

> devenue un sujet majeur de recherche en géologie. Au fil des ans, le récit de cette glaciation se précise. Peu à peu, nombre des difficultés qu'il soulevait ont été élucidées. Aujourd'hui se dessinent non seulement les mécanismes qui ont conduit à l'entrée et à la sortie de cette période, mais aussi des pistes sérieuses pour résoudre une de ses plus grandes énigmes: à l'époque, les organismes les plus évolués étaient des algues filamenteuses et des organismes mobiles unicellulaires (des protozoaires). Les premiers eucaryotes – des organismes formés d'une cellule comportant un noyau, et dont sont issus tous les animaux et les plantes – sont apparus plus d'un milliard d'années plus tôt, mais la vie pluricellulaire ne s'est pas encore imposée. Or non seulement les organismes photosynthétiques ont survécu à cette glaciation extrême, mais la vie pluricellulaire a connu une extraordinaire explosion juste après. Comment? Ce sont ces pistes que nous suivons dans le désert américain.

DE LA GLACE AUX TROPIQUES ?

Mais d'abord, pourquoi cet engouement pour la Terre boule de neige? Il n'est pas certain que la Terre ait subi une glaciation complète par le passé. Néanmoins, depuis une trentaine d'années, les arguments en faveur de cette hypothèse s'accumulent. L'idée est apparue une première fois en 1950. Le géologue australien Douglas Mawson montra que, sur la plupart des continents, les roches de cette époque contenaient des dépôts glaciaires – des débris et poussières caractéristiques de ceux que la glace libère en fondant. Il postula qu'une grande glaciation était survenue à la fin du Précambrien, durant l'ère néoproterozoïque, il y a entre 1 milliard et 500 millions d'années, juste avant une explosion rapide de la vie pluricellulaire.

En 1964, un second argument vint renforcer cette idée. Le géologue Brian Harland s'était alors intéressé à l'aimantation magnétique de petits grains minéraux enchâssés dans les roches glaciaires. Ces grains, déjà magnétisés, sont supposés se déposer en s'orientant selon le champ magnétique ambiant durant leur sédimentation, puis garder cette orientation. Or la mesure de cette orientation (mesure dite paléomagnétique) a révélé que les grains s'étaient déposés près de l'équateur à l'époque (leur inclinaison était horizontale – près des pôles, elle aurait été verticale). En s'appuyant sur ces résultats, Brian Harland démontra que les glaciers continentaux s'étaient probablement étendus jusqu'à l'équateur. Cependant, en 1966, un nouvel argument rendit ses conclusions inaudibles.

Mikhail Budyko, climatologue soviétique, travaillait sur les conséquences climatiques d'un conflit nucléaire généralisé entre les blocs de l'Est et de l'Ouest. À l'aide d'un des premiers modèles numériques de climat, il montra qu'un refroidissement assez intense (un hiver nucléaire, par

exemple) qui entraînerait l'extension de la banquise (ou de la neige) au-dessous de 30° de latitude devait, dès ce seuil franchi, enclencher un refroidissement irréversible de la Terre et conduire à un englacement total de sa surface. Le principe est simple. Les surfaces blanches réfléchissent plus de 60% des rayons solaires incidents, effet nommé albédo. Si l'albédo des zones recevant le plus d'énergie augmente, dès lors, tout réchauffement devient impossible. La Terre entre dans une spirale de refroidissement qui aboutit à un englacement total de sa surface.

Comme ni Harland ni aucun de ses confrères ne purent proposer un mécanisme mettant fin à un tel englacement, l'idée de Harland fut abandonnée. L'hypothèse d'une glaciation globale ne refit surface qu'en 1992, quand le paléomagnéticien américain Joseph Kirschvink la proposa pour expliquer une nouvelle énigme soulevée entre-temps par deux Australiens, Brian Embleton et George Williams. Cette fois, cependant, le scénario envisagé expliquait non seulement l'entrée, mais la sortie de l'état glaciaire.

En 1986, Brian Embleton et George Williams avaient identifié, dans la formation précambrienne d'Elatina, au Sud de l'Australie, des dépôts glaciaires tropicaux similaires à ceux recensés par Harland. Toutefois, leur agencement était tel qu'il témoignait d'une forte saisonnalité, avec des phases de gel et dégel des sols. Les basses latitudes actuelles montrant une très faible saisonnalité, les deux Australiens étaient convaincus de détenir un argument démontrant que la Terre n'avait pu geler des pôles à l'équateur: pour eux, ces dépôts glaciaires tropicaux n'étaient pas liés à un englacement généralisé de la Terre, mais étaient plutôt la conséquence d'une très forte obliquité de la Terre (l'inclinaison de son plan équatorial par rapport à celui de son orbite), supérieure à 54°, soit bien supérieure à la valeur actuelle (23,5°). Cette solution élégante permettait de placer les tropiques actuels aux hautes latitudes, zone caractérisée par une forte saisonnalité et soumise à l'influence des calottes polaires.

