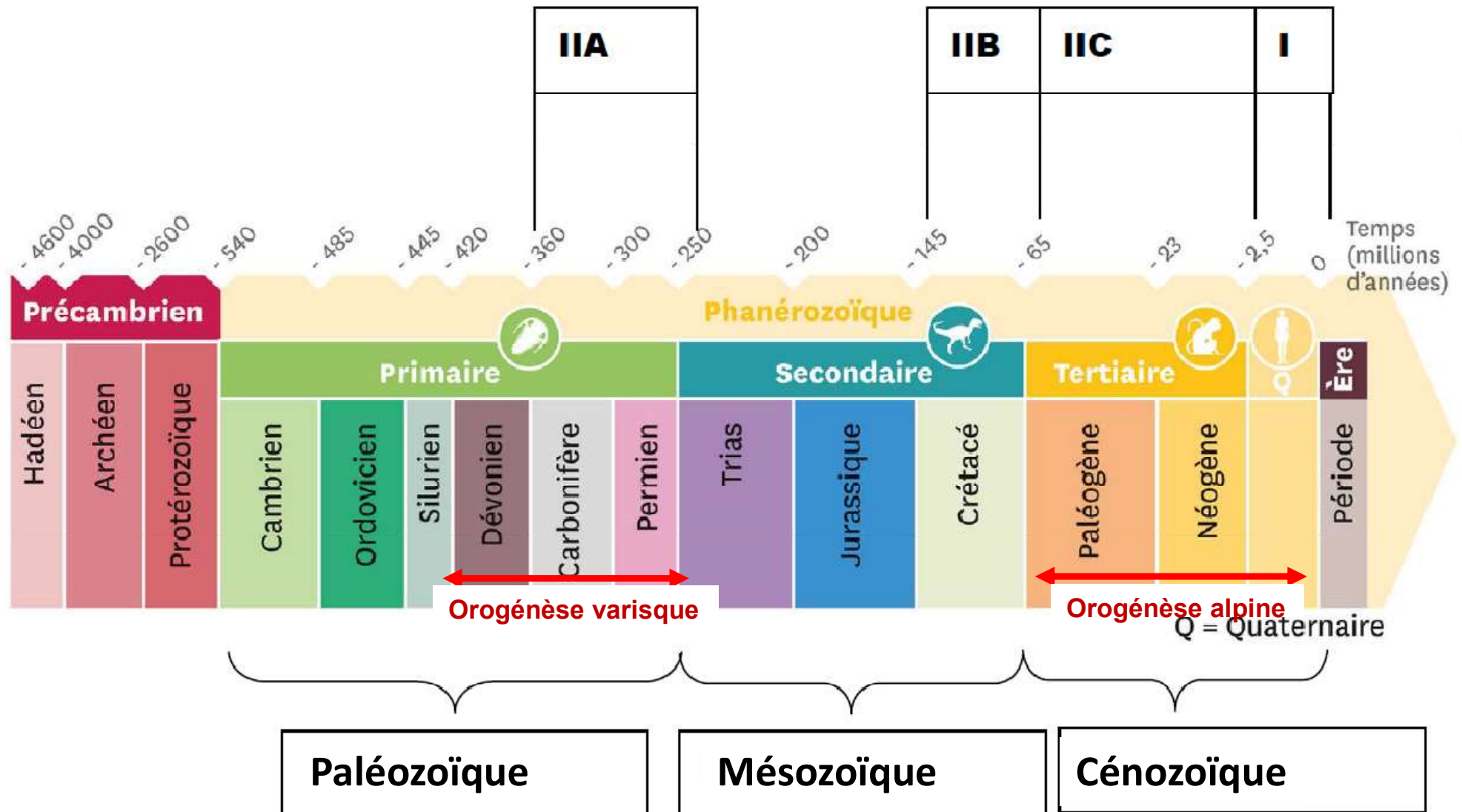


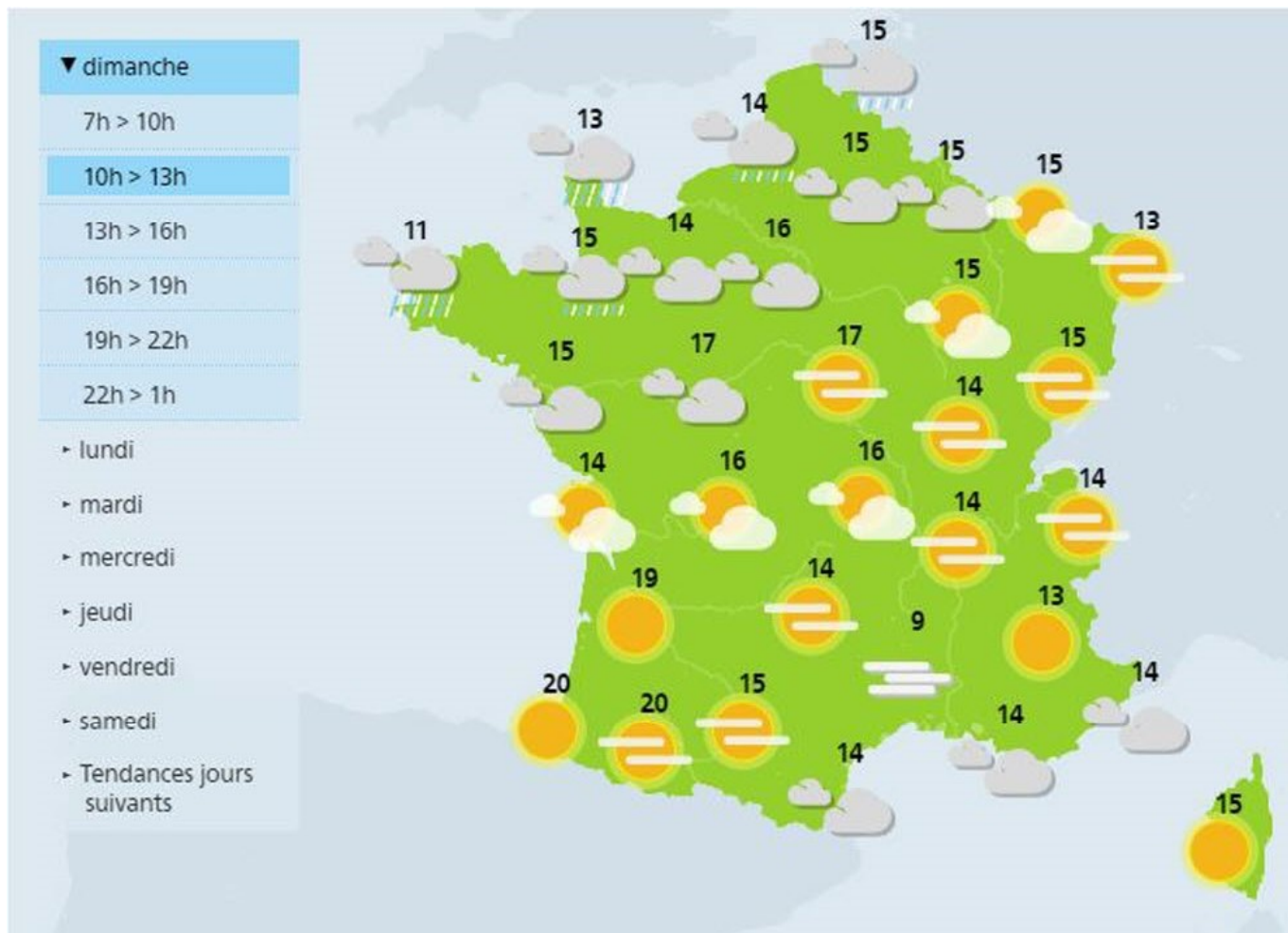
# **Thème : Les climats de la Terre: comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain**



# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées



# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

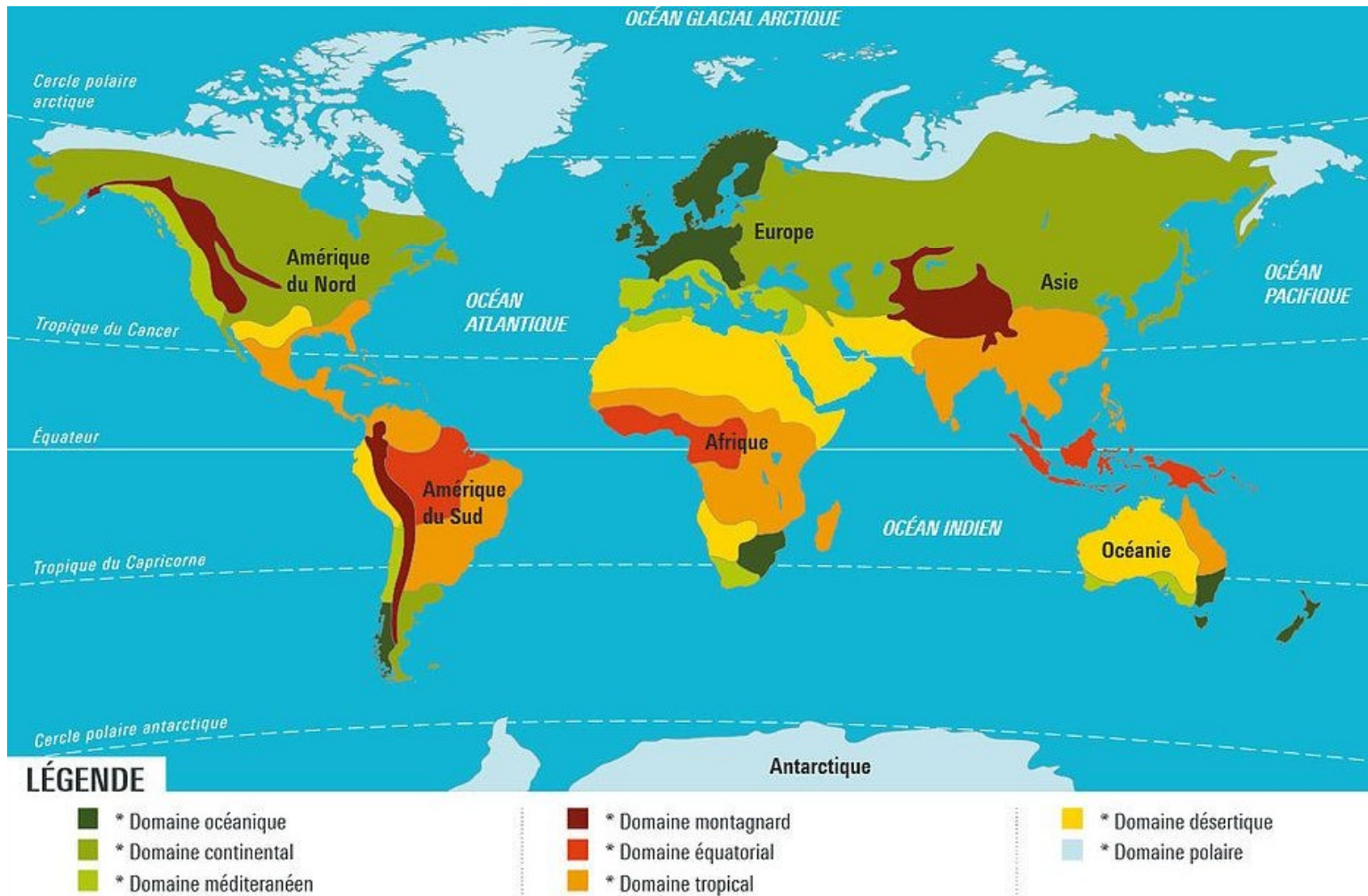


Carte météo du 16 février 2020

La **météorologie** est une science qui étudie les phénomènes atmosphérique dans le but de faire des prévisions à court terme (jours ou semaines)



# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées



Principales zones climatiques actuelles de la Terre

La **climatologie** est une science qui étudie les variations du climat (défini par des conditions météorologiques – T°C, pluviométrie, ensoleillement, vents, pression atmosphérique – en un lieu sur un temps long) dans l'espace et le temps à moyen et long terme (années, siècles, périodes géologiques)



# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

*Comment les scientifiques reconstituent-ils les variations climatiques passées ?*

# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

## I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

- A. les changements climatiques du quaternaire
- B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques
- C. Les causes des variations climatiques du quaternaire

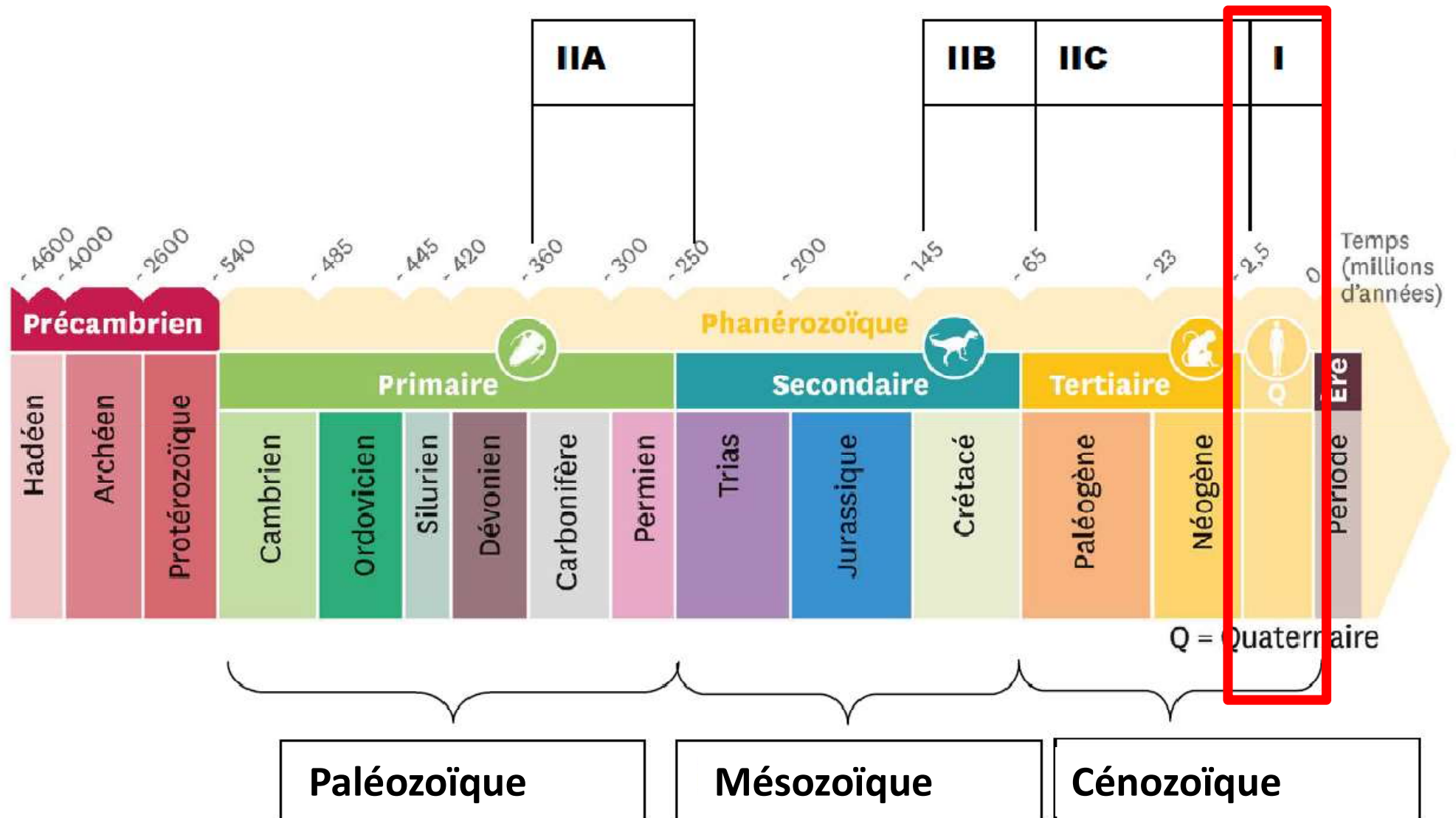
## II. Des variations climatiques anciennes – TD2

- A. La glaciation Carbonifère-Permien (période comprise entre -360 et -250 Ma)
- B. des indices d'un climat chaud au Crétacé (période comprise entre -145 et -65 Ma).
- C. Le refroidissement Cénozoïque (période comprise entre -65 Ma et aujourd'hui).

# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

## I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

### A. les changements climatiques du quaternaire





# **Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées**

## **I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines**

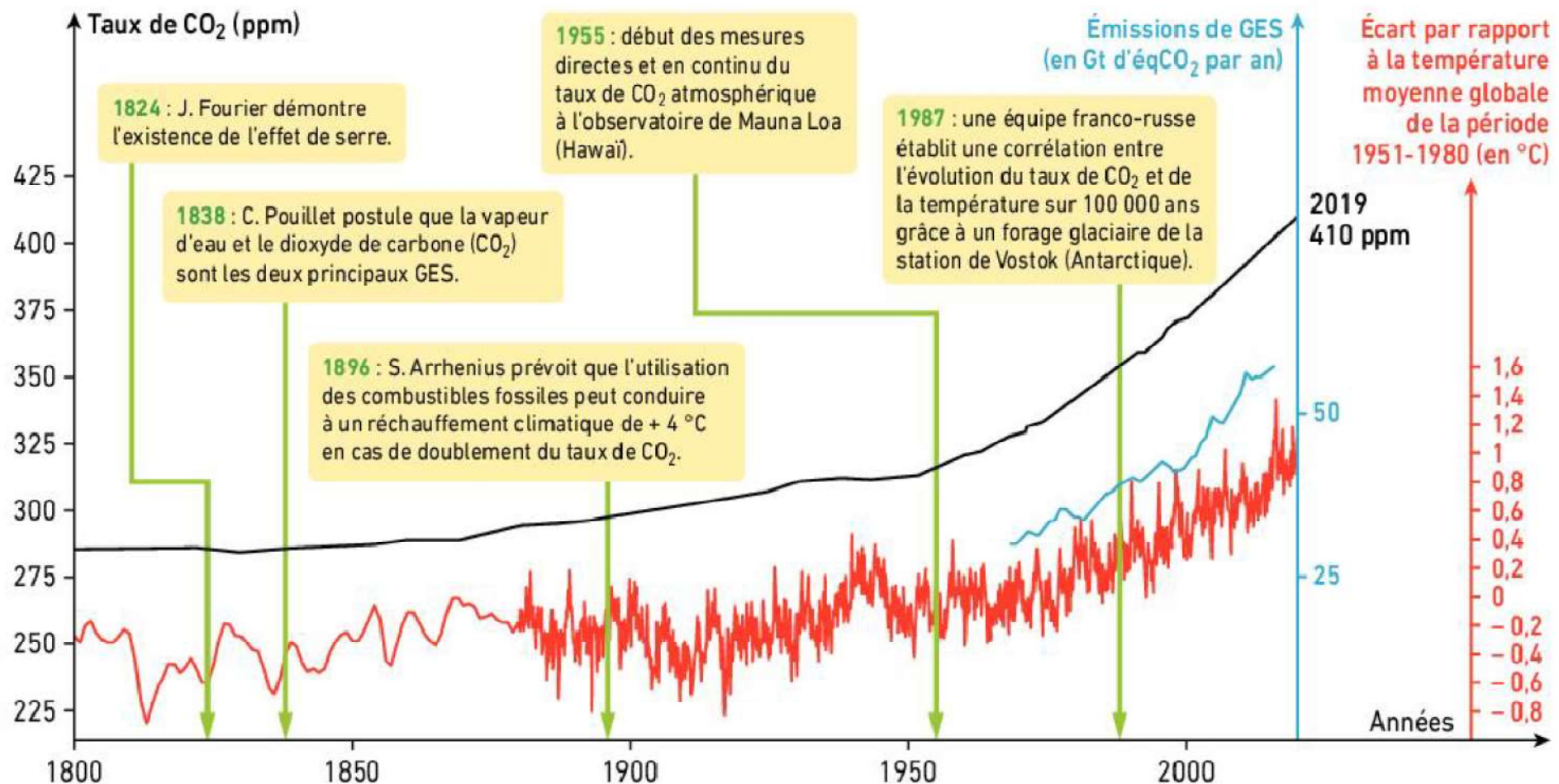
### **A. les changements climatiques du quaternaire**

#### **1. Le réchauffement climatique actuel (dernier siècle)**

## De la mise en évidence d'un réchauffement climatique à la prise de décisions politiques

De nombreuses observations cumulées depuis 200 ans prouvent le **réchauffement climatique\*** de la Terre (A). Il faut pourtant attendre 1979 pour que commence **l'élaboration d'un consensus scientifique\*** sur ce sujet (1<sup>re</sup> conférence mondiale sur le climat) et qu'il soit porté à la connaissance du plus grand nombre.

Ainsi, en 1988, est créé le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (**GIEC\***) permettant à plus de 2500 scientifiques du monde entier et à leurs équipes de produire plusieurs rapports à l'attention du grand public et des décideurs politiques (B).



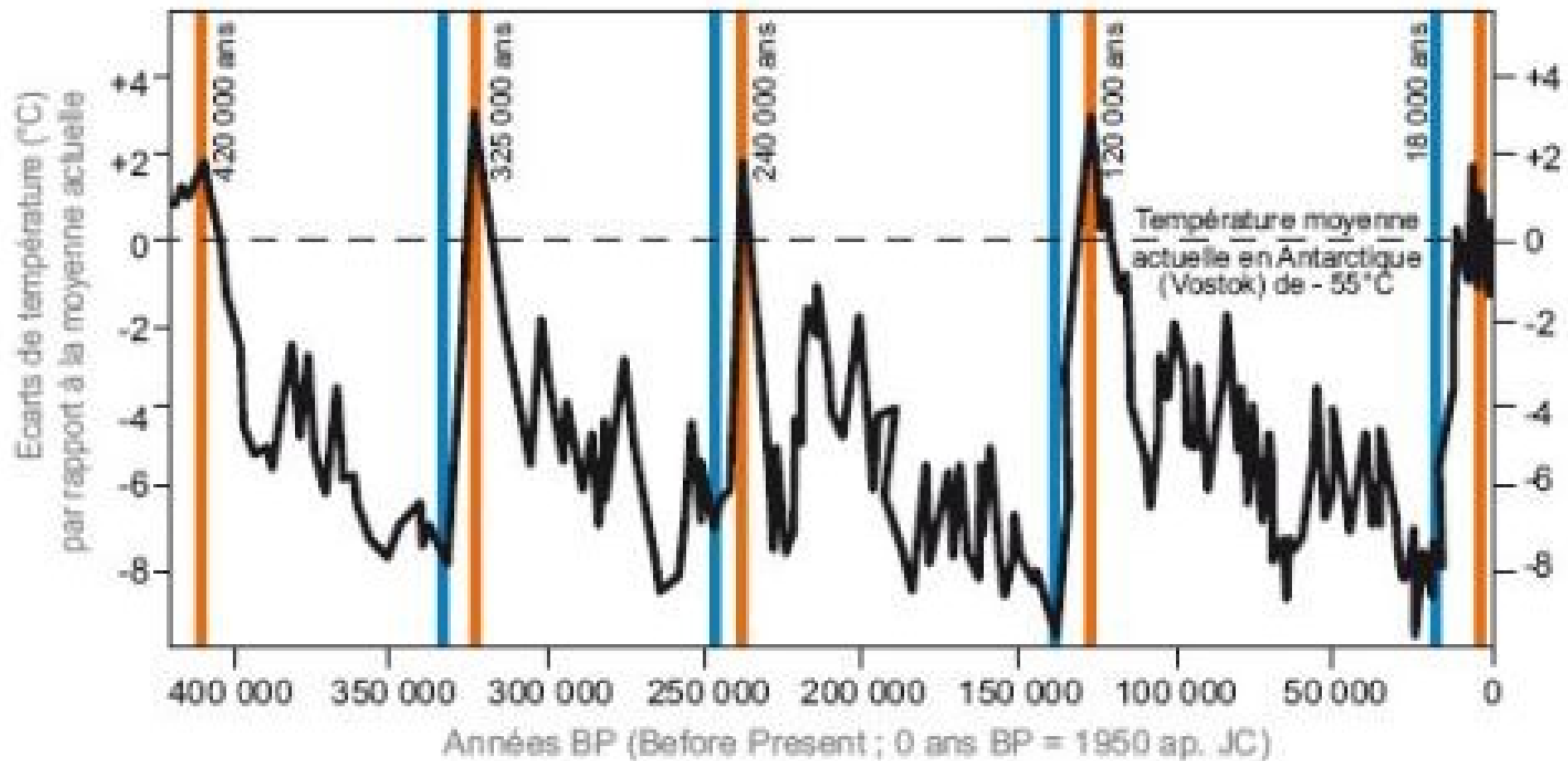
# **Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées**

