

Le climat au Cénozoïque (Ère tertiaire)

Comment reconstituer et expliquer les variations climatiques depuis 65000 ans ?

[Échelle chrono-stratigraphique.](#)

I: Les perturbations climatiques récentes (150 ans).

Le réchauffement climatique occupe actuellement une place importante dans l'actualité politique et citoyenne. Les archives climatiques permettent d'étudier ses manifestations depuis 150 ans. [Lien vers l'activité](#)

L'évolution passée des biomes témoigne des variations climatiques passées.

Un biome (ou macro-écosystème) est une aire biogéographique caractérisée par son peuplement végétal et son climat.

De 1876 à 2000, on voit une réduction notable de la surface occupée par les biomes boréaux de la ceinture montagnarde et subalpine. En 2000, ces ceintures sont remontées de 150 mètres au sommet et de 390 mètres à la base par rapport à leur altitude en 1876.

Les prévisions des évolutions climatiques prédisent un accroissement du réchauffement.

Selon les prévisions favorables, cette ceinture boréale va pratiquement disparaître. Elle sera remontée de 240 mètres pour le sommet et de 410 mètres à la base plus élevées par rapport à leur altitude actuelle.

Si les prévisions sont défavorables, la quasi-totalité des biomes alpins, boréaux et des forêts tempérées froides disparaît. La ceinture boréale remonte de plus d'1 km en altitude.

L'effet du CO₂ sur l'équilibre des réactions physico-chimiques dans l'eau et sur les communautés des biomes marins.

Une fois dissous dans l'eau, le CO₂ interagit avec 3 molécules d'eau pour former un ion carbonate pouvant interagir avec les ions Ca²⁺ pour faire de la calcite, mais aussi deux ions hydroniums. Plus la concentration en ions hydronium augmente sous l'effet de l'apport de CO₂, plus le pH diminue.

La baisse du pH peut dissoudre le calcaire des coquilles et tests de certains organismes. Les moules et les récifs coralliens sont très sensibles à la baisse du pH. D'autres organismes comme les algues sont en revanche favorisés et prolifèrent.

L'origine anthropique des perturbations climatiques.

On observe une corrélation positive entre les émissions de carbone anthropiques et l'élévation de température récente (depuis la révolution industrielle). Ni le volcanisme, ni l'activité solaire ne sont corrélés avec les anomalies thermiques. Cela montre que les activités humaines sont responsables des changements climatiques actuels. Les rejets de CO₂ dans l'atmosphère accroissent l'effet de serre. (Voir cours enseignement scientifique.)

II: L'évolution climatique à l'Holocène

L'Holocène (-12000 ans -> actuel) est l'époque actuelle au sein de la période quaternaire au sein de l'ère cénozoïque. [Lien vers l'activité](#)

La palynologie permet de reconstituer les variations paléo climatiques des Vosges durant l'Holocène.

La tourbe se forme de façon continue du bas vers le haut grâce à l'accumulation de matière végétale. Cette matière piège dans un milieu anoxique les pollens des espèces présentes dans l'environnement. En s'accumulant, la tourbe enregistre ainsi les variations du biome qui l'entoure.

La relation entre le climat et les peuplements végétaux.

Chaque espèce végétale présente des exigences ou des préférences climatiques particulières principalement en relation avec la pluviométrie et les températures saisonnières. Le développement d'une espèce végétale en un lieu donné dépend donc de ces conditions climatiques. La répartition géographique des végétaux dépend de leurs exigences écologiques et est donc fonction du climat. La même relation peut s'établir à une échelle plus grande en considérant des peuplements végétaux constitués par l'association de différentes espèces végétales partageant une même zone géographique et ayant les mêmes exigences climatiques: la nature d'un peuplement végétal est un indicateur du climat.

La détermination des peuplements végétaux passés.

La composition d'un peuplement végétal est donc un indicateur des conditions climatiques qui règnent dans la zone géographique du peuplement à l'instant donné. Pour reconstituer des variations paléo-climatiques, il faut donc déterminer la nature des peuplements végétaux passés; cela est possible grâce à l'étude des pollens anciens issus des lacs et tourbières.

