

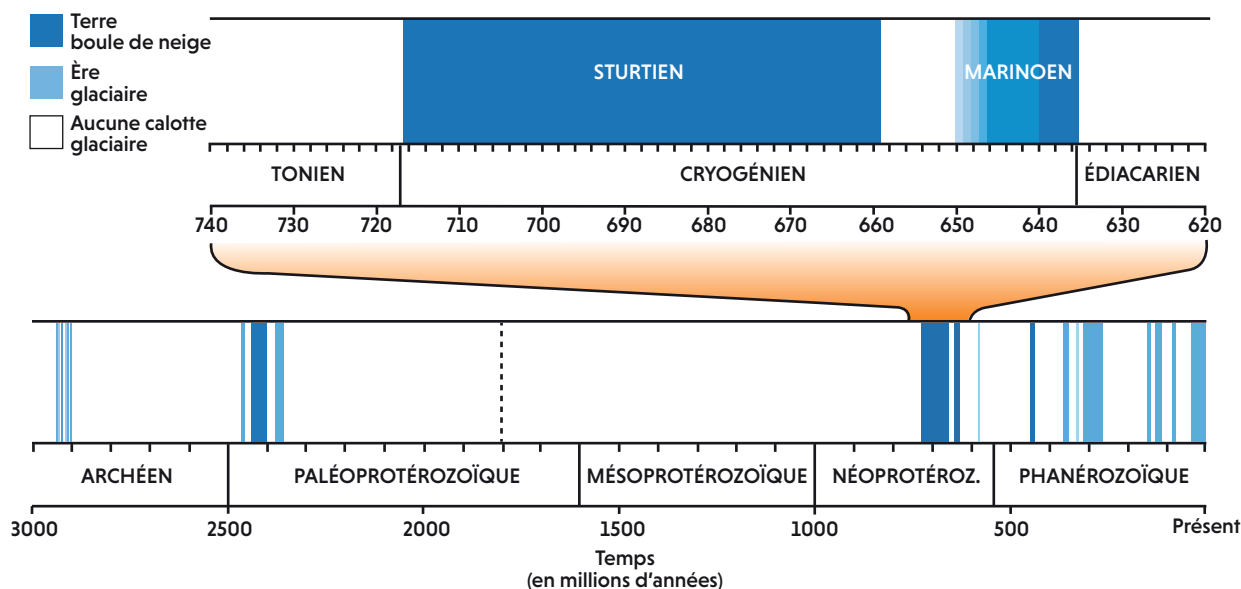
## LES ÂGES DE GLACE DE LA TERRE

**E**n 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  $-60^{\circ}\text{C}$ , 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  $10^{\circ}$ ). 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  $30^{\circ}$ ), rarement aux moyennes ( $30-60^{\circ}$ ) et jamais aux hautes (au-delà de  $60^{\circ}$ ). 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'insolation est maximale, aurait entraîné un refroidissement global et permis l'installation de glaces jusqu'aux Tropiques – la fameuse latitude limite de  $30^{\circ}$  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 ( $\text{CO}_2$ ) atmosphérique par le cycle long du carbone. Sur des échelles de temps supérieures au million d'années, la concentration de  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  est transformé en ions hydrogénocarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) qui sont entraînés dans les océans, où ils se combinent avec des ions calcium, formant des sédiments

➤ carbonatés qui stockent d'importantes quantités de carbone (voir l'illustration ci-dessous).

## LA PISTE DU CO<sub>2</sub>

Dans ce cycle long, la source de carbone (le volcanisme) est indépendante du climat. Ce n'est pas le cas des processus qui piègent le carbone : l'altération des roches dépend de la température et du ruissellement des eaux. C'est cette propriété qu'utilisa Joseph Kirschvink dans son scénario : lorsque la glaciation s'est généralisée, les températures extrêmement froides et l'absence d'eau liquide ont stoppé l'altération des roches, mais les volcans ont continué à émettre du CO<sub>2</sub>. Le gaz s'est accumulé dans l'atmosphère et a intensifié l'effet de serre jusqu'à ce que ce dernier contrebalance l'effet d'albédo, provoquant une fonte rapide et brutale des glaces. La glace disparaissant, l'effet refroidissant causé par le fort albédo des glaces s'est atténué, ce qui a accéléré la fonte. Libérée de sa glace, mais avec une atmosphère encore très riche en CO<sub>2</sub>, la Terre a alors brutalement quitté son climat glacial pour un climat tropical généralisé.

Ce scénario restait cependant très fragile, car seule la formation d'Elatina témoignait de la présence de glaces aux basses latitudes. Séduit par cette hypothèse, Paul Hoffman, géologue à l'université Harvard, aux États-Unis, partit alors à la recherche de vestiges de ces événements passés afin de vérifier sa vraisemblance. Accompagné de son étudiant en thèse, Galen Halverson, il élabora, au terme de six années d'une exploration minutieuse, la théorie de la Terre boule de neige, qu'il présenta en 1998 (voir l'entretien page 32).

Depuis, cette théorie est devenue un sujet scientifique majeur. Nombre de problèmes concernant la Terre boule de neige ont été élucidés la décennie suivante. De nombreuses séries de dépôts glaciaires du Néoprotérozoïque ont

été découvertes sur tous les continents, et l'amélioration des techniques de datation a permis notamment de montrer leur synchronicité. On a ainsi mis en évidence deux épisodes glaciaires extrêmes de plusieurs millions d'années, datés respectivement de 717 et 649 millions d'années, qui semblent bien avoir été généralisés (et un autre épisode plus ancien, voir l'encadré page 29), et des mécanismes conduisant à l'entrée et à la sortie de chacun ont été proposés à partir de ces données. Cependant, il restait à comprendre comment les organismes photosynthétiques avaient survécu, et comment la vie pluricellulaire avait même profité de ces glaciations extrêmes.

On sait depuis longtemps, grâce à l'exploration des environnements polaires, que nombre d'organismes, surtout microscopiques, survivent au froid et à l'absence saisonnière de lumière. Dès le début des années 2000, les scientifiques se sont donc demandé quelles contraintes supplémentaires, par rapport à ces conditions déjà extrêmes, une Terre entièrement gelée aurait imposées aux organismes. Deux contraintes majeures sont apparues.

La première concerne l'épaisseur de la glace de mer et le blocage du rayonnement solaire. La banquise polaire actuelle est peu épaisse, et son extension limitée par sa fonte saisonnière. Sur une Terre entièrement gelée, c'est différent. Les températures extrêmement basses des pôles

## LE CYCLE LONG DU CO<sub>2</sub>

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) atmosphérique a pour source principale le volcanisme (qu'il soit continental ou océanique) ①. Sous l'effet de la pluie et de la chaleur, les roches contenant des silicates CaSiO<sub>3</sub> réagissent avec les pluies acides dues à la présence de CO<sub>2</sub> et sont dégradées en un résidu solide et en ions. Au cours de cette altération des roches, le carbone issu du CO<sub>2</sub> est transféré dans les rivières sous forme d'ions hydrogénocarbonate HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ②, puis dans les océans ③. Dans l'océan, ces ions sont utilisés lors de la précipitation de carbonates ④, ce qui piège le carbone issu du CO<sub>2</sub> atmosphérique pour des millions d'années.

