

d'enregistrements climatiques étaient quasi identiques sur les 110 000 dernières années, elles ne s'accordaient pas pour les périodes antérieures, en raison de déformations différentes des couches de glace. Le socle rocheux perturbe bien plus les couches annuelles qu'on ne s'y attendait initialement ; il avait brouillé les analyses climatiques.

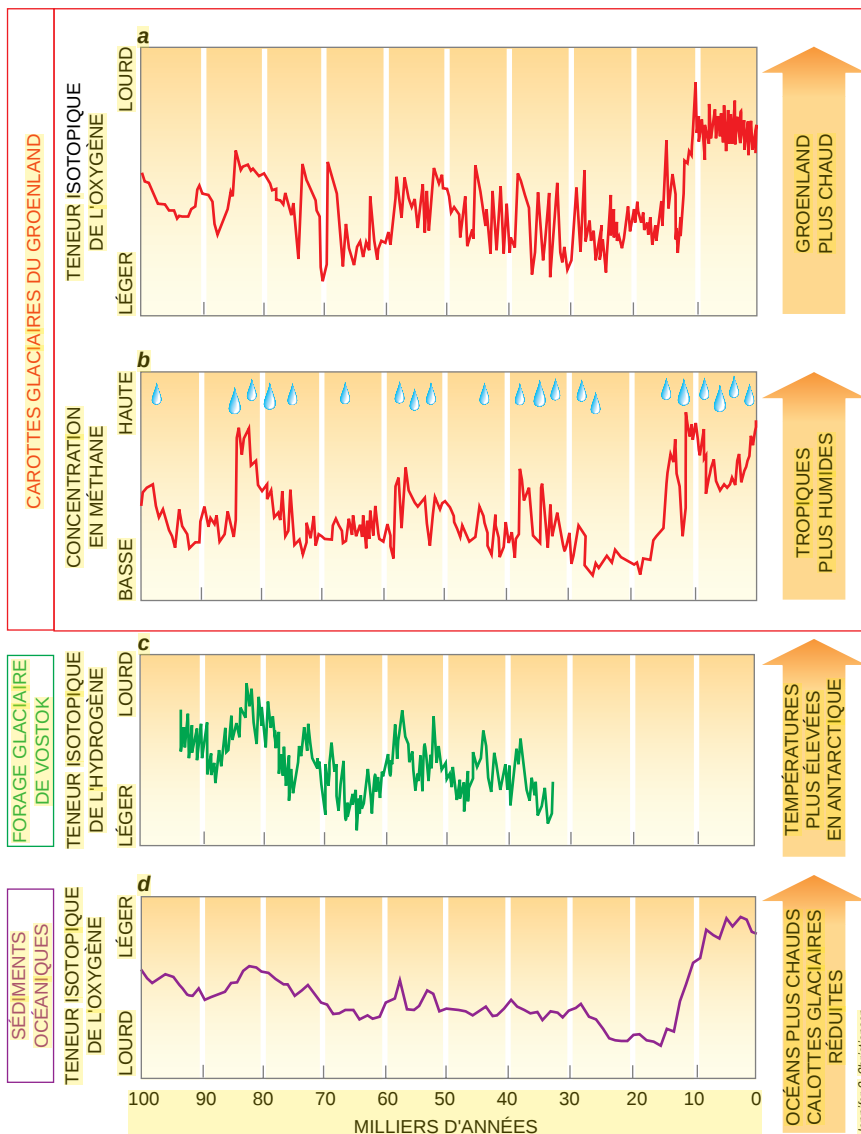
Aujourd'hui, les paléoclimatologues tentent de modéliser informatiquement ces déformations des couches profondes. De surcroît, pour obtenir un enregistrement fiable du climat pendant l'Éémien, l'équipe européenne a entrepris un autre forage, à 340 kilomètres au Nord-Ouest des deux forages précédents. Dans ce nouveau

site, les couches antérieures à 110 000 ans seraient plus loin du socle rocheux que dans les précédents forages : les distorsions dues à l'écoulement de la glace y seraient plus faibles.

