

(NB: This is the English version of the paper, “Quand tous les océans étaient gelés”, which appeared in *La Recherche*, v. 355, pp. 26-30, 2002. The French version with color figures is appended at the end of this PDF file.)

When All of the Oceans Were Frozen

Joseph L. Kirschvink

Department of Earth and Planetary Science

University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Tokyo 113-0033, Japan,
and

Division of Geological & Planetary Science, California Institute of Technology,
Pasadena, CA 91125, USA.

Science is the most fun when it makes things *simple*. And it is at the best when we find a theory that makes many previously-unrelated observations fit together like a puzzle, and which then leads to new predictions and discoveries. During the mid- to late 1960s, Plate-Tectonics did this in grand style for most of the Earth sciences, allowing an entire host of observations from paleontology to petrology to be united within one simple, all-encompassing framework. Although major conceptual advances of this sort are rare, we can still have a lot of fun exploring many aspects of Earth history, and testing novel ideas for unifying and understanding diverse sets of observations. My Snowball Earth theory [1] was an attempt to do this for mysterious glacial deposits in late Precambrian time (between about 730 and 590 million years ago), which were poorly understood, yet clearly preceded the most important diversification of life known on this planet, the Cambrian Explosion. In this brief commentary, I will review the development of this theory, and give my opinion on some of the current issues related to it that are now being debated vigorously.

Two prominent geologists, the Australian Sir Douglas Mawson of the University of Adelaide and independently the British Brian Harland of Cambridge University, were apparently the first to recognize the global extent of these late-Precambrian glaciations in the middle of the 20th Century. Both argued that large ice sheets had reached the tropics, and were thus distinctly different in character than any glaciation during Phanerozoic time (see [2] for a more complete review). Glaciers leave a variety of distinctive fingerprints on the rocks they grind over and in the sediments they deposit, including distinctive sets of parallel scratches on cobbles and pavements, stones dropped from icebergs, poorly-sorted conglomerates where the clasts simply 'float' in a matrix of rock-flour, and so forth. Based on their experience with modern glacial deposits, Mawson and Harland recognized these same fingerprints in many late Precambrian sedimentary deposits, and concluded that they must also have been produced by glacial activity. However, there were also some rather *peculiar* features, such as

the presence of clasts and dropstones which, in many cases, were composed almost entirely of carbonate (limestone and dolomite). These rock types were thought to form primarily in tropical environments, so their association with the glacial units had the startling implication that the Precambrian glaciers had marched over carbonate platforms like those in the Bahamas today. They both realized that glacially-derived rocks of this age were scattered over all of the major continents, implying that the ice age that caused them, if it was a single event, would have dwarfed anything else in Earth history. Two wonderful references on this include a 1964 Scientific American article [3], and an exhaustive monograph on pre-Pleistocene glaciations [4]. As shown on Figure 1, It was subsequently realized that some of these late Precambrian glacial episodes also include the re-appearance of iron-rich mudstones (and even Banded Iron Formations, BIFs), after a gap of more than one billion years in the geological record. Our modern understanding of the distribution of these glacial epochs and more recent constraints on their age suggests that there were 3 or 4 Neoproterozoic glacial events between about 730-590 million years ago [2], and at least one probable snowball event in the Paleoproterozoic at about 2.2-2.3 billion years ago [5, 6].

Although suggestions of Precambrian glacial activity were generally accepted by the geological community, the hypothesis of discrete, synchronous events with glaciers well down into the tropics was challenged severely. Earth's polar ice caps during the Quaternary period never extended closer to the equator than a latitude of about 40° (roughly the level of Chicago and New York City), and the age constraints on the deposits were so poor that no one could be really sure that they represented the same geological events. As the principle of Geological Uniformitarianism held that the 'Present was the Key to the Past', many attempts were made to find less radical solutions to this climatic paradox.

The discovery of Plate Tectonics as the mechanism of continental drift in the late 1960's provided an obvious solution to this dilemma. Part of the argument for low-latitude glaciers was based on the presence of glacial deposits in the (present-day) tropical parts of Africa, South America, and Australia, but if the continents were free to move around, then they might have traveled back and forth between the Equator and the Poles, forming the carbonates while on the Equator and having them ground up by the glaciers when they were at the poles. Huge intervals of geological time were certainly available for this, and, as the age constraints on the glacial units were (and are still somewhat) poor, this was not an implausible scenario to avoid tropical glaciers.

But these hypotheses of wild plate motions could, in fact, be tested with another emerging discipline of geophysics, called paleomagnetism. This technique has the unique ability to measure quantitatively the latitude of deposition of many rocks; this is simply because the magnetic field at the equator tends to be horizontal, while it is vertical at Earth's poles, and at systematically varying angles in between. Early work by Brian Harland on the paleomagnetism of glaciogenic rocks in Greenland and Spitsbergen and by the Belgian Lucien Cahen suggested that they had formed in low latitude [7] and see [2], but the idea was highly controversial, and paleomagnetism was generally regarded as

suspect because so many things could go wrong with it. Several other studies of late Precambrian glacially derived sediments, which initially had suggested low latitude glaciation, had later been shown to be totally remagnetized. Other authors had tried to explain the apparent association of the glacial tillites with low-latitude carbonate by rapid continental drift, moving continents from the equatorial carbonate belts to the poles many times [8]. Other geologists, who were willing to accept the possible reality of low-latitude glaciation, devised elegant scenarios through which glaciers could reach the equator but would avoid freezing the entire planet. In particular, George Williams of the University of Adelaide in Australia has long promoted the idea that the Precambrian Earth may have had a very high orbital obliquity, allowing more solar radiation to fall at Earth's poles rather than at the equator [9]; that this could produce low-latitude glaciers has been disputed hotly [2]. The real problem, however, was the lack of paleomagnetic data that were "bullet-proof", in other words, where it could be shown unambiguously that the low-latitude magnetism preserved in the rock was gained at or close to the time of deposition during a glacial interval.

