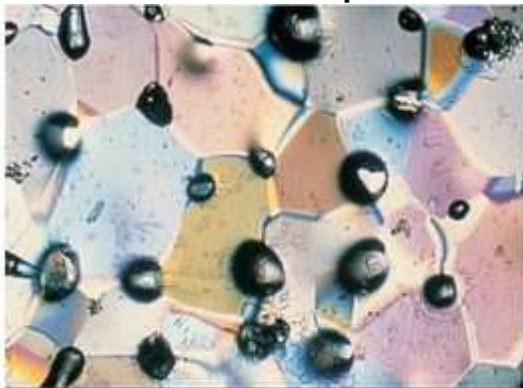


Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

Quelles sont les séries d'indices qui permettent de reconstituer les climats passés ?

I – Les indices fournis par la chimie



Photographie d'une lame mince de glace observée au microscope polarisant (LPA)

« La scène se situe en 1965, non loin de la base Dumont d'Urville de Terre Adélie. Au soir d'une journée de carottage particulièrement ratée et pénible, nous prenons l'apéritif [...]. Ce jour-là, tentés par le sacrilège, nous glissons dans nos verres des morceaux prélevés au fond de ce maudit forage à une centaine de mètres de profondeur ; ils doivent avoir des milliers d'années... Or les glaçons de profondeur, très compressés, sont particulièrement pétillants [...]. Et là, en regardant dans mon verre éclater les bulles d'air libérées de leur pression, j'ai la brusque intuition que la glace pourrait contenir les archives de l'atmosphère. »

Extrait du livre :

Voyage dans l'Anthropocène, C. Lorius, L. Carpentier, Actes Sud.

Les calottes glaciaires, épaisses de plusieurs kilomètres de glace renferment des informations importantes concernant les climats du passé. Les forages qui ont été effectués, en particulier en Antarctique, ont permis de reconstituer des carottes de plus de 3000 m de glace représentant près de 800 000 années d'archives glaciaires.

Les glaces renferment deux types d'informations :

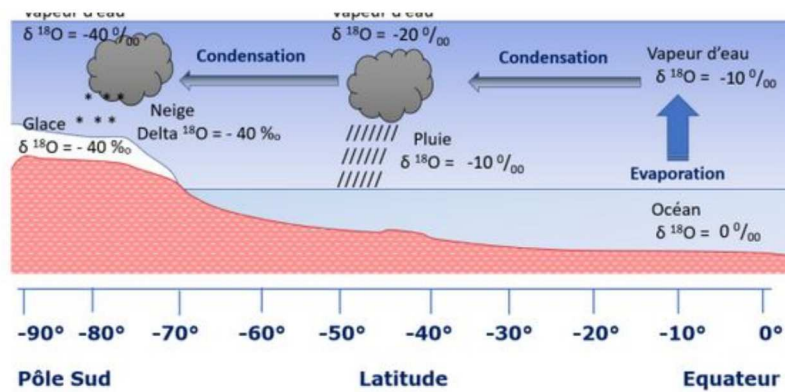
- des données isotopiques qui constituent des thermomètres indirects et qui permettent de mesurer la température au moment de la formation de la glace.
- de l'air emprisonné au moment de la chute de neige et progressivement transformée en glace et qui témoigne de la composition de l'atmosphère au moment de la formation de la glace.

TP1 – Les thermomètres isotopiques et les climats du passé

Outils : le dosage isotopiques de l'oxygène

Les mesures de composition isotopique de l'oxygène (^{16}O et ^{18}O) montrent que la proportion de ^{18}O dans les eaux de pluie et les précipitations neigeuses actuelles diminue avec la température.

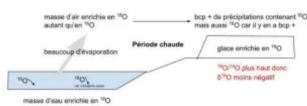




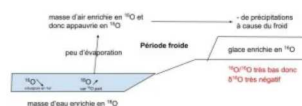
Les valeurs mesurées du rapport $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$ dans la glace sont comparées à une valeur de référence connue (le SMOW : eau de l'océan actuel). Le $\delta^{18}\text{O}$ (lire delta 18 O) est un outil utilisé par les géologues pour comprendre l'évolution passée du climat ; la notation du $\delta^{18}\text{O}$ s'écrit :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{échantillon}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} \times 1000$$

Le rapport $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}$ correspond au rapport $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})$ de l'eau de l'océan actuel (SMOW= Standard Mean Ocean Water). Sa valeur moyenne est de 2.10^{-3} .

