



MESURES

En deux mots

L'analyse de la glace du Groenland révèle précisément la séquence des événements qui se sont déroulés au début de notre ère interglaciaire. Tout a commencé sous les tropiques, puis le climat s'est stabilisé après une modification, d'une année sur l'autre, de la circulation atmosphérique.

La bascule ultrarapide du climat

L'entrée dans l'ère interglaciaire que nous connaissons s'est déroulée de façon très abrupte il y a 11 700 ans. Une équipe internationale a décrit pour la première fois, année après année, la séquence des événements.

La scène se déroule en 9711 avant notre ère. Les hommes, les animaux et la végétation subissent toujours cette glaciation qui n'en finit pas depuis 115 000 ans. La température moyenne de la Terre avoisine les 5 °C. Deux immenses calottes glaciaires recouvrent l'Amérique du Nord et au nord de l'Europe jusqu'aux îles Britanniques et le nord de l'Allemagne. Le niveau des mers est inférieur de 120 mètres à celui d'aujourd'hui. Mais cette année est la dernière de l'ère glaciaire. En effet, la température moyenne augmente, la mousson asiatique devient plus abondante. Puis, quelques années plus tard, la circulation atmosphérique polaire se modifie brusquement.

Ce scénario n'est pas une fiction. Il résulte de l'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces effectuée par l'équipe NorthGRIP (North Greenland Ice Core Project). Celle-ci détaille, pour la première fois à l'année près, le déroulement de cette modification rapide

du climat qui a ouvert la voie à l'Holocène, l'ère interglaciaire que nous connaissons depuis lors [1].

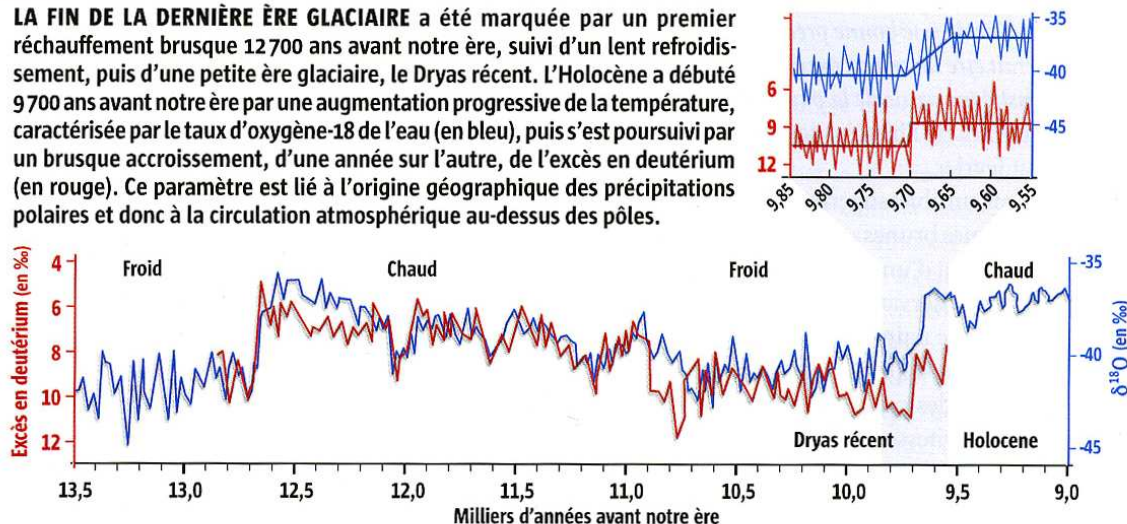
NorthGRIP est un site implanté sur l'inlandsis du Groenland. Entre 1996 et 2003, une équipe internationale dirigée par Dorthe Dahl-Jensen, de l'université de Copenhague, y a foré la glace jusqu'à atteindre le socle rocheux. Des carottes de glace totalisant une longueur de 3 085 mètres ont ainsi été récupérées. Protégées de l'air ambiant, elles gardent en mémoire les conditions climatiques qui ont régné ces derniers 123 000 ans.

