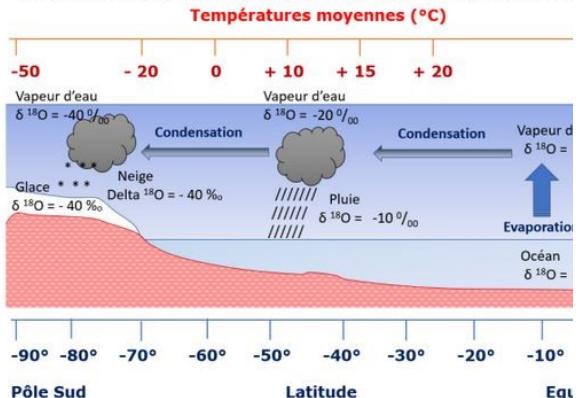


**Bilan 1 :** (actuel, indirectement, albédo, altération, astronomique, baisse, bonne, carbonatés, cyclique, CO<sub>2</sub>, coquilles, 100 000, augmente, excentricité, faible, glace, <sup>2</sup>H, inclinaison, indirectement, l'orbite, Milankovitch, mort, %, permafrost, petit, pH, pôles, précession, solaire, température, vapeur d'eau)

### \* Outils : le dosage isotopiques de l'oxygène

Les mesures de composition isotopique de l'oxygène (<sup>16</sup>O et <sup>18</sup>O) montrent que la proportion de <sup>18</sup>O dans les eaux de pluie et les précipitations neigeuses actuelles ..... avec la température.

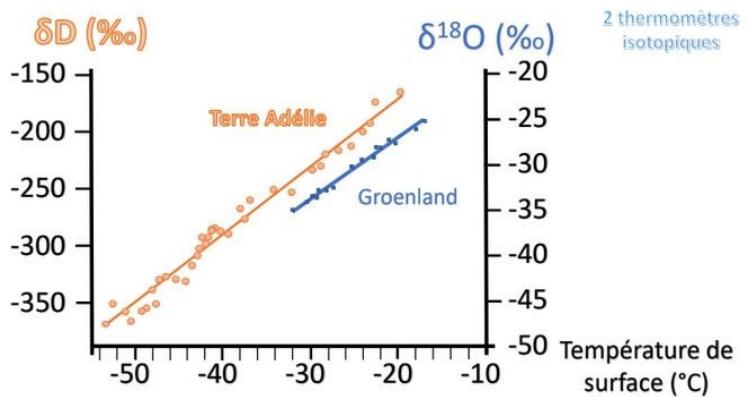
Rapports isotopiques des précipitations, exprimées par delta 18



Les valeurs mesurées du rapport <sup>18</sup>O / <sup>16</sup>O dans la glace sont comparées à une valeur de référence connue (le SMOW : eau de l'océan actuel). Le δ<sup>18</sup>O est un outil utilisé par les géologues pour comprendre l'évolution passée du climat ; la notation du δ<sup>18</sup>O s'écrit :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{échantillon}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} \times 1000$$

Le rapport (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O) SMOW correspond au rapport (<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O) de l'eau de l'océan actuel (SMOW= S Ocean Water). Sa valeur moyenne est de 2.10<sup>-3</sup>.

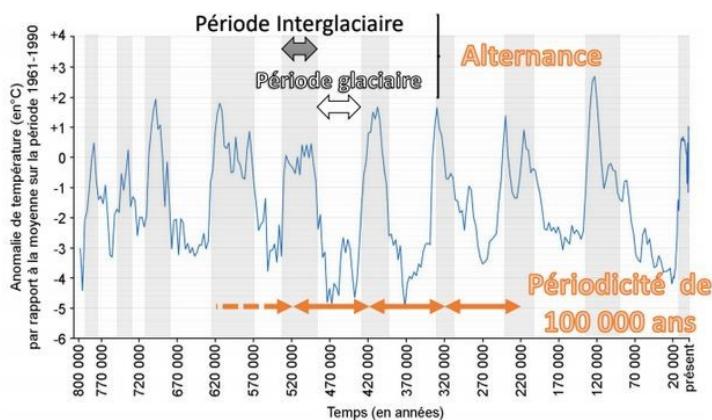


Plus il fait froid et plus le δ<sup>18</sup>O est .....

