



HAL
open science

Glaces polaires : variations rapides du climat

J. Jouzel, C. Lorius

► **To cite this version:**

J. Jouzel, C. Lorius. Glaces polaires : variations rapides du climat. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 1995, 81 (5-6), pp.98 - 103. 10.1051/lhb/1995052 . hal-03334860

HAL Id: hal-03334860

<https://hal.science/hal-03334860>

Submitted on 5 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.

Glaces polaires : variations rapides du climat

J. Jouzel

Laboratoire de Modélisation du Climat et de l'Environnement du CEA et LGGE du CNRS

C. Lorius

Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement du CNRS

Le récent succès des forages européen GRIP (Greenland Ice core Project) et américain GISP 2 (Greenland Ice Sheet Project) qui ont atteint, en 1992 et 1993 le socle rocheux en plein centre du Groenland (site de SUMMIT, à une altitude de 3 250 m) a permis d'y reconstituer l'évolution du climat sur les 100 000 dernières années ou peut-être plus (fig. 1). Notre objectif est ici de comparer les informations climatiques déduites de l'étude de ces forages aux enregistrements de l'Antarctique.

Nous rappelons brièvement que l'approche isotopique utilisée pour la reconstitution des séries climatiques en régions polaires s'appuie sur le fait que les pressions de vapeur saturante des molécules isotopiques HDO et $H_2^{18}O$ sont légèrement inférieures à celles de $H_2^{16}O$. La phase condensée (pluie ou neige) est donc plus riche en isotopes lourds que la phase vapeur qui lui donne naissance et les teneurs isotopiques des précipitations diminuent progressivement à mesure de leur formation au cours de l'épuisement d'une masse d'air [1]. Il en résulte une décroissance générale des teneurs en deutérium et oxygène 18 (δD et $\delta^{18}O$) * depuis les régions équatoriales jusqu'aux pôles qui, au Groenland [2] et en Antarctique [3], se traduit par une relation linéaire entre les valeurs moyennes annuelles (δD ou $\delta^{18}O$) et la température moyenne du site. Expliquées de façon relativement satisfaisante à partir de modèles isotopiques dits de Rayleigh [1, 4], ces relations empiriques servent de base à la reconstitution des paléotempératures à partir de l'analyse isotopique des glaces. Celle-ci s'appuie, suivant le cas, sur δD ou sur $\delta^{18}O$. Un refroidissement de 1 °C (température de surface) correspond à une diminution de 0,67 ‰ en oxygène 18 et de 6 ‰ en deutérium (Antarctique) [3] (Groenland) [2].

I ■ GRIP ET GISP 2 : LES RÉSULTATS MARQUANTS ■

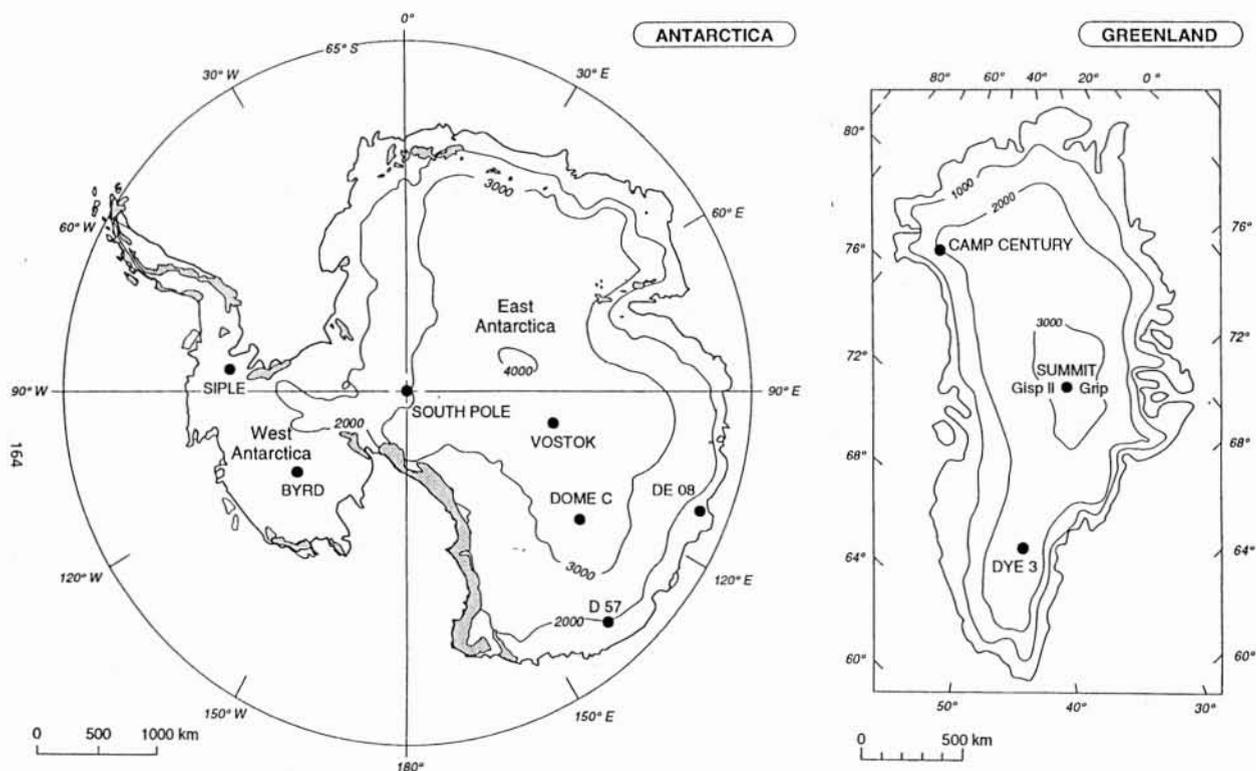
L'originalité des forages GRIP et GISP 2 tient, pour une large part, au fait qu'ils fournissent les premiers enregis-

