

ENJEUX PLANÉTAIRES CONTEMPORAINS



*Terminale
spécialité*

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

*1- Reconstituer et comprendre les variations
climatiques passées*

Lycée Camille Claudel

SOMMAIRE :

Introduction	3
I- Les différentes méthodes d'étude de climats passés	3
A- Le principe d'actualisme (ou uniformitarisme)	3
B- Les indices préhistoriques	5
C- Les indices géologiques	6
1- L'étude des glaces	6
a) de l'air dans les glaces	
b) les variations isotopiques de l'oxygène	
2- Les indices sédimentaires	9
a) de périodes froides	
b) de périodes chaudes	
3- Les indices des paléorivages	11
D- Les indices paléontologique et paléo-écologiques	12
1- Les fossiles continentaux	12
a) Indices stomatiques	
b) La palynologie	
2- Les fossiles Océaniques	13
a) Les coraux	
b) Les foraminifères	
II- Les Causes des variations climatiques	14
A- Les causes astronomiques du climat	14
1- Excentricité de la révolution terrestre	14
2- Obliquité de l'axe de rotation de la Terre.	14
3- Précession des équinoxes	15
B- Les phénomènes amplificateurs ou boucles de rétroaction	15
1- L'albédo	15
2- Les gaz à effet de serre (GES)	16
C- Les causes géologiques modifiant les climats sur de très grandes échelles.	16
III- L'histoire climatique de la Terre au Phanérozoïque (de -541 MA à aujourd'hui)	17
A- Alternance glaciaire et interglaciaire du Quaternaire (de -2,58 MA à nos jours)	17
B- Les variations du Cénozoïque (de -65 Ma à aujourd'hui)	17
C- La période chaude du Mésozoïque (de - 252 MA à -65 Ma)	18
D- Le Paléozoïque (de - 541 MA à -252 Ma)	18
Conclusion	19
Schéma Bilan	20
Fiche de révision pour mieux réussir	21

Variations climatiques passées

Introduction

L'ensemble des données accumulées depuis 150 ans, notamment par des relevés locaux météorologiques, montre un **réchauffement climatique** indéniable de **plus d'1 degré** corrélé à l'activité humaine. D'ailleurs, dans cette 2^e décennie du XX^{ème} siècle, nous avons dépassé un point de non retour du réchauffement climatique aux conséquences majeures pour l'ensemble de la planète et en particulier pour l'humanité. Ce qui reste à venir peut être plus ou moins modulé en fonction des efforts de chacun.

Néanmoins, des climato-sceptiques invoquent toujours un réchauffement qui ne serait pas lié à l'Homme, notamment en invoquant des **preuves de réchauffement climatique** antérieures à l'activité industrielle. C'est pour cette raison, qu'il est nécessaire de faire le tri parmi les méthodes employées pour analyser les **climats passés** et pour pouvoir observer les causes des variations climatiques. **Plus les méthodes seront diversifiées et plus les résultats iront dans un même sens, alors plus le climat passé sera avéré et sa cause déterminée.**

Le but de ce chapitre sera de pouvoir mieux cerner les méthodes scientifiques employées pour analyser les climats passés, afin de mieux comprendre les changements vécus aujourd'hui et d'en déterminer les causes.

Ce chapitre est connecté à celui de l'enseignement scientifique (Thème 1 : Science, climat et société)

Photo de couverture : d'après Jb

Problèmes : Comment reconstituer les variations climatiques passées ? Les variations observées sont elles locales ou mondiales ? Comment choisir une méthode fiable en fonction de l'époque étudiée ? Quels ont été les climats passés ?

I- Les différentes méthodes d'étude de climats passés

Il existe différentes méthodes d'étude des climats passés qui vont dépendre des échelles de temps et des matériaux utilisés. Ce qui importe donc, c'est de relever **différents indices** qui vont nous **renseigner sur une échelle de température, à une époque donnée et au niveau d'une localité**. Pour conclure à une variation globale de la température, il faudra prendre la précaution de s'assurer que les variations se sont reproduites à l'identique à différents endroits dans le monde.

A- Le principe d'actualisme (ou uniformitarisme)



Définition :

Actualisme : principe de base de la géologie moderne qui postule que les processus qui s'exercent aujourd'hui, se sont exercés aussi dans le passé (principe d'uniformitarisme : des phénomènes semblables s'opèrent en tous temps et en tous lieux).

On peut donc étudier des êtres vivants ou des sédiments répartis en fonction des climats actuels et on les compare avec des fossiles ou d'anciens sédiments. Alors, on peut envisager des corrélations entre climats passés et climats actuels.

Par exemple : les moraines sont des sédiments typiquement glaciaires. Leur position en fonction permet de localiser le recul des glaciers actuels. Mais évidemment, si on retrouve ces mêmes traces dans des strates ou même au niveau de régions qui n'ont plus de glaciers, on pourra conclure à la présence d'un glacier dans le passé (idem pour des stries ou des blocs erratiques).

Il en va de même pour les tillites qui sont des dépôts sédimentaires déposés lors de la fonte de glacier.

On peut donc conclure qu'en trouvant des moraines et/ou des tillites en un endroit, qu'il devait y avoir à cet emplacement un glacier dans le passé.



Définitions :

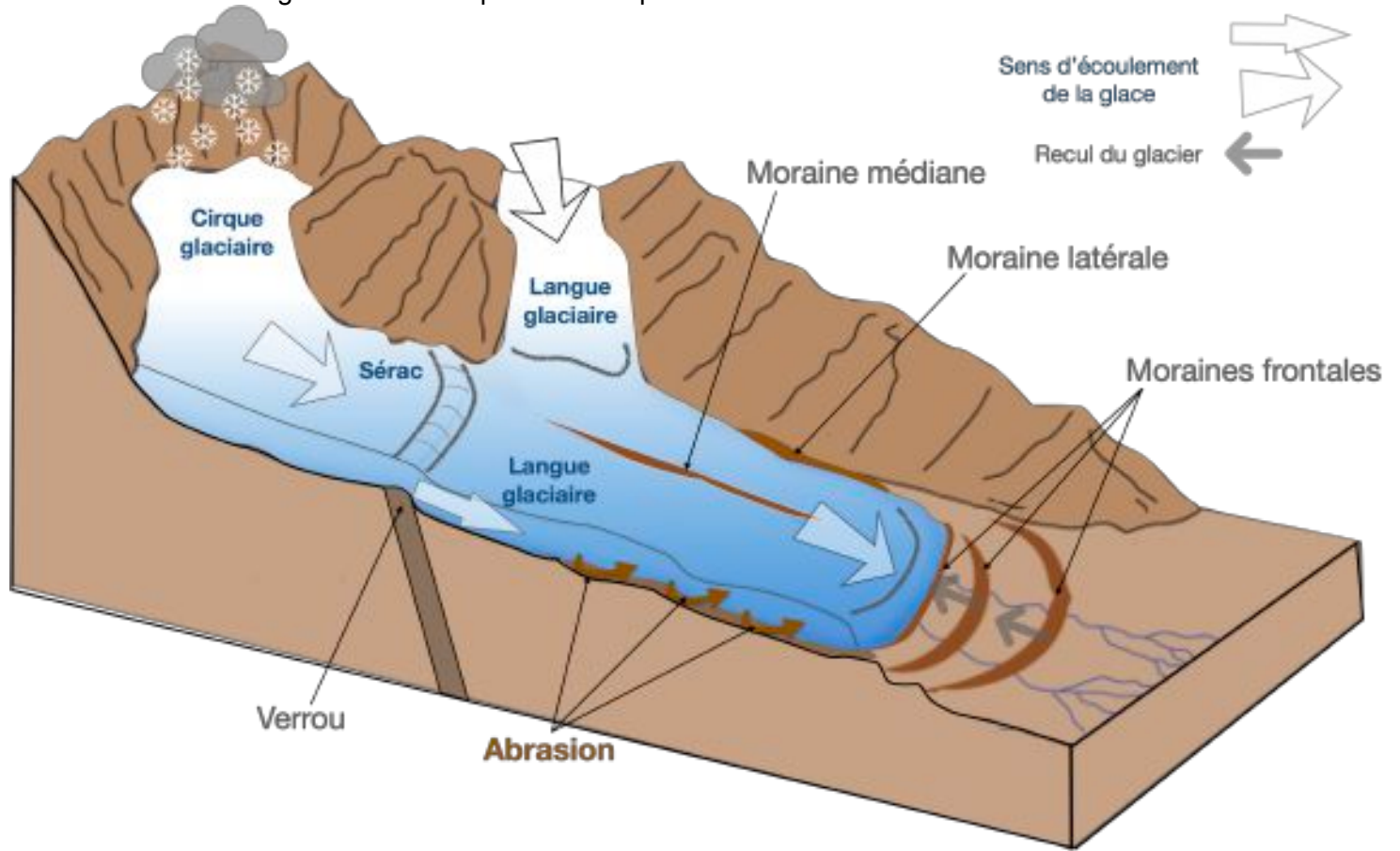
Moraines : Débris de roche entraînés par un glacier et formant un grand amas.

Tillites : sédiments argilo-limoneux issus de la fonte d'un glacier et enveloppant des débris rocheux de différentes tailles.

Variations climatiques passées

Grâce au principe d'actualisme, nous allons pouvoir relever plein d'indices qui vont nous permettre d'interpréter des données et d'envisager des climats passés.

Doc.1 : Schéma d'un glacier et des dépôts morainiques



Doc.2 : Moraines et tillites



Variations climatiques passées

B- Les indices préhistoriques

Les hommes préhistoriques ont laissé des traces de leur passage dans différentes grottes (comme Lascaux, -17 000 ans ou Chauvet -36 000 ans). Les peintures rupestres retracent la faune locale. Ces deux grottes ne sont séparées que de quelques centaines de kilomètres, et les variétés d'animaux représentées sur les parois sont différentes. A Chauvet, on a plutôt des mammouths, des lions des cavernes, des rhinocéros laineux, des chevaux, et des cervidés. A Lascaux, on a plutôt, des aurochs, des bisons, des lions et peu de rhinocéros (beaucoup moins qu'à Chauvet).

Doc.3 : Le bestiaire de Chauvet et celui de Lascaux

Doc.3A : Grotte de Chauvet



D'après [Franceculture](#) et [archéologie culture](#)

Doc.3B : Grotte de Lascaux



Il y a presque autant de temps entre Chauvet et Lascaux qu'entre nous et Lascaux. La faune a considérablement changé entre ces différentes périodes montrant un **réchauffement climatique**.

On peut observer dans une autre grotte, celle de Cosquer, avec 2 périodes d'occupations distinctes (-27 000 ans et - 19 000 ans) et des peintures rupestres des animaux des 2 périodes. Mais ce qui est évident, c'est que cette grotte est aujourd'hui en partie immergée et n'est accessible qu'à 37 m de profondeur entre Marseille et Cassis. Au moment où l'homme préhistorique fréquente les lieux, le niveau de la mer est plus bas d'au moins 120

Variations climatiques passées

mètres et la ligne de rivage se situe à environ 6 kilomètres de là. Il y a -27 000 ans, le climat et les paysages étaient ceux des temps glaciaires.

