



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWECK

DES HÔTELS À GÉOMÉTRIE VARIABLE

Parce qu'une part importante de l'activité hôtelière est gérée par des services en ligne, un hôtel peut désormais être réparti sur plusieurs sites. Bienvenue dans la non-localité !



Il y a quelques années, après avoir réservé en ligne une chambre d'hôtel, j'ai reçu un courrier électronique qui me communiquait deux digicodes, l'un permettant d'accéder à cet hôtel, l'autre à ma chambre. Arrivé sur place, mon hôtel ressemblait à un immeuble ordinaire, dans lequel le premier code permettait effectivement d'entrer. Quant au second, il servait à ouvrir la serrure électronique d'un studio: ma «chambre».

Plusieurs appartements de cet immeuble étaient des «chambres d'hôtel», alors que les autres étaient des logements ordinaires. À l'inverse, les chambres de cet hôtel étaient peut-être réparties dans plusieurs immeubles de la ville. La géométrie des hôtels avait changé: la localité avait fait place à la non-localité.

En quoi cet hôtel non local diffère-t-il des hôtels classiques, disons du xx^e siècle? À l'époque, une enseigne sur leur devanture indiquait que ces immeubles étaient des hôtels. On trouve maintenant cette information en cherchant sur divers sites de réservation en ligne. Par ailleurs, dans

ces hôtels du xx^e siècle, un réceptionniste était chargé de répondre au téléphone aux clients souhaitant réserver une chambre. Il accueillait les voyageurs, leur indiquait le numéro de leur chambre, comment accéder au réseau, etc. Il leur donnait la clé de leur chambre et procédait au règlement en collectant l'argent – sous forme de billets de banque, de chèques, etc.

Le réceptionniste, qui ne pouvait être qu'à un seul endroit à la fois, conférait à l'hôtel sa localité

Toutes ces activités du réceptionniste consistent en réalité à échanger de l'information. Il est donc possible de transmettre ces informations autrement: on réserve et paye sa chambre sur les sites en ligne, les diverses informations concernant l'accès à l'hôtel, le numéro de la chambre, etc.

sont communiquées à l'avance par courrier électronique. La clé, elle-même, n'est qu'un support d'information, parmi d'autres possibles, indiquant quel client peut utiliser quelle chambre. Cette information est désormais représentée par un code à quatre chiffres.

La comparaison montre qu'une part importante du métier des hôteliers consiste à échanger de l'information. Ils le faisaient au xx^e siècle par l'intermédiaire de lumière, de son, de clés, de billets de banque, etc. Ces protocoles déterminaient la géométrie des hôtels: le réceptionniste, qui gérait les chambres et qui ne pouvait être qu'à un seul endroit à la fois, conférait à l'hôtel son caractère local. Quand ces protocoles ont changé, il en a été de même de la géométrie hôtelière, devenue non locale. Ce changement en a entraîné un autre: il n'est désormais plus nécessaire d'être propriétaire d'un immeuble entier pour ouvrir un hôtel, un appartement suffit.

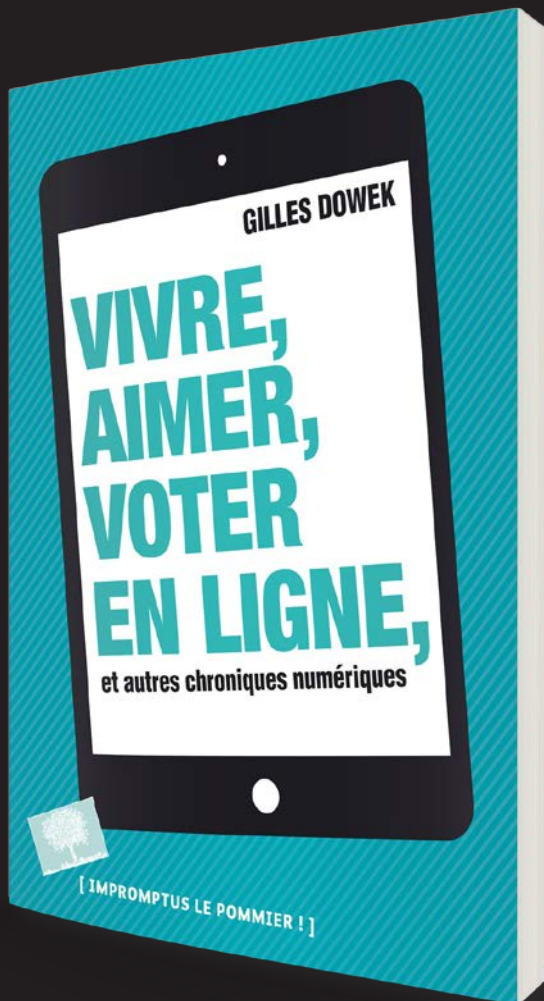
Certes, le travail dans un hôtel ne se résume pas à de l'échange d'information. Divers services exigent une présence physique. Au xx^e siècle, du personnel changeait les draps, remplaçait les ampoules défectueuses, réparait les fenêtres cassées, préparait le petit-déjeuner, etc. Ces services perdurent: dans l'hôtel non local, une personne passe de temps en temps nettoyer les chambres, un numéro de téléphone peut être appelé en cas d'urgence et le café, au coin de la rue, sert des petits-déjeuners aux voyageurs qui ne le préparent pas eux-mêmes. Reste que cette part matérielle n'est sans doute pas l'essentiel dans l'organisation d'un hôtel: ce n'est pas elle qui en détermine la géométrie, mais les protocoles de communication.

