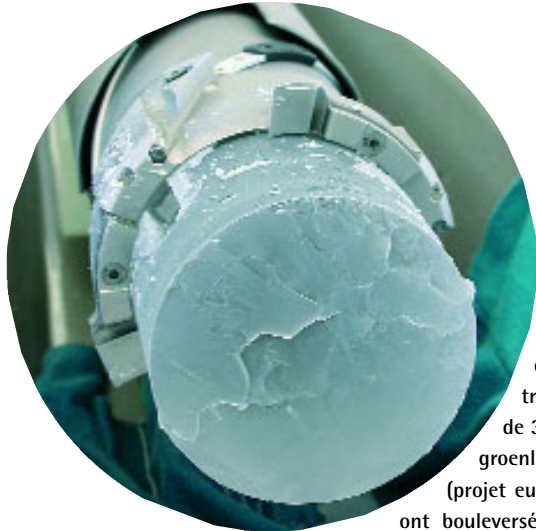


# A LA RECHERCHE DE LA DERNIERE PERIODE INTERGLACIAIRE DANS LES GLACES DU GROENLAND :

## les surprenants résultats du forage profond de NorthGRIP



### 1.1. LES ENJEUX

Les changements du climat et

de l'environnement reconstruits à partir des carottes de plus de 3 km forées au sommet de la calotte groenlandaise au début des années 1990 (projet européen GRIP et projet américain GISP2)

ont bouleversé notre perception de la dynamique du climat pendant les périodes glaciaires : le climat de l'Atlantique nord peut changer radicalement en quelques décennies, quand le transport de chaleur par l'Atlantique nord s'interrompt.

Cependant, la comparaison des résultats obtenus sur la partie profonde des deux carottages ne laisse pas de doute : les enregistrements climatiques les plus anciens des deux sites, au-delà de 100 000 ans, sont très certainement perturbés par l'écoulement de la glace formant des plis au voisinage du socle rocheux... C'est une déception pour toute notre communauté de ne pas avoir d'informations précises sur les changements climatiques pendant la précédente période chaude.

Qu'en est-il, en particulier, de la stabilité du climat de nos régions pendant les périodes chaudes, antérieures à celle que nous connaissons depuis 10 000 ans ? Dans le contexte du réchauffement global en cours, c'est là tout l'enjeu de la recherche d'un enregistrement fiable de la dernière période interglaciaire dans les glaces du Groenland... et la motivation première de la mise sur pied d'un nouveau programme de forage : NorthGRIP.

Valérie Masson-Delmotte<sup>1</sup>  
et Laurent Augustin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, IPSL/CEA-CNRS UMR 1572, Gif-sur-Yvette (masson@lscce.saclay.cea.fr).

<sup>2</sup> Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, CNRS-UJF, Saint-Martin d'Hères (augustin@lgge.obs.ujf-grenoble.fr)

Collaborations françaises :

J. Jouzel, P. Doira, O. Cattani, N. Caillon, A. Landais, S. Falourd, C. Bourq (LSCE)  
J.Chappellaz, J.M. Barnola, C.Goujon, A. Manouvrier (LGGE)

21

Rapport d'activités IPEV 2002

*The deep drilling operations conducted on the summit of the Greenland ice cap (GRIP and GISP2) in the 1990s have produced exceptional climatic records showing rapid climatic changes during the last glacial period. However the bottom ice, near the bedrock, was perturbed and could not provide reliable climatic information. In order to extend the Greenland records back to the last warm interglacial period, a new deep drilling was initiated by the Danish glaciological group, with the collaboration of 8 countries. The first surprising results show an unexpected ice flow, probably due to a large local geothermal heat flux, and enable a very high resolution reconstruction of the glacial inception. The NorthGRIP water stable isotope profile, a proxy of local temperature changes, exhibits a significantly larger amplitude of variations, and should provide a reference temperature record for Greenland.*

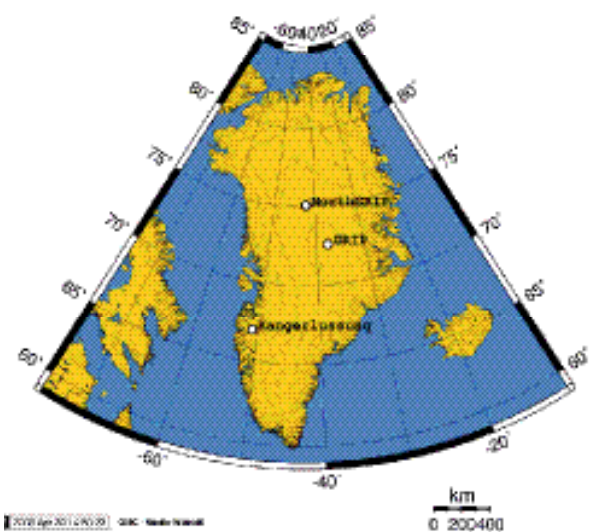


Figure 1 : carte du Groenland montrant la localisation des différents sites de forages profonds.  
 Map of Greenland showing the locations of the deep drilling sites.