## **I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines**

### **A. les changements climatiques du quaternaire**

- 1. Le réchauffement climatique actuel (dernier siècle)**
- 2. Le climat du quaternaire : une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires**

## Des cycles climatiques réguliers

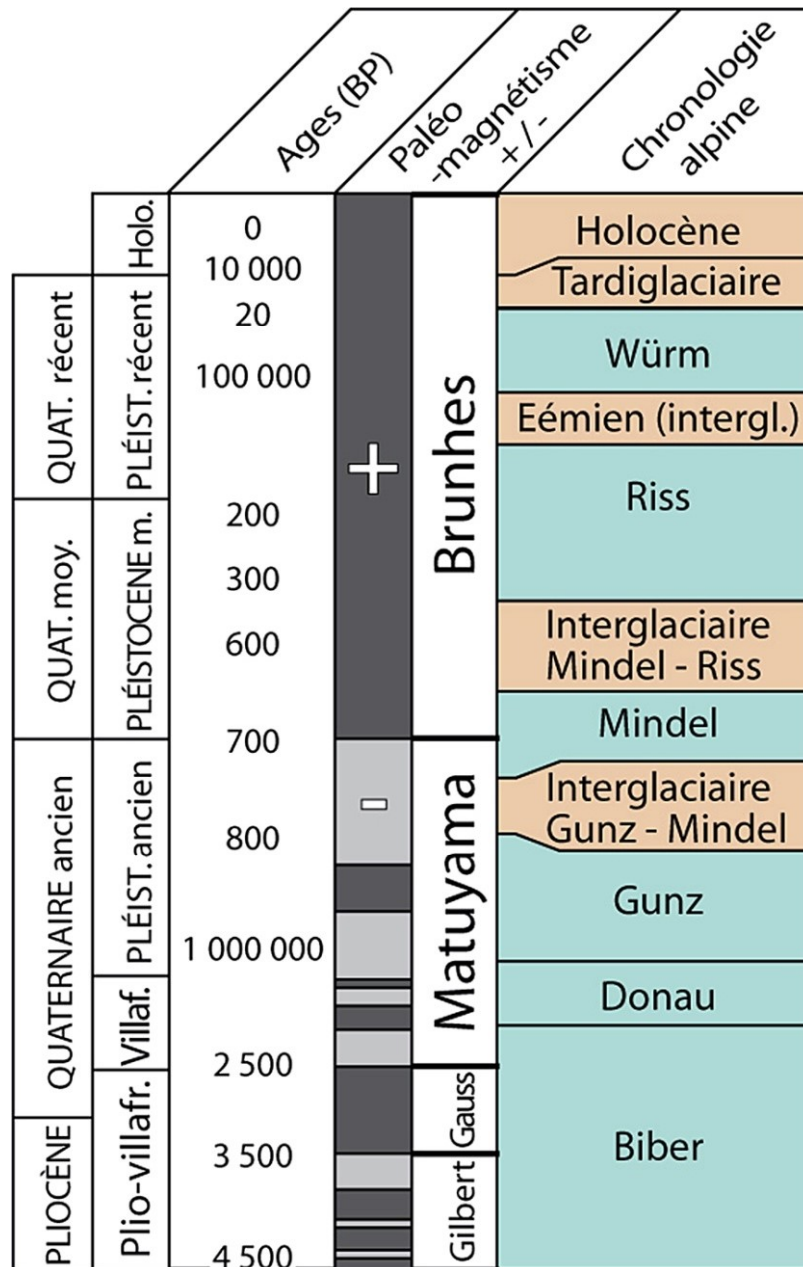


Reconstitution pour l'Antarctique (site de Vostock) de l'évolution des écarts de températures par rapport à la moyenne actuelle en Antarctique

(Source : d'après Petit & al., 2000)



