



HAL
open science

Variabilité climatique rapide en période glaciaire: événements de Dansgaard/Oeschger et de Heinrich et leur enregistrement dans les glaces

Valérie Masson-Delmotte, Amaelle Landais

► To cite this version:

Valérie Masson-Delmotte, Amaelle Landais. Variabilité climatique rapide en période glaciaire: événements de Dansgaard/Oeschger et de Heinrich et leur enregistrement dans les glaces. Lettre PIGB-PMRC France, 2003, 15, (Changement global), pp.9-15. hal-03327666

HAL Id: hal-03327666

<https://hal.science/hal-03327666>

Submitted on 29 Sep 2021

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

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

Variabilité climatique rapide en période glaciaire : les événements de Dansgaard/Oeschger et de Heinrich et leur enregistrement dans les glaces

A la fin des années 1980, les paléoclimatologues ont découvert avec étonnement l'existence de changements climatiques abrupts au cours de la dernière période glaciaire dans le secteur de l'Atlantique Nord. Leur extension géographique et leur origine est au coeur de nombreux travaux de recherche sur le climat.

L'historique des événements «D/O»

Les premiers forages profonds effectués dans les glaces du Groenland dans les années 1960 (Dye 3 et Camp Century, figure 1) ont permis l'analyse isotopique continue de l'eau de ces carottes de glace. Les variations de la composition isotopique de la glace (voir encart) permettent aux chercheurs danois W. Dansgaard et suisse H. Oeschger d'identifier en 1984 des changements très rapides de la température locale au cours de la dernière période glaciaire (entre 100 000 et 12 000 ans avant l'actuel). De nouveaux forages réalisés au sommet de la calotte du Groenland dans les années 1990 (GRIP et GISP2) et 2000 (North GRIP, forage en cours) confirment la présence de 24 événements de «Dansgaard/Oeschger» (D/O) (figure 2) pendant la dernière période glaciaire.

La signature dans les glaces

Ces événements correspondent à des réchauffements importants (plus de la moitié d'un changement glaciaire-interglaciaire) et rapides (des réchauffements d'au moins 10°C susceptibles de se développer en moins de 300 ans, à comparer à la durée d'une entrée ou d'une sortie de glaciation, de l'ordre de 10 000 ans), suivis d'un retour plus lent aux conditions gla-

Rapid climate variability during ice ages : Dansgaard/Oeschger and Heinrich events, and their ice core records

In the late 1980s, paleoclimatologists have discovered to their amazement the occurrence of abrupt climatic changes during the last ice age in the north Atlantic area. Their geographical extension and origin of these events are the focus of much research.

History of the «D/O» events

The first deep drilling operations conducted in the 1960s on the Greenland ice cap (Dye 3 and Camp Century, Figure 1) provided the first continuous isotopic records of the water from these ice cores. The changes in the ice isotopic composition (see inset) enabled Danish researcher W. Dansgaard and Swiss researcher H. Oeschger to identify in 1984 very rapid local temperature changes during the last ice age (from 100 000 to 12 000 years before present). New drillings conducted on the summit of the Greenland ice cap in the 1990s (GRIP and GISP2) and 2000s (NorthGRIP ongoing drilling) confirm the occurrence of 24 «Dansgaard/Oeschger» (D/O) events (figure 2) during the last ice age.

The ice core records

These D/O events correspond to large (more than half the glacial-interglacial amplitude) and fast warmings (temperature increases of 10°C or more in less than 300 years, compared to glacial inception or terminations which typically occur over 10 000 years), followed by a progressive cooling back to glacial conditions. These events follow each other with a pacing of 1500 to 5000 years, and have also been identified in proxies