trements du Groenland qui aillent au-delà de la dernière période glaciaire. La dernière déglaciation y est bien documentée. Elle s'est réalisée en deux étapes (fig. 2) avec une première période de réchauffement qui culmine au Bölling et est suivie d'un retour temporaire vers des conditions froides (le Dryas récent), très marqué dans l'Atlantique Nord et les régions continentales adjacentes. Les enregistrements GRIP [5] et GISP 2 [6] confirment la rapidité de la transition du Dryas récent vers le climat Holocène actuel (au Groenland 7 °C en 50 ans). Au cours de cette transition qui s'est terminée il y a environ 11 500 ans, il a fallu seulement de 5 à 20 ans pour que le contenu en poussières, témoin direct d'un changement de la circulation atmosphérique passe de valeurs élevées de type glaciaire à des valeurs beaucoup plus faibles caractéristiques du climat actuel [7, 8]. Pendant cette même transition, l'accumulation aurait doublé en trois ans [9]. Contrairement à l'enregistrement isotopique qui donne accès à une température locale, ces modifications rapides des teneurs en poussières, et plus encore, de l'accumulation sont la manifestation de changements climatiques à échelle géographique large. Ceci leur confère une importance indéniable.

Pour la dernière période glaciaire, nous retiendrons trois résultats clé liés à l'existence de variations climatiques rapides en période froide. Ces événements dits de « Dansgaard-Oeschger » ont été découverts dans les forages de Camp Century et Dye 3 précédemment réalisés au Groenland [5]. 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. L'existence et les caractéristiques de ces événements sont confirmées : une vingtaine d'interstades de ce type, d'une durée comprise entre 500 et plus de 2 000 ans, ont été répertoriés en période glaciaire le long des forages GRIP [10] et GISP 2 [6]. L'analyse des teneurs en poussières montre que des changements de circulation atmosphérique y sont systématiquement associés.

La structure de ces interstades est extrêmement similaire à celle des événements rapides, récemment mis en évidence dans des sédiments marins de l'Atlantique Nord où ils sont associés à une série de couches dites de « Heinrich » dont la présence est liée à la décharge massive d'icebergs provenant des grandes calottes de l'hémisphère Nord [11]. Les variations de température enregistrées au

* La valeur δ d'un échantillon, exprimée en pour mille, s'écrit en fonction du rapport isotopique de celui-ci R_{Ech} : $\delta = (1000 * (R_{Ech} / R_{SMOW}) - 1000)$ formule dans laquelle R_{SMOW} est égal à $155,76 * 10^{-6}$ et à $2005,2 * 10^{-6}$ pour les rapports D/H et $^{18}O/^{16}O$ respectivement.



