

Chapitre 4.1: Reconstituer et comprendre les variations climatiques à l'échelle du Quaternaire

Mots clés : Bilan radiatif, forçage, boucle de rétroaction, effet de serre, gaz à effet de serre, cycle du carbone, cycles de Milankovitch, paramètres orbitaux de la Terre, période glaciaire, période interglaciaire, diagramme pollinique, albédo, principe d'actualisme, thermomètre isotopique (dO18)

Notions	Activités, exemples
<p>I - Depuis la révolution industrielle, l'augmentation de la proportion dans l'atmosphère des gaz à effet de serre due aux émissions anthropiques constitue un forçage radiatif supplémentaire à l'origine de l'augmentation de la température moyenne du globe.</p> <p>1. Depuis 150 ans, la température globale a augmenté d'environ + 1,5°C</p> <p>2. L'origine humaine du changement climatique est clairement établie depuis les années 2000, les facteurs naturels ne pouvant expliquer une telle augmentation de température.</p> <p>a. La proportion du CO₂ atmosphérique (gaz à effet de serre) augmente depuis 1850 (de 280 ppm à 405 ppm environs)</p> <p>b. Cette augmentation est en grande partie liée à la consommation des carburants fossiles.</p> <p>c. Ainsi, cette perturbation du cycle biogéochimique du carbone due aux activités humaines provoque un forçage radiatif supplémentaire (effet de serre additionnel) à l'origine de l'augmentation de la température globale depuis la révolution industrielle</p> <p>d. D'autres phénomènes naturels (volcanisme, activité solaire...) peuvent aussi influencer le bilan radiatif, donc le climat.</p> <p>3. L'étude et la compréhension des climats passés sont indispensables pour anticiper le changement climatique à venir.</p>	
<p>II. A l'échelle du Quaternaire, des indices de nature différente (paléoécologiques, géologiques, préhistoriques, isotopiques...), permettent de reconstituer des variations climatiques, plus particulièrement des alternances de périodes glaciaires et interglaciaires depuis -800 000 ans. Ces reconstitutions se basent sur le principe de l'actualisme (hypothèse qui stipule les phénomènes géologiques du passé se réalisent de la même façon qu'actuellement)</p> <p>1. Différents indices climatiques continentaux (traces laissées par les glaciers après leur fonte, pollens fossiles...etc) contribuent à reconstituer les évolutions climatiques récentes (depuis - 120 000 ans).</p> <p>a. Des indices paléo-écologiques (traces laissées par la flore ou la faune à une époque donnée) permettent de reconstituer le climat local et ses changements.</p>	

- Un grain de pollen est entouré d'exine, une structure résistante qui se conserve avec le temps.

- Les pollens récoltés dans des pièges sédimentaires (tourbières par exemple) témoignent de la végétation du passé.

- Or, la végétation et sa répartition obéit à des préférences écologiques et dépend donc étroitement du climat.

[Exemple : graminée, bouleau, pin = climat froid ; chêne, tilleul = climat plus tempéré]

- Ainsi, l'interprétation d'un diagramme pollinique (nature et proportions des pollens dans une carotte sédimentaire en fonction de la profondeur) permet de reconstituer des paléoclimats successifs.

- L'interprétation des diagrammes polliniques repose sur les principes de l'actualisme (les espèces fossiles ont les mêmes exigences que les espèces actuelles) et de superposition (les couches les plus profondes sont les plus anciennes).

b. Des indices géologiques, notamment les sédiments glaciaires, constituent des archives climatiques permettant de reconstituer l'étendue des glaciers et des calottes polaires dans le passé.

- Des striations peuvent être interprétées comme les traces caractéristiques laissées par le passage des glaciers (agents d'érosion très puissants)

- Les moraines sont des fragments de roche de toute taille (matériaux tombant des montagnes ou arrachés au socle raboté par un glacier). Ces matériaux, transportés sur de grandes distances puis déposés sur les bords des glaciers, témoignent de l'extension glaciaire à une époque donnée.

- Les blocs erratiques sont des fragments de roche de taille relativement importante qui ont été déplacés par le glacier parfois sur de grandes distances. Lors de la fonte du glacier, le bloc erratique est abandonné sur place et témoigne de l'extension glaciaire.

c. Pour les périodes les plus récentes, l'étude des peintures rupestres nous informe sur la faune côtoyée par l'être humain et donc sur le climat et ses évolutions.

d. Ainsi, différents indices climatiques permettent de dire que le Pléistocène supérieur (-120 000 ans ; -11 000 ans) était une période globalement froide tandis que l'Holocène (depuis -10 000 ans jusqu'à nos jours) est marqué par un réchauffement (interglaciaire).

