

Les climats de la Terre : comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain

Réf.10 **Chap.X : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées**
Les variations climatiques au Cénozoïque

Objectifs de ce chapitre :

Il s'agit d'identifier les méthodes de mesure les plus adéquates, comprendre les mécanismes potentiellement responsables de ces variations.

Il s'agit de comprendre que les méthodes d'étude et les mécanismes expliquant les variations constatées peuvent être de natures différentes, de comprendre les mécanismes potentiellement responsables de ces évolutions et d'acquérir une idée générale de l'amplitude des variations climatiques reconstruites depuis le Paléozoïque.

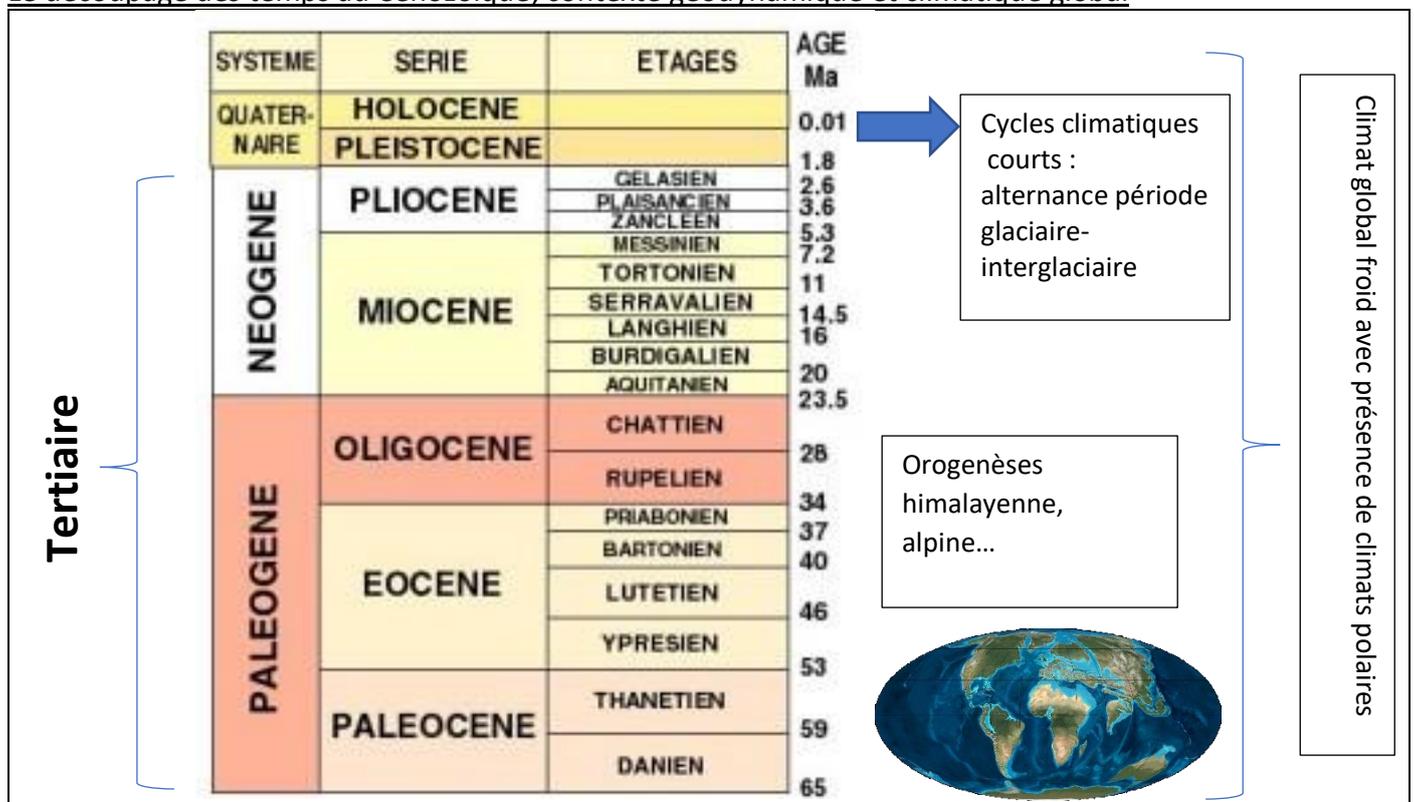
Etre capable de formuler des hypothèses explicatives sur les spécificités du réchauffement climatique à la lueur des connaissances des climats du passé.

