



**HAL**  
open science

## La Terre “ boule de neige ” : de l’hypothèse à la théorie

Françoise Dreyer

► **To cite this version:**

Françoise Dreyer. La Terre “ boule de neige ” : de l’hypothèse à la théorie. Travaux du Comité français d’Histoire de la Géologie, 2022, 3ème série (tome 36), pp.21-41. <hal-04646043>

**HAL Id: hal-04646043**

**<https://hal.science/hal-04646043v1>**

Submitted on 12 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

## La Terre « boule de neige » : de l'hypothèse à la théorie

Françoise DREYER

Chercheuse associée au Centre François Viète (Nantes)  
Cofrhigéo (trésorière)

**Résumé.** L'idée d'une glaciation généralisée à la fin du Précambrien se dessine à la fin du XIX<sup>e</sup> et au début du XX<sup>e</sup> siècle, mais reste controversée faute d'arguments convaincants et surtout de mécanismes explicatifs. Bien que des arguments paléomagnétiques lui donnent quelques couleurs et les premiers modèles climatiques une plausibilité, la controverse reste vive. En 1992, les résultats de Joe Kirschvink, d'abord opposé à cette idée, le conduisent à formuler l'hypothèse d'une Terre totalement englacée ou Terre « boule de neige ». Malgré de nombreux contradicteurs, Paul Hoffman fait la synthèse des observations en 1998 et attise l'intérêt pour cette hypothèse. Si la théorie proposée répond aux questions soulevées, de nouvelles se posent et le scénario envisagé devra être affiné pour y répondre.

**Mots clés :** Terre boule de neige – Néoprotérozoïque – Hypothèse – Théorie - Joe Kirschvink – Paul F. Hoffman – Glaciation globale - Controverse

**Abstract.** The idea of a widespread glaciation at the end of the Late Precambrian began to take shape in the late 19th and early 20th centuries, but remained controversial for lack of convincing arguments and, above all, explanatory mechanisms. Although paleomagnetic arguments gave it some color and the first climate models some plausibility, the controversy remained active. In 1992, the findings of Joe Kirschvink, initially opposed to the idea, led him to formulate the hypothesis of a fully ice-covered or "snowball" Earth. Despite numerous opponents, Paul Hoffman synthesized the observations in 1998 and fuelled interest in this hypothesis. While the proposed theory answered the questions raised, new questions arose and the scenario envisaged has to be refined to answer them.

**Key words :** Snowball Earth – Neoproterozoic – Hypothesis – Theory - Joe Kirschvink – Paul F. Hoffman – Global glaciation - Controversy

L'expression *Snowball Earth* ou « Terre boule de neige » est assez récente puisqu'elle fut introduite par le géologue et géophysicien américain Joseph L. Kirschvink en 1992. Elle sous-tend l'idée d'une Terre entièrement englacée, idée inacceptable, même à l'époque, alors que des masses de données allant dans ce sens avaient été accumulées depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. En effet, à peine l'origine glaciaire de certains dépôts pléistocènes était-elle acceptée que des dépôts d'origine glaciaire précambriens avaient été découverts, d'abord en Écosse, puis sur tous les continents. Le développement du paléomagnétisme a confirmé l'existence de dépôts glacio-marins aux basses latitudes, renforçant l'hypothèse d'une glaciation généralisée à la fin du Précambrien. La

remise en cause de l'origine glaciaire des dépôts néoprotérozoïques, puis celle de la qualité des données paléomagnétiques, masque en fait l'impossibilité de concevoir une Terre couverte de neige ou de glace tant que les mécanismes permettant une glaciation généralisée restent inconnus. Par ailleurs, dès la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, des stromatolites précambriens avaient été découverts, attestant l'existence de la vie sur Terre. Comment ces espèces auraient-elles pu survivre à une telle catastrophe ? Seuls les progrès réalisés en paléomagnétisme, géophysique et géochimie, et dans la modélisation climatique ont rendu possible cette hypothèse largement acceptée actuellement.

## Une glaciation néoprotérozoïque de grande ampleur

### Bref historique

L'origine glaciaire des blocs erratiques, des moraines, des vallées en forme de U, etc. fut proposée de façon indépendante par Jens Esmark (1824, Norvège), Peter Dobson (1826, Angleterre), Ignaz Venetz (1833) et Jean de Charpentier (1835, Suisse), et Albrecht R. Bernhardt (1832, Allemagne).

D'abord hostile à la théorie glaciaire proposée par Venetz et Charpentier, Louis Agassiz (1807-1873) la défendra dans son discours de Neuchâtel en 1837 reprenant l'idée que les blocs erratiques sont transportés par les glaciers et les stries glaciaires laissées par ceux-ci. Il proposera aussi l'hypothèse d'un âge glaciaire avec la formation d'une vaste calotte de glace s'étendant des régions polaires jusqu'à la Méditerranée. Ces affirmations peu étayées provoquèrent un tollé général (SCHAER, 2001). Il était alors admis que la Terre se refroidissait lentement par dissipation de sa chaleur interne et rien ne permettait d'expliquer des variations climatiques aussi importantes. Par ailleurs, les références au Déluge étaient encore très vivaces : les blocs erratiques avaient été entraînés loin de leur lieu d'origine par un déluge monstrueux. La théorie glaciaire mise en avant par Agassiz était tout simplement impensable dans le contexte du moment, mais ce coup d'éclat à Neuchâtel mis cette théorie sous les projecteurs. Il faudra cependant attendre les travaux de Ramsay, Jamieson et des frères Geikie dans les années 1860, ainsi que la mise en évidence de l'effet de serre<sup>1</sup> pour qu'un regain d'intérêt à l'égard de la théorie glaciaire la fasse accepter (HOFFMAN, 2011).

C'est aussi dans les années 1860 que sont découvertes des formations glaciaires plus anciennes, en Écosse d'abord, puis en Australie, en Afrique, etc. Ces formations glaciaires, permienne pour la plupart, posent dès lors la question d'une glaciation généralisée, plus globale que la glaciation pléistocène d'Agassiz. Une telle

extension des glaces paraissait impossible et l'origine glaciaire de ces dépôts fut fortement controversée. Cependant, en 1912, Alfred Wegener (1880-1930) estime que cette glaciation permienne pouvait être expliquée par la dérive des continents : si tous les continents étaient rassemblés aux pôles au Permien, alors tous les continents auraient pu être couverts de glace lors d'un épisode semblable à celui du Pléistocène. Cela permettait aussi d'expliquer les traces de fluage de la glace à partir du pôle Sud (centré alors au Sud de l'Afrique centrale) jusqu'à la mer, mais n'impliquait pas de glaciation globale. Pure hérésie pour les géologues fixistes, encore nombreux. Ainsi, l'idée de grandes glaciations circulait parmi les géologues, mais peinait à trouver un début d'acceptation.

Dans le même temps, d'autres dépôts glaciaires encore plus anciens sont découverts. Précambriens, ils sont datés du Néoprotérozoïque, juste avant le Cambrien, et seront à l'origine, un siècle plus tard, de l'hypothèse de la Terre boule de neige.

### Les premières découvertes de dépôts glaciaires précambriens (1871-1915)

En 1871, James Thomson (1822-1892) décrit à Port Askaig (Islay, Écosse) une formation précambrienne<sup>2</sup> contenant des clastes de roches qui ne se trouvent nulle part ailleurs en Écosse. Il suggère qu'ils proviennent d'un « *grand continent du Nord* » et qu'ils ont été transportés par des glaciers. Cette découverte ouvre la voie à la description de tels dépôts glaciaires précambriens un peu partout dans le monde.

En Australie tout d'abord, où Harry P. Woodward (1858-1917) suspecte un dépôt glaciaire près d'Adélaïde en 1884.

En Norvège ensuite : souvent considéré comme le premier découvreur de dépôts glaciaires précambriens, le Norvégien Hans Reusch (1852-1922) décrit en 1891 près de Bigganjarga dans le Varangerfjord (Nord de la Norvège), un

<sup>1</sup> C'est le physicien irlandais John Tyndall (1820-1893) qui démontre en 1861 que certains gaz comme le CO<sub>2</sub> et la vapeur d'eau absorbent le rayonnement infrarouge ('rayons obscurs') émis par la Terre tout en étant transparents à la lumière du Soleil (ce que l'on appelle l'effet de serre). Fasciné par l'idée de période glaciaire avancée par Agassiz, Tyndall conclut que des variations des proportions des gaz dans l'atmosphère pouvaient jouer un rôle important dans « *tous les changements climatiques que les recherches des géologues ont révélés* ». Reprise par les physiciens du climat et les météorologues, cette notion diffusera dans tous les milieux scientifiques dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

<sup>2</sup> À cette époque, on parlait de *lowest Cambrian*, « Cambrien le plus inférieur ».

conglomérat avec des blocs de toutes tailles, non triés, au milieu de particules plus fines. Par analogie avec les tills et les moraines actuelles, il suppose qu'il s'agit d'une moraine précambrienne consolidée. L'origine glaciaire de cette formation est appuyée par le fait qu'elle repose sur une roche présentant des stries glaciaires<sup>3</sup> (Fig. 1). Ces critères de reconnaissance des marques glaciaires étaient alors acceptés et l'origine glaciaire de cette formation ne fut pas contestée.

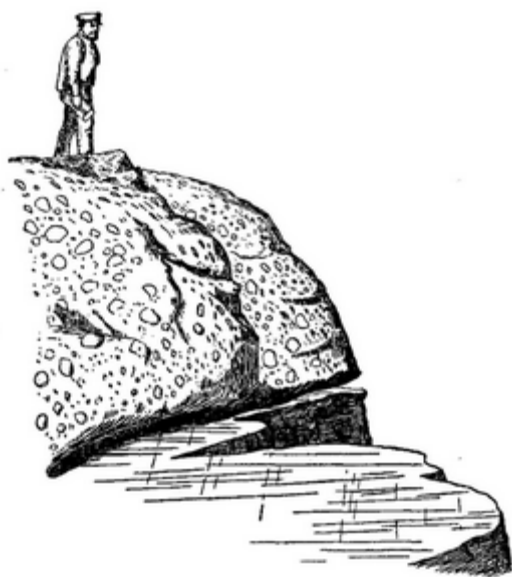


Fig. 1. Représentation par Reusch (1891) du conglomérat morainique de Bigganjargga, Varangerfjord, Norvège. Celui-ci repose sur un grès strié sous l'effet d'un glacier.

Suivent les découvertes de E. J. Garwood et J. W. Gregory au Svalbard en 1898, B. Willis en Chine du Sud en 1904, T. H. Holland en Himalaya en 1908, F. F. Hintze en Amérique du Nord en 1913 et A. W. Rogers en Afrique en 1915.

En 1906, Albrecht Penck (1858-1945) introduit le terme de tillite pour nommer les anciens tills lithifiés.

En 1908, Walter Howchin (1845-1937) confirme l'origine glaciaire des tillites de Sturt Gorge<sup>4</sup> décrites près d'Adélaïde par Woodward, quatorze ans plus tôt. La région d'Adélaïde et les Flinders

Ranges plus au nord deviendront emblématique de ce type de formation.

Écosse, Australie, Norvège, Svalbard, Chine, Inde, Amérique du Nord, Afrique... autant de formations glaciaires dont la répartition interroge et conduit à des synthèses.

