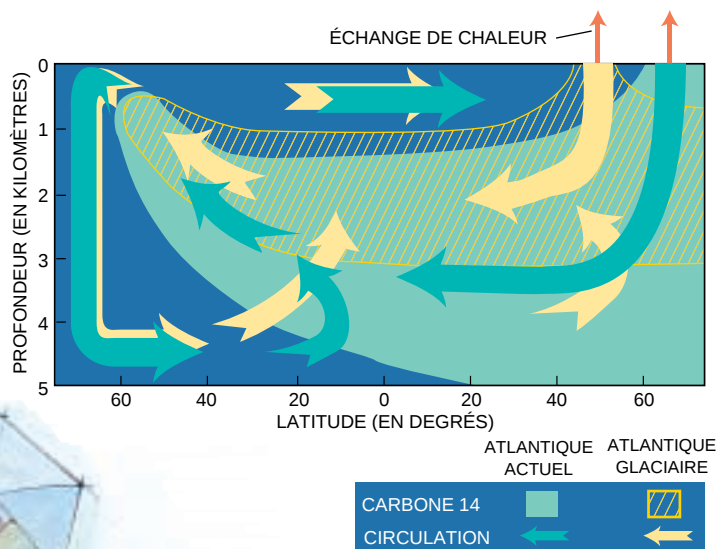
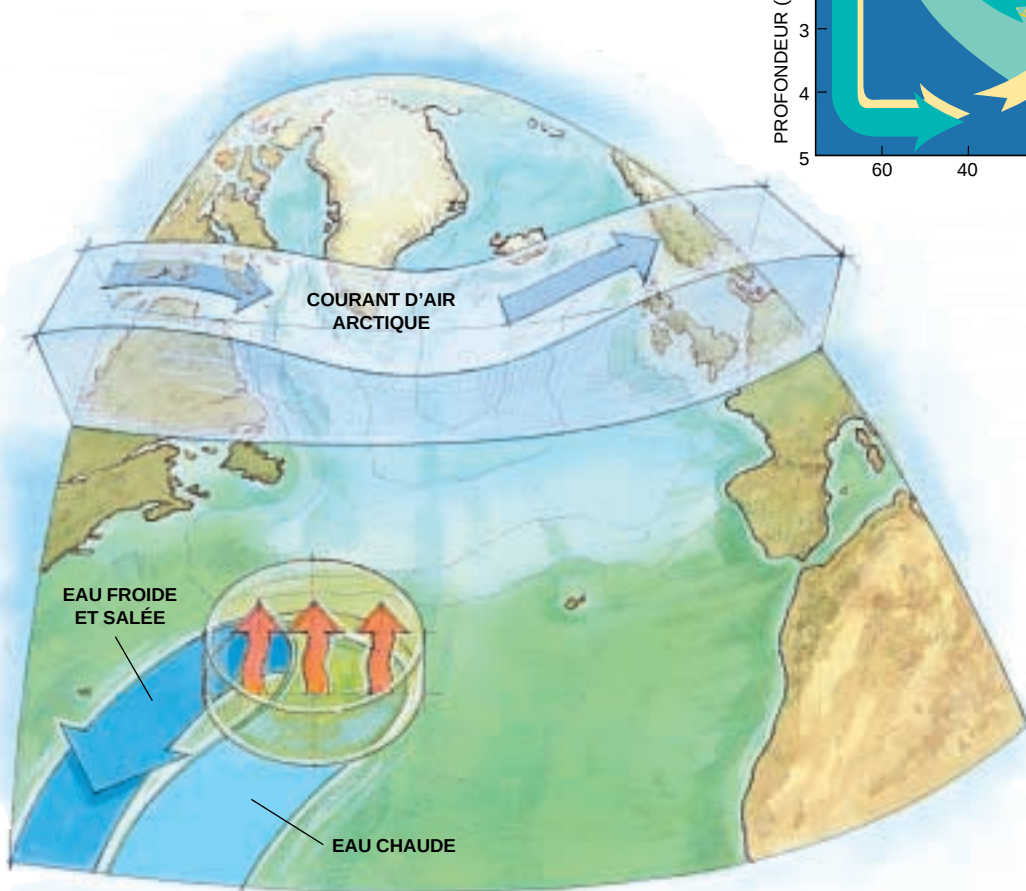


2. UNE CIRCULATION SECONDAIRE, à la latitude de l'Europe méridionale, ne transférerait pas de chaleur aux vents de l'Atlantique Nord. Les températures en Europe, lors des périodes froides, où ce courant existait, étaient, en moyenne, inférieures de dix degrés aux températures actuelles. Cette circulation secondaire est moins profonde que la circulation principale (à droite).



