

L'évolution des climats

JEAN-CLAUDE DUPLESSY

Il y a juste 25 ans, l'origine astronomique des grandes glaciations du passé était enfin reconnue. Aujourd'hui, on mesure le rôle primordial que joue l'océan dans la machinerie climatique.

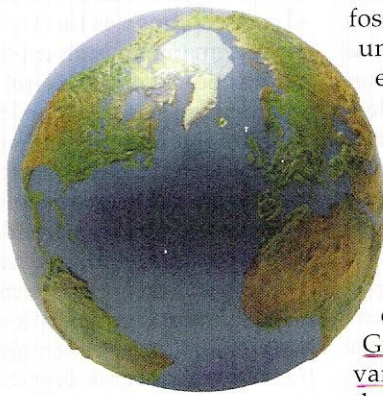
Pendant la première moitié du XX^e siècle, l'étude des climats anciens progresse peu. Les géologues connaissent certes l'existence de grandes glaciations dans le passé. Ils en ont dénombré quatre en cartographiant des moraines, débris rocheux qui sont transportés par les glaciers et qui marquent leur ligne de front. Pour expliquer ces grands coups de froid, les géologues invoquent tantôt de grandes phases volcaniques dont les émissions auraient intercepté le rayonnement solaire et provoqué un refroidissement de la planète, tantôt une diminution de l'activité solaire qui aurait eu le même effet. Peu d'entre eux se réfèrent à la théorie astronomique du climat, élaborée en 1941 par le géophysicien serbe Milutin Milankovitch.

La théorie astronomique de Milankovitch attribue les modifications du climat aux variations périodiques de l'orbite que décrit la Terre autour du Soleil. En effet, cette orbite passe d'une forme quasi-circulaire à faiblement allongée environ tous les 100 000 ans. Par ailleurs, l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite varie de plus ou moins 1,5 degré autour de sa valeur actuelle avec une périodicité de 41 000 ans. Enfin, l'axe des pôles terrestres suit un mouvement de précession, telle une toupie, si bien que la distance entre la Terre et le Soleil varie, à une saison donnée, avec une périodicité voisine de 21 000 ans.

IL Y A 21 000 ANS



AUJOURD'HUI



1. LORS DU DERNIER MAXIMUM GLACIAIRE, il y a 21 000 ans, des calottes glaciaires recouvraient le Canada et le Nord de l'Europe ; la glace s'étendait sur les mers nordiques et atteignait l'Islande ; la Manche et le plateau continental de la Bretagne étaient asséchés. La température moyenne de la Terre avait diminué de six degrés Celsius. Le refroidissement était inégalement réparti : intense dans l'océan Atlantique Nord et au voisinage du Japon, il était plus faible sous les tropiques.

Ainsi, même si le Soleil émet toujours la même quantité de chaleur, les modifications de la géométrie de l'orbite terrestre entraînent des variations de la quantité d'énergie solaire interceptée en chaque point de la planète. En calculant ces variations, Milankovitch a déterminé l'existence de nombreuses poussées glaciaires au cours du dernier million d'années. Or les géologues ne reconnaissent à cette époque en tout et pour tout que quatre glaciations (d'après les cartographies des moraines), ce qui constitue un argument majeur contre la théorie astronomique.

La théorie astronomique triomphe

La guerre froide donne un essor inattendu à la paléoclimatologie : les grandes puissances cherchent à manifester leur présence dans tous les océans du monde, et se servent de navires... océanographiques. Ceux-ci prélèvent des carottes sédimentaires longues de plusieurs mètres. Plus les sédiments prélevés sont profonds, plus ils sont vieux. Les carottes sont riches en coquilles microscopiques d'algues ou d'animaux fossiles, qui témoignent des conditions du passé et constituent un enregistrement de l'histoire locale de l'océan au cours des dernières dizaines ou centaines de millénaires.

