

SVT	Thème 2B : Les climats de la Terre : comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain	TSpé SVT
Cours	Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées	ESTHER

Introduction : 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.

Ce réchauffement du système climatique terrestre entraîne des bouleversements dans les écosystèmes naturels et dans les sociétés humaines.

Pour prendre du recul et mesurer les variations actuelles du climat, nous allons reconstituer et chercher à comprendre la dynamique des variations climatiques passées.

Problème : comment reconstituer les variations climatiques passées ? quelles ont été les causes de ces variations ?

Pour bien se repérer dans le temps, nous allons nous intéresser à quatre périodes des temps géologiques :

- La période du **quaternaire** (dernière période de l'ère cénozoïque) qui va de l'actuel à ~2.5 Ma ;
- L'ère **cénozoïque** qui va de l'actuel à ~65 Ma ;
- L'ère **mésozoïque** qui va de ~65 Ma à ~250 Ma ;
- L'ère **paléozoïque** qui va de ~250 Ma à ~540 Ma.

Nous n'étudierons pas en détail les variations climatiques plus anciennes correspondant au protérozoïque et à l'archéen.

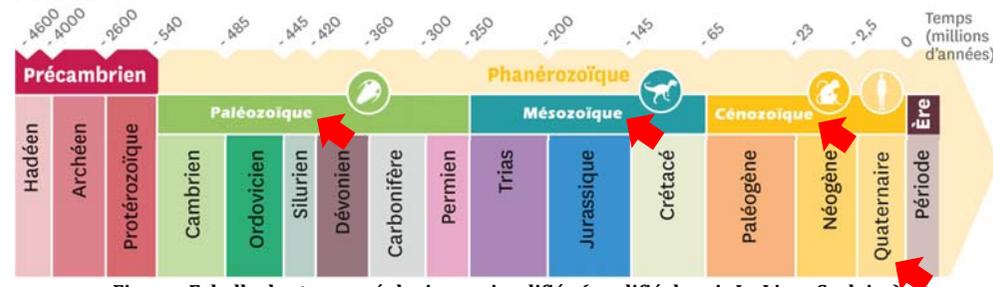


Figure : Echelle des temps géologiques simplifiée (modifié depuis Le Livre Scolaire)

I- Les variations climatiques au quaternaire

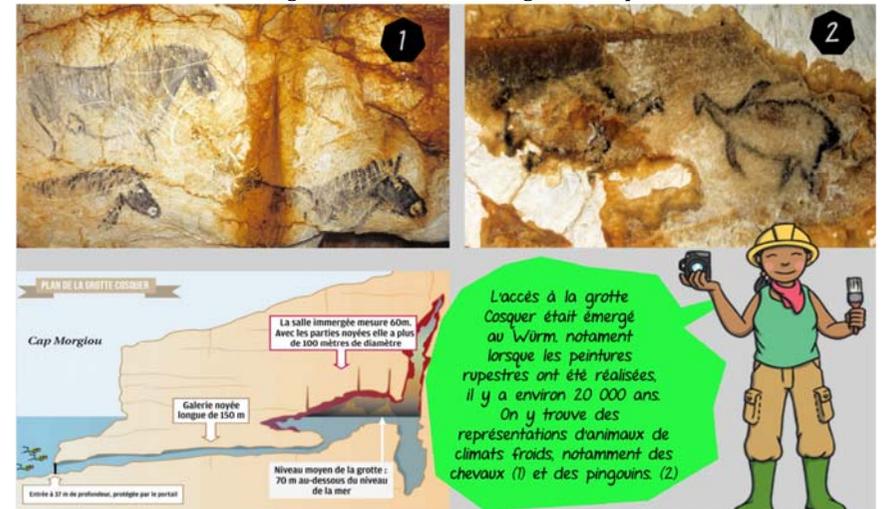
IA - Mise en évidence d'une période glaciaire entre -120 000 et -11 000 ans (glaciation du Würm)

Pour étudier le climat du quaternaire on s'appuie sur une série d'indices/archives :

- **Les indices géologiques :** des roches et des structures formées par des glaciers : moraines glaciaires (roches formées par l'activité érosive des glaciers), des blocs erratiques, roches moutonnées, stries glaciaires, vallées en auge, lacs glaciaires et cirques glaciaires.
L'étude de ces structures et des paysages en France montrent qu'à cette période, les glaciers alpins étaient beaucoup plus étendus (l'une des langues du glacier alpin descendait jusqu'à l'actuel ville de Lyon).
- **Les indices préhistoriques :** des peintures rupestres d'animaux sauvages donnent des indices de la faune que côtoyaient les hommes au paléolithique. *Ainsi dans la grotte*

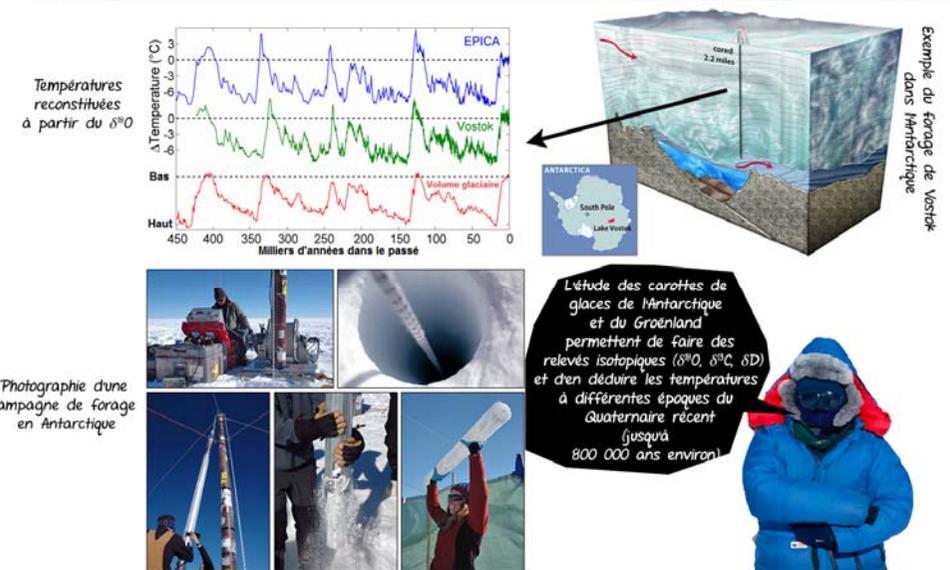
Chauvet (Ardèche) ou dans la grotte Cosquer (Bouches-du-Rhône), on trouve des peintures datées entre -20000 et -40000 ans représentant des animaux typiques de la toundra et de climats froids et secs (équivalents de l'actuel Sibérie). Ils ont représenté des bouquetins, des cervidés, des mammoths, etc.