Dans les cas où les problèmes de datation sont résolus, on étudie les évolutions climatiques à partir des températures passées. Le principal thermomètre utilisé est la concentration en eau «lourde», dont l'atome d'oxygène contient 17 ou 18 neutrons, au lieu de 16 dans les atomes d'oxygène les plus courants (il existe un autre type d'eau «lourde», utilisée notamment dans les centrales nucléaires, où l'hydrogène est remplacé par sa forme à un neutron, le deutérium). Lorsqu'une masse d'air se

refroidit, l'eau lourde se condense d'abord et précipite (les liaisons «hydrogène» entre les atomes d'hydrogène et les atomes d'oxygène de molécules différentes y sont plus fortes). Ainsi, pendant les périodes plus froides, la neige qui tombe à l'intérieur des terres contient moins d'eau «lourde», parce que celle-ci a déjà précipité, lorsque les nuages étaient au-dessus de l'océan ou des bords de la calotte glaciaire.

La température actuelle de la glace donne d'autres indications. Le phénomène est analogue à celui que l'on observe quand on met un rôti congelé au four : le cœur reste froid longtemps. De même, la glace située à un ou deux kilomètres de profondeur conserve l'enregistrement atténué et déformé des températures extrêmes de la dernière glaciation : elle est plus froide qu'en surface. Ces deux méthodes d'évaluation de la température montrent que



2. LES TEMPÉRATURES (a) et les concentrations en méthane dans l'atmosphère (b) ont été déterminées, pour les 100 000 dernières années, par l'étude des carottes de glace du Groenland. Ces mesures confirment les résultats des études analogues menées sur des carottes glaciaires prélevées à Vostok, en Antarctique (c), et les calculs du

volume total de glace dans le monde réalisés à partir de l'analyse des sédiments marins profonds (d). Le Globe se réchauffe tous les 20 000 ans. Le refroidissement progressif, jusqu'à il y a 20 000 ans, et le réchauffement rapide il y a 20 000 à 10 000 ans suivent un cycle de période plus longue, égale à 100 000 ans environ.

L'opposition climatique Nord-Sud dans les carottes de glace

L'examen des carottes de glace du Groenland, pour les derniers 110 000 ans, a révélé des épisodes de réchauffement et de refroidissement brusques (en quelques décennies), nommés événements Dansgaard/Oeschger. Les carottes glaciaires prélevées en Antarctique témoignent aussi de fluctuations moins rapides et d'amplitude bien moindre. En replaçant les enregistrements sur une même échelle de temps, nous avons confirmé, pour un passé récent, ce que des modèles et des prélèvements sédimentaires océaniques laissent penser : ces fluctuations dans les deux hémisphères sont en opposition de phase.

Comment déterminer une échelle temporelle précise pour les carottes de glace ? On utilise des marqueurs stratigraphiques, témoins d'événements dont les conséquences ont touché simultanément tout le Globe : leur observation dans les carottes du Groenland et de l'Antarctique permet d'établir une chronologie commune. Les principaux sont les éruptions volcaniques importantes, les pics de béryllium 10, radioélément produit dans la haute atmosphère et dont le flux vers la surface dépend de l'activité solaire ou du champ magnétique terrestre, et les variations de la concentration atmosphérique de gaz traces.

Ces dernières ont l'avantage sur les autres marqueurs d'être quasi continues, et de produire une longue échelle de temps relative. Toutefois, la neige séjourne un certain temps sur le glacier avant de se transformer en glace et d'emprisonner de l'air : ce dernier est donc toujours plus récent que la glace qui l'entoure. La quantification de cette différence d'âge détermine la précision des corrélations possibles.

Deux paramètres gazeux ont été utilisés jusqu'ici pour corréler les carottes de glace du Groenland et de l'Antarctique : la composition isotopique de l'oxygène de l'air (le rapport d'abondance entre l'oxygène 18 «lourd» et l'oxygène 16 «léger») et la concentration en méthane. Grâce

