



Les archéologues dressent une imitation en béton d'une statue polynésienne, pour tester la validité de la méthode qu'ils ont proposée. Ils ont travaillé pendant une journée et demie pour l'incliner à 45 degrés. Elle repose sur un traîneau fabriqué par l'assemblage de troncs d'arbre et de rondins avec des cordes, selon une technique polynésienne. Ils utilisent des leviers qui soulèvent le traîneau et la statue en même temps et construisent un tumulus en pierre afin de soutenir l'ensemble.

le sol. Ainsi, elle a été tirée sur un terrain plat, puis en pente. Pour qu'elle glisse mieux, on a utilisé des lubrifiants naturels, dont on se sert en Polynésie (feuille d'eucalyptus, de palmier, banane, patate douce).

Pour dresser la statue, les archéologues l'ont laissée sur le traîneau. Ils ont utilisé des leviers de plusieurs mètres de long, qui, en s'appuyant sur le traîneau, ne risquaient pas d'endommager la statue (toutes les statues ont été sculptées avant d'être dressées). Ainsi, ils ont soulevé l'ensemble statue-traîneau par étapes successives. Sous cet ensemble, il plaçaient des pierres qui formaient un tumulus de soutien ; cette technique laisse le temps à l'équipe de reprendre des forces. Une centaine de statues de l'île ont un bloc cylindrique sur la tête, en lave poreuse, beaucoup plus légère que le basalte. Les archéologues ont attaché un tel bloc au traîneau, au-dessus de la tête de la statue. Ils l'ont levé avec la statue, de sorte qu'à la fin de l'opération, il reposait sur sa tête. Personne n'avait encore soulevé un tel bloc de lave en même temps que la statue. Pour dresser la statue, 20 personnes ont travaillé pendant trois jours.

Cette méthode est adaptée au terrain de l'île, réalisable avec les matériaux autrefois disponibles sur place et par un groupe de 40 personnes. Cependant, les femmes et les enfants remplissaient les tâches annexes, tels le ravitaillement et le ramassage des pierres pour le tumulus. Un chef, s'il

réunissait tous les membres d'une large famille et accumulait les ressources nécessaires pendant plusieurs années, était capable de faire sculpter une statue de taille moyenne, de la déplacer sur un traîneau (à raison de 1,6 kilomètre par jour) et de la dresser. Les Polynésiens, en transportant les statues, démontraient leur dévouement au chef. Le transport faisait probablement naître beaucoup d'excitation, de camaraderie et resserrait les liens entre membres d'une même communauté, ce qui contribuait au caractère sacré des statues.

Cette méthode est culturellement polynésienne, puisqu'elle utilise les techniques de construction navale et de fabrication d'échelles de pirogues. Les pirogues les plus courantes avaient à peu près la même taille et le même poids que les statues de l'île de Pâques, où les premiers explorateurs en ont observé des vestiges, et où des écritures hiéroglyphiques attestent de leur présence. Les artisans qui fabriquaient les pirogues savaient manipuler et transporter les énormes troncs nécessaires à leurs ouvrages et assembler des pièces de bois, notamment par des méthodes de liage élaborées. Ils possédaient de nombreux outils, dont le *keke* en forme de Y, qui servait à faire les nœuds des cordages et à les serrer. C'est grâce à ces talents, perpétués de génération en génération, que les statues mégalithiques de l'île de Pâques se dressent aujourd'hui dans ce coin reculé du Pacifique, à des milliers de kilomètres de toute autre civilisation.

Quand la Terre était gelée

PAUL HOFFMAN • DANIEL SCHRAG

Il y a plusieurs centaines de millions d'années, la Terre aurait été couverte de glace ; puis, à la faveur d'un réchauffement par effet de serre, les organismes vivants se seraient multipliés et diversifiés.

Nos ancêtres avaient la vie dure. Des félins aux dents acérées et des mammouths étaient sans doute des menaces quotidiennes, mais la rudesse du climat l'était tout autant. Au cours du dernier million d'années, ils ont dû affronter plusieurs âges glaciaires. Au plus fort de la dernière glaciation, il y a 20 000 ans, des glaciers de plus de deux kilomètres d'épaisseur ont recouvert la majeure partie de l'Amérique du Nord et de l'Europe (jusqu'à la latitude de Bordeaux).

Ces conditions climatiques extrêmes ont certainement été dramatiques, mais elles ne furent en rien comparables aux événements catastrophiques que nos ancêtres microscopiques ont endurés il y a environ 600 millions d'années. Juste avant l'apparition des organismes pluricellulaires, à une époque nommée Néoprotérozoïque, le froid était tel que même les zones tropicales semblent avoir gelé.

La Terre aurait traversé l'espace sous la forme d'une boule de neige cosmique, pendant plus de dix millions d'années. La chaleur se dégageant du noyau en fusion aurait empêché les océans de geler en profondeur, mais une couche de glace de un kilomètre d'épaisseur, entretenue par une température de -50°C , les aurait recouverts. Nous pensons

1. DES MONTAGNES DE GLACE comme celles du glacier Moreno, en Argentine (*ci-contre*) ont naguère recouvert tous les continents. On a trouvé des informations sur cette période dans des couches de roches aujourd'hui visibles, comme sur ces collines proches de la côte Nord-Ouest de la Namibie (*cartouche*).



que la quasi-totalité des organismes primitifs peuplant la planète disparaurent. Mis à part les glaciers qui avançaient en se craquelant et les glaces océaniques qui dérivèrent en gémissant, la seule activité perceptible était celle des volcans dont les panaches se frayaient un passage à travers la surface figée. La planète semblait ne jamais devoir se réveiller de ce sommeil glacé, mais les volcans produisaient tout doucement un moyen d'échapper au froid : le dioxyde de carbone.

