

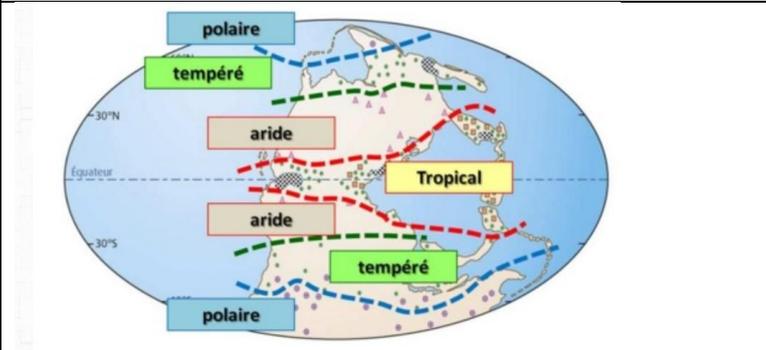
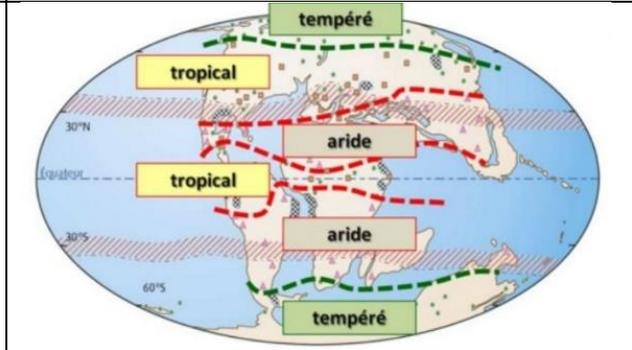


## I Reconstitution de paléoclimats à partir d'indices paléontologiques et géologiques

A l'échelle de millions d'années et à l'échelle planétaire, le climat oscille entre deux grands types de période : des périodes froides caractérisées par la présence de calottes glaciaires et des périodes chaudes sans glaciation. Deux périodes seront étudiées : celle du **Permo-Carbonifère** et celle du **Crétacé**.

### A- Les variations du climat enregistrées par les roches sédimentaires et les fossiles

- Les roches sédimentaires se forment dans des conditions climatiques particulières. Elles témoignent ainsi des grandes zones climatiques des régions où elles se sont formées.

Roches sédimentaires témoins du climat global du Permo-Carbonifère	Roches sédimentaires témoins du climat global au Crétacé
 <p>The map shows a global distribution of climate zones during the Permo-Carboniferous period. It features a central supercontinent with a polar region (polaire) at the top and bottom, temperate zones (tempéré) on the sides, and arid (aride) and tropical (Tropical) zones in the interior. Dashed lines indicate the boundaries between these zones.</p>	 <p>The map shows a global distribution of climate zones during the Cretaceous period. It features a temperate zone (tempéré) at the top and bottom, tropical zones (tropical) on the sides, and arid zones (aride) in the interior. Dashed lines indicate the boundaries between these zones.</p>
<p>- <b>Les tillites et les moraines</b> sont des marqueurs d'une activité glaciaire. Leur présence sur des continents aujourd'hui éloignés (Amérique du Sud, Afrique du Sud, Inde, Australie) s'explique par le fait qu'au Permo-Carbonifère ceux-ci étaient rassemblés avec le continent Antarctique en un continent unique centré sur le pôle sud. Une calotte glaciaire recouvrait donc en partie ces continents.</p> <p>- <b>Les charbons</b>, roches sédimentaires majeures du Carbonifère, se rencontrent en Amérique du Nord, en Europe, en Sibérie, en Chine... Les troncs fossilisés attestent de la présence de forêts très importantes ayant fourni le matériel végétal à l'origine du charbon.</p> <p>- <b>La présence de bauxite, latérite et d'évaporites</b> témoignent d'un climat tropical à aride.</p> <p>Globalement, le climat au Permo-Carbonifère devait être assez semblable à celui du Quaternaire car marqué par la <b>coexistence de climat polaire et subpolaire, climat tempéré, climat tropical et aride.</b></p> <p><b>A l'échelle de la planète, le Permo-Carbonifère est considérée comme une période de climat global froid comme le Quaternaire. On estime la température moyenne à la surface du globe à 12-15°C</b></p>	<p>- <b>Au Crétacé, il n'existe aucune trace d'activité glaciaire</b></p> <p>- On note la présence <b>d'évaporites, de latérites et de bauxites à des latitudes plus élevées qu'actuellement.</b></p> <p>- <b>Le niveau de la mer était supérieur de 300 m à l'actuel.</b></p> <p>- d'autres roches sédimentaires comme les <b>roches glauconieuses</b> attestent d'un climat chaud et d'une transgression marine</p> <p>Globalement, le climat du Crétacé était très différent du Permo-Carbonifère et marqué par <b>l'absence de calotte glaciaire et l'absence de climat polaire ou subpolaire.</b></p> <p><b>On estime la température moyenne à la surface du globe à 24-25 °C.</b></p>

