HAL open science

Climats du passé - Les glaces polaires, une mine d'informations pour étudier l'histoire du climat

Jean Jouzel, Claude Lorius

To cite this version:

Jean Jouzel, Claude Lorius. Climats du passé - Les glaces polaires, une mine d'informations pour étudier l'histoire du climat. MET MAR Météorologie Maritime, 1994, 164, pp.31-37. hal-03344057

HAL Id: hal-03344057

https://hal.science/hal-03344057v1

Submitted on 14 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Climats du passé

Les glaces polaires, une mine d'informations pour étudier l'histoire du climat

Jean Jouzel
Ingénieur au Commissariat à l'énergie atomique
Adjoint au directeur du Laboratoire de modélisation du climat et de l'environnement (LMCE-Saclay) et au directeur du Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE-Grenoble)

Claude Lorius
Directeur de recherches au CNRS
Président de l'Institut français pour la recherche et la technologie polaires (IFRTP)

Bien que les grands forages réalisés dans les calottes du Groenland et de l'Antarctique se comptent sur les doigts d'une main ou presque, ils nous ont beaucoup appris sur notre climat, y compris sur le rôle majeur que joue l'océan.

Trois d'entre eux seulement permettent d'avoir accès à de la glace vieille de plus de 100 000 ans et de remonter à la période chaude que nous appelons l'Eémien. C'était il y a environ 120 000 ans. Cet «interglaciaire» était alors suivi d'une longue période glaciaire qui s'est terminée, il y a un peu plus de 10 000 ans, par un retour brusque vers des conditions interglaciaires, celles du climat actuel, l'Holocène.

Ce nombre restreint de grands forages en régions polaires n'est en rien lié à une absence d'intérêt scientifique. Au contraire, celui-ci est exceptionnel. Dans le concert des différentes approches complémentaires sur lesquelles s'appuie l'étude des climats du passé - géomorphologie, croissance des anneaux d'arbres, lacs et sédiments lacustres, eaux souterraines, paléosols, stalagmites, séries polliniques, fossiles d'insectes et d'escargots, etc, dans les régions continentales, coraux et sédiments marins dans l'océan - les glaces polaires occupent une place à part. Leur spécificité tient à ce qu'elles gardent à la fois la mémoire des variations climatiques à partir de leur teneur isotopique[1] et celle de la composition de l'atmosphère piégée dans les bulles d'air.

1. L'eau n'est pas composée que d'hydrogène «normal» (de masse 1) ou d'oxygène «normal» (de masse 16). Ces deux atomes ont l'un et l'autre des isotopes. En particulier, le deutérium (hydrogène de masse 2) et l'oxygène 18, dont l'existence conduit à des formes «isotopiques», HDO et $H_2{}^{18}O$, accompagnent systématiquement la molécule d'eau, $H_2{}^{16}O$. Les propriétés physiques de ces trois molécules sont légèrement différentes : les molécules lourdes ont, ce qui est intuitif, tendance à aller préférentiellement vers la phase condensée (pluie ou neige) plutôt que vers la vapeur. Résultat : la phase condensée est plus riche en isotopes lourds que la phase vapeur qui lui donne naissance. A chaque précipitation, la vapeur d'eau perd quelques molécules «lourdes». Il y a donc appauvrissement progressif des teneurs isotopiques de la vapeur et des précipitations à mesure que la masse d'air se refroidit. Dans les régions polaires, ceci se traduit par une relation linéaire entre température moyenne annuelle du site et teneurs isotopiques (deutérium ou oxygène 18). Cette linéarité est à la base de ce que nous appelons « Le thermomètre isotopique » : plus il fait froid, plus la teneur isotopique est faible et inversement. Appliquée en un site donné, cette correspondance permet de reconstruire les variations du climat à partir d'un enregistrement des variations des teneurs soit en deutérium, soit en oxygène 18.

Forages en Antarctique et au Groenland : une longue histoire

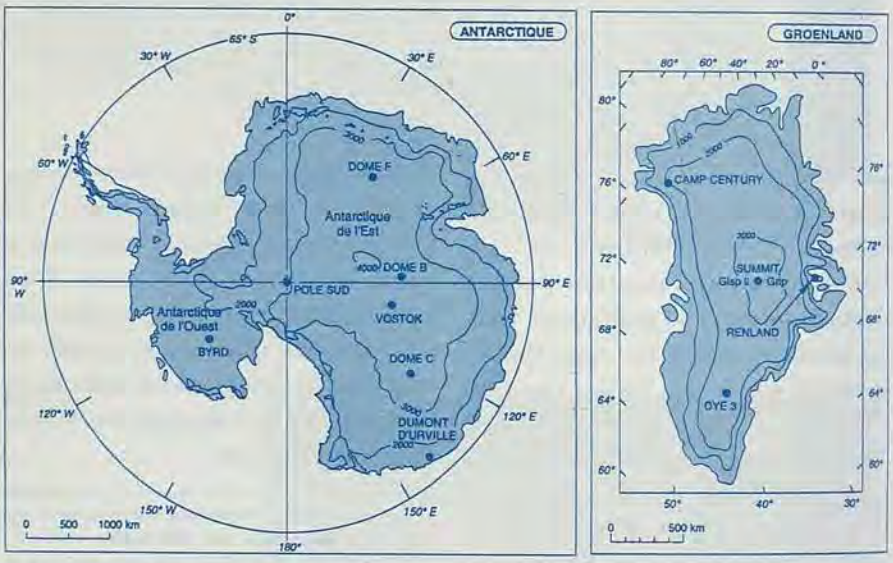
Mais forer dans la glace sur des profondeurs de plusieurs kilomètres est une opération de haute technicité, à réaliser dans des sites particulièrement inhospitaliers et d'accès difficile. Pénétration, récupération de la carotte et des déchets ou de l'eau de fusion, utilisation d'un fluide pour éviter la fermeture du trou par le fluage de la glace, sont autant de difficultés que seules quelques équipes ont su maîtriser. Et ce malgré près de 30 années d'un effort international soutenu...

