



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 647–656



Géophysique externe, climat et environnement (Climat)

## Climat et atmosphère : la mémoire des glaces

Dominique Raynaud\*, Claude Lorius

*Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (CNRS et université Joseph-Fourier),  
54, rue Molière, domaine universitaire, BP 96, 38402 Saint-Martin-d'Hères cedex, France*

Accepté le 5 janvier 2004

Rédigé à l'invitation du Comité éditorial

---

### Résumé

La glace des calottes polaires enregistre la composante atmosphérique des changements climatiques passés. Ces données viennent donc compléter les informations fournies par les sédiments marins et les archives continentales. La reconstruction de l'évolution des gaz à effet de serre constitue une des spécificités de l'étude des carottes de glace. Elle permet d'analyser le rôle de ces gaz dans le forçage des cycles glaciaires–interglaciaires. L'enregistrement actuel couvre les quatre derniers cycles climatiques (420 000 ans) et souligne le rôle majeur du CO<sub>2</sub> dans ce forçage. L'enregistrement existant est en passe d'être étendu aux derniers 800 000 ans. Cette extension devrait permettre d'investiguer des conditions climatiques différentes et ainsi d'évaluer notre capacité à prédire l'évolution future du climat. La glace, qui documente aussi les périodes plus récentes et suggère un lien marqué entre gaz à effet de serre et le réchauffement séculaire récent, fournit donc des informations pertinentes pour l'évaluation du climat futur. *Pour citer cet article : D. Raynaud, C. Lorius, C. R. Geoscience 336 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Atmospheric properties of past climatic changes are recorded in the polar ice.** They complement the information obtained from marine and continental sediments. Reconstructing the evolution of greenhouse gases is one of the specificity of the ice core analysis, which allows us to investigate the contribution of the greenhouse effect in the climatic forcing of the glacial–interglacial cycles. The available record covers four climatic cycles (the last 420 000 years) and highlights the important forcing role of CO<sub>2</sub>. New ice is now available and the record should soon cover approximately the last 800 000 years, offering the possibility to investigate different climatic conditions and to better evaluate our predictive capacity for future climate. The ice record, which carries also information on more recent time scales and suggests a marked link between the anthropogenic increase of greenhouse gases and the secular warming, thus provides valuable information for evaluating our future climate. *To cite this article: D. Raynaud, C. Lorius, C. R. Geoscience 336 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* carottes de glace ; gaz à effet de serre ; forçages climatiques ; sensibilité climatique

*Keywords :* ice cores; greenhouse gases; climatic forcing; climate sensitivity

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [raynaud@lgge.obs.ujf-grenoble.fr](mailto:raynaud@lgge.obs.ujf-grenoble.fr) (D. Raynaud).

### Abridged English version

Deep ice coring in Antarctica and Greenland provides unique archives of the climate and atmosphere of our planet. The Antarctic ice sheet contains the oldest records, covering potentially one million of years or more, and the most reliable record of atmospheric CO<sub>2</sub>. The longest available records are those of the Dome Fuji and Vostok ice cores, which cover, respectively, the last 300 000 years (300 ka) and 420 ka. The new EPICA DC core recovered in 2003 should extend the record to the last 800 ka. In Greenland, three cores cover the last 100 ka or slightly more. The north–south climatic connection during the last glacial–interglacial cycle can be investigated through the comparison between Antarctic and Greenland records.

Ice cores taken in high accumulation area also enable us to sample with appropriate resolution more recent periods, as the Holocene and the last millennium.

After stressing the specificity of the palaeoclimatic ice record (Section 2), the paper reviews the information carried by the ice record on the forcing role of greenhouse gases on climate (Section 3), addresses new perspectives that should arise from the recent time extension of the record to the last 800 ka (Section 4), and concludes on the ice contribution to the understanding of the climatic system (Section 5).

The polar ice records atmospheric properties of past climatic changes and thus complements the information obtained from marine and continental sediments. It provides, in particular, the only reliable palaeoarchive that directly records atmospheric composition in the form of trapped air bubbles, and allows the reconstruction of the past evolution of important greenhouse trace gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O).

It took nearly one century before the ice record [7,10] confirms the Arrhenius prediction [2] that the cooling corresponding to the establishment of the last ice age could result from a decrease of about 40% of the atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. Since these pioneering works, the Vostok ice record demonstrated that this conclusion was valid for the last four glacial–interglacial cycles [27]. The Vostok record highlights the fact that CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> are highly correlated to these climatic cycles [3,9,27], which are modulated by the orbital periodicities (100, 40,

20 ka). Various proxies recorded in the Antarctic ice also allow us to investigate the phase relationship between different radiative forcings, like greenhouse gases or northern hemisphere ice sheet changes. They indicate that, during the climatic transitions [26,27] and at the 100-ka period [31], the variations of the greenhouse gases (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) precede those of the northern ice sheets by several thousands of years. Furthermore, the ice record indicates that the Antarctic glacial–interglacial warming precedes the increase in greenhouse trace gases by a few hundred years [8,12,25], and the major Greenland warming by a few thousands of years [26,27]. These evidences, combined with the efforts made for quantifying the different perturbations to the energy balance of the planet during a glacial–interglacial transition ([14], [16 (and references herein)], [17,22]), lead to the conclusion that the increase in greenhouse trace gases, and especially in CO<sub>2</sub>, first, and then the shrinkage of the northern ice sheets, played a major role in amplifying the weak initial forcing due to the orbital eccentricity.

The recent extension of the ice record (800 ka expected from the EPICA DC core) open new perspectives concerning the behaviour of atmospheric CO<sub>2</sub> under different conditions of the Quaternary climate, in particular during a period when the 40-ka cycle was predominant instead of the 100-ka cycle. It will also allow, for the first time, to investigate the complete atmospheric record of marine isotopic stage 11 (MIS 11), which should provide a pertinent evaluation of our capacity to predict the evolution of the Holocene in the absence of any anthropogenic perturbation.