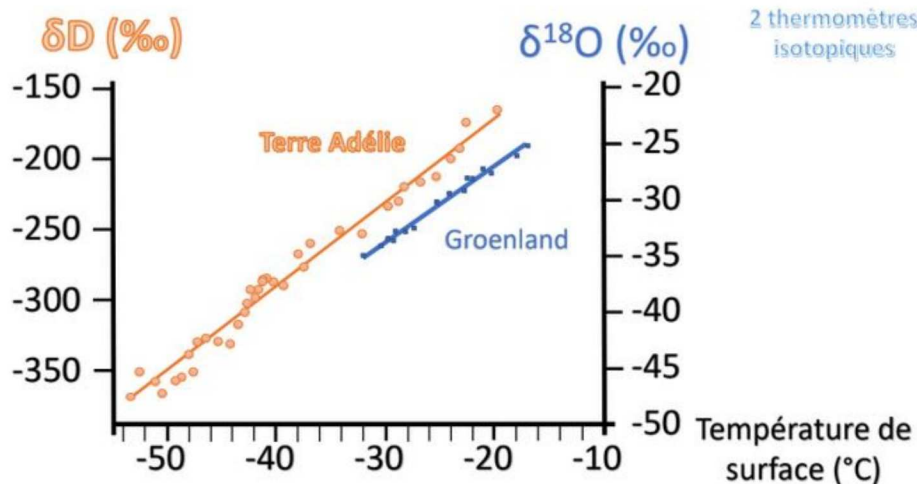


$\delta\text{O}18$ en période chaude



$\delta\text{O}18$ en période froide

Plus il fait froid et plus le $\delta^{18}\text{O}$ est négatif.

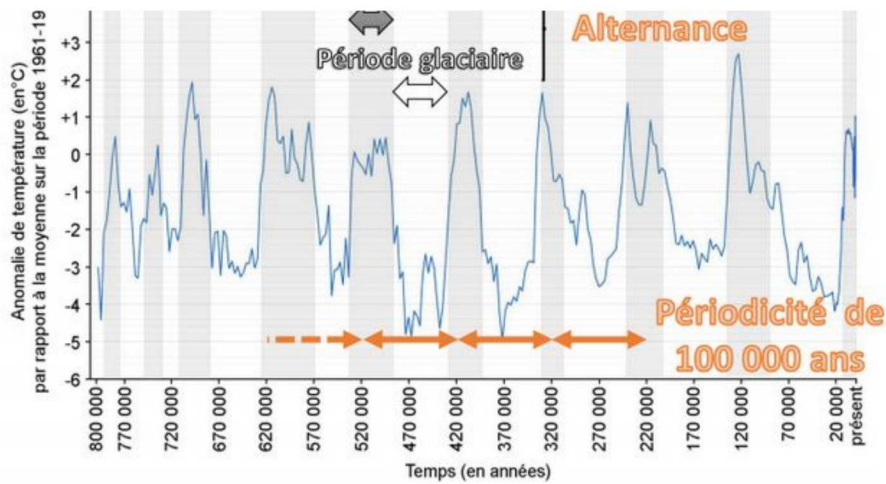


Un autre rapport isotopique est couramment utilisé comme thermomètre isotopique. Il s'agit du rapport (D/H) noté δD . Le deutérium (D) est l'isotope lourd de l'hydrogène de masse atomique 2 (2H). Pour des raisons similaires à celles évoquées pour les isotopes de l'oxygène, on n'utilise pas ce rapport directement mais l'écart δD (en ‰) par rapport à un standard

de référence de composition proche de celle de l'océan mondial. Le δD est d'autant plus négatif que la température de formation de la neige est faible.

Le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD sont proportionnels à la température. Les températures dont témoignent ces deux rapports sont celles estimées au niveau des pôles. L'estimation de ces rapports fournit donc des informations sur les températures et leurs variations qui montrent une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires avec des cycles de 100 000 ans.

Variation de la température moyenne de la Terre déduite du thermomètre isotopique depuis 800 000 ans



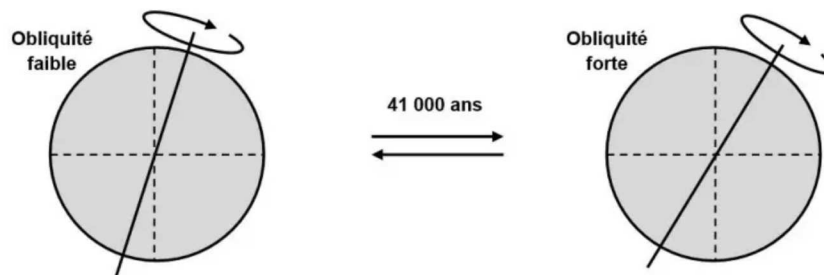
L'analyse des bulles d'air emprisonnées dans la glace permet de corréliser ces variations de températures à des variations du CO₂ et CH₄ atmosphériques. On observe une très bonne concordance de ces variations au Groenland et en Antarctique.