On doit les deux premiers forages aux Américains. En 1966, le socle rocheux est atteint à Camp Century (figure 1) au nord-ouest du Groenland : 1 390 m et de la glace vieille de plus de 100 000 ans. Les mêmes équipes récidivent en Antarctique de l'Ouest à la station Byrd. Là aussi le socle rocheux est atteint. En 1968, sont extraits plus de 2 kilomètres de carotte. Une belle réussite, même si l'âge de la glace n'y dépasse pas 80 000 ans. Mais le carottier reste au fond du trou et il faudra attendre 1993 pour que les foreurs américains célèbrent de nouveau le succès d'un forage profond.

Au début des années 1970, commence la grande aventure du forage Vostok en Antarctique de l'Est. Cette station Soviétique, située à une altitude de 3 488 m, détient le record de la température terrestre la plus basse (-89,7°C). La température moyenne annuelle y est de -55,5°C. Dû à ce froid intense, le régime des précipitations est quasi-désertique. Il y tombe l'équivalent de 2 cm d'eau par an. Grâce à ce faible taux de précipitations et à la grande épaisseur de la calotte (3 700 m), Vostok est un excellent site pour remonter loin dans le temps. Malgré les conditions hostiles et un accès difficile, les Soviétiques y installent une station permanente et réalisent des forages de plus en plus profonds : 500 m en 1970, 950 m en 1974. Mais ils ne sont bientôt plus seuls en Antarctique de l'Est. Début 1978, l'équipe de forage et les chercheurs du Laboratoire de glaciologie du CNRS à Grenoble arrivent au Dôme C, grâce au soutien des Américains qui assurent le transport depuis le Pôle Sud. En moins de deux mois, une carotte de 900 m est extraite en ce site tout aussi inhospitalier que celui de Vostok. En 1982, ce laboratoire et deux autres équipes françaises déjà impliquées dans le projet Dôme C, l'une du CEA Saclay, l'autre du CNRS Orsay, s'associent au projet Vostok. Celui-ci bénéficie également du soutien logistique américain. Le troisième forage Vostok dépasse 2 000 m en 1983. Pour la première fois, une carotte de glace permet de reconstituer l'histoire du climat et de l'environnement sur un cycle climatique complet (150 000 ans). Bien que ce forage et le suivant aient dû être arrêtés à des profondeurs respectives de 2 200 et 2 500 m pour cause de la fermeture progressive du trou, le programme Vostok, auquel se sont joints des scientifiques américains, se poursuit. Un nouveau forage, le cinquième, vient d'atteindre 2 755 m et de la glace probablement vieille de 250 000 ans. La station d'hivernage, fermée début 1994, devrait être ouverte à nouveau. L'espoir subsiste de forer le kilomètre restant, et donc d'atteindre le socle rocheux d'ici deux ans. La glace du fond est vieille d'au moins 500 000 ans ...

Le second forage du Groenland a été réalisé par les Danois à la station Dye 3, entre 1979 et 1981. Américains et Suisses y ont collaboré. Plus de 2 000 m, près de 100 000 ans. Mais l'âge et l'origine de la glace formée en amont du site sont très difficiles à déterminer car cette région côtière est très accidentée et les enregistrements ne sont guère exploitables au-delà de 50 000 ans.

En fait, le choix du site reposait largement sur des considérations logistiques (accessibilité depuis la base américaine de Sondre Strömfjord), alors que d'un point de vue scientifique, c'est la région de Summit, le point haut du plateau groenlandais situé dans sa partie centrale, qui s'impose. L'épaisseur de glace y est maximale, un peu plus de 3 000 m. C'est, au Groenland, l'endroit où l'on peut espérer obtenir la glace la plus ancienne. Mais, forer au centre de cette calotte est une opération difficile à mettre sur pied. Malgré le soutien actif des scientifiques américains, l'idée a, dans un premier temps, du mal à se concrétiser. Danois et Suisses se tournent alors vers l'Europe et en particulier vers la France. Après un forage de 300 m dédié à l'étude des 1 000 dernières années et réalisé en 1989 conjointement par le Danemark, la Suisse et la France, le projet d'un carottage profond prend corps. Cinq autres pays européens s'y investissent. Pendant ce temps, les scientifiques américains ont convaincu leur tutelle du bien-fondé d'un tel projet. Ils avancent l'idée de réaliser deux forages dans la région de Summit. On pressent, en effet, que des découvertes importantes sont à la clé et, si tel est le cas, elles mériteront d'être rapidement examinées sur un second forage. Deux projets sont nés : GRIP (*Greenland Ice Core Project*) du côté européen et GISP2 (*Greenland Ice Sheet Program*) du côté américain. Le forage européen s'effectue, comme prévu, en trois campagnes d'été : 710 m en 1990, 2 320 m en 1991 et 3 028,8 m le 12 juillet 1992. Un peu moins chanceux, car le câble est source de problèmes, nos collègues américains atteignent le socle l'été suivant.