Finally, the ice record also carries information on more recent time scales, which suggests a marked link between the anthropogenic increase in greenhouse gases and the secular warming. The palaeoapproach described above should provide an appropriate test of the capacity of the GCMs (General Circulation Models) to simulate the past climatic changes and thus to verify how reliable they are to simulate future climate. In particular, the palaeosimulations can be used for evaluating the climate sensitivity of a variation in CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> or N<sub>2</sub>O.

## 1. Introduction

Les calottes de glace des régions polaires, et en premier lieu l'Antarctique et le Groenland, constituent des archives uniques de notre planète. Pour échantillonner ces archives sur de longues échelles de temps, des carottages de plusieurs milliers de mètres sont nécessaires et constituent souvent encore aujourd'hui de véritables challenges technologiques. C'est ainsi que, dès les années 1960, les premiers forages profonds effectués à Camp Century, au Groenland, et Byrd, en Antarctique, ont initié une ère nouvelle dans l'étude du Climat et de l'Environnement de notre planète.

L'Antarctique contient les archives les plus vieilles, remontant potentiellement au-delà du million d'années (Fig. 1). La carotte de Dôme Fuji couvre les derniers 300 000 ans (300 ka), celle de Vostok les derniers 420 ka, et la nouvelle carotte DC EPICA devrait couvrir les derniers 800 ka. Ces carottes permettent de reconstruire des caractéristiques fondamentales de l'évolution du climat et de la composition de l'atmosphère sur plusieurs cycles climatiques glaciaires–interglaciaires.

Au centre du Groenland, trois carottages profonds – GRIP, GISP2 et NGRIP – permettent aujourd'hui d'avoir un précieux enregistrement continu provenant

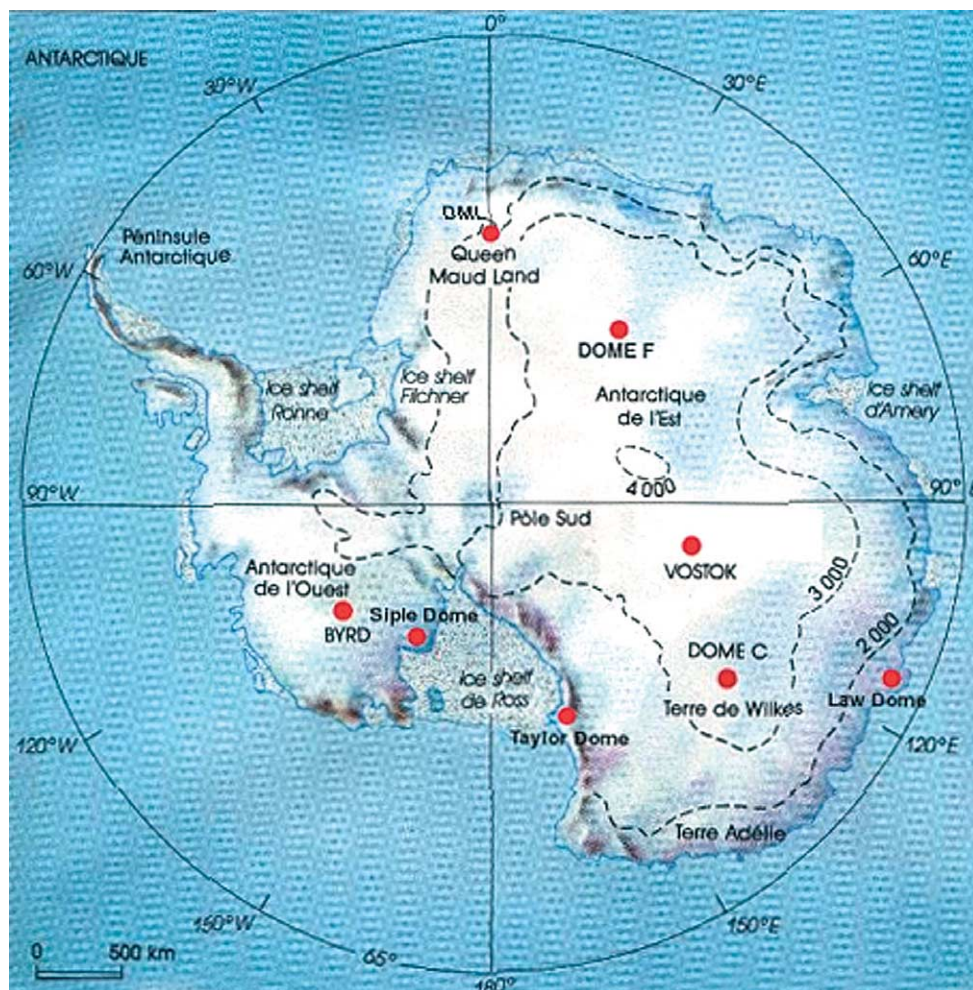


Fig. 1. Carte de l'Antarctique : localisation des sites de forage mentionnés dans le texte.