Le dioxyde de carbone s'accumula dans l'atmosphère, où il atteignit des concentrations élevées. Or le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre : il piège la chaleur émise par le Soleil,

il réchauffe la planète, et fait fondre la glace. Le dégel ne prit que quelques centaines d'années, et les créatures qui avaient survécu à la glaciation durent alors résister à la chaleur due à un intense effet de serre.

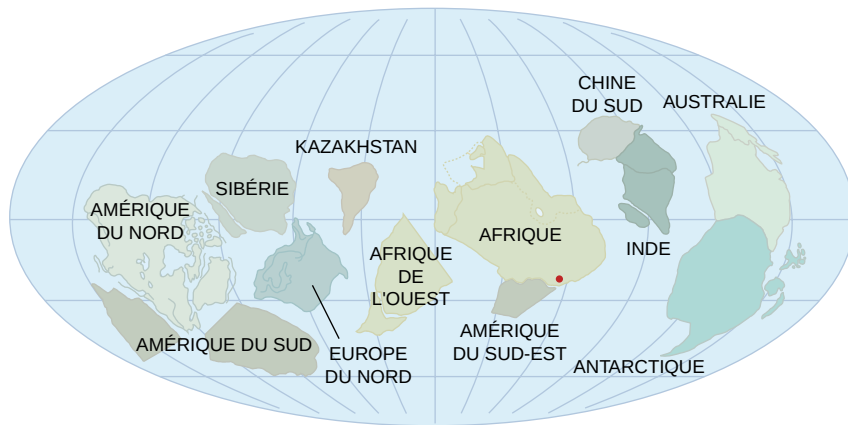
Nous pensons qu'une telle inversion brutale du climat s'est produite à quatre reprises, il y a entre 750 et 580 millions d'années. On a longtemps pensé que la Terre, contrairement à d'autres planètes, telle Vénus, n'avait jamais connu de climats aussi rudes. Toutefois, dès le début des années 1960, on a commencé à avoir des indices de variations climatiques extrêmes et, au cours des huit dernières années, nous avons fait de nouvelles observations et élaboré une

histoire du climat de la Terre qui intéresse particulièrement les géologues, les biologistes et les climatologues.

La mémoire du climat qui régnait au Néoprotérozoïque est gravée dans les roches anciennes. Pendant des décennies, les indices découverts semblaient contradictoires. On a d'abord eu du mal à comprendre la présence de débris glaciaires proches du niveau de la mer, dans des zones tropicales. Aujourd'hui, on ne trouve des glaciers près de l'équateur qu'au-dessus de 5 000 mètres et, au plus fort de la dernière glaciation, ils ne sont guère descendus au-dessous de 4 000 mètres. On a trouvé, mélangés aux débris glaciaires, des dépôts inhabituels de roches riches en fer ; or ces dépôts



Glen Allison, Digital Imagery © 1999 PhotoDisc, Inc. En haut : Avec l'aimable autorisation de Paul F. Hoffman



2. LES CONTINENTS étaient probablement rassemblées près de l'équateur pendant les glaciations globales, qui ont eu lieu il y a environ 600 millions d'années. Depuis, les continents se sont déplacés, mais les vestiges des débris abandonnés par la glace, quand elle a fondu, affleurent en de nombreux points de la surface des terres émergées, notamment dans l'actuelle Namibie (point rouge).

n'auraient pu se former que si les océans et l'atmosphère du Néoprotérozoïque étaient quasi dépourvus d'oxygène, mais, à cette époque, l'atmosphère avait déjà presque la même composition qu'aujourd'hui (en présence d'oxygène, le fer est pratiquement insoluble dans l'eau). Qui plus est, les roches, dont on sait qu'elles se forment dans des eaux chaudes, semblent s'être accumulées juste après le retrait des glaciers. Si la Terre a été suffisamment froide pour être couverte de glace, comment s'est-elle réchauffée ? Pourquoi certains organismes vivants ont-ils échappé à la mort ? La signature isotopique que le carbone imprime dans les roches indique que l'activité biologique est longtemps restée infime.

Chacune de ces énigmes anciennes semble s'éclaircir quand on les considère comme des jalons de l'histoire d'une Terre boule de neige. Nous avons publié notre théorie en 1998 et, depuis, elle a reçu un soutien prudent de la communauté scientifique. S'il est exact, notre scénario qui explique les mystères du climat du Néoprotérozoïque, apporterait de nouveaux éclairages sur les changements du climat global. Ces glaciations sans égal se sont produites juste avant une diversification rapide de la vie pluricellulaire, culminant avec l'« explosion du Cambrien », qui eut lieu entre 575 et 525 millions d'années. Paradoxalement, les longues périodes d'isolement et de conditions extrêmes que la Terre gelée a subies ont peut-être favorisé des mutations génétiques qui, ultérieurement, auraient stimulé l'explosion évolutive.

Nous avons cherché, partout dans le monde, des indices de ces événements climatiques. Bien que nous étudions aujourd'hui les roches du Néoprotérozoïque en Australie, en Chine, dans l'Ouest des États-Unis et dans les îles arctiques de l'archipel du Svalbard, nous avons commencé notre quête en 1992, le long des falaises rocheuses de la côte des Squelettes, en Namibie. À l'ère néoprotérozoïque, cette région d'Afrique du Sud-Ouest faisait partie d'une vaste plaque continentale qui subissait un phénomène de subduction lent, à quelques degrés de latitude Sud.

Nous y avons trouvé, dans des roches formées de dépôts de poussières et de débris que la glace a abandonnés en fondant, des indices de la présence de glaciers. Des roches, surtout des carbonates de calcium et de magnésium, recouvrent les débris glaciaires et indiquent qu'une atmosphère excessivement chaude a succédé à la période de glaciation extrême. Après avoir été enfouies pendant des centaines de millions d'années, ces roches qui affleurent aujourd'hui à la surface racontent leur histoire.