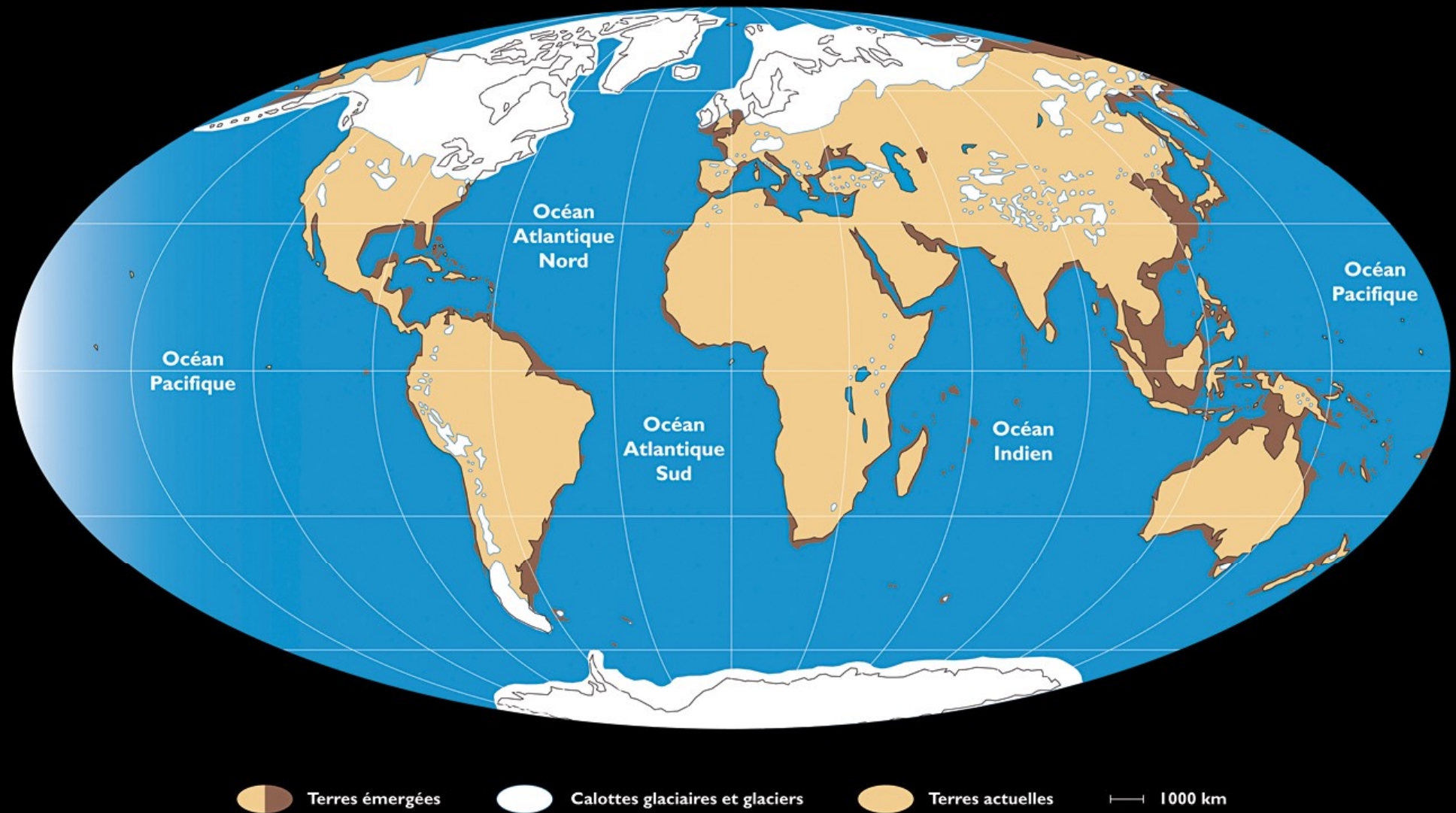
# Des cycles climatiques réguliers



interglaciaire

glaciaire

# Würm : dernière phase glaciaire (-120 000 ans / - 11000 ans)

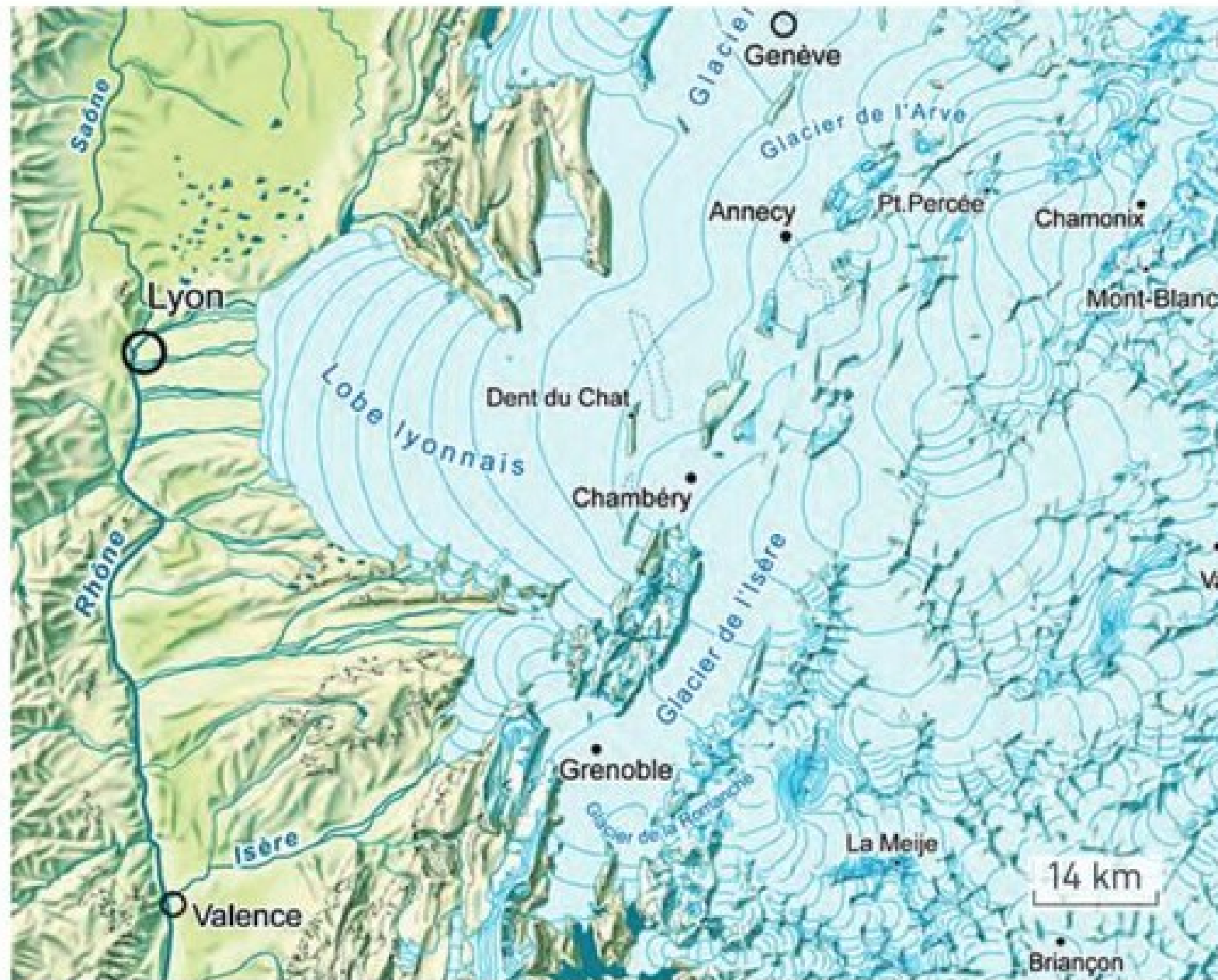


# Würm : dernière phase glaciaire (-120 000 ans / - 11000 ans)





## Würm : dernière phase glaciaire (-120 000 ans / - 11000 ans)



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

# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

A. les changements climatiques du quaternaire

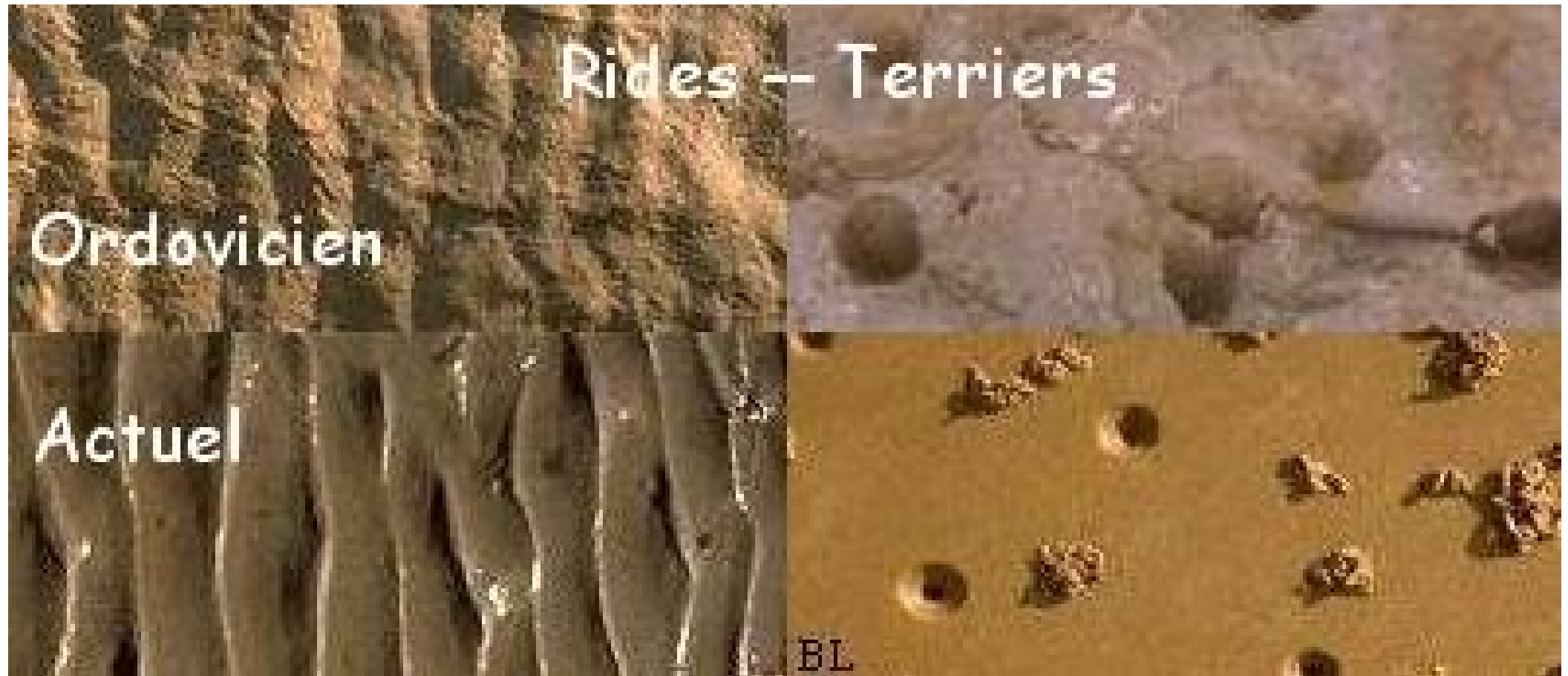
**B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques**



