

Les enregistrements climatiques du Groënland et de l'Antarctique au cours du dernier cycle climatique

J. Jouzel

Lab. de Modélisation du Climat et de l'Environnement, CEA/DSM, CE Saclay 91191, Gif-sur-Yvette Cedex, et
Lab. de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement CNRS, B.P. 96 - 38402 St Martin d'Hères (France)

RÉSUMÉ - *Les enregistrements climatiques du Groënland et de l'Antarctique au cours du dernier cycle climatique* - *Il Quaternario* 7(1b), 1994 - 267-274 - L'étude des carottes de glace récemment obtenues au centre du Groenland par les équipes européennes (GRIP) et Américaines (GISP2) a conduit à un ensemble remarquable de résultats relatifs à la variabilité naturelle du climat dans cette zone de l'Atlantique Nord au cours du dernier cycle glaciaire-interglaciaire (~ les 150.000 dernières années). Ceux-ci sont largement basés sur l'analyse isotopique de la glace qui constitue un indicateur de la température du site. Après avoir fait une synthèse des principaux résultats obtenus à ce jour, nous les examinons dans une perspective globale à travers une comparaison avec l'enregistrement Antarctique de Vostok.

ABSTRACT - *Climatic records in Greenland and the Antarctic during the last climatic cycle* - *Il Quaternario* 7(1b), 1994 - 267-274 - The study of ice cores drilled by European (GRIP) and American (GISP2) teams in central Greenland has produced a great amount of data on the climate natural variability in this zone of North Atlantic during the last glacial-interglacial cycle (~ the last 150,000 years). Most results have been obtained through isotopic analyses of ice, which is a marker of site temperature. The main results obtained up-to-now are synthetically presented and compared to the Vostok Antarctic record from a global point of view.

1. Introduction

Le 12 juillet 1992, le forage Européen GRIP (**GR**eenland **Ice** core **P**roject) atteignait le socle rocheux en plein centre du Groënland (site de SUMMIT à une altitude de 3250 m; Figure 1). Un an plus tard le forage Américain GISP 2 (**GR**eenland **Ice** **S**heet **P**roject), situé 28 km à l'Ouest était également couronné de succès. Avant de comparer les informations climatiques déduites de l'étude de ces forages aux enregistrements de l'Antarctique, nous rappelons brièvement les principes de l'approche isotopique sur laquelle s'appuie la reconstitution des séries climatiques en régions polaires.

Les pressions de vapeur saturante des molécules isotopiques HDO et H₂¹⁸O sont légèrement inférieures à celles de H₂¹⁶O si bien que la phase condensée (pluie ou neige) est plus riche en isotopes lourds que la phase vapeur qui lui donne naissance. Les teneurs isotopiques des précipitations diminuent donc progressivement à mesure de leur formation au cours de l'épuisement d'une masse d'air (Dansgaard, 1964). Il en résulte une décroissance générale des teneurs en deutérium et oxygène 18 (δD et $\delta^{18}O$)⁽¹⁾ depuis les régions équatoriales jusqu'aux pôles qui, au Groënland (Johnsen *et al.*, 1989) et en Antarctique (Lorius & Merlivat, 1977), 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 (Dansgaard, 1964; Jouzel & Merlivat, 1984), 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 (Groënland; Johnsen *et al.*, 1989) et de 6‰ en deutérium (Antarctique; Lorius & Merlivat, 1977).

L'approche suivie par les glaciologues suppose que les gradients spatiaux et temporels (en un site donné) sont équivalents. La validité de cette hypothèse a été examinée en introduisant le cycle des molécules isotopiques et les fractionnements associés dans des modèles de circulation générale de l'atmosphère (Joussaume *et al.*, 1984; Jouzel *et al.*, 1987). L'avantage est double: la complexité des processus atmosphériques est alors prise en compte et les teneurs isotopiques des précipitations peuvent être simulées pour des climats différents, moderne et glaciaire par exemple. Des modélisations de ce type ont été réalisées au LMD (CNRS/Paris) et au GISS (NASA/NewYork). Les résultats convergent: les gradients spatiaux et temporels sont, dans les régions polaires, tout à fait comparables (Joussaume & Jouzel, 1993; Jouzel *et al.*, soumis). Ils justifient l'utilisation du gradient spatial, le seul auquel nous ayons expérimentalement accès, pour reconstituer des séries temporelles de températures. D'après ces simulations l'incertitude sur les températures serait de 20 ou 30%. Cette incertitude pourrait, en particulier au Groënland, être liée à une modification de l'origine des masses d'air qui y apportent les précipitations (Charles *et al.*, 1994).

