

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 115 (1989)  
**Heft:** 12

**Artikel:** Le climat moyen à la surface du globe (III)  
**Autor:** Fischer, Gaston  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-76971>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 18.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Le climat moyen à la surface du globe (III)<sup>1</sup>

## 3. Les glaces polaires, témoins des climats passés

### 3.1. Les vestiges des périodes glaciaires

L'existence de périodes glaciaires dans le climat passé de la Terre nous a été révélée par d'assez nombreux indices dont les plus frappants sont sans doute les blocs erratiques. Dans la région de Neuchâtel, le plus connu de ces mor-

PAR GASTON FISCHER,  
NEUCHÂTEL

ceaux de roches alpines, disséminés sur le Plateau suisse et les versants sud du Jura, est probablement la Pierre-à-Bot, dont on voit une photographie à la figure 10.

Les études en vue de déterminer l'origine des blocs erratiques ont permis de

reconstituer le cheminement des langues de glace qui ont recouvert le Plateau. Ces mêmes études ont encore révélé d'autres aspects importants des glaciations. On a ainsi trouvé qu'il y avait eu d'autres époques glaciaires précédant la dernière; elles se distinguent entre elles par des altitudes extrêmes différentes atteintes par les glaciers alpins dans le Jura. Ces altitudes sont marquées par des accumulations de roches meubles, de graviers et de sables, qui sont en fait les anciennes moraines latérales des glaciers et forment un liseré presque continu sur les contreforts du Jura exposés au sud.

Au plus fort de la dernière glaciation (appelée Würm), voici 18000 ans, le niveau de la mer de glace dépassait l'altitude de 1000 m entre Neuchâtel et Genève, ce dont témoigne le gros bloc erratique situé en bordure de la route de Chaumont à 1045 m d'altitude (fig. 11). A Lausanne, la surface de

glace atteignait environ 1300 m, mais tombait à 700 m à Soleure. D'Oensingen à Baden, et en direction du sud jusqu'à autour du Napf, le sol était libre de glaces permanentes. Plus à l'est elles réapparaissaient et s'établissaient à l'altitude de 700 m environ au-dessus de Zurich et à plus de 2000 m à Coire. Quelques blocs erratiques ont révélé que des glaciations plus fortes que la dernière avaient poussé leur langue jusque dans les vallées de La Sagne et du Locle. On peut naturellement se demander comment les glaciers parvenaient à transporter de si grosses pierres sur d'aussi grandes distances. Le mécanisme est en fait très simple; c'est celui des tables glaciaires dont un bel exemplaire est montré à la figure 12. Le bloc de rocher y joue le double rôle d'écran vis-à-vis des rayons du Soleil et de manteau thermique isolant par rapport à l'air. Il parvient ainsi à se maintenir à la surface du glacier par lequel il est alors transporté lors de son écoulement plastique.

<sup>1</sup> Les deux premiers de cette série d'articles ont paru dans *Ingénieurs et architectes suisses*, 9/89, pp. 133-137 et 11/89, pp. 279-283. Nous les reproduisons ici avec l'aimable autorisation du quotidien neuchâtelois. *L'Impartial*, qui les a publiés dans ses éditions des 4, 5, 25 et 26 octobre 1988, des 23 et 23 novembre 1988 et des 19 et 20 décembre 1988.