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

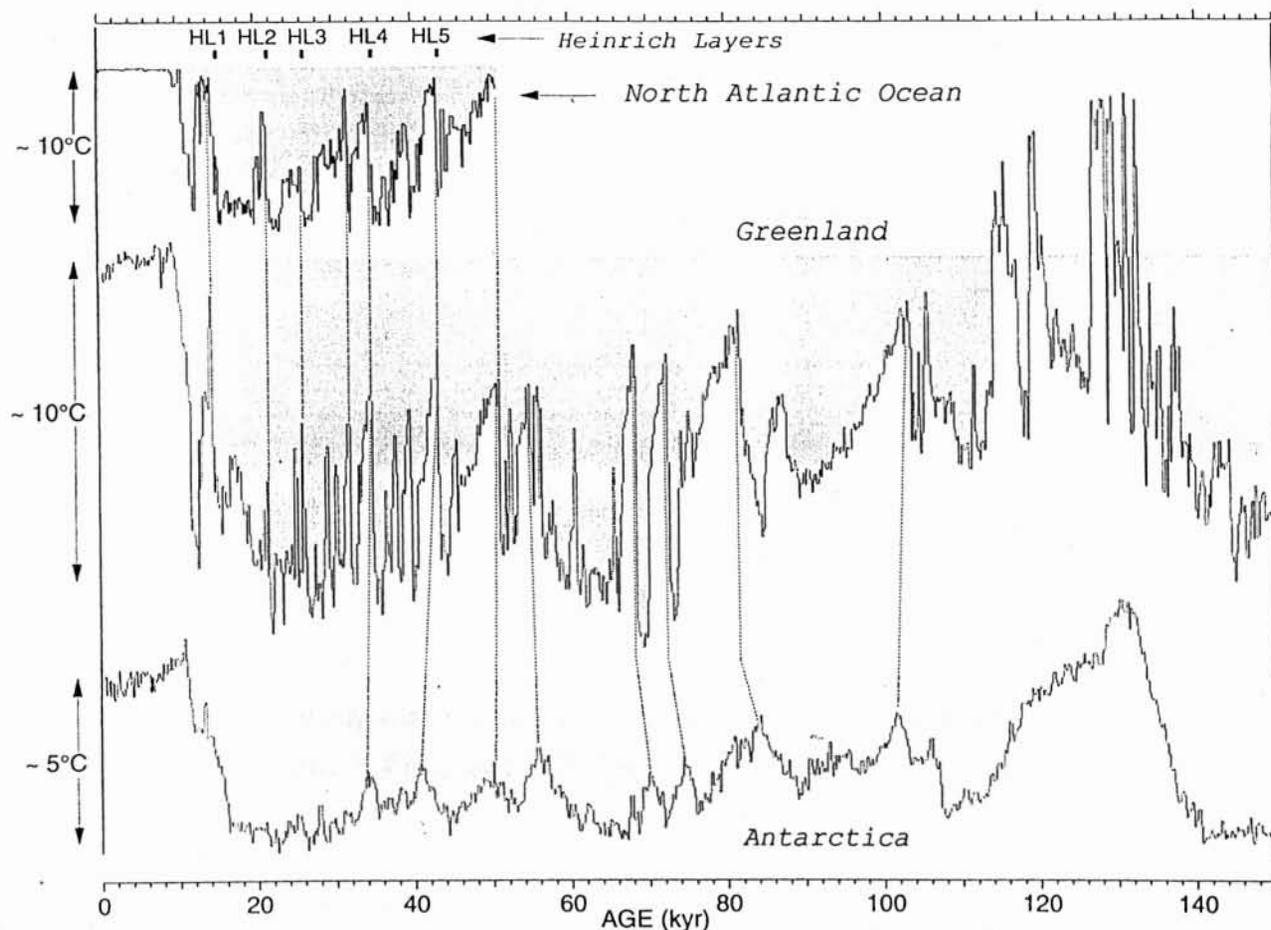
Groenland et dans l'Atlantique Nord sont comparables et les interstades les plus marqués peuvent être identifiés dans les enregistrements marins (fig. 2). Il y a donc très probablement un lien entre les événements de « Dansgaard-Oeschger » et les instabilités des grandes calottes polaires auxquelles sont associés des changements de la circulation océanique. A chaque interstade correspond généralement une augmentation significative (> 100 ppbv) des teneurs en méthane [12]. Celles-ci témoignent de variations du cycle hydrologique continental aux basses latitudes et suggèrent que ces événements rapides ont, au moins, influencé le climat de l'hémisphère Nord dans son ensemble. Notons ici que des variations de la teneur en méthane se sont également produites au cours du Dryas récent.

