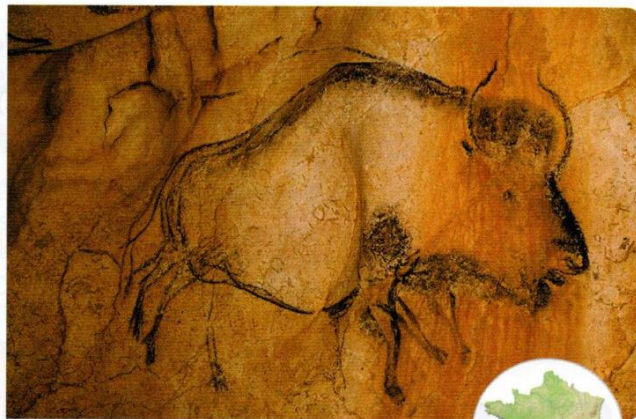


# Des peintures des Hommes du paléolithique

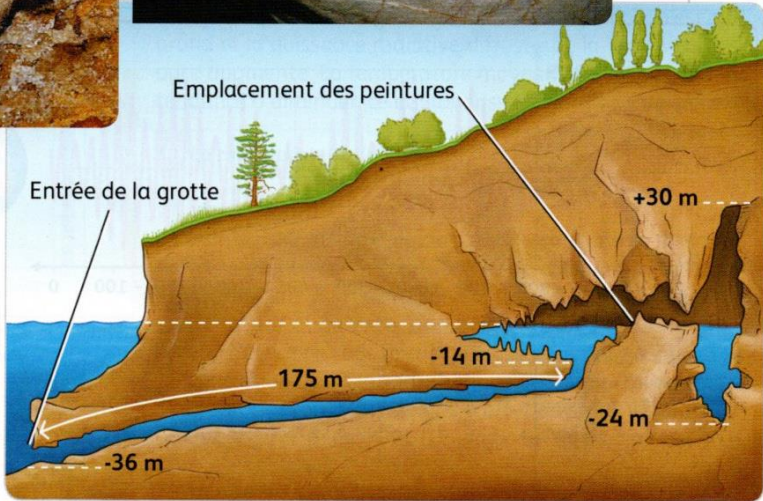
**Q:** quelles informations climatiques sont apportées par ces peintures rupestres de la grotte Chauvet et Cosquer?



**La grotte Chauvet (Ardèche) et ses peintures.** Dans cette grotte fréquentée par des humains entre -37 000 et -28 000 ans, on peut observer environ 400 peintures et gravures représentant un grand nombre d'animaux typiques des régions de toundras.



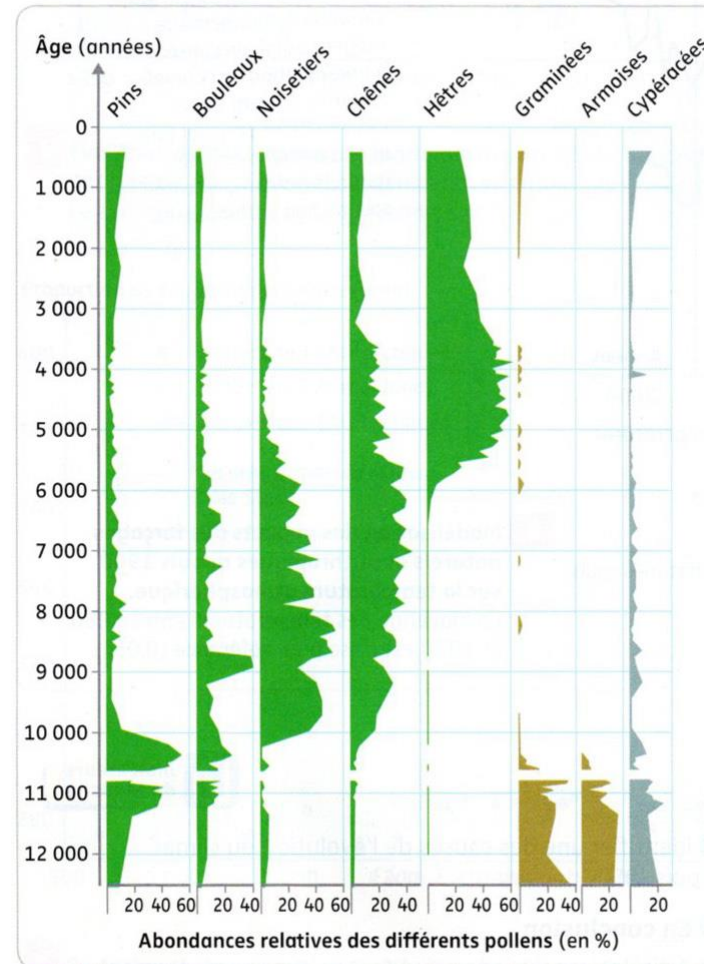
**La grotte Cosquer (Bouches-du-Rhône) et ses peintures.** Cette grotte, dont l'entrée est actuellement située à 36 m sous le niveau de la mer, a été fréquentée par des humains entre -27 000 et -19 000 ans (il n'existe aucun autre accès à la grotte que celui indiqué sur le schéma).



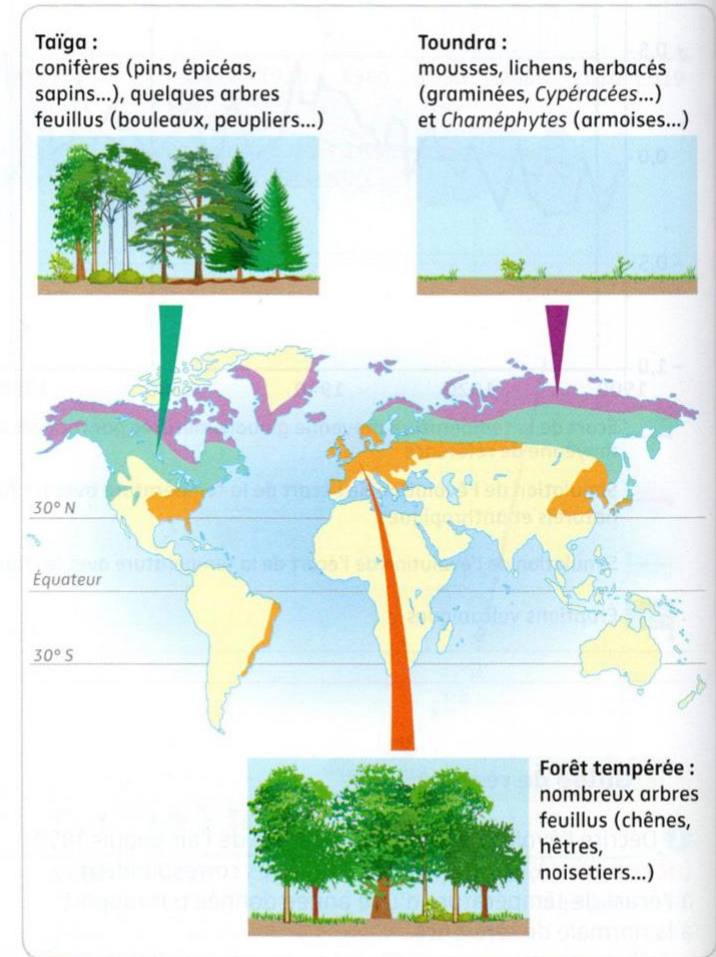
Les pollens fossiles, indices des climats de l'Holocène ( de -11700 ans à nos jours)

voire TP Palynologie

La palynologie, étudie les grains de pollens retrouvés dans des sols anciens. En déterminant à quelles espèces appartiennent les grains de pollens retrouvés, on peut avoir une idée du climat régional à différentes époques.



**1** Diagramme pollinique de la tourbière de la Roche Gourgon (Loire). Il s'agit d'une représentation graphique des proportions des pollens de différentes espèces en fonction de la profondeur et donc de l'âge.



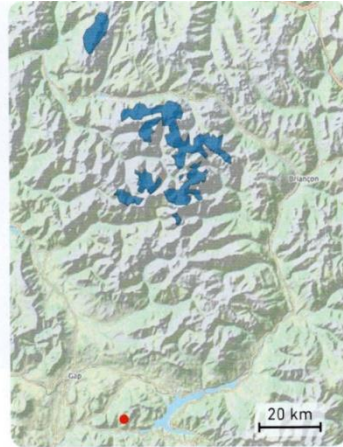
**2** Trois exemples de biomes et leurs végétations dominantes.