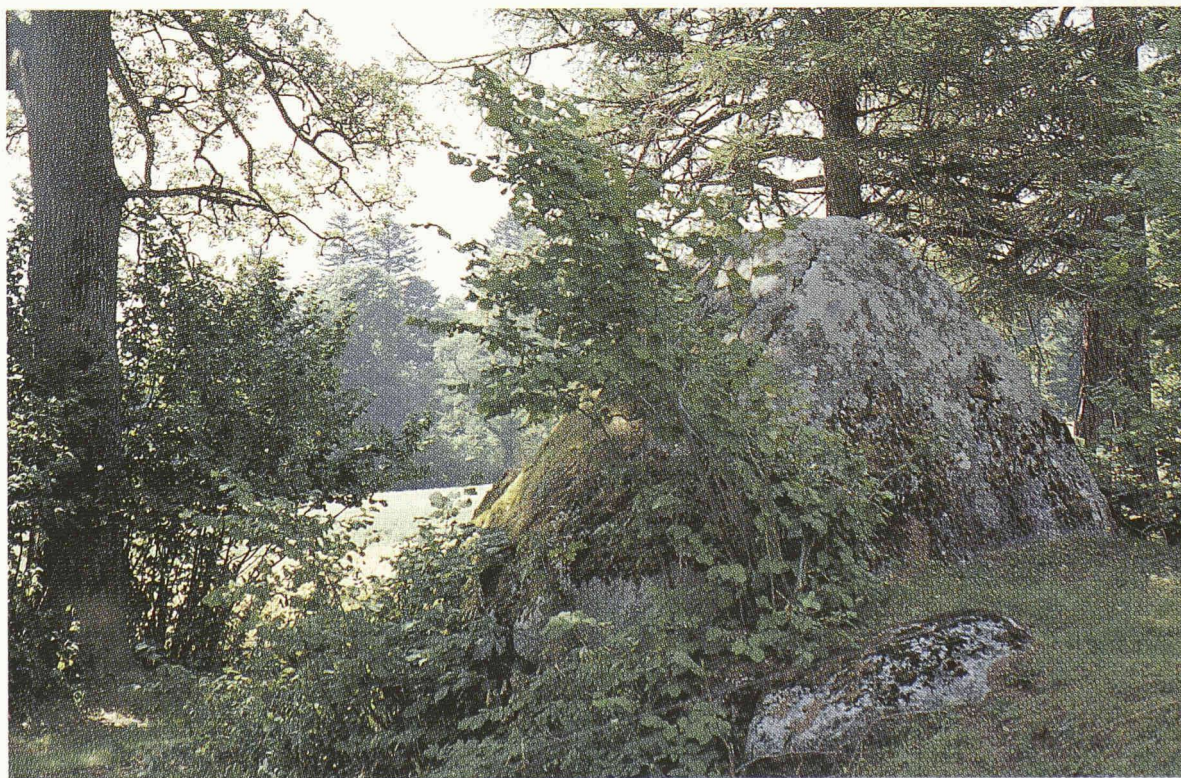


Fig. 10. – Bloc erratique de Pierre-à-Bot. Cet énorme morceau de granite provient du massif du Mont-Blanc. Il a été transporté jusqu'à Neuchâtel, à l'altitude de 710 m, par le glacier du Rhône. On peut estimer ses dimensions (environ 10 m de hauteur) par comparaison avec le banc se trouvant à sa base. Dans le contexte de la dernière période glaciaire, celle du Würm, on admet que quatre grands glaciers envahissaient le Plateau suisse. Tout à l'ouest l'immense glacier du Rhône s'étendait depuis les sources de cette rivière jusqu'en Isère, la Bresse et le Plateau suisse de Genève jusqu'à Bienne. Le glacier de l'Aar était plus petit et recouvrait la haute vallée de l'Aar jusque vers Oensingen. La région du Napf était libre de glace. Le glacier de la Reuss allait du Saint-Gothard jusqu'au-delà de Zurich, alors que l'énorme glacier du Rhin s'étendait de Schaffhouse jusque loin dans la Bavière. (Photo de l'auteur.)



Fig. 11. – Gros bloc erratique sur les contreforts de Chaumont à l'altitude de 1045 m. Ce bloc a une hauteur d'environ 4 m et a été charrié par les glaces du Würm comme la Pierre-à-Bot. (Photo de l'auteur.)