Doc. 4 : Grotte de Cosquer



D'après la provence

C- Les indices géologiques

Ce sont des indices que nous pouvons utiliser sur de grandes échelles de temps.

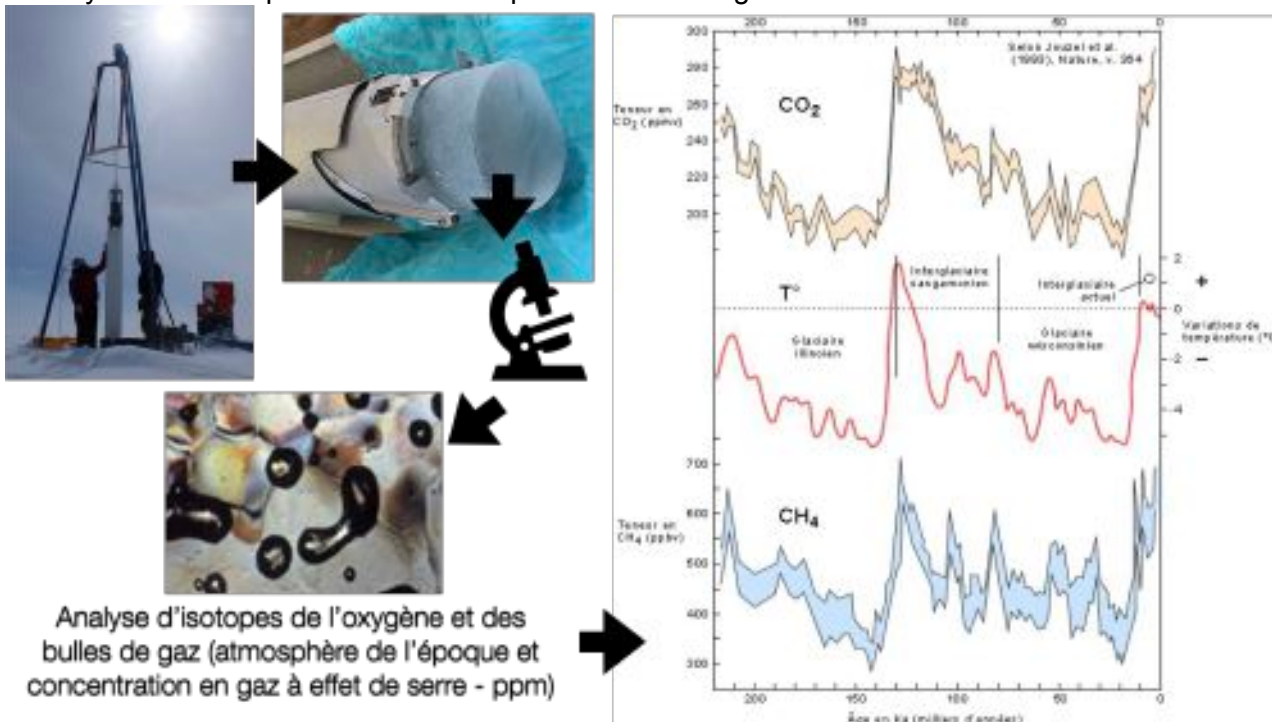
Certaines roches ne se forment qu'en condition de climat chaud ou de climat froid. Alors que d'autres restent indifférentes à ces paramètres. On connaît bien de nos jours ces processus de formation, notamment sur les conditions de formation des roches sédimentaires (diagenèse).

Comme on connaît les conditions climatiques de formation de différentes roches, il est possible de donner le type de climat en fonction d'un gisement correspondant, en fonction de sa datation. Cela replace la localité dans son paléoenvironnement climatique.

1- L'étude des glaces

a) de l'air dans les glaces

Doc. 5 : Analyse de la composition de l'air emprisonné dans la glace



Lorsque la neige tombe à des latitudes polaires ou circumpolaires, les cristaux se déposent et peuvent être recouverts par de nouvelles précipitations. Les cristaux précédents sont alors tassés et de l'air se retrouve piégé. Des séries de glace sont ainsi formées par couches successives d'année en année.

Variations climatiques passées

Lorsque des forages glaciaires sont effectués, on retrouve ces couches successives et on peut analyser alors l'air contenu. Cela constitue des archives de "l'air du passé".

Les gaz à effet de serre sont présents dans l'atmosphère et n'oublions pas qu'ils permettent une température de 15°C (au lieu de -18°C) sur Terre. Mais les variations de leur taux pourrait expliquer soit une baisse de température, on parle alors de période glaciaire, soit une hausse de température ou réchauffement, on parle alors de période interglaciaire.

Il est remarquable de noter que les périodes glaciaires correspondent à des taux faibles de gaz à effet de serre, alors que les périodes interglaciaires, à des taux élevés. Ces observations peuvent nous donner des pistes concernant l'évolution du climat récent, et donc nous permet d'envisager un climat futur.

b) les variations isotopiques de l'oxygène

Activité : TP $\delta^{18}O$

Il existe 3 isotopes de l'oxygène : ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O . En géologie seuls les isotopes 16 et 18 sont utilisés.

$^{16}O = 99,8\%$

$^{18}O = 0,2\%$

On peut calculer alors le rapport suivant :

$$\delta^{18}O = \frac{\left[\frac{^{18}O}{^{16}O} \right]_{ech} - \left[\frac{^{18}O}{^{16}O} \right]_{standard}}{\left[\frac{^{18}O}{^{16}O} \right]_{standard}} \times 1000$$

Il faut alors choisir un standard pour toutes les études.

- **Pour les carbonates** : on s'est aperçu que les carbonates de calcium ($Ca CO_3$) renfermaient du ^{18}O forcément fixé dans les océans. Le premier élément ainsi étudié fut un **rostre de Bélémnite** provenant de la localité de **Pee Dee (PDB 1)** en Caroline du Nord (USA) et daté du Crétacé. A cette époque, il n'y avait pas de calotte polaire (période chaude).
- **Pour les glaces** : **SMOW** (Standard Mean of Ocean Water, moyenne standard de l'eau océanique) est un standard moyen des océans retenu pour la glace des inlandsis.

Définition :

Inlandsis : est un **glacier continental** de très grande étendue se présentant sous la forme d'une nappe de glace recouvrant la terre ferme et qui peut atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur. => **± Calotte glaciaire**

Complément : Explication de ce qu'est un rostre de bélémnite.

On mesure donc sur les carbonates et sur l'eau la quantité de ^{18}O . On a alors déterminé un standard moyen des océans : **SMOW** (standard mean ocean water)

Le rapport entre les carbonates et les océans permet alors de déterminer une température moyenne qui régnait : $T_{passé} = 16,9 - 4 (\delta_{carbonates} - \delta_{eau})$ (où s'est formé le carbonate))

En terme de température il faut s'assurer que le δ_{eau} n'a pas changé. Or un facteur est susceptible de le modifier : ce sont les **glaciations**.

Illustrations et commentaires :

Actuellement $\delta_{eau} = 0$. Mais cela n'a pas toujours été le cas ; en effet au maximum des glaciations ce δ_{eau} était de 1‰ ou 1,3‰. De même pour le Tertiaire on estime qu'il n'y avait pas de calotte glaciaire.



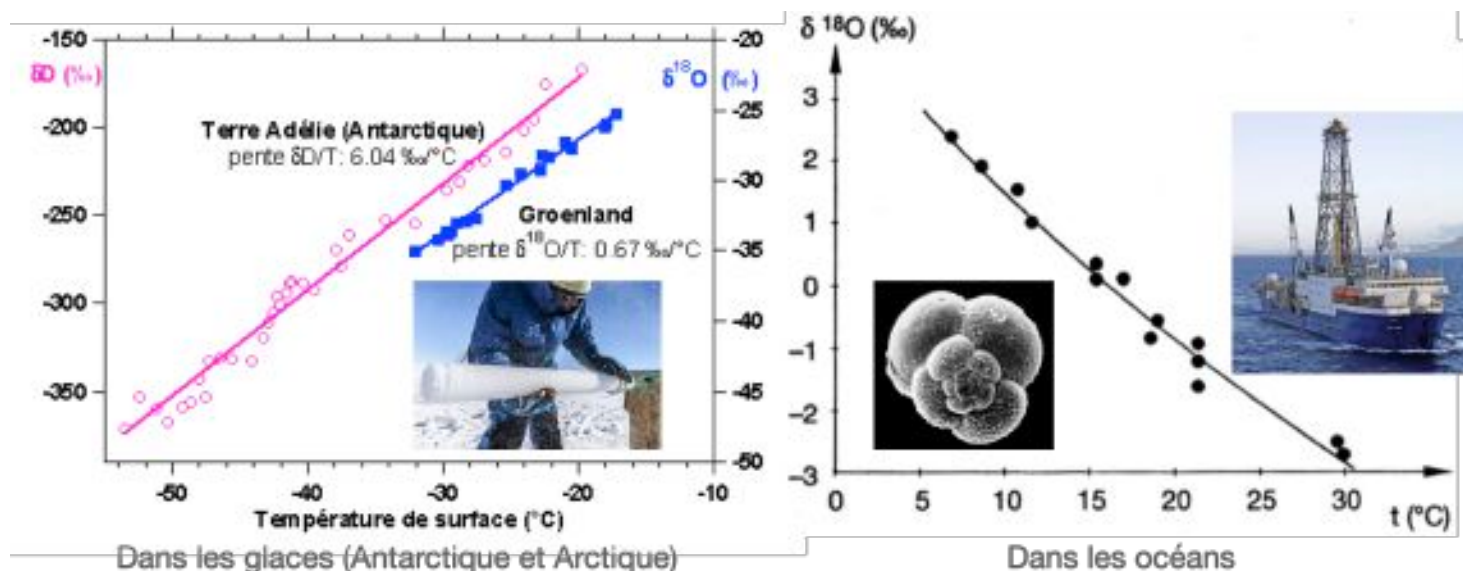
Pour ses analyses de la glace de l'[Antarctique](#) et du [Groenland](#) permettant de connaître le climat terrestre passé ([paléoclimatologie](#)), Jean Jouzel est reconnu mondialement. En 2002, il est récompensé pour ses travaux sur les paléoclimats et reçoit conjointement avec Claude

Variations climatiques passées

Lorius la prestigieuse médaille d'or du CNRS. Le GIEC, et notamment l'équipe de Jean Jouzel, a reçu le prix Nobel de la paix en 2007 en tant que lanceur d'alerte climatique. Les faits scientifiques et l'argumentation sont aujourd'hui acceptés de toute la communauté scientifique.

Pour l'étude de ces rapports isotopiques, le géologue Emiliani avait établi bien avant une condition nécessaire : il faut se placer dans des conditions où il y a le moins d'arrivée d'eau douce (à cause du lessivage des continents).

