

C1. Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

Réchauffement climatique actuel et perturbation anthropique du cycle du carbone.

- Le **réchauffement climatique** observé actuellement correspond à une hausse la température terrestre **d'environ 1°C en 150 ans**.
- Il est **corrélé aux émissions de GES par les activités humaines**, notamment celles en **CO₂**. La hausse des émissions de GES se traduit en effet par une **augmentation de la concentration atmosphérique en GES**, et donc à un **accroissement de l'effet de serre** conduisant à un **forçage radiatif positif**.
- Le **cycle biogéochimique** du carbone est donc **perturbé** (déséquilibré) suite aux activités humaines.
- Pour plus de détails : voir enseignement scientifique de terminale.

Les archives climatiques du Quaternaire et les évolutions climatiques.

- Le **Quaternaire** est la période géologique la plus récente (depuis environ -2,6 Ma). Elle comprend le **Pléistocène**, et la période actuelle l'**Holocène**.
- Différents **indices** permettent de **reconstituer le climat** au cours du quaternaire :
 - * Les **pollens** (la science est la palynologie). En utilisant le **principe d'actualisme** (les lois régissant les phénomènes géologiques actuels étaient également valables dans le passé), on peut déduire les conditions écologiques et climatiques de développement des espèces rencontrées. On élabore alors des **diagrammes polliniques**.
 - * Le **thermomètre isotopique** : c'est le **$\delta^{18}\text{O}$** ou le **δD** (les deux méthodes fonctionnant de la même manière) tous les deux en %.
 - La méthode du thermomètre isotopique est fondée sur les **isotopes de O et H** qui constituent la molécule de **H₂O**.
 - La neige, quand elle tombe, contient une très faible quantité de ^{18}O ou de ^2H (= D pour deutérium).
 - Cette **quantité de ^{18}O ou de ^2H** dans la neige est **d'autant plus faible que les températures sont basses** (variation linéaire du $\delta^{18}\text{O}$ ou du δD suivant la T°C).
 - Ainsi, **les glaces continentales** (qui proviennent de la transformation de la neige qui s'est accumulée au sol) ont un $\delta^{18}\text{O}$ ou le δD d'autant plus négatif que les températures sont basses.
- Il est aussi possible de déterminer un **$\delta^{18}\text{O}$ dans les sédiments marins**, notamment dans les **tests** (coquilles calcaires) d'unicellulaires marins appelés **foraminifères**. L'élaboration de leur test en CaCO₃ (carbonate de calcium) nécessite le prélèvement

d'O dans l'eau de mer : ainsi, plus l'on trouve de ^{18}O dans l'eau de mer, plus leur test en contient.

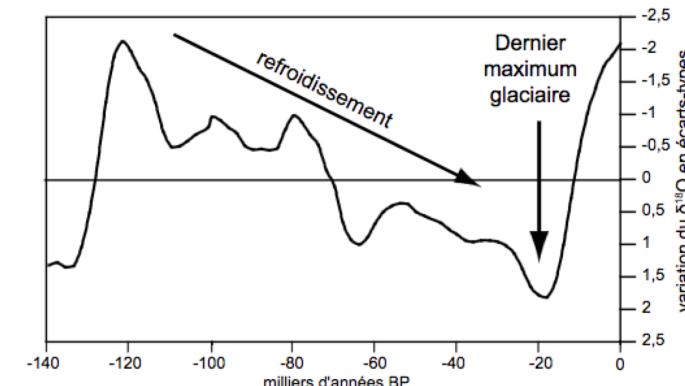
- Or les **océans contiennent plus de ^{18}O en période glaciaire** : ainsi le **$\delta^{18}\text{O}$ des tests carbonatés des foraminifères est d'autant plus élevé que l'eau est froide**.
- Faire attention : les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ ne sont pas les mêmes dans les glaces et les sédiments marins car les référentiels de calcul ne sont pas les mêmes.
- * L'exploitation de **fossiles** (micro- ou macro-fossiles). Certaines **espèces sont symptomatiques de climats donnés**. Par exemple la **représentation d'espèces rencontrées par l'humain sur la paroi de grottes** (art pariétal) apporte des informations.

* Les **glaciers** laissent aussi les traces de leur passage : **moraines** (sédiments déposés par les glaciers au cours de leur avancée), **blocs erratiques** (blocs isolés transportés laissés sur place), **vallées creusées en auges** (en U), lacs d'origine glaciaires (creusés par les glaciers), **roches moutonnées** (= polies) et **roches striées** (= rayées).

