

Paléontologie humaine et Préhistoire

Climat et atmosphère au Quaternaire : de nouveaux carottages glaciaires

Jean Jouzel^{a,*}, Claude Lorius^b, Dominique Raynaud^b

^a *Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, institut Pierre-Simon-Laplace,
UMR CEA-CNRS 1572, DSM, CE Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France*

^b *Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, UMR 5183 CNRS-UJF, 54, rue Molière, Saint-Martin-d'Hères cedex, France*

Reçu le 21 décembre 2004 ; accepté après révision le 19 septembre 2005

Disponible sur internet le 27 décembre 2005

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

Résumé

Depuis une vingtaine d'années, l'étude des glaces de l'Antarctique et du Groenland a été marquée par l'obtention de résultats importants vis-à-vis de l'évolution passée et future de notre climat, en premier lieu la mise en évidence d'une relation entre climat et gaz à effet de serre dans le passé et la découverte de variations climatiques rapides. Ces résultats s'appuient sur des enregistrements tels que ceux obtenus à partir de l'étude du forage de Vostok, qui donne accès à l'évolution du climat de l'Antarctique et à celle de la composition de l'atmosphère depuis 420 ka (milliers d'années), et sur ceux de GRIP et GISP2 (Groenland), qui permettent de décrire précisément le rythme des variations rapides au cours des 100 000 dernières années. L'année 2004 a permis d'accroître considérablement l'information disponible à partir des glaces polaires grâce aux forages d'EPICA Dome C (Antarctique) et de North GRIP (Groenland). Nous présentons ces deux programmes internationaux couronnés de succès et décrivons les premiers résultats obtenus sur les deux forages, l'un couvrant huit cycles climatiques (800 ka) et l'autre permettant, pour la première fois pour un forage glaciaire de l'hémisphère nord, d'atteindre l'Éémien, la période la plus chaude du dernier interglaciaire, il y a environ 120 000 ans. **Pour citer cet article : J. Jouzel, C. R. Palevol 5 (2006).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Quaternary climate and atmospheric composition: new ice cores. Over the last 20 years, studies of Antarctic and Greenland ice cores have provided a wealth of information directly relevant to the past and to the future evolution of our climate with, as more important, the discovery of a link between greenhouse gases and climate in the past and the characterization of rapid climate changes. These results are based on the analysis of deep ice cores such as the one drilled at the Vostok site, which allows us to describe the evolution of Antarctic climate and of atmospheric composition over 420 ka (thousands of years), and GRIP and GISP2 (Greenland), which precisely depict the rhythm of rapid changes during the last 100 ka. Information available from ice cores has considerably increased in 2004 thanks to the EPICA Dome C ice core in Antarctica and to the North GRIP one, in Greenland. We present these two successful international programs and describe the first results they have provided, with the EPICA Dome C core covering eight climatic cycles (800 ka) and the North GRIP one allowing us to reach, for the first time from a northern-hemisphere ice core, the Eemian, the warmest past of the last interglacial around 120 ka ago. **To cite this article: J. Jouzel, C. R. Palevol 5 (2006).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Corresponding author.

Adresse e-mail : jouzel@lscce.saclay.cea.fr (J. Jouzel).

Mots clés : Paléoclimat ; Quaternaire ; Archives glaciaires ; Antarctique ; Groenland ; Effet de serre

Keywords: Palaeoclimate; Quaternary; Ice cores; Oceanic and continental archives; Greenhouse effect

Abridged English version

As most of other oceanic or continental climate proxies, polar ice cores give access to local climate change and to climate parameters of largest geographical significance. However, they are unique in their capacity of tracking the composition of our past atmosphere through the analysis of entrapped air bubbles. Combining information contained both in the ice and in the air from Antarctic and Greenland, ice cores have provided a wealth of information directly relevant to the past and future evolution of our climate. Most importantly, we note the discovery of a link between greenhouse gases and climate in the past and the characterization of rapid climate changes. These results are based on the analysis of deep ice cores such as the one drilled at the Vostok site (Fig. 1), which allows describing the evolution of Antarctic climate and of atmospheric composition over the last 420 ka [35] and to estimate global climate sensitivity [27], and such as GRIP and GISP2 (Greenland, Fig. 2), which precisely depict the rhythm of rapid changes during the last 100 ka [8,13].

Information available from ice cores has considerably increased in 2004 thanks to the EPICA Dome C ice core in Antarctica [10,11] and to the North GRIP one, in Greenland [32]. We present these two successful international programs in which French teams from Grenoble, Orsay and Saclay have been very active. We describe the first results provided by these ice cores, the first one covering eight climatic cycle (800 ka) and the second one allowing to reach the Eemian, the warmest part of the last interglacial around 120 ka ago, for the first time from a northern hemisphere ice core.

The Dome C Antarctic site (Fig. 1), where a first core was drilled in the seventies [26] is, with its more than 3-km ice thickness and its low accumulation, ideal to get very old ice [28]. It was chosen 10 years ago as one of the drilling sites of the European project EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) launched in 1995 by 10 European countries under the auspices of the European Science Foundation (ESF), with a strong support from the European Communities. After a first drilling stacked at a depth 780 m, a second drilling started in 2000 has just reached the bedrock (3259,72 m) on December 29 2004. The time scale developed for the Dome C deep ice core [11], still preliminary, is based on an inverse dating method [34] that

combines an ice-flow model and an accumulation history. Available preliminary results [11] cover the last 730 ka (e.g., down to 3139 m) with a recent extension down to 3200 m, a depth corresponding to an age of ~800 ka.

The most striking feature of the EPICA record, previously observed in the deep-sea core record, is the clear change in the amplitude of glacial–interglacial changes before and after the isotope cold stage 12 (~430 ka) with consistently colder and longer interglacials for the older period [11]. Explaining this change of pacing remains a challenge for the palaeoclimate community. The transition between stage 12 and the following interglacial (11.3) identified as an exceptionally long interglacial (28 ka) has been studied in great detail. It shows resemblances with the transition into the present interglacial in terms of the magnitude of changes in the temperature and greenhouse gases, with however significant differences in the pattern of change. The similarities between the orbital parameters with our current glacial may imply that without human intervention a climate similar to the present one would extend well into the future [11].

The North GRIP drilling project (Fig. 2) was undertaken by an international consortium directed and organized by the ice core group of Copenhagen University [32]. As for EPICA Dome C, the first drilling was unsuccessful (drill stacked in 1997 at a depth of 1372 m), but the second drilling has reached the bedrock at a depth of 3085 m in 2003. The North GRIP core extends the undisturbed record back to 123 ka within the last interglacial period (which was probably 5 °C warmer than the Holocene). It thus allows an exceptionally detailed description of the last glacial inception which, somewhat surprisingly, is interrupted around 115 ka by a rapid warming at a time when the Laurentide and Fennoscandian ice sheet were at the very beginning of their formation [32]. Comparison of GRIP and North GRIP records over their common part (the last 105 ka) shows strong similarities as far as rapid changes are concerned, but points also to regional climate differences between the two sites. Temperature estimates based on combined measurements of nitrogen and argon isotopes confirm that rapid warming can reach up to 16 °C (Fig. 5) within a few decades.