En effet, les pollens présentent des caractéristiques favorables à ce type d'études:

- Les grains de pollens présentent des formes particulières qui permettent de les distinguer au microscope.

- Chaque espèce végétale produit un seul type de grain de pollen qui lui est caractéristique.
- Les grains de pollen possèdent une enveloppe très résistante qui permet leur conservation et leur accumulation dans les sédiments (leur conservation est favorisée par l'acidité des tourbières).
- Les pollens possèdent une forme et une structure qui permet leur dispersion sur une échelle géographique suffisante pour pouvoir s'accumuler dans les tourbières, et telle que la reconstitution réalisée est caractéristique d'un peuplement végétal régional, donc d'un climat local.

Les variations climatiques dans les [Vosges à l'Holocène](#).

Au début de l'Holocène, on compte environ 30 % de pollens de poacées et d'armoises (plantes qui résistent à la sécheresse et aux grands froids), 65 % de plantes telles que le bouleau et l'épicéa (résistent au froid, mais le bouleau craint la sécheresse) et à peine 5 % de plantes comme le chêne, le hêtre et le noisetier qui sont plus sensibles au froid. Ceci indique que le climat était froid. La tendance s'inverse ensuite, et pendant plus de la moitié de l'Holocène, le climat dans les Vosges se réchauffe puisque les associations tempérées (chêne, noisetier et hêtres) constituent 95 % des pollens

Le climat s'est ensuite à nouveau refroidi sans pour autant être très froid : les associations de bouleau, épicéa dominaient, mais les espèces sensibles au froid étaient toujours présentes. Plus récemment, on observe un réchauffement puisque la quantité de pollen d'espèces sensibles au froid augmente.

Le $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques permet de reconstituer des variations paléo climatiques globales durant l'Holocène.

Les foraminifères sont des organismes unicellulaires hétérotrophes (protozoaires) aquatiques. Ils vivent dans un test calcaire («coquille» constituée de carbonate de calcium: CaCO_3 contenant du ^{18}O et du ^{16}O) qui s'accumule à leur mort dans certaines conditions sur les fonds marins. Le groupe est très diversifié tant d'un point de vue morphologique que biologique. Ainsi certaines espèces sont planctoniques alors que d'autres vivent sur les fonds océaniques (on les dit alors benthiques) où la température est considérée constante au cours du temps.

Il existe une corrélation négative entre le [\$\delta^{18}\text{O}\$ des foraminifères benthiques](#) et le climat global:

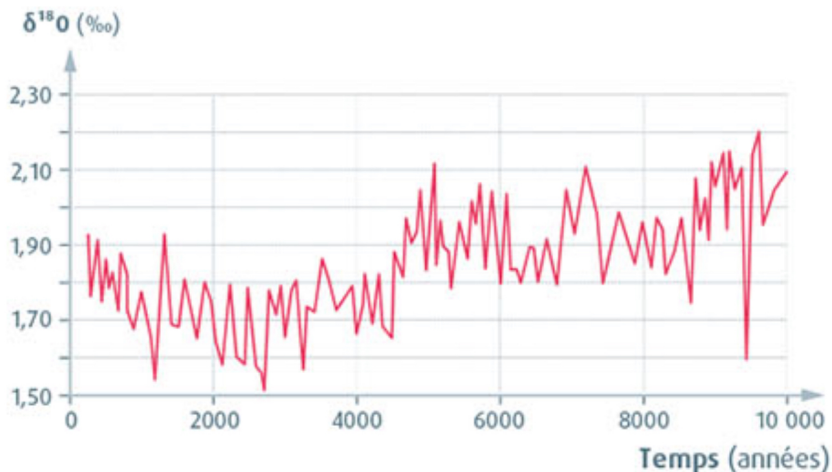
$$\delta^{18}\text{O} \text{ foraminifères benthiques} = - f (T^\circ \text{ globale})$$

Les forages des fonds océaniques donnent accès à des sédiments océaniques contenant des restes de tests calcaires de foraminifères que l'on peut dater (plus les sédiments sont profonds plus ils sont anciens). En mesurant le $\delta^{18}\text{O}$ de ces tests calcaires, et connaissant la relation ci dessus, il est alors possible de reconstituer les variations paléo-climatiques.:

Une augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques témoigne d'une augmentation du volume des calottes glaciaires, c'est à dire d'un refroidissement climatique.