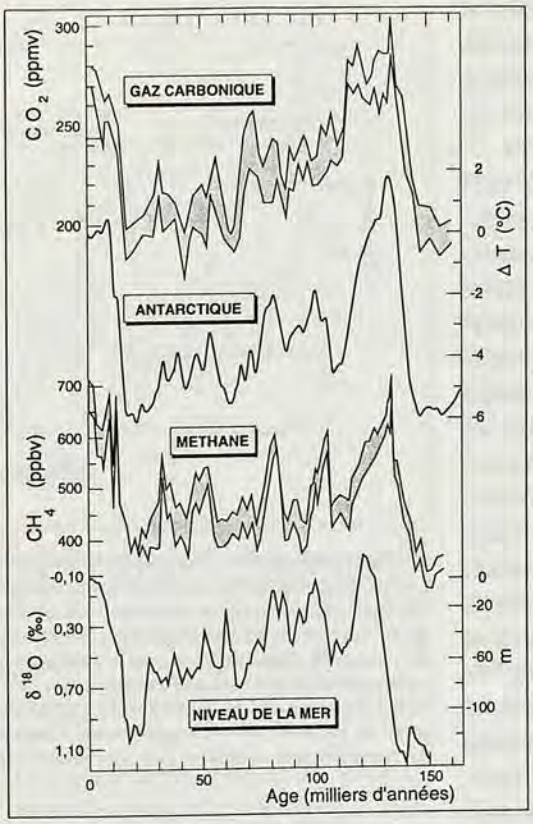
1. Cartes du Groenland et de l'Antarctique avec indication des différents sites de forages profonds.

Les forages de Vostok et ceux du centre du Groenland ont apporté des informations originales et essentielles sur le comportement du système climatique au cours du dernier cycle glaciaire-interglaciaire. D'une part, est confortée l'idée d'un lien entre climat et gaz à effet de serre. De l'autre, est modifiée notre vision de la variabilité naturelle du climat dans les régions de l'Atlantique nord. Les équipes françaises[2] de Grenoble, Saclay et Orsay ont contribué de façon importante à ces recherches dont nous rappelons ici quelques résultats majeurs.

Vostok : une relation étroite entre climat et gaz à effet de serre

La relation entre climat et gaz à effet de serre obtenue à partir de l'analyse de la glace de Vostok (figure 2) est au rang des résultats qui, dans le domaine des recherches sur le climat, ont marqué les années quatre-vingts. La raison en est évidente, pour qui s'intéresse à l'évolution de notre climat, car elle touche à un aspect qui est au centre des préoccupations à l'aube du 21ème siècle. Différents composés, gaz carbonique, méthane, oxyde nitreux, chlorofluorocarbones, ont la propriété d'absorber le rayonnement infrarouge réémis par le sol. La concentration de ces gaz à effet de serre est modifiée par l'activité humaine, avec pour conséquence une augmentation régulière de l'énergie moyenne reçue par notre planète d'environ 2 W/m² au cours des 200 dernières années (celle-ci est voisine de 240 W/m²). Ajoutons qu'ozone et vapeur d'eau sont également des gaz à effet de serre.

Prédire l'évolution du climat au cours des prochaines décennies, en fonction de la façon dont cette augmentation se poursuivra, serait simple s'il n'était nécessaire de ne tenir compte que de l'effet radiatif direct. Une augmentation de 4 W/m², correspondant à peu près à un doublement de la teneur en CO_2 auquel il est très souvent fait référence, induirait, une fois l'équilibre atteint, un réchauffement moyen de 1,2°C. Mais le réchauffement de l'atmosphère se transmet peu à peu à l'océan avec deux conséquences : accroissement de l'évaporation et diminution de la glace de mer. L'une et l'autre amplifient le réchauffement initial à travers, respectivement, l'augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique et la disparition de surfaces fortement réfléchissantes. Et surtout, les modifications induites au niveau des nuages sont mal connues. Résultat : les simulations climatiques, en cas de doublement de CO_2, réalisées avec des modèles de circulation générale de l'atmosphère conduisent à des estimations comprises entre 2 et 5°C. Elles sont donc toutes supérieures à 1,2°C, indiquant que le forçage radiatif direct est amplifié. Au simple vu de ces résultats, et surtout de leur dispersion liée largement à la façon dont est pris en compte le rôle des nuages, on comprend bien qu'il est important que soient explorées d'autres approches qui puissent apporter des informations sur la sensibilité du climat. Les glaces polaires s'avèrent être des alliés précieux des modélisateurs...



