

On a ensuite trouvé que plusieurs types de modifications étaient efficaces : liaisons chimiques entre des chaînes alpha, entre des chaînes bêta, ou entre des chaînes alpha et bêta ; liaison de plusieurs molécules d'hémoglobine ; ou encore, association de l'hémoglobine à une grosse molécule nommée polyéthylène glycol. Ces modifications, qui augmentent généralement la taille des molécules d'hémoglobine, évitent les atteintes rénales et l'évacuation trop rapide de la molécule.

Aujourd'hui, cinq produits à base d'hémoglobine sont testés aux États-Unis. Plusieurs d'entre eux sont fabriqués à partir de sang trop ancien pour être utilisé. Le *PolyHème*, fabriqué par les Laboratoires *Northfield*, est composé d'hémoglobine humaine polymérisée, que l'on teste dans les cas de transfusion opératoire. Ce produit est préparé par pyridoxylation, une opération qui déforme la molécule, augmentant

sa capacité de transport de l'oxygène, puis qui augmente sa taille, par polymérisation. L'*HemAssist* de la Société *Baxter International* est également préparé à partir de sang humain périmé ; cette forme d'hémoglobine, composée de plusieurs chaînes liées, est en cours d'essai en chirurgie cardiaque, ainsi que chez des personnes ayant subi un choc hémorragique ou traumatique.

D'autres produits résultent d'approches différentes. La Société *Somatogen* fabrique l'*Optro* à partir de sous-unités d'hémoglobine humaine liées, qu'elle fait produire par la bactérie *Escherichia coli*. La Société *Bio-pure* fabrique l'*Hemopure* à partir d'hémoglobine polymérisée provenant de sang de bovins. Ce substitut est à l'étude dans les cas de traumatismes, d'interventions chirurgicales et d'anémie falciforme.

Pour nos travaux, nous utilisons également l'hémoglobine bovine, qui est peu coûteuse, disponible en quantité et qui, contrairement à l'hémoglobine humaine, ne nécessite pas de 2,3-DPG pour libérer de l'oxygène. En associant cette hémoglobine bovine à du polyéthylène glycol, nous avons obtenu une molécule stable et plus grosse que l'hémoglobine pure.

L'évaluation de l'hémoglobine couplée au polyéthylène glycol est testée



5. CETTE SOURIS respire dans un récipient plein d'un fluorocarbure : les composés de ce type dissolvent de grandes quantités d'oxygène. Ce sont des substituts du sang que les biochimistes cherchent aujourd'hui à améliorer.

chez des personnes souffrant de tumeurs solides. En administrant l'hémoglobine couplée au polyéthylène glycol, des médecins sont parvenus à oxygéner les tumeurs et à les rendre sensibles à la radiothérapie. La molécule est également utilisée dans le traitement des infarctus et des accidents vasculaires cérébraux : comme la molécule est plus petite qu'un globule rouge, elle circule même dans des vaisseaux sanguins obstrués et apporte ainsi de l'oxygène à des cellules qui en sont privées.

Sécurité et substituts

Malgré les progrès, les recherches se poursuivent, car aucun substitut parfait n'a été trouvé. En raison de la grande quantité de substitut qui doit être administrée lors des transfusions, les biochimistes doivent tenir compte d'effets secondaires qui ne se manifestent pas lors d'administration de petites doses. Alors qu'on administre seulement quelques milligrammes des divers médicaments, les substituts du sang doivent être fournis en quantités de l'ordre de 50 à 100 grammes.

On ignore les effets secondaires de ces composés. Tous ceux qui sont en cours de test se sont révélés toxiques à court terme, provoquant des hypertensions, des atteintes rénales, des tachycardies, des douleurs gastro-intestinales. Comme la plupart des substituts sanguins seront administrés quand la vie du malade est en jeu, les chercheurs doivent démontrer que les bénéfices immédiats sont supérieurs aux risques.