A second major setback to the low-latitude glacial hypothesis emerged in the late 1960's from the field of computational paleoclimatology. Partially in response to fears of nuclear holocausts during the cold war, numerical models of the global response to severe climatic perturbations were conducted in both the US and the Soviet Union. In particular, Budyko [10] noticed a peculiar instability in the radiative feedback models, in which the earth would freeze completely over if the edge of the polar ice caps ever wandered farther south than a latitude of about 30°. The physical basis of this was rather simple, as the ice was bright and reflective and the solar heat needed to keep the planet warm was simply reflected off into space. In turn, this cooled the planet more, leading to more ice, making it colder, etc., in an unstoppable, positive feedback loop. This 'ice-albedo runaway' effect invariably trapped the computer simulations in what was termed the 'white-earth' solution or the 'ice catastrophe', from which the simulations could never escape. Mean global temperatures were predicted to plummet to about -50°C, with an equilibrium ice thickness between 1.5 km at the Equator and up to 3 km at the poles. As there was no conceivable escape, and Earth is not frozen now, the paleoclimate community assumed that it had never happened; it was considered an imaginary solution to climate models, much like $\sqrt{-1}$, or i , is an imaginary (but useful!) solution to many equations.

The first truly convincing paleomagnetic study indicating low latitude of deposition for a Precambrian glacial sequence was published in 1986 by George Williams and the Australian paleomagnetist Brian Embleton [11]. They studied the varvite member of the Elatina formation in South Australia, and showed that it had an unusually stable remanent magnetization carried by detrital hematite (Fe_2O_3). This mineral has a very high Curie temperature, 680° C, and the authors were able to show that basement rocks in the area had never been heated above ~150° C. Their result suggested that the Elatina formation had been deposited within a few degrees of the equator.

This intriguing observation still lacked one essential ingredient, however, in that there was no direct geological constraint on the age of the magnetism. I

became interested in this problem in 1987 when Bruce Runnegar (of UCLA) was going on a field trip to the Flinders Ranges of Australia, where the Elatina formation is exposed. Bruce collected an oriented hand sample for me and my student (Dawn Sumner), of the varvite member that displayed very clear soft-sediment, small-scale folding features. We were able to show that the magnetism was in fact folded with the bedding laminae, and must therefore have been gained while the sediment was still soft, probably at the time of deposition (Figure 2). This little study, published only as a meeting abstract [12], prompted the Australians to do a full-fledged paleomagnetic fold test on the Elatina formation [13], confirming our result. Subsequent papers have since demonstrated the presence of geomagnetic reversals and a coherent magnetostratigraphy in the Elatina formation, making it one of the best, most reliable directions in the entire paleomagnetic database [14, 15]. Even then, conservative paleomagnetists criticized and tried to ignore this result simply because it implies that glaciers actually did reach the equator! The present data base is far more robust, with a major recent review indicating that the Elatina is not unique any more [16].

Back in 1987, this bullet-proof paleomagnetic result was particularly interesting to members of the Precambrian Paleobiology Research Group that J.W. Schopf and Bruce Runnegar had assembled at UCLA. My role in this project was to try and piece together a paleontologically and geologically realistic set of continental reconstructions for late Precambrian time, based on the best available geological, paleontological, and paleomagnetic data. But an ugly problem kept surfacing, in that large areas of the continents were apparently on the equator during the late Precambrian glaciations [17], which invoked the scenario of a permanent ice catastrophe like that which had been rejected by Budyko and others. At this point, I had an inspiration -- what if the Earth actually had frozen over, going into a state resembling a snowball? Could we really trust the climatic modelers when they asserted that there would be no escape from their ice catastrophe? Models should never be used to exclude observations; models are *supposed* to explain observations! But if it had happened, how did it end? It occurred to me that CO₂ emissions from volcanoes would not stop simply because the oceans had frozen over, and, during a global glaciation, photosynthesis and silicate weathering (the two major methods for removing CO₂ from the atmosphere) and the hydrological cycle would be stopped *cold*. Eventually, enough of this greenhouse gas should accumulate in the atmosphere to end any glacial episode. In thinking about this, I reasoned that the oceans would be cut off from the atmosphere for a long period of time by a thick layer of floating pack ice, but the hydrothermal vents at the oceanic ridge crests would continue to circulate water through the hydrothermal vent systems. After a few million years, all of the oxygen would be removed and reducing metals (principally Fe⁺²) would build up in solution. When the ice eventually did melt, the iron should react with oxygen in the atmosphere and produce banded iron formations once again, as is observed (Figure 1). It was a thrill to realize that I could explain the otherwise mysterious association of low-latitude paleomagnetic data, the strange clast compositions, and the presence of these BIFs with one hypothesis. I named this concept, "Snowball Earth" [1], to distinguish it from the

white Earth solutions dismissed as 'imaginary' by climate modelers, and to emphasize the point that it was a testable hypothesis.

However, the scenario was still incomplete. In particular, I had only a vague estimate of the concentration of CO₂ which would be needed to end the snowball state. In 1992, Jim Kasting of the University of Pennsylvania, another participant in the PPRG project, calculated that this would require CO₂ concentrations of about 0.12 bar (or about 400 times the present level). This value is comparable to the accumulation in the atmosphere expected from several million years of volcanic out-gassing. To this point, we really had not worried about the possible consequences of such high CO₂ concentrations. When Paul Hoffman and colleagues at Harvard realized that the ~0.12 bar of atmospheric CO₂ needed to escape a Snowball-Earth episode would eventually be dumped out as carbonate, removing it from the climate system and leaving a volcanic fingerprint in the ¹³C/¹²C isotope ratios[18], it struck me as a very good idea. It is something that I should have thought of! However, the association of many Neoproterozoic glacial units with a peculiar type of carbonate sequence overlying them, now termed "cap-carbonates", was not widely appreciated in the late 1980s, nor was the regularity of the carbon isotope drop across these horizons known.

The paper by Hoffman and colleagues prompted us to take a closer look at the earlier Paleoproterozoic Snowball event in South Africa[5, 6], to see if there were any peculiar post-glacial sedimentary features associated with it. Indeed, although BIFs were deposited both before and after the glacial sediments (typical for that time, as seen in Fig. 1), immediately above the Snowball-related units there is a truly unique deposit – the Kalahari Manganese field – a bedded unit of Mn oxides nearly 50 m thick, representing 80% of the world's accessible economic reserves of this element! We also realized that the only other known sedimentary manganese units are associated with the Neoproterozoic BIFs; again, intimately associated with low-latitude glaciation. Mn⁺² is also a common element in the deep-sea hydrothermal vent fluids, but its electrochemical deposition from seawater requires molecular oxygen, and lots of it. The only possible source for this amount of oxygen is photosystem II. The Kalahari deposit is actually the oldest direct constraint on the presence of free oxygen in our atmosphere, and we think that the evolution of this photosynthetic pathway may have triggered this first Snowball glaciation by destroying a previous methane-dominated greenhouse. A novel and energetically efficient evolutionary innovation like this, which combines two separate photosynthetic pathways into one organism, should have taken over the world in a geological instant [19].