Une chose, en revanche, était possible dans les hôtels au xx^e siècle et ne l'est plus aujourd'hui. Dans certains au moins de ces hôtels, on pouvait commander une bouteille de champagne au milieu de la nuit. Ce luxe a tendance à disparaître. ■

GILLES DOWECK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

Livre
conseillé par
POUR LA
SCIENCE

Qu'est-ce que vivre à l'ère numérique ?



Un livre en forme
de kaléidoscope
pour se construire
sa propre vision de
la révolution digitale.

Gilles Dowek, 176 pages, 12 €

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr

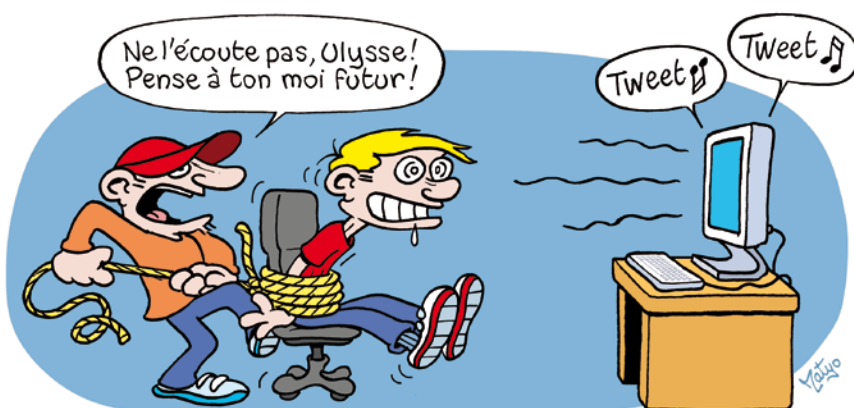

Éditions
Le Pommier



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

LES BOULETS DU PASSÉ ONT DE L'AVENIR

Les personnes en quête de notoriété sous-estiment souvent le risque pris : celui que l'hypermn sie d'Internet fasse remonter leurs errements passés.



La polémique qui a éclaté récemment à propos d'une candidate de l'émission *The Voice*, sur la chaîne TF1, est de celles qui semblent anecdotiques, mais qui traduisent en réalité des questions essentielles. Rappelons les faits: lors de cette émission, Mennel Ibtissem, 22 ans, réalise une prestation remarqu e en interprétant *Hallelujah*, de Leonard Cohen. Son interprétation est saluée par le jury, mais bientôt le scandale éclate: la chanteuse bisontine a écrit quelques mois auparavant des *tweets* aux accents franchement complotistes à propos des attentats de Nice ou de Saint- tienne-de-Rouvray. Sous la pression, la jeune femme décide finalement de quitter l'émission.

Cette histoire a comme un goût de déjà-vu: elle ressemble à s'y méprendre à la polémique ayant accompagné, par exemple, la découverte de messages insultants de Rayan Nezzar à l'endroit de personnalités politiques comme Valérie Pécresse ou Alain Juppé. Celui qui était le porte-parole du parti En Marche dut démissionner quatre jours après avoir été

nommé. De même, Gérald Darmanin, devenu ministre, dut faire face à l'embaras causé par certains messages hostiles à Emmanuel Macron qu'il avait écrits sur la Toile lorsque ce dernier n'était pas encore président de la République.

Le cas de Mehdi Meklat, un jeune chroniqueur et animateur de radio bien connu, confronté lui aussi à d'immenses messages laissés imprudemment sur les

**Le passé devient
un éternel présent
pour celui qui accède
  la renommée**

réseaux sociaux, n'est pas moins intéressant. Il a suscité une série d'explications discutables. L'auteur de ces messages lui-même a ainsi cherché à rendre compte de ses infamies passées en les considérant comme l'expression d'un double diabolique que lui possédait. On peut moquer de

tels systèmes de défense, mais la question demeure: pourquoi les individus obèrent-ils leur avenir en se comportant de façon si inconséquente?

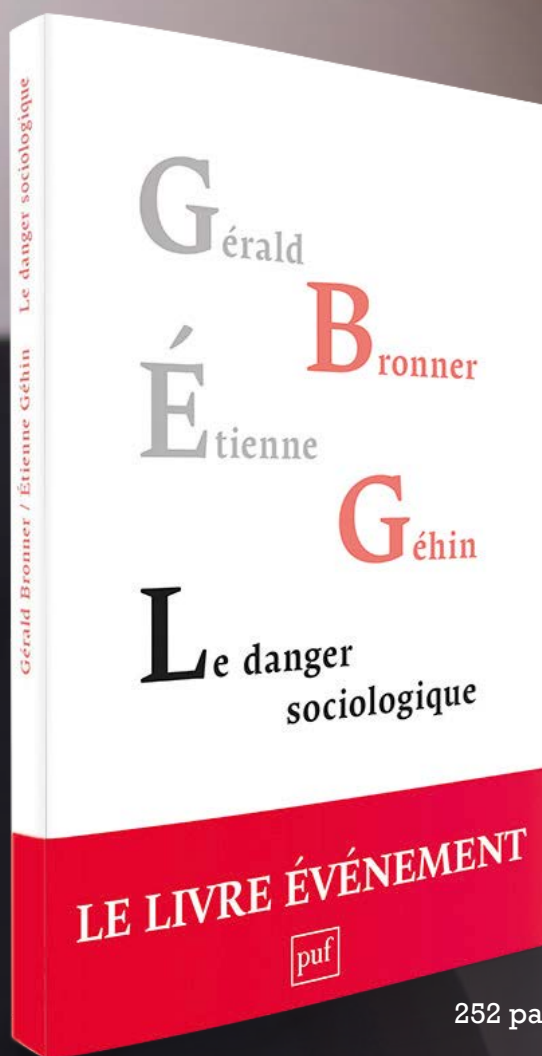
Tous ces individus ne peuvent tout à fait ignorer qu'Internet est un espace social où rien ne s'oublie. On peut comprendre la jouissance mauvaise qu'il y a à  ructer sur les réseaux sociaux, mais ce maigre bénéfice est sans commune mesure avec les risques pris. Cette curiosité peut sans doute être éclairée en partie par ce que Paul Samuelson a identifié comme étant la dépréciation temporelle de la valeur.