Comment expliquer ces cycles de température ?

Dans les années 1940, le mathématicien serbe Milutin Milankovitch (1879-1958) avance l'hypothèse de l'existence d'une relation entre les variations climatiques et les modifications de l'orbite terrestre. Selon lui, la distance séparant la Terre du Soleil est déterminante puisque l'énergie solaire conditionne les climats terrestres (vu en Enseignement Scientifique de 1ère).

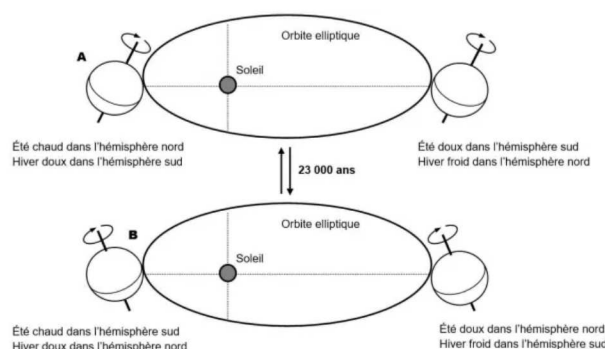
La théorie de Milankovitch (ou théorie astronomique des changements climatiques) permet d'expliquer l'alternance cyclique de périodes glaciaires et interglaciaires. Milankovitch montra qu'une combinaison de trois paramètres orbitaux de la Terre varie de façon cyclique avec une période de 100 000 ans très marquée :

- l'angle d'inclinaison de la Terre, c'est-à-dire l'obliquité, varie avec une période de l'ordre de 41 000 ans.



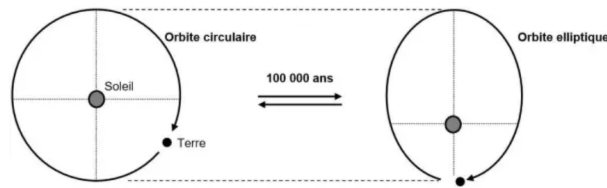
Les variations de l'obliquité

- la précession des équinoxes. Elle est la lente modification de direction de l'axe de rotation de la Terre. Elle change avec une période de 23 000 ans.



La précession des équinoxes

- L'excentricité. C'est la forme de l'ellipse qui varie avec une période de 100 000 ans. L'excentricité correspond au degré d'aplatissement de l'orbite terrestre : elle varie de 0 (orbite circulaire) à 0,06 (ellipse), la valeur actuelle étant de 0,017.



L'excentricité de l'orbite terrestre

Ces variations cycliques des paramètres orbitaux modifient la quantité d'énergie solaire reçue à la surface du globe. Ces variations ont été amplifiées par des rétroactions positives et négatives –vues en enseignement scientifique– impliquant :

- la variation de la concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère
- le dégel partiel du pergélisol
- l'albédo et la décroissance de la surface couverte par les glaces
- la solubilité du CO₂ dans les océans

D'une façon plus générale, ces rétroactions sont à l'origine des entrées et sorties de glaciation.

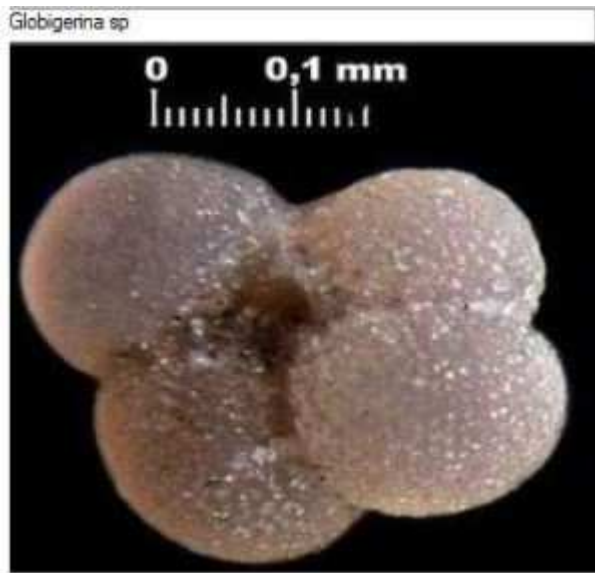
Outils : suivi des rapports isotopiques dans les sédiments marins

