

# Atmosphère et climat



**Gilles Ramstein**

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement  
Institut Pierre Simon Laplace

Yann Esnault (SaE)

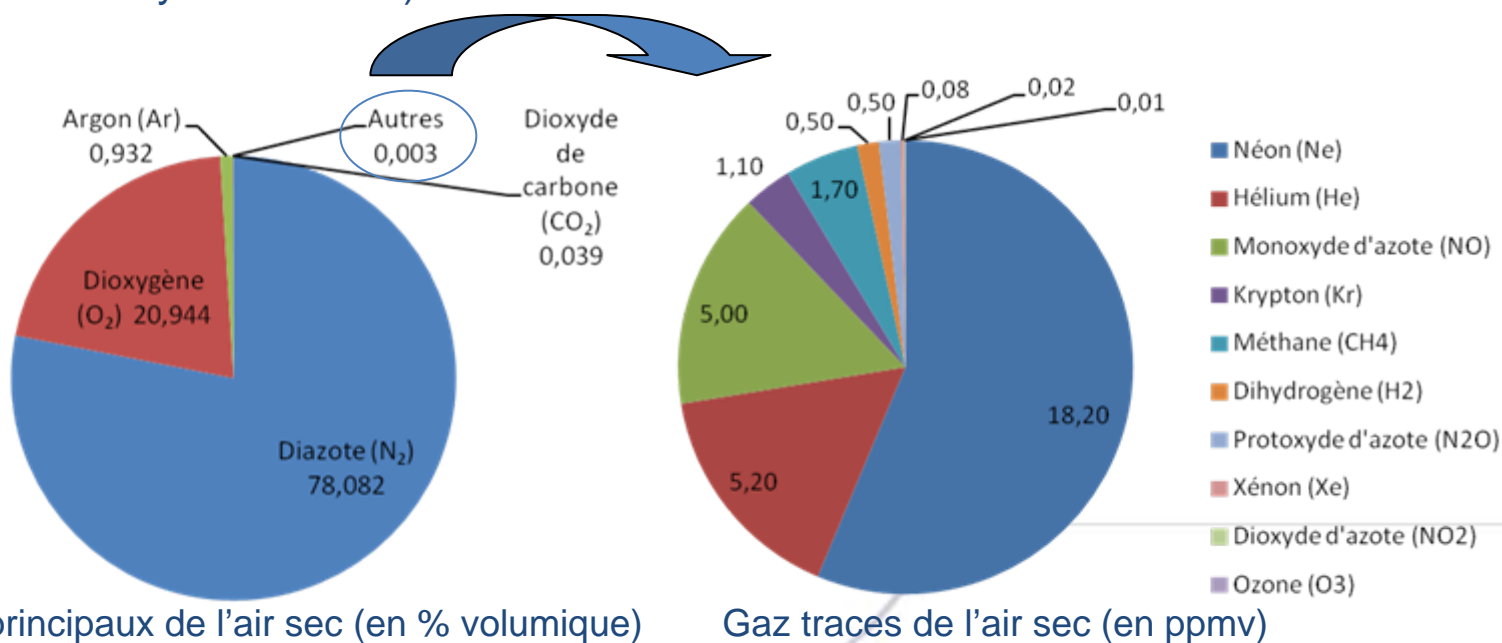


# Les gaz traces, acteurs du climat

La teneur des éléments majeurs de l'atmosphère terrestre – diazote ( $N_2$ ) et dioxygène ( $O_2$ ) – est remarquablement stable à l'échelle de centaines de millions d'années.

Ce qui varie à des échelles de temps bien plus courtes, ce sont les **gaz « traces »**, c'est-à-dire présents dans l'atmosphère en très petites quantités : en parties par million (ppm) pour le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et en parties par milliard (ppb) pour le méthane ( $CH_4$ ).

Malgré leur faible abondance, ces gaz jouent un rôle important dans le **bilan radiatif** de notre planète, car ce sont des **gaz à effet de serre** (comme la vapeur d'eau, l'oxyde d'azote et l'ozone) (voir la fiche « Rayonnement »).