Nombreuses instabilités

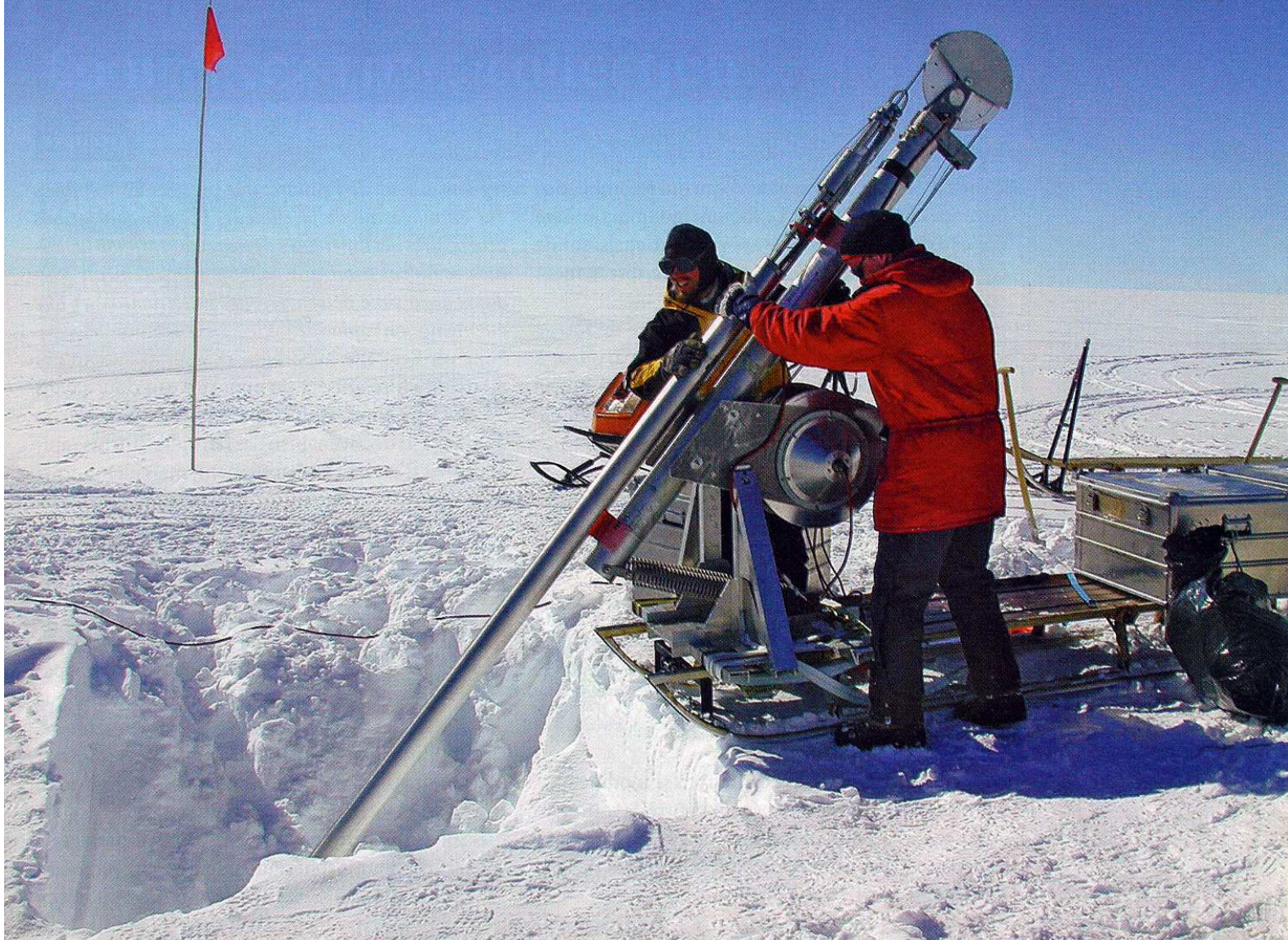
Une première analyse, publiée en 2004, révélait que la dernière ère glaciaire avait débuté par une baisse progressive de la température en 7 000 ans, puis s'était installée durablement il y a 115 000 ans [2]. Très vite, cette glaciation s'est accompagnée d'instabilités rapides du climat. Cette période froide est en effet marquée par 25 épisodes de refroidissements progressifs, suivis

Fig.1 Le début de l'Holocène

LA FIN DE LA DERNIÈRE ÈRE GLACIAIRE a été marquée par un premier réchauffement brusque 12 700 ans avant notre ère, suivi d'un lent refroidissement, puis d'une petite ère glaciaire, le Dryas récent. L'Holocène a débuté 9 700 ans avant notre ère par une augmentation progressive de la température, caractérisée par le taux d'oxygène-18 de l'eau (en bleu), puis s'est poursuivi par un brusque accroissement, d'une année sur l'autre, de l'excès en deutérium (en rouge). Ce paramètre est lié à l'origine géographique des précipitations polaires et donc à la circulation atmosphérique au-dessus des pôles.



Jacques-Olivier Baruch
est journaliste
à La Recherche.