2. 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 enregistrements du Groënland qui vont au-delà de la dernière période glaciaire. Ce sont donc les questions soulevées par la découverte de l'instabilité

⁽¹⁾ La valeur δ d'un échantillon, exprimée en pour mille, s'écrit en fonction du rapport isotopique de celui-ci R_{Ech} : $\delta = [1000 \cdot (R_{Ech}/R_{SMOW})] - 1000$ formule dans laquelle R_{SMOW} est égal à $155,76 \cdot 10^{-6}$ et à $2005,2 \cdot 10^{-6}$ pour les rapports D/H et ¹⁸O/¹⁶O respectivement-

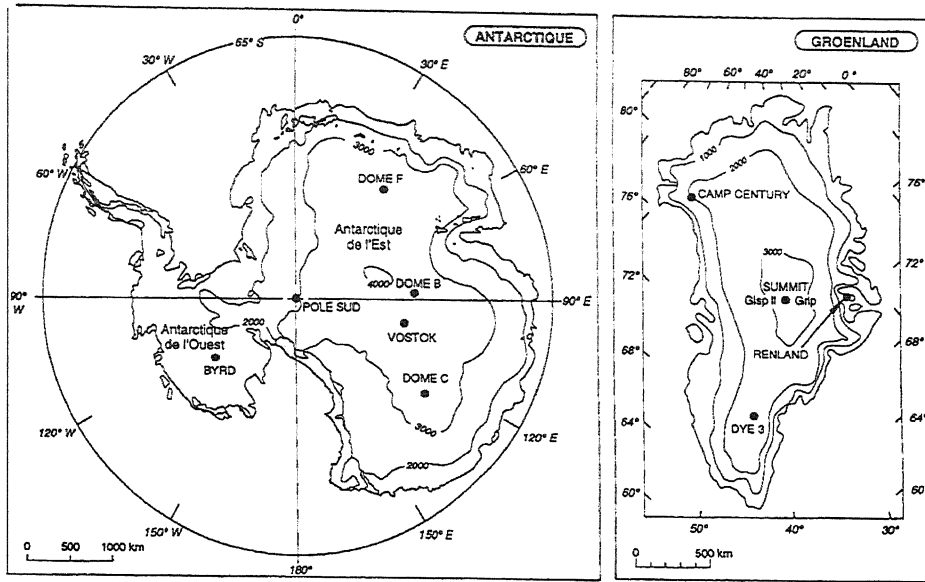


Fig. 1 - Carte du Groënland et de l'Antarctique avec l'indication des différents sites de forages profonds.

Map of Greenland and the Antarctic showing the locations of deep boreholes.

apparente du climat du précédent interglaciaire (l'Eémien) et des divergences entre les deux séries d'enregistrements qui retiennent le plus l'attention. Celles-ci ne doivent pas masquer la richesse des informations fournies par ces deux forages sur la dernière déglaciation et la dernière période glaciaire.

La dernière déglaciation

Cette transition climatique est bien documentée. Elle s'est réalisée en deux étapes (Fig. 2) avec une première période de réchauffement qui culmine au Bolling 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 (Rind *et al.* 1986). Les enregistrements GRIP (Johnsen *et al.*, 1992) et GISP 2 (Grootes *et al.*, 1993) confirment la rapidité de la transition du Dryas récent vers le climat Holocène actuel (au Groënland 7°C en 50 ans). Les informations nouvelles concernent la chronologie des événements et la mise en évidence, au-delà de celles affectant la température, de modifications encore plus rapides des précipitations et de la circulation atmosphérique.

L'existence de variations saisonnières détectables jusqu'à cette profondeur (poussières et éléments chimiques) confirme que cette transition est plus vieille qu'il n'était admis précédemment et ce en accord avec la redatation proposée à partir de la nouvelle calibration des chronologies ¹⁴C (Bard *et al.*, 1993). Au Groënland, le Dryas récent s'est terminé il y a 11600 ans (11550±70 à GRIP, Johnsen *et al.*, 1992; 11640±250 à GISP 2, Alley *et al.*, 1993).