Notre discussion des glaciations au voisinage des Alpes ne doit pas nous faire oublier qu'il s'agit d'un phénomène global. Les glaciers scandinaves s'étendaient jusqu'au milieu de l'Allemagne et ceux du Canada jusqu'au milieu des Etats-Unis. Ces glaciers étaient incomparablement plus grands que l'îlot alpin. Le volume d'eau piégé par les glaces était si important que le niveau des océans se trouvait abaissé d'une centaine de mètres.

### 3.2. Les variétés isotopiques de l'eau

Chacun a déjà entendu parler d'*eau lourde*. De quoi s'agit-il? La molécule d'eau ordinaire,  $H_2O$ , est formée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. L'hydrogène est l'atome le plus simple de la nature, composé qu'il est d'un noyau formé d'un unique *proton* et d'un *électron* qui gravite autour. L'oxygène, quant à lui, comprend un noyau composé, généralement, de huit protons et de huit *neutrons*. On désigne par  $O^{16}$  cet oxygène

courant autour duquel gravitent huit électrons. Proton et neutron sont des particules lourdes, de poids semblables, environ 1840 fois plus élevés que celui de l'électron. Le chiffre de 16 dans  $O^{16}$  représente le *poids atomique*; pour l'hydrogène, dont nous avons parlé plus haut, on écrirait donc  $H^1$ .

Comme pour tous les éléments on trouve dans la nature, à côté des variétés communes que sont  $H^1$  et  $O^{16}$ , des formes plus rares de ces éléments; on parle d'*isotopes différents*. Les divers isotopes d'un élément ont les mêmes propriétés chimiques, car ils ont le même nombre d'électrons et de protons, mais ils possèdent un nombre différent de neutrons. Ainsi, à côté des 99,985% de  $H^1$ , il y a 0,015% de  $H^2$ , dont le noyau est formé d'un proton et d'un neutron. On appelle d'ailleurs cet élément le *deutérium* et on le représente le plus souvent par le symbole D plutôt que par  $H^2$ . Pour l'oxygène, il y a deux autres isotopes naturels qui comprennent respectivement 9 et 10 neutrons, soit  $O^{17}$  et  $O^{18}$ , avec des abon-

dances naturelles de 0,04 et 0,2%. Dans le cas de l'hydrogène et de l'oxygène nous voyons donc que les isotopes naturels *secondaires* sont plus lourds que les isotopes *communs* correspondants.

Ce que les physiciens nucléaires entendent par *eau lourde* est une eau où les deux isotopes d'hydrogène sont remplacés par du deutérium, qu'on peut donc représenter par  $H_2^2O$  ou  $D_2O$ . Cette eau lourde a un *poids moléculaire*, somme des *poids atomiques*, égal à  $2 \times 2 + 16 = 20$ , au lieu de 18 pour la molécule d'eau normale. Mais toute molécule d'eau où l'un des isotopes communs est remplacé par un isotope correspondant plus lourd est en fait aussi une molécule d'eau plus lourde que celle de l'eau normale. Ces eaux lourdes sont, avec leurs abondances respectives, HDO (0,015%),  $H_2O^{17}$  (0,04%) et  $H_2O^{18}$  (0,2%). Les molécules où deux ou tous les trois isotopes ont été remplacés par des variétés lourdes sont si rares que nous pouvons les ignorer.

### 3.3. Evaporation différenciée des variétés isotopiques de l'eau

A l'interface entre un liquide et un gaz on a, du côté liquide, des molécules qui se touchent, raison pour laquelle les liquides sont très peu compressibles. Du côté gaz, en revanche, les molécules se déplacent en ligne droite, comme des balles élastiques, et ne se touchent qu'au moment des collisions. La vitesse moyenne des molécules croît et décroît selon que la température augmente ou diminue et on parle en fait d'*agitation thermique*. Le parcours moyen entre les collisions dépend, quant à lui, de la concentration des molécules. Bien que dans le liquide les molécules se touchent, elles sont aussi sujettes à l'agitation thermique; elles vibrent ou oscillent au centre d'un entourage qui n'est pas aussi régulier que dans les solides. Cette augmentation de l'agitation explique d'ailleurs la dilatation des liquides et des solides lorsque la température s'élève.