Exercer un regard critique sur tous les biais d'interprétation pouvant affecter la compréhension de systèmes complexes impliquant de nombreux phénomènes (voir aussi Enseignement scientifique).

Quelles sont les méthodes permettant de reconstituer des climats du Cénozoïque ? Quels sont les indices et les témoins des variations climatiques récentes ? Quels sont les facteurs à l'origine de changements climatiques ? Quel rôle jouent les activités humaines sur ces changements ?

Pour se situer dans le temps :

Le découpage des temps au Cénozoïque, contexte géodynamique et climatique global



I Le climat global au Cénozoïque

Le Cénozoïque fait suite à une période globalement chaude, celle du Crétacé, qui marque la fin du Mésozoïque.

- Globalement, à l'échelle du Cénozoïque, et depuis 30 millions d'années, les indices géochimiques des sédiments marins montrent une tendance générale à la baisse de la température moyenne du globe (voir introduction du réf.09).

- D'autres indices montrent cette tendance également comme les indices stomatiques des végétaux (voir ref.09).
- Celle-ci est associée à la baisse de la concentration atmosphérique de CO₂ en relation avec l'altération des matériaux continentaux notamment à la suite des orogénèses du Tertiaire: on retrouve donc à nouveau, les mêmes mécanismes déclencheurs d'un refroidissement global à l'échelle de la planète lors du Permo-Carbonifère (voir Réf.09)
- De même, les mêmes mécanismes amplificateurs sont à l'œuvre : albédo, océans puits de carbone.(voir Réf.09)
- La paléogéographie des continents a joué un rôle également en modifiant les régimes de circulation des courants océaniques. Par exemple la séparation du continent Antarctique durant l'Eocène a généré un courant circum-polaire amplificateur du refroidissement de cette partie du globe.

Cependant, les études des climats à des échelles de temps plus courtes et plus récentes montrent une alternance de période plus froide ou plus chaude.

Quels sont les outils et méthodes utilisés pour reconstituer les variations climatiques au Quaternaire ?

II Des indices permettant de reconstituer les variations climatiques du Quaternaire

Les changements climatiques, notamment des 800 000 dernières années du Quaternaire, sont déduits d'analyses effectuées à partir de carottes glaciaires, de tourbes mais aussi d'indices sédimentaires.

A Des indices biologiques

Les variations climatiques locales peuvent être déduites de l'étude de **carottes** sédimentaires de lacs ou de tourbières. Grâce à ces carottages, on peut retrouver des **pollens** fossiles et les dater. La comparaison des pollens fossiles et des pollens actuels permet d'identifier les végétaux qui se sont succédé au cours du temps dans une région donnée. La répartition en pourcentage des pollens des différentes espèces à une époque donnée constitue un **spectre pollinique**. L'évolution des spectres polliniques au cours du temps est représentée par un **diagramme pollinique**. En appliquant le **principe d'actualisme** (c'est-à-dire en considérant que les espèces d'autrefois avaient les mêmes exigences climatiques que les espèces actuelles), on peut reconstituer les climats qui se sont succédé localement au cours du temps.

B Des indices physico-chimiques dans les carottes de glace

- Les variations locales de température au-dessus des calottes polaires sont déduites de la composition isotopique de l'oxygène ¹⁸O/¹⁶O de la glace.

Les glaces polaires se forment par accumulation de neige au cours des années. Le principe de superposition s'applique à leur étude : les couches de glace superficielles sont plus récentes que les couches profondes.

L'oxygène présente deux isotopes stables, ¹⁸O et ¹⁶O présents en quantités différentes dans l'eau, la glace ou la neige. On mesure le **rapport isotopique de la glace** (¹⁸O/¹⁶O) puis on calcule le **δ¹⁸O**

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{glace}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}} \right] \times 1000 / \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}}$$
 SMOW = Standard Mean Ocean Water = référence standard.

