

# Le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces polaires.

[Lien vers les fichiers excel paléoclimatologie](#)

Les calottes glaciaires qui recouvrent les pôles sont constituées d'une accumulation de neige déposée années après années et compressée sous son propre poids. Les [carottes](#) de glace extraites de certains forages donnent accès à des échantillons de glace issus de précipitations neigeuses dont l'âge dépend de la profondeur de l'échantillon. En certains forages, les glaces les plus profondes ont jusqu'à 800 000 ans.

Il existe plusieurs isotopes stables de l'oxygène dont  $^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$  qui sont les plus abondants (respectivement 99,8 % et 0,2 %). On les retrouve dans tous les composés oxygénés naturels, notamment l'eau et les carbonates. L'eau (océan, vapeur, pluie, glace, etc.) est constituée essentiellement à partir de l'isotope 16 de l'oxygène qui est le plus répandu.

## La notion de delta isotopique.

Le  $\delta^{18}\text{O}$  indique la différence entre le rapport  $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$  mesuré dans échantillon d'eau et le rapport  $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$  moyen des océans actuels (nommé SMOW). Il est exprimé en pour mille et il se calcule selon la formule suivante :

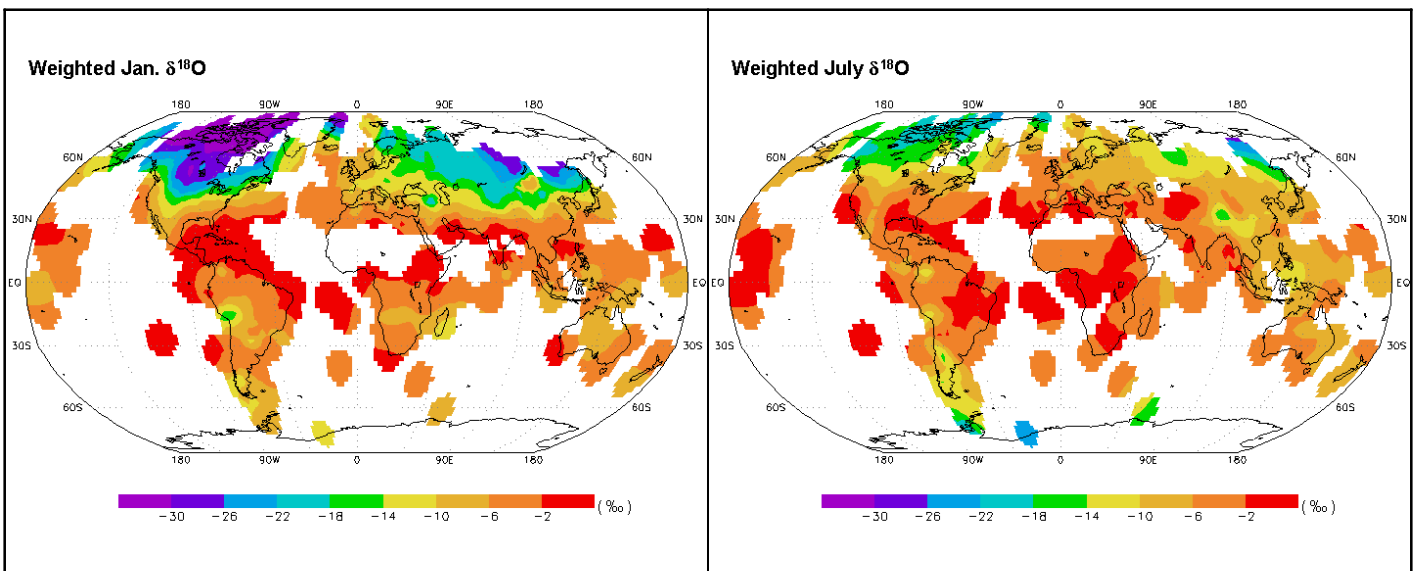
$$\delta^{18}\text{O} = 1000 \cdot [ (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{mesuré}} / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}} - 1 ]$$

SMOW désigne la composition moyenne de l'océan (Standard Mean Ocean Water), qui vaut :  $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}} = 2005,2 \cdot 10^{-6}$

Lorsque la concentration en  $^{18}\text{O}$  de l'eau diminue le  $\delta^{18}\text{O}$  diminue.