L'agitation thermique a pour conséquence qu'à la surface du liquide les molécules peuvent occasionnellement passer de la zone liquide à la zone gazeuse et inversement. Plus la température est élevée, plus ces passages sont fréquents. A la surface de l'eau, soit par exemple à la surface des océans, ces échanges entre liquide et vapeur d'eau dans l'air sont ceux qui conduisent à l'évaporation. A l'équilibre, lorsque la température de l'eau et celle de l'air saturé de vapeur sont identiques, il y a autant de molécules d'eau qui vont dans un sens et dans l'autre; mais si l'eau devient plus chaude il y aura une évaporation nette de l'eau, tandis que si l'air est plus



Fig. 12. – Superbe table glaciaire. La plaque de roche est un écran vis-à-vis du rayonnement solaire et fournit un manteau isolant à la glace qu'elle recouvre et dont elle empêche la fonte. Cela maintient le bloc de pierre à la surface du glacier au-dessus duquel il finit par s'élever comme un champignon. Il peut alors être transporté au loin par la langue de glace. On sait en effet que les glaciers s'écoulent dans le lit des vallées comme des liquides très visqueux.

(Photo : M. Aellen, Zurich.)

chaud, il y aura un surplus de molécules d'eau qui retournera se condenser dans le liquide.

Nous venons de voir que l'agitation thermique des molécules varie avec la température. Elle dépend aussi du poids des molécules; les molécules lourdes ont des vitesses moyennes plus faibles que les molécules légères. Cela a pour conséquence que les molécules d'eau lourde s'évaporent moins facilement que les molécules d'eau normale, mais la différence des taux d'évaporation est d'autant plus grande que la température est plus basse. Ainsi, lorsque les mers sont froides, l'eau qui s'évapore est appauvrie en molécules lourdes, en particulier HDO et  $H_2O^{18}$ . Si l'abaissement de la température des mers est généralisé et persiste pendant de longues périodes, la neige qui se forme et s'accumule sur d'immenses épaisseurs en Antarctique et au Groenland sera appauvrie en deutérium et en  $O^{18}$  par rapport à la moyenne globale de ces éléments,

alors que l'eau des mers finira par accuser un excédent de ces mêmes éléments.

La séparation isotopique au cours du processus d'évaporation est encore accentuée, surtout durant les périodes glaciaires, par le fait que l'atmosphère est aussi plus froide pendant ces périodes. Au cours du transport de la vapeur d'eau vers les zones polaires, les molécules lourdes auront une plus forte tendance à retomber par gravité, pour ainsi retourner à la mer, que les molécules plus légères.

#### 3.4. Les glaces polaires et les sédiments marins, chroniques des climats passés

Ceux qui ont eu l'occasion de participer à des excursions en haute montagne ont peut-être vu, aux abords des crevasses, des empilements de neige qui laissent apparaître une stratification horizontale bien marquée. De fait,

on a quelquefois l'impression de pouvoir distinguer des strates annuelles. Dans certaines conditions favorables on a pu, dans les Alpes, trouver des empilements qui permettent d'identifier des couches de neige et glace vieilles de plusieurs centaines d'années. Dans les régions polaires, où on rencontre des épaisseurs de glace avoisinant 3000 m pour le Groenland et 4000 m pour l'Antarctique, on a retiré des carottes de glace vieilles de plus de 100 000 ans. On a, bien sûr, choisi des sites où l'écoulement plastique des glaces ne pouvait se faire qu'horizontalement. Près de la surface l'analyse isotopique des glaces permet de reconstruire les variations de température saisonnières; plus bas on identifie les années; ensuite, les couches devenant toujours plus minces, on reconnaît les variations climatiques qui s'étendent sur de plus longues périodes, d'abord celles du passé récent, puis de plus en plus lointain, comme nous le voyons aux figures 13 et 14.