Au cours de cette transition, il a fallu seulement 5 ans pour que le contenu en poussières, témoin direct d'un changement de la

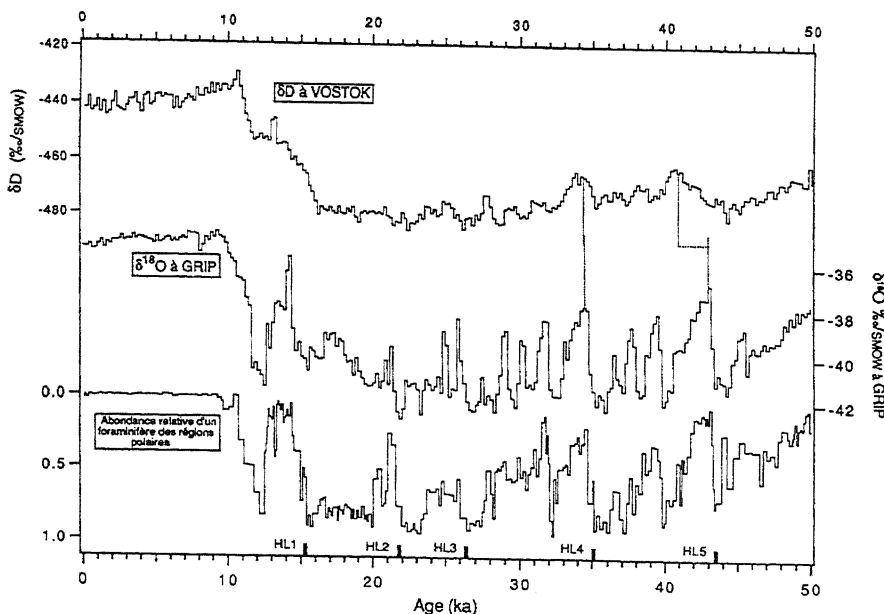


Fig. 2 - Comparaison, au cours des 50000 dernières années, des enregistrements climatiques: 1) de Vostok (teneur en deutérium); 2) de GRIP (teneurs en oxygène 18) et 3) du site V23-81 dans l'Atlantique Nord (pourcentage de *N. Pachyderma*, indicateur de la température océanique de surface) site pour lequel nous avons indiqué les niveaux des couches de Heinrich (adapté de Bond *et al.*, 1993).

Comparison between climatic records for the last 50,000 years: 1) at Vostok (deuterium contents); 2) at GRIP (¹⁸O contents) and 3) at the site V23-81 in the North Atlantic (percentage of *N. Pachyderma*, marker of surface oceanic temperatures), site for which Heinrich strata (Bond *et al.*, 1993, modified) have been shown.

circulation atmosphérique passe de valeurs élevées de type glaciaire à des valeurs beaucoup plus faibles caractéristiques du climat actuel (Taylor *et al.*, 1993). Pendant cette même transition, l'accumulation a doublé en 3 ans (Alley *et al.*, 1993). Le changement d'accumulation s'est effectué presque aussi rapidement à la fin de la première période de réchauffement. 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.

La dernière période glaciaire

Nous retiendrons ici 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 Groënland (Johnsen *et al.*, 1972; Dansgaard *et al.*, 1984). 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 2000 ans, ont été répertoriés en période glaciaire le long des forages GRIP (Dansgaard *et al.*, 1993) et GISP2 (Grootes *et al.*, 1993). Les teneurs en poussières montrent que des changements de circulation atmosphérique y sont systématiquement associés (GRIP Project Members, 1993).

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 (Bond *et al.*, 1993). Les variations de température enregistrées au Groënland et dans l'Atlantique Nord sont comparables et les interstades les plus marqués peuvent être identifiés dans les enregistrements marins en dépit de légères différences d'âge liées au fait que les deux chronologies sont établies de façon indépendante (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 est généralement associée une augmentation significative (>100 ppbv) des teneurs en méthane (Chappellaz *et al.*, 1993). 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.