- Le maximum glaciaire (moment le plus froid) a été atteint il y a -20 000 ans.

- Le Nord de l'Europe et le Alpes étaient alors recouverts d'une calotte de glace.

- Cette période se traduit par une avancée des côtes (car niveau de la mer 120m plus bas qu'actuellement)

2. L'étude des rapports isotopiques de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) dans les carottes polaires antarctiques et les sédiments carbonatés montre sur les 800 000 dernières années des changements climatiques globaux, planétaires, et périodiques, sous la forme d'une succession de cycles qui coïncident avec les variations cycliques de composition de l'atmosphère en gaz à effet de serre (déduites de l'analyse des bulles d'air piégées dans la glace)

a. Les rapports isotopiques de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) et de l'hydrogène ($\delta^{18}\text{D}$) des molécules d'eau de la glace continentale permettent d'estimer la température de l'air au moment de la chute de neige car ils varient dans le même sens.

- Les glaces polaires se forment à partir de l'accumulation et du tassement des chutes de neige au cours des années. La succession des couches en fonction de la profondeur correspond à l'ordre de dépôt au cours du temps. Un carottage permet de remonter le temps : la couche la plus ancienne est la plus profonde (principe de superposition).
- L'oxygène est présent sous forme de différents isotopes à la surface de la Terre. La valeur en ^{18}O étant faible, le rapport de la teneur en isotope lourd sur celle en isotope léger est exprimé par un écart (δ) en fonction d'un standard (valeur moyenne de l'eau de l'océan actuel)

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

- L'isotope ^{18}O est plus lourd que l'isotope ^{16}O , il s'évapore plus difficilement et précipite plus préférentiellement dans les eaux de pluie (ou la neige). Ce fractionnement isotopique a pour conséquence de faire varier la concentration de la neige en ^{18}O en fonction de la température.
- Ainsi en mesurant la composition isotopique des couches de glace d'une carotte de glace, il est possible de déterminer la température qui régnait lors du dépôt de la neige à l'origine de la glace.
- Une diminution des rapports isotopiques dans la glace correspond à une diminution de la température de l'air soit un refroidissement (et inversement).

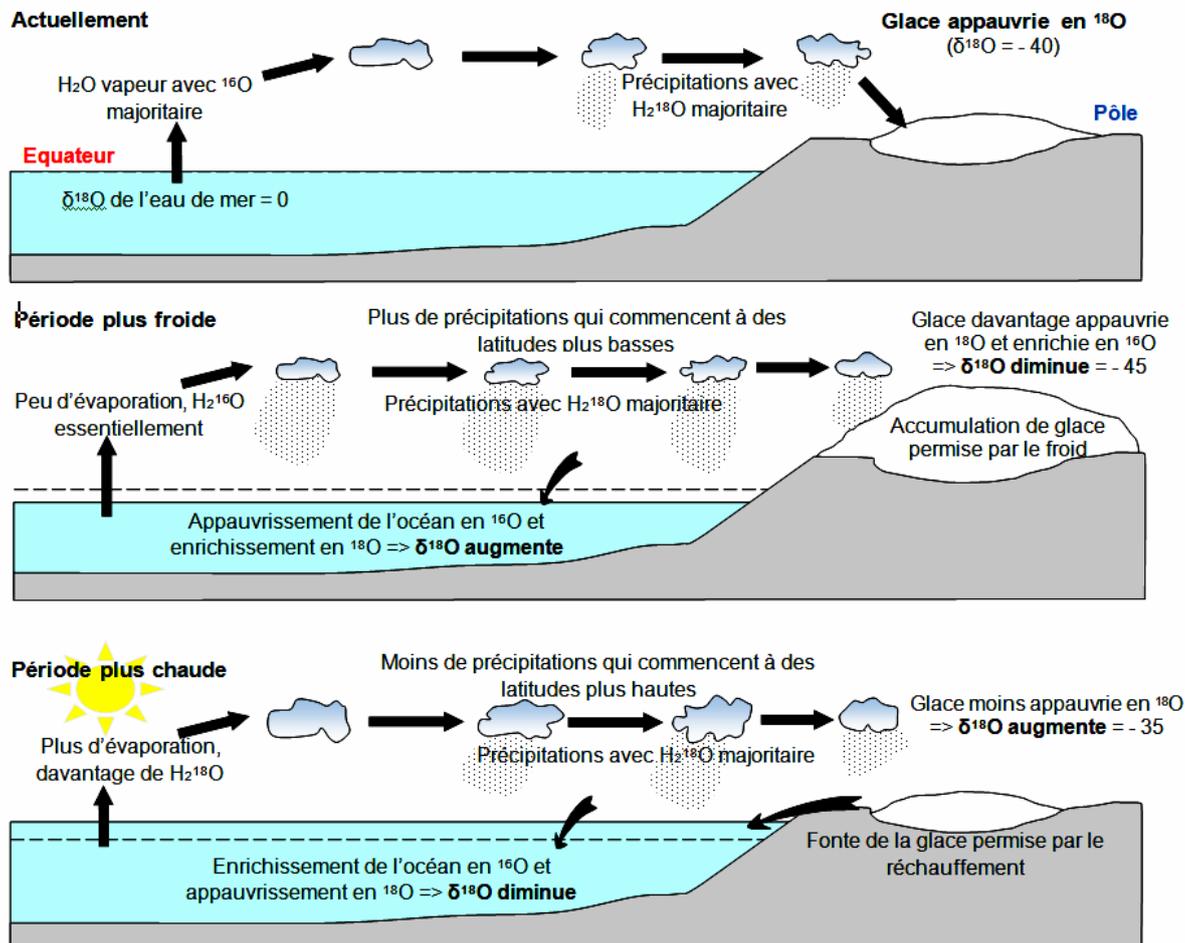
b. Les tests carbonatés des foraminifères constituent des archives climatiques au niveau océanique. Dans ce cas, le rapport isotopique ($\delta^{18}\text{O}$) varie dans le sens opposé de la température de l'eau de mer.