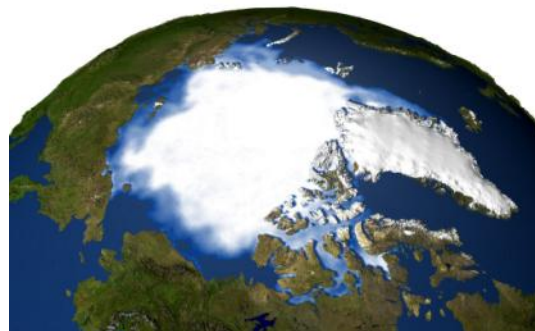
# Les archives glaciaires de l'atmosphère

Nous vivons dans une ère froide du climat de la Terre où coexistent deux calottes de glace (ou inlandsis), au Groenland et en Antarctique. Ces calottes se sont formées par la lente accumulation et compaction de la neige. Elles donnent accès à la composition de l'atmosphère des 800 000 dernières années grâce à l'analyse des minuscules **bulles d'air piégées dans la glace**. Certaines carottes de glace sont issues de forages à plus de 3000 mètres de profondeur et nous font donc remonter près d'un million d'années dans le passé !

Cet intervalle de temps de 800 000 ans est extrêmement court comparé à l'âge de la Terre (4,6 milliards d'années), mais suffisamment long pour que la glace ait enregistré des variations climatiques associées à des modifications de la teneur en  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ .



Une carotte (© British Antarctic Survey)



L'inlandsis groenlandais (et la banquise)



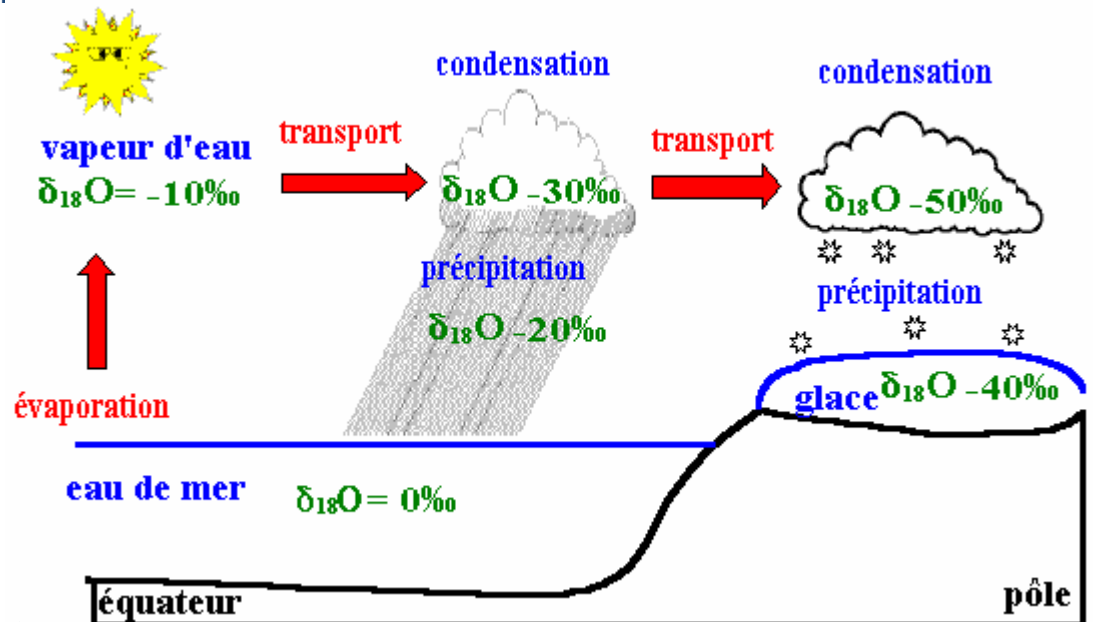
L'inlandsis antarctique

# Les archives glaciaires du climat

En effet, en plus des bulles d'air qu'elle piège, **la glace elle-même est une archive du passé** ! Dans les molécules d'eau ( $H_2O$ ), on trouve les deux isotopes principaux de l'oxygène,  $^{16}O$  (l'isotope principal) et  $^{18}O$  (isotope plus lourd, et rare). Leur abondance relative (**rapport  $\delta^{18}O$** ) donne une indication sur le climat. Voici le mécanisme :