- La flore et la faune sont aussi des indicateurs de climats
  - ✓ **Les fossiles terrestres peuvent nous informer sur le climat en domaine continental.**
  - les fossiles de végétaux indiquent le type de peuplement végétal présent à une époque donnée. Par exemple, les fougères fossilisées dans les sédiments du Permo-Carbonifère sont caractéristiques de la présence d'une forêt tropicale à cette époque.
  - **Les formations coralliennes**, situées actuellement entre les tropiques, se développent jusqu'à des latitudes de 40° au Crétacé.

- Au crétacé, on rencontre à des latitudes de 70° des **arbres caractéristiques de climats chauds ainsi que des reptiles** qui, par comparaison avec des espèces actuelles, nécessitent des températures annuelles moyennes supérieures à 14°C.

- Dans des conditions de fossilisation favorable, les paléontologues ont utilisé un indicateur du taux de dioxyde de carbone, gaz à effet de serre, jouant un rôle dans le contrôle du climat. On sait en effet que l'indice stomatique mesuré sur des plantes est inversement proportionnel au taux de dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. En utilisant le principe d'actualisme, on peut déterminer approximativement le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique présent à une époque donnée en utilisant les empreintes fossilisées de feuilles de certains végétaux. Cette méthode peut s'appliquer à la période du Crétacé et au Cénozoïque (réf.10).

- les coccolithophoridés des roches calcaires du Crétacé sont des indicateurs d'un climat chaud.

### B- Les sédiments marins contiennent des fossiles indicateurs de la paléotempérature de l'océan.

Les foraminifères sont des organismes marins à test carbonaté (squelette externe). On mesure un rapport isotopique <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O établi à partir de ces tests de foraminifères et on calcule un indice isotopique δ<sup>18</sup>O en prenant comme référence les rapports isotopiques des tests de foraminifère du Crétacé.

$$\delta^{18}\text{O} = \left[ \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{foraminifère}} - \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Crétacé}} \right] \times 1000 / \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Crétacé}} \quad \text{Crétacé} = \text{rapport } ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ référence standard.}$$

⇒ Le δ<sup>18</sup>O est un **thermomètre isotopique** : plus il est élevé, plus la température au moment de la formation du test carbonaté est basse et inversement.

Cet indice dépend donc de la température au moment de la formation des tests carbonatés des foraminifères.

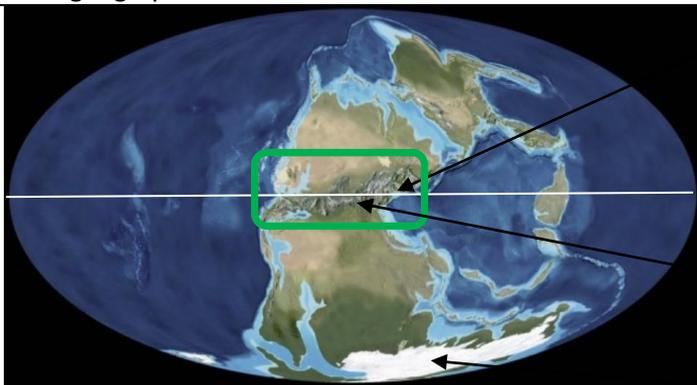
### II Des facteurs à l'origine des variations climatiques à l'échelle de millions d'années

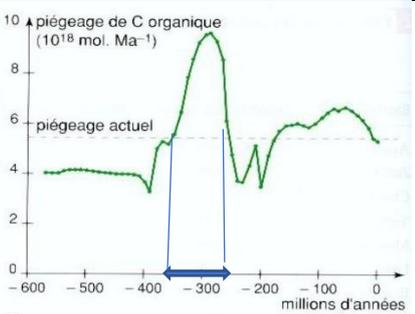
Les mécanismes des variations climatiques aux grandes échelles de temps impliquent des variations importantes dans la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère, en particulier le CO<sub>2</sub>. Ces variations sont contrôlées par un certain nombre de processus qui libèrent ou consomment du CO<sub>2</sub>.