# Sédimentologie et indices glaciaires

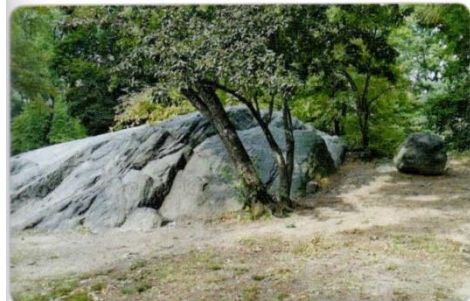
**Q:** expliquez comment les indices de terrain permettent de reconstituer les conditions climatiques qui régnaient au Pléistocène.



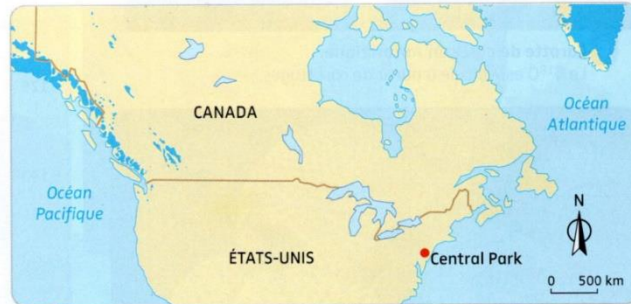
**3** Affleurement de « La salle de bal des demoiselles coiffées » (Hautes-Alpes). Ce terrain, daté du Pléistocène (entre -125 000 et -11 000 ans), est constitué d'éléments allant de la taille d'un grain de sable à des blocs de plusieurs mètres.



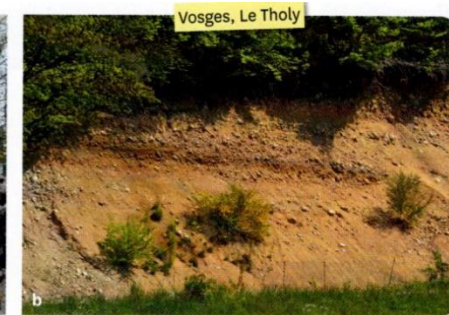
**4** Localisation de l'affleurement de « La salle de bal des demoiselles coiffées » (point rouge). Les surfaces colorées en bleu correspondent aux emplacements actuels des glaciers de la région.



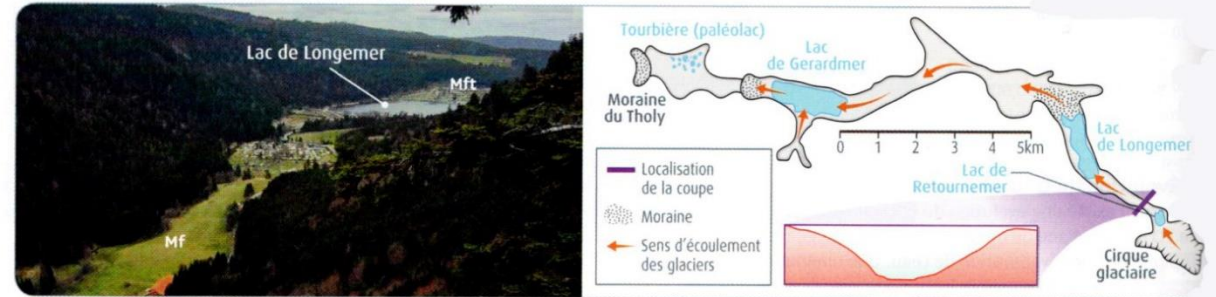
**5** Deux blocs erratiques dans Central Park (New York, USA). Les scientifiques estiment que le dépôt de cette roche s'est produit entre -75 000 et -11 000 ans.



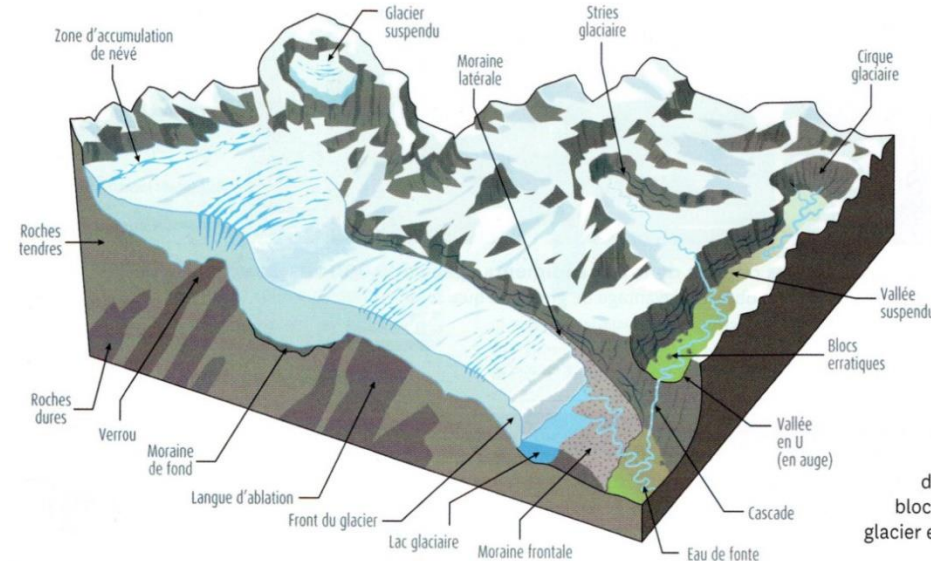
**6** Localisation de Central Park (point rouge). Les surfaces colorées en bleu correspondent aux emplacements actuels des glaciers les plus proches.



**1** Roche moutonnée et stries glaciaires (a). Moraine datée du pléistocène supérieur (b).



**2** Carte de la vallée de la Cleulie et coupe au niveau de la vallée en auge de Longemer. Le lac de Longemer s'est mis en place dans une dépression creusée par la langue glaciaire après sa fonte. Il est difficile de se rendre compte du volume de glace accumulé entre le cirque glaciaire et la moraine frontale du Tholy lors du dernier maximum glaciaire il y a à peu près 20 000 ans. Il peut être déterminé à partir du volume des vallées. Mft moraine frontale; moraine de fond: Mf.

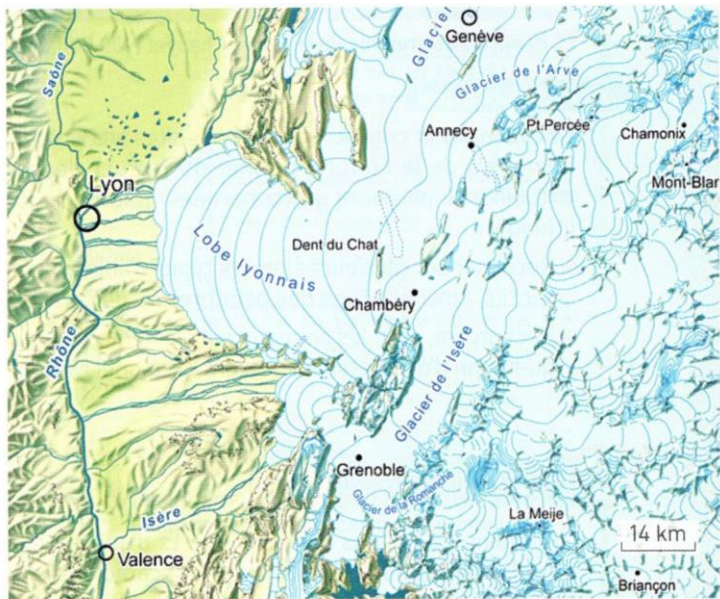


### 3 Un paysage glaciaire.

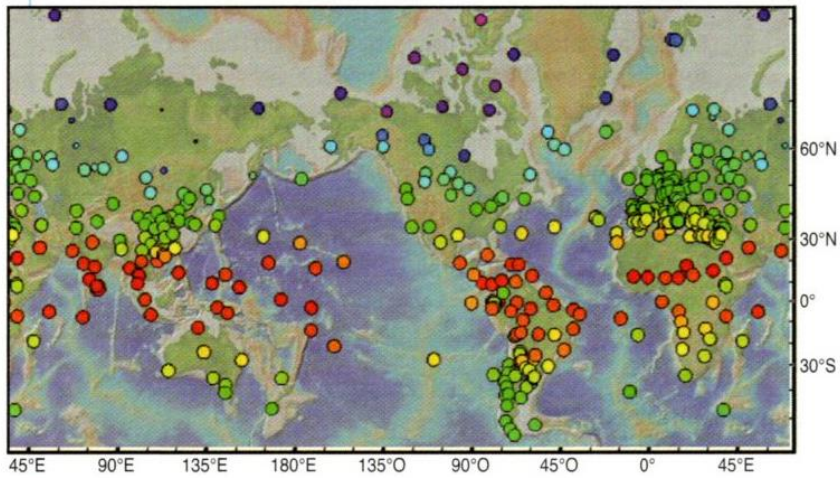
On retrouve en France des traces de glaciers qui recouvraient une grande partie de l'Europe au Pléistocène. L'érosion glaciaire creuse des vallées en U et se manifeste aussi par des surfaces polies arrondies (roches moutonnées) souvent striées par les blocs de roche enchâssés dans la glace lors de son déplacement.

