

# Le dernier réchauffement climatique

Quels rôles jouent l'insolation, l'effet de serre et les courants océaniques lors d'un réchauffement de grande ampleur ? Les rouages de la mécanique climatique responsable de la dernière déglaciation, entre - 21 000 et - 8 000 ans, viennent d'être élucidés.



**PAR Édouard Bard**, professeur au Collège de France (chaire de l'évolution du climat et de l'océan), membre de l'Académie des sciences et directeur adjoint du Cerege à Aix-en-Provence, université d'Aix-Marseille et CNRS.

**I**l y a 21 000 ans, le climat de la Terre a basculé. La température moyenne du globe a grimpé d'environ 4 °C en 10 000 ans. Ce réchauffement a marqué la fin de la dernière grande glaciation. Les deux tiers des glaces continentales ont fondu, et le niveau marin s'est élevé d'environ 130 mètres.

Plusieurs changements, qui se sont produits à peu près à la même période, ont participé à ce bouleversement : l'or-

bite de la Terre a varié ; la concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) a augmenté de moitié ; et la circulation de l'océan profond s'est arrêtée momentanément. Quelles ont été les importances respectives de ces phénomènes dans le réchauffement ? Répondre à cette question était nécessaire pour expliquer comment un tel bouleversement a pu s'opérer. Cela permet aussi de mieux comprendre le réchauffement climatique actuel, et de prévoir comment il pourrait évoluer. Les mécanismes qui ont présidé à cette transition climatique passée sont en effet toujours actifs aujourd'hui.

**Dioxyde de carbone moteur.** Après une décennie de recherche au sein de notre laboratoire et de nombreux groupes dans le monde, c'est chose faite. Nos conclusions sont claires : l'augmentation de l'insolation de la Terre a donné l'impulsion pour déclencher la déglaciation, mais c'est l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> qui, en créant un effet de serre\* supplémentaire dans l'atmosphère, a pris le relais et a constitué le moteur principal du réchauffement [1]. Celui-ci n'a été ralenti que régionalement par les soubresauts de la circulation océanique mondiale.

Notre première tâche a été de reconstituer la chronologie précise des événements climatiques qui se sont succédé au cours des 21 000 dernières années. Elle était d'envergure : il existe en effet

## L'essentiel

> IL Y A 21 000 ANS, la Terre a commencé à se réchauffer : au cours des 10 000 ans suivants, la température globale moyenne a augmenté de 4 °C.

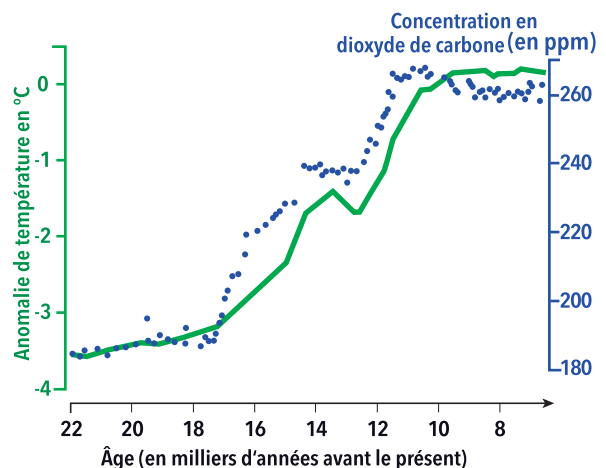
> LES VARIATIONS de température des différentes régions du globe pendant cette période ont été reconstituées.