There is still a lot to measure and to interpret in these EPICA and North GRIP cores (with a second drilling

hopefully reaching the bedrock at Kohlen Station in 2006), but the international ice core community is already looking towards the future with three major objectives: (i) to extract ice older than one million years in East Antarctica with the hope to get access to the climate period dominated by a 40 ka periodicity, (ii) to drill an ice core fully covering the Eemian and reaching back the previous glaciation in North Greenland, and (iii) to obtain a series of intermediate cores in coastal Antarctica. Projects aiming to fulfil the third objective are already going on, whereas the Greenland project and a reconnaissance to identify potential sites to extract the oldest ice in Antarctica should be launched during the International Polar Year (2007–2008).

1. Introduction

La connaissance que nous avons des conditions dans lesquelles se sont développées nos sociétés et nos cultures depuis l'apparition des hominidés s'appuie sur un très riche ensemble d'archives continentales, océaniques et glaciaires, dont il est facile de mettre en évidence la complémentarité, que ce soit au niveau des échelles de temps, de la représentativité géographique, ou des paramètres, climatiques et environnementaux, auxquels elles donnent accès. Comme la plupart de ces archives, les glaces polaires donnent accès aux conditions climatiques locales (température, accumulation) et à des paramètres de signification géographique plus large (circulation atmosphérique, température dans les régions sources). Mais elles ont surtout cette propriété unique de garder, à travers les bulles d'air qui y sont piégées, la mémoire de la composition de l'atmosphère passée, que ce soit au niveau des gaz à effet de serre dont, depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines augmentent de façon notable la concentration dans l'atmosphère (gaz carbonique, méthane, oxyde nitreux), ou de propriétés comme la composition isotopique de l'oxygène de l'air, qui apporte des informations sur l'évolution de la biosphère et sur celle du niveau de la mer.

Les archives glaciaires témoignent ainsi de la dynamique du climat et de l'atmosphère au cours des grands cycles climatiques du Quaternaire récent. Les résultats, obtenus en particulier à partir de la carotte de Vostok [35], indiquent que les variations atmosphériques du CO₂ ou du CH₄ sont fortement corrélées aux oscillations caractérisant le climat glaciaire– interglaciaire et que ces variations de l'effet de serre, dans ce cas d'origine naturelle, ont contribué de façon importante à l'amplitude des variations climatiques des dernières centaines de milliers d'années. Cette corrélation forte

entre effet de serre et climat dans le passé offre la possibilité d'estimer la sensibilité du climat en cas d'un doublement de la teneur en gaz carbonique, la valeur de 3 à 4 °C suggérée par ces données [27] étant dans la gamme de celles retenues par les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), soit 1,5 à 4,5 °C [14]. En outre, la période correspondant au dernier maximum glaciaire, voici 20 000 ans, permet de tester la capacité des modèles climatiques utilisés pour prédire le climat du futur, à rendre compte de conditions climatiques très différentes de celles que nous connaissons actuellement [18]. Enfin, les carottes de glace du Groenland [8,13] ont joué un rôle clé dans la découverte et la caractérisation de variations climatiques rapides qui, à ces échelles de temps, ont affecté directement l'Atlantique nord et les régions continentales adjacentes et ont eu des répercussions sur l'ensemble de la planète.

Les carottes de glace renseignent aussi sur les conditions plus récentes. Les mesures réalisées sur les gaz qui en sont extraits ont permis d'étudier la variabilité des teneurs en CO₂, CH₄ et N₂O au cours de l'Holocène [12,15] et de documenter l'augmentation rapide de leurs concentrations au cours des deux derniers siècles [14]. L'augmentation de ces trois gaz à effet de serre, essentiellement due aux émissions anthropiques, a conduit à une augmentation du forçage radiatif de la planète de plus de 2 Wm⁻² (1,46 pour CO₂, 0,48 pour CH₄ et 0,15 pour N₂O) dont nous avons désormais de plus en plus de preuves qu'elle est à l'origine de la majeure partie du réchauffement observé au cours des 50 dernières années [14].

L'année 2004 a été exceptionnelle pour la communauté scientifique impliquée dans l'étude des glaces polaires en ce qu'elle a permis de repousser les limites sur lesquelles cette communauté butait depuis un certain nombre d'années, aussi bien au Groenland qu'en Antarctique. Deux nouveaux forages, EPICA Dome C en Antarctique [10,11] (Fig. 1) et North GRIP au Groenland [32] (Fig. 2), ont permis d'obtenir de la glace de la dernière période chaude, l'Éémien, il y a 120 ka, au Groenland, et de doubler la période désormais couverte par les carottes de glace en Antarctique (800 ka). Les équipes françaises de Grenoble (LGGE), Saclay (LSCE) et Orsay (CSNSM) sont fortement impliquées dans ces deux programmes, conduits respectivement dans le cadre du projet européen EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*) qui, au dôme C, bénéficie d'un important soutien logistique de l'institut polaire Paul-Émile-Victor (IPEV), et du projet international NGRIP (*North Greenland Ice core Project*) mis sur pied et coordonné par l'équipe danoise du départe-

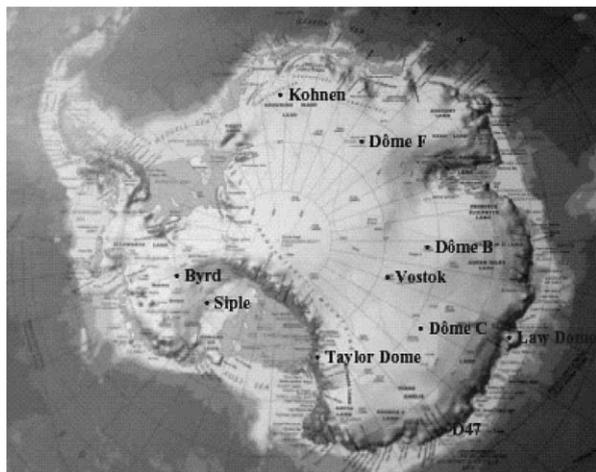


Fig. 1. Carte de l'Antarctique, avec indication des différents sites où ont été réalisés des forages profonds.

Fig. 1. Map of Antarctica, with location of deep drilling sites.

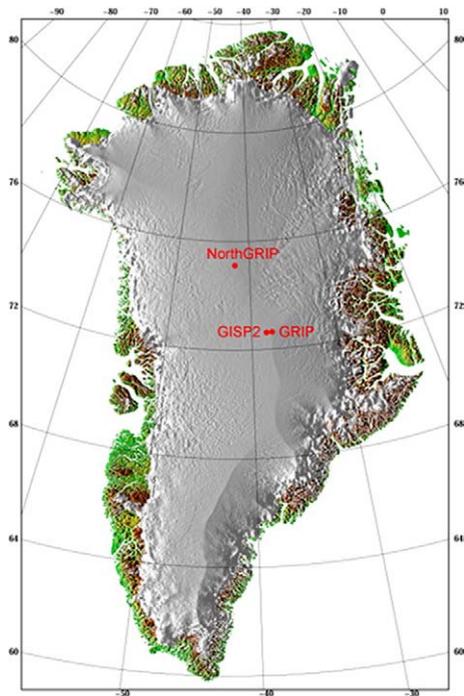


Fig. 2. Carte du Groenland, avec indication des différents sites où ont été réalisés des forages profonds.