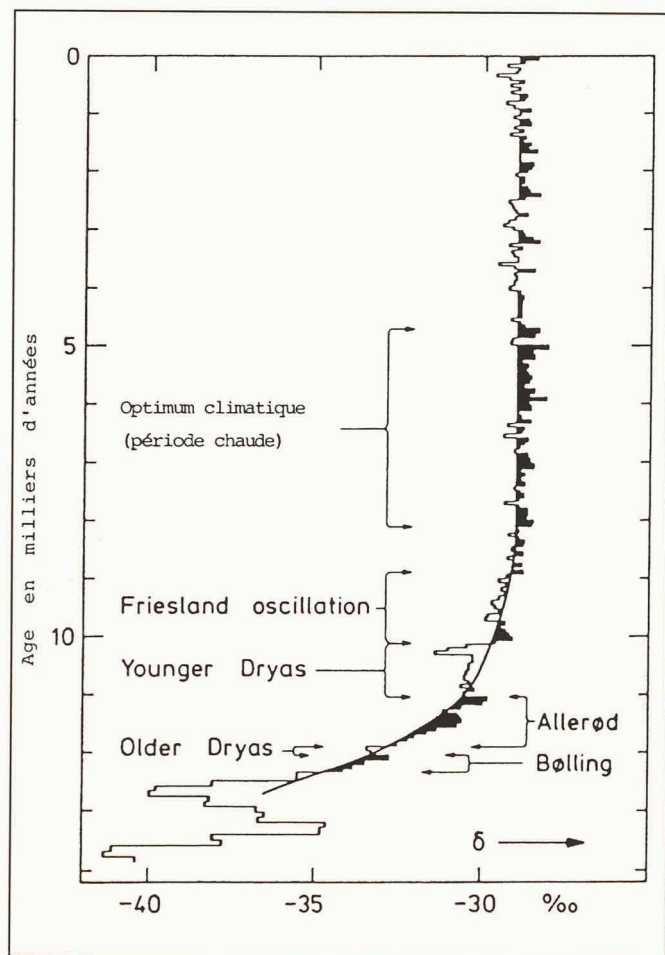


Fig. 13. – Variation de la concentration de l'isotope  $O^{18}$  dans une carotte de glace du Groenland. Le zéro de l'abscisse correspond à l'eau de mer. L'eau douce et la neige sont toujours appauvries en  $O^{18}$ . Les périodes froides rendent l'évaporation des eaux lourdes encore plus difficile, ce qui augmente encore l'appauvrissement de la neige en  $O^{18}$ . L'ordonnée est une échelle des temps dont l'unité vaut 1000 ans tandis que le présent est à l'origine. On voit que le passage de la dernière époque glaciaire à l'interglaciaire présent s'est effectué sur une période d'environ 3000 ans. La longue période de 5000 à 8000 ans avant le présent était une période particulièrement chaude, alors que sur le dernier millénaire on reconnaît les «petites époques glaciaires» signalées au paragraphe 1.5.

(Graphique tiré de Dansgaard et al. [2].)

Pour établir la chronologie des événements reportés dans les figures 13 et 15 on fait appel, d'une part, aux taux de précipitations connus dans les régions concernées en fonction des températures et, d'autre part, aux lois qui régissent l'écoulement plastique de la glace sous pression. Il s'agit d'un processus de calcul itératif délicat, mais qui finit par converger (Lorius et al., 1985 [5]). Dans la figure 14, l'abscisse correspond à la longueur de la carotte glaciaire, tandis que dans la figure 15, la conversion en âges a été effectuée et l'abscisse représente des milliers d'années dans le passé. Dans ces deux figures on voit clairement la dernière période glaciaire, le Würm, et une partie de l'avant-dernière, le Riss; on reconnaît aussi l'interglaciaire présent et le précédent. On note que les périodes glaciaires paraissent se terminer de façon plus abrupte qu'elles ne démarrent, mais ces deux transitions nécessitent tout de même plusieurs milliers d'années chacune. Cela n'est pas surpre-

nant si l'on se souvient que la couche de glace au-dessus de Neuchâtel dépassait 600 m il y a 18000 ans. Comme le taux de précipitations en Suisse est typiquement de un mètre d'eau par an, on comprend sans peine qu'il faille une dizaine de milliers d'années pour produire et transporter les énormes volumes de glace qui finalement recouvraient presque tout le Plateau suisse. De même, il a fallu des centaines d'années pour faire fondre cette carapace de glace lorsque les paramètres astronomiques étaient devenus favorables à une période interglaciaire.