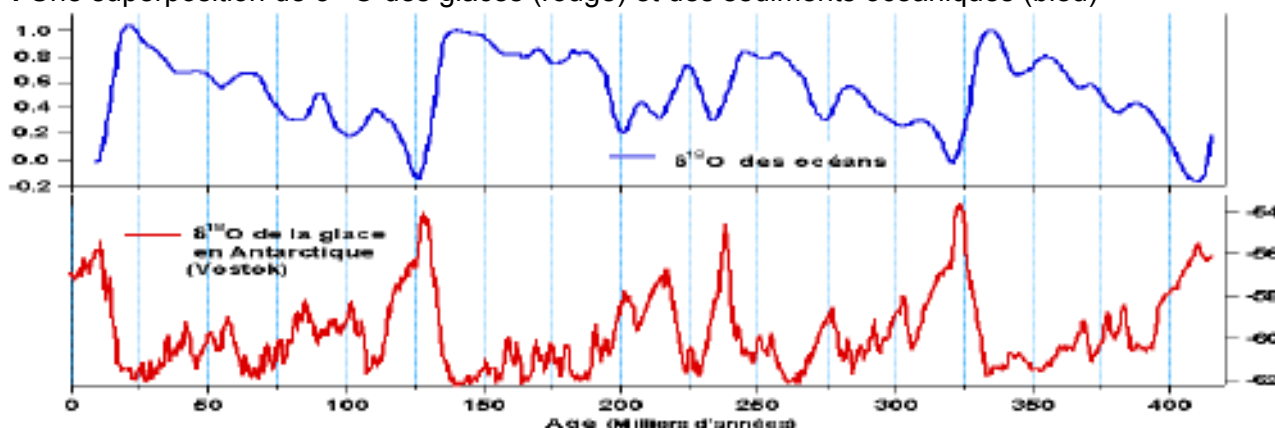
Doc. 6 : Le thermomètre isotopique



A gauche mesure du δ¹⁸O effectué en Arctique (en bleu) et du δD effectué en Antarctique (en bleu). Le fait d'avoir une relation linéaire entre les isotopes et la température prouve que ces isotopes peuvent être utilisés comme indicateurs de températures passées. De plus, cette corrélation fonctionne de façon inversée pour les carbonates (à droite) et peut également être utilisée pour des forages sédimentaires.

L'analyse des calottes glaciaires nous permet de déterminer les températures passées sur 800 000 ans au maximum (Antarctique). Mais cela suffit pour déterminer des cycles et leur intensité et pour imaginer leurs causes. Si ces événements climatiques sont superposables à des prélèvements réalisés ailleurs, par les mêmes méthodes ou par des méthodes différentes, on pourra alors conclure à un changement climatique global à l'échelle mondiale.

Doc. 7 : Une superposition de δ¹⁸O des glaces (rouge) et des sédiments océaniques (bleu)



D'après : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/delta-temperature.xml>

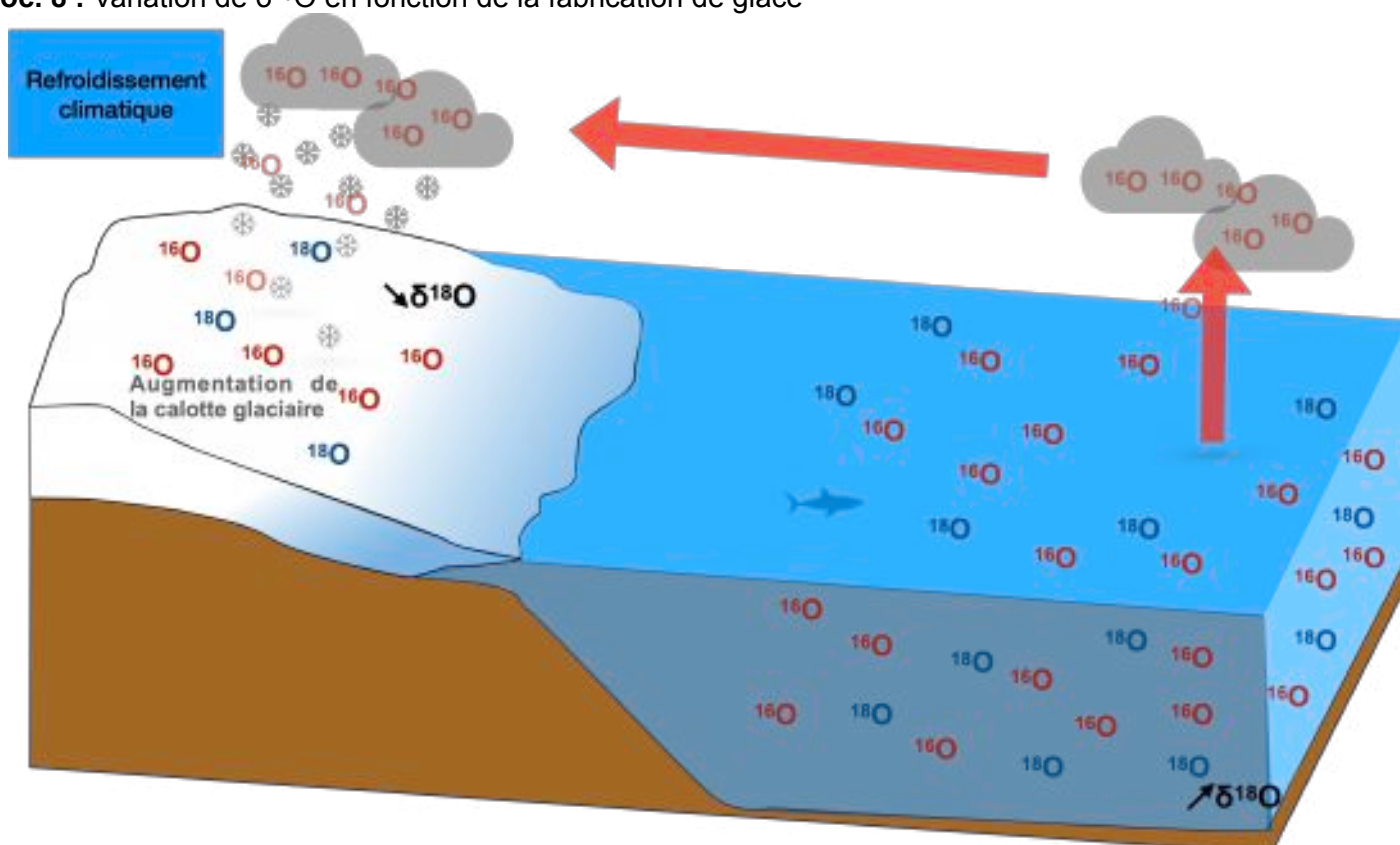
Si les mesures sont effectuées dans les glaces, on observe une diminution du δ¹⁸O en cas de diminution de température et une augmentation de δ¹⁸O en cas de réchauffement climatique.

Dans le cas de mesures réalisées dans des sédiments marins, c'est exactement l'inverse qu'on observe (si baisse de température : augmentation du δ¹⁸O et si augmentation de température : baisse de δ¹⁸O). Ceci s'explique par une plus grande concentration d'¹⁶O dans les glaces et en raison de la plus grande mobilisation de cet isotope dans la fabrication des nuages. Si l'eau contenue dans les précipitations ne retourne pas dans les

Variations climatiques passées

océans, et reste immobilisé dans les glaces, alors le $\delta^{18}\text{O}$ variera en fonction de la variation de balance entre ^{16}O et ^{18}O .

Doc. 8 : Variation de $\delta^{18}\text{O}$ en fonction de la fabrication de glace



L'analyse des calottes glaciaires nous permet de déterminer les températures passées sur 800 000 ans au maximum (Antarctique). Mais cela suffit pour déterminer **des cycles** et **leur intensité** et pour imaginer leurs causes. **Si ces événements climatiques sont superposables à des prélèvements réalisés à différents endroits à la surface de la Terre**, par la même méthode ou par des méthodes différentes, **cela conduira à conclure alors à un changement climatique global à l'échelle mondiale.**

Le δD se comporte de la même façon que le $\delta^{18}\text{O}$ au niveau des glaces.

2- Les indices sédimentaires

a) de périodes froides

Les **moraines** sont des sédiments typiquement glaciaires. Leur position en fonction des strates permet de localiser d'éventuels glaciers passés (idem pour des stries ou des blocs erratiques). Il en va de même pour les tillites qui sont des dépôts argilo-limoneux déposés lors de la fonte de glacier et qui cimentent des particules de différentes tailles qui ne sont pas ordonnées. Les moraines peuvent se transformer en tillites.

Le **loess** est un sédiment fin transporté principalement par le vent à des altitudes variables selon la granulométrie considérée, mais surtout signe de déserts froids périglaciaires.

Les **pergélisols (ou permafrost)** sont des sols gelés presque en permanence créant des motifs polygonaux lorsqu'ils subissent un léger dégel. De tels sols fossilisés sont évidemment des indices de périodes froides.

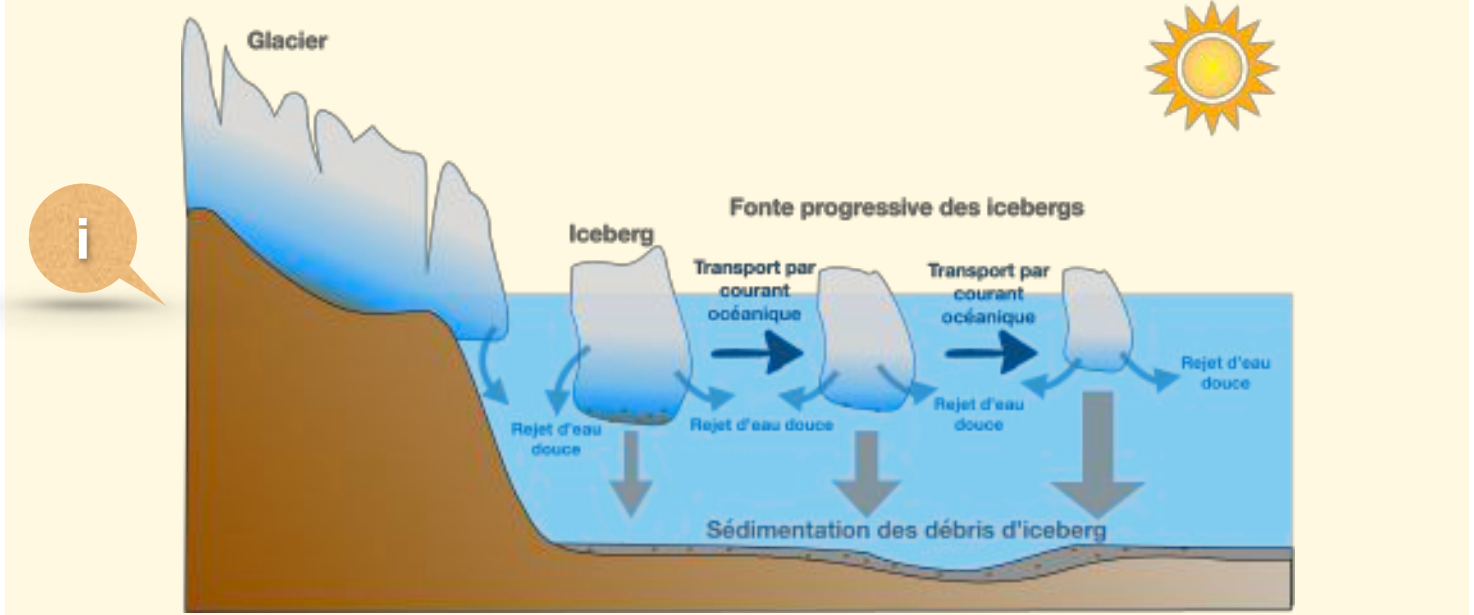
Complément : Les événements d'Heinrich

De grandes quantités de **sédiments polaires** peuvent apparaître à certains moments sur le plancher océanique et seraient dus à des débâcles importantes d'icebergs au cours des glaciations quaternaires (les IRD, Ice Rafted Debris, « débris de glace flottante »); Ces **événements sont qualifiés d'Heinrich** du nom de leur inventeur, et ont une périodicité d'environ 7000 ans. Ils auraient provoqué un refroidissement accru, sans doute en générant une baisse de

