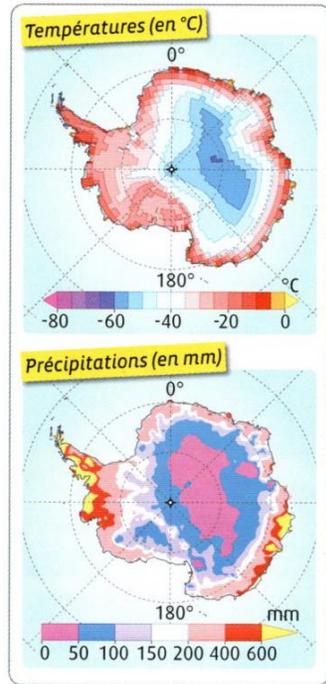
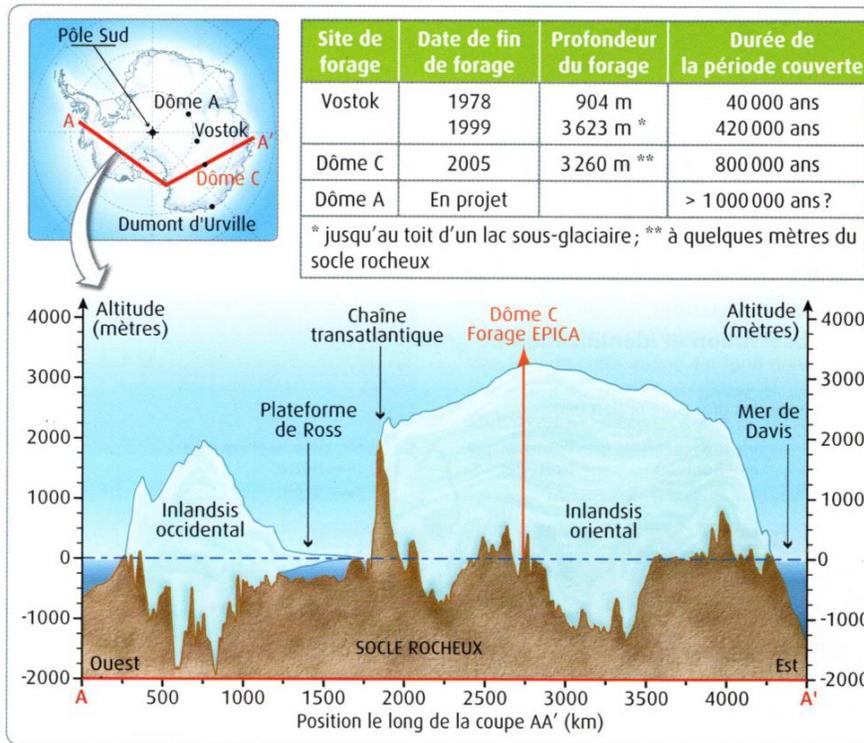


# Les glaces polaires, 800 000 ans d'archives climatiques et atmosphériques



**1 Le climat actuel de l'Antarctique : températures et précipitations annuelles moyennes.**



**2 Une coupe à travers le continent antarctique et les caractéristiques de quelques sites de forage.**



**3 Carottes de glace extraites du site de forage antarctique du Dôme C.**

## Datation de la glace:

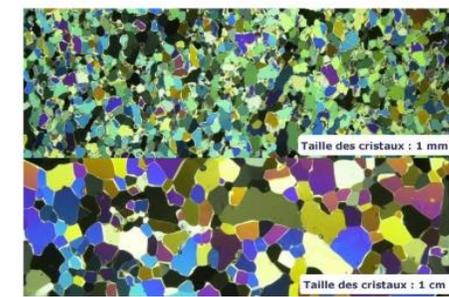
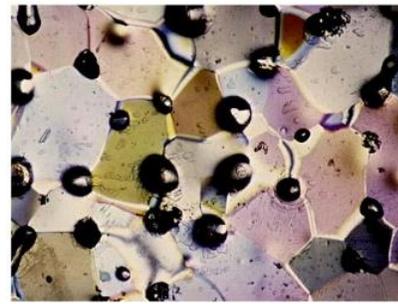
Pour la datation relative des glaces, on utilise le principe de superposition : les couches les plus profondes sont les plus anciennes. La datation absolue est difficile. Pour les glaces les plus récentes, on compte les couches annuelles ou on identifie des paramètres variant de manière saisonnière (jusqu'à 100 000 ans). On utilise par ailleurs des modèles de dépôts et de compaction qui permettent d'attribuer un âge à une certaine profondeur en fonction de l'épaisseur des couches de surface et d'un facteur d'amincissement (tassement) des couches en fonction de la profondeur. On se base aussi sur des événements remarquables visibles dans les glaces comme une couche de cendres laissée par une éruption volcanique. L'utilisation de méthodes radio chronologiques est difficile sur les glaces. Ces glaces représentent donc des archives du passé.

En arctique et antarctique les températures constamment négatives ont permis l'accumulation d'énormes quantités de précipitations neigeuses. Accumulées puis tassées elles se transforment en glace qui constituent les calottes glaciaires pouvant dépasser les 3km.

Le forage puis l'extraction minutieuse et l'archivage des carottes permet ainsi d'accéder à des données du passé.

A Groenland, ces carottes représentent plus de 100 000 ans d'archives. En antarctique, où les précipitations annuelles sont plus faibles, le forage Epica (Dôme C) a permis de remonter à -800 000 ans.

# Les paramètres mesurés dans les carottes



## la conductivité thermique:

Elle est liée aux variations de l'acidité de la glace. La conductivité augmente durant les périodes froides et les périodes chaudes mais ses valeurs sont plus basses au cours des périodes climatiques intermédiaires.

## la quantité de poussière ("dust" en anglais):

Les périodes froides en Antarctique sont caractérisées par des apports de poussière plus importants qu'en période interglaciaire. Ceci est à relier à une diminution du niveau marin pendant la période glaciaire mettant ainsi à nu d'une plus grande surface continentale. A cela s'ajoute une augmentation de l'aridité et de la force des vents qui contribue à transporter vers les pôles les poussières issues de l'érosion des continents.

## la taille des grains de glace:

Plus la glace est riche en particules, plus le taux de croissance des cristaux de glace est faible. Par conséquent, une diminution de la taille des cristaux de glace indique une transition interglaciaire/glaciaire. D'autre part la vitesse de croissance des cristaux est aussi influencée par la température de la glace.

## l'âge de la glace:

L'évaluation de l'âge de la glace n'est pas une mince affaire. Pour évaluer l'âge de la glace, il faut tenir compte du taux d'accumulation de la glace (quantité de neige restant en surface au bout d'une année), de la vitesse d'écoulement de la glace et de l'amincissement des couches de glace au fur et à mesure de leur enfoncement. Des modèles basés sur des équations physiques sont utilisés.