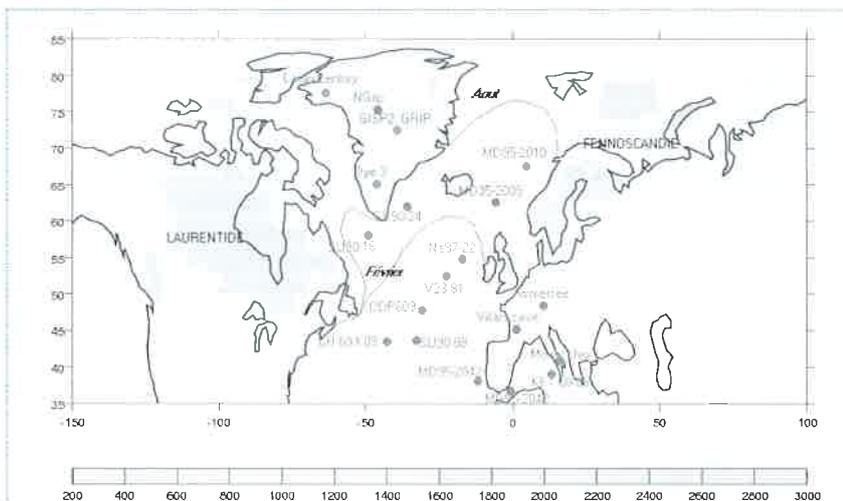


Figure 1 - Carte des environs de l'Atlantique nord en période glaciaire. Les reconstructions d'épaisseur de glace par rapport à l'actuelle (différence période glaciaire moins période actuelle) sont représentées en gris sur les deux calottes principales : Laurentide et Fennoscandie. Des traits pleins indiquent l'étendue de la glace de mer en Août et en Février. Les ronds indiquent certains sites de forage dans lesquels on a enregistré les événements de D/O (carottes de glace, carottes marines, spéléothèmes, forages lacustres).

Map of north Atlantic area during ice ages. The Laurentide and Fennoscandian ice cap thickness are shown in grey. Solid lines indicate the sea-ice extent in February and August. Dots show drilling sites when D/O events have been recorded (ice cores, lake and deep sea sediment cores, speleothems).

Les isotopes dans l'air piégé dans la glace

Les variations de la composition isotopique de l'azote et de l'argon piégés dans les bulles d'air dépendent uniquement des processus physiques de diffusion dans le névé (partie poreuse d'environ 80 m à la surface de la calotte). A l'effet bien connu de la gravité entraînant les isotopes lourds vers la base du névé se superpose un effet de diffusion thermique lors des augmentations rapides de température associées aux événements D/O : le gradient thermique établi lors de la transition (chaud en haut et encore froid à la base) force la diffusion des isotopes les plus lourds vers la base du névé où l'air est piégé et par conséquent l'anomalie isotopique conservée. Cet effet de diffusion par gradient thermique est possible car la chaleur met 10 fois plus de temps que le gaz à diffuser dans le névé. L'intérêt de la mesure conjointe de la composition isotopique de l'azote et de l'argon est de séparer les effets gravitationnel et thermique, ce dernier permettant une estimation quantitative, puisque liée à des processus physiques, connus de la température. De plus, cette mesure de température directement dans l'air permet de connaître de façon précise le déphasage entre augmentation de température et augmentation de la teneur en gaz atmosphériques (CH₄, N₂O,...). On s'affranchit ainsi du problème de la différence d'âge entre la glace et le gaz lié à l'utilisation des isotopes de la glace comme indicateurs de température. Cependant, cette méthode analytique est plus difficilement applicable aux transitions climatiques lentes car l'effet de diffusion thermique y est nul.

Isotopic composition of the air trapped in ice

Changes in the isotopic composition of nitrogen and argon trapped in air bubbles only depend on physical diffusion processes in the firn (the porous upper part of the ice cap, about 80 m deep). In addition to the well-known gravitational effect, which tends to concentrate the heavy isotopes in the bottom of the firn, a thermal diffusion effect during D/O rapid temperature changes also acts to fractionate the gases: the thermal gradient set up during a transition (with a warm surface and a still cold bottom part) causes the diffusion of heavy isotopes towards the firn base, where the air is trapped and the isotopic anomaly well preserved. This thermal gradient diffusion is possible because the gases diffuse 10 times faster than heat diffuses through the firn. The simultaneous measurements of nitrogen and argon isotopic ratios provide a means of separating the gravitational and thermal effects, and, hence, of quantifying the temperature changes. This temperature measurement in the air phase further permits a precise quantification of the phase lag between changes in temperature and changes in atmospheric gas concentrations (CH₄, N₂O...), getting rid of the age difference problem between ice (where the temperature is classically estimated from water stable isotopes) and gases. However, this method presents a challenge for slow climatic transitions, where the thermal diffusion effect is nil.

ciaires. Ces événements se succèdent tous les 1500 à 5000 ans et sont également identifiés dans des indices de changement de circulation atmosphérique (composition chimique de la glace) et de changements de cycle de l'eau via les teneurs atmosphériques de certains gaz à effet de serre (la teneur des bulles d'air de la glace en méthane et en oxyde nitreux augmente de 30% pendant les réchauffements des D/O).

Quelle est l'étendue spatiale de ces bouleversements climatiques ? L'observation de changements importants des teneurs en méthane et oxyde nitreux laisse déjà entendre que de vastes étendues ont été affectées par ces bouleversements climatiques (voir encart sur le méthane). Récemment, les événements de D/O ont également été détectés dans des séries climatiques à haute résolution (quelques dizaines d'années) à des latitudes tempérées et tropicales (pollens, sédiments marins et lacustres, spéléothèmes, etc. ; voir carte figure 1).