Une confirmation à la fois des variations isotopiques et de la chronologie reportées aux figures 13, 14 et 15 est fournie par l'étude de carottes de sédiments marins. Nous avons vu qu'à mesure que les rapports d'abondance isotopiques  $O^{18}/O^{16}$  et D/H diminuent dans les glaces polaires, ils augmentent dans les océans. Il s'ensuit que les sédiments marins formés à partir des

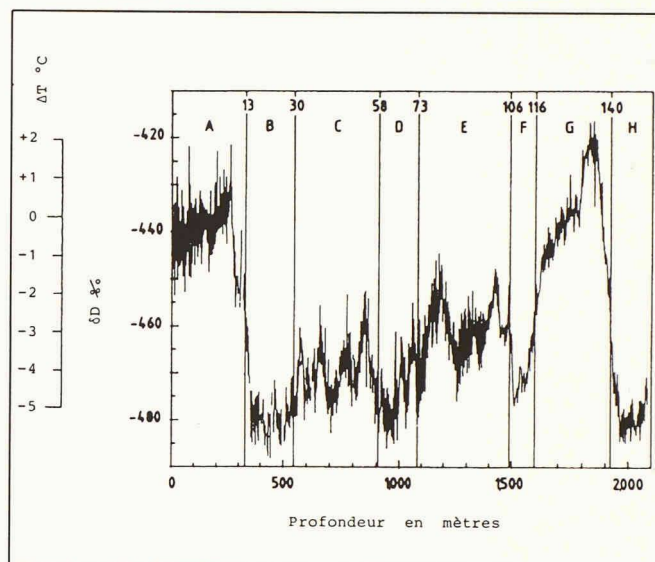


Fig. 14. – Concentration de deutérium observée dans les carottes de glace de Vostok par Jouzel et al. [3]. L'échelle horizontale donne la profondeur des échantillons analysés, tandis que les chiffres en haut du diagramme correspondent aux âges en milliers d'années. Le déficit de deutérium,  $\delta D$ , est indiqué en pour-mille et tout à gauche nous donnons une échelle approximative des refroidissements moyens de la température dans les zones tempérées de l'hémisphère nord.

dépôts de micro-organismes détritiques et de coquillages qui se déposent au fond des mers seront enrichis de ces mêmes isotopes  $O^{18}$  et D, comme on le voit à la figure 16. La datation des sédiments marins repose sur l'identification de fossiles unicellulaires (des foraminifères) et elle est bien établie. Ce que la figure 16 fait clairement apparaître est qu'au cours des 500 000 ans du passé récent la Terre a connu 5 glaciations, ce qui confirme la période fondamentale de 100 000 ans pour les variations d'excentricité de l'orbite de la Terre autour du Soleil, dont nous avons parlé au chapitre précédent. En réalité c'est une dizaine de glaciations que l'on a identifiées depuis un million d'années, mais comme chaque glaciation tend à effacer les vestiges de celles qui l'ont précédée, on a peu de renseignements précis sur les plus anciennes. Ce que les géologues nous disent pourtant avec certitude, c'est qu'il n'y a pas eu d'époques glaciaires pendant une très longue période au-delà d'un passé de trois millions d'années au plus, observation pour laquelle on n'a pas, aujourd'hui encore, d'explication convaincante.