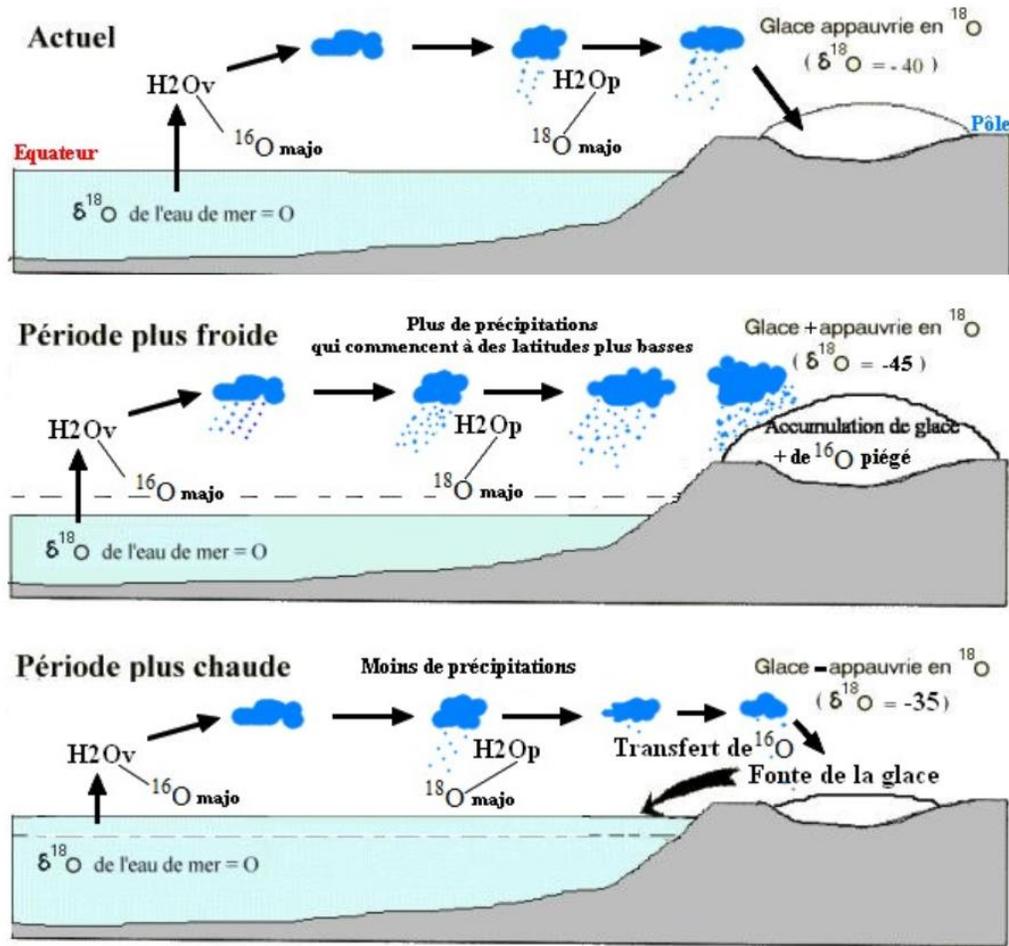
## le rapport isotopique de l'oxygène et hydrogène de la glace, grâce à la spectrométrie de masse sur quelques millilitres d'eau:

Les deux isotopes de l'hydrogène les plus abondants sont H<sup>1</sup> (99,985%) et D<sup>2</sup> (ou deutérium) (0,015%). De même les isotopes stables de l'oxygène les plus abondants sont O<sup>16</sup> et O<sup>18</sup>. L'eau formant la glace peut donc être présente sous différentes formes isotopiques. Ces molécules diffèrent par leur masse et leur symétrie, et pour cette raison, elles vont être fractionnées (c'est-à-dire que leurs proportions dans l'eau vont changer) au cours des processus d'évaporation, de condensation.

## les teneurs des bulles d'air en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>

Les calottes glaciaires polaires sont formées à partir des précipitations neigeuses lesquelles emprisonnent des bulles de gaz correspondant à la composition de l'air au moment des précipitations. La neige, perméable à l'air lors de son dépôt, se tasse progressivement sous son poids, enfermant ainsi l'air sous forme de bulles dans la glace. Ces bulles représentent environ 10% du volume des glaces. Lors de leur fermeture, vers 80 mètres de profondeur, elles sont définitivement isolées de l'atmosphère. A cette profondeur elles voisinent avec de la glace déposée il y a environ 2500 ans en Antarctique au site de Vostok et 250 ans au Groenland au site de Summit où l'accumulation est beaucoup plus grande. La température de la neige au moment du dépôt est enregistrée dans la carotte par la composition isotopique de la glace, que ce soit O<sup>18</sup> ou le deutérium. Cet enregistrement permet d'identifier les stades climatiques glaciaires et interglaciaires. A l'heure actuelle les analyses des carottes polaires permettent de remonter à plus de 200 000 ans à Vostok (Antarctique) et 100000 ans à Summit (Groenland). Ces deux gaz à effet de serre séjournent suffisamment longtemps dans l'atmosphère pour que la concentration de ces gaz s'homogénéise à la surface de la Terre. Il est donc possible de se servir de ces mesures pour comparer et dater relativement des profils obtenus dans différentes carottes de glace.

# Le fractionnement isotopique



Source : E. Lacouture

L'isotope 18 de l'oxygène comporte deux neutrons de plus que l'isotope 16, de sorte que la molécule d'eau qui le contient est plus lourde d'autant. Son évaporation nécessite donc plus d'énergie qu'une molécule contenant de l'oxygène 16 et à l'inverse sa condensation implique moins de perte d'énergie. Le rapport oxygène 18/oxygène 16 de la vapeur est ainsi environ 1% plus faible que celui de l'eau en équilibre. Lorsque l'eau de mer s'évapore, la molécule d'eau à  $\text{O}_{16}$  plus légère passe plus rapidement dans la phase vapeur que la molécule d'eau à  $\text{O}_{18}$  plus lourde. Donc, la vapeur d'eau au-dessus des régions chaudes contient moins d'eau à  $\text{O}_{18}$  que l'eau des océans. La condensation de la vapeur d'eau forme les nuages qui seront à l'origine des précipitations vers les plus hautes latitudes. Les molécules d'eau à  $\text{O}_{18}$  se condensent préférentiellement aux molécules d'eau à  $\text{O}_{16}$  et retombent vers le sol rapidement. La vapeur d'eau s'appauvrit donc de plus en plus en eau  $\text{O}_{18}$  au cours de sa migration vers les pôles. Les nuages s'approchant des pôles seront donc de plus en plus pauvres en  $\text{O}_{18}$ . Donc le  $\delta^{18}\text{O}$  des précipitations diminue de l'équateur vers les pôles. La neige qui tombe sur les calottes glaciaires contient relativement peu d' $\text{O}_{18}$ . La vapeur est donc enrichie en isotopes légers et la mer s'enrichit alors en isotopes lourds.