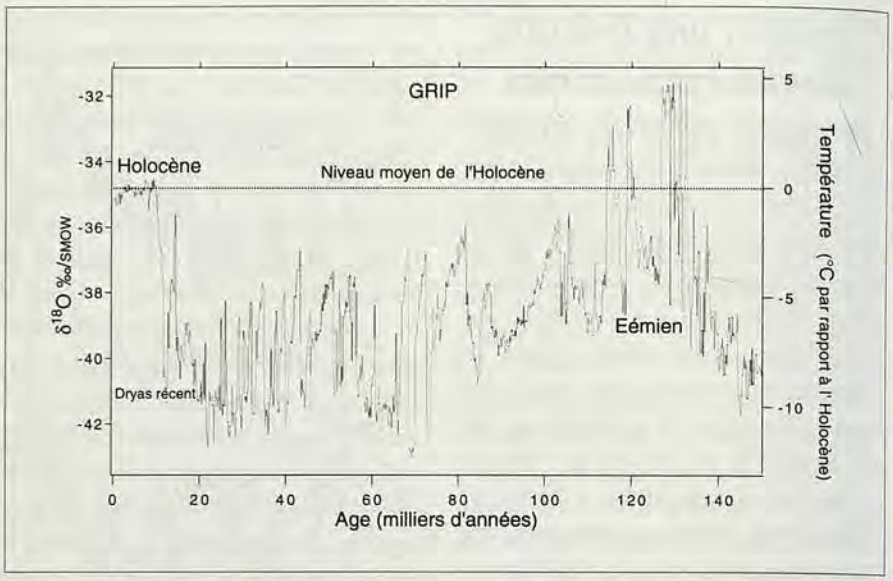
2 - Variations au cours des dernières 150 000 années des teneurs en gaz carbonique et méthane, de la température en Antarctique et du niveau de la mer.
De haut en bas :
- gaz carbonique en parties par millions en volume
- différence avec aujourd'hui de la température moyenne en Antarctique (valeur actuelle : -55°C)
- teneur en méthane (en parties par milliards en volume)
- niveau de la mer (échelle de droite), déterminé par la teneur en oxygène 18 de l'océan (échelle de gauche) mesurée dans les sédiments marins.

Pour ce qui concerne l'action de l'homme, ce sont elles qui ont permis de reconstituer l'augmentation de la teneur du gaz carbonique, du méthane et de l'oxyde nitreux, depuis le début de l'industrialisation et de l'agriculture intensive. En fait, et ce fut là une découverte de tout premier plan, les grenoblois, Robert Delmas, Michel Legrand et Jean-Marc Ascensio, et leurs collègues de Berne, avaient tout d'abord observé, au début des années quatre-vingts, que les teneurs en gaz carbonique étaient plus faibles au dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, qu'il y a 200 ans. Plus récemment, et toujours grâce aux glaces polaires, cette augmentation entre glaciaire et interglaciaire a été documentée pour les autres gaz à effet de serre, méthane et oxyde nitreux. Les teneurs en gaz carbonique ont augmenté de 40% pendant la déglaciation tandis que celles du méthane ont doublé ; la teneur en oxyde nitreux a également augmenté pendant la déglaciation, d'environ 30%. L'explication de ces variations naturelles n'est pour l'instant que partielle mais on sait

2. L'étude des carottages de l'Antarctique et du Groenland est, au niveau français, coordonnée par le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement du CNRS (LGGE-Grenoble). Cet effort s'appuie sur les compétences de trois laboratoires : le LGGE pour la chimie atmosphérique, les gaz à effet de serre et la physique de la glace, le Laboratoire de modélisation du climat et de l'environnement du CEA à Saclay pour la reconstitution des variations climatiques et le Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse du CNRS à Orsay pour les isotopes cosmogéniques. Il bénéficie du soutien de l'Institut national des sciences de l'univers (INSU/ CNRS), du Ministère de la recherche et de l'enseignement, du Commissariat à l'énergie atomique, de l'Institut français pour la recherche et la technologie polaires, de la Fondation de France et des communautés européennes. Ces recherches s'inscrivent dans le cadre de programmes internationaux : collaboration Russie, France, Etats-Unis pour le projet Vostok, collaboration européenne (Allemagne, Belgique, Danemark, Islande, France, Italie, Royaume-Uni et Suisse) mise sur pied par la Fondation européenne de la science pour le projet GRIP (Greenland Ice Core Project).

qu'elle met en jeu, dans chacun des cas, des interactions entre le climat et les cycles géochimiques liés au monde vivant. Ainsi, pour le gaz carbonique, elle implique certainement la circulation des océans et leur productivité.

Mais, c'est un message climatique beaucoup plus fort, illustré sur la figure 2, que nous livrent les glaces de Vostok à travers les travaux de trois autres grenoblois, Dominique Raynaud, Jean-Marc Barnola et Jérôme Chappellaz : tout au long des derniers 150 000 ans, les concentrations en CO_2 (gaz carbonique) et CH_4 (méthane) sont, en général, fidèlement corrélées aux variations de la température. Les variations naturelles des concentrations de ces deux composés, entraînent, entre périodes glaciaires et interglaciaires, une augmentation de l'effet de serre d'un peu plus de 2 W/m², soit un effet radiatif direct de 0,6°C. Mais voilà, glace de mer, vapeur d'eau et nuages jouaient en période glaciaire, comme c'est le cas aujourd'hui et comme ce le sera dans le futur, à modifier la réponse du système climatique. La sensibilité du climat vis-à-vis de ces rétroactions peut donc être évaluée à partir des données du passé[3]. Cette approche a certaines limites mais elle illustre bien le résultat clé mis en évidence, à des degrés divers, par l'ensemble des modèles climatiques : ce sont des mécanismes d'amplification vis-à-vis du forçage radiatif lié à l'effet de serre anthropogénique qui devraient opérer au cours des prochaines décennies. D'ailleurs, les résultats obtenus à Vostok ont joué un rôle important dans la prise de conscience de ce problème du réchauffement climatique lié à l'augmentation des gaz à effet de serre.