This recent interest in the problem of low-latitude glaciation has also prompted some climate modelers to re-examine the problem, and to use more realistic methods to simulate Snowball-like events, including initiation. One surprising result [20] was the identification of a quasi-stable solution in which significant areas of the equatorial oceans could remain ice free, while virtually all of the continental masses of low latitudes would be fully glaciated with an active

hydrological cycle. This "soft-snowball" or "slush-ball" solution pleased many geobiologists, who were concerned that the hard-snowball solution would kill off many of the animal phyla which had supposedly formed (according to molecular-clock analyses) up to several hundred million years before the glacial events[21]. The high levels of environmental CO₂ (~0.12 bar) predicted at the termination of a snowball event would be poisonous to almost any animal that used the family of globin proteins (like hemoglobin, myoglobin, etc.) for oxygen transport.

Table 1 shows a summary of the various geological observations mentioned above, as well as my subjective opinion as to whether or not these observations are accounted for by the various alternative hypotheses. I include in this table an additional observation discussed recently by Condon et al. [22], who suggest that some of the glacially-related sediments had materials dumped from free-floating icebergs (called glacial rainout intervals), which might preclude completely ice-covered oceans. No model is 100 % satisfactory at present, but it seems clear that the Phanerozoic-style glaciations can only account for this last observation. The high-obliquity model[9] can at best only account for the low-latitude tillites (but see [2]), and perhaps the rainout deposits (depending upon whether the low-latitude oceans would be frozen over on a high-obliquity Earth). The slush-ball model would account for the low-latitude glacial deposits, the abundant carbonate clasts, and the rain-out intervals, but would not provide an explanation for the banded iron formations, the Mn, or the cap-carbonates, all of which seem to require a smothered ocean. The slushball also does not yet provide a good mechanism to escape from the intense glacial state.

In closing, I suspect that a more complex scenario may be closer to the actual truth than any of the discrete models shown on Table 1. All of the observations would be accounted for by an initial, perhaps Phanerozoic-style glacial interval which then collapsed into a prolonged slushball state, which is then terminated by a hard-Snowball event. Although this would imply that life survived the hard Snowball, given the expected abundance of terrestrial hydrothermal spring systems this should not be too difficult, particularly for Protoctists. I suspect rather strongly that the actual radiation of the animal phyla did not happen until after the last intense glacial episode at 590 million years ago, and that proper calibration of the molecular clock (including correction for episodes of intense biological speciation during the Cambrian) will bring these estimates more in line with the actual fossil record. Only a few jellyfish-like impressions have been found prior to this last Snowball, and there are yet no firm links between these and the diverse Ediacara fauna which appear only after the glaciation.

Acknowledgements:

I thank the NASA Astrobiology Institute and the NSF for support of this work, Paul Hoffman and David Evans for critical comments, and Fabienne Lemarchand for the French translation.

Table 1. Proterozoic Glacial Characteristics and Hypotheses to explain them

	Hard Snowball	'SlushBall'	High-Obliquity	Phanerozoic-style
Abundant carbonate clasts in tills	Yes	Yes	No?	No?
Low-latitude tillite deposition	Yes	Yes	Yes?	No
Association with vent-derived BIFs	Yes	No	No	No
Association with BIF-hosted Mn deposits	Yes	No	No	No
Presence of cap carbonates	Yes	No	No	No
Negative $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ excursions	Yes	Yes?	No?	No
Glacial rain-out intervals	No?	Yes	Yes?	Yes

Figure 1 – Time distribution of Banded Iron Formations and major glacial events, adapted from Beukes et al. [23].

Figure 2 - The sample of the Elatina Formation varvite member which yielded the first convincing paleomagnetic test of the low-latitude nature of the late Precambrian glaciations[12].

Web Resources:

Paul Hoffman's Snowball Earth page at Harvard:

http://www-eps.harvard.edu/people/faculty/hoffman/snowball_paper.html

BBC Horizon Snowball Earth:

<http://www.bbc.co.uk/science/horizon/snowballearth.shtml>

References:

1. Kirschvink, J.L., *Late Proterozoic Low-Latitude Global Glaciation: The Snowball Earth; Section 2.3*, in *The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study.*, D. Des Maris, Editor. 1992, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. p. 51-52.
2. Hoffman, P.F. and D.P. Schrag, *The snowball Earth Hypothesis: testing the limits of global change*. Terra Nova, 2002. **in press**.
3. Harland, W.B. and M.J.S. Rudwick, *The Great Infra-Cambrian Glaciation*. Scientific American, 1964. **211**(2): p. 28-36.