Fig. 2. Map of Greenland, with indication of deep drilling sites.

ment de géophysique de l'université de Copenhague. Les premiers résultats marquants obtenus sur ces deux carottages qui, l'un et l'autre, ont dépassé 3 km, ont été publiés en 2004 dans deux articles collectifs de la revue *Nature* [11,32]. L'objectif de cet article est d'en présenter une synthèse, en mettant l'accent sur la contribution spécifique des équipes françaises.

2. Les forages EPICA et NGRIP

Fortes du succès de GRIP (*Greenland Ice core Project*), forage qui a atteint le socle rocheux en 1992, les équipes européennes se tournent alors vers l'Antarctique, avec l'idée de mettre sur pied un projet ambitieux incluant des forages profonds dans deux sites complémentaires en Antarctique de l'Est, l'un localisé sur un dôme, avec alors l'espoir que le forage puisse couvrir cinq cycles climatiques, l'autre devant être situé dans le secteur atlantique, pour permettre une comparaison optimale avec les enregistrements de GRIP et de GISP2 [28].

Le site du dôme C (Fig. 1), où les équipes du LGGE avaient déjà réalisé un forage de 900 m au cours de la saison 1977–1978 [26], s'avère idéalement placé pour extraire de la glace vieille de plus de 500 ka. De plus, c'est à cet endroit qu'il est alors envisagé de construire une station permanente en commun entre la France et l'Italie (base Dome Concordia, dont la construction s'est achevée au début de l'année 2005). La sélection de ce site va donc de soi à la fois pour des raisons scientifiques et logistiques. Ce choix est plus compliqué pour le second forage, car le secteur atlantique de l'Antarctique de l'Est est alors complètement inexploré, et de nombreuses campagnes de reconnaissance seront nécessaires pour identifier un site de forage approprié dans cette vaste région de Dronning Maud Land (DML). Le projet des deux forages est mis sur pied dans le cadre de la Fondation européenne de la science (ESF), avec un fort soutien des Communautés européennes et des agences nationales des dix pays impliqués (Allemagne, Belgique, Danemark, Italie, France, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède et Suisse). Le soutien logistique est assuré par la France (IPEV) et l'Italie pour le forage du dôme C, et par l'Allemagne pour celui de DML (site de Kohnen Station).

Les opérations de forage conduites par une équipe internationale placée sous la responsabilité de Laurent Augustin (LGGE) ont commencé au dôme C en 1995. Après un premier échec consécutif au blocage du carottier à 780 m de profondeur (EDC1), elles ont été couronnées de succès au cours de la saison 2004–2005 (profondeur de 3259,72 m). À 3200 m, l'âge devrait être proche de 800 ka et de 940 ka à proximité du socle rocheux (avec néanmoins le risque que les couches les plus profondes soient perturbées par cette proximité). Le second forage EPICA (DML Kohnen), démarré en 2001–2002, s'est poursuivi sans problème pour atteindre la profondeur de 2565 m en 2004. L'âge de la glace y est d'environ 200 ka et l'espoir est d'atteindre le socle rocheux (2760 m) au début de l'année 2006.

Comme au dôme C, la réalisation du forage NGRIP (Fig. 2) s'est heurtée à de nombreuses difficultés et a réservé quelques surprises. Les opérations conduites dans le cadre d'un consortium réunissant, autour de celle de Copenhague, des équipes de sept autres pays (Allemagne, Belgique, États-Unis, France, Islande, Suède et Suisse) ont commencé au cours de l'été 1996 en un site choisi de façon à couvrir le dernier interglaciaire (Éémien) et à donner, si possible, accès à de la glace de la précédente période glaciaire [6]. Mais dès la saison suivante, le forage est arrêté à 1372 m (soit 9800 ans) et, tout comme au dôme C, il faut repartir de la surface. Trois saisons ont été nécessaires pour atteindre, en 2003, le socle rocheux [32]. Plus précisément, le forage s'est terminé dans une « rivière » sous-glaciaire présente sous 3085 m de glace, avec comme conséquence la remontée sur 45 m de cette eau, soumise à une très forte pression.

La composition isotopique de la glace constitue l'outil privilégié pour reconstituer les variations de la température dans les régions polaires, l'analyse des teneurs en deutérium (isotope de l'hydrogène) ou en oxygène 18 pouvant être indifféremment utilisée à cet effet. Comme pour le forage de Vostok, l'interprétation climatique est, au dôme C, conduite à partir du profil de teneur en deutérium analysé au LSCE Saclay (reporté sur la Fig. 3 en fonction de la profondeur). En raison des fractionnements isotopiques successifs qui interviennent lorsque la vapeur d'eau se condense, les teneurs en deutérium et en oxygène 18 de la neige décroissent régulièrement, à mesure que sa température de

formation diminue [7], donc dans les régions côtières au centre de l'Antarctique [29] et du Groenland [16]. En outre, la combinaison de plusieurs approches (modélisation isotopique basée sur l'utilisation de modèles de circulation générale de l'atmosphère dans lesquels ont été introduites les formes isotopiques de la molécule d'eau, HDO et H₂¹⁸O, contraintes apportées par les chronologies des forages et leur comparaison en différents sites) a récemment permis de démontrer que la relation observée entre la température moyenne à la surface de la calotte et la composition isotopique de la neige dans les conditions actuelles (variation de 6‰/°C pour le deutérium et de 0,75‰/°C pour l'oxygène 18) rend correctement compte (à ±20% près) des variations de température en un site donné [20], au moins pour ceux de la partie centrale de l'Antarctique de l'Est. L'analyse de la teneur isotopique le long d'un forage tel que celui du dôme C y permet donc une interprétation quantitative des variations de la température moyenne annuelle au site de forage [20].

Tout comme en Antarctique, une relation linéaire est, au Groenland, observée entre les moyennes annuelles de la composition isotopique des précipitations récentes et de la température du site (variation de 0,67‰/°C pour l'oxygène 18 [16]). Cependant, la comparaison avec des méthodes indépendantes (paléothermométrie, informations déduites de l'analyse isotopique ou élémentaire de l'air piégé dans la glace), mises en oeuvre sur les forages de GRIP et GISP2, montre que l'application de ce gradient y sous-estime significativement les variations de température au Groenland, jus-