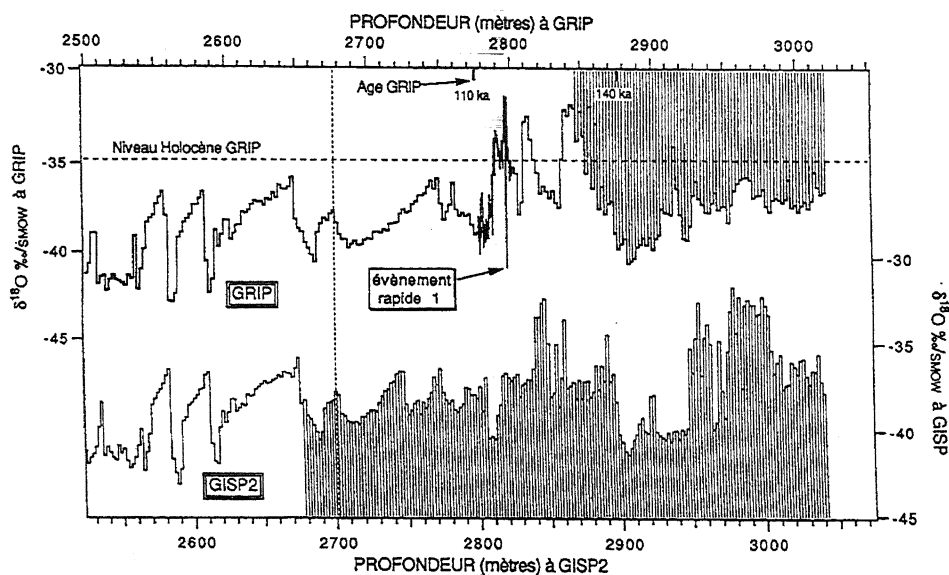


Fig. 3 - Comparaison des enregistrements isotopiques GRIP et GISP2 pour la partie inférieure des forages en fonction de la profondeur. L'accord entre les deux enregistrements est excellent jusqu'à une profondeur d'environ 2700 m (les échelles de profondeur ont été légèrement décalées pour bien mettre en évidence cet accord). Sur le profil GRIP correspondant à un pas de 2.2 m (2 m à GISP2), nous avons superposé, autour de 2790 m, l'enregistrement plus détaillé de l'évènement rapide 1 (GRIP Project Members, 1993). Nous avons également indiqué les niveaux correspondant à GRIP (datation préliminaire) aux âges de -110000 et -140000 ans (Eémien) ainsi que la teneur isotopique moyenne de l'Holocène. Les zones hachurées correspondent aux profondeurs pour lesquelles des couches inclinées ont été observées dans chacune des carottes (adapté de Jouzel *et al.*, sous-presse).

Comparison between the GRIP and GISP2 isotopic records of the boreholes lower portion versus depth. Data from the two records are in good agreement up to a depth of about 2700 m (depth scale has been a little modified in order to highlight this correspondence). The more detailed record of rapid event 1 (GRIP Project Members, 1993) has been superposed to the GRIP profile corresponding to a cadence of 2.2 m (2 m at GISP2) around 2790 m. The levels of -110,000 and -140,000 years at GRIP (preliminary age determinations) (Eemian) and the mean isotopic content for Holocene have also been indicated. Dashed areas show zones where inclined strata are present in each core (from Jouzel *et al.*, in press; modified).

Le dernier interglaciaire

Au-delà de 40000 ans, une chronologie préliminaire du forage GRIP a été établie en utilisant un modèle glaciologique et en admettant que le niveau -110000 ans est correctement identifié par comparaison avec d'autres enregistrements (Dansgaard *et al.*, 1993). La séquence située entre 2876 et 2775 m correspond à la période -140000/-110000 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. 3) mais la variabilité de l'enregistrement isotopique y est tout à fait inattendue (GRIP Project Members, 1993): les périodes chaudes (jusqu'à 4°C de plus que le climat actuel) ont 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) et, suivant le cas, les conditions froides (changements de température associés de l'ordre de 10°C) persistent entre 70 et 5000 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 -115000 ans) qui constituent des sources possibles d'instabilités.

Les résultats du forage GISP2 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 -87000 ans, les séries commencent à diverger au-delà (Fig. 4) 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 2847 m (129000 ans). Cette inclinaison des couches est, par contre, visible à GISP2 dès que les séries commencent à diverger (2678 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 GISP2 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. L'analyse de la composition des bulles d'air constitue une approche prometteuse pour identifier la façon dont ont été perturbées, éventuellement pour GRIP, presque certainement pour GISP2, les glaces correspondant à l'Eémien et au -delà. Ces analyses sont en cours sur chacun des forages. L'idée est de comparer les enregistrements de la composition de l'atmosphère qui ont un caractère global à ceux obtenus le long du forage Vostok (Barnola *et al.*, 1987; Chappellaz *et al.*, 1990; Sowers *et al.*, 1993) où la glace formée au dernier interglaciaire est actuellement à près de 2 km du fond et représente donc une séquence non perturbée.

La comparaison des profils isotopiques du Groënland 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 Groënland.