### 3.5. Découverte d'archives relatives au dioxyde de carbone atmosphérique

Les carottes de glace retirées du Groenland et de l'Antarctique contiennent de petites bulles d'air ancien, captives de la glace. Les premières analyses de ce type de matériel sont celles du laboratoire du professeur Hans Oeschger de l'Université de Berne, mais c'est l'étude récente et sys-

tématique des carottes de Vostok qui a fourni les renseignements les plus probants sur ce sujet (voir [3] [4]). Elle a permis de reconstituer la teneur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> au cours du dernier cycle et demi des glaciations. Ce que la figure 15 révèle est qu'il y a manifestement une corrélation étroite entre la température moyenne du globe et la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Cela se traduit par un changement important du taux moyen de CO<sub>2</sub> pendant les périodes glaciaires et les interglaciaires. Si ce taux varie entre les extrêmes de 180 à 240 ppmv (parties par million de volume) au cours des glaciations, il s'élève au niveau moyen de 270 ppmv pendant les périodes interglaciaires. C'est approximativement la valeur qu'on avait en 1850, avant le début de l'ère industrielle. L'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces antarctiques a encore révélé un comportement semblable pour le méthane (CH<sub>4</sub>). Nous avons vu au paragraphe 1.3 que ce gaz joue lui aussi un rôle important dans l'effet de serre.

