

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.

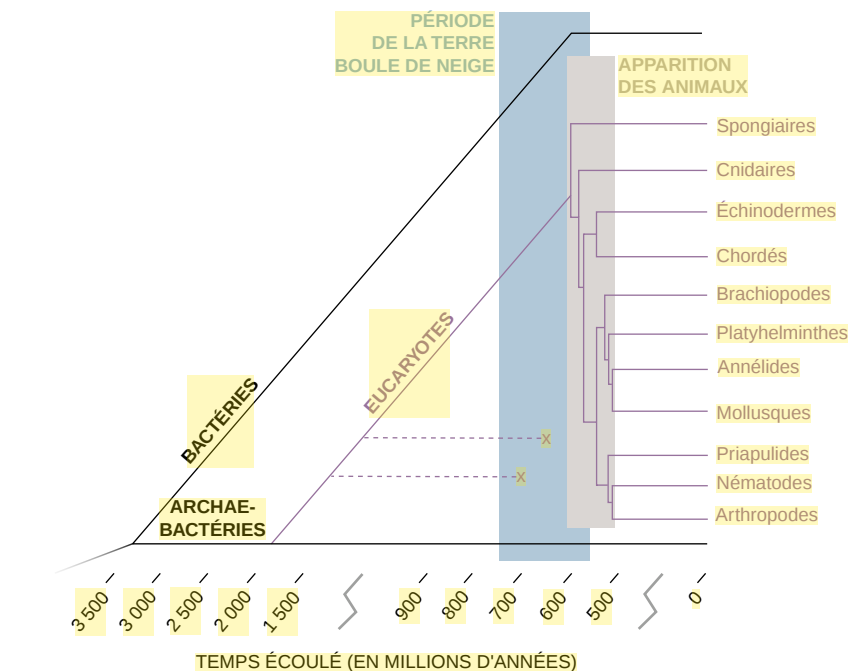
Des communautés de sources chaudes très éloignées de la surface glacée du globe ont accumulé une diversité génétique pendant des millions d'années. Lorsque deux groupes,

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.