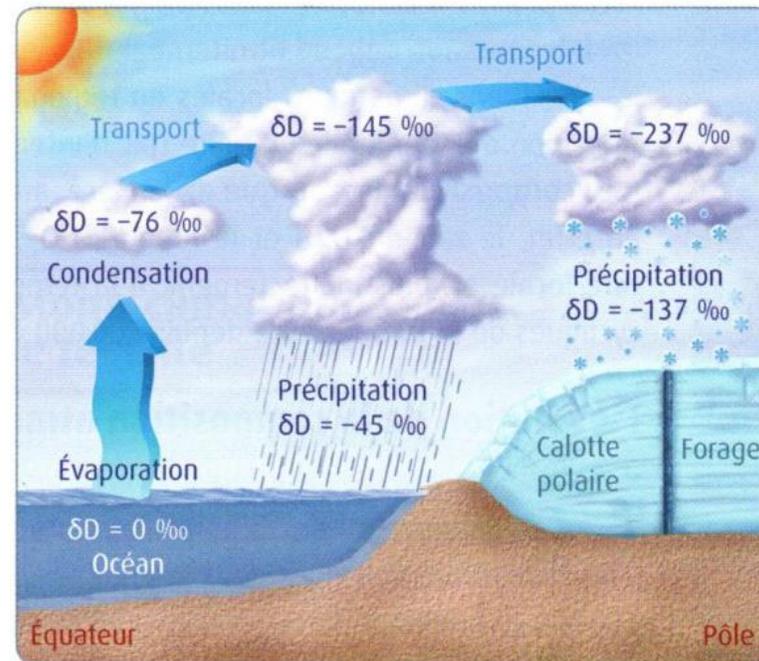
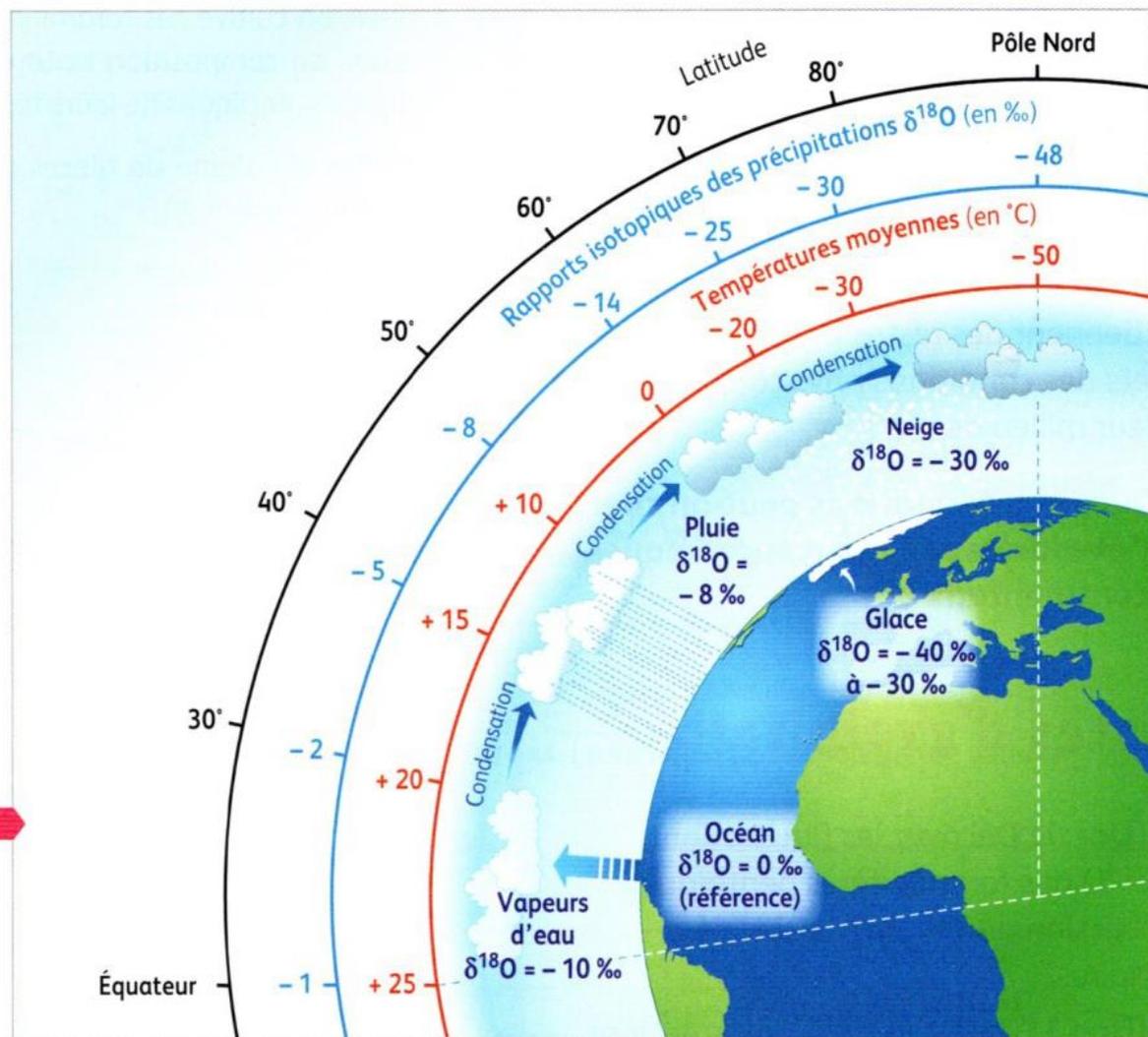
On utilise en fait un rapport delta dans lequel la composition isotopique d'un échantillon est mesurée relativement à un standard de composition connue. Ce rapport traduit donc une déviation relative à ce standard et comme il est très petit, on l'exprime en pour mille (‰)

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{glace}} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{glace}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{moyen des océans}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{moyen des océans}}}$$

$$\delta\text{D}_{\text{glace}} = \frac{(\text{D}/^1\text{H})_{\text{glace}} - (\text{D}/^1\text{H})_{\text{moyen des océans}}}{(\text{D}/^1\text{H})_{\text{moyen des océans}}}$$

Expression des  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  en fonction des rapports isotopiques de l'eau des glaces et des océans actuels.