En 1964, Brian Harland, de l'Université de Cambridge, montra que des dépôts glaciaires parsèment les affleurements de roches néoprotérozoïques sur la quasi-totalité des continents. Au début des années 1960, l'hypothèse des plaques tectoniques faisait son chemin : elle décrit comment la mince enveloppe rocheuse de la planète est découpée en gigantesques fragments qui flottent à la surface d'une masse de roches en fusion. En étudiant l'orientation magnétique de minuscules grains de

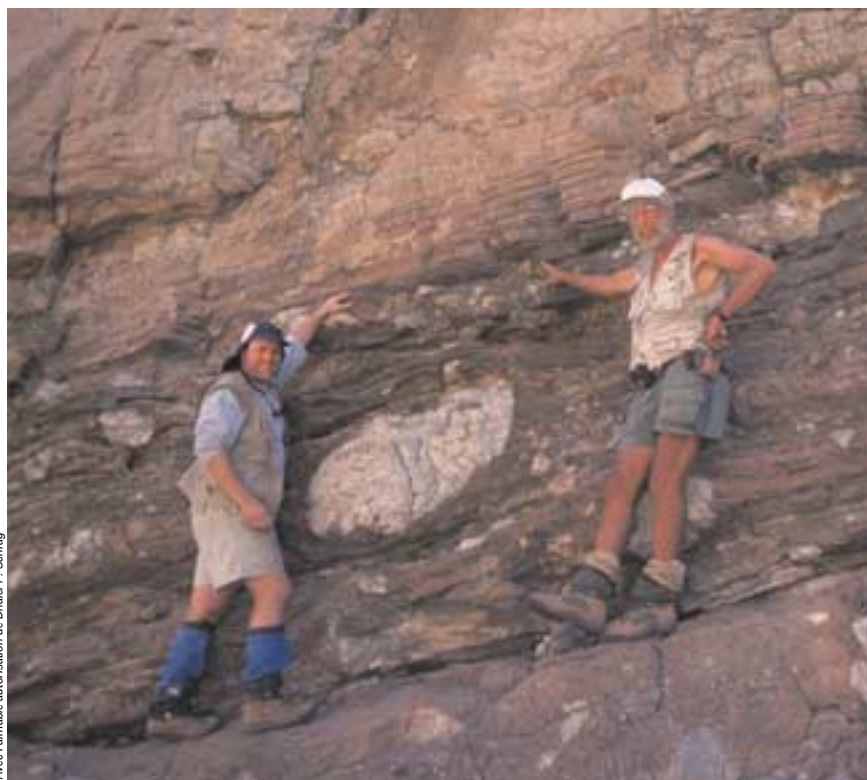
minéraux emprisonnés dans les roches glaciaires, B. Harland a proposé que les continents se sont rassemblés à proximité de l'équateur à l'ère néoprotérozoïque. Avant que les roches ne soient solidifiées, ces grains se sont alignés sur le champ magnétique terrestre, tout en restant dans le même plan horizontal, car ils étaient proches de l'équateur (s'ils s'étaient formés près des pôles, leur orientation magnétique serait quasi verticale).

Réalisant que les glaciers avaient dû recouvrir les zones tropicales, B. Harland fut le premier géologue à émettre l'hypothèse que la Terre avait subi une grande période glaciaire néoprotérozoïque. Bien que certains de ses collègues aient douté de la fiabilité des données magnétiques, d'autres, depuis, ont validé son hypothèse. Toutefois, personne ne parvenait à expliquer comment les glaciers avaient résisté à la chaleur tropicale.

L'albédo

À cette époque, les physiciens venaient de mettre au point les premiers modèles mathématiques du climat de la Terre. Mikhail Budyko, de l'Observatoire géophysique de Léninegrad, trouva un moyen d'expliquer l'existence des glaciers tropicaux en utilisant des équations qui décrivaient comment le rayonnement solaire interagit avec la surface terrestre et l'atmosphère pour imposer le climat. Certaines surfaces réfléchissent plus que d'autres l'énergie solaire, une caractéristique nommée albédo. Ainsi, la neige blanche qui réfléchit plus que les autres surfaces l'énergie solaire a un albédo élevé, tandis que les océans sombres ont un albédo faible ; les surfaces continentales ont des valeurs d'albédo intermédiaires, qui dépendent du type et de la répartition de la végétation.

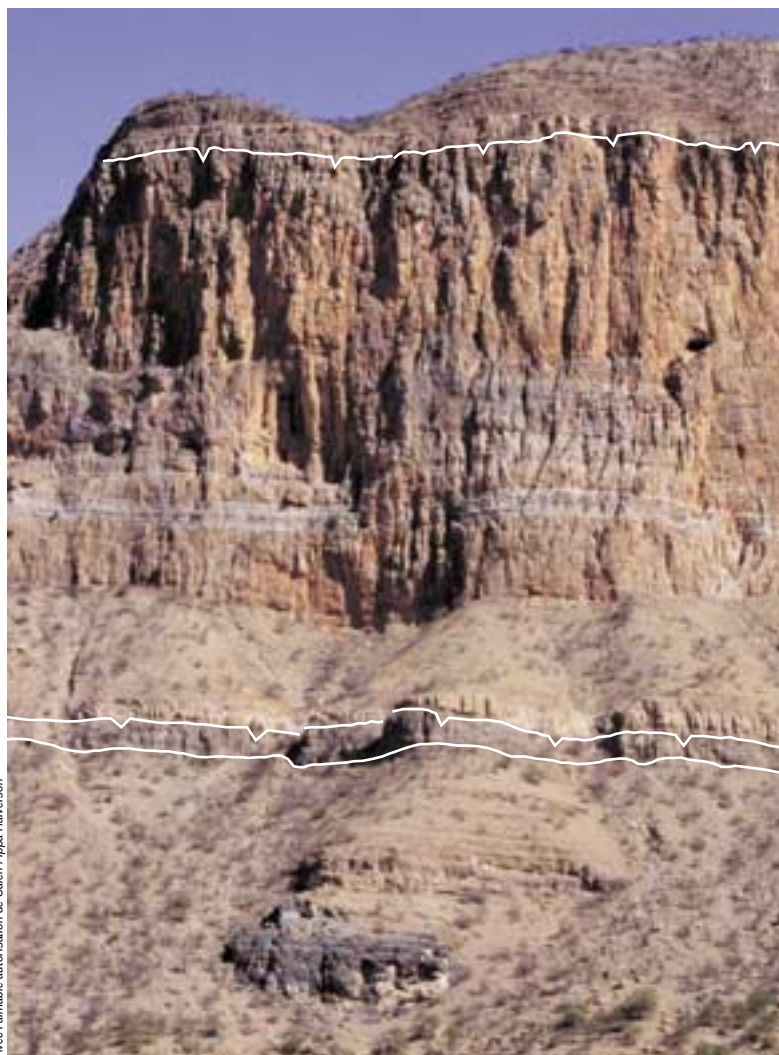
Plus la planète réfléchit le rayonnement solaire, plus la température est basse. Avec leur albédo élevé, la neige et la glace refroidissent l'atmosphère, assurant ainsi leur propre existence. Ce phénomène, nommé rétroaction de l'albédo des glaces, contribue, aujourd'hui, à l'expansion des couches glaciaires polaires. M. Budyko a montré que cette rétroaction peut s'emballer : quand des glaciers se forment à des latitudes inférieures à 30 degrés Nord ou Sud par rapport à l'équateur, l'albédo de la planète augmente, car la