La signature dans les sédiments atlantiques

Au cours de la dernière période glaciaire, les sédiments marins de l'Atlantique Nord sont caractérisés par plusieurs événements détritiques, décrits pour la première fois par le géologue allemand Heinrich. Au cours de ces événements, les sédiments de l'Atlantique Nord deviennent brutalement pauvres en micro-organismes (les rares fos-

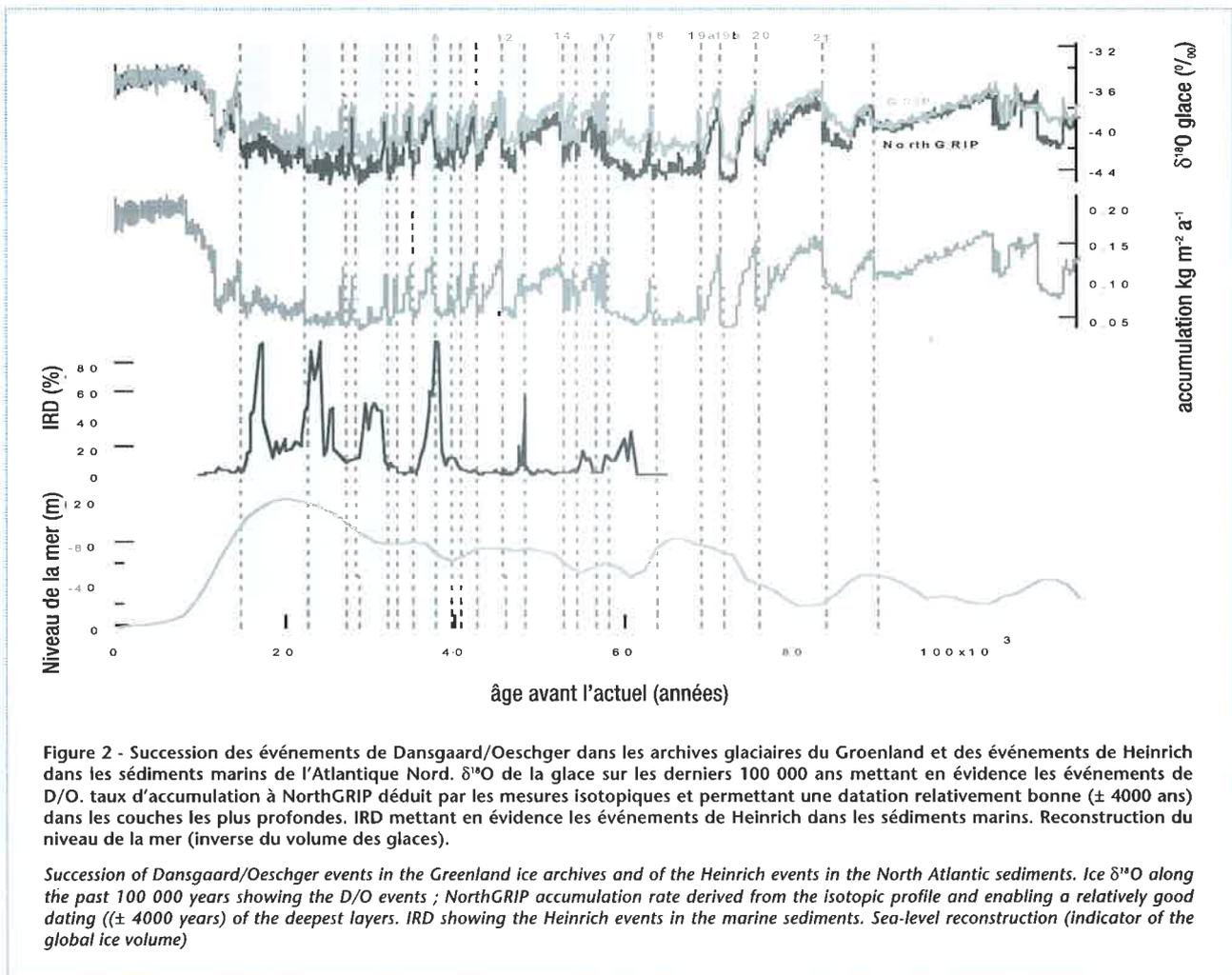
of atmospheric circulation change (chemical composition of the ice) and water cycle changes by way of the isotopic composition of some greenhouse gases (the concentrations of methane and nitrous oxide in air bubbles trapped in the ice increase by 30% during the D/O warmings).

What is the spatial scale of these climatic upheavals? The large changes observed in the atmospheric concentrations of methane and nitrous oxide atmospheric levels already suggest that large areas of the globe undergo large climatic changes (see methane inset). Recently, D/O events have also been detected in high resolution (a few decades) paleoclimatic records at temperate and tropical latitudes (pollens, lake and marine sediments, speleothemes... , see figure 1).