### **Le temps des premières synthèses (1926-1940)**

En 1915, des tillites précambriennes ou « *éocambriennes* » ont été décrites sur tous les continents, du nord au sud et à l'équateur, laissant penser à des changements climatiques majeurs. Après la première guerre mondiale, plusieurs synthèses sont réalisées au sujet des climats passés, des périodes glaciaires et des périodes non glaciaires. Si Wegener avait proposé une dérive des continents rendant possibles les observations de la grande glaciation permienne, il n'en est pas de même pour la glaciation éo-cambrienne. En 1926, Arthur P. Coleman (1852-1939), fixiste radicalement opposé à la dérive des continents, estime donc que la glaciation éo-cambrienne est plus extrême que celle du Pléistocène ou même celle de la fin du Paléozoïque, ce qu'il a peine à croire.

En 1934, Oskar Kulling (1898-1988) actualise la synthèse de Coleman en ajoutant les découvertes de tillites au Zaïre du Sud, en Sibérie, Amérique du Sud (Brésil), Afrique de l'Ouest, NW de la Chine. Plus important, il corrèle dans le temps la tillite qu'il a décrite au Spitzberg avec celles de l'Est du Groenland et celle du Varangerfjord en Norvège (HARLAND, 2007, p. 636). En effet, si ces tillites sont toutes éo-cambriennes, elles ne sont pas nécessairement synchrones. Il est donc essentiel de tenter de corréliser ces tillites entre elles. Pour cela, Kulling groupe les occurrences de tillites en trois catégories :

- les tillites en continuité avec les strates sus-jacentes cambriennes, c'est-à-dire se situant juste avant le Cambrien (tillites du Nord de l'Atlantique, Chine du Nord, Australie et Amérique du Nord) ;
- celles qui présentent une discontinuité mineure ; elles sont antérieures au Cambrien,

<sup>3</sup> Il s'est avéré plus tard que cette moraine glaciaire consolidée n'avait pas été mise en place directement sur la roche striée et qu'elle avait été déplacée. Par ailleurs, le Varangerfjord donnera son nom au Varangien, deuxième étage du Cryogénien (Néoprotérozoïque) pendant lequel se développe la deuxième glaciation globale du Cryogénien, la glaciation marinoenne.

<sup>4</sup> Sturt Gorge donnera son nom au Sturtien, premier étage du Cryogénien et à la première glaciation globale cryogénienne.

mais il est plus difficile de préciser leur position par rapport au Cambrien (Sibérie centrale, Asie centrale) ;

- les séries non fossilifères ne pouvant être datées directement (tillite du Nord de l'Inde, Afrique centrale et du Sud).

Cette synthèse importante mettant en évidence une glaciation mondiale majeure et de grande intensité à la fin du précambrien, est reprise au 17<sup>ème</sup> congrès international de géologie à Moscou en 1937, lors d'un symposium sur les paléoclimats. Un consensus est trouvé à propos de l'origine glaciaire des dépôts éo-cambriens en Asie, Afrique, Australie, Europe et Amérique du Nord, Chine du Sud et Afrique centrale, c'est-à-dire à l'équateur. La conclusion est que la glaciation éo-cambrienne n'a d'égale que celle de la fin du Paléozoïque. Il est par ailleurs observé que des animaux invertébrés sont apparus après le retrait des calottes glaciaires, suggérant un lien possible entre ces deux événements. Il est à noter que, dès les années 1870, avait été évoquée l'idée qu'une glaciation majeure pourrait être à l'origine de la

diversification des espèces et de l'apparition de nouveaux groupes et de nouvelles espèces à son issue. Par la suite, Douglas Mawson (1882-1958), géologue et explorateur polaire australien, découvre de nombreuses tillites au nord d'Adelaïde (Australie) dans les Flinders Ranges qu'il passe au crible. En 1949, il décrit une série de couches de près de 7 000 m d'épaisseur dans le « géosynclinal de Bibliando Dome ». Directement au-dessous du Cambrien fossilifère discordant, 3 000 m environ en-dessous des quartzites de Pound contenant la faune d'Ediacara, cette série ou système Adelaïde est donc de la fin du Protérozoïque<sup>5</sup>. Mawson y trouve des horizons contenant de nombreux blocs striés. Il acquiert la certitude que ce sont des tillites glaciaires et distingue deux séquences de tillites séparées par des dépôts interglaciaires. Ces deux formations sont caractéristiques des glaciations sturtiennes (HARLAND, 2007). Il les rapproche par leurs caractéristiques des tillites de Griquatown en Afrique du Sud et de Sveanor au Spitzberg, et suggère leur contemporanéité malgré leur éloignement (MAWSON, 1949). Par ailleurs, il figure sur une carte la

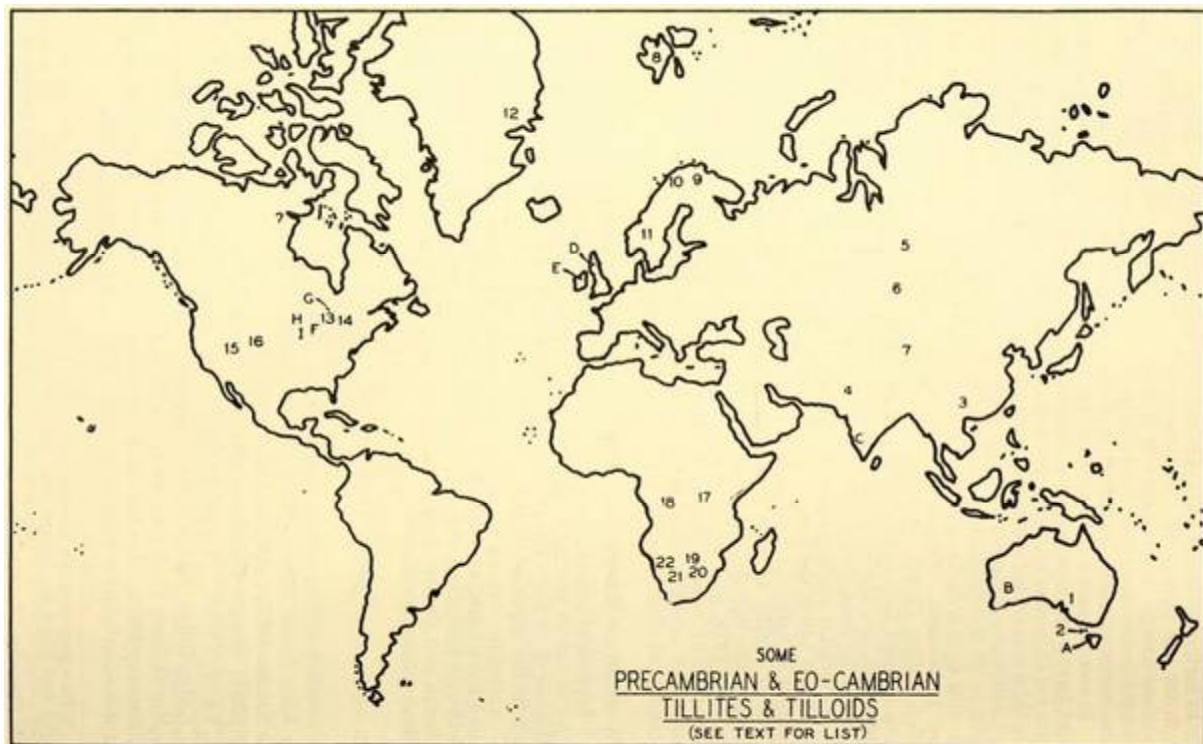


Fig. 2. Carte de Mawson (1949) indiquant la répartition mondiale des 22 tillites précambriennes découvertes avant 1949 (chiffres romains de 1 à 22 ; les lettres correspondent à des formations d'origine glaciaire moins certaine, appelées tilloïdes).

<sup>5</sup> Alors que dans les années 1930, la période était dite éo-cambrienne, Mawson emploie le terme *late-Proterozoic*.

position de 22 tillites précambriennes (Fig. 2) montrant la répartition mondiale de celles-ci. Pour Mawson, qui est fixiste, la présence de tillites en Afrique équatoriale (Ouganda et Congo) marque l'intensité de la « plus grande période glaciaire » (*Greatest Ice-Age*) de l'histoire de la Terre et qui pourrait avoir profondément influencé l'évolution et la répartition de la Vie de cette époque.

En 1949, Mawson découvre près d'Elatina Creek dans les Flinders Ranges, une tillite de faible épaisseur qu'il retrouve un plus au sud à Marino Rocks. « *La formation présente des caractères inhabituels et est localisée dans la séquence protérozoïque dans un horizon loin au-dessus de la bien-connue tillite sturtienne.* » (Mawson, 1950). C'est pour lui une troisième glaciation.

Ainsi, il démontre l'existence, en Australie, de plusieurs périodes glaciaires séparées par de nets interglaciaires arides à la fin du Protérozoïque, la glaciation sturtienne et la glaciation elatinienne (ou glaciation marinoenne).

Par ailleurs, en 1951, Kulling propose une période glaciaire majeure basée sur la série du Vangerfjord (Norvège).

Dans le contexte des années 1930-1940, la dérive des continents est une théorie inacceptable pour beaucoup de scientifiques et l'idée d'une glaciation globale, généralisée, était inaudible. D'abord, parce que le schéma d'une Terre en constant refroidissement était encore bien vivace. Même si les glaciations pléistocènes étaient reconnues, celle de la fin du Protérozoïque avait une tout autre ampleur. Ensuite, rien ne permettait de l'expliquer. Qu'est-ce qui aurait pu déclencher une telle glaciation ? Et une fois glacée, comment la Terre se serait-elle déglacée ? Aussi, nombre de géologues ont cherché à invalider les arguments proposés par les partisans d'une glaciation globale.

### **Des arguments contestés et contestables ?**

Les principaux arguments contestés sont essentiellement ceux qui permettent d'affirmer l'existence de dépôts glaciaires et leur répartition.

#### *L'origine glaciaire des tillites*

Comme pour les dépôts glaciaires pléistocènes d'Agassiz, le caractère glaciaire des tillites néo-protérozoïques est très contesté.

Dès les années 1920-1940, divers processus alternatifs ont été proposés pour expliquer la formation des tillites.

En 1937, Owen T. Jones (1878-1967) avait établi l'existence d'écoulements gravitaires sous-marins dans des sédiments siluriens présentant l'aspect de till et dans les années 1950, il a été démontré que les courants de turbidité étaient responsables de sédiments granoclassés. En 1963, les explications tectoniques et autres étaient largement préférées aux interprétations glaciaires (HARLAND, 2007). Si ces alternatives à l'origine glaciaire des tills pouvaient être retenues dans certains cas, elles ne pouvaient expliquer bon nombre de tillites néo-protérozoïques, comme le montre W. Brian Harland (1917-2003) en 1964.

En 1964, Harland résume les origines non glaciaires possibles de tels dépôts et identifie leurs caractéristiques (Fig. 3a à 3f), puis les compare à celles des dépôts d'origine glaciaire (Fig. 3g et 3h). Il en ressort que les dépôts marins glaciaires présentent trois caractéristiques essentielles : ils sont de très vaste étendue (plus de 1 000 km<sup>2</sup>) et d'épaisseur assez constante ; certains des blocs qu'ils contiennent sont de grande taille (quelques dizaines de centimètres, voire plus d'un mètre).

Sur la base de ces critères, Harland réexamine les tillites précambriennes supposées glaciaires de Scandinavie, du Groenland et du Spitzberg. Il en confirme l'origine glaciaire, mais n'exclut pas un remaniement de ces dépôts glaciaires dans des coulées de boue ou des courants de turbidité. C'est ainsi d'ailleurs qu'est réinterprétée la moraine de Reusch (Fig. 1).

En 1974, L. J. G. Schermerhorn conteste l'origine glaciaire des tillites australiennes de la fin du Protérozoïque et affirme qu'il s'agit de coulées de débris. Il montre qu'elles ont été déposées dans des bassins délimités par des blocs basculés, par conséquent tectoniquement actifs. Il estime que ce sont des coulées sous-marines de blocs et débris détachés par la tectonique. Pour lui, ces dépôts ne sont pas glaciaires. Plus tard, il sera proposé que, si la tectonique est entrée en jeu, cela n'était pas incompatible avec une couverture de glace.