These tiny shells know how much ice there is on Earth



On mesure des rapports isotopiques de divers isotopes présents dans les sédiments marins :

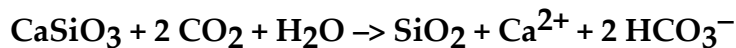
- le rapport $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$ enregistré dans les carbonates permet de connaître le pH de l'eau qui est proportionnel au taux de CO₂ dissous donc au taux de CO₂ atmosphérique



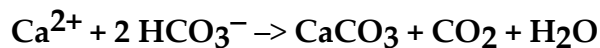
– La mesure du rapport des isotopes de l'oxygène $\delta^{18}\text{O}$ ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) dans les coquilles (= tests) calcaires de certains fossiles océaniques (foraminifères par exemple). Les foraminifères sont des organismes unicellulaires planctoniques ou benthiques qui élaborent leur squelette externe calcaire, ou test, à partir des constituants (ions carbonate et calcium) permet également de déterminer indirectement la température au moment de la mort de l'organisme. **Pour faire simple, une augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates est corrélée à une diminution des températures de l'eau** (donc attention, ici $\delta^{18}\text{O}$ élevé = eau froide, c'est le contraire de ce que nous avons dit pour $\delta^{18}\text{O}$ dans les glaces polaires !).

L'altération des roches, thermostat de la terre (lien vers article Pour la Science)

Un autre rapport isotopique est utilisé : le $\delta^{87}\text{Sr}$. Il est également mesuré dans les calcaires océaniques et ce rapport témoigne de l'importance de l'altération continentale. En effet, les roches comme le granite subissent une altération chimique sous l'effet de l'eau chargée en CO_2 . Les plagioclases se transforment en minéraux argileux comme la kaolinite selon la réaction suivante :



Les ions Ca^{2+} et HCO_3^- ainsi formés passent en solution et sont transportés par les cours d'eau. Ils peuvent ensuite précipiter et forment des sédiments carbonatés selon la réaction suivante :



Plus l'altération des roches continentales est importante et plus il y a d'isotopes ^{87}Sr et ^{86}Sr apportés dans les océans et plus ces isotopes sont incorporés dans les calcaires et donc plus le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mesuré dans ces calcaires est grand. Or l'altération continentale se fait au cours de réactions (géo)chimiques qui consomment du CO_2 (en effet, le bilan de ces deux équations montre 2 CO_2 prélevées dans l'atmosphère \rightarrow 1 CO_2 fixé dans les sédiments et 1 CO_2 restitué à l'atmosphère : il y a donc pompage du CO_2 atmosphérique, donc refroidissement). Donc, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ témoigne indirectement de la température. Le document du livret montre l'évolution du rapport dans les roches océaniques depuis 130 Ma.

L'augmentation de ce rapport $\delta^{87}\text{Sr}$ au cours du temps est synonyme de baisse de température.

II/ Les indices fournis par la géologie

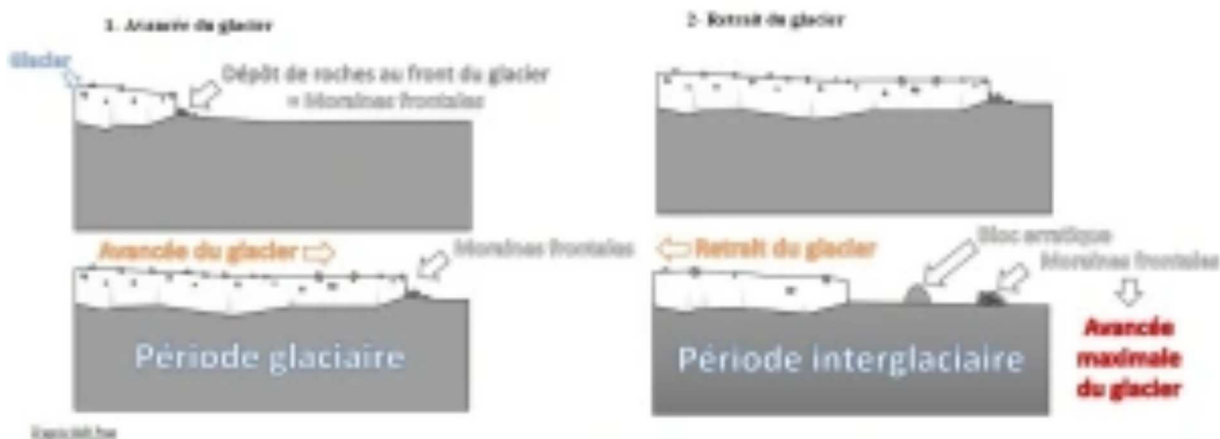
TP 2 : Les indices géologiques et les climats passés

On utilise un principe géologique qui postule que les lois régissant les phénomènes géologiques actuels étaient également valables dans le passé : il s'agit du principe d'actualisme.

