

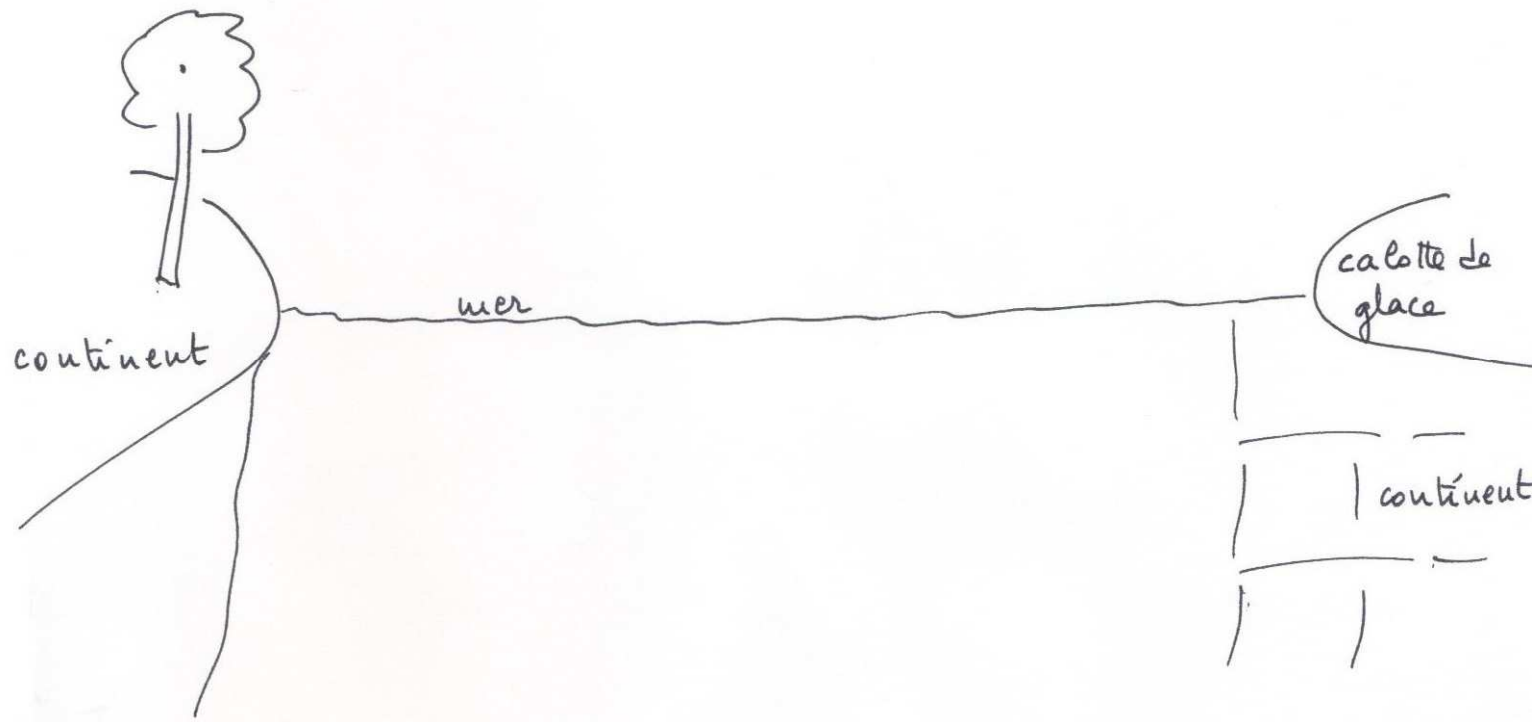
# Atmosphère, hydrosphère, climats : du passé à l'avenir

# Chapitre I Evolutions récentes du climat et de l'atmosphère



Vue satellitale de la calotte glaciaire arctique en septembre 2011.  
Jamais cette calotte n'a été aussi réduite.

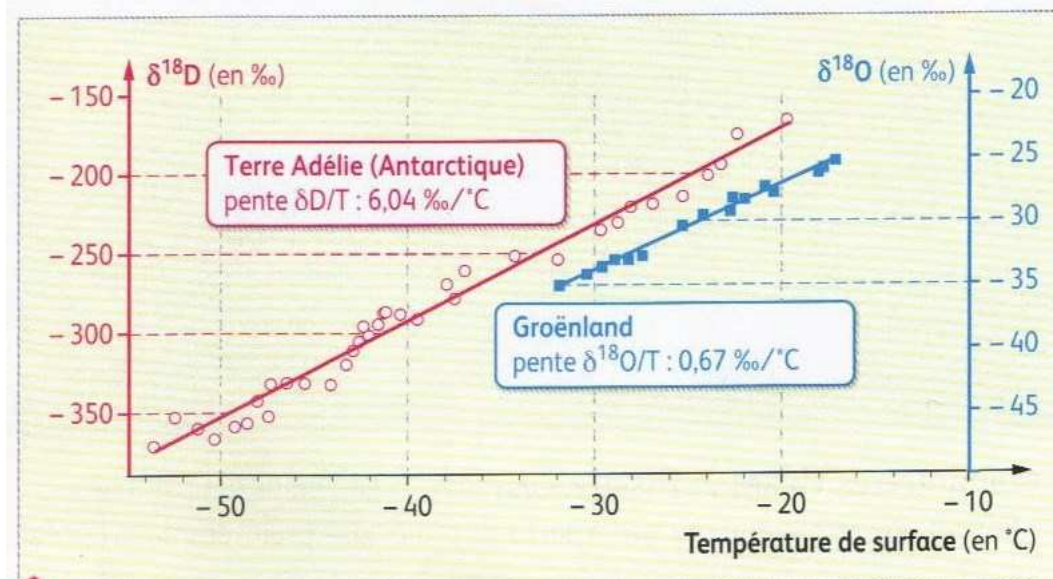
## - I - La glace, mémoire récente du climat



Plus la vapeur d'eau s'éloigne de la zone océanique chaude, moins elle contient d' $^{18}\text{O}$ , qui retourne à l'océan sous la forme de pluies. La neige qui tombe sur les calottes glaciaires contient relativement peu d' $^{18}\text{O}$ .

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{glace}} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{glace}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{moyen des océans}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{moyen des océans}}}$$

$$\delta\text{D}_{\text{glace}} = \frac{(\text{D}/^1\text{H})_{\text{glace}} - (\text{D}/^1\text{H})_{\text{moyen des océans}}}{(\text{D}/^1\text{H})_{\text{moyen des océans}}}$$



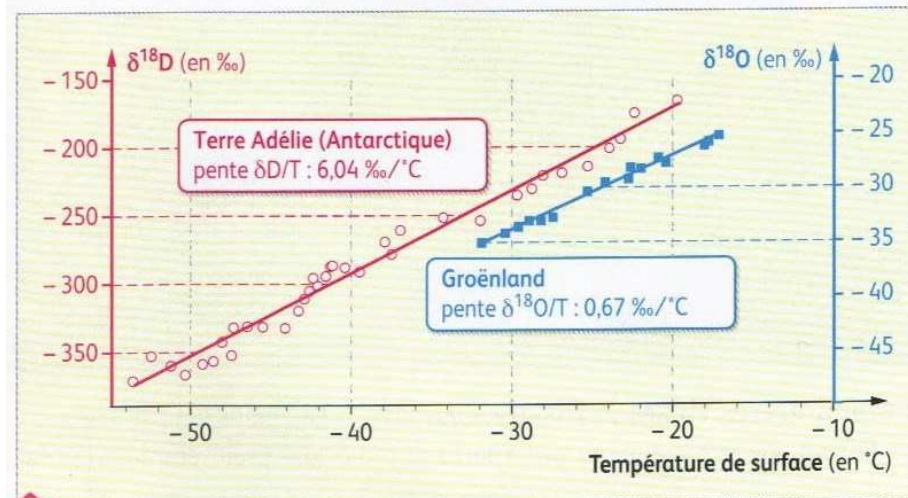
**a** Compositions isotopiques de la neige (exprimées respectivement en δ<sup>18</sup>O et en δD) en fonction des températures moyennes de formation de ses cristaux.

## Signification des variations du $\delta^{18}\text{O}$ d'un échantillon

Lorsque l'eau de mer s'évapore, la molécule  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  légère passe plus rapidement dans la phase vapeur que la molécule plus lourde  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ . Donc, la vapeur d'eau au-dessus des régions chaudes contient moins d' $\text{H}_2^{18}\text{O}$  que l'eau des océans.

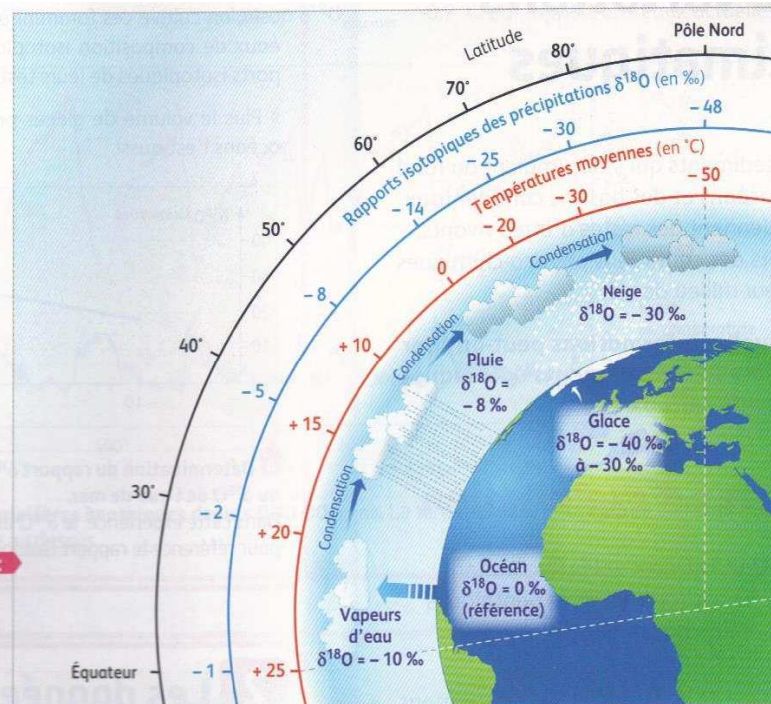
La condensation de la vapeur d'eau forme les nuages qui seront à l'origine des précipitations vers les plus hautes latitudes. Les molécules  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  se condensent préférentiellement aux molécules  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  et retombent vers le sol rapidement. La vapeur d'eau s'appauvrit donc de plus en plus en  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  au cours de sa migration vers les pôles. Donc le  $\delta^{18}\text{O}$  des précipitations diminue de l'équateur vers les pôles.





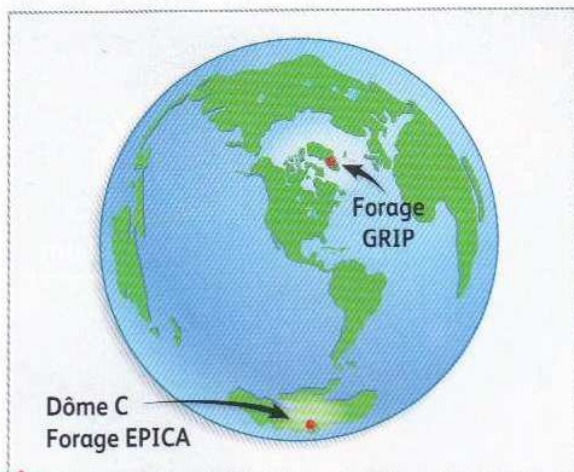
**a** Compositions isotopiques de la neige (exprimées respectivement en  $\delta^{18}\text{O}$  et en  $\delta\text{D}$ ) en fonction des températures moyennes de formation de ses cristaux.

