

À LA RECHERCHE DE LA TERRE BOULE DE NEIGE EN NAMIBIE



PAUL HOFFMAN
est chercheur émérite
de l'université Harvard

Propos recueillis par PIERRE SANSJOFRE

Quand et comment avez-vous connu la théorie de la Terre boule de neige ?

Joseph Kirschvink m'en a parlé en 1989 lors d'une conférence à Washington. Nous attendions un bus sous une forte canicule. Il en parlait aux gens de façon informelle parce que l'idée lui était venue trop tard pour être incluse dans le programme officiel. Je n'avais jamais travaillé sur le Néoprotérozoïque à cette époque et je n'avais donc pas d'idée préconçue sur cette théorie.

Pourquoi avez-vous choisi de rechercher des traces de la Terre boule de neige en Namibie ?

Cette glaciation a été globale, donc on peut en rechercher des traces dans de nombreuses régions, partout où des roches de l'époque correspondante sont conservées près de la surface de la Terre. Lorsque j'ai décidé d'étudier la géologie du Néoprotérozoïque, en 1993, j'ai choisi de travailler en Namibie pour trois raisons : politique, géographique et géologique.

D'abord, il me fallait un pays en paix et stable. J'étais un nouveau venu dans le domaine et mon premier projet durerait nécessairement plusieurs années. Après son indépendance en 1990, la Namibie apparaissait comme une démocratie représentative multiraciale, gouvernée par un parti doté d'un mandat populaire fort. Mes attentes n'ont pas été déçues.

Ensuite, lorsque l'on étudie des dépôts sédimentaires dans les affleurements (par opposition aux carrières ou aux carottes de forage profond), il est essentiel que la végétation n'obscurcisse pas les roches et que l'on puisse

distinguer les couches tendres et dures. On privilégie donc les déserts et les pentes abruptes de collines. Dans la région de la Namibie que j'étudie, les précipitations annuelles sont inférieures à 20 centimètres et les pentes abruptes abondent sur l'escarpement côtier.

Enfin, en Namibie, il n'y a aucun doute possible sur le fait que si les surfaces les plus chaudes étaient glacées, les plus froides l'étaient aussi : les dépôts glaciaires néoprotérozoïques s'y trouvent dans les sédiments de plate-formes carbonatées marines situées au

Attirer l'attention de
brillants scientifiques
sur la Terre boule
de neige a été ma
principale réussite

niveau de la mer, comme celles du Grand Banc des Bahamas ou du plateau continental du nord-ouest de l'Australie. Or pour des raisons chimiques simples de saturation de l'eau en carbone, les sédiments carbonatés se forment surtout dans les parties les plus chaudes de l'océan de surface, là où l'évaporation est la plus forte. C'est toujours vrai, que le climat mondial soit plus chaud ou plus froid. Aucun sédiment glaciaire ne peut donc avoir glissé d'une montagne, comme au Chili.

Mais il a quand même fallu cinq ans de travail sur le terrain en Namibie pour me convaincre que nos observations étaient inattaquables, que la Terre boule de neige était leur meilleure interprétation et que de nouvelles preuves de la théorie de Joseph Kirschvink existaient, indépendantes de celles qui l'avaient motivé.

Quelle a été votre plus grande découverte sur la théorie de la Terre boule de neige ?

Celle du lien entre l'origine des *cap carbonates* et la théorie climatique qui explique la sortie d'un épisode de Terre boule de neige. Les *cap carbonates* sont des couches spécifiques de carbonates de plusieurs mètres d'épaisseur qui recouvrent directement les dépôts glaciaires du Néoprotérozoïque. Nous avons montré qu'ils sont associés à la fin des épisodes de Terre boule de neige et non à des époques glaciaires plus jeunes. Joseph Kirschvink ne connaissait pas les *cap carbonates*, qui ne figuraient donc pas dans sa théorie.

En fait, c'est mon collègue Dan Schrag, un océanographe géochimiste, qui le premier a compris pourquoi les *cap carbonates* sont une conséquence prévisible de la Terre boule de neige. Mon rôle a été de l'intéresser au problème. Attirer l'attention de personnes brillantes sur la Terre boule de neige a d'ailleurs été ma principale réussite. Cela signifiait généralement les convaincre que le phénomène avait pu se produire.

Vous avez récemment proposé une nouvelle explication de la présence de vie lors d'un épisode de Terre boule de neige. Pourriez-vous l'expliquer ?