Les moraines sont des accumulations des roches arrachées par le glacier. Les blocs erratiques ont été transportés par le glacier et laissés en place après sa fonte.

Représentation de la Terre il y a 21000 ans

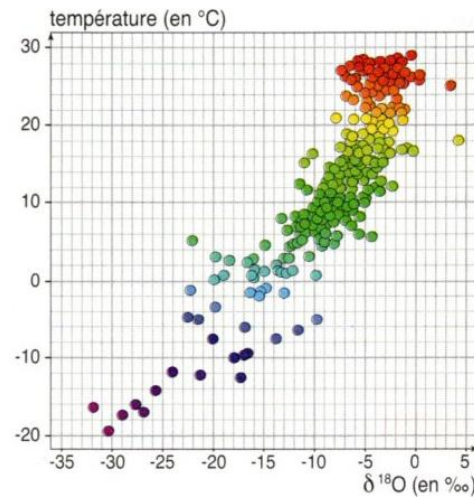


Extension des glaciers du nord des Alpes lors du dernier maximum glaciaire.



**a** Localisation des différents sites de mesures. Les couleurs indiquent les températures moyennes mesurées (voir *graphe b*).

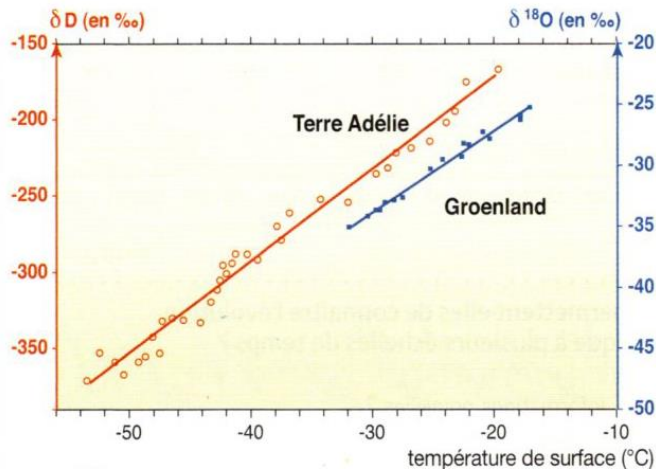
• L'élément oxygène existe sous deux formes isotopiques  $^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$ . L'eau est donc un mélange de molécules de  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  (99,8%) et de  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  (0,2%). Les physiciens utilisent des **spectromètres de masse** pour mesurer ces proportions. Ils établissent alors le **rapport  $\delta^{18}\text{O}$**  en comparant le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  dans la glace (ou dans l'eau) à un



**b** Relation entre  $\delta^{18}\text{O}$  et température pour les différents lieux indiqués dans le document a.

rapport de référence (le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  moyen des océans). En analysant des données provenant de multiples sites (*carte a*), ils ont pu établir une corrélation entre la valeur du  $\delta^{18}\text{O}$  dans la neige (ou l'eau) et la température atmosphérique au moment de la précipitation (*graphe b*).

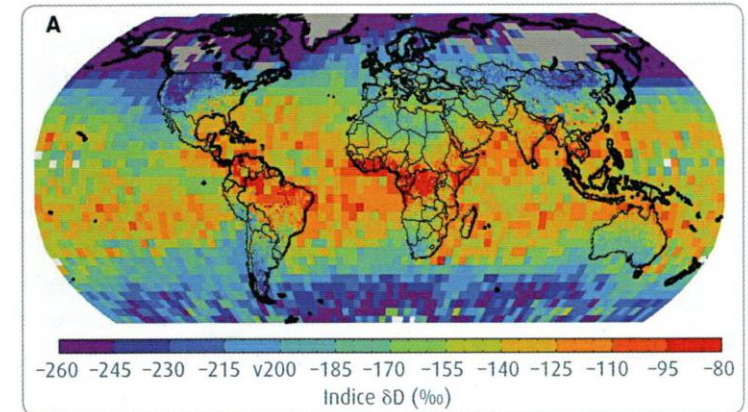
• Le « calibrage » du thermomètre isotopique au Groenland et en Antarctique



• Outre le  $\delta^{18}\text{O}$ , Les glaciologues utilisent également un autre rapport isotopique pour déterminer les paléotempératures : c'est le  $\delta\text{D}$  (rapport entre les isotopes de l'hydrogène  $^1\text{H}$  et  $^2\text{H}$  ou deutérium). Sur le *graphe*, les points représentent les moyennes annuelles de la température et de la composition isotopique des précipitations (neige) mesurées en différents endroits des régions polaires.

• On peut penser que la corrélation entre  $\delta^{18}\text{O}$  (ou  $\delta\text{D}$ ) et température était la même par le passé. Ces rapports isotopiques peuvent donc constituer des « paléothermomètres » pour déterminer les températures du passé

## Thermomètres isotopiques (voire TP)

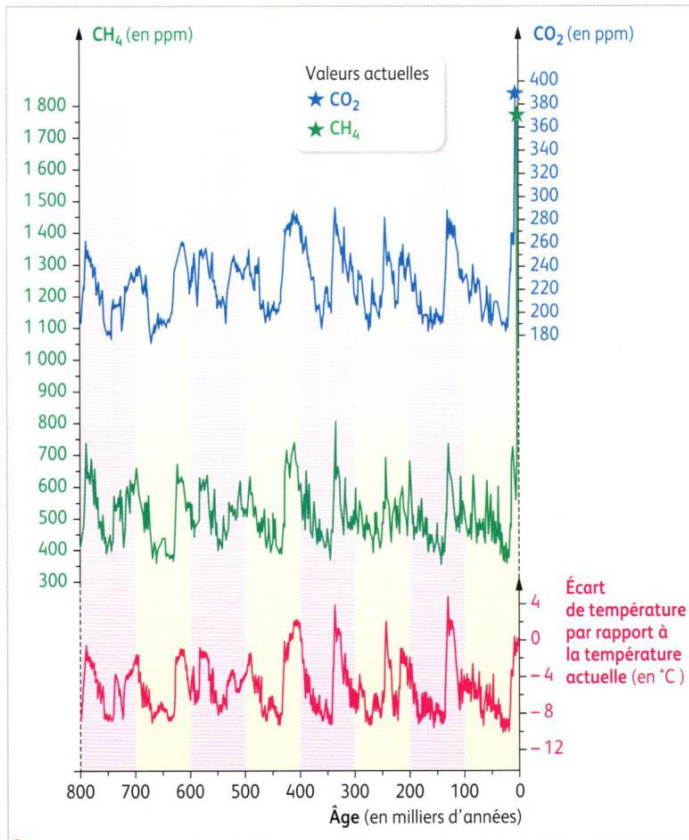
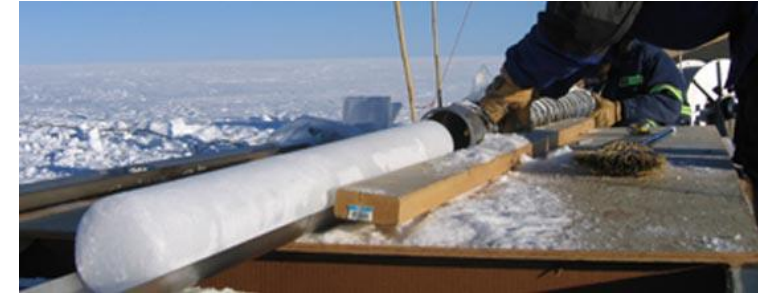


**5** Variations du  $\delta\text{D}$  des précipitations à l'échelle de la planète (moyenne des années 2003 à 2005).

### Le principe du thermomètre isotopique:

Il y a une relation linéaire entre les compositions isotopiques, donc les deltas et la température. A partir des courbes étalons de référence et en appliquant le principe d'actualisme on peut donc graphiquement déterminer la température qui régnait au moment de la chute de neige, transformé ultérieurement en glace.