La décennie 1970-1980 est marquée par des innovations majeures. John Imbrie et Nilva Kipp, paléoclimatologues à l'Université américaine Brown à Providence, développent une méthode d'analyse statistique des faunes fossiles présentes dans les carottes. En répertoriant, dans une strate, les espèces connues pour vivre dans des eaux plus ou moins froides, ils déduisent, avec une précision de l'ordre du degré, la température de surface de l'océan dans laquelle elles vivaient.

À l'Université de Cambridge, Nick Shackleton démontre que le rapport des isotopes 18O/16O présents dans les foraminifères (des micro-organismes unicellulaires marins) fossiles dépend surtout du volume des grandes calottes glaciaires présentes sur les continents (voir l'encadré page 78). Grâce à l'analyse isotopique des carottes, on connaît les variations du volume des calottes et donc la succession des périodes glaciaires (voir la figure 2). Les paléoclimatologues mettent ainsi en évidence une dizaine de grandes glaciations et davantage de poussées glaciaires de plus faible amplitude pendant le dernier million d'années. Leur chronologie est en excellent accord avec les calculs de Milankovitch : la théorie astronomique triomphe enfin voilà tout juste 25 ans !

Les variations du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ enregistrent un phénomène global : le volume des glaces présentes sur les continents. Elles servent à repérer dans des carottes provenant de différents océans les strates qui correspondent à des maxima d'une glaciation ou d'une période chaude. Ainsi naît l'idée de reconstituer l'état de la Terre au moment du dernier maximum glaciaire datant d'environ 21 000 ans (programme international CLIMAP). Les climatologues analysent les fossiles de la strate correspondant à cette époque et montrent que le Canada et le Nord de l'Europe étaient alors recouverts de montagnes de glace hautes de trois à quatre kilomètres (voir la figure 1). Faute de pluie, les déserts avaient progressé partout sur les continents. Pourtant, la température moyenne de l'air n'avait baissé que de six degrés Celsius environ.

Un changement de la température moyenne de la planète de quelques degrés a donc des conséquences énormes, très variables d'une région à une autre. Ceci est bien sûr vrai que le réchauffement soit provoqué par des variations de l'orbite terrestre ou par le rejet dans l'atmosphère des gaz à effet de serre.