- Les fonds océaniques sont recouverts de couches sédimentaires superposées selon leur ordre de dépôt (datation relative possible) et formées par accumulation de tests (coquille calcaire) de foraminifères fossiles (organismes unicellulaires benthiques)
- Les tests calcaires CaCO_3 sont formés à partir des atomes O en solution dans l'eau de mer soit avec ^{18}O et ^{16}O .
- En mesurant actuellement ce rapport dans de nombreuses coquilles de foraminifères, à des latitudes différentes, les scientifiques ont établi que le ($\delta^{18}\text{O}$) des tests carbonatés est inversement proportionnel à la température moyenne de l'eau.

[Remarque : Le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ qui sert de référence pour le calcul du ($\delta^{18}\text{O}$) est celui des coquilles fossiles d'âge crétacé, époque au cours de laquelle il n'y avait pas de calotte glaciaire à la surface de la terre]

- Ainsi, pour un sédiment donné formé à une époque donnée, l'augmentation du rapport isotopique ($\delta^{18}\text{O}$) des carbonates traduit une diminution de la température et inversement.

Schéma 1 : Principe du fractionnement isotopique et de la corrélation rapport isotopique / climat



[Remarque : L'étude statistique des espèces de foraminifères présents dans les sédiments permet aussi de reconstituer les paléoclimats car certaines espèces ont des exigences écologiques précises :

- Globigérines dans les eaux chaudes
- Radiolaires dans les eaux froides, aux latitudes plus élevées]

c. Les variations climatiques planétaires déduites de l'étude des foraminifères sont concordantes avec celles déduites de l'étude de la glace : même variations et même périodicité :