Au-delà de 40 000 ans, une chronologie préliminaire du forage GRIP a été établie en utilisant un modèle glaciologique et en admettant que le niveau — 110 000 ans est correctement identifié par comparaison avec d'autres enregistrements [10]. La séquence située entre 2 876 et 2 775 m correspond à la période — 140 000/— 110 000 ans, intervalle qui couvre l'ensemble du dernier interglaciaire (Eémien) considéré, en général, comme ayant été légèrement plus chaud que l'Holocène. Cette caractéristique se vérifie à GRIP (fig. 2) mais la variabilité de l'enregistrement isotopique y est tout à fait inattendue [13] : les périodes chaudes (jusqu'à 4 °C de plus que le climat actuel) y auraient été interrompues par des excursions vers des conditions climatiques assez proches de celles d'une époque glaciaire. Les transitions sont très rapides (quelques dizaines d'années). Suivant le cas, les conditions froides (changements de température associés de l'ordre de 10 °C)

auraient persisté entre 70 et 5 000 ans. Les chercheurs du projet GRIP notent la difficulté d'interpréter ces résultats en l'absence de grandes calottes polaires de l'hémisphère Nord (par exemple à — 115 000 ans) qui constituent des sources possibles d'instabilités.

Les résultats du forage GISP 2 soulèvent des questions sur la validité de cette interprétation. Alors que l'accord est excellent jusqu'à la profondeur correspondant dans la chronologie de GRIP à — 87 000 ans, les séries commencent à diverger au-delà indiquant que la stratigraphie des forages (ou au moins de l'un d'entre eux) a été modifiée du fait de distorsions liées à l'écoulement de la glace près du socle rocheux. La présence de couches inclinées, généralement associées au phénomène de repliement (Boulton, 1993), n'est observée à GRIP qu'à partir de 2 847 m (129 000 ans). Cette inclinaison des couches est, par contre, visible à GISP 2 dès que les séries commencent à diverger (2 678 m). Une explication plausible de cette différence tient au fait que GRIP est situé sur le dôme glaciaire ce qui n'est pas le cas pour GISP 2 mais l'argument est fragile tant que les conséquences d'un déplacement éventuel de la position du dôme au cours du dernier cycle climatique n'auront pas été complètement évaluées.

La comparaison des profils isotopiques du Groenland et de l'Antarctique, abordée ci-dessous, ne permet pas de lever cette ambiguïté. Son objectif premier est d'examiner quelles sont les similarités et les différences entre le climat des deux régions polaires et donc de mieux appréhender le caractère soit régional, soit global des différents événements climatiques enregistrés au Groenland



2. Enregistrements climatiques : 1) dans l'Atlantique Nord (pourcentage de *N. Pachyderma*, indicateur de la température océanique de surface) avec indication des niveaux des couches de Heinrich (adapté de [11] et [3]) de GRIP 1 de Vostok. Les lignes tiretées indiquent les correspondances déduites de l'examen visuel des courbes GRIP et Vostok d'une part [29] et des courbes de l'Atlantique Nord et de GRIP de l'autre [11].

II ■ ANTARCTIQUE ET GROENLAND : SIMILARITÉS ET DIFFÉRENCES ■

La connaissance que nous avons du climat et de sa relation avec la composition de l'atmosphère en gaz à effet de serre doit beaucoup aux forages réalisés à la station russe de Vostok en Antarctique depuis le début des années 1970. Des équipes françaises, depuis une dizaine d'années, et plus récemment américaines, sont associées à ce projet. Les enregistrements disponibles couvrent les 220 000 dernières années [14]. Ils permettent une intéressante comparaison avec les forages de Summit pour chacune des grandes périodes sur lesquelles nous avons centré la présentation des résultats du Groenland.

La dernière déglaciation s'y effectue également en deux étapes mais le refroidissement temporaire est d'un facteur 3 plus faible à Vostok que celui observé pendant le Dryas récent au Groenland. Ce refroidissement a donc une signification géographique très large comme le confirment de nombreux enregistrements océaniques et continentaux disponibles jusqu'ici essentiellement de l'hémisphère Nord. Les réchauffements s'opèrent de façon beaucoup plus lente en Antarctique qu'au Groenland. Bien qu'il

apparaisse que les changements de la circulation océanique globale qui ont leur source dans la formation, ou non, d'eaux profondes dans l'Atlantique Nord jouent un rôle clé dans la relation entre le climat de chacun des hémisphères, ces résultats témoignent de la nature fort complexe du lien interhémisphérique. Notons qu'à Vostok, la partie la plus chaude de l'Holocène se situe vers - 11 000 ans et donc tout au début de cette période [15] alors que les conditions climatiques sont loin d'avoir atteint leur optimum à GRIP et GISP 2. Cette différence est probablement liée au fait que les calottes polaires de l'hémisphère Nord n'avaient pas encore complètement disparu. Ces caractéristiques, déglaciation en deux étapes et optimum climatique précoce, sont communes aux trois forages de l'Antarctique de l'Est, Vostok, Dôme C et Dôme B [16].