La vapeur d'eau issue de l'évaporation des océans est enrichie en  $^{16}\text{O}$  et en  $^1\text{H}$ . En se dirigeant vers les hautes latitudes, les masses d'air se condensent et génèrent des précipitations plus riches en  $^{18}\text{O}$  et en  $\text{D}$  que la vapeur d'eau dont elles proviennent.



**c** Évolution de la composition isotopique des précipitations en fonction de la latitude. L'eau de l'océan contient 2,00‰ d'oxygène  $^{18}\text{O}$ ; par définition,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{océan actuel}} = 0$ .

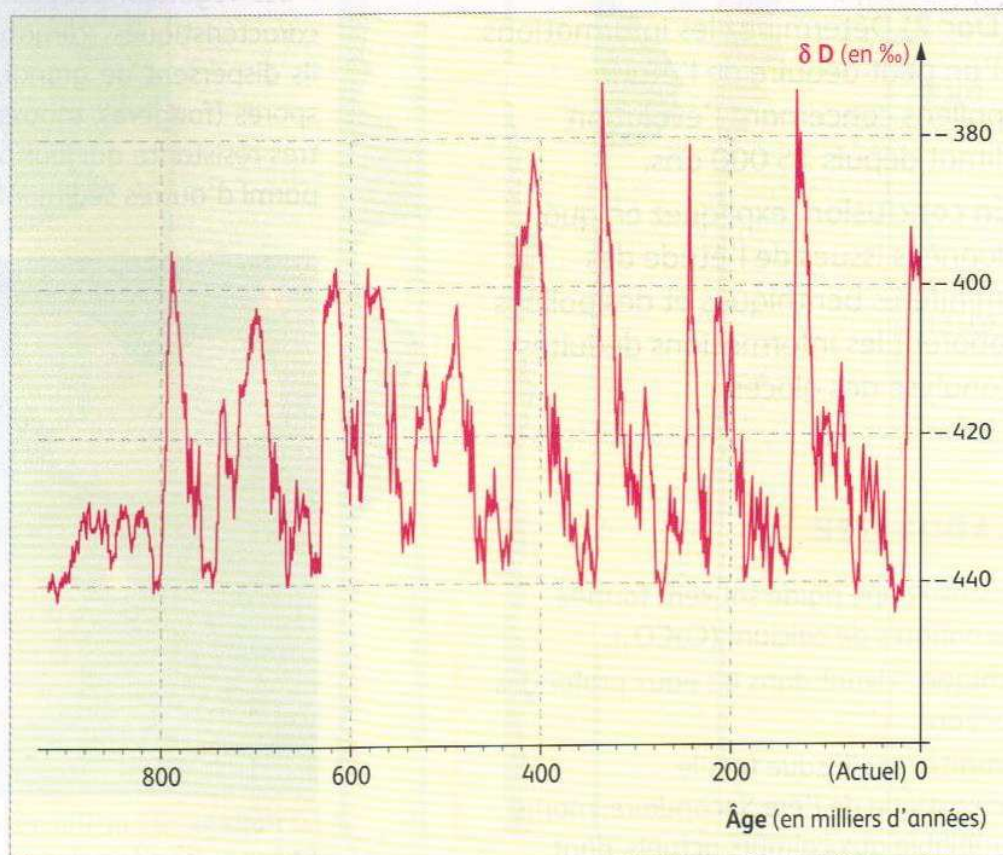
▸ Les forages réalisés au travers des calottes de glace polaires ont atteint des profondeurs de 3 000 m au Groenland et de 3 270 m en Antarctique sur le site du Dôme C.



**b Localisation de quelques forages dans les calottes glaciaires :**

GRIP : projet européen de carottage au Groenland.

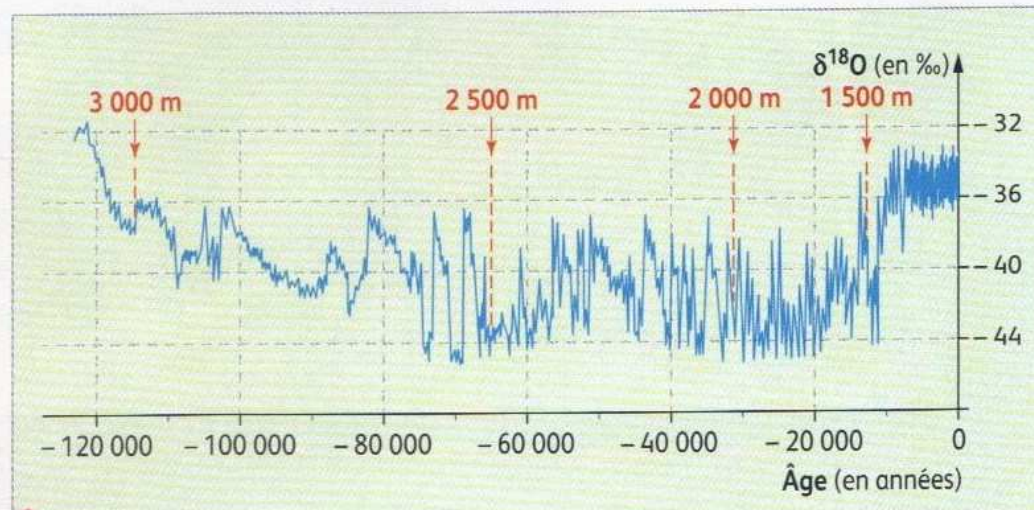
EPICA : projet européen de carottage en Antarctique.



**c  $\delta D$  de la glace en fonction de son âge dans la calotte glaciaire antarctique sur le site du Dôme C.**



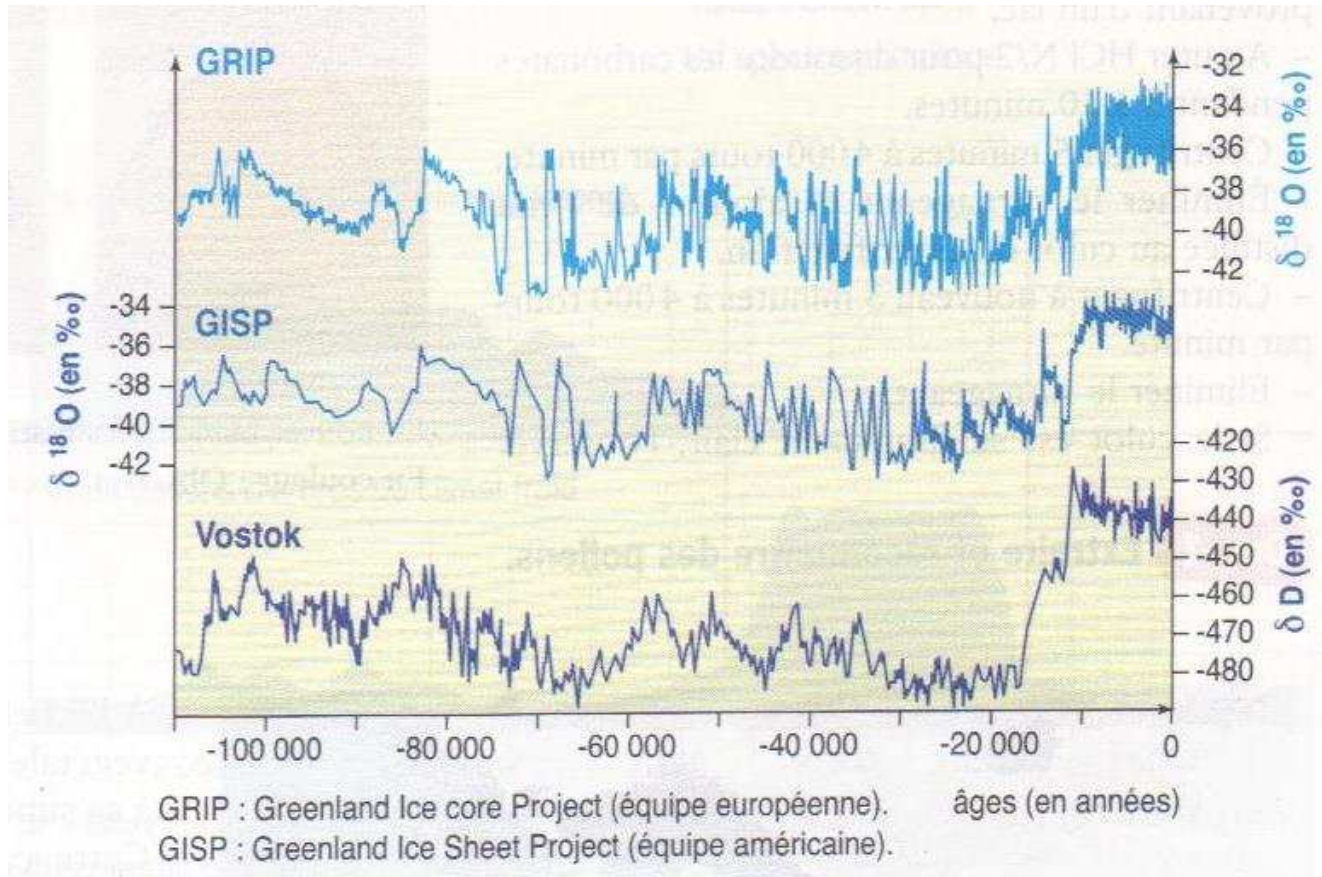
► La glace prélevée par carottage dans les **calottes glaciaires** de l'Antarctique et de l'Arctique au Groenland, résulte du tassement et de la compaction de précipitations neigeuses.



**a**  $\delta^{18}\text{O}$  de la glace en fonction de sa profondeur dans la calotte glaciaire au Groenland (site GRIP).

La profondeur à laquelle a été prélevée la glace est indiquée en rouge pour quelques échantillons étudiés.





En Antarctique, le  $\delta D$  des glaces oscille périodiquement depuis 800 000 ans ; des périodes de réchauffement succèdent à des périodes de refroidissement approximativement tous les 100 000 ans. L'étude du  $\delta^{18}O$  dans les glaces du Groenland confirme ces conclusions au cours des 120 000 dernières années : le climat s'est refroidi progressivement entre  $-120\ 000$  ans et  $-20\ 000$  ans et s'est ensuite réchauffé rapidement entre  $-20\ 000$  et  $-10\ 000$  ans.

La correspondance entre les variations déduites de l'étude de différentes régions valide l'idée de variations climatiques globales.

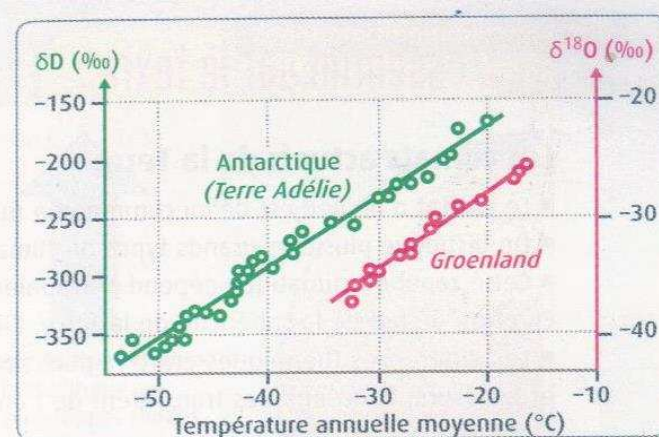
## Conclusion

L'utilisation d'un thermomètre isotopique fondée sur le rapport de concentration d'isotopes ( $^{18}\text{O}$  et  $^{16}\text{O}$  d'une part,  $^1\text{H}$  et  $^2\text{H}$  d'autre part), calibré à la zone d'extraction des carottes glaciaires, permet de mettre en évidence une succession de périodes glaciaires et interglaciaires d'une amplitude globale de 10 à 15°C et dont l'origine est naturelle et non anthropique.

