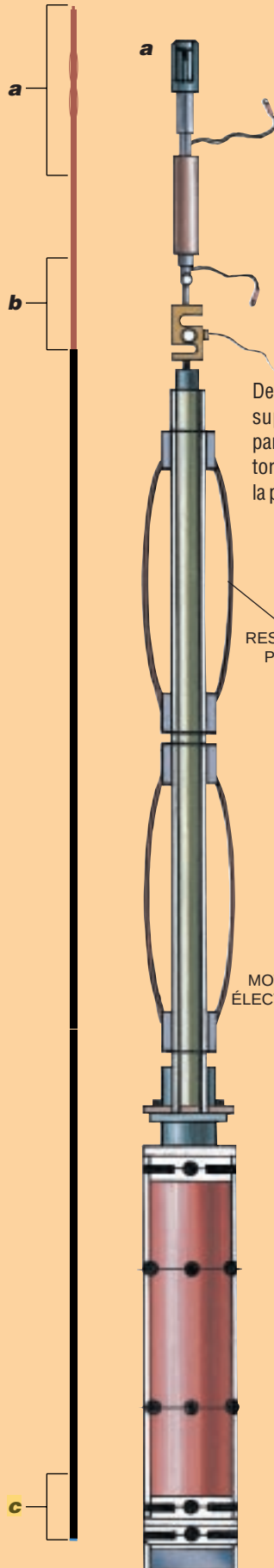
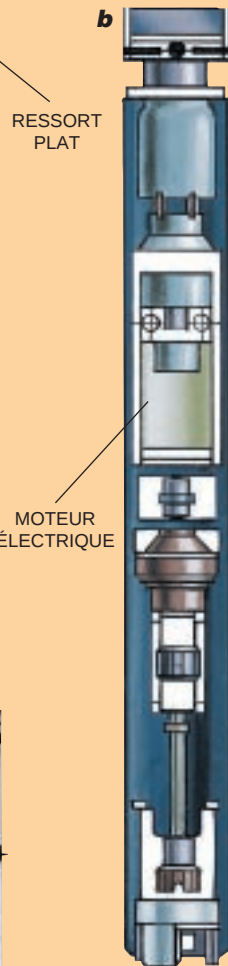


Les outils de forage

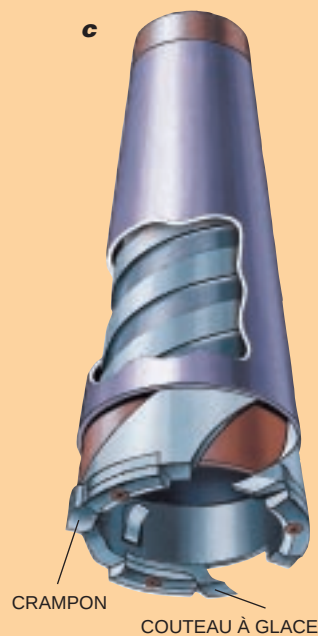


Le trépan, cylindre creux muni de couteaux affûtés à son extrémité, est descendu dans le trou de forage au bout d'un câble à partir d'une plate-forme à l'intérieur d'un bâtiment (à droite). Pour empêcher les parois du trou de s'effondrer, on injecte un fluide, tel que l'acétate de butyle (un additif alimentaire au parfum d'ananas), afin d'équilibrer la pression de la glace environnante.

Des ressorts plats maintiennent la partie supérieure de l'assemblage contre les parois glacées du trou, afin qu'elle ne se torde pas et ne tourne pas pendant que la partie inférieure est en train de forer (a).



Un moteur électrique fixé au tube (b) fait tourner les couteaux contre la glace, produisant des copeaux qui sont pompés vers le haut. Ce type de forage fournit une carotte de glace cylindrique.



Des crampons aiguisés et pivotants se déplacent légèrement vers le bas de la partie extérieure de la carotte pendant le forage (c). Quand les techniciens remontent le cylindre, les crampons, qui sont inclinés vers le haut, agrippent le bas de la carotte et la dégagent de la glace qui l'entoure. Les crampons maintiennent aussi la carotte à l'intérieur du cylindre tandis que l'ensemble est treuillé hors du trou.