3 - Enregistrement climatique le long du forage GRIP, en fonction de l'âge tel qu'il est estimé à partir d'un modèle glaciologique avec, à gauche, l'échelle de teneur en oxygène 18. A droite est indiquée une estimation de la variation de température du site telle qu'elle est déduite de ce profil isotopique en admettant qu'un appauvrissement de 1‰ correspond à un refroidissement de 1,5°C.
Cette figure met en évidence la variabilité de l'enregistrement pour la période de l'Eémien mais l'interprétation en termes de changement de température soulève des questions au-delà de 100 000 ans (cf texte).

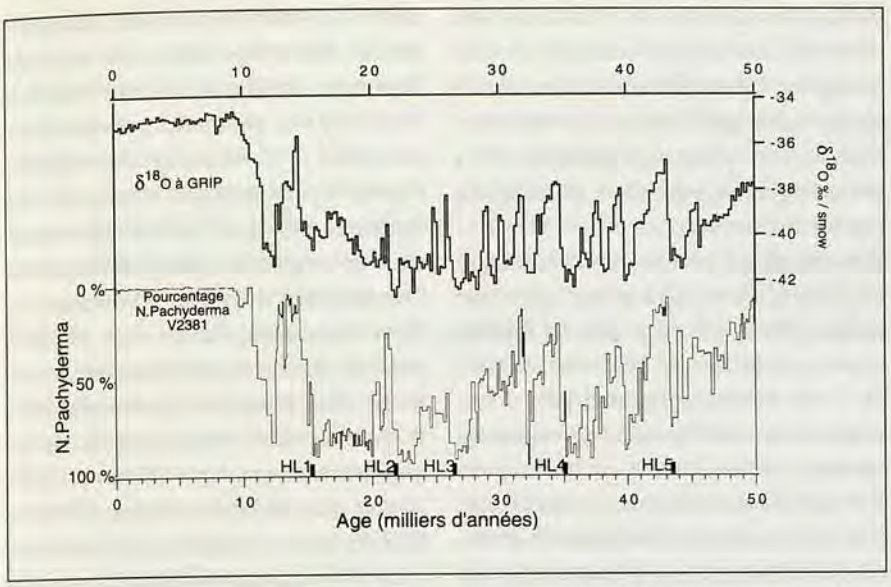
Groenland : quelques dizaines d'années ont suffi à bouleverser le climat

C'est la révélation de quelque chose d'inattendu que nous ont offert les forages du Groenland. Jugeons-en à travers les résultats de l'enregistrement isotopique obtenu pour les 150 000 dernières années le long du forage GRIP (figure 3). Il y a un contraste remarquable entre la stabilité de l'enregistrement au cours des 10 000 dernières années et le caractère très chahuté des périodes qui les ont précédées[4].

C'était déjà le cas au cours de la dernière déglaciation caractérisée par une première période de réchauffement suivie par un retour temporaire vers des conditions froides (le Dryas récent). Ce dernier refroidissement a été très marqué dans l'Atlantique nord et les régions continentales adjacentes. Ce qui frappe, c'est la rapidité de la transition qui, à la fin du Dryas récent, il y a 11 500 ans, a conduit vers le climat actuel. Les forages GRIP et GISP2 confirment pleinement les résultats de celui de Dye 3 : l'analyse isotopique très détaillée indique, qu'au Groenland, le climat s'est alors réchauffé de 7°C en une cinquantaine d'années (figure 4). Même si les changements sont amplifiés aux hautes latitudes par rapport à l'ensemble du globe, il s'agit là d'un changement climatique majeur. Certaines caractéristiques peuvent être modifiées encore plus rapidement. Nos collègues améri-

3. Contrairement à une idée reçue, cette approche ne requiert pas que soit complètement déchiffrée la complexité des mécanismes des grands changements climatiques et que soit apportée une réponse définitive à la question de «l'œuf et de la poule», si souvent soulevée au sujet des variations respectives du climat et des gaz à effet de serre dans le passé. Il suffit que puissent être correctement estimés les différents forçages qui opèrent à l'échelle des grands changements glaciaires-interglaciaires, dont le forçage astronomique dû aux variations d'insolation liées à la position de la terre par rapport au soleil, et les changements climatiques associés. Une analyse statistique indique que l'effet de serre explique environ 50% du réchauffement de 4 à 5°C associé à la déglaciation, soit environ 2°C. Le forçage radiatif direct a été amplifié, à travers les rétroactions liées à la glace de mer, à la vapeur d'eau et aux nuages, d'un facteur voisin de 3 (2°C par rapport au 0,6°C initial). Cette même amplification opère dans le cas d'un doublement de CO_2 et ceci suggère qu'une valeur de 3 à 4°C (3x1,2) pour la sensibilité du climat dans l'hypothèse de référence d'un doublement de CO_2 est, au regard des paléodonnées, une prédiction réaliste.

4. La chronologie du forage est basée sur l'existence de variations saisonnières (teneur en poussières, composition chimique de la glace) jusque vers - 40 000 ans. Elle est ensuite établie à partir d'un modèle glaciologique et devient, en fait, de plus en plus imprécise à mesure que l'on s'approche du socle rocheux. L'épaisseur annuelle qui, en surface, correspond au taux d'accumulation, soit un peu plus de 20 cm à GRIP, s'amoindrit sous l'effet de l'écoulement à mesure que l'on s'enfonce. A GRIP, elle ne correspond plus, par exemple, qu'à un centimètre vers 2 500 m et à un millimètre vers 2 900 m. La chronologie de Vostok est également construite à partir d'un modèle glaciologique.