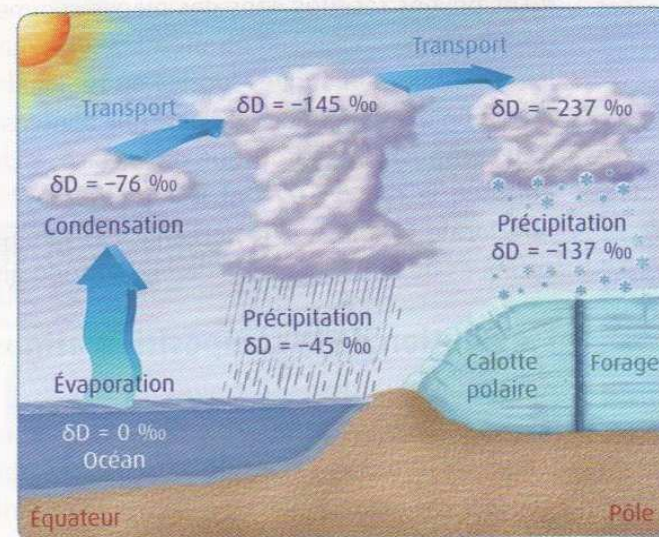


# Bilan

- Du fait de températures constamment négatives, les calottes glaciaires arctique et antarctique ont accumulé des épaisseurs de glace pouvant dépasser 3 kilomètres. On peut en extraire des carottes par forage. Au Groenland, ces carottes représentent plus de 100 000 ans d'archives. En Antarctique, où les précipitations annuelles sont très faibles, un forage au cœur de l'inlandsis (Dôme C) a permis de remonter à -800 000 ans.
- En effectuant des mesures sur les précipitations actuelles, on a constaté une relation entre la température à laquelle surviennent ces précipitations et la **composition isotopique** de l'eau. Les deux éléments chimiques constitutifs de l'eau sont exploitables: pour l'hydrogène, on s'intéresse au rapport D/H et pour l'oxygène, au rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ . Dans les deux cas, plus la température est basse, plus l'eau est appauvrie en isotope lourd, donc plus l'indice isotopique  $\delta$  ( $\delta\text{D}$  ou  $\delta^{18}\text{O}$ ) est faible. La composition isotopique de la glace, à différentes profondeurs dans une carotte, nous renseigne donc sur la température locale à l'époque des précipitations.
- Au Dôme C, on constate que le  $\delta\text{D}$  a varié cycliquement entre -360 et -450 ‰ au cours des 800 000 dernières années, avec une période de l'ordre de 100 000 ans. On peut en déduire que la température moyenne annuelle a varié entre -52°C et -65°C (soit une variation de 0 à -13°C par rapport à la période actuelle). Par extrapolation, on peut reconstituer l'évolution de la température moyenne globale.



Relation entre température des précipitations et composition isotopique de l'eau



Cycle de l'eau et variation de l'indice isotopique  $\delta\text{D}$ .



# - II - Des fossiles, témoins de variations climatiques

## 1) L'étude des sédiments océaniques

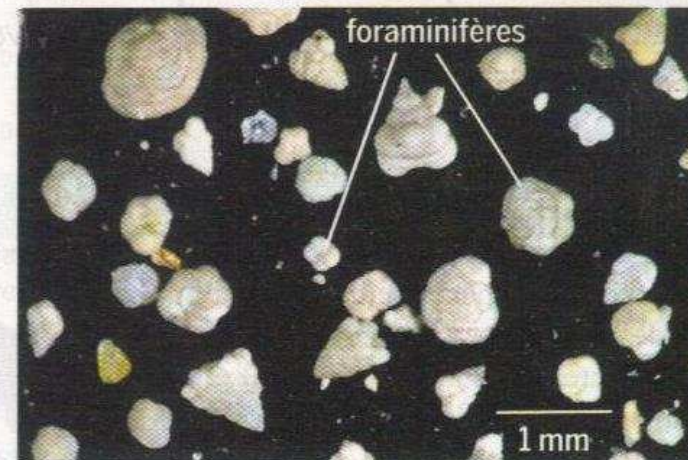
- Une cellule entourée d'un test calcaire

Les foraminifères sont des animaux unicellulaires (protozoaires) très répandus dans les milieux marins. De petite taille (quelques dizaines de microns à quelques millimètres), ils sont logés dans un test (une « coquille ») formé de plusieurs loges et ouvert au niveau d'un foramen (la *photographie* représente un test de globigérine actuelle). Ce test est souvent perforé d'une multitude de pores laissant passer des filaments cytoplasmiques. Très abondants dans les sédiments marins, depuis le début de l'ère primaire, ce sont de très bons indicateurs des caractéristiques de leur environnement.



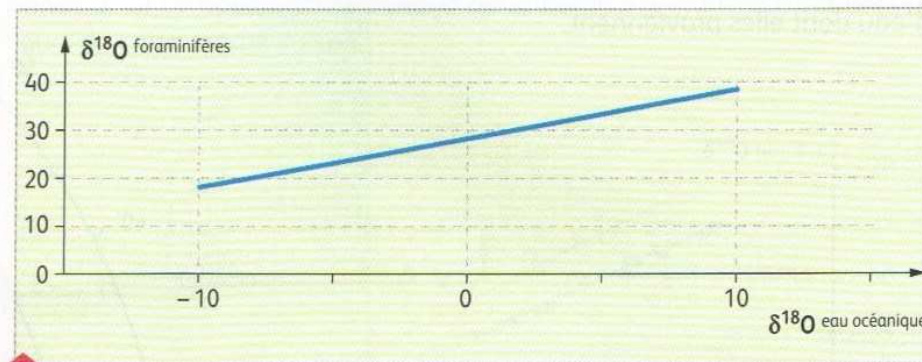
- Observation à la loupe binoculaire

En tamisant une boue océanique, on peut isoler de nombreux tests de foraminifères et les observer à la loupe binoculaire (*photographie*). Un comptage est alors possible (*voir exercice 9 page 221*).



On peut étudier expérimentalement l'influence du rapport isotopique de l'eau de mer sur le rapport isotopique des **tests** de foraminifères actuels semblables à ceux retrouvés dans les sédiments océaniques. Pour cela, on cultive ces foraminifères dans des aquariums alimentés par des eaux de composition isotopique contrôlée ; on mesure ensuite les rapports isotopiques de leurs tests.

Plus le volume de glaces polaires est élevé, plus le  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau des océans l'est aussi.



**a** Détermination du rapport  $\delta^{18}\text{O}$  des tests de foraminifères en fonction du  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau de mer.

Dans cette expérience, le  $\delta^{18}\text{O}$  des foraminifères est calculé en utilisant pour référence le rapport isotopique moyen des eaux océaniques actuelles.

Le  $\delta^{18}\text{O}$  des tests carbonatés évolue comme le  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux océaniques, lui-même lié au volume de glace stocké à un moment donné dans les régions polaires, et donc reflet du climat.

Lorsque ce volume augmente (refroidissement),  $^{16}\text{O}$  est principalement stocké dans les glaces de sorte que le  $\delta^{18}\text{O}$  des océans et donc des tests de foraminifères benthiques qui s'y forment augmente ; l'inverse se déroule en cas de réchauffement climatique.

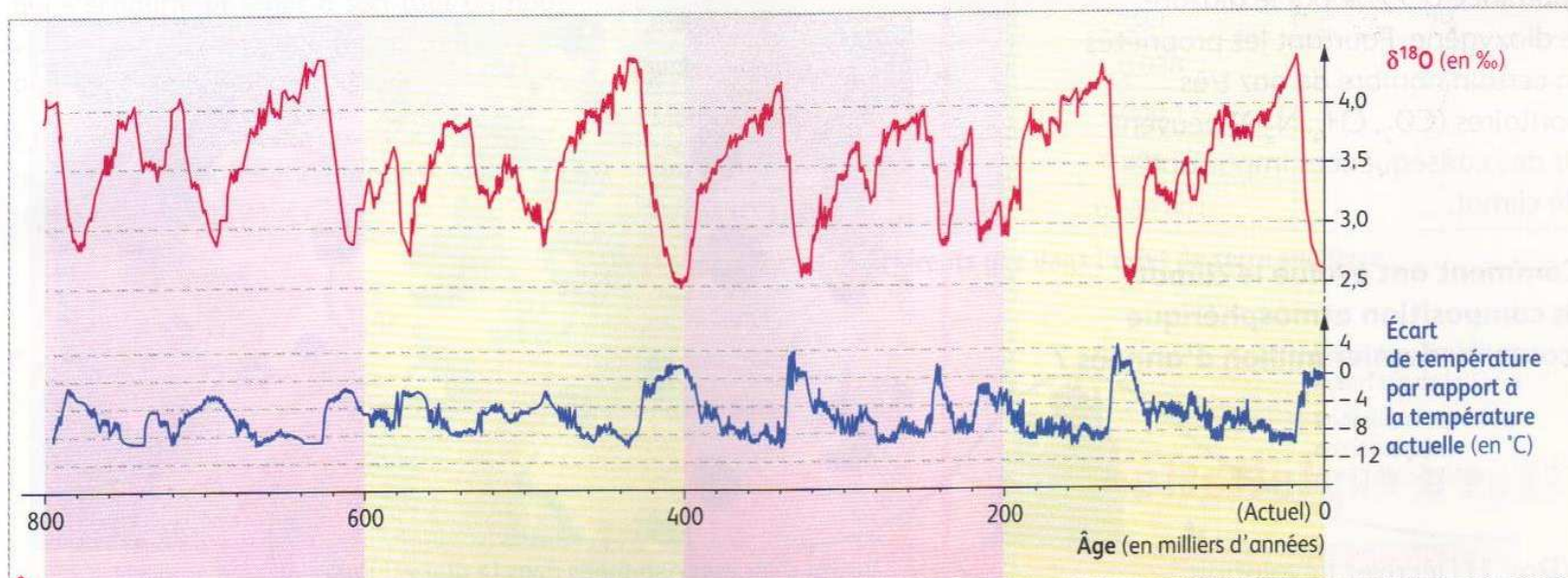


Des forages ont été réalisés au travers des sédiments et des roches sédimentaires qui recouvrent les fonds océaniques. Des tests calcaires de foraminifères **benthiques** ont été trouvés dans ces sédiments ; leur  $\delta^{18}\text{O}$  a pu être déterminé.

Pour les sédiments carbonatés, on compare le rapport isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  de l'échantillon à un rapport de référence, le  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  de la calcite d'un rostre de **bélemnite**. On définit alors le  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sédiment carbonaté}}$  tel que :

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{sédiment}} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sédiment}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{bélemnite référence}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{bélemnite référence}}}$$

Le fossile de bélemnite servant de référence a été trouvé dans une roche calcaire datée du Crétacé supérieur (99,5 à 65,5 Ma). À cette époque, on suppose que la Terre était dépourvue de calottes glaciaires ; l'eau de mer présentait alors un  $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau mer}} \approx -0,7 \text{ ‰}$  par rapport aux eaux actuelles.