La valeur d'une dette, expliquait cet éminent économiste américain, est psychologiquement d'autant plus faible que le futur où elle doit être honorée est lointain. Ainsi, le fumeur ne peut ignorer les risques qu'il prend pour sa santé, mais souvent le coût à payer lui paraît si éloigné qu'il ne trouve pas dans cette crainte les ressources suffisantes pour se priver de son plaisir. De même, les tweeteurs compulsifs ne paraissent pas mettre les bénéfices qu'ils retirent de leur activité en regard avec les coûts dont ils devront peut-être s'acquitter.

Le plus intéressant est que cette dépréciation ne devient calamiteuse que parce que les individus commettent justement l'imprud nce de vouloir accéder à une certaine visibilité sociale. La notoriété est désirée, mais elle comporte un risque: celui du prix de nos erreurs de jugement liées à la dépréciation temporelle de la valeur.

Ce risque s'est considérablement accru depuis qu'Internet a fait valoir les règles d'hypermn sie qui le caractérisent: tout ressurgit dès que votre notoriété devient grande. Le passé devient un éternel présent pour celui qui accède à la renommée. Il conviendrait dans cette situation de s'inspirer d'Ulysse, qui, voulant écouter le chant des sirènes sans craindre de les rejoindre par le fond, se fit enchaîner sur son m t. Le héros grec, dans sa grande sagesse, savait qu'il faut parfois enchaîner son moi présent pour ne pas condamner son moi futur. ■

GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.



252 pages • 17€

**Gérald Bronner et Étienne Géhin
remettent la science au cœur
de la sociologie**

Suivez notre actualité
www.puf.com

puf

Le paradoxe de la

Il y a plus de 635 millions d'années, la Terre a connu une période si froide qu'elle a très probablement été recouverte de glace pendant plusieurs dizaines de millions d'années. Or non seulement la vie a persisté, mais les organismes pluricellulaires ont pris leur essor juste après. On commence à comprendre comment...

Décembre 2016. Nous sommes un groupe de six scientifiques – des Allemands, un Américain et des Français – partant en mission au Grand Canyon, dans le Colorado, puis dans les montagnes arides de la vallée de la Mort. Aussi étrange que cela puisse paraître, c'est dans cette région, parmi les plus chaudes de la Terre, que nous cherchons à percer les mystères d'une de ses périodes géologiques les plus froides, survenue il y a plus de 635 millions d'années. Cette période a probablement été si glaciale que, vue de l'espace, la Terre devait ressembler à une boule de neige géante. Nous ne sommes pas les seuls lancés sur la piste de la Terre boule de neige. Depuis une vingtaine d'années, elle est >

Terre boule de neige

L'ESSENTIEL

> Des sédiments glaciaires trouvés sur tous les continents suggèrent fortement que deux glaciations extrêmes ont recouvert la Terre de glace il y a entre 760 et 635 millions d'années.

> La vie consistait alors principalement en organismes unicellulaires et algues filamenteuses, mais la vie

pluricellulaire a explosé juste après la déglaciation.

> Les glaciations ont créé une forte pression de sélection qui a stimulé le développement d'algues vertes.

> L'oxygénation massive qui a débuté durant ces glaciations a sans doute aussi contribué à l'essor d'organismes complexes.

LES AUTEURS



PIERRE SANSJOFRE
maître de conférences
à l'université de Bretagne
occidentale et membre
du laboratoire Géosciences
Océan, à Plouzané



GUILLAUME LE HIR
maître de conférences
à l'université Paris-Diderot
et chercheur à l'institut
de physique du Globe
de Paris

Voici à quoi ressemblerait la Terre si une glaciation de type Terre boule de neige survenait aujourd'hui. Lorsque de telles glaciations se sont produites, il y a plusieurs centaines de millions d'années, les continents étaient tous rassemblés dans la région de l'équateur.

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

DE LA GLACE AUX TROPIQUES ?