Mark Twicker, University of New Hampshire

les périodes les plus rudes de la dernière glaciation étaient vraiment très froides : la température moyenne du Groenland était inférieure de plus de 20 degrés à celle d'aujourd'hui.

Les carottes de glace ont aussi enregistré l'histoire des précipitations, par l'épaisseur des couches annuelles. En corrigeant les distorsions dues à l'écoulement et au tassement de la glace, on calcule la quantité de neige tombée une année donnée. Dans les périodes les plus froides, le centre du Groenland a reçu quatre à cinq fois moins de précipitations qu'aujourd'hui.

Des poussières dans la neige

D'autres informations climatiques sont contenues dans les matériaux transportés par le vent et piégés par la glace. Ainsi, des particules de poussière plus grosses sont apportées quand les vents sont plus violents. On retrace même les anciens systèmes de circulation atmosphérique en déterminant l'origine des poussières d'après leur composition (comme l'analyse des cendres permet l'identification des éruptions volcaniques).

Des produits émis par les algues marines et des isotopes radioactifs produits dans l'atmosphère par les rayons cosmiques ont également été

trouvés dans les carottes de glace. Lorsque la concentration en ces substances diminue, c'est qu'elles ont été apportées en quantité moindre ou que des chutes de neige plus abondantes les ont diluées. Comme on sait calculer la quantité de neige tombée chaque année, on distingue les deux phénomènes. On a ainsi mis en évidence des augmentations d'un facteur 100 de la quantité de calcium apportée par le vent, ce qui indique l'existence de vents beaucoup plus forts et, peut-être, de déserts plus étendus pendant les glaciations.

La glace piège aussi l'air du passé. Dans la neige fraîche, les gaz circulent facilement entre les pores des cristaux de glace. Puis le poids de la neige qui s'accumule comprime les couches inférieures, réduisant le volume des pores jusqu'à les fermer complètement entre environ 40 et 120 mètres de profondeur. L'air est alors emprisonné dans la glace sous forme de bulles isolées.

Les analyses de ces minuscules échantillons d'air révèlent l'évolution des concentrations en divers gaz de l'atmosphère, notamment en gaz à effet de serre. Des périodes glaciaires aux périodes interglaciaires, par exemple, les concentrations en dioxyde de carbone et en méthane ont augmenté respectivement d'environ 50 et 75 pour cent. Ces chiffres relativisent les augmentations récentes dues aux activités humaines : 30 pour cent pour le dioxyde de carbone, mais 160 pour cent pour le méthane. La composition de l'air piégé dans la glace permet en outre de placer dans une même chronologie les mesures réalisées sur les carottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique : comme l'atmosphère se mélange rapidement, on considère que sa composition est toujours identique dans les deux hémisphères.

Les fluctuations climatiques enregistrées par la glace du Groenland correspondent à celles déduites de l'étude des carottes de glace de l'Antarctique et des sédiments marins profonds. Ces enregistrements montrent des températures maximales il y a environ 103 000, 82 000, 60 000, 35 000 et 10 000 ans. La période de ces cycles est proche des 20 000 ans calculés par Milankovitch pour les cycles associés à la précession de l'axe de rotation de la Terre, ce qui est une bonne confirmation de sa théorie.

