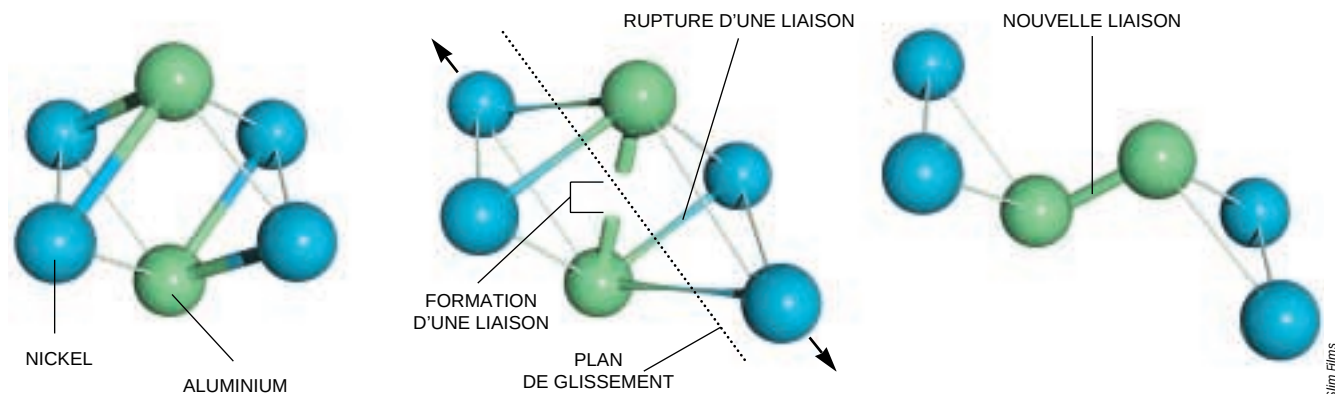




4. LA TOPOLOGIE DE DENSITÉ DE CHARGE révèle où et quand les liaisons chimiques se brisent et se forment lorsqu'un solide métallique se déforme. Les théories classiques n'expliquent pas ces phénomènes : par exemple, elles n'indiquent pas si une liaison se forme entre deux atomes d'aluminium, dans un cristal d'aluminium de nic-

kel quand celui-ci est étiré le long d'un plan de glissement. La charge nécessaire à la formation de cette liaison provient de la rupture des liaisons entre les atomes d'aluminium et de nickel. La manipulation de ce transfert de charge est la clé de la fabrication d'alliages plus ductiles.

matériaux. J'ai cherché les différences de propriétés entre ces trois alliages qui n'avaient pas été expliquées par les modèles classiques, et quels éléments ajoutés à l'aluminium de nickel le rendraient plus ductile. L'aluminium de nickel est ductile si les liaisons initiales sont maintenues longtemps avant la rupture, tandis que de nouvelles liaisons se forment rapidement le long du plan de glissement. Pour satisfaire ces exigences contradictoires, il fallait utiliser la charge des liaisons qui se rompent pour en former de nouvelles. Afin d'évaluer dans quelle mesure ce projet était faisable, j'avais besoin de nouveaux programmes informatiques qui engendreraient les nombres représentant la densité de charge et qui évalueraient les changements dans sa topologie.

À l'Université de Tulane, James MacLaren avait mis au point les instruments dont j'avais besoin pour calculer la densité de charge des trois aluminiums, et pour identifier les points critiques et les différents angles qui les décrivent. Les premières simulations ont confirmé l'accord avec les propriétés expérimentales. Par exemple, l'aluminium de fer, connu pour être le plus ductile des trois alliages, est celui qui a la charge la plus forte autour du point selle, dans les liaisons entre les atomes de fer et d'aluminium. Cet aluminium a aussi un minimum très plat entre les atomes d'aluminium voisins, et, par conséquent, la création d'une liaison à cet endroit ne nécessiterait qu'une faible charge.

J'ai poussé cette idée plus loin. Les programmes ont calculé la modification

des propriétés de l'aluminium de nickel en remplaçant quelques atomes de nickel par un élément qui placerait davantage de charges le long de la liaison nickel-aluminium, charges qui seraient ensuite disponibles pour la création de nouvelles liaisons entre les atomes d'aluminium à l'endroit du minimum. Cette redistribution des charges rendrait le matériau plus ductile.