4. Hambrey, M.J. and W.B. Harland, *Earth's pre-Pleistocene glacial record*. 1981, Cambridge, United Kingdom (GBR): Cambridge Univ. Press,.
5. Evans, D.A., N.J. Beukes, and J.L. Kirschvink, *Low-latitude glaciation in the Palaeoproterozoic era*. *Nature*, 1997. **386**(6622): p. 262-266.
6. Kirschvink, J.L., et al., *Paleoproterozoic snowball Earth: Extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2000. **97**(4): p. 1400-1405.
7. Bidgood, D.E.T. and W.B. Harland, *Palaeomagnetism in some East Greenland sedimentary rocks*. *Nature (London)*, 1961. **189**(4765): p. 633-634.
8. McElhinny, M.W., J.W. Giddings, and B.J.J. Embleton, *Palaeomagnetic results and late Precambrian glaciations*. *Nature*, 1974. **248**(5449): p. 557-561.
9. Williams, G.E., *History of the Earth's Obliquity*. *Earth-Science Reviews*, 1993. **34**(1): p. 1-45.
10. Budyko, M.I., *The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth*. *Tellus*, 1969. **21**: p. 611-619.
11. Embleton, B.J.J. and G.E. Williams, *Low Paleolatitude of Deposition for Late Precambrian Periglacial Varvites in South-Australia - Implications for Paleoclimatology*. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986. **79**(3-4): p. 419-430.
12. Sumner, D.Y., J.L. Kirschvink, and B.N. Runnegar, *Soft-sediment paleomagnetic field tests of late Precambrian glaciogenic sediments*. *EOS, Trans. American Geophysical Union*, 1987. **68**(44): p. 1251.
13. Schmidt, P.W., G.E. Williams, and B.J.J. Embleton, *Low Paleolatitude of Late Proterozoic Glaciation - Early Timing of Remanence in Hematite of the Elatina Formation, South- Australia*. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991. **105**(4): p. 355-367.
14. Schmidt, P.W. and G.E. Williams, *The Neoproterozoic Climatic Paradox - Equatorial Paleolatitude for Marinoan Glaciation near Sea-Level in South Australia*. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995. **134**(1-2): p. 107-124.
15. Sohl, L.E., N. Christie-Blick, and D.V. Kent, *Paleomagnetic polarity reversals in Marinoan (ca. 600 Ma) glacial deposits of Australia: Implications for the duration of low-latitude glaciation in neoproterozoic time*. *Geological Society of America Bulletin*, 1999. **111**(8): p. 1120-1139.
16. Evans, D.A.D., *Stratigraphic, geochronological, and paleomagnetic constraints upon the neoproterozoic climatic paradox*. *American Journal of Science*, 2000. **300**(5): p. 347-433.
17. Kirschvink, J.L., *A Paleogeographic Model for Vendian and Cambrian Time. Chapter XII in: The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study.*, D. Des Maris, Editor. 1992, Cambridge University Press: Cambridge, U.K. p. 567-581.
18. Hoffman, P.F., et al., *A Neoproterozoic snowball earth*. *Science*, 1998. **281**(5381): p. 1342-1346.
19. Kirschvink, J.L. and B.P. Weiss, *Mars, Panspermia, and the Origin of Life: Where did it all begin?* *Palaeontologia Electronica*, 2002. **4**(2): p. editorial 2:8p.
20. Hyde, W.T., et al., *Neoproterozoic 'snowball Earth' simulations with a coupled climate/ice-sheet model*. *Nature*, 2000. **405**(6785): p. 425-429.

21. Runnegar, B., *Loophole for snowball earth*. Nature, 2000. **405**(6785): p. 403-404.
22. Condon, D.J., A.R. Prave, and D.I. Benn, *Neoproterozoic glacial-rainout intervals: Observations and implications*. Geology, 2002. **30**(1): p. 35-38.
23. Beukes, N.J. and C. Klein, *4.3 Models for Iron-Formation Deposition*, in *The Proterozoic Biosphere: A multidisciplinary study*, C. Klein, Editor. 1992, Cambridge University Press: New York. p. 147-152.

Quand tous les océans étaient gelés

A la veille de l'ère Primaire, Il y a quelque 600 millions d'années, la Terre aurait été entièrement gelée au moins à cinq reprises. Chaque fois, les glaces auraient fondu à la faveur d'un réchauffement par effet de serre. Emise voici dix ans, l'hypothèse reste controversée. Mais les indices se multiplient...

Joseph L. Kirschvink

est géobiologiste. Il travaille à l'université de Tokyo et au California Institute of Technology, à Pasadena.

Il faut attendre le XX^e siècle pour que les géologues admettent l'existence de glaciations précambriennes

La science devient amusante lorsqu'elle permet de simplifier les choses. Le summum étant d'imaginer une théorie qui rende compte d'une multitude d'observations sans dépendance mutuelle apparente. Ce fut le cas de la théorie de la tectonique des plaques qui, dans les années 1960, permit de réunir des observations paléontologiques, pétrographiques, géophysiques, etc., en un seul et même concept unificateur. De telles avancées conceptuelles sont rares. Mais de nombreux aspects obscurs de l'histoire de

la Terre laissent encore le champ libre à de nouvelles hypothèses. Ainsi, en 1992, j'ai émis l'idée d'une « Terre boule de neige », c'est-à-dire d'une Terre entièrement gelée, pour résoudre l'énigme des dépôts glaciaires de la fin du Précambrien*, la période qui précède la fameuse « explosion cambrienne » pendant laquelle la plupart des lignées animales sont apparues⁽¹⁾. Dix ans après, cette idée provocatrice est toujours l'objet de violents débats.

L'existence de glaciations précambriennes est restée longtemps ignorée. L'Australien Sir Douglas Mawson, de l'université d'Adélaïde, et le Britannique Brian Harland, de l'université de Cambridge, furent les premiers, au milieu du XX^e siècle, à reconnaître leur ampleur exceptionnelle. Indépendamment l'un de l'autre, ces deux éminents géologues avaient repéré dans de nombreux ensembles sédimentaires de l'époque les traces d'anciens glaciers : stries parallèles gravées sur les roches par l'écoulement des glaces, cailloux abandonnés par des icebergs, etc. Plus étrange, D. Mawson et B. Harland avaient trouvé, mélangés aux débris glaciaires, des frag-

ments de roches composées de carbonates de calcium (calcaires) ou de magnésium (dolomites), lesquelles se forment dans les eaux chaudes tropicales. Les glaciers précambriens s'étaient apparemment écoulés sur des plateaux carbonatés comme ceux qui entourent les Bahamas aujourd'hui. Le refroidissement était donc survenu immédiatement après un épisode chaud. Autre observation déroutante : ces dépôts glaciaires se retrouvaient en de nombreux points de la planète, y compris sous les tropiques⁽²⁾ ! Les deux hommes en déduisirent que la glaciation qui les avait engendrés, si elle était unique, avait sans doute été d'une ampleur exceptionnelle, jamais égalée dans l'histoire de la Terre⁽⁵⁾. Les américains Cornelis Klein et Nic Beukes s'aperçurent quelques années plus tard que les glaciations précambriennes coïncidaient aussi avec la réapparition de dépôts d'argiles très riches en fer (les BIF, pour *Banded Iron Formations*) qui avaient disparu depuis plus d'un milliard d'années (fig. 1). Or, leur formation suppose un océan privé d'oxygène. Depuis lors, les observations se sont affinées, et nous pensons aujourd'hui que trois ou quatre événements « Boule de neige » se sont succédé au Néoprotérozoïque*, entre 730 et 590 millions d'années⁽²⁾ et qu'un autre au moins a sévi au Paléoprotérozoïque*, il y a 2,2 ou 2,3 milliards d'années^(4,5).