## 1.2. LA MISE EN PLACE DU PROJET, A L'INITIATIVE DES DANOIS

Dès 1994, le groupe de l'Université de Copenhague au Danemark relance rapidement l'idée d'un nouveau forage profond au Groenland permettant d'obtenir des enregistrements climatiques fiables de la dernière période chaude, l'Eémien (ainsi définie dans les enregistrements polliniques européens) ou le stade isotopique marin 5e (correspondant au minimum de volume des glaces continentales), il y a environ 125 000 ans.

Les sites de forage sont systématiquement choisis soit au sommet des dômes glaciaires, soit sur des lignes de crête («ridges») pour éviter les problèmes d'écoulement tridimensionnels. Le choix du site idéal pour l'Eémien requiert également un compromis entre épaisseur de glace (plus faible vers les côtes) et accumulation (plus faible au centre de la calotte), pour garantir la préservation de couches de glace aussi anciennes. Le développement technologique autour de

l'acquisition et le traitement des échos radars renvoyés par des réflecteurs inclus dans la calotte (horizons volcaniques, poussières...) et par le socle rocheux permettent d'envisager une cartographie de certaines lignes d'écoulement de la glace et donc de détecter les zones où l'écoulement au voisinage du socle rocheux est le moins perturbé, et ainsi favorables au forage profond.

Les équipes danoises, américaines, et allemandes effectuent en 1994-1995 une série de survols aériens et de raids complétée par des mesures radar par avion au nord du sommet de la calotte. Les forages de surface réalisés lors de ces raids permettent d'évaluer l'accumulation actuelle, grâce à la stratigraphie de la glace, au comptage des cycles saisonniers d'espèces chimiques, à la caractérisation chimique d'éruptions volcaniques bien connues et à la signature radioactive des essais nucléaires atmosphériques.

Le site offrant les meilleures perspectives de succès est ainsi identifié à 300 km au nord de GRIP et 930 km au nord-est de la base côtière de Kangerlussuaq. Il sera dénommé NorthGRIP (75.10°N, 42.32°W, altitude

2 900 m, température moyenne de l'air -31°C et accumulation moyenne actuelle 19 cm de glace par an).

Pour le forage profond sur ce site, les Danois prennent en charge l'organisation logistique et bénéficient du soutien aérien de l'US Air Force (permettant l'acheminement des personnels et du matériel par C130 depuis la base côtière de Kangerlussuaq). C'est l'occasion pour nous ici de rendre hommage au travail remarquable d'organisation effectué par notre collègue danois Niels Gundestrup, décédé l'an passé. Neuf pays s'engagent aux côtés des Danois pour assumer le coût logistique du projet : l'Allemagne, le Japon, la Belgique, la Suède, l'Islande, les Etats-Unis, la France et la Suisse. La contribution française à la logistique se monte à 2,8 % du coût total.

## 1.3. LES DIFFICULTES DU FORAGE

L'épaisseur totale de glace sur le site de NorthGRIP est estimée à 3 080 m. Le forage profond a débuté en 1996, et s'est poursuivi pendant la campagne d'été 1997 jusqu'à ce que le carottier soit bloqué dans la glace à une profondeur de 1 310 m : au moment de l'extraction de la carotte, une accumulation anormale de copeaux au fond du trou liée à un fonctionnement défectueux de la pompe du carottier a provoqué ce