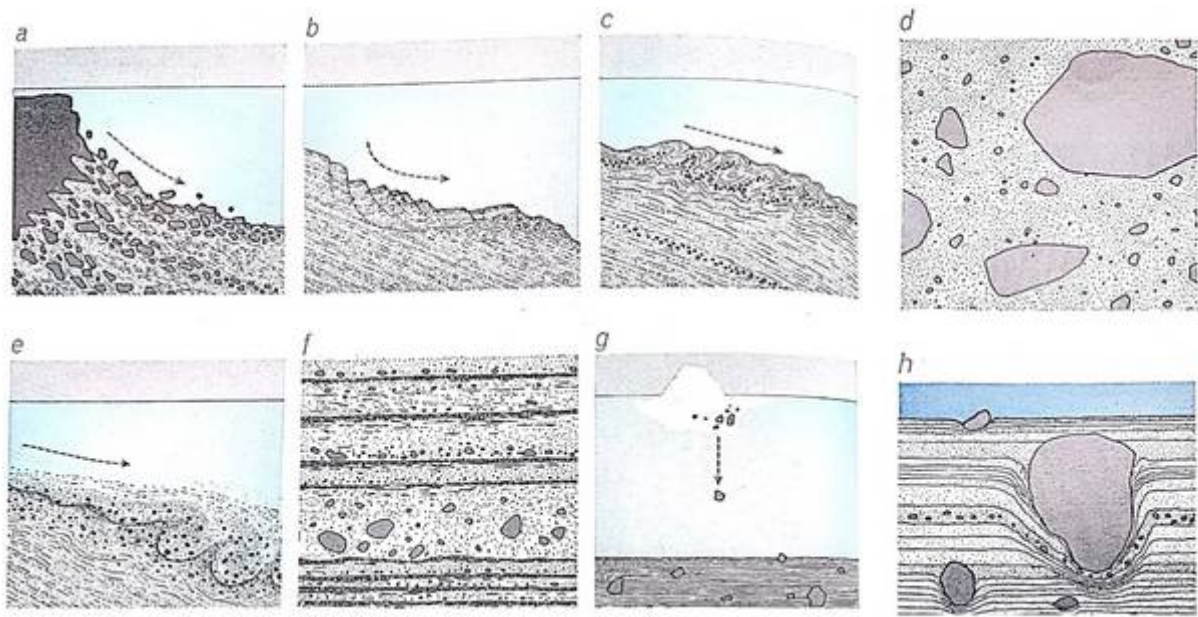


Fig. 3. Caractérisation des dépôts marins non glaciaires (a à f) et comparaison avec des dépôts marins glaciaires (g et h) par Harland (HARLAND & RUDWICK, 1964)

a. Sur de fortes pentes sous-marines, de grands blocs anguleux peuvent être décrochés par des tremblements de terre, glisser le long de la pente tout en étant éventuellement striés, et emballés dans des sédiments fins ;

b. Sur de faibles pentes, des sédiments récents peuvent devenir instables, de grandes lentilles de sédiments se détachent, glissent vers le bas en soulevant les boues sur la pente et le fond ; le mélange se redépose en eau profonde ; ce type de dépôt contient rarement des blocs ;

c-d. Si des blocs se trouvent sur la pente, ils sont alors mélangés aux sédiments fins dans la coulée de boue (c) et le dépôt ressemble à un till (d), mais de faible étendue ;

e-f. Sur une pente sous-marine, la désagrégation des sédiments dans des courants de turbidité (e) se traduit par des dépôts granoclassés (f) sur de vastes étendues (sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres) ; cependant ce type de dépôt contient des graviers de seulement quelques centimètres, pas davantage. De telles turbidites sont reconnaissables par leur granoclassement.

g-f. En comparaison, des blocs, souvent de grande taille, portés par une langue glaciaire flottant sur l'océan ou sur un iceberg (g), tombent au fond de l'eau, s'enfoncent en déformant les minces lits de sédiments encore meubles (h). Ceci permet de préciser les caractéristiques d'un dépôt marin de tillite glaciaire : vaste étendue du dépôt, épaisseur peu variable et taille importante de certains blocs.

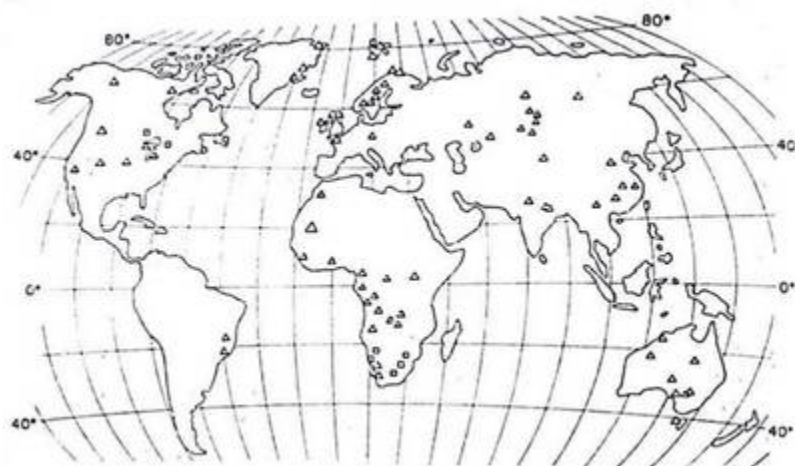


Fig. 4. Localisation des tillites précambriennes possibles (HARLAND, 1964)

Les triangles représentent les tillites présumées, probablement varangiennes ;

les cercles des rudites, sans doute des tillites de l'Infracambrien ;

les triangles et les cercles avec des points représentent celles d'âge certainement plus ancien que le Varangien, mais

quand même de la fin du Précambrien ;

les carrés pour des tillites présumées, probablement encore plus anciennes.

Si l'on tient compte des tillites protérozoïques véritablement glaciaires selon les critères de Harland, leur répartition est mondiale, sur tous les continents (Fig. 4), ce qui indique une glaciation généralisée concernant les pôles comme l'équateur. Si les calottes glaciaires sont très étendues, Harland ne pense pourtant pas que la Terre ait été entièrement couverte de glace. Il suppose que de grandes étendues d'océan ont pu rester libre.

Si la répartition des tillites paraît mondiale, encore faut-il s'assurer de la position des continents à la fin du Précambrien. En effet, en 1964, même si la dérive des continents n'est pas encore acceptée par tous, beaucoup pensent que les continents n'ont pas toujours été dans leur position actuelle, ce que confirme Harland par l'étude paléomagnétique des tillites réexaminées.

#### *Entrée en jeu du paléomagnétisme dans les années 1950*

Au début des années 1950, Jan Hospers donne une confirmation statistique de l'hypothèse d'un dipôle axial géocentrique<sup>6</sup>. De fait, il devient possible, lorsqu'une roche présente une aimantation rémanente naturelle, de déterminer sa latitude et sa position par rapport aux pôles au moment de sa mise en place, en mesurant son champ rémanent. Ainsi, les recherches paléomagnétiques sur les roches se multiplient afin de vérifier les hypothèses de l'errance des pôles et de la dérive des continents. L'intérêt se porte aussi sur les formations glaciaires paléozoïques et précambriennes afin de déterminer la latitude à laquelle celles-ci se sont déposées.

En 1957, Edward A. Irving (1927-2014) montre que l'inclinaison magnétique des varves glaciaires du permo-carbonifère en Australie est subverticale, ce qui implique un dépôt à haute latitude corroborant l'hypothèse de Wegener fondée sur l'origine glaciaire de ces dépôts : au Permo-carbonifère, les continents étaient rassemblés au pôle Sud et étaient couverts de glace ; par conséquent la glaciation restait restreinte aux latitudes élevées.

Mais qu'en est-il au Précambrien ? En 1959, Harland et D. E.T. Bidgood utilisent pour la première fois les méthodes d'Irving sur des dépôts glaciaires infracambriens de Scandinavie et du Groënland. Leurs résultats, sur un petit nombre d'échantillons, indiquent une paléolatitude équatoriale de ces formations glaciaires suggérant une glaciation généralisée (HOFFMAN, 2011). Que les continents soient dans leur position actuelle ou dans leur position supposée de la fin du Précambrien, des formations glaciaires se répartissent sur tous les continents, aux basses latitudes aussi bien qu'aux hautes latitudes (Fig. 5).

Ces données, lithologiques, stratigraphiques et paléomagnétiques, prouvent clairement qu'une grande glaciation s'est développée à la fin du Précambrien et devraient relativiser les critiques.

Cependant, cette glaciation généralisée est très débattue à la conférence de Newcastle sur les paléoclimats (janvier 1963) à laquelle Harland a présenté ses résultats. Walter H. Bucher (1888-1965) la considère comme la « troisième grande confrontation » après la controverse sur l'âge de la Terre et celle de la dérive des continents. Les débats portent sur les paléolatitudes basses enregistrées pour les glaciations précambriennes. Il ressort des échanges que trois explications sont possibles : les données paléomagnétiques sont erronées, les roches ne sont pas d'origine glaciaire ou la Terre entière avait été gelée. Malgré de nombreux articles démontrant l'origine glaciaire de ces tillites précambriennes, la confirmation des travaux paléomagnétiques, la synthèse de Harland et un nouveau symposium à Cologne en mars 1964, le scepticisme a prévalu et la glaciation généralisée est rejetée. Harland écrit en 2007 qu'« À cette conférence [de Newcastle], l'idée d'une glaciation globale a été tournée en ridicule. »

La glaciation paléozoïque était acceptable en supposant une dérive des continents, hypothèse qui commence à faire son chemin malgré de nombreuses réticences. En revanche, la glaciation de

<sup>6</sup> C'est-à-dire que les lignes de force du champ magnétique terrestre sont peu différentes de celles que créerait un dipôle magnétique fictif placé dans le centre du noyau.

l'Infracambrien ne peut être que généralisée, qu'il y ait dérive des continents ou non, et cela est en total désaccord avec l'idée que l'on a à ce moment-là des paléoclimats. Le scepticisme ambiant

remet en cause la qualité des résultats obtenus, notamment l'inclinaison magnétique de certaines tillites qui aurait pu être acquise ultérieurement à leur dépôt.