**b** Composition isotopique des tests de foraminifères benthiques depuis 800 000 ans. La variation de la température déduite de l'étude des glaces antarctiques est rappelée au dessus.

# Bélemnite



Mollusque céphalopode marin ayant vécu du Dévonien au Crétacé



## 2) Les données issues de l'étude des pollens



▲ Grain de pollen de sapin (MO).      ▲ Grain de pollen de hêtre (MO).

Les arbres et les plantes herbacées produisent une grande quantité de pollen, dont la morphologie est caractéristique de l'espèce. Les grains de pollen de certaines espèces sont dispersés par le vent, sur des distances pouvant dépasser la dizaine de kilomètres. Ils peuvent être piégés dans des sédiments lacustres ou dans des tourbières, où les conditions sont favorables à leur conservation. La paroi pollinique est très résistante, et les grains de pollen peuvent être retrouvés et identifiés après des millions d'années. Toutefois, les séries continues couvrant plus de 20 000 ans sont exceptionnelles.

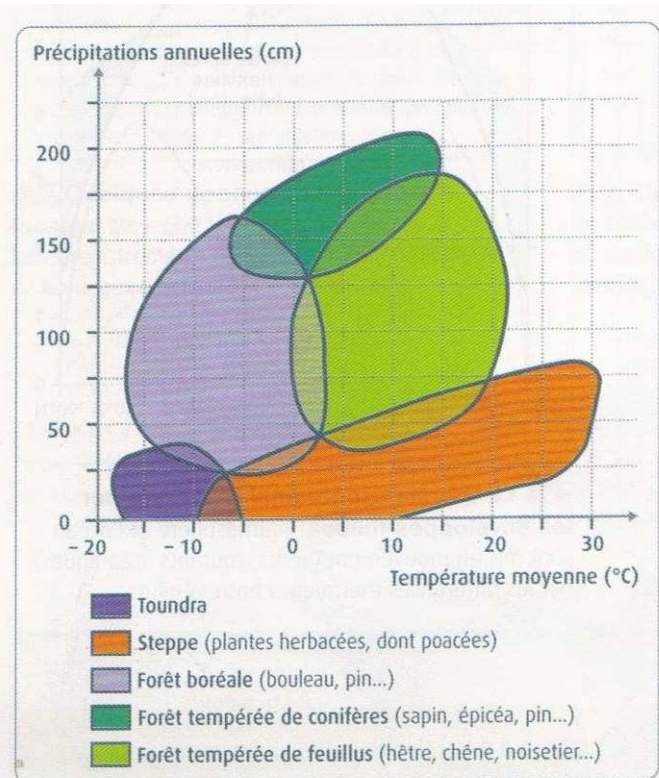
**3** Les pollens, des témoins des peuplements végétaux.

Caractéristiques des pollens qui en font de bons indicateurs des climats continentaux :

- un végétal produit du pollen dont la morphologie est caractéristique de l'espèce
- la paroi pollinique particulièrement résistante assure une excellente conservation durant un temps très long
- la petite taille des grains de pollen et leur grand nombre font que les pollens retrouvés dans des pièges sédimentaires continentaux sont assez représentatifs des peuplements végétaux locaux

=> l'ensemble de ces caractéristiques fait que les pollens permettent de reconstituer la végétation du passé.





**2 Les préférences climatiques de quelques types de peuplements végétaux.** Les peuplements végétaux (forêt tempérée de feuillus, forêt tempérée de conifères, etc.) se rencontrent sous certaines conditions de température et de précipitations.

Les végétaux peuplent les milieux continentaux en fonction de leurs caractéristiques climatiques. Durant leur période de reproduction, ils dispersent de grandes quantités de pollens (plantes à fleurs) ou de spores (fougères, mousses). Pollens et spores possèdent une enveloppe très résistante qui leur permettent d'être fossilisés lorsqu'ils sont piégés parmi d'autres sédiments.

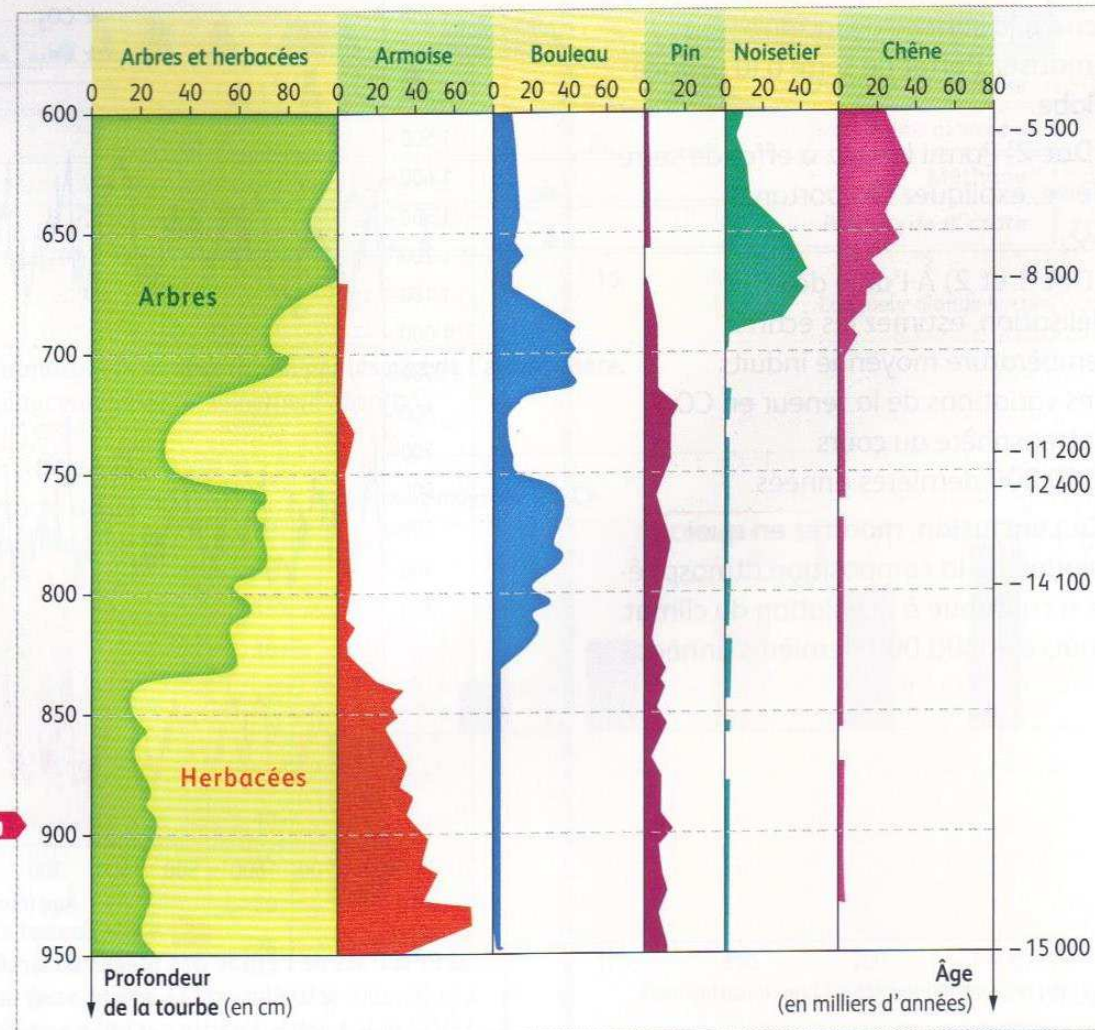


**a Pollens :** 1 de Pin, espèce forestière supportant le climat froid ; 2 de Chêne et 3 d'Armoise génépi, espèce de lande de climat froid ; 4 de Noisetier, espèces de climat tempéré ; 5 de Bouleau, espèce de climat tempéré froid.

► Le site de La Cousteix, situé au sud-est du massif des Monts Dore, correspond au comblement progressif d'un ancien lac par une tourbière.

► Les tourbières sont des dépressions humides dans lesquelles s'accumulent les restes de mousses à l'origine de la tourbe. Des pollens issus des autres végétaux alentours peuvent y être piégés et conservés.

**Diagramme pollinique (site de La Cousteix).**  
 Ce diagramme représente l'abondance relative des pollens de diverses espèces dans la tourbe en fonction de la profondeur.



## Conclusion

L'étude des sédiments océaniques permet de mettre en évidence des variations climatiques synchrones à celles établies à partir des études glaciologiques : l'analyse des pollens dans la tourbière de La Cousteix confirme le réchauffement climatique qui a fait suite à la dernière période glaciaire entre -20000 ans et -5000 ans.

La correspondance entre les variations déduites de l'étude de différentes régions, arctique, antarctique et continentales, valide l'idée de variations climatiques globales.



# Bilan

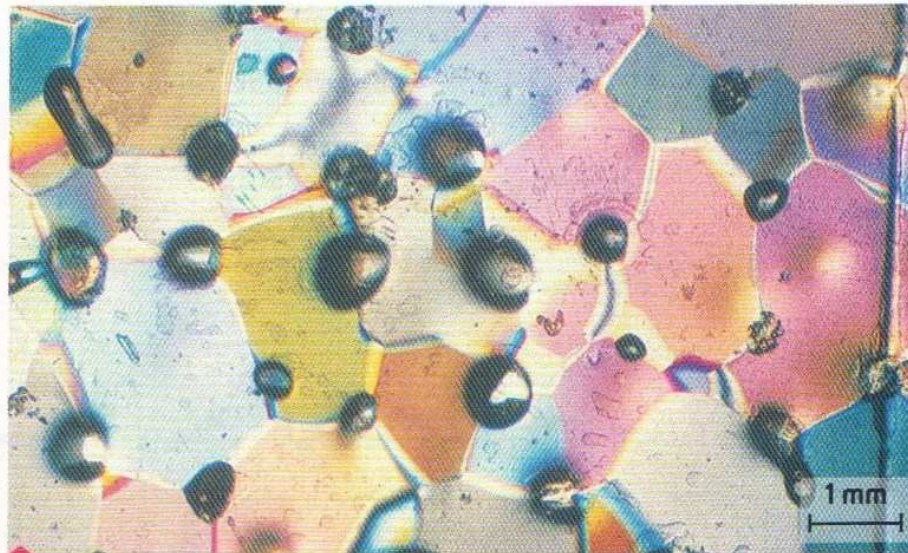
- Le peuplement végétal actuel est un bon indicateur du climat local. En effet, les espèces végétales sont adaptées à des conditions climatiques relativement précises. D'après le principe d'actualisme, on peut supposer qu'il en était de même dans le passé. La végétation du passé (ou paléovégétation) est donc utilisée comme indicateur du climat de l'époque (ou **paléoclimat**).
- La paléovégétation peut être reconstituée en étudiant les grains de pollen, dont la morphologie est caractéristique de l'espèce. C'est le domaine de la palynologie. Du fait de leur abondance et de leur grande résistance, les grains de pollen piégés dans certains sédiments (tourbe, sédiments lacustres) sont représentatifs des peuplements végétaux qui les ont produits. En identifiant puis en dénombrant les grains de pollen à différents niveaux d'une carotte sédimentaire, on peut établir un diagramme pollinique, témoin de l'évolution du peuplement végétal local. En combinant les résultats obtenus en différents sites, on construit des cartes de répartition de la végétation à différentes époques. La comparaison de ces cartes révèle des changements climatiques. Par exemple, depuis 18 000 ans, l'Europe a connu un important réchauffement climatique, qui correspond à la transition d'une période glaciaire à une période interglaciaire.
- Tout indicateur climatique (ou proxy) a ses limites, notamment en termes de résolution spatiale et temporelle du paléoclimat. L'étude des climats du passé se fonde donc sur différents proxys.

