

Ce qu'il faut retenir du delta 18 O ($\delta^{18}O$) en tant qu'indicateur paléoclimatique

Tristan FERROIR <http://tristan.ferroir.free.fr>

Comme de nombreux éléments sur Terre, l'oxygène existe sous la forme d'isotopes, c'est à dire un même élément mais dont le noyau atomique possède un nombre différents de neutrons. On a ainsi, pour l'oxygène, 3 isotopes : l'isotope 16 (8 protons, 8 neutrons) qui est le plus abondant, l'isotope 17 (8 protons, 9 neutrons) et l'isotope 18 (8 protons, 10 neutrons).

I Le $\delta^{18}O$, qu'est-ce que c'est?

Le $\delta^{18}O$ est un indicateur qui quantifie la quantité d'isotope 18 de l'oxygène par rapport à l'oxygène 16 dans un échantillon. Afin de pouvoir comparer les différentes valeurs de ce rapport, on choisit un standard qui fera office de référent universel. Ainsi, tous les rapports $\frac{^{18}O}{^{16}O}$ seront comparés à un standard ce qui permettra ensuite de comparer les différentes valeurs entre elles. En pratique, le $\delta^{18}O$ est calculé à partir de la formule suivante après avoir mesuré le rapport $\frac{^{18}O}{^{16}O}$ d'un échantillon par un spectromètre de masse :

$$\delta^{18}O = \left(\frac{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

Etant donné qu'on multiplie le résultat obtenu par 1000, le $\delta^{18}O$ s'exprime donc en ‰ (pour mille). De façon simple, le $\delta^{18}O$ quantifie donc la quantité d'isotope 18 de l'oxygène par rapport à l'oxygène 16. Si la quantité d'isotope 18 dans l'échantillon est importante, alors le numérateur est grand et donc le $\delta^{18}O$ est élevé. Au contraire, s'il y a peu d'oxygène 18 dans l'échantillon, alors le numérateur est petit et le $\delta^{18}O$ est donc faible.

II Pourquoi y a-t-il des variations du $\delta^{18}O$?

A priori, quel que soit l'échantillon, il devrait y avoir toujours la même quantité d'oxygène 18 par rapport à l'oxygène 16 puisque dans les deux cas, il s'agit du même élément. Cependant, il existe une légère différence de masse à cause de la présence, pour l'oxygène 18 de 2 neutrons supplémentaires : l'oxygène 18 pèse donc plus lourd. Cette différence peut donc être à l'origine d'un fractionnement isotopique qu'on dit dépendant de la masse puisque du à cette différence de masse.

III Qu'est-ce que le fractionnement isotopique et comment se produit-il?

Nous l'avons dit, étant donné la différence de masse entre les deux isotopes, ceux-ci ne vont pas avoir exactement la même réaction lors des processus physico-chimiques. Prenons un exemple : l'évaporation.

Si on considère un océan au-dessus duquel flottent des nuages, il y a des processus d'évaporation qui se produisent de l'océan vers les nuages et qui permettent leur formation. Etant donné que l'oxygène 18 est plus lourd que l'oxygène 16, l'oxygène 18 s'évapore moins facilement. En terme physique, il s'agit d'une différence d'énergie d'activation permettant la vaporisation. L'énergie nécessaire à la vaporisation de l'oxygène 16 (en fait de l'eau contenant de l'oxygène 16) est plus faible que celle nécessaire à la vaporisation de l'oxygène 18 puisque la molécule d' $H_2^{16}O$ est plus légère que celle d' $H_2^{18}O$. Comme cette énergie de vaporisation est plus faible, pour une même température, l'énergie de vaporisation d' $H_2^{16}O$ sera plus souvent atteinte que celle d' $H_2^{18}O$. Les nuages seront donc plus riches en $H_2^{16}O$ qu'en $H_2^{18}O$ donc plus riches en oxygène 16 qu'en oxygène 18. Il se produit donc lors de l'évaporation un fractionnement isotopique au profit de l'isotope léger. A l'inverse, la condensation et donc les pluies seront plus chargées en oxygène 18 qu'en oxygène 16.

Ceci explique par exemple que les nuages aient un $\delta^{18}O$ plus faible (comprendre plus négatif) que celui de l'océan puisqu'il y a moins d'oxygène 18 dans les nuages.

IV Pourquoi le $\delta^{18}O$ varie-t-il avec la latitude?