Variations climatiques passées

salinité à l'origine d'une baisse de la circulation océanique réduisant le transfert de chaleur de l'équateur vers les pôles.

Doc. 9 : Dépôts sédimentaires de débris d'Iceberg.



b) de périodes chaudes

Les **évaaporites** correspondent à des sels marins fossiles. Cela prouve une intense évaporation et la présence d'une faible tranche marine (comme les marais salants). Si de tels sédiments sont rencontrés, on peut supposer que des températures élevées régnaient alors dans cette région engendrant de ce fait une forte évaporation marine.

Les **charbons** : Ils correspondent à d'anciennes forêts tropicales ou équatoriales ce qui nous permet de les replacer dans ces zones climatiques. => Attention ! Les charbons peuvent également être formés à partir des forêts tempérées ou boréales. Tout dépend des espèces à l'intérieur.

La bauxite : Roche formée par l'altération de terrains tropicaux, dont les climats favorisent des précipitations importantes et une température élevée, ce qui provoque le lessivage des sols. Ce lessivage du sol se traduit par la libération d'oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium qui se concentrent sous un couvert végétal bien développé, donnant sa couleur caractéristique ocre (Baux de Provence). En pays tropical, si le couvert végétal disparaît, le sol est entraîné par ruissellement, ce qui donne une cuirasse impropre à la culture, appelée cuirasse latéritique.

La **précipitation des carbonates** est plus forte en période chaude alors qu'en période froide elle diminue.

Doc. 10 : Des exemples de roches témoins de climats chauds.

Variations climatiques passées



3- Les indices des paléorivages

Les **paléorivages** montrent une organisation particulière et peuvent être repérés par différents moyens :

- ▶ les sédiments s'accumulent partout au niveau océanique y compris sur le talus continental. Lorsque il y a des effondrements ou des glissement de terrains, on retrouve une organisation avec des particules grossières dans le fond et des particules fines en surface. Ce granoclassement donne un type de roche : les **flyshs**. Ces derniers nous indiquent donc l'emplacement de la bordure d'un talus continental.
- ▶ On peut aussi avoir d'autres indices comme des plages fossilisées révélant d'anciens domaines soumis au phénomène des marées et des mouvements des vagues et donc avec une faible profondeur marine. Ces études peuvent être accompagnées d'indices paléontologiques et sédimentaires qui nous confirmeront la profondeur de l'eau.
- ▶ Enfin il existe une organisation particulière selon les sédiments situés plus ou moins loin du rivage. Les sédiments aux particules les plus grosses sont proches du rivage et les plus fines éloignées et on trouve encore plus loin des calcaires. La superposition des sédiments renseignera sur des figures de **transgression** ou de **régression**. De telles formations peuvent aussi être repérées par sismique réflexion.

Grâce à cela, on peut retracer des lignes de paléorivages qui montrent des **variations du niveau des océans en fonction du temps**.

Or on sait que les calottes glaciaires jouent un rôle dans ces variations ainsi que la température globale des eaux. Si le niveau est plus haut que le niveau actuel, la période devait être plus chaude, tandis que si le niveau était plus bas, le climat devait être plus froid.

Définitions :

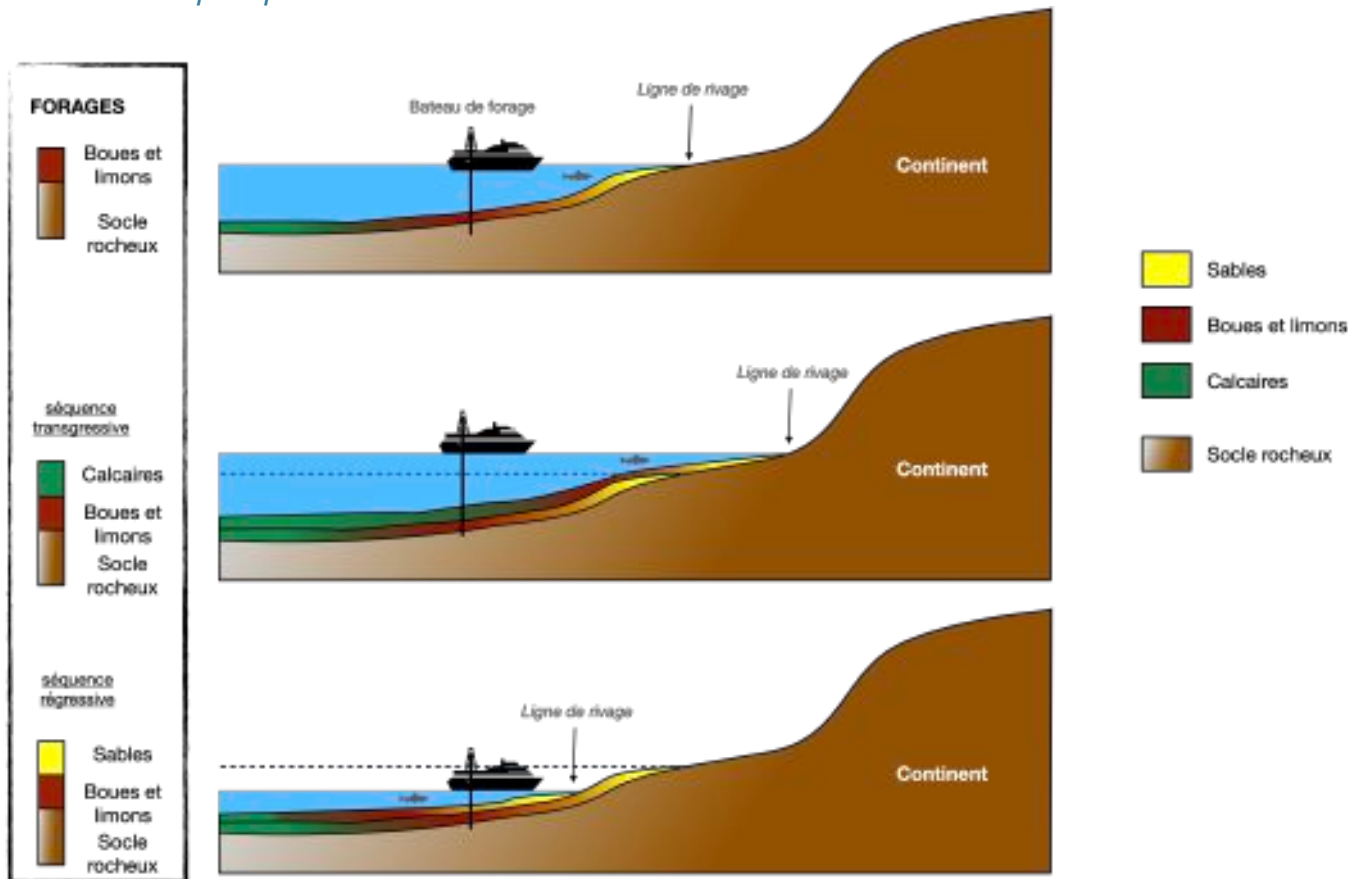


Eustatisme : C'est la variation du niveau moyen (ou « absolu ») des mers (relative par rapport aux continents supposés stables).

Transgression : C'est une avancée de la ligne de rivage sur le continent, provoquée par une élévation relative du niveau de la mer.

Régression : C'est le déplacement de la ligne de rivage en direction de la mer, résultant d'un abaissement relatif du niveau de la mer.

Doc. 11 : Séquence transgressive ou régressive.



D- Les indices paléontologique et paléo-écologiques

1- Les fossiles continentaux

Différents fossiles peuvent permettre de retracer des climats passés, comme ceux représentés dans les peintures rupestres. Cela permet de reconstituer une faune ou une flore et donc tout un paléoenvironnement dont l'adaptation révèle en partie les conditions climatiques qui régnaient à l'époque de ces fossiles. Nous ne nous focaliserons ici que sur 2 exemples tirés de fossiles végétaux :

a) Indices stomatiques

A partir de -300 millions d'années les feuilles des végétaux sont pourvues de stomates, structures grâce auxquelles les végétaux réalisent leurs échanges gazeux au niveau des feuilles. Des études expérimentales ont prouvé que l'indice stomatique dépend de la teneur en CO₂. Ainsi, plus l'air est riche en CO₂, plus l'indice stomatique est faible. A partir de l'indice stomatique d'une feuille fossile, il est donc possible d'évaluer la teneur en CO₂ atmosphérique à une époque donnée (le Ginkgo biloba est un bon représentant pour être étudié, car il est apparu il y a 260 MA et existe encore de nos jours).

b) La palynologie

Les **Angiospermes** et les **Conifères** sont des espèces productrices de **pollens** qui, du fait de leur **paroi (exine)** sont assez **résistants** à l'oxydation et peuvent donc être **aisément fossilisés ou conservés**, notamment lorsqu'ils sont piégés dans des **argiles** ou de la **tourbe**.

Ainsi, les sédiments lacustres renferment des informations concernant les climats passés. On observe que la végétation meurt et forme de la matière organique qui ne se dégrade presque pas (tourbière). Dans le même temps des ravinevements apportent plus de matière détritique.

Définitions :



Tourbe : C'est une matière organique fossile formée par accumulation sur de longues périodes de temps de matière organique morte, essentiellement des végétaux (sphaignes...), dans un milieu saturé en eau.