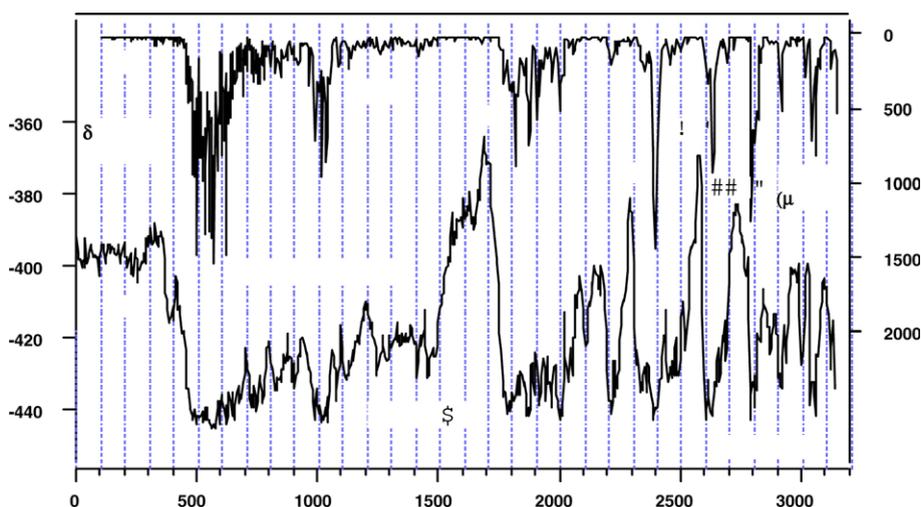


Fig. 3. Teneur en deutérium (a, courbe inférieure) et concentration en poussières (b, courbe supérieure avec un axe inversé) en fonction de la profondeur le long du carottage EPICA dôme C (adapté de [11]).

Fig. 3. Deuterium concentration (a, lower curve) and dust concentration (b, upper curve with inverted axis), reported with respect to the depth along the EPICA Dome C ice core (adapted from [11]).

qu'à un facteur 2 lors du dernier maximum glaciaire [5, 17]. La saisonnalité différente des précipitations entre climat actuel et climat glaciaire est la cause première de la sous-estimation systématique des variations de température déduites, au Groenland, à partir de l'application « conventionnelle » du thermomètre isotopique, basée sur la relation géographique actuelle observée sur les neiges de surface [21,44].

3. EPICA dôme C : des enregistrements couvrant 800 000 ans

À partir de l'enregistrement isotopique (teneur en deutérium) analysé sur le carottage EPICA dôme C (Figs. 3 et 4), il est aisé d'identifier les événements qui, entre la surface et environ 2800 m, correspondent à ceux des quatre derniers cycles climatiques couverts par le forage de Vostok. En dessous de ce niveau, le rythme des variations climatiques est très clairement modifié, avec des périodes interglaciaires moins chaudes [11]. Même s'il y est moins marqué, ce changement de rythme est apparent dans les enregistrements obtenus à

partir des sédiments marins, tel celui reporté sur la Fig. 4 [1], qui témoigne à la fois des variations du niveau de la mer et de celles de la température des eaux de surface au site de prélèvement. Même s'ils ne sont pas directement influencés par les mêmes paramètres climatiques, l'enregistrement marin et le profil isotopique du dôme C offrent des similitudes qui ont permis de poursuivre cette stratigraphie sur l'ensemble du carottage du dôme C. Ainsi, la période très froide vers 3040 m correspond sans ambiguïté au stade marin 16,2 (il y a 630 ka), au cours duquel le niveau de la mer était particulièrement bas et qui correspondait probablement à une période très froide. Cette stratigraphie s'est également appuyée sur les autres paramètres disponibles sur la carotte du dôme C, conductivité électrique mesurée sur le terrain et contenu en poussière analysé au LGGE (cf. Fig. 3). L'âge est voisin de 740 ka (stade marin froid 18,4) à la profondeur de 3139 m [11], les analyses désormais disponibles indiquant, à 3201 m, un âge proche de 800 ka (stade marin froid, 20.2). Enfin, toutes les analyses disponibles indiquent l'absence de perturbations liées à l'écoulement de la glace [11].

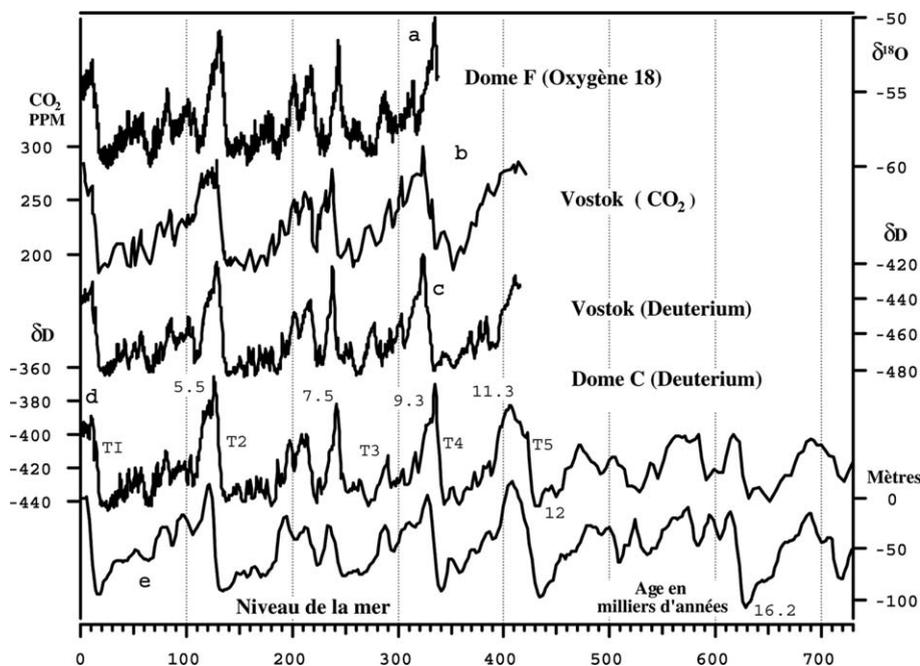


Fig. 4. Comparaison des profils isotopiques du dôme F (courbe a, adaptée de [43]), Vostok (courbe c, adaptée de [35]) et EPICA dôme C (courbe d, adaptée de [11]) avec une extension jusqu'à 800 ka et l'indication des stades isotopiques marins et des noms des terminaisons citées dans l'article. La courbe b correspond aux variations de la concentration en gaz carbonique (forage Vostok, courbe adaptée de [35]) et la courbe e à la variation du niveau de la mer (adaptée de l'enregistrement en oxygène marin publié dans [1], avec une échelle en mètres).

Fig. 4. Comparison of isotopic profiles from Dome F (curve a, adapted from [43]), Vostok (curve c, adapted from [35]) and EPICA dome C (curve d, adapted from [11]) with an extension back to 800 ka and indication of marine isotopic stages and terminations as cited in the text. Curve b corresponds to carbon dioxide variations (Vostok core; curve adapted from [35]) and curve e to sea-level change (adapted from the marine record published in [1] with a scale in metres).

L'établissement de cette stratigraphie est un préalable à l'obtention d'une chronologie continue du carottage telle que celle présentée sur la Fig. 4. L'approche suivie combine un modèle d'écoulement de la glace (relativement simple dans le cas d'un dôme) et un modèle qui permet de décrire les variations de l'accumulation de la neige en surface en fonction du temps [11], suivant une méthodologie développée par F. Parrenin [33,34]. Cette chronologie reste entachée d'erreurs relativement importantes et doit être considérée comme préliminaire.