The north Atlantic sediment records

During the last ice age, the north Atlantic deep sea sediments were characterised by several detritic events, described for the first time by German geologist Heinrich. During these events, north Atlantic sediments become abruptly poor in micro-organisms (the scarce fossils reveal a surface water cooling of 2 to 6°C) but contain stones, sometimes larger than 1 cm.

American paleoceanographers Bond and Broecker have shown that these Heinrich events are synchronous over the entire North Atlantic Ocean and that the stones (Ice Rafted



siles témoignent d'un refroidissement des eaux superficielles compris entre 2 et 6°C). En revanche, les sédiments marins contiennent à ces profondeurs des cailloux, dont la taille dépasse parfois le centimètre.

Les paléocéanographes américains G. Bond et W.S. Broecker ont montré que ces événements de Heinrich sont synchrones dans tout l'Atlantique Nord et que ces cailloux (Ice Rafted Detritus ou IRD) sont apportés par des débâcles d'icebergs. L'analyse isotopique des rares foraminifères présents au milieu des IRD, effectuée à Gif-sur-Yvette, a témoigné que la fonte des icebergs s'est accompagnée d'un apport d'eau douce énorme. L'analyse minéralogique des cailloux, effectuées par les groupes de Bordeaux, de Gif-sur-Yvette et du Lamont, indique qu'ils proviennent principalement de la calotte nord-américaine (la Laurentide) mais qu'une partie d'entre eux porte une signature européenne (les calottes d'Islande et de Fennoscandie). Il semble que les cailloux marqueurs du continent européen précèdent l'arrivée des cailloux américains. Ces événements de Heinrich, froids, sont ensuite suivis de réchauffements qui peuvent correspondre à certains Dansgaard/Oeschger des glaces du Groenland.

Detritus or IRD) are carried by iceberg discharges. Isotopic analyses of the scarce foraminifera present among the IRD have shown that the iceberg discharge also brought massive freshwater fluxes. Mineralogical analysis of the stones, conducted in Bordeaux, Gif sur Yvette and Lamont, has revealed that the stones originated predominately from the North American ice sheet (the Laurentide) but that some of them have a European signature (the Fennoscandian and Icelandic ice caps). It appears that the European stones preceded the arrival of the American ones. These cold Heinrich events are then followed by warmings, which may correspond to some of the D/O events detected in the Greenland ice cores.

A final clue : paleoceanographers from Gif-sur-Yvette, discovered smaller but more frequent detritic events in the Norwegian sea, the ends of which correspond to Greenland D/O warmings. This time the associated iceberg discharges come only from the small European ice caps (Fennoscandia or Iceland, see figure 1). These results suggest that the frequent instabilities of the small European ice caps provoked iceberg discharges every 1500 to 5000 years; some of which may have led to the destabilization of the enormous Laurentide ice sheet, thereby triggering the Heinrich events.

L'excès en deutérium

L'excès en deutérium, (défini par : $\delta = \delta D - 8 \delta^{18}O$), dans les molécules d'eau constituant la glace signe la température de la région océanique où s'est produite l'évaporation initiale des masses de vapeur d'eau parvenant aux pôles. En effet, les coefficients de fractionnement à l'équilibre pour le deutérium et l'oxygène-18 ont un rapport d'environ 8 (rapport des masses des atomes d'oxygène et de deutérium), qui contraint au premier ordre un facteur 8 entre les compositions des précipitations dans ces deux isotopes. Au second ordre, dans les processus de fractionnement hors équilibre (évaporation à la surface de l'océan, formation des cristaux de glace), apparaît un fractionnement cinétique supplémentaire dû aux différences de diffusivité des divers isotopes. Cet effet de second ordre justifie la définition d'excès en deutérium. A l'évaporation, ce fractionnement cinétique appauvrit moins la vapeur formée en deutérium qu'en oxygène-18 et dépend des conditions d'évaporation : température de surface, mais également humidité relative de l'air et vitesse du vent. Les modèles de distillation et les modèles de circulation générale de l'atmosphère incluant les isotopes stables de l'eau montrent que le signal de l'évaporation dans l'excès en deutérium est conservé le long de la trajectoire des masses d'air jusqu'aux pôles.