lumière du Soleil frappe une plus grande surface de glace par degré de latitude. Dans ces simulations, la rétroaction devint si forte que toute la planète gèle.

Gelé ou grillé

La modélisation du climat naquit des simulations de M. Budyko, mais lui-même doutait que la Terre ait été gelée à ce point. On pensait qu'une telle catastrophe aurait détruit toute trace de vie sur la Terre. Pourtant, certaines algues microscopiques ont été fossilisées dans des roches vieilles d'un milliard d'années ; elles ressemblent beaucoup aux formes d'algues modernes, ce qui prouve que la vie ne s'est pas arrêtée. De surcroît, si la Terre avait gelé complètement, l'albédo élevé de son enveloppe glaciaire aurait entraîné une telle baisse des températures de surface que toute vie se serait éteinte ; si une telle glaciation s'était produite, elle n'aurait pas été réversible.



DRAPÉS CRISTALLINISÉS
DÉPÔTS DE CARBONATES
DÉPÔTS GLACIAIRES



3. LES FALAISES ROCHEUSES qui longent la côte des Squelettes de Namibie (*en haut*) ont apporté des indices en faveur de l'hypothèse de la Terre gelée. Les auteurs, D. Schrag (*à gauche*) et P. Hoffman (*à droite*) indiquent une couche rocheuse, signe de la fin soudaine d'un événement de glaciation extrême, qui s'est produit il y a environ 600 millions d'années. La grosse inclusion de couleur claire, au centre, a sans doute été transportée par un iceberg avant de sombrer au fond de l'océan lorsque la glace a fondu. Des couches de carbonates purs ont recouvert les dépôts glaciaires (*ci-contre*), par précipitation dans les eaux chaudes et peu profondes des océans durant la période chaude qui a suivi. Ces dépôts carbonatés sont les seules roches du Néoprotérozoïque présentant de grandes structures cristallines qui se sont formées lors d'une accumulation rapide de carbonates (*ci-dessus*).

C'est alors, à la fin des années 1970, que l'on découvrit les remarquables communautés d'organismes qui vivent dans des environnements extrêmes dont on pensait qu'ils étaient trop inhospitaliers pour abriter quelque forme de vie que ce soit. Dans les sources chaudes des fonds océaniques, on a trouvé des micro-organismes qui tirent leur énergie de substances chimiques et non de la lumière du Soleil. Or l'activité volcanique qui alimente les sources chaudes se serait poursuivie pendant que la Terre était gelée. Les conditions auraient même été adaptées aux organismes qui recherchent le froid, tels ceux qui vivent aujourd'hui dans les vallées des montagnes extrêmement froides et sèches de l'Est de l'Antarctique. Des cyanobactéries et certaines espèces d'algues colonisent la neige, les roches poreuses et la surface des particules

de poussière piégées dans des glaces flottantes.