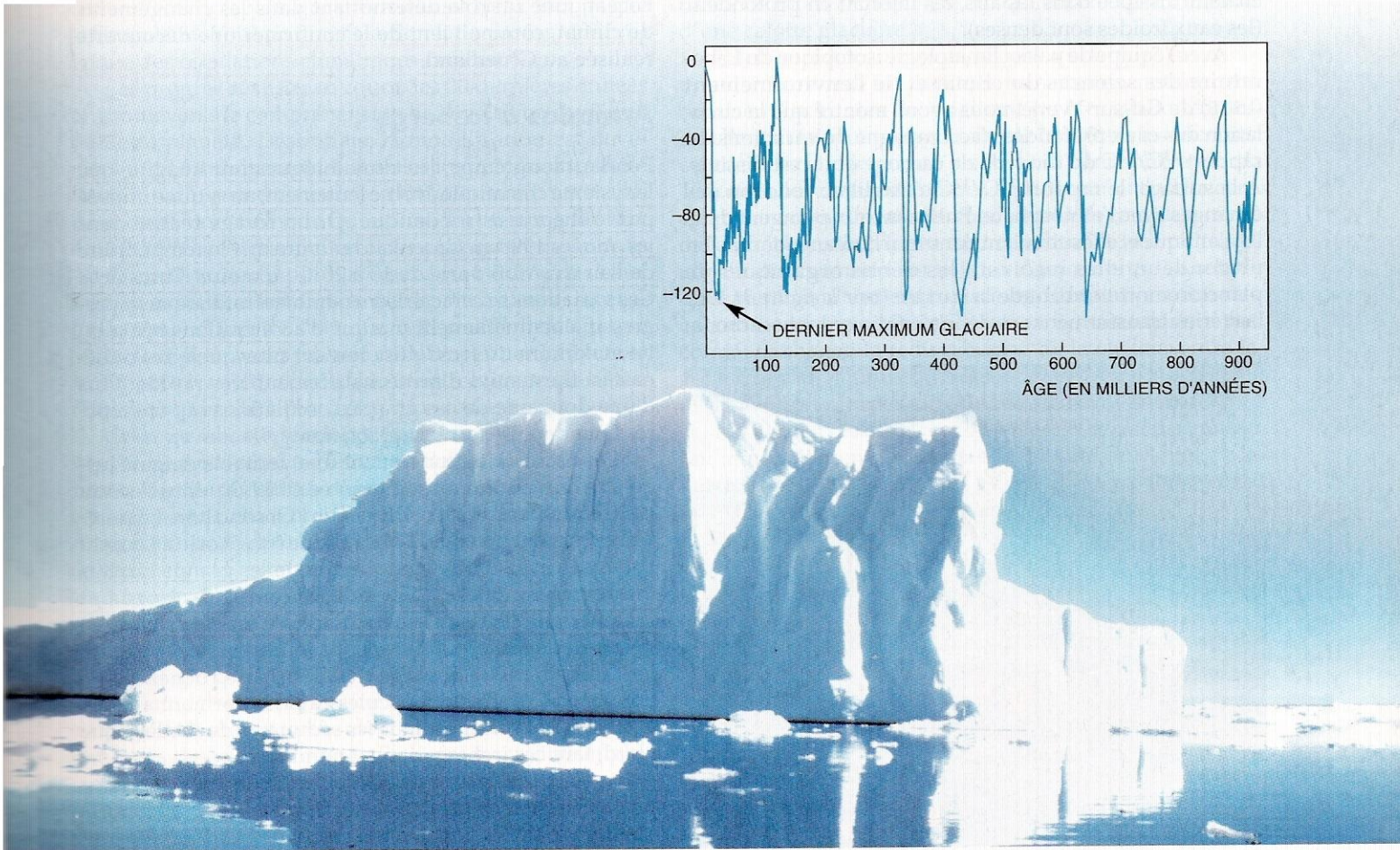
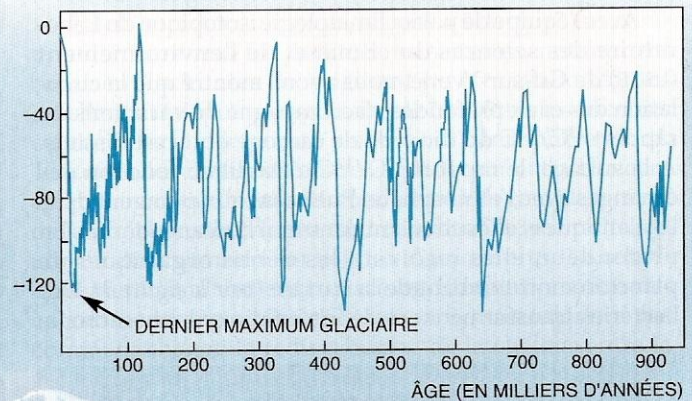
Outre l'analyse de carottes sédimentaires, les paléoclimatologues se livrent aussi à l'exploitation de carottes de glace. Des expéditions polaires françaises, danoises, suisses, américaines et russes, entraînées par Willi Dansgaard à Copenhague, Claude Lorius à Grenoble et Hans Oeschger

à Berne, réalisent des forages dans les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique. En analysant le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans les glaces, ils déterminent les variations de la température de l'air dans les zones polaires au cours des 400 000 dernières années : ils retrouvent l'empreinte des grandes glaciations, qui coïncident parfaitement avec celles déjà déterminées à partir des carottes marines sédimentaires.

