

Les climats passés et futurs de la Terre

Introduction (voir padlet : [préparation au « grand oral »](#))

L'étude statistique du XXème siècle montre que la population mondiale a été multipliée par 7 entre 1945 et 2010. Ce coefficient est également retrouvé pour la consommation énergétique mondiale, basée à 75% sur des énergies non renouvelables mais également pour la production agricole. Cette dernière stagne à 70 Q/ha, ce qui montre que les ressources sont limitées (capacité de régénération du sol, diminution de la biodiversité, aléa climatique ...).

En parallèle, le taux de CO₂ est passé de 288ppm à 390 ppm de 1945 à 2010 soit 135% d'augmentation. Ce taux est de l'ordre de 412 ppm (380 en 2010, 400 en 2015, 403 en 2016, 405 en 2017 et 412 ppm en 2020). Le débat reste partagé mais la très grande majorité des études scientifiques montrent de façon précise la part de l'Homme dans les modifications récentes du climat et les conséquences désastreuses que ce réchauffement pourrait avoir (montée des eaux, accentuation des phénomènes météorologiques brutaux, augmentation des vagues de chaleur, déstabilisation de l'agriculture ...).

Problématique : Quels sont les changements récents du climat et quelle est la part de l'Homme dans ces changements ?

Pour répondre à cette question, nous allons commencer par identifier les indices climatiques, ce qui nous permettra ensuite de décrire les variations climatiques depuis 1 million d'années environ (climat du Quaternaire) et d'identifier des cycles glaciaires. Enfin nous verrons les causes des changements climatiques récents (variations de l'orbite terrestre, albédo et effet de serre).

Objectifs de cette partie:

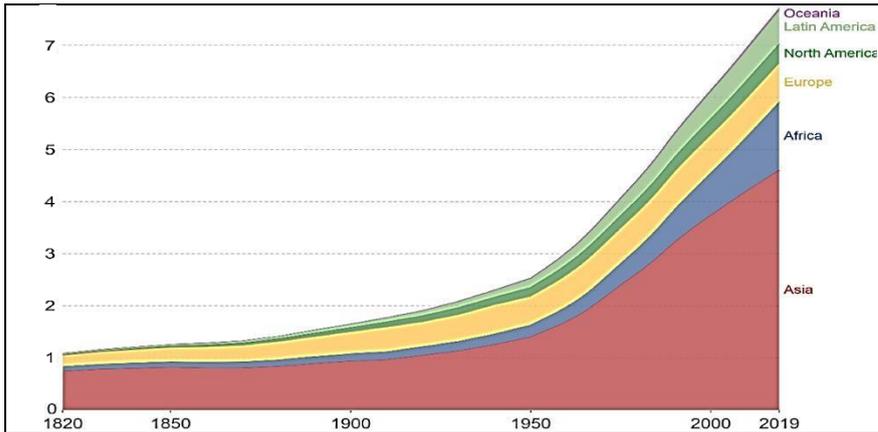
Connaître les principaux outils d'étude des climats récents (glaces, pollens ...)

Identifier les causes des climats récents (GES, albédo, paramètres astronomiques)

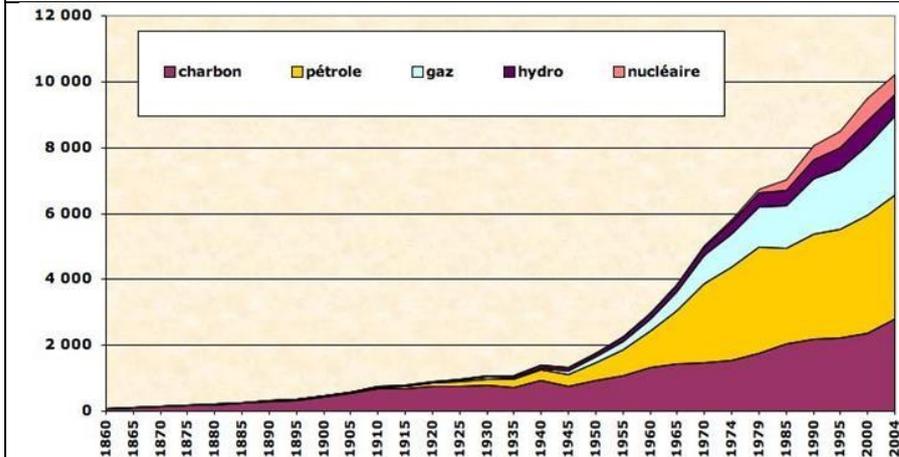
Comprendre ce qu'est l'effet de serre et connaître les différents GES

Identifier les aspects amplificateurs du climat (albédo et solubilité du CO₂)

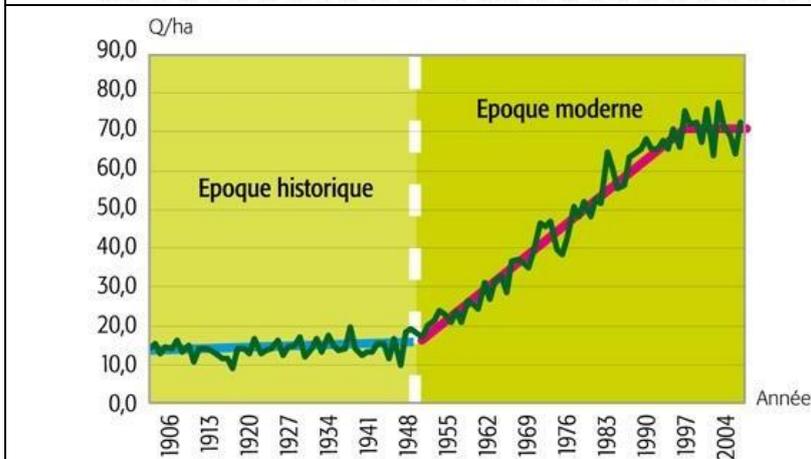
Document : Etat des lieux de l'ère industrielle



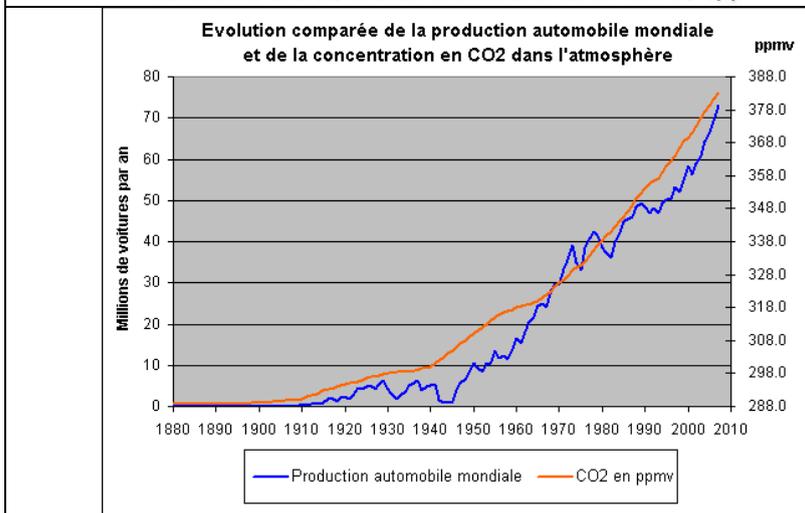
Graphique de la population mondiale (en milliards d'habitants) depuis 1820 (Source : HYDE 2016 et UN 2019)



Graphique de la consommation d'énergie (en MTep : Méga Tonne équivalent pétrole) depuis 1860



Etat de la production agricole mondiale (en quintal : 100 kg par hectare) depuis 1906



Evolution comparée de la production automobile mondiale et de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère

Chapitre 1

La reconstitution des modifications climatiques récentes (depuis 800 000 ans)