## Les variations du $\delta^{18}\text{O}$ .

### Moyennes mensuelles du $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de précipitation:

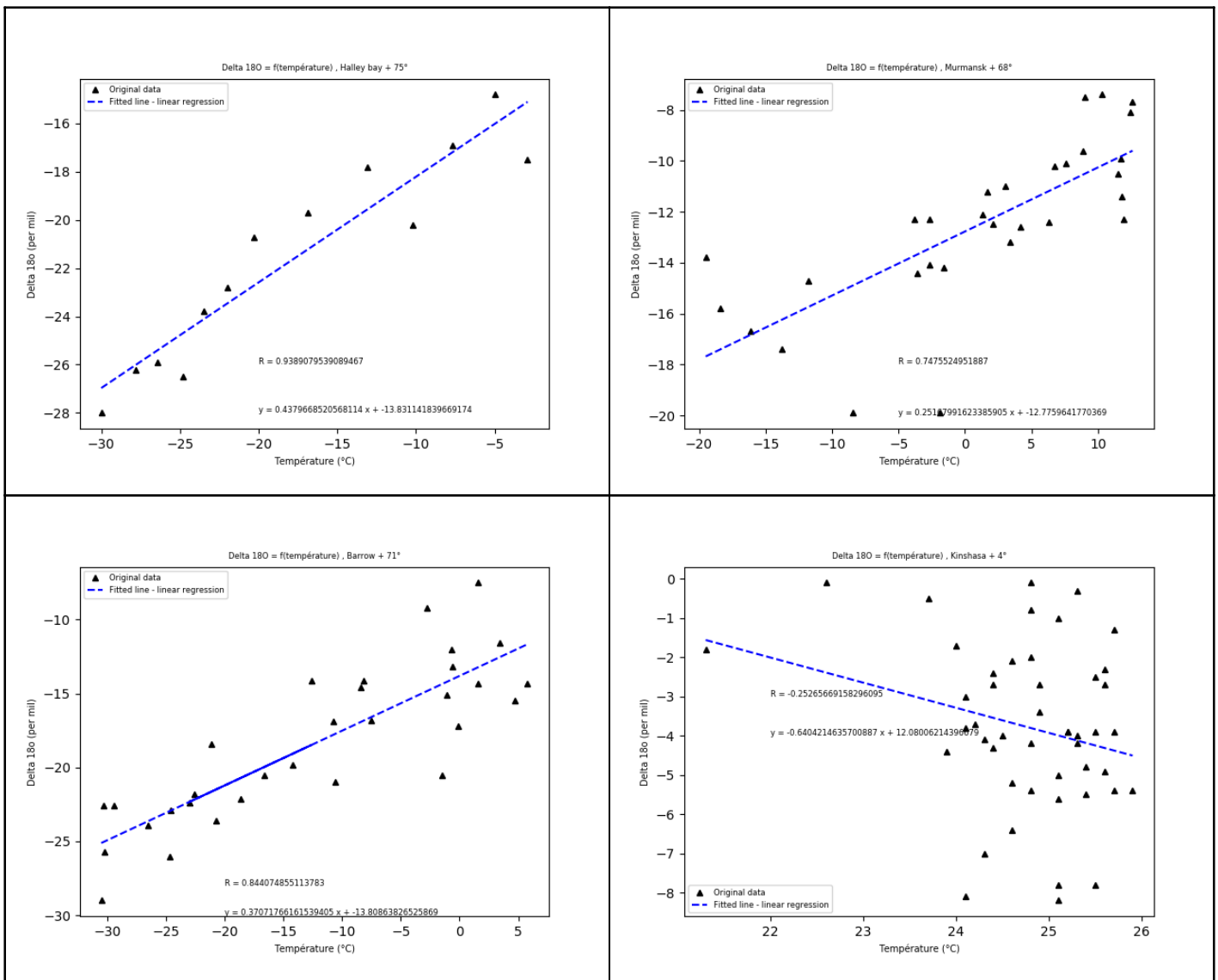


Le  $\delta^{18}\text{O}$  varie en fonction de la latitude: plus la latitude est élevée plus le  $\delta^{18}\text{O}$  est faible. Le  $\delta^{18}\text{O}$  varie aussi en fonction du temps (saisons); il est plus faible en janvier qu'en juillet. La variation temporelle s'observe surtout aux hautes latitudes.