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

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

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

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

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

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

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

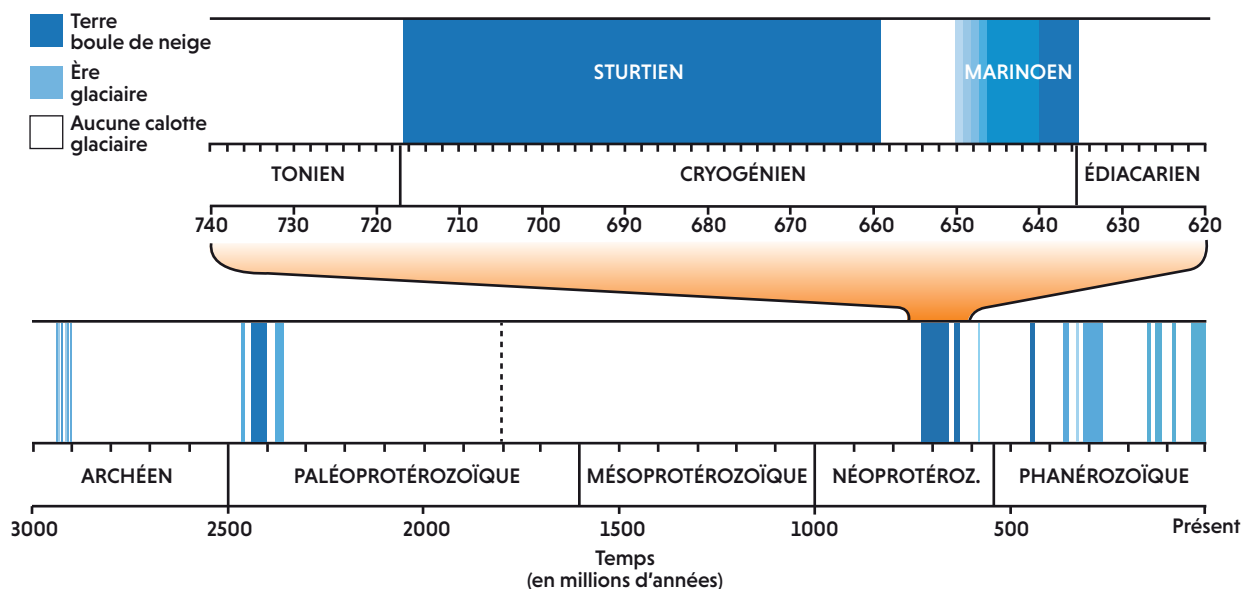
LES ÂGES DE GLACE DE LA TERRE

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

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

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

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



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

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

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

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

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

LA PISTE DU CO₂

Dans ce cycle long, la source de carbone (le volcanisme) est indépendante du climat. Ce n'est pas le cas des processus qui piègent le carbone : l'altération des roches dépend de la température et du ruissellement des eaux. C'est cette propriété qu'utilisa Joseph Kirschvink dans son scénario : lorsque la glaciation s'est généralisée, les températures extrêmement froides et l'absence d'eau liquide ont stoppé l'altération des roches, mais les volcans ont continué à émettre du CO₂. Le gaz s'est accumulé dans l'atmosphère et a intensifié l'effet de serre jusqu'à ce que ce dernier contrebalance l'effet d'albédo, provoquant une fonte rapide et brutale des glaces. La glace disparaissant, l'effet refroidissant causé par le fort albédo des glaces s'est atténué, ce qui a accéléré la fonte. Libérée de sa glace, mais avec une atmosphère encore très riche en CO₂, la Terre a alors brutalement quitté son climat glacial pour un climat tropical généralisé.

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

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

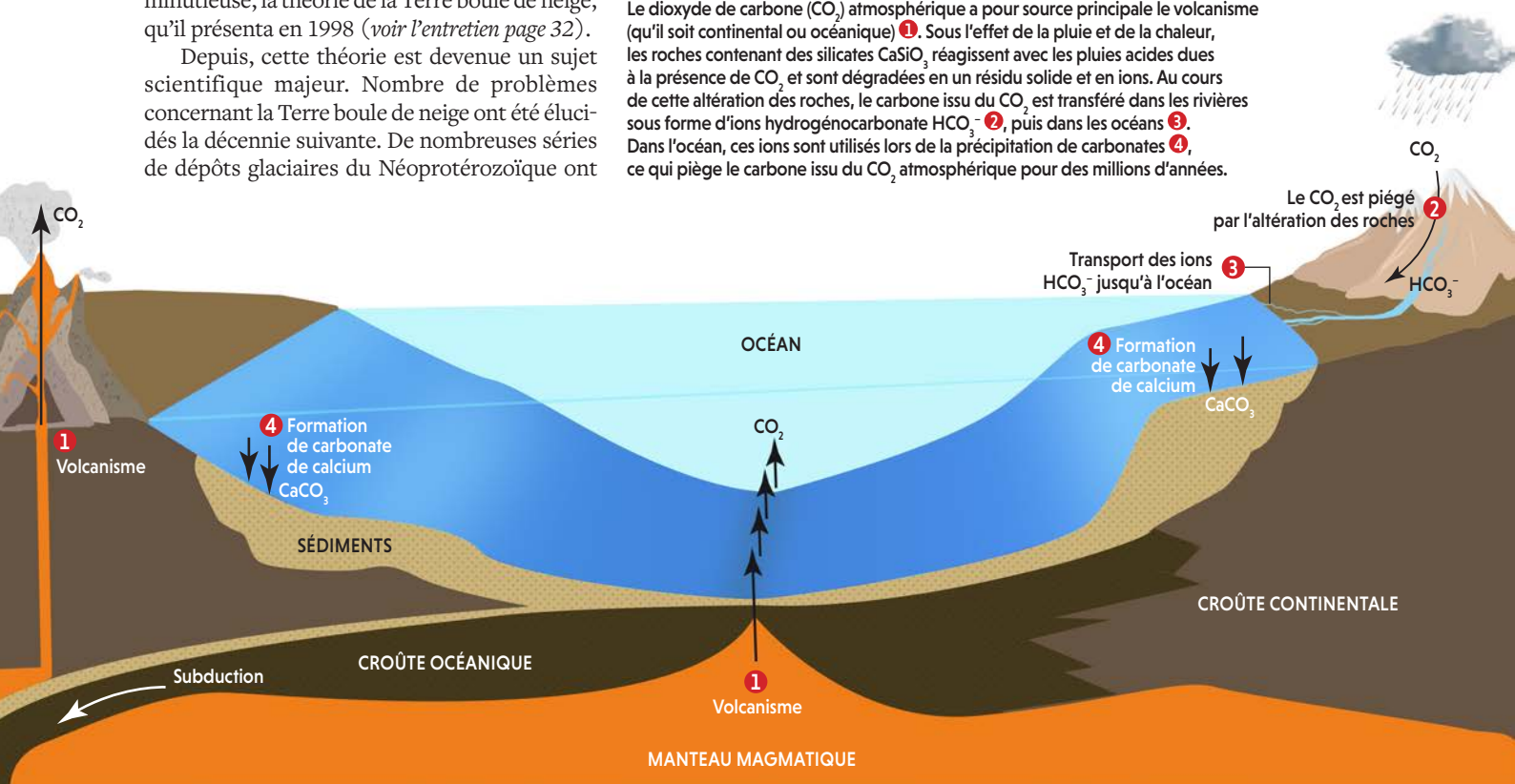
été découvertes sur tous les continents, et l'amélioration des techniques de datation a permis notamment de montrer leur synchronicité. On a ainsi mis en évidence deux épisodes glaciaires extrêmes de plusieurs millions d'années, datés respectivement de 717 et 649 millions d'années, qui semblent bien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