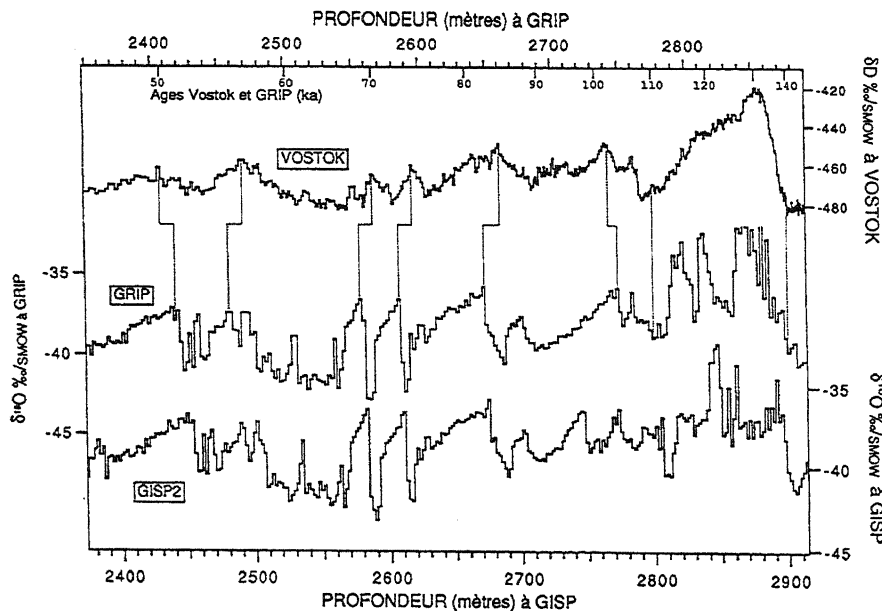


Fig. 4 - Comparaison des enregistrements climatiques à Vostok (teneur en deutérium), GRIP et GISP2 (teneurs en oxygène 18) pour une partie de la période glaciaire et l'Eémien. Les enregistrements GRIP et GISP2 sont reportés en fonction de la profondeur (échelles linéaires légèrement décalées pour bien mettre en évidence l'accord entre les deux forages jusque vers 2700 m). Nous avons indiqué en haut la chronologie du forage GRIP (datation préliminaire de Dansgaard *et al.*, 1993). L'enregistrement Vostok est également reporté en fonction de l'âge. Nous avons indiqué les correspondances que nous suggérons entre Vostok et GRIP pour cette partie des enregistrements (adapté de Jouzel *et al.*, sous-presse).

*Climatic records in Vostok (deuterium contents) and at GRIP and GRISP2 (¹⁸O contents) referring to a part of glacial period and Eemian. GRIP and GRISP2 records are shown versus depth (linear scale has been a little modified in order to show the good correspondence between boreholes up to 2700 m). The chronology of GRIP borehole is shown on top (preliminary dating from Dansgaard *et al.*, 1993). Also Vostok record is given versus age. Suggested correspondence between Vostok and GRIP is shown (from Jouzel *et al.*, in press; modified).*

3. Antarctique et Groënland: 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 (Fig. 5). 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 (Jouzel *et al.*, 1993) et permettent une intéressante comparaison avec les forages de Summit pour chacune des grandes périodes sur lesquelles nous avons centré la présentation des résultats du Groënland.

La dernière déglaciation

Bien que l'échelle de temps de la carotte de Vostok ait été établie à partir d'un modèle glaciologique dont la précision n'est pas meilleure que $\pm 10\%$ (Jouzel *et al.*, 1993), l'examen des Figures 2 et 4 permet de souligner deux points importants.

La dernière déglaciation s'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 Groënland. Ce refroidissement a donc une signification géographique très large comme le confirment de nombreux enregistrements océaniques et continentaux, mais jusqu'ici essentiellement de l'hémisphère nord. Le début de la déglaciation à Vostok (~ -17000 ans) précède celui observé à GRIP (~ -15000 ans). Cette remarque s'applique également à la seconde étape de réchauffement d'autant plus que la chronologie Vostok utilisée ici conduit probablement à des âges trop jeunes de plus de 1000 ans (Chappellaz *et al.*, 1993, Sowers *et al.*, 1993). Par ailleurs, les réchauffements s'opèrent de façon beaucoup plus lente en Antarctique qu'au Groënland. 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.

A Vostok, la partie la plus chaude de l'Holocène, se situe vers -11000 ans et donc tout au début de cette période (Ciais *et al.*, 1992) alors que les conditions climatiques sont loin d'avoir atteint optimum à GRIP et GISP2. 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 (Jouzel *et al.*, en préparation). Bien que la situation soit différente à Byrd (Johnsen *et al.*, 1972) où aucun retour marqué à des conditions froides n'est clairement identifié au cours de la déglaciation (peut-être parce que ce site de l'Antarctique de l'Ouest est situé dans un secteur Pacifique peu influencé par les changements de la circulation océanique

globale), les résultats obtenus à Vostok et dans les autres forages de l'Antarctique de l'Est mettent en lumière le caractère global de la structure en deux étapes de la dernière déglaciation.