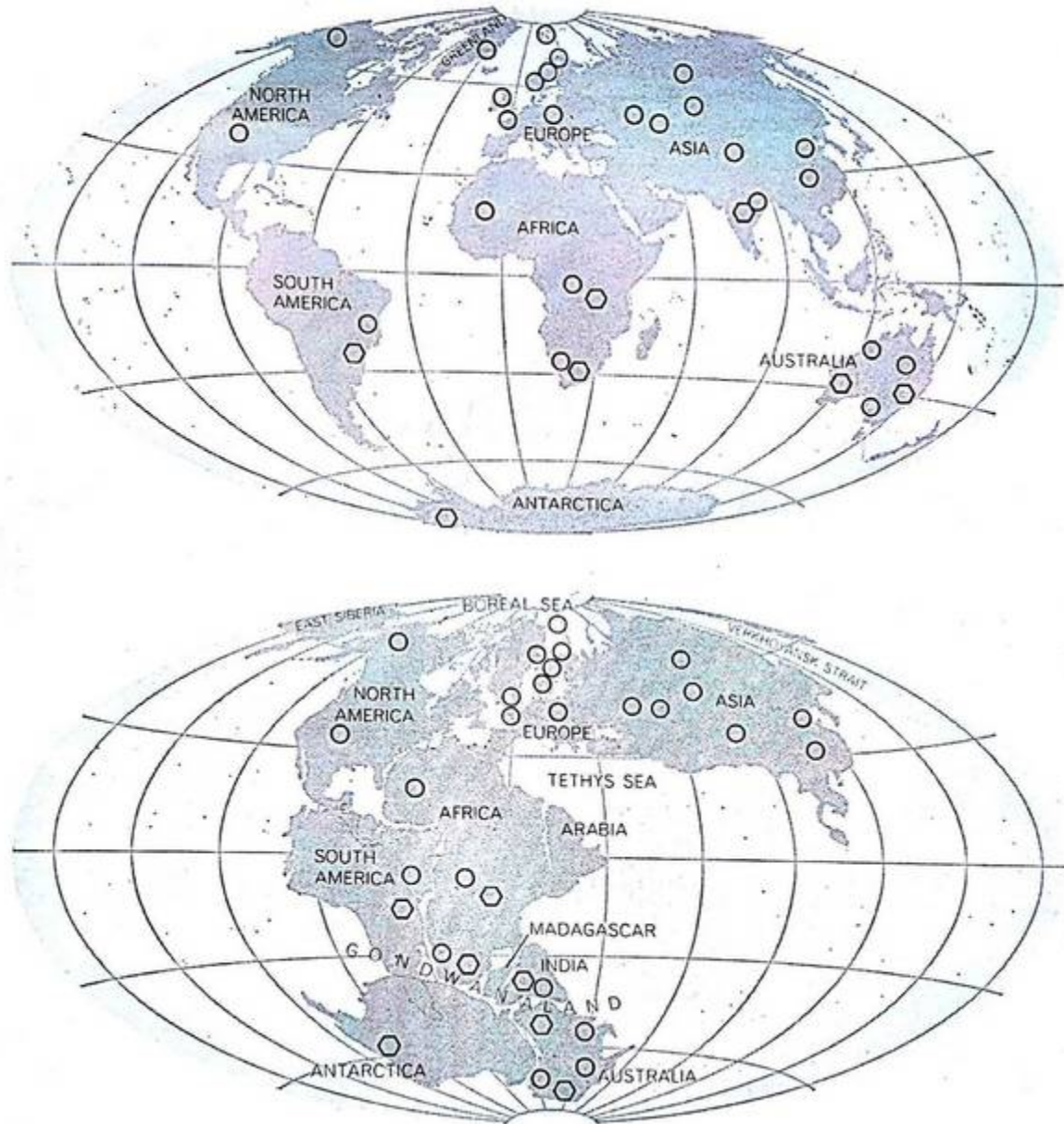


Fig. 5. Répartition des tillites d'origine glaciaire infracambriennes (cercles) et permo-carbonifères (hexagones). Carte du haut : les continents sont dans leur position actuelle. Carte du bas : les continents sont dans leur position supposée à l'Infracambrien (position basée sur celle du Permo-Carbonifère, probablement plus proche que l'actuelle, selon Harland). Quelle que soit la position des continents, des tillites infracambriennes présentes à l'équateur suggèrent une glaciation généralisée. (HARLAND & RUDWICK, 1964).

Le nombre de publications sur le sujet, qui avait fait un bond au moment des conférences, chute drastiquement, avant un rebond dans les années 1980, lors de la synthèse initiée en 1981 par le programme international de corrélation géologique (IGCP), provoquant un regain d'intérêt et de nombreuses études sur les processus et les dépôts glacio-marins, l'utilisation des isotopes du carbone comme outil de corrélation, l'acquisition de contraintes paléomagnétiques fiables sur les paléolatitudes des dépôts glacio-marins, etc. (HOFFMAN, 2011).

En 1986, Brian J. J. Embleton et George E. Williams apportent la première preuve paléomagnétique fiable d'une glaciation au niveau de la mer, aux basses latitudes, sur des varvites de la formation d'Elatina (Australie-Méridionale).

#### La contemporanéité des tillites

L'un des contre-arguments d'une glaciation généralisée est le fait que les tillites néoprotérozoïques ne sont pas nécessairement synchrones. En effet, même si ce sont des dépôts à quelques centaines de mètres sous les dépôts très fossilifères de la

base du Cambrien, même si leur position stratigraphique est identique (fin du Précambrien), il est impossible de connaître la durée des dépôts et donc leur contemporanéité. Ne sont possibles que des datations relatives et il est quasiment impossible de corréler des dépôts observés en Europe, en Afrique ou en Australie. C'est pourquoi des propositions explicatives, parfois un peu farfelues, pas toujours très cohérentes, sont données à cet ensemble de formations glaciaires. Citons par exemple une hypothèse explicative reprise fréquemment, celle d'une dérive rapide des pôles qui amènerait les continents en position polaire, les uns après les autres, hypothèse sans véritable fondement, mais permettant d'éviter d'envisager la présence de glace aux Tropiques, voire à l'Équateur.

Cependant, Harland a indiqué l'âge probable des tillites précambriennes, permo-carbonifères et pléistocènes, observées sur les continents (Fig. 6). Leur répartition indique clairement que seule la glaciation de la fin du Précambrien s'est développée sur tous les continents et a un caractère mondial. On peut relever aussi les nombreuses incertitudes notamment dans les temps lointains.

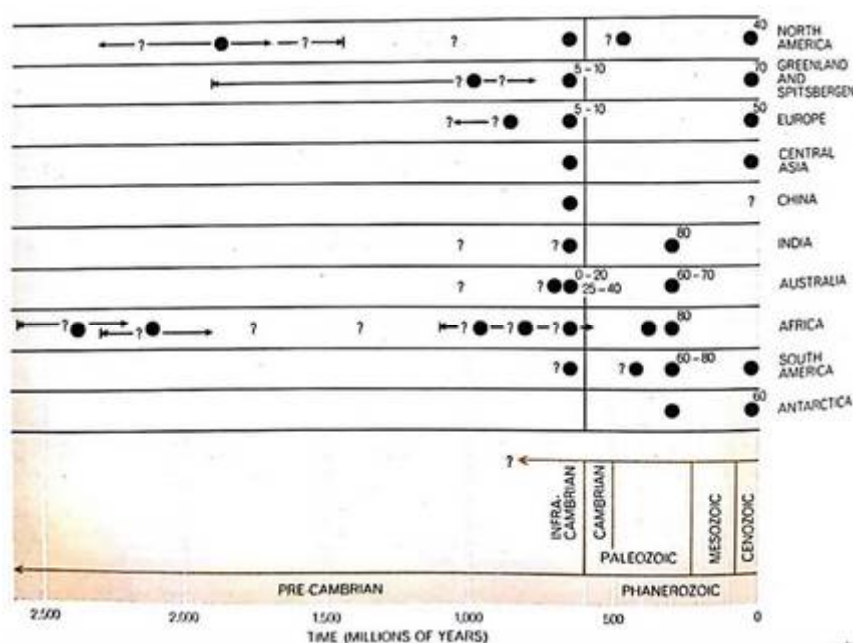


Fig. 6. Distribution des tillites dans le temps pour chaque continent. (HARLAND & RUDWICK, 1964) Chaque cercle représente un ou plusieurs dépôts glaciaires, les points d'interrogation les incertitudes sur l'âge du dépôt et les flèches les limites d'incertitude mesurée par radiométrie. Les chiffres sont les latitudes au moment du dépôt, déterminées par paléomagnétisme. Seules les tillites infracambriennes se trouvent sur tous les continents, y compris aux basses latitudes et présentent un caractère mondial. Plusieurs épisodes glaciaires pourraient avoir sévi à l'Infracambrien.

Les tillites de la fin du Protérozoïque sont-elles synchrones ou y a-t-il plusieurs glaciations ? généralisées ou non ? combien ? de quel âge ? Telles sont les questions encore en suspens. Il est généralement admis dans les années 1960-1990,

l'existence de 2 glaciations protérozoïques globales, la glaciation sturtienne vers -700 Ma et la glaciation marinoenne (ou varangienne) un peu plus tardive vers -650 Ma.

### La généralité des glaciations

Il a été suggéré que certaines tillites, par exemple celles de Port Askaig, présentaient des strates glaciaires intercalées avec des strates témoignant d'un interglaciaire chaud. Ces séquences seraient liées à l'avancée et au recul de calottes glaciaires marines, incompatibles avec une Terre entièrement couverte de glace.

Pourquoi une glaciation généralisée est-elle si difficile à admettre ? Comme pour la dérive des continents sans mécanisme moteur, il manque à l'hypothèse d'une glaciation généralisée des mécanismes explicatifs pour une entrée en glaciation, une sortie de cette glaciation et pour la persistance de la Vie sur Terre.

Parmi les premiers mécanismes proposés avant 1990 pour l'entrée en glaciation (Hoffman, 2011), on peut citer :

- la variation solaire par Harland en 1964 ;
- l'obliquité de la Terre : Williams propose en 1975 une obliquité orbitale (angle entre l'axe de rotation de la Terre et son orbite autour du Soleil) extrêmement importante, plus de 54°. Dans cette configuration, les zones équatoriales sont celles qui reçoivent le moins d'énergie solaire. Les masses continentales, positionnées alors à l'équateur, pourraient se couvrir d'une calotte glaciaire tandis que les océans resteraient libres de glace aux pôles ; cette hypothèse permet à cet auteur d'expliquer la présence dans la formation d'Elatina en Australie, de lits très fins qu'il considère comme saisonniers ; ce type de dépôts suppose un cycle hydrologique vigoureux incompatible avec une Terre entièrement gelée ;
- des effondrements périodiques d'anneaux de glace en orbite<sup>7</sup>, évoqués par Richard Sheldon en 1984 ;

- l'enfouissement du CO<sub>2</sub> sous forme de carbonates dans l'océan (un « anti effet de serre » à l'origine de la glaciation de la fin du Précambrien), proposé par Roberts en 1971 ;
- la position des continents proposée par MARSHALL *et al.* en 1988.

Certains de ces mécanismes pourraient représenter un début d'explication, mais aucun ne peut à lui seul suffire et les discussions ultérieures en ont invalidé certains.

### L'hypothèse de la « Terre boule de neige » ou *Snowball Earth* (Joseph Kirschvink 1992)

Sceptique, malgré la qualité des travaux d'Embleton et Williams, estimant qu'il manquait une vérification pour affirmer que l'aimantation rémanente primaire des varves de la formation d'Elatina était conservée, le paléomagnéticien Joseph Kirschvink reprend les mesures d'Embleton et Williams. En 1987, il donne à son doctorant Dawn Sumner un échantillon de la formation d'Elatina, formation glaciaire de la fin du Protérozoïque, pour effectuer un *fold test* ou test de pli, test permettant de s'assurer que l'aimantation rémanente de la roche est bien primaire. Celui-ci s'avère positif et confirme donc, au grand étonnement de Kirschvink, les résultats d'Embleton et Williams (HOFFMANN, 2002). Dès lors, convaincu que les glaces s'étendent jusqu'à l'océan à quelques degrés de l'équateur et donc de l'existence d'une « glaciation équatoriale généralisée », il imagine une Terre qui aurait ressemblé à une « boule de neige » ou *Snowball Earth*, très blanche et très réfléchissante avec peut-être quelques « flaques » tropicales dans la mer de glace. Cette hypothèse aurait l'avantage d'expliquer la présence de formations de fer rubané<sup>8</sup> parfois associées aux tillites. Kirschvink va dorénavant s'attacher à trouver des explications aux questions essentielles ainsi posées par cette hypothèse (entrée et sortie de la glaciation, survie des êtres vivants...).