L'observation majeure faite pour la dernière déglaciation, à savoir qu'un événement climatique important dans l'Atlantique Nord est vu mais de façon atténuée à Vostok semble, de façon générale, valoir pour les interstades de « Dansgaard-Oeschger » : les plus marqués de ces événements peuvent être identifiés dans l'enregistrement Vostok tandis que les plus courts en sont éliminés (*fig. 2*). Cette suggestion que nous avons faite à partir d'un simple examen visuel des enregistrements [17] vient d'être re-

marquablement confirmée à partir de l'analyse de la teneur en oxygène 18 des bulles d'air contenues dans les glaces de GISP 2 et de Vostok [18].

Cette équipe américaine s'est intéressée à l'analyse du rapport oxygène 18/oxygène 16 des bulles d'air contenues dans la glace avec l'idée que ce paramètre pourrait apporter des informations sur la réponse de la biosphère marine et continentale à un changement climatique [19]. Malgré la complexité des fractionnements isotopiques qui interviennent au cours de la photosynthèse et de la respiration, il s'est en fait avéré que la différence entre la teneur isotopique de l'air et celle de l'eau de mer (l'effet Dole) varie peu au cours du dernier cycle climatique [20]. Ceci suggère que le rapport des productivités de la biosphère marine et continentale a peu varié. Une conséquence est que les variations des teneurs isotopiques de l'air et de l'eau varient de façon grossièrement parallèle. Nous avons là un moyen unique pour placer sur une même échelle de temps enregistrements marins et glaciaires que Sowers *et al.* [21] ont appliqué au forage de Vostok. L'analyse récente de l'oxygène 18 de l'air de GISP 2 permet, elle, de corréler glaces du Groenland et de l'Antarctique car le signal isotopique est homogène dans l'atmosphère [18]. Jusqu'à 100 000 ans, l'exercice est facile et il a permis à Bender *et al.* [18] de démontrer que les événements rapides les plus importants (ceux qui durent plus de 2 000 ans) ont effectivement une contrepartie dans l'enregistrement de Vostok (fig. 3).

Pour ce qui concerne le dernier interglaciaire, nous privilégions ici la comparaison entre GRIP et Vostok, car il est désormais démontré que cette partie de l'enregistrement de GISP 2 a été effectivement perturbée par la proximité du socle rocheux [20]. En effet, au-delà de 100 000 ans, les similarités entre les enregistrements du rapport oxygène 18/oxygène 16 à GISP 2 et Vostok disparaissent. A Vostok, la glace du dernier interglaciaire est à près de 2 km du fond et représente donc une séquence non perturbée : ceci implique que la glace de la partie profonde du forage GISP 2 a, elle, subi des distorsions liées à la proximité du socle rocheux. Cette absence de corrélation entre Vostok et GISP n'apporte, par elle-même, pas d'indication sur le forage GRIP mais elle indique une des voies qui peut conduire à démontrer si les variations rapides enregistrées pendant l'Eémien sont, ou non, d'origine climatique. Cette voie est suivie par les équipes européennes (Grenoble et Berne), qui utilisent les informations déduites, non seulement, de l'analyse isotopique de l'air mais aussi de sa composition en méthane [22]. En attendant qu'elle soit complètement explorée, la comparaison entre les enregistrements climatiques de GRIP et Vostok garde tout son intérêt.