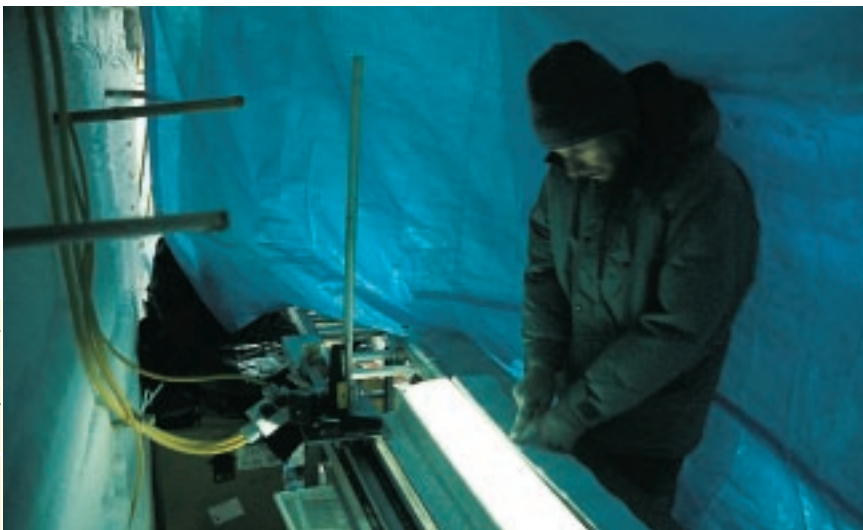
Climats oscillants

En revanche, la théorie de Milankovitch ne prévoit pas les fluctuations climatiques rapides, nommées événements Dansgaard/Oeschger, des noms de leurs découvreurs, enregistrées par les glaces du Groenland : en quelques centaines à quelques milliers d'années, le Groenland se réchauffe rapidement, puis se refroidit, d'abord lentement, puis plus vite. Il y a 100 000 à 20 000 ans, une vingtaine d'événements de ce type se sont produits.

Pendant chacun de ces événements, la concentration en méthane a augmenté dans l'atmosphère. Le méthane est produit par des bactéries dans des environnements où l'oxygène est rare, tels les marais tropicaux et les tourbières. Ces milieux se seraient donc étendus pendant les événements Dansgaard/Oeschger, à cause probablement de l'augmentation des pluies.

L'une des caractéristiques surprenantes de ces événements Dansgaard/Oeschger est leur soudaineté. En une décennie, voire en quelques années, la température moyenne a varié de cinq à dix degrés, les chutes de neige ont doublé et le vent a apporté jusqu'à dix fois plus de poussières. Ces phénomènes spectaculaires ont surtout marqué les périodes de transition entre les stades glaciaires et interglaciaires : alors que la théorie de Milankovitch prévoit un passage progressif des températures chaudes aux températures froides (et inversement), le climat a fait de petits sauts entre le chaud et le froid. Comparativement, la partie la plus froide de la glaciation et l'interglaciaire actuel sont plus stables.

Comment expliquer ces errements climatiques? Les climatologues en recherchent l'origine dans des phénomènes indépendants de l'orbite terrestre, telles les circulations atmosphériques et océaniques. À l'aide de modèles informatiques, ils étudient comment une modification du climat dans une région du Globe se répercute ailleurs. Ils ont ainsi établi qu'un réchauffement des hautes latitudes modifierait les circulations océaniques et atmosphériques de telle façon que les régions tropicales se réchaufferaient aussi. L'eau s'y évaporerait alors davantage, et l'atmosphère, plus chargée en vapeur d'eau, gaz à effet de serre, se réchaufferait encore. Par ailleurs, pendant les périodes glaciaires, les immenses calottes de glace continentale,



3. LES CAROTTES DE GLACE prélevées au Groenland sont aujourd'hui comparées à celles qui sont récupérées en Antarctique. Les glaciologues examinent quelle est la relation entre les climats des hémisphères Nord et Sud.

entourées d'énormes étendues d'océans gelés, réfléchissaient beaucoup de lumière solaire vers l'espace ; hors des périodes chaudes, au contraire, la fonte des calottes glaciaires permettait une plus grande absorption de la lumière solaire ; l'accumulation de dioxyde de carbone, ainsi que des autres gaz à effet de serre, tels le méthane et la vapeur d'eau, retenait davantage la chaleur.

Comme ces phénomènes réchauffent et refroidissent simultanément les régions de la planète, les climatologues furent surpris lorsque Thomas Stocker, de l'Université de Berne, et Thomas Crowley, de l'Université du Texas, ont annoncé, en 1992, que les événements Dansgaard / Oeschger devaient être inversés au Groenland et en Antarctique.

T. Stocker et T. Crowley avaient observé que, dans l'hémisphère Nord, des eaux salées et tièdes forment le Gulf Stream, de l'Équateur vers l'Arctique, où elles libèrent de la chaleur dans l'atmosphère, créant le climat tempéré et stable de l'Europe du Nord. En se refroidissant, les eaux deviennent plus denses et plongent dans les profondeurs de l'océan, où elles s'écoulent vers l'Antarctique, comme un grand « tapis roulant ». Au plus fort des glaciations, ce tapis roulant ne fonctionnait pas ou était affaibli : les eaux équatoriales s'écoulaient plus lentement vers l'Arctique ; le Groenland et le Nord de l'Europe étaient plus froids. Pendant les événements Dansgaard / Oeschger, le tapis roulant reprenait de la vigueur.