Figure : Présentation de la grotte Cosquer



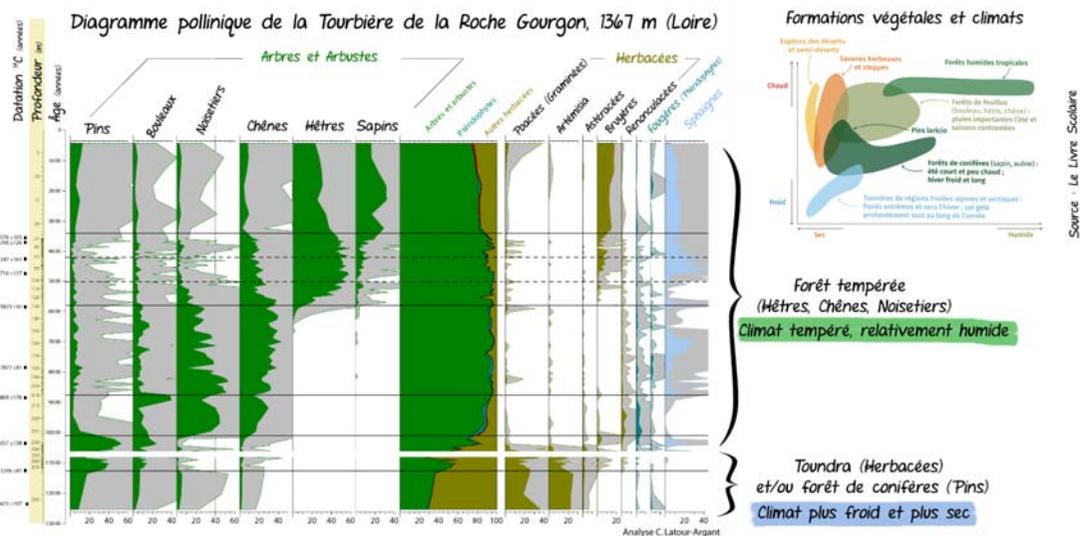
- **Les indices géochimiques :** l'étude de rapports isotopiques comme le $\delta^{18}O$, le δD ou le $\delta^{13}C$ mesurés dans les glaces ou dans les coquilles de certains organismes marins (foraminifères par exemple) apporte également un grand nombre d'indications sur le climat passé (voir encart). *Entre -11000 ans et -120000 ans, on constate une diminution du $\delta^{18}O$ de la glace, ce qui témoigne d'un refroidissement global du climat.*

Figure : présentation de la méthode de carottage des glaces pour l'étude des rapports isotopiques



- **Les indices paléo-écologiques** : les indices laissés par la faune ou la flore donnent des indications sur le climat. Par exemple, l'étude des pollens (palynologie) permet de reconstituer la végétation et le climat de différents époques. *L'étude des pollens de tourbières met en évidence un changement de la végétation aux alentours de -11000 ans. On passe d'une végétation typique de climats froids (toundra : conifères en abondance, peu de feuillus ; taïga : herbacées) à une végétation de climats plus tempérés (forêt tempérée : chêne, hêtre, noisetiers).*

Figure : utilisation des diagrammes polliniques pour reconstituer les variations climatiques passées



Au cours du Quaternaire, on constate donc en France, un climat plutôt tempéré de l'actuel à -11000 ans et un climat plus froid entre -11 000 ans et -120 000 ans (glaciation dite du Würm).

L'étude plus globale du quaternaire, et notamment l'étude des indices géochimiques, montre, une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires entre l'actuel et -800 000 ans. *Comment expliquer cette alternance climatique ?*

L'Europe de l'Ouest au moment du dernier maximum glaciaire (-22000 ans), pendant la glaciation du Würm, reconstituée à partir d'indices palynologiques et géologiques

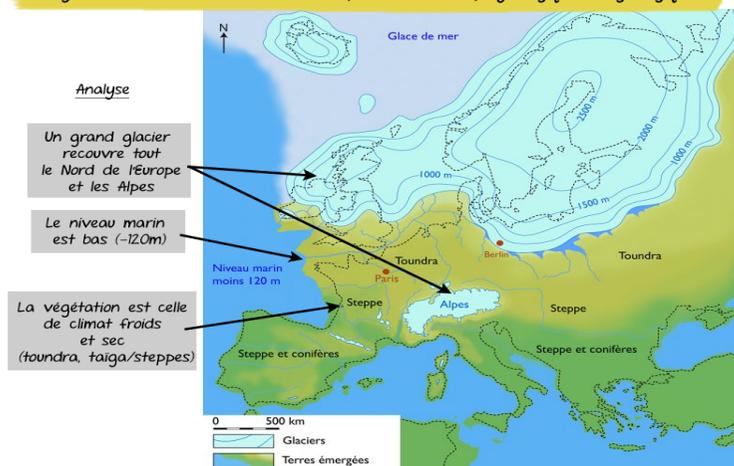
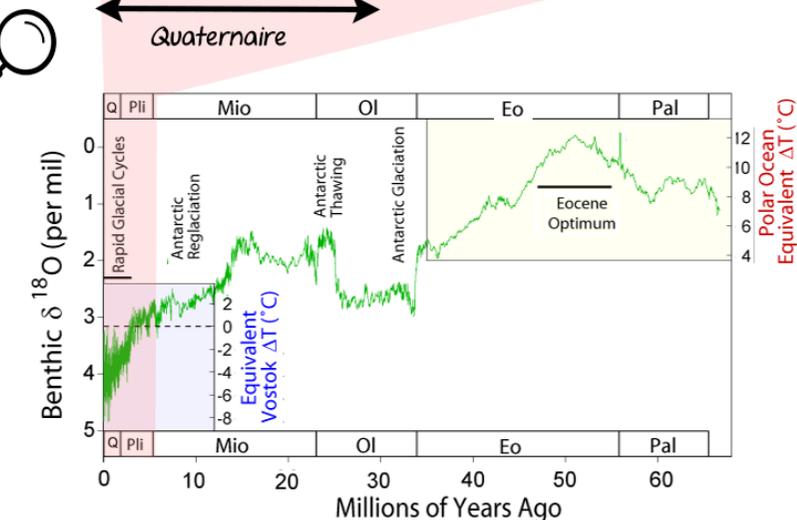
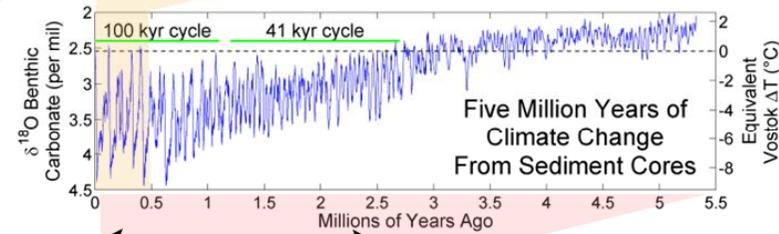
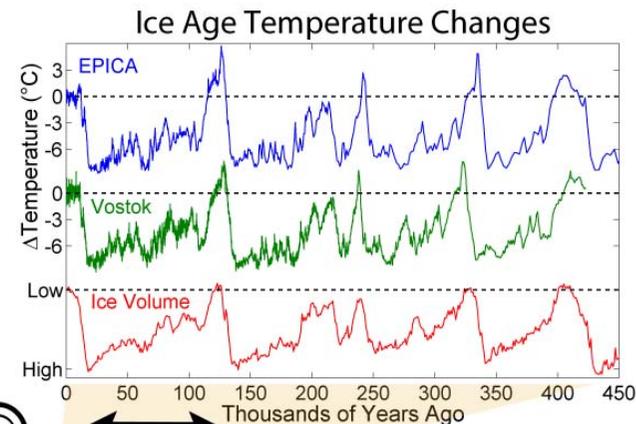