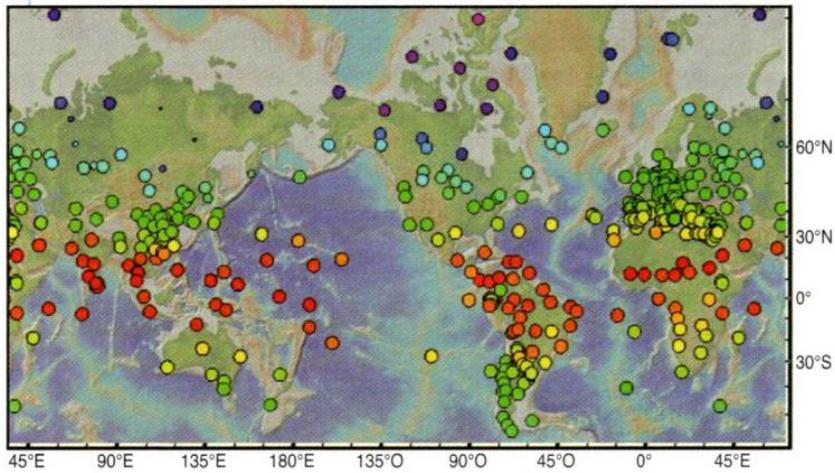
## Evolution des compositions isotopiques selon la latitude



Cycle de l'eau et variation de l'indice isotopique  $\delta\text{D}$ .

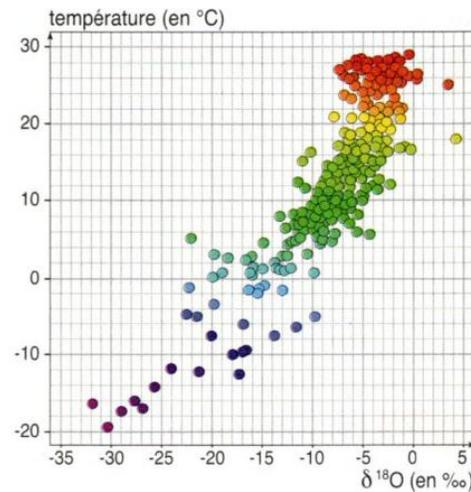
### Évolution de la composition isotopique des précipitations en fonction de la latitude.

L'eau de l'océan contient 2,00 ‰ d'oxygène  $^{18}\text{O}$ ; par définition,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{océan actuel}} = 0$ .



**a** Localisation des différents sites de mesures. Les couleurs indiquent les températures moyennes mesurées (voir graphe b).

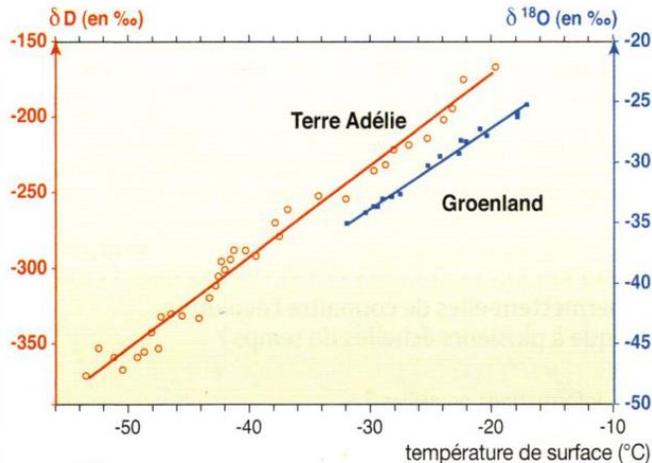
• L'élément oxygène existe sous deux formes isotopiques  $^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$ . L'eau est donc un mélange de molécules de  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  (99,8%) et de  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  (0,2%). Les physiciens utilisent des **spectromètres de masse** pour mesurer ces proportions. Ils établissent alors le **rapport  $\delta^{18}\text{O}$**  en comparant le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  dans la glace (ou dans l'eau) à un



**b** Relation entre  $\delta^{18}\text{O}$  et température pour les différents lieux indiqués dans le document a.

rapport de référence (le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  moyen des océans). En analysant des données provenant de multiples sites (carte a), ils ont pu établir une corrélation entre la valeur du  $\delta^{18}\text{O}$  dans la neige (ou l'eau) et la température atmosphérique au moment de la précipitation (graphe b).

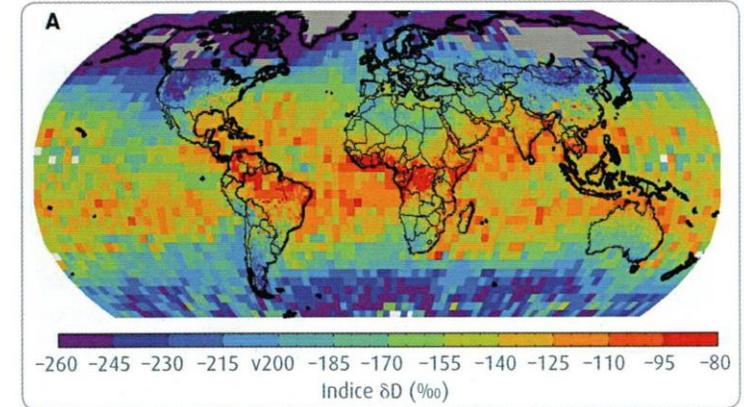
• Le « calibrage » du thermomètre isotopique au Groenland et en Antarctique



• Outre le  $\delta^{18}\text{O}$ , Les glaciologues utilisent également un autre rapport isotopique pour déterminer les paléotempératures : c'est le  $\delta\text{D}$  (rapport entre les isotopes de l'hydrogène  $^1\text{H}$  et  $^2\text{H}$  ou deutérium). Sur le *graphe*, les points représentent les moyennes annuelles de la température et de la composition isotopique des précipitations (neige) mesurées en différents endroits des régions polaires.

• On peut penser que la corrélation entre  $\delta^{18}\text{O}$  (ou  $\delta\text{D}$ ) et température était la même par le passé. Ces rapports isotopiques peuvent donc constituer des « paléothermomètres » pour déterminer les températures du passé