Fig. 1. Map of Antarctica: location of drilling sites quoted in the text.

des latitudes boréales sur le dernier cycle glaciaire–interglaciaire, c’est-à-dire en gros sur les derniers 100 ka. En revanche, pour le CO<sub>2</sub>, l’enregistrement antarctique est le plus fiable [28], en raison du contenu relativement élevé en impuretés de la glace du Groen-

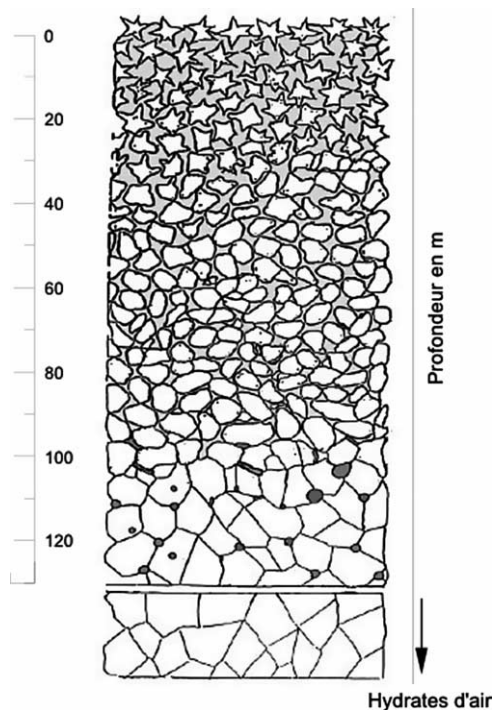


Fig. 2. Piégeage de l’air dans la glace (les profondeurs portées sur la figure correspondent au site de Vostok). Sur les premiers mètres de névé, l’air est bien mélangé par convection. Plus en profondeur, l’air se retrouve à l’état statique. Au fond de la colonne de névé, l’air est alors totalement isolé des échanges avec l’extérieur et se retrouve emprisonné sous forme de bulles dans la glace. En conséquence, l’âge de l’air piégé au fond de la colonne de névé a une distribution (et non une date précise) qui varie d’une dizaine d’années pour les sites relativement chauds et à haute accumulation à plusieurs centaines d’années pour les sites situés en régions centrales de l’Antarctique. De plus, le piégeage de l’air s’effectue en profondeur et donc l’âge de l’air des bulles est plus jeune que celui de la glace qui l’entoure. Cette différence d’âge peut être calculée avec un modèle de densification, et on peut ainsi disposer d’une échelle de temps commune pour les gaz et la glace. Après la fermeture des bulles, leur taille diminue et la pression de l’air augmente. Plusieurs centaines de mètres plus en profondeur, les bulles progressivement disparaissent et les molécules d’air se trouvent alors encagées dans la matrice glace sous forme d’hydrates d’air (nommées aussi clathrates). Lorsque toutes les bulles se sont transformées en clathrates, la composition de l’air extrait de la glace se trouve inchangée par rapport à celle des bulles initiales.

land qui peut conduire à une production de CO<sub>2</sub> in situ, dans la glace, par interactions carbonate–acide ou par oxydation de matière organique [1,11,15].

Des carottes prélevées en des sites présentant des taux d’accumulation de la neige suffisamment élevés permettent d’obtenir, sur des périodes plus courtes et en particulier sur l’Holocène, des enregistrements climatiques à plus haute résolution.

Les archives glaciaires permettent aussi de documenter l’ère industrielle et donc de faire le lien entre l’enregistrement climatique à long terme avec l’enregistrement instrumental mesuré directement dans l’atmosphère et qui s’est largement développé au cours du XX<sup>e</sup> siècle.

Une revue exhaustive des informations provenant des carottes de glace est hors de portée de ce numéro spécial des *Comptes rendus Geoscience*. Cependant, parmi les découvertes révélées par l’étude des archives glaciaires, il en est deux qui contribuent de façon tout à fait unique à la compréhension du système climatique :

- la reconstruction de l’évolution des traces gazeuses à effet de serre au cours du Quaternaire récent, rendue possible par l’échantillonnage quasi-direct de l’atmosphère à travers le piégeage des bulles d’air par la glace ;
- la découverte de changements abrupts du climat au cours du passé, les événements Dansgaard–Oeschger, et de leur réponse bipolaire, obtenue grâce à la synchronisation possible des ca-

Fig. 2. Trapping of the air by the ice (the depth scale corresponds to the site of Vostok). In the top few meters of firm, air is well mixed by convection. Below this zone, the air in the firm is static and an equilibrium between molecular diffusion and gravitational setting is reached for each gas component. The bottom of the firm column is a non-diffusive zone where the bubbles close off. An ice sample corresponds to a large number of bubbles, which have been generally closing-off at different time periods. As a consequence the air trapped at the bottom of the firm column has an age distribution (varying from about 10 to a few hundred years), which depends on temperature and accumulation rate. Another consequence is that the age of the air in the bubbles at close-off is less than the age of the surrounding ice. This difference in age can be calculated using a model for the firm densification process. After the bubble close-off and the ice is buried, the bubble size decreases and the air pressure progressively increases in the bubbles. Several hundred meters below the surface, the elevated pressure leads to the formation of air clathrates. At the equilibrium (all the bubbles being transformed into clathrates) the composition of the air extracted from the clathrates is identical to the initial composition in the bubbles.

rottes groenlandaises et antarctiques. Cette dernière perspective fait l'objet de l'article de Labeyrie et Jouzel dans le présent numéro.

Pour nous limiter au premier point, nous exposons d'abord les raisons pour lesquelles la glace offre des archives uniques. Puis nous analysons les informations apportées par la glace en ce qui concerne le rôle des gaz à effet de serre dans le forçage climatique des cycles glaciaires–interglaciaires (Section 2). Dans une troisième section, nous abordons les nouvelles perspectives que devrait offrir l'extension de l'enregistrement glaciaire à quatre cycles glaciaires–interglaciaires supplémentaires. Enfin, la conclusion (Section 4) porte sur l'apport des archives glaciaires à la compréhension du système climatique et donc à notre capacité de le modéliser en vue de simuler l'évolution du climat futur.