Figure : carte de l'Europe au moment du maximum glaciaire (-22000 ans)

Enregistrement des variations climatiques au Cénozoïque, zooms sur le Quaternaire et les derniers cycles glaciaires

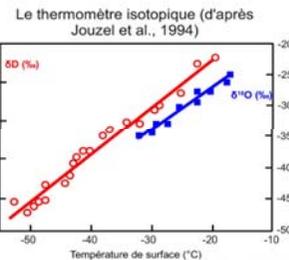
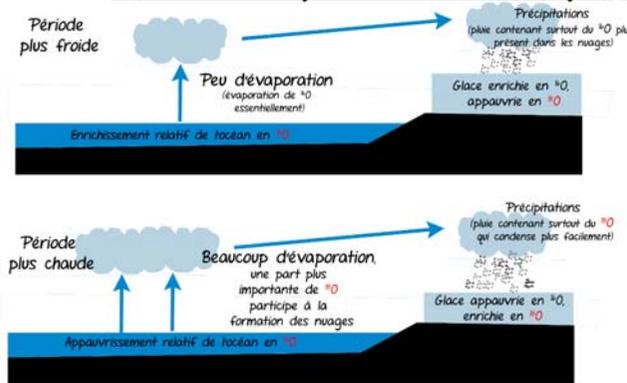


Encart – Les mesures du $\delta^{18}\text{O}$ et leur intérêt pour la reconstitution des climats passés

Pour utiliser les données glaciologiques en climatologie, il faut mesurer la composition isotopique $\delta^{18}\text{O}$ de la glace pour avoir une idée de la température moyenne atmosphérique au moment de la formation de la glace. La relation entre $\delta^{18}\text{O}$ et température est liée à un fractionnement isotopique entre l'oxygène lourd ^{18}O et l'oxygène léger ^{16}O au moment de la condensation de la vapeur d'eau en pluie: lorsque la température atmosphérique diminue, **le H_2^{18}O se condense plus facilement que H_2^{16}O** . Les nuages s'appauvrissent en ^{18}O et le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations du moment sont enrichies en ^{18}O . Le nuage étant appauvri, les précipitations suivantes issues de ce même nuage auront donc un $\delta^{18}\text{O}$ plus faible.

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

Explication schématique du thermomètre isotopique $\delta^{18}\text{O}$ (source : tristan.ferrair.free.fr)



Climat	$\delta^{18}\text{O}$ des océans (à partir de fossiles à test calcaire)	$\delta^{18}\text{O}$ des glaces
Climat froid	↗	↘
Climat chaud	↘	↗

- L'**excentricité** de l'orbite terrestre (cycle de 100 000 ans) ;
- La **précession** de l'axe de rotation (cycle de 26 000 ans) ;
- L'**obliquité** (cycle de 41 000 ans) ;

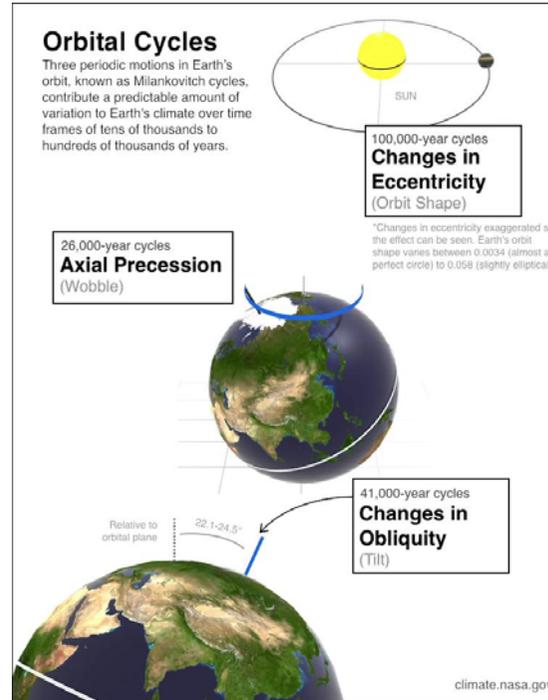
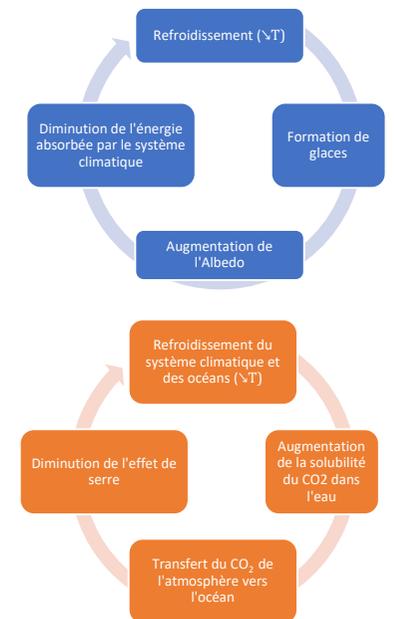


Figure : Présentation des paramètres astronomiques de Milankovitch (source : climate.nasa.gov)

Figure : Boucles de rétroaction du système climatique amplifiant les variations initiales liées aux paramètres astronomiques



Les variations des paramètres orbitaux modifient l'énergie solaire reçue à la surface de la Terre et influencent donc le climat.

Ces variations sont ensuite amplifiées par des boucles de rétroactions positives et négatives :

- La formation de glace augmente l'albédo, les sols absorbent moins de rayonnement et se refroidissent, ce qui favorise la formation de glace, etc. Lors d'un réchauffement, le phénomène inverse se produit.
- Lors d'une entrée en glaciation, le refroidissement de l'océan entraîne une augmentation de la solubilité du CO₂, l'océan capte une partie du CO₂ atmosphérique, cela limite l'effet de serre et entraîne un refroidissement, etc.

A l'échelle des temps géologiques, les variations du climat observées au quaternaire sont des variations plutôt rapides. Quelles sont les variations climatiques à plus grande échelle, au cours des grandes ères géologiques notamment ?