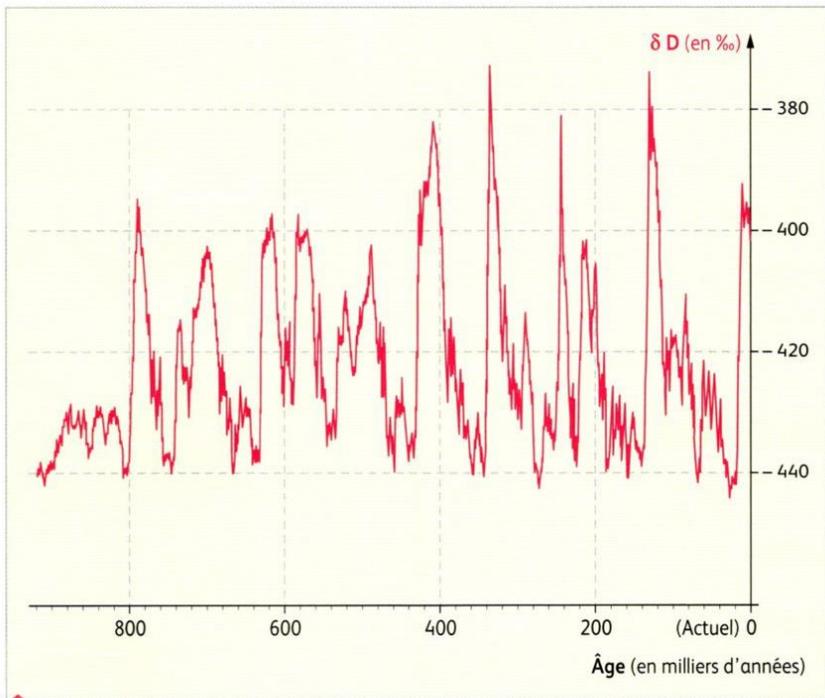
## Relation entre le delta et la température



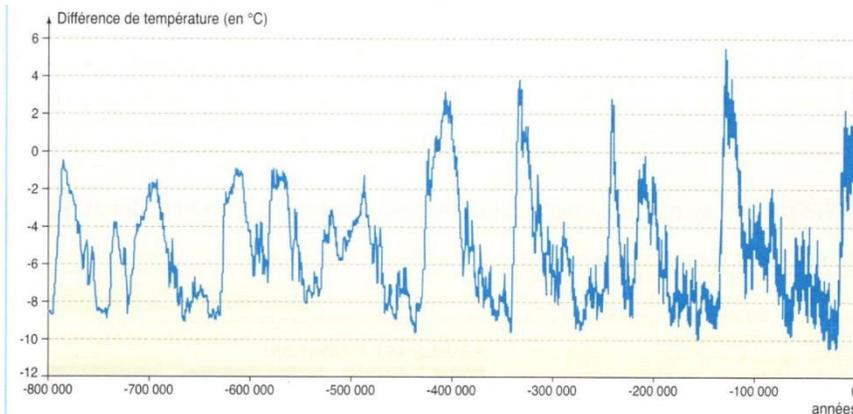
**5** Variations du  $\delta\text{D}$  des précipitations à l'échelle de la planète (moyenne des années 2003 à 2005).

### Le principe du thermomètre isotopique:

Il y a une relation linéaire entre les compositions isotopiques, donc les deltas et la température. A partir des courbes étalons de référence et en appliquant le principe d'actualisme on peut donc graphiquement déterminer la température qui régnait au moment de la chute de neige, transformé ultérieurement en glace.



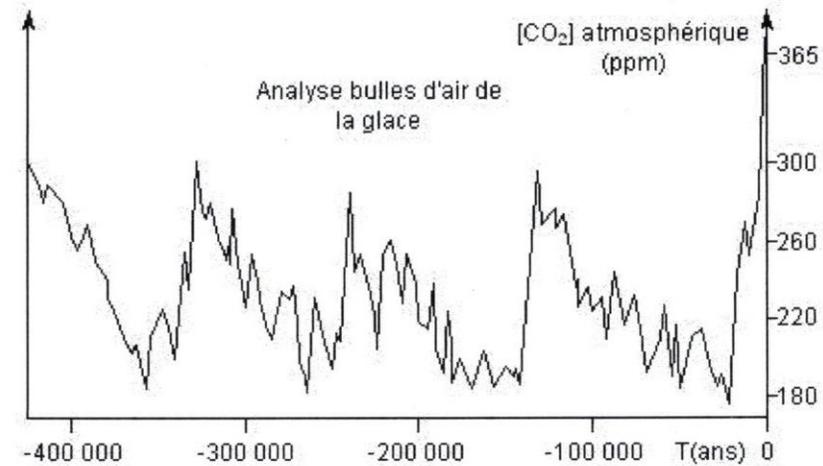
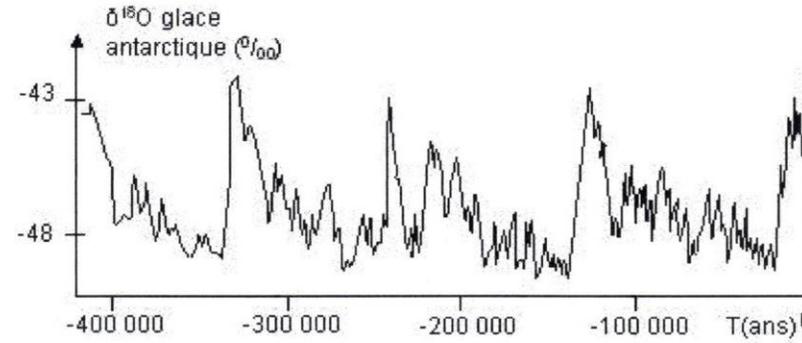
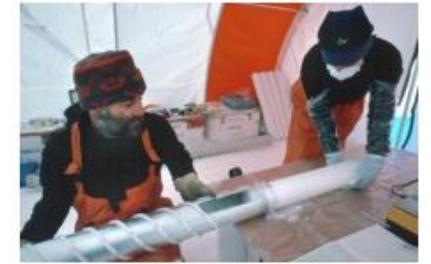
**C**  $\delta D$  de la glace en fonction de son âge dans la calotte glaciaire antarctique sur le site du Dôme C.



Ci-dessus, reconstitution des températures en Antarctique depuis 800 000 ans à partir des carottes de glace issues du site Dôme C. Le graphique représente la différence des températures par rapport à la moyenne des 1 000 dernières années.