## Glaces polaires et paléotempératures



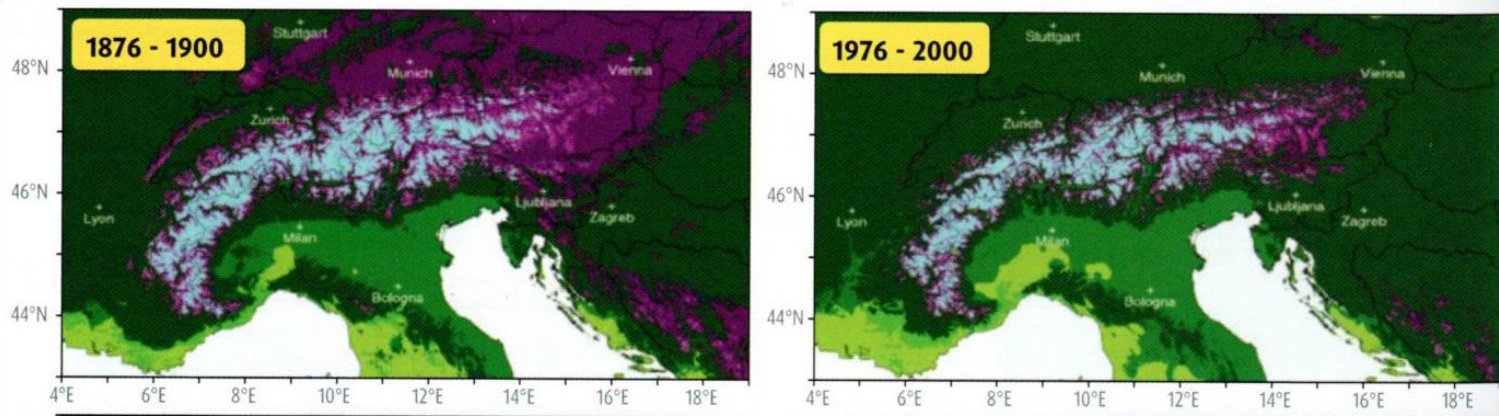
**b Résultats de l'étude des glaces antarctiques (site du Dôme C).**  
Les teneurs actuelles en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> sont respectivement 391 ppm et 1 800 ppb. 1 ppb = 1 partie par billion, soit 1 pour 10<sup>9</sup>.

### Conclusion:

Les résultats obtenus à Vostok au cœur de l'Antarctique ont montré une parfaite concordance entre les différentes données depuis 800 000 ans . La concentration des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane) montre des variations cycliques d'une périodicité d'environ 100 000 ans. En même temps pour des cycles de 100 000 ans, une longue période froide (glaciaire) marquée par une baisse du delta 18O (ou du delta D), des taux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>, a alterné avec une période chaude (interglaciaire) caractérisée par des hausses de ces mêmes indices : aux périodes de réchauffement coïncident des périodes d'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O) dans l'atmosphère ; aux phases de refroidissement coïncident des baisses de la teneur de l'atmosphère en ces mêmes gaz.

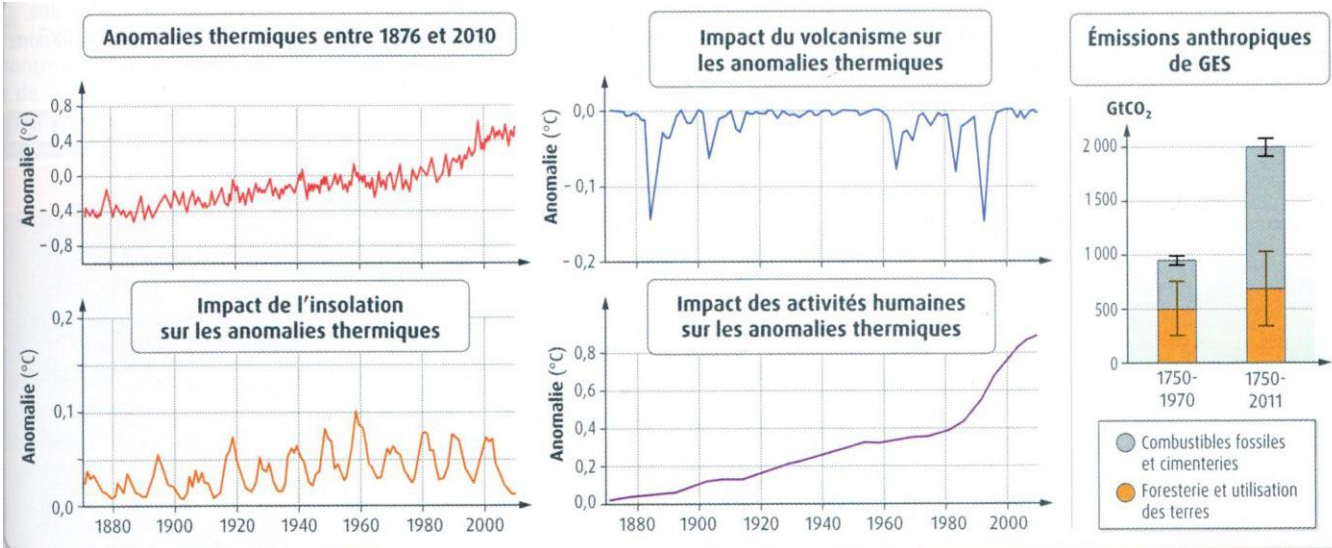
**Ainsi ces travaux ont permis de mettre en évidence une succession de périodes glaciaires et interglaciaires d'une amplitude globale de 10 à 15°C dont l'origine est naturelle et non anthropique.**

# 150 ans d'archives climatiques

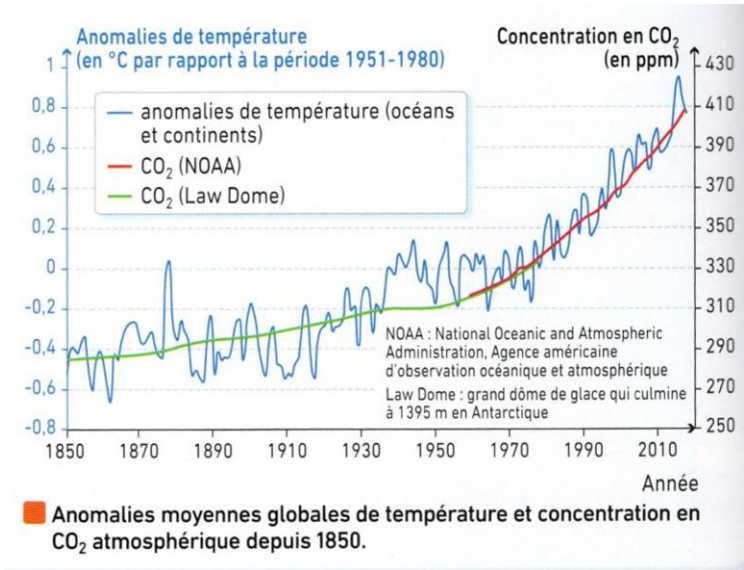


Evolution des biomes dans l'arc alpin ( biome: vaste région biogéographique s'étendant sous un même climat)

Le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) est un des principaux **gaz à effet de serre\***. Bien que présent en faible quantité dans l'atmosphère, il a un impact important sur le climat global. L'évolution du taux de  $CO_2$  atmosphérique a pu être reconstituée à partir de bulles d'air emprisonnées dans les glaces polaires (voir p. 300). Depuis 1960, il est suivi en permanence, par mesure directe, notamment à l'observatoire atmosphérique d'Hawaï, dans l'océan Pacifique. Le graphe ci-contre présente ces variations, ainsi que les anomalies de la température terrestre par rapport à la moyenne des températures sur la période 1951-1980.