II – Les variations climatiques au Cénozoïque

IIA - Mise en évidence d'un refroidissement global au cours du Cénozoïque

L'étude des glaces ne permet pas d'étudier des variations de plus d'1Ma. Pour étudier les variations climatiques au Cénozoïque (actuel à -65 Ma), les scientifiques utilisent donc divers indices :

IB - Les variations climatiques du quaternaire : des alternances de périodes glaciaires/interglaciaires liées aux paramètres orbitaux de la Terre

L'étude des rapports isotopiques dans les glaces de l'Antarctique et d'autres indices convergent pour montrer une alternance de périodes glaciaires/interglaciaires depuis 800 000 ans au cours du Quaternaire.

L'astronome Milutin Milankovitch a proposé une explication astronomique à ces variations climatiques. Cette théorie, dite **théorie astronomique du climat**, est aujourd'hui acceptée par la communauté scientifique. Les variations climatiques observées au quaternaire seraient liées aux variations cycliques de trois paramètres astronomiques :

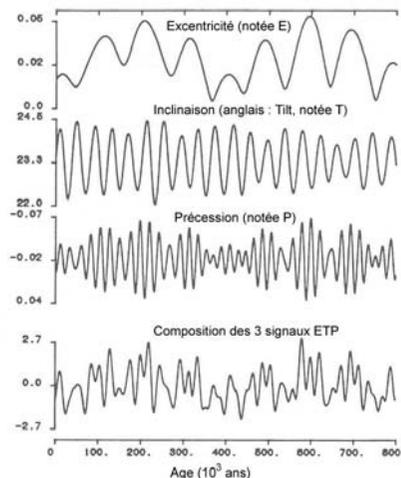


Figure : Variation des paramètres astronomiques de Milankovitch (source : <https://planet-terre.ens->

- **Les indices géochimiques :** dans les sédiments marins, on étudie notamment le $\delta^{18}O$ des sédiments marins pour connaître les températures océaniques mais aussi le $\delta^{13}C$ pour évaluer la teneur en CO_2 de l'atmosphère ;

L'étude du $\delta^{18}O$ montre un refroidissement global au cours du Cénozoïque et l'étude du $\delta^{13}C$ montre une diminution de la quantité de CO_2 atmosphérique. Au cours du Cénozoïque, on a donc un refroidissement lié à une baisse de l'effet de serre.

- **Les indices géologiques :** l'altération des roches et le transport des particules sédimentaires, puis leur dépôt et la formation de roches sédimentaires peuvent être fortement influencés par les conditions climatiques.

Par exemple, la bauxite et les latérites (roches rouges, oxydés) se forment sous des climats plutôt chauds, de même que les charbons (liés à l'accumulation rapide de matière organique). Les tillites, des dépôts glaciaires témoignent de climats plus froids. L'étude de la répartition et de l'âge de ces roches donnent des indices sur les climats passés.

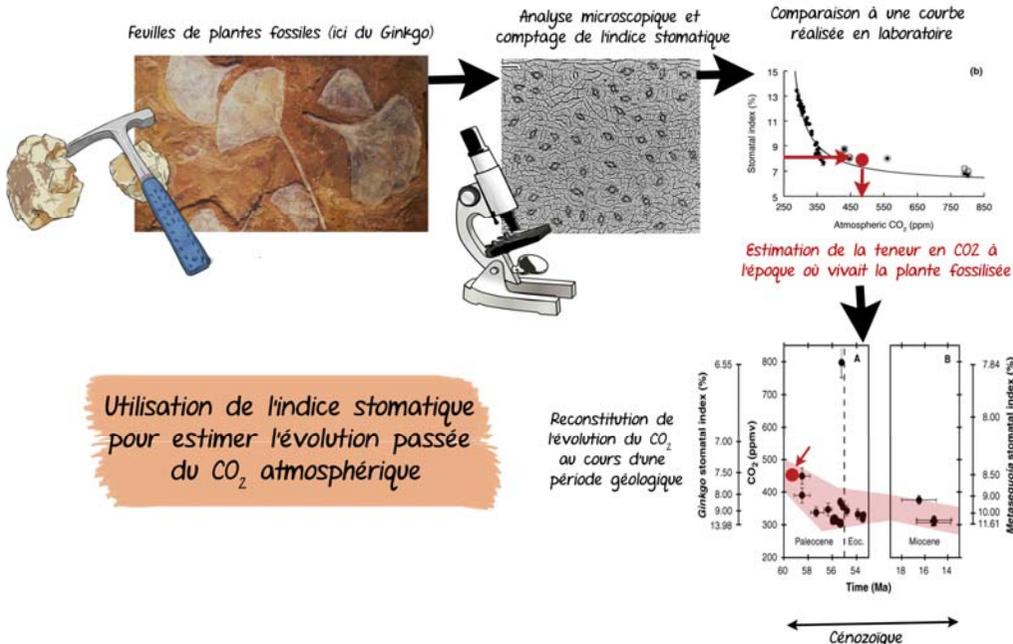
Les géologues étudient aussi les dépôts sédimentaires sur les marges et notamment la nature des sédiments (composition et nature des argiles) et en déduisent des informations sur le climat et l'altération des sols.

L'étude de la limite Eocène-Oligocène (~34Ma) dans les sédiments de la marge passive atlantique aux USA montre un passage de sédiments carbonatés riches en foraminifères à des boues riches en argiles. L'étude des argiles au niveau de cette limite montre un refroidissement du climat et une augmentation de l'érosion des continents. Ces données sont concordantes avec les études géochimiques.

- **Les indices paléoclimatiques :** l'étude des pollens nous renseigne sur les climats et l'étude de l'abondance des stomates à la surface des feuilles fossiles nous renseigne sur le taux de CO_2 atmosphérique.

L'étude des stomates notamment sur les végétaux du genre Ginkgo permet de mettre en évidence une diminution de la quantité de CO_2 atmosphérique au cours du Cénozoïque.

Figure : utilisation de l'indice stomatique pour estimer l'évolution passée du CO_2 atmosphérique



Utilisation de l'indice stomatique pour estimer l'évolution passée du CO_2 atmosphérique

Reconstitution de l'évolution du CO_2 au cours d'une période géologique

Plus qu'un seul type d'indice, c'est l'analyse de l'ensemble des indices climatiques qui nous renseigne sur l'évolution du climat au cours du Cénozoïque. Ces indices montrent un refroidissement global

depuis 65 Ma avec une englaciation des pôles. Ce refroidissement n'est pas régulier, la courbe des températures a ainsi une allure en « marches d'escalier ».

Quelles sont les hypothèses pour expliquer ce refroidissement du climat au cours du Cénozoïque ?