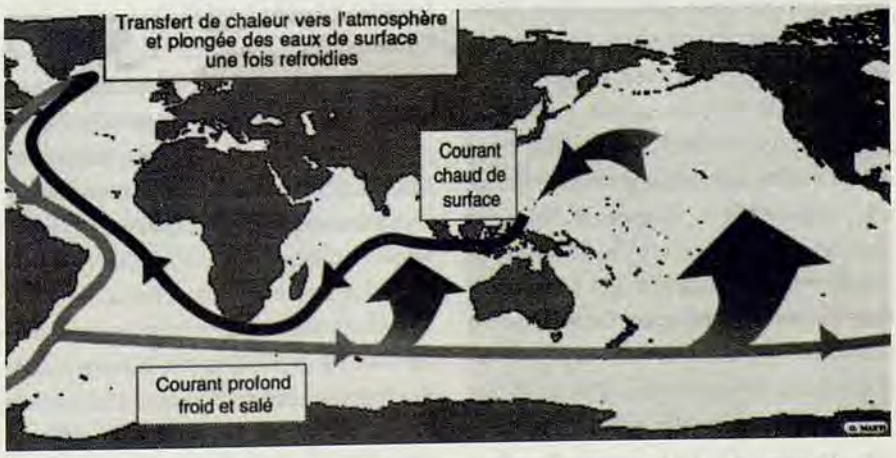
4 - Comparaison, au cours des 50 000 dernières années, de la teneur en oxygène 18 du sondage de GRIP et du pourcentage de N. Pachyderma (coquillages microscopiques), indicateur de la température océanique de surface, mesuré au site V 23-81 dans l'Atlantique nord. Sur cette dernière courbe figurent les niveaux des couches de Heinrich (HL1... HL5).

cains ont montré qu'à la fin du Dryas récent, il a fallu moins de 20 ans pour que le contenu en poussières, témoin direct de l'intensité du transport atmosphérique et donc de l'intensité des vents, passe de valeurs élevées de type glaciaire à des valeurs beaucoup plus faibles, caractéristiques du climat actuel. Au cours de cette même transition, les précipitations et donc l'accumulation de la glace ont doublé quasi-instantanément, en 3 ans et peut-être même d'une année sur l'autre. S'il est possible que le changement de l'intensité des vents ait un caractère local, cela n'est guère envisageable pour l'accumulation, et une telle rapidité laisse perplexe.

Groenland et Atlantique nord : des climats étroitement solidaires

Début des années quatre-vingts, le forage de Dye 3 révèle l'existence de changements climatiques rapides en pleine période glaciaire. Ils se traduisent par un réchauffement important (souvent plus de la moitié de celui correspondant à la transition glaciaire-interglaciaire) qui s'opère en quelques décennies et est suivi d'un retour vers les conditions glaciaires avec un refroidissement d'abord lent puis plus rapide. Leur existence est pleinement confirmée par les forages du centre du Groenland, vingt-deux de ces interstades étant répertoriés tout au long de la période glaciaire. Dès leur mise en évidence, il est suggéré que ces changements auxquels est donné le nom d'événements de «Dansgaard-Oeschger» du nom des glaciologues responsables des équipes danoise et suisse impliquées dans le projet, sont étroitement liés à des modifications de la circulation océanique dans l'Atlantique nord. Cette idée s'appuie sur l'hypothèse qu'il existe différents modes dans lesquels cette circulation peut être stable. Deux types de circulation océanique, schématisés à l'échelle globale à travers le «Conveyor belt», leur sont associés (figure 5). Actuellement, des courants de surface transportent de l'eau et des calories depuis l'équateur vers l'Atlantique nord. Ces eaux se refroidissent en réchauffant le continent européen adjacent et deviennent suffisamment denses pour plonger et former des eaux profondes qui repartent ensuite vers le sud et irriguent les différents océans. En période glaciaire, les eaux équatoriales ne peuvent remonter suffisamment au nord pour acquérir une densité qui leur permette de plonger. Le mode actuel «chaud» est caractérisé par la formation d'eaux profondes dans l'Atlantique nord tandis qu'en mode «glaciaire» celles-ci ne se forment pas, ou, en tout état de cause, de façon moins intense. La transition rapide froid/chaud, caractéristique des événements Dansgaard/Oeschger, correspondrait à la mise en route de cette circulation et le retour à des conditions glaciaires, à son interruption. Si ce schéma séduisant est réalité, on doit trouver trace de ces événements dans les sédiments marins.