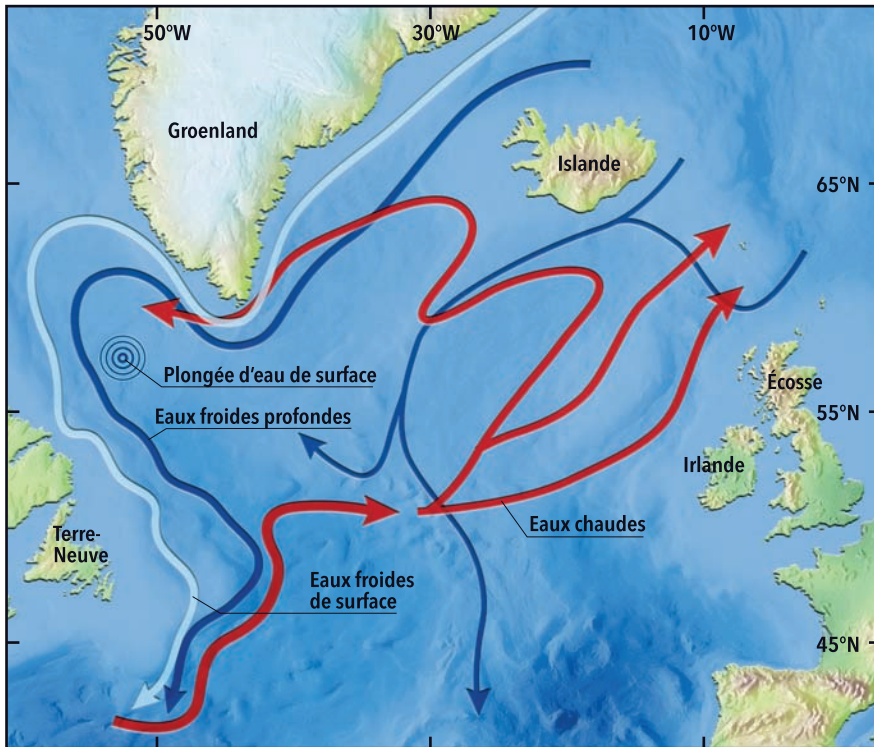
> C'EST L'AUGMENTATION de l'effet de serre liée à l'accroissement de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone qui est responsable de l'ampleur du réchauffement.

© PATRICK IMBERT/COLLÈGE DE FRANCE

**Fig.1** Le dioxyde de carbone source de réchauffement

**L'AUGMENTATION** de la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère à la fin de la dernière période glaciaire (en bleu) a été mesurée dans les carottes de glace prélevées en Antarctique. Elle précède l'augmentation de la température moyenne mondiale (en vert), reconstituée à partir de nombreux enregistrements recueillis sur toute la planète.





**Dans l'Atlantique Nord, des eaux chaudes (en rouge) provenant de la zone tropicale viennent réchauffer l'atmosphère. Corrélativement, des courants froids (en bleu clair et foncé) se dirigent vers le sud. Cette circulation profonde s'est presque arrêtée à deux reprises au cours de la déglaciation.**

des centaines d'études décrivant l'évolution des températures locales à différentes périodes de la déglaciation. Toutes mettent à profit le fait que la composition de la neige qui s'accumule sur les calottes de glace, ou des sédiments qui se déposent au fond des lacs et des océans, varie avec la température. Mais chaque type de dépôt a été analysé et daté avec des méthodes spécifiques. Il fallait donc, pour obtenir une vision globale de l'évolution des températures, reprendre ces données en ramenant les échelles de temps et de température à deux référentiels homogènes.

Cela fait, notre préoccupation a été de calculer les variations de la température moyenne à la surface du globe, et de les comparer avec l'évolution de la concentration en  $\text{CO}_2$  atmosphérique. Pour celle-ci,

nous disposons depuis 1980 de valeurs globales, mesurées dans les bulles des carottes de glace de l'Antarctique. Effectivement, ce gaz se mélange rapidement dans l'atmosphère, de façon homogène.

Cette comparaison était très attendue : jusqu'ici, en effet, l'évolution de la concentration de  $\text{CO}_2$  n'avait été comparée précisément qu'avec la température locale en Antarctique. Ces études indiquaient