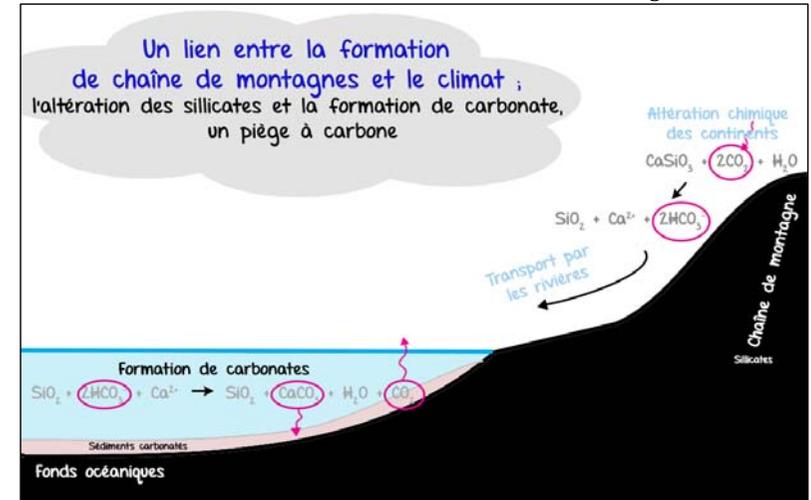
IIB - Les causes possibles du refroidissement Cénozoïque : liens entre la tectonique des plaques et variations climatiques

Pour expliquer la mise en place progressive d'un climat plus froid et de pôles englacés au cours du Cénozoïque, les scientifiques proposent des hypothèses faisant intervenir deux mécanismes liés à la tectonique des plaques :

1. La formation de chaînes de montagnes ;
2. L'ouverture de passages océaniques autour de l'Antarctique, permettant la mise en place d'un courant circumpolaire ;

La formation de chaînes de montagnes (1), notamment en Himalaya-Tibet et dans les Alpes entraîne une augmentation des processus d'érosion et d'altération. Ces processus érosifs consomment du CO_2 atmosphérique et entraîne un stockage du carbone dans les roches. Les équations bilans simplifiées de ces mécanismes sont présentées dans le schéma ci-dessous :

Figure : schéma montrant le lien entre la formation des chaînes de montagne et le climat



La formation de chaînes de montagnes au cours du Cénozoïque sont donc l'une des causes probables de la diminution du CO_2 atmosphérique, de la diminution de l'effet de serre et du refroidissement global.

L'autre cause probable du refroidissement climatique du Cénozoïque est l'ouverture de passages entre l'Antarctique et l'Amérique du Sud (passage de Drake) et l'Antarctique et l'Australie (passage de Tasmanie), permettant la mise en place d'un courant circumpolaire. Ces ouvertures seraient liées à l'activité des dorsales océaniques et donc aux mouvements tectoniques des plaques.

L'ouverture de ces passages auraient permis la mise en place de courants circumpolaires avec plusieurs conséquences climatiques :

- o L'isolement thermique de l'Antarctique, qui n'est plus réchauffé par des courants marins chauds en provenance des basses latitudes ;
- o L'activation de la circulation océanique profonde dite « circulation thermo-haline » qui a pour effet de séquestrer une partie du carbone océanique et des calories (chaleur) en profondeur, régulant ainsi le climat mondial ;

Figure – Reconstruction paléogéographique et océanographique autour de l'Antarctique depuis 86 Ma jusqu'à l'actuel

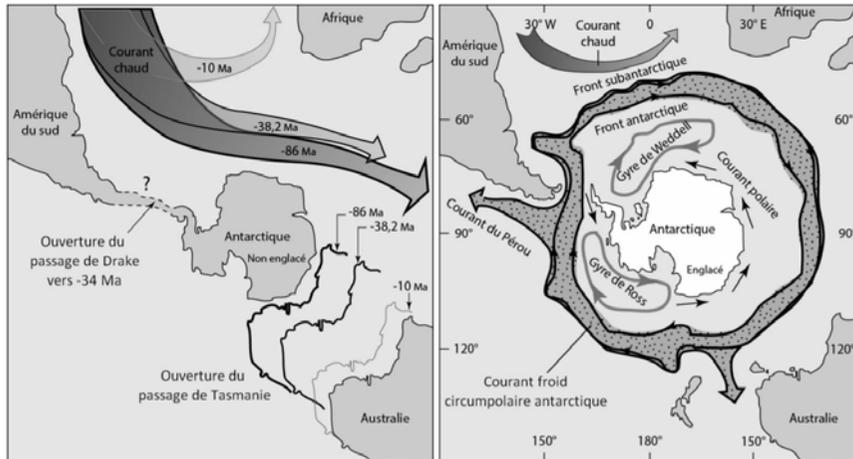
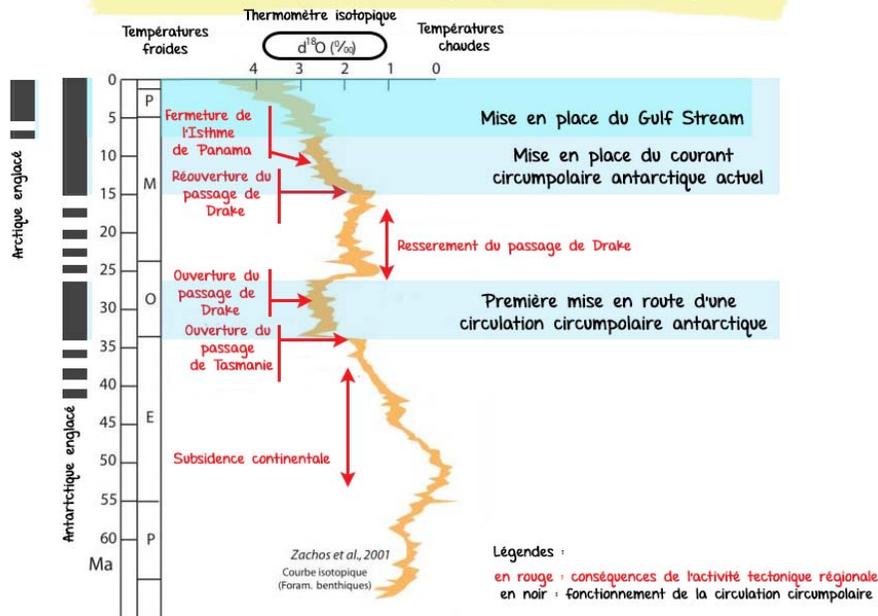


Figure – Variations climatiques au Cénozoïque et tectonique des plaques

Mise en évidence des liens entre la tectonique des plaques et le changement climatique global au Cénozoïque



Encart – La circulation océanique et le climat

La circulation océanique joue un rôle clé dans la régulation du climat, en assurant le stockage et le transport de chaleur, de carbone, de nutriments et d'eau douce à travers le monde. Des mécanismes complexes et variés expliquent cette circulation et définissent ses propriétés à court et long terme. La circulation océanique est contrôlée par de nombreux paramètres : vents, températures de l'eau et de l'air, salinité, géométrie océans/continents, etc.