L'influence de l'océan

Par ailleurs, les carottes forées dans les calottes glaciaires renferment de microscopiques bulles d'air bloquées au sein de la glace. Leur analyse suscite une grande surprise à une époque où l'on croit à la stabilité du cycle du carbone : l'air contient moins de dioxyde de carbone et de méthane pendant les périodes glaciaires que pendant les périodes chaudes. Ce phénomène, dont les mécanismes sont encore mal connus, contribue à réduire l'effet de serre naturel de notre planète et montre combien les cycles biogéochimiques sont fragiles et sensibles aux variations climatiques.

Au début des années 1980, l'histoire du climat sur la Terre est, dans ses très grandes lignes, reconstituée. Il reste toutefois une inconnue de taille : on ignore tout de l'évolution de la circulation océanique. Aujourd'hui, la circulation océanique est très dissymétrique. Les eaux superficielles froides plongent dans l'océan Atlantique Nord, puis



2. RECONSTITUTION DES VARIATIONS DU NIVEAU DE LA MER au cours du dernier million d'années. Lorsque les glaciers croissent sur les continents, le niveau de la mer diminue. Une baisse de 120 mètres comme celle observée lors du dernier maximum glaciaire, il y a 21 000 ans, correspond à un volume des glaces continentales de 50 millions de kilo-

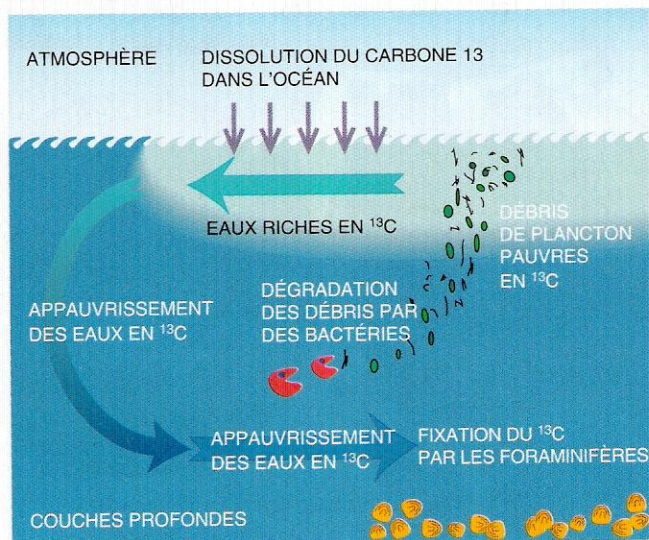
mètres cubes en excès par rapport au volume actuel des glaciers. Les maxima glaciaires se succèdent environ tous les 100 000 ans, périodicité imposée par les variations de l'orbite de la Terre autour du Soleil, comme le décrit la théorie astronomique du climat, proposée par le géophysicien serbe Milankovitch, et qui s'est imposée il y a 25 ans.

Isotopes et calotte glaciaire

Les variations de la composition isotopique de l'oxygène constituent un outil puissant pour reconstituer les glaciations. Le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ des coquilles de foraminifères dépend à la fois de la température et du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'eau dans laquelle ces animaux ont vécu. Or les molécules d'eau contenant l'isotope léger ^{16}O s'évaporent plus vite que celles formées avec l'isotope lourd ^{18}O . La vapeur d'eau dans l'atmosphère est enrichie en ^{16}O ainsi que les neiges qui tombent sur les calottes glaciaires. Ces dernières constituent un gigantesque réservoir d'eau douce, riche en ^{16}O , qui fond ou grossit en fonction des conditions climatiques. Plus les glaciers sont développés, plus le réservoir continental d'eau riche en ^{16}O est grand et plus l'eau restant dans la mer est pauvre en ^{16}O et riche en ^{18}O . Les variations du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ sont donc un bon indicateur du volume des océans et des calottes glaciaires.

circulent à grande profondeur pour envahir les océans Pacifique et Indien (voir la figure 4). Elles diffusent alors lentement vers la surface, se réchauffent et sont reprises par les courants superficiels. Tout se passe comme si un gigantesque tapis roulant collectait les eaux chaudes de l'océan mondial, les ramenait dans l'Atlantique Nord, pour le plus grand bénéfice des zones périatlantiques, puis, leur chaleur dissipée dans les airs, les injectait en profondeur (les eaux froides sont denses).