Du point de vue climatique, ce nouveau forage confirme l'homogénéité des variations de température en Antarctique, avec des changements tout à fait similaires à Vostok [35], au dôme C [11] et au dôme F [43] sur les parties communes de ces enregistrements (Fig. 4). L'application conventionnelle du « thermomètre isotopique » confirme que les températures à la surface de la calotte était environ de 10 °C plus froides qu'actuellement lors du dernier maximum glaciaire, tandis que les températures les plus élevées (supérieures d'environ 5 °C à celles de l'Holocène) correspondent aux périodes les plus chaudes du dernier (stade 5.5, il y a 125 ka) et de l'antépénultième (stade 9.3, il y a 335 ka) interglaciaires. La comparaison avec l'enregistrement marin conforte, par ailleurs, le caractère global des changements climatiques enregistrés en Antarctique, tout au moins d'un point de vue qualitatif et lorsque l'on considère les grands changements entre périodes glaciaires et interglaciaires et sans tenir compte des déphasages inter-hémisphériques qui peuvent atteindre quelques milliers d'années [2,35].

Deux périodes des forages dôme C ont, pour l'instant, fait l'objet d'analyses détaillées. La première concerne les 45 000 dernières années, couvertes par le premier forage de 788 m [38], qui, à ce jour, est l'étude la mieux documentée de la dernière déglaciation en Antarctique. Les résultats confirment que ce réchauffement s'est opéré en deux étapes séparées par l'ACR (*Antarctic Cold Reversal*), et ce de façon très homogène, tout au moins sur le plateau Antarctique [19].

La dernière déglaciation a, par ailleurs, fait l'objet d'une étude à haute résolution des concentrations en gaz carbonique et en méthane [31]. Conduite conjointement par les équipes de l'université de Berne (Suisse) et du LGGE, elle est la plus détaillée actuellement disponible sur cette période. Même si ces travaux confirment un retard (800 ± 600 ans) du gaz carbonique par rapport à la température de l'Antarctique au début de la déglaciation, ces deux paramètres sont ensuite étroitement corrélés (avec, pour chacun d'entre eux, quatre étapes distinctes). Cette corrélation suggère un rôle important

de l'océan Austral dans le cycle du gaz carbonique, tandis que la similitude observée avec les variations du méthane suggère que les processus qui affectent les tropiques et l'hémisphère nord (régions où sont localisées les sources de méthane) jouent également un rôle notable sur les teneurs en gaz carbonique de l'atmosphère [31].

Le profil de teneur en deutérium détaillé disponible jusqu'à 45 ka [19,42] montre que chacun des événements rapides dits de Dansgaard/Oeschger (DO) observés au Groenland a une contrepartie systématique (mais de forme différente) en Antarctique. Par ailleurs, Raisbeck et al. [36] se sont appuyés sur une analyse très détaillée de l'isotope cosmogénique béryllium 10 autour de 40 ka, période caractérisée par le pic de production mentionné ci-dessus, pour corréliser les enregistrements climatiques obtenus au dôme C, d'une part, et à GRIP, de l'autre.

La seconde période d'ores et déjà étudiée [11] avec un certain détail est celle comprise entre 435 et 410 ka, qui inclut la terminaison V, la fin du stade 12 qui la précède et le stade 11.3 qui la suit ; elle n'était que partiellement représentée dans la partie profonde de la carotte de Vostok [37], les perturbations de l'écoulement y ayant clairement affecté le stade 12 et la terminaison V. En dehors du fait qu'elle marque la transition entre deux régimes climatiques distincts, cette période présente un double intérêt. D'une part, de nombreux indicateurs suggèrent que le stade 11.3 était une période particulièrement chaude, avec un niveau de la mer peut-être nettement plus élevé qu'aujourd'hui [9], certaines évaluations faisant état d'une hausse pouvant atteindre 20 m par rapport au niveau actuel. D'autre part, cet interglaciaire, très long dans les enregistrements marins, correspond à des conditions d'insolation relativement proches de celles que nous connaissons actuellement, avec une excentricité et donc un forçage lié à la précession faibles [4]. De plus, les mesures disponibles sur la carotte de Vostok et du dôme C suggèrent que les teneurs en CO₂ sont restées équivalentes à celles de l'Holocène. Les températures dans l'Antarctique (c'est-à-dire les teneurs en deutérium) apparaissent, elles aussi, très similaires à celles de l'Holocène pendant les 10 000 premières années du stade 11.3 [11]. Il en est de même pour les teneurs en méthane, dont l'augmentation débute cependant 4 à 5 ka avant celle du gaz carbonique, contrairement à la terminaison I et, plus généralement, aux quatre dernières terminaisons, au cours desquelles gaz carbonique et méthane varient pratiquement en phase [11]. La durée exceptionnellement longue du stade 11.3 est confirmée ; elle est estimée à 28 000 ans, ce qui laisse entrevoir que, sans intervention des activi-

tés humaines, des conditions climatiques proches de celles que nous connaissons actuellement pourraient prévaloir pendant près de 20 000 ans [3,11], d'autant que les conditions de forçage climatique (insolation et gaz à effet de serre) semblent identiques pour ces deux périodes.

4. Le dernier interglaciaire au Groenland

Même s'ils sont perturbés avant 100 ka, les profils isotopiques analysés le long des forages GRIP et North GRIP suggéraient que la période de l'Éémien était, comme indiqué par de nombreux enregistrements (océaniques, continentaux ou glaciaires), plus chaude que l'Holocène. En effet, les 300 m les plus profonds des deux forages du centre du Groenland contiennent de la glace, dont la teneur en oxygène 18 (isotope utilisé de préférence au deutérium comme indicateur climatique par nos collègues danois ou américains) est de 3‰ plus élevée que celle de l'Holocène (–32 et –35‰, respectivement). Une reconstruction de la séquence temporelle du forage GRIP, basée sur la comparaison des concentrations en oxygène 18 et en méthane des bulles d'air incluses dans la glace avec celles de la carotte non perturbée de Vostok, confirme sans ambiguïté que cette glace isotopiquement riche correspond bien à cette période la plus chaude du dernier interglaciaire, de 125 à 120 ka environ [22]. Il n'en reste pas moins que la démonstration, désormais apportée, de cette différence de température entre le dernier interglaciaire et l'Holocène, estimée à 5 °C au Groenland, est un des résultats importants du forage North GRIP [32].

Mais c'est en fait l'accès désormais possible à tout un ensemble de données à très haute résolution lors d'une l'entrée en glaciation qui en constitue le résultat majeur (la période entre 123 et 110 ka est représentée par 130 m de glace). Cette séquence a déjà révélé des similitudes notables avec un enregistrement océanique (entre l'oxygène 18 de la glace et celui de foraminifères planctoniques) obtenu sur un forage réalisé sur la marge ibérique à hauteur du Portugal [41]. Plus surprenant est le fait qu'à North GRIP, l'entrée en glaciation est interrompue, vers 115 ka, par un réchauffement rapide et bien marqué (même si la variation en oxygène 18 de la glace ne représente que le quart de celle observée pour les DO les plus importants). En effet, même si cette variation rapide (DO 25) a des caractéristiques similaires aux événements Dansgaard/Oeschger de la dernière période glaciaire (à partir de DO 24), il est difficile de faire appel au même mécanisme de débâcle d'icebergs ou d'arrivée d'eau douce pour en expliquer l'existence, car les grandes calottes de l'hémisphère

nord (calottes Laurentide et Fenno-scandienne) n'étaient alors qu'au tout début de leur formation [32].