TP1 – La reconstitution des climats récents

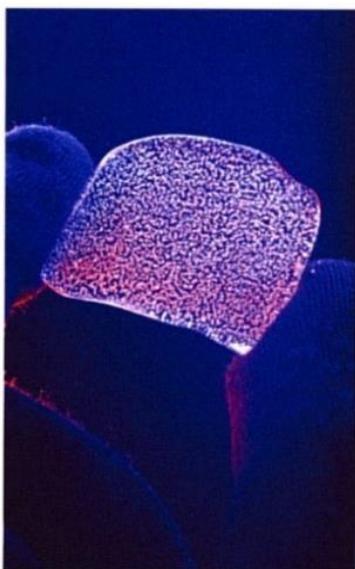
Objectifs :

Connaître le climat du Quaternaire

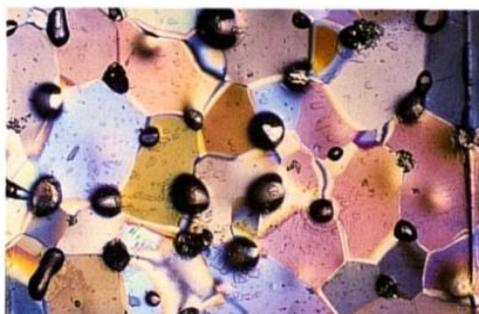
Connaître les outils pour déterminer le climat (pollens, delta 180)

I. Les indices de l'évolution des climats récents

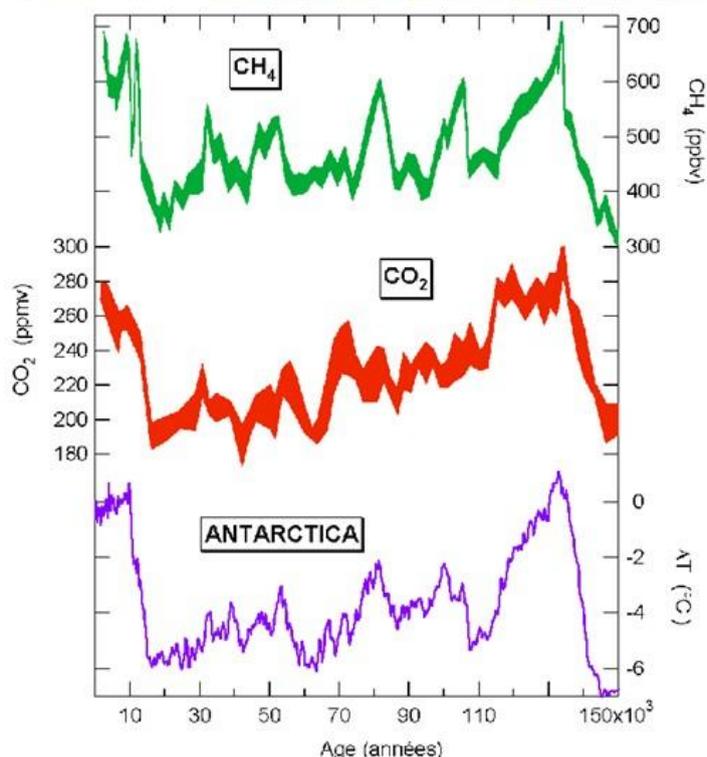
1. Les calottes polaires, des archives chronologiques ordonnées des climats



Les cristaux de neige, en s'accumulant, piègent entre eux un peu d'air. Quand le tassement est suffisamment important, les pores de la neige se ferment et des bulles d'air se retrouvent incluses dans la glace. Elles peuvent représenter environ 10 % du volume de la glace et emprisonnent l'air ambiant au moment de la chute de neige, air qui est ainsi « fossilisé ». L'analyse des bulles permet d'avoir une idée de la composition de cet air fossile : teneur en O₂ mais aussi en gaz à effet de serre, tels que le CO₂ ou le CH₄.



Photographies :
a - observation à l'œil nu.
b - observation au microscope en lumière polarisée. Les « billes » noires sont des bulles d'air emprisonnées dans la glace.



Document 1 : Les glaces polaires, des archives climatiques

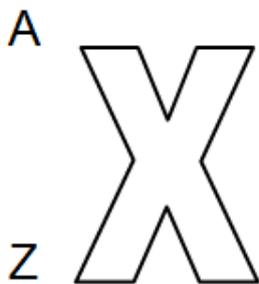
Chaque année, une couche de glace se forme aux Pôles. La neige accumulée se compacte (1 à 2 cm d'épaisseur). On peut alors appliquer le principe de superposition ; les glaces les plus profondes sont les plus anciennes. On a donc des archives ordonnées.

La glace piège ainsi des bulles de l'air présent à la période où la neige est tombée et s'est accumulée. Ces bulles contiennent des informations sur la teneur en gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ et H₂O vapeur) de l'atmosphère à l'échelle de la planète et donnent donc des informations sur la température ou le climat de l'époque.

Ces gaz permettent de reconstituer le climat depuis 400 000 ans environ. Celui-ci se compose de cycles glaciaires constitués :

- d'une phase glaciaire (80 000 ans) avec un faible taux de GES (FROID)
- d'une phase interglaciaire (10 000 ans) à fort taux de GES (CHAUD).

2. L'utilisation des isotopes présents dans les glaces.



X : Symbole de l'atome (H, He, C, N, O ...)
 Z : Nombre de charge (électrons ou protons)
 A : Nombre de masses (protons + neutrons = nucléons)

Document 2 : Définition d'un atome et d'un isotope

- Atome : c'est un élément chimique défini par son nombre de charge (Z).
- Isotopes : deux atomes sont dits isotopes s'ils ont le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent.

Ex: ¹⁶O : isotope de l'oxygène comprenant 16 nucléons (8P + 8N)

¹⁸O : isotope de l'oxygène comprenant 18 nucléons (8P + 10N)

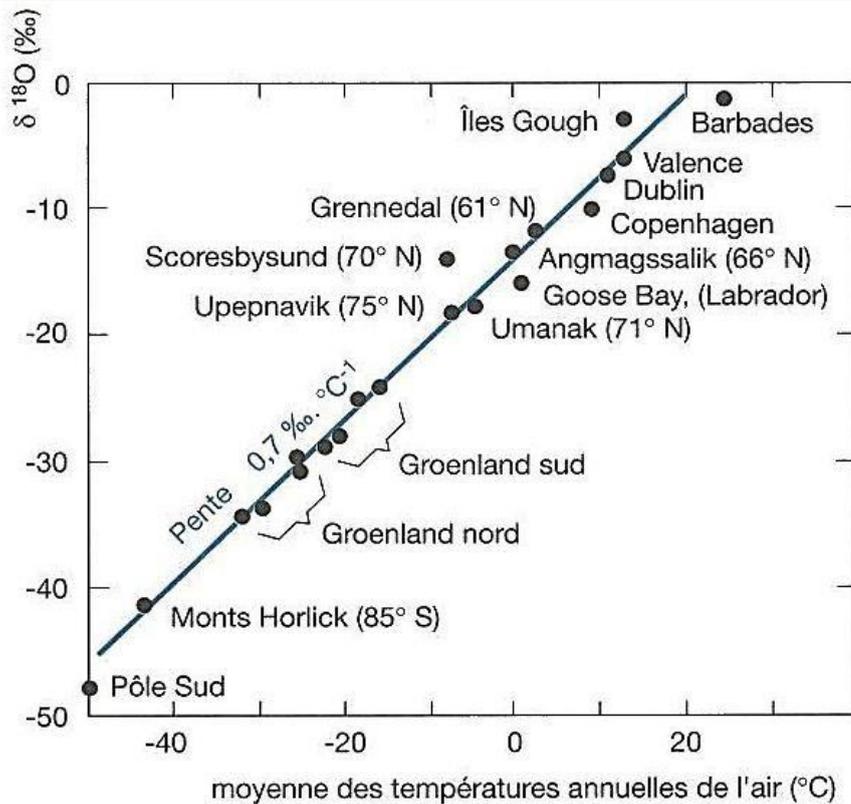
• $\delta^{18}\text{O}$: grandeur définie par les spécialistes qui comparent le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de la glace à un rapport de référence, le $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ moyen des océans.