Avec l'équipe de paléoclimatologie isotopique du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) de Gif-sur-Yvette, nous avons montré que la circulation des eaux profondes s'accompagne de variations du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ du dioxyde de carbone qui y est dissous. À la surface, le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ s'établit en fonction des échanges avec l'atmosphère. Puis, ces eaux plongent dans l'Atlantique et elles circulent dans tout l'océan mondial. En profondeur, elles reçoivent les débris organiques de plancton mort tombant de la surface (voir la figure 3). Des bactéries transforment ces débris en dioxyde de carbone,



3. LE CARBONE 13 sert de marqueur de la circulation océanique. Le dioxyde de carbone de l'atmosphère se dissout dans les eaux de surface, qui s'enfoncent vers les profondeurs, avec un certain rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. À mesure qu'elles s'éloignent, elles reçoivent des débris de plancton, pauvres en ^{13}C et dégradés par des bactéries : elles s'appauvrissent en ^{13}C .

qui est pauvre en ^{13}C (tous les êtres vivants sont pauvres en ^{13}C). À mesure que les eaux profondes s'éloignent de leur source, elles reçoivent de plus en plus de matière organique morte, donc leur teneur en ^{13}C diminue. Au final, le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'eau est enregistré dans la coquille des foraminifères benthiques qui vivent à la surface du sédiment, parfois à une profondeur de plusieurs kilomètres.

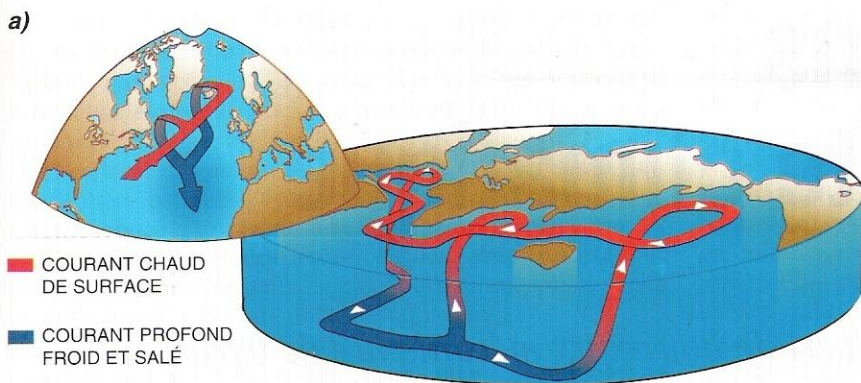
À partir de 1984, Nick Shackleton et moi présentons les premières reconstitutions de la circulation océanique globale passée, à partir des foraminifères benthiques prélevés dans des carottes collectées à diverses latitudes et sous différentes profondeurs d'eau. Nous déterminons que les périodes froides sont caractérisées par un tapis roulant moins actif : les masses d'eau plongent toujours dans l'océan Atlantique, mais en quantité réduite (voir la figure 4). Par exemple, lors de la dernière période glaciaire, la quantité d'eau profonde qui plongeait dans l'Atlantique Nord était réduite d'environ 50 pour cent, parce que les eaux de surface aux hautes latitudes étaient moins salées, donc moins denses que dans les conditions actuelles. Le tapis roulant étant ralenti, le flux de chaleur reçu par l'Atlantique Nord était réduit d'autant, ce qui contribuait aux basses températures sur les continents de l'hémisphère Nord. Par conséquent, le système climatique n'évolue pas seulement en fonction des variations de l'incidence du rayonnement solaire : l'océan joue un rôle déterminant dans les changements de climat, comme vient de le confirmer une découverte réalisée au Groenland.