**Évolution de quelques paramètres entre 1880 et 2010.** Les anomalies correspondent à l'écart de la température avec la moyenne relevée entre 1961 et 1990. GES : gaz à effet de serre, Gt : gigatonnes ( $10^6$  tonnes). Données du Giec.



**Anomalies moyennes globales de température et concentration en  $CO_2$  atmosphérique depuis 1850.**

# Les différents paramètres de l'orbite terrestre

## Excentricité

L'orbite terrestre passe cycliquement d'une forme circulaire à une forme elliptique. C'est le résultat des forces d'attraction gravitationnelles exercées par les autres astres du système solaire.

## Obliquité

L'axe de rotation de la Terre est oblique par rapport au plan de l'écliptique (plan dans lequel se déplace la Terre autour du Soleil). L'obliquité correspond à l'angle entre la perpendiculaire à l'écliptique et l'axe de rotation de la Terre. Cet angle oscille cycliquement de 21,5 à 24,5°.

## Précession

À cause de sa forme aplatie au niveau des pôles, les forces gravitationnelles exercées par la Lune et le Soleil tendent à faire tourner la Terre comme une toupie. Son axe de rotation décrit un cône autour de la perpendiculaire au plan de l'écliptique.

Configuration elliptique

Configuration circulaire

Axe de rotation actuel 23,37°

A

P

Écliptique

A : Aphélie

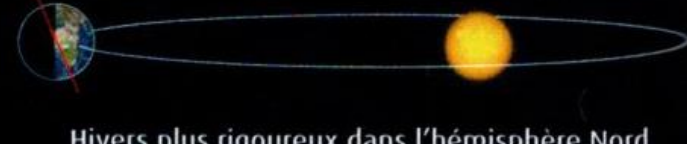
Point où la Terre est la plus éloignée du Soleil

P : Périhélie

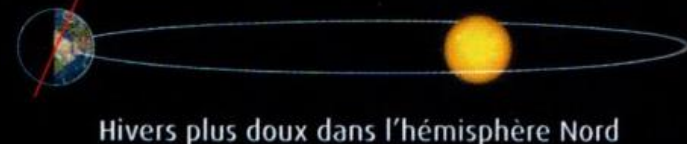
Point où la Terre est la plus proche du Soleil

24,5°

21,5°



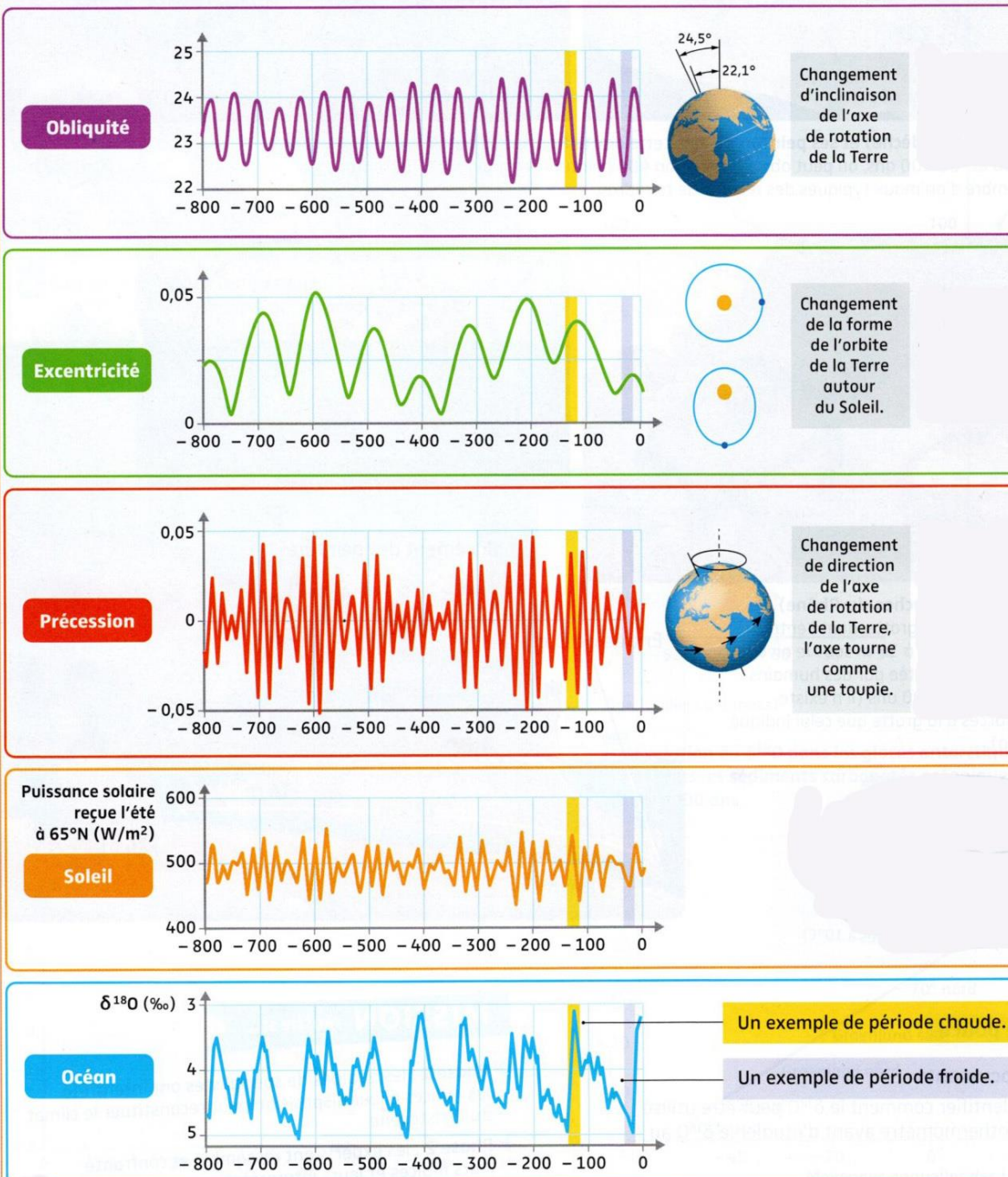
Hivers plus rigoureux dans l'hémisphère Nord



Hivers plus doux dans l'hémisphère Nord

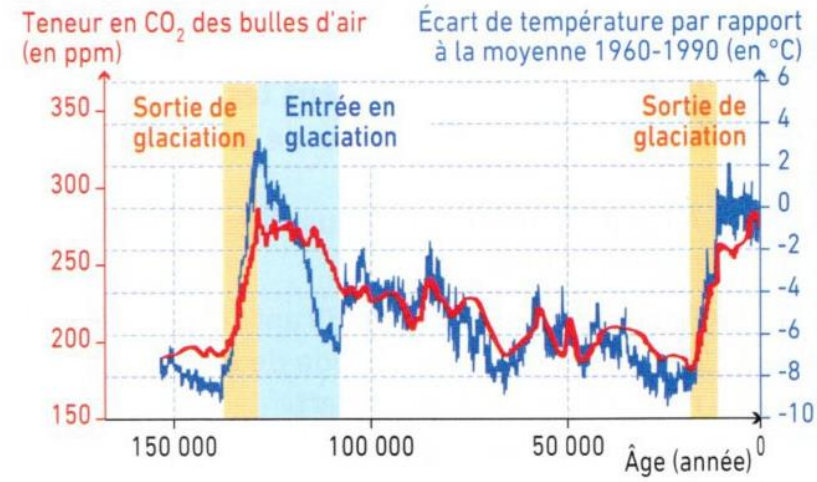
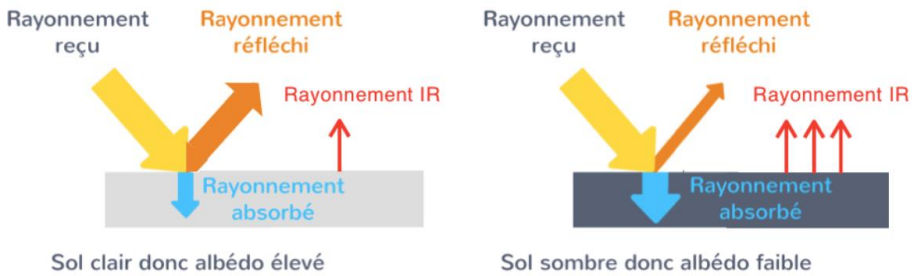
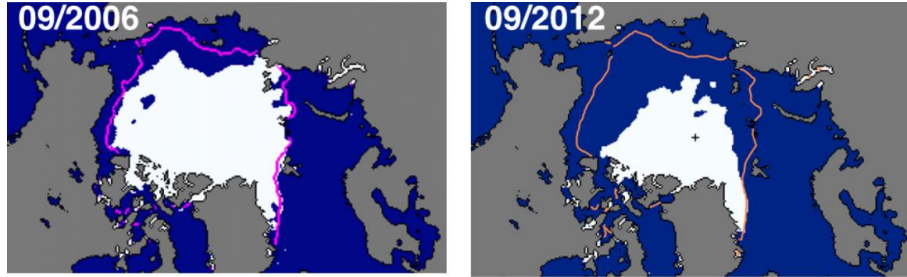