Une diminution du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques témoigne d'une diminution du volume des calottes glaciaires, c'est à dire d'un réchauffement climatique.

Variations du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques à l'Holocène:



On observe que:

De - 10 000 à - 5000 ans, le $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques est élevé, c'est donc une période froide

De -5000 à - 1000, le $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques est plus faible, il y a donc eu un réchauffement du climat

De - 1000 à l'actuel, le $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques augmente légèrement, c'est donc un refroidissement du climat

Une autre utilisation climatique des foraminifères est envisageable : elle consiste à distinguer parmi les espèces rencontrées dans un échantillon celles qui correspondent à une eau froide ou une eau chaude.

III: L'évolution climatique au Pléistocène

Le Pléistocène (-1,7 Ma -> -12000 ans) est l'avant dernière époque (avant l'Holocène) au sein de la période quaternaire au sein de l'ère cénozoïque. [Lien vers l'activité](#)

Le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces polaires témoigne d'une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires au Pléistocène.

Au niveau des calottes polaires, le delta isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ ou δD) de la glace est fonction de la température de l'air qui régnait au dessus de la calotte lors des précipitations neigeuses à l'origine de la glace. Plus le delta isotopique de la glace est élevé plus la température de l'air était élevée lors de la précipitation neigeuse.

Les carottes de glaces, issues des forages réalisés en Antarctique (pôle Sud) et au Groenland (pôle Nord), donnent accès à des échantillons de glaces anciennes que l'on peut dater (plus la profondeur de la carotte est élevée, plus la glace est âgée) et sur lesquelles on peut mesurer le delta isotopique; il est donc possible de déterminer la température qui régnait au moment des précipitations neigeuses à l'origine des échantillons de glace étudiés.

La calotte glaciaire au niveau de l'Antarctique provient du tassement de plus de 400.000 ans de chute de neige. L'analyse du $\delta^{18}\text{O}$ (ou du δD) des carottes glaciaires met ainsi en évidence une alternance de périodes froides (δ faible) et de périodes chaudes (δ élevé) avec un écart de température d'une dizaine de degrés Celsius. Ces périodes sont approximativement synchrones et de mêmes amplitudes en Antarctique et au Groenland. Il s'agit donc de changements globaux d'un ou plusieurs paramètres du climat. Ces périodes "froides" (périodes glaciaires) ont une périodicité de 100 000 ans et sont entrecoupées de périodes chaudes (périodes inter-glaciaires) d'environ 10 000 ans.

Les altérations glaciaires témoignent d'épisodes froids au Pléistocène.

On observe dans les Vosges des déformations et altérations datées du Pléistocène:

Des stries glaciaires: altérations mécaniques qui résultent de l'avancée d'un glacier

Des moraines: accumulations de blocs rocheux tombés sur un glacier ou arrachés aux flancs et au fond de la vallée et transportés à la suite de son avancée.

Des roches moutonnées présentant une surface polie par l'avancée d'un glacier

Des blocs erratiques: rochers de grande taille transportés, le plus souvent, par un glacier loin de son lieu d'origine.

Ces roches témoignent d'un épisode froid dans les Vosges au Pléistocène.

L'origine des alternances des périodes glaciaires et interglaciaires au Pléistocène: Les paramètres orbitaux de Milankovitch.