<sup>7</sup> Sheldon « a supposé que des anneaux de glace plus denses que ceux de Saturne étaient en orbite autour de la Terre archéenne. Au Protérozoïque, la sublimation a aminci les anneaux et ils sont devenus plus discrets. Au fur et à mesure que la Lune s'éloignait de la Terre, leurs orbites se sont lentement dégradées et ils sont entrés successivement dans l'atmosphère. Lorsque chaque anneau s'est approché de la Terre, son ombre a provoqué une période glaciaire. En entrant dans l'atmosphère et avant que l'anneau suivant ne s'approche, l'ombre a disparu et des gaz à effet de serre ont été ajoutés, provoquant une période interglaciaire chaude. » (HOFFMAN, 2011)

<sup>8</sup> Le Fe réduit Fe<sup>2+</sup> est très soluble dans l'eau, mais dès qu'il est en présence d'un oxydant, il précipite sous forme d'oxyde de fer Fe<sup>3+</sup> (ferrique). La présence de fer rubané riche en oxyde de fer dans des dépôts marins indique que l'eau de mer qui était alors réduite, est localement devenue oxydante. Les fers rubanés sont essentiellement archéens et on suppose que leur formation est liée à l'activité photosynthétique (oxygénique) de cyanobactéries. Dans le cas des fers rubanés néoproterozoïques lors de la Terre boule de neige, ce serait la reprise d'échanges (locaux) entre l'océan anoxique, riche en Fe<sup>2+</sup>, et l'atmosphère contenant de l'O<sub>2</sub> qui serait à l'origine de ces dépôts.

## **Hypothèse de la Terre boule de neige**

### **plausible**

Afin d'étayer son hypothèse d'une « Terre boule de neige », Kirschvink rassemble les arguments en faveur d'une glaciation généralisée. Pour cela, il s'appuie sur les travaux des 30 années précédentes dans plusieurs grands domaines : géologie, physique du climat et géophysique, géochimie, etc.

### **Géologie et paléomagnétisme : une glaciation aux basses latitudes**

- De nombreuses formations glaciaires néo-protéozoïques (Canada, Scandinavie, Australie par exemple) contiennent des fragments de roches carbonatées arrachés lors de l'écoulement de la glace sur une plateforme carbonatée. De plus, elles sont limitées au-dessus et au-dessous par d'épaisses séries carbonatées, qui, dans la période récente, se déposent dans les mers chaudes et peu profondes de la ceinture tropicale, jusqu'à environ 33° de l'équateur, preuve que la glaciation s'est développée sous les tropiques et est suivie par une période très chaude.
- La présence d'une plateforme carbonatée sous les formations glaciaires est pour Kirschvink un argument fort pour réfuter la théorie de l'obliquité de la Terre développée par Williams comme mécanisme possible de l'entrée en glaciation. En effet, si la chaleur est redistribuée vers les pôles, les ceintures de carbonates devraient migrer de l'équateur vers les pôles. Les carbonates ne seraient donc pas associés aux formations glaciaires équatoriales. Par ailleurs, Vanyo *et al.* (1988) soutiennent de manière convaincante que l'obliquité, il y a 800 Ma, était de l'ordre des valeurs actuelles.
- Les *dropstones* ou bloc de délestage (Fig. 3h et Fig. 7) présents dans les formations glaciomarines indiquent leur origine glaciaire.
- Les progrès du paléomagnétisme à la fin des années 1980 ont permis de déterminer si l'aimantation rémanente des roches était primaire ou acquise après le dépôt des sédi-

ments, et ainsi de préciser leur latitude et leur position par rapport aux pôles au moment du dépôt. Les données confirment des dépôts glaciaires aux basses latitudes, c'est-à-dire en position quasi équatoriale à la fin du Protérozoïque.

- D'après les données paléomagnétiques, tous les continents étaient rassemblés à des latitudes moyennes et basses à la fin du Protérozoïque.

L'ensemble de ces données soutiennent l'hypothèse d'une glaciation étendue, aux basses latitudes et au niveau de la mer. Reste à trouver un mécanisme donnant lieu à une telle glaciation.



Fig. 7. Dropstone photographié par Hoffman dans des carbonates de la formation de Ghaub à Fransfontein, NW Namibie. L'impact du bloc délesté par la glace sur le fond marin a déformé, plissé les minces lits de sédiments encore meubles au moment de la chute. Cette photo pourrait être l'illustration du schéma de Harland (Fig. 3h). (HOFFMAN & SCHRAG, 2002) © Creative Commons.

### **Physique du climat : entrée en glaciation globale possible**

Kirschvink s'appuie sans les détailler<sup>9</sup> sur les modèles climatiques développés dans les années 1960-1970. Pour n'en citer qu'un, nous prendrons celui de Budyko de 1969, fréquemment cité par les auteurs. Mikhail I. Budyko (1920-2001) était un physicien russe du climat qui travaillait sur les conséquences possibles d'une guerre et d'un hiver nucléaires. En s'appuyant sur les bilans radiatifs de la Terre, il considéra les effets d'un apport considérable de particules dans l'atmosphère lors d'une éruption volcanique majeure. Les particules arrêtent la lu-

<sup>9</sup> L'article de Kirschvink est une synthèse de 2 pages (parmi 1348 pages) in J.W. SCHOPF & C. KLEIN (eds.), *The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study*. Cambridge University Press, 1992.

mière du Soleil abaissant l'intensité lumineuse et donc la température moyenne de la Terre. Il montre qu'avec un abaissement de 1,6% de l'intensité lumineuse, les glaces atteignent 50° de latitude, seuil à partir duquel le système s'emballé et l'équilibre est rompu. Le système climatique jusque-là stable, devient instable. En tenant compte de l'albedo très élevé de la glace, plus il y a de glace, plus la lumière du Soleil est réfléchi, plus la température baisse. La glace progresse augmentant l'albedo globale de la Terre, etc. Ce feedback positif de l'albedo emballe le système et les glaces atteignent l'équateur en quelque milliers d'années. Si le modèle de Budyko est très simple, comme il le dit lui-même, et ne prend en considération que quelques paramètres intervenant dans le bilan énergétique de la Terre, il montre qu'une glaciation généralisée est possible.

Kirschvink suggère que la position des continents aux basses et moyennes latitudes à la fin du Précambrien a un impact considérable sur le climat global dans la mesure où ils réfléchissent bien davantage l'énergie solaire que les océans. Cette position favoriserait le refroidissement du globe. S'ils sont entourés de mers épicontinentales peu profondes, une légère baisse du niveau des mers liée au refroidissement transformerait une vaste étendue d'océan de faible albedo<sup>10</sup>, qui absorbe beaucoup d'énergie solaire, en une surface très réfléchissante, d'albedo élevé, augmentant la tendance au refroidissement.

Il propose donc un feedback positif de l'albedo des continents comme possible mécanisme déclencheur de la glaciation, sans aller plus loin. Par ailleurs, on estime que l'intensité solaire au Néoprotérozoïque était 94% de ce qu'elle est actuellement, facteur qui facilite l'entrée en glaciation.

Kirschvink considère que si l'obliquité de la Terre est normale pendant la glaciation équatoriale, on peut s'attendre à ce que les pôles soient aussi froids, sinon plus froids que l'équateur. La surface océanique serait couverte d'une plateforme glaciaire flottante aux hautes et moyennes latitudes, donnant à la Terre l'aspect d'une

« boule de neige » très réfléchissante, mais où la couverture glaciaire continentale serait mince et inégale en raison de la quasi-élimination du cycle hydrologique. Toutefois, ce modèle ne permet pas de dire quelle part de l'océan reste libre de glace.

*Géochimie, roches et gaz à effet de serre : sortie de glaciation concevable*

Si une entrée en glaciation généralisée semble possible, comment une 'Terre boule de neige' peut-elle échapper à la glaciation ?

Pour répondre à cette question, Kirschvink envisage l'effet de serre du CO<sub>2</sub> dont les mécanismes commencent à être bien connus. Le CO<sub>2</sub> émis par les volcans ne peut se dissoudre dans les océans couverts de glace et s'accumule dans l'atmosphère. De plus, la température très basse et la couverture de glace sur les continents comme sur les océans diminuent très fortement la photosynthèse (des cyanobactéries, ici) et l'altération des roches. En 1981, James C. G. Walker (1939-2022) a montré que l'altération des roches silicatées consomme du CO<sub>2</sub> et se comporte comme un puits de CO<sub>2</sub> qui, selon lui, équilibre à l'heure actuelle les émissions volcaniques de CO<sub>2</sub>. Tout affaiblissement de ce puits de CO<sub>2</sub> contribue à l'effet de serre.

Ainsi, l'émission de CO<sub>2</sub> par les volcans et l'affaiblissement des deux principaux puits de CO<sub>2</sub>, photosynthèse et altération des roches, peuvent conduire à une situation instable et à une rupture d'équilibre susceptible de déclencher une rapide déglaciation<sup>11</sup>.

L'hypothèse d'une Terre boule de neige est donc concevable : l'entrée en glaciation globale est possible ainsi que la sortie, mais les mécanismes restent à confirmer.

Kirschvink propose alors trois tests à réaliser pour valider l'hypothèse.

### **Hypothèse testable**

Les trois tests nécessaires pour valider l'hypothèse de la Terre boule de neige sont la mise en évidence :

<sup>10</sup> Kirschvink n'utilise pas le terme d'albedo.

<sup>11</sup> Le seuil à atteindre est évalué à 350 fois la teneur en CO<sub>2</sub> actuelle. En se fondant sur le taux actuel d'émissions volcaniques, Walker estime en 1981 que la pCO<sub>2</sub> atteindrait 1 bar en environ 20 Ma. La glaciation aurait duré 10 à 20 Ma.

- d'un synchronisme des formations glaciaires de la fin du Protérozoïque ; des techniques de radiochronologie, paléomagnétiques, paléontologique ou géochimiques devraient pouvoir le tester ; ce sera le dernier test validé ;
- d'une similitude des caractères lithologiques de ces séries réparties partout dans le monde, qui serait le résultat de l'échelle globale de ces fluctuations climatiques ;
- d'indices de l'anoxie des océans ; la présence de glaces flottantes devrait réduire l'évaporation, découpler les courants océaniques du régime des vents et, par l'inhibition des échanges océan-atmosphère, permettre aux eaux profondes de stagner et de devenir anoxiques ; au fil du temps, le fer ferreux émis au niveau des rides médio-océaniques resterait en solution, puis s'oxyderait et précipiterait en une couverture de fer rubané à la fin de la période glaciaire, à la reprise de la circulation des eaux et des échanges gazeux ; de tels dépôts de fer rubané ont déjà été observés dans plusieurs formations glaciaires de la fin du Protérozoïque au Canada, au Brésil, en Australie et en Afrique du Sud ; il y a donc bien eu anoxie des

océans, au moins à certains endroits. Ce troisième test est donc déjà validé.

#### *Et la Vie ?*

En conclusion, Kirschvink rappelle ce que Mawson en 1949, Harland et Martin J.S. Rudwick en 1964 et bien d'autres, avaient souligné, à savoir que cet épisode glaciaire intense marque un tournant majeur dans l'évolution de la Vie. Si la présence de protistes et de procaryotes avait été observée à de nombreuses reprises dans les formations antérieures, la glaciation protérozoïque est suivie par la première trace claire d'animaux métazoaires (la faune d'Ediacara) et, peu après, par la faune minéralisée du Cambrien. Comme Rudwick, il suggère que ces conditions extrêmes en faisant disparaître la quasi-totalité des êtres vivants (mais pas tous), pourraient être à l'origine d'une sélection drastique permettant aux formes de vie survivantes de se diversifier et de s'établir en l'absence de concurrence.

