

atteint les eaux profondes grâce à la circulation globale des océans : pendant qu'elles vont du Sud au Nord, les eaux chaudes de surface dissolvent de l'air qui contient du carbone 14. Elles entraînent cet élément lorsqu'elles plongent dans les abysses. Bien que les eaux profondes remontent brièvement à la surface près de l'Antarctique, peu de carbone 14 se dissout à cet endroit.

Un ralentissement de la circulation globale ferait notablement varier l'abondance du carbone 14 dans l'atmosphère et dans l'océan. La proportion de carbone 14 par rapport au carbone 12 (isotope stable, contrairement au premier qui est radioactif), est, au fond des océans, environ 12 pour cent inférieure à celle des couches supérieures de l'océan et de l'atmosphère : le carbone 14 se désintègre lors de son transport et de son séjour au fond. Simultanément, les rayons cosmiques régénèrent le carbone 14, à raison de un pour cent du total présent sur Terre tous les 82 ans. Si les échanges entre les couches supérieures et inférieures des océans s'interrompaient, la proportion de carbone 14 dans les couches supérieures de l'océan et dans l'atmosphère augmenterait de cinq pour cent par siècle, parce que le carbone 14 ne serait pas entraîné dans les eaux profondes. Dans ces conditions, après un millénaire, la proportion de carbone 14 dans l'atmosphère aurait augmenté d'un tiers.

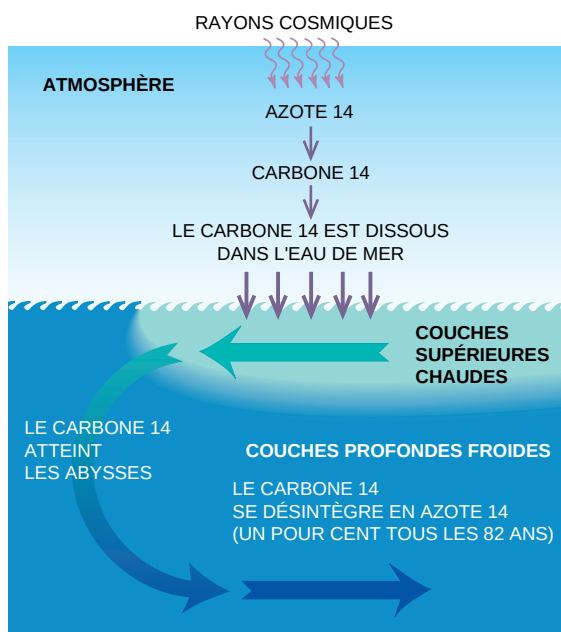
Un tel phénomène perturberait fortement les résultats des datations au carbone 14. Les paléontologues déterminent l'âge des fossiles en mesurant leur contenu résiduel en carbone 14 : plus il est faible, plus le spécimen est ancien. La quantité de carbone 14 présente dans une plante vivante dépend de la proportion de cet isotope dans l'atmosphère ou dans les océans à l'époque où cette plante vit. Les plantes qui auraient poussé pendant un arrêt des échanges entre l'atmosphère et les eaux profondes contiendraient plus de carbone 14 et sembleraient plus jeunes qu'elles ne le seraient en réalité. Selon la datation au carbone 14, les plantes des périodes froides marquées par un arrêt de la circulation globale sembleraient contemporaines de celles qui

ont vécu 1 000 ans plus tard, au cours d'une période chaude.

La circulation permanente du carbone 14

Bien que la quantité de carbone 14 dans l'atmosphère ait un peu fluctué au cours du temps, la datation au carbone 14 des sédiments marins qui se sont accumulés de manière uniforme ne montre aucune variation brusque au cours des 20 000 dernières années. De surcroît, des datations absolues de coraux par mesure de l'abondance de l'uranium et du thorium, indiquent même que, à la fin du Dryas récent, à l'époque où la circulation globale aurait repris, la concentration atmosphérique en carbone 14 a augmenté.

Cette observation semble révéler que les arrêts de la circulation globale n'auraient pas duré plus d'un siècle et qu'ils auraient été suivis par des périodes d'intense brassage des eaux. En particulier, au Dryas récent, la circulation des océans a plutôt augmenté que diminué, comme on aurait pu le prévoir si un arrêt complet de la circulation était responsable du froid. Toutefois si la circulation s'était arrêtée, nous devrions envisager d'autres modes de transport du carbone 14 vers les eaux profondes.