Tourbière : zone humide, colonisée par la végétation, dont les conditions écologiques particulières ont permis la formation d'un sol constitué d'un dépôt de tourbe. Le sol est saturé en permanence d'une eau stagnante ou très peu mobile et anoxique privant de décomposition et du

Variations climatiques passées

recyclage de la matière organique. La litière végétale s'accumule alors, progressivement, formant un dépôt de matière organique mal ou non décomposée : **la tourbe**.

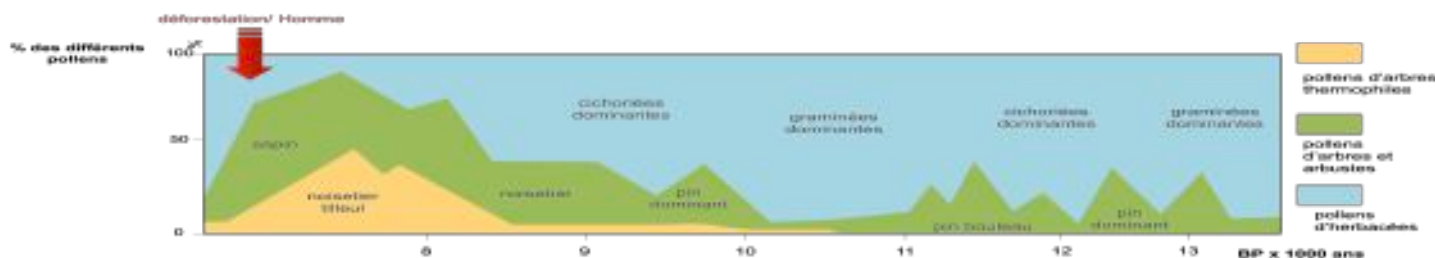
Palynologie : Partie de la botanique qui étudie les pollens actuels et fossiles.

Les grains de pollens sont remarquablement conservés (jusqu'à des millions d'années), d'une part grâce à leur enveloppe très résistante et d'autre part grâce aux propriétés conservatrices des tourbières. Ce sont des cellules reproductrices mâles dont l'enveloppe présente des motifs caractéristiques de l'espèce. On peut alors **reconstituer la flore de l'environnement et son évolution**. Comme l'implantation de la flore dépend du climat, on a alors des témoins de climats passés. En plus la matière accumulée sur les zones de tourbières permet de remonter le temps en forant en profondeur. On pourra alors avoir une alternance de paléoenvironnement.

On appelle **diagramme pollinique** un **diagramme reportant verticalement l'abondance des différentes espèces de pollens trouvée dans une série sédimentaire (souvent suite à un carottage)**.

Doc. 12 : Exemple de prélèvement et de diagramme pollinique.

Doc. 12 A : Diagramme pollinique



Doc. 12 B : Préférences climatiques des espèces du diagramme pollinique

actuels	préférences
noisetier et tilleul	climat tempéré [+3°C à + 18°C]
pin, bouleau et sapin	climat tempéré (continental et montagnard) [-10°C à + 5°C]
cichoriées (apparentées aux pissenlits) graminées (poacées)	climat froid et sec si la température augmente légèrement, les cichoriées deviennent dominantes / aux graminées, sinon ce sont les graminées qui dominent

D'après Bintz Bac TS 2004

2- Les fossiles Océaniques

De **nombreux organismes marins** sont de bons **bioindicateurs** des **conditions océaniques** dont ils supportent plus ou moins les **variations de température**, de **salinité**, d'agitation du milieu...

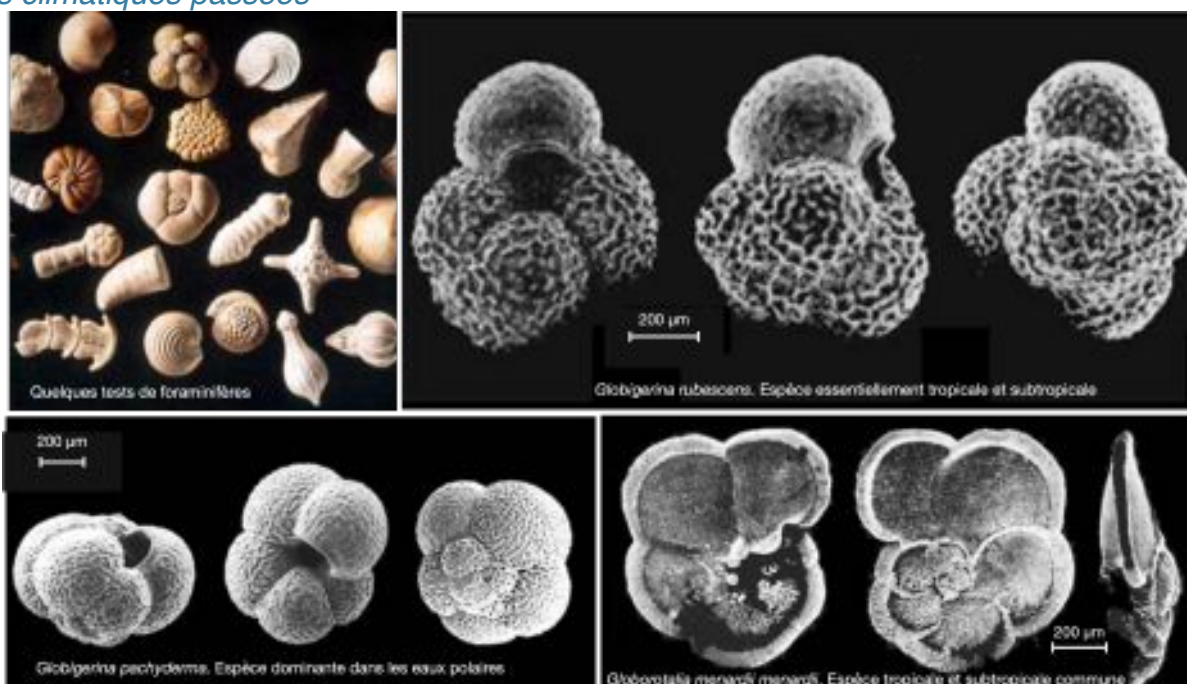
a) Les coraux

Les coraux sont des êtres dépendant actuellement des zones intertropicales. Ils vivent dans des conditions étroites de température et de salinité. **Si on est en période chaude, alors cette zone aura tendance à s'étendre**. A contrario, en période froide, la zone se restreint vers l'équateur.

b) Les foraminifères

Les **organismes à tests calcaires** sont particulièrement **intéressants** puisqu'ils produisent **d'importants sédiments** et de **nombreux fossiles**. Les **Foraminifères** sont un bon exemple d'organismes comportant des **espèces indicatrices du climat**.

Doc. 13 : Foraminifères indicateurs de climats

d'après [TP de terminale](#)

II- Les Causes des variations climatiques

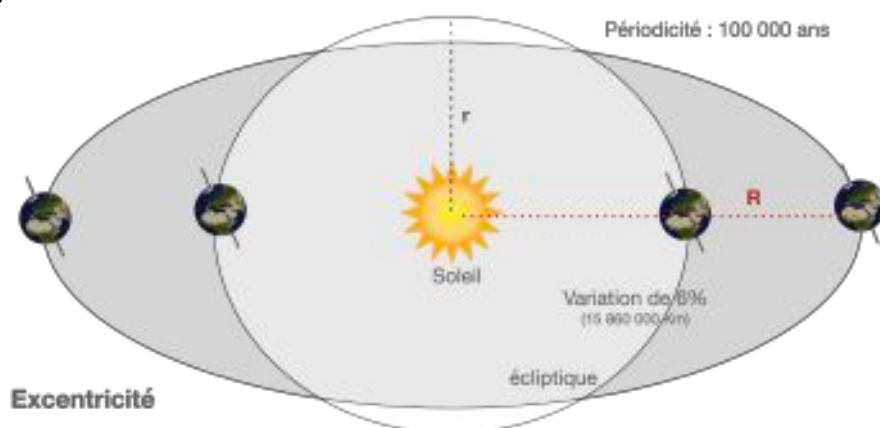
A- Les causes astronomiques du climat

Milankovitch en 1940, dont les travaux sont repris en 1988 par Berger, montre que le climat n'est pas stable au cours des temps et qu'il doit être dirigé par une commande astronomique du système solaire. De ce fait, l'ensoleillement reçu (aux latitudes Nord essentiellement=> dissymétrie des hémisphères) diffère suivant des périodicités dépendant de paramètres planétaires :

1- Excentricité de la révolution terrestre

Il existe une variation des paramètres de révolution de la Terre. Il s'agit d'une variation de rayons de l'ellipse de rotation de la Terre autour du soleil. Les différences enregistrées entre R et r peuvent varier de 0 à environ 6%, sur une périodicité de 100 000 ans soit une variation entre 0 (orbite de la Terre circulaire autour du Soleil) et 0.06 (l'écart est alors de 15 860 000 km entre les deux distances) sur 100 000 ans.

Doc. 14 : Excentricité



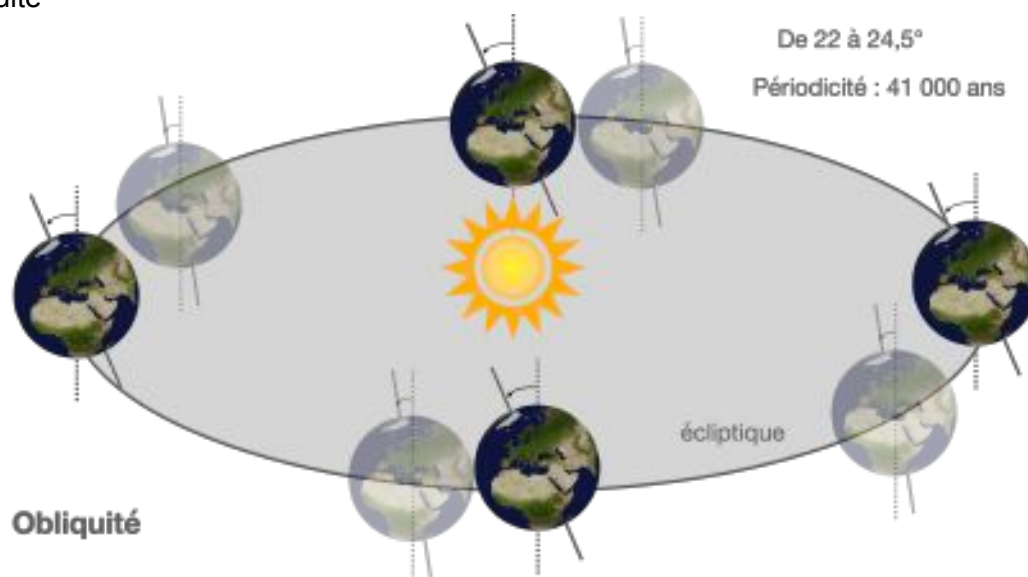
2- Obliquité de l'axe de rotation de la Terre.

L'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire par rapport au plan de l'écliptique. L'angle par rapport à cette verticale peut varier de 3° à $27^\circ \pm 1^\circ,3$. Sa périodicité est de 41000 ans.