Par quels éléments remplacer le nickel? L'analogie avec la chaîne de montagnes montre que chaque atome est un sommet, avec des pentes différentes qui en descendent. Dans une montagne d'aluminium proche d'une montagne de fer, il y a davantage de rochers à l'endroit du col, et la cuvette est plus plate qu'à côté d'une montagne de nickel. Avec du fer, il y a suffisamment de rochers pour retirer une partie de la liaison et pour la construction d'une nouvelle ligne de crête entre les atomes d'aluminium dans la cuvette. En revanche, avec une montagne de cobalt, il n'y a pas assez de rochers à l'emplacement du col pour la construction d'une ligne de crête. Le fer semblait le meilleur candidat pour la substitution.

Lorsque ce résultat fut obtenu, la recherche empirique d'éléments capables d'améliorer l'aluminium de nickel était en cours depuis 15 ans, de sorte que j'espérais qu'elle aurait confirmé mes prévisions. De fait, à une conférence, à la fin de 1998, j'ai appris que dix pour cent de fer substitué au nickel donne exactement l'effet prévu.

Trop tardive pour améliorer les alliages d'aluminium de nickel, la théorie topologique de la liaison chimique

devrait mettre fin aux longs tâtonnements des métallurgistes.

On l'utilise déjà pour chercher de nouveaux alliages plus légers, plus solides et qui conservent leurs propriétés à des températures supérieures. Ces alliages seront utilisés pour la fabrication d'avions supersoniques dans les années 2010. Enfin, au lieu de tester d'innombrables alliages que l'on modifie à l'aveuglette, les métallurgistes utiliseront des ordinateurs pour calculer la densité de charge d'alliages qu'ils n'auront pas à réaliser. Munis de cette information, ils détermineront comment modifier la densité de charge pour obtenir les propriétés désirées et ainsi prévoir quels éléments produiront ces changements. Et si l'on brise une bouteille de champagne sur le nez d'un avion construit avec ces alliages, j'espère être là pour en étudier la rupture.

Mark EBERHART est professeur de chimie et de géochimie à l'École des mines du Colorado.

Richard F.W. BADER, *Atoms in Molecules : A Quantum Theory*, Oxford University Press, 1994.

Mark EBERHART, *Computational Metallurgy*, in *Science*, vol. 265, pp. 332-333, 15 juillet 1994.

Ivan AMATO, *Stuff*, BasicBooks, 1997.

M.E. EBERHART et A.F. GIAMEI, *The Visualization and Use of Electronic Structure for Metallurgical Applications*, in *Materials Science and Engineering A : Structural Materials*, vol. 248, n° 1, pp. 287-295, 1998.

Les archives climatiques des lacs du Jura

MICHEL MAGNY

Les sédiments accumulés dans les lacs du Jura, les glaces du Groenland et les sédiments de l'Atlantique Nord, révèlent les fluctuations du climat depuis 10 000 ans. Paradoxalement, un brusque réchauffement peut amener un refroidissement de la planète.

L'étude des climats du passé repose sur la nature et la datation des sédiments anciens en divers points du globe terrestre. Après avoir longtemps divergé, les données marines et continentales s'accordent aujourd'hui pour reconnaître la relative instabilité du climat au cours des douze derniers millénaires. Certaines des oscillations climatiques qui ont été ainsi identifiées présentent un intérêt tout particulier : remarquables par leur amplitude et leur rapidité, elles pourraient préfigurer le proche avenir de notre climat menacé par la pollution de l'atmosphère.

L'examen des sédiments déposés au fond des mers a établi que le climat, lors de la période quaternaire (recouvrant

les deux derniers millions d'années), a été marqué par une alternance de phases froides, ou glaciations, et de phases de réchauffement, ou interglaciaries.

Pendant les glaciations, les continents sont partiellement envahis par des calottes glaciaires qui se développent à partir des zones polaires et des montagnes. Le stockage des eaux sous forme de glaces sur les continents a pour conséquence un abaissement du niveau des océans. Ainsi, lors du dernier maximum glaciaire, il y a quelque 20 000 ans, d'énormes calottes de glace ont recouvert l'Amérique du Nord jusqu'au Sud des Grands Lacs, et l'Europe du Nord jusqu'au Sud de Belfast et de la Baltique ; parallèlement, le niveau des

océans a baissé de 120 mètres. Pendant les périodes interglaciaires, le climat se réchauffe, et la Terre retrouve une physionomie voisine de celle qui prévaut actuellement.