LES CLIMATOLOGUES ONT FORÉ LA GLACE du site NorthGRIP, au centre du Groenland, jusqu'à atteindre le socle rocheux. Ils ont ainsi récupéré 3 085 mètres de glace sous forme de carottes, renfermant 123 000 ans d'archives climatiques. © PHOTOS ICE & CLIMATE / UNIVERSITY OF COPENHAGEN

de réchauffements abrupts de 8 à 16 °C en quelques décennies, formant les événements dits de Dansgaard-Oeschger, du nom des deux paléoclimatologues qui les ont mis en évidence dès 1985 à l'aide des premiers forages du Groenland.

Le dernier réchauffement, marquant la fin de l'ultime événement de Dansgaard-Oeschger, est l'objet de la nouvelle étude de l'équipe NorthGRIP. Il date de 11 700 ans. Il est particulièrement marqué dans la zone arctique, qui est, comme d'habitude, la plus sensible au changement. En 1993, Richard Alley, de l'université de Pennsylvanie, montrait déjà qu'au sommet de la calotte glaciaire du Groenland, 300 kilomètres au sud de NorthGRIP, les précipitations neigeuses augmentent rapidement [3]. La même année, Kendrick Taylor, du Desert Research Institute dans le Nevada, détaillait la diminution de la quantité de poussières déposées au même endroit [4]. Cependant, aucune équipe avant NorthGRIP n'avait pu analyser l'ensemble du contenu physico-chimique des glaces, comparer les différents paramètres d'un même site et révéler ainsi précisément la séquence des événements qui a conduit au réchauffement.

Pour ce faire, l'équipe de NorthGRIP a utilisé toutes les méthodes analytiques disponibles. Elle a d'abord

mesuré en continu, par chromatographie*, la quantité de poussières, ainsi que le sodium et le calcium que la glace contenait. Comme les poussières se déposent suivant un rythme saisonnier, elle a pu aussi déterminer l'épaisseur de neige déposée annuellement, donc la quantité de précipitations. Puis elle a découpé la glace en tranches de 2,5 centimètres d'épaisseur afin de détailler le contenu en éléments présents sous forme de traces et, pour les molécules d'eau, en oxygène-18 ou en deutérium. Or chaque variable est la signature d'un phénomène précis.

De l'Asie au Groenland

La teneur des poussières en strontium et en néodyme indique qu'elles proviennent, comme aujourd'hui, de l'érosion des zones arides d'Asie, en particulier du désert de Gobi. Elles y sont plus ou moins « lavées » par la mousson d'hiver du Pacifique. Puis elles sont transportées vers les hautes latitudes par la circulation atmosphérique et se déposent au Groenland avec les chutes de neige. Le taux d'oxygène-18, la forme lourde de l'oxygène, dépend de la température, tandis que l'excès en deutérium, une combinaison entre les taux d'oxygène-18 et de deutérium, renseigne sur le ➔

*La **chromatographie** est une technique qui permet de séparer les différents constituants d'un échantillon suivant leur vitesse de migration dans un fluide.

[1] J. P. Steffensen et al., *Science*, 321, 680, 2008.

[2] North Greenland Ice Core Project Members, *Nature*, 431, 147, 2004.

[3] R. Alley et al., *Nature*, 362, 527, 1993.

[4] K. Taylor et al., *Nature*, 361, 432, 1993.



LES 3 085 MÈTRES DE GLACE sont découpés sur place en morceaux de 50 centimètres, puis envoyés dans les laboratoires danois et français pour des analyses fines.

© ICE & CLIMATE / UNIVERSITY OF COPENHAGEN

[5] V. Masson-Delmotte et al., *Science*, 309, 118, 2005.

[6] Y. Wang et al. *Nature*, 451, 1090, 2008.

[7] A. Brauer et al., *Nature Geoscience*, 1, 520, 2008.

[8] X. Zhang et al., *GRL*, 35, L22701, 2008.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Les sites de forage au Groenland avec participation française

■ NorthGRIP
http://www.gfy.ku.dk/~www-glac/ngrip/index_eng.htm

■ Neem, en forage actuellement
<http://neem.ku.dk/>

⇒ lieu d'origine de la vapeur d'eau qui retombe sous forme de chutes de neige. Le sodium indique la salinité de l'eau de mer au lieu d'évaporation. L'épaisseur de couche de neige annuelle est, quant à elle, directement reliée à la quantité des précipitations.

Grâce aux conditions climatiques du site de forage et à ces différentes analyses, l'équipe est parvenue à une précision de deux ou trois mesures par année sur chacun de ces paramètres. La qualité de ces données est telle qu'on peut maintenant suivre pas à pas la séquence des événements.

Ainsi, c'est la quantité de poussières qui varie en premier. Elle passe de 100 particules par microlitre à moins de 10 entre -9711 et -9661. La bascule climatique débute donc sous les tropiques par une intensification progressive de la mousson d'hiver du Pacifique. Au même moment, la température moyenne annuelle au Groenland commence à augmenter. En moins de soixante ans, elle gagnera 10 °C [5] !