Les déserts d'une Terre boule de neige sont situés dans les régions tropicales. Dans ces déserts, la glace se retire des terres à basse altitude par sublimation – conversion directe de la glace en vapeur d'eau. En revanche, l'océan tropical reste couvert de glace parce qu'il gèle par en dessous. Les vents violents de ces régions dégagent de la poussière des terres nues. En tombant, la neige piège la poussière contenue dans l'air, ainsi que les cendres volcaniques, et les dépose notamment dans les zones non désertiques, recouvertes de glace. Le mouvement de la glace transporte la poussière emprisonnée vers l'océan tropical, où elle s'accumule en surface sur la glace, elle-même soumise à



En Namibie, les pentes abruptes et désertiques des collines (*en haut*) recèlent des traces de la glaciation marinoenne, la seconde glaciation totale du Néoprotérozoïque, il y a plus de 635 millions d'années. Au centre, Paul Hoffman se situe sous une large couche de carbonates, au milieu des sédiments glaciaires de cette période, caractérisés notamment par des blocs de roche (*dropstones*) qui sont tombés lors de la fonte des glaces et ont déformé la couche sédimentaire (*en bas*).



la sublimation. La poussière accumulée assombrit la surface de la glace, qui se met à absorber la lumière du Soleil, ce qui permet la formation de flaques d'eau liquide. Les cyanobactéries et les algues vertes colonisent ces flaques, fournissant de la nourriture pour les champignons, les protozoaires unicellulaires et certains animaux multicellulaires.

Ces écosystèmes sont bien étudiés dans les environnements polaires et alpins modernes. En 2000, Warwick Vincent, de l'université Laval, au Canada, qui a étudié ces écosystèmes aux pôles, a proposé que des organismes variés se soient développés et aient évolué dans de tels écosystèmes lors des épisodes de Terre boule de neige. J'ai récemment attiré l'attention sur son idée, qui semble de plus en plus crédible à la lumière des résultats des modèles climatiques sur les mouvements de glace et de vapeur d'eau lors d'une glaciation totale.

Quels sont les prochains objectifs des explorateurs de la Terre boule de neige ?

Déterminer la cause immédiate de chaque épisode, expliquer pourquoi les deux épisodes néoprotérozoïques sont loin d'être identiques, comprendre comment les voies métaboliques et les cycles biogéochimiques se sont modifiés durant ces épisodes, et comment ces épisodes ont changé le cours de l'évolution de la vie par rapport à ce qui se serait produit en l'absence de glaciation totale.

Qu'auriez-vous aimé faire si vous n'étiez pas devenu géologue ?

J'aurais pu être un bon chasseur-cueilleur si j'étais né plus tôt.



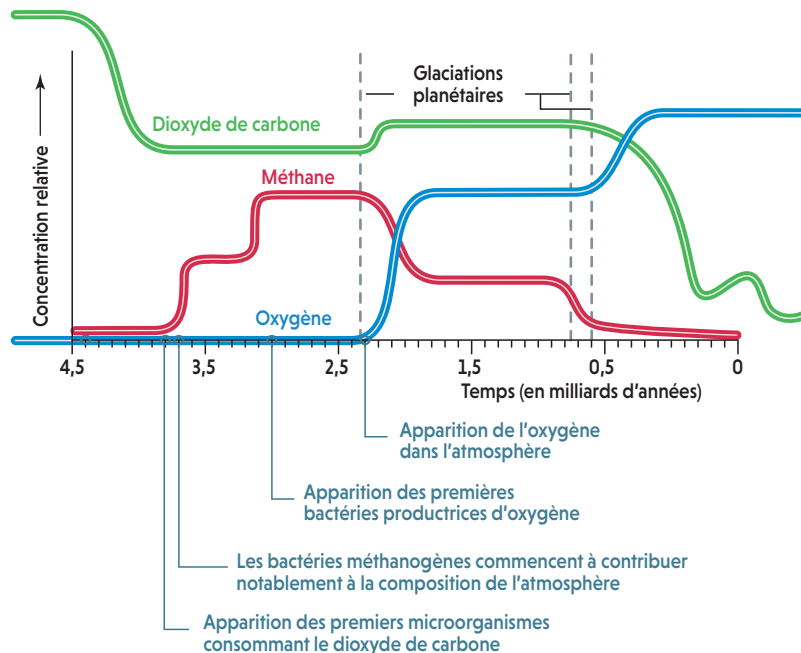
> matière de la surface vers l'océan en traversant de part en part la banquise.