Un autre rapport isotopique est couramment utilisé comme thermomètre isotopique. Il s'agit du rapport (D/H). Le deutérium (D) est l'isotope lourd de l'hydrogène de masse atomique 2 (.....). Pour des raisons similaires à celles évoquées pour les isotopes de l'oxygène, on n'utilise pas ce rapport directement mais l'écart δD (en ..... ) par rapport à un standard de référence de composition proche de celle de l'océan mondial. Le δD est d'autant plus ..... que la température de formation de la neige est faible.

Le δ<sup>18</sup>O et le δD sont proportionnelles à la température. Les températures dont témoignent ces deux rapports sont celles estimées au niveau des ..... L'estimation de ces rapports fournit donc des informations sur les températures et leurs variations qui montrent une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires avec des cycles de ..... ans.

Variation de la température moyenne de la Terre déduite du thermomètre isotopique depuis 800 000 ans



L'analyse des bulles d'air emprisonnées dans la ..... permet de corrélérer ces variations de températures à des variations du CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> atmosphériques. On observe une très ..... concordance de ces variations au Groenland et en Antarctique.

## Comment expliquer ces cycles de température ?

Dans les années 1940, le mathématicien serbe Milutin ..... (1879-1958) avance l'hypothèse de l'existence d'une relation entre les variations climatiques et les modifications de ..... terrestre. Selon lui, la distance séparant la Terre du Soleil est déterminante puisque l'énergie solaire conditionne les climats terrestres.

La théorie de Milankovitch (ou théorie ..... des changements climatiques) permet d'expliquer l'alternance ..... de périodes glaciaires et interglaciaires. Milankovitch montra qu'une combinaison de trois paramètres orbitaux de la Terre varie de façon cyclique avec une période de 100 000 ans très marquée :

- l'angle d' ..... de la Terre, c'est-à-dire **l'obliquité**, varie avec une période de l'ordre de 41 000 ans.

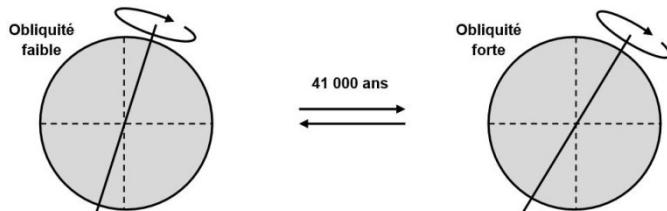
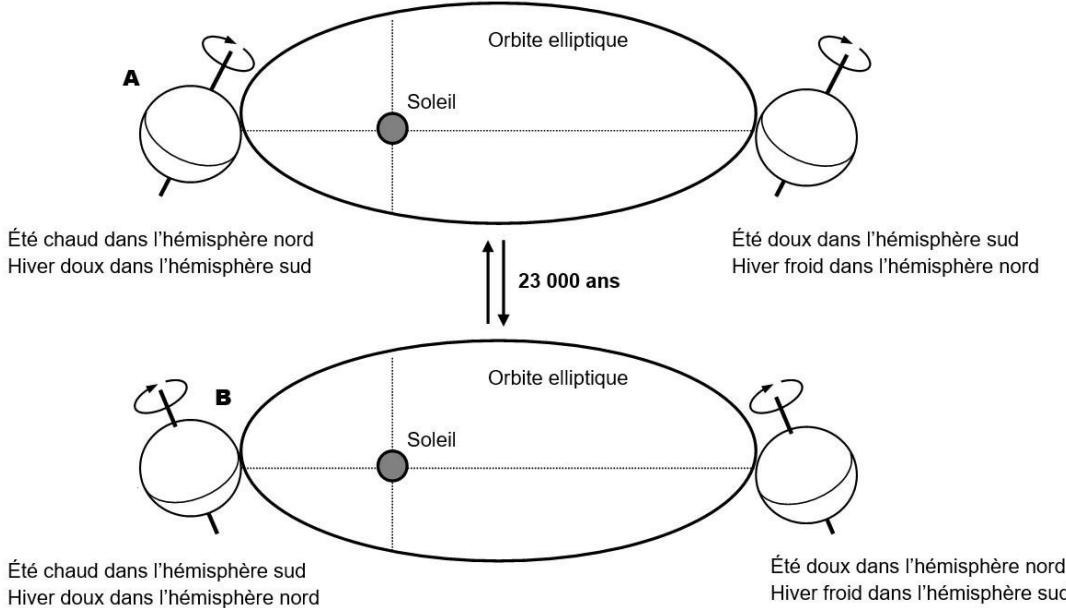
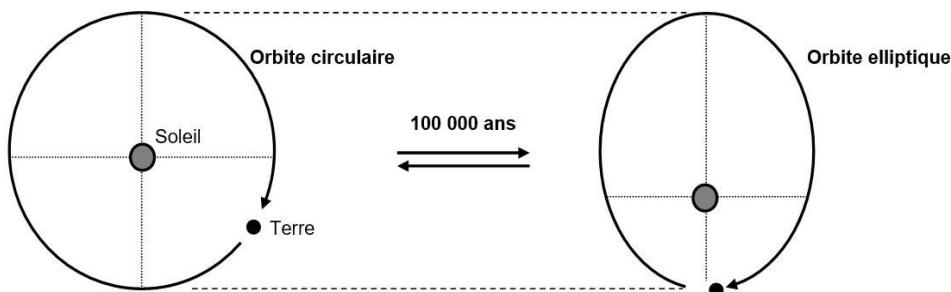