Ces grands changements climatiques résultent des variations périodiques de l'orbite de la Terre, qui modifient la quantité de chaleur solaire absorbée par la Terre. Ainsi, les glaciations se répètent tous les 100 000 ans environ depuis près d'un million d'années. Toutefois certaines variations du climat sont beaucoup plus rapides.

Dix degrés en 20 ans !

L'analyse de deux sondages réalisés par des équipes européennes (Projet GRIP) et américaines (Projet GISP2) sur le site de Summit, au Groenland, a donné de nouvelles courbes retraçant dans le détail l'histoire du climat depuis 130 000 ans, c'est-à-dire depuis le dernier interglaciaire (ou Éémien). Ces courbes s'appuient, en particulier, sur l'évolution du rapport des deux isotopes 18 et 16 de l'oxygène contenu dans la glace (une diminution de la concentration en oxygène 18 traduit un refroidissement du climat).

1. VUE AÉRIENNE DU PETIT LAC D'ÉTIVAL, dans le Jura (à gauche). Avec plus de 80 plans d'eau, souvent d'origine glaciaire, le Jura offre aux paléoclimatologues un champ d'investigation exceptionnel. Ils extraient des carottes où les sédiments enregistrent les variations passées du climat qui ont affecté l'alimentation des lacs et provoqué des variations de leur niveau. La carotte de 50 centimètres de longueur a été prélevée dans les sédiments du lac de Narlay, dans le Jura, documente une forte baisse du niveau du lac survenue vers 2500 avant notre ère. Comme les autres glaciers alpins, le glacier d'Aletsch (à droite), dans les Alpes suisses, se révèle très sensible aux variations du climat, même de faible ampleur. Sa masse s'est ainsi considérablement amoindrie depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, vers 1850. La comparaison des oscillations du climat retracées récemment dans le Jura avec celles obtenues au début des années 1970 par les palynologues et les glaciologues dans les Alpes suisses et autrichiennes montre que les hausses des lacs du Jura coïncident pendant les dix derniers millénaires avec les avancées des glaciers dans les Alpes (un refroidissement du climat se traduisant dans les deux régions par de plus fortes précipitations).



À la surprise générale, la courbe du sondage GRIP démontre l'extrême instabilité du climat durant l'Éémien, avec notamment un épisode où le refroidissement est de 14 °C en une vingtaine d'années. Si la réalité de cet épisode est encore controversée, les sondages GRIP et GISP2 confirment tous deux la très forte instabilité du climat tout au long de la dernière glaciation, entre -80 000 et -10 000 ans. Ces fluctuations (connues désormais sous le nom d'événements de Dansgaard-Oeschger) présentent la même succession typique : au départ, un brusque réchauffement survenant en quelques dizaines d'années, suivi par un retour progressif (en 2 000 à 3 000 ans) à des conditions glaciaires qui perdurent ensuite pendant environ un millénaire. Ces événements apparaissent eux-mêmes regroupés dans des sortes de cycles, dits «cycles de Bond», caractérisés chacun par une succession de refroidissements de plus en plus intenses.

Ces variations climatiques ont été aussi repérées sur les carottes de sédiments marins : les pics de froid achevant les cycles de Bond coïncident avec des débâcles massives d'icebergs dans

l'Atlantique Nord. Ces débâcles sont marquées par la présence, dans les sédiments marins, de couches de débris de roches provenant du Canada et du Groenland.

Une stabilité trompeuse

Contrastant avec une forte instabilité pendant l'Éémien et la dernière glaciation, l'histoire du climat pendant notre interglaciaire (dénommé aussi Holocène, la dernière partie du Quaternaire, ayant duré environ 12 000 ans) apparaissait beaucoup plus stable aux paléoclimatologues travaillant sur les carottes marines ou glaciaires. La courbe isotopique du sondage GRIP, par exemple, suggérait une étonnante uniformité de la température tout au long des 11 500 dernières années, excepté deux brefs épisodes de refroidissement plus marqués, le premier il y a 11 200 ans et le second il y a 8 200 ans ; ces deux épisodes d'environ deux siècles sont connus sous les noms d'oscillation préboréale et d'événement 8200.

Dans cette stabilité générale, un refroidissement récent faisait exception : connu sous le nom de Petit Âge

Glaciaire, il se traduisit, entre 1500 et 1850, par une avancée des langues glaciaires dans les Alpes en Europe et, d'une façon générale, dans les montagnes de tous les continents.