Lors du maximum glaciaire, il y a 20 000 ans BP, le nord de l'Europe et les Alpes étaient recouverts d'une épaisse calotte glaciaire et le niveau marin était inférieur de 120 m au niveau actuel.

Outils : les indices sédimentaires

Les glaciers façonnent les paysages : ils creusent des vallées à fond plat (vallées en U), ils strient les roches par leurs mouvements d'avancée ou de recul, ils déplacent des blocs de roches, ils créent des moraines (amas de roches laissés par les glaciers sur leurs bords latéraux, au fond ou à l'avant des glaciers).



Le processus de recul/avancée du glacier.

On peut retrouver dans le paysage de nombreux indices d'anciens glaciers et reconstituer ainsi l'extension des glaciers continentaux qui ont façonné les paysages.

Appliqué aux paysages glaciaires, ce principe permet de dire que -par le passé- les glaciers ont façonné les paysages de la même manière que les glaciers actuels le font.



Les modelés glaciaires

Exemple : glaciations Permo-carbonifères

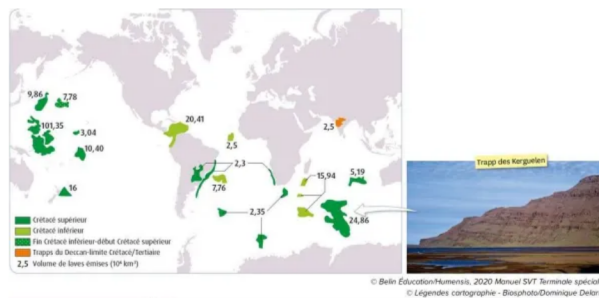
D'autres indices géologiques donnent des indications sur les climats passés : conditions de formation de quelques roches sédimentaires :

	Bauxite et latérite	Évaporite	Pétrole	Charbon	Tillites et blocs isolés
Processus de formation	Altération continentale par hydrolyse des roches siliceuses	Précipitation des ions d'une solution salée sursaturée	Accumulation puis transformation des phytoplancton	Accumulation puis transformation des végétaux continentaux ou littoraux	Accumulation et compaction de produits de l'érosion glaciaire des continents
Contexte favorable	Climat chaud et humide	Évaporation intense d'un bassin salé	Marge continentale à forte productivité primaire	Bassin continental subsident à forte productivité primaire	Présence d'une calotte glaciaire ou d'un glacier

Aires climatiques					
Polaire			X		X
Tempéré froid				X	
Tempéré			X	X	
Aride		X	X		
Tropical	X		X	X	

Outils : répertoire des zones à fort volcanisme

L'un des évènements géologiques augmentant le taux de CO₂ atmosphérique et donc la température, est l'émission de lave. En effet, les larges provinces ignées (LIP) sont de gigantesques coulées de lave liées à un volcanisme de point chaud. Lors de la mise en place des trapps du Deccan (LIP de la limite Crétacé-Cénozoïque), les émissions de CO₂ ont été évaluées entre 11 et 200 Gt par éruption, soit 1690 Gt de CO₂ en tout pour 2 à 3 millions de km³ de lave émis (Gt : milliard de tonnes).



Carte de répartition actuelle des larges provinces ignées du Crétacé.

Un autre évènement géologique augmentant le taux de CO₂ atmosphérique et donc la température, est principalement l'accélération de l'expansion des dorsales océaniques.

Outils : modélisation du déplacement des plaques lithosphériques

Le déplacement des masses continentales sous l'effet de la tectonique des plaques a modifié la circulation océanique, fermant certains passages et en ouvrant d'autres. Les climatologues font un lien entre climat et courant océanique :

- la présence d'un climat froid autour de l'Antarctique favorise l'installation d'une calotte glaciaire.



- un courant chaud faisant le tour du globe dans la région intertropicale favorise un réchauffement climatique
- l'existence de courant Nord-Sud indépendant accentue les différences de température en fonction de la latitude, favorisant l'installation d'un refroidissement global.