3. LE CARBONE 14 est formé dans l'atmosphère par les rayons cosmiques. Il est entraîné au fond de l'océan par les eaux qui plongent dans les abysses. La datation au carbone 14 indique indirectement l'état de la circulation océanique : tout arrêt prolongé de ce courant provoquerait une accumulation de carbone 14 dans l'atmosphère, ce qui perturberait les datations.

Si les afflux d'eau douce expliquent les arrêts de la circulation globale et la survenue des glaciations, d'où vient cette eau douce ? Sans doute des calottes glaciaires polaires : ces brusques variations du climat semblent limitées à des périodes où d'épaisses couches de glace recouvriraient le Canada et la Scandinavie.

Nous connaissons les traces d'au moins huit afflux d'eau douce dans l'Atlantique Nord : sept résultent de la libération d'une armada d'icebergs par la partie orientale de la calotte glaciaire de la baie d'Hudson ; la huitième provient de l'écoulement d'un énorme lac. Au début des années 1980, Hartmut Heinrich, de l'Université de Göttingen, a découvert une série de couches sédimentaires à structure particulière dans l'Atlantique Nord. Ces couches, qui s'étendent de la mer du Labrador aux îles Britanniques, résultent probablement de la fonte d'un nombre considérable d'icebergs venus du Canada.

Les débris entraînés et déposés par cette armada s'amincissent vers l'Est, de 50 centimètres d'épaisseur dans la mer du Labrador à quelques centimètres dans l'Atlantique Est. Les plus grosses particules contenues dans les sédiments sont surtout issues des roches calcaires sédimentaires et du lit de roches éruptives de la baie d'Hudson et de la zone avoisinante. Les coquilles de foraminifères sont rares dans ces couches, ce qui évoque un océan encombré de glaces (qui réduisent la prolifération du plancton), et la proportion réduite d'oxygène 18 par rapport à l'oxygène 16 dans les coquilles retrouvées prouve que les animaux vivaient dans de l'eau moins salée que la normale : la pluie et la neige contiennent peu d'oxygène 18, à ces hautes latitudes, parce que les molécules d'eau qui contiennent cet élément se condensent en premier, avant d'arriver dans ces régions.

Le huitième afflux d'eau douce est dû au lac Agassiz, qui était créé par le poids de la calotte glaciaire en recul. Jadis, l'eau du lac se déversait, par dessus un rebord rocheux, dans le bassin du Mississippi, jusque dans le golfe du Mexique, mais le recul du front glaciaire, il y a environ 12 000 ans, a ouvert une seconde voie d'écoulement, à

L'Est : le niveau du lac a considérablement diminué. L'eau ainsi libérée s'est déversée au Sud du Canada, dans la vallée aujourd'hui occupée par le Saint-Laurent, et a abouti dans la région de l'océan où se forment aujourd'hui les eaux profondes.

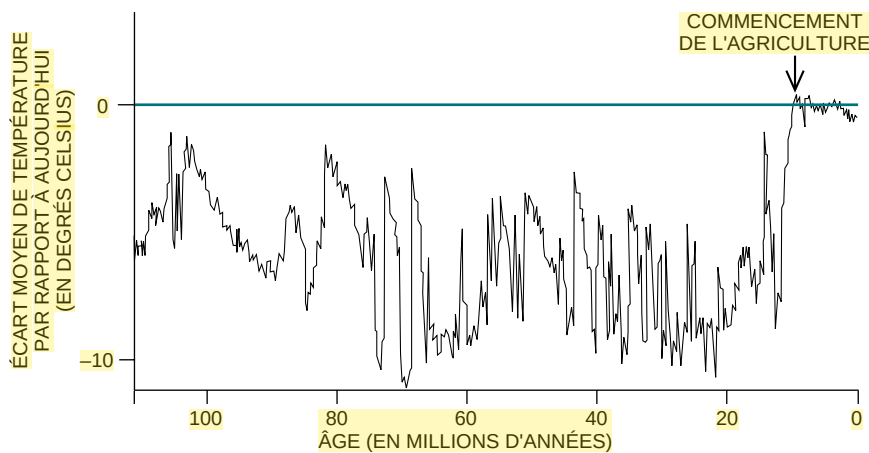
Des vagues de froid de plus en plus accentuées