- ⇒ Le δ¹⁸O est un **thermomètre isotopique** : plus il est négatif, plus la température au moment de la formation de la glace est basse.
- ⇒ Le δ¹⁸O permet de déterminer des variations de températures au niveau des pôles.

Les carottages effectués permettent de remonter dans le temps jusqu'à 800 000 ans (record obtenu en 2004 en Antarctique).

Ces études ont permis de montrer que le climat a fluctué de façon cyclique avec alternance **de période glaciaire et de période interglaciaire**. Chaque cycle climatique, d'une durée approximative de 100 000 ans, est ainsi caractérisé par une phase de refroidissement lent et irrégulier (d'une durée de l'ordre de 90 000 ans) et d'une phase de réchauffement plus rapide qui peut durer 10 000 ans.

On reconnaît actuellement que depuis 800 000 ans, la Terre a connu huit cycles climatiques.

- Les analyses des bulles de gaz piégées dans les glaces permettent aussi de récolter des données sur la **composition gazeuse de l'atmosphère** au cours des 800 000 dernières années. De nombreux gaz sont étudiés et certains, comme **les gaz à effet de serre** tels que le dioxyde de carbone et le méthane, sont significatifs et permettent d'expliquer les variations climatiques. En effet, on constate une corrélation étroite entre les

concentrations en CO₂ et CH₄ (méthane) et les changements de température enregistrés aux pôles : lorsque la concentration des gaz à effet de serre augmente, on enregistre une augmentation de la température.

C Des indices physico-chimiques dans les sédiments océaniques => voir ref.09

III La reconstitution de variations climatiques au niveau local

A Des indices géologiques

Les glaciers abandonnent de grandes quantités de matériaux sur leur bordure et à leur front. Si le glacier se stabilise pendant quelques années, les dépôts s'accumulent jusqu'à former de longues crêtes parallèles : les **moraines latérales** et une accumulation au front du glacier, la **moraine frontale**. Les moraines sont composées de matériaux de tailles variées.

On dit souvent que les vallées glaciaires ont un profil en U (ou en auge), et les vallées fluviales en V. Mais en fait le glacier ne va pas partout à la même vitesse, la roche n'est pas homogène. Il y a donc des verrous glaciaires (là où la roche est particulièrement dure), et, en amont, des ombilics, endroits plus creusés, qui donnent ensuite des lacs. La présence d'ombilics constitue la preuve d'une vallée glaciaire : une rivière ne peut pas creuser de cuvette.

B Des données préhistoriques et des indices de variation du niveau marin

- Des paléorivages attestent de variation du niveau marin. Par exemple, la grotte Cosquer est une grotte ornée du paléolithique située dans une calanque dans la région de Marseille. Unique au monde, cette grotte sous-marine abrite plusieurs dizaines d'œuvres peintes et gravées il y a entre **27 000 et 19 000 ans**. On y observe des peintures de pingouins, montrant que le climat devait être relativement froid. Actuellement, l'entrée de cette grotte se trouve à environ 36 m sous le niveau actuel de la mer.
- De telles données préhistoriques témoignent de période de glaciation.

L'ensemble des données montrent, de façon concordante, que le climat a oscillé au cours des 800 000 dernières années : des périodes glaciaires (froides) et des périodes interglaciaires (réchauffement) ont alterné de façon cyclique.

A la suite d'une vaste extension des calottes glaciaires entre – 120 000 et – 11000 ans, la dernière période du Quaternaire, l'Holocène (- 10 000 mille ans à l'actuel), est marqué par un réchauffement. Le réchauffement climatique actuel (XX^{ème} et XXI^{ème} siècles), rapide, s'inscrit donc dans une période de réchauffement à l'échelle du millénaire.

IV Des paramètres permettant d'expliquer l'origine des variations climatiques

A Des paramètres astronomiques

Ces paramètres modifient la quantité d'énergie solaire reçue par la Terre ainsi que sa répartition à sa surface. La théorie de Milankovitch (ou théorie astronomique des changements climatiques) permet d'expliquer des changements des climats en relation avec des changements de paramètres orbitaux de la Terre. Ces changements sont cycliques et sont en corrélation avec les enregistrements effectués grâce aux indices physico-chimiques.