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{\text{de l'eau } (^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ de la glace}) - \text{moyen } (^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ des océans})}{\text{moyen } (^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ des océans})}$$

Exprimé en ‰, il varie dans le même sens que le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

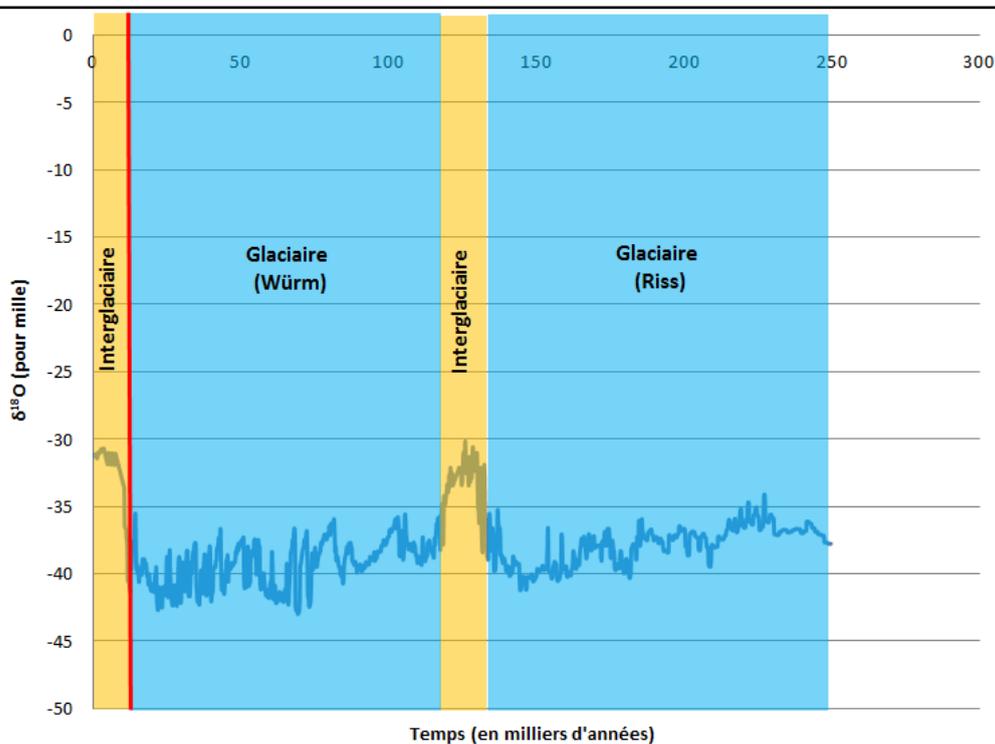
Document 3 : Définition du $\delta^{18}\text{O}$

$\delta^{18}\text{O}$: Grandeur définie par les spécialistes comme le rapport entre le $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ d'un échantillon et le $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ d'un standard (l'eau des océans) appelé SMOW (*Standard Mean Ocean Water*). Il est exprimé en pour mille.



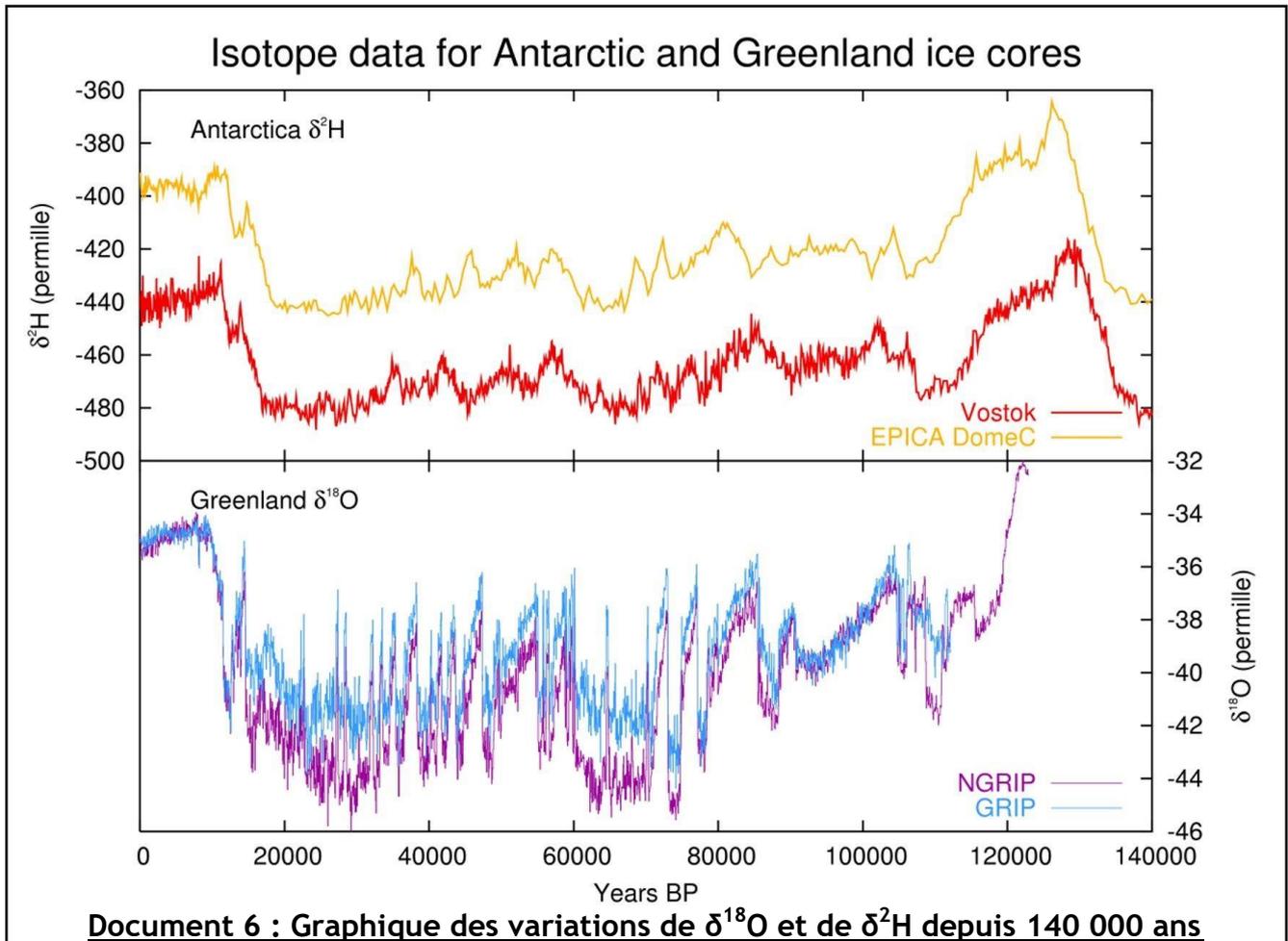
Document 4 : Le $\delta^{18}\text{O}$, un thermomètre isotopique

Actuellement, on a pu démontrer que plus la température est élevée, plus le $\delta^{18}\text{O}$ est fort. Le $\delta^{18}\text{O}$ est donc un thermomètre isotopique direct. D'autre part, en appliquant le principe d'actualisme, on peut se servir du $\delta^{18}\text{O}$ au sein des glaces polaires pour retrouver la température des climats passés : c'est donc un paléothermomètre.



Document 5 : Graphique des variations de $\delta^{18}\text{O}$ depuis 250 000 ans.

Corrigé TP1 - Les climats récents



La détermination du $\delta^{18}\text{O}$ est cohérent dans les glaces Arctiques et Antarctiques, quel que soit le site de forage (Vostok, EPICA, NGRIP, GRIP ...). Ceci est une preuve de robustesse de cet indice climatique.

Remarque : On peut également utiliser d'autres isotopes, en particulier ceux de l'hydrogène. Il s'agit du deutérium (D ou ^2H) qui permet de mesurer un δD ou $\delta^2\text{H}$. Ce paramètre est également parfaitement cohérent avec le $\delta^{18}\text{O}$.