Armadas d'icebergs

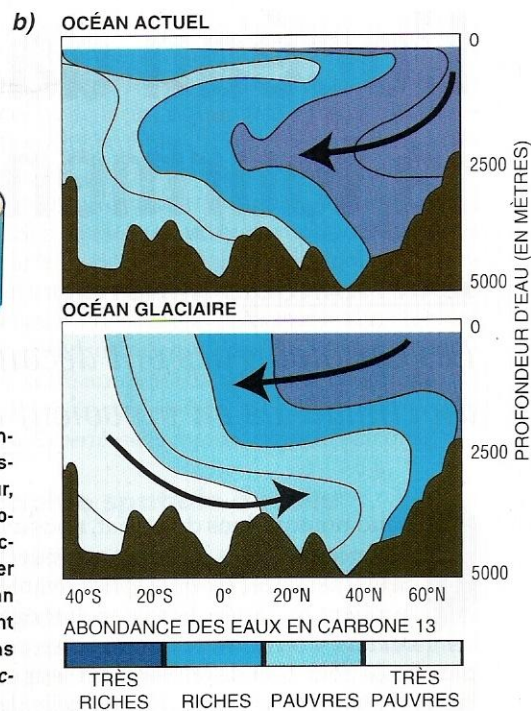
Pendant longtemps, les climatologues ont imaginé que le système climatique évolue lentement, au rythme imposé par la théorie astronomique. Or un forage réalisé dans les années 1990 au Groenland montre que la température de l'air a parfois varié de 10 à 20°C en moins d'un siècle. Ces variations se caractérisent par un refroidissement progressif, éventuellement marqué d'accéléérations brutales. Le maximum du froid dure tout au plus quelques millénaires. Il est suivi d'un réchauffement très rapide. Plus d'une douzaine de ces grandes oscillations ont été repérées pendant la dernière glaciation.

Ces oscillations constituent une véritable énigme jusqu'à ce que la solution soit trouvée en 1993... dans l'océan, par Gerard Bond et ses collègues de l'Observatoire Lamont-Doherty de l'Université Columbia de New York et Laurent Labeyrie du LSCE. Ils découvrent que les grands glaciers qui recouvraient l'Europe et l'Amérique du Nord ont relâché, par période, des armadas d'icebergs (événements de Heinrich). Ceux-ci ont fondu en laissant tomber, trace de leur passage, les débris de roches qu'ils transportaient. Ces minuscules cailloux forment aujourd'hui des lits continus dans les sédiments de l'Atlantique Nord, tant ces icebergs étaient nombreux.

La fonte de ces icebergs avait créé une couche d'eau peu salée qui stratifiait l'océan comme de l'huile sur le vinaigre dans les zones où les eaux de surface plongent habituellement. Par conséquent, le tapis roulant océanique ralentissait, voire s'arrêtait, et un grand coup de froid s'abat-tait sur tout l'Atlantique Nord. Lorsque les calottes glaciaires devenaient trop petites pour émettre des icebergs, la circulation océanique reprenait. L'arrivée d'eaux tropicales



4. LA CIRCULATION OCÉANIQUE est globale : la circulation globale de l'océan ressemble à un gigantesque tapis roulant qui amène des eaux chaudes dans l'Atlantique Nord, où leur chaleur est transférée à l'atmosphère (a). Quand le tapis roulant ralentit, l'Atlantique Nord reçoit moins de chaleur, ce qui se traduit immédiatement par un grand coup de froid. Les variations de la composition isotopique du dioxyde de carbone dissous dans l'eau reflètent la circulation océanique, ici dans la section Nord Sud de l'océan Atlantique (b). Pour l'établir, on a analysé des échantillons d'eau de mer (océan actuel) ou des foraminifères benthiques prélevés dans des carottes de sédiment (océan glaciaire). Les masses d'eau les plus riches en carbone 13 sont celles qui ont été le plus récemment en contact avec l'atmosphère. Les masses d'eau profonde les mieux ventilées sont localisées dans l'Atlantique Nord, là où les eaux superficielles plongent pendant l'hiver (les flèches indiquent la direction principale du courant d'eau profonde).



chaudes aux hautes latitudes était alors responsable d'un réchauffement rapide, qui affectait aussi bien l'Europe que le Groenland. Voilà comment la circulation océanique provoque des oscillations climatiques rapides.