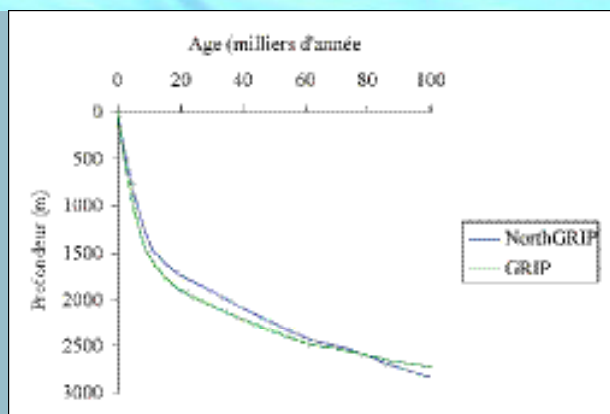


Figure 2 : comparaison des échelles âges (exprimés en milliers d'années avant l'actuel) -profondeur (en mètres) pour les forages de GRIP (dernière datation de S. Johnsen) et de NorthGRIP (datation préliminaire de S. Johnsen par modélisation de l'écoulement). Pour les derniers 12 000 ans l'échelle d'âge est obtenue par comptage des couches annuelles. Au début du forage, pour une même profondeur des âges plus anciens sont obtenus pour NorthGRIP (en bleu) que pour GRIP (en vert); ceci résulte d'une accumulation plus faible à NorthGRIP en surface. Par contre, au fond du forage, les deux courbes se croisent (flèche noire) : cette fois c'est à GRIP qu'on obtient des âges plus anciens, à profondeur égale. Ce résultat surprenant provient d'une forte fusion sous la calotte de glace, très certainement liée à un flux géothermique fort localement.

Comparison between the age scales (age in thousands of years before present versus depth in meters) for GRIP and NorthGRIP obtained by layer counting (last 12 000 years) and ice flow modelling (S. Johnsen). In the recent times, NorthGRIP (blue curve) has older ages than GRIP (green curve) at the same depths, a consequence of a smaller accumulation rate. However, after the black arrow the two curves cross each other, and GRIP shows then older ages than NorthGRIP. This astonishing feature probably results from a larger basal fusion and a large local geothermal heat flow below NorthGRIP site.

coincement. Cette première carotte, dénommée NGRIP1, couvre une grande partie de l'Holocène, la période interglaciaire dans laquelle nous vivons depuis 10 000 ans.

Deux ans plus tard, et avec un nouveau carottier, le forage reprend depuis la surface, à des vitesses record, avec 145 m de glace forés par jour (1 750 m de profondeur en une saison, 2 930 m de profondeur la saison suivante). Le carottier se bloque brutalement le 23 juillet 2000... Devant l'impossibilité de le dégager par traction sur le câble de forage, 160 litres de glycol puis de glycol pré-gelé sont introduits dans le trou de forage depuis la surface. Finalement, le glycol fait fondre la gangue de glace et le carottier peut être remonté à la surface sans dégât le 28 juillet suivant. Cette opération, couronnée de succès (puisque le carottier a été débloqué) complique singulièrement la tâche des foreurs. En effet, le glycol a également dissous la glace, modifiant le diamètre du trou de forage localement et entraînant la formation de « ponts » de glace au sommet de cellules de convection du liquide de forage...

Au voisinage du socle rocheux, des difficultés techniques supplémentaires se présentent car la température de la glace est chaude, jusqu'à  $-5^{\circ}\text{C}$ , proche de la température de fusion à cette pression ( $-2,4^{\circ}\text{C}$ ). Pendant la campagne d'été 2001, il n'est possible de forer que 71 m supplémentaires jusqu'à la profondeur de 3 001 m atteinte le 2 août 2002... Il reste donc 80 m de glace au fond du trou de forage, glace particulièrement riche en informations climatiques car elle correspond à la fin de la dernière période interglaciaire.

La campagne 2003 sera consacrée à la récupération de cette glace profonde et chaude, avec le même carottier mais en remplissant le fond du trou avec 50 litres d'une solution d'éthanol et d'eau, ou en utilisant un carottier thermique développé spécifiquement pour cette application. Cette étape de forage sera également suivie avec attention par les équipes de forage de Dôme C en Antarctique où il reste également 100 m de glace « chaude » à forer, dans des conditions similaires, pour atteindre le socle rocheux.

L'implication française sur site à porter sur le forage (participation de L. Augustin à chaque saison de forage pendant un total de 7 mois de 1996 à 2003 ; O. Alemany en 1999 ; P. Journé en 1996 et 1997 ; A. Manouvrier en 1996 et 1997 et C. Rado en 1996), et sur le conditionnement sur site

des échantillons de glace, dans la tranchée scientifique (participation de V. Masson-Delmotte et P. Doira du LSCE en 1997 et 1999, et N. Caillon et C. Bourg en 1999).



Photo G. Gajardo/LBCM

La CTD-rosette est à l'eau. Cet instrument est utilisé durant les campagnes ISO pour récolter des échantillons d'eau de mer à différentes profondeurs, de la surface jusqu'à 5000m. Cela permet l'analyse du  $\text{CO}_2$  dans l'océan et d'estimer l'accroissement de  $\text{CO}_2$  dans l'océan à toute profondeur.