## **Principe d'actualisme :**

**principe selon lequel les phénomènes géologiques passés se sont déroulés de la même manière qu'actuellement. De même, des êtres vivants similaires à des organismes actuels devaient vivre dans le même environnement (climat notamment).**

# Principe d'actualisme : exemple



Présence d'eau – de vagues

# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

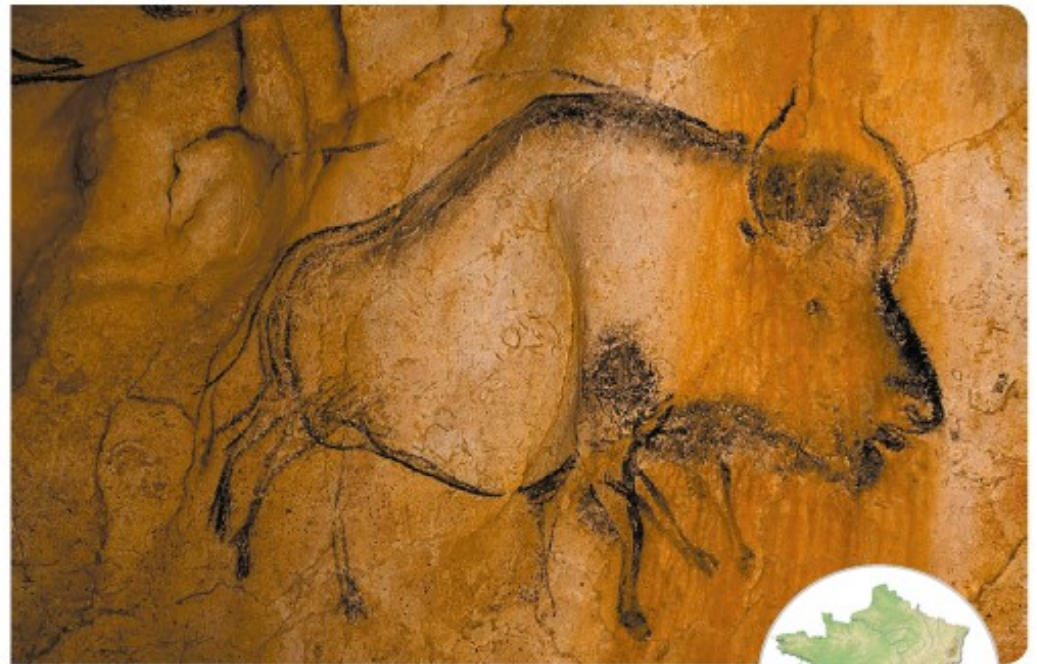
A. les changements climatiques du quaternaire

**B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques**

**1. Les données de l'archéologie (TD1)**

A partir des documents ci-dessous (manuel p 245), montrer comment l'étude de la grotte Chauvet et de la grotte Cosquer peut permettre de reconstituer le climat d'une période donnée.

Pour y parvenir, vous exploiterez les gravures rupestres de ces grottes et vous expliquerez comment des humains ont pu accéder à la grotte Cosquer.



**13** 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.



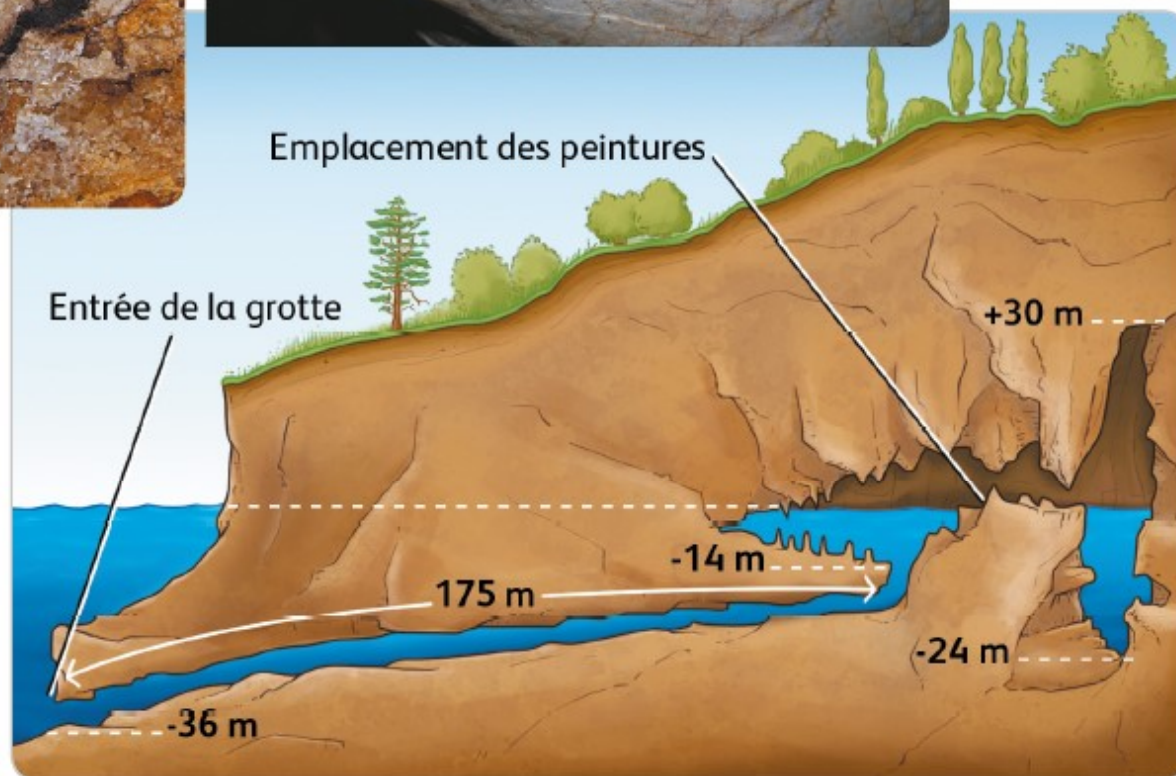




**14 La grotte Cosquer (Bouches-du-Rhône) et ses peintures.** Cette grotte, dont l'entrée est actuellement située à 36 m sous le niveau de la mer, a été fréquentée par des humains entre -27 000 et -19 000 ans (il n'existe aucun autre accès à la grotte que celui indiqué sur le schéma).