Quand on regarde le trajet des nuages, ils vont globalement de l'équateur vers les pôles. Au niveau de l'équateur, ils se chargent en eau au cours de l'évaporation et l'eau des nuages a donc un $\delta^{18}O$ plus négatif que celui de l'océan. Au fur et

à mesure de leur migration vers les pôles, il va y avoir des précipitations qui vont donc appauvrir le nuage en oxygène 18 (puisque celui-ci précipite préférentiellement) : le $\delta^{18}O$ des nuages devient donc de plus en plus négatif de l'équateur vers les pôles. Le $\delta^{18}O$ varie donc avec la latitude.

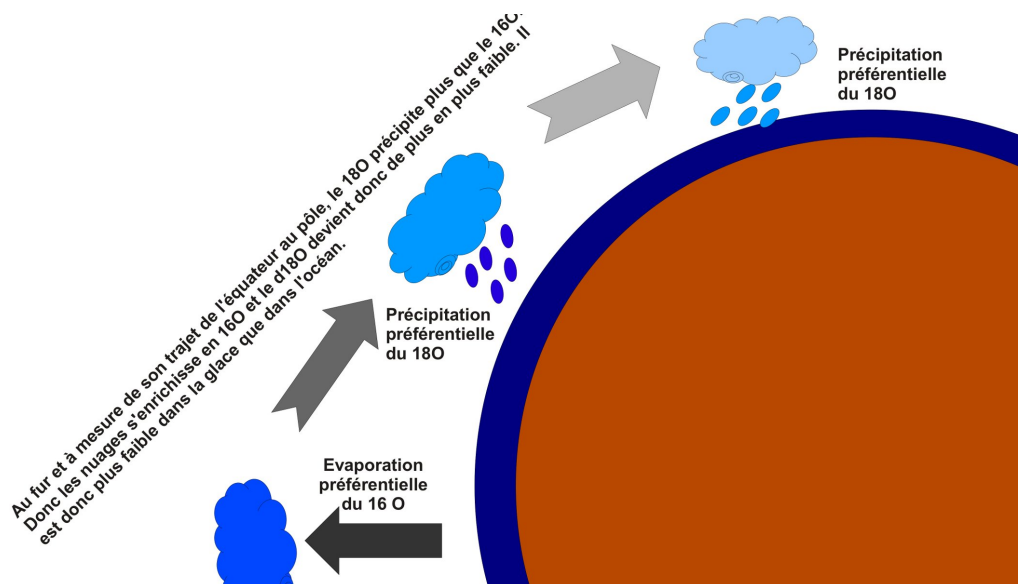


Fig. 1: La diminution du $\delta^{18}O$ en fonction de la latitude s'explique par le déplacement des nuages et les précipitations.

V Le $\delta^{18}O$ des glaces peut être interprété comme un paléothermomètre

Nous avons vu que le $\delta^{18}O$ variait avec la latitude. Pour pouvoir utiliser le $\delta^{18}O$ comme un paléothermomètre, il faut donc toujours rester à la même latitude et mesurer conjointement la température et le $\delta^{18}O$ des précipitations neigeuses pour avoir une référence. C'est ce qui a été fait par Jouzel et collaborateurs aux pôles.

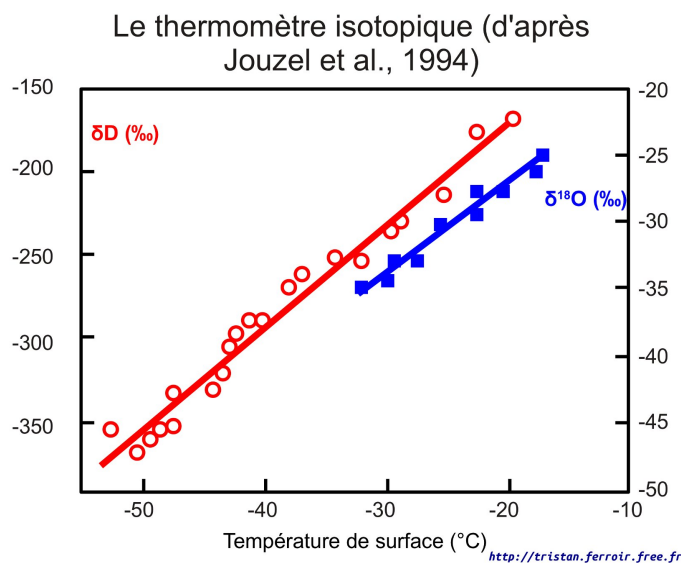


Fig. 2: Relation entre le $\delta^{18}O$ et la température au niveau des glaces.

La figure montre que lorsque la température augmente, le $\delta^{18}O$ des glaces augmentent et inversement, lorsque la température diminue, le $\delta^{18}O$ diminue. Il est très important pour expliquer cela de bien comprendre la figure suivante et son explication.