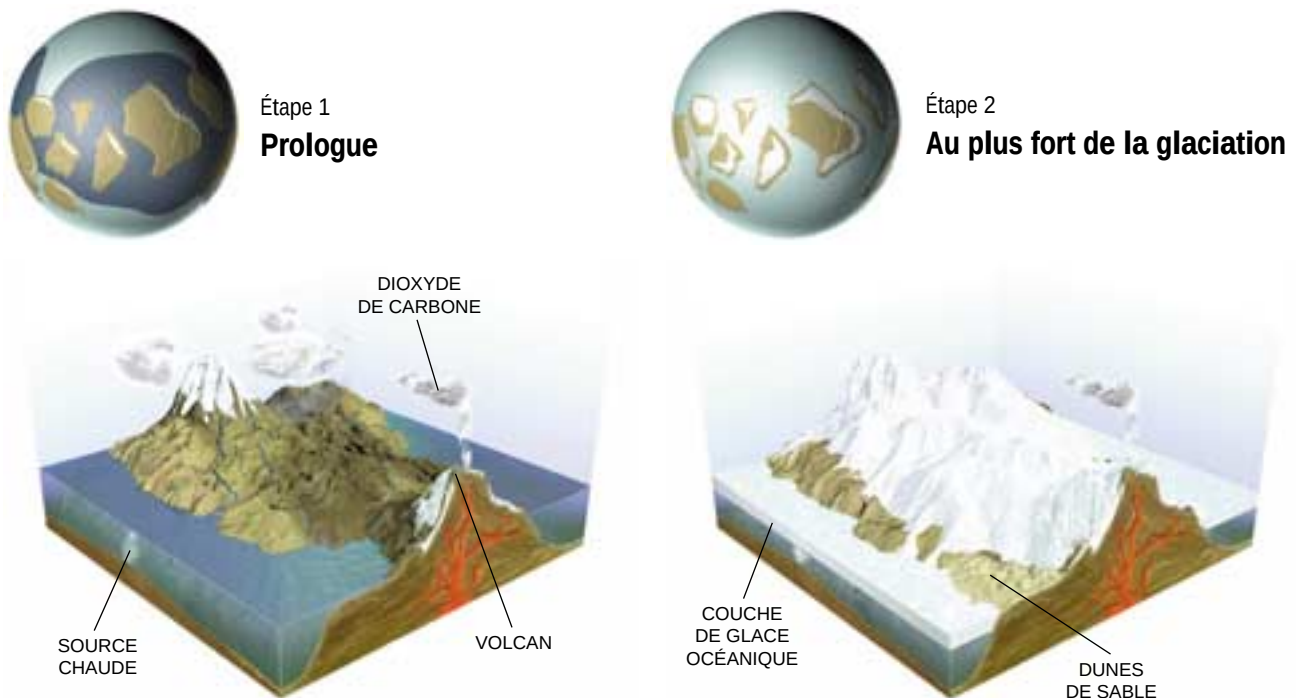
Par ailleurs, c'est le dioxyde de carbone qui a évité l'emballement du phénomène de congélation de la planète. Il est l'un des gaz émis par les volcans. Normalement, cette production continue de carbone est compensée par l'érosion des roches contenant de la silice : au cours de la dégradation chimique de ces roches, le dioxyde de carbone est transformé en ions carbonate, qui sont entraînés vers les océans, où ils se combinent aux ions calcium et magnésium pour former des sédiments carbonatés stockant d'énormes quantités de carbone.

En 1992, Joseph Kirschvink, un géobiologiste de l'Institut de technologie de Californie, montra que, durant une glaciation globale, les plaques tectoniques continueraient à se déplacer et des volcans à se former

et à libérer des rejets qui enrichiraient l'atmosphère en dioxyde de carbone. L'eau nécessaire à l'érosion des roches et à l'immersion du dioxyde de carbone étant piégée dans les glaces, le dioxyde de carbone s'accumulerait et ses concentrations deviendraient très élevées, suffisantes pour réchauffer la planète et mettre fin à la glaciation globale.

J. Kirschvink avait soutenu l'idée d'une ère glaciaire néoprotérozoïque, notamment en raison des mystérieux dépôts de fer découverts parmi les débris glaciaires. On trouve de tels dépôts beaucoup plus tôt dans l'histoire de la Terre, au moment où les océans (et l'atmosphère) contenaient très peu d'oxygène et où le fer pouvait facilement s'y dissoudre. Si la Terre avait été recouverte de glace pendant des millions d'années, les océans auraient été privés d'oxygène,

Scénario du passage d'une Terre gelée à une Terre surchauffée



Il y a 770 millions d'années, les petits continents issus de la dislocation du supercontinent de Rodinia se rassemblent près de l'équateur. Les fortes précipitations entraînent une plus grande quantité de dioxyde de carbone atmosphérique (qui a un effet de serre) et érodent plus rapidement les roches continentales. La température globale diminue, et de grandes étendues de glace se forment dans les océans, près des pôles. La glace blanche réfléchit davantage le rayonnement solaire que les océans plus sombres, de sorte que les températures continuent à baisser. Ce cycle de rétroaction déclenche un refroidissement sans fin qui finit par envelopper la planète entière de glace, en l'espace d'un millénaire.

Les températures globales moyennes descendent jusqu'à -50°C , peu après le début de l'emballement de la glaciation. Les océans se couvrent d'une couche de glace de plus de un kilomètre d'épaisseur, et la congélation n'est limitée que par la chaleur émise par les volcans. La plupart des micro-organismes marins meurent, à l'exception de ceux qui survivent à proximité des sources chaudes océaniques. L'air étant froid et sec, les glaciers terrestres cessent de progresser, créant de vastes déserts de sable balayés par les vents. En l'absence de précipitations, le dioxyde de carbone émis par les volcans stagne dans l'atmosphère. À mesure qu'il s'accumule, la planète se réchauffe, et la couche de glace qui recouvre les océans s'amincit.

de sorte que le fer dissous rejeté par les sources chaudes du plancher océanique aurait pu s'y accumuler. Puis, lorsque l'effet de serre déclenché par le dioxyde de carbone aurait commencé à faire fondre la glace, l'oxygène se serait à nouveau mélangé aux eaux océaniques, faisant précipiter le fer qui se serait mélangé aux débris contenus dans les glaces océaniques et dans les glaciers.

On a alors calculé, en 1992, que l'arrêt de la glaciation globale aurait nécessité une concentration en dioxyde de carbone environ 350 fois supérieure à celle d'aujourd'hui. En supposant que les volcans du Néoprotérozoïque émettaient une quantité de gaz identique à celle des volcans actuels, la planète serait restée emprisonnée dans les glaces pendant plus de dix millions d'années avant qu'une quantité suffisante de

dioxyde de carbone ne se soit accumulée et ne commence à faire fondre la glace. Cette glaciation aurait été la plus intense, mais aussi la plus longue.