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

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

LE CYCLE LONG DU CO₂

Le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique a pour source principale le volcanisme (qu'il soit continental ou océanique) ①. Sous l'effet de la pluie et de la chaleur, les roches contenant des silicates CaSiO₃ réagissent avec les pluies acides dues à la présence de CO₂ et sont dégradées en un résidu solide et en ions. Au cours de cette altération des roches, le carbone issu du CO₂ est transféré dans les rivières sous forme d'ions hydrogénocarbonate HCO₃⁻ ②, puis dans les océans ③. Dans l'océan, ces ions sont utilisés lors de la précipitation de carbonates ④, ce qui piège le carbone issu du CO₂ atmosphérique pour des millions d'années.



(simulées par les modèles du climat) conduisent à la formation d'une épaisse banquise qui ne fond pas durant l'été. La modélisation numérique indique que cette banquise, d'épaisseur supérieure à un kilomètre aux pôles, flue rapidement vers l'équateur à raison de plusieurs mètres par an. À l'équateur, elle est légèrement moins



Le monde vivant de l'époque était dominé par les algues unicellulaires



épaisse, car sublimée par la forte insolation durant la journée, c'est-à-dire directement convertie en vapeur. Mais même amincie, la banquise demeure trop épaisse (plus de 700 mètres) pour qu'une fraction du rayonnement lumineux incident parvienne à l'océan liquide. Or en l'absence de lumière, la photosynthèse ne peut se dérouler. Par conséquent, aucune forme de vie fondée sur cette forme de métabolisme ne peut survivre en milieu marin. Pourtant, le monde vivant de cette époque, essentiellement microscopique, est dominé par les algues unicellulaires et autres cyanobactéries, c'est-à-dire des organismes photosynthétiques...

Seconde contrainte: l'absence d'apport de nutriments à l'océan. Aujourd'hui, une part importante des nutriments nécessaires à la survie des organismes marins provient de l'altération des continents, les rivières et les vents charriant jusqu'à l'océan les éléments minéraux nécessaires à tout organisme (notamment le phosphore). Sur une Terre entièrement gelée, l'érosion est stoppée, ou du moins très fortement diminuée du fait de la quasi-absence d'eau liquide sur les continents. Or en 2009, Gordon Love, de l'université de Californie à Riverside, et ses collègues ont proposé, à partir de traces de biomarqueurs repérées dans des sédiments d'Oman, que des animaux aquatiques – les cnidaires et les démosponges – soient apparus entre les deux glaciations extrêmes du Néoprotérozoïque. Comment se seraient nourris ces organismes marins sans les apports liés à l'érosion?

D'autres théories que la Terre boule de neige ont alors été proposées pour expliquer la survie des organismes, par exemple une version

«allégée» du modèle, où une bande d'océan équatorial libre de glace aurait subsisté. Cependant les modèles numériques ont montré que ces scénarios n'étaient pas stables sur des longues durées. Les chercheurs se sont donc orientés vers une autre piste: puisque la Terre boule de neige semblait bien avoir existé, il fallait trouver un mécanisme qui aurait pu autoriser la formation d'eau libre durant une glaciation totale. Une solution consistait à rechercher un mécanisme capable d'abaisser l'albédo de la glace: cela aurait augmenté sa température et ainsi limité son épaisseur, par sublimation. Et, à terme, dans les zones de forte insolation, de l'eau libre se serait formée.