atomes contiennent des nombres différents de neutrons) dans les coquilles des foraminifères benthiques, animaux minuscules qui vivent dans les profondeurs. Les eaux profondes de la circulation de l'Atlantique Nord sont pauvres en cadmium et riches en carbone 13 ; dans les autres eaux profondes de l'océan, c'est l'inverse. Les différences d'abondances sont dues à la respiration des organismes aquatiques, qui réduit la concentration en carbone 13 et augmente la concentration en cadmium. Pendant les périodes de grand froid sur l'Atlantique, la concentration en cadmium a chuté dans les eaux de profondeur moyenne et a augmenté fortement dans les eaux de fond ; la proportion relative de carbone 13 et de carbone 12 a varié à l'opposé. Ces variations sont bien expliquées par le modèle de S. Rahmstorf, qui stipule que la circulation était alors à une profondeur inférieure : les eaux les plus profondes stagnaient.

Ensuite l'existence d'une circulation secondaire expliquerait la poursuite du transfert du carbone 14 vers les eaux profondes, pendant les périodes froides. Si ce transfert avait cessé, les datations obtenues par dosage du carbone 14 montreraient d'énormes distorsions, ce qui n'est pas le cas. Un quart seulement du carbone mondial est aujourd'hui dans les couches supérieures des océans et dans l'atmosphère ; le reste est dans les abysses. La répartition du carbone 14, qui est formé dans l'atmosphère par les rayons cosmiques, dépend de la circulation océanique. Aujourd'hui, dans les océans, le carbone 14

kilomètres du pôle Nord. En outre, une telle variation surviendrait en dix ans au plus.

Puis, après des centaines ou des milliers d'années, la circulation reprendrait parce que la diffusion de la chaleur, des parties les plus chaudes de l'océan, et la diffusion du sel, du fond vers la surface, réduiraient la densité de l'eau abyssale stagnante jusqu'à ce que les eaux de surface de l'une ou l'autre des régions polaires s'y mélangent à nouveau, rétablissant le brassage de la chaleur et du sel. Toutefois cette circulation ne serait pas nécessairement identique à celle d'aujourd'hui : elle dépendrait de l'écoulement d'eau douce dans chaque région polaire.

Selon les simulations de Stefan Rahmstorf, de l'Université de Kiel, l'arrêt de la circulation globale serait suivi de la formation d'un autre courant, moins profond, dont les eaux

froides plongeraient au Nord des Bermudes et non près du Groenland : l'Europe du Nord recevrait moins de chaleur. Cette circulation secondaire serait aussi arrêtée par un afflux d'eau douce, mais elle reprendrait spontanément après quelques dizaines d'années seulement. S. Rahmstorf n'explique toutefois pas comment la circulation principale se rétablirait ensuite.

Le cadmium et le carbone 13

Deux caractéristiques du modèle de S. Rahmstorf intéressent particulièrement les paléoclimatologues. Tout d'abord, il explique les variations, au cours des périodes de refroidissement, des concentrations en cadmium et en isotopes du carbone (les différentes formes de cet élément, dont les

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.

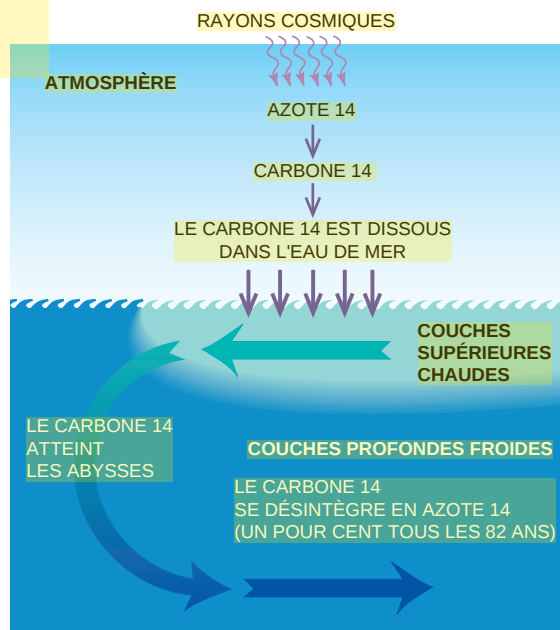
Un tel phénomène perturberait fortement les résultats des datations au carbone 14. Les paléontologues déterminent l'âge des fossiles en mesurant leur contenu résiduel en carbone 14 : plus il est faible, plus le spécimen est ancien. La quantité de carbone 14 présente dans une plante vivante dépend de 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