Sur leur partie commune (depuis environ 105 ka), les enregistrements GRIP et North GRIP sont, à première vue, très similaires : les DO répertoriés au centre du Groenland sont aisément identifiés à North GRIP, les amplitudes des changements rapides successifs étant tout à fait comparables. Cependant, des différences notables existent entre les deux profils en oxygène 18 pendant la période glaciaire, celui de North GRIP étant appauvri de 1 à 2‰ par rapport à celui de GRIP [32]. Une explication plausible serait que la calotte Laurentide affecte de façon différente la répartition saisonnière des précipitations à GRIP et à North GRIP, ce second site ayant un caractère continental d'autant plus marqué que le volume de cette calotte est important. Une comparaison plus approfondie a été entreprise sur l'Holocène [30], période pour laquelle les profils des teneurs en deutérium et en oxygène 18 sont disponibles à très haute résolution temporelle (voisine de quatre ans). L'utilisation de modèles isotopiques simples confirme une origine différente des précipitations, ou, tout au moins, de la contribution relative des différentes zones source

La carotte North GRIP est l'objet d'une approche similaire qui est conduite en collaboration entre l'équipe de Berne et celle du LSCE [23,24], avec pour objectif d'obtenir une estimation de l'amplitude du réchauffement associé à chacun des événements de Dansgaard/Oeschger. La méthode s'appuie sur l'existence d'anomalies dans les rapports isotopiques de l'azote et de l'argon dont les anomalies observées (Fig. 5) résultent de façon certaine des processus de fractionnements, thermique et gravitationnel, qui prennent place dans le névé entre la surface de la calotte et la profondeur à laquelle les bulles d'air sont définitivement piégées dans la glace. À chaque réchauffement rapide est associée un anomalie isotopique positive, liée au fait que les gaz diffusent environ dix fois plus rapidement dans le névé que ne le fait la chaleur, ce qui cause une différence temporaire de température entre la surface et la base du névé, elle-même à l'origine d'un fractionnement thermique [39,40]. Ces changements rapides de température sont souvent accompagnés de changements d'accumulation tout aussi rapides, qui modifient, quant à eux, le fractionnement gravitationnel. L'analyse conjointe des isotopes de l'azote et de l'argon offre la possibilité de séparer ces deux effets et donc d'évaluer précisément le fractionnement thermique et l'amplitude du réchauffement, qui lui est directement proportionnelle [23].

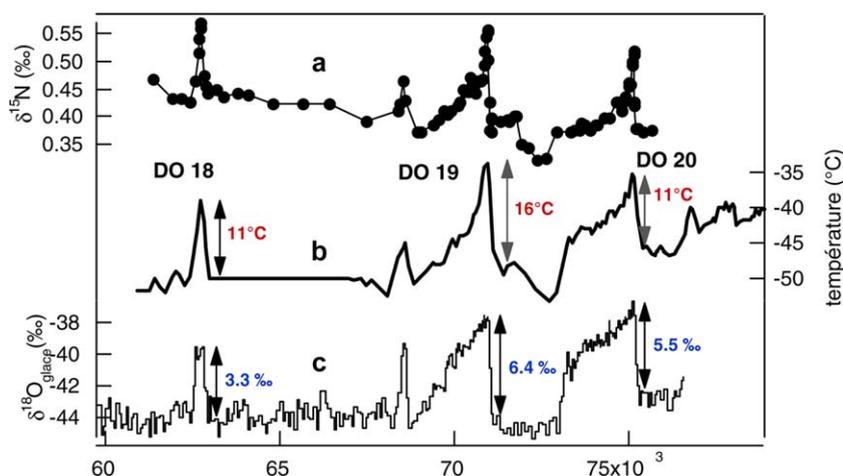


Fig. 5. Cette figure, adaptée de [23], montre les variations de la teneur isotopique de l'azote (courbe a) utilisées avec celles de l'argon pour estimer les variations de la température à North GRIP, où les réchauffements associés aux événements de Dansgaard/Oeschger peuvent atteindre 16 °C (courbe b). La courbe c décrit la variation de la teneur en oxygène 18 dans la glace.

Fig. 5. This figure adapted from [23] shows the nitrogen isotope concentration (courbe a) used, along with argon isotope measurements, to estimate temperature changes along the North GRIP ice core where warming associated with Dansgaard/Oeschger events can reach up to 16 °C (curve b). The lower plot (curve c) gives the variation of the oxygen-18 concentration in ice.

La Fig. 5 illustre cette approche pour une série de trois DO successifs – 18, 19, 20 – avec un événement très bref et de faible amplitude (18a) qui n'avait pas été répertorié lors de l'étude initiale de Dansgaard et al. [8]. La valeur très élevée du réchauffement (16 °C), estimée pour le DO 19 à partir d'une étude similaire conduite sur le forage GRIP [25], est pleinement confirmée à North GRIP [23], non seulement pour cet événement, mais aussi pour le DO 24 [24], au tout début de la dernière période glaciaire (~108 ka). Par ailleurs, avec des réchauffements respectifs de 11, 16 et 11 °C pour les DO 18, 19 et 20, les estimations dérivées de l'analyse isotopique de l'air sont notablement supérieures (d'un peu plus d'un facteur 2 dans le cas du DO 18) à celles qui seraient déduites du profil de teneur en oxygène de la glace (5, 10 et 8 °C, respectivement). L'interprétation conjointe des profils isotopiques de deutérium et d'oxygène 18 dans la glace de GRIP (les deux profils y sont disponibles et sont en cours d'obtention à North GRIP) suggère que cette explication, avancée pour le dernier maximum glaciaire [21,44], vaut également pour les événements rapides.

5. Conclusion

La réalisation de programmes de forages profonds tels ceux conduits au dôme C et North GRIP a demandé près d'une dizaine d'années entre le lancement du projet et l'obtention des premières séries de résultats qui en marquent le succès. Consciente de ces contraintes, la

communauté internationale concernée a d'ores et déjà commencé à établir des plans pour les années à venir. Trois objectifs majeurs sont affichés dans les régions polaires, (i) remonter si possible au-delà du million d'années en Antarctique de l'Est avec l'espoir d'avoir accès à la période caractérisée par une cyclicité proche de 40 ka, (ii) extraire une carotte qui couvre l'ensemble du dernier interglaciaire et atteigne l'avant-dernière période glaciaire au Groenland, et (iii) réaliser un ensemble de carottages intermédiaires dans les régions côtières de l'Antarctique, à la fois pour en préciser le climat à l'échelle régionale et pour mieux appréhender les interactions calotte-climat, volet sur lequel des programmes sont en cours ou en projet.