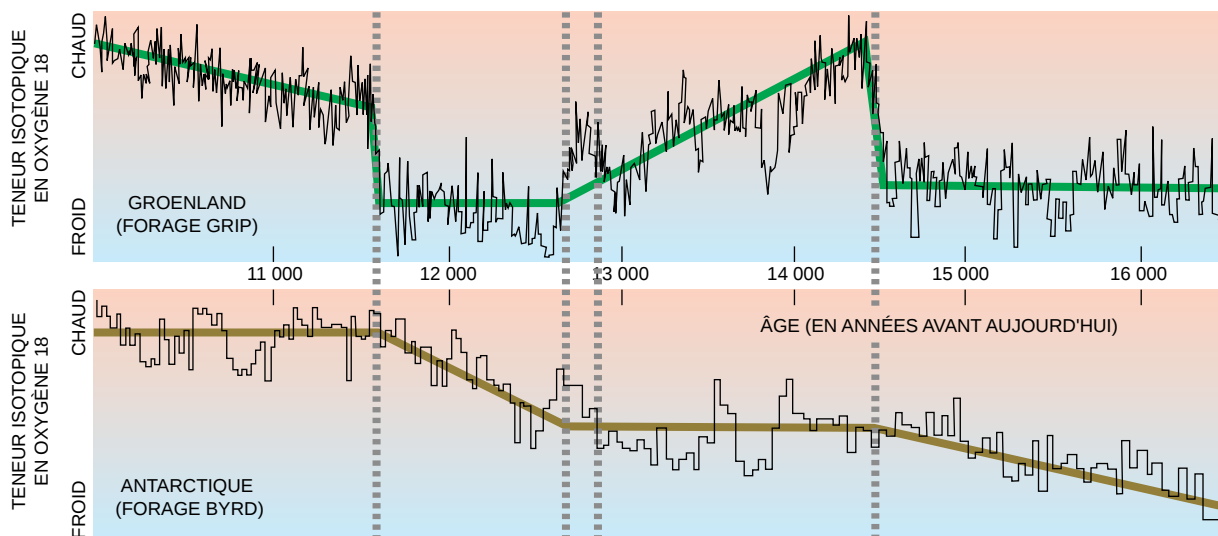
au premier, Mike Bender et ses collègues ont montré que la température s'est élevée significativement en Antarctique seulement quand les événements Dansgaard/Oeschger du Groenland ont duré plus de 2 000 ans. L'incertitude sur la différence d'âge entre l'air et la glace, et la faible variabilité de la composition isotopique de l'oxygène atmosphérique les a toutefois empêchés de déterminer la relation temporelle entre Groenland et Antarctique avec une précision meilleure que 3 000 ans.

La concentration en méthane varie beaucoup plus au cours du temps. En collaboration avec nos collègues de l'Université de Berne, en Suisse, nous l'avons mesurée et montré que l'épisode à température constante qui interrompt pendant 1 500 ans le réchauffement de l'Antarctique lors de la dernière déglaciation était simultané à un épisode chaud au Groenland. De même, le refroidissement spectaculaire du Dryas récent (il y a 12 500 à 11 500 ans) au Groenland était accompagné d'un réchauffement en Antarctique.

Cette relation temporelle entre les climats du Nord et du Sud prouve que, comme des modèles océaniques l'avaient prédit, pendant la dernière déglaciation, le flux de chaleur provenant de l'océan qui entoure l'Antarctique était en opposition de phase avec celui de l'océan Atlantique Nord. Ainsi, les climats des régions polaires Nord et Sud semblent-ils toujours couplés, via la circulation océanique globale, durant cette phase de changement climatique fondamental, mais avec des conséquences opposées dans les deux hémisphères. Nous poursuivons actuellement les analyses de la concentration en méthane sur la période d'il y a 50 000 à 25 000 ans, afin de vérifier si la même relation existait pendant cette période.

Jérôme CHAPPELLAZ, CNRS

Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, Saint-Martin-d'Hères



Les variations de température au Groenland (en haut) et en Antarctique (en bas) pendant la dernière transition glaciaire/interglaciaire ont été corrélées à partir des concentrations en méthane dans l'atmosphère. Au début du réchauffement au Groenland (il y a

14 500 à 13 000 ans environ), la température se stabilise en Antarctique. En revanche, pendant la période froide d'il y a 12 700 à 11 600 ans au Groenland, la température a continuellement augmenté en Antarctique.

D'après T. Blunier et al., *Geophysical Research Letters*, vol. 24, pp. 2683-2686, 1^{er} nov. 1997.