Ainsi :

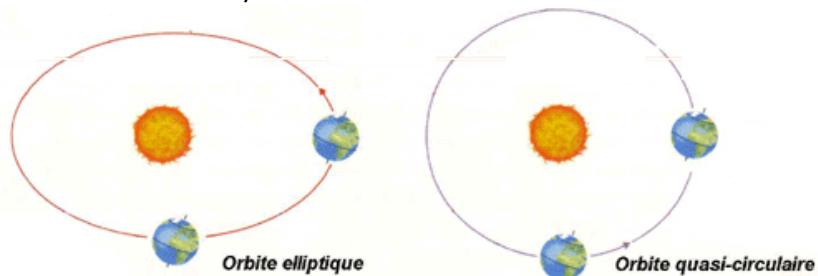
- l'**Holocène**, période qui a débuté voici -11 000 ans est une période plutôt chaude, dite **interglaciaire** ;
- le **Pléistocène**, est une période marquée par **l'alternance de périodes glaciaires** (avec une forte extension des glaces continentales) **et interglaciaires** (retrait des glaciers continentaux). Les **alternances** entre périodes interglaciaires et glaciaires sont **périodiques**. **La dernière période glaciaire s'étend entre -120 000 et -11 000 ans**. On dénombre environ 8 alternances glaciaire / interglaciaire sur les 800 000 dernières années.

Le dernier cycle glaciaire.

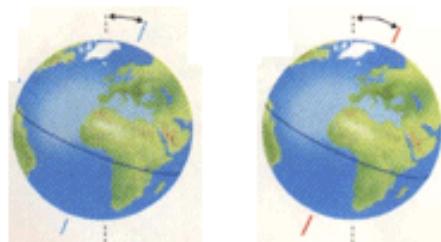


Les paramètres orbitaux et les rétroactions : à l'origine des changements climatiques du Quaternaire.

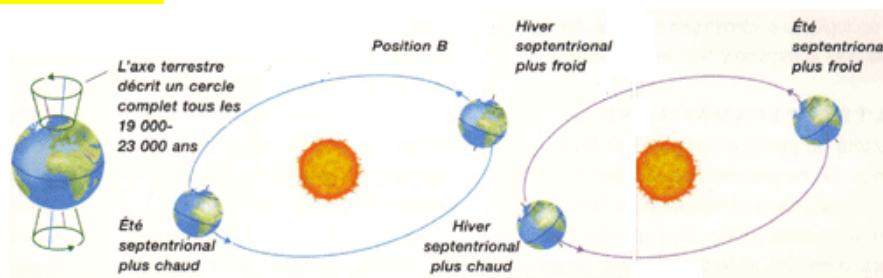
- Les paramètres orbitaux, au nombre de **trois**, ont été décrits par Milankovitch. Ils définissent la **position de la Terre dans l'espace par rapport au soleil**.
- L'**excentricité** correspond à **l'aplatissement plus ou moins prononcé de l'orbite terrestre autour du soleil**. Cycles de 400 000 et 100 000 ans.



- L'**obliquité** correspond à **l'inclinaison de l'axe de rotation** de la Terre qui est plus ou moins grande. Période de 41 000 ans.



- La **précession des équinoxes** : l'axe de rotation de la Terre tourne comme une toupie. La conséquence de la précession est que **le solstice d'été dans un hémisphère donné a lieu alternativement tous les 11 000 ans soit près du Soleil, soit loin du soleil**. Périodes de 19 000 et 24 000 ans



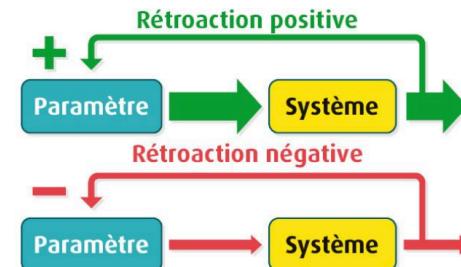
Images : <http://www.cnrs.fr>

- Ces paramètres ne font varier la **quantité d'énergie solaire reçue** (puissance solaire reçue) que de quelques %, et donc les températures enregistrées de quelques dixièmes de degrés Celsius.

- Ce sont les **moteurs** des changements climatiques.