L'année polaire internationale, qui débutera en 2007, devrait marquer le point de départ des opérations liées aux deux premiers objectifs, avec, d'une part, une reconnaissance de régions encore peu explorées de l'Antarctique de l'Est qui permette de définir celles susceptibles de receler la glace très vieille, et, de l'autre, le début de réalisation d'un nouveau forage au Groenland en un site très prometteur, déjà sélectionné au nord de North GRIP. Mais avant tout, il reste énormément à faire pour extraire l'ensemble des informations que recèlent ces deux carottages profonds du dôme C et de North GRIP (sans parler de celui de la carotte extraite à DML Kohnen, dont l'analyse commence à peine), dont nous avons décrits les premiers résultats. Ceci représente de trois à cinq années de travail dans les différents laboratoires, voire plus pour certains paramètres, avant

de les interpréter en termes de mécanismes climatiques. Comment explique-t-on le changement de rythme observé il y a un peu plus de 400 ka en Antarctique, (c'est là une des découvertes les plus marquantes du forage EPICA), avec des périodes chaudes moins marquées, mais aussi nettement plus longues, plus avant dans le temps ? Quel est le rôle précis des gaz à effet de serre dans le passé et que peut-on en déduire pour des paramètres tels que la sensibilité du climat à venir ? Quels sont les mécanismes mis en jeu lors d'une entrée en glaciation et quelles sont alors les différences entre les deux hémisphères ?

Remerciements

Cet article est basé sur une présentation faite lors des journées *Climats, Cultures et Sociétés aux temps pré-historiques, de l'apparition des Hominidés jusqu'au Néolithique*, qui se sont tenues à l'Institut de France du 13 au 16 septembre 2004. Nous remercions l'ensemble des équipes participant aux projets EPICA et North GRIP et de nombreux collègues pour les discussions très constructives sur les aspects que nous avons abordés, en particulier, Jean-Marc Barnola, Jérôme Chappellaz, Sigfus Jonhson, Amaelle Landais, Valérie Masson-Delmotte, Frédéric Parrenin, Grant Raisbeck, Jim White et Françoise Yiou. Ces travaux ont bénéficié du soutien du PNEDC (Programme national d'étude du climat et de l'environnement), de celui de la Fondation Balzan et des projets européens EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*, mis sur pied par la Fondation européenne pour la science) et POP (*Pole-Ocean-Pole*).

Références

- [1] F.C. Bassinot, L.D. Labeyrie, E. Vincent, X. Quidelleur, N. J. Shackleton, Y. Lancelot, The Astronomical theory of climate and the age of the Brunhes–Matuyama magnetic reversal, *Earth Planet. Sci. Lett.* 126 (1994) 91–108.
- [2] A. Berger, M.-F. Loutre, An exceptionally long interglacial ahead?, *Science* 297 (2002) 1287–1288.
- [3] A. Berger, M.-F. Loutre, Climate 400 000 years ago, a key to the future?, in: A. Droxler, L. Burckle, R. Poore (Eds.), *Earth's Climate and Orbital Eccentricity: The Marine Isotope Stage-11 Question*, Geophys. Monogr. 137, 2003, pp. 17–26.
- [4] T. Blunier, E.J. Brook, Timing of Millennial-Scale Climate Change in Antarctica and Greenland During the Last Glacial Period, *Science* 291 (2001) 109–112.
- [5] K.M. Cuffey, G.D. Clow, R.B. Alley, M. Stuiver, E.D. Waddington, R.W. Saltus, Large Arctic temperature change at the Winconsin–Holocene glacial transition, *Science* 270 (1995) 455–458.
- [6] D. Dahl-Jensen, et al., A search in north Greenland for a new ice-core drill site, *J. Glaciol.* 43 (1997) 300–306.
- [7] W. Dansgaard, Stable isotopes in precipitation, *Tellus* 16 (1964) 436–468.
- [8] W. Dansgaard, S.J. Johnsen, H.B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. S. Guntherstrup, C.U. Hammer, J.P. Steffensen, A. Sveinbjörnsdottir, J. Jouzel, G. Bond, Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record, *Nature* 364 (1993) 218–220.
- [9] A. Droxler, L. Burckle, R. Poore, *Earth's Climate and Orbital Eccentricity: The Marine Isotope Stage-11 Question*, Geophys. Monogr., American Geophysical Union, Washington DC, 2003.
- [10] EPICA Dome C 2001–2002 science and drilling teams, Extending the ice core record beyond half a million years, *EOS* 83 (2002) 509–517.
- [11] E.P.I.C.A. Community, L. Augustin, C. Barbante, P. Barnes, J.-M. Barnola, M. Bigler, E. Castellano, O. Cattani, J. Chappellaz, D. Dahl-Jensen, B. Delmonte, G. Dreyfus, G. Durand, S. Falourd, H. Fischer, J. Flückiger, M. Hansson, P. Huybrechts, G. Jugie, S. Johnsen, J. Jouzel, S. Kipfstuhl, F. Lambert, V. Lipenkov, G. Littot, A. Longinelli, R. Lorrain, V. Maggi, V. Masson-Delmotte, H. Miller, R. Mulvaney, J. Oerlemans, H. Oerter, G. Orombelli, F. Parrenin, D. Peel, J.-R. Petit, D. Raynaud, C. Ritz, U. Ruth, J. Schwander, U. Siegenthaler, R. Souchez, B. Stauffer, J.-P. Steffensen, B. Stenni, T. Stocker, I. Tabacco, R. Udisti, R. van de Wal, M. van den Broeke, J. Weiss, F. Wilhelms, J.-G. Winther, E. Wolff, M. Zucchelli, Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, *Nature* 429 (2004) 623–628.
- [12] J. Flückiger, et al., High-resolution Holocene N₂O ice core record and its relationship with CH₄ and CO₂, *Global Biogeochem. Cycles* (2002) (16 p.); 10.1029/2001GB001417.
- [13] P.M. Grootes, M. Stuiver, J.W.C. White, S.J. Johnsen, J. Jouzel, Comparison of the oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores, *Nature* 366 (1993) 552–554.
- [14] IPCC, *Climate change 2001: The Science of Climate Change*, in: *Contribution of Working Group I to the IPCC third assessment report*, Cambridge University Press, 2001.
- [15] A. Indermüle, T.F. Stocker, F. Joos, H. Fischer, H.J. Smith, M. Wahlen, B. Deck, D. Mastroianni, J. Tschumi, T. Blunier, R. Meyer, B. Stauffer, Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica, *Nature* 398 (1999) 121–126.
- [16] S.J. Johnsen, W. Dansgaard, J.W. White, The origin of Arctic precipitation under present and glacial conditions, *Tellus* 41 (1989) 452–469.
- [17] S.J. Johnsen, D. Dahl-Jensen, W. Dansgaard, N. Gundestrup, Greenland paleotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles, *Tellus* 47B (1995) 624–629.
- [18] S. Joussaume, K.E. Taylor, Status of the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP), *Proc., 1st Int. AMIP Sci. Conf., WCRP 92* (1995) 425–430.
- [19] J. Jouzel, V. Masson, O. Cattani, S. Falourd, M. Stievenard, B. Stenni, A. Longinelli, S.J. Johnsen, J.-P. Steffensen, J.R. Petit, J. Schwander, R. Souchez, N.I. Barkov, A new 27-kyr high-resolution East Antarctic climate record, *Geophys. Res. Lett.* 28 (2001) 3199–3202.
- [20] J. Jouzel, F. Vimeux, N. Caillon, G. Delaygue, G. Hoffmann, V. Masson, F. Parrenin, Magnitude of the Isotope/Temperature scaling for interpretation of central Antarctic ice cores, *J. Geophys. Res.* (2003) 108 (10.1029/2002JD002677).
- [21] G. Krinner, C. Genthon, J. Jouzel, GCM analysis of local influences on ice core δ signals, *Geophys. Res. Lett.* 24 (1997) 2825–2828.