Valse des continents. Si l'idée de glaciations précambriennes est généralement acceptée par les géologues, l'hypothèse d'événements synchrones, discrets, au cours desquels les glaces seraient descendues jusque sous les Tropiques, est toujours âprement discutée. Les datations restent peu nombreuses. Il est donc difficile d'être certain que les dépôts glaciaires témoignent bien des mêmes événements géologiques. En outre, au Quaternaire, les calottes glaciaires ne sont jamais allées en deçà de 40° de latitude (à peu près au niveau de Chicago et de New York). Au nom du précepte géologique qui veut que « le présent est la clé du passé », les scientifiques ont cherché des solutions moins radicales à ce paradoxe climatique.

Dans les années 1960, la nouvelle théorie de la tectonique des plaques leur offrit une explication évi-

En deux mots

La présence de dépôts glaciaires jusque sous les Tropiques, l'orientation du champ magnétique passé et l'existence d'argiles riches en fer en de nombreux points de la planète suggèrent que la Terre fut, dans sa jeunesse, et, au moins à cinq reprises, complètement couverte de glaces. Mais en s'accumulant dans l'atmosphère, le gaz carbonique émis par les volcans aurait provoqué un effet de serre exceptionnel et, par conséquent, la fonte rapide des glaces. C'est l'amélioration du climat après 590 millions d'années qui aurait favorisé l'émergence des premières lignées animales et la fameuse « explosion cambrienne ».



Des mers tropicales précambriennes coïncées sous plusieurs centaines de mètres de glace ? Et des pôles (ici, l'Antarctique) sous plusieurs milliers de mètres ? L'hypothèse, pourtant séduisante, n'est toujours pas admise par la communauté scientifique. © Wisniewski W./Foton Bios

* Le **Précambrien** s'étend de la formation de la Terre, il y a 4,55 milliards d'années à environ 543 millions d'années.

* Le **Protérozoïque** est le dernier étage du Précambrien. Il couvre la période de l'histoire de la Terre qui va de 2,5 milliards d'années à environ 543 millions d'années. Il se subdivise à son tour en **Paléo-protérozoïque** (2,5 à 1,6 milliard d'années), **Mésoproterozoïque** (1,6 milliard à 900 millions d'années) et **Néo-protérozoïque** (900 à 543 millions d'années).

* **L'obliquité** est l'angle que fait l'axe de la Terre avec l'écliptique. C'est elle qui module la quantité d'ensoleillement reçue aux différentes latitudes suivant les saisons.

dente: carbonates et dépôts glaciaires résultaient tout simplement du mouvement passé des continents. Les premiers s'étaient formés alors que les masses continentales étaient à l'équateur, et les seconds lorsqu'elles s'étaient rapprochées des pôles. Faute de datations, le scénario ne semblait pas impossible. Il permettait en tout cas d'éviter les glaciers tropicaux. Encore fallait-il trouver les preuves de ces déplacements anciens. L'étude du champ magnétique passé (ou « paléomagnétisme »), bien que balbutiante, était à ce titre riche de promesses. Les géophysiciens s'étaient aperçus que certains minéraux (comme la magnétite ou l'hématite) acquièrent, au moment de leur formation, une aimantation dont la direction et le sens sont ceux du champ magnétique ambiant. Or, celui-ci varie avec la latitude : il est pratiquement horizontal à l'équateur et vertical aux pôles. En mesurant le champ magnétique des roches anciennes, il était possible de retrouver la latitude à laquelle elles s'étaient formées. Et donc de reconstituer le cheminement des continents.

Les premiers résultats que Brian Harland obtint en 1961 étaient en faveur d'une glaciation tropicale: les échantillons prélevés au Groenland et au Spitzberg exhibaient en effet un champ magnétique presque horizontal, typique des basses latitudes. Le Belge Lucien Cahen obtint des résultats similaires peu de

temps après. Mais cette conclusion déclencha une vive polémique. Pouvait-on se fier à une technique qui, à plusieurs reprises, avait été mise en défaut ? Maintes fois, il était apparu que le magnétisme mesuré n'était pas d'origine et qu'il avait été acquis postérieurement alors que la roche avait été chauffée. Et sans mesures paléomagnétiques sur les dépôts glaciaires eux-mêmes, impossible d'exclure l'existence de dérives continentales rapides entre l'équateur et les pôles.

Moins de soleil. D'autres scénarios furent proposés dans lesquels les glaciers pouvaient atteindre l'équateur sans pour autant que la Terre soit complètement gelée. Par exemple, George Williams, de l'université d'Adélaïde, défendit l'idée selon laquelle l'obliquité* de la Terre était plus forte au Précambrien qu'elle ne l'est aujourd'hui. En conséquence, les régions équatoriales recevaient moins d'ensoleillement que les pôles. Que cela ait pu engendrer des glaciers aux basses latitudes fut très chaudement discuté⁽²⁾.

L'hypothèse d'une glaciation tropicale n'était pas non plus admise par les modélisateurs du climat. A la fin des années 1960, en pleine guerre froide, planait la menace d'un holocauste nucléaire et, avec elle, celle d'un bouleversement du climat planétaire. Des modèles numériques furent donc développés

Dans les premiers modèles, faute d'un mécanisme connu pour sortir de la catastrophe glaciaire, le Globe gelé ne fondait jamais !

*Le **bilan radiatif** est la différence entre le rayonnement reçu et celui réémis par la Terre.

*La **photosynthèse** est l'ensemble des réactions par lesquelles les plantes fabriquent les sucres nécessaires à leur croissance à partir du gaz carbonique et de l'eau grâce à l'énergie lumineuse absorbée par la chlorophylle.