LE POUVOIR DE LA POUSSIÈRE

Les raisons d'une baisse de l'albédo de la glace sont peu nombreuses. Plusieurs conditions doivent être réunies: une source de poussière, un processus d'accumulation des poussières au sein de la banquise et l'absence d'une couverture neigeuse. Sur des durées très longues de plusieurs millions d'années, une source de poussière continue, même très faible, modifie les propriétés optiques de la banquise. On pense aujourd'hui que les fines poussières issues du volcanisme et de l'érosion glaciaire ont lentement sali la glace de manière irréversible. Ces poussières, dérivant avec la glace de mer, se seraient accumulées aux basses latitudes, là où la sublimation est la plus forte.

L'ensemble des simulations climatiques intégrant ces conditions proposent une glace de mer dépourvue de couvert neigeux sous 20° de latitude. Et les dernières modélisations numériques, notamment celles réalisées en 2013 par Jason Goodman, du collège Wheaton, dans le Massachusetts, et Dana Strom, du Laboratoire de développement météorologique, dans le Maryland, suggèrent que l'épaisseur d'une banquise équatoriale «salie» pourrait être réduite à 100 mètres.

Malheureusement, la transmission du rayonnement solaire incident reste impossible si l'épaisseur de la banquise dépasse quelques dizaines de mètres. D'autres mécanismes ont dû agir, peut-être conjointement. Parmi les hypothèses avancées pour résoudre cette difficulté, la plus intéressante est celle des cryoconites, proposée en 2000 par Warwick Vincent, de l'université Laval, à Québec, et reprise en 2016 par Paul Hoffman (*voir l'entretien page 32*). Les cryoconites sont des trous qui se creusent dans la glace à la suite de la lente accumulation de fines poussières, plus sombres et donc plus chaudes que la glace ou la neige (*voir la photo page 35*). Ces trous et les zones d'eau liquide qui se forment à proximité, à la surface de la banquise, sont des habitats potentiels pour les organismes photosynthétiques. Les cryoconites permettent aussi un transfert de ➤

À LA RECHERCHE DE LA TERRE BOULE DE NEIGE EN NAMIBIE



PAUL HOFFMAN
est chercheur émérite
de l'université Harvard

Propos recueillis par PIERRE SANSJOFRE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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



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

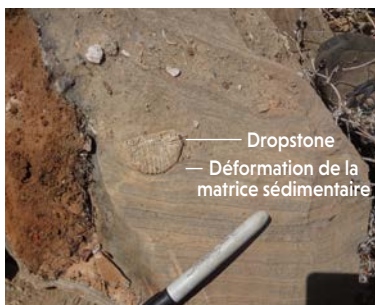
Ces écosystèmes sont bien étudiés dans les environnements polaires et alpins modernes. En 2000, Warwick Vincent, de l'université Laval, au Canada, qui a étudié ces écosystèmes aux pôles, a proposé que des organismes variés se soient développés et aient évolué dans de tels écosystèmes lors des épisodes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

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

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

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

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



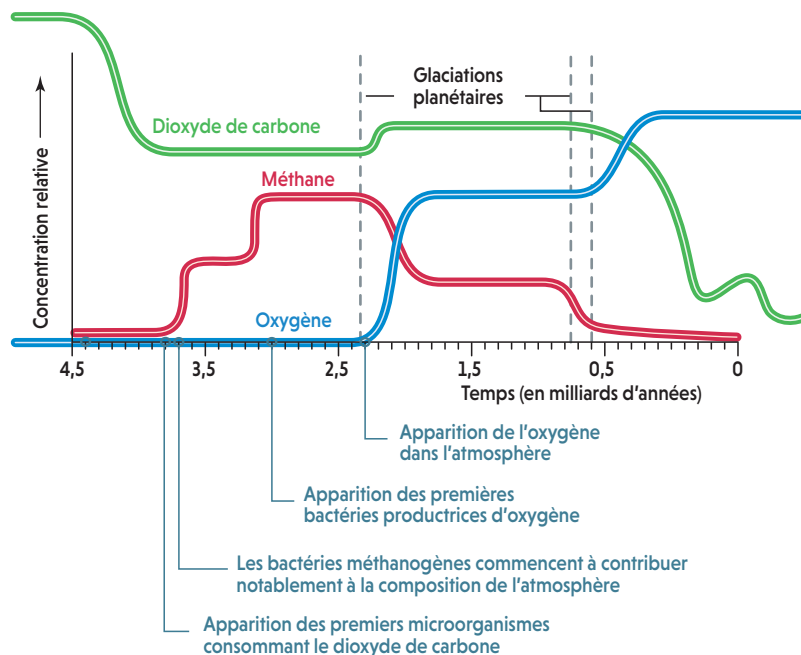
> matière de la surface vers l'océan en traversant de part en part la banquise.

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

LE RÈGNE DES ALGUES MARINES

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

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



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

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

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

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

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

Max-Planck de biogéochimie de Iéna, en Allemagne, et d'autres collègues, nous avons utilisé les sédiments échantillonnés au Grand Canyon et d'autres pour extraire des fossiles moléculaires nommés biomarqueurs.