Méthode	Support	Période couverte (années)	
• Mesures instrumentales	• Résultats de mesures	• 150 (exceptionnellement 300)	
• Indicateur climatique (ou proxy)	- Dates des floraisons, vendanges, récoltes, etc.	• 2 000	
	- Cernes des arbres (dendrochronologie)	• Arbres sur pied, arbres fossiles	• 10 000
	- Pollens (palynologie)	• Sédiments lacustres, tourbe	• De l'ordre de 100 000

Quelques méthodes utilisées pour l'étude des climats du passé récent.

## - III - Histoire récente de l'atmosphère

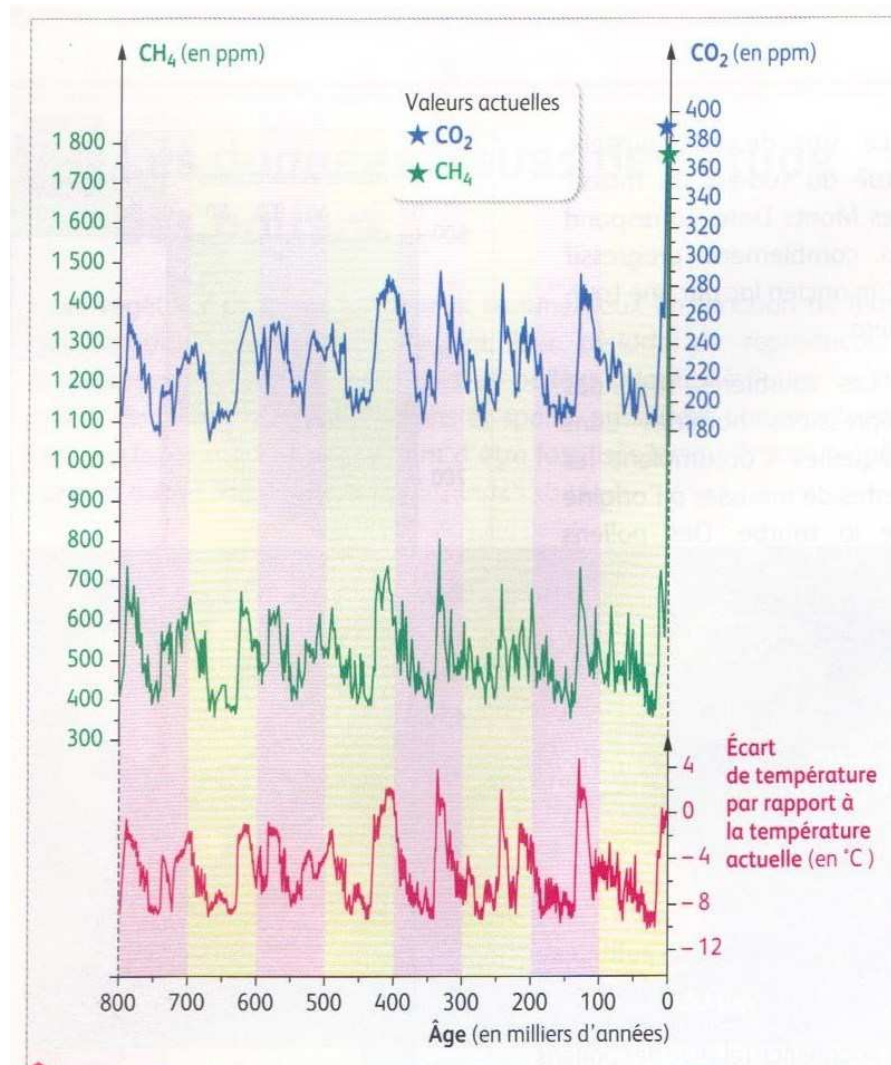
► Lorsque la neige s'empile par chutes successives, elle se transforme en glace compacte sous l'effet de son poids ; durant cette évolution, de minuscules bulles d'air sont piégées entre les cristaux de glace. Leur analyse, même quelques centaines de milliers d'années plus tard permet de connaître la composition de l'atmosphère contemporaine de leur piégeage.



**a** Bulles d'air emprisonnées dans la glace (LPA).

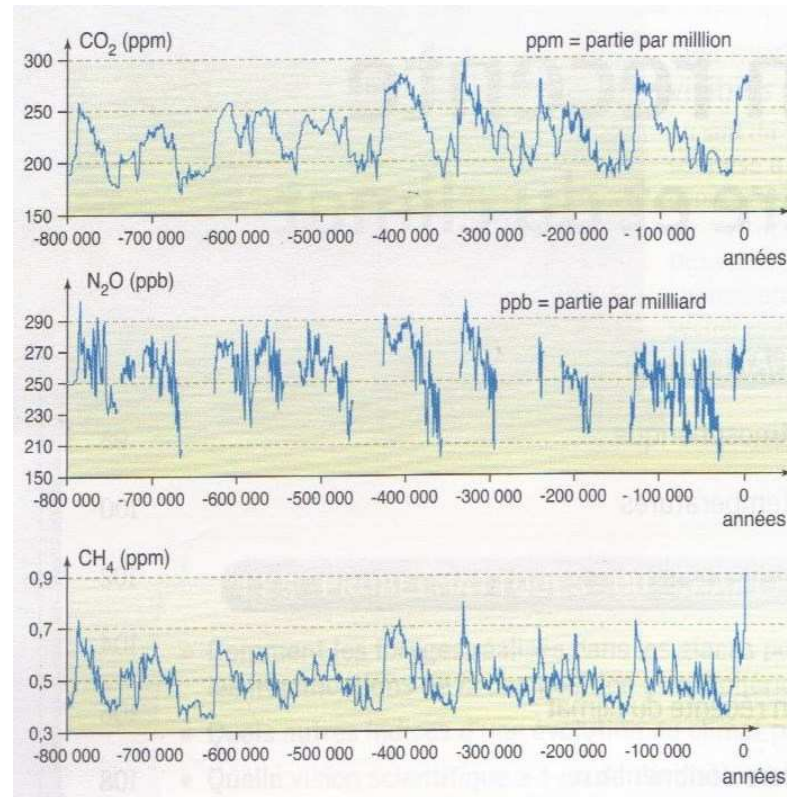
Les bulles d'air apparaissent en noir tandis que les cristaux de glace sont colorés.





**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>.

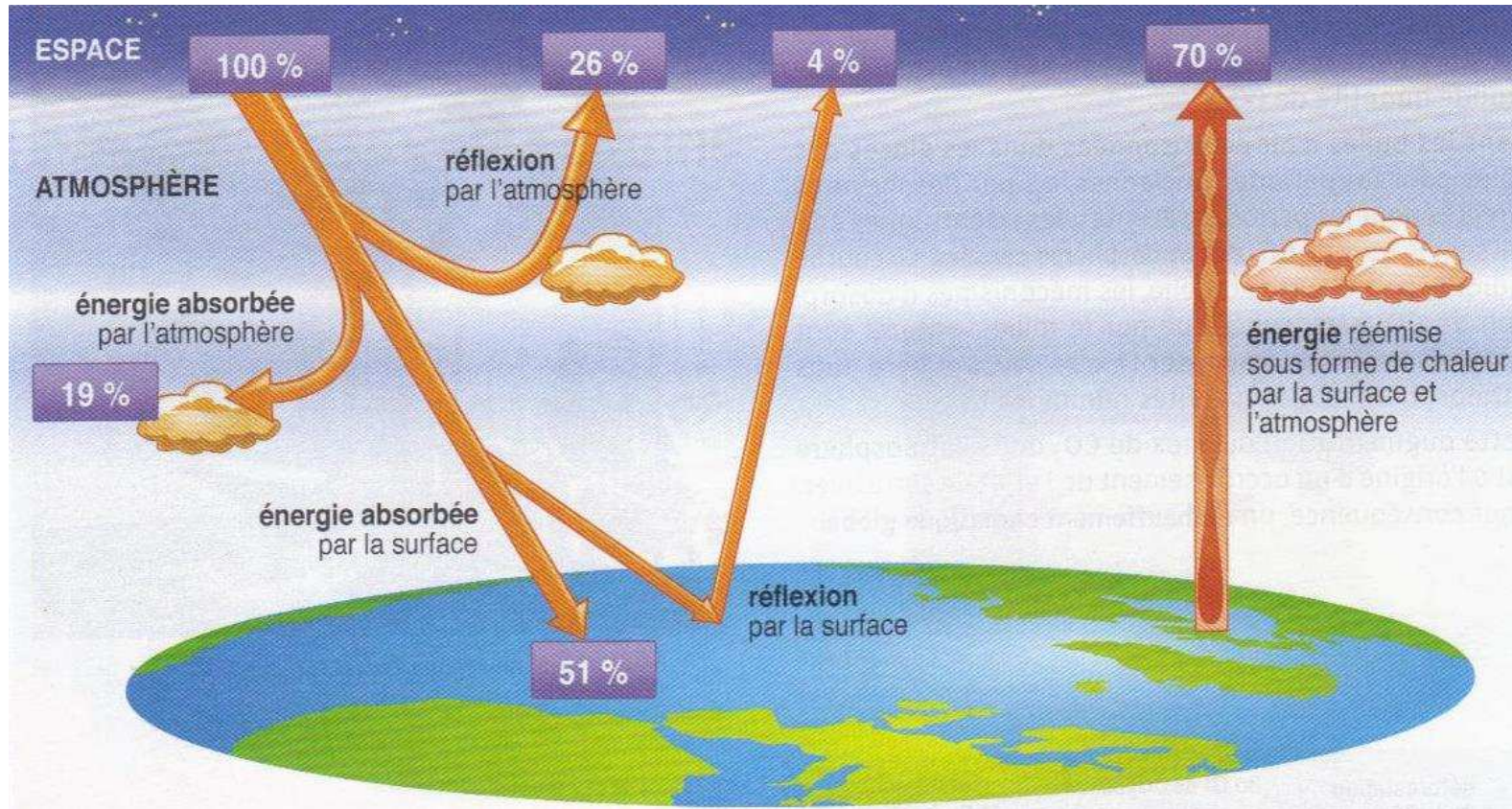


## Résultats de l'analyse des carottes de glace prélevées en Antarctique

Depuis 800 000 ans, les concentrations en CO<sub>2</sub>, en protoxyde d'azote et en méthane ont varié parallèlement et de façon cyclique, avec une période de 100 000 ans environ.



# Le bilan radiatif de la planète



Gaz	Concentration (en %)	Participation à l'effet de serre (en %)
Diazote (N <sub>2</sub> )	78,1	0
Dioxygène (O <sub>2</sub> )	20,9	0
Argon (Ar)	0,9	0
Eau (H <sub>2</sub> O)	0,1	60
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	0,038	25
Méthane (CH <sub>4</sub> )	0,000 17	15
Oxyde nitreux (N <sub>2</sub> O)	0,000 03	
Ozone (O <sub>3</sub> )	0,000 001	

**a** Importance des différents gaz dans l'effet de serre sur Terre.

Certains gaz de l'atmosphère comme le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et la vapeur d'eau peuvent absorber les radiations infrarouges réémises lors de l'échauffement de la surface de la Terre par les radiations solaires incidentes, s'échauffer et renvoyer à leur tour des radiations infrarouges vers cette surface : ils sont responsables d'un effet de serre qui permet d'expliquer la température moyenne à la surface du sol de la planète.

Le CO<sub>2</sub> apparaît comme le plus important après la vapeur d'eau dans ce processus.