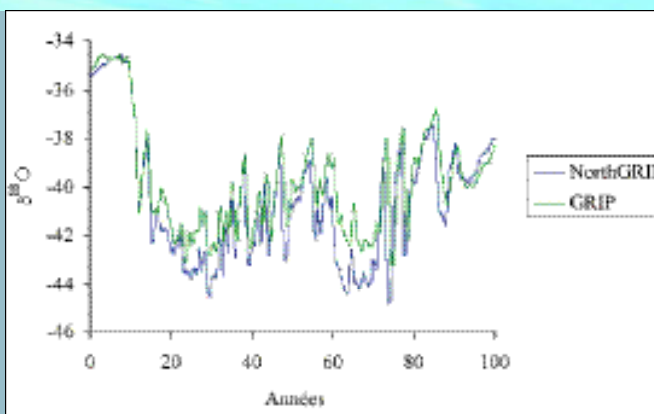
## 1.4. PREMIERS RESULTATS

La séquence de travail sur site est désormais bien rodée grâce à l'expérience acquise lors des campagnes de terrain GRIP et GISP2. L'équipe de forage, sur qui le succès de l'opération repose, est relayée, après la remontée des carottes, par les « loggers » qui effectuent le suivi stratigraphique des différentes carottes. Celles-ci sont ensuite transportées dans la « tranchée scientifique », laboratoire froid souterrain, où s'effectuent les découpes pour les différents types d'analyses ultérieures, ainsi qu'une série de mesures sur site (propriétés optiques, mesure de conductivité électrique et diélectrique de la glace, chromatographie ionique, lames minces). Ces premières séries de mesures permettent l'identification de la signature chimique d'éruptions volcaniques ou de grandes transitions climatiques (changement d'acidité de la glace et donc de conductivité suite aux pics de sulfates par exemple), ainsi qu'une estimation grossière de l'âge des carottes. Les échantillons découpés sont ensuite conditionnés pour leur expédition par transport frigorifique jusqu'aux chambres froides de Copenhague et des autres laboratoires partenaires.

Le suivi des couches de référence identifiées sur site par rapport aux mêmes événements enregistrés à GRIP montre très vite que les couches de glace ne s'amincissent pas comme prévu à NorthGRIP. Elles deviennent même trois

Figure 3 : comparaison des variations de la composition isotopique de la glace, un indicateur des variations passées de température ( $\delta^{18}\text{O}$ , exprimé en ‰) mesurées sur les carottes de GRIP et NorthGRIP (données lissées à un pas de temps de 1 000 ans) en fonction de l'âge (exprimé en milliers d'années avant l'actuel) ; chaque forage est présenté sur son échelle d'âge, voir Figure 2). On observe une amplitude plus grande de variation à NorthGRIP qu'à GRIP.

Comparison of the ice isotopic composition, a proxy of temperature fluctuations, measured on GRIP and NorthGRIP ( $\delta^{18}\text{O}$  expressed in per mil, one thousand year running average) on each time scale. Note the larger amplitude of fluctuations measured on NorthGRIP.



## Références bibliographiques

fois plus épaisses qu'à GRIP au fond du forage, premier indice d'un fort glissement horizontal de la glace basale de NorthGRIP. Les mesures de température dans le trou de forage confirment bien une glace très chaude. Enfin, le profil de  $\Delta^{18}\text{O}$  de la glace, indicateur des variations passées de température, confirme ces premiers résultats : pas de trace de l'Eémien, attendu vers 2 750 m de profondeur si l'écoulement à NorthGRIP était le même qu'à GRIP. La modélisation de l'écoulement particulier à NorthGRIP n'est compatible qu'avec un flux géothermique particulièrement élevé localement. Cette nouvelle information modifie les attentes vis-à-vis du forage profond de NorthGRIP : il devient très improbable d'obtenir de la glace couvrant l'ensemble de l'Eémien. Côté positif, le faible amincissement des couches de glace en profondeur permet d'obtenir un enregistrement de l'entrée dans la dernière glaciation non seulement bien archivé, mais également particulièrement bien détaillé. La datation de cette période est affinée grâce à l'identification du changement abrupt de méthane et de température d'il y a 105 000 ans dans les bulles d'air, signal enregistré lors de la diffusion des gaz dans le névé (mesures effectuées au LGGE et au LSCE).