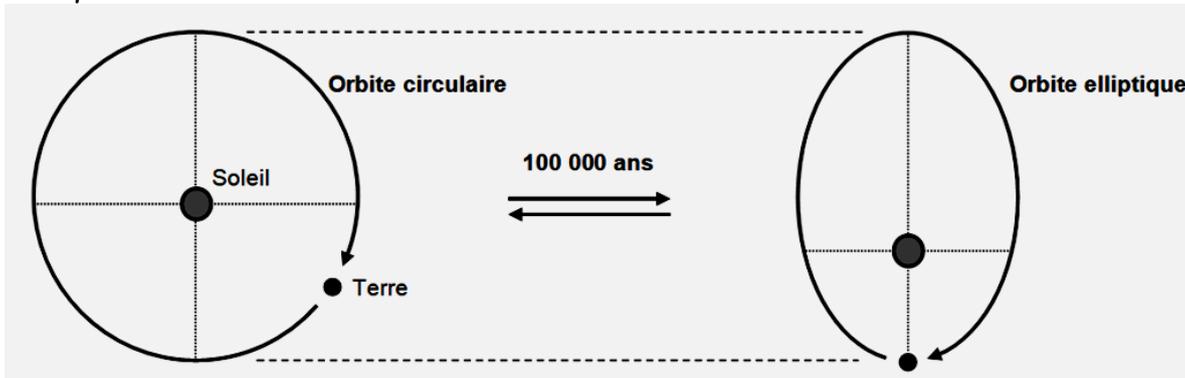
- Périodes glaciaires « froides » qui durent environ 80 - 100 000 ans.
- Périodes interglaciaires « chaudes » qui durent environ 20 000 ans.
- Ces périodes alternent tous les 100 000 ans avec une amplitude plus ou moins grande.
- Phases de réchauffement rapides qui alternent avec phases de refroidissement plus lentes

III. Les variations cycliques du climat au Quaternaire s'expliquent par des variations périodiques de paramètres orbitaux (forçages astronomiques) dont les effets ont pu être augmentés par des phénomènes amplificateurs (variations de solubilité du CO₂, de l'albédo).

1. Les rapports isotopiques montrent des variations cycliques coïncidant avec des variations périodiques des paramètres orbitaux de la Terre susceptibles de modifier la quantité d'énergie thermique reçue par la Terre (donc le climat).

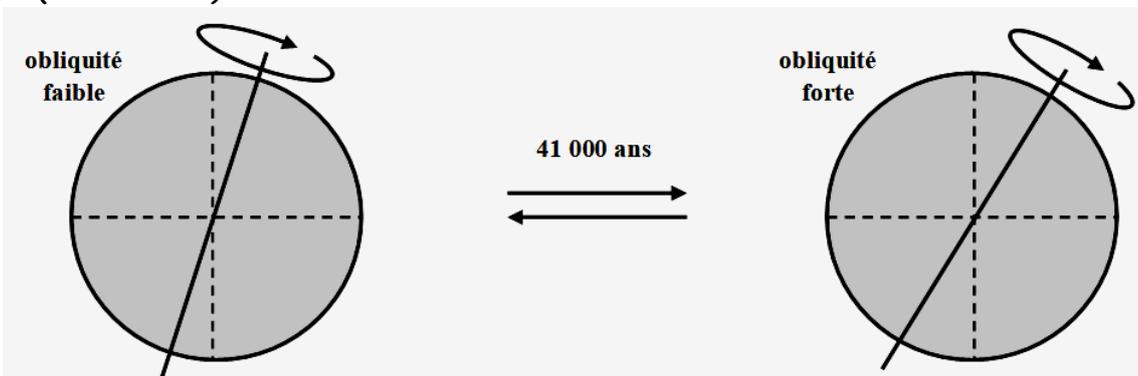
a. Les changements de position d'astres massifs du système solaire (Jupiter, Saturne) ou d'objets proches de la Terre (Vénus) provoquent de légères modifications des attractions gravitationnelles que subit la Terre. Ces variations engendrent des modifications périodiques des paramètres orbitaux de la Terre (Cycles de Milankovitch) → variations de puissance solaire reçue → modification du bilan radiatif.

- Excentricité : L'orbite de la Terre autour du Soleil décrit tantôt un cercle, tantôt une ellipse.



→ La tendance elliptique diminue la distance moyenne entre la Terre et le Soleil ce qui a pour effet d'augmenter l'insolation annuelle moyenne.