# Conclusion

Au cours des 800 000 dernières années, la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre a oscillé périodiquement et de manière synchrone aux variations du climat global de la Terre : aux périodes de réchauffement coïncident des périodes d'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ ) dans l'atmosphère ; aux phases de refroidissement coïncident des baisses de la teneur de l'atmosphère en ces mêmes gaz.

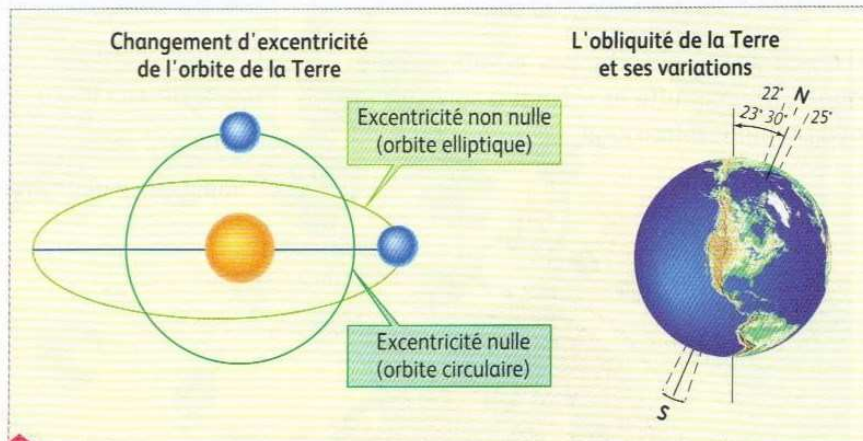
En considérant le  $\text{CO}_2$  comme le principal gaz à effet de serre après l'eau, il semble que les fluctuations des teneurs de ces gaz dans l'atmosphère n'expliquent qu'en partie seulement les écarts de température caractérisant les variations du climat. Il est donc nécessaire d'envisager l'intervention d'autres facteurs pour expliquer ces variations.



## - IV - Origines des variations climatiques récentes

### 1 Paramètres orbitaux, insolation et volume des glaces

La quantité d'énergie solaire reçue par la Terre à un endroit donné de sa surface dépend notamment de trois paramètres évoluant périodiquement : l'**excentricité** de son orbite autour du Soleil, l'**obliquité** de l'axe de rotation de la planète par rapport au plan de l'orbite et la direction vers laquelle pointe cet axe à un moment de l'année alors qu'il évolue suivant un mouvement de **précession**.



**Variations de l'excentricité de l'orbite terrestre et de l'obliquité de la planète.**

L'obliquité de la Terre varie entre 22° et 25° ; elle est actuellement de 23°30'.

**Excentricité** : valeur exprimant l'aplatissement d'une ellipse. L'excentricité de l'orbite terrestre varie de 0 à 6% suivant des périodicités de 400 000 et 100 000 ans.

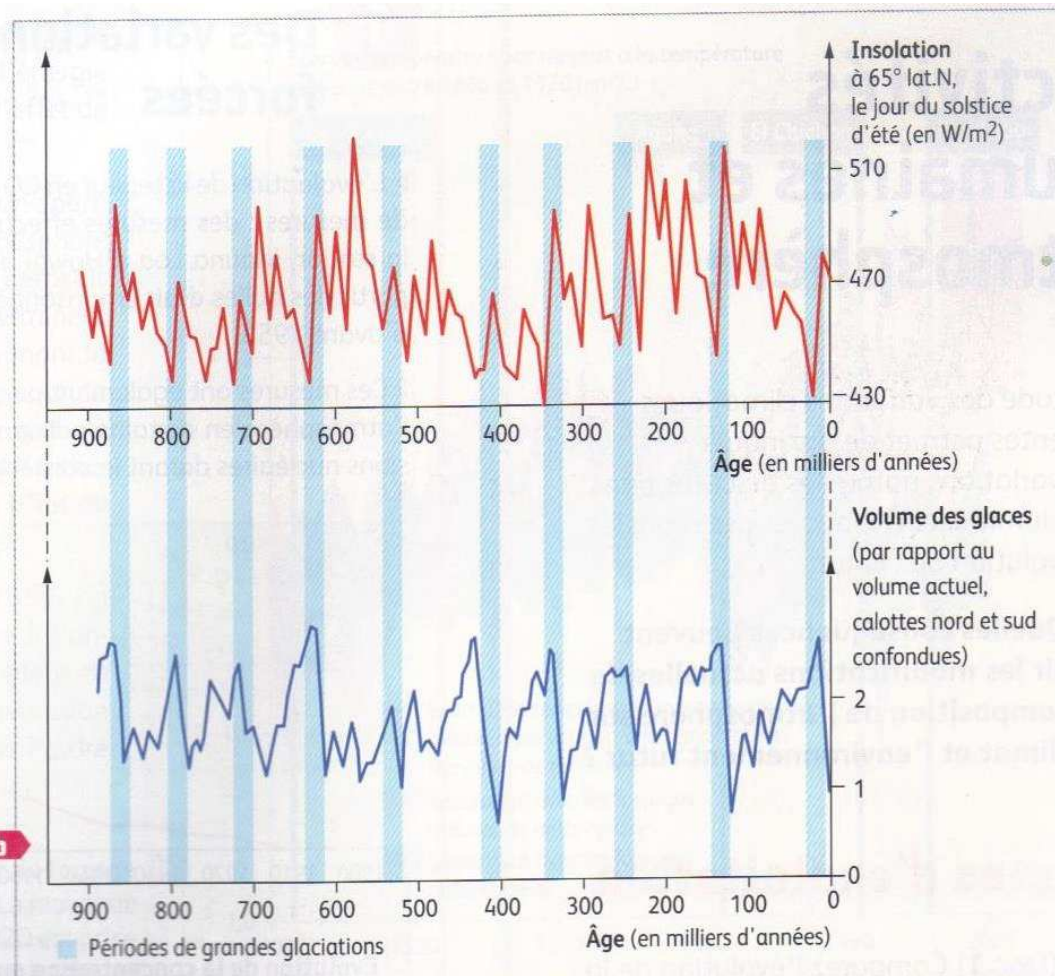
**Obliquité** : angle qui caractérise l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'orbite ; elle oscille entre 22° et 25° suivant une périodicité de 41 000 ans.

**Précession** : mouvement très lent de rotation de l'axe d'un corps, lui-même en rotation. La précession de l'axe de rotation de la Terre évolue suivant des périodicités de 23 000 ans et 19 000 ans.

Des calculs montrent que les variations orbitales de la Terre autour du Soleil peuvent induire de très légères variations d'insolation annuelles (inférieures à 0,2 %), elles-mêmes pouvant expliquer à leur tour des variations de température moyenne à la surface de la Terre de 0,5°C maximum.

On estime que lors du dernier **maximum glaciaire** (il y a 20 000 ans), la température moyenne était de 6°C inférieure à la température actuelle.

**Variations d'insolation (calculées) et du volume des glaces polaires (dédit de l'étude du  $\delta^{18}\text{O}$  des sédiments océaniques) au cours du dernier million d'années.**



L'orbite de la Terre, l'inclinaison de son axe de rotation et l'orientation de cet axe varient régulièrement suivant des périodes similaires à celles identifiées pour décrire les variations globales du climat. Ces modifications orbitales peuvent entraîner des variations périodiques d'insolation, elles-mêmes à l'origine de variations de la température moyenne à la surface de la Terre et de fluctuations du volume des calottes glaciaires ; elles sont cependant insuffisantes pour expliquer l'ampleur des variations de température déduites de l'étude des glaces. Elles peuvent apparaître comme des facteurs déclencheurs dans la mesure où elles précèdent toujours de peu les variations de température globale.

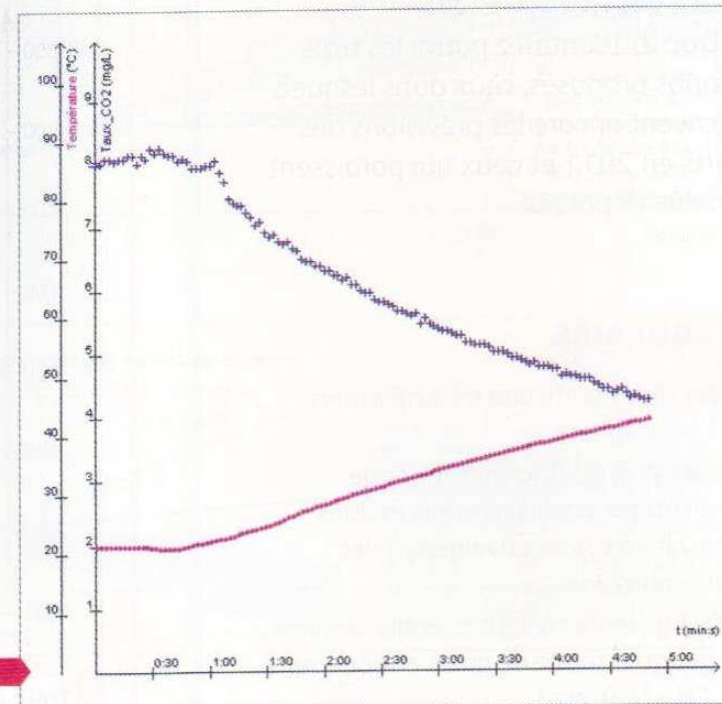


### 3 Température et solubilité du dioxyde de carbone

► Dans les océans, la température moyenne des eaux superficielles (profondeur inférieure à 1 000 m) dépend du climat alors que plus profondément elle reste constante et voisine de 1 à 2°C. La température des eaux océaniques superficielles est actuellement de 15°C alors qu'au cours du der-

nier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, elle devait être de 10°C.

► On s'intéresse ici à l'influence de la température sur la solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau.



Influence de la température sur la solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau.

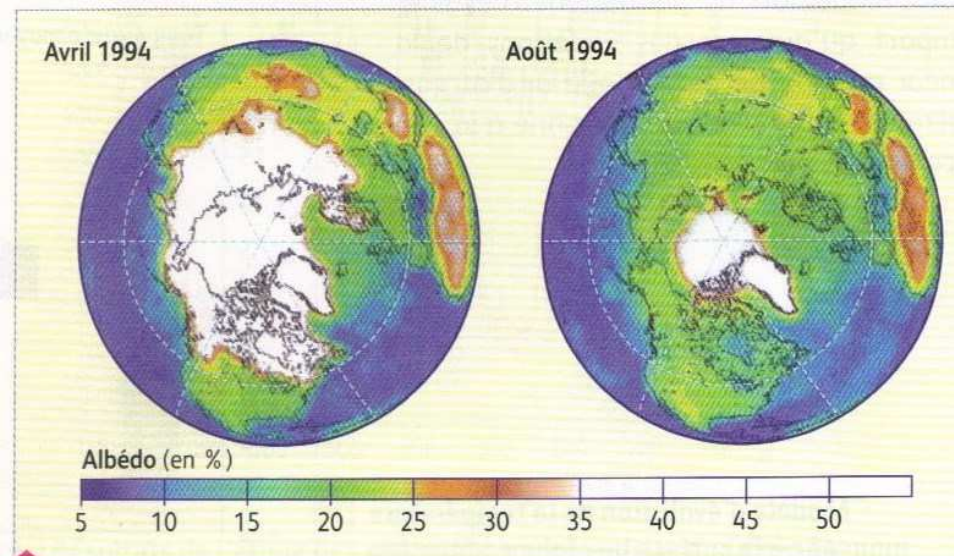
La solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau diminue lorsque la température augmente.