Toutefois, il n'aborde pas la question de la survie des êtres vivants au cours de la période glaciaire

---

#### *Astronomical theories*

- |                           |                                                                          |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1. Solar variation        | Harland (1964a)                                                          |
| 3. Large obliquity        | Williams (1972, 1975), Jenkins (2000),<br>Donnadieu <i>et al.</i> (2002) |
| 5. Ice-ring collapses     | Sheldon (1984)                                                           |
| 13. Impact ejecta         | Bendtsen & Bjerrum (2002), Fawcett &<br>Boslough (2002)                  |
| 4. Giant molecular clouds | Pavlov <i>et al.</i> (2005)                                              |

#### *Oceanographic theories*

- |                        |                                                            |
|------------------------|------------------------------------------------------------|
| 2. Carbonate burial    | Roberts (1971)                                             |
| 7. Ocean stagnation    | Kaufman <i>et al.</i> (1993), Grotzinger & Knoll<br>(1995) |
| 10. Hypsometric effect | Kennedy (1996), Ridgwell <i>et al.</i> (2003)              |
| 11. Organic burial     | Kaufman <i>et al.</i> (1997)                               |

#### *Geodynamic theories*

- |                                |                                                                                                              |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6. Continental<br>distribution | Marshall <i>et al.</i> (1988), Worsley & Kidder<br>(1991), Kirschvink (1992), Schrag <i>et al.</i><br>(2002) |
| 9. Continental break-up        | Eyles (1993), Young (1995a), Donnadieu <i>et al.</i><br>(2004a)                                              |
| 15. Basalt weathering          | Goddéris <i>et al.</i> (2003)                                                                                |
| 16. True polar wander          | Li <i>et al.</i> (2004)                                                                                      |

#### *Biological theories*

- |                               |                                                                                                 |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8. Biocatalysed<br>weathering | Carver & Vardavas (1994), Lenton & Watson<br>(2004), Kennedy <i>et al.</i> (2006)               |
| 12. Methane destruction       | Pavlov <i>et al.</i> (2000, 2003), Catling <i>et al.</i> (2001),<br>Claire <i>et al.</i> (2006) |
| 14. Methane substitution      | Halverson <i>et al.</i> (2002), Schrag <i>et al.</i> (2002)                                     |
- 

Fig. 8. Théories explicatives pour la glaciation néoprotérozoïque (Hoffman, 2011).

Cette hypothèse d'une Terre toute blanche, couverte de glace, image quelque peu frappante, va imprimer un nouvel élan aux recherches sur la période glaciaire néoprotérozoïque, le nombre d'articles annuels ne cessant d'augmenter, les uns cherchant à la valider, les autres au contraire à la réfuter.

### **Validée, l'hypothèse devient théorie : la synthèse de Paul Hoffman**

Nous avons vu que le troisième test suggéré par Kirschvink était déjà validé. Les travaux des années suivantes devront valider, ou non, les deux autres.

De nouvelles théories explicatives de la répartition mondiale des formations glaciaires néoprotérozoïques viennent s'ajouter à celles qui avaient déjà été proposées (voir plus haut et Fig. 8). Les plus en vogue et qui retiennent l'attention, sont les causes géodynamiques avec la rupture des continents proposée par Eyles, Young, Donnadieu *et al.*, responsable de la mise en place d'une grande quantité de basaltes dont l'altération va faire diminuer le réservoir de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Au Néoprotérozoïque, un rift s'établit en position équatoriale sur le supercontinent Rodinia. En Australie, dans des bassins intracontinentaux, deux niveaux nettement séparés de dépôts glaciaires néoprotérozoïques traduisent la présence de calottes glaciaires à l'équateur. La dislocation de Rodinia est donc accompagnée de deux glaciations généralisées successives, l'une pouvant expliquer les deux autres. En effet, lors de la dislocation, un volcanisme intense émet en surface ou dans des bassins peu profonds, de grandes quantités de laves basaltiques. L'altération de ces basaltes, importante en climat intertropical chaud, abaisserait la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique et par conséquent l'effet de serre, ce qui aurait pu amorcer la glaciation. Ces hypothèses ont été testées en 2004 par Donnadieu *et al.*, avec un modèle simplifié de la circulation atmosphérique générale couplé à un modèle du cycle géochimique du carbone. La découverte de la dislocation de Rodinia est donc un argument à l'appui de l'entrée en glaciation.

Dès 1998, Paul Hoffman reprend l'idée de la 'Terre boule de neige' dans une rapide synthèse *A Neoproterozoic Snowball Earth*, accompagnée de ses propres résultats sur les variations

de  $\delta^{13}\text{C}$  inorganique dans une série néoprotérozoïque du nord de la Namibie, et de leur relation avec les glaciations. Deux éléments nouveaux apparaissent dans cette synthèse : la fragmentation d'un supercontinent (BOND *et al.*, 1984) accompagnée d'une glaciation généralisée ; une diminution considérable du  $\delta^{13}\text{C}$  (jusqu'à 14‰) dans les intervalles glaciaires.

Cette synthèse, publiée dans *Science*, eut un grand retentissement et stimula de nombreuses recherches dans les divers secteurs concernés : paléomagnétisme, paléoclimatologie et modélisations climatiques, paléogéographie, géochimie des roches et des océans, radiochronologie, etc.

Hoffman et Daniel A. Schrag actualisent cette synthèse en 2002 dans *The snowball Earth hypothesis : testing the limits of global change*.

Parmi toutes les théories proposées pour expliquer la répartition des dépôts glaciaires néoprotérozoïques, Hoffman et Schrag estiment que celle de la Terre boule de neige est celle qui permet le mieux d'expliquer les données géologiques, géophysiques et géochimiques. Ils réfutent la théorie de la *slushball* (boule de neige fondue) proposée par William T. Hyde en 2000 à partir d'un modèle couplé climat/calottes de glace. Cette théorie, si elle explique la survie des êtres vivants, ne rend pas compte de certaines données géologiques (cap carbonates, fer rubanés). Instable, une *slushball* ne pourrait durer plus de quelques millions d'années.

Hoffman et Schrag listent les arguments essentiels qui valident la théorie de la boule de neige, *snowball*, et présentent les résultats, arguments et contre-arguments proposés par la communauté scientifique pour répondre aux trois tests suggérés par Kirschvink.

### **Test 1 : non validé**

En 2002, la synchronicité des dépôts glaciaires de la fin du Néoprotérozoïque n'est pas encore validée par manque de matériaux adéquats pour une datation radiométrique. Cependant, la stratigraphie isotopique du carbone indique des anomalies de  $\delta^{13}\text{C}$  caractéristiques de toutes les formations glaciaires néoprotérozoïques étudiées. Et surtout, « dans de nombreuses régions, une chute brutale des valeurs de  $\delta^{13}\text{C}$  de 10 à 15‰

précède toute preuve de glaciation ou d'abaissement du niveau de la mer. » (Fig. 9).

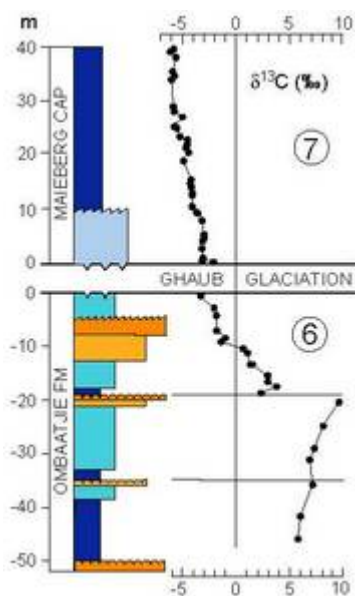


Fig. 9. Coupe composite de la formation glaciaire de Ghaub montrant les données à haute résolution du  $\delta^{13}\text{C}$ . Le  $\delta^{13}\text{C}$  est  $> 5\text{‰}$  avant la glaciation (traduisant la présence de matières organiques dans le carbone enfoui) et  $< 0\text{‰}$  après (absence de matière organique ou flux de carbone inorganique très élevé). Une chute brutale du  $\delta^{13}\text{C}$  se produit à la base de l'avant-dernière paraséquence préglaciaire. Il a été évoqué pour expliquer l'augmentation puis la chute brutale du  $\delta^{13}\text{C}$  avant la glaciation, une libération massive de méthane due à la fonte de pergélisols. L'effet de serre qui s'en est suivi aurait déstabilisé le climat et aurait pu enclencher la glaciation, sans que l'on ne comprenne bien comment. (HOFFMAN *et al.*, 1998).

D'après Hoffman (2002), « *il existe un consensus sur le fait que ces changements isotopiques sont de nature suprarégionale... [marquant] la synchronicité des événements glaciaires dans des régions très différentes (Afrique, Australie, Canada, Europe) ...* ». Ce serait un début de preuve.

### Test 2 : Validé

La plupart des dépôts glaciaires de la fin du Néoprotérozoïque sont recouverts de façon très nette et sans transition, par des strates de carbonates particuliers appelées *cap carbonates* ou carbonates de couverture, indiquant un retour brusque à un climat plus chaud dû à un effet de serre postglaciaire. Ce sont essentiellement des dolomies (*cap dolostone*), rarement des cal-

caires, d'un à quelques dizaines de mètres d'épaisseur et aux caractéristiques sédimentologiques, géochimiques et isotopiques très particulières (HOFFMAN & SCHRAG, 2002). Étroitement associés à l'élévation du niveau de la mer consécutif à la fonte des glaces, marqueurs du passage abrupte des conditions glaciaires à des conditions tropicales à l'échelle globale, ces *cap carbonates* sont la conséquence d'une période 'boule de neige'.

Ils remplissent les conditions posées par Kirschvink pour son second test, des caractères lithologiques particuliers que l'on retrouve dans toutes les séries glaciaires de la fin du Protérozoïque.

### Test 3 : validé

Déjà validé par Kirschvink avec les formations de fer rubanés, Hoffman et Schrag confirment tout en tenant compte des paramètres nécessaires à la formation de fer rubané (anoxie, flux de  $\text{H}_2\text{S}:\text{Fe}(\text{II}) < 2$  pour que tout le  $\text{Fe}(\text{II})$  ne soit pas enfoui sous forme de sulfure  $\text{FeS}_2$ , puis présence d'un oxydant local pour précipiter le fer).

En 2002, deux des tests de Kirschvink sont validés. Reste le premier, celui de la synchronicité des dépôts glaciaires de la fin du Néoprotérozoïque.

Quelques questions sont envisagées : les glaciers s'écouleraient-ils ? l'eau de mer changerait-elle ? les eucaryotes survivraient-ils ? leurs réponses sont des propositions d'explications qui demandent confirmation.

Cet article reçut un accueil mitigé et très critique, certaines indications semblant incohérentes et de nombreux points restant en suspens. Il eut cependant pour effet de stimuler la communauté scientifique.

C'est grâce aux progrès des techniques de radiochronologie et au travail acharné des géologues que les âges des deux glaciations du Cryogénien (deuxième étage du Néoprotérozoïque) ont pu être précisés dans une nouvelle synthèse donnée en 2017, par une équipe internationale de 27 chercheurs conduite par Hoffman.

### **2017 : test 1 enfin validé**

Les datations combinées uranium-plomb et rhénium-osmium entreprises dans les années 2010, ont donné des valeurs très concordantes et permis de bien contraindre les âges d'entrée en glaciation et de sortie de glaciation à  $\pm 0,5$  Ma.

Le Cryogénien est donc marqué par deux glaciations :

- la glaciation sturtienne qui a duré près de 58 Ma, entre -717 et -659 Ma ;
- un interglaciaire très bref, de 10 à 20 Ma ;
- la glaciation marinoenne qui s'installe entre -649 et -639 Ma et se termine autour de -635 Ma.