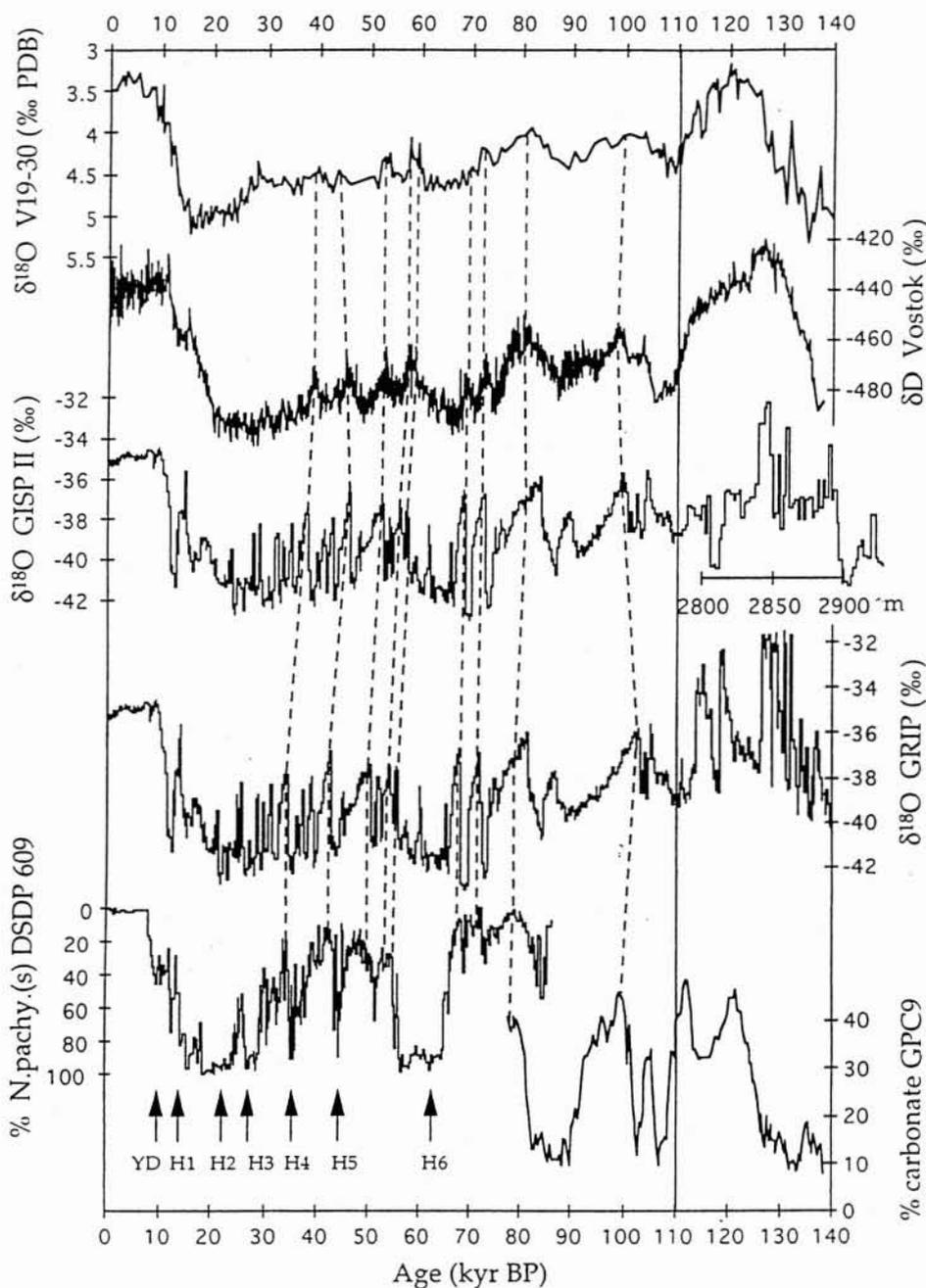
GRIP et Vostok présentent deux similitudes intéressantes : 1) les périodes les plus chaudes de l'Eémien montrent, dans chacun des cas, des températures plus élevées que celles de l'Holocène (jusqu'à 4 °C à GRIP, un peu moins à Vostok) ; 2) dans chacun des cas l'Eémien est plus long que le stade climatique interglaciaire 5e défini dans les enregistrements marins. En Antarctique, le début du réchauffement précède la décroissance du volume global des glaces comme l'indique aussi l'évolution des températures océaniques dans l'océan Austral [23]. Au-delà de ces points communs, l'absence de variations climatiques rapides à Vostok aussi bien au niveau de la déglaciation précédente réalisée en une seule étape, que de l'interglaciaire lui-même, constitue une différence marquante entre les deux

enregistrements. Soulignons que celle-ci n'est pas liée à une différence de résolution des enregistrements. En fait, malgré une accumulation dix fois plus faible, le dernier interglaciaire est représenté par une plus grande épaisseur de glace à Vostok qu'au GRIP où l'amincissement lié à la relative proximité du socle rocheux (~200 m) est très important ; l'intervalle - 110 000, - 140 000 ans correspond à une épaisseur de 420 m à Vostok et de 100 m au GRIP. Indubitablement, cette différence de structure ajoute aux interrogations soulevées par la comparaison GRIP/GISP 2. Les deux étapes de la dernière déglaciation sont enregistrées, certes de façon atténuée à Vostok ; pourquoi cela est-il différent pour la précédente transition ? L'hypothèse que les variations rapides de l'Eémien puissent ne pas avoir été ressenties à Vostok reste cependant plausible d'autant que ce site est en dehors du secteur Atlantique et donc peu sensible à des événements ayant leur source dans l'Atlantique Nord. Dans la mesure où les transferts océaniques sont lents, il se peut aussi que, parmi les événements enregistrés à GRIP, seuls ceux ayant une durée suffisamment longue puissent être enregistrés à Vostok.