CONCLUSION :

La mesure du $\delta^{18}\text{O}$ des glaces permet donc d'évaluer les variations de températures au niveau des calottes polaires (Arctique et Antarctique) et d'en déduire les variations climatiques qui ont affecté l'ensemble du globe (climat global) pour des climats récents (400 000 ans maximum : pas de glaces plus anciennes. Remarque : le projet EPICA envisage de remonter jusqu'à 1,5 Ma).

Article sur le forage EPICA :

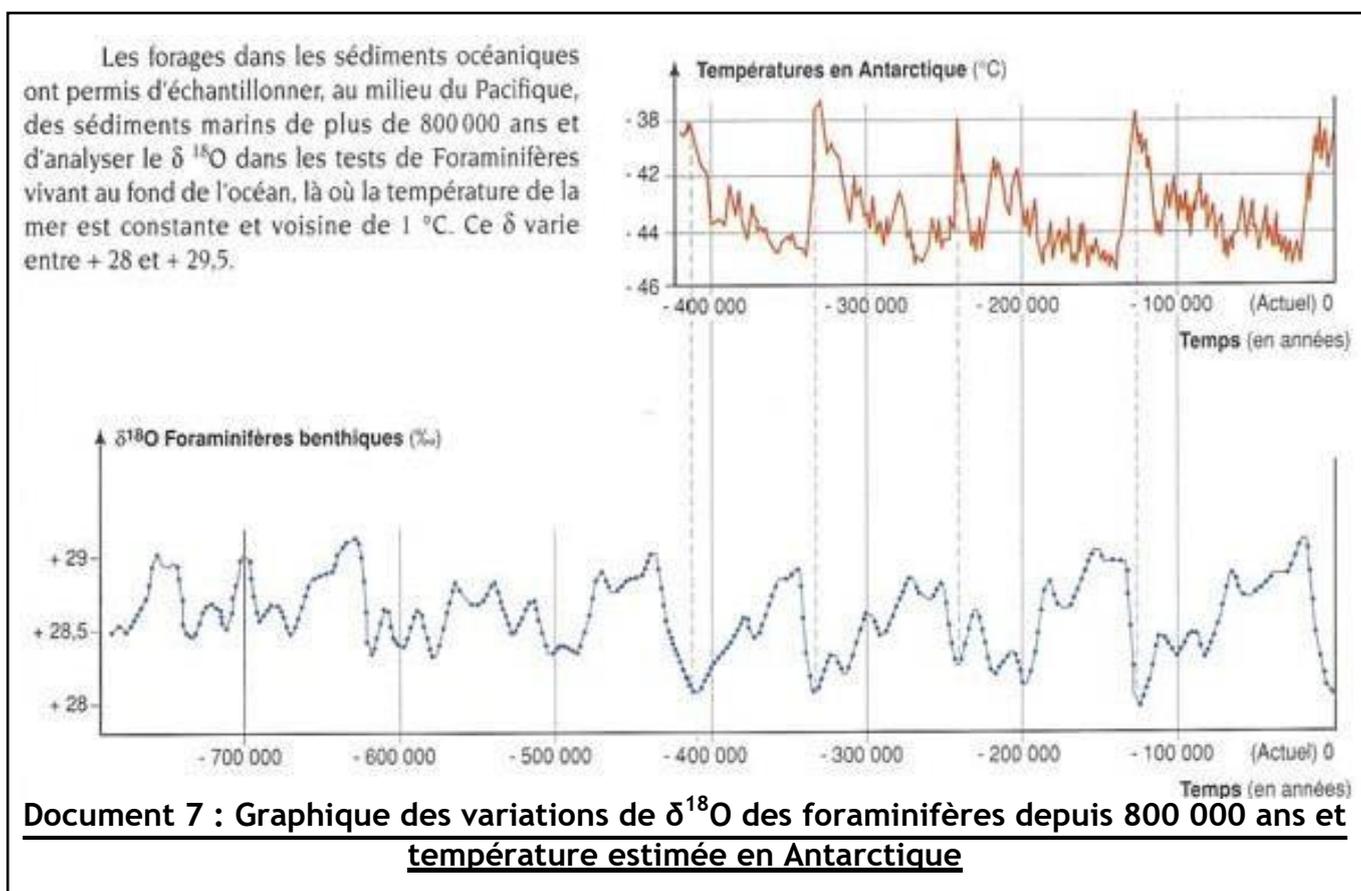
<https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/climatologie-partez-traces-plus-ancienne-glace-monde-antarctique-2-2-76061>

3. L'utilisation des isotopes présents dans les sédiments marins

Les foraminifères sont des êtres vivants unicellulaires qui fabriquent leurs coquilles (= un test) calcaires (CaCO_3) à partir des éléments chimiques de l'eau. Leur composition isotopique est donc identique à celle de l'eau de mer.

Dans ce cas, l'effet de fractionnement isotopique est inverse à celui des précipitations (pluie et neige) : plus la température est forte, plus l'océan s'appauvrit en ^{18}O et comme les foraminifères sont en équilibre avec l'eau, ils s'appauvrissent également. Donc, plus la température est forte, plus le $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères est faible : c'est un thermomètre isotopique inverse. Ce paramètre permet aussi d'estimer le volume des glaces polaires.

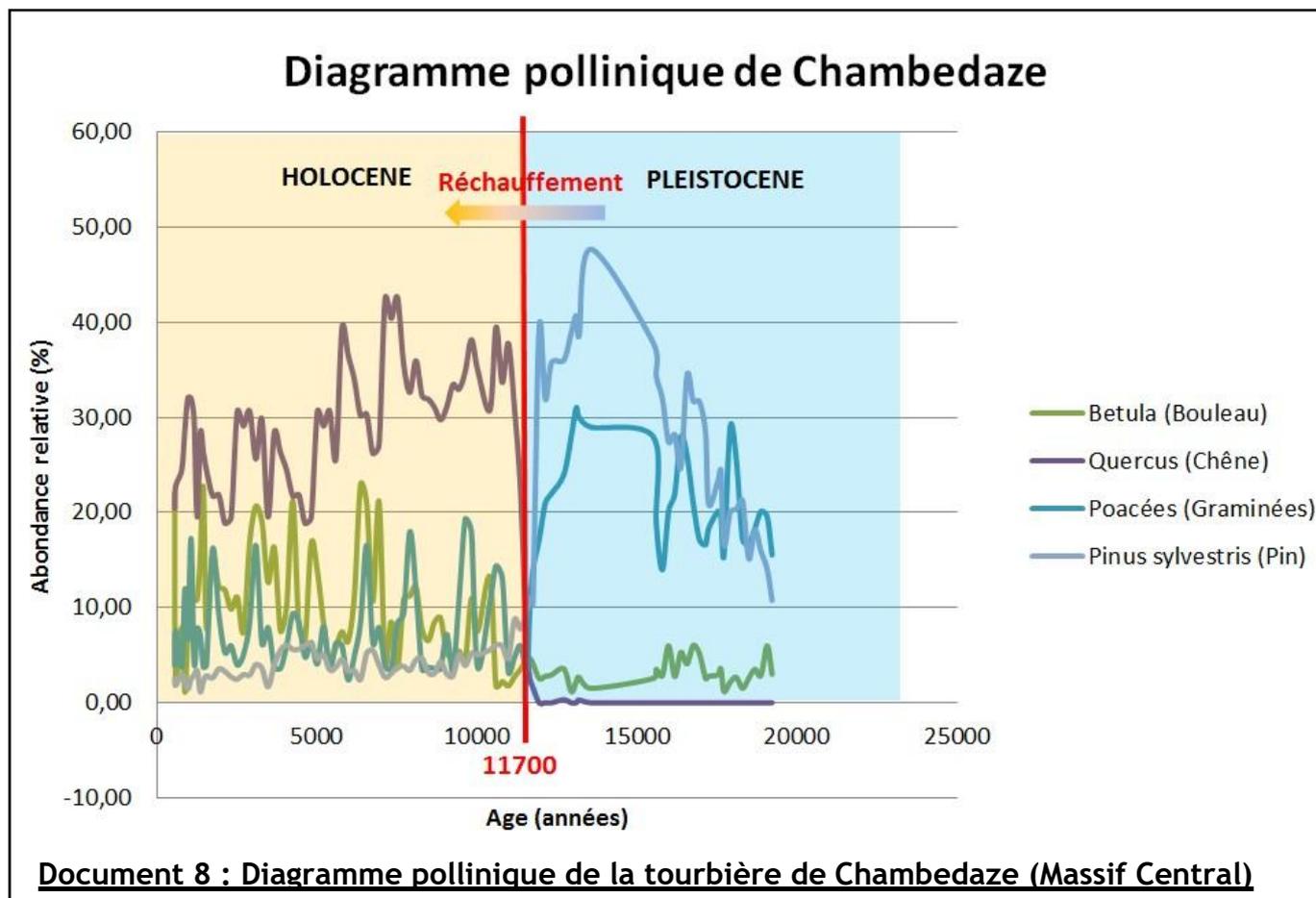
Comme précédemment, on peut utiliser le $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères pour déterminer les climats passés (paléothermomètre inverse). Dans ce cas, on utilise les couches de sédiments océaniques (Atlantique), ce qui permet de déterminer les climats jusqu'à 1 Ma environ.