[Lien vers la modélisation](#)

L'étude des variations climatiques des 700 000 dernières années met en évidence une alternance de périodes glaciaires et inter-glaciaires. On dénombre 7 périodes glaciaires au cours des 700 000 dernières années; on observe ainsi une périodicité de 100 000 ans entre 2 maxima glaciaires. Au sein de ces périodes de 100 000 ans, on distingue des variations climatiques de moindre amplitude sur des périodes de 41.000, 23.000 et 19.000 ans.

La teneur en CO_2 atmosphérique et l'albédo amplifient les variations climatiques selon un mécanisme de rétroaction positive; ce qui devrait s'opposer à l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires observée au cours des 700 000 dernières années; il existerait donc un mécanisme initiateur des variations climatiques.

Le CO_2 : un mécanisme amplificateur des variations climatiques	L'albédo: un mécanisme amplificateur des variations climatiques
Réchauffement -----> Dégazage CO_2 -----> Hausse [CO_2] atm ↑ Hausse effet de serre ←-----	Réchauffement -----> Fonte calottes glaciaires -----> Baisse albédo ↑ -----
Refroidissement -----> Dissolution CO_2 -----> Baisse [CO_2] atm ↑ Baisse effet de serre ←-----	Refroidissement ----> Expansion calottes glaciaires ----> Hausse albédo ↑ -----

Au début du XX^e siècle, un mathématicien Serbe: Milutin Milankovitch étudie les causes des variations climatiques au cours du Pléistocène. Il émet l'hypothèse d'une influence astronomique, et il teste son hypothèse en étudiant les variations de certains [paramètres orbitaux](#): l'excentricité, l'obliquité, et la précession des équinoxes.

	Obliquité	Excentricité (e)	Précession des équinoxes
Périodicités	41 000 ans	100 000 et 400 000 ans	23 000 et 19 000 -> résultante: 21 000 ans
Variations	21,9° < obliquité < 24,5°	0 < e < 0,6	
Valeur actuelle	23,45°	e = 0,017	
Conséquences climatiques des variations des paramètres orbitaux indépendamment les uns des autres	Si l'obliquité diminue par rapport à l'actuel: L'angle d'incidence des rayons solaires augmente au solstice d'hiver (hiver + chaud) et diminue au solstice d'été (été + froid) dans l'hémisphère nord. Il y'a moins de contrastes saisonniers.	Si e = 0 (l'orbite de la terre autour du soleil forme un cercle parfait) alors la distance terre – soleil reste constante toute l'année (le soleil est situé au centre du cercle) Conséquences par rapport à la situation actuelle des paramètres orbitaux: • plus de contrastes saisonniers dans l'hémisphère nord (terre plus éloignée du soleil en hiver, et plus proche en été) • moins de contrastes saisonniers dans l'hémisphère sud	Situation actuelle: Dans l'hémisphère nord, l'hiver coïncide avec la périhélie (terre au plus proche du soleil) ; l'été coïncide avec l'aphélie (terre au plus loin du soleil). Il y'a donc moins de contrastes saisonniers dans l'HN Dans l'hémisphère sud, l'hiver coïncide avec l'aphélie; l'été coïncide avec la périhélie. Il y'a donc plus de contrastes saisonniers dans l'HS
	L'angle d'incidence des rayons diminue au solstice d'hiver (été + froid) et augmente au solstice d'été (hiver + chaud) dans l'hémisphère sud. Il y'a moins de contrastes saisonniers		
(on envisage les variations de chaque paramètre en considérant que les deux autres sont dans leur situation actuelle)	Si l'obliquité augmente par rapport à l'actuel: L'angle d'incidence des rayons diminue au solstice d'hiver (hiver + froid) et augmente au solstice d'été (été + chaud) dans l'hémisphère nord. Il y'a davantage de contrastes saisonniers.	Si e = 0,06 (l'orbite de la terre autour du soleil forme une ellipse légèrement aplatie) alors la distance terre-soleil varie encore plus qu'actuellement au cours de l'année (le soleil est situé à un des foyer de l'ellipse) Conséquences par rapport à la situation actuelle des paramètres orbitaux: • moins de contrastes saisonniers dans l'hémisphère nord (terre plus proche du soleil en hiver et plus éloignée en été) • plus de contrastes saisonniers dans l'hémisphère sud	Situation à + ou – 10 500 ans par rapport à l'actuel: Dans l'hémisphère nord, l'hiver coïncide avec l'aphélie; l'été coïncide avec la périhélie. Il y'a donc plus de contrastes saisonniers dans l'HN Dans l'hémisphère sud, l'hiver coïncide avec la périhélie ; l'été coïncide avec l'aphélie. Il y'a donc moins de contrastes saisonniers dans l'HS
	L'angle d'incidence des rayons augmente au solstice d'hiver (été + chaud) et diminue au solstice d'été (hiver + froid) dans l'hémisphère sud. Il y'a davantage de contrastes saisonniers.		