Lorsqu'une augmentation d'insolation initie une augmentation de température des eaux océaniques superficielles, du CO<sub>2</sub> est libéré depuis l'océan vers l'atmosphère, ce qui amplifie le réchauffement du fait d'un effet de serre accru.

A l'inverse, une baisse d'insolation induit une baisse de température qui s'accompagne d'une dissolution accrue de CO<sub>2</sub> dans l'océan et donc d'une baisse de l'effet de serre.

## 2 Glaces polaires et albédo de la Terre

- La surface de la **banquise** et de la calotte glaciaire qui recouvrent l'hémisphère nord varie au cours des saisons. Elle est maximale en fin d'hiver et minimale en fin d'été.
- L'albédo d'un objet est le rapport entre l'énergie qu'il réfléchit et l'énergie qu'il reçoit du Soleil. Plus une surface est réfléchissante, moins elle s'échauffe. Alors que l'albédo moyen de la Terre (hors zone glacée) est de 0,2, l'albédo moyen des glaces est de 0,85.



▮ Albédo de l'hémisphère nord de la Terre mesuré par satellite au cours de 2 mois de l'année.



Lors d'installation de période froide, le développement de glaces polaires augmente l'albédo global de la planète : le rayonnement solaire est davantage réfléchi et chauffe moins la surface terrestre qui se refroidit donc de plus en plus vite.

A l'opposé, lors d'un réchauffement, la baisse de l'albédo global consécutif à la diminution de l'englacement accélère la hausse des températures.

# Conclusion

Il est donc possible de proposer le scénario suivant pour une phase de refroidissement : elle peut être initiée par une modification des paramètres orbitaux terrestres qui a pour effet premier une diminution d'insolation estivale et un abaissement de la température moyenne en surface du globe. La baisse de température qui en découle facilite le transfert de CO<sub>2</sub> depuis l'atmosphère vers l'océan, et donc une diminution de l'effet de serre ; cette action est donc à même d'amplifier le refroidissement initié par la modification des paramètres orbitaux terrestres.

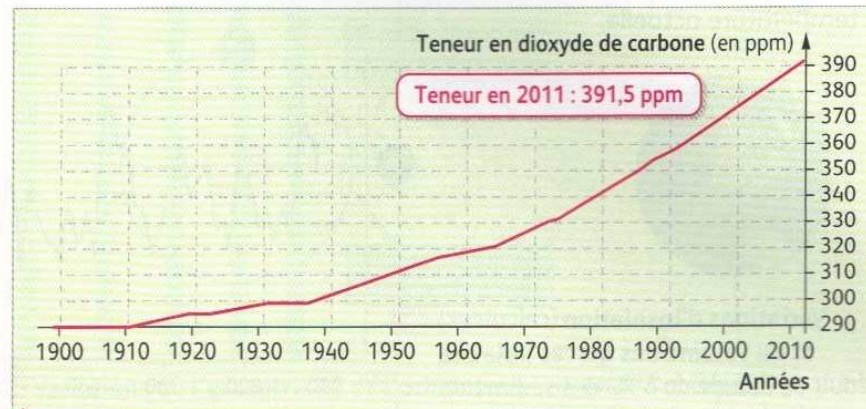
Aux hautes latitudes, l'augmentation de l'englacement provoque une augmentation de l'albédo, ce qui amplifie aussi le refroidissement de ces régions et donc l'abaissement de la température moyenne du globe.

Le scénario inverse peut être proposé en cas de réchauffement avec cependant un déroulement plus rapide de celui-ci.

# - V - Activités humaines et atmosphère

## 1 Des variations climatiques forcées

- L'évaluation de la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère repose sur deux types de mesures : des mesures effectuées directement dans l'atmosphère à la station Mauna Loa d'Hawaï depuis 1958 ; des mesures effectuées à partir des bulles d'air emprisonnées dans les glaces pour les évaluations d'avant 1958.
- Ces mesures ont également permis de suivre l'évolution de la teneur de l'atmosphère en certains polluants tels les CFC, ou ceux liés aux explosions nucléaires durant le  $\text{xx}^{\text{e}}$  siècle.



a Évolution de la concentration moyenne de  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère depuis 1900.

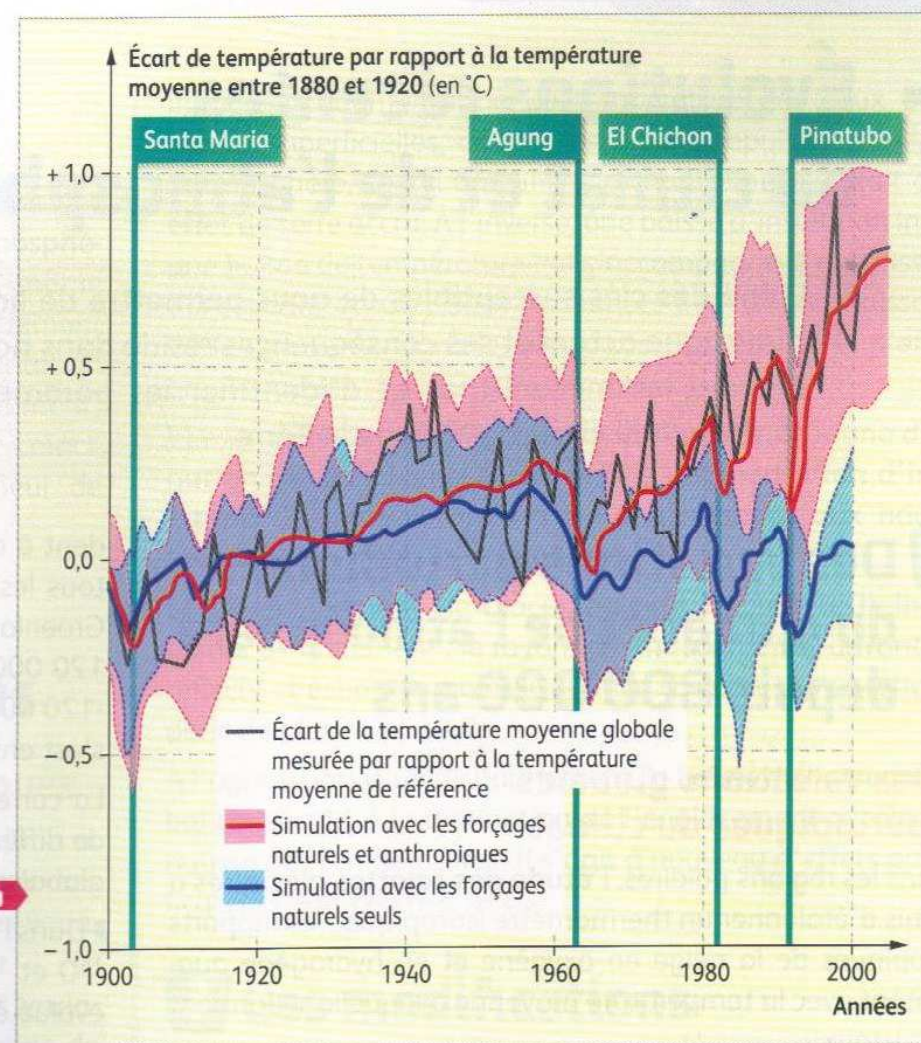


► La température moyenne à la surface de la Terre résulte des effets conjoints de l'énergie solaire parvenant à cette surface et de l'effet de serre.

► Les variations de l'activité du Soleil d'une part, les fluctuations de l'opacité de l'atmosphère influencée notamment par sa teneur en **aérosols** d'origine volcanique d'autre part, déterminent des variations de l'énergie solaire atteignant la surface de la Terre. On appelle «forçage» toute variation de température moyenne globale consécutive à une variation de l'énergie radiative incidente (forçage naturel), ou à un **effet de serre additionnel** (forçage anthropique).

► Depuis le début de l'ère industrielle (1850), on estime que les activités humaines sont à l'origine d'une augmentation nette de la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère ; en 2010, l'augmentation a été de 2,42 ppm alors qu'elle était de l'ordre de 1 ppm/an durant les années 1960.

**Modélisations du forçage naturel et du forçage anthropique depuis 1900.** La moyenne des températures entre 1880 et 1920 est prise pour référence (0,0). Quelques éruptions volcaniques avec fortes émissions d'aérosols ont été repérées.



Avant 1960, la modélisation de l'évolution de la température ne prenant en compte que le forçage naturel demeure relativement proche de celle intégrant en plus le forçage anthropique, et de l'évolution constatée de la température moyenne globale.

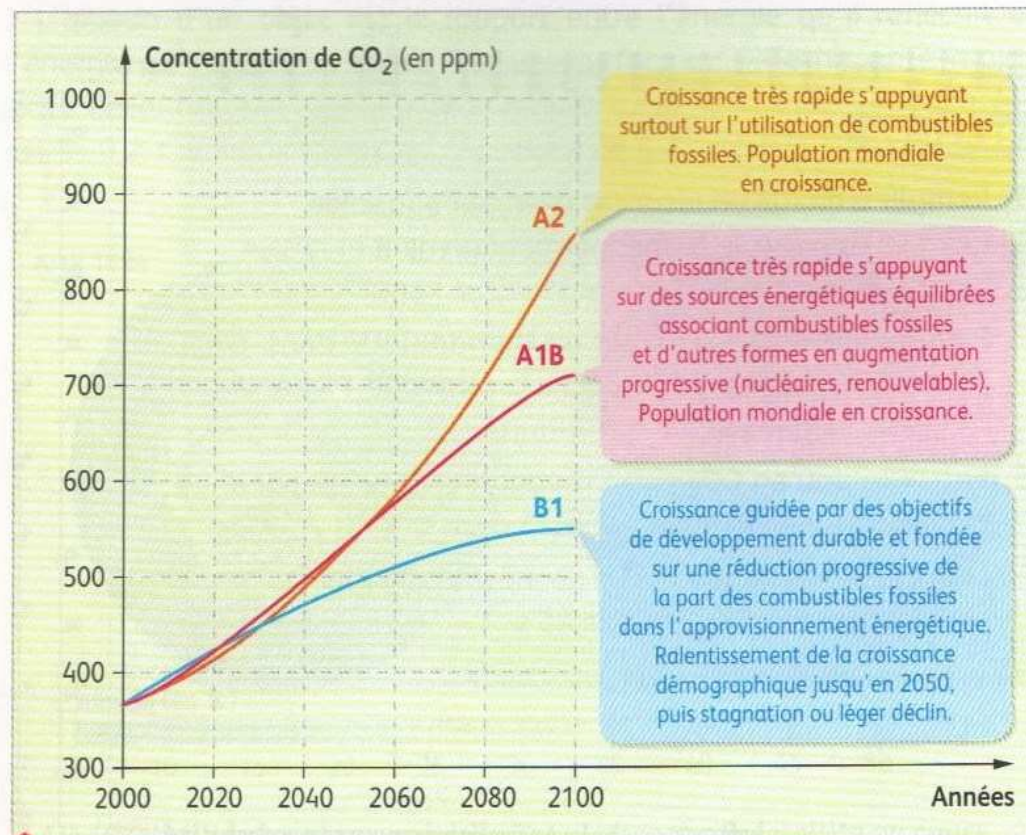
Depuis 1960, l'évolution de la température moyenne globale s'est écartée de l'évolution de la température modélisée à partir de la seule prise en compte du forçage naturel, tout en demeurant proche de celle modélisée sur la base de forçages naturel et anthropique.

Cela signifie qu'à partir de 1960, l'augmentation des rejets de gaz à effet de serre en relation avec les activités humaines est devenue un facteur prépondérant de l'évolution de la température, donc du climat.