Si l'axe est très incliné, alors on a des étés chauds et des hivers froids : **périodes interglaciaires**. Sinon, avec un axe moins incliné, on a des étés frais et des hivers moins froids : **périodes glaciaires**.

Variations climatiques passées

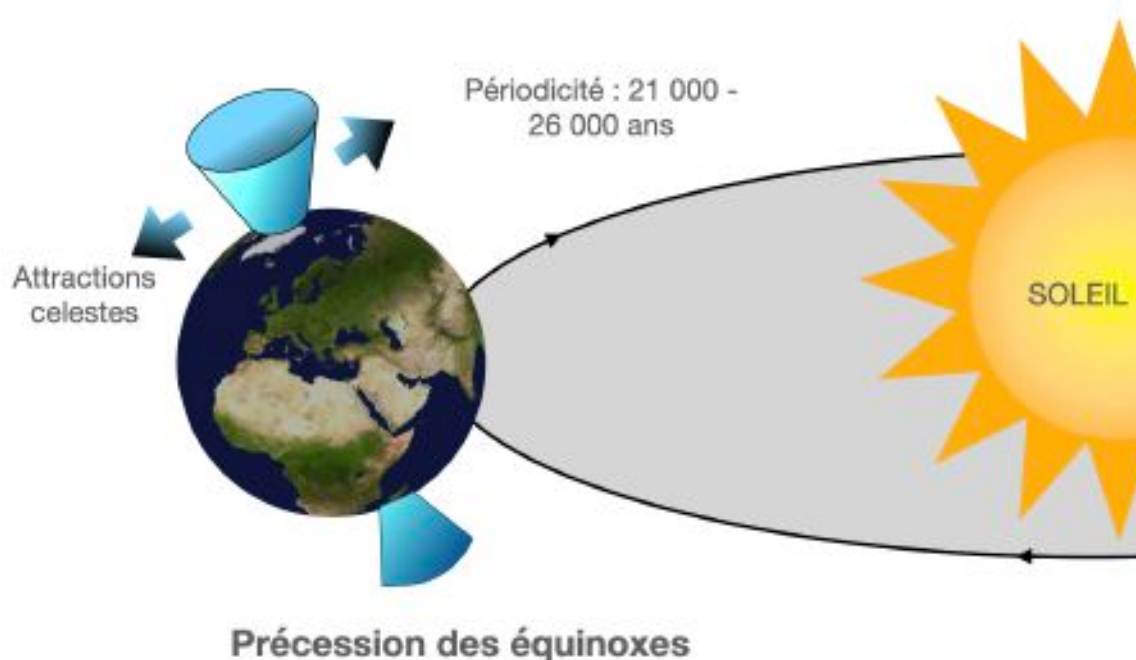
Doc. 15 : Obliquité



3- Précession des équinoxes

La terre n'est pas sphérique et a des attirances avec d'autres planètes (même mécanisme que les marées mais à l'échelle des planètes). Cette attirance provoque des bourrelets qui créent un cône de précession (phénomène de toupie). Cela peut engendrer des différences de présentation du pôle Nord ou Sud au soleil. Sa périodicité est de 21000 ans (de 19000 à 23000 ans).

Doc. 16 : Précession des équinoxes



B- Les phénomènes amplificateurs ou boucles de rétroaction

1- L'albédo

Si la glace et la neige n'ont pas fondu pendant l'été, alors une plus grande quantité d'énergie sera réfléchiée vers l'espace. C'est un effet boule de neige (ou amplificateur) qui a pour conséquence d'accélérer le refroidissement. L'inverse est également vrai. Ce phénomène est à relier à l'albédo. L'albédo est le pouvoir réflecteur d'un corps et se traduit par $A = \text{quantité d'énergie réfléchiée} / \text{Energie reçue}$. Ainsi la glace et la neige possède un albédo élevé alors que les sols, les forêts et les mers possèdent un albédo faible.

Variations climatiques passées

A noter qu'une éruption volcanique générant beaucoup de cendres ou même un impact météoritique générant beaucoup de poussières atmosphériques augmente l'Albédo global de la Terre, entraînant un refroidissement.

2- Les gaz à effet de serre (GES)

Les gaz à effet de serre peuvent par leur concentration atmosphérique accentuer un phénomène climatique. Si on prend l'exemple du CO₂, alors en période chaude le CO₂ se dissout moins facilement dans l'eau de mer qu'en période moins chaude. Le CO₂ aura alors plus tendance à diffuser vers l'atmosphère, ce qui augmentera l'effet de serre et amplifiera le phénomène.

C- Les causes géologiques modifiant les climats sur de très grandes échelles.

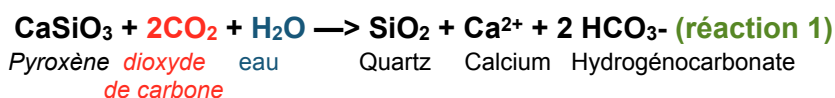
Les mécanismes des variations climatiques aux grandes échelles de temps impliquent des variations importantes dans la teneur en gaz à effet de serre de l'atmosphère. Quatre mécanismes principaux expliquent ces variations climatiques importantes :

- ▶ le **piégeage de la matière organique** (roches carbonées) faisant baisser significativement la teneur en CO₂ atmosphérique générant une baisse thermique.
- ▶ l'émission de CO₂ par l'**activité volcanique** (volcans et/ou rifts) et la **tectonique des plaques**.
- ▶ l'apparition de **grand relief** et l'augmentation de l'**altération** des roches
- ▶ la **production massive de sédiments**

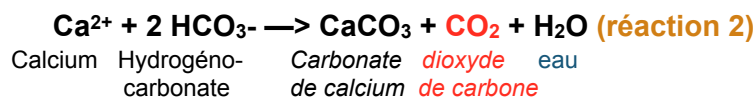
Quelques réactions chimiques élémentaires et caractéristiques de processus d'altération ou de formation de roches permettent de comprendre ces mécanismes de libération ou de consommation de CO₂.

Quelles sont les équations à savoir ?

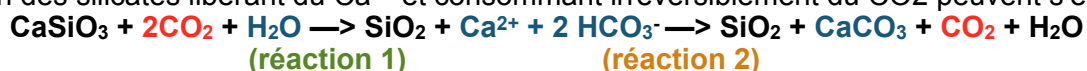
L'altération des silicates des roches magmatiques ou métamorphiques consomme du CO₂ gazeux de l'atmosphère. Prenons par exemple l'érosion d'un pyroxène calcique cette réaction s'écrit :



Au niveau des océans, il existe des réactions qui libèrent du CO₂ comme par exemple celle de la précipitation des carbonates :



Le bilan de l'altération des silicates libérant du Ca²⁺ et consommant irréversiblement du CO₂ peuvent s'écrire :

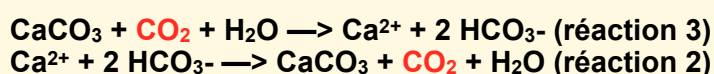


Le bilan montre que deux molécules de CO₂ sont utilisées et qu'une seule est libérée

Complément : Comprendre les processus géologiques d'altération et de sédimentation

Les processus chimiques impliquant la formation ou l'altération des roches, qui libèrent ou consomment du CO₂, jouent un rôle important dans la régulation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère aux grandes échelles de temps. Quelques réactions élémentaires et caractéristiques de processus d'altération ou de formation de roches permettent de comprendre ces mécanismes de libération ou de consommation de CO₂.

A la surface des continents l'altération des carbonates et des silicates consomme du CO₂. L'exemple le plus simple est la dissolution des carbonates:



Les réactions de dissolution-précipitation des carbonates (réaction 2 et 3) se compensent s'il n'y a pas d'apport ou de départ d'ions Ca²⁺ et ne changent pas de manière majeure la teneur en CO₂ de l'atmosphère sur des échelles de temps de plusieurs millions d'années.

Variations climatiques passées

Quelques ordres de grandeur :

- 1 kg de CaCO₃ contient 440 g de CO₂ ; les calcaires déposés à l'Urgonien dans les Alpes forment une couche d'épaisseur 200 m occupant une surface de 300 km X 50 km;
- l'ensemble des calcaires sur Terre représente une quantité équivalente de CO₂ de 4.10²⁰ kg. La formation des carbonates et des roches carbonées depuis le début de l'histoire de la Terre a fait chuter la quantité de CO₂ de l'atmosphère de plusieurs ordres de grandeur et donc diminuer de façon importante l'effet de serre.

III- L'histoire climatique de la Terre au Phanérozoïque (de -541 MA à aujourd'hui)

A- Alternance glaciaire et interglaciaire du Quaternaire (de -2,58 MA à nos jours)

Cette période est en fait la dernière partie du Cénozoïque. Elle est caractérisée par une **alternance régulière de périodes glaciaires et interglaciaires** mises en évidence grâce au thermomètre isotopique : δ¹⁸O des glaces, aux concentrations en GES des bulles d'air des glaces, et confirmée par les indices préhistoriques nombreux à cette période marquée par l'apparition et le développement du genre Homo.

Ces alternances s'expliquent par une **variation de la quantité d'énergie solaire reçue par la Terre** selon les **paramètres astronomiques découverts par Milankovitch**. On remarque donc de grandes périodes de glaciation d'environ 100 000 ans alternant avec des brèves périodes de réchauffement (périodes interglaciaires) d'environ 20 000 ans. Au sein des périodes glaciaires, on observe des réchauffements et refroidissements plus brefs et de moindre ampleur présentant une périodicité de 40000 ans et 20000 ans qui correspondent aux cycles de variation des paramètres orbitaux de la Terre. Le dernier maximum glaciaire s'est produit il y a 20 000 ans.

La variation de l'insolation initie des périodes de refroidissement ou de réchauffement qui sont amplifiées par des **boucles de rétroactions** impliquant l'**albédo des calottes glaciaires et la solubilisation du CO₂** dans les océans engendrant des **sorties et des entrées rapides en période glaciaire**.

B- Les variations du Cénozoïque (de -65 Ma à aujourd'hui)

Les différents indicateurs montrent que le climat s'est refroidi surtout au cours des 30 derniers millions d'années. Au cours de cette période, la dynamique lithosphérique a permis la surrection de puissantes chaînes de montagnes : la chaîne Alpine et Himalayenne par exemple. La Terre est ainsi passée d'une configuration sans calottes (il y a -65MA), dite « *Greenhouse* », de **climat chaud**, à une configuration avec calottes, dite « *Icehouse* », de **climat froid**.

Doc. 17 : Le cénozoïque



D'après [wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9nozo%C3%AC99)

Ces chaînes de montagnes, au fur et à mesure de leur croissance, subissent l'érosion. C'est ainsi que **l'altération de certains minéraux consomme du CO₂**, faisant baisser sa concentration, et donc la température.

