

des tropiques. Les fluctuations dans les relevés de méthane indiquent que les tropiques ont connu une période de sécheresse pendant chaque période de refroidissement de l'hémisphère Nord.

D'autre part, une carotte sédimentaire prélevée à 500 mètres au-dessous du niveau de la mer, dans le bassin de Santa Barbara, a révélé que des bandes de sédiments intacts, avec des couches annuelles bien marquées, alternaient avec des sections perturbées par des vers fous. La présence de vers indique que les eaux profondes de la région contenaient suffisamment d'oxygène pour permettre la vie. Ces périodes sont étrange-

ment corrélées avec les refroidissements du Groenland : les variations de la circulation océanique ont atteint toute la planète.

Un changement mondial du climat

Les conséquences sur tout le Globe des événements découverts par S. Heinrich sont encore plus surprenantes. Selon les analyses du pollen extrait des sédiments du lac Tulane, en Floride, le rapport entre les abondances de pin et de chêne a brusquement augmenté lors de chacun de ces événements. Les pins prospèrent dans des climats relativement humides, tandis

que les chênes préfèrent les climats secs. Bien que la relation exacte entre l'abondance des pins et les événements de S. Heinrich doive être datée plus précisément, ces relevés indiqueraient une période humide par cycle. Dans l'hémisphère Sud, on trouve aussi des corrélations : chacun des quatre événements de S. Heinrich qui peut être daté par la méthode au carbone 14 correspond à une extension maximale des glaciers montagneux des Andes.

Que la fonte massive des glaciers canadiens ait eu des conséquences sur tout le Globe est paradoxal car, selon les modèles de circulation atmosphérique, les changements dans les



Le méthane dans les glaces

L'analyse du méthane dans les bulles de glace polaire permet de reconstituer l'évolution de sa concentration dans l'atmosphère terrestre. Grâce au forage européen GRIP, réalisé au sommet du glacier qui couvre le Groenland, nous avons mesuré la concentration en méthane des 40 000 dernières années, avec une résolution temporelle comprise entre quelques dizaines et quelques centaines d'années. Ces mesures détaillent un précédent enregistrement des variations de la concentration en méthane de l'atmosphère qui couvre plus de 200 000 ans, obtenu grâce au forage VOSTOK en Antarctique.

Au cours de la dernière glaciation, il y a 110 000 à 15 000 ans environ, le climat s'est réchauffé par épisodes (qui n'ont pas fait fondre les calottes glaciaires) de 500 à 12 000 ans chacun. Lors de chacun de ces épisodes, la concentration en méthane a fortement augmenté dans l'atmosphère, passant de 400 à 550 parties par milliard en volume environ. Une telle augmentation résulte d'un dégagement anormal supplémentaire de 30 à 40 millions de tonnes de méthane. Le méthane naturel provient à 75 pour cent des sols saturés en eau, marécages et tourbières, qui sont aujourd'hui répartis en deux bandes de latitude, l'une boréale, entre 50 et 70 degrés de latitude Nord, l'autre subtropicale, entre 20 degrés de latitude Nord et 30 degrés de latitude Sud. Comme les zones boréales étaient couvertes de glace pendant la dernière glaciation, les variations rapides de la concentration en méthane indiquent de brusques changements de l'étendue des zones marécageuses sous les tropiques. Ainsi faut-il voir dans ces fluctuations rapides de la composition de l'atmosphère groenlandaise les traces d'un réarrangement bien plus global du climat terrestre, à l'échelle de quelques décennies.

L'enregistrement de la concentration en méthane sur ces échelles de temps nous apporte d'autres enseignements importants : durant les 10 000 dernières années, alors que

le contenu en oxygène 18 des précipitations sur le Groenland indique un climat exceptionnellement stable, le méthane, à caractère plus global, montre l'existence d'événements climatiques notables. Il y a 8 200 ans, la concentration de l'atmosphère en méthane a diminué d'environ 70 parties par milliard en volume, pendant moins de 200 ans. Sur les derniers 10 000 ans, cette concentration a diminué de plus de 20 pour cent, puis elle a réaugmenté. Même si ces fluctuations apparaissent bien faibles par rapport à l'apport humain des derniers 200 ans, qui a fait augmenter de 150 pour cent la concentration de l'atmosphère en méthane, elles indiquent une variabilité climatique importante, notamment sous les tropiques.

Le dioxyde de carbone et l'oxygène 18 contenu dans l'oxygène atmosphérique apportent aussi des informations sur les brusques changements du climat pendant la dernière glaciation. Des mesures détaillées, à partir de forages dans la calotte Antarctique, montrent que la concentration en dioxyde de carbone a peu varié il y a entre 20 000 et 50 000 ans : ce gaz à effet de serre n'a donc pas été responsable de l'extension globale de ces brusques variations du climat.

L'oxygène 18 contenu dans l'oxygène atmosphérique est un signal global, qui a été utilisé comme marqueur pour corréler les couches de glace des carottes extraites au Groenland et en Antarctique. On a ainsi constaté que seuls les événements groenlandais qui ont duré plus de 2 000 ans ont laissé une trace dans le climat de l'Antarctique : les conséquences des réarrangements de la circulation dans l'Atlantique sur le climat du pôle Sud semblent donc atténuées. De futurs efforts de calage temporel utilisant le méthane comme marqueur permettront d'élucider la relation entre les deux pôles au cours de ces fluctuations climatiques rapides.