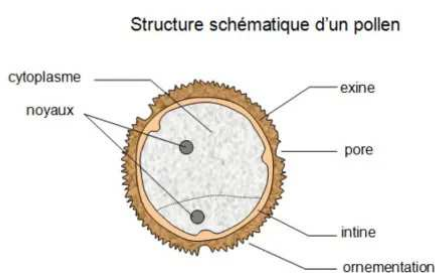
III/ Les indices fournis par les données préhistoriques et paléoécologiques

Des données archéologiques témoignent également des variations climatiques du passé.

- La grotte Cosquer dans le sud de la France. Sur les parois humides se côtoient divers animaux dont des aurochs, bisons, bouquetins et chamois et des pingouins qui témoignent d'un climat froid et sec comparable à celui actuel de la Sibérie. Par ailleurs, l'entrée de la grotte actuellement immergée témoigne d'un niveau marin plus bas lors de la fréquentation de la grotte (on estime à -120 m au Dernier Maximum Glaciaire). Ainsi, des indices paléoécologiques (ici les témoins d'une faune) témoignent également des climats du passé. (source image)



TP3 – La paléoflore et les climats du passé

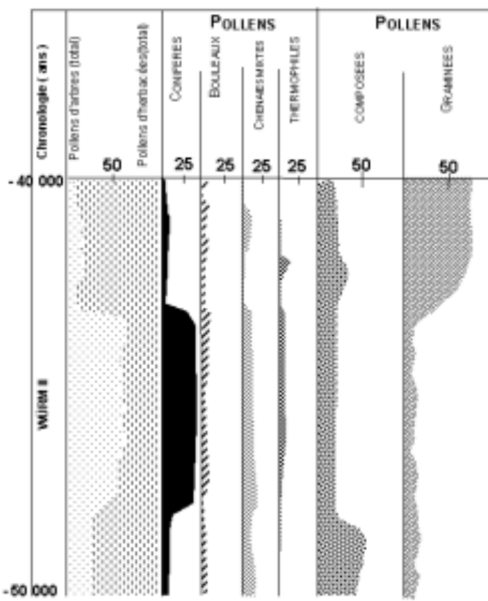
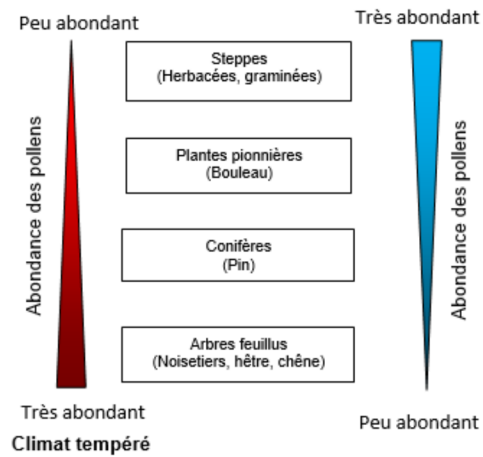


Les grains de pollen observés dans des carottes de sédiments prélevés au fond des lacs ou des tourbières informent sur les couverts végétaux qui ont existé localement.

Les zones de végétation regroupent les espèces végétales ayant les mêmes exigences écologiques et correspondent aux zones climatiques.

Principales espèces en fonction du climat

Climat froid



spectre pollinique

L'étude des grains de pollen dans un milieu donné permet d'établir des diagrammes polliniques ou spectres polliniques (image ci-contre). Ces spectres polliniques caractérisent un peuplement végétal à un moment donné dans un lieu donné. On reconstitue ainsi précisément les peuplements végétaux. Or ceux-ci sont étroitement liés au climat en raison des préférences climatiques de nombreuses espèces végétales. Par exemple, une abondance de graminées (paysage de steppes) et un recul des forêts sont associés à un refroidissement et inversement en cas de réchauffement. On utilise pour ces reconstitutions paléoclimatiques le principe d'actualisme déjà utilisé précédemment.

IV / Variations du taux de CO₂ atmosphérique et perturbations du cycle du carbone depuis le Paléozoïque

Les outils que nous venons d'étudier sont nécessaires pour reconstituer le climat du passé : il existe des variations de taux de CO₂ atmosphérique qui perturbent le cycle du carbone depuis le Paléozoïque, jusqu'à l'actuel, permettent d'expliquer en partie l'évolution de la température mondiale.