B Des facteurs qui amplifient les changements climatiques

- Le dioxyde de carbone
- ⇒ L'effet de serre :

L'atmosphère laisse passer une très grande partie du spectre de la lumière solaire : l'atmosphère est transparente aux radiations du domaine du visible. Une partie importante de l'énergie solaire atteint la surface de la Terre (on parle d'énergie incidente). Une partie de cette énergie est réémise sous forme de **radiations infra-rouges**. Ce qui a tendance à refroidir la surface de la Terre. Cependant, les gaz à effet de serre absorbent une grande partie des radiations infra-rouges, ce qui limite les pertes d'énergie vers l'espace. L'absorption de ces infra-rouges par certains gaz comme le dioxyde de carbone constitue **l'effet de serre naturel**.

Des variations dans la composition en gaz à effet de serre entraîneront donc un déséquilibre avec soit une augmentation de l'effet de serre ou une diminution.

⇒ Les modifications des paramètres astronomiques sont des **déclencheurs** de variations de climats. Ces variations sont amplifiées par un processus de **rétroaction positive** ou diminuées par **rétroaction négative**.

Par exemple, si les paramètres orbitaux déclenchent une augmentation de la quantité d'énergie reçue à la surface de la Terre, on observe une amorce de réchauffement climatique. Ce réchauffement va interférer sur le cycle du carbone : réchauffement des eaux de surface, diminution de la solubilité du CO₂ dans l'eau. Les océans deviennent des **sources de CO₂**. Du CO₂ passe dans l'atmosphère ce qui engendre une augmentation de l'effet de serre. Dans ce cas, il y a amplification du réchauffement (rétroaction positive) avec un **forçage radiatif** positif (augmentation de la quantité d'énergie au sol).

Même type de raisonnement si les modifications des paramètres orbitaux déclenchent un refroidissement. Dans ce cas, les océans deviennent des **puits de CO₂**.

➤ L'albédo

L'albédo correspond au rapport de l'énergie réfléchi par une surface sur l'énergie reçue par cette surface. Plus la quantité d'énergie réfléchi est élevée, plus l'**albédo** est important : la surface réfléchissante absorbe encore moins d'énergie et se refroidit davantage. (voir réf.09). L'augmentation des surfaces englacées amplifie le refroidissement. Inversement, la fonte des glaces déclenchée par une hausse de température diminue globalement l'albédo et renforce ainsi le réchauffement.

D'autres phénomènes naturels sont à prendre en compte dans les modifications du climat comme par exemple les éruptions volcaniques qui sont source de dioxyde de carbone.

V Activités humaines et évolution possible du climat

D'environ 1°C en 150 ans, le réchauffement climatique observé au début du XXI^e siècle est corrélé à la perturbation du cycle biogéochimique du carbone par l'émission de gaz à effet de serre liée aux activités humaines.

- Depuis la révolution industrielle de la fin du XVIII^e siècle, les activités humaines libèrent une grande quantité de gaz à effet de serre. Il en résulte un effet de serre d'**origine anthropique** qui s'ajoute à l'effet de serre naturel. On parle de forçage radiatif positif d'origine anthropique.
- Actuellement, le taux de CO₂ a atteint 400 ppm. Ce taux, mesuré notamment dans les carottes de glace, a augmenté rapidement depuis le début du XIX^e siècle alors que les variations enregistrées jusqu'alors oscillaient entre 200 à 300 ppm environ.
- Les conséquences d'un réchauffement climatique global sont nombreuses :
 - Fontes des glaciers des montagnes, fontes des calottes polaires antarctiques et des banquises
 - Augmentation de la température des océans
 - Modification du cycle du carbone avec augmentation du taux de CO₂ atmosphérique par des processus d'amplification...
- L'augmentation de la température a des effets sur le niveau de la mer : l'élévation de la température des océans entraîne une dilatation thermique (augmentation du volume d'eau sous l'effet du réchauffement) ainsi que la fonte des glaces continentales qui entraînent une élévation du niveau marin.
- Des modèles climatiques permettent d'évaluer les conséquences du réchauffement de la Terre et d'établir différents scénarios en fonction des politiques engagées dans la réduction de la production des gaz à effet de serre. Ces différents modèles envisagent des augmentations de températures entre 2 et 5°C sur une période de 100 ans.