# Les cycles de Milankovic et leurs conséquences

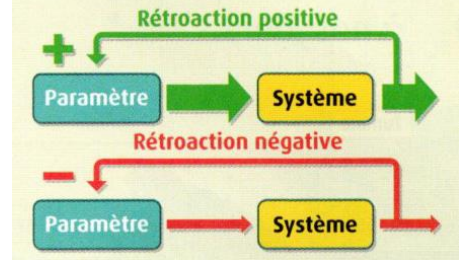


Évolution depuis 800 000 ans des paramètres orbitaux de Milankovitch (obliquité, excentricité et précession), de la puissance solaire reçue à la latitude 65°N et du  $\delta^{18}\text{O}$  dans l'océan (tests carbonatés des foraminifères).

# Les effets amplificateurs de l'albédo et de la solubilité du CO<sub>2</sub>



**Rétroaction :** Action en retour d'un système à la modification d'un paramètre. Si la réponse du système amplifie le phénomène, on parlera de rétroaction positive. Si elle l'atténue, on parlera de rétroaction négative.



Surface	Neige fraîche	Forêt de conifères	Forêt de feuillus	Surface de la mer	Surface des lacs	Glace	Sable sec	Cultures
Albédo	0,75 à 0,9	0,05 à 0,15	0,15 à 0,2	0,05 à 0,15	0,02 à 0,04	0,6	0,25 à 0,45	0,15 à 0,25

**Albédo de différentes surfaces.** Il quantifie le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie reçue au niveau d'une surface. Sa valeur est comprise entre 0 (0% de l'énergie reçue est réfléchie) et 1 (100% de l'énergie reçue est réfléchie).

Température (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Solubilité (g.L <sup>-1</sup> )	3,35	2,32	1,68	1,26	0,97	0,76	0,57	0,43	0,25	0,08	0

Évolution de la solubilité du CO<sub>2</sub> en fonction de la température.

Q1: montrez comment l'albédo et la solubilité du dioxyde de carbone peuvent provoquer des rétroactions climatiques  
 Q2: en justifiant le type de rétroaction, expliquez la rapidité des variations climatiques

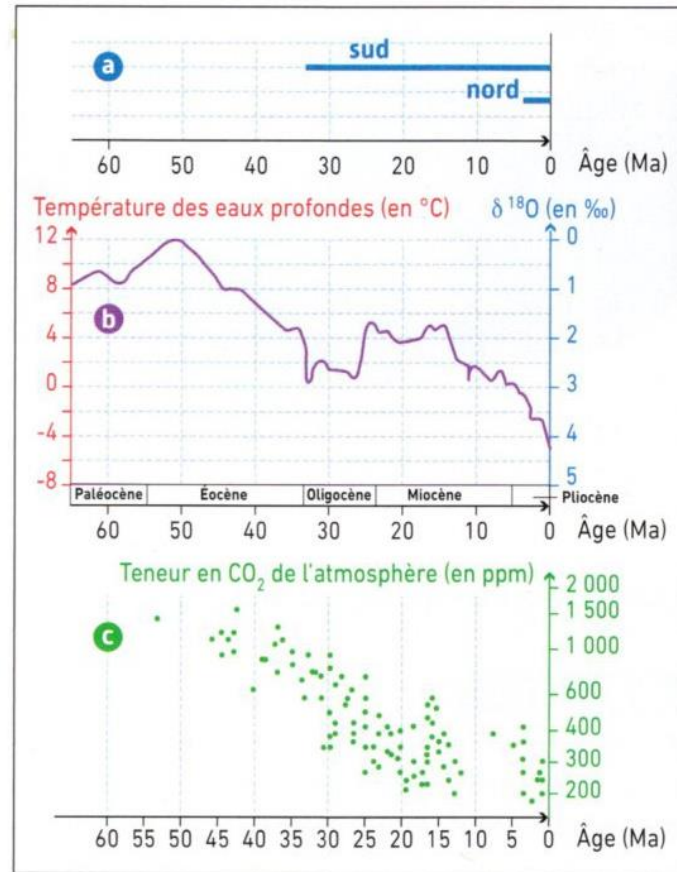
## Les indicateurs climatiques du Cénozoïque

Les forages glaciaires ne permettent pas de remonter à des âges supérieurs au million d'années. Les chercheurs utilisent donc d'autres méthodes pour reconstituer les variations du climat et de la teneur atmosphérique en  $\text{CO}_2$  plus anciennes. Les graphiques ci-contre en présentent trois :

**a** Reconstitution de la présence de calottes polaires dans les deux hémisphères à partir de données sédimentologiques (présence de dépôts glaciaires comme les tillites\*).

**b** Étude de la température des eaux océaniques profondes à partir du rapport isotopique  $\delta^{18}\text{O}$  dans les foraminifères vivant sur le fond marin (voir p. 299).

**c** Reconstitution de la teneur atmosphérique en  $\text{CO}_2$  à partir de l'étude de rapports isotopiques du carbone dans les sédiments carbonatés (« Paleo- $\text{CO}_2$  project »). Les scientifiques mesurent le rapport entre les différents isotopes du carbone à l'intérieur de molécules organiques fossilisées dans les tests de microalgues, les coccolithophoridés (voir document 2). En effet, lors de la photosynthèse, ces algues utilisent davantage le  $^{12}\text{C}$  par rapport au  $^{13}\text{C}$ , mais lorsque la teneur en  $\text{CO}_2$  diminue, l'écart entre l'incorporation des deux isotopes décroît.

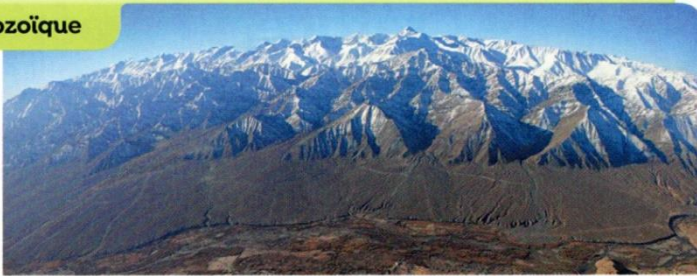


**■** Trois indicateurs climatiques à l'échelle de l'ère cénozoïque.

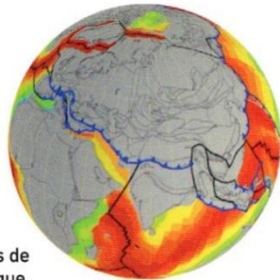
# L'orogénèse alpine et ses conséquences

## Les chaînes de montagnes du Cénozoïque

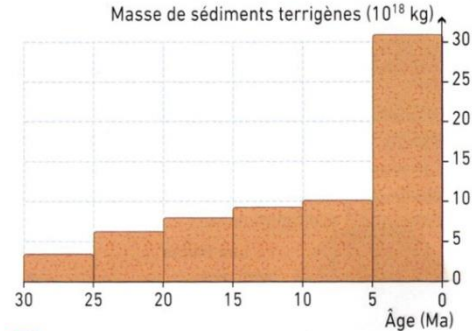
Le Cénozoïque est une période de réunion des blocs continentaux et de formation de chaînes de montagnes, dont les principales forment la ceinture orogénique alpine (voir p. 160). Dès leur formation, les reliefs montagneux sont soumis à l'altération et à l'érosion\*. Ce phénomène est quantitativement très important. À titre d'exemple, on estime que pour l'Himalaya ces phénomènes ont démantelé un volume de roches de 2 millions de milliards de m<sup>3</sup> au cours des 20 derniers millions d'années.