- Au **Paléozoïque**, des indices paléontologiques et géologiques, corrélés à l'échelle planétaire et tenant compte des paléolatitudes, révèlent une importante glaciation au Carbonifère-Permien (-360 à -250 Ma). Par la modification du cycle géochimique du carbone qu'elles ont entraînée, l'altération de la chaîne hercynienne sous un climat équatorial et tropical chaud et humide, le développement rapide de vastes forêts puis leur fossilisation (grands gisements carbonés) piégeant ainsi le carbone dans des bassins sédimentaires, en périphérie de la chaîne hercynienne sont tenues pour responsables de cette glaciation.

La constitution de ces puits de carbone a soustrait à l'atmosphère une partie de son CO₂ réduisant jusqu'à une époque récente l'effet de serre sur Terre.

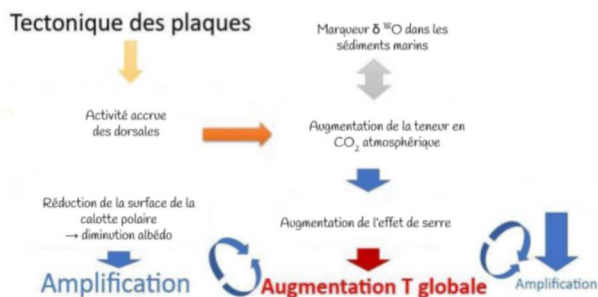
Les mécanismes des variations climatiques au cours du Carbonifère



Bilan Paléozoïque

- Au **Mésozoïque**, pendant le Crétacé (-145 Ma à - 66 Ma) , les variations climatiques se manifestent par une tendance à une hausse de température. Du fait de l'augmentation de l'activité des dorsales, la géodynamique terrestre interne semble principalement responsable de ces variations. Les données paléogéographiques montrent que cette période est caractérisée par l'absence de calottes glaciaires aux pôles, d'un niveau marin élevé : on parle de transgression marine, le développement d'un climat chaud et le développement de vastes couvertures forestières y compris au niveau de l'Antarctique. Le climat global du Crétacé était un climat très chaud.

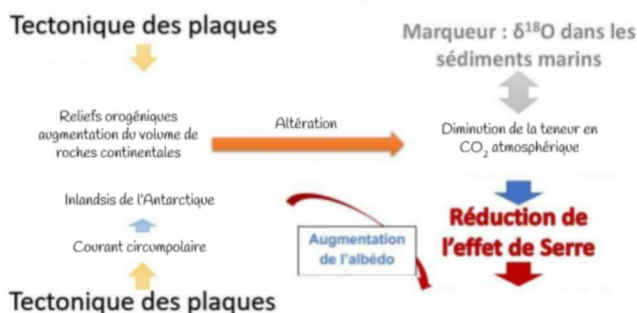
Les mécanismes des variations climatiques au cours du Crétacé



Bilan 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 température moyenne du globe.

Les mécanismes des variations climatiques au cours du Cénozoïque



Bilan Cénozoïque

- À l'échelle du **Quaternaire**, des données préhistoriques, géologiques et paléocéologiques attestent l'existence, sur la période s'étendant entre -120 000 et -11 000 ans, d'une glaciation, c'est-à-dire d'une période de temps où la baisse planétaire des températures conduit à une vaste extension des calottes glaciaires. Les témoignages glaciaires (moraines), la mesure de rapports isotopiques de l'oxygène dans les carottes polaires antarctiques et les sédiments font apparaître une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires durant les derniers 800 000 ans.

Quiz : Un voyage sur des millions d'années



Notions fondamentales : effet de serre, gaz à effet de serre, cycle du carbone, cycles de Milankovitch, albédo, principe d'actualisme, rapports isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$), 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.

À l'échelle du Quaternaire, des données préhistoriques, géologiques et paléo-écologiques attestent l'existence, sur la période s'étendant entre -120 000 et -11 000 ans, d'une glaciation, c'est-à-dire d'une période de temps où la baisse planétaire des températures conduit à une vaste extension des calottes glaciaires. Les témoignages glaciaires (moraines), la mesure de rapports isotopiques de l'oxygène dans les carottes polaires antarctiques et les sédiments font apparaître une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires durant les derniers 800 000 ans.

Les rapports isotopiques montrent des variations cycliques coïncidant avec des variations périodiques des paramètres orbitaux de la Terre. Celles-ci ont modifié la puissance solaire reçue et ont été accompagnées de boucles de rétroactions positives et négatives (albédo lié à l'asymétrie des masses continentales dans les deux hémisphères, solubilité océanique du CO_2) ; elles sont à l'origine des entrées et des sorties de glaciation. 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 température moyenne du globe.