Cette relative stabilité du climat de notre interglaciaire contrastait avec les résultats obtenus depuis 25 ans en milieu continental. Ainsi, par exemple, dès le début des années 1970, palynologues et glaciologues, en Suisse et en Autriche, montraient que toute la durée de l'Holocène était ponctuée par une alternance d'avancées et de retraits des langues glaciaires. L'amplitude de ces différentes avancées n'était certes pas comparable avec celle atteinte lors des grandes glaciations. Toutefois, la succession de ces avancées et de ces retraits, en plein Holocène, suggérait que le Petit Âge Glaciaire n'était que l'épisode le plus récent d'une série de refroidissements qui avaient affecté tout notre interglaciaire. Des résultats similaires obtenus en Scandinavie par W. Karlén, de l'Université de Stockholm et, en Alaska, par G.H. Denton, de l'Université du Maine, amenaient ces deux chercheurs à reconnaître au cours de l'Holocène l'existence de cycles climatiques d'environ 2 500 ans.

L'apport des sédiments lacustres

Les lacs occupent souvent des dépressions creusées, puis abandonnées par les glaciers lors de la dernière glaciation, comme en Scandinavie ou encore dans la zone péréalpine et dans le Jura ; les recherches paléoclimatiques en milieu continental s'appuient aussi sur l'analyse des sédiments qui s'y déposent.

Les archives climatiques contenues dans ces cuvettes lacustres ne permettent pas de remonter aussi loin dans le temps que les carottes glaciaires et marines : les sédiments accumulés au fond des lacs du Jura ne documentent qu'une période d'environ 20 000 ans contre 450 000 ans pour les glaces polaires, ou plusieurs millions d'années pour les dépôts marins. Toutefois, les lacs présentent un intérêt majeur pour la reconstitution des climats du passé : la vitesse moyenne d'accumulation annuelle de sédiments y est particulièrement importante (un à deux mètres de dépôts par millénaire). Grâce à cette haute résolution chronologique, les géologues peuvent reconstituer dans le détail les oscillations du climat survenues depuis la dernière glaciation.

Outre l'analyse de la composition isotopique des dépôts et l'étude des

pollens fossiles qui documentent l'histoire de la végétation, les carottes extraites des remplissages lacustres témoignent des fluctuations passées du niveau de l'eau dans ces cuvettes. Les oscillations du climat ont en effet déterminé des changements dans l'alimentation et dans le bilan hydrique de ces lacs, entraînant des variations de leur niveau. Ces variations sont enregistrées par des changements dans les types de sédiments accumulés au bord des lacs (alternance de couches de tourbes, de craie lacustre, d'oncolithes...)

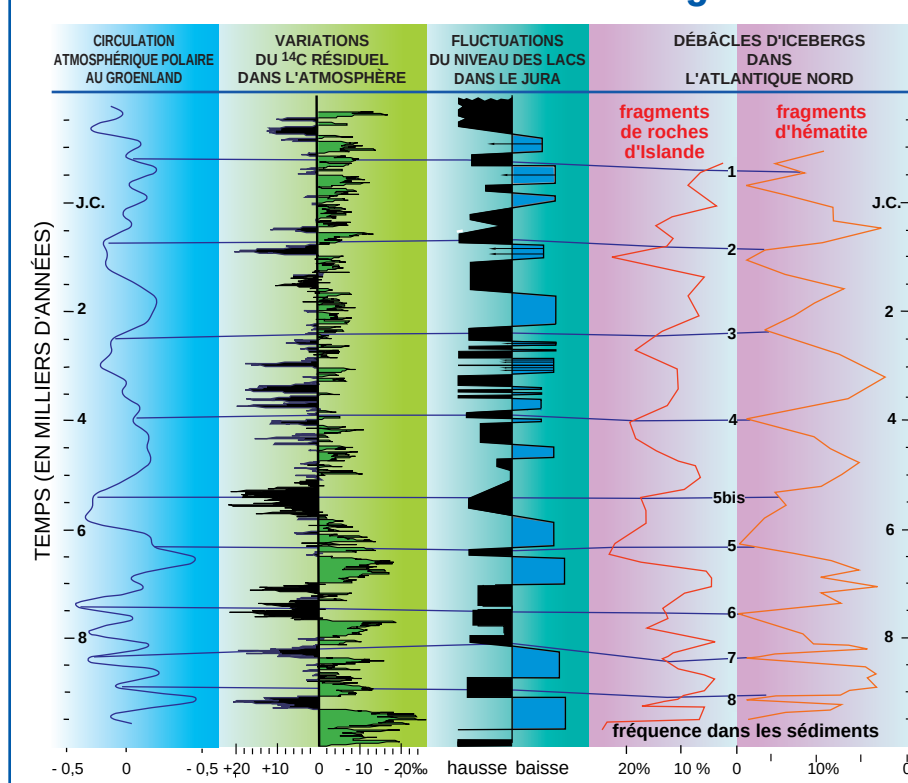
Depuis 15 ans, une équipe du Laboratoire de chrono-écologie, à Besançon, travaille à la reconstitution des fluctuations passées des niveaux lacustres dans le Jura et la zone péréalpine. L'étude des remplissages sédimentaires de plus de vingt cuvettes retrace l'histoire de ces plans d'eau depuis les débuts de l'Holocène. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par les palynologues et les glaciologues suisses et autrichiens, révèle que les périodes de hausse des plans d'eau dans le Jura coïncident avec les phases de refroidissement, lesquelles sont marquées dans les Alpes par une avancée des glaciers et un abaissement de la limite forestière.