Ces variations spatiales et temporelles suggèrent une influence de la température sur le  $\delta^{18}\text{O}$ . Pour tester cette hypothèse il faut mesurer la corrélation entre le  $\delta^{18}\text{O}$  et la température:

## Étude de la corrélation $\delta^{18}\text{O}$ / température.

Le dossier temp\_18O contient des fichiers xls mettant en relation la date, le  $\delta^{18}\text{O}$  mesuré dans l'eau de pluie et la température mesurée, en différents lieux. On peut donc tracer les graphiques suivants :  $\delta^{18}\text{O} = f(\text{température})$  et afficher leurs droites de régression, ainsi que leurs équations et coefficients de corrélation R, pour différents lieux.



En fonction du lieu choisi, il n'existe pas toujours une corrélation entre les valeurs du  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux de précipitations et la moyenne mensuelle (ou annuelle) des températures de l'air. La corrélation est forte (les points s'alignent) aux hautes latitudes (Pôles), mais très faibles (mauvais alignement, points dispersés) aux faibles latitudes (Équateur).

	Amderma	Ascension	Kinshasa	Murmansk	Halley Bay	Barrow
<b>Latitude</b>	+ 69°	+ 7°	+ 4°	+ 68°	+ 75°	+ 71°
<b>Équation</b>	$y = 0,29x - 13,39$	$y = -0,33x + 8,89$	$y = -0,64x + 12$	$y = 0,25x - 12$	$y = 0,43x - 13$	$y = 0,37x - 13$
<b>Coefficient de corrélation</b>	0,75	-0,44	-0,25	0,74	0,93	0,84

La corrélation observée entre  $t^\circ$  et  $\delta^{18}\text{O}$  aux hautes latitudes est une corrélation positive: une augmentation de la température de l'air est corrélée à une augmentation du  $\delta^{18}\text{O}$  des précipitations. Les informations relatives à la notion de  $\delta$  isotopique et au principe de fractionnement isotopique de l'oxygène, permettent de préciser le sens de la corrélation: c'est l'augmentation de la température de l'air qui induit l'augmentation du  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux de précipitations. Une augmentation du  $\delta^{18}\text{O}$  traduit donc une augmentation de la température. Et inversement.

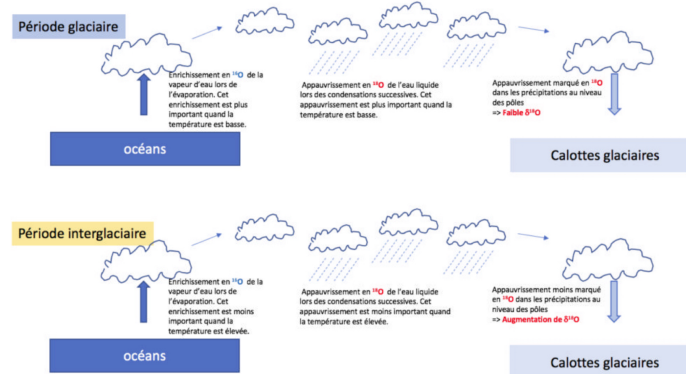
### Le fractionnement isotopique $^{18}\text{O}$ $^{16}\text{O}$

Contrairement aux processus biologiques qui ne font généralement pas de différence entre les différents isotopes d'un même élément, la différence de masse entre les isotopes affecte les processus physico-chimiques tels que l'évaporation.

Lors de l'évaporation océanique (principalement dans la zone intertropicale), l'oxygène 18 étant plus lourd que l'oxygène 16, il s'évapore moins facilement. Les nuages formés sont alors relativement appauvris en  $^{18}\text{O}$  et enrichis en  $^{16}\text{O}$ . Leur  $\delta^{18}\text{O}$  diminue donc par rapport à la référence océanique SMOW et devient négatif.

Au cours du trajet du nuage vers le pôle, les phénomènes de condensations successifs appauvrissent le nuage en  $^{18}\text{O}$  (le  $^{18}\text{O}$  plus lourd condense plus facilement, l'eau de pluie est alors relativement enrichie en  $^{18}\text{O}$ ). Le  $\delta^{18}\text{O}$  du nuage devient de plus en plus négatif.

