

d'un second Dryas récent qui, à l'image du premier, aurait pu logiquement suivre le second épisode de fonte accélérée après 9500 avant notre ère. Nous avons vu que les refroidissements qui se développent dans le Jura et les Alpes de -8000 à -7000 et -6000 à -5000 pouvaient être les équivalents – en termes de structure, mais bien affaiblis en termes quantitatifs! – du Dryas récent.

Modèles et prévisions

Les simulations numériques réalisées par les Allemands C. Schäfer-Neth et K. Statteger suggèrent qu'à volume égal le contrecoup climatique d'un brusque afflux d'eau douce dans l'Atlantique Nord est nettement plus important si cet afflux provient des côtes européennes que s'il se développe au large des côtes groenlandaises. Combiné avec la diminution progressive du volume d'eau douce mis en jeu dans les trois étapes successives de la déglaciation, ce modèle confirme le violent contrecoup climatique qu'a pu avoir la première phase de la déglaciation, mettant en œuvre un énorme volume d'eau douce arrivant dans l'Atlantique à la fois depuis les côtes européennes et celles d'Amérique du Nord.

Au contraire, la deuxième étape de la déglaciation, où les eaux douces d'origine européenne constituaient un apport secondaire par rapport aux eaux d'origine américaine, et la troisième étape, constituée principalement par de l'eau douce provenant d'Amérique du Nord et de l'Antarctique, sans apport européen, ont eu un contrecoup climatique de plus en plus affaibli.

En définitive, le système climatique semble avoir répondu à la déglaciation par une série d'oscillations dont l'amplitude s'apaise à mesure que la déglaciation s'achève, c'est-à-dire que le volume des afflux d'eau douce dans l'océan se réduit et que la source de ces afflux se déplace et s'éloigne des côtes européennes. La parenté de structure de chacun des cycles climatiques associées aux étapes successives de la déglaciation traduit sans doute le même mode de réponse de l'océan aux perturbations répétées qu'il subit tout au long de cette histoire. Vers 5000 avant notre ère, la déglaciation achevée, le système climatique s'équilibre enfin, ses oscillations étant désormais plus régulières et de moindre amplitude.

Refroidissement lié à l'effet de serre?

Quelles applications pouvons-nous tirer de cette histoire de la déglaciation pour le futur de notre climat? On sait aujourd'hui que la forte augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, liée aux activités humaines («effet de serre additionnel»), est un puissant facteur de déséquilibre du système climatique de la Terre. L'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces du Groenland et les observations directes à partir de l'île de Mauna Loa dans les Hawaï montrent en particulier un accroissement accéléré de la teneur en gaz carbonique depuis la révolution industrielle. Elle laisse envisager un doublement de la valeur préindustrielle de cette teneur aux environs de 2030. Dans cette hypothèse, les simulations numériques prévoient un réchauffement allant de 1,9 à 5,2 °C.

Au regard de l'histoire que nous venons de parcourir, il est possible d'envisager la menace que fait peser sur notre climat l'effet de serre additionnel. De nombreux paléoclimatologues craignent que la fonte des glaces polaires entraînée par le réchauffement global ne perturbe et ne ralentisse la circulation thermohaline. Un accroissement des précipitations aux hautes latitudes, corollaire du réchauffement du climat et des eaux océaniques, pourrait renforcer le processus. Certes, si l'on en croit les simulations numériques évoquées plus haut et le modèle grandeur nature offert par les variations du climat pendant la déglaciation, l'absence actuelle de calotte glaciaire sur la Scandinavie écarte le danger du retour d'un épisode identique au Dryas récent. Cependant, un coup de froid du même type que l'événement 8200 n'est pas impossible. Le modèle mis au point par S. Rahmstorf, de l'Université de Postdam, montre la grande sensibilité de la circulation océanique : un brusque apport de 60 000 mètres cubes d'eau douce suffirait à perturber cette circulation. La circulation thermohaline est bien le talon d'Achille de notre système climatique.

Nous voici donc, du fait de la pollution de notre atmosphère, exposés aux mêmes menaces que nos ancêtres de la préhistoire. À cause des phénomènes associés à la déglaciation, ceux-ci ont subi de brusques coups de froid,

alors même que la Terre bénéficiait d'un maximum d'insolation! Le réchauffement global pourrait, à terme, conduire aussi à un refroidissement sensible de notre climat.

Avons-nous au moins le temps de voir venir le danger? La réponse que l'on peut apporter à cette question n'est pas rassurante, car les courbes climatiques les plus précises dont disposent les paléoclimatologues montrent que, le plus souvent, les changements climatiques associés à la déglaciation sont survenus brusquement, en moins d'un demi-siècle. On observe de véritables basculements du climat d'un état d'équilibre à un autre. Ces basculements, vraisemblablement à l'échelle d'une génération humaine, ont dû laisser nos ancêtres préhistoriques pour le moins perplexes.

Les paléoclimatologues s'efforcent depuis plus de vingt ans d'attirer l'attention de l'opinion publique et des politiques sur les menaces que fait peser sur nous l'effet de serre additionnel. Il s'agit d'une question complexe, encore loin d'être entièrement résolue par les scientifiques. Les résultats de simulations numériques réalisées récemment par l'Anglais R. Wood sont plutôt alarmants : ils suggèrent que le site de formation d'eaux profondes du Labrador pourrait se désamorcer au cours des trente prochaines années, c'est-à-dire avant 2029. Dès 1987, W. Broecker posait ouvertement la question de savoir si «nous ne jouons pas à la roulette russe avec le climat sans que personne sache vraiment ce qu'il y a dans le barillet»...