## 2 Des modèles pour prévoir l'évolution du climat

Divers scénarios ont servi de base aux modélisations visant à établir les conséquences climatiques de la hausse de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère associée à chacun d'entre eux.



**a** Trois scénarios utilisés pour modéliser l'évolution du climat.



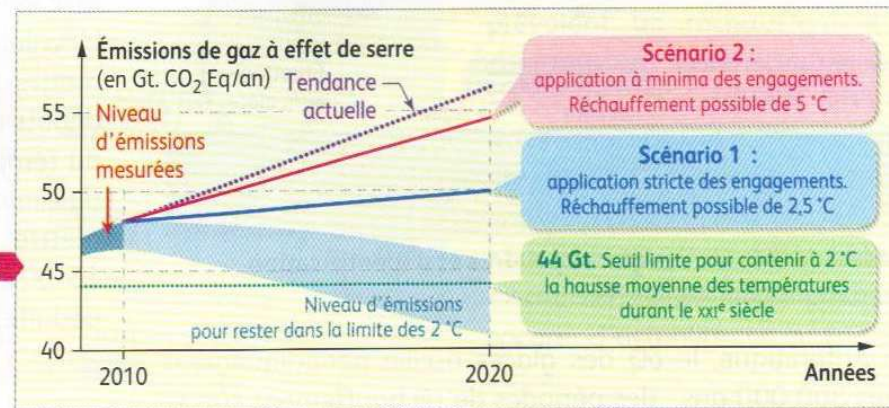
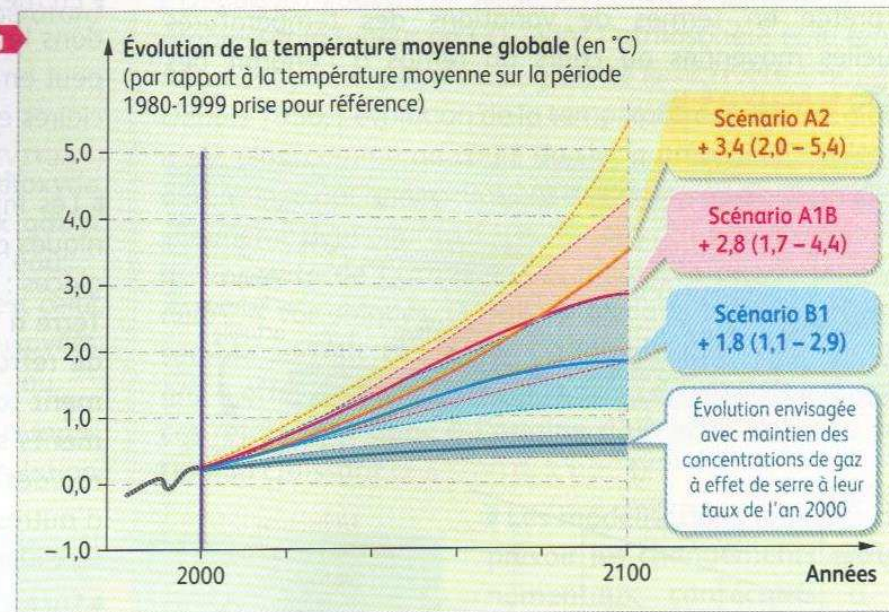
**Modèle d'évolution de la température moyenne à la surface du globe en fonction des scénarios d'évolution de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.**

► Pour chaque scénario, les climatologues ont estimé par plusieurs méthodes de calcul le réchauffement global probable à l'horizon 2100. Les courbes en gras représentent les moyennes des valeurs obtenues par les différentes méthodes de calcul ; les secteurs figurés autour de chacune d'elles indiquent les incertitudes des résultats obtenus avec ces différentes méthodes. Pour chaque scénario, une valeur de température estimée est fournie pour 2100, accompagnée d'une fourchette tenant compte des incertitudes du modèle (entre parenthèses).

► Sous l'égide de l'ONU, 86 pays ont déposé en 2009 des engagements climatiques en vue d'une maîtrise du réchauffement en cours.

**Modèles d'évolution des émissions de gaz à effet de serre et du climat en fonction du suivi des engagements des états.**

En 2010, les rejets de gaz à effet de serre s'établissaient à 47 Gt CO<sub>2</sub> Eq.





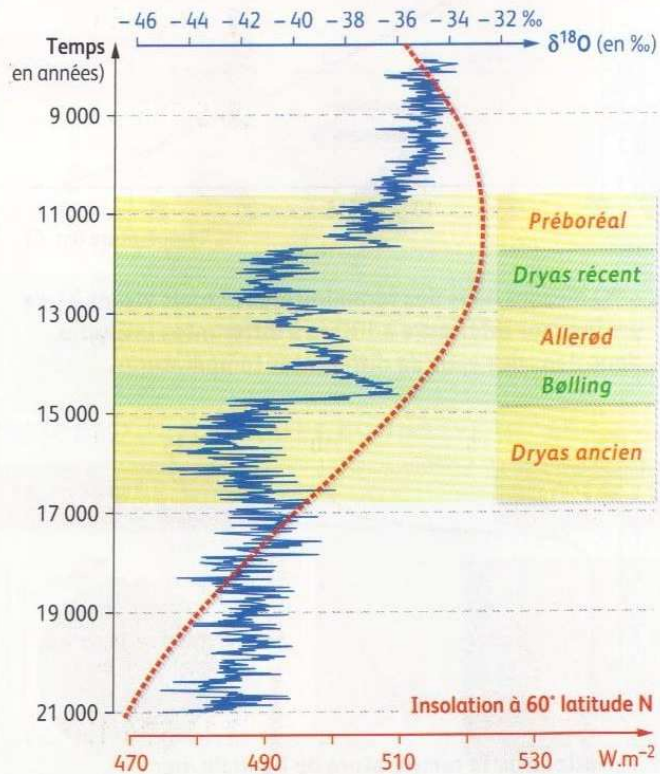
# L'évolution du climat depuis 20 000 ans

Au cours du dernier million d'années, le climat de la Terre a connu une succession de variations climatiques qui ont laissé de nombreuses traces sédimentaires.

## QUESTION

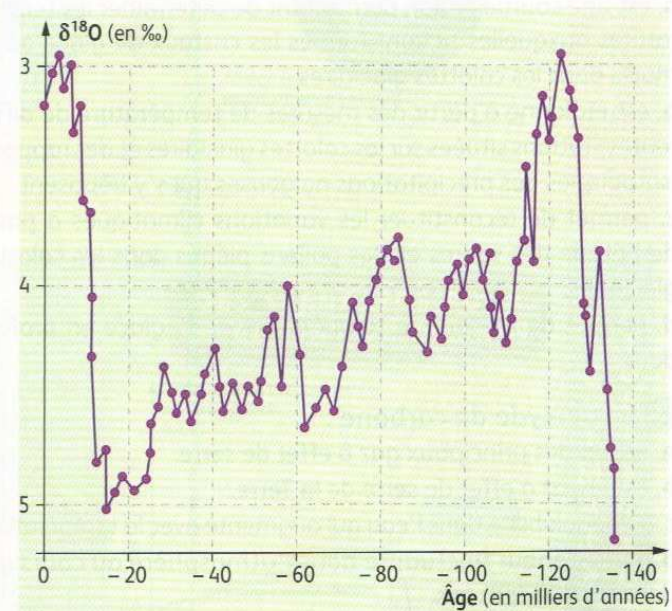
À partir de l'exploitation des documents proposés et de vos connaissances, dégager les principales caractéristiques de l'évolution du climat de la Terre depuis 20 000 ans.

DOCUMENT 1 Insolation estivale et évolution du  $\delta^{18}\text{O}$  dans les glaces du Groenland depuis 20 000 ans



DOCUMENT 2 Variations du  $\delta^{18}\text{O}$  de foraminifères benthiques au cours des 130 000 dernières années

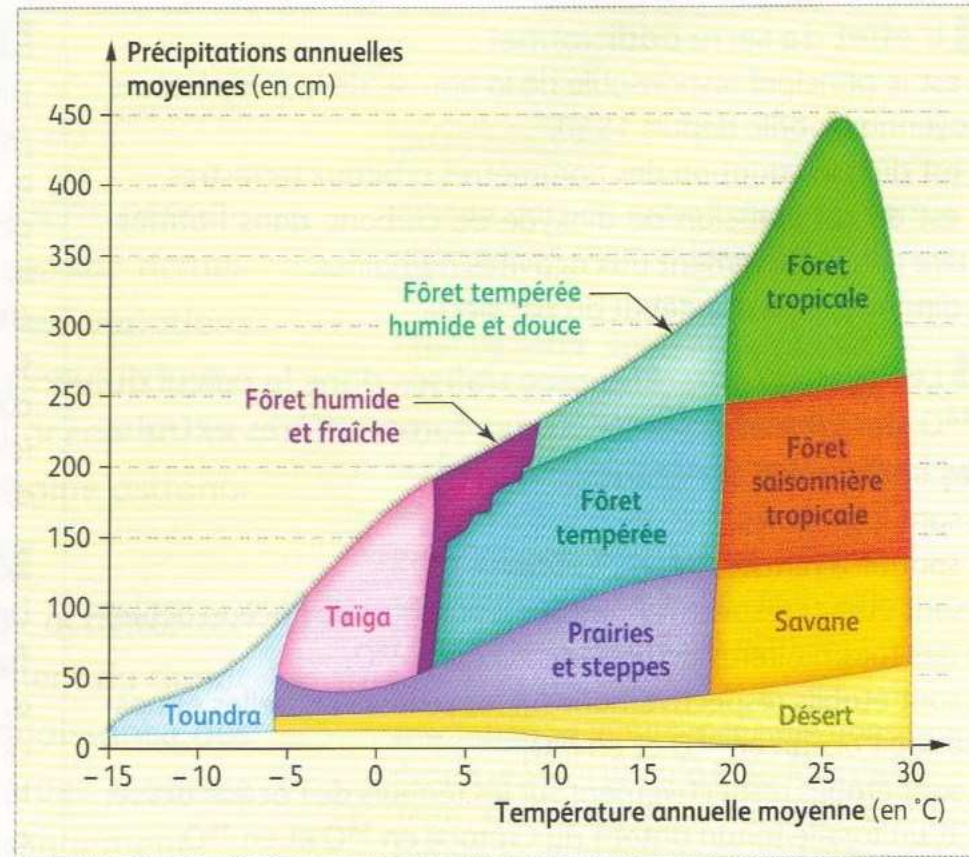
Les mesures ont été réalisées à partir de l'étude des sédiments d'une carotte de sédiments océaniques prélevés dans l'océan Pacifique équatorial.



DOCUMENT 3 Répartition de quelques espèces végétales actuelles et des principaux biomes terrestres

► Un biome est un groupement d'organismes vivants caractérisés par leur adaptation aux contraintes environnementales, et particulièrement au climat.

Biomes terrestres	Espèces végétales
Steppe boréale froide : toundra, prairies arctique et alpine	Armoise Chenopode
Forêt boréale : taïga	Pin, Bouleau
Forêt tempérée humide et fraîche	Hêtre Sapin
Forêt tempérée humide et douce et forêt tempérée	Chêne, Noisetier, Orme, Frêne, Tilleul





DOCUMENT 4 Diagramme pollinique simplifié du site de la Chaumette (Aubrac, Massif central, France)

▮ Ces courbes figurent les proportions de pollens de différentes espèces végétales en fonction de la profondeur du carottage.