Les indices des carbonates

Deux nouveaux indices allaient renforcer l'hypothèse de la Terre gelée : les dépôts glaciaires du Néoprotérozoïque sont presque toujours recouverts d'une couche de roches carbonatées, lesquelles se forment dans des eaux chaudes peu profondes. Si la glace et les eaux chaudes avaient existé à des époques séparées par des millions d'années, personne ne s'en serait étonné, mais les carbonates semblent s'être formés très peu de temps après que les glaciers ont déposé leur dernière charge. On se heurtait toujours à la même question : comment

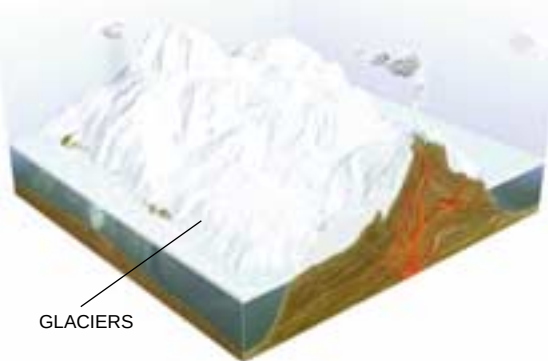
était-on passé si rapidement d'un climat glaciaire à un climat tropical?

En comparant tous les résultats avec les observations que nous avons faites en Namibie, nous avons alors compris comment un tel changement semble s'être produit. Les épaisses couches de roches carbonatées que nous avons observées se seraient formées dans des conditions extrêmes, quand un effet de serre intense aurait suivi la période de glaciation. Pendant tout le temps de la glaciation, l'atmosphère se serait suffisamment enrichie en dioxyde de carbone pour que la glace commence à fondre, à l'équateur. Une fois la fonte amorcée, les eaux océaniques à faible albédo auraient remplacé les glaces dont l'albédo est élevé, et la glace aurait continué à fondre. L'effet de serre aurait fait remonter les températures jusqu'à près de 50 °C, selon les calculs effectués par



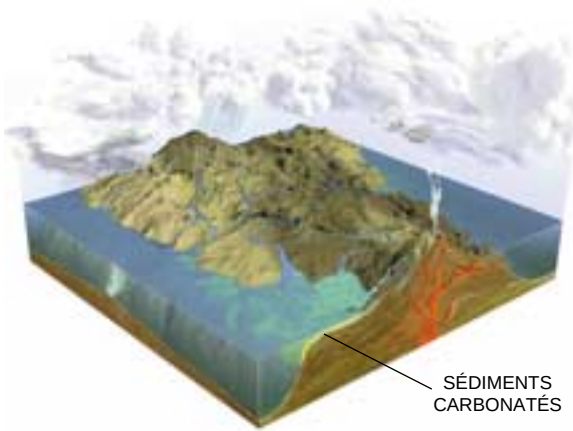
Étape 3

Les prémices de la fonte



Étape 4

Un fort effet de serre



David Fiersten

Pendant dix millions d'années, les volcans libèrent du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, de sorte que sa concentration augmente d'un facteur 1 000. En raison du réchauffement dû à l'effet de serre, les températures s'élèvent jusqu'au point de fusion de la glace, à proximité de l'équateur. À mesure que la planète se réchauffe, la vapeur d'eau produite par la sublimation des glaces océaniques près de l'équateur regèle en altitude et alimente les glaciers terrestres. L'eau liquide qui finit par se former dans les zones tropicales absorbe plus de rayonnement solaire que la glace, ce qui accélère la remontée des températures globales. En quelques siècles, un monde chaud et humide remplace un monde gelé.

Lorsque les glaces tropicales fondent, l'eau de mer s'évapore et, en association avec le dioxyde de carbone, renforcent l'effet de serre. Les températures de surface dépassent 50 °C, déclenchant un cycle soutenu d'évaporation et de précipitations. Des pluies torrentielles chargées d'acide carbonique érodent les débris rocheux laissés dans le sillage des glaciers qui se retirent. Les rivières gonflées entraînent les ions bicarbonate et d'autres ions vers les océans, où ils se déposent sous forme de sédiments carbonatés. De nouvelles formes de vie, engendrées par un isolement génétique prolongé et par une pression de sélection intense, peuplent la Terre lorsque le climat global se normalise.

le climatologue Raymond Pierrehumbert à l'Université de Chicago.

La reprise de l'évaporation aurait également participé au réchauffement de l'atmosphère, car la vapeur d'eau est aussi un gaz à effet de serre. De plus, quand l'atmosphère était saturée d'eau, les pluies torrentielles auraient entraîné une partie du dioxyde de carbone atmosphérique sous forme d'acide carbonique, lequel aurait érodé les débris rocheux laissés à nu par le retrait des glaciers. Les produits de l'érosion chimique se seraient déposés alors rapidement dans les océans, conduisant à la précipitation de sédiments carbonatés, à leur accumulation rapide au fond des océans et à leur transformation ultérieure en roches. Les structures préservées dans les dépôts carbonatés de Namibie indiquent qu'ils se seraient accumulés très rapidement, peut-être en quelques milliers d'années. Par exemple, des cristaux d'aragonite, dont certains dépôts atteignent deux mètres de hauteur, n'ont pu se former que dans des eaux saturées en carbonate de calcium.

Les dépôts de carbonates apportent un autre élément en faveur du scénario du dégel de la Terre. Ils contiennent deux isotopes du carbone, le carbone usuel 12 et le carbone 13, plus rare et dont le noyau renferme un neutron supplémentaire. Les rapports de ces deux types de carbone sont inhabituels : on retrouve les mêmes rapports dans les dépôts carbonatés du monde entier, mais personne n'avait fait le rapprochement avec le scénario de la Terre gelée. Nous avons montré que ce rapport isotopique est conservé sur des centaines de kilomètres de roches affleurant au Nord de la Namibie.

Or le dioxyde de carbone libéré par les volcans et atteignant les océans est constitué d'environ un pour cent de carbone 13, le reste étant du carbone 12. Si seules les roches prélevaient du carbone dans les océans, elles devraient contenir la même proportion de carbone 13 et de carbone 12 que les rejets volcaniques. Toutefois, les algues et les bactéries qui se développent dans les océans prélèvent également du carbone dans les eaux environnantes, mais leur machinerie photosynthétique préfère le carbone 12 au carbone 13. Par conséquent, le carbone disponible pour la formation de roches carbonatées dans un océan plein de vie a plus de chances d'être du

carbone 13 si on le compare au carbone tout juste émis par un volcan.