Arrivée au pôle, la neige qui tombe des nuages est très appauvrie en  $^{18}\text{O}$ . La glace qui se forme a alors un  $\delta^{18}\text{O}$  très négatif (-40 à -50 pour mille)



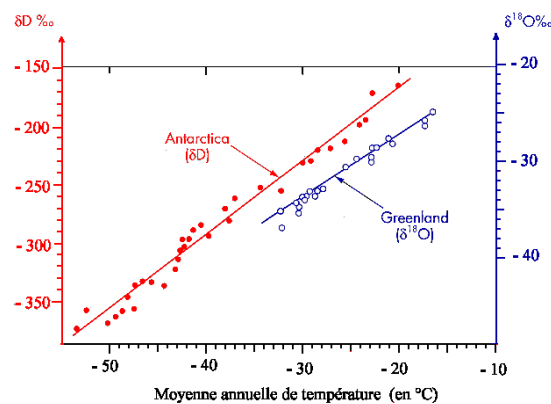
Le fractionnement isotopique du  $^{18}\text{O}$   $^{16}\text{O}$  dépend de la température. La vaporisation du  $^{18}\text{O}$  nécessitant davantage d'énergie que celle du  $^{16}\text{O}$ , il y a donc davantage de  $^{18}\text{O}$  qui s'évapore lors d'une période chaude que lors d'une période froide.

Le nuage qui se forme contient davantage de  $^{18}\text{O}$  pendant une période chaude que pendant une période froide. Ainsi, le  $\delta^{18}\text{O}$  du nuage en période chaude est plus élevé qu'en période froide. Le  $\delta^{18}\text{O}$  de la glace polaire sera donc plus élevé pendant une période chaude que pendant une période froide.

### Application.

Aux hautes latitudes, si on connaît (mesure) le  $\delta^{18}\text{O}$ , on peut alors déterminer la température de l'air au moment de la précipitation grâce à l'équation de la droite de régression. Le  $\delta^{18}\text{O}$  constitue ainsi un thermomètre isotopique.

Les équations des droites de régression varient en fonction de la localisation. L'utilisation du  $\delta^{18}\text{O}$  pour reconstituer les variations paléoclimatiques en un lieu donné nécessite donc d'utiliser l'équation spécifique à ce lieu.



Jouzel J., C. Lorius, S. Johnsen and P. Grootes, 1994 :

*Climate instabilities : Greenland and Antarctic records. Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris. vol. t. 319, série II, 65-77*

Les équations des droites de régression du graphique de Jouzel sont du type :  $y = a.x + b$  c'est à dire  $\delta = a.(\text{Température}) + b$

Donc:  $\text{Température} = (\delta - b) / a$

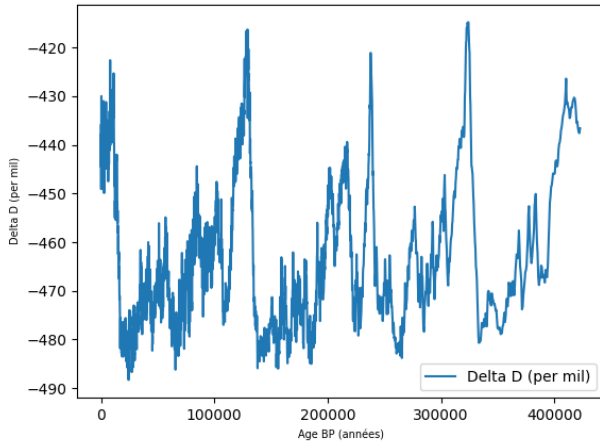
On peut donc mesurer graphiquement cette relation à partir du graphique de Jouzel:

- À Vostok (Antarctique):  $t^\circ = (\delta\text{D} + 31,5) / 6,5$
- À GRIP (Arctique):  $t^\circ = (\delta^{18}\text{O} + 14) / 0,66$