Ainsi, même au cours de cet interglaciaire, le climat est loin d'être parfaitement stable. Refroidissements et réchauffements alternent tout au long de l'Holocène, et le Petit Âge Glaciaire n'est pas exceptionnel. En se fondant sur l'amplitude des mouvements en altitude de la limite forestière dans les Alpes, les chercheurs suisses et autrichiens estiment que ces mouvements reflètent des variations des températures moyennes estivales de l'ordre de 1,5 °C à 2 °C.

Stabilité ou instabilité ?

Une certaine discordance apparaissait donc dans l'évaluation du climat de notre interglaciaire entre les chercheurs travaillant sur les continents et ceux qui analysaient les sédiments marins et les glaces polaires : les premiers identifiaient de multiples oscillations pendant l'Holocène, tandis que les seconds mettaient en avant la monotonie des courbes isotopiques pour cette période. En outre, la faible épaisseur de la période holocène dans les carottes marines où, souvent, les sédiments récents sont perturbés lors des opérations de prélèvement, n'incitait pas à des investigations très approfondies. Le géochimiste français J.-C. Duplessy notait néanmoins,

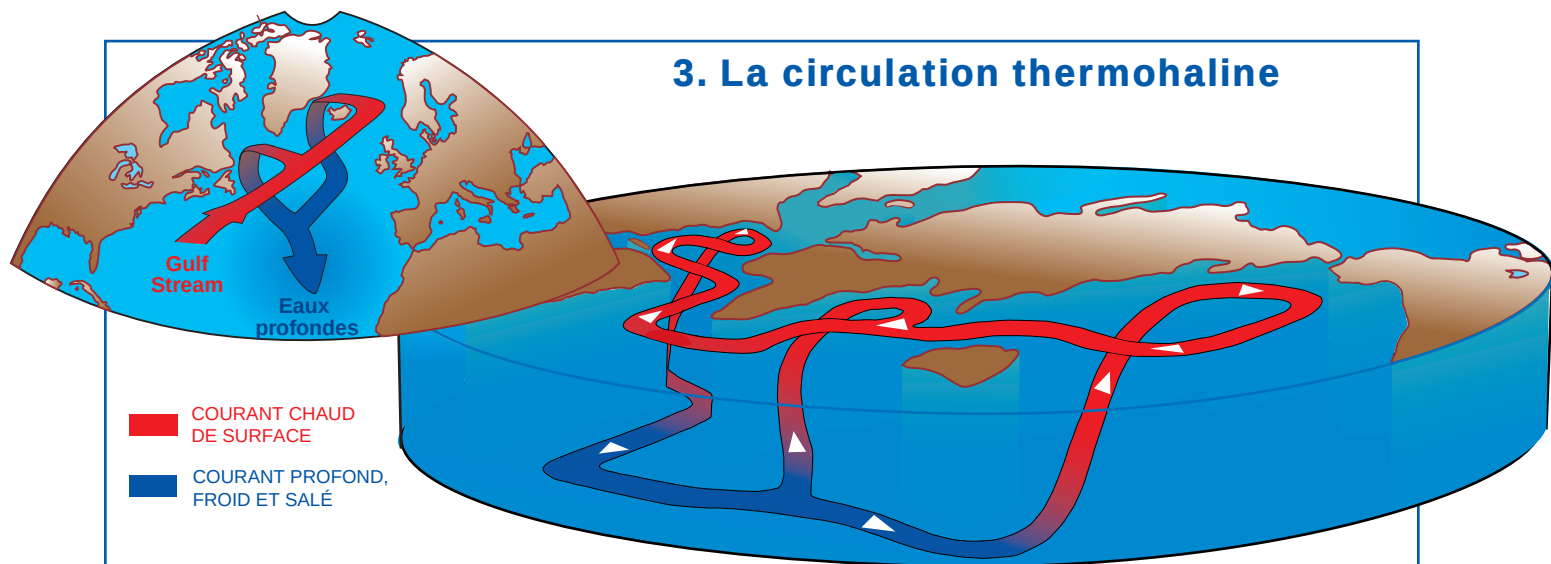
2. Mesures des changements de climat



Les renforcements de la circulation atmosphérique polaire et les débâcles d'icebergs dans l'Atlantique Nord coïncident avec des refroidissements du climat marqués par la hausse des lacs dans le Jura. L'intensité de la circulation atmosphérique polaire est reconstituée à partir de la composition chimique des poussières retrouvées dans les glaces du Groenland, et les débâcles d'icebergs par la concentration en fragments de roches originaires d'Islande, du Groenland et des îles du Spitzberg.

L'ensemble de notre interglaciaire est ponctué par des oscillations du climat où se combinent des périodicités de 2 300 et 1 470 ans. Les corrélations qui apparaissent entre les accidents climatiques et les variations du carbone 14 résiduel

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

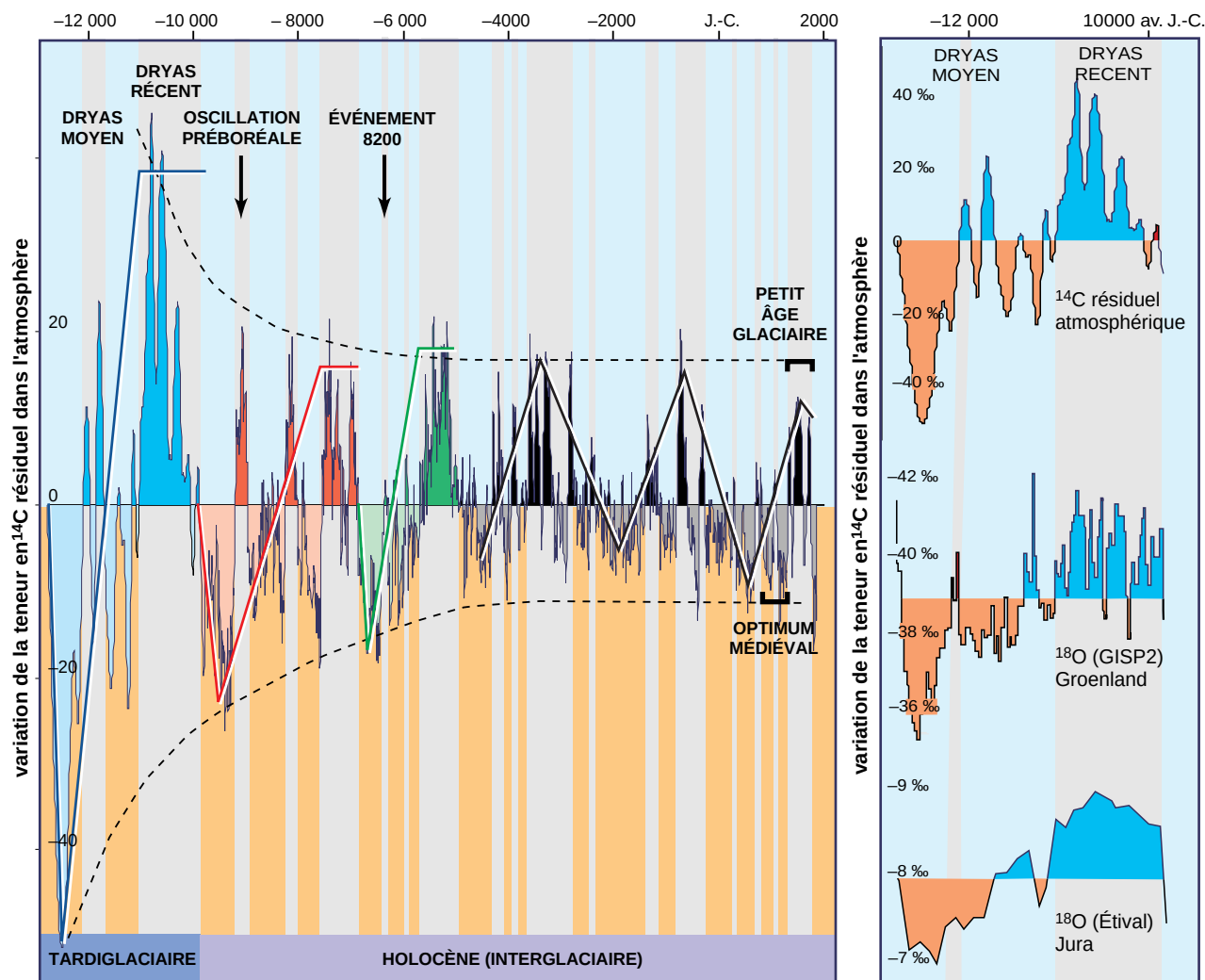
l'océan. Dans les deux cas, ils marquent l'arrêt d'un réchauffement et un net renversement de tendance du climat vers le refroidissement.