La dernière période glaciaire

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 (Figures 2 et 4). La comparaison des enregistrements lissés, illustre bien cette observation et met en évidence les similitudes basses fréquences des enregistrements (Dansgaard *et al.*, 1993). Ces similitudes semblent résulter d'une réponse commune au forçage astronomique. En témoigne, la présence claire du cycle de 41000 ans correspondant à l'obliquité dans les analyses spectrales des deux enregistrements isotopiques (Dansgaard *et al.*, 1993).

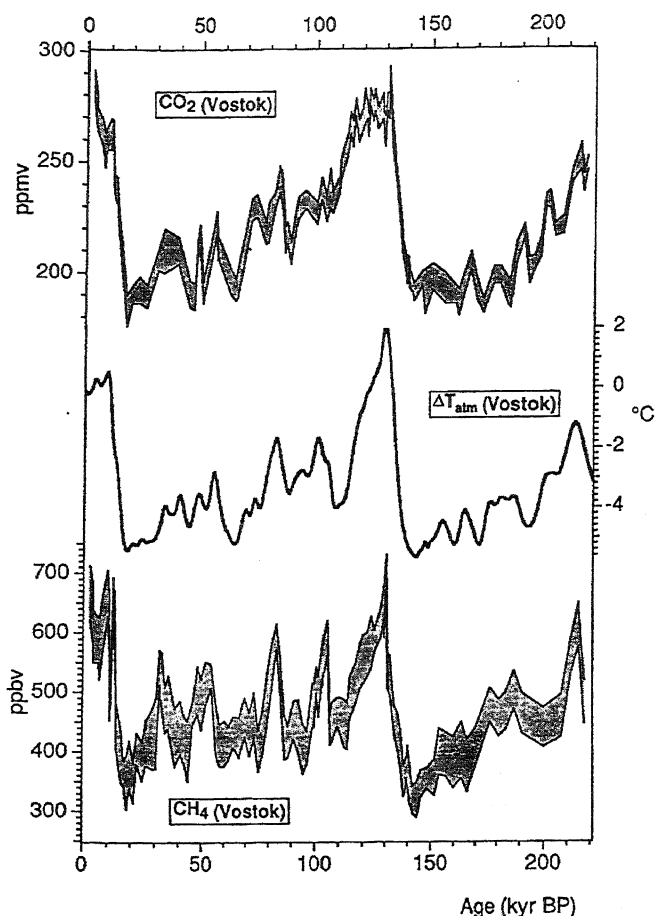


Fig. 5 - Variations de la température de l'atmosphère en Antarctique (courbe du milieu) et des teneurs en gaz carbonique (courbe du haut) et en méthane (courbe du bas) au cours des 220 000 dernières années (adapté de Jouzel *et al.*, 1993).

Atmospheric temperature changes in the Antarctic (middle curve) and variations in CO_2 contents (top curve) and methane (bottom curve) during the last 220,000 years (from Jouzel *et al.*, 1993, modified).

Dans le cas du Groënland, s'y surimposent une réponse, fortement non linéaire, aux instabilités qui affectent la calotte (Oerlemans, 1993).

Comme pour la dernière déglaciation, l'hypothèse d'un lien interhémisphérique à travers les changements de circulation océanique peut-être raisonnablement avancée. A l'évidence, les correspondances proposées sur les Figures 2 et 4 aussi bien que les mécanismes impliqués sont sujets à caution tant que la validité des échelles de temps, qui l'une et l'autre s'appuient alors sur des modèles glaciologiques, n'aura pas été mieux établie. La comparaison détaillée de paramètres à caractère global (composition de l'atmosphère) constitue, là aussi, une voie prometteuse.

Le dernier interglaciaire

Nous privilégions ici la comparaison entre GRIP et Vostok, l'enregistrement de GISP2 ayant, en tout état de cause, une probabilité plus grande d'être perturbé pour l'Eémien. 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 (Pichon *et al.*, 1992).