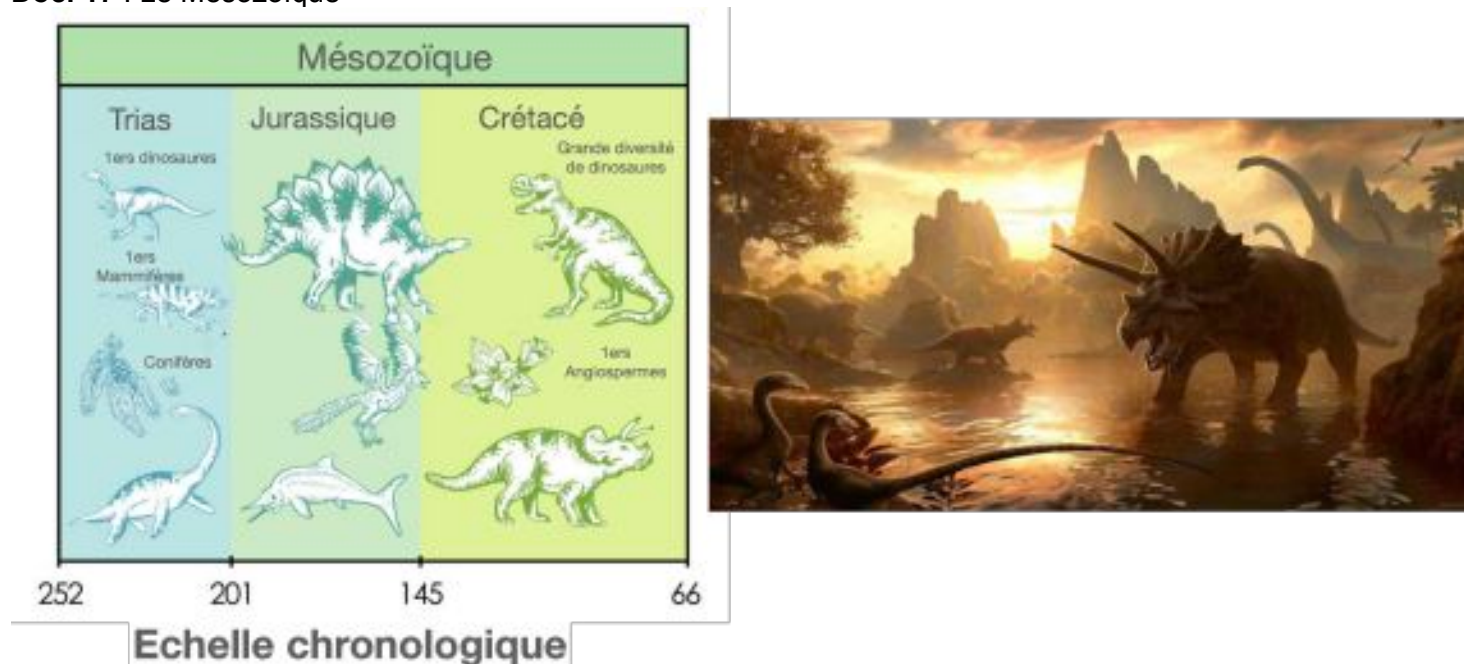
Variations climatiques passées

Il faut aussi considérer la **tectonique des plaques** qui a permis de modifier la circulation océanique grâce à l'ouverture et l'interconnexion des océans. A partir d'environ **50 Ma**, la **température des eaux océaniques profondes a chuté progressivement de 14-15°C** pour atteindre **2°C** de nos jours. Ce phénomène traduit un **refroidissement global de l'ensemble de la masse océanique**, accompagnant le refroidissement global du climat et témoigne de la mise en route de la **circulation océanique moderne**. Ainsi, la circulation océanique globale (thermohaline), mettant en place un brassage global des océans, n'a pu se réaliser qu'à la suite de l'interconnexion des 3 océans : Pacifique, Atlantique et Indien.

C- La période chaude du Mésozoïque (de - 252 MA à -65 Ma)

Les indicateurs (thermomètre isotopique et l'étude des fossiles) montrent qu'**au Crétacé** les températures au pôle Nord étaient supérieures de 30°C aux températures actuelles. **Le Crétacé est d'ailleurs sans doute l'une des périodes les plus chaudes de toute l'histoire de la Terre.**

Doc. 17 : Le Mésozoïque



Les données géologiques (importante accumulation de roches calcaires, évaporites, bauxites ...), les données paléontologiques et paléobotaniques (extension des flores et faunes tropicales dont les coraux à de hautes latitudes) témoignent d'une hausse générale de température atmosphérique et océanique. A cette époque, les calottes glaciaires n'existaient pas. On estime que la température moyenne était 4 à 5°C au dessus de la température actuelle.

C'est l'expansion océanique qui gouverne essentiellement le climat de cette époque ainsi que la tectonique des plaques. Le taux de CO₂ a alors particulièrement augmenté (jusqu'à 5 fois le taux actuel).

D- Le Paléozoïque (de - 541 MA à -252 Ma)

Lors de l'ère **paléozoïque**, tous les continents étaient soudés en un vaste continent unique : la Pangée. Celui-ci résulte de collisions successives des blocs continentaux soumis à la tectonique des plaques. Les zones de sutures ont constitué **des ceintures orogéniques dont la chaîne varisque (ou hercynienne = Chaînes de montagnes)** s'achève au **Carbonifère** (en Europe ; massif central, vosges, sud du massif armoricain; aux US : les Appalaches), **entre -350Ma et -250Ma**. L'**altération de la chaîne hercynienne** participe activement au **piégeage de CO₂ atmosphérique**.

Variations climatiques passées

Doc. 17 : Le Paléozoïque. Exemple du carbonifère : coupe d'une forêt tropicale au Carbonifère

On voit qu'en altitude, certaines espèces peuvent s'acclimater au froid



D'après www.evolution-biologique.org

Le Carbonifère (-300 Ma) tient son nom de la grande quantité de **charbon** qui s'est formée à cette période (donc climat humide, chaud à tempéré). Les gisements ont livré des fossiles de fougères arborescentes telles qu'on en observe actuellement en climat chaud et humide (principe de l'actualisme). Ce climat a donc été propice au développement d'une grande forêt luxuriante, la **forêt houillère**, produisant énormément de **matière organique qui s'est transformée en charbon** lors de son enfouissement. Piégeant ainsi le CO₂ et donc **faisant baisser la température globale**.

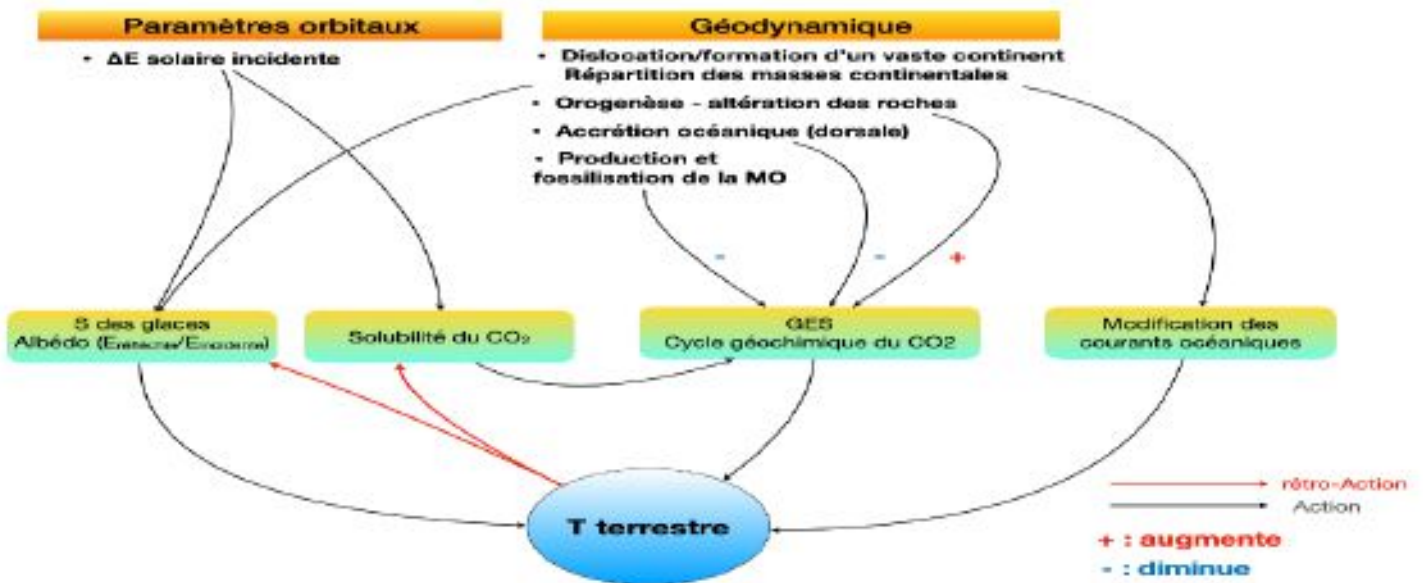
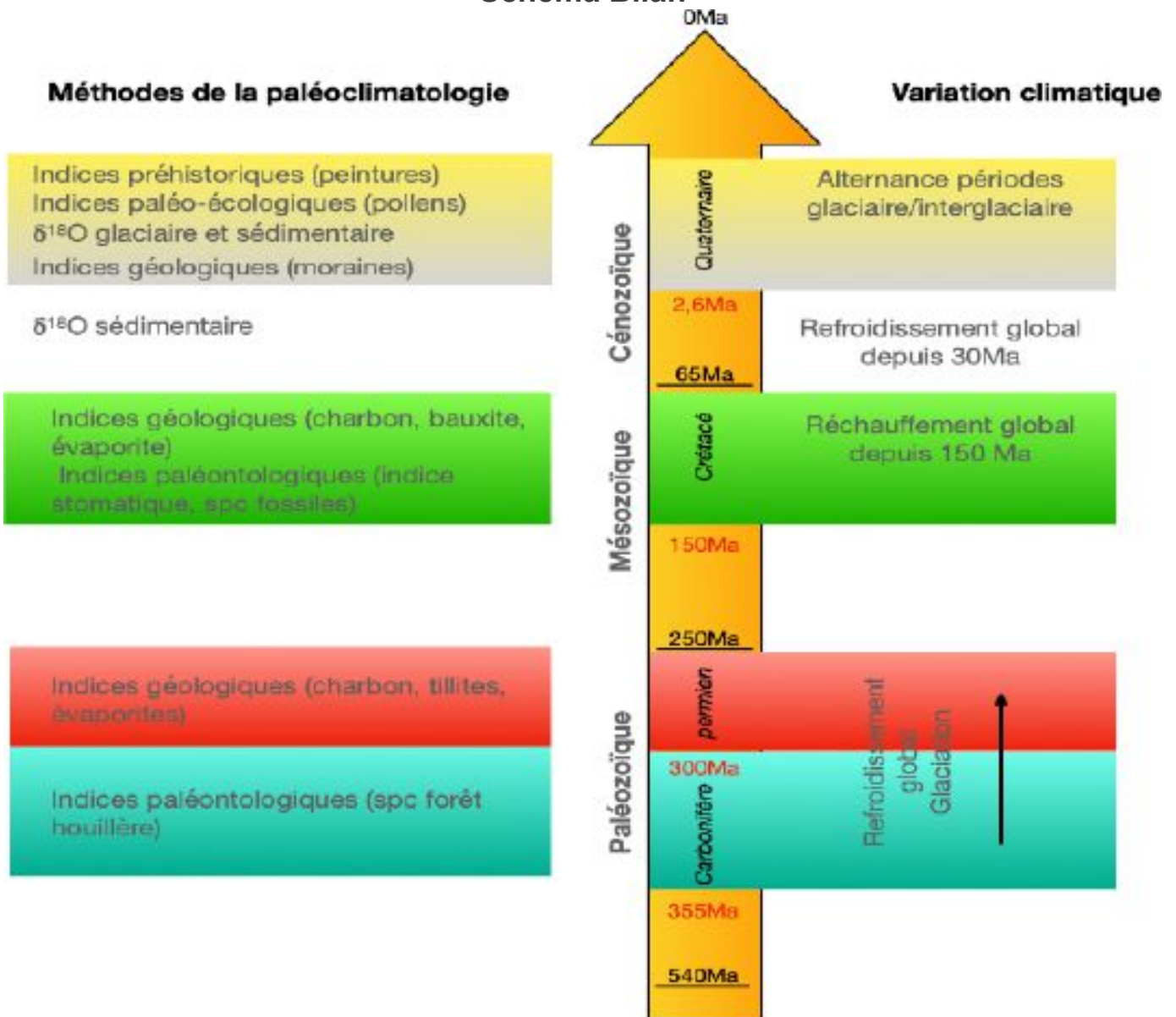
Par conséquent, même si la France était en régime équatorial durant la période Carbonifère-Permien, globalement, le climat était froid et se refroidissait.