La relation entre ces événements et les variations climatiques locales est claire. Quatre d'entre eux correspondent à des changements importants du climat du bassin Nord-Atlantique. L'une des couches de S. Heinrich marque la fin de l'avant-dernier cycle

glaciaire principal, et une autre indique le plus récent. Une troisième couche correspondrait au début du Dryas récent. Chacune des quatre autres couches correspond à un sous-cycle climatique. La corrélation de ces couches et des relevés des carottes glaciaires du Groenland a révélé que les refroidissements millénaires forment une série, caractérisée par des vagues de froid de plus en plus sévères, dont la plus forte correspond à une couche de S. Heinrich. Le climat se réchauffait ensuite : un nouveau cycle démarrait.

Les variations climatiques du Dryas récent ont été ressenties dans le monde entier. En est-il de même pour les 15 événements similaires,

antérieurs, indiqués par les carottes glaciaires ? À ce jour, deux éléments seulement confirment cette hypothèse, mais ils sont convaincants. D'une part, Jérôme Chappellaz, du Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement du CNRS, a analysé l'air emprisonné dans les carottes glaciaires prélevées au Groenland et observé que les périodes glaciaires sont accompagnées d'une diminution de la concentration atmosphérique en méthane. Le méthane est produit surtout dans les marais et dans les marécages. Comme ceux des régions tempérées de l'hémisphère Nord étaient gelés ou ensevelis sous la glace, le méthane devait provenir



4. LES CAROTTES DE GLACE (à droite) révèlent la variabilité du climat de la Terre au cours des 100 000 dernières années (en haut, à gauche). Les climatologues qui ont foré jusqu'au socle rocheux, près du centre de la calotte glaciaire du Groenland (ci-dessus), ont mesuré les concentrations relatives en oxygène 18 et en oxygène 16 dans les échantillons. L'abondance de l'oxygène 18 dans la vapeur d'eau atmosphérique dépend de la température de l'air : plus le climat est froid, moins l'eau qui contient cet isotope de l'oxygène est présente. Des photographies d'une section de carotte, prises au microscope en lumière polarisée, révèlent les cristaux de glace (en haut, à droite) et montrent les bulles d'air emprisonnées dont l'analyse nous permet de connaître la composition de l'atmosphère préhistorique (au milieu, à droite). Les couches inférieures (en bas, à droite) ont été déformées par le glissement de la calotte glaciaire sur le sol rocheux du Groenland, rendant les relevés précis difficiles, voire impossibles.



des tropiques. Les fluctuations dans les relevés de méthane indiquent que les tropiques ont connu une période de sécheresse pendant chaque période de refroidissement de l'hémisphère Nord.

D'autre part, une carotte sédimentaire prélevée à 500 mètres au-dessous du niveau de la mer, dans le bassin de Santa Barbara, a révélé que des bandes de sédiments intacts, avec des couches annuelles bien marquées, alternaient avec des sections perturbées par des vers fous. La présence de vers indique que les eaux profondes de la région contenaient suffisamment d'oxygène pour permettre la vie. Ces périodes sont étrange-

ment corrélées avec les refroidissements du Groenland : les variations de la circulation océanique ont atteint toute la planète.

Un changement mondial du climat

Les conséquences sur tout le Globe des événements découverts par S. Heinrich sont encore plus surprenantes. Selon les analyses du pollen extrait des sédiments du lac Tulane, en Floride, le rapport entre les abondances de pin et de chêne a brusquement augmenté lors de chacun de ces événements. Les pins prospèrent dans des climats relativement humides, tandis

que les chênes préfèrent les climats secs. Bien que la relation exacte entre l'abondance des pins et les événements de S. Heinrich doive être datée plus précisément, ces relevés indiqueraient une période humide par cycle. Dans l'hémisphère Sud, on trouve aussi des corrélations : chacun des quatre événements de S. Heinrich qui peut être daté par la méthode au carbone 14 correspond à une extension maximale des glaciers montagneux des Andes.

Que la fonte massive des glaciers canadiens ait eu des conséquences sur tout le Globe est paradoxal car, selon les modèles de circulation atmosphérique, les changements dans les