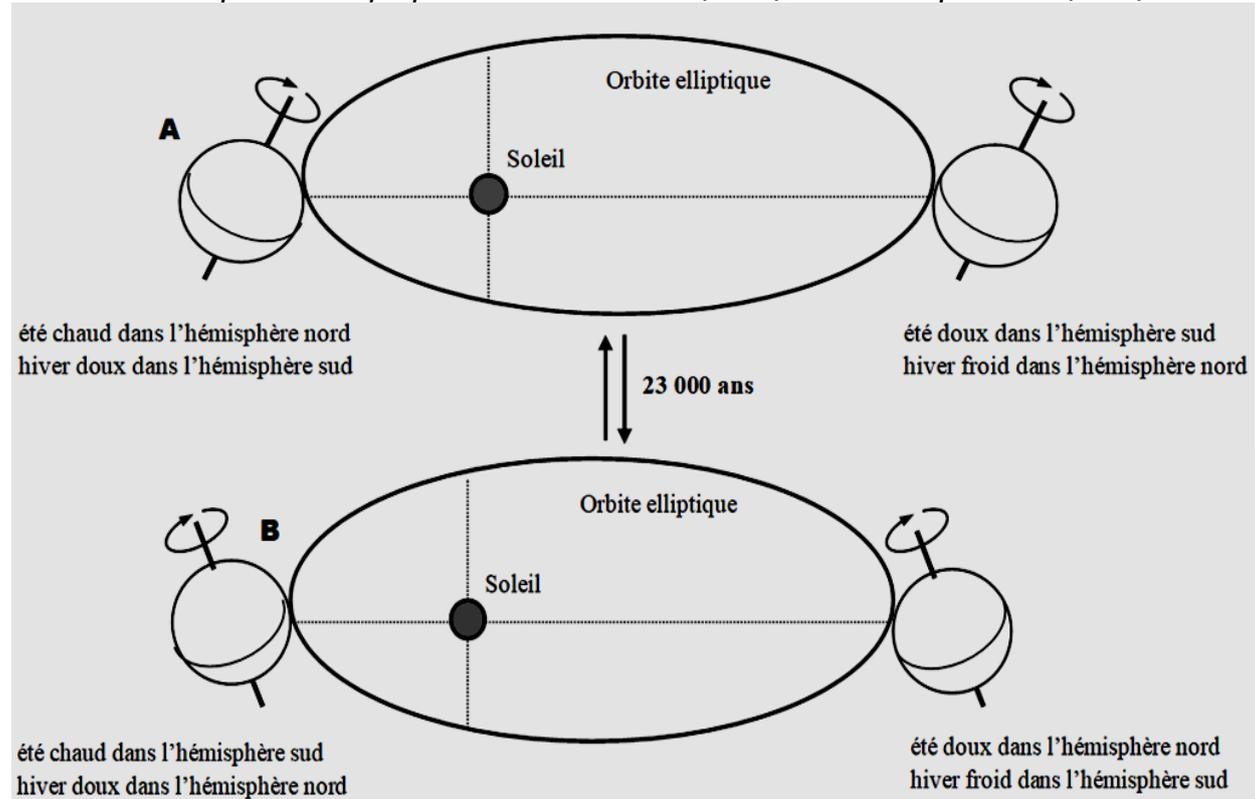
- Obliquité : variation de l'angle d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur elle-même (de 21 à 24°)



→ plus l'inclinaison est faible plus le contraste saisonnier est faible → étés plus frais
→ les glaces formées pendant l'hiver ne fondent pas complètement → accumulation de glace qui augmente l'albédo → glaciation

- Précession : Changement de direction de l'axe de rotation (l'axe tourne comme une toupie)

Sur les schémas ci-dessous, lorsque la Terre est au plus proche du Soleil (à gauche) c'est tantôt le pôle nord qui pointe vers le soleil (en A), tantôt le pôle sud (en B).



→ Modifie les contrastes saisonniers de chacun des hémisphères

b. Les variations périodiques des paramètres orbitaux se répètent avec des périodes de 100 000 ans, 41 000 ans et 23 000 ans qui coïncident avec les variations climatiques du quaternaire déduites des données isotopiques.

2. Les variations de paramètres orbitaux ne peuvent expliquer à elles seules les oscillations climatiques. Des boucles de rétroactions permettent d'expliquer l'ampleur des changements climatiques ainsi que la rapidité des entrées et sorties de glaciation.

a. Lors d'un refroidissement, initié par une diminution de l'insolation, neige et glace augmentent l'albédo moyen de la Terre. La planète réfléchit davantage le rayonnement solaire, ce qui amplifie son refroidissement. Le réchauffement a des effets inverses. On est donc en présence d'un mécanisme amplificateur (= d'une rétroaction positive).

b. Il y a équilibre entre la quantité de CO_2 atmosphérique qui participe à l'effet de serre et la quantité de CO_2 qui se dissout dans l'eau de mer.

Lorsque la $T^\circ C$ de l'eau de mer augmente, la solubilité de CO_2 dans l'océan diminue. Lors d'un réchauffement initié par une augmentation d'insolation, du CO_2 dissous dans l'eau de mer passe dans l'atmosphère, ce qui entraîne une augmentation de l'effet de serre et donc une amplification du réchauffement. Le refroidissement a des effets inverses.