L'entrée en glaciation sturtienne et les deux sorties de glaciation sont globalement synchrones, ce qui valide le premier test de Kirschvink. Seule l'entrée en glaciation marinoenne est moins bien contrainte.

Depuis plus de 40 ans, les données se sont accumulées et affinées, la connaissance des mécanismes en jeu s'est grandement approfondie. À la géologie de terrain s'est ajoutée la géochimie dont les progrès techniques ont permis de quantifier avec grande précision les isotopes des éléments (C, S, O, B, etc.) dans les roches autorisant le calcul des fractionnements isotopiques si informatifs pour déterminer les flux, les échanges entre les différents compartiments de la Terre, les traces de vie... Les informations fournies sont parfois inattendues, corroborent ou remettent en cause les hypothèses. À cela s'ajoutent les modélisations climatiques qui se sont développées grâce à l'arrivée de l'informatique et le développement de calculateurs surpuissants. Du modèle simple (simplissime ?) de Budyko, on passe à des modèles climatiques complexes couplés ou non avec les océans et/ou les glaces. Ils ont permis de discuter, vérifier les hypothèses avancées. Ils ont été essentiels pour évaluer les circulations atmosphériques sur la Terre boule de neige, le fluage des calottes glaciaires et le cycle hydrologique. Demeure la difficulté de bien contraindre l'ensemble des paramètres à prendre en compte pour avoir un modèle climatique fiable et performant, source de toutes les discussions et éventuelles remises en cause.

Après 40 ans de discussions et de controverse, de désaccords et d'argumentation, un consensus semble avoir été trouvé autour d'un scénario cohérent et probable, au moins dans ses lignes générales, pour ces deux glaciations du Cryogénien.

### **Un scénario possible pour la Terre boule de neige**

En 2017, l'équipe de 27 chercheurs coordonnée par Hoffman propose un scénario bien étayé par un faisceau d'arguments forts, mais encore incertains pour certains points, des suggestions à discuter.

Tout commence il y a 850 Ma, au Cryogénien, alors que l'intensité lumineuse du Soleil est 94% de l'actuelle. Tous les continents sont rassemblés en un supercontinent Rodinia positionné entre 60°N et le pôle Sud, l'essentiel des terres émergées étant en position intertropicale

#### *Le déclenchement de la glaciation sturtienne*

Il y a 800 Ma, le supercontinent Rodinia commence à se fracturer, un rift s'ouvre en position équatoriale, accompagné de grandes provinces ignées.

Les conséquences sont multiples. Les circulations océaniques et le cycle hydrologique sont modifiés. Des zones intracontinentales arides se retrouvent en bordure océanique. Précipitations, ruissellement et températures élevées sur des continents en position intertropicale, favorisent l'altération des roches, en particulier celle des grandes quantités de basaltes émis sur les continents lors du rifting, basaltes dont l'altération consomme huit fois plus de CO<sub>2</sub> que celle des roches granitiques continentales. Par ailleurs, l'installation des rifts océaniques délimite de grands bassins peu profonds et chauds où la photosynthèse est intense.

L'amplification de ces deux grands puits de CO<sub>2</sub> tend à faire baisser l'effet de serre du CO<sub>2</sub> atmosphérique et donc la température du globe. La dislocation de Rodinia est donc responsable d'un climat froid pré-sturtien.

C'est dans ce contexte d'un climat déjà froid qu'il y a environ 720 Ma, une grande province ignée, la Franklin LIP (*Large Igneous Province*), se met en place à l'équateur, en bordure nord de Laurentia dans l'*Artic Canada*, « marge conti-

mentale exposée au vent » (Fig. 10). La Franklin LIP aurait couvert plus de 3 millions de km<sup>2</sup>, ce qui en fait l'une des plus grandes provinces ignées continentales de tous les temps. La synchronicité de la mise en place de la Franklin LIP avec le début de la glaciation (-717 Ma) suggère qu'elle est le déclencheur final de la glaciation,

non seulement par l'altération de cet immense plateau basaltique, mais aussi par l'émission de précurseurs d'aérosols soufrés (SO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>S) dans la stratosphère, augmentant l'albedo (HOFFMAN, 2017). D'après certains modèles, l'englacement aurait été géologiquement instantané (quelque 150 ans à peine !).

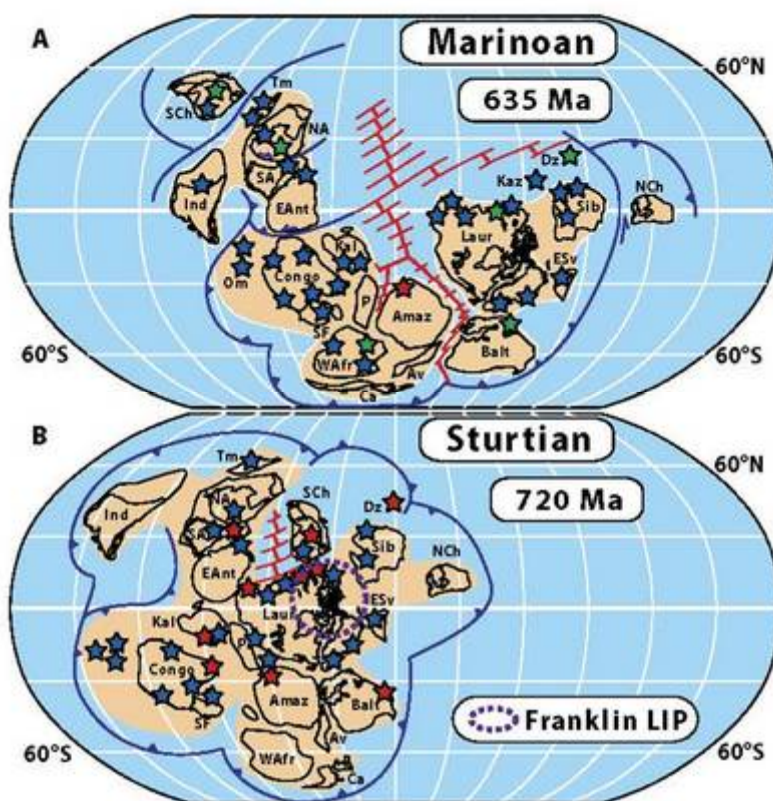


Fig. 10. Paléogéographie du Cryogénien et dislocation de Rodinia du début du Sturtien à 720 Ma (B) à la fin du Marinoen à 635 Ma (A). Lignes rouges : failles transformantes des dorsales océaniques ; lignes bleu foncé avec des barbes : zones de subduction présumées ; étoiles : formations glaciaires (rouges avec du fer synglaciaire, vertes avec barytine dans les *cap dolostones* marinoens). La glaciation cryogénienne coïncide avec la dislocation du palécontinent Rodinia et la mise en place de la Franklin LIP (ligne en pointillé violet) en bordure nord de Laurentia. (HOFFMAN *et al.*, 2017) <http://advances.sciencemag.org>

#### La période « Terre boule de neige »

La Terre boule de neige est-elle totalement couverte de glace ?

On a longtemps pensé que si la Terre était entièrement englacée, le cycle hydrologique serait stoppé. Mais les études ont montré l'existence d'un cycle vigoureux en Australie et en Amérique du Nord durant la « Terre boule de neige ». La sublimation de la glace, à l'équateur en particulier, apporterait de la neige sur les glaciers continentaux. Ainsi, les langues glaciaires

continentales s'écouleraient jusqu'à la mer. L'apport de glace permanente favoriserait l'englacement aux basses latitudes.

Les enregistrements géologiques comme par exemple la présence de dunes soumises aux vents dans le Sud de l'Australie (WILLIAMS, 1998), suggèrent l'existence de zones continentales non englacées, désertiques dont l'analogue actuel seraient les vallées sèches de Mc Murdo en Antarctique où l'on trouve des cyanobactéries et des eucaryotes (diatomées et ciliés).

Océans entièrement couverts de glace, grandes plaines désertiques et vastes couvertures de neige sur les continents avec une forte saisonnalité à toutes les latitudes, circulations atmosphériques intenses, tel est le paysage de la Terre boule de neige.

Et la vie dans tout cela ?

La « Terre boule de neige » est un phénomène essentiellement océanique. Sur les océans, une épaisse couche de glace (des centaines de mètres d'épaisseur) emplit, par gravitation, le moindre espace, interdisant toute surface d'océan libre. Sous une telle épaisseur de glace, seuls des hétérotrophes peuvent survivre, notamment près des fumeurs hydrothermaux

des fonds océaniques. Les conditions favorables aux phototrophes sont les zones hydrothermales et les embouchures dans des zones terrestres libres de glace et de faible albedo. Ce peut être aussi sur la glace, là où il y a de l'eau de fonte, comme dans ces petits trous que l'on peut observer, à l'heure actuelle, sur les calottes glaciaires et où l'on trouve un véritable écosystème. Ils sont dus aux poussières volcaniques noires (des cryoconites) déposées et qui absorbent l'énergie solaire faisant fondre la glace (Fig. 11). Mais encore faut-il que la température ne soit pas trop basse. On peut donc supposer la présence d'écosystèmes fondés sur les cyanobactéries qui auraient pu survivre aussi sur les zones continentales dénudées.



Fig. 11. Surface de glace, chaude, en sublimation avec des trous de cryoconite sur le glacier Canada, Antarctique, latitude 77°37'S, 145 m au-dessus du niveau de la mer. Les poussières (cryoconites) s'accumulent à la surface et forment des amas sombres imprégnés de matière organique qui s'enfoncent à une profondeur d'équilibre, créant des trous contenant de l'eau de fonte en été et recouverts de glace claire sans bulle en hiver. Des cyanobactéries tolérantes au froid excrètent des molécules organiques mucilagineuses et fortement pigmentées. Les trous abritent également des phototrophes et des hétérotrophes eucaryotes, y compris des métazoaires (HOFFMAN *et al.*, 2017) <http://advances.sciencemag.org>

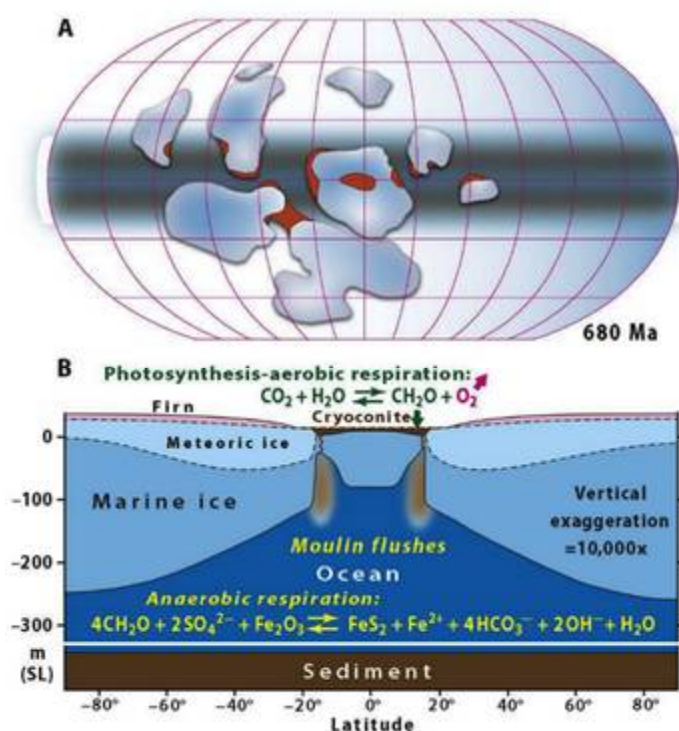


Fig. 12. A. Paléogéographie pendant le Sturtien à 680 Ma. L'accumulation de cryoconites dans la zone d'ablation équatoriale (où se produit la sublimation et où la couche de glace est plus fine) diminue localement l'albedo et favorise la fonte de la glace (zones grises). Les zones continentales brun-rouge indiquent schématiquement les vallées sèches sources de poussières. B. La vidange d'eau de fonte et de cryoconites au niveau des « moulins » permettrait des échanges d'aérosols soufrés, de poussières riches en Fe(III) utilisé par les anaérobies et éventuellement des matières organiques qui pourraient être enfouies. (Hoffman *et al.*, 2017) <http://advances.sciencemag.org>

Pour Hoffman, l'accumulation de cryoconites en zone équatoriale serait à l'origine d'échanges avec les eaux océaniques (Fig. 12).