*Lorsque les **roches silicatées** se dégradent, le CO₂ est converti en ions carbonates qui, entraînés vers les océans, vont se combiner à des ions calcium et magnésium pour former des sédiments carbonatés. Le carbone est alors stocké dans les carbonates.

aux États-Unis et en Union soviétique afin d'en prévoir les effets. C'est dans ce contexte que le Russe Mikhaïl Budyko développa un modèle de bilan radiatif*. Ses résultats étaient surprenants : la Terre gelaient entièrement dès que les calottes glaciaires atteignaient 30° de latitude⁽⁶⁾. La raison en est purement physique. La glace, blanche et brillante, réfléchit fortement le rayonnement solaire. De ce fait, la quantité d'énergie solaire absorbée par la surface terrestre diminue, le refroidissement initial s'intensifie et la couverture de glace s'épaissit. Avec ce mécanisme, appelé « rétroaction de l'albédo des glaces », la Terre ne cesse de se refroidir et la glace d'avancer dans un cycle sans fin. D'après les calculs de Budyko, les températures pouvaient ainsi descendre jusqu'à environ -50°C et la glace s'accumuler sur 1,5 km d'épaisseur à l'équateur et sur 3 km aux pôles ! Cependant, le Globe gelé de Budyko ne revenait jamais à la normale. Comme aucun mécanisme connu ne pouvait le sortir de cette catastrophe glaciaire et que la Terre n'est plus gelée, les paléoclimatologues en déduisirent qu'un tel scénario ne s'était jamais déroulé : il fut considéré comme une solution imaginaire pour les modèles climatiques...

Magnétisme originel. Il fallut attendre près de vingt ans pour que l'hypothèse de glaciations tropicales revienne sur le devant de la scène. En 1986, les Australiens George Williams et Brian Embleton publièrent la première étude paléomagnétique vraiment convaincante : ils montrèrent que l'aimantation des fines couches glaciaires d'Elatina, au sud de l'Australie, était fossilisée dans des grains d'origine sédimentaire et qu'elle n'avait jamais été perturbée par des processus thermiques⁽⁷⁾. Or, cette aimantation était... « équatoriale ». Ils étaient à deux doigts de

prouver définitivement la présence de glaciers aux basses latitudes. Mais il manquait encore un élément essentiel : le moment exact où ce magnétisme avait été acquis.

Regroupement équatorial. C'est à cette époque que je suis entré en scène. En 1987, Bruce Runnegar, de l'université de Californie, à Los Angeles, était allé en Australie, sur le site d'Elatina, et avait collecté pour moi étudiant et moi-même un bel échantillon. Les lits de sédiments y étaient bien visibles, de même que les plissements qui les affectaient (fig. 2). Nous avons montré que le magnétisme avait été acquis avant que les sédiments ne soient plissés, lorsqu'ils étaient encore mous, vraisemblablement au moment de leur dépôt. La preuve tant recherchée était là, sous nos yeux. Cette petite étude, qui fit l'objet d'un résumé dans les actes d'un colloque⁽⁸⁾, stimula les Australiens qui se lancèrent dans l'analyse complète du paléomagnétisme d'Elatina⁽⁹⁾. Nos premiers résultats furent confirmés. Mais la polémique se poursuivit. De nombreux géologues refusaient toujours l'idée de glaciers tropicaux. Cependant, Elatina n'était pas unique en son genre, et d'autres enregistrements allaient bientôt révéler des faits semblables⁽¹⁰⁾.

Mais revenons en 1987. Je faisais alors partie du groupe de recherche sur la paléobiologie du Précambrien (PPRG) que J. William Schopf et Bruce Runnegar venaient de créer à l'université de Californie, à Los Angeles. J'étais chargé de rassembler les données disponibles en paléontologie, géologie et géomagnétisme, afin de reconstituer le déplacement des continents à la fin du Précambrien. Ce faisant, je m'aperçus que de larges zones continentales se trouvaient à l'équateur lors des glaciations⁽¹¹⁾ (fig. 3). Finalement, le scénario prédit et rejeté par Mikhaïl Budyko était-il possible ? J'imaginai alors la Terre, complètement

La baleine, cousine du mouton

Epilogue de cinquante ans de controverses sur la famille originelle des ancêtres terrestres de nos cétacés aquatiques. Deux squelettes datant du début du tertiaire, découverts au cours de l'été 2001 au Pakistan, ont permis de trancher : nos cétacés, tels que la baleine, le dauphin ou le marsouin, descendent bien des artiodactyles, groupe constitué d'ongulés herbivores au nombre impair d'orteils, qui compte parmi leurs descendants les hippopotames, les vaches et les moutons.

Cette filiation avait la faveur des biologistes moléculaires, mais elle était dénoncée par les paléontologues qui, à partir de correspondances morphologiques sur les dents et les oreilles, postulaient que nos cétacés étaient apparentés au groupe des mésochyniens, ongulés carnivores du début de l'époque tertiaire dont il n'existe plus de descendant.

Les squelettes d'*Ichthyolestes* et *Pakicetus* découverts au Pakistan par l'équipe de Johannes Thewissen, de l'université Northeastern dans l'Ohio, présentent le mérite d'être, pour la première fois, quasiment complets, et d'être pourvus d'un petit os des chevilles, l'astragale. A l'origine d'une grande mobilité du pied, celui-ci apporte la preuve que les ancêtres de nos cétacés étaient d'intrépides coureurs terrestres. « C'est l'une des découvertes les plus importantes du XX^e siècle en paléontologie des vertébrés, estime Christian de Muizon, du Muséum national d'histoire naturelle de Paris. Comme l'Archéoptéryx pour les oiseaux ou l'Australopithèque pour l'homme, *Pakicetus* constitue un élément clé dans l'évolution des espèces. »

Quant au plus proche parent actuel des cétacés, la question reste posée. Est-ce l'hippopotame, comme le pensent les biologistes moléculaires ? L'étude morphologique faite par l'équipe de J. Thewissen ne permet pas de trancher.

E. B.

J.G.M. Thewissen et al., *Nature*, 413, 277, 2002 / F. Spoor et al., *Nature*, 417, 163, 2002.