Deuterium excess

The deuterium excess (defined by $\delta = \delta D - 8 \delta^{18}O$) of ice water molecules reflects the temperature of the oceanic area where the initial evaporation of water vapor transported to the poles had occurred. Indeed, the equilibrium fractionation coefficients for deuterium and 18-oxygen have a ratio around 8 (ratio between the oxygen and deuterium masses), which constraints a first order ratio of 8 between the composition of the precipitation of these two isotopes. At the second order, during non equilibrium fractionation processes (ocean surface evaporation, ice crystal formation), the different molecular diffusivities induce an additional kinetic fractionation. This second order effect justifies the definition of the deuterium excess. During evaporation, this kinetic fractionation results in a relatively less intense depletion of water vapour in deuterium compared to 18-oxygen, and depends on the evaporation conditions (surface temperature, but also air relative humidity and wind speed). The distillation models and the atmospheric general circulation models including the explicit modelling of water stable isotopes show that the initial deuterium excess signal imprinted at the moisture source is preserved along the air mass trajectories to the poles.

Enfin, dernier indice, les paléocéanographes de Gif-sur-Yvette découvrent en mer de Norvège des événements détritiques moins importants mais plus nombreux que les événements de Heinrich, et dont la fin coïncide avec les réchauffements de D/O du Groenland. Cette fois les débâcles associées proviennent uniquement des petites

Their origin ?

All of the rapid climatic fluctuations are associated with massive injections of iceberg meltwater into the high latitudes of the North Atlantic. Such freshwater injections may slow down or even suppress deep water formation and profoundly

Isotopes de l'eau et paléotempératures

Les teneurs en deutérium (rapport D/H) et en oxygène 18 (rapport $^{18}O/^{16}O$) dans les molécules d'eau constituant la glace permettent d'estimer les températures du passé. Le cycle atmosphérique de l'eau (depuis l'évaporation à la source jusqu'à la précipitation sous forme de neige dans les régions polaires) implique de nombreux changements de phase liquide-vapeur-neige aux cours desquels il y a fractionnement : la phase condensée est isotopiquement enrichie par rapport à la phase vapeur et d'autant plus enrichie que la température est froide (effet de distillation). Il en résulte pour les régions polaires une croissance linéaire entre la température de surface (reliée simplement à la température de formation de la précipitation) et la composition isotopique. Cet effet linéaire est mesuré par des traverses au Groenland et en Antarctique : à chaque site, on mesure teneur isotopique de la neige précipitée et température de surface. La relation linéaire obtenue est ensuite appliquée pour retrouver les températures du passé avec l'hypothèse forte que cette relation était la même dans le passé. Cette dernière hypothèse a été fortement remise en question par une méthode s'appuyant sur l'inversion des mesures de température dans les trous de forage et par l'analyse isotopique de l'air piégé dans la glace.

Water stable isotopes and paleotemperatures

The content of deuterium (D/H) and 18-oxygen ($^{18}O/^{16}O$) in water molecules of ice enable to estimate past temperatures. The atmospheric water cycle (from the source evaporation to the polar snowfall) implies numerous liquid-vapor-ice phase changes during which isotopic fractionations occur: the condensed phase is isotopically enriched compared to the vapor phase, and its enrichment depends on the temperature (distillation effect). As a result, a linear correlation is observed in polar regions between surface temperature (simply related to condensation temperature) and snow isotopic composition. This linear effect is measured on traverse data from Greenland and Antarctica: for each site, the surface temperature and the surface snow isotopic composition are measured. The linear slope obtained this way is then used to reconstruct past temperatures, with the strong hypothesis that this relationship was stable in the past. This last hypothesis has been strongly questioned by the borehole thermometry method and by the isotopic analysis of the air trapped in ice.

calottes glaciaires européennes (Fennoscandie ou Islande, voir figure 1). Ces résultats suggèrent que les instabilités fréquentes des petites calottes européennes ont provoqué tous les 1500 à 5000 ans des débâcles d'icebergs ; certaines de ces débâcles ont pu entraîner la déstabilisation de l'énorme calotte Laurentide, provoquant ainsi les événements de Heinrich.

L'origine ?

Toutes les variations climatiques rapides sont accompagnées de fonte massive d'icebergs dans les hautes latitudes de l'océan Atlantique Nord. De telles injections d'eau douce sont susceptibles de ralentir, voire supprimer les formations d'eau profonde et de perturber profondément la circulation globale de l'océan. Les changements climatiques rapides en période glaciaire sont donc très certainement reliés à des changements de modes de la circulation thermohaline glaciaire, avec un mode froid et stable (sans convection profonde en Atlantique Nord) et un mode plus chaud et instable avec convection profonde en Atlantique Nord (correspondant aux phases chaudes des D/O). La « bascule » du transport nord-sud de chaleur associé à ces changements de circulation thermohaline semble confirmée au moins pour quelques événements marqués (8, 12, 17), à la sortie d'événements de Heinrich : l'Antarctique se réchauffe alors que le Groenland est encore froid ; lorsque le Groenland se réchauffe brutalement, l'Antarctique entame un refroidissement.