Bien sûr, aucun vestige, même indirect, de ces structures n'a été conservé. Seule l'analogie avec les phénomènes observés sur l'actuelle cryosphère peut nous éclairer. Ainsi, la présence de suie sur la banquise et la fonte accélérée des glaces continentales donnent une idée des phénomènes et de leur potentielle importance. Ces observations suggèrent que les environnements formés grâce aux cryoconites ont pu héberger la vie durant les glaciations de type Terre boule de neige, mais pas à leur tout début : la formation de ces trous n'est possible que si le climat est suffisamment chaud. Dans les régions les plus froides actuellement comme le mont Howe, en Antarctique, culminant à 2350 mètres d'altitude, les poussières sont balayées par les vents et les particules sombres restent trop froides pour creuser des cryoconites. Ainsi, dans les premiers millions d'années de la glaciation, lorsque l'accumulation de CO₂ restait trop limitée, ni la formation de cryoconites ni la présence de glace salie et plus sombre à l'équateur ne semblent possibles. Comment les organismes photosynthétiques ont-ils survécu à ces premiers millions d'années ? La question reste entière...

LE RÈGNE DES ALGUES MARINES

Notre équipe et d'autres se concentrent sur la seconde grande question sur le vivant que soulève la Terre boule de neige. Le Cryogénien – la période qui comprend les deux glaciations de type Terre boule de neige du Néoprotérozoïque et leur interlude – constitue une transition biologique majeure : le passage d'un monde unicellulaire microscopique à un monde constitué d'organismes pluricellulaires macroscopiques, les métazoaires. Il est incontestable qu'une telle période glaciaire a représenté une pression de sélection majeure pour les organismes biologiques. Nombre de lignées eucaryotes ont dû disparaître. Et pourtant, plusieurs études ont montré qu'au lendemain de la seconde glaciation, dite marinoenne, la vie a repris son cours de manière rapide et spectaculaire. Par exemple, en 2007, Marcel Elie, de l'université Henri-Poincaré, à Nancy, et ses collègues ont mis en évidence la prolifération d'algues rouges, un organisme pouvant être pluricellulaire, à partir de sédiments recouvrant directement les roches glaciaires. Par quels mécanismes le Cryogénien a-t-il pu favoriser la vie pluricellulaire ?

Diverses études ont révélé la présence de fragments de microfossiles dans les sédiments glaciaires, suggérant que la biodiversité n'était pas nulle durant les épisodes de Terre boule de neige et après. Mais cet enregistrement reste trop fragmentaire pour qu'on en déduise l'impact de ces épisodes sur l'évolution de la vie. De plus, seule la comparaison des sédiments avant et après ces glaciations permettra réellement de



caractériser cet impact. C'est pour cette raison que nous explorons le Grand Canyon et la vallée de la Mort. Notre groupe tente de comprendre ce qui s'est passé en entrée et en sortie de la glaciation marinoenne en étudiant le contenu chimique de roches datant de cette période. Les données recueillies apporteront des contraintes sur l'environnement où les sédiments glaciaires se sont déposés, que nous utiliserons dans nos modèles numériques du climat en laboratoire.

L'arrivée sur le site de la vallée de la Mort est spectaculaire. Les sédiments contiennent des *dropstones*, des blocs de roche libérés lors de la fonte d'un iceberg et qui, en tombant, ont déformé la matrice sédimentaire marine. Ces galets striés et facettés, anciennement interprétés comme des témoins du déluge, témoignent d'une activité glaciaire importante. Leur datation (635 millions d'années) et leur paléogéographie tropicale en font des témoins de la glaciation marinoenne. Les sédiments glaciaires qui les contiennent, nommés tillites, ont une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres.

Nous prélevons des roches que nous comparerons avec d'autres échantillonnées sur le même site, mais antérieures à la glaciation. Elles rejoignent les sédiments pré et postglaciaires de cette même période que nous avons trouvés au Grand Canyon. Leur état de préservation exceptionnelle en fait de parfaits candidats pour y observer des traces de vie ancienne.

L'échantillonnage n'était cependant que la première partie du projet. Depuis, nous sommes revenus au laboratoire avec plus de 60 kilogrammes de roches et nous essayons, avec d'autres équipes, d'y détecter des traces physiques et chimiques de vie. Notamment, en 2017, avec Yosuke Hoshino, de l'institut

La Terre a connu deux grandes oxygénations depuis sa naissance, il y a 4,5 milliards d'années. La première, il y a entre 2,4 et 2,2 milliards d'années, liée à l'activité des premiers microorganismes photosynthétiques, est contemporaine de la première glaciation extrême. La seconde, il y a entre 1 milliard et 540 millions d'années, durant les glaciations extrêmes du Cryogénien, est contemporaine de l'apparition et de la diversification des métazoaires et autres organismes complexes.