Pakicetus

© Illustration Carl Buell



Balaenoptera acutorostrata

© Nachoum/Photoceans

gelée, ressemblant à une énorme boule de neige. N'y avait-il vraiment aucun moyen de sortir d'une telle catastrophe glaciaire? Les modèles sont censés expliquer les observations, pas les exclure! Il me vint à l'esprit qu'une glaciation, même globale, n'avait pu empêcher les volcans de fonctionner et de rejeter du gaz carbonique. En temps normal, ces émissions sont compensées à la fois par la photosynthèse* et par l'érosion des roches silicatées* qui jouent le rôle de pompe à carbone. Mais dans le cas d'une Terre entièrement gelée, le cycle hydrologique aurait été inter-

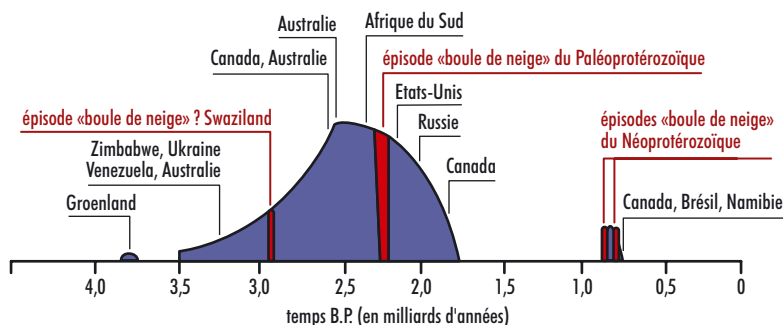


Figure 1. Distribution des dépôts d'argiles très riches en fer (BIF pour Banded Iron Formations) et des principaux épisodes glaciaires. (D'après Beukes et al.)

rompu, et le gaz carbonique se serait accumulé dans l'atmosphère. Résultat, la surface de la Terre se serait réchauffée par effet de serre, la glace aurait fondu, mettant fin à la glaciation.

L'hypothèse était séduisante. En outre, elle expliquait les dépôts riches en fer, les fameux BIF dont nous avons déjà parlé. Le carcan de glace bloquait les échanges entre l'océan et l'atmosphère. Mais en profondeur les cheminées hydrothermales continuaient à fonctionner : l'eau de mer circulait à l'intérieur de la croûte océanique, se réchauffant au contact du magma avant de remonter sous forme d'eau chaude chargée d'éléments métalliques (dont le fer) lessivés des roches traversées. Lorsque la glace a fondu, les échanges avec l'atmosphère ont repris et l'eau s'est réoxygénée. Le fer a réagi avec l'oxygène (il est insoluble en présence d'oxygène) et a précipité massivement sur le fond de l'océan (fig. 1). Les dépôts riches en fer plus anciens ont dû se former lorsque les océans et l'atmosphère renfermaient peu d'oxygène.

Mon émotion était à son comble. Petit à petit, les pièces du puzzle s'agençaient : le magnétisme fossile, l'étrange composition des blocs de roches détritiques retrouvés dans les dépôts glaciaires et les BIF pouvaient s'expliquer par un seul et même concept que je baptisais « Snowball Earth » ou « Terre boule de neige⁽¹⁾ », pour le distinguer de celui de « Terre blanche » des modélisateurs et pour souligner qu'il s'agissait d'une hypothèse testable.

Mais, en cette fin des années 1980, le scénario était encore incomplet. En particulier, j'ignorais quelles

teneurs en gaz carbonique permettaient de sortir de l'événement boule de neige. En 1992, Jim Kasting, de l'université de Pennsylvanie, qui faisait également partie du PPRG, calcula qu'il fallait une pression partielle en CO₂ de 0,12 bar (soit environ 400 fois plus qu'actuellement). Cette valeur était compatible avec une accumulation du gaz dans l'atmosphère pendant plusieurs millions d'années par dégazage volcanique. A l'époque, nous ne nous étions pas vraiment inquiétés des conséquences possibles de telles concentrations. On sait aujourd'hui que cet excès de gaz carbonique fut immédiatement éliminé et précipité sous forme de carbonates. Dès la fin des années 1980, les géologues avaient constaté que d'épaisses séquences de carbonates coiffaient les dépôts glaciaires néoproterozoïques. En 1998, Paul Hoffman et Daniel Schrag, de Harvard, montrèrent que les carbonates de Namibie s'étaient probablement déposés, alors que la température globale était de 50°C. Et qu'ils avaient les mêmes rapports isotopiques que le carbone émis par les volcans⁽¹²⁾.

Le manganèse issu du dégel. Quoi qu'il en soit, les travaux de Hoffman et de ses collègues suscitèrent encore plus notre intérêt. Il fallait regarder de plus près le premier événement Boule de neige, celui du Paléoproterozoïque. Des calculs similaires démontrèrent qu'il avait fallu une pression de CO₂ d'environ 0,6 bar (près de 2000 fois le niveau actuel) pour sortir de cet événement qui avait duré environ 70 millions d'années! Nous nous sommes donc rendus en Afrique du Sud pour y chercher d'éventuels indices d'un dégel rapide^(4,5). Là, juste au-dessus des dépôts glaciaires et des BIF, nous avons découvert une couche d'oxydes de manganèse épais d'une cinquantaine de mètres. Connue sous le nom de « Kalahari Manganese Field », elle représente 80% des réserves mondiales de ce métal! Nous avons réalisé à ce moment-là que tous les autres dépôts de manganèse d'origine sédimentaire connus étaient également associés aux BIF néoproterozoïques et donc à la présence de glace sous les Tropiques. Le cation

Les dépôts de fer et de manganèse résultent de la réoxygénation des océans, et donc du dégel brutal de la planète

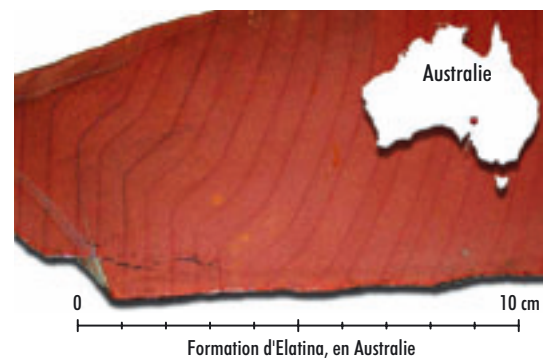


Figure 2. L'analyse du champ magnétique passé des dépôts glaciaires d'Elatina, en Australie, a fourni la première preuve convaincante en faveur d'une « Terre boule de neige ». Elle montre en effet que les glaciers avaient atteint l'équateur.