Aux différentes époques géologiques, des modifications de la circulation océanique de surface mais surtout de la circulation océanique profonde (circulation dite « thermohaline ») ont pu jouer un rôle important dans les variations climatiques.

Infographie – La circulation océanique

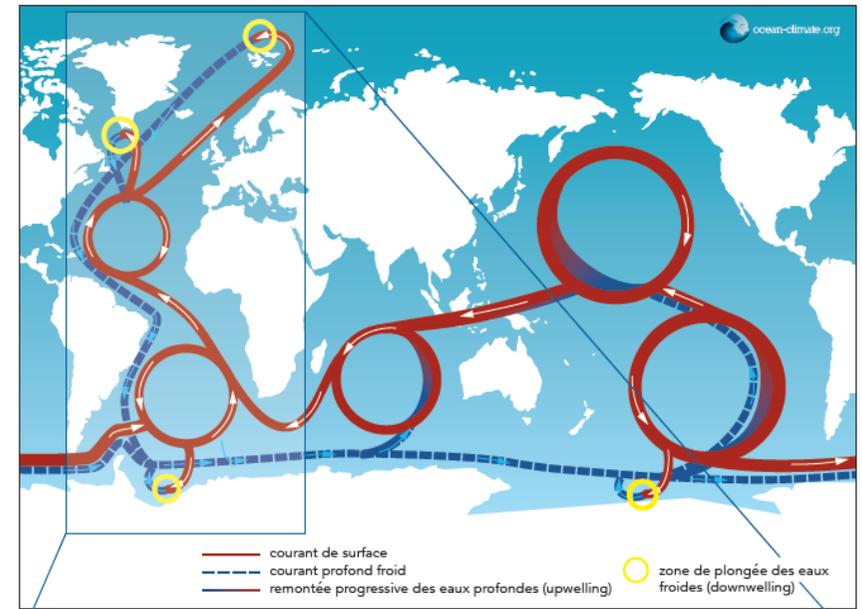
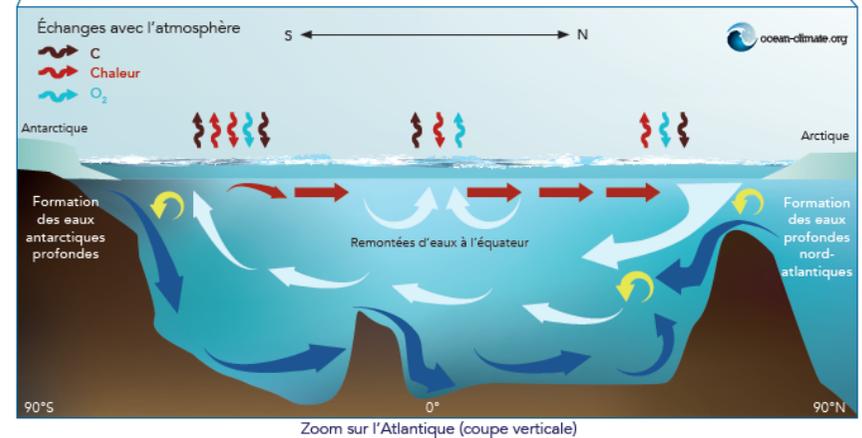


Schéma simplifié de la circulation océanique de grande échelle



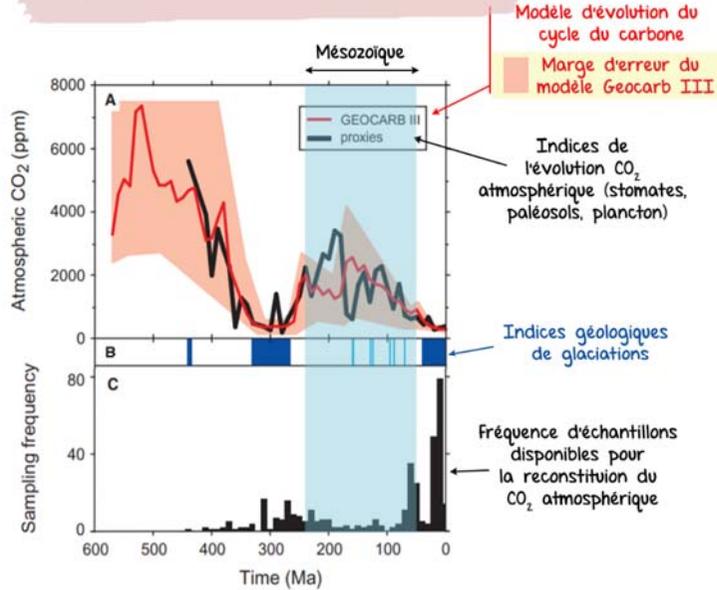
Zoom sur l'Atlantique (coupe verticale)

Au début du Cénozoïque, le climat mondial est plutôt chaud, qu'en est-il avant, au Crétacé et plus généralement au Mésozoïque ?

III – Les variations climatiques au Mésozoïque

IIIA - Mise en évidence d'un climat plutôt chaud au cours du Mésozoïque et notamment au cours du Crétacé

Infographie - Reconstitution des climats passés selon différents indices



Modèle d'évolution du cycle du carbone
Marge d'erreur du modèle Geocarb III

Indices de l'évolution CO₂ atmosphérique (stomates, paléols, plancton)

Indices géologiques de glaciations

Fréquence d'échantillons disponibles pour la reconstitution du CO₂ atmosphérique

Pour reconstituer le climat du Mésozoïque, les scientifiques utilisent globalement les mêmes indices : géochimiques ($\delta^{18}O$ et $\delta^{13}C$), géologiques (variation du niveau marin, formations sédimentaires) et paléocécologiques (pollens, indice stomatique). En s'appuyant sur ces indices, les climatologues ont construit un modèle nommé GEOCARB basé sur le lien entre cycles du carbone et climats et ils peuvent comparer ce modèle aux autres indices sur le climat (voir figure ci-contre).

Ces indices mettent en évidence un réchauffement du climat mondial pendant le Mésozoïque avec un maximum atteint au Crétacé.

A cette époque, le niveau élevé de dioxyde de carbone atmosphérique entraîne un effet de serre intense et un forçage climatique positif entraînant un réchauffement climatique.