- L'évaporation de l'eau des océans donne de la vapeur appauvrie en  $H_2^{18}O$  par rapport à l'eau de mer, car l'évaporation de cette eau plus lourde nécessite plus d'énergie.
- Comme  $H_2^{18}O$ , pour la raison symétrique, précipite préférentiellement au cours du cheminement des masses nuageuses, la vapeur qui condense finalement sous forme de neige aux pôles est très appauvrie en  $^{18}O$ .

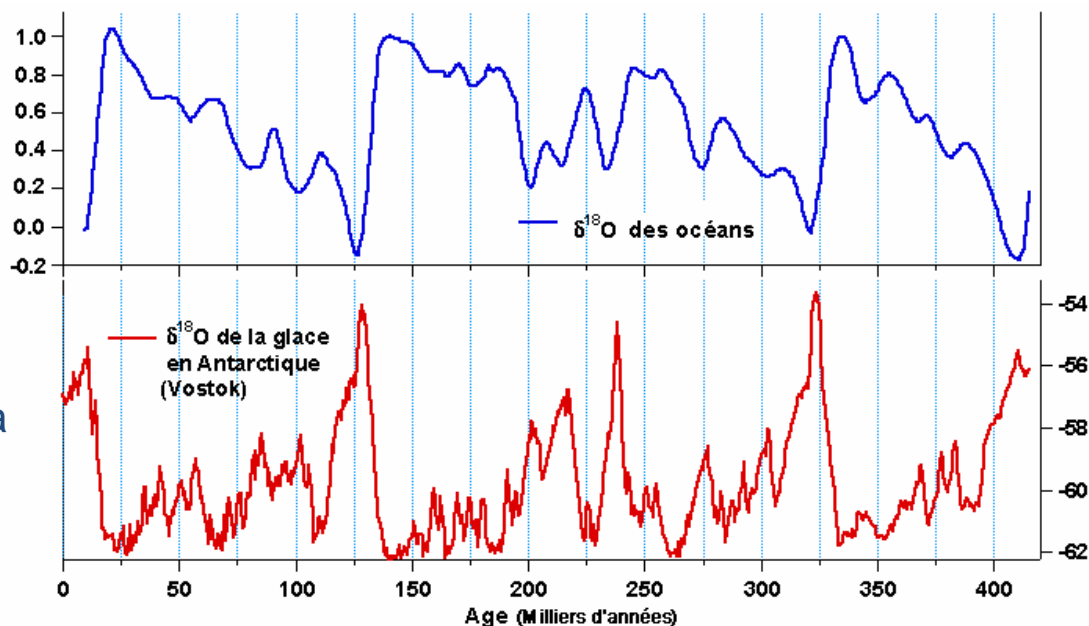
- **Cet appauvrissement est encore plus prononcé en période froide**, car la condensation qui a précédé l'arrivée aux pôles a été plus intense. Ce « thermomètre » qu'est le  $\delta^{18}O$  des glaces ne nous donne toutefois qu'une température locale, celle des régions proches du pôle.





