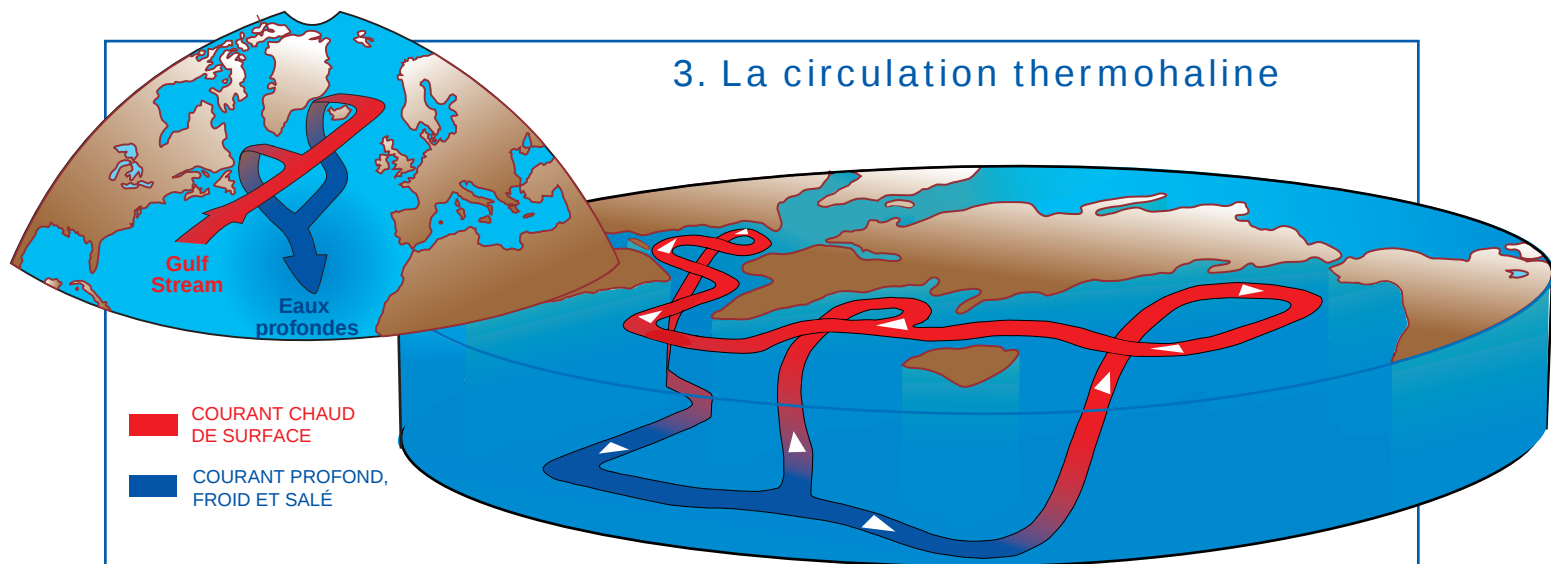


3. La circulation thermohaline



L'océan est un rouage essentiel de la machine climatique. Couvrant plus des trois quarts de la planète, il assure environ 50 pour cent du transfert d'énergie des zones excédentaires des tropiques vers les zones déficitaires des pôles. Le Gulf Stream constitue le terme de la circulation thermohaline qui anime l'ensemble des océans du Globe. Les eaux de surface de l'Atlantique Nord plongent sur deux sites principaux, le premier au large du Labrador, et le second en mer de Norvège. Elles s'écoulent ensuite en profondeur jusqu'à vers le Pacifique Nord, où elles refont surface. De là, par un courant chaud de surface, elles rejoignent l'Atlantique Nord. La pompe de ce mouvement est dans la zone du cercle polaire arctique : les eaux polaires sont plus denses en raison de la basse température et du sel que rejette la glace lors de sa formation. En outre, la salinité de l'Atlantique Nord est plus forte que celle du Pacifique.

Ce gigantesque «tapis roulant» océanique fonctionne au profit de l'Europe : le Gulf Stream draine un flux d'eau chaude de 20 millions de mètres cubes par seconde qui, en se refroidissant vers le Nord, libère une forte quantité de chaleur dans l'atmosphère.

Une partie du carbone 14 contenu dans l'atmosphère se mêle aux eaux superficielles de l'océan. Il est entraîné ensuite au fond de l'océan par les eaux qui plongent en mer de Norvège. Dans les abysses, le carbone 14 se désintègre alors en azote 14, et les eaux profondes s'appauvrissent peu à peu en carbone 14. Ainsi, lorsque la circulation thermohaline se renforce, elle accélère le retour en surface, dans le Pacifique, d'un plus grand volume d'eaux profondes déficitaires en carbone 14, ce qui, à terme, affaiblit la concentration atmosphérique en radiocarbone. Et inversement, dans l'hypothèse d'un ralentissement de la circulation océanique.

en 1996, des corrélations possibles entre des phases de faible salinité dans l'Atlantique et des périodes d'assèchement sous les Tropiques.