- En période froide, l'évaporation est faible. Il y a donc essentiellement du 16O qui part dans les nuages. Le rapport entre le 16O et le 18O est donc très fort : il y a beaucoup de 16O par rapport au 18O. Ainsi, le $\delta^{18}O$ des nuages est

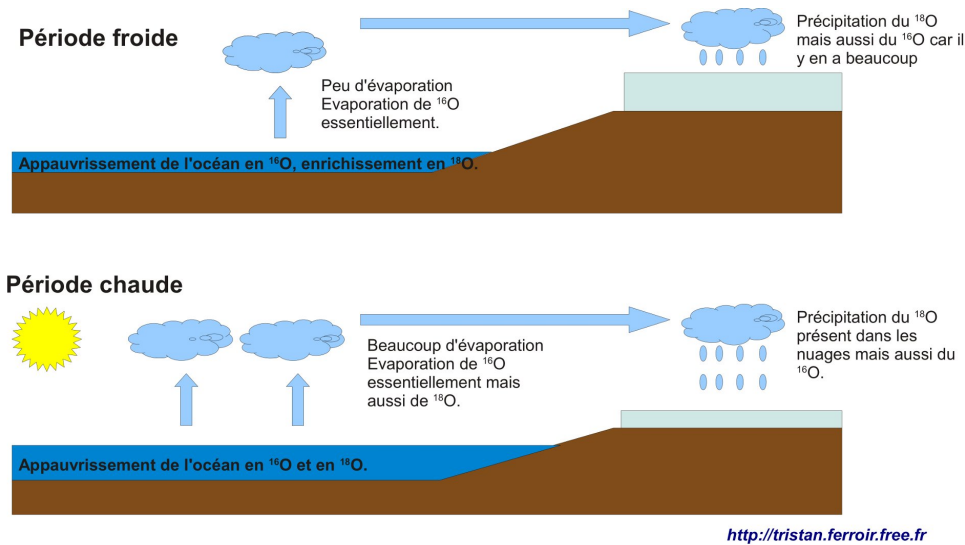


Fig. 3: La figure majeure pour comprendre l'utilisation du $\delta^{18}O$ comme paléothermomètre.

très faible. Quand le nuage arrive aux pôles, il n'a quasiment que du ^{16}O à précipiter, le $\delta^{18}O$ des glaces est donc très faible (très négatif)

- En période chaude, l'évaporation est forte. Il y a donc toujours essentiellement du ^{16}O qui part dans les nuages mais aussi du ^{18}O (car l'énergie de vaporisation est plus facilement franchie quand il fait chaud). Donc, le nuage est plus chargé en ^{18}O qu'en ^{16}O pendant une période chaude que pendant une période froide. Ainsi, le $\delta^{18}O$ du nuage en période chaude est plus élevé qu'en période froide. En arrivant au pôle, le nuage relargue du ^{16}O mais aussi du ^{18}O puisqu'il en contient. Ainsi, le $\delta^{18}O$ de la glace sera donc plus élevé pendant la période chaude que pendant la période froide. Il en va de même pour le $\delta^{18}O$ de l'atmosphère au dessus des pôles.

En utilisant le thermomètre isotopique de Jouzel et collaborateurs, on peut donc connaître à partir du $\delta^{18}O$ des glaces, la température qui régnait à l'époque des précipitations au dessus des pôles. On fait l'interprétation que s'il fait plus froid aux pôles, alors il faisait plus froid sur Terre. On effectue cette mesure de $\delta^{18}O$ sur une même carotte de glace pour être toujours à la même latitude et donc pour que notre mesure de $\delta^{18}O$ ne renseigne bien que sur la température.

C'est ainsi qu'on obtient la fameuse courbe de variation de la température au cours du quaternaire.