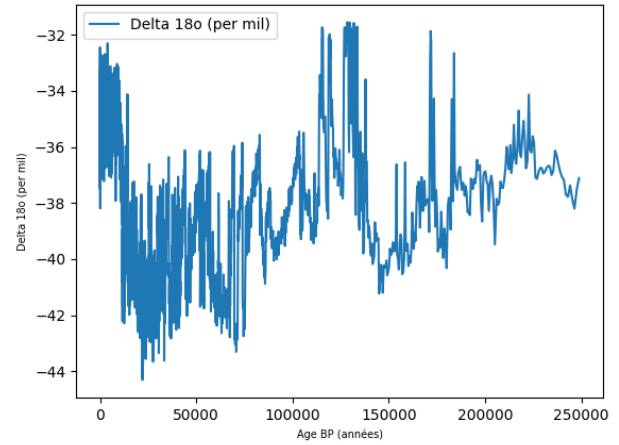
Les carottes de glaces, issues des forages réalisés en Antarctique (pôle Sud) et au Groenland (pôle Nord), donnent accès à des échantillons de glaces anciennes que l'on peut dater (plus la profondeur de la carotte est élevée, plus la glace est âgée) et sur lesquelles on peut mesurer le delta isotopique.

Le dossier ice $^{18}\text{O}$  contient des fichiers xls/x qui mettent en relation, pour différents forages, l'âge de la glace, et le  $\delta^{18}\text{O}$  mesuré:

Delta D en fonction du temps à Vostok

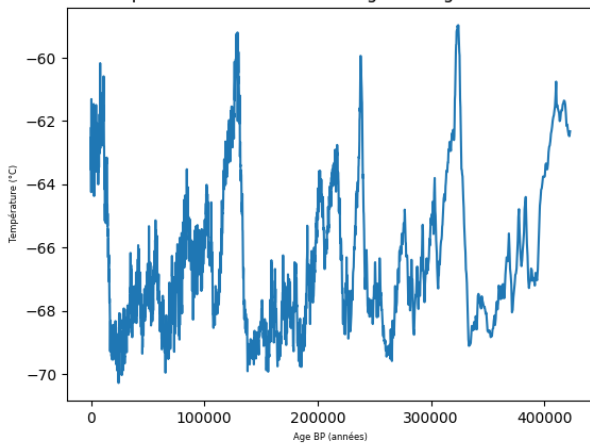


Delta 18o en fonction du temps à GRIP

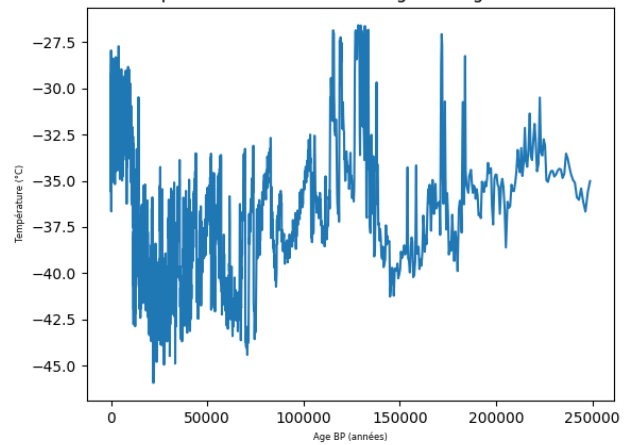


Connaissant la relation entre la température et le delta isotopique de l'eau (équations des droites de Jouzel à Vostok et à GRIP), on peut alors déterminer la température qui régnait au moment des précipitations à l'origine des échantillons de glace en antarctique et en arctique:

Température en fonction de l'âge de la glace - Vostok



Température en fonction de l'âge de la glace - GRIP



L'application de l'équation de la droite de Jouzel montre que la température actuelle en Antarctique est de  $-62^{\circ}$ , alors qu'il y a 21000 ans lors du dernier minima du  $\delta D$  la température était de  $-70^{\circ}$ . Il y a 21000 ans la température au dessus de l'antarctique était inférieure de  $8^{\circ}C$  à la température actuelle. On trouve un écart de  $10^{\circ}C$  pour le Groenland.

L'analyse du  $\delta^{18}O$  (ou du  $\delta D$ ) des carottes glaciaires met ainsi en évidence sur 400 000 ans une alternance de périodes froides ( $\delta$  faible) et de périodes chaudes ( $\delta$  élevé) avec un écart de température d'une dizaine de degrés Celsius. Ces périodes sont approximativement synchrones en Antarctique et au Groenland. Il s'agit donc de changements globaux d'un ou plusieurs paramètres du climat. Ces périodes "froides" (périodes glaciaires) ont une périodicité de 100 000 ans et sont entrecoupées de périodes chaudes (périodes inter-glaciaires) d'environ 10 000 ans.