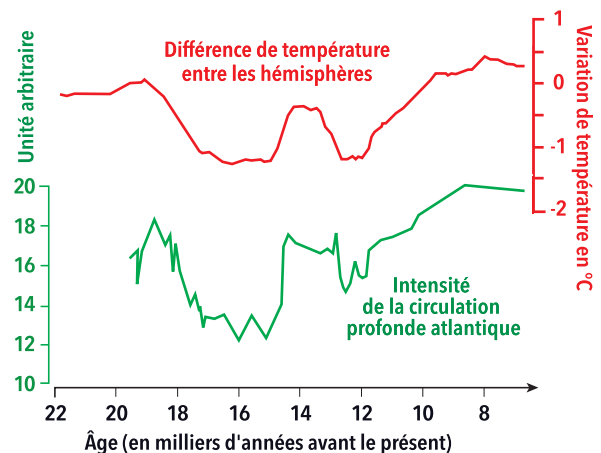
que le continent austral s'était réchauffé en même temps, voire quelques siècles avant l'augmentation de cette concentration (et donc avant l'augmentation correspondante de l'effet de serre). Ce résultat était parfois présenté comme contredisant le rôle de l'effet de serre dans le réchauffement. Or nos travaux montrent que la température moyenne mondiale a, au contraire, suivi l'augmentation de la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$ . La courbe de température de l'Antarctique ne reflète donc pas précisément le phénomène global. D'ailleurs, à y regarder de près, le tempo du réchauffement dépend fortement de la latitude.

**Hautes latitudes d'abord.** La zone qui se réchauffe la première, vers -21 000 ans, est située aux plus hautes latitudes de l'hémisphère Nord, au-dessus de 60 degrés de latitude nord. Vers -18 000 ans, le réchauffement gagne les hautes latitudes de l'hémisphère Sud, notamment l'Antarctique. Ce n'est que trois millénaires plus tard, vers -14 700 ans, que les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord (entre 30 et 60 degrés) se rallient au réchauffement général.

Le  $\text{CO}_2$ , lui, s'accumule rapidement dans l'atmosphère à partir de -18 000 ans. Or, à la même période, la composition géochimique des sédiments et des coraux de l'océan Austral évolue. Ces changements trahissent l'émission, par les eaux >>>

**Fig.2 Réchauffement hétérogène**

**ENTRE - 22 000 ET - 8 000 ANS,** l'hémisphère Nord a arrêté de se réchauffer, voire a légèrement refroidi à deux reprises : on observe des différences significatives entre les températures des deux hémisphères (en rouge). Ces événements sont parfaitement corrélés à de fortes chutes de l'intensité de la circulation profonde dans l'Atlantique (en vert).



**\*L'EFFET DE SERRE** est le réchauffement de la basse atmosphère dû au piégeage par certains composants atmosphériques d'une partie de la chaleur émise par la Terre, chauffée par le Soleil.

**\*LE CARBONE-13 ET LE CARBONE-14** sont des atomes qui ne diffèrent du carbone-12 (le plus courant) que par le nombre de neutrons dans leur noyau.

# Le dernier réchauffement climatique

►►► de l'océan Austral, de CO<sub>2</sub> appauvri en carbone-13 et en carbone-14\*. On observe cet appauvrissement dans le CO<sub>2</sub> retrouvé en excès dans les bulles d'air emprisonnées dans les glaces de l'Antarctique. L'excès de CO<sub>2</sub> atmosphérique proviendrait donc des eaux de l'océan Austral [2].

Nous avons aussi mis en évidence deux autres événements : deux refroidissements brefs dans l'Atlantique Nord, vers -16 000 ans, puis vers -12 000 ans, au moment où les zones australes, elles, se réchauffent. Cette bascule thermique coïncide avec des variations de la composition des sédiments marins, qui révèlent un arrêt de la circulation océanique profonde de l'Atlantique. Deux faits cohérents : quand les grands courants de la circulation profonde se déplacent, ils transfèrent de la chaleur du sud vers le nord de l'Atlantique ; s'ils ralentissent ou s'arrêtent, le sud a tendance à se réchauffer, et l'Atlantique Nord à se refroidir.

Ces éléments ont permis de reconstituer le scénario de la dernière déglaciation, en cinq étapes principales. Tout commence vers -21 000 ans, en pleine période glaciaire. Les modifications cycliques de l'orbite de notre planète, liées à la mécanique céleste, l'amènent à se rapprocher légèrement du Soleil à l'été boréal. L'axe de rotation de la Terre est alors incliné de manière que l'hémisphère Nord bénéficie le premier du surplus d'insolation.