## 2. Pourquoi la glace constitue-t-elle des archives uniques du climat ?

Les glaciers et particulièrement les calottes de glace situées dans les régions polaires constituent des archives paléoclimatiques et environnementales de notre planète. Ceci est dû à la capacité de la neige nourricière d'échantillonner les poussières et aérosols de l'atmosphère, d'enregistrer la température à laquelle elle s'est formée, et de se transformer en un solide étanche, la glace, qui incorpore des bulles d'air atmosphérique.

Cet archivage se fait essentiellement en deux temps. La neige, en se déposant à la surface, échantillonne par lessivage les poussières et les aérosols atmosphériques, et sa composition isotopique en oxygène 18 ou en deutérium enregistre la température de condensation des nuages qui reflète la température du site de dépôt [21]. Puis, comme indiqué sur la Fig. 2, la neige va progressivement se transformer en un matériau à porosité fermée : la glace avec ses bulles qui, au moment de leur fermeture, vont échantillonner l'air ambiant. Cette transformation dure de quelques dizaines à quelques milliers d'années suivant les sites et donc l'âge de l'air piégé dans la glace est plus jeune que la glace elle-même et que son contenu en poussières et aérosols.

La glace des calottes polaires va ainsi archiver, de façon unique, les conditions climatiques des très hautes latitudes. Ceci est particulièrement important du fait de la forte sensibilité de ces régions aux changements climatiques. Mais surtout la glace est le seul milieu connu qui permet d'échantillonner au cours du temps, et de façon quasi-directe, une parcelle d'air représentative de l'atmosphère globale, en particulier en Antarctique, ouvrant ainsi la voie à la reconstruction de l'évolution passée des traces gazeuses contribuant à l'effet de serre, telles que le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O.

De plus, la composition isotopique de l'oxygène de l'air contenu dans la glace ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{air}}$ ) reflète à la fois les changements de la composition isotopique de l'eau de mer, qui dépend essentiellement de la quantité de glace stockée sur les continents, et les modifications de la biosphère continentale et du cycle hydrologique aux basses latitudes [5,6,23,24]. En s'affranchissant de l'influence de l'insolation aux basses latitudes, on peut alors avoir accès, à partir de la mesure dans la glace de la composition isotopique de l'oxygène de l'air, aux variations du volume des glaces au cours du passé [26, 31].

Les archives glaciaires peuvent ainsi fournir, d'une part la signature de forçages climatiques fondamentaux : volume des glaces, gaz à effet de serre, aérosols, et d'autre part la réponse climatique aux hautes latitudes (Fig. 4).

De façon sommaire, la datation de la glace s'effectue par comptage des couches annuelles (sur les derniers dix mille ans dans le cas des sites les plus favorables), en utilisant des horizons repères – volcaniques ou autres – bien datés par ailleurs, ou en modélisant l'écoulement de la glace. Dans ce dernier cas, il faut disposer notamment de données sur l'accumulation de la neige et la vitesse de déplacement de la glace. Les âges ainsi obtenus peuvent être, pour certains événements climatiques caractéristiques, ajustés avec les datations obtenues sur les sédiments marins.

## 3. Les cycles glaciaires–interglaciaires : forçage climatique des gaz à effet de serre

Les oscillations orbitales de notre planète autour du soleil modulent l'énergie solaire reçue à sa surface, ainsi que sa répartition. L'effet majeur de ces

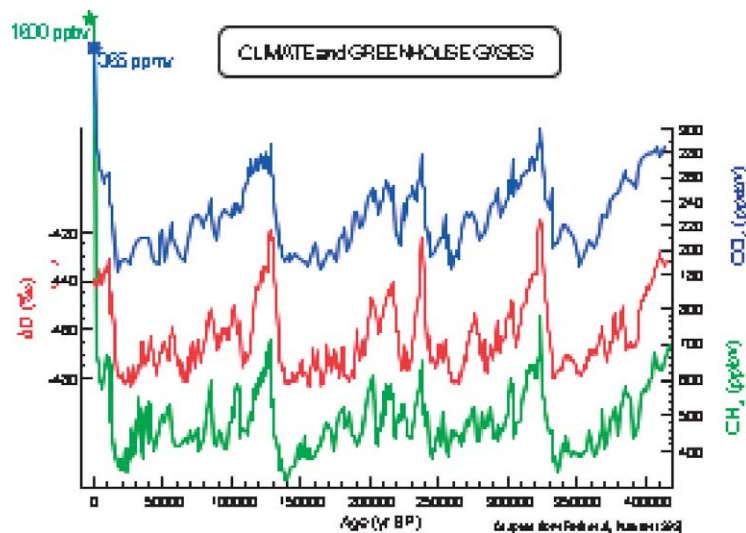


Fig. 3. Carotte de Vostok : évolution de la composition isotopique en deutérium (un indicateur de l'évolution de la température antarctique), du  $\text{CO}_2$  et du  $\text{CH}_4$  au cours des derniers 420 000 ans. On notera, sur l'extrémité gauche de la figure, la mise en perspective de « l'explosion » des teneurs actuelles en  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  par rapport à la variabilité « naturelle » des quatre derniers cycles climatiques.