Conditions d'installation d'une calotte polaire:

Les calottes polaires s'installent sur des continents or au quaternaire les continents sont majoritairement dans l'hémisphère nord. L'installation d'une calotte polaire dans l'hémisphère Nord est favorisée par un faible contraste saisonnier dans l'hémisphère Nord. Pour cela une situation astronomique idéale est par exemple:

- une excentricité forte
- une obliquité faible
- une précession similaire à l'actuelle

La fonte d'une calotte polaire dans l'hémisphère Nord est favorisée par un fort contraste saisonnier dans l'hémisphère Nord. Pour cela une situation astronomique idéale est par exemple:

- une excentricité forte
- une obliquité forte
- une précession inverse par rapport à l'actuelle.

Deux arguments principaux permettent de valider la théorie astronomique des climats:

Les [variations de l'insolation](#) calculées en tenant compte de l'excentricité, de l'obliquité et de la précession des équinoxes au cours des 700 000 dernières années sont corrélées à celles du $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates: plus l'insolation est élevée, plus le $\delta^{18}\text{O}$ est faible. Or plus le $\delta^{18}\text{O}$ dans les carbonates est faible, plus la t° globale de la Terre était élevée. Les variations de l'insolation calculées à partir des paramètres orbitaux sont en cause dans les variations climatiques de la Terre au cours des 700 000 dernières années.

L'excentricité de la Terre varie selon des cycles de 100 000 ans, l'obliquité varie selon des cycles de 41 000 ans et la précession varie selon des cycles de 23 000 et 19 000 ans. Or les variations climatiques de la Terre ont une périodicité de 100 000, 41 000 et 23 000 et 19 000 ans.

Les variations de l'excentricité de la Terre sont responsables des variations climatiques de périodicité 100 000 ans (cycles climatiques), les variations de l'obliquité de la Terre sont responsables des variations climatiques de périodicité 41 000 ans et la précession des équinoxes est responsable des variations climatiques de périodicités 23 000 et 19 000 ans

La corrélation entre les variations des paramètres orbitaux et les variations climatiques ainsi que la similitude des périodicités plaident en faveur de la théorie astronomique des climats.

Cependant, l'impact sur l'insolation reste très modeste: les variations sont de l'ordre de 0,1% ce qui entraîne une variation de la température moyenne du globe de quelques dixièmes de degrés, or l'amplitude des variations thermiques mesurées entre les périodes glaciaires et interglaciaires est de l'ordre de 5°C à 10°C.

Les variations des paramètres orbitaux agissent comme un mécanisme initiateur des variations climatiques qui sont ensuite amplifiées par la teneur en CO_2 et l'albédo.

IV: L'évolution climatique au Cénozoïque

Le Cénozoïque ou ère tertiaire s'étend de -66 Ma à l'actuel. [Lien vers l'activité](#)

L'alternance de bancs calcaires et marneux dans les Flysch de Zumaia témoigne des conditions climatiques au Cénozoïque:

Un banc calcaire correspond à une période où l'altération des continents est faible avec peu de précipitations, et peu d'apport argileux en mer. C'est la signature d'un climat aride.

Un banc marneux, riche en argile est produit lors de périodes climatiques plus humides marquées par une altération intense.