Chaque type de substitut sanguin a ses inconvénients : les fluorocarbures sont mal éliminés, toxiques, trop instables dans le sang, et ils assurent une oxygénation excessive. Les substituts sanguins fabriqués à partir de sang humain périmé sont en quantité insuffisante. Pour les fabriquer par génie génétique, on devra trouver des procédés de fabrication en masse.

Enfin, les substituts d'origine bovine ne doivent pas transmettre de maladies comme l'encéphalopathie spongiforme bovine ou d'autres maladies non encore identifiées. Les fabricants éviteront naturellement d'utiliser le sang provenant de vaches qui ont été nourries avec les produits d'origine animale responsables de l'épidémie récente, mais ils doivent aussi s'assurer qu'aucun autre agent pathogène n'est présent.

Les substituts qui sont en cours d'essais cliniques seront commercialisés dès qu'ils en auront reçu l'autorisation, mais seront-ils acceptés par le public ? Quel prix acceptera-t-il de payer pour ces produits ? D'autre part, en raison du coût élevé de leur mise au point, ces produits seront sans aucun doute deux à cinq fois plus coûteux que le sang. Les systèmes de soins accepteront-ils ce coût ?

Mary NUCCI et Abraham ABUCHOWSKI travaillent pour la Société *New Paradigm Consulting*.

T.M.S. CHENG, *Blood Substitutes*, Marcel Dekker, 1989.

R.M. WINSLOW, *Blood Substitutes : Physiological Basis of Efficacy*, Springer-Verlag, 1995.

Blood Substitutes : New Challenges, sous la direction de R.M. Winslow, K.D. Vandegriff et M. Intaglietta, Birkhäuser, 1996.

Le climat dans les glaces

RICHARD ALLEY • MICHAEL BENDER

La glace du Groenland, accumulée depuis des dizaines de milliers d'années, révèle le climat du passé.

Comment le climat de la planète changera-t-il dans les prochains siècles? L'Europe se réchauffera-t-elle comme il y a 1 000 ans, lorsque les Vikings s'établissaient au Groenland et que l'on cultivait la vigne dans les îles Britanniques? Le Sahara redeviendra-t-il plus humide, comme il y a 10 000 ans, ou se désertifiera-t-il davantage sous l'effet de la sécheresse? Alors que les peuples et les gouvernements s'inquiètent des conséquences de l'émission artificielle de gaz à effet de serre sur le réchauffement de la planète, nous avons plus que jamais besoin de comprendre les mécanismes naturels qui règlent les évolutions climatiques.

Pour prévoir l'avenir, les climatologues se tournent vers le passé. Les études géomorphologiques, puis, plus récemment, les prélèvements de sédiments marins avaient montré que le climat terrestre suit des cycles longs où alternent les périodes glaciaires, froides, et interglaciaires, chaudes. L'analyse des carottes de glace de plusieurs kilomètres de longueur, prélevées au Groenland, en Antarctique et ailleurs, précise les conditions qui régnaient à chaque époque : l'eau gelée depuis des dizaines de milliers d'années a piégé des impuretés, des gaz et des poussières qui sont des témoins du passé.

Les carottes de glace du Groenland ont révélé que des variations climatiques rapides (sur quelques centaines à quelques milliers d'années) et de grande amplitude se sont superposées à ces cycles. Au cours des échanges de chaleur entre les hémisphères Nord et Sud par l'océan Atlantique, les événements se sont produits en opposition de phase dans les deux hémisphères : le Groenland se réchauffait pendant que l'Antarctique refroidissait, et réciproquement.



1. LA CALOTTE GLACIAIRE, au centre du Groenland, résulte de l'accumulation de la neige depuis plus de 100 000 ans. Les climatologues extraient des informations sur les climats du passé en prélevant des carottes de glace de plusieurs kilomètres de longueur.