Cependant, même si l'implication de la circulation thermohaline est reconnue, la cause de ce basculement entre deux modes reste encore à déterminer : est-ce une oscillation interne à l'océan ? Une oscillation couplée entre océan et calottes glaciaires ? Faut-il des forçages externes au système climatique pour les déclencher ? Ces oscillations sont-elles présentes même faiblement pendant les périodes interglaciaires ? Autant de sujets de recherche...

Certains modèles simplifiés d'océan suggèrent, sans intervention des calottes glaciaires, une oscillation naturelle à une période de 1500 ans entre deux modes instables. Des processus de résonance de modes propres du système climatique par rapport à des forçages cycliques externes (par exemple une périodicité assez controversée de 1500 ans dans l'irradiance solaire) sont aussi envisagés pour faire basculer la circulation océanique d'un mode à l'autre à partir d'un certain seuil. Ce seuil serait variable en fonction de l'état du système océan-atmosphère-calotte (par exemple avant et après un événement de Heinrich) ; on expliquerait ainsi que la période des événements D/O ne soit pas toujours 1500 ans mais parfois le double ou le triple. Enfin d'autres études récentes recherchent une origine tropicale aux événements D/O se basant sur l'énorme réservoir de chaleur et de sel du Pacifique tropical et son rôle majeur sur la variabilité interannuelle du climat moderne et du cycle de l'eau (El Niño).

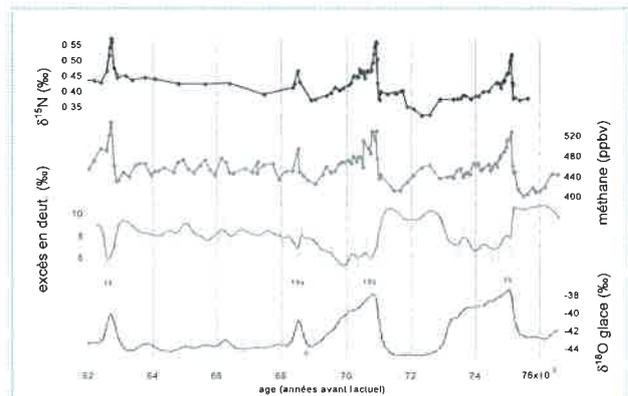


Figure 3 - Succession des Dansgaard/Oeschger 18, 19 et 20 sur les données de GRIP et NorthGRIP : $\delta^{15}\text{N}$ de l'air mettant en évidence les changements rapides de température de surface (gradient transitoire de température dans le névé) (NorthGRIP) ; méthane atmosphérique (NorthGRIP) ; excès en deutérium mettant en évidence une température de source plus faible pendant les périodes chaudes (excès en deutérium plus faible) (GRIP) ; $\delta^{18}\text{O}$ de la glace (NorthGRIP) montrant l'évolution de la température au site de forage.

Succession of Dansgaard/Oeschger events 18, 19 and 20 on GRIP and NorthGRIP data : air $\delta^{15}\text{N}$ showing the rapid changes in surface temperature (transient firn temperature gradient) from northGRIP; atmospheric methane from NorthGRIP; deuterium excess showing a colder source during warm periods (GRIP); ice $\delta^{18}\text{O}$ (NorthGRIP) showing the evolution of local temperature \pm 4000 years of the deepest layers. IRD showing the Heinrich events in the marine sediments. Sea-level reconstruction (indicator of the global ice volume)

modify the global ocean circulation. Rapid climatic changes during ice ages are very certainly linked to changes in the modes of the glacial thermohaline circulation, with a cold and stable mode (without deep convection in the north Atlantic) and a warm and unstable mode with deep convection in the north Atlantic (corresponding to the warm part of the D/O). These changes in the thermohaline circulation result in a seesaw of north-south heat transport, which seems confirmed for at least several marked events (8, 12, 17), at the end of Heinrich events; when Greenland is abruptly warming, Antarctica is cooling down.

However, even if the role of the thermohaline circulation is acknowledged, the cause of the seesaw between two modes must still be determined : is it an oscillation internal to the ocean? A coupled oscillation between the ocean and the glacial ice caps ? Are external forcings outside of the climate system necessary to activate them ? Are these oscillations also persistent, even weakly, during interglacial periods ? These questions are the subjects of current research projects...