#### A Des mécanismes déclencheurs

##### ➤ **Au Permo-Carbonifère**

L'accroissement de l'altération des roches silicatées à la suite de l'orogénèse hercynienne et le piégeage de la matière organique sous forme de charbons ont entraîné **une baisse du taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique**. La **diminution de l'effet de serre a occasionné un refroidissement climatique amplifié par un albédo (voir B) important lié à une imposante calotte glaciaire** favorisée par le regroupement des continents au pôle sud.

Paléogéographie au Permo-Carbonifère	
	<p>Il y a 320 millions d'années, dans tout ce qui deviendra l'Europe, une immense chaîne de montagnes se met en place. Cette chaîne, dite hercynienne, sera à l'origine de la formation des roches granitiques et métamorphiques de ce que nous appelons aujourd'hui les massifs anciens (Massif Central, Massif armoricain, Vosges).</p> <p>Zone tropicale : formation importante de roches carbonées (charbon)</p> <p>Calotte glaciaire</p>

	<h4><b>Le piégeage de la matière organique dans les roches</b></h4> <p>Dans la biosphère un équilibre s'établit entre la production de matière organique par les végétaux photosynthétiques (consommatrice de CO<sub>2</sub>) et sa dégradation par les processus respiratoires ou fermentaires producteurs de CO<sub>2</sub>. Cependant, une partie de la matière organique peut échapper à ce recyclage et conduire à l'accumulation de molécules organiques complexes non dégradées à l'origine de la formation de roches carbonées comme le pétrole ou de charbon. Le carbone se trouve piégé dans les roches carbonées, moins de CO<sub>2</sub> est produit. Au Permo-carbonifère ce piégeage est supérieur au piégeage actuel.</p>
---	--

## L'altération des silicates

L'altération des silicates des roches magmatiques ou métamorphiques consomme du CO<sub>2</sub>.

### Exemple :

L'altération chimique du granite s'effectue par hydrolyse. Un plagioclase calcique comme l'anorthite s'hydrolyse de la façon suivante  $2 \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 4 \text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Ca}^{++} + 4 \text{HCO}_3^- + \text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Al}_4(\text{OH})_8$  (argile: kaolinite)

=> L'hydrolyse de deux moles d'anorthite **consomme 4 moles de CO<sub>2</sub>**.

Cependant, la précipitation des carbonates dans les océans **produit du CO<sub>2</sub>**  $4 \text{HCO}_3^- + 2\text{Ca}^{++} \rightarrow 2 \text{CaCO}_3 + 2\text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Ainsi, globalement, lorsqu'une mole de plagioclase calcique est hydrolysée et en prenant en compte la précipitation des carbonates, ce sont deux moles de CO<sub>2</sub> qui sont injectées dans l'atmosphère.

=> **Par la modification du cycle biogéochimique du carbone qu'elles ont entraîné, l'altération de la chaîne hercynienne et la fossilisation importante de matière organique (grands gisements carbonés) sont tenues responsables de cette glaciation.**

### ➤ Au Crétacé

Le Crétacé est caractérisé par un « éclatement » des continents lié à la formation de dorsales océaniques responsables de l'expansion océanique. L'activité volcanique est donc intense : il y a libération d'une grande quantité de CO<sub>2</sub> dans l'hydrosphère (les océans) ; ce CO<sub>2</sub> passe dans l'atmosphère et augmente de ce fait l'effet de serre. L'augmentation de l'effet de serre a occasionné un réchauffement climatique global entraînant la fonte des calottes glaciaires avec une diminution de l'albédo (voir mécanismes amplificateurs).

D'autre part, au Crétacé, l'érosion des reliefs aplanis durant la période précédente est moins intense : la consommation de CO<sub>2</sub> est donc plus faible lors des processus d'érosion.