3. L'utilisation des pollens et des sédiments de tourbières

L'étude des pollens d'un sédiment permet de reconstituer les écosystèmes végétaux de l'époque. L'association des diverses espèces végétales d'un environnement est étroitement liée au climat. Les préférences climatiques (et/ou exigences écologiques) des associations végétales donnent des indications de température et d'hygrométrie (humidité) des climats.

Ces associations végétales sont déterminées par l'analyse des carottes de tourbe et la réalisation de diagramme polliniques : ce sont des graphiques présentant l'abondance relative (%) de chaque pollen au cours du temps (dans les différentes couches de tourbe).



Document 8 : Diagramme pollinique de la tourbière de Chambedaze (Massif Central)

Les diagrammes polliniques permettent d'étudier le climat d'une zone géographique restreinte : on reconstitue ainsi le climat local. La reconstitution permet également d'envisager les types d'écosystèmes et leurs interactions.

II. L'histoire du climat du Quaternaire

1. La concordance des indices climatiques

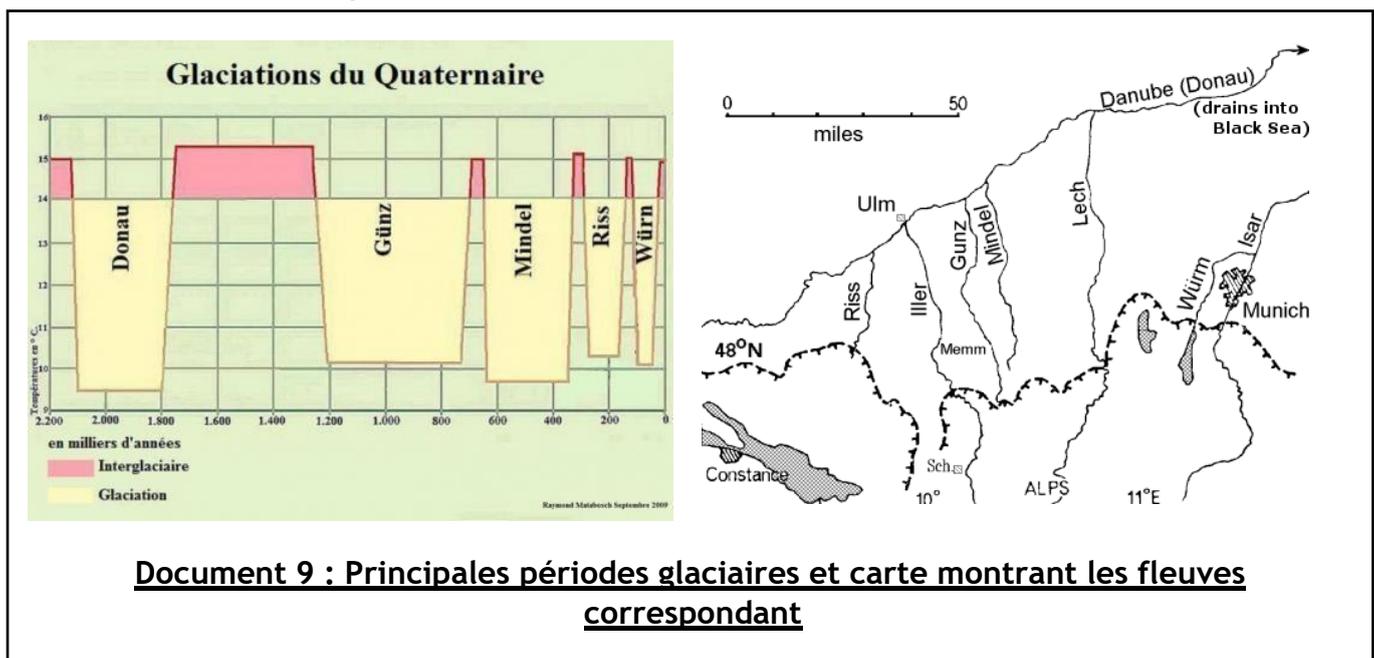
Le recouplement des différentes données ($\delta^{18}\text{O}$ des glaces, $\delta^{18}\text{O}$ des tests de foraminifères, concentrations en GES des bulles de gaz glaciaires, analyses polliniques) permet de connaître le climat du Quaternaire.

Les données obtenues sont très cohérentes et permettent d'avoir une idée précise des climats du Quaternaire. Il est rare que les indices climatiques se contredisent, mis à part entre des données globales et locales.

2. Une succession de cycles glaciaires

Le climat de l'ère Quaternaire est caractérisé par la succession de cycles glaciaires formés d'une période (ou phase) glaciaire (froide) assez longue (80 000 ans) suivie d'une période interglaciaire (chaude) plus courte (10 000 ans environ). Actuellement, nous sommes dans une période interglaciaire qui a débuté il y a 15 000 ans environ et qui s'est accentuée à partir de la transition Pléistocène - Holocène (-11 700 ans).

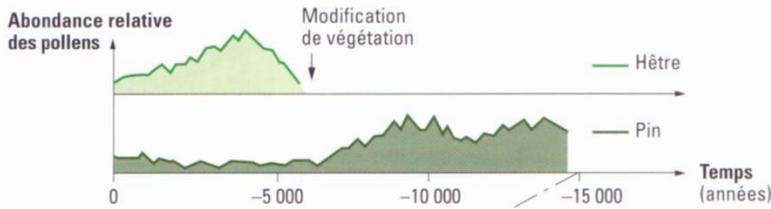
Ainsi, l'ère Quaternaire présente des cycles glaciaires d'une durée d'environ 100 000 ans. En Europe, les périodes glaciaires portent des noms de fleuves, en lien avec l'extension des glaciers.



3. Des variations climatiques plus fines

En plus des cycles de 100 000 ans, on observe la présence de cycles plus courts de 43 000 et 19 000 ans. Ceci est en lien avec l'aspect très « saccadé » des valeurs obtenues pour le $\delta^{18}\text{O}$. De plus, on peut en déduire que ces cycles peuvent se cumuler et induire des variations climatiques plus franches, ce qui génère une variabilité climatique : les périodes glaciaires n'ont donc pas toute la même intensité.