III ■ CONCLUSION ■

L'étude des deux carottages GRIP et GISP 2 souligne le caractère exceptionnel de la stabilité du climat du Groenland au cours des 10 000 dernières années vis-à-vis de celui des 100 000 dernières années. Les échelles de temps associées aux instabilités sont de quelques décennies pour ce qui concerne la phase de réchauffement, que ce soit en période glaciaire ou au cours de la transition vers l'Holocène. Il est désormais démontré que les plus importantes de ces instabilités, refroidissement au cours de la dernière déglaciation et interstades majeurs pendant la glaciation, sont enregistrées mais de façon très atténuée à Vostok.

Pour le dernier interglaciaire, les données du forage GRIP ont été également interprétées en termes d'instabilités climatiques dont la mise en place apparaît tout aussi rapide. Ni les résultats de GISP 2, ni ceux de Vostok ne permettent de confirmer cette interprétation. Cependant, les différences entre les trois forages ne sont en elles-mêmes pas suffisantes pour remettre en cause l'interprétation de l'Eémien de GRIP dans la mesure où elles peuvent être raisonnablement expliquées : perturbation due à l'écoulement de la glace pour GISP 2, absence réelle de variations climatiques rapides à Vostok. Il n'en reste pas moins qu'une confirmation de l'existence de variations rapides dans l'Eémien requiert que puisse être faite à GRIP la part entre signal climatique et perturbation éventuelle liée à la dynamique des couches de glace à proximité du socle rocheux. L'analyse du méthane et de l'oxygène 18 de l'air occlus dans la glace de GRIP et sa comparaison aux données du même type enregistrées à Vostok est une voie prometteuse vis-à-vis de cet objectif. En tout état de cause, une identification de ces variations rapides dans d'autres enregistrements est indispensable à une réelle confirmation de leur existence et de leur extension géographique éventuelle. Les études récentes consacrées à la séquence de l'Eémien dans des sédiments marins de l'Atlantique Nord [24, 25, 26] et dans des séries continentales en Europe de l'Ouest [27, 28] n'ont, pour l'instant, pas apporté de réponse définitive à cette question de l'instabilité du climat au cours de la dernière période interglaciaire.



3. Comparaison de différents enregistrements climatiques au cours des 140 000 dernières années (figure adaptée de [29]). a) variation de la teneur en oxygène des sédiments marins, indicateur du volume des glaces continentales, b) profil de teneur en deutérium à Vostok, c) profil de teneur en oxygène 18 à GRIP, d) le même profil à GISP 2 placé sur une échelle de profondeur pour la partie pour laquelle les enregistrements GISP 2 et GRIP divergent et d'enregistrements obtenus sur des sédiments marins de l'Atlantique Nord avec indication des niveaux de Heinrich. Les lignes tiretées indiquent les correspondances entre événements climatiques, telles qu'elles ont été établies par le travail de Bender et al. [18].

Nous remercions tous les participants aux programmes GRIP, GISP 2 et Vostok ainsi que Didier Paillard et Michel Stievenard pour leurs commentaires et la réalisation des figures.

Références

[1] DANSGAARD W. (1964) — Stable Isotopes in Precipitation, *Tellus*, 16, 436-468.

[2] JOHNSEN S.J., DANSGAARD W. and WHITE J.W. (1989) — The origin of Arctic precipitation under present and glacial conditions, *Tellus*, 41, 452-469.

[3] LORius C. and MERLIVAT L. — Distribution of mean surface stable isotope values in East Antarctica. Observed changes with depth in a coastal area, In *Isotopes and impurities in snow and ice. Proceedings of the Grenoble Symposium Aug./Sep. 1975*, IAHS Publication edited by IAHS, IAHS, Vienna, 1977.