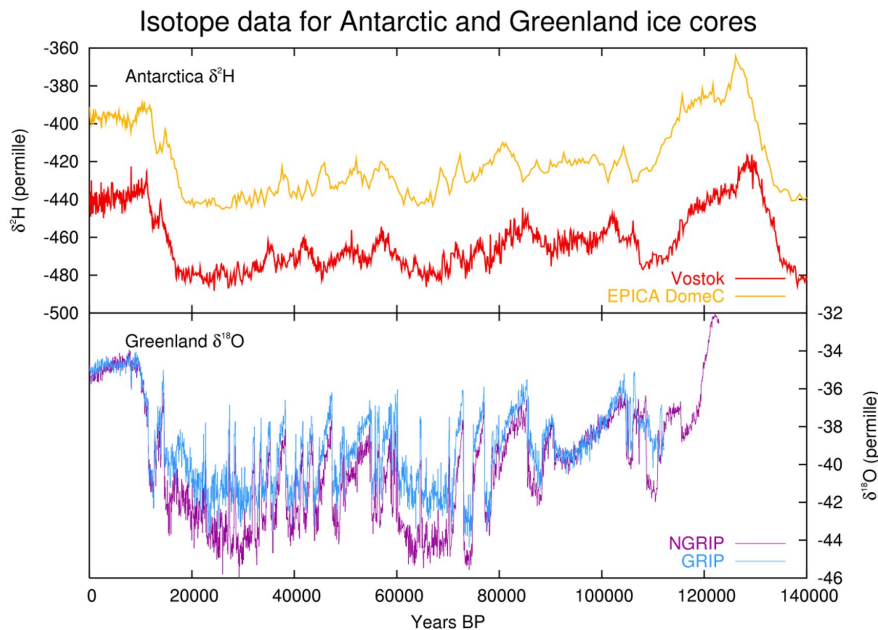


Fig. 4: La courbe du $\delta^{18}O$ mesurée dans une carotte de glace du Groenland (GRIP) et du δ^2H ou δD dans la carotte de Vostok en Antarctique. (Le δD fonctionne de la même façon que le $\delta^{18}O$.)

VI Le $\delta^{18}O$ des foraminifères benthiques peut être interprété comme une indication du volume des glaces

Le $\delta^{18}O$ des foraminifères ne renseignent pas sur la valeur absolue de la température comme peut le faire le $\delta^{18}O$ des glaces.

Les foraminifères utilisent l'oxygène présent dans l'eau environnante dans la formation de leur test carbonaté. Ainsi, le $\delta^{18}O$ des foraminifères dépend donc d'une part du rapport oxygène 18-oxygène 16 de l'océan ainsi que de la température de ce même océan. Pour s'affranchir de la température de l'océan, on utilise les foraminifères dit benthiques qui vivent sur le fond : la température y est constante et le $\delta^{18}O$ de ces foraminifères benthiques ne dépend donc que du $\delta^{18}O$ des océans.

Regardons à nouveau la figure 1. Lorsqu'un nuage se forme, il prélève préférentiellement du ^{16}O par rapport au ^{18}O . Ainsi, lorsque le nuage se forme, la quantité d'oxygène 18 dans l'océan augmente et donc son $\delta^{18}O$ aussi. Maintenant, regardons attentivement la figure 3. En période froide, il y a peu d'évaporation. Donc, l'essentiel de l'oxygène 18 reste dans l'océan. Donc le $\delta^{18}O$ de l'océan augmente. Donc, celui des foraminifères benthiques augmente aussi. Au contraire, en période chaude, il y a beaucoup d'évaporation. Il y a donc un fort prélèvement par les nuages de ^{18}O . Donc le $\delta^{18}O$ de l'océan diminue. Donc le $\delta^{18}O$ des foraminifères benthiques diminuent aussi.

Ainsi, le $\delta^{18}O$ des foraminifères benthiques augmente lorsque la température diminue et le $\delta^{18}O$ des foraminifères benthiques diminue lorsque la température augmente. Pour autant, la valeur du $\delta^{18}O$ ne donne pas de température. Il nous dit simplement si on était en période plus chaude ou plus froide. Le $\delta^{18}O$ des foraminifères est en fait un indicateur de la quantité de glace présente aux pôles : si la période est froide, alors il y a beaucoup de glace aux pôles et donc l'essentiel de l'oxygène 16 est stocké dans la calotte de glace des pôles. Consécutivement, l'essentiel de l'oxygène 18 est présent dans les océans : le $\delta^{18}O$ des océans est élevé, celui des foraminifères benthiques aussi.

VII Que retenir de tout ça?

1. Le $\delta^{18}O$ est une mesure de la quantité d'oxygène 18 par rapport à la quantité d'oxygène 16.
2. Il existe un fractionnement isotopique entre l'oxygène 16 et l'oxygène 18 car ils n'ont pas la même masse.
3. Le fractionnement isotopique entre oxygène 16 et oxygène 18 est fonction de la température.
4. Le $\delta^{18}O$ des glaces renseignent sur la température qu'il fait aux pôles : lorsque la température augmente, le $\delta^{18}O$ augmente.
5. Le $\delta^{18}O$ des foraminifères benthiques renseignent sur la quantité de glace stockée aux pôles : lorsque le $\delta^{18}O$ augmente, cela signifie qu'il y a plus de glace aux pôles (car elle stocke l'isotope léger) et donc qu'il fait plus froid.