Some simplified ocean models, excluding ice caps, suggest the existence of a natural oscillation with a 1500 year lag between two unstable modes. A possible resonance between the internal modes of the climate system and cyclical external forcing (such as a controversial 1500 year periodicity in solar irradiance) has also been proposed as a threshold mechanism for activating a shift in the ocean circulation

Le méthane et l'oxyde nitreux

Le méthane et l'oxyde nitreux ont été mesurés en détail sur certains événements D/O. L'amplitude de leurs variations n'est pas constante : pour le méthane, on observe des augmentations de 50 à 250 ppbv qui prennent place en quelques décennies à quelques centaines d'années (300 ans) ; pour l'oxyde nitreux, ces variations vont de 20 à 50 ppbv et sont beaucoup plus lentes (quelques centaines d'années). Les causes de ces variations demeurent incertaines. Les augmentations du méthane trouvent probablement leur origine dans l'impact des réchauffements D/O sur le cycle hydrologique et l'étendue des zones humides dans les régions boréales et tropicales. En moyenne l'amplitude des augmentations de méthane équivalent à l'apparition ou la disparition de zones humides couvrant plusieurs millions de km² ; en soit, ce simple parallèle révèle l'étendue spatiale considérable probablement affectée par les événements climatiques rapides du glaciaire. Par ailleurs une autre explication controversée porte sur la possibilité de dégazages catastrophiques d'hydrates de méthane piégés dans les fonds océaniques. Les taux d'augmentation (et leur régularité) du méthane observés à ce jour dans les carottes de glace ne vont pas dans le sens d'une telle cause mais l'hypothèse ne peut pas être invalidée pour autant. Pour les variations de l'oxyde nitreux, là aussi le cycle hydrologique pourrait en être l'origine, au travers des cycles de nitrification/dénitrification dans les sols dépendant de l'humidité de ces derniers. L'espoir d'améliorer notre compréhension du couplage entre variations abruptes du climat et teneurs en méthane et oxyde nitreux passe par le développement de bilans isotopiques sur ces gaz ; un travail difficile et de longue haleine qui occupera les glaciologues durant les années à venir...
Contact : Jérôme Chappellaz, Chappellaz@lgge.obs.ujf-grenoble.fr.

Methane and nitrous oxide

The methane and nitrous oxide have been measured in detail along some D/O events. The amplitude of their variations is not constant: for methane, concentration increases from 50 to 250 ppbv during several decades to one century have been observed; for nitrous oxide, these variations range from 20 to 50 ppbv and are much slower (several centuries). The causes of these variations remain uncertain. Methane increases probably originate from the impact of D/O warming on the hydrological cycle and the extent of boreal and tropical wetlands. In average, the amplitude of methane increases corresponds to the appearance or disappearance of wetlands covering several millions of km². This fact reveals the huge spatial scale of glacial rapid climatic changes. Another controversial explanation invokes catastrophic degassing of methane hydrates trapped in bottom of the ocean. The rates of ice core methane increase and their regularity do not favor such a mechanism, which can however not be fully discarded. The fluctuations of nitrous oxide may also be related to changes of the hydrological cycle through nitrification/denitrification cycles in the soils, depending on the soils wetness. The hope to improve the understanding of the links between climatic changes and methane and nitrous oxide budgets requires the development of isotopic budgets for these gases, a difficult, long and exacting task which will take up much of the glaciologists time during the next years. Contact : Jérôme Chappellaz ; Chappellaz@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

Quantification du signal dans les glaces ?

Même si la compréhension des mécanismes climatiques doit passer par une approche globale incluant les tropiques, nous n'avons pas fini de faire parler les glaces polaires. Si la composition isotopique de la glace a permis de détecter les événements de D/O comme réchauffements rapides de la température locale, la quantification de ces variations reste difficile. En particulier, les changements de température glaciaire-interglaciaire estimés par l'inversion du profil de la température mesurée dans le trou de forage suggère une amplitude beaucoup plus forte que celle déduite des isotopes de l'eau. Ce sont les modèles de circulation générale de l'atmosphère qui ont permis de résoudre cette apparente contradiction : le changement de température glaciaire-interglaciaire est probablement élevé (typiquement 20°C) mais s'accompagne d'un changement de circulation atmosphérique et de saisonnalité des précipitations. La présence des calottes et la couverture de l'Atlantique Nord par la banquise en hiver inhibe l'évaporation et décale les passages dépressionnaires vers le Sud. Au final, la composition isotopique des neiges tombées en période glaciaire reflète

modes. This threshold would be dependent on the mean state of the ocean-atmosphere-ice cap system (for instance before and after a Heinrich event); this would explain why the D/O events are not recurrent with a pacing of 1500 years but sometimes two or three times more distant. Lastly, recent studies focus on a tropical cause for D/O events, based on the giant heat and salinity storage capacities in the tropical Pacific and its dominant role on modern climate and water cycle interannual variability (El Niño).

Quantification of the ice core signal ?