Dès la découverte des variations rapides dans le forage de Dye 3, les paléocéanographes se mettent à la recherche d'un témoignage éventuel de ces variations rapides dans l'océan. Les premiers indices sont apportés par l'analyse sédimentologique. Certaines carottes sont interrompues par une série de couches calcaires



5 - Le «*conveyor belt*» (tapis roulant) : représentation simplifiée de la circulation océanique à l'échelle globale pour les conditions climatiques actuelles.

dont l'étude montre qu'elles proviennent de l'érosion d'un socle continental, Amérique du Nord ou Scandinavie. Elles sont connues sous le nom de «Couches de Heinrich», le scientifique allemand qui les a découvertes. De son côté, une équipe américaine met en évidence des variations cycliques de la couleur du sédiment liées à ces couches de Heinrich. Ces équipes, auxquelles se joignent d'autres chercheurs dont Laurent Labeyrie (Gif/Yvette), s'unissent et aboutissent, fin 1992, à une image cohérente de ces différentes observations. Six couches de Heinrich sont identifiées entre - 70 000 et - 14 000 ans et cartographiées. Leur origine continentale est confirmée. En outre, une diminution de la teneur en oxygène 18 de l'eau de mer leur est associée. Ces deux éléments indiquent qu'elles sont liées à des décharges massives d'icebergs (pauvres en oxygène 18) se détachant de la calotte nord - américaine ou fennoscandienne lorsque celle-ci a grossi jusqu'à devenir instable. Ces détachements massifs surviennent en fin de phase de refroidissement, période dont la durée est de 5 000 à 10 000 ans. Les températures océaniques sont alors de 7 à 10°C plus faibles qu'elles ne le sont actuellement. Après chaque décharge, le retour à des conditions relativement plus chaudes est beaucoup plus rapide.

Nous retrouvons ainsi la stucture en «dents de scie» des glaces du Groenland et il est bien tentant d'associer les événements Dansgaard/Oeschger et les cycles identifiés dans les sédiments marins de l'Atlantique nord. Cette étape est franchie dans une étude commune entre paléocéanographes et glaciologues. Grâce à des analyses complémentaires et à un examen approfondi des différents enregistrements, cette correspondance est démontrée. Il y a, à travers l'océan, un lien entre les décharges massives d'icebergs et les variations rapides enregistrées au Groenland en période glaciaire. Cette arrivée d'énormes quantités d'eau douce aurait alors contribué à modifier la circulation océanique et par là même le climat, fournissant ainsi une explication raisonnable à l'existence d'instabilités climatiques en période glaciaire. Même s'il reste beaucoup à comprendre sur l'origine de ces instabilités, les variations rapides de la période glaciaire perdent du coup un peu de leur mystère.

Des résultats récents montrent que ces variations rapides, qui ont leur origine dans l'océan, ont de larges répercussions sur les continents. D'abord, elles viennent d'être documentées sur différents enregistrements continentaux à la fois en Europe et en Amérique du Nord. Ensuite, à chacun des grands interstades correspond généralement une augmentation significative (supérieure à cent «parties par milliard en volume») des teneurs en méthane; celles-ci témoignent très probablement de variations du cycle hydrologique continental aux basses latitudes (la production du méthane est liée à l'étendue des zones inondées) et suggèrent que ces événements rapides ont influencé le climat de l'hémisphère nord dans son ensemble.

Variations rapides en climat «chaud» : de sérieux points d'interrogation

Les enregistrements isotopiques complets obtenus le long des forages GRIP et GISP2 ont été publiés l'un et l'autre l'an dernier. Plus que les variations rapides de la dernière période glaciaire et de la fin de la déglaciation, c'est l'existence éventuelle d'instabilités au cours de l'interglaciaire précédent, l'Eémien, il y a un peu plus de 120 000 ans, qui nous a surpris. Les résultats GRIP paraissent en premier au cours de l'été. La variabilité de l'enregistrement isotopique y est tout à fait inattendue : les périodes chaudes (jusqu'à 4°C de plus que le climat actuel) auraient été interrompues par des excursions vers des conditions intermédiaires entre le climat actuel et une époque glaciaire. Les transitions apparaissent très rapides (quelques dizaines d'années) et, dans un cas au moins, l'événement froid (changements de température associés de l'ordre de 10°C) pourrait avoir été très bref : 70 ans pour celui survenu il y a environ 115 000 ans. Instabilité d'autant plus étonnante que, là, plus question d'évoquer la décharge massive d'icebergs : les grandes calottes de l'hémisphère nord avaient disparu.

Les résultats du forage GISP2, publiés quelques mois plus tard, soulèvent des questions sur la validité de l'interprétation climatique de l'enregistrement isotopique obtenu à GRIP. Alors que l'accord entre GRIP et GISP2 est excellent jusqu'à environ - 100 000 ans, les séries commencent à diverger au-delà. Cette divergence ne peut être d'ordre climatique, les deux stations n'étant distantes que de 28 km. Seule explication plausible : la stratigraphie des forages (ou au moins de l'un d'entre eux) a été modifiée à cause de la proximité du socle rocheux. Nous nous attendions à devoir faire face à de tels problèmes. C'était d'ailleurs là une des raisons pour laquelle deux forages voisins avaient été entrepris. Mais, à vrai dire, nous ne pensions pas qu'ils interviendraient relativement loin du socle rocheux (plus de 200 mètres). Ajoutons que ces modifications se traduisent en général par la présence de couches inclinées, et que de telles couches ne sont observées à GRIP qu'au delà de 135 000 ans. Elles sont par contre visibles à GISP2 dès que les séries commencent à diverger. GRIP est situé sur le dôme et GISP2 ne l'est pas. Ceci fournit une explication raisonnable de cette différence, mais l'argument est fragile, la position du dôme étant susceptible de s'être déplacée au cours du dernier cycle climatique.