La situation est différente pour les isotopes du carbone des roches néoprotérozoïques de Namibie. Juste avant les dépôts glaciaires, la proportion du carbone 13 s'était effondrée jusqu'à des valeurs équivalentes à celles des émissions volcaniques, signe d'une diminution de l'activité biologique au moment où la Terre était couverte de glace et proche d'une glaciation globale. Quand les océans ont été entièrement recouverts de glace, la vie a presque disparu, mais on ne dispose d'aucune mesure du carbone, car le carbonate de calcium n'a pu se former dans un océan pris par les glaces. La baisse du carbone 13 persiste dans toute l'épaisseur des dépôts carbonatés qui recouvrent les dépôts glaciaires, puis la proportion du carbone 13 augmente progressivement plusieurs centaines de mètres plus haut, ce qui indique sans doute la reprise de la vie à la fin de la période d'effet de serre.

Une brusque variation de la proportion du carbone 13 et du carbone 12 se manifeste également dans des roches carbonatées qui se sont formées durant des périodes d'extinctions massives, mais aucune n'a été aussi importante ni aussi longue. Même le cataclysme à l'origine de la disparition des dinosaures, il y a 65 millions d'années, n'a pas provoqué un effondrement aussi prolongé de l'activité biologique.

Ainsi, l'hypothèse de la Terre gelée expliquerait de nombreuses observations surprenantes faites dans les couches géologiques du Néoprotérozoïque : les variations du rapport des isotopes 12 et 13 du carbone associées aux dépôts glaciaires, le paradoxe des dépôts carbonatés, la présence prolongée de glaciers au niveau de la mer dans les zones tropicales et les dépôts de fer associés. Cette hypothèse justifierait toutes ces constatations pour lesquelles on n'avait pas proposé d'explication satisfaisante. De plus, nous sommes persuadés que cette hypothèse éclaire les premiers stades évolutifs de la vie.

Dans les années 1960, Martin Rudwick, travaillant avec B. Harland, proposa que l'inversion de climat après la glaciation néoprotérozoïque avait favorisé l'explosion de la vie pluricellulaire. Les eucaryotes (les cellules qui ont un noyau entouré d'une membrane et dont sont issus toutes les plantes et tous les animaux) étaient apparus plus d'un

milliard d'années plus tôt, mais les organismes les plus évolués au moment de la première glaciation néoprotérozoïque étaient des algues filamenteuses et des protozoaires unicellulaires. On s'est longtemps demandé pourquoi cela a pris si longtemps pour que ces organismes se diversifient pour donner les plans d'organisation corporelle qui apparaissent soudain durant l'explosion du Cambrien.

Le retour à la vie

Une succession de congélations et de réchauffements aurait agi comme un filtre environnemental sur l'évolution de la vie, et tous les eucaryotes descendraient des survivants du Néoprotérozoïque. L'ampleur des extinctions des eucaryotes transparaît dans les arbres phylogénétiques, qui indiquent comment divers groupes d'organismes ont évolué les uns par rapport aux autres, en fonction de leurs degrés de similitude. Aujourd'hui, les biologistes dressent ces arbres en étudiant les séquences d'acides nucléiques des organismes vivants.

La plupart de ces arbres décrivent la phylogénie des eucaryotes comme une ramification tardive sur un long tronc sans embranchement. L'absence de ramifications précoces signifierait que la plupart des lignées eucaryotes ont été «élaguées» durant le Néoprotérozoïque. Les créatures qui ont survécu aux glaciations auraient trouvé refuge dans des sources chaudes des fonds océaniques et près de la surface de la glace où la photosynthèse aurait continué.

La température élevée et les gradients chimiques qui règnent autour des sources chaudes auraient déjà présélectionné des organismes qui allaient résister aux conditions infernales à venir. Face aux contraintes environnementales, de nombreux organismes subissent d'importantes modifications génétiques. Des contraintes draconiennes favorisent les mutations génétiques sur une courte période, car les organismes dont les gènes se modifient le plus rapidement ont davantage de chances d'acquiescer des caractères qui les aideront à s'adapter et à proliférer.

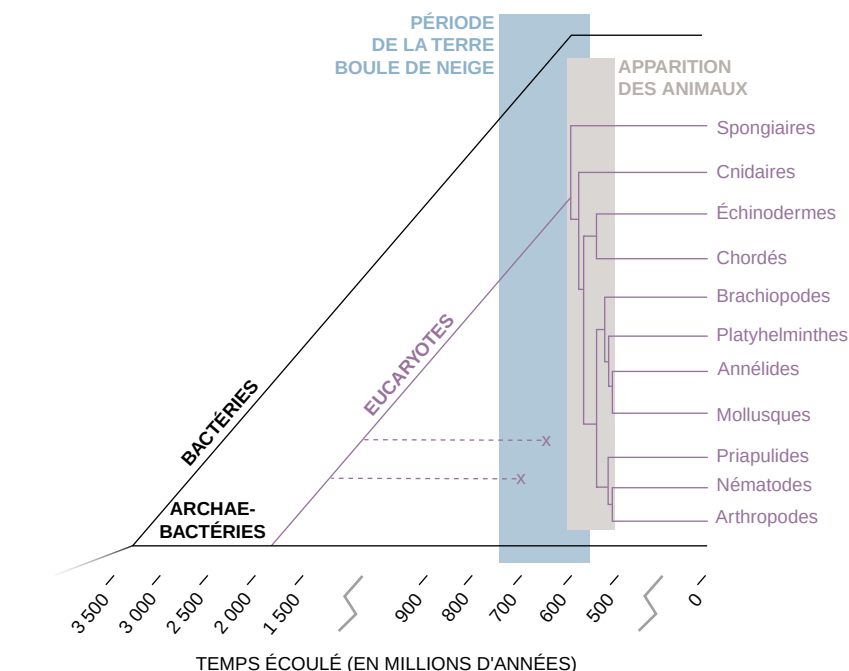
Des communautés de sources chaudes très éloignées de la surface glacée du globe ont accumulé une diversité génétique pendant des millions d'années. Lorsque deux groupes,

apparus simultanément, sont isolés l'un de l'autre suffisamment longtemps dans des conditions différentes, il est vraisemblable, selon l'ampleur des mutations génétiques, qu'une nouvelle espèce apparaîtra. Après chaque glaciation, les populations auraient subi des pressions de sélection nouvelles changeant rapidement, et très différentes des conditions qui avaient précédé la glaciation ; de telles conditions auraient favorisé l'émergence de nouvelles formes de vie.