Although our understanding of the climatic mechanisms requires a global approach including the role of the tropics, ice cores have not yet had their last word. While the ice isotopic composition revealed the presence of the D/O as local temperature increases, the quantification of these variations is still difficult. Indeed, the glacial-interglacial changes estimated by borehole thermometry suggest a much larger temperature change than estimated from the stable isotopes of water. The atmospheric general circulation models have resolved this apparent contradiction : the glacial-interglacial

une température d'été et non une moyenne annuelle, biaisant les reconstructions vers le chaud (voir encart isotopes de l'eau et paléotempérature).

Les changements de région source des précipitations sont également enregistrés dans la composition isotopique de la glace (voir encart excès en deutérium) ; quand les hautes latitudes sont froides, et probablement englacées, la région source des précipitations se décale vers le Sud et sa température augmente (voir figure 3). Les analyses d'excès en deutérium sont actuellement en cours au LSCE pour le forage de NorthGRIP.

Enfin, une nouvelle méthode de quantification de changements abrupts de température a été initiée récemment par J. Severinghaus grâce à l'analyse isotopique de l'air piégé dans la glace (voir encart isotopes de l'air). Les analyses conduites au LSCE pour plusieurs D/O des forages de GRIP et NorthGRIP concluent à un réchauffement local de plus de 10°C (environ 1/3 de plus que l'interprétation classique des isotopes de l'eau). Cette même méthode a également permis de montrer que les variations de température du Groenland sont exactement en phase avec les augmentations de méthane au cours de quelques événements de D/O déjà étudiés (événement 12 à GRIP et 18,19 et 20 à NorthGRIP). Ces deux nouvelles techniques (excès en deutérium, isotopes des gaz) ouvrent de nouvelles perspectives et, combinées à des simulations climatiques transitoires, permettront d'améliorer notre compréhension de cette variabilité climatique.

Conclusion

L'étude des climats du passé a permis de mettre en évidence l'existence de changements intenses et rapides en période glaciaire, mettant en jeu la réponse de la circulation océanique profonde à des changements de flux d'eau douce à la surface de l'Atlantique Nord. Des études de sensibilité conduites avec des modèles de climat simplifiés suggèrent que des mécanismes similaires pourraient se produire également dans le contexte d'un climat plus chaud, et plus humide, si les émissions des gaz à effet de serre dans l'atmosphère se poursuivent au même rythme au cours des prochains siècles...

La participation française aux campagnes océanographiques IMAGES du Marion-Dufresne et à la logistique des forages polaires est prise en charge par l'IPEV (Institut polaire Paul-Emile Victor) ; les analyses isotopiques des glaces sont financées par le CEA, le CNRS via le Programme National d'Etude du Climat, et la Commission Européenne (projets européens EPOC, POP et EPICA).

temperature change is probably very high (typically 20°C in Greenland) and is associated with a change in atmospheric circulation and seasonality of the precipitation. The large ice caps and the north Atlantic winter sea-ice cover inhibit evaporation and shift the storm tracks southwards. Finally, the glacial snow isotopic composition reflects summer temperature and does not integrate an annual mean, leading to a warm bias in the temperature estimates (see inset on water stable isotopes and paleotemperatures).

Changes in the precipitation moisture source are also recorded in the ice isotopic composition (see inset on deuterium excess) ; when high latitudes are cold and icy, the precipitation moisture source shifts to the south and its temperature increases (see figure 3). The deuterium excess analyses are currently being processed at LSCE for the NorthGRIP ice core.

Finally, a new method to quantify abrupt temperature changes has recently been established by J. Severinghaus using the isotopic analysis of the air trapped in the ice (see inset). Measurements conducted at LSCE on several GRIP and NorthGRIP D/O events show a warming of more than 10°C (1/3 more than the classical water stable isotope reconstruction). The same method has also been used to demonstrate that Greenland temperature shifts occur exactly in phase with methane fluctuations during D/O 12 (GRIP) and 18-19-20 (NorthGRIP). These two new techniques (deuterium excess and gas isotopes) open new horizons and, combined with transient climatic simulations, will improve our understanding of this climatic variability.

Conclusion

Paleoclimatic studies have brought to light the existence of intense and rapid climatic changes during ice ages, and highlighted the role of the deep ocean circulation in changes in the North Atlantic surface freshwater flux. Sensitivity studies conducted with simplified climate models suggest that similar processes may well take place in a warmer, wetter climate, if greenhouse gas emissions continue to increase at the current rate into the coming centuries.

Contact : Valérie Masson-Delmotte et Amaelle Landais
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
UMR CEA-CNRS de l'Institut Pierre-Simon Laplace
L'Orme des Merisiers, Bât. 709, CEA Saclay
91 191 Gif-sur-Yvette cedex
masson@lsce.saclay.cea.fr
landais@lsce.saclay.cea.fr