**A** Dépôts sédimentaires liés à l'érosion de l'Himalaya dans la vallée de l'Indus.

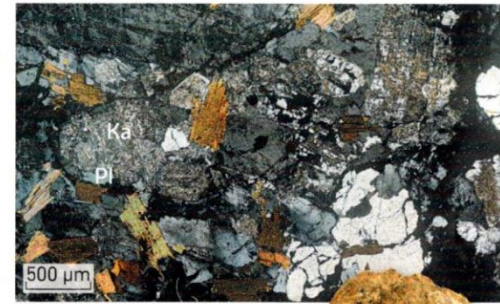


**B** Formation de chaînes de montagnes au Cénozoïque.



**C** Masse de sédiments issus de l'érosion depuis 30 millions d'années.

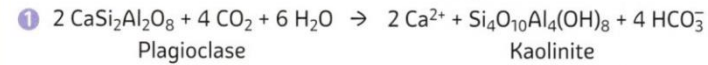
**Q:** établissez les relations de causes à effets entre les variations climatiques, la teneur en CO<sub>2</sub>, la dynamique des masses continentales et l'altération des roches



**A** Observation d'un granite altéré au microscope en lumière polarisée analysée.



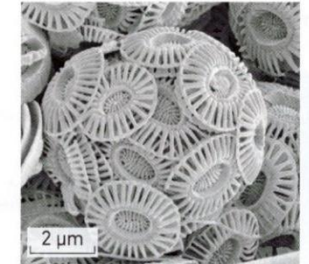
**B** Échantillon d'un granite altéré.



Les roches silicatées comme le granite subissent en surface une **altération chimique\*** sous l'effet de l'eau chargée en CO<sub>2</sub>.

L'observation au microscope polarisant en LPA\* d'un granite altéré (A) montre la transformation des plagioclases (Pl) en de nombreux cristaux d'un minéral argileux, la kaolinite (Ka) suivant la réaction (1).

Les ions Ca<sup>2+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ainsi formés passent en solution et sont transportés par les cours d'eau. Lorsque les conditions sont réunies, ils précipitent, le plus souvent grâce à l'action des êtres vivants, et forment des sédiments carbonatés suivant la réaction (2), dite de précipitation\* des carbonates.

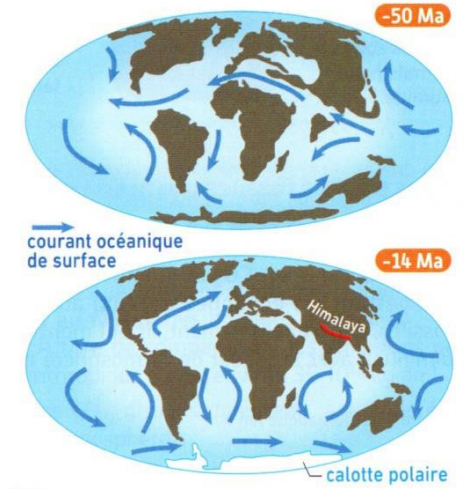


**C** Tests calcaires de coccolithophoridés (microalgues), observés au MEB\*.

Le déplacement des masses continentales au cours du Cénozoïque, sous l'effet de la **tectonique des plaques\***, a entraîné une modification des courants océaniques de surface, fermant certains passages et en ouvrant d'autres.

Les climatologues font des liens entre **circulation océanique\*** et climat global :

- En réchauffant les eaux océaniques, un courant faisant le tour du globe dans la région intertropicale favorise un climat global chaud.
- Au contraire, la présence d'un courant froid autour du continent Antarctique (courant circumpolaire), en isolant ce dernier des apports d'eaux chaudes, y favorise l'installation d'une calotte glaciaire propice au refroidissement global, notamment par augmentation de l'albédo.
- L'existence de courants indépendants de direction globalement nord-sud (courants méridiens) accentue les différences de température en fonction de la latitude, ce qui est favorable à l'installation d'un refroidissement global.



**D** Dynamique des masses continentales et courants marins.

# Bilan: reconstitution des climats du Quaternaire et plus globalement du Cénozoïque

## 1°) Des indices de variations climatiques au Quaternaire

- l'étude des peintures rupestres nous informe sur la faune côtoyée par l'Homme et donc sur le climat
- l'étude des pollens fossilisés permet de reconstituer l'évolution de la végétation et donc du climat
- des indices géologiques, moraines, blocs erratiques, stries glaciaires, vallées en U, constituent des traces de l'existence d'anciens glaciers qui ont façonné les paysages
- l'utilisation des thermomètres isotopiques basée sur la mesure des proportions des isotopes de l'oxygène ou de l'hydrogène permet de reconstituer l'évolution de la température atmosphérique globale depuis 800 000 ans, de même les proportions isotopiques de l'oxygène mesurés dans les sédiments océaniques carbonatés permettent de reconstituer l'évolution de la température de l'océan, même au delà de 800 000 ans.
- l'évolution climatique des 150 dernières années est connue avec précision grâce aux nombreuses études et mesures effectuées

Ainsi le climat du Quaternaire, depuis 2,6 Ma environ, se caractérise par des alternances de périodes froides dites glaciaires, et plus douces, dites interglaciaires.

La dernière période glaciaire s'est terminée il y a environ 11 000 ans et le maximum glaciaire, moment le plus froid de cette glaciation a été atteint il y a 20 000 ans: le nord de l'Europe et les Alpes étaient alors recouverts d'une calotte de glace et le niveau de la mer était 120 m plus bas que le niveau actuel.

Depuis 150 ans la température globale a augmenté d'environ 1°C, les facteurs naturels ne peuvent expliquer cette variation. Sur la même période les activités humaines, utilisation du charbon et du pétrole, déforestation...ont considérablement augmentés de même que la teneur en CO<sub>2</sub>, gaz à effet de serre. Cette dernière variation brutale est donc anthropique.

## 2°) L'origine des variations climatiques quaternaires

Les variations périodiques des paramètres orbitaux de la Terre, excentricité de l'orbite terrestre, obliquité et la précession de l'axe de rotation se répètent sur des périodes d'environ 100 000, 40 000 et 20 000 ans. Elles coïncident avec les variations climatiques reconstituées à partir des thermomètres isotopiques.

En modifiant la puissance solaire reçue à la surface du globe, ces petites variations astronomiques modifient l'équilibre thermique de la planète.

Des boucles de rétroactions positives peuvent expliquer l'ampleur des variations climatiques et la rapidité des entrées et sorties de glaciations:

- la formation de la glace augmente l'albédo terrestre, les sols absorbent moins de chaleur ce qui favorise l'extension de la glace, et inversement lors d'une sortie de glaciation

- lors d'une entrée de glaciation, le refroidissement de l'océan entraîne une augmentation de la solubilité du CO<sub>2</sub> dans les eaux océaniques. Cela provoque la diminution de sa teneur atmosphérique d'où une baisse de la température de l'eau et une augmentation de la solubilité... le phénomène inverse se produit en sortie de glaciation.

## 3°) Les variations climatiques au Cénozoïque

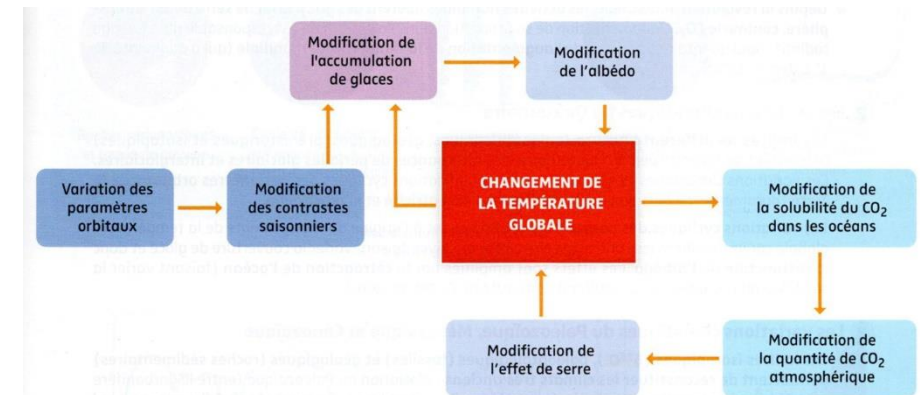
Différents indices, données de la sédimentologie glaciaire, rapports isotopiques du dioxygène dans les carbonates des foraminifères des fonds marins, rapport isotopiques du carbone dans des coccolithophoridés fossiles, indice stomatique des Ginkgo, montrent une brève période chaude puis les 50 derniers millions d'années, un refroidissement progressif.