T. Stocker et T. Crowley ont observé que ce système océanique refroidit l'hé-

misphère Sud en même temps qu'il réchauffe le Nord et *vice versa*, à cause de deux phénomènes. Tout d'abord, l'écoulement des eaux profondes et froides vers l'Antarctique engendre un courant de retour vers le Nord : des eaux plus chaudes, peu profondes, ramènent une chaleur supplémentaire qu'elles ont prélevée au Sud. Deuxièmement, le ralentissement du tapis roulant pendant les périodes froides empêche les eaux chaudes originaires des latitudes tropicales de se refroidir beaucoup dans l'hémisphère Nord : il laisse remonter plus d'eau chaude autour de l'Antarctique, ce qui réchauffe l'air de l'extrême Sud.

Cette théorie du déphasage des fluctuations climatiques a été confirmée au milieu des années 1990, lorsque des paléontologues qui étudiaient les foraminifères fossiles (des coquillages microscopiques dont la forme dépend

de la température et de la profondeur) ont constaté que l'océan Antarctique était plus chaud lorsque le tapis roulant ne fonctionnait pas. En outre, Wallace Broecker, de l'Université Columbia, a réexaminé les enregistrements climatiques provenant de carottes sédimentaires et glaciaires de la fin de la dernière glaciation, il y a 20 000 à 10 000 ans : le réchauffement était plus lent en Antarctique pendant les périodes de réchauffement rapide au Groenland, et réciproquement.

Les principaux événements Dansgaard / Oeschger enregistrés dans les carottes de glace du Groenland sont aussi présents en Antarctique, bien que les changements climatiques dans le Sud n'aient pas été aussi importants ni soudains. Des incertitudes quant à la datation des carottes de glace compliquent les corrélations entre les refroidissements au Groenland et les réchauffements en Antarctique pour tous ces événements. Des laboratoires à Grenoble, à Berne et ailleurs tentent de les étendre jusqu'au milieu de la dernière glaciation. Ils pourront, dans les prochaines années, utiliser les nouvelles carottes extraites par les projets de forage profond conduits en Antarctique par des équipes américaines, japonaises, américaines et australiennes.

En forant encore plus profondément dans les calottes glaciaires des deux hémisphères, nous obtiendrons des informations sur les évolutions du climat dans des périodes plus reculées. Nous comprendrons alors mieux les couplages entre l'océan et l'atmosphère qui interviennent fortement dans ces évolutions et nous espérons prévoir les conséquences des activités humaines à moyen terme sur le réchauffement ou sur le refroidissement de la planète.

Richard ALLEY est professeur de sciences de la Terre à l'Université de Pennsylvanie. Michael BENDER est professeur de sciences de la Terre à l'Université Princeton.

R.B. ALLEY et al., *Abrupt Increase in Greenland Snow Accumulation at the End of the Younger Dryas Event*, in *Nature*, vol. 362, pp. 527-529, 8 avril 1993.

W. DANSGAARD et al., *Evidence for General Instability of Past Climate from a 250-kyr Ice-Core Record*, in *Nature*, vol. 364, pp. 218-220, 15 juillet 1993.

Michael BENDER, Todd SOWERS, Mary-Lynn DICKSON, Joseph ORCHARD, Pieter GROOTES, Paul A. MAYEWSKI et

Debra A. MEESE, *Climate Correlations between Greenland and Antarctica during the Past 100,000 Years*, in *Nature*, vol. 372, pp. 663-666, 15 décembre 1994.

Kurt M. CUFFEY, Gary D. CLOW, Richard B. ALLEY, Minze STUIVER, Edwin D. WADDINGTON et Richard W. SALTUS, *Large Arctic Temperature Change at the Wisconsin-Holocene Glacial Transition*, in *Science*, vol. 270, pp. 455-458, 20 octobre 1995.

Wallace BROECKER, *L'origine des glaciations*, in *Pour la Science*, janvier 1996.

Claude BOUTRON, *La mémoire des glaces du Groenland*, in *Pour la Science*, octobre 1996.