**Doc. 2** Évolution de la température depuis 800 000 ans (à partir des données du forage Epica, Dôme C).

## Les résultats globaux de Vostok

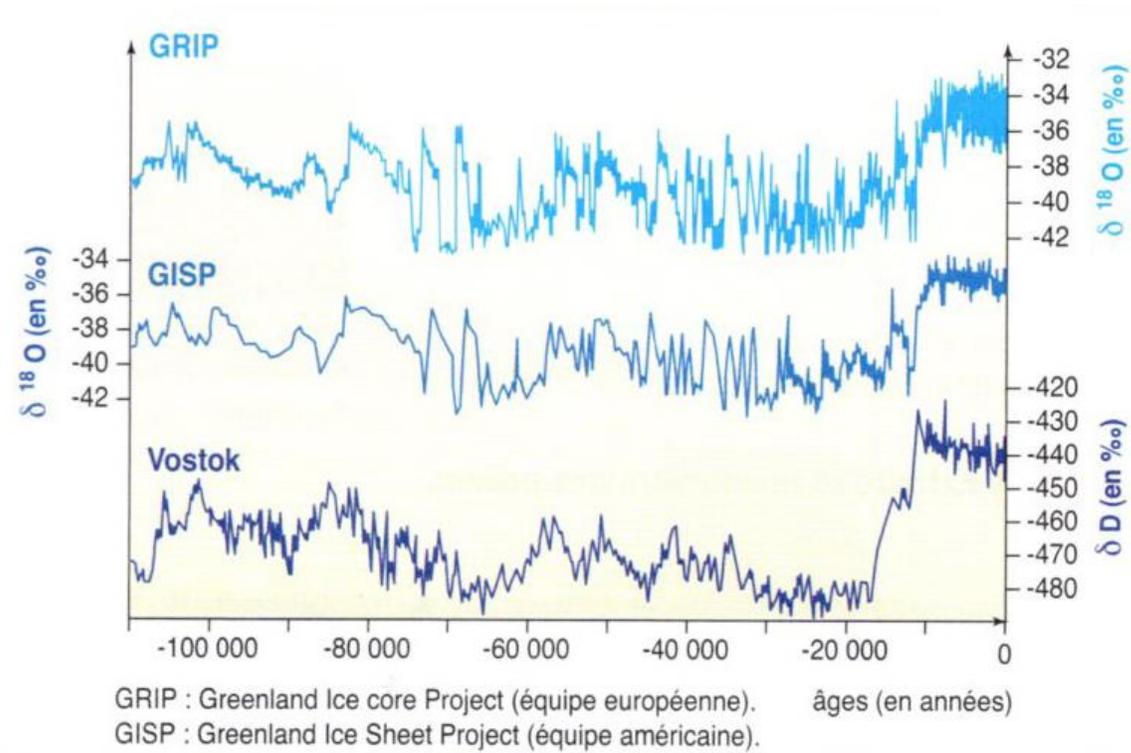


Décrivez l'évolution du delta D et O, les températures et la teneur en CO<sub>2</sub> durant les derniers 800 000 ans. Quelles conclusions peut-on en tirer ?

## Comparaison des résultats de Vostok et du Groenland

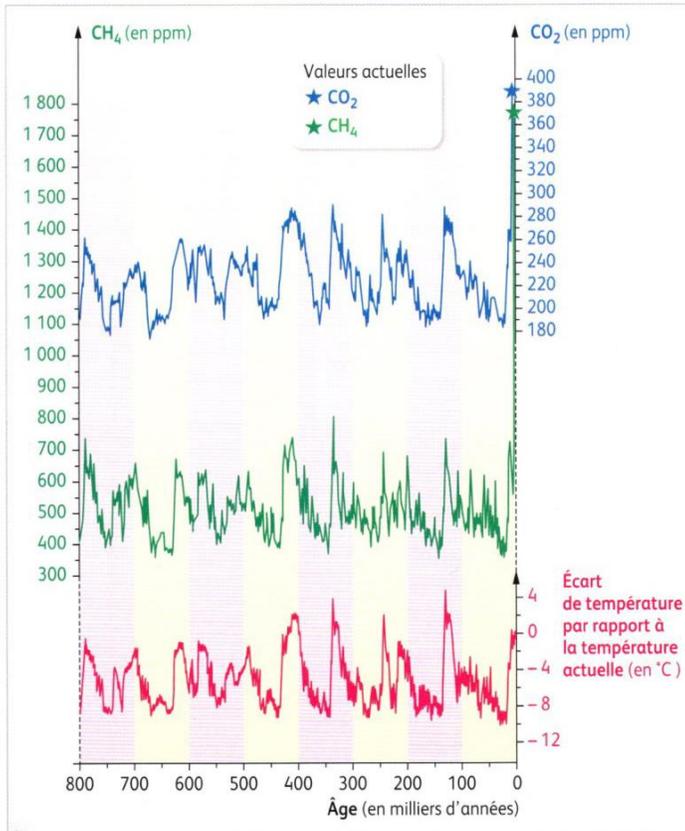


Les enregistrements ci-contre présentent les variations du  $\delta^{18}\text{O}$  et du  $\delta\text{D}$  (deutérium) dans les glaces extraites par carottage au niveau de trois forages, deux au Groenland (GRIP et GISP) et un en Antarctique (Vostok).



Comparez les deltas D de Vostok et O du Groenland. Quelles conclusions peut on en tirer ?

## Glaces polaires et paléotempératures



**b Résultats de l'étude des glaces antarctiques (site du Dôme C).**  
Les teneurs actuelles en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> sont respectivement 391 ppm et 1 800 ppb. 1 ppb = 1 partie par billion, soit 1 pour 10<sup>9</sup>.

### Conclusion:

Les résultats obtenus à Vostok au cœur de l'Antarctique ont montré une parfaite concordance entre les différentes données depuis 800 000 ans . La concentration des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane) montre des variations cycliques d'une périodicité d'environ 100 000 ans. En même temps pour des cycles de 100 000 ans, une longue période froide (glaciaire) marquée par une baisse du delta 18O (ou du delta D), des taux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>, a alterné avec une période chaude (interglaciaire) caractérisée par des hausses de ces mêmes indices : aux périodes de réchauffement coïncident des périodes d'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O) dans l'atmosphère ; aux phases de refroidissement coïncident des baisses de la teneur de l'atmosphère en ces mêmes gaz.

**Ainsi ces travaux ont permis de mettre en évidence une succession de périodes glaciaires et interglaciaires d'une amplitude globale de 10 à 15°C dont l'origine est naturelle et non anthropique.**

# Etude de documents: la reconstitution du climat à partir des microfossiles



MO x200 foraminifère actuel

Les Foraminifères sont un groupe de protistes caractérisés par un test composé d'une ou plusieurs chambres et fait de calcite précipitée par la cellule ou de grains détritiques agglutinés. Les tests présentent des formes très variées dans leur taille, leur géométrie et le nombre de chambres : une seule ou plusieurs chambres disposées dans un seul plan, en spirale plus ou moins haute, ou dans divers plans. Plusieurs types d'ornementation et d'ouvertures peuvent décorer ces tests. Leur taille varie habituellement entre 50 $\mu$  et 1 mm.

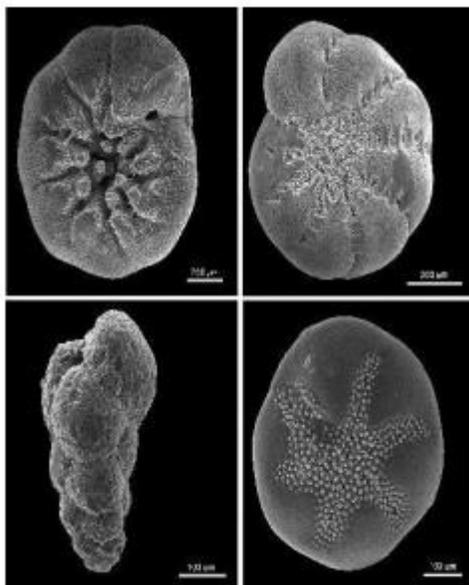
Les formes vivantes sont soit planctoniques, vivant dans ce cas à la surface de l'océan (de 0 à -300m), ou benthiques, vivant fixées à la surface du fond.