Les progrès réalisés au cours des 20 dernières années ont bouleversé la compréhension de l'évolution du climat de notre planète. Désormais, la modélisation est devenue l'outil fondamental pour tester les mécanismes d'interaction au sein du système climatique. Au LSCE, j'ai développé une méthode qui utilise les mesures du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ des foraminifères planctoniques (vivant dans les eaux de surface) pour estimer les salinités des eaux de mer superficielles dans le passé. Par ailleurs, on évalue la température de l'eau d'après la méthode d'analyse statistique des faunes fossiles développée par J. Imbrie et N. Kipp. On connaît donc la densité de ces eaux, qui détermine leur capacité à plonger profondément.

Grâce au modèle développé par mes collègues de l'Université de Louvain-La-Neuve en Belgique, nous avons retrouvé, à partir de ces données, les grands traits de la circulation océanique que j'avais reconstituée dix ans plus tôt avec mon collègue Nick Shackleton par des méthodes entièrement indépendantes (l'analyse du ^{13}C présent dans les foraminifères benthiques). Les simulations montrent que, lorsque les eaux superficielles de l'Atlantique Nord sont salées et denses, le tapis roulant océanique est actif. Il ralentit dès que la salinité et la densité diminuent.

Les modèles de circulation générale de l'atmosphère sont utilisés depuis plus de 20 ans pour simuler des extrêmes des climats passés (le dernier maximum glaciaire, par exemple). Jusqu'à l'an dernier, toutes les tentatives pour simuler une transition climatique, telle l'entrée dans une glaciation, ont échoué. Myriam Khodri et ses collègues du LSCE ont montré dans un modèle que la diminution de l'insolation d'été aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord a un rôle essentiel. Elle provoque un ralentissement de la circulation océanique et un refroidissement des mers nordiques et des continents, au

point que les neiges tombées sur le Canada et la Scandinavie ne fondent plus l'été, ce qui amorce la formation d'une calotte glaciaire.

Quels sont les points qui restent à éclaircir ? On comprend encore mal les périodes transitoires, notamment comment les chutes de neige ont pu être si abondantes qu'elles ont fait pousser en moins de 10 000 ans les énormes calottes glaciaires qui ont recouvert l'hémisphère Nord. Toutefois, les changements de végétation n'ont pas encore été pris en compte dans les modèles. Or le remplacement de la forêt boréale par une toundra entraîne une réflexion accrue du rayonnement solaire. Ceci amplifie le refroidissement résultant des variations d'insolation et de circulation océanique. Par ailleurs, on ne sait toujours pas comment change la redistribution de la chaleur entre la zone tropicale, qui reçoit l'essentiel de l'énergie solaire, et les hautes latitudes lorsque l'insolation varie.

Les études réalisées au cours des 20 dernières années ont mis en évidence l'extrême sensibilité du climat de la Terre. Il répond fortement à de petites variations du bilan énergétique de l'atmosphère, en raison du rôle amplificateur des rétroactions de l'océan ou de la végétation. Qu'en était-il dans un passé plus lointain ? La disposition des continents, l'altitude des chaînes de montagnes et la circulation océanique étaient différentes. Ce sont des mondes qui restent à explorer pour comprendre comment notre planète a vécu de longs épisodes de glaciation, par exemple cette boule-de-neige dont on pressent l'existence il y a quelque 600 millions d'années, ainsi que des périodes chaudes qui régnaient il y a encore 60 millions d'années. Seule l'analyse approfondie des climats passés nous permettra de comprendre le monde chaud, qui, dès le siècle prochain, pourrait résulter des émissions de gaz à effet de serre.

Jean-Claude DUPLESSY est directeur de recherches au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CNRS/CEA), à Gif-sur-Yvette.