Schéma illustrant les variations de l'obliquité

- la **précession des équinoxes**. Elle est la lente modification de direction de l'axe de rotation de la Terre. Elle change avec une période de 23 000 ans. Schéma illustrant la ..... des équinoxes



- **L'excentricité**. C'est la forme de l'ellipse qui varie avec une période de 100 000 ans. L'excentricité correspond au degré d'aplatissement de l'orbite terrestre : elle varie de 0 (orbite circulaire) à 0,06 (ellipse), la valeur actuelle étant de 0,017. Schéma illustrant les variations de l' ..... de l'orbite terrestre.



Ces variations des paramètres orbitaux modifient la quantité d'énergie ..... reçue par la Terre. Ces variations ont été amplifiées par des rétroactions positives et négatives. C'est ce que nous allons voir dans le paragraphe suivant. Ce sont les variations cycliques des paramètres orbitaux qui ont modifié la quantité d'énergie

thermique reçue à la surface du globe. Elles ont été également amplifiées par des rétroactions (positives ou négatives) –vu en enseignement scientifique– impliquant :

- la variation de la concentration en ..... dans l'atmosphère
- le dégel partiel du .....
- l'..... et la décroissance de la surface couverte par les glaces
- la solubilité du ..... dans les océans

D'une façon plus générale, ces rétroactions sont à l'origine des entrées et sorties de glaciation.

#### \* Outils : suivis des rapports isotopiques dans les sédiments marins

<https://www.youtube.com/watch?v=oaOfeSJZ3IY>

On mesure des rapports isotopiques de divers isotopes présents dans les sédiments marins :

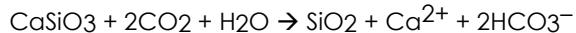
– le rapport  $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$  enregistré dans les carbonates permet de connaître le ..... de l'eau qui est proportionnel au taux de CO<sub>2</sub> dissous donc au taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique



– La mesure du rapport des isotopes de l'oxygène ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) dans les ..... (= tests) calcaires de certains fossiles océaniques (foraminifères par exemple- Les foraminifères sont des organismes unicellulaires planctoniques ou benthiques qui élaborent leur squelette externe calcaire, ou test, à partir des constituants (ions carbonate et calcium) permet également de déterminer ..... la température au moment de la ..... de l'organisme. Pour faire simple, une ..... du  $\delta^{18}\text{O}$  des carbonates est corrélée à une diminution des températures de l'eau.

#### L'altération des roches, thermostat de la terre ([lien vers article pour la science](#))

Un autre rapport isotopique est utilisé : le  $\delta^{87}\text{Sr}$ . Il est également mesuré dans les calcaires océaniques et ce rapport témoigne de l'importance de l'..... continentale. En effet, les roches comme le granite, subissent une altération chimique sous l'effet de l'eau chargée en CO<sub>2</sub>. Les plagioclases se transforment en minéraux argileux comme la kaolinite selon la réaction suivante :



Les ions Ca<sup>2+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ainsi formés passent en solution et sont transportés par les cours d'eau. Ils peuvent ensuite précipiter et forment des sédiments ..... selon la réaction suivante :



Plus l'altération des roches continentales est importante et plus il y a d'isotopes  $^{87}\text{Sr}$  et  $^{86}\text{Sr}$  apportés dans les océans et plus ces isotopes sont incorporés dans les calcaires et donc plus le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  mesuré dans ces calcaires est grand. Or l'altération continentale se fait au cours de réactions (géo)chimiques qui consomment du .....

Donc, le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  témoigne indirectement de la .....

L'augmentation de ce rapport dans les roches océaniques au cours du temps est synonyme de ..... de température.