► Des forages ont été réalisés au travers des sédiments et des roches sédimentaires qui recouvrent les fonds océaniques. Des tests calcaires de foraminifères **benthiques** ont été trouvés dans ces sédiments ; leur  $\delta^{18}\text{O}$  a pu être déterminé.

► Pour les sédiments carbonatés, on compare le rapport isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  de l'échantillon à un rapport de référence, le  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  de la calcite d'un rostre de **bélemnite**. On définit alors le  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sédiment carbonaté}}$  tel que :

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{sédiment}} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sédiment}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{bélemnite référence}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{bélemnite référence}}}$$

Le fossile de bélemnite servant de référence a été trouvé dans une roche calcaire datée du Crétacé supérieur (99,5 à 65,5 Ma). À cette époque, on suppose que la Terre était dépourvue de calottes glaciaires ; l'eau de mer présentait alors un  $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau mer}} \approx -0,7\text{‰}$  par rapport aux eaux actuelles.

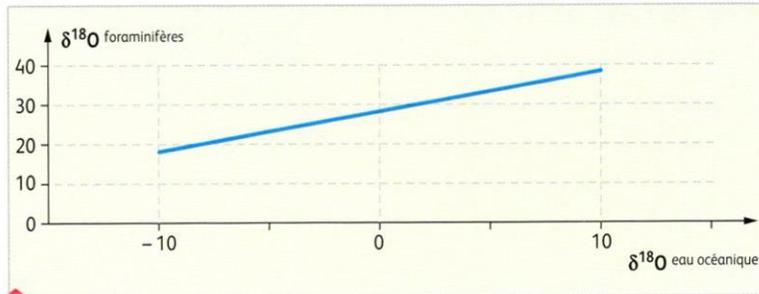


micrographs of four benthic foraminiferans (ventral view) from the USGS. Clockwise from top left: *Ammonia beccarii*, *Elphidium excavatum clavatum*, *Buccella frigida*, and *Eggerella advena*.



► On peut étudier expérimentalement l'influence du rapport isotopique de l'eau de mer sur le rapport isotopique des tests de foraminifères actuels semblables à ceux retrouvés dans les sédiments océaniques. Pour cela, on cultive ces foraminifères dans des aquariums alimentés par des eaux de composition isotopique contrôlée ; on mesure ensuite les rapports isotopiques de leurs tests.

► Plus le volume de glaces polaires est élevé, plus le  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau des océans l'est aussi.

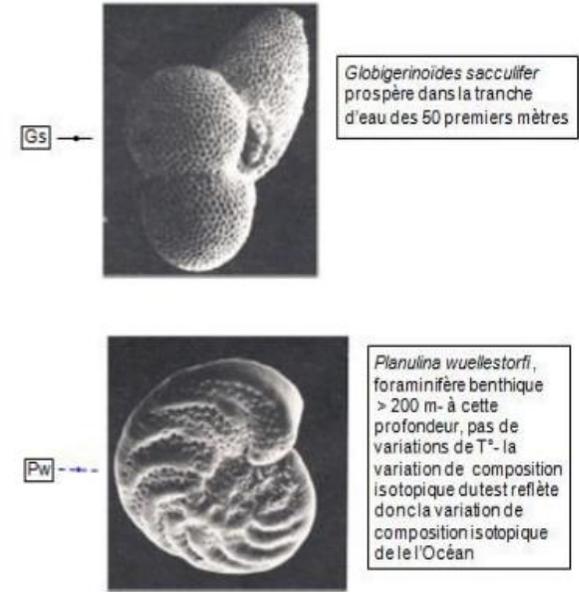
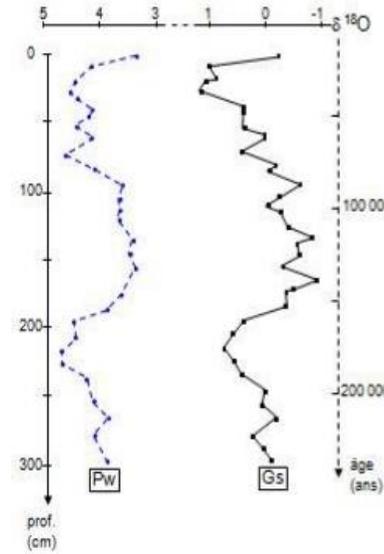


**a Détermination du rapport  $\delta^{18}\text{O}$  des tests de foraminifères en fonction du  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau de mer.**

Dans cette expérience, le  $\delta^{18}\text{O}$  des foraminifères est calculé en utilisant pour référence le rapport isotopique moyen des eaux océaniques actuelles.

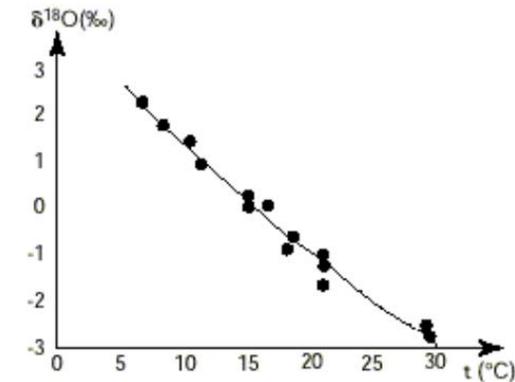
Le  $\delta^{18}\text{O}$  des tests carbonatés évolue comme le  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux océaniques, lui-même lié au volume de glace stocké à un moment donné dans les régions polaires, et donc reflet du climat. Lors de l'évaporation au-dessus de l'océan, la vapeur d'eau est appauvrie en  $^{18}\text{O}$ , et l'eau de mer s'enrichit en  $^{18}\text{O}$ . Cependant, en situation d'équilibre, il sort autant d'eau par évaporation qu'il n'en rentre par les fleuves et les précipitations. Le volume de l'océan reste constant,  $\delta^{18}\text{O}$  ne varie pas. Lorsque ce volume augmente (refroidissement),  $^{16}\text{O}$  est principalement stocké dans les glaces de sorte que le  $\delta^{18}\text{O}$  des océans et donc dans les tests de foraminifères benthiques qui s'y forment augmente ; l'inverse se déroule en cas de réchauffement climatique.

De même, plus l'eau est froide, plus le  $\delta^{18}\text{O}$  des tests carbonatés des foraminifères planctoniques est élevé (attention variation inverse par rapport au  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces).

