

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

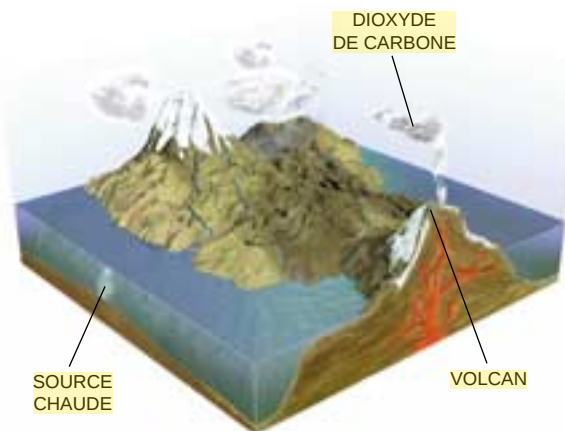
et à libérer des rejets qui enrichiraient l'atmosphère en dioxyde de carbone. L'eau nécessaire à l'érosion des roches et à l'immersion du dioxyde de carbone étant piégée dans les glaces, le dioxyde de carbone s'accumulerait et ses concentrations deviendraient très élevées, suffisantes pour réchauffer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



Étape 1
Prologue



Étape 2
Au plus fort de la glaciation



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

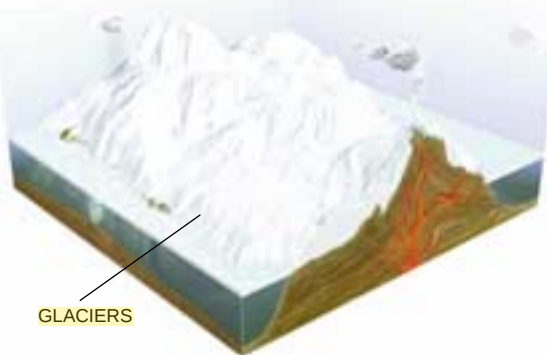
Deux nouveaux indices allaient renforcer l'hypothèse de la Terre gelée : les dépôts glaciaires du Néoprotérozoïque sont presque toujours recouverts d'une couche de roches carbonatées, lesquelles se forment dans des eaux chaudes peu profondes. Si la glace et les eaux chaudes avaient existé à des époques 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?

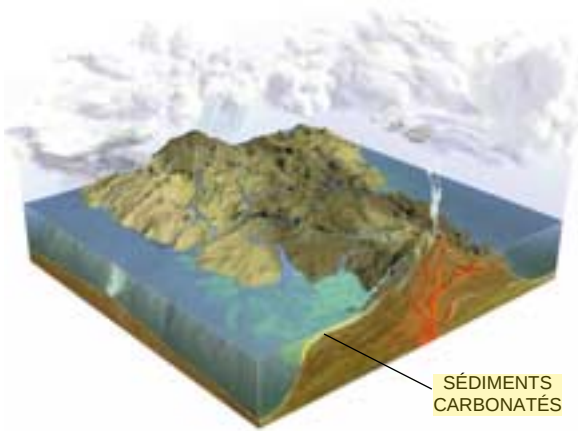
En comparant tous les résultats avec les observations que nous avons faites en Namibie, nous avons alors compris comment un tel changement semble s'être produit. Les épaisses couches de roches carbonatées que nous avons observées se seraient formées dans des conditions extrêmes, quand un effet de serre 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 Pierre-humbert 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'acquérir 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,