Conclusion

Grâce à notre connaissance des climats passés, nous pouvons analyser les perturbations climatiques et leur causes passées. **Depuis plusieurs centaines de milliers d'années, jamais la concentration du CO₂ atmosphérique n'a augmenté aussi rapidement qu'actuellement.**

La prévision des climats du futur est un enjeu scientifique (mais aussi économique et social). Il fait l'objet de conventions, d'accords et de protocoles internationaux. L'identification des paramètres qui contrôlent le climat de la Terre tout au long de son histoire est essentiel pour construire des modèles de l'évolution du climat dans le passé mais aussi dans le futur. La relation entre température moyenne de la surface de la Terre et concentration en gaz à effet de serre est observée tout au long de l'histoire de la Terre. Les scénarios d'évolution de la température moyenne de la Terre qui, mis à part la variabilité naturelle du climat, prennent en compte l'impact de l'activité humaine, suggèrent un réchauffement au cours du XXI^e siècle de l'ordre de 2 à 5 °C. Ce réchauffement à l'échelle du siècle se superpose à un refroidissement constant de plus grande ampleur commencé il y a vingt millions d'années.

Schéma Bilan

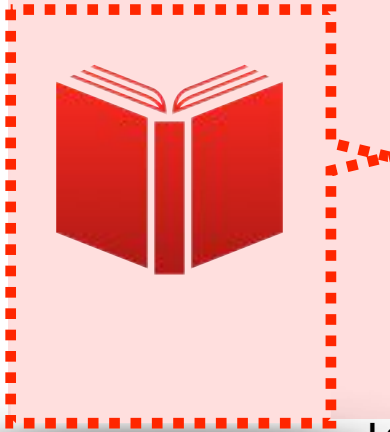


D'après Alban Caillette, lycée Ronsard, Vendôme

Fiche de révision pour mieux réussir

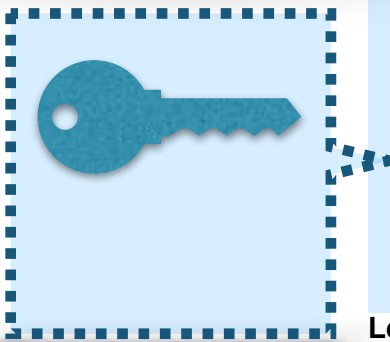
Problèmes du chapitre : Comment reconstituer les variations climatiques passées ? Les variations observées sont elles locales ou mondiales ? Comment choisir une méthode fiable en fonction de l'époque étudiée ? Quels ont été les climats passés ?

Les définitions à connaître :



- ★ Actualisme
- ★ Moraines, tillites, blocs erratiques
- ★ Inlandsis, iceberg, glacier, banquise
- ★ Paléothermomètres
- ★ $\delta^{18}\text{O}$, δD , SMOW et PDB1
- ★ Loess, pergélisols
- ★ Évaporites, charbons, bauxite
- ★ Paléorivages, eustatisme, transgression et régression
- ★ Indice stomatique
- ★ Palynologie, diagramme pollinique, tourbe
- ★ Fossiles, coraux, foraminifères
- ★ Excentricité de la révolution, obliquité, précession des équinoxes
- ★ Albédo
- ★ Gaz à effet de serre
- ★ Phanérozoïque, Cénozoïque, mésozoïque, paléozoïque

Les notions clés à maîtriser (à savoir expliquer) :



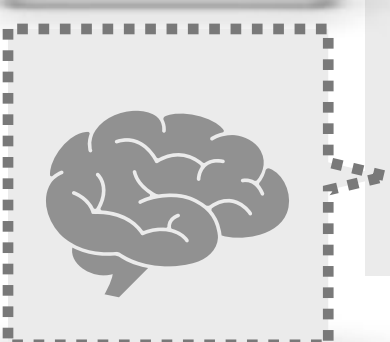
- ★ Actualisme
- ★ Indicateurs de climats passés : indices préhistoriques, géologiques, paléontologiques
- ★ Paléothermomètre et $\delta^{18}\text{O}$
- ★ Palynologie
- ★ Les causes astronomiques de Milankovitch
- ★ Les boucles de rétroaction positive ou phénomènes amplificateurs
- ★ Les causes géologiques des changements climatiques à grande échelle : Tectonique, altération des roches et précipitation sédimentaire
- ★ Les variations climatiques du Phanérozoïque et leurs causes

Les méthodes et compétences travaillées



- ★ ECE
- ★ Actualisme
- ★ $\delta^{18}\text{O}$, δD
- ★ Palynologie (microscope et prise de photos + détermination)
- ★ Indices stomatiques (microscope et prise de photos)
- ★ Utilisation de Mesurim, de tableurs pour construire des graphes

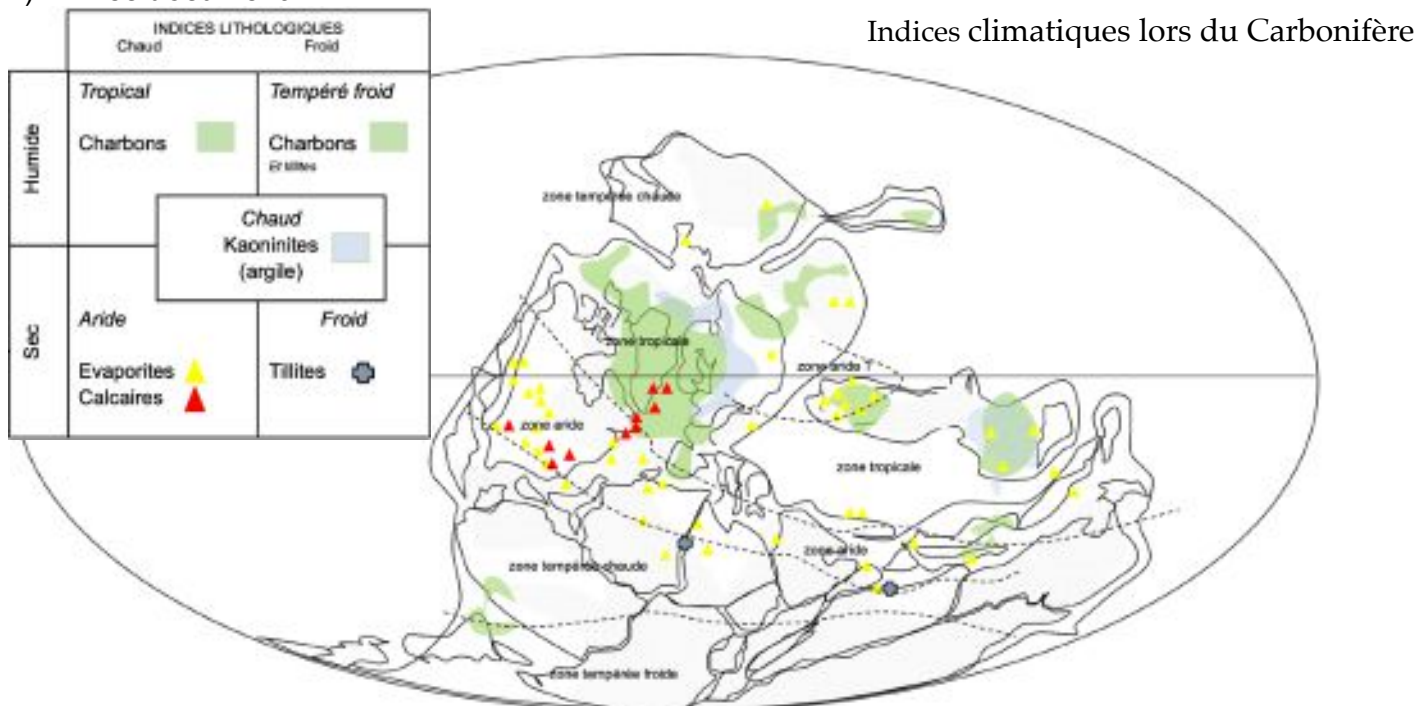
Pour mieux mémoriser ou s'entraîner:



- ★ L'essentiel dans votre livre p252 à 254 + Exercices se tester p 256
- ★ Carte de mémorisation Anki
- ★ S'entraîner à expliquer les grands principes de détermination de climats passés ($\delta^{18}\text{O}$, palynologie...)
- ★ S'entraîner à des exercices impliquant l'ensemble des archives climatiques
- ★ ECE : palynologie, indices stomatiques
- ★ QCM p256
- ★ Exercice type bac dans votre livre p258 et 259

Exemples de sujets de synthèse :

- 1) Après avoir rappelé quels sont les différents indices permettant de repérer des minima ou maxima climatiques, vous expliquerez les mécanismes qui modifient les climats.
- 2) Avec document :



A l'aide du document et de vos connaissances, expliquer les grands mécanismes impliqués dans la régulation du climat au paléozoïque (ici carbonifères) et les différentes zones climatiques.

Le climat mondial en 2017

Sélection d'anomalies climatiques significatives



Source : NOAA, State of the Climate 2017

AFP