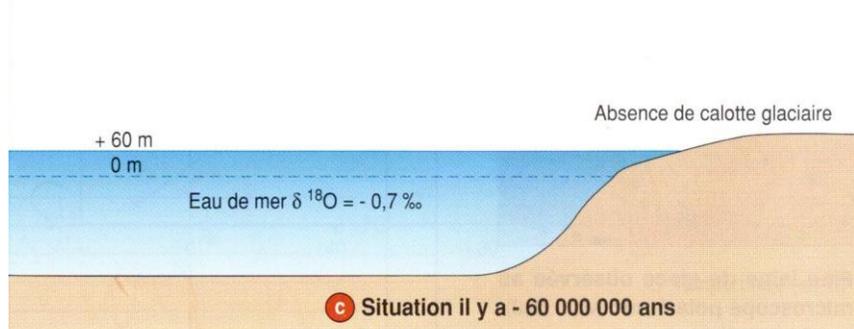
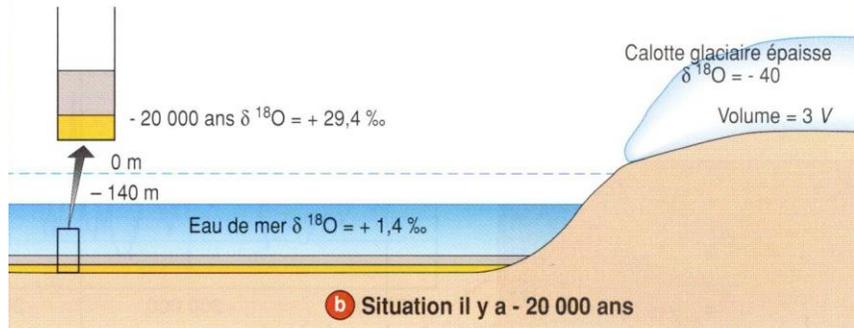
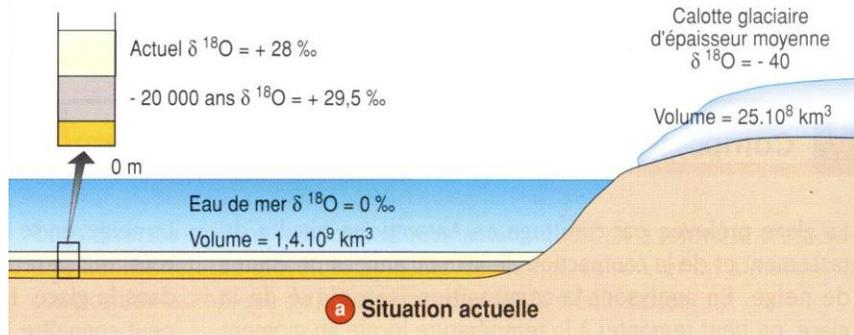


variation du rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  des foraminifères le long d'une carotte de l'Atlantique équatorial d'après C. Lorius et J.C. Duplessy- La Recherche n°83 - 1977- photographies CNRS CEA

**Le thermomètre isotopique des carbonates**



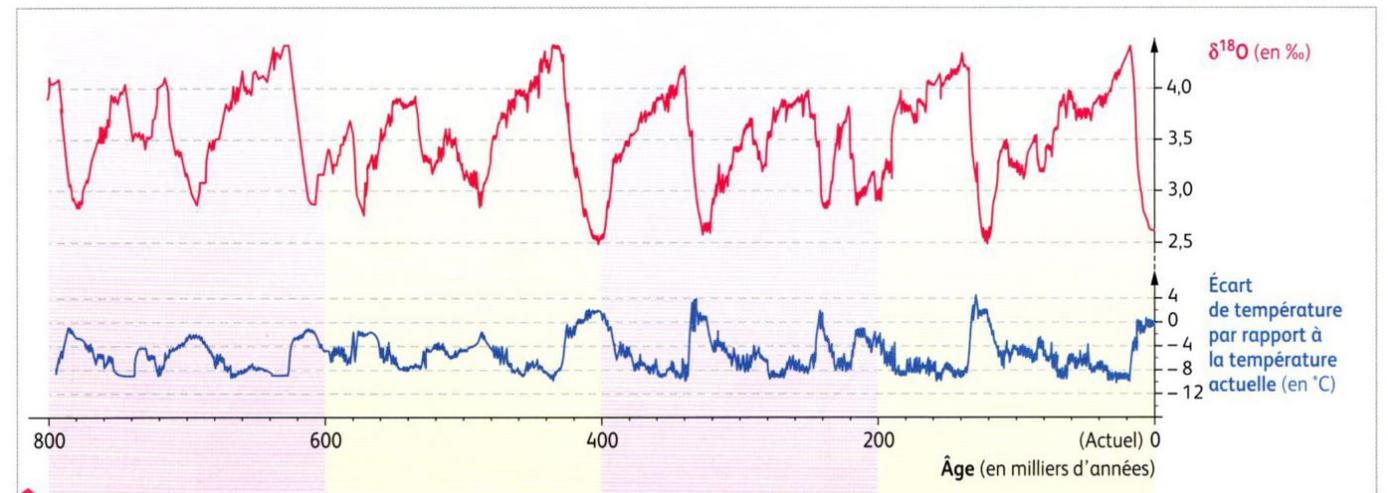
Variations du  $\delta^{18}\text{O}$  (mesuré dans le carbonate de calcium du test des animaux marins) en fonction de la température de l'eau. Le  $\delta^{18}\text{O}$  représente la différence entre le rapport isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  mesuré dans l'échantillon étudié et celui d'un échantillon de référence. Les  $\delta^{18}\text{O}$  sont exprimés en ‰ par rapport à cette référence. Ils reflètent la température qui régnait lors de la formation des échantillons analysés.



Épaisseurs des calottes glaciaires à trois époques différentes et détermination du  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau de mer pour ces mêmes périodes.

En période glaciaire, le volume de glace piégeant l' $^{16}\text{O}$  est plus important qu'en période interglaciaire : l'eau de mer est donc proportionnellement enrichie en  $^{18}\text{O}$  et le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  mesuré dans les tests de foraminifères est plus élevé. ( jusqu'à > à zéro)

En période interglaciaire : On observe une fonte des calottes glaciaires. Conséquences au niveau de la mer : le volume tend à augmenter, l'eau s'enrichit en  $^{16}\text{O}$  donc  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  diminue donc  $\delta^{18}\text{O}$  des sédiments diminue.



**b** Composition isotopique des tests de foraminifères benthiques depuis 800 000 ans. La variation de la température déduite de l'étude des glaces antarctiques est rappelée au dessus.

L'analyse des carottes sédimentaires océaniques par le calcul du  $\delta^{18}\text{O}$  des tests de Foraminifères montre une alternance de périodes chaudes brèves et de périodes froides plus longues. Cette alternance présente une grande similarité avec celle observée dans les carottes de glace, ce qui confirme l'évolution globale et périodique du climat durant les 800000 dernières années.