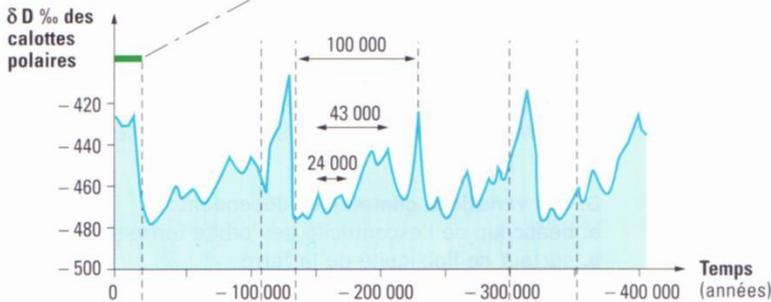
Les changements du climat des 700 000 dernières années



Pollens
Abondance relative entre espèces

↓

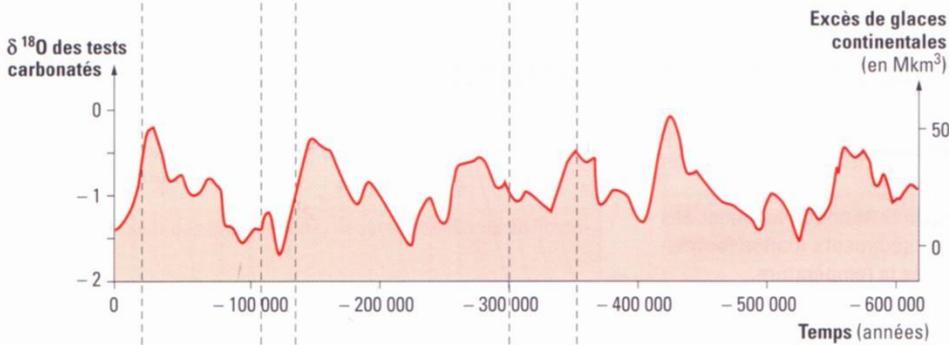
Modifications climatiques locales sur quelques milliers d'années



$\delta^{18}O$ ‰ ou δD ‰ variations dans les glaces des calottes polaires

↓

Alternances climatiques périodiques



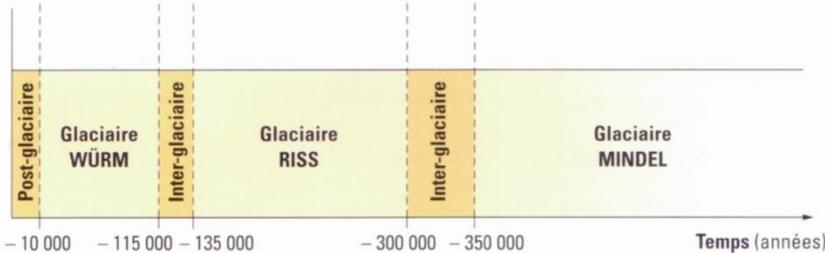
$\delta^{18}O$ variations dans les tests carbonatés de foraminifères benthiques

↓

Variations globales de volume des calottes glaciaires

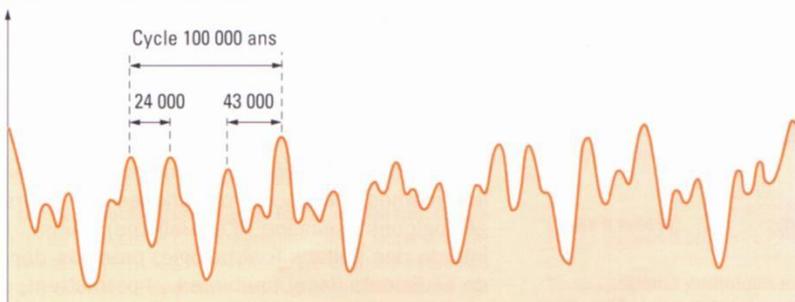
↓

Variations du niveau marin



Variations climatiques globales :
alternance de périodes glaciaires et inter-glaciaires

Combinaison des différents cycles des paramètres orbitaux = effet astronomique



Des phénomènes modulateurs amplificateurs ou atténuateurs :
teneur atmosphérique en CO₂ et albédo, modulent l'effet astronomique

Document 10 : L'histoire climatique du Quaternaire

III. Les causes des variations climatiques récentes

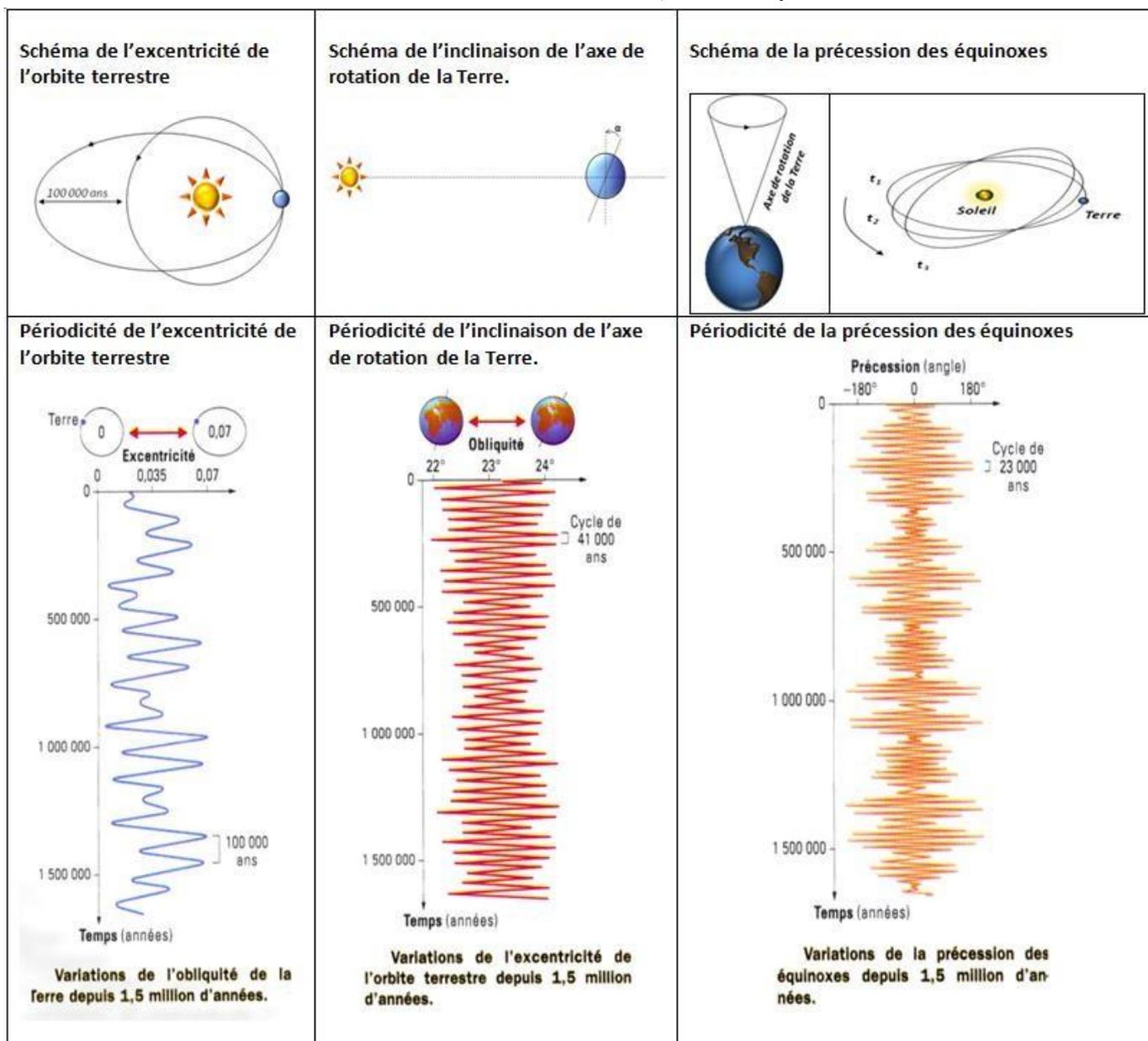
Problématique : Comment expliquer les modifications climatiques du Quaternaire ?

1- Les paramètres astronomiques ou paramètres de Milankovitch (cf TP 2 : Milankovitch)

Sur de grandes périodes de temps, l'orbite terrestre subit des variations de sa forme et de sa taille, ce qui modifie la distance Terre-Soleil. Ces changements de l'orbite terrestre modifient l'insolation (ensoleillement) globale de la Terre et donc la température sur Terre.