Des cycles astronomiques

Les grandes variations climatiques du passé ont des causes astronomiques. Pendant les années 1920 et 1930, l'astronome serbe Milutin Milankovitch a étudié comment l'attraction gravitationnelle des autres planètes modifie cycliquement l'orbite de la Terre. Comme la répartition et l'intensité du rayonnement solaire qui parvient à la surface de la Terre sont modifiées, le climat terrestre est perturbé. Selon Milankovitch, trois paramètres de l'orbite sont déterminants : l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur le plan de son orbite, la précession de cet axe (sa rotation autour de sa position moyenne) et l'excentricité de l'orbite autour du Soleil (c'est une ellipse plus ou moins allongée). Les variations de ces trois paramètres entraînent des oscillations, lentes mais perceptibles, des climats, avec des périodes respectives d'environ 40 000, 20 000 et 100 000 ans.

La théorie de Milankovitch fut contestée parce qu'elle ne s'appuyait pas sur des résultats précis d'observations. Puis l'étude des carottes sédimentaires prélevées au fond des océans, initiée par Cesare Emiliani,

en 1955, confirma que les derniers millions d'années ont été marqués par une succession de réchauffements et de refroidissements, au cours de laquelle les glaciers ont avancé ou reculé sur de vastes étendues, au rythme prédit par Milankovitch. Depuis au moins un demi-million d'années, le cycle climatique fondamental, d'un maximum glaciaire au suivant, est d'environ 100 000 ans ; des oscillations plus courtes, de 20 000 à 40 000 ans, s'y superposent.

Plus récemment, nous avons accédé à des enregistrements plus précis des climats du passé, contenus dans les grandes calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique : par des forages, on a récupéré des carottes de glace dans des sites où la neige s'est accumulée, pendant des dizaines de milliers d'années, sur plusieurs kilomètres d'épaisseur et où, tassée sous son propre poids, elle a formé de la glace.

La première étape dans l'étude des carottes de glace ainsi obtenues est la datation de la glace aux différentes profondeurs : c'est seulement ainsi que l'on obtient, ultérieurement, une histoire du climat. Heureusement, dans les régions où il neige fréquemment, la glace forme des couches annuelles, que l'on compte comme les cernes de croissance annuels des arbres. Cette stratification est souvent perceptible à l'œil nu, parce que les cristaux de neige sont plus gros l'été que l'hiver. La glace est aussi généralement plus acide l'été (sans que l'on en connaisse la raison précise). En outre, la concentration en particules de poussière, mesurée par un laser, augmente généralement au printemps, car le vent souffle plus fort pendant cette saison.

En utilisant ces méthodes et d'autres, l'un d'entre nous (R. Alley) a établi, pour

une carotte prélevée au Groenland, une chronologie qui s'accorde avec plusieurs mesures indépendantes. En analysant la composition des cendres trouvées dans certaines couches de glace, par exemple, on a identifié les volcans d'où proviennent les cendres, et l'on a comparé les chronologies des glaces aux dates d'éruption : sur plusieurs siècles, on retrouve les mêmes dates par comptage des couches annuelles de glace. Pour les 11 500 dernières années, l'actuelle période chaude interglaciaire, le comptage des couches donne des dates précises à un pour cent près. Bien que la précision soit un peu moins bonne pour la glace plus ancienne des époques plus froides, elle vaut celle d'autres techniques de datation jusqu'à 50 000 ans au moins.

Les déformations de la glace

Au-delà de 100 000 ans, les couches annuelles restent visibles, mais elles sont souvent déformées : les glaciers et les calottes glaciaires s'étalent et s'amincissent sous leur propre poids. Ce mouvement se poursuivant sur des dizaines de milliers d'années, les couches de glace situées près du socle rocheux s'amincissent jusqu'à disparaître et sont plissées par les déplacements du glacier sur le sol. Ainsi, dans les carottes obtenues par l'équipe américaine au Groenland, les couches annuelles étaient successivement, de haut en bas, horizontales, ondulées, marquées d'un pli en forme de Z et, enfin, pour celles de plus de 110 000 ans, inclinées à des angles de plus de 20 degrés. Les carottes prélevées à proximité par les chercheurs européens ont révélé des formes tout aussi complexes, mais différentes.