Fig. 3. The Vostok record: evolution of the deuterium composition of the ice (taken as a proxy of the Antarctic temperature), and of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  over the last climatic cycles. Note, on the right, the comparison with the present-day atmospheric mixing ratios for these two greenhouse trace gases.

changements d'oscillations a été l'établissement de cycles glaciaires–interglaciaires durant lesquels le climat a varié entre de longues périodes froides, pendant lesquelles de vastes calottes de glace s'établissaient dans l'hémisphère nord et des périodes chaudes plus courtes et consécutives à la fonte de ces mêmes calottes. L'étude des archives glaciaires a contribué de façon majeure à la description et à la compréhension de la variabilité climatique caractéristique de ces cycles.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle s'établit un débat important concernant les causes de l'existence des âges de glace, qui avaient été révélés par les empreintes géologiques laissées par les retraits des glaciers dans les Alpes. Arrhenius entreprit alors des calculs, qu'il qualifia d'ennuyeux, pour évaluer la variation de température moyenne en fonction de la saison et de la latitude pour différentes teneurs atmosphériques en  $\text{CO}_2$  et pour démontrer que les refroidissements correspondant à l'établissement des âges de glace pouvaient s'expliquer par une décroissance de l'ordre de 40 % des teneurs en  $\text{CO}_2$  [2]. La quantification de l'effet de serre était née, mais ce n'est que presque un siècle plus tard que les glaces de l'Antarctique confirmèrent

la prédiction d'Arrhenius en révélant pour la première fois les faibles teneurs en  $\text{CO}_2$  de l'air datant du dernier maximum glaciaire [7,10]. Cette découverte a été magistralement confirmée par l'analyse de la carotte de Vostok. Elle indique, de façon plus générale, que  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  sont fortement corrélés aux grandes variations climatiques des quatre derniers cycles glaciaires–interglaciaires [3,9,27] (Fig. 3), qui sont modulées par les fréquences orbitales caractéristiques (100, 40, 20 ka).

S'agissant du forçage radiatif des traces gazeuses à effet de serre, le  $\text{CO}_2$  joue un rôle majeur [27]. Le lien entre  $\text{CO}_2$  et climat, mis en évidence par les archives glaciaires, a permis de lever, au moins partiellement, le paradoxe du cycle de 100 ka posé par la théorie astronomique de l'évolution du climat au cours du Quaternaire récent. En effet, un cycle dominant d'environ 100 ka est présent dans l'ensemble des paléo-enregistrements du dernier million d'années, mais l'amplitude de l'insolation à cette fréquence, qui correspond à l'oscillation de l'excentricité de l'orbite terrestre autour du soleil, est très faible et donc le système climatique doit répondre de façon non linéaire aux changements orbitaux. La non-linéarité de la ré-

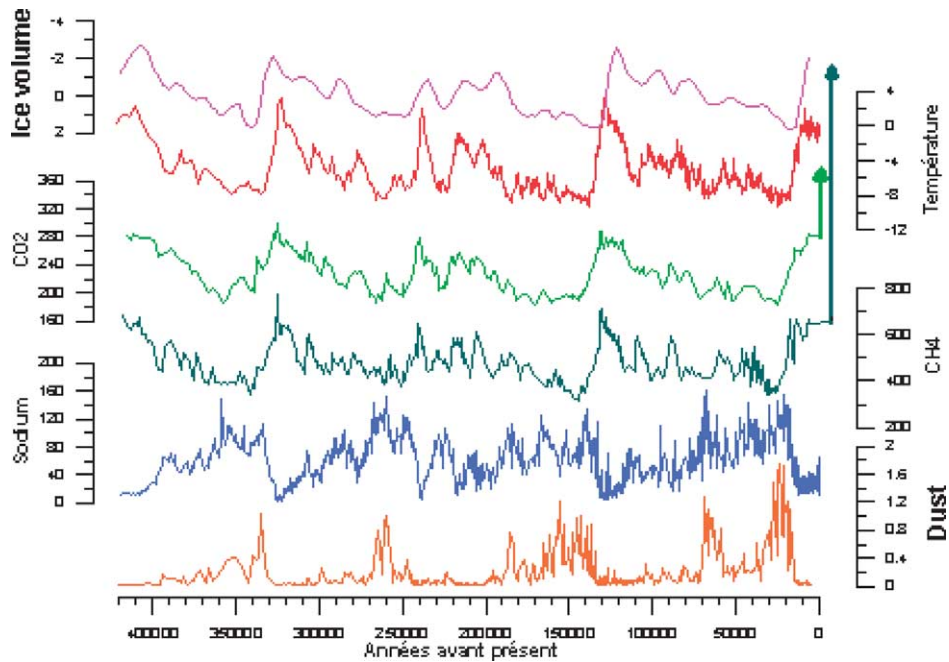


Fig. 4. Comparaison entre les signatures de différents forçages radiatifs dans la carotte de Vostok [27] et l'enregistrement marin du volume des glaces [4]. Noter que l'échelle temporelle est inversée par rapport à la Fig. 3.

Fig. 4. Comparison between the Vostok time series of different proxies for radiative forcings (greenhouse trace gases, aerosols), the Vostok temperature record [27], and the marine record of ice volume [4]. Note that the time axis is running the opposite way to Fig. 3.

ponse climatique a été d'abord attribuée au temps de réponse des grandes calottes de l'hémisphère nord. En effet, ce dernier peut générer une oscillation marquée du volume des glaces correspondant à la période de 100 ka de l'excentricité orbitale, quand on force le système climatique par l'insolation d'été à 65° N qui est elle-même dominée par la précession [18]. Ce caractère non linéaire apparaît clairement dans l'enregistrement marin en dents de scie du volume des glaces, avec des déglaciations « rapides » et des glaciations progressives et lentes (Fig. 4).

En fait l'enregistrement des gaz à effet de serre dans les carottes de glace va montrer que le rythme, de l'ordre de 100 ka, des transitions glaciaires–interglaciaires n'est pas nécessairement généré par les seules variations du volume des glaces. En effet, au cours des transitions climatiques entre époques glaciaires et interglaciaires [26,27] et pour les cycles de 100 ka [31], les variations des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>) précèdent celles du volume des glaces continentales de plusieurs milliers d'années. Par ailleurs, les enregistrements glaciaires de Vostok et d'EPICA Dome C

indiquent que le réchauffement climatique au-dessus de l'Antarctique a précédé de plusieurs centaines d'années l'augmentation du CO<sub>2</sub> au cours des transitions glaciaires–interglaciaires [8,12,25].