Les mesures des isotopes de l'eau montrent également une amplitude presque 30% plus grande des variations isotopiques passées à NorthGRIP qu'à GRIP. On sait maintenant que l'enregistrement des fluctuations de température dans les isotopes de l'eau de GRIP est biaisé par les changements de cycle saisonnier des précipitations : la forte diminution des précipitations d'hiver au centre du Groenland pendant les périodes les plus froides, suite à l'englacement de l'Atlantique nord et au changement de circulation atmosphérique par la calotte Laurentide, modifie l'échantillonnage annuel réalisé dans les carottes de glace. Visiblement ce biais est moins marqué à NorthGRIP, permettant une meilleure reconstruction des variations passées de température. Les premières mesures d'excès en deutérium, couvrant les derniers 10 000 ans et effectuées au LSCE, confirment une origine différente des précipitations pour les deux sites. Enfin, l'estimation précise de l'amplitude des variations rapides de température au début de la période glaciaire, il y a 80 000 à 60 000 ans, est rendue possible grâce à l'analyse des isotopes stables de l'argon et l'azote piégés dans la glace et dont la composition isotopique ne varie que sous l'effet de la diffusion gravitationnelle et thermique du névé. Ces mesures très précises effectuées au LSCE sont combinées à la modélisation du névé et à l'analyse du méthane de la glace, réalisées au LGGE. Elles conduisent à estimer des amplitudes des variations rapides de température de 10°C à 15°C. Plus intrigant, les variations de température du Groenland et de la teneur atmosphérique en méthane sont simultanées, suggérant une relation étroite entre hydrologie des régions marécageuses tropicales (sources de méthane en période glaciaire) et climat polaire.

N. Caillon, *Composition isotopique de l'air piégé dans les glaces polaires : outil de paléothermométrie*, Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2001.

S.J. Johnsen, H.B. Clausen, W. Dansgaard, N.S. Gundestrup, C.U. Hammer, U. Andersen, K.K. Andersen, C.S. Hvidberg, D. Dahl-Jensen, J.P. Steffensen, H. Shoji, A.E. Sveinbjörnsdóttir, J.W.C. White, J. Jouzel and D. Fisher, *The  $\delta^{18}\text{O}$  record along the Greenland Ice Core Project deep ice core and the problem of possible Eemian climatic instability*, *Journal of Geophysical Research* 102(C12, GRIP/GISP2 special issue), 26397-26410, 1997.

S.J. Johnsen, D. Dahl-Jensen, N. Gundestrup, J.P. Steffensen, H.B. Clausen, H. Miller, V. Masson-Delmotte, A.E. Sveinbjörnsdóttir and J. White, *Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye3, GRIP, GISP2, Renland and North GRIP*, *Journal of Quaternary Science* 16(4), 299-307, 2001.

A. Landais, J. Chappellaz, M. Delmotte, J. Jouzel, T. Blunier, C. Bourg, N. Caillon, S. Cherrier, B. Malaizé, V. Masson-Delmotte, D. Raynaud, J. Schwander, J. Steffensen, *A tentative reconstruction of the last interglacial and glacial inception in Greenland based on new gas measurements in the GRIP ice core*, *JGR*, sous presse. V. Masson-Delmotte et J. Chappellaz, *Au cœur de la glace, les secrets du climat*. *La Météorologie*, (37) 18-25, 2002.

## 1.5. Conclusions

Avec le forage profond de NorthGRIP, l'aventure humaine, technologique et scientifique des forages profonds au Groenland se poursuit. Aventures humaine, bien sûr, car le travail de terrain dans un contexte où neuf pays sont représentés est une occasion unique de rencontres et d'échanges. Aventures technologiques, également, avec le développement de nouvelles méthodes de carottage et d'analyse continue in-situ de la glace. Aventures scientifiques enfin...

Même si la perspective d'obtenir effectivement un enregistrement de l'intégralité de l'Eémien s'éloigne, les résultats obtenus sur les carottes de glace déjà disponibles n'étaient pas ceux que nous attendions. Ainsi, une forte fusion à la base du site de forage, probablement liée à un flux géothermique particulièrement élevé, permet une bien meilleure résolution temporelle pour les enregistrements climatiques au début de la dernière période glaciaire... alors qu'on attendait des signaux plus « compressés » qu'au sommet de la calotte (à GRIP). De même, l'enregistrement des variations passées de température est mieux préservé dans la composition isotopique des précipitations à NorthGRIP qu'à GRIP. Ces résultats garantissent déjà que NorthGRIP va livrer des enregistrements climatiques de référence.

A ce jour, nous ne savons toujours pas quels secrets vont nous livrer, si on parvient à les extraire, les glaces du fond de NorthGRIP.