Ces déformations empêchent le comptage continu des couches annuelles au-delà d'une certaine profondeur et compliquent leur datation. Ainsi, les climatologues qui étudiaient les carottes prélevées par le forage européen avaient annoncé que, lors de la précédente période interglaciaire, l'Éémien, qui s'est terminé il y a environ 120 000 ans, le climat terrestre avait connu des oscillations fréquentes et rapides : c'était très surprenant, car on pensait que les périodes interglaciaires étaient plutôt stables. La comparaison avec les résultats issus du forage américain a rassuré les climatologues : tandis que les deux séries

Steve Starr. SABA

Des tranches de temps

Les carottes de glace obtenues par forage au Groenland ou en Antarctique sont analysées par plusieurs méthodes.



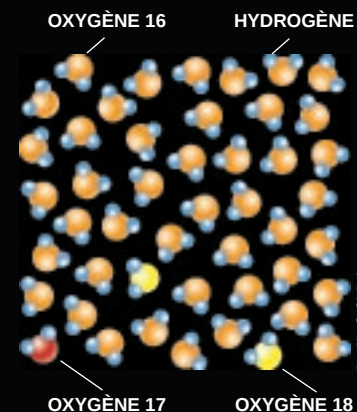
Richard B. Alley

LES COUCHES ANNUELLES de neige indiquent le temps écoulé depuis le dépôt. Souvent visibles à l'œil nu, elles sont généralement horizontales, mais de lents mouvements du glacier les plissent parfois.



Richard B. Alley

DES BULLES D'AIR sont piégées dans la neige lorsque celle-ci se transforme en glace, sous le poids des couches supérieures. Ces échantillons de l'atmosphère du passé montrent l'évolution des concentrations en différents gaz de l'atmosphère, tels le dioxyde de carbone et le méthane.



Jennifer C. Christensen

LES ATOMES D'OXYGÈNE de la glace ont 16, 17 ou 18 nucléons (neutrons et protons). La teneur relative des différents types d'oxygène renseigne sur la température au moment de la précipitation.

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.

