

que la quasi-totalité des organismes primitifs peuplant la planète disparaissent. Mis à part les glaciers qui avançaient en se craquelant et les glaces océaniques qui dérivait 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.

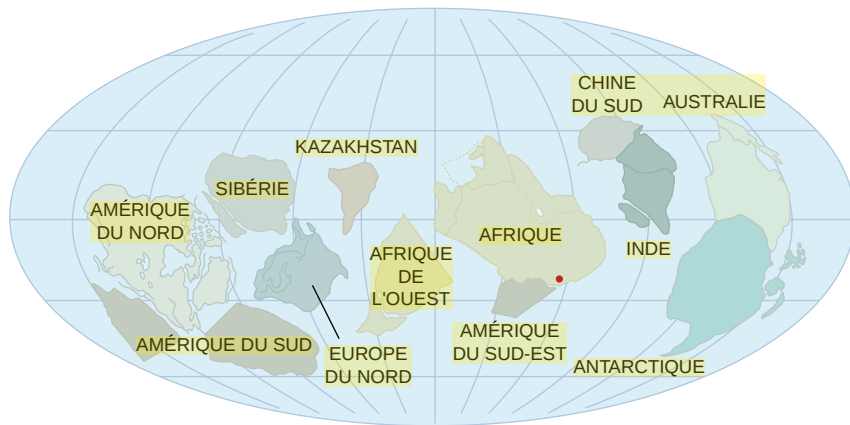
Nous pensons qu'une telle inversion brutale du climat s'est produite à quatre reprises, il y a entre 750 et 580 millions d'années. On a longtemps pensé que la Terre, contrairement à d'autres planètes, telle Vénus, n'avait jamais connu de climats aussi rudes. Toutefois, dès le début des années 1960, on 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

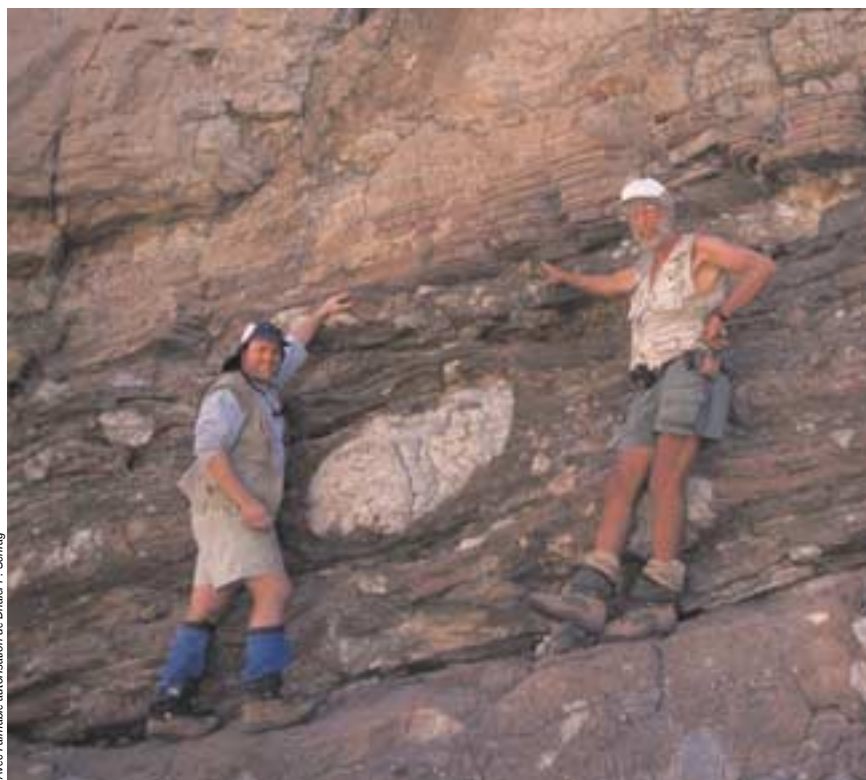
minéraux emprisonnés dans les roches glaciaires, B. Harland a proposé que les continents se sont rassemblés à proximité de l'équateur à l'ère néoprotérozoïque. Avant que les roches ne soient solidifiées, ces grains se sont alignés sur le champ magnétique terrestre, tout en restant dans le même plan horizontal, 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.

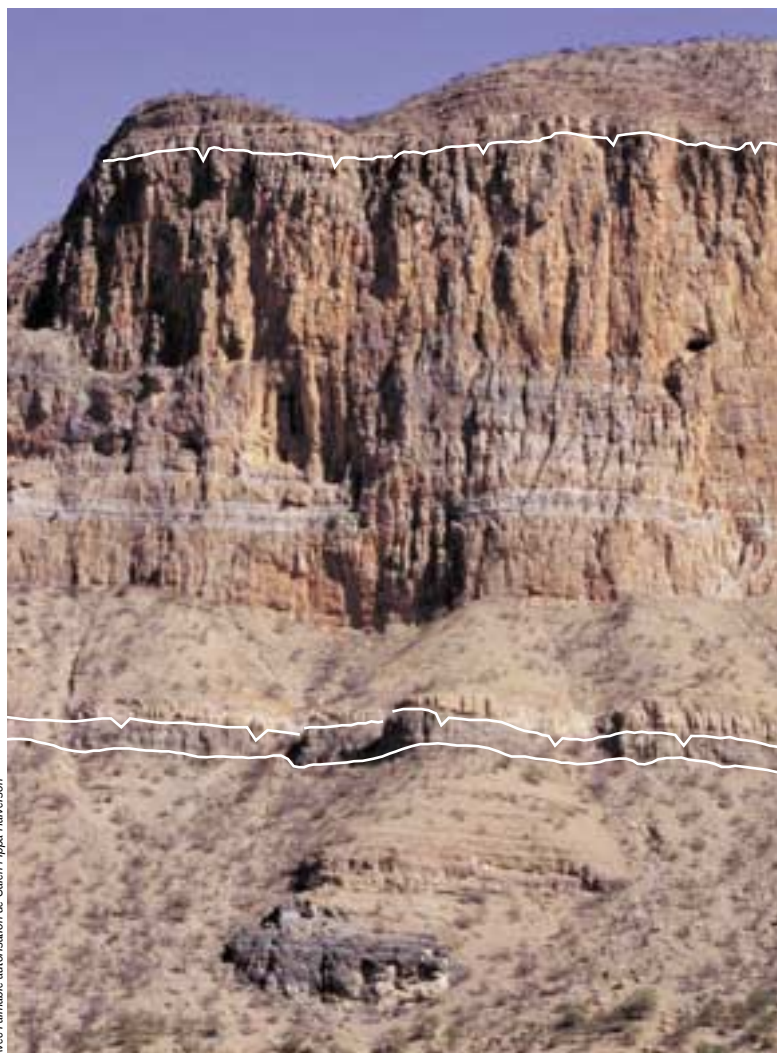
Plus la planète réfléchit le rayonnement solaire, plus la température est basse. Avec leur albédo élevé, la neige et la glace refroidissent l'atmosphère, assurant ainsi leur propre existence. Ce phénomène, nommé rétroaction de l'albédo des glaces, contribue, aujourd'hui, à l'expansion des couches glaciaires 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 CRISTALLISÉS

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*).