- Il existe par ailleurs des **boucles de rétroactions positives et négatives** qui influencent le climat.

- Une **rétroaction** est une **action en retour d'un système à la modification d'un paramètre**. Si la réponse du système **amplifie** le phénomène, on parle de **rétroaction positive**. Si elle l'**atténue**, c'est une **rétroaction négative**.



* L'**albédo** est le **rapport entre l'énergie solaire reçue (incidente) par un corps et l'énergie qu'il réfléchit**.

- **Plus la surface est blanche, plus l'albédo est fort** (donc plus l'énergie est réfléchie). La neige à un très fort albédo. Les surfaces sombres (océan, les sols sombres...) ont un faible albédo.

- **Plus les surfaces englacées sont importantes, plus l'albédo augmente** et plus l'énergie est réfléchie : c'est une **rétroaction positive**.

- A l'heure actuelle, il y a une **asymétrie de la répartition des masses continentales dans les deux hémisphères** : l'**Antarctique centré sur le pôle sud est englacé** provoquant un albédo global moyen d'environ 30 %.

* La **solubilité du CO₂**. **Plus la température de l'eau est basse, plus le CO₂ est soluble** et **plus potentiellement les océans peuvent contenir de CO₂** (qui diffuse depuis l'atmosphère). De ce fait lorsque la température des océans baisse, davantage de CO₂ est soluble (**puits de CO₂**) et donc l'effet de serre diminue : c'est une **rétroaction positive**.

- **Albédo** et **solubilité du CO₂** sont des **mécanismes amplificateurs des changements climatiques** : leurs variations expliquent que **les températures fluctuent de plusieurs °C entre période glaciaire et interglaciaire**. Couplés aux variations des paramètres orbitaux, ils **permettent ainsi les entrées et les sorties de glaciations**.

L'évolution climatique au Cénozoïque : un refroidissement progressif du climat.

- Le **Cénozoïque** est une ère comprise entre -65 et 0 Ma (le Quaternaire en fait donc partie).
- On retrouve la trace sédimentaire des **cycles des paramètres orbitaux** au cours du Cénozoïque. Toutefois, on observe des **changements climatiques de plus grande ampleur** qui sont enregistrés dans **diverses archives**.
- Des archives comme l'**indice (index) stomatique** (exploitation de la densité des stomates foliaires au cours du temps, densité que l'on peut relier à une **concentration atmosphérique en CO₂**) montrent que **la concentration en CO₂ a globalement diminué au cours du Cénozoïque** pour atteindre des valeurs proches ou un peu inférieures à la valeur actuelle.
- La baisse de concentration de ce GES explique que **l'effet de serre a progressivement diminué**, d'où une **baisse de température** progressive au cours du Cénozoïque (renforcée aussi par l'apparition de la **calotte glaciaire antarctique** qui **augmente l'albédo** de la planète) et aussi par la **hausse de la solubilité du CO₂**.
- **L'inlandis antarctique apparaît vers 30 Ma**. Sa formation a été déclenchée par les **mouvements des plaques** qui a permis **l'établissement de la circulation circumpolaire** isolant ainsi l'Antarctique des eaux plus chaudes.
- **L'orogène alpin au sens large** est **progressivement apparu au cours du Cénozoïque**.
- L'**érosion** de cette chaîne de plus en plus élevée s'est donc accrue. La hausse de l'érosion est enregistrée dans **l'accroissement du rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr** dans les sédiments.
- **L'érosion comprend les processus d'altération des roches** (= « usure » physique et chimique), de **transport** des sédiments altérés. Suite à l'érosion, **les sédiments transportés se déposent dans un bassin de sédimentation** où ils vont progressivement se transformer en **roche sédimentaire**.
- **L'altération des roches silicatées**, les roches majoritaires au sein des chaînes de montagnes, **consomme du CO₂** (puits de CO₂) : cela a donc contribué à la **baisse de la concentration atmosphérique en CO₂** au cours du Cénozoïque.

Le climat du Mésozoïque : le Crétacé, un monde sans glace.