# Les archives sédimentaires du climat

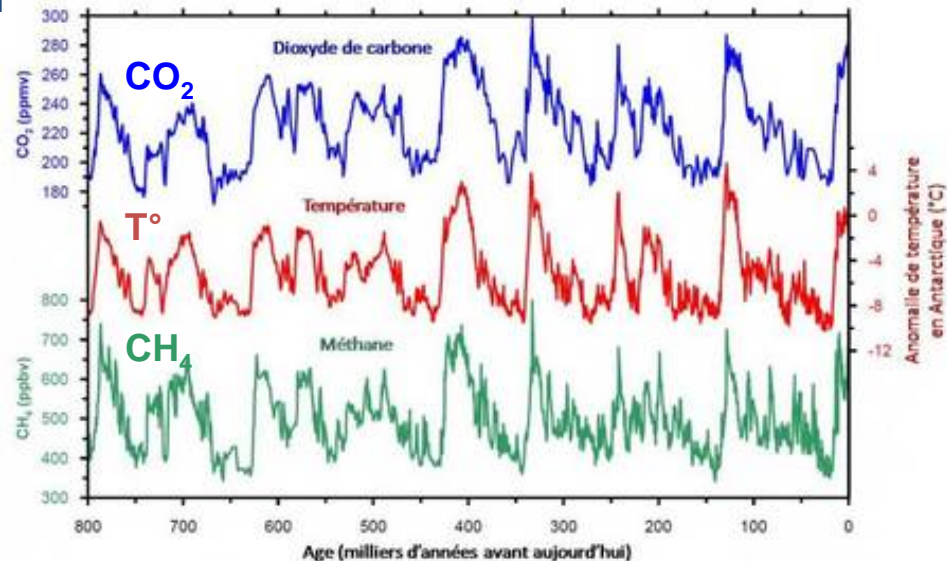
- En période glaciaire, on stocke donc un énorme volume d'eau appauvrie en  $^{18}\text{O}$  dans les calottes glaciaires : du coup, l'eau qui reste dans les océans se retrouve enrichie en  $^{18}\text{O}$  (car la quantité totale de  $^{18}\text{O}$  est évidemment conservée) ! **Le  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau de mer nous informe donc directement sur le volume des glaces.** Mais comment connaître le  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau de mer pour les périodes passées ?
- Des petits organismes marins, les foraminifères, synthétisent leur test en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) ; l'oxygène du carbonate vient évidemment de l'eau de mer. A partir de carottes de sédiments marins, on peut calculer le  $\delta^{18}\text{O}$  des carbonates pour une période donnée. Si l'on choisit des foraminifères qui vivent dans les grands fonds (« benthiques »), où la température de l'eau est plus ou moins constante, alors le  $\delta^{18}\text{O}$  des carbonates ne dépend que du  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau de mer, et permet donc d'estimer le volume des glaces à cette époque !
- On voit ci-contre la corrélation entre le  $\delta^{18}\text{O}$  de la glace antarctique (minimal lors du dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans) et le  $\delta^{18}\text{O}$  des océans (maximal à cette même époque).



# Gaz à effet de serre et climat

- Sur ces derniers 800 000 ans, le climat oscille entre des périodes glaciaires (présence de quatre calottes de glace : Amérique du Nord, Europe du Nord, Groenland et Antarctique) et des périodes interglaciaires comme actuellement, avec deux calottes seulement. On a montré que **les teneurs en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> varient de manière presque synchrone avec la température** (le contenu en gaz à effet de serre étant plus bas en période glaciaire qu'en période interglaciaire : 280 ppm contre 190 ppm pour le CO<sub>2</sub>, par exemple).
- Ces variations sont elles **cause ou conséquences** des changements climatiques ? On sait que le climat est soumis aux variations de l'énergie solaire reçue aux hautes latitudes nord durant l'été (**forçage orbital du climat**, voir la fiche « Rayonnement ») et que **l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> est parfois légèrement postérieure au réchauffement**. Mais **elle l'amplifie**, et joue donc un rôle important dans la sortie de glaciation. L'augmentation de température des océans et le dégel du pergélisol entraîne le **dégazage** de ces gaz à effet de serre, et crée un **feedback positif**.
- Malheureusement, pour des périodes plus anciennes, nous n'avons plus ces archives glaciaires. On perd, totalement pour le méthane, partiellement pour le CO<sub>2</sub>, la capacité à restituer les valeurs de ces deux gaz.

Les bulles piégées dans les glaces de l'Antarctique permettent de restituer le contenu en différents gaz à effet de serre CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O pendant près de 800 000 ans.