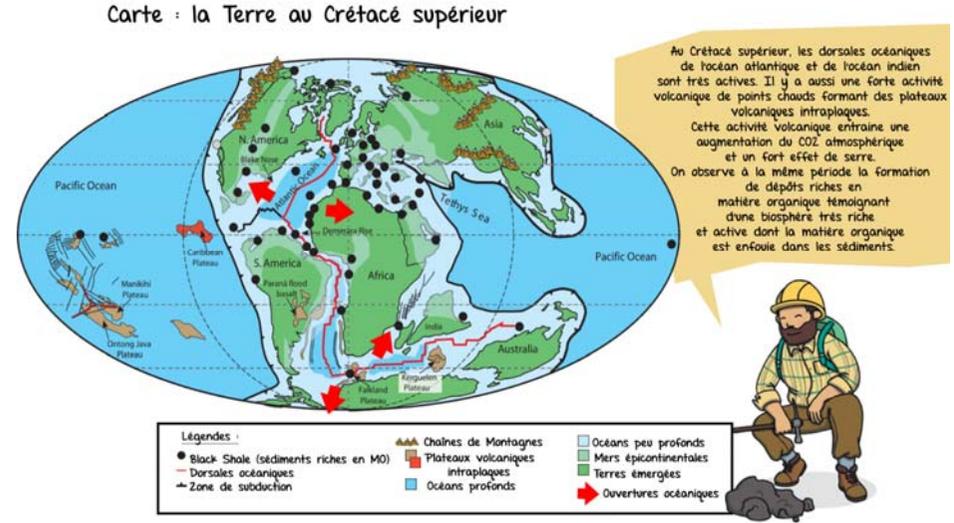
Ces données vont dans le même sens que les études sur le niveau marin qui aurait été très élevé au Crétacé (entre 100 et 200 m de plus que le niveau marin actuel).

Des études récentes de forage dans les sols, sous les glaces de l'Antarctique, ont mis en évidence qu'au Crétacé le pôle sud n'était pas englacé, mais plutôt recouvert de végétation forestière (comparable à celle de la Nouvelle-Zélande actuelle).

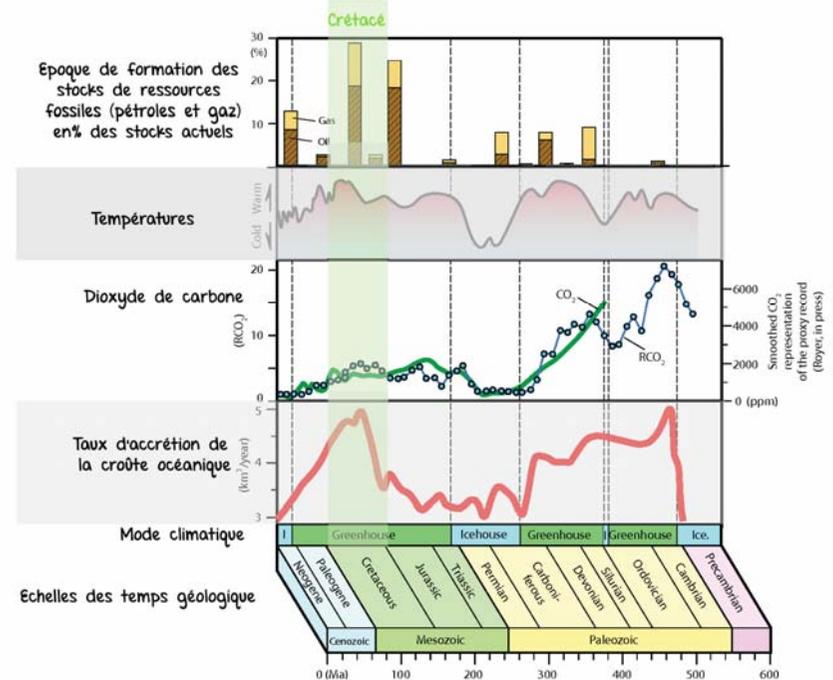
Remarque : au Crétacé supérieur le bassin Parisien est recouvert par une mer peu profonde (~300 m de profondeur). A cette latitude les

IIIB - Les causes possibles du réchauffement climatique du Crétacé

Figure : la Terre au Crétacé supérieur



Corrélations entre le taux d'accrétion océanique, le climat et la formation de ressources fossiles



La principale hypothèse évoquée pour expliquer l'augmentation de la température pendant le Mésozoïque et notamment pendant le Crétacé, est une augmentation de l'activité des dorsales océaniques

températures moyennes sont élevées et favorisent le développement de microorganismes à tests calcaires (coccolithophoridés) dont l'accumulation forme les couches de craies du Crétacé du Bassin Parisien.

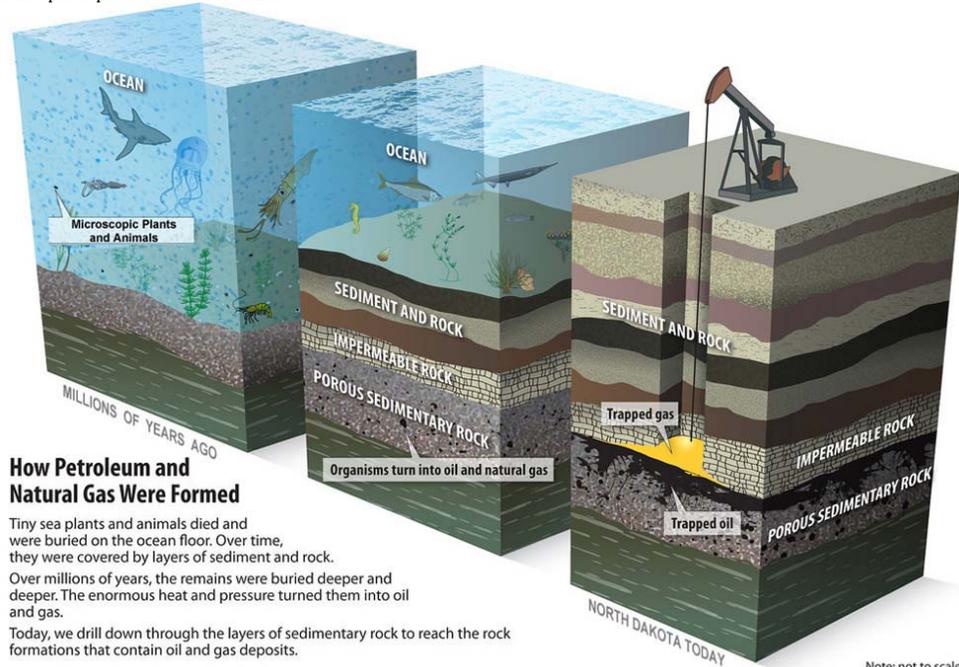
Echelle des temps géologiques

et de l'activité volcanique. Celle-ci entraîne une forte libération de dioxyde de carbone, un fort effet de serre et un réchauffement du climat.

Encart - Le Crétacé, principale époque de formation des réserves pétrolières mondiales

Le climat chaud et la forte croissance de la biomasse marine au cours du Crétacé expliquent la forte accumulation de matière organique dans les sédiments marins. Le Crétacé est l'époque où s'est formée une grande partie des réserves de pétrole et de gaz mondiales exploitées depuis le 20^{ème} siècle.

Cette séquestration de carbone dans les sédiments n'est cependant pas suffisante pour faire diminuer suffisamment le CO₂ atmosphérique et refroidir le climat.



How Petroleum and Natural Gas Were Formed

Tiny sea plants and animals died and were buried on the ocean floor. Over time, they were covered by layers of sediment and rock.