- Le **Mésozoïque** est une ère s'étendant de -245 à -65 Ma.
- Le **Crétacé** est un système du Mésozoïque compris entre -135 et -65 Ma.
 - On retrouve les traces du climat crétacé dans l'exploitation des **roches sédimentaires** (puisque elles se forment en surface ou à proximité).
 - * De **nombreux gisements de roches carbonées** (charbon, pétrole) se forment indiquant un climat chaud.
 - * Le **δ¹⁸O de tests de foraminifères** enregistre la présence d'eaux océaniques plus chaudes.
 - * Les **tillites**, roches issues d'un dépôt glaciaire, sont absentes au Crétacé. Il n'y avait donc **pas de calotte glaciaire** (soit un **albédo plus faible**).
 - * On trouve des **fossiles de climats chauds aux hautes latitudes** (= pôles), ainsi que de **nombreux gisements de roches se formant sous climat humide et chaud** (bauxites).
 - Les différents indices recueillis à la surface du globe vont dans le sens d'un **monde chaud au Crétacé, y compris au niveau des pôles**.
 - Par ailleurs, le Crétacé est marqué par une **vaste transgression marine** (**hausse du niveau océanique**). C'est ainsi que de **vastes formations de craie** se sont **déposées en milieu chaud et peu profond** dans le bassin parisien sur plusieurs centaines de mètres. Ils proviennent de **l'accumulation de fragments d'êtres vivants unicellulaires** (les coccolithophoridés).
 - La **hausse du niveau marin** au crétacé s'explique par **trois facteurs** :
 - * la **dilatation thermique de l'eau**. L'eau occupe un volume plus grand lorsque sa température augmente.
 - * **l'absence de glaces continentales** : toute l'eau était à l'état liquide, donc en grande partie dans les océans.
 - * Les **dorsales étaient plus rapides** au Crétacé, et ce à l'échelle mondiale. Or le plancher océanique est plus élevé (donc moins profond) quand les dorsales sont plus rapides. **Les océans pouvaient alors contenir un volume moindre d'eau**, ce qui a provoqué une forte hausse du niveau marin.
 - La **concentration atmosphérique en CO₂ était plus élevée**. On peut l'expliquer par :
 - * un **fort magmatisme** lié à la **géodynamique interne**, à la fois de **dorsale** et de **point chaud**, émetteur de forte quantités de CO₂ (= **source de CO₂**),
 - * **l'absence d'orogène** au Crétacé, et donc de **puits de CO₂ lié à l'altération** (rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr faible dans les sédiments).
 - La **hausse de la concentration atmosphérique en CO₂** a donc provoqué une **hausse de l'effet de serre** et donc des températures.

Le climat au Paléozoïque : la glaciation du Carbonifère-Permien.

- Le **Paléozoïque** est une ère s'étendant de -540 à -245 Ma.
- Le **Carbonifère et le Permien** sont deux systèmes consécutifs compris entre -355 et -245 Ma.
- Au **Carbonifère**, on trouve de nombreuses **tillites** sur divers continents qui étaient **accolés et centrés sur le pôle sud à l'époque**. Il y avait donc une vaste **calotte glaciaire continentale au pôle sud** au carbonifère.
- On retrouve des **fossiles de climat chaud à l'équateur**, ainsi que des dépôts de **charbon et bauxites** (climat équatorial humide). Par exemple en France, située au niveau de l'équateur, se trouvait la **forêt houillère** (à l'origine des gisements de charbon français).
- Il faisait donc **froid au pôles et chaud à l'équateur**.
- On enregistre une **baisse transitoire de la température** au cours de Carbonifère-permien (malgré des incertitudes compte tenu de l'ancienneté de la période).
- Le **RCO₂** (masse de CO₂ dans le passé sur masse de CO₂ actuel) **a nettement diminué au début du Carbonifère**. L'**effet de serre a donc décrû** (d'où une baisse des températures et une hausse de la **solubilité océanique du CO₂** et une **rétroaction positive**).
- La **quantité de matière organique piégée** (par exemple la forêt houillère) au cours de la période **a nettement augmenté**, conduisant aux **vastes gisements de charbon** (et de pétrole) connus actuellement. Il y avait donc un fort **puits de CO₂**.
- La **Pangée**, vaste continent unique, était **en cours de formation** : les diverses **collisions** aboutissent à la grande **chaîne varisque** (hercynienne). Cette chaîne subit alors une **intense altération** (le **rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr est élevé** à l'époque, ce qui traduit une forte altération). C'est donc un **puits de CO₂**.
- Une **partie de ce vaste continent est centrée sur le pôle sud** : cela permet la **formation d'un vaste inlandsis**. Ce dernier **augmente l'albédo global** entraînant alors un refroidissement encore plus prononcé (**rétroaction positive**).