- [22] 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.P. Steffensen, A tentative reconstruction of the Greenland Eemian and glacial inception based on gas measurements in the GRIP ice core, *J. Geophys. Res.* 108 (D18) (2003) (10.1029/2002JD003147).
- [23] A. Landais, J.-M. Barnola, V. Masson-Delmotte, J. Jouzel, J. Chappellaz, N. Caillon, C. Huber, M. Leuenberger, S. J. Johnsen, A continuous record of temperature evolution over a whole sequence of Dansgaard–Oeschger during Marine Isotopic Stage 4 (76 to 62 kyr BP), *Geophys. Res. Lett.* 31 (2004) L22211 (10.1029/2004GL021193).
- [24] A. Landais, V. Masson-Delmotte, J. Jouzel, D. Raynaud, S.J. Johnsen, C. Huber, M. Leuenberger, J. Schwander, B. Minster, The glacial inception recorded in the NorthGRIP Greenland ice core: abrupt temperatures changes toward its end and leads and lags in the climatic sequence, *Clim. Dyn.* (soumis).
- [25] C. Lang, M. Leuenberger, J. Schwander, S.J. Johnsen, 16 °C rapid temperature variation in central Greenland 70 000 years ago, *Science* 286 (1999) 934–937.
- [26] C. Lorius, L. Merlivat, J. Jouzel, M. Pourchet, A 30 000-yr isotope climatic record from Antarctic ice, *Nature* 280 (1979) 644–648.
- [27] C. Lorius, J. Jouzel, D. Raynaud, J. Hansen, H. Le Treut, Greenhouse warming, climate sensitivity and ice core data, *Nature* 347 (1990) 139–145.
- [28] C. Lorius, J. Jouzel, European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA), in: G. Hempel (Ed.), *The Ocean and the Poles, 1995 Grand Challenges for European Cooperation*, Commission of the European Communities and European Sciences Foundation, 1993, pp. 253–263.
- [29] C. Lorius, L. Merlivat, 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, Proc. Grenoble Symposium August–September 1975*, vol. 118, IAHS, Vienna, 1977, pp. 125–137.
- [30] V. Masson-Delmotte, A. Landais, M. Stiévenard, O. Cattani, S. Falourd, J. Jouzel, S.J. Johnsen, D. Dahl-Jensen, A. Sveinbjornsdottir, J.W.C. White, T. Popp, H. Fischer, Greenland Holocene climatic change: different moisture origins at GRIP and North GRIP? *J. Geophys. Res.* (soumis).
- [31] E. Monnin, A. Indermühle, A. Dällenbach, J. Flückiger, B. Stauffer, T. Stocker, D. Raynaud, J.-M. Barnola, Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination from the Dome Concordia, Antarctica ice core, *Science* 291 (2001) 112–114.
- [32] North Greenland Ice-Core Project (NorthGRIP), K. K. Andersen, J.-M. Barnola, M. Bigler, P. Biscaye, N. Caillon, J. Chappellaz, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, H. Fischer, J. Flückiger, Y. Fujii, K. Grønvold, N.S. Gundestrup, M. Hansson, C. Huber, C.S. Hvidberg, S.J. Johnsen, High-resolution climate record of the Northern Hemisphere reaching into the Last Interglacial Period, *Nature* 431 (2004) 147–151.
- [33] F. Parrenin, Datation des forages profonds en Antarctique : Utilisation d'une méthode inverse, thèse, université Joseph-Fourrier, Grenoble, 2002.
- [34] F. Parrenin, J. Jouzel, C. Waelbroeck, C. Ritz, J.-M. Barnola, Dating the Vostok ice core by an inverse method, *J. Geophys. Res.* 106 (2001) 31837–31851.
- [35] J.-R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, J. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. Kotyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzman, M. Stievenard, Climate and Atmospheric History of the Past 420 000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica, *Nature* 399 (1999) 429–436.
- [36] G.M. Raisbeck, F. Yiou, J. Jouzel, Cosmogenic ¹⁰Be as a high-resolution correlation tool for climate records, *Geochim. Cosmochim. Acta*, Goldschmidt Conference, Abstracts, 2002 (A 623).
- [37] D. Raynaud, M.-F. Loutre, C. Ritz, J. Chappellaz, J.-M. Barnola, J. Jouzel, V.Y. Lipenkov, J.-R. Petit, F. Vimeux, Marine Isotope Stage (MIS) 11 in the Vostok ice core: CO₂ Forcing and Stability of East Antarctica, in: A. Droxler, L. Burckle, R. Poore (Eds.), *Earth's Climate and Orbital Eccentricity: The Marine Isotope Stage-11 Question*, *Geophys. Monogr., American Geophysical Union* 137, 2003, pp. 27–40.
- [38] J. Schwander, J. Jouzel, C.U. Hammer, J.-R. Petit, R. Udisti, E. Wolff, A tentative chronology of the EPICA Dome C ice core, *Geophys. Res. Lett.* 28 (2001) 4243–4246.
- [39] J.P. Severinghaus, T. Sowers, E. Brook, R.B. Alley, M.L. Bender, Timing of abrupt climate change at the end of the Younger Dryas interval from thermally fractionated gases in polar ice, *Nature* 391 (1998) 141–146.
- [40] J.P. Severinghaus, E. Brook, Simultaneous tropical–Arctic abrupt climate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice, *Science* 286 (1999) 930–934.
- [41] N. Shackleton, M.A. Hall, E. Vincent, Phase relationship between millennial-scale events 64 000–24 000 years ago, *Paleoceanography* 15 (2000) 565–569.
- [42] B. Stenni, J. Jouzel, V. Masson-Delmotte, R. Roethlisberger, E. Castellano, O. Cattani, S. Falourd, S.J. Johnsen, A. Longinelli, J.-P. Sachs, E. Selmo, R. Souchez, J.-P. Steffensen, R. Udisti, A late-glacial high-resolution site and source late glacial temperature record derived from the EPICA Dome C isotope records (East Antarctica), *Earth Planet. Sci. Lett.* 217 (2004) 183–195.
- [43] O. Watanabe, J. Jouzel, S. Johnsen, F. Parrenin, H. Shoji, N. Yoshida, Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles, *Nature* 422 (2003) 509–512.
- [44] M. Werner, U. Mikolajewicz, M. Heimann, G. Hoffmann, Borehole versus isotope temperatures on Greenland: Seasonality does matter, *Geophys. Res. Lett.* 27 (2000) 723–726.