L'ensemble de ces résultats suggère le scénario suivant pour les grandes transitions glaciaires–interglaciaires, que la planète a connu au cours des derniers 420 ka :

- le réchauffement sensible a d'abord lieu dans l'hémisphère sud (tout au moins aux latitudes australes), sans doute sous l'impulsion de l'insolation d'été locale, qui précède celle à 65° N de plusieurs milliers d'années ;
- ce n'est que plusieurs milliers d'années après que le réchauffement marqué de l'hémisphère nord, tout au moins aux latitudes boréales, et la variation sensible du volume des glaces prennent place (Fig. 5).

Une des questions cruciales réside dans l'évaluation de la contribution de chacun des différents for-

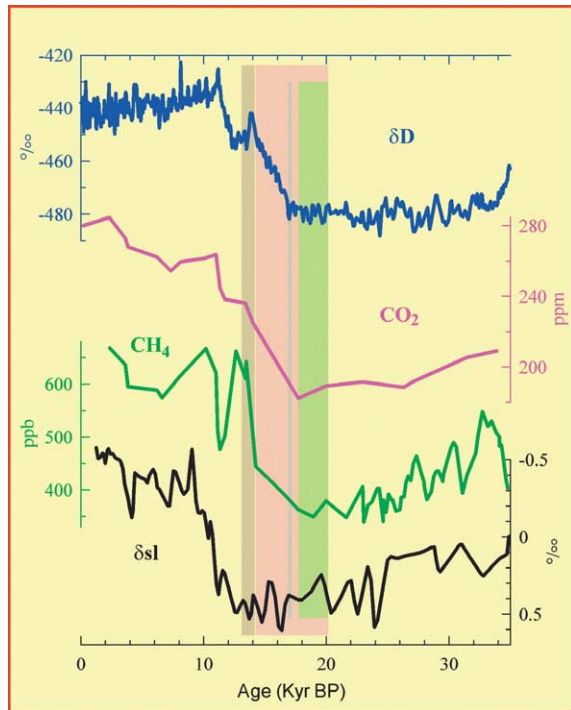


Fig. 5. Enregistrement de Vostok de la dernière transition glaciaire–interglaciaire illustrant les séquences d'événements climatiques (d'après [26]). La température antarctique (proxy :  $\delta D$ ) et le  $\text{CO}_2$  augmentent plusieurs milliers d'années avant la température au Groenland (proxy : variation rapide du  $\text{CH}_4$  [27]) et le volume des glaces de l'hémisphère nord (proxy :  $\delta sl$ , obtenu à partir de la composition isotopique de l'oxygène de l'air, voir texte). Cette séquence est aussi caractéristique des trois transitions précédentes.

Fig. 5. Vostok record of the last glacial–interglacial transition showing the sequence of climatic events (after [26]). Antarctic temperature (proxy :  $\delta D$ ) and atmospheric  $\text{CO}_2$  increase several thousand years before Greenland temperature (proxy: the rapid increase of  $\text{CH}_4$  during the transition) and the ice volume in the northern hemisphere (proxy:  $\delta sl$ , obtained from the isotopic composition of the air oxygen, see text).

çages climatiques intervenant pour passer d'un régime de maximum glaciaire à un mode interglaciaire. La variation de la composition de l'atmosphère en gaz à effet de serre et en aérosols est obtenue à partir des archives glaciaires ; celles des étendues des glaces continentales et des couverts végétaux sont assez bien cartographiées pour le dernier maximum glaciaire. À partir de ces paléo-données, on peut empiriquement évaluer les différentes perturbations du budget énergétique de la Planète (forçages radiatifs) qui contribuent

au forçage d'un état interglaciaire à partir des conditions du dernier maximum glaciaire [16] :

- $(3,5 \pm 1) \text{ W m}^{-2}$  pour les effets conjugués du changement d'albedo (glaces continentales + végétation) ;
- $(2,6 \pm 0,5) \text{ W m}^{-2}$  pour les gaz à effet de serre ;
- $(0,5 \pm 1) \text{ W m}^{-2}$  pour les poussières et les aérosols.

Cette approche empirique conclut à deux amplificateurs puissants : les calottes de glace de l'hémisphère nord et les gaz à effet de serre, en particulier le  $\text{CO}_2$ . Les paléo-données indiquent aussi que la réponse climatique au forçage radiatif total de  $6,5 \text{ W m}^{-2}$  est de l'ordre de  $5^\circ\text{C}$  et que donc la sensibilité correspondante du climat est de l'ordre de  $0,77^\circ\text{C}$  par  $\text{W m}^{-2}$ .

Ces conclusions sont conformes à celles obtenues à partir de modèles de circulation générale ([14] et références incluses) et d'analyses multivariées des paléo-signaux [17,22].

Ainsi, l'augmentation des gaz à effet de serre, en particulier du  $\text{CO}_2$ , d'abord, puis la disparition progressive des calottes de glace de l'hémisphère nord pendant les transitions entre maxima glaciaires et interglaciaires auraient joué un rôle majeur d'amplificateur du faible forçage initial dû à l'excentricité.

#### 4. Extension de l'enregistrement à un autre aspect du climat du Quaternaire

Le consortium européen EPICA (*European Project on Ice Coring in Antarctica*), qui rassemble 10 nations, a initié en 1995 un forage profond au site de Dôme C. Le forage a atteint, en janvier 2003, la profondeur de 3200 m. Ceci va permettre d'analyser une séquence de glace qui va couvrir approximativement les derniers 800 ka, doublant ainsi l'échelle de temps fournie par la carotte de Vostok et ouvrant l'accès à quatre cycles glaciaires–interglaciaires supplémentaires. Que peut-on apprendre de nouveau de cette importante extension temporelle ?