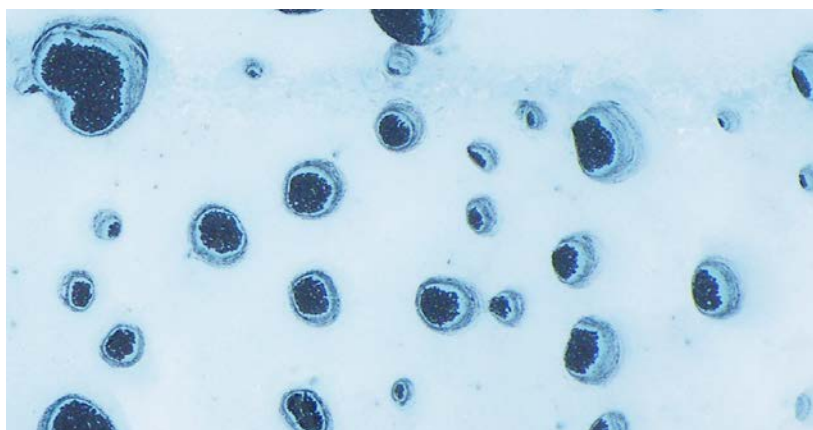
Cette technique repose sur le fait que différentes espèces synthétisent des molécules organiques qui leur sont propres et qui peuvent être préservées dans les sédiments pendant plusieurs millions d'années. Les molécules organiques extraites des divers sédiments ont permis de montrer que différents groupes d'algues existaient avant, pendant et après le Cryogénien. La technique a aussi révélé que la capacité des organismes à produire une molécule particulière, le 24-éthyl-stérol, est apparue durant cette période. Cette molécule est importante, car elle rend la membrane cellulaire plus résistante aux variations de température. Cette innovation biologique aurait donné aux algues vertes un avantage considérable, leur permettant de proliférer et de coloniser la surface de la planète.

En effet, la même année, dans une étude complémentaire fondée cette fois sur l'exploration de la diversité d'un groupe de lipides – les stéroïdes – dans les sédiments cryogénien, Jochen Brocks, de l'université nationale d'Australie, Yosuke Hoshino et leurs collègues ont montré que juste avant le Cryogénien, le monde était dominé par des producteurs de stéroïdes primaires de type cyanobactéries, puis que les algues marines planctoniques les avaient « vite » supplantés durant l'interlude entre les deux glaciations. La pression de sélection que ces glaciations ont imposée au monde vivant se révèle ainsi avoir été un véritable stimulus évolutif qui a mené à l'émergence de la famille des algues vertes.

COUP DE POUCE DE BACTÉRIES

Un autre stimulus a pu jouer un grand rôle dans l'émergence de la vie pluricellulaire: une oxygénation massive de l'atmosphère, qui lui aurait permis d'atteindre une concentration proche de l'actuelle. Ce sont cette fois des échantillons de la fin de la glaciation marinoenne prélevés en 2010 au Mato Grosso, au Brésil, qui nous ont permis, en 2016, d'apporter cette seconde brique dans l'histoire de la vie. Nous avons mis en évidence le rôle de bactéries exploitant le soufre dans cette oxygénation massive.

L'oxygénation de l'atmosphère s'est déroulée sur deux périodes: la première, il y a entre 2,4 et 2,2 milliards d'années, est attribuée (en partie) à la photosynthèse. La seconde, comprise entre 1 milliard et 540 millions d'années, restait inexpiquée. En analysant les composés soufrés dans les sédiments, nous nous sommes aperçus qu'ils étaient très abondants, ce qui suggérait une activité intense de bactéries qui utilisent ces composés comme oxydant dans une respiration anaérobie (sans oxygène). Nous avons estimé que ces bactéries auraient été responsables d'une



Des cryoconites, des trous de quelques dizaines de centimètres que l'on observe dans la banquise arctique et antarctique, comme ici au Groenland, ont pu héberger la vie durant les glaciations du Cryogénien.

baisse de 50% des sulfates dissous dans l'océan. Ces bactéries auraient ainsi « épargné » l'oxygène produit par les organismes photosynthétiques. Ce mécanisme, couplé à l'essor des algues, aurait permis d'accumuler une quantité suffisante d'oxygène libre pour soutenir énergétiquement des formes de vie multicellulaires.

Bon nombre de mystères restent à résoudre concernant ces épisodes de Terre boule de neige. Notamment, peu de modèles numériques expliquent une sortie de glaciation sans invoquer une accumulation extrême de CO₂ dans l'atmosphère, en désaccord avec les données géochimiques obtenues. Certains chercheurs s'orientent donc vers d'autres explications, comme la libération du méthane piégé sous la glace des continents lors de ses fracturations.

Notre équipe poursuit sa quête d'échantillons. Nous revenons récemment de Suède où des sédiments cryogénien très bien préservés affluent. Nous espérons y identifier la biomasse produite durant la glaciation et comparer son signal chimique à celui des cryoconites antarctiques actuelles, mais aussi estimer l'impact de la colonisation post-Terre boule de neige sur le cycle global du carbone.

On nous demande souvent si la Terre subira une autre glaciation globale. La conjonction des facteurs qui l'ont permise au Néoprotérozoïque était assez exceptionnelle: des continents tous en position tropicale, ce qui favorisait leur altération, et donc le piégeage du CO₂. Aujourd'hui, ces conditions ne sont pas réunies, mais même réunies, elles ne permettraient sans doute plus l'entrée en glaciation. En effet, le Soleil est plus vieux de 700 millions d'années et sa puissance a augmenté. La principale conséquence est qu'il faudrait une concentration quasi nulle en CO₂ dans l'atmosphère pour que la Terre se couvre de nouveau de glace. Plus le Soleil vieillira, plus il sera donc difficile d'enclencher le processus. On note toutefois que dans les années 1960, les travaux de Mikhaïl Budyko se fondaient sur un scénario anthropique, celui d'un hiver nucléaire lié à un affrontement ouvert entre les blocs de l'Est et de l'Ouest. Ce scénario reste d'actualité... ■

BIBLIOGRAPHIE

P. F. Hoffman *et al.*, **Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology**, *Science Advances*, vol. 3(11), e1600983, 2017.