Michel MAGNY est directeur de recherches au Laboratoire de chrono-écologie (UMR 6565), à Besançon.

J.-C. DUPLESSY, *Quand l'océan se fâche. Histoire naturelle du climat*, Odile Jacob, 277 pages, 1996.

M. MAGNY, *Une histoire du climat. Des derniers mammouths au siècle de l'automobile*, Errance, 176 pages, 1995.

S. JOUSSAUME, *Climat, d'hier à demain*, CNRS Éditions, 1993.

U. VON GRAFENSTEIN et al., *A Mid-European Decadal Isotope Climate Record from 15 500 to 5 000 Years BP*, in *Science*, n° 284, pp. 1654-1657, 1999.

R.A. WOOD et al., *Changing Spatial Structure of the Thermohaline Circulation in Response to Atmospheric CO₂ Forcing in a Climate Model*, in *Nature*, n° 399, pp. 572-575, 1999.

Les magnétoiles

KEVIN HURLEY

Depuis 20 ans, des éclairs de rayonnement gamma répétitifs déchirent le ciel. Ce rayonnement émanerait d'étoiles à neutrons au fort champ magnétique, sujettes à des séismes analogues aux tremblements de terre, mais autrement plus puissants.

Le 27 août 1998 à 5 heures 22 en temps universel, la plus intense bouffée de rayonnement gamma jamais enregistrée atteint la Terre. Elle a commencé par un intense pic de rayonnement, puis s'est éteinte graduellement dans les cinq minutes suivantes, envoyant, comme un phare, un éclair de rayonnement gamma d'intensité décroissante toutes les 5,16 secondes. Les seuls témoins de cet extraordinaire phénomène furent les sondes spatiales qui voyageaient en silence à travers le Système solaire et des chercheurs qui surveillaient l'ionosphère ; diffusé et absorbé par cette couche de l'atmosphère terrestre, le rayonnement gamma n'a donc pas atteint le niveau de la mer.

Ce rayonnement provenait d'un objet de notre Galaxie qui intriguait les astronomes depuis des années, mais qui n'avait pas encore laissé entrevoir sa puissance phénoménale. L'étude de cet objet, ainsi que sa ressemblance avec plusieurs autres objets étudiés depuis une vingtaine d'années, nous a permis de conclure à l'existence d'un nouveau type d'étoile, que l'on a nommée «magnétoile», ou étoile magnétique (en anglais *magnetar*, contraction de *magnetic* et de *star*). Malgré leur rareté – jusqu'ici quatre d'entre elles ont été repérées –, les magnétoiles intéressent vivement les astronomes, car elles recèlent les champs magnétiques les

plus intenses de l'Univers (voir la figure 1).

Bien qu'elle n'ait pas été identifiée comme telle à l'époque, la première magnétoile a été observée le 5 mars 1979. Une flottille de neuf satellites avait été équipée de détecteurs de rayonnements gamma, afin d'étudier le phénomène nouveau des sursauts gamma. Aujourd'hui, les astronomes savent que ces «sursauts», de brefs éclairs de rayonnement gamma qui illuminent le ciel plusieurs fois par jour, résultent d'événements catastrophiques, coalescences d'étoiles à neutrons ou supernovae très puissantes, qui se produisent dans les milliards de galaxies entourant la nôtre. Cependant, à l'époque, le mystère était entier : les astronomes ignoraient si ces sursauts provenaient d'autres galaxies, de notre Galaxie, ou même du Système solaire.

Le sursaut gamma enregistré ce jour-là était le plus intense jamais observé (il détint ce record jusqu'au 27 août 1998). Connaissant les instants d'arrivée sur les sondes spatiales, les astronomes calculèrent le lieu d'émission du sursaut gamma avec précision. À la surprise générale, l'émission semblait provenir du vestige de supernova N49 situé dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie proche de la nôtre, à environ 150 000 années-lumière.

Ce sursaut semblait n'être qu'une version extrêmement intense d'un sursaut gamma classique, mais c'était la première fois qu'on pouvait rattacher un sursaut à un objet précis, tel un vestige de supernova, déjà observé à d'autres longueurs d'onde. C'était aussi le premier sursaut gamma périodique : l'intensité du rayonnement gamma augmentait et décroissait toutes les huit secondes. Enfin, dans les jours suivant ce sursaut majeur, les astronomes observèrent d'autres sursauts plus faibles de même provenance. La situation était totalement nouvelle.

Les sursauts gamma émanaient-ils des vestiges de supernovae, auquel cas leur origine était établie ? Ou bien avait-on découvert, au hasard d'un enregistrement de routine des sursauts gamma, un nouveau type de sursaut ? Le débat allait durer près de 20 ans.

Des étoiles à neutrons par milliards

Lorsqu'une étoile massive ordinaire a épuisé son combustible nucléaire, elle s'effondre avant d'exploser, en éjectant 90 pour cent de sa masse dans l'espace sous forme de gaz. Les dix pour

1. UNE MAGNÉTOILE est une étoile à neutrons dont le champ magnétique est des milliards de fois plus intense que les champs magnétiques que l'on parvient à créer en laboratoire. De temps à autre, lors de tremblements d'étoiles, ces objets émettent des bouffées périodiques de rayonnement gamma.