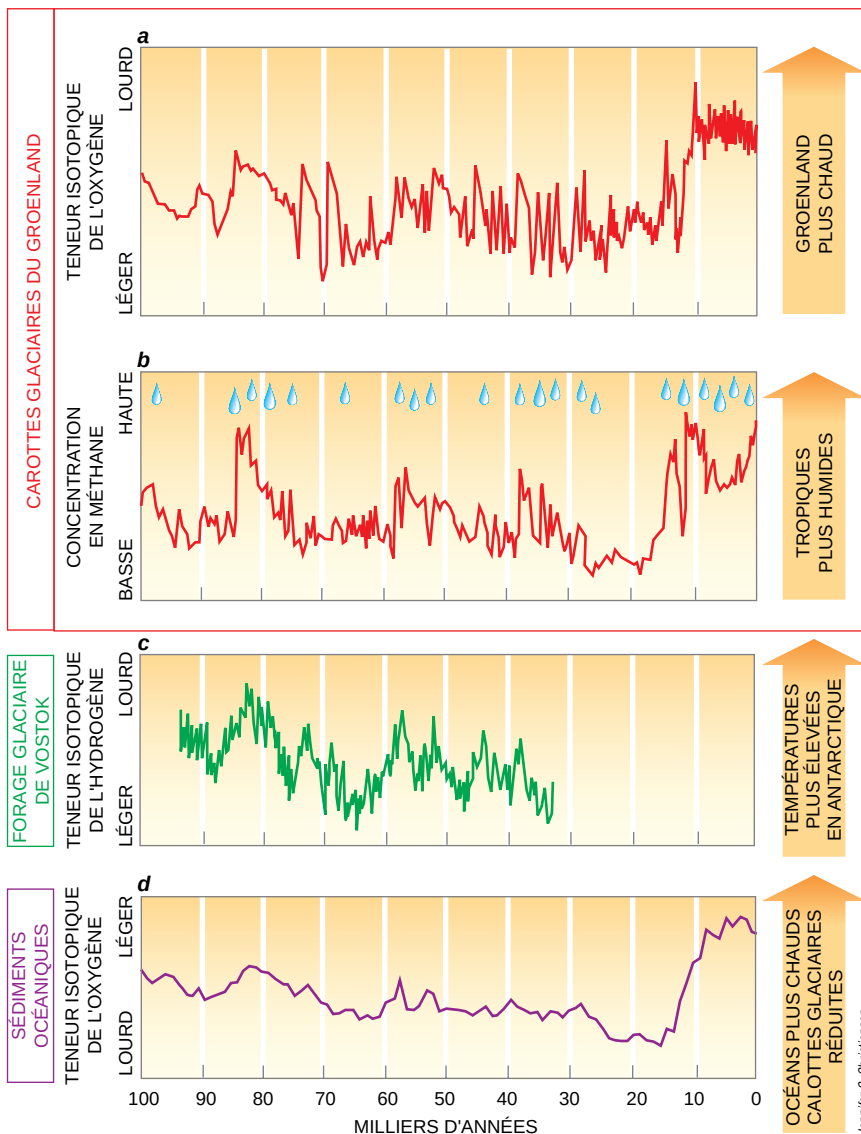
Aujourd'hui, les paléoclimatologues tentent de modéliser informatiquement ces déformations des couches profondes. De surcroît, pour obtenir un enregistrement fiable du climat pendant l'Éémien, l'équipe européenne a entrepris un autre forage, à 340 kilomètres au Nord-Ouest des deux forages précédents.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

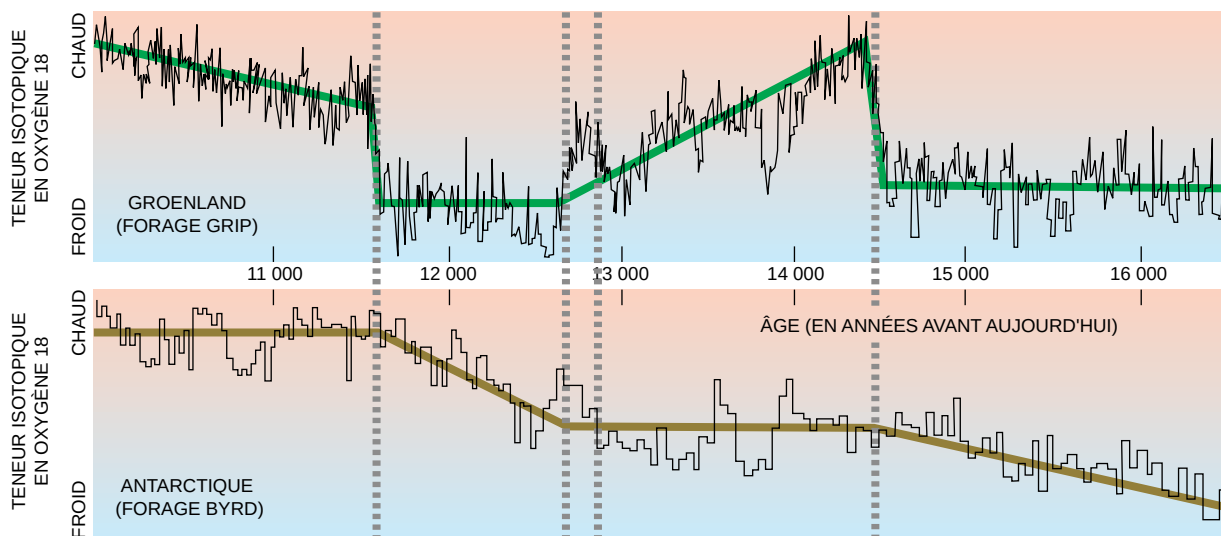
au premier, Mike Bender et ses collègues ont montré que la température s'est élevée significativement en Antarctique seulement quand les événements Dansgaard/Oeschger du Groenland ont duré plus de 2 000 ans. L'incertitude sur la différence d'âge entre l'air et la glace, et la faible variabilité de la 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 simultanément 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.