Une séquence précise

En -9701, l'origine des précipitations se modifie soudainement [fig. 1]. D'une année sur l'autre, la source de la vapeur d'eau qui retombe en neige au Groenland se déplace brusquement de plusieurs degrés de latitude vers le nord. Puis, à partir de -9698, les chutes de neige deviennent plus abondantes. L'épaisseur de la couche qui se dépose chaque année augmente de 40 % en sept ans, avant de se

stabiliser. Un seul indicateur ne montre pas de changement brusque : la teneur en sel de l'eau de mer.

L'étude confirme ainsi l'hypothèse émise en 1993 par Richard Alley, Kendrick Taylor et leurs collègues : cette bascule climatique est due à une réorganisation rapide de la circulation atmosphérique. L'océan ne serait-il donc pas le chef d'orchestre des variations climatiques ?

« Le fait que les fluctuations atmosphériques soient très rapides au Groenland n'implique pas que les composantes lentes, telle la circulation océanique, n'y participent pas, prévient Édouard Bard, du Collège de France. Le couplage océan-atmosphère étant non linéaire, il y a probablement des effets de seuils très sensibles. »

Effectivement, hormis le taux de sodium, tous les paramètres mesurés par l'équipe de NorthGRIP passent très rapidement d'un état à peu près stable à un autre. « La déglaciation était amorcée depuis plusieurs milliers d'années, évoque Valérie Masson-Delmotte, du laboratoire des sciences du climat et de l'environnement et membre de l'équipe NorthGRIP. Il y a 11 700 ans, précession des équinoxes oblige, l'hémisphère Nord recevait 20 watts par mètre carré de plus qu'aujourd'hui en été. Juste avant ce réchauffement rapide, le Groenland a subi une phase froide, mais les

régions autour de l'Antarctique ou sous les tropiques ont emmagasiné de la chaleur. Les réorganisations progressives des différences de température selon la latitude semblent avoir provoqué des déplacements soudains de la zone de convergence intertropicale et une augmentation rapide de l'intensité des moussons. »

Pour vérifier cette hypothèse, il faudrait l'appui des modèles. En réponse à un apport d'eau douce dans l'Atlantique Nord, simulant l'impact de la déglaciation, ceux-ci décrivent bien des refroidissements rapides suivis d'un lent réchauffement, mais aucun n'arrive à reproduire cette entrée abrupte dans l'holocène. « Nos données sont très stimulantes pour les modélisateurs. Ils vont devoir maintenant tester leurs simulations avec une séquence d'événements très précise », ajoute Valérie Masson-Delmotte.

Pourtant, même si les modèles ne parviennent pas encore à le reproduire, l'événement a bien eu lieu et pas seulement au Groenland. Les couches de sédiments des lacs suisses et allemands le gardent en mémoire. Le taux d'oxygène-18 de stalagmites chinoises, lié aux pluies tropicales de la mousson est-asiatique, a aussi changé brusquement à cette période [6].

Ainsi que le montre l'équipe NorthGRIP, le passage de la circulation atmosphérique polaire d'un état quasi stable à un autre s'est traduit en premier, il y a 11 700 ans, par une évolution d'une année à l'autre de l'excès en deutérium de la vapeur d'eau. Cette réorganisation brusque de la circulation

atmosphérique pourrait sans doute se généraliser aux autres changements climatiques importants. Selon une étude des sédiments du lac allemand de Meerfelder parue en août dernier, le début du Dryas récent, la courte période de glaciation qui a précédé l'Holocène, se caractérise aussi par une réorientation des vents dominants d'une année sur l'autre [7].

Le réchauffement actuel peut-il aussi provoquer une modification très rapide de la circulation atmosphérique ? Plusieurs articles parus en 2008 vont dans ce sens, puisqu'ils expliquent la diminution drastique de la banquise arctique durant les étés 2007 et 2008 par une réorganisation des vents. Xiangdong Zhang, de l'université d'Alaska, et ses collègues notent même que ces dernières années la structure de la circulation atmosphérique polaire s'est modifiée d'une manière jamais observée auparavant [8]. Sommes-nous déjà dans le basculement que certains annoncent ? Hélas, aucune expérience ne mesure cet excès en deutérium sur place. « Pour surveiller l'évolution de la dynamique atmosphérique polaire, un suivi continu de la composition isotopique de la vapeur d'eau est à organiser d'urgence tout autour de l'Arctique », plaide Valérie Masson-Delmotte. ■ J.-O. B.

La bascule climatique serait due à une réorganisation de la circulation atmosphérique