Over millions of years, the remains were buried deeper and deeper. The enormous heat and pressure turned them into oil and gas.

Today, we drill down through the layers of sedimentary rock to reach the rock formations that contain oil and gas deposits.

Source : <https://www.ndstudies.gov/>

Les indices étudiés par les scientifiques permettent d'étudier les changements climatiques pendant l'ère paléozoïque, comment les interprète-t-on ?

IV - Les variations climatiques au Paléozoïque

IVA - Mise en évidence d'un refroidissement au Carbonifère-Permien

Pour l'étude du climat du Paléozoïque, on utilise à nouveau les mêmes indices (et les mêmes documents voir figure de la partie III).

On constate en étudiant les différents indices que **jusqu'au Dévonien un climat chaud règne** sur Terre, parfois chaud et sec (présence de roches de type évaporites). **Ensuite, au Carbonifère- Permien, un important refroidissement climatique se produit.** Il y a la formation probable d'une calotte au pôle Sud, tandis qu'à l'équateur règne un climat tropical humide.

Remarque : parmi les indices de la présence d'une calotte, on peut citer les traces géologiques de glaciations (tillites, roches striées) utilisées par Alfred Wegener comme argument à l'existence d'un supercontinent au Carbonifère- Permien (fin du paléozoïque).

Quelles sont les hypothèses pour expliquer ce refroidissement au Carbonifère-Permien ?

IVB - Les causes possibles du refroidissement Carbonifère-Permien

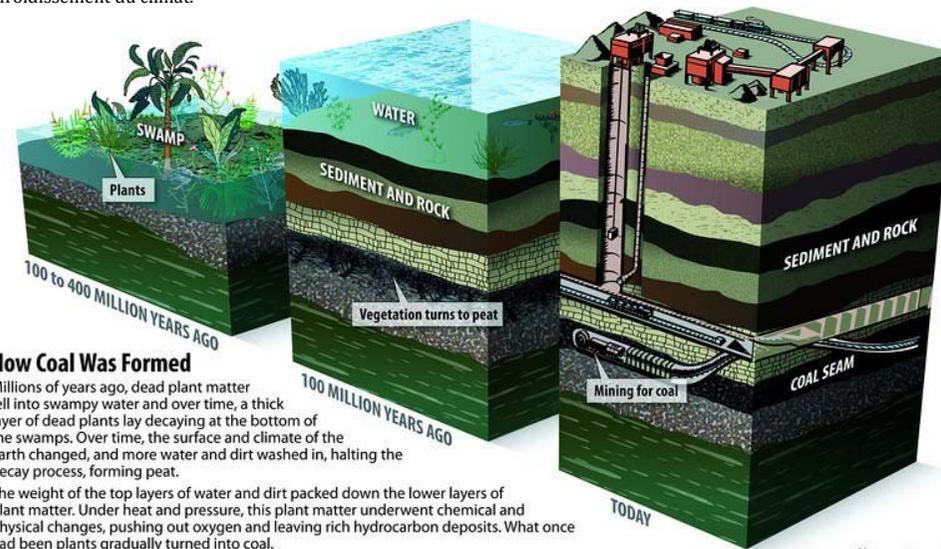
Les scientifiques évoquent deux principaux phénomènes ayant pu causer un piégeage du carbone pendant cette période, aboutissant à une diminution de l'effet de serre :

1. **La formation de la chaîne Hercynienne puis son érosion/altération** : comme on l'a vu précédemment, l'érosion des silicates entraîne un piégeage du carbone atmosphérique ;
2. **Une importante formation de biomasse et son stockage sous forme de roches carbonées** : aux basses latitudes il règne un climat chaud et humide propice à la végétation et à la formation de biomasse. Celle-ci est en partie enfouie dans les sédiments et transformée par la pression et la température en roches carbonées (charbon essentiellement).

Encart - Le Carbonifère-Permien, principale époque de formation des réserves de charbon mondiales

Le climat chaud à l'équateur et la forte croissance de la biomasse terrestre (forêts tropicales humides) au cours du Carbonifère-Permien expliquent la forte accumulation de matière organique dans les sédiments continentaux. Le Carbonifère-Permien est l'époque où se sont formées une grande partie des réserves de charbon mondiales exploitées depuis le 19^{ème} siècle.

Cette séquestration de carbone dans les sédiments est l'un des causes probables à la baisse du CO₂ atmosphérique et au refroidissement du climat.



How Coal Was Formed

Millions of years ago, dead plant matter fell into swampy water and over time, a thick layer of dead plants lay decaying at the bottom of the swamps. Over time, the surface and climate of the Earth changed, and more water and dirt washed in, halting the decay process, forming peat.

The weight of the top layers of water and dirt packed down the lower layers of plant matter. Under heat and pressure, this plant matter underwent chemical and physical changes, pushing out oxygen and leaving rich hydrocarbon deposits. What once had been plants gradually turned into coal.

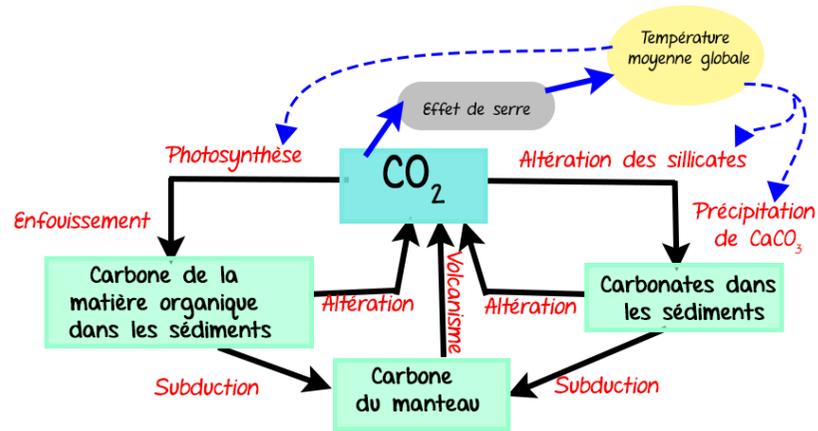
Coal can be found deep underground (as shown in this graphic), or it can be found near the surface.

Source : <https://www.ndstudies.gov/>

Conclusion :

On a pu voir au cours de ce chapitre que l'étude corrélée de nombreux indices permet de reconstituer les climats du passé de l'époque actuelle jusqu'à plusieurs centaines de millions d'années. Il est urgent d'utiliser ses connaissances sur les climats anciens pour mieux comprendre l'évolution actuelle du climat mondial et mieux en appréhender les conséquences.

Le modèle GEOCARB de cycle du carbone



	Effets de la température sur les échanges de carbone		Réservoirs de carbone lithosphériques	En rouge : mécanisme de transfert de carbone
	Echanges de carbone entre réservoirs		Réservoir de carbone du système atmosphère-océan	