Deux causes principales expliqueraient ce refroidissement:

- le démantèlement et l'altération des roches siliceuses des chaînes alpines: en effet l'altération piège du CO<sub>2</sub> et la diminution de l'effet de serre provoqué un refroidissement
- le déplacement des masses continentales et la fermeture d'un vaste domaine océanique centré sur l'équateur aurait provoqué la disparition d'un courant chaud intertropical. De même l'isolement de l'Antarctique aurait permis la formation d'un courant froid circumpolaire favorisant la formation de la calotte glaciaire, ce qui aurait participé au refroidissement global par effet albédo.

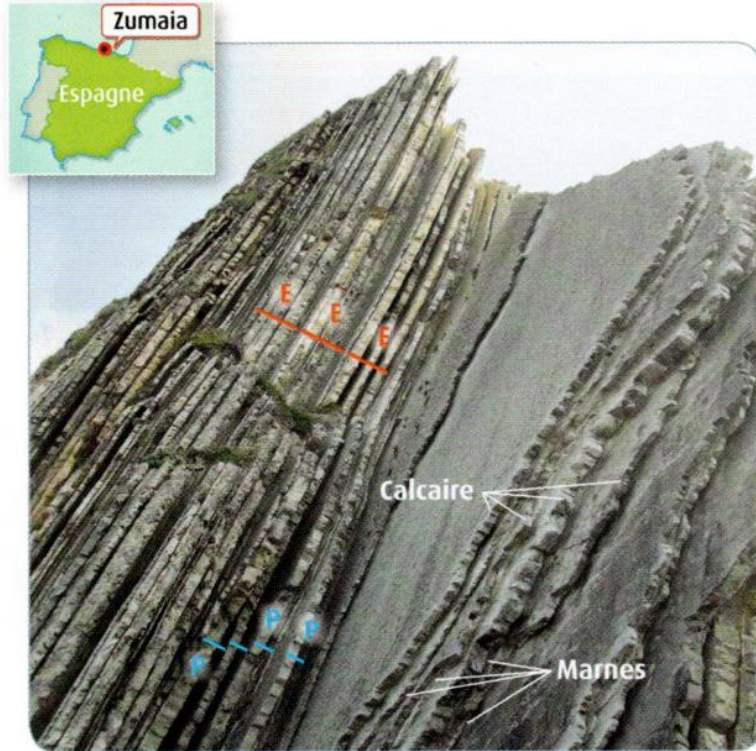
« Depuis que la Terre existe, il y a eu des changements climatiques à différentes échelles de temps. Ce qui est extraordinaire là est inédit, c'est que les changements climatiques récents et leurs vitesses sont fulgurants par rapport à tout ce que l'on a connu. »

Ainsi le climat est devenu un fort enjeu de société et a provoqué une prise de conscience sur l'avenir de notre planète et de l'humanité.



Effets des variations des paramètres orbitaux sur la température globale.

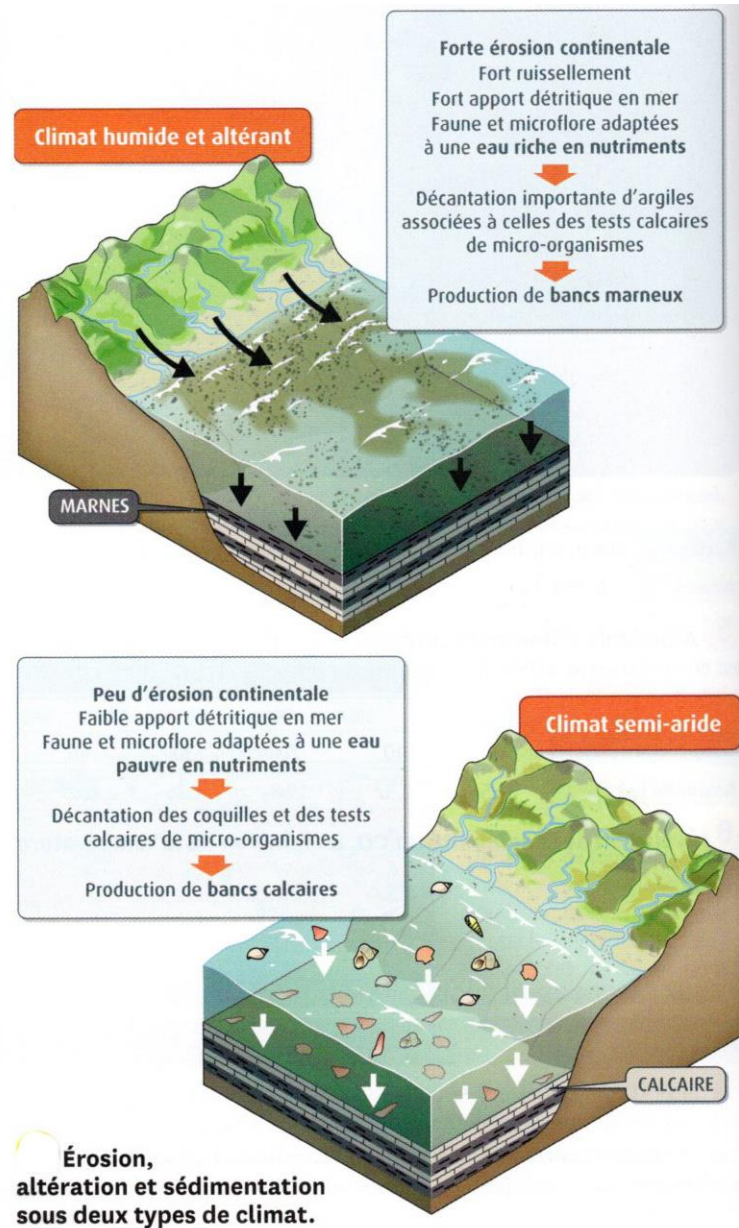
## Exercice



**1** **Flysch de Zumaia (Espagne).** Ce dépôt marin a été formé entre 58,7 et 55,8 Ma (début du Cénozoïque). Il est formé d'une alternance de couches calcaires et de couches de marnes. Chaque barre associée à la lettre **P** correspond à une épaisseur accumulée pendant 20 000 ans, soit un cycle de variation de la précession. Cette épaisseur comprend l'association d'une couche marneuse (en creux) et d'une couche calcaire (en relief). Chaque barre associée à la lettre **E** correspond à une épaisseur accumulée pendant 100 000 ans, soit un cycle de variation de l'excentricité.

**Q1:** décrivez l'évolution climatique au début du Cénozoïque

**Q2:** montrez que l'alternance des bancs de calcaire et de marnes reflètent des cycles de Milankovitch



Les changements périodiques de l'orbite de la Terre et de l'orientation de son axe de rotation (cycles de Milankovitch) entraînent des changements du climat en modifiant la répartition annuelle de l'insolation en un point donné de la Terre. Ils influencent donc fortement les processus d'altération continentale, d'érosion, de transport et de sédimentation. Les sédiments marins qui se déposent par décantation loin des côtes et dans un contexte tectoniquement stable s'accumulent avec un taux constant. Il est alors possible de retrouver l'enregistrement sédimentaire des variations orbitales. La nature des argiles qui ont été acheminés jusqu'à la mer renseigne sur l'intensité de l'érosion continentale. De même, la production de calcaires par des organismes adaptés à la richesse ou à la pauvreté des eaux en nutriments permet de mettre en évidence les variations de ces flux jusqu'à la mer. Les cycles de Milankovitch étant des phénomènes périodiques, leur identification permet de calculer la durée des périodes géologiques, c'est donc aussi un bon outil pour la datation.