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 Eémiens. Soulignons que celle-ci n'est pas liée à une différence de résolution des enregistrements comme en témoigne la Figure 4 où les deux profils sont présentés avec un pas commun de 200 ans. En fait, malgré une accumulation dix fois plus faible, le dernier interglaciaire est représenté par une plus grande épaisseur de glace à Vostok qu'à GRIP où l'amincissement lié à la relative proximité du socle rocheux (~ 200 m) est très important: l'intervalle -110000/-140000 ans correspond à une épaisseur de 420 m à Vostok et de 100 m à GRIP. Indubitablement, cette différence de structure ajoute aux interrogations soulevées par la comparaison GRIP/GISP2. 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 très 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.

Nous avons entrepris d'étudier le dernier interglaciaire de Vostok avec une résolution temporelle de l'ordre de 10 ans équivalente à celle qui a permis de mettre en évidence une excursion froide d'une durée de 70 ans dans l'enregistrement GRIP (Fig. 3). Les premiers résultats concernent la déglaciation; ils confirment l'absence des variations importantes enregistrées à GRIP pour cette période (M. Stievenard *et al.*, en préparation). Par contre, aucune donnée n'est encore disponible vers -115000 ans, période où a été identifié l'évènement de 70 ans.

4. Conclusion

L'étude des deux carottages GRIP et GISP2 souligne le caractère exceptionnel de la stabilité du climat du Groënland au cours des 10000 dernières années vis à vis de celui des 100000 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. 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 GISP2, 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 GISP2, 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 intéressante 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.

Ce texte a été rédigé à l'invitation de Monsieur Le Professeur Orombelli à la suite d'un séminaire que j'ai présenté à Gênes en juin 1993. Il tient cependant compte de l'ensemble des résultats publiés dans la seconde partie de l'année 1993. Il s'appuie largement sur une note de synthèse récemment présentée aux Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Jouzel *et al.*, sous-pression). Je remercie P. Grootes, S. Johnsen et C. Lorius co-auteurs de cette note ainsi que tous les participants aux projets GRIP, GISP2 et Vostok et les

organismes qui ont participé l'organisation de ces programmes et leur ont apporté leur soutien financier Je remercie particulièrement Laurent Labeyrie et Gerry Bond pour les données de la carotte V23-81 et Michel Stievenard pour ses nombreuses suggestions.