- [4] JOUZEL J. and MERLIVAT L. (1984) — Deuterium and oxygen 18 in precipitation : modeling of the isotopic effects during snow formation, *Journal of Geophysical Research*, 89, 11749-11757.
- [5] JOHNSEN S.J. (1992) — 13 others, Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core, *Nature*, 359, 311-313.
- [6] GROOTES P.M., STUIVER M., WHITE J.W.C., JOHNSEN S.J. and JOUZEL J. (1993) — Comparison of the oxygen isotope records from the GISP 2 and GRIP Greenland ice cores, *Nature*, 366, 552-554.
- [7] TAYLOR K.C. (1993) — 13 others, Electrical conductivity measurements from the GISP 2 and GRIP Greenland ice cores, *Nature*, 366, 549-552.
- [8] MAYEWSKI P.A., MEEKER L.D., WHITLOW S., TWICKLER M.S., MORRISON M.C., ALLEY R.B., BLOOMFIELD P. and TAYLOR K. (1993) — The atmosphere during the Younger Dryas, *Science*, 261, 195-197.
- [9] ALLEY R.B., MEESE D.A., SHUMAN C.A., GOW A.J., TAYLOR K.C., GROOTES P.M., WHITE J.W.C., RAM M., WADINGTON E.D. and MAYEWSKI P.A. (1993) — Abrupt increase of Greenland snow accumulation at the end of the Younger-Dryas event, *Nature*, 362, 527-529.
- [10] DANSGAARD W. (1993) — 13 others, Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record., *Nature*, 364, 218-220.
- [11] BOND G., BROECKER W.S., JOHNSEN S.J., Mc MANUS J., LABEYRIE L.D., JOUZEL J. and BONANI G. (1993a) — Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice, *Nature*, 365, 143-147.
- [12] CHAPPELLAZ J., BLUNIER T., ANKLIN M., BARNOLA J.M., RAYNAUD D. and STAUFFER B. (1993) — The GRIP record of atmospheric CH₄ and CO₂ and their link with Greenland climate, *EOS*, october 26, 78.
- [13] GRIP project members (1993) — Climatic instability during the last interglacial period revealed in the Greenland summit ice-core, *Nature*, 364, 203-207.
- [14] JOUZEL J. (1993) — 13 others, Extending the Vostok ice-core record of paleoclimate to the penultimate glacial period, *Nature*, 364, 407-412.
- [15] CIAIS P., PETIT J.R., JOUZEL J., LORIS C., BARKOV N.I., LIPENKOV V. and NICOLAÏEV V. (1992) — Evidence for an early Holocene climatic optimum in the Antarctic deep ice core record, *Climate Dynamics*, 6, 169-177.
- [16] JOUZEL J. — 13 others (1995), The two-step shape and timing of the last deglaciation in Antarctica ; *Clim. Dyn.*, 11, 151-161.
- [17] JOUZEL J., LORIS C., JOHNSEN S.J. and GROOTES P. (1994) — Climate instabilities : Greenland and Antarctic records, *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 319, série II, 65-77.
- [18] BENDER M., SOWERS T., DICKSON M.L., ORCHADO J., GROOTES P., MAYEWSKI P.A. and MEESE D.A. (1994a) — Climate connection between Greenland and Antarctica during the last 100,000 years, *Nature*, 372, 663-666.
- [19] BENDER M., LABEYRIE L.D., RAYNAUD D. and LORIS C. (1985) — Isotopic composition of atmospheric O₂ in ice linked with deglaciation and global primary productivity, *Nature*, 318, 349-352.
- [20] BENDER M., SOWERS T. and LABEYRIE L.D. (1994b) — The Dole effect and its variation during the last 130,000 years as measured in the Vostok core, *Glob. Biog. Cycles*, 8, 363-376.
- [21] SOWERS T., BENDER M., LABEYRIE L.D., JOUZEL J., RAYNAUD D., MARTINSON D. and KOROTKEVICH Y.S. (1993) — 135 000 year Vostok - SPECMAP common temporal framework, *Paleoceanography*, 8, 737-766.
- [22] CHAPPELLAZ J., BLUNIER T., RAYNAUD D., BARNOLA J.M., SCHWANDE J. and STAUFFER B. (1993b) — Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP, *Nature*, 366, 443-445.
- [23] PICHON J.J., LABEYRIE L.D., BAREILLE G., LABRACHERIE M., DUPRAT M. and JOUZEL J. (1992) — Surface waters temperature changes in the high latitudes of the southern ocean over the last glacial-interglacial cycle. *Paleoceanography*, 7, 289-318.
- [24] McMANUS J.F., BOND G.C., BROECKER W.S., JOHNSEN S., LABEYRIE L. and HIGGINS S. (1994) — High-resolution climate records from the North Atlantic during the last interglacial, *Nature*, 371, 326-329.
- [25] KEIGWIN L.D. and JONES G.A. (1994) — Western North Atlantic evidence for millennial-scale changes in ocean circulation and climate, *J. Geophys. Res.*, 99, 12397-12410.
- [26] CORTIJO E., DUPLESSY J., LABEYRIE L., LECLAIRE H., DUPRAT J. and van WEERING T. (1994) — Eemian cooling in the Norwegian Sea and North Atlantic ocean preceding ice-sheet growth, *Nature*, 372, 446-449.
- [27] THOUVENY N. (1994) — 13 others, Climate variations in Europe over the past 140 kyr deduced from rock magnetism, *Nature*, 371, 503-506.
- [28] FIELD M., HUNTLEY B. and MÜLLER H. (1994) — Eemian climate fluctuations observed in a European pollen record, *Nature*, 371, 779-783.
- [29] JOUZEL J. (1994) — Ice cores north and south, *Nature*, 372, 612-613.