La situation a rapidement évolué au cours des quatre dernières années. Fin 1995, S. R. O'Brien, de l'Université de Durham, révèle que la concentration en sels marins et la composition chimique des poussières contenues dans le sondage GISP2 du Groenland témoignent des variations du climat pendant l'Holocène. Un second article, publié en 1997, attire l'attention de la communauté des paléoclimatologues sur l'événement 8200 enregistré dans les glaces du Groenland : R. B. Alley et ses collègues de l'Université de Pennsylvanie ne trouvent aucune explication satisfaisante à cet épisode, mais ils soulignent l'amplitude du refroidissement auquel il correspond – vraisemblablement 6 °C au Groenland et près de 2 °C en Europe de l'Ouest.

À la fin de l'année 1997, P. Mayewski et ses collègues de l'Université de Durham approfondissent l'étude de la composition chimique des poussières

contenues dans les glaces du Groenland. Cette composition, qui reflète l'intensité et l'extension de la circulation atmosphérique polaire, montre des variations sensibles tout au long de l'Holocène. La courbe de ces variations révèle des périodicités de 1 450 ans et 2 300 ans, que l'on retrouve dans la courbe du carbone 14 résiduel (voir l'encadré 4). Parallèlement, encouragée par les résultats qu'avait obtenus l'équipe de S. R. O'Brien, une autre équipe, réunie autour de G. Bond, de l'Université de Columbia, entreprend d'étudier en détail deux carottes prélevées dans l'Atlantique Nord, la première au large de l'Irlande et la seconde entre les côtes groenlandaises et islandaises. Pour pallier le faible taux de sédimentation, les échantillons analysés sont prélevés à des intervalles de l'ordre du centimètre ou du demi-centimètre ! Les débris de roches retrouvés dans ces échantillons révèlent l'existence de plusieurs débâcles d'icebergs qui proviennent du Groenland et du Spitzberg et ponctuent l'ensemble de l'Holocène avec une périodicité d'environ 1 470 ans.

Ces débâcles montrent en outre l'invasion d'eaux froides originaires des zones au Nord de l'Islande jusqu'à la latitude de la Grande-Bretagne !

Un consensus se dégage aujourd'hui : sans atteindre bien sûr l'amplitude qu'ils possédaient en période glaciaire, des accidents climatiques ponctuent toute la durée de l'Holocène. Les périodes de circulation atmosphérique polaire forte et intense et les débâcles d'icebergs coïncident avec les phases de refroidissement climatique marquées, dans le Jura, par une hausse des plans d'eau et, dans les Alpes, par une avancée des langues glaciaires. L'histoire du climat de nos régions, au cœur de l'Europe tempérée, apparaît ainsi étroitement déterminée par la dynamique d'un système où interagissent l'océan Atlantique Nord, la calotte glaciaire groenlandaise et la circulation atmosphérique polaire. En outre, le parallélisme entre les variations du carbone 14 résiduel dans l'atmosphère et les accidents climatiques identifiés dans le Jura, dans l'Atlantique et au Groenland, suggère de rap-

porter ces oscillations du climat à des variations périodiques de l'activité du Soleil, dont les effets ont été amplifiés par des changements de la circulation océanique.

La circulation thermohaline et les réchauffements

En examinant les variations du carbone 14 résiduel atmosphérique depuis 14 500 ans, on distingue deux périodes : la première, qui couvre le Tardiglaciaire et les débuts de l'Holocène jusque vers 5000 avant J.-C., est caractérisée par de larges variations des valeurs du carbone 14, dont l'amplitude s'atténue peu à peu ; la seconde partie de notre interglaciaire montre des variations d'une amplitude plus faible et plus régulière. Au cours de la période antérieure à 5 000 avant J.-C., on remarque en outre la succession de trois cycles asymétriques (voir l'encadré 4) qui présentent la même structure interne : une brusque chute des valeurs du carbone 14, bientôt suivie par leur remontée progressive ponctuée par de brefs maximums, et enfin une période de maximum qui se prolonge sur près d'un millénaire.

Traduit en termes de circulation océanique, le début de ces cycles correspondrait à une brusque réactivation de la circulation thermohaline (voir l'encadré 3), suivie, dans un premier temps, par son ralentissement progressif (ponctué par de brefs épisodes de fort ralentissement) et, enfin, par une période prolongée de plus faible circulation thermohaline. Traduit en termes climatiques, on note qu'effectivement les phases de renforcement de la circulation thermohaline coïncident bien avec des périodes de réchauffement dans le Jura et au Groenland, ou encore avec l'absence de débâcles d'icebergs dans l'Atlantique Nord.