La connaissance de l'enregistrement marin sur cette période du passé [4] indique que les cycles climatiques de type glaciaires – interglaciaires qui ont précédé les quatre derniers présentent des maxima glaciaires équivalents ou plus prononcés que les précédents, mais par



contre des déglaciations et des périodes interglaciaires nettement moins marquées. Cette différence apparaît dans la signature spectrale de l'enregistrement marin avec, dans le cas des 4 premiers cycles (entre  $-800$  et  $-400$  ka), le passage d'une période dominante de 40 ka (le monde à 40 ka) à 100 ka (monde à 100 ka). L'intérêt de prolonger l'enregistrement atmosphérique de la glace à quatre cycles supplémentaires réside dans le fait que l'on va aborder une structure différente des variations climatiques. L'enregistrement devrait permettre de savoir si la gamme de variation du  $\text{CO}_2$  au cours des quatre derniers cycles (190–300 ppmv) est aussi valable dans un monde à 40 ka.

Enfin, l'extension de l'enregistrement glaciaire devrait permettre de mieux cerner les conditions qui caractérisent l'interglaciaire qui est le nôtre : l'Holocène. Un des objectifs majeurs est d'évaluer notre capacité à prédire l'évolution de l'Holocène, en excluant la perturbation anthropogénique, à partir de l'étude de périodes interglaciaires précédentes. Une période est particulièrement à privilégier dans ce cadre : le stade isotopique marin 11 (communément désigné par MIS 11) qui se situe, il y a environ 420 ka. Il s'agit, en particulier d'une période avec des paramètres orbitaux semblables à ceux de l'Holocène et des dizaines de milliers d'années à venir. D'où l'intérêt d'associer l'enregistrement atmosphérique de la glace à celui de l'environnement marin. L'enregistrement de Vostok s'arrête précisément au stade 11 [30] et celui d'EPICA va en offrir un enregistrement complet.

## 5. Conclusion : le message de la glace pour le futur

Les archives glaciaires témoignent donc de la dynamique du climat et de l'atmosphère au cours des grands cycles climatiques du Quaternaire récent. Elles indiquent en particulier que les variations du  $\text{CO}_2$  ou du  $\text{CH}_4$  atmosphériques sont fortement corrélées aux oscillations caractérisant le climat glaciaire–interglaciaire, tandis que l'évaluation du rôle des différents forçages radiatifs mis en jeu révèle que le  $\text{CO}_2$  a contribué de façon majeure à l'amplitude des variations glaciaires–interglaciaires.

Mais la glace renseigne aussi sur les conditions plus récentes. Les mesures des carottes de glace ont permis d'étudier la variabilité du  $\text{CO}_2$ , du  $\text{CH}_4$ , et du  $\text{N}_2\text{O}$  au cours de l'Holocène [13,19], et de documenter

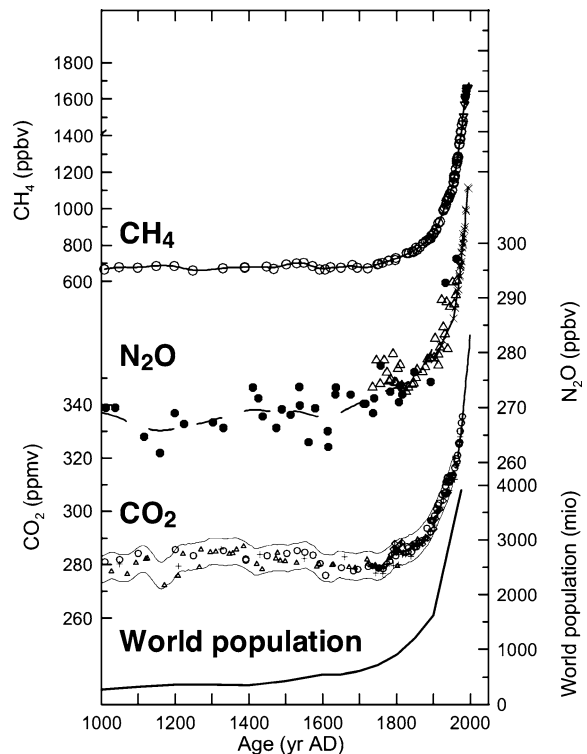


Fig. 6. Évolution des gaz à effet de serre à l'état de traces :  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , au cours du dernier millénaire (figure tirée de [29]). Comparaison avec l'évolution démographique.

Fig. 6. The record of greenhouse trace gases over the last millennium and comparison with the changes in the world population (adapted from [29]).

l'augmentation exponentielle de ces gaz à effet de serre au cours des deux derniers siècles (Fig. 6). Cette augmentation est essentiellement due aux émissions anthropiques et suggère un lien avec le réchauffement observé sur l'enregistrement thermométrique qui a débuté en 1861 [20]. Néanmoins, une des incertitudes majeures pour prédire le climat futur consécutif à la perturbation anthropique réside dans la connaissance de la sensibilité du climat aux variations des gaz à effet de serre.

En testant la capacité des modèles de circulation générale à simuler les changements paléoclimatiques, on espère pouvoir vérifier leur fiabilité pour simuler le climat du futur [14]. L'approche « paléo », décrite dans la Section 3, offre des avantages uniques, dont, en particulier, l'étude de changements climatiques importants entre deux états que l'on peut considérer

comme à l'équilibre. En particulier ces simulations du passé peuvent être utilisées pour évaluer la sensibilité du climat à une variation des gaz à effet de serre, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O qui, aujourd'hui, sont essentiellement émis de façon anthropique [16].

## Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien des programmes nationaux PNEDC et ECLIPSE et du programme européen EPICA.

## Références

- [1] M. Anklin, et al., CO<sub>2</sub> record between 40 and 8 kyr BP from the Greenland Ice Core Project ice core, *J. Geophys. Res.* C 102 (12) (1997) 26539–26546.
- [2] S. Arrhenius, On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine* (1896).
- [3] J.-M. Barnola, et al., Vostok ice core provides 160 000-year record of atmospheric CO<sub>2</sub>, *Nature* 329 (6138) (1987) 408–414.
- [4] F.C. Bassinot, et al., The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes–Matuyama magnetic reversal, *Earth Planet. Sci. Lett.* 126 (1994) 91–108.
- [5] M. Bender, et al., Isotopic composition of atmospheric O<sub>2</sub> in ice linked with deglaciation and global primary productivity, *Nature* 318 (1985) 349–352.
- [6] M. Bender, T. Sowers, L. Labeyrie, The Dole effect and its variations during the last 130 000 years as measured in the Vostok ice core, *Global Biogeochem. Cycles* 8 (3) (1994) 363–376.
- [7] W. Berner, H. Oeschger, B. Stauffer, Information on the CO<sub>2</sub> cycle from ice core studies, *Radiocarbon* 22 (1980) 227–235.
- [8] N. Caillon, et al., Timing of atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic temperature changes across termination III, *Science* 299 (2003) 1728–1731.
- [9] J. Chappellaz, et al., Ice-core record of atmospheric methane over the past 160 000 years, *Nature* 345 (6271) (1990) 127–131.
- [10] R.J. Delmas, J.M. Ascencio, M. Legrand, Polar ice evidence that atmospheric CO<sub>2</sub> 20 000 BP was 50% of the present, *Nature* 284 (1980) 155–157.
- [11] R.J. Delmas, A natural artefact in Greenland ice-core CO<sub>2</sub> measurements, *Tellus B* 45 (1993) 391–396.
- [12] H. Fischer, et al., Ice core records of atmospheric CO<sub>2</sub> around the last three glacial terminations, *Science* 283 (1999) 1712–1714.
- [13] J. Flückiger, et al., High resolution Holocene N<sub>2</sub>O ice core record and its relationship with CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>, *Global Biogeochem. Cycles* 16 (2002), 10.1029/2001GB001417.
- [14] C. Genthon, et al., Vostok ice core: Climatic response to CO<sub>2</sub> and orbital forcing changes over the last climatic cycle, *Nature* 329 (1987) 414–418.
- [15] D. Haan, D. Raynaud, Ice core record of CO variations during the last two millennia: atmospheric implications and chemical interactions within the Greenland ice, *Tellus Ser. B Chem. Phys. Meteorol.* 50 (3) (1998) 253–262.
- [16] J. Hansen, The global warming time bomb, in: Council on Environmental Quality, 2003.
- [17] C.D. Hewitt, J.F.B. Mitchell, Radiative forcing and response of a GCM to ice age boundary conditions: cloud feedback and climate sensitivity, *Clim. Dyn.* 13 (1997) 821–834.
- [18] J. Imbrie, J.Z. Imbrie, Modeling the climatic response to orbital variations, *Science* 207 (1980) 943–953.
- [19] A. Indermühle, et al., Holocene carbon-cycle dynamics based on CO<sub>2</sub> trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica, *Nature* 398 (1999) 121–126.
- [20] P.D. Jones, et al., Adjusting for sampling density in grid box land and ocean surface temperature time series, *J. Geophys. Res.* D 106 (4) (2001) 3371–3380.
- [21] J. Jouzel, et al., Magnitude of the Isotope/Temperature scaling for interpretation of central Antarctic ice cores, *J. Geophys. Res.* 108 (2003), 10.1029/2002JD002677.
- [22] C. Lorius, et al., The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming, *Nature* 347 (6289) (1990) 139–145.
- [23] B. Malaizé, et al., The Dole effect over the last two glacial–interglacial cycles, *J. Geophys. Res.* D 104 (12) (1999) 14199–14208.
- [24] M.-A. Mélières, M. Rossignol-Stick, B. Malaizé, Low latitude insolation at the origin of the δ<sup>18</sup>O variations of atmospheric oxygen, *Geophys. Res. Lett.* 24 (1997) 1235–1238.
- [25] E. Monnin, et al., Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations over the Last Glacial Termination, *Science* 291 (2001) 112–114.
- [26] L. Pépin, et al., Hemispheric roles of climate forcings during glacial–interglacial transitions, as deduced from the Vostok record and LLN-2D model experiments, *J. Geophys. Res.* D 106 (23) (2001) 31885–31892.
- [27] J.R. Petit, et al., Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature* 399 (1999) 429–436.
- [28] D. Raynaud, et al., The ice record of greenhouse gases, *Science* 259 (1993) 926–933.
- [29] D. Raynaud, et al., in: K.D. Alverson, R.S. Bradley, T.F. Pedersen (Eds.), *The Late Quaternary History of Atmospheric Trace Gases and Aerosols: Interactions Between Climate and Biochemical Cycles*, in: *Paleoclimate, Global Change and the Future*, Springer, Heidelberg, 2002, pp. 13–35.
- [30] D. Raynaud, et al., Marine isotope stage (MIS) 11 in the Vostok ice core: CO<sub>2</sub> forcing and stability of East Antarctica, in: A.W. Droxler, R.Z. Poore, L.H. Burckle (Eds.), *Earth's Climate and Orbital Eccentricity: The Marine Isotope Stage 11 Question*, American Geophysical Union, 2003, pp. 27–40.
- [31] N.J. Shackleton, The 100 000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity, *Science* 289 (2000) 1897–1902.