L'Anthropocène est une époque de l'histoire de la Terre qui a été proposée pour caractériser l'ensemble des événements géologiques qui se sont produits depuis que les activités humaines ont une incidence globale significative sur l'écosystème terrestre. Théorisé pour la première fois par Paul Josef Crutzen, prix Nobel de Chimie en 1995, l'anthropocène signifie étymologiquement « L'Âge de l'Homme ». Ce serait une nouvelle ère dans la chronologie de la géologie ayant débuté lors de la Révolution industrielle de 1850, et succédant à l'« holocène » (l'ère interglaciaire qui a favorisé l'expansion des sociétés humaines), qui dura plus de 10 000 ans. Elle vise à définir une nouvelle ère dans la géologie dans laquelle l'Homme est devenu l'acteur central.

Lexique référentiel 10

Albédo : rapport entre la quantité d'énergie réfléchie par un objet et la quantité d'énergie reçue. L'albédo de la neige ou de la glace est voisin de 0,9 par exemple. L'albédo varie entre 0 et 1 (ou 0 et 100% si on l'exprime en %)

Altération : transformation chimique des minéraux des roches sous l'effet conjugué de facteurs climatiques.

Calotte glaciaire : couche de glace recouvrant une masse continentale. Elles sont qualifiées de calottes polaires lorsqu'elles sont situées au niveau des pôles (Antarctique, Groenland). Ne pas confondre avec la banquise (masse d'eau glacée flottant sur l'eau).

Coccolithophoridés :

Cycle biogéochimique du carbone : ensemble des échanges de carbone entre l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère et la biosphère.

Effet de serre : phénomène de réchauffement de la surface terrestre lié à la présence dans l'atmosphère de certains gaz comme le dioxyde de carbone ou la vapeur d'eau.

Forçage radiatif : différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique donné. Un forçage radiatif positif tend à réchauffer le système (plus d'énergie reçue qu'émise), alors qu'un forçage radiatif négatif va dans le sens d'un refroidissement (plus d'énergie perdue que reçue).

Gaz à effet de serre : gaz atmosphérique qui absorbe les radiations infrarouges émises par la surface de la Terre

Origine anthropique : liée aux activités humaines

Orogenèse : formation des reliefs d'une chaîne de montagnes.

Principe d'actualisme : principe selon lequel les lois régissant les phénomènes géologiques actuels étaient les mêmes dans le passé. Ce principe s'applique également aux phénomènes biologiques.

Puits de carbone : flux entrant de carbone supérieur au flux sortant

Piégeage du CO₂ : processus consistant à séparer le CO₂ de ses sources et à l'isoler de l'atmosphère sur le long terme.

Rétroaction : action en retour d'un système suite à la modification d'un paramètre. Si la réponse du système amplifie la modification du paramètre, on parle de rétroaction positive. Si au contraire elle l'atténue, on parle de rétroaction négative.

Rétroaction positive : action en retour d'un phénomène qui tend à accentuer davantage ce phénomène

Ex : refroidissement => calotte glaciaire => albédo élevé => refroidissement accentué

Transgression marine : envahissement durable de zones littorales par la mer.

Capacités et attitudes attendues pour ce chapitre : (elles complètent celles du réf.09)

- Mettre en évidence l'amplitude et la période des variations climatiques étudiées à partir d'une convergence d'indices.
- Mobiliser les connaissances acquises sur les conséquences des activités humaines sur l'effet de serre et sur le cycle du carbone.
- Rassembler et confronter une diversité d'indices sur le dernier maximum glaciaire et sur le réchauffement de l'Holocène (changement de la mégafaune dans les peintures rupestres, cartographie des fronts morainiques, construction et utilisation de diagrammes polliniques, terrasses, paléoniveaux marins...).
- Comprendre et utiliser le concept de thermomètre isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ dans les glaces arctiques et antarctiques, $\delta^{18}\text{O}$ dans les carbonates des sédiments océaniques => réf.09) pour reconstituer indirectement des variations de températures.
- Mettre les variations temporelles des paramètres orbitaux, définis par Milankovitch, en relation avec les variations cycliques des températures au Quaternaire.

Références :