L'orbite terrestre varie selon 3 paramètres qui ont été décrits au début du XX^{ème} siècle par un géophysicien serbe du nom de Milutin Milankovitch :

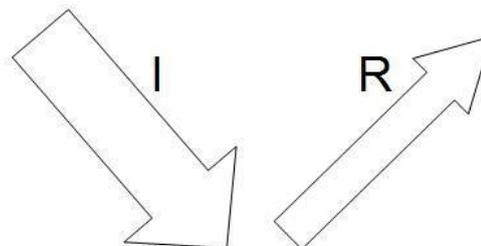
- L'excentricité de l'orbite terrestre présente une période de 100 000 ans. La forme de l'orbite est plus ou moins circulaire ou elliptique
- L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre ayant une période de 41 000 ans. L'inclinaison de l'axe va modifier l'ampleur des saisons.
- La précession des équinoxes qui correspond à 2 phénomènes distincts :
 - la rotation de l'ellipse de l'orbite selon une période de 23 000 ans
 - l'orientation de l'axe de rotation 19 000 ans.



Document 11 : Les paramètres de Milankovitch

2- L'albédo, un paramètre amplificateur

Type de surface	Albédo (0 à 1)
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Surface de la mer	0,05 à 0,15
Sol sombre	0,05 à 0,15
Cultures	0,15 à 0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Glace	0,30 à 0,40
Neige tassée	0,40 à 0,70
Neige fraîche	0,75 à 0,90
Miroir	1



Type de surface

Principe de l'albédo

L'albédo est une grandeur physique définie comme le rapport de l'énergie solaire réfléchi (R) sur l'énergie incidente (I).

Une surface blanche ou un miroir renvoient efficacement les rayons solaires et possèdent un albédo proche de 100% (soit 1). Une surface noire capte presque tous les rayons incidents et son albédo est proche de 0.

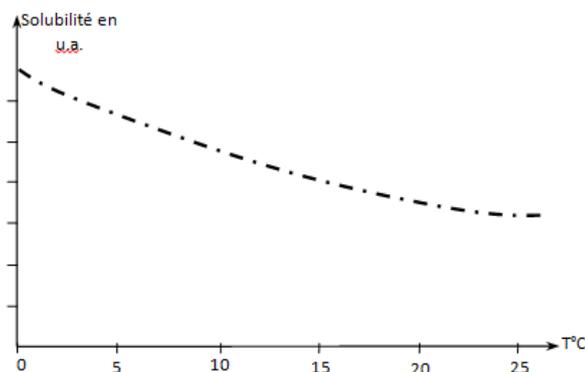
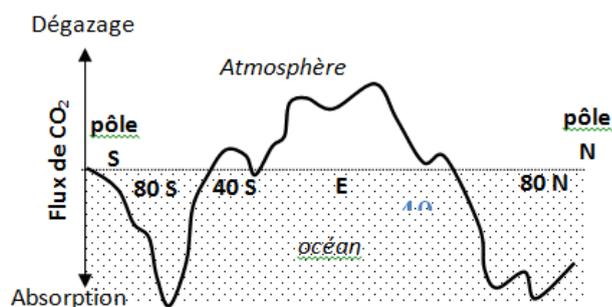
Document 12 : L'albédo

L'albédo correspond au rapport de l'énergie solaire réfléchi sur l'énergie incidente, c'est-à-dire à la fraction de l'énergie renvoyée par rapport à l'énergie reçue. Plus la valeur est forte, plus la surface réfléchit l'énergie. La neige et la glace ont un albédo très fort (0,9). Celui de la végétation ou de l'eau liquide est plus faible.

Actuellement, l'albédo global de la Terre est de 0,3 (30%). Néanmoins, la variation de la surface des glaces terrestres (calottes polaires et glaciers continentaux) contribue à faire varier l'albédo. Actuellement, le réchauffement climatique implique une diminution de surface des glaces arctiques (perte de 60% de la calotte arctique). Or, la diminution des calottes glaciaires et le développement de la végétation diminuent l'albédo global de la planète, ce qui accentue son réchauffement. C'est un « cercle vicieux » qui correspond à un phénomène amplificateur.

3- La solubilité du CO₂, un paramètre amplificateur

Le CO₂ participe à l'effet de serre de la planète. Sa concentration dans l'atmosphère est en équilibre avec celle de l'océan. Lorsque la température augmente, la solubilité du CO₂ dans l'océan diminue, l'équilibre précédent est déplacé : du CO₂ passe de l'océan dans l'atmosphère ce qui provoque une augmentation des températures : c'est donc un nouveau paramètre amplificateur.



Document 13 : La solubilité du CO₂

4- La dynamique des enveloppes fluides

Enfin, la circulation atmosphérique et océanique tend à redistribuer le surplus d'énergie reçue au niveau de l'équateur vers les pôles. Ces circulations limitent ainsi les écarts de température attendus entre l'équateur et les pôles liés à la sphéricité de la Terre. C'est donc un élément qui atténue les variations climatiques et qui contrebalance le réchauffement actuel.

Néanmoins, si les perturbations sont importantes, des courants océaniques pourraient être modifiés ou même s'arrêter, ce qui entraînerait des modifications climatiques locales drastiques (ex : arrêt du Gulf Stream et refroidissement important en Europe).



CONCLUSION

Le climat du Quaternaire est constitué de cycles glaciaires de 100 000 ans qui se répètent depuis 1 million d'années, à des intensités variables. Ces cycles sont dus aux variations de l'orbite terrestre (paramètres de Milankovitch).

Actuellement, nous sommes dans une période interglaciaire (chaude) dont l'ampleur dépasse les périodes interglaciaires précédentes (maximum de CO₂ depuis 1 Ma = 300 ppm, contre 420 ppm aujourd'hui). Le réchauffement constaté (+1°C en 150 ans) est lié aux activités humaines et aux rejets de GES. De plus, le réchauffement pourrait s'emballer à cause des paramètres amplificateurs (albédo et solubilité du CO₂).