Un couple banc marneux/banc calcaire correspond à un cycle de précession qui dure 20 000 ans.

L'indice stomatique des feuilles de Ginkgo biloba fossiles témoigne des concentrations en CO₂ passées:

Le Ginkgo biloba (espèce présente sur la Terre depuis 200 millions d'années) possède sur ses feuilles une quantité de stomates, qui varie avec la concentration atmosphérique de CO₂.

L'indice stomatique est le rapport (en %) entre le nombre de stomates d'une feuille et sa surface. Les études menées sur les feuilles de Ginkgo biloba actuelles montrent qu'il existe une corrélation négative entre l'indice stomatique et la concentration en CO₂ atmosphérique.

L'indice stomatique ainsi que d'autres marqueurs du CO₂ (bore, nahcolite, phytoplanctons, paléosols) montrent une corrélation positive entre l'évolution de la concentration en CO₂ atmosphérique et l'évolution de la température au Cénozoïque:

Au Paléocène et au début de l'Eocène, la concentration en CO₂ atmosphérique augmente (jusqu'à plus de 1000 ppm). Cette augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique est corrélée à une augmentation de la température d'équilibre (27°C) avec présence d'une calotte polaire seulement au pôle Nord.

A la fin de l'Eocène, puis à l'Oligocène, Miocène, Pliocène, la concentration en CO₂ atmosphérique diminue (jusqu'à 400 ppm). Cette baisse de la concentration en CO₂ atmosphérique est corrélée à une température d'équilibre (19°C) plus faible avec présence d'une calotte polaire aux deux pôles.

Le rôle de la tectonique des plaques dans les évolutions climatiques

[Lien vers l'activité](#)

Le rôle de la tectonique des plaques dans la formation d'un inlandsis en antarctique au début de l'oligocène (après 33 Ma):

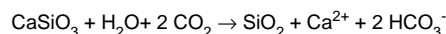
Avant 33 Ma (à l'Éocène) le climat était globalement plus chaud. De plus, des eaux chaudes descendent de l'équateur en longeant la côte Est de l'Australie. Ces eaux chaudes baignent alors les côtes antarctiques ce qui réchauffe le continent.

Le refroidissement initié au milieu de l'Eocène et la séparation entre la Tasmanie et l'Antarctique, permettent la circulation d'eaux froides qui peuvent faire le tour de l'Antarctique, ce qui induit le refroidissement du continent et la mise en place d'un inlandsis qui est toujours en place depuis.

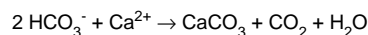
Le rôle de la tectonique des plaques et de l'altération des roches lors du refroidissement climatique du Cénozoïque:

Au Cénozoïque, la convergence entre la plaque Africaine et la plaque Eurasienne induit une collision à l'origine de l'orogénèse alpine et de la fermeture de la Téthys (ancien océan situé entre les 2 plaques). L'altération de la chaîne alpine a eu des conséquences sur le climat du Cénozoïque.

L'altération des silicates des roches magmatiques ou métamorphiques constitutives des chaînes de montagne, consomme du CO₂ lors du démantèlement des reliefs par érosion. Il y a transfert de CO₂ atmosphérique vers l'hydrosphère :



L'apport en Ca²⁺ et HCO₃⁻ dans les océans provoque alors un décalage de l'équilibre océanique entre la précipitation et la dissolution des carbonates dans le sens de la précipitation:



Ainsi pour 2 CO₂ prélevés dans l'atmosphère lors de l'altération d'un silicate (CaSiO₃), l'un se retrouve piégé dans un carbonate (CaCO₃) tandis que l'autre se retrouve solubilisé dans l'hydrosphère. Ce mécanisme a contribué à la diminution de la concentration en CO₂ atmosphérique et donc au refroidissement lors du Cénozoïque.

L'orogénèse alpine et son altération ainsi que les modifications de la circulation océanique ont ainsi contribué au refroidissement du climat au Cénozoïque.