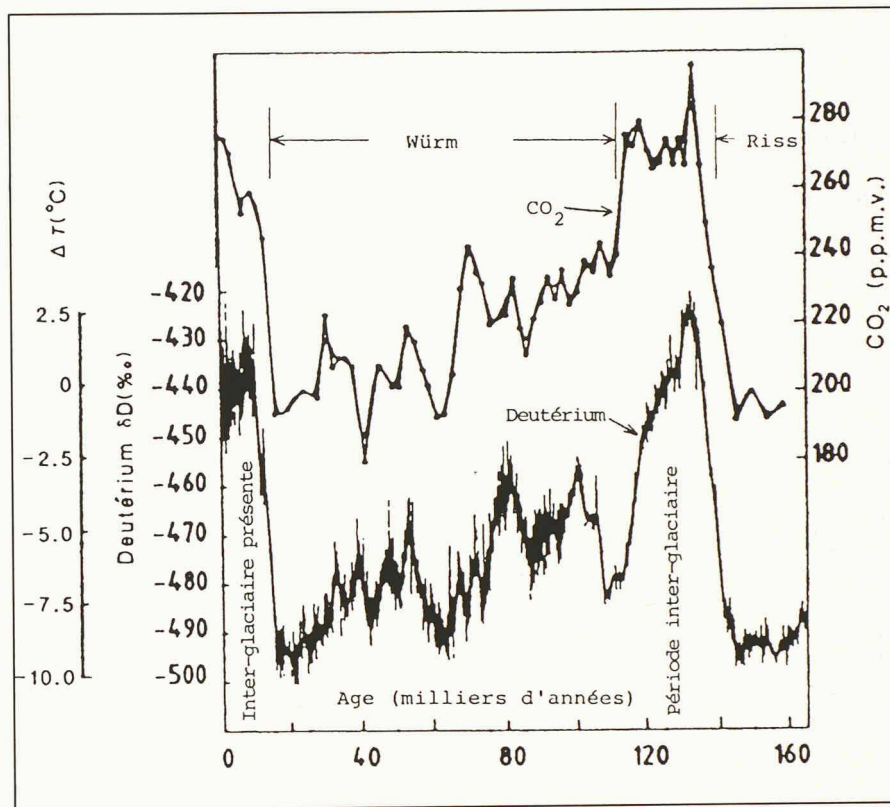


Fig. 15. - Concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> dérivée de l'analyse des carottes glaciaires de Vostok (Antarctique) par l'équipe franco-russe (Nature, [3] [4]). La courbe inférieure donne l'évolution de la concentration de deutérium; une échelle de températures lui est associée qui correspond aux écarts par rapport à la normale pour le site polaire de Vostok. Ces écarts sont presque deux fois plus grands que ceux qui correspondent à nos latitudes tempérées de l'hémisphère nord. On remarque, dans ce diagramme, que la fin des glaciations est plus abrupte que leur début et que l'augmentation des concentrations de CO<sub>2</sub> et de deutérium paraît synchrone avec la fin des deux glaciations du Riss et du Würm, tandis que la chute du CO<sub>2</sub> se fait avec un retard de l'ordre de 10 000 ans au départ du Würm. Les petites différences de  $\delta D$  entre les figures 13 et 14 proviennent du processus d'itération mathématique nécessaire à l'établissement de la chronologie (C. Lorius et al. [5]); elles affectent aussi les concentrations isotopiques.

Adresse de l'auteur :  
Gaston Fischer, professeur  
Observatoire cantonal  
58, rue de l'Observatoire  
2000 Neuchâtel

Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.



Cet article nous a été soumis par le Groupe romand des ingénieurs de l'industrie.

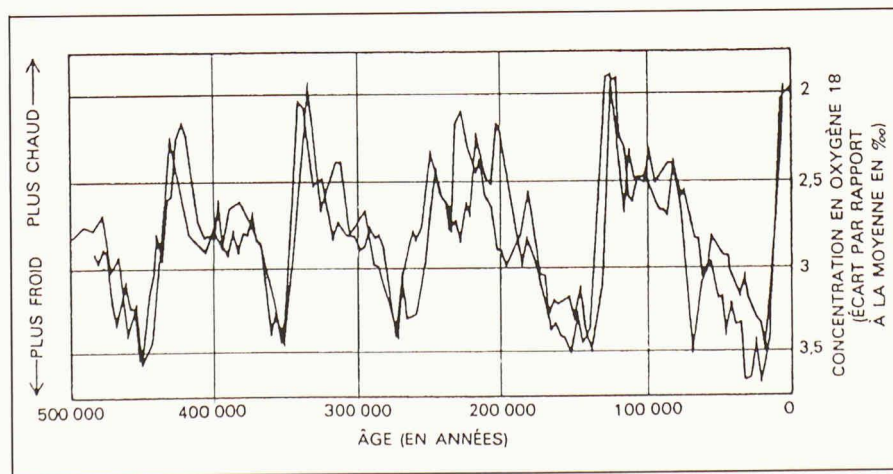


Fig. 16. - Le rapport des deux isotopes de l'oxygène dans les sédiments océaniques est une mesure du volume global de glace du passé. Plus la concentration en oxygène 18 dans une couche sédimentaire est élevée, plus la quantité de glace continentale était importante lorsque la couche a été déposée, et plus le climat était froid. On a représenté deux ensembles de données isotopiques; chacun porte sur plusieurs lots de matériaux sédimentaires extraits du fond des océans. Les courbes sont remarquablement semblables pour des échantillons qui proviennent d'endroits très éloignés l'un de l'autre: les rapports isotopiques dans les sédiments reflètent bien le volume de glace global. On note qu'il y a aujourd'hui moins de glace qu'il y en a jamais eu depuis 120 000 ans. (Adapté de Covey, [6].)

Bibliographie

- [2] DANSGAARD, W. et al.: «Climatic record revealed by the Camp Century ice core», *The late Cenozoic glacial ages*, K. K. Turekian (ed.), 1971, pp. 37-56.
- [3] JOUZEL, J. et al.: «Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160 000 years)», *Nature*, 329, octobre 1987, pp. 403-408.
- [4] BARNOLA, J. M. et al.: «Vostok ice core provides 160 000 - year record of atmospheric CO<sub>2</sub>», *Nature*, 329, octobre 1987, pp. 408-413.
- [5] LORIUS, C. et al.: «A 150 000-year climatic record from Antarctic ice», *Nature*, 316, August 1985, pp. 591-596.
- [6] COVEY, C.: «L'orbite de la Terre et les périodes glaciaires», *Pour la Science*, avril 1984, pp. 22-31.