=> **La géodynamique terrestre intervient donc aussi dans les variations climatiques : émission de dioxyde de carbone lors des phases d'expansion océanique, orogénèse et altération des roches modifient le cycle du carbone.**

**D'autre part, la modification de la position des continents (regroupement ou éclatement des masses continentales) modifient les régimes de circulation des courants océaniques qui jouent également un rôle dans les changements climatiques (voir exemple dans le réf.10).**

## B Des mécanismes amplificateurs : des rétroactions positives

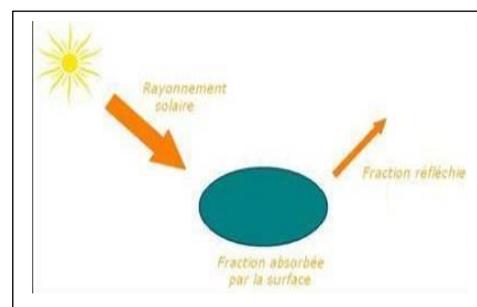
### ➤ L'albédo, un facteur amplificateur des variations climatiques

**L'albédo correspond au rapport de l'énergie réfléchie R par une surface sur l'énergie incidente I reçue par cette surface.  $A = R/I$**

Plus la quantité d'énergie réfléchie est élevée, plus l'**albédo** est important : la surface réfléchissante absorbe encore moins d'énergie et se refroidit davantage (c'est le cas des surfaces claires).

- Un albédo plus faible amplifie le réchauffement (l'albédo global diminue par diminution des surfaces glaciaires comme au Crétacé).

- Un albédo plus fort amplifie le refroidissement (l'albédo global augmente par augmentation des surfaces glaciaires comme au permo-Carbonifère).



### ➤ Le rôle joué par les océans : puits ou source de CO<sub>2</sub>

- Un refroidissement global entraîne une augmentation de la solubilité du CO<sub>2</sub> dans les océans. En effet, les températures de surface des océans diminuant, la solubilité du CO<sub>2</sub> augmente dans l'eau : le CO<sub>2</sub> atmosphérique se dissout plus facilement dans l'eau, l'océan devient un puits de carbone. Ce phénomène amplifie le refroidissement. (cas du Permo-Carbonifère).

- Inversement, un réchauffement global entraîne une diminution de la solubilité du CO<sub>2</sub> dans les océans. En effet, les températures de surface des océans augmentant, la solubilité du CO<sub>2</sub> diminue dans l'eau : le CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau passe dans l'atmosphère. L'océan devient source de carbone. Ce phénomène amplifie le réchauffement. (cas du Crétacé).

## Lexique référentiel 09

**Albédo** : rapport entre la quantité d'énergie réfléchiée 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.

**Bauxite** : roche latéritique blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine  $Al_2O_3$  et en oxydes de fer. Cette roche constitue le principal minerai permettant la production d'aluminium.

Elle se forme par altération continentale en climat chaud et humide.

**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.

**Evaporite** : roche sédimentaire qui a pour origine la précipitation d'ions par évaporation d'une étendue d'eau (exemple : gypse).

Foraminifère :

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

**Latérite** : sol tropical rouge, ferrugineux et durci.

**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  $CO_2$  : processus consistant à séparer le  $CO_2$  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

**Tillites** : dépôts détritiques très hétérogènes liés à la présence d'un glacier ou d'une calotte glaciaire.

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

### **Capacités et attitudes attendues pour ce chapitre :**

- Comprendre et utiliser le concept de thermomètre isotopique ( $\delta^{18}O$  dans les carbonates des sédiments océaniques) pour reconstituer indirectement des variations de températures.
- Exploiter la carte géologique du monde pour calculer des vitesses d'expansion des dorsales océaniques aux périodes considérées.
- Utiliser les connaissances acquises sur la géodynamique interne et la tectonique des plaques pour comprendre leur rôle sur le climat et mettre en relation la nature des roches formées avec les paléoclimats du Crétacé.
- Reconstituer l'extension de la glaciation permienne à partir de la distribution des tillites.
- Reconstituer un paléoclimat local à partir d'une variété d'indices paléontologiques ou géologiques en tenant compte de la paléo-latitude
- Exploiter des bases de données pour reconstituer les paléoceintures climatiques.
- Exploiter les équations chimiques associées aux transformations d'origines géologiques pour modéliser les modifications de la concentration en  $CO_2$  atmosphérique.
- Mobiliser les acquis antérieurs sur le cycle du carbone biosphérique et les enrichir des connaissances sur les réservoirs géologiques (carbonates, matière organique fossile) et leurs interactions.

### **Références :**