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 $1,2 \cdot 10^5$ 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

4. Datation au carbone 14 et radiocarbone résiduel



L'âge d'un échantillon est mesuré par le rapport carbone 14/ carbone 12 : tous les 5 730 ans, la quantité de carbone 14 (ou radiocarbone) diminue de moitié. On a longtemps supposé que la teneur de l'atmosphère en carbone 14 restait constante au cours du temps, or ce n'est pas tout à fait le cas. Il faut donc corriger les âges donnés par le radiocarbone. La technique la plus précise consiste à dater par le radiocarbone des bois dont on connaît l'âge précis grâce à la dendrochronologie (étude des cernes de croissance des arbres). Les bois fossiles collectés par différents laboratoires en Amérique du Nord et en Europe ont permis d'établir la courbe des variations de la teneur de l'atmosphère en carbone 14 depuis 9900 avant notre ère. En datant des sédiments composés d'une succession de couches annuelles dans le bassin de Cariaco, au large du Venezuela, les géologues ont prolongé cette courbe jusqu'aux environs de -12500 avant notre ère.

La production de carbone 14 dans la haute atmosphère est modulée par le champ géomagnétique et par l'activité solaire : elle diminue quand l'intensité du champ géomagnétique et l'activité du Soleil se renforcent. En soustrayant les effets induits par le champ géomagnétique, on obtient la courbe des variations de la teneur de l'atmosphère en carbone 14 résiduel. Ces variations reflètent les changements de la circulation océanique, ainsi que la répartition du radiocarbone entre l'atmosphère, la biosphère et l'océan.

À gauche, la courbe du carbone 14 résiduel montre des cycles d'une périodicité d'environ 2 300 ans que l'on retrouve également dans l'histoire de la circulation atmosphérique polaire reconstituée à partir des poussières retrouvées dans les glaces du Groenland.

Ces cycles pourraient être liés à des changements de l'activité solaire, comme le suggère l'observation d'étoiles du même type que le Soleil. Les effets de ces variations de l'activité solaire sur le climat seraient amplifiés par la circulation océanique qui affecte elle-même la répartition du radiocarbone entre atmosphère et océan (voir l'encadré 3).

Les trois premiers cycles (en bleu, rouge et vert) contemporains de la déglaciation ont une forme asymétrique et une amplitude qui contrastent avec la symétrie et l'amplitude plus modeste et plus régulière des cycles suivants.

À droite, les variations de la teneur de l'atmosphère en carbone 14 résiduel se calquent sur les oscillations du climat enregistrées par le rapport oxygène 18/oxygène 16 au site de Summit, au Groenland, ou dans le lac d'Étival, dans le Jura. Les brusques chutes des valeurs du carbone 14 résiduel vers 12500 et 9500 avant notre ère, associées à une réactivation de la circulation thermohaline, ont pour corollaire de brusques réchauffements du climat au Groenland et en Europe.

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. Statterger 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 mamouths 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.