La Terre entre alors dans une spirale de refroidissement qui la recouvre de glace

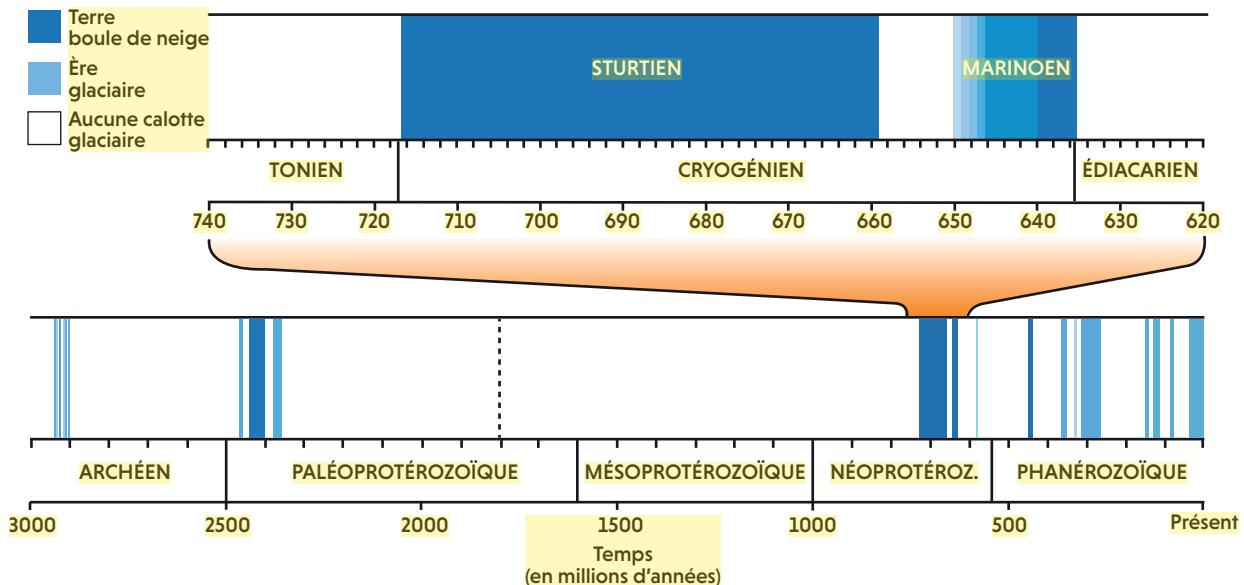
LES ÂGES DE GLACE DE LA TERRE

En 4,56 milliards d'années, la Terre a été recouverte presque entièrement de glace à trois reprises, ce qui a changé de manière radicale la chimie et la biodiversité présentes à sa surface. Une première série de glaciations, dites huroniennes (car découvertes dans des sédiments à proximité du lac Huron, en Amérique du Nord), datée à 2,5 milliards d'années, est

contemporaine d'une modification chimique majeure de la surface de la planète : l'apparition d'oxygène libre dans l'atmosphère, probablement due à une intense activité photosynthétique. Cet événement se caractérise, dans les dépôts sédimentaires, par la disparition de sédiments très riches en fer, mais aussi par celle d'un signal géochimique témoin d'un rayonnement ultraviolet très intense, signe que l'oxygène et l'ozone de l'atmosphère ont fortement réduit ce rayonnement.

Les deux autres glaciations extrêmes sont datées respectivement à 717 et 649 millions d'années et font partie

d'une période géologique nommée le Cryogénien. Cette période au climat froid, dominée par d'abondantes calottes de glaces continentales, se divise en deux phases glaciaires de durée inégale, les glaciations sturtienne (60 millions d'années) et marinoenne (10 millions d'années), ces deux épisodes n'étant espacés que de 20 millions d'années. Longtemps débattus, ces deux âges glaciaires sont désormais reconnus comme des glaciations exceptionnelles, sans équivalents depuis. On suppose que la banquise s'étendait des pôles à l'équateur et que la température moyenne de la Terre avoisinait les -60°C , d'où leur nom de Terre boule de neige. Pire, les températures polaires généralisées auraient induit la formation d'une épaisse couche de glace de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur isolant partiellement l'océan de l'atmosphère et inhibant toute activité photosynthétique. Plus surprenant encore, les sédiments glaciaires correspondants sont recouverts d'une épaisse couche de carbonates contenant, à sa base, des stromatolithes – des tapis microbiens photosynthétiques fossilisés. Ces stromatolithes témoignent de la recolonisation massive des océans durant la déglaciation de la Terre boule de neige. La présence de ces carbonates révèle aussi un passage rapide d'un environnement extrêmement froid à un environnement relativement chaud.



Intrigué par ces résultats, Joseph Kirschvink étudia la position de l'Australie à la fin du Précambrien et confirma la position équatoriale de la formation d'Elatina (à une latitude de 10°). De plus, l'ensemble des mesures paléomagnétiques réalisées sur les divers continents s'accordaient sur un point : les blocs continentaux se trouvaient tous dans des zones de basse latitude (jusqu'à 30°), rarement aux moyennes (30° - 60°) et jamais aux hautes (au-delà de 60°). L'hypothèse des Australiens était donc démentie et celle de la glaciation revenait en force.

Joseph Kirschvink commença par expliquer l'englacement de la Terre au moyen d'un scénario inédit. La faible latitude des blocs continentaux aurait induit le refroidissement initial à cause de la différence d'albédo qu'ils produisaient. En effet, dépourvus de végétation, ils avaient un albédo plus élevé que les océans.

Leur présence aux basses latitudes, là où l'inso-lation est maximale, aurait entraîné un refroidissement global et permis l'installation de glaces jusqu'aux Tropiques – la fameuse latitude limite de 30° à partir de laquelle l'englacement s'emballe, selon le modèle de Mikhail Budyko.

Restait à expliquer la sortie de la glaciation. Joseph Kirschvink s'appuya sur la modulation du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique par le cycle long du carbone. Sur des échelles de temps supérieures au million d'années, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère fluctue en fonction du volcanisme, qui libère ce gaz, et de l'altération des roches, principalement celles contenant des silicates. Au cours de cette dégradation, le CO_2 est transformé en ions hydrogénocarbonate (HCO_3^-) qui sont entraînés dans les océans, où ils se combinent avec des ions calcium, formant des sédiments >