Références Bibliographiques

- Alley R. B., D. A. Meese, C. A. Shuman, A. J. Gow, K. C. Taylor, P. M. Grootes, J. W. C. White, M. Ram, E. D. Waddington, P. A. Mayewski & G. A. Zielinski, 1993 - *Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event*. *Nature*, **362**, 527-529.
- Bard E., M. Arnold, R. G. Fairbanks & B. Hamelin, 1993 - *^{230}Th - ^{234}U ^{14}C ages obtained from mass spectrometry on corals*. *Radiocarbon*, **35**, 191-199.
- Barnola J. M., D. Raynaud, Y. S. Korotkevich & C. Lorius, 1987 - *Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO_2* . *Nature*, **329**, 408-414.
- Bond G., W. S. Broecker, S. J. Johnsen, J. Mc Manus, L. D. Labeyrie, J. Jouzel & G. Bonani, 1993 - *Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice*. *Nature*, **365**, 143-147.
- Boulton G., 1993 - *Two cores are better than one*. *Nature*, **366**, 507-508
- Chappellaz J., J. M. Barnola, D. Raynaud, Y. S. Korotkevich & C. Lorius, 1990 - *Ice core record of atmospheric methane over the past 160,000 years*. *Nature*, **345**, 127-131.
- Chappellaz J., T. Blunier, D. Raynaud, J. M. Barnola, J. Schwander & B. Stauffer, 1993 - *Synchronous changes in atmospheric CH_4 and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP*. *Nature*, **366**, 443-445.
- Charles C., D. Rind, J. Jouzel, R. Koster & R. Fairbanks, 1994 - *Glacial interglacial changes in moisture sources for Greenland: influences on the ice core record*. *Science*, **263**, 508-511.
- Ciais P., J. R. Petit, J. Jouzel, C. Lorius, N. I. Barkov, V. Lipenkov & V. Nicolaiev, 1992 - *Evidence for an early Holocene climatic optimum in the Antarctic deep ice core record*. *Clim. Dyn.*, **6**, 169-177.
- Dansgaard W., 1964 - *Stable Isotopes in Precipitation*. *Tellus*, **16**, 436-468.
- Dansgaard W., S. Johnsen, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. Gundestrup, C. U. Hammer & H. Oeschger, 1984 - In: *Climate processes and climate sensitivity* (eds. J. E. Hansen and T. Takahashi), 288-298, Am. Geophys. Union, Washington, 1984.
- Dansgaard W., S. J. Johnsen, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. S. Gundestrup, C. U. Hammer, J. P. Steffensen, A. Sveinbjornsdottir, J. Jouzel & G. Bond, 1993 - *Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record*. *Nature*, **364**, 218-220.
- GRIP Project Members, 1993 - *Climatic instability during the last interglacial period revealed in the Greenland summit ice - core*. *Nature*, **364**, 203-207.
- Grootes P. M., M. Stuiver, J. W. C. White, S. J. Johnsen & J. Jouzel, 1993 - *Comparison of the oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores*. *Nature*, **366**, p. 552 - 554.
- Johnsen S. J., W. Dansgaard, H. B. Clausen & C. C. Langway, 1972 - *Oxygen isotope profiles through the Antarctic and Greenland ice sheets*. *Nature*, **235**, 429-434.
- Johnsen S. J., W. Dansgaard & J. W. C. White, 1989 - *The origin of Arctic precipitation under present and glacial conditions*. *Tellus*, **41**, 452-469.
- Johnsen S. J., H. B. Clausen, W. Dansgaard, K. Fuhrer, N. S. Gundestrup, C. U. Hammer, P. Iverssen, J. Jouzel, B. Stauffer & J. P. Steffensen, 1992 - *Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core*. *Nature*, **359**, 311-313.
- Joussaume S. & J. Jouzel, 1993 - *Paleoclimatic tracers: an investigation using an atmospheric General Circulation Model under ice age conditions. 2. Water Isotopes*. *J. Geophys. Res.*, **98**, 2807-2830.
- Joussaume S., J. Jouzel & R. Sadourny, 1993 - *A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere*. *Nature*, **311**, 24-29.
- Jouzel J., G. L. Russell, R. J. Suozzo, R. D. Koster, J. W. C. White & W. S. Broecker, 1987 - *Simulations of the HDO and H₂18O atmospheric cycles using the NASA/GISS general circulation model: The seasonal cycle for present-day conditions*. *J. Geophys. Res.*, **92**, 14739-14760.
- Jouzel J., N. I. Barkov, J.M. Barnola, M. Bender, J. Chappellaz, C. Genthon, V. M. Kotlyakov, V. Lipenkov, C. Lorius, J. R. Petit, D. Raynaud, G. Raisbeck, C. Ritz, T. Sowers, M. Stievenard, F. Yiou & P. Yiou, 1993 - *Vostok ice cores: extending the climatic signal over the penultimate glacial period*. *Nature*, **364**, 407-412, .
- Jouzel J., C. Lorius, S. Johnsen & P. Grootes, (Sous-presses) - *Climate instabilities: Greenland and Antarctic records*. *Cr. Acad. Sci.*
- Lorius C. & L. Merlivat., 1977 - In: *Isotopes and impurities in snow and ice*. Proc. IUGG Grenoble Symposium, Aug./Sep. 1975, (eds. IAHS), 125-137, IAHS, Vienna, 1977.
- Lorius C., J. Jouzel, D. Raynaud, J. Hansen & H. Le Treut, 1990 - *Greenhouse warming, climate sensitivity and ice-core data*. *Nature*, **347**, 139-145.
- Oerlemans H., 1993, *Evaluating the role of climate cooling in iceberg production and the Heinrich events*. *Nature*, **364**, 783-786.
- Pichon J. J., L.D Labeyrie, G. Bareille, M. Labracherie, J. Duprat & J. Jouzel, 1992 - *Surface water temperature changes in the high latitudes of the Southern Hemisphere over the last glacial-interglacial cycle*. *Paleoceanography*, **7**, 289-318.
- Rind D., D. Peteet, W. Broecker, A. McIntyre & W. Ruddiman, 1986 - *Impact of cold North Atlantic sea surface temperatures on climate*

- implications for the Younger Dryas cooling.* *Climate Dynamics*, **1**, 3-33.
- Saltzman B. & M. Verbitsky, 1994 - *CO₂ and glacial cycles.* *Nature*, **367**, 419.
- Sowers T., M. Bender, L. D. Labeyrie, J. Jouzel, D. Raynaud, D. Martinson & Y. S. Korotkevich, 1993 - *135 000 year Vostok-SPECMAP common temporal framework.* *Paleoceanogr.*, **8**, 737-766.
- Taylor K. C., G. W. Lamorey, G. A. Doyle, R. B. Alley, P. M. Grootes, P. A. Mayewski, J. W. C. White & L. K. Barlow, 1993 - *The "flickering switch" of late Pleistocene climate change.* *Nature*, **361**, 432-436.

Testo ricevuto il 4. 6. 1994