La Recherche a publié :
(1) Hélène Le Meur,
 « Le Globe terrestre
 en boule de neige »,
 septembre 2000.

Un bilan en faveur d'une Terre gelée

J'ai résumé dans ce tableau les observations géologiques mentionnées dans le texte et donné mon avis (subjectif !) sur le fait qu'elles sont ou non expliquées par les différentes hypothèses. L'hypothèse d'une modification de l'obliquité de la Terre ne rend compte que des dépôts glaciaires des basses latitudes. La Terre boule de neige fondue n'offre pas d'explication valable pour les BIF (Banded Iron Formations), les niveaux de manganèse ou des calottes de carbonates, qui tous supposent un océan privé d'oxygène. En outre ce scénario n'explique pas comment sortir d'une glaciation.

	Terre boule de neige	Boule de neige fondue	Obliquité plus élevée	Glaciation phanérozoïque
Déchets de carbonates	oui	oui	non	non
Dépôts glaciaires à basses latitudes	oui	oui	oui	non
Association avec les BIF	oui	non	non	non
Association avec les BIF et dépôts de manganèse	oui	non	non	non
Présence de calottes de carbonates	oui	non	non	non

*Le Phanérozoïque s'étend de 543 millions d'années à nos jours.

(1) J.L. Kirschvink, *Late Proterozoic Low-Latitude Global Glaciation: the Snowball Earth; in the Proterozoic Biosphere: a Multidisciplinary Study*, Schopf J.W. et al. (eds), Cambridge University Press, 1992, p. 51-52.

(2) P.F. Hoffman et D.P. Schrag, *Terra Nova* 2002, sous presse.

(3) M.J. Hambrey et W.B. Harland, *Earth's Pre-Platocene Glacial Record*, Cambridge, United Kingdom (GBR), Cambridge Univ. Press, 1981.

(4) D.A. Evans et al., *Nature*, 386, 262, 1997.

(5) J.L. Kirschvink et al., *P.N.A.S.*, 97, 1400, 2000.

(6) M.I. Budyko, *Tellus*, 21, 611, 1969.

(7) B.J.J. Embleton et G.E. Williams, *Earth and Planetary Science Letters*, 79, 419, 1986.

(8) D.Y. Sumner et al., *EOS, Trans. American Geophysical Union*, 68, 1251, 1987.

(9) P.W. Schmidt et al., *Earth and Planetary Science Letters*, 105, 355, 1991.

(10) D.A.D. Evans, *American Journal of Science*, 300, 347, 2000.

(11) J.L. Kirschvink, *A Paleogeographic Model for Vendian and Cambrian Time; in the Proterozoic Biosphere: a Multidisciplinary Study*, Schopf J.W. et al. (eds), Cambridge University Press, p. 567-581, 1992.

(12) P.F. Hoffman et al., *Science*, 281, 1542, 1998.

(13) W.T. Hyde et al., *Nature*, 405, 425, 2000.

(14) B. Runnegar, *Nature*, 405, 405, 2000.

métallique Mn^{2+} est commun dans les fluides hydrothermaux mais son dépôt requiert quantité d'oxygène moléculaire. Or, celui-ci est essentiellement produit par la photosynthèse.

Les dépôts de Kalahari attestent donc son existence dès cette époque. Ils sont même la plus ancienne preuve directe de l'existence d'oxygène moléculaire de l'histoire de la Terre. Avant l'apparition de la photosynthèse, l'atmosphère était fortement réductrice. Gaz sulfurés (comme H_2S et SO_2) et méthane (dont l'effet de serre est l'un des plus forts) y flottaient librement.

Zones refuges. On ne sait toujours pas très bien ce qui a déclenché les glaciations du Néoprotérozoïque. En revanche, c'est probablement l'augmentation de la concentration de l'oxygène dans l'air qui a été à l'origine de la première glaciation globale. L'évolution progressive de la composition de l'atmosphère aurait en effet détruit l'effet de serre lié au méthane. Stimulés par cette masse d'observations, les modélisateurs ont cherché à simuler les événements Boule de neige de façon plus réaliste. Voici deux ans, William Hyde, du département d'océanographie de l'université A&M du Texas, a couplé un bilan radiatif à un modèle d'évolution des calottes de glace⁽¹¹⁾. De façon surprenante, il a obtenu une solution quasi stable dans laquelle les glaces atteignent l'équateur tout en épargnant de larges zones équatoriales (on parle de «boule de neige fondue»)⁽¹³⁾. Une solution qui plaît beaucoup aux géobiologistes car ces zones auraient pu servir de refuge aux premières lignées animales. N'oublions pas que celles-ci seraient apparues, d'après les biologistes moléculaires, plu-

sieurs centaines de millions d'années avant les glaciations (quelques dizaines de millions d'années seulement pour les paléontologues)⁽¹⁴⁾. Reste que les fortes concentrations en CO_2 nécessaires pour sortir d'un épisode Boule de neige auraient sans nul doute été fatales aux animaux utilisant les protéines de la famille des globines (l'hémoglobine, la myoglobine, etc.) pour le transport de l'oxygène. En outre, le modèle de Hyde ne rend pas compte de la plupart des observations (voir tableau).

Je soupçonne pour ma part un scénario plus complexe dans lequel une glaciation initiale du genre de celles qui se sont déroulées plus tard, au Phanérozoïque*, aurait progressivement basculé vers un événement de type Boule de neige assez long. Celui-ci se serait terminé par un épisode glaciaire particulièrement intense. Cela suppose bien sûr que certains organismes aient pu survivre à ces conditions extrêmes. Mais il semble tout à fait possible que des protozoaires aient pu se réfugier dans les profondeurs océaniques, à proximité des sources hydrothermales. Et c'est l'amélioration du climat après la dernière glaciation, vers 590 millions d'années, qui aurait favorisé l'émergence des premières lignées animales. La balle est désormais dans le camp des biologistes et des paléontologues.

J.L. K. ■

Pour en savoir plus

● La page de Paul Hoffman sur la Terre en boule de neige : www-eps.harvard.edu/people/faculty/hoffman/snowball_paper.html

● BBC Horizon : www.bbc.co.uk/science/horizon/snowballarth.shtml