Jérôme CHAPPELLAZ,
Laboratoire de glaciologie
et géophysique de l'environnement
du CNRS, Grenoble.

échanges de chaleur entre l'atmosphère et l'Atlantique Nord ne modifient les climats que localement. Quel mécanisme aurait étendu ces variations aux tropiques et aux régions méridionales tempérées, voire à l'Antarctique ?

La répartition symétrique de ces variations climatiques autour de l'équateur souligne l'importance de ce qui se passe aux tropiques, et l'on comprend que des modifications dans la dynamique de l'atmosphère tropicale auraient facilement des conséquences globales : les cellules de convection en colonnes, qui se forment dans l'atmosphère tropicale aux points de rencontre des alizés, fournissent à l'atmosphère le principal gaz responsable de l'effet de serre, la vapeur d'eau. Bien que le lien entre la circulation océanique et la convection tropicale soit ténu, une modification de la circulation semble modifier la quantité d'eau froide qui remonte à la surface le long de l'équateur, dans le Pacifique. Cette remontée des eaux modifie notablement les échanges de chaleur de la région, donc son climat. La réduction de cette remontée, comme on le constate lors des épisodes «El Niño», provoque des sécheresses dans certaines zones et des inondations dans d'autres.

«El Niño» pendant 1 000 ans

L'assèchement des tropiques, mis en évidence par J. Chappellaz, n'est pas le seul argument en faveur de ce scénario. L'autre preuve spectaculaire provient du grand bassin de l'Ouest des États-Unis : immédiatement après le dernier événement de S. Heinrich il y a 12 000 ans, le lac Lahontan, dans le Nevada, a atteint sa taille maximale, dix fois supérieure à sa taille actuelle. Un tel lac ne subsiste que si les précipitations sont considérables, d'un niveau comparable à celui qu'a connu la région lors de la période «El Niño» de l'hiver 1982-1983. Les périodes de refroidissement passées seraient-elles dues à des changements dans la circulation océanique qui auraient fait durer «El Niño» pendant 1 000 ans ?

Des découvertes plus récentes contribuent à confirmer que le climat tropical était très différent pendant les refroidissements. Des carottes de glace ancienne, prélevées à 6 000



5. LE CLIMAT DE L'EUROPE changerait considérablement si la circulation océanique était perturbée. Dublin (en haut à gauche) aurait en été le climat que connaît aujourd'hui le Spitzberg (en

haut à droite), et les hivers londoniens (en bas à gauche) seraient aussi froids que les hivers actuels à Irkoutsk, en Sibérie (en bas à droite).

mètres d'altitude dans les Andes tropicales, contiennent 200 fois plus de poussière fine que les échantillons les plus récents : il s'agit probablement de poussière transportée par les vents qui soufflaient sur une Amazonie aride. La glace la plus ancienne contient aussi moins d'oxygène 18 que celle qui s'est formée depuis 10 000 ans ; la température était inférieure d'environ dix degrés à celle d'aujourd'hui. En outre, la limite des glaces éternelles dans les Andes était 1 000 mètres plus bas qu'aujourd'hui : pendant les périodes de refroidissement, les tropiques étaient à la fois plus froides et plus sèches.

Notre compréhension partielle du passé ne nous permet guère de tirer des conclusions définitives en ce qui concerne l'avenir du climat. L'accumulation actuelle de gaz à effet de serre modifiera-t-elle la circulation océanique globale et le climat ? Selon les relevés paléographiques, les brusques variations des climats passés ont été limitées à des périodes où l'Atlantique Nord était entouré d'immenses

couches de glace, pendant la dernière glaciation ou juste à la fin : nous sommes loin de cette situation. Toutefois l'ampleur de l'effet de serre provoqué par les activités humaines risque d'être bien plus grande qu'aucun autre événement au cours d'un intervalle interglaciaire, et l'on n'a pas de certitude que le système climatique global reste figé dans son mode actuel de fonctionnement.

Un arrêt de la circulation océanique ou une autre perturbation comparable sont improbables, mais si cela

se produisait, les conséquences seraient catastrophiques. La probabilité d'un tel événement atteindra son maximum dans 50 ou 150 ans, alors que la population mondiale sera trop nombreuse, menacée par la famine et par les maladies et qu'il faudra lutter pour préserver la vie sauvage de la pression toujours croissante sur l'environnement. Nous devons prendre cette éventualité au sérieux et faire tous les efforts possibles pour mieux comprendre le système climatique de notre planète.

Wallace BROECKER est professeur de géologie à l'Observatoire terrestre Lamont-Doherty de l'Université Columbia.

Wallace S. BROECKER et George H. DENTON, *Les cycles glaciaires*, in *Pour la Science*, n° 149, mars 1990.

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.

D.R. MACAYEAL, *A Low-Order Model*

of the Heinrich Event Cycle, in *Paleoceanography*, vol. 8, n° 6, pp. 767-773, décembre 1993.

J. CHAPPELLAZ, T. BLUNIER, D. RAYNAUD, J.M. BARNOLA, J. SCHWANDER et B. STAUFFER, *Synchronous Changes in Atmospheric CH_4 and Greenland Climate between 40 and 8 KYR BP*, in *Nature*, vol. 366, pp. 443-445, 2 décembre 1993.

Jean-François MINSTER, *Les océans*, Éditions Flammarion, 1994.