Celle-ci apparaît associée à une baisse de la concentration atmosphérique de CO_2 en relation avec l'altération des matériaux continentaux, notamment à la suite des orogénèses du Tertiaire. De plus, la variation de la position des continents a modifié la circulation océanique. Au Mésozoïque, pendant le Crétacé, les variations climatiques se manifestent par une tendance à une hausse de température. Du fait de l'augmentation de l'activité des dorsales, la géodynamique terrestre interne semble principalement responsable de ces variations. Au Paléozoïque, des indices paléontologiques et géologiques, corrélés à l'échelle planétaire et tenant compte des paléolatitudes, révèlent une importante glaciation au Carbonifère-Permien. Par la modification du cycle géochimique du carbone qu'elles ont entraînée, l'altération de la chaîne hercynienne et la fossilisation importante de matière organique (grands gisements carbonés) sont tenues pour responsables de cette glaciation.

Toutes les données sont concordantes : au cours des 800 000 dernières années des périodes froides (de 8 à 10 °C en moins) ont alterné avec des périodes plus chaudes (de 3 à 4 °C en plus).
On parle de périodes glaciaires et interglaciaires. Ces variations sont cycliques et les cycles durent 100 000 ans.

Ainsi, un cycle de 100 000 ans rythme les maximas glaciaires. Les refroidissements enregistrés semblent toujours s'installer très progressivement alors que les réchauffements sont plus brutaux. Cette alternance de périodes chaudes et froides caractérise le quaternaire (depuis 2,6 Ma environ).

– L'excentricité de la trajectoire de la Terre autour du soleil
: elle mesure l'aplatissement de l'ellipse et varie de 0% (orbite circulaire) et 6% (ellipse légèrement aplatie) avec des périodes proches de 100 000 ans-
L'obliquité, angle qui caractérise l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique oscille entre 22° et 25° avec une période de 41 000 ans.- La précession des équinoxes est un mouvement plus complexe qui résulte de deux mouvements de rotation. C'est le mouvement circulaire au cours du temps de l'axe de rotation de la Terre autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'écliptique. La période de ce mouvement est de 26 000 ans.

Voir l'activité – Des indices géologiques du DMG

Les glaciers actuels se caractérisent par de nombreux indices géologiques repérables sur le terrain.

Les glaciers façonnent les paysages : ils creusent des vallées à fond plat, ils strient les roches par leurs mouvements d'avancée ou de recul, ils déplacent des blocs de roches, ils créent des moraines (amas de roches laissés par les glaciers sur leurs bords latéraux, au fond ou à l'avant des glaciers).

On peut retrouver dans le paysage de nombreux indices d'anciens glaciers et reconstituer ainsi l'extension des glaciers continentaux qui ont façonné les paysages.

On utilise un principe géologique qui postule que les lois régissant les phénomènes géologiques actuels étaient également valables dans le passé : **il s'agit du principe d'actualisme.**

Appliqué aux paysages glaciaires, ce principe permet de dire que par le passé les glaciers ont façonné les paysages de la même manière que les glaciers actuels le font.

Des données archéologiques témoignent également des variations climatiques du passé. La grotte Cosquer dans le sud de la France. Sur les parois humides se côtoient divers animaux dont des aurochs, bisons, bouquetins et chamois et des pingouins qui témoignent d'un climat froid et sec comparable à celui actuel de la Sibérie. Par ailleurs, l'entrée de la grotte actuellement immergée témoigne d'un niveau marin plus bas lors de la fréquentation de la grotte (on estime à – 120 m au DMG). Ainsi, des indices paléocéologiques (ici les témoins d'une faune) témoignent également des climats du passé. Nous allons maintenant voir les informations laissées par la flore en menant des études palynologiques.

<p>Plus l'altération des roches continentales est importante et plus il y a d'isotopes ^{87}Sr et ^{86}Sr apportés dans les océans et plus ces isotopes sont incorporés dans les calcaires et donc plus le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mesuré dans ces calcaires est grand. Or l'altération continentale se fait au cours de réactions (géo)chimiques qui consomment du CO_2. C'est ce que nous allons voir dans le paragraphe suivant. Donc, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ témoigne indirectement de la température. Le document ci-contre montre l'évolution du rapport dans les roches océaniques depuis 130 Ma. L'augmentation de ce rapport au cours du temps est synonyme de baisse de température.</p>		
	<p>L'indice stomatique = (nombre de stomates / nombre total de cellules) x 100, pour une surface donnée</p>	