Parmi les nombreuses propositions avancées, certaines ont une bonne valeur explicative, mais le problème de la survie des espèces durant ces glaciations n'est pas entièrement résolu.

#### *La déglaciation*

Sur une Terre couverte de glace, les deux puits de CO<sub>2</sub>, l'altération des roches et la photosynthèse, s'arrêtent. Mais le volcanisme lié à la dislocation de Rodinia continue. Les poussières volcaniques s'accumulent et diminuent progressivement l'albedo. Le CO<sub>2</sub> émis par les volcans, insoluble dans la neige, s'accumule dans l'atmosphère et l'effet de serre augmente. Au rythme actuel d'émission, la pCO<sub>2</sub> atteindrait 1 bar en seulement 20 Ma.

L'effet de serre considérable qui s'en suit, fait alors fondre la couverture de glace en quelques milliers d'années. Le niveau marin s'élève, avec une grande transgression marine caractérisée par le dépôt des *cap carbonates* si particuliers. La température moyenne serait de l'ordre de 50°C. Après cet épisode extrême, la reprise des circulations marines et des échanges avec l'atmosphère, de l'altération des silicates et de la photosynthèse, abaisse progressivement le niveau de CO<sub>2</sub>.

Ces changements climatiques rapides et intenses ont dû exercer une pression sélective considérable sur les êtres vivants. Les biomarqueurs fossiles comme les stéranes indiquent que les « *algues vertes photosynthétiques [peu présentes avant la glaciation] deviennent les eucaryotes producteurs primaires dominants à la suite de la glaciation cryogénienne.* »

#### *Deux surprises*

Deux surprises sont apparues avec les datations radiochronologiques : la brièveté de l'interglaciaire, à peine 8,6 à 20,3 Ma et la différence entre les deux glaciations sturtienne et marinoenne

La glaciation marinoenne est bien plus brève (4 à 15 Ma) que la glaciation sturtienne (58 Ma). Plusieurs éléments de réponse ont été proposés et sont encore en discussion.

Au début de la glaciation marinoenne, les continents ont une répartition assez différente, ils sont plus dispersés et localisés plutôt dans l'hémisphère sud (Fig. 10). Comme il y a moins de surfaces continentales équatoriales, leur albedo serait légèrement plus faible. D'autre part, les masses continentales sont plus loin des dorsales médio-océaniques dont les produits volcaniques s'épanchent sur les fonds océaniques. L'émission de laves basaltiques sur les continents est donc beaucoup plus faible. De plus, le plateau volcanique de la Franklin LIP a été érodé lors de la glaciation sturtienne. Le puits de CO<sub>2</sub> que représente l'altération des roches est affaibli. Par ailleurs, l'activité tectonique étant plutôt située dans les océans, les altitudes continentales seraient moins élevées ce qui ne favorise pas l'établissement d'une calotte glaciaire.

Et ainsi de suite.

Beaucoup de questions restent sans réponses

#### **Conclusion**

Ainsi, il aura fallu près d'un siècle pour que la théorie d'une glaciation généralisée au Néoproterozoïque soit acceptée. D'abord évoquée de façon sporadique tellement elle était décriée, souvent étouffée, mais revenant comme un serpent de mer à chaque nouvelle découverte, à chaque nouvelle « preuve », preuves géologiques d'abord, puis preuves paléomagnétiques, ce n'est qu'à la fin des années 1980 que l'idée fut prise un peu au sérieux. Les détracteurs ont été nombreux et virulents, remettant en cause l'origine glaciaire des dépôts, les observations et leurs interprétations, la qualité des mesures paléomagnétiques.

Cette théorie était inconcevable dans le contexte de l'époque, il en fallait davantage pour ébranler les sceptiques. Trop de questions fondamentales restaient sans réponse. Comment la Terre pouvait-elle entrer en glaciation généralisée ? comment pouvait-elle en sortir et comment les êtres vivants pouvaient-ils survivre à un tel événement ? Telles étaient les questions essentielles qui se posaient et restaient sans de réponse.

Comme pour la dérive des continents, pas de moteur, pas de dérive ! Pourtant la dérive des

continents était enfin acceptée et la tectonique des plaques lui donnait son sens. Les preuves d'une glaciation au niveau de la mer et aux basses latitudes s'accumulaient, mais tant que l'on n'avait pas de mécanisme plausible, on la réfutait.

Les résultats provenant de différents champs disciplinaires ont donné quelque poids à l'hypothèse de la glaciation généralisée : le paléomagnétisme d'abord a permis de localiser en latitude les dépôts glaciaires et de positionner les continents au Néoprotérozoïque ; les modèles climatiques ont montré que du fait d'un feedback positif de l'albedo, la déstabilisation du système climatique et son emballement rendaient la glaciation possible ; la géochimie ensuite avec une meilleure connaissance de l'altération des roches comme puits de carbone, a offert un mécanisme crédible d'entrée en glaciation, et avec les gaz à effet de serre, un mécanisme de sortie de glaciation ; la radiochronologie a validé le

synchronisme des dépôts. Et, bien sûr, la géologie qui sur le terrain a permis de découvrir ces dépôts glaciaires, d'en étudier les séries et d'échantillonner pour les analyses de laboratoires notamment sur les teneurs isotopiques en divers éléments. Les progrès techniques réalisés depuis quarante ans ont été essentiels pour la compréhension des paramètres climatiques à introduire dans les modèles climatiques. Ceux-ci ont joué un rôle majeur pour tester les hypothèses, pour confirmer ou infirmer le rôle supposé de tel ou tel paramètre.

La théorie de la Terre boule de neige est celle qui rend le mieux compte des données géologiques, géophysiques et géochimiques. Un consensus a été trouvé sur la théorie générale, mais de nombreuses questions de détail demeurent. Le scénario proposé est donc un cadre de recherche, à affiner, améliorer en fonction de nouvelles données. Les discussions ont de l'avenir...

## Bibliographie

- AGASSIZ, L. (1837). Discours prononcé à l'ouverture des séances de la Société Helvétique des Sciences Naturelles, à Neuchâtel, le 24 juillet 1837. *Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles* (22ème session, Neuchâtel, 24–26 juillet 1837), **5**–32.
- BOND, G. C., NICKESON, P. A., KOMINZ, M. A., (1984). Breakup of a supercontinent between 625 Ma and 555 Ma : new evidence and implications for continental histories. *Earth Planet. Sci. Lett.* **70**, p. 325.
- BUDYKO, M. I. (1969). The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*, **21**, p. 611–619.
- CHARPENTIER, J. de (1835). Sur la cause probable du transport des blocs erratiques de la Suisse. *Ann. Mines*, **8**, (3), p. 219-236.
- DONNADIEU, Y., GODDERIS, Y., RAMSTEIN, G., NEDELEC, A. & MEERT, J. (2004). A 'snowball Earth' climate triggered by continental breakup through changes in runoff. *Nature*, **428**, p. 303–306.
- EMBLETON, B. J. J. & WILLIAMS, G. E. (1986). Low latitude of deposition for late Precambrian periglacial varvites in South Australia: implications for palaeoclimatology. *Earth and Planetary Science Letters*, **79**, p.419–430.
- ESMARK, J. (1826). Bidrag til vor jorgklodes historie. *Magazin vor Naturvidenskaberne*, **2**, (1), p. 107-122.
- EYLES, N. (1993). Earth's glacial record and its tectonic setting. *Earth- Science Reviews*, **35**, p. 1–248.
- HARLAND, W. B. (2007, posthume). Origins and assessment of snowball Earth hypotheses. *Geol. Mag.*, **144** (4), p. 633-642.
- HARLAND, W. B. (1964). Critical evidence for a great infra-Cambrian glaciation. *Geologische Rundschau*, **54**, p. 45–61.
- HARLAND, W. B. & BIDGOOD, E. T. (1959). Palaeomagnetism in some Norwegian Sparagmites and the Late Pre-Cambrian ice age. *Nature*, **184**, p. 1860–1862.
- HARLAND, W.B. & RUDWICK, M. J. S. (1964). The great infra-Cambrian ice age. *Scientific American*, August, p. 42–49.
- HOFFMAN P. F. (2011). A History of Neoproterozoic glacial geology, 1871-1997. In : ARNAUD, E., HALVERSON, G. P. & SHIELDS-ZHOU, G. (Ed.): *The Geological Records of*

- Neoproterozoic Glaciations*. : Geological Society, London, p. 17-37.
- HOFFMAN, P. F., KAUFMAN, A. J., HALVERSON, G. P. & SCHRAG, D. P. (1998). A Neoproterozoic snowball Earth. *Science*, **281**, 342–1346.
- HOFFMAN, P. F. & SCHRAG, D. P. (2002). The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, **14**, p. 129–155.
- HOFFMAN, P. F. *et al.*, (2017). Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. *Sci. Adv.* **3**, e1600983.
- HYDE, W. T., CROWLEY, T. J., BAUM, S. K. & PELTIER, W. R. (2000). Neoproterozoic "snowball Earth" simulations with a coupled climate/ice-sheet model. *Nature*, **405**, p. 425-429.
- KIRSCHVINK, J. L. (1992). Late Proterozoic low-latitude glaciation : the snowball Earth. *In* : Schopf, J. W. & Klein, C. (Ed.) : *The Proterozoic Biosphere*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 51-52.
- MAWSON, D. (1949). The Late Precambrian ice age and glacial record of the Bibliando dome. *Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales*, **82**, p. 150–174.
- MAWSON, D. (1950). The Elatina glaciation : a third recurrence of glaciation evidenced in the Adelaide system. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, **73**, p. 117–121.
- REUSCH, H. (1891). Skuringsmærker og morænegrus eftervist i Finnmarken fra en periode meget ældre end 'istiden'. *Norges Geologiske Undersøgelse*, **1**, p. 78–85.
- SCHAER, J-P. (2001). Le rôle d'Agassiz en glaciologie ou la réussite d'un entrepreneur scientifique ambitieux. *Trav. Comite fr. Hist. Geol.*, (3), **15**, p. 77-87.
- SCHERMERHORN, L. J. G. (1974). Late Precambrian mixtites: glacial and/or non-glacial? *American Journal of Science*, **274**, p. 673–824.
- SHELDON, R. P. (1984). Ice-ring origin of the Earth's atmosphere and hydrosphere and late Proterozoic–Cambrian phosphogenesis. *Special Publication, Geological Survey of India*, **17**, p. 17–21.
- VENETZ, I. (1833). Mémoire sur les variations de la temperature dans les Alpes de la Suisse. Rédigé en 1821. *Denkschr. Der allgem. Schweizer. Ges. Für die gesammten Naturwissensch.* **1**, (2), p. 1-38.
- WALKER, J. C. G., HAYS, P.B. & KASTING, J. F. (1981). A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, **86** (C10), p. 9776–9782.
- WILLIAMS, G. E. (1975). Late Precambrian glacial climate and the Earth's obliquity. *Geological Magazine*, **112**, p. 441–544.