Les différences entre les deux forages ne sont donc pas suffisantes pour remettre en cause l'interprétation de l'Eémien de GRIP. Il n'en reste pas moins que la confirmation de l'existence de ces variations rapides requiert que puisse être faite la part entre le signal climatique et les perturbations éventuelles liées à l'écoulement. L'analyse de paramètres à caractère global, tels la composition de

l'air occlus dans la glace, et sa comparaison aux données du même type enregistrées à Vostok est une voie intéressante. En effet, à Vostok, la séquence correspondant à l'Eémien est actuellement à près de 2 000 m du socle rocheux. Elle n'a donc certainement pas été perturbée. Jusqu'à ce que cette voie ait été pleinement explorée et en l'absence d'une identification d'événements similaires dans d'autres enregistrements (qui seule constituerait une réelle confirmation de leur existence et de leur extension géographique éventuelle), ces variations rapides restent, pour nous, un très grand point d'interrogation.

L'océan : un rôle climatique majeur

L'objectif de ces quelques pages est d'ouvrir le passionné de météorologie marine à la richesse du témoignage «climatique» que nous livrent les glaces polaires. Il n'est guère besoin d'épiloguer pour que le lecteur saisisse combien ce regard tourné vers le passé est d'actualité. Accès tout à fait unique aux évolutions étroitement mêlées du climat et des gaz à effet de serre ; description détaillée, sur près de 100 000 ans et à une résolution toujours largement inférieure à celle d'une vie humaine, de la variabilité du climat du Groenland reflet de celle de l'Atlantique nord ; étonnement face à la découverte de l'ampleur des variations climatiques au cours de la dernière période glaciaire et à la fin de la déglaciation ; surprise s'il s'avérait que les variations isotopiques enregistrées pendant l'Eémien correspondent, ne serait-ce que partiellement, à des changements climatiques... Ce sont là autant d'éléments qui alimentent la réflexion des scientifiques intéressés par le devenir de notre climat.

Même s'il n'en était pas le thème central, le lecteur aura bien senti, tout au cours de cette brève histoire des grands forages polaires, l'omniprésence de l'océan et le rôle majeur qu'il joue au sein du système climatique. Nous en avons, d'une part, évoqué deux aspects très classiques. L'océan est un indéniable facteur d'amplification du forçage climatique au travers, en cas de réchauffement initial, de l'accroissement de l'évaporation et de la diminution de la glace de mer. Il a, par contre, le mérite d'être un puits important de gaz carbonique dont l'action permet de limiter significativement l'augmentation de la concentration de ce gaz à effet de serre dans l'atmosphère. De l'autre, la comparaison des enregistrements du Groenland et de ceux de l'Atlantique nord nous dit l'étroite solidarité de leurs climats respectifs. Surtout, elle révèle la rapidité avec laquelle la circulation océanique peut être radicalement modifiée. La connaissance que nous avons désormais de la succession des événements El Niño, de leur large impact climatique et des mécanismes océaniques impliqués, nous a, depuis quelques années, familiarisés avec le rôle de la variabilité interannuelle de l'océan et de sa circulation. La lecture des enregistrements paléoclimatiques nous offre une image frappante de cette variabilité, tout au moins dans l'Atlantique nord. Sans ce témoignage, personne n'accepterait l'idée que cette circulation puisse, par passage d'un état stable à l'autre, être inversée en quelques dizaines d'années. Et pourtant, il y a fort à parier que cela s'est produit une bonne vingtaine de fois au cours des 100 000 dernières années...

Qu'elles soient réalité ou fiction, les variations rapides de l'Eémien ne laissent pas non plus les océanographes indifférents. Ainsi, des modélisateurs ont suggéré que l'océan pouvait avoir trois modes stables de circulation ; l'existence d'un état intermédiaire pourrait aider à expliquer comment des variations rapides interviennent en période chaude. A noter aussi que certaines simulations utilisant un modèle couplé océan-atmosphère ont montré, que dans le cas d'un réchauffement climatique, la modification du cycle hydrologique pourrait effectivement affecter la circulation océanique. Ces travaux, tout récents, illustrent avant tout qu'il reste beaucoup à comprendre du côté du rôle climatique de l'océan. Celui-ci est loin d'avoir dévoilé tous ses secrets ■

Nous remercions tous les participants aux projets Vostok et GRIP et les organismes qui ont apporté leur soutien à ces projets.

Références

Travaux publiés dans des revues scientifiques

- Alley et al., *Nature*, 362, 527-529, 1993.
- Bond et al., *Nature*, 365, 143 - 147, 1993.
- Dansgaard et al., *Nature*, 364, 218-220, 1993.
- GRIP Project Members, *Nature*, 364, 203-207, 1993
- Grootes et al., *Nature*, 366, 552 - 554, 1993.
- Johnsen et al., *Nature*, 359, 311-313, 1992.
- Jouzel et al., *Nature*, 364, 407-412, 1993.
- Lorius et al., *Nature*, 347, 139 -145, 1993.
- Raynaud et al., *Science*, 259, 926 -934, 1993.
- Taylor et al., *Nature*, 361, 432 - 436, 1993.

Ouvrages généraux

- JC. Duplessy et P. Morel, *Gros temps sur la planète*. Ed Odile Jacob.
- S. Joussaume. A paraître (fin 1994).
- C. Lorius, *Glaces de l'Antarctique, une mémoire, des passions*. Ed Odile Jacob.