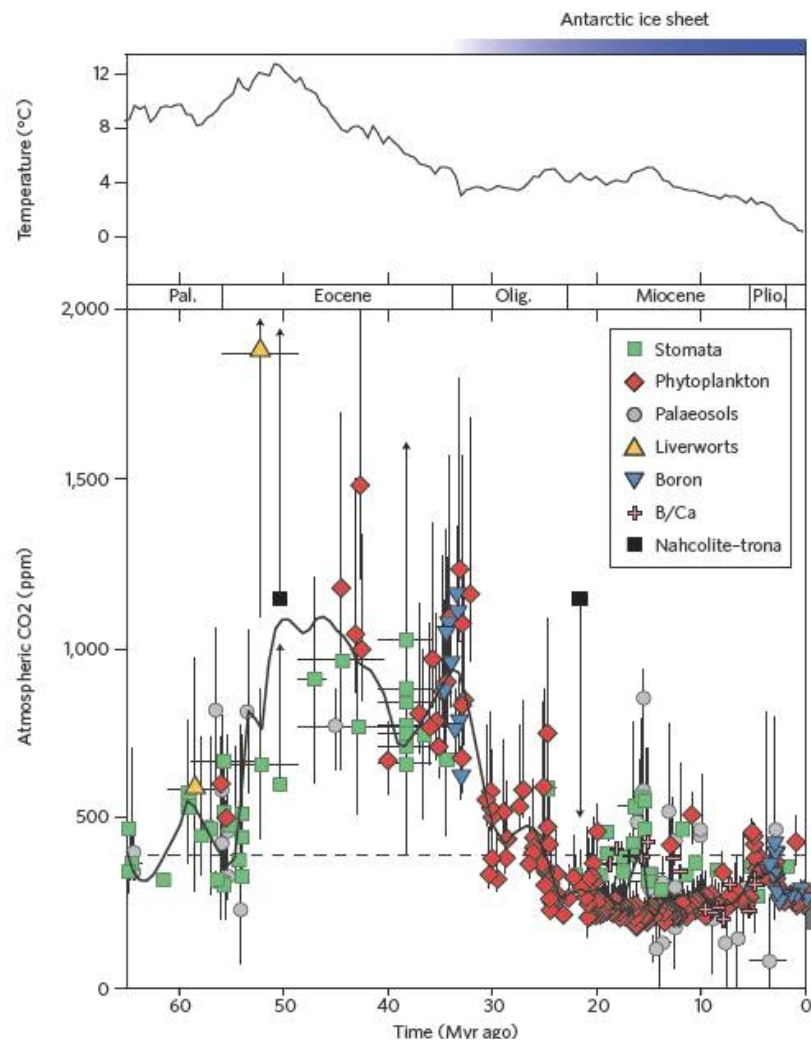


# Atmosphère et climat à l'ère tertiaire

➤ Pour l'ère tertiaire, entre 65 et 2 millions d'années, période pendant laquelle le climat ne cesse de se refroidir à quelques exceptions près, on peut proposer un scénario d'évolution du taux de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère à partir d'indicateurs beaucoup moins précis que les bulles d'air, comme par exemple la densité des stomates des feuilles (des ouvertures qui régulent leurs échanges avec l'atmosphère). Les valeurs absolues calculées pour la teneur en  $\text{CO}_2$  varient beaucoup d'un indicateur à l'autre.

➤ Néanmoins, tous les indicateurs s'accordent sur une tendance à la baisse d'un facteur 4 environ, du début du Tertiaire au Quaternaire. **Ainsi refroidissement et baisse du  $\text{CO}_2$  sont tout à fait corrélés pendant le Tertiaire.**

➤ L'évolution de la teneur en  $\text{CO}_2$  pour des périodes plus anciennes sera détaillée dans la fiche « Histoire de l'atmosphère »



Au delà de 800 000 ans, certains indicateurs, comme la densité des stomates des feuilles fossiles, les isotopes du bore ou le contenu en  $\text{C}_{13}$  de composés organiques nommés alcénones, permettent, avec des barres d'erreur bien plus grandes, de reconstruire l'évolution du  $\text{CO}_2$  tout au long du Tertiaire