Rudwick n'a peut-être pas assez insisté sur le fait que l'amélioration du climat, après les glaciations du Néoprotérozoïque, aurait favorisé l'évolution des premiers animaux. Les événements climatiques extrêmes ont peut-être favorisé l'apparition de la vie pluricellulaire.

Ainsi nous pensons que les dépôts glaciaires et les roches carbonatées du Néoprotérozoïque indiquent que deux événements climatiques extraordinaires ont eu lieu : la glaciation de la Terre, suivie d'un effet de serre, moins prolongé, mais tout aussi délétère. Plusieurs questions restent ouvertes : quelle fut l'origine de ces calamités et pourquoi la planète a-t-elle été épargnée depuis ? Durant le Néoprotérozoïque, le rayonnement solaire était moins intense d'environ six pour cent : les risques de glaciation étaient supérieurs. À mesure qu'il vieillit, le Soleil se réchauffe lentement, ce qui expliquerait pourquoi, depuis, aucune glaciation globale ne se soit produite sur la Terre. Toutefois, divers indices géologiques indiquent qu'aucune glaciation de cette ampleur n'a eu lieu durant le milliard d'années qui a précédé le Néoprotérozoïque, lorsque le Soleil était encore moins chaud.

La position particulière des continents près de l'équateur aux temps néoprotérozoïques serait peut-être une explication plus convaincante. Lorsque les continents sont proches des pôles, comme aujourd'hui, les concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone sont suffisamment élevées pour que la planète reste chaude. Lorsque les températures globales s'abaissent assez pour que les glaciers recouvrent les continents des latitudes élevées, tels l'Antarctique et le Groenland, les couches de glace empêchent l'érosion chimique des roches sous-jacentes. Le processus d'absorption du carbone étant entravé, le dioxyde de carbone



4. TOUS LES ANIMAUX descendent des premiers eucaryotes, des cellules qui ont un noyau délimité par une membrane, apparus il y a environ deux milliards d'années. Lorsque la Terre a gelé, plus d'un milliard d'années après l'apparition de la vie, les eucaryotes avaient peu évolué : ils n'en étaient qu'au stade de protozoaires unicellulaires et d'algues filamenteuses. Toutefois, malgré les conditions climatiques extrêmes, qui ont peut-être « élagué » l'arbre des eucaryotes (lignes en pointillés), les 11 grandes familles d'animaux qui peuplent la Terre sont apparues en très peu de temps, après la fonte des neiges à la surface de la Terre. L'isolement génétique prolongé et la pression de sélection qui avait eu lieu sur la Terre gelée seraient à l'origine de cette explosion de nouvelles formes de vie.

atmosphérique reste concentré et les glaces cessent de gagner du terrain. Au contraire, quand tous les continents se rassemblent dans les zones tropicales, la glace ne s'y accumule pas, même si la Terre se refroidit et se rapproche du seuil critique au-dessous duquel la glaciation s'emballe. Le dioxyde de carbone, « interrupteur de sécurité », devient inefficace, car une quantité excessive de carbone est enfouie dans les sédiments.

Nous ne saurons peut-être jamais ce qui a réellement déclenché une telle glaciation de la Terre, car nos théories sur les changements climatiques sont trop rudimentaires. Pendant le dernier million d'années, la Terre a connu la période la plus froide depuis l'apparition des animaux, mais, même lors de l'avancée la plus notable des glaciers, il y a 20 000 ans, le seuil critique qu'il aurait fallu atteindre pour que la Terre gèle était encore loin. Durant les prochaines centaines d'années, nous serons certainement plus préoccupés des conséquences de l'activité humaine sur le climat – puisque la Terre se réchauffe en raison du dioxyde de carbone émis par l'homme dans l'atmosphère – que de grandes glaciations.

Malgré cet effet de serre, la Terre pourrait-elle un jour être à nouveau gelée ? Nous sommes à quelque 80 000 ans de la prochaine ère glaciaire, ce qui nous laissera peut-être le temps de trouver la réponse. Il est difficile de prévoir quelle sera l'évolution du climat de la Terre au cours des prochains millions d'années. Si la tendance des millions d'années passées se poursuit et si l'« interrupteur de sécurité » s'enraye, une nouvelle catastrophe glaciaire globale, qui orienterait la vie dans une nouvelle direction, pourrait bien se produire.

Paul HOFFMAN, géologue, et Daniel SCHRAG, géochimiste et océanographe, travaillent à l'Université Harvard.

Origin and Early Evolution of the Metazoa, sous la direction de J.H. Lipps et P.W. Signor, Plenum Publishing, 1992.

D. ERWIN, J. VALENTINE et D. JABLONSKI, *The Origin of Animal Body Plans*, in *American Scientist*, vol. 85, n° 2, pp. 126-137, mars-avril 1997.

P.F. HOFFMAN, A.J. KAUFMAN, G.P. HALVERSON et D.P. SCHRAG, *A Neoproterozoic Snowball Earth*, in *Science*, vol. 281, pp. 1342-1346, 28 août 1998.