La structure de ces trois cycles du radiocarbone résiduel qui se succèdent pendant le Tardiglaciaire et la première partie de l'Holocène n'est pas sans rappeler le schéma d'évolution caractéristique des événements de Dansgaard-Oeschger évoqués précédemment. Elle s'apparente également à la courbe des fluctuations du rapport oxygène 18/oxygène 16 obtenue dans le sondage GISP2 pour la période comprise entre 12500 et 9500 environ avant notre ère. Cette période tardiglaciaire, immédiatement antérieure à l'Holocène, correspond à la

première phase de réchauffement sensible qui suit la fin de la dernière glaciation. Un brusque réchauffement survient aux environs de 12500 avant notre ère : le rapport oxygène 18/oxygène 16 atteint d'emblée des valeurs voisines de celles qui seront les siennes tout au long de l'Holocène. Mais bientôt ces valeurs déclinent, marquant un refroidissement progressif du climat ponctué de plusieurs coups de froid, dont le premier est connu sous le nom de Dryas moyen. La période s'achève par une phase froide prolongée, le Dryas récent, pendant laquelle le climat retrouve une rigueur proche de celle des temps glaciaires. Cette période de 12500 à 9500 avant notre ère présente toutes les caractéristiques d'un faux départ de notre interglaciaire.

Paradoxalement, le retour aux conditions glaciaires pendant le Dryas récent survient alors que la Terre bénéficie d'un maximum d'insolation, celui qui précisément a déclenché la déglaciation. Les carottes extraites de l'Atlantique ont établi que le Dryas récent et les coups de froid qui le précèdent et le suivent immédiatement, c'est-à-dire le Dryas moyen et l'oscillation préboréale, coïncident avec des ralentissements de la circulation thermohaline : la haute résolution chronologique d'une carotte extraite en mer de Norvège suggère même que ces ralentissements de la circulation thermohaline sont survenus en moins d'un demi-siècle.

Les paléoclimatologues qui ont travaillé à retracer l'histoire de la déglaciation de la fin de la dernière glaciation aux débuts de notre interglaciaire ont établi le synchronisme qui a existé entre les deux importants réchauffements du climat qui surviennent aux environs de 12500 et 9500 avant J.-C., et deux périodes de fonte très rapide des calottes glaciaires. Cette fonte provoque alors une brusque remontée du niveau général des océans, pouvant atteindre un rythme de quatre centimètres par an ! Dans les deux cas, le brusque afflux d'eau douce qui en a résulté dans la zone de l'Atlantique Nord aurait modifié la densité des eaux marines, perturbé la formation des eaux profondes et ralenti la circulation thermohaline (voir l'encadré 3). Les coups de froid du Dryas moyen et de l'oscillation préboréale seraient les contrecoups directs de ces épisodes de fonte accélérée et de ces brusques afflux d'eau douce dans

l'océan. Dans les deux cas, ils marquent l'arrêt d'un réchauffement et un net renversement de tendance du climat vers le refroidissement.

La parenté de structure interne qui existe entre les trois cycles successifs que nous venons de décrire à partir des variations du radiocarbone résiduel pendant le Tardiglaciaire et les débuts de l'Holocène suggère que nous avons affaire à la répétition d'un même processus : un brusque réchauffement associé à une réactivation rapide de la circulation thermohaline provoque une fonte accélérée des appareils glaciaires ; l'afflux soudain d'eau douce dans l'Atlantique Nord qui en résulte provoque à son tour un désamorçage partiel de la circulation thermohaline, qui se traduit dans l'immédiat par un brusque coup de froid (le Dryas moyen, l'oscillation préboréale ou l'événement 8200), puis par un renversement de tendance climatique qui conduit à un épisode froid plus durable, tel que le Dryas récent, et les périodes 8000-7000 avant J.-C. et 6000-5000 avant J.-C.

L'événement 8200 serait le contrecoup de la dernière étape de la déglaciation ; comme le Dryas moyen et l'oscillation préboréale, il coïncide d'ailleurs avec un brusque mais bref renforcement des valeurs du radiocarbone, qui suggère là encore un ralentissement de la circulation thermohaline. Cette dernière étape correspondrait à la phase finale de la déglaciation en Amérique du Nord, la calotte du Nord de l'Europe ayant alors complètement disparu, en raison de sa taille plus réduite. Elle correspondrait aussi au signal isotopique identifié par les Américains Mix et Riddiman dans les carottes extraites de l'océan Atlantique et daté des environs de 7000-5000 avant J.-C. Elle marquerait en particulier la brutale disparition de la dernière partie de la calotte Nord-américaine autour de la baie d'Hudson, entraînant le brusque drainage d'énormes lacs proglaciaires et l'afflux d'environ 1,2.10⁵ kilomètres cubes d'eau douce dans l'Atlantique Nord, il y a environ 8 500 ans.

Les trois cycles que nous venons de retracer structurent fortement la période de transition qui couvre la fin de la dernière glaciation et les débuts de notre interglaciaire. En 1992, observant et décrivant le premier de ces cycles enregistré par le rapport oxygène 18/oxygène 16 au Groenland, l'Américain W. Broecker s'interrogeait sur l'absence