Y. Hoshino *et al.*, **Cryogenian evolution of stigmastereoid biosynthesis**, *Science Advances*, vol. 3(9), e1700887, 2017.

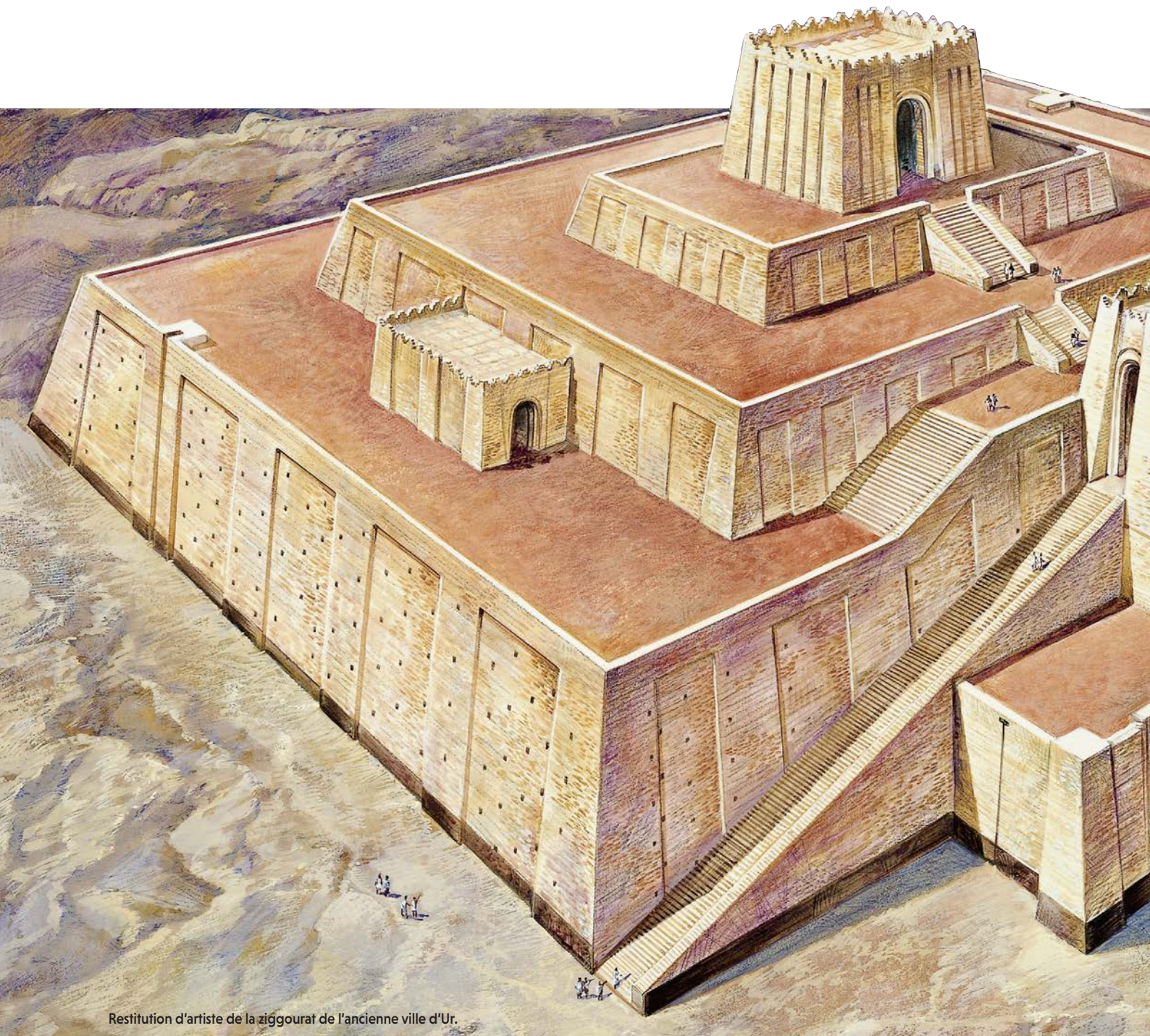
J. J. Brocks *et al.*, **The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals**, *Nature*, vol. 548, pp. 578-581, 2017.

P. F. Hoffman, **Cryoconite pans on Snowball Earth: Supraglacial oases for Cryogenian eukaryotes?**, *Geobiology*, vol. 14(6), pp. 531-542, 2016.

P. Sansjofre *et al.*, **Multiple sulfur isotope evidence for massive oceanic sulfate depletion in the aftermath of Snowball Earth**, *Nature Communications*, vol. 7, 12192, 2016.

P. Hoffman, **Quand la Terre était gelée**, *Pour la Science*, n° 268, pp. 30-37, fév. 2000.

Combien a coûté la tour de Babel?



Restitution d'artiste de la ziggourat de l'ancienne ville d'Ur.