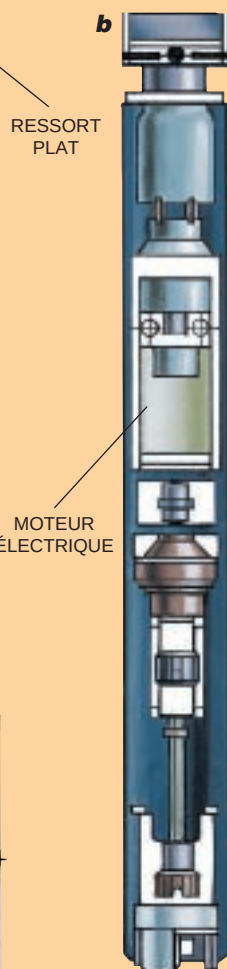
D'après T. Blunier et al., *Geophysical Research Letters*, vol. 24, pp. 2683-2686, 1^{er} nov. 1997.

Les outils de forage

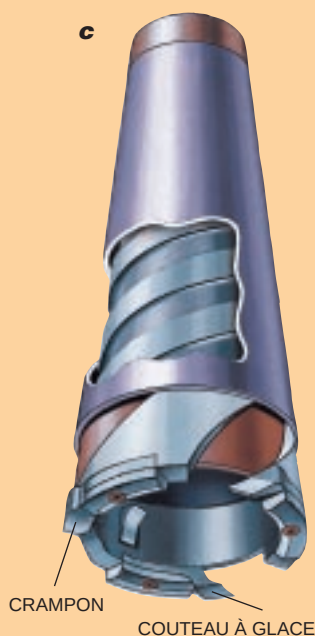


Le trépan, cylindre creux muni de couteaux affûtés à son extrémité, est descendu dans le trou de forage au bout d'un câble à partir d'une plate-forme à l'intérieur d'un bâtiment (à droite). Pour empêcher les parois du trou de s'effondrer, on injecte un fluide, tel que l'acétate de butyle (un additif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

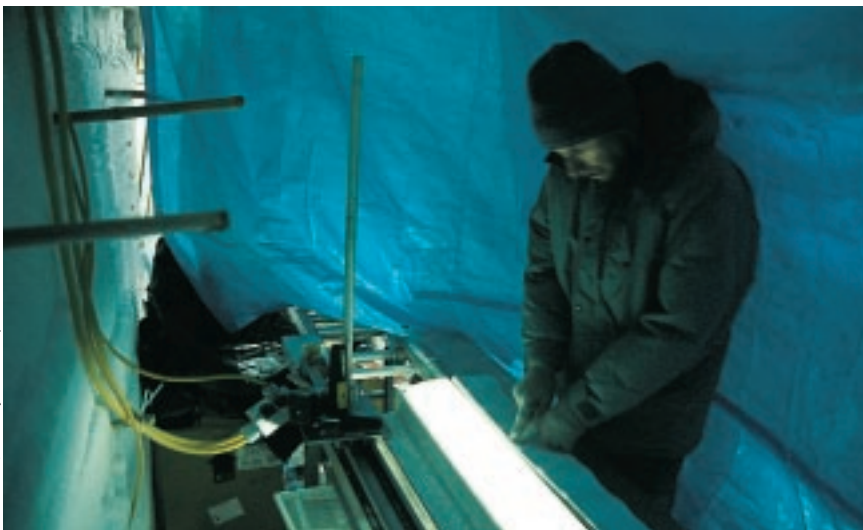
Climats oscillants

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.