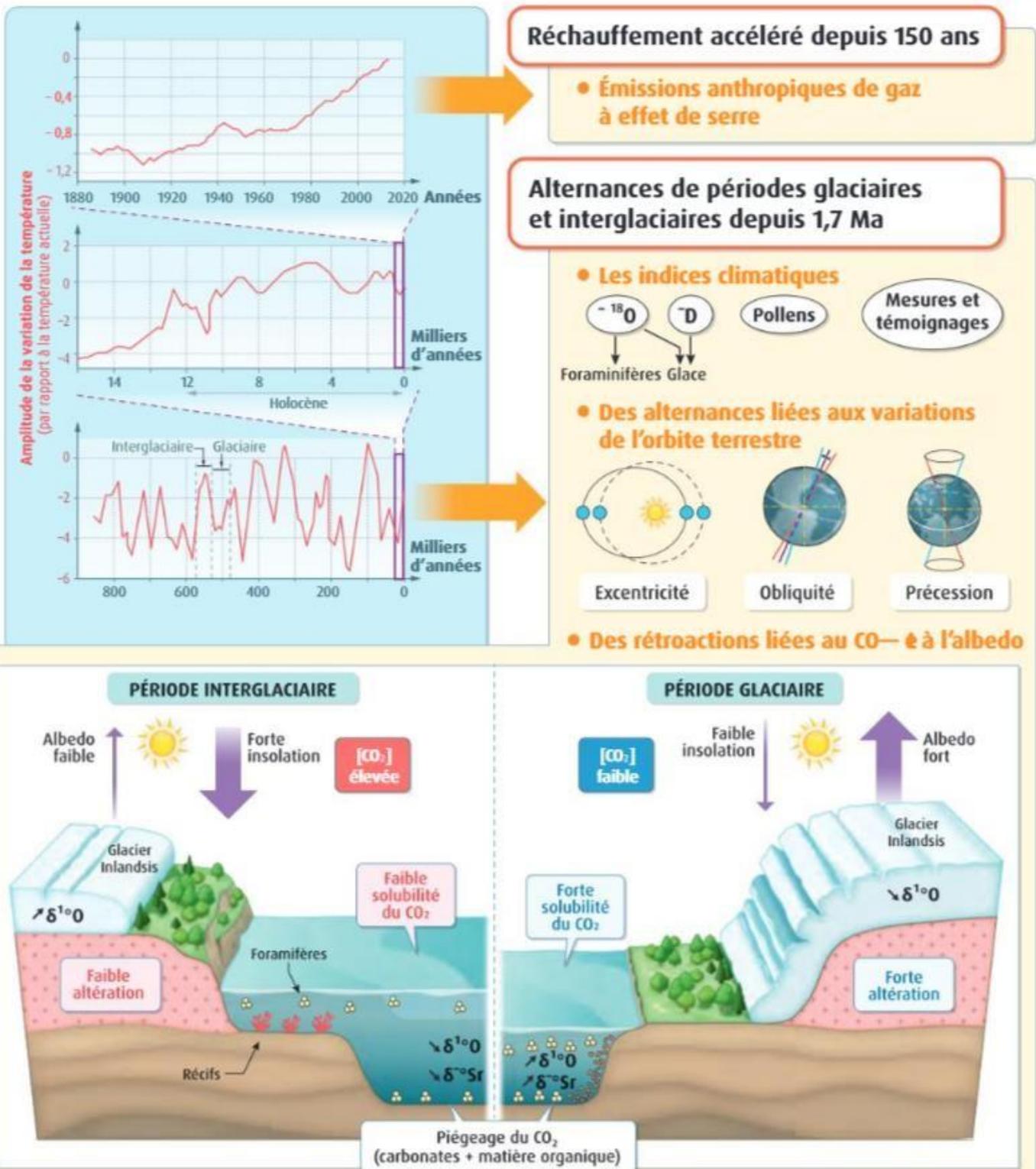
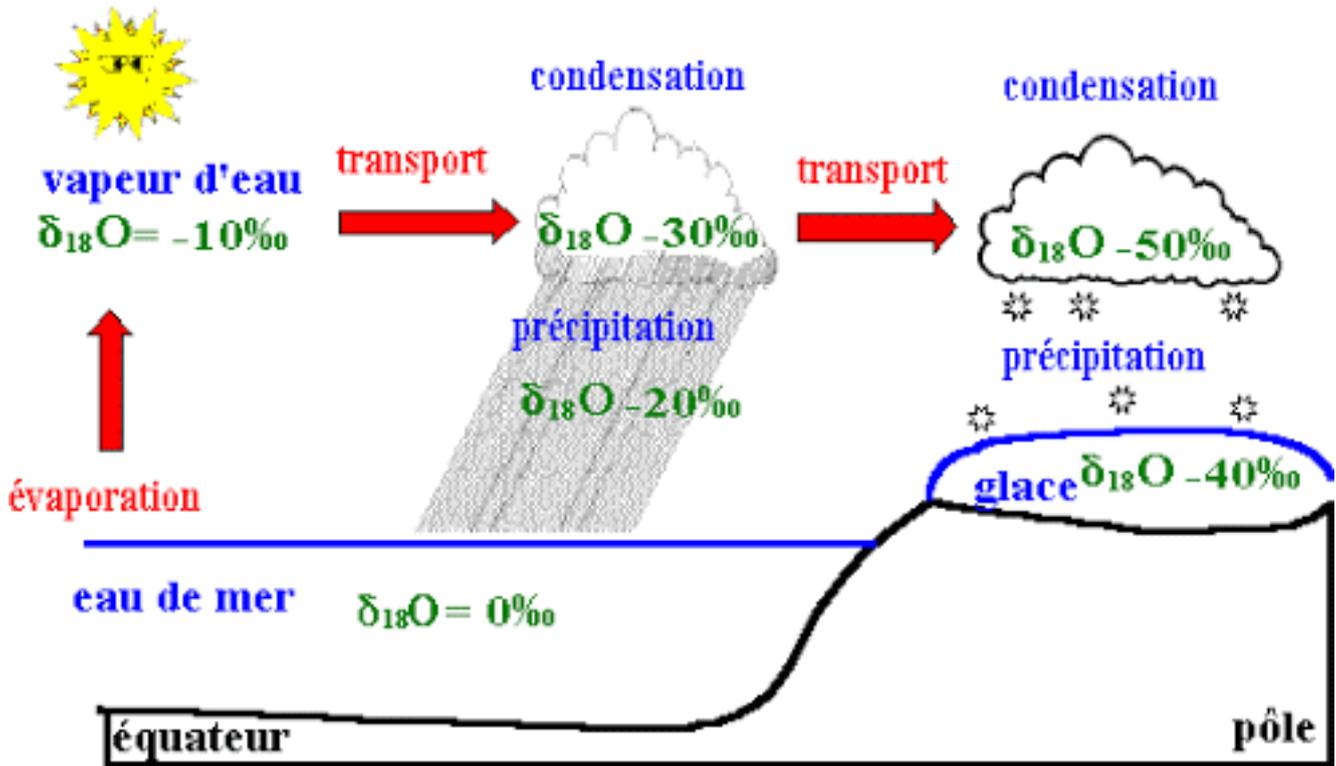
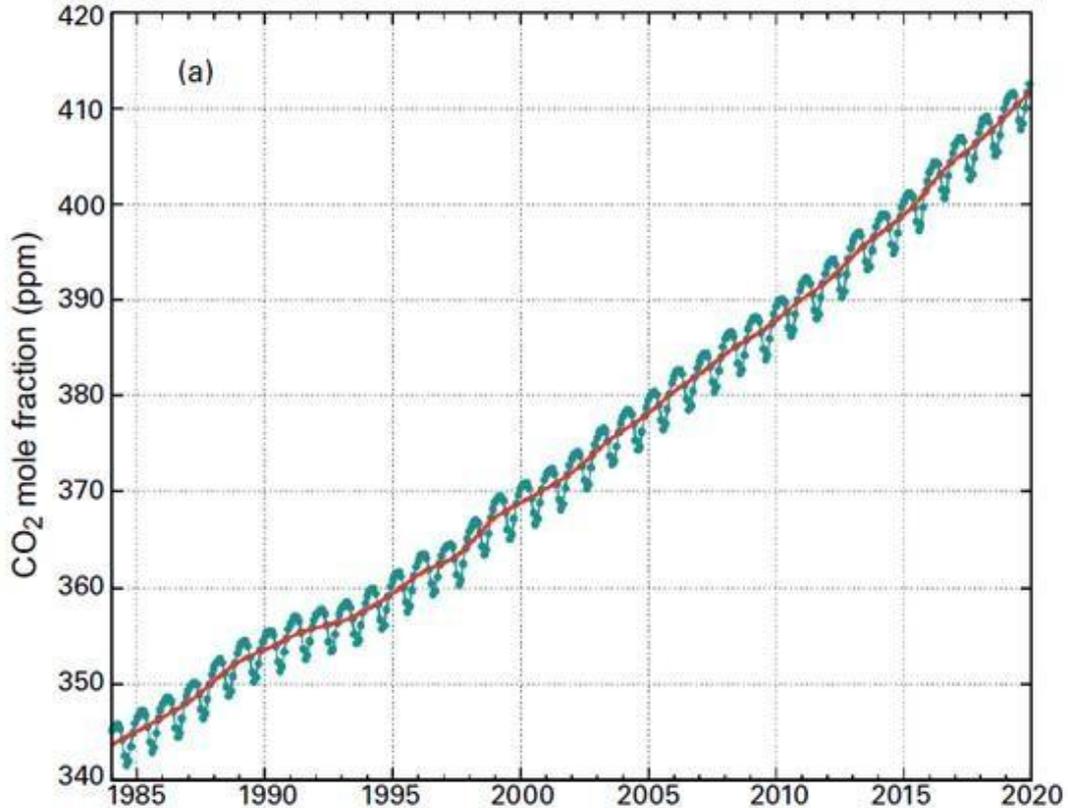


Schéma supplémentaire expliquant le delta ¹⁸O



Graphique du taux de CO₂ depuis 1985



Remarque : les oscillations annuelles sont dues aux saisons et au fait que l'hémisphère Nord possède une surface continentale plus grande (donc plus de végétaux en été de l'HN et donc CO₂ qui diminue par la photosynthèse plus active de avril à octobre).