## Le facteur déclenchant

**Il y a 21 000 ans, c'est la variation de l'orbite terrestre qui a déclenché le réchauffement. Les variations d'insolation ont été suffisantes pour pousser le système dans une boucle de rétroactions positives : fonte des glaces, arrêt de la circulation océanique et émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) vers l'atmosphère ont fortement amplifié le réchauffement initial. Aujourd'hui, la configuration de l'orbite terrestre devrait plutôt favoriser un refroidissement à long terme. Mais l'homme, en brûlant des hydrocarbures fossiles, émet du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et augmente l'effet de serre atmosphérique. C'est ce phénomène qui perturbe le bilan radiatif terrestre et réchauffe notre climat actuel. Le cercle vicieux est en marche.**

Le réchauffement commence alors aux latitudes les plus hautes de cet hémisphère. Il fait fondre en partie les grandes calottes de glace qui recouvrent l'Amérique du Nord et l'Europe. Cet apport d'eau douce provoque, à partir de -19 000 ans, l'effondrement de la circulation océanique profonde. Cela réduit fortement le flux de chaleur de l'hémisphère Sud vers l'hémisphère Nord : celui-ci se refroidit de nouveau, tandis que le sud s'échauffe, notamment en Antarctique. Malgré le refroidissement intense de l'Atlantique Nord, la moyenne de la température planétaire augmente vite. La cause principale de ce réchauffement généralisé est l'effet de serre supplémentaire produit par l'accumulation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Ce gaz est émis par l'océan Austral, par remontée des masses d'eau chargées en CO<sub>2</sub>.

**Augmentation du niveau marin.** La circulation de l'Atlantique finit par se rétablir vers -14 700 ans, quand la débâcle des icebergs provenant de la baie d'Hudson se calme. La bascule océanique se renverse : le réchauffement de la zone australe s'arrête pendant deux millénaires, tandis que le nord rattrape rapidement son retard. Ce réchauffement accélère de nouveau la fonte des calottes de glace conduisant à une augmentation spectaculaire du niveau marin, de 4 à 5 mètres par siècle [3].

Comme précédemment, l'afflux d'eau douce dans l'Atlantique Nord entraîne un effondrement de la circulation océanique profonde. Entre -13 000 et -11 500 ans, l'hémisphère Nord se refroidit donc une seconde fois, tandis que l'Antarctique se réchauffe. La circulation atlantique se

rétablit enfin, et les températures des différentes bandes de latitude se stabilisent doucement à des niveaux proches de la climatologie actuelle.

Nous avons validé ce scénario grâce au modèle de circulation générale du Centre américain de recherche atmosphérique et de l'université du Wisconsin. Celui-ci peut simuler le comportement couplé de l'océan et de l'atmosphère sur une période d'une dizaine de millénaires. Il permet en outre de faire varier isolément les différents paramètres qui influencent le climat, et ainsi de mieux comprendre lesquels peuvent le faire basculer.

Nos modélisations ont par exemple souligné l'importance de l'océan dans les échanges de chaleur à l'échelle de la planète. Celui-ci ne se contente pas d'atténuer les variations climatiques. Il peut amplifier, réduire, voire inverser, transitoirement et régionalement, une évolution climatique à long terme. Le retrait des calottes glaciaires se révèle de son côté moins influent que ce qui est parfois présenté. La diminution du pouvoir réfléchissant de la surface terrestre, à la suite de la fonte des grandes calottes, n'influence le climat qu'aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Cet effet ne permet pas d'expliquer le gain de plusieurs degrés aux basses latitudes.

Finalement, le paramètre principal dans un réchauffement de grande ampleur est bien l'augmentation de l'effet de serre. Ce constat confirme les inquiétudes quant à l'évolution climatique actuelle, alors que ce facteur est exacerbé par les activités humaines. L'ampleur du changement climatique actuel est pour l'instant plus faible que celle de la dernière déglaciation, mais on peut craindre qu'il s'accélère. ■

[1] J. D. Shakun *et al.*, *Nature*, 484, 49, 2012.

[2] J. Schmitt *et al.*, *Science*, 336, 711, 2012 ; A. Burke et L. Robinson, *Science*, 335, 557, 2012.

[3] P. Deschamps *et al.*, *Nature*, 483, 559, 2012.

### Pour en savoir plus

► E. Bard (dir.), *L'Océan, le climat et nous : un équilibre fragile ?* Le Pommier & Universcience, 2011.

► C. Jeandel et R. Mosseri (dir.), *Le Climat à découvert*, CNRS Éditions, 2011.