## Mémo

> Les toundras sont des formations végétales que l'on observe dans les régions au climat polaire (températures froides toute l'année, températures moyennes du mois le plus chaud jamais supérieures à 10°C).



# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

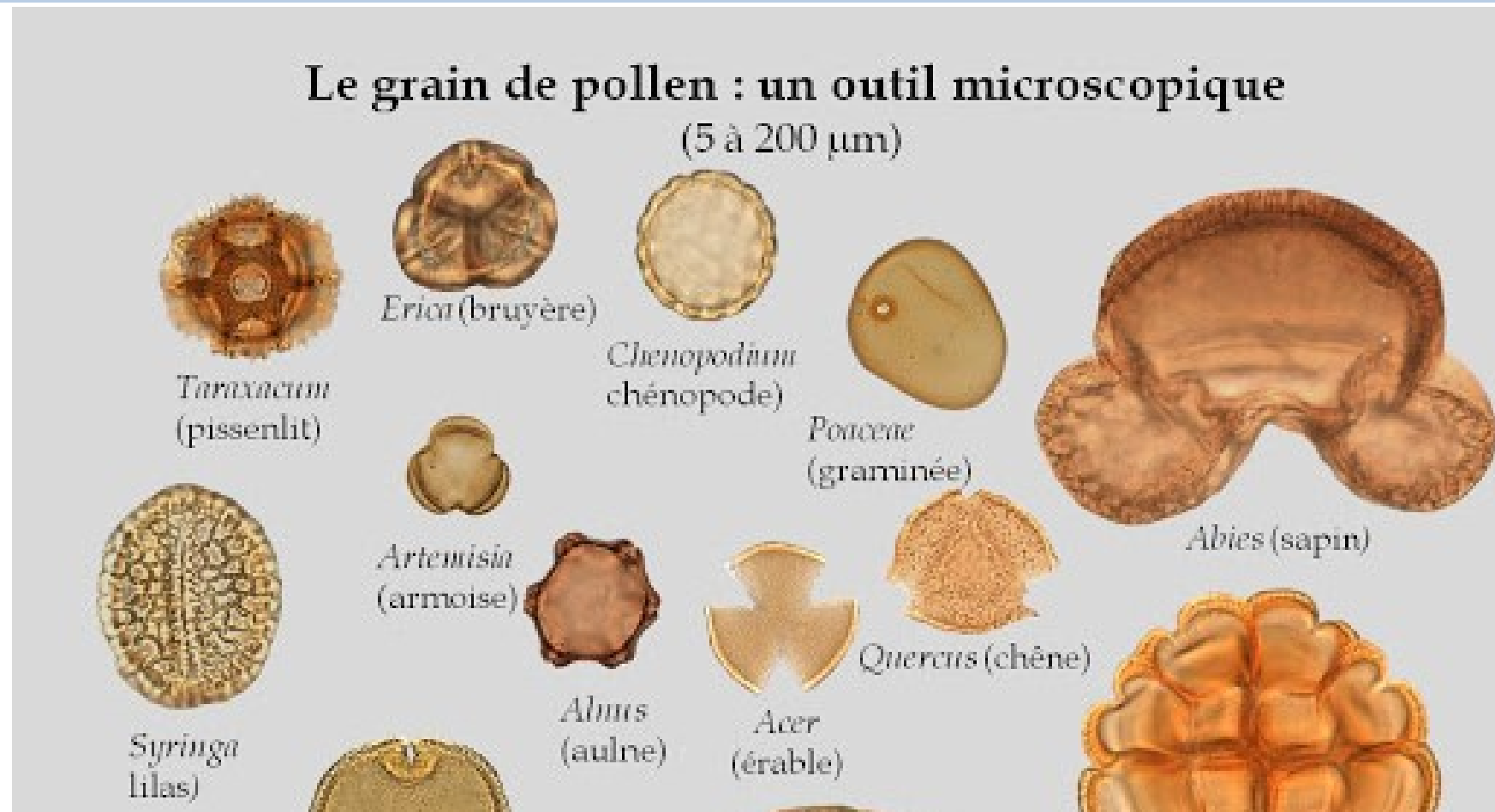
A. les changements climatiques du quaternaire

**B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques**

1. Les données de l'archéologie (TD1)

2. Les grains de pollens

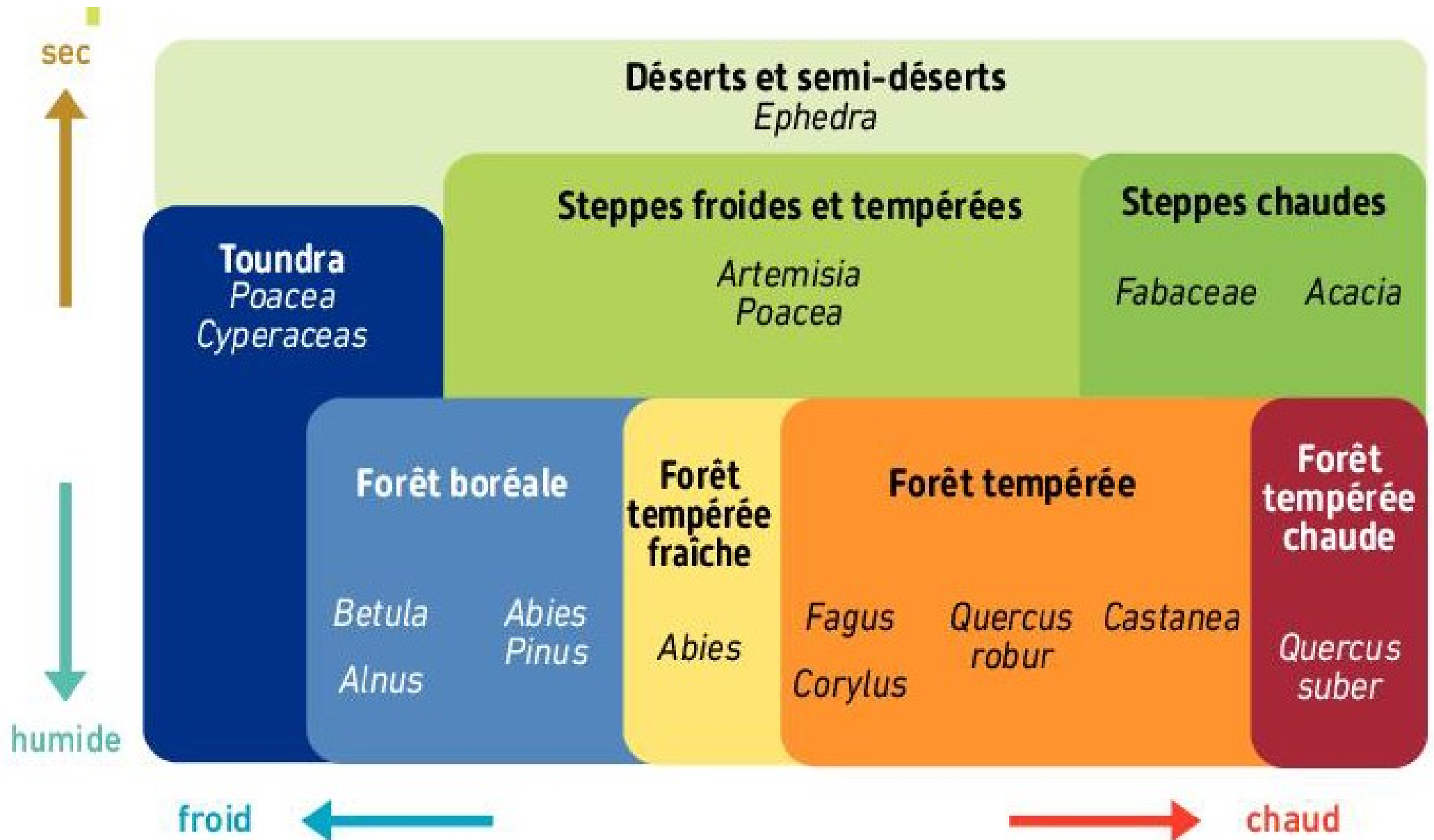
# Les pollens, archives du climat



Le pollen est:

- petit et léger,
- émis en très grand nombre
- très résistant à la décomposition.
- de forme et de taille variable

# Les pollens, archives du climat

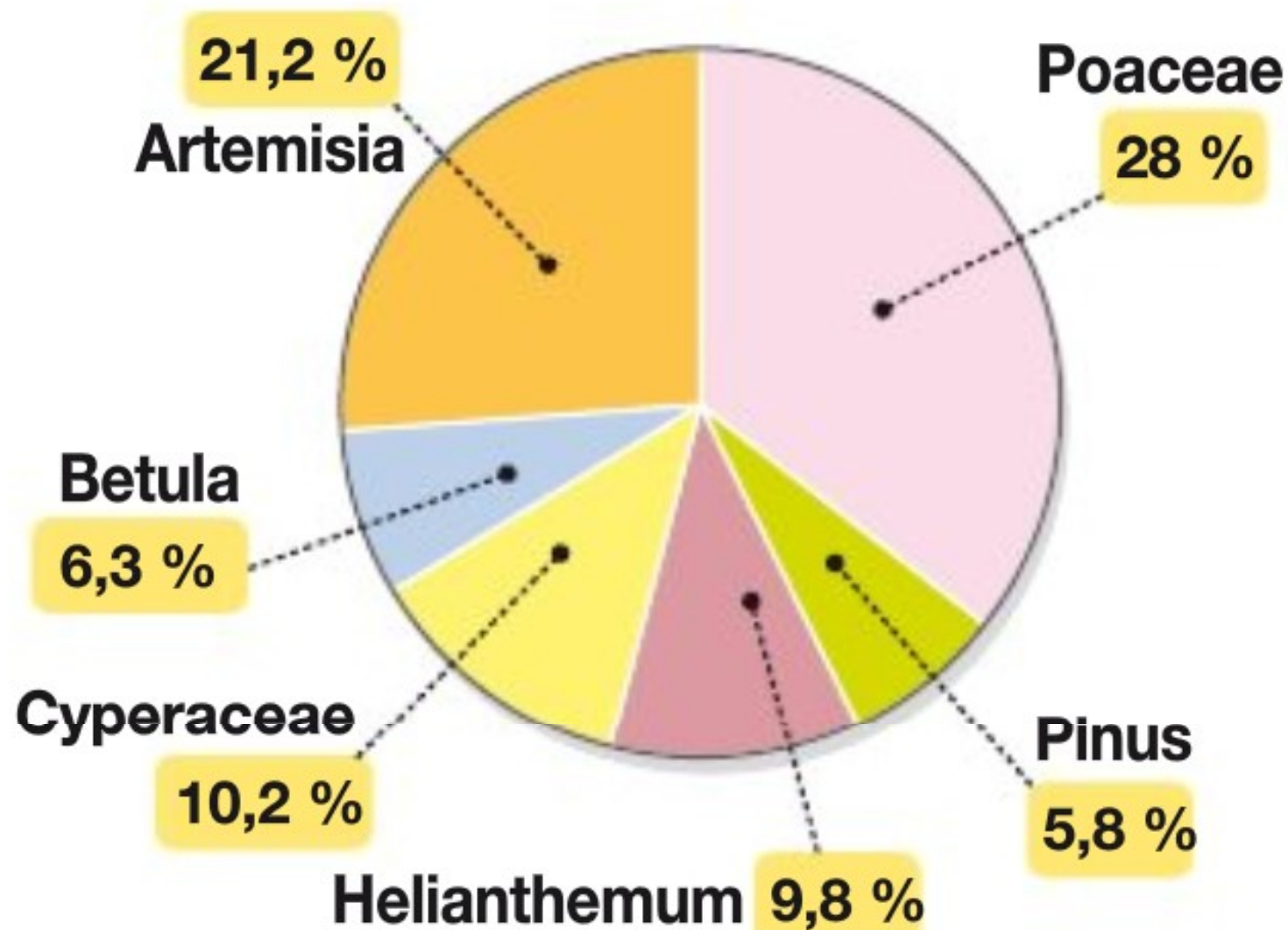


**A** Les associations végétales typiques des différents biomes.



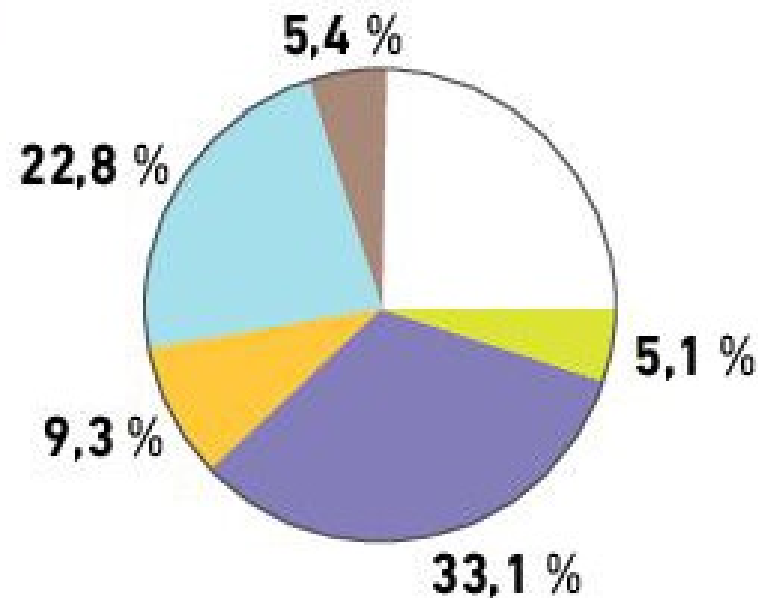
# Les pollens, archives du climat

évaluation (à partir de comptage) du pourcentage de chaque type de pollen



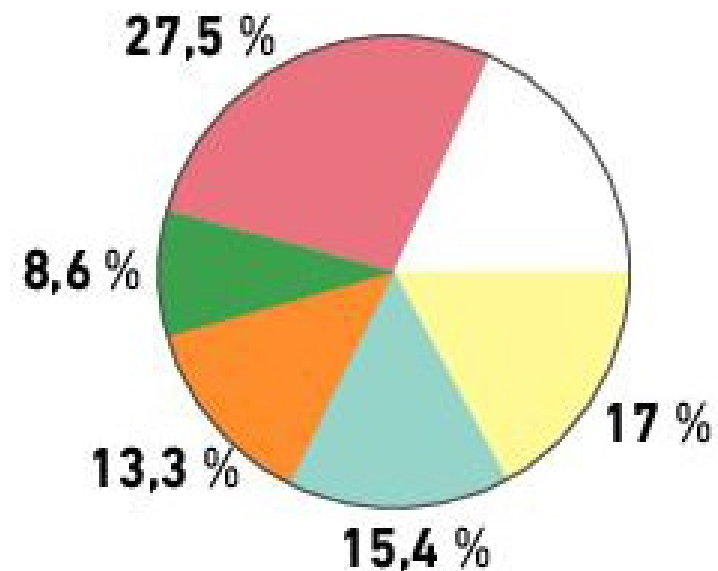
**Un spectre pollinique**

# Les pollens, archives du climat



Abies  
Corylus  
Alnus  
Fagus  
Quercus robur  
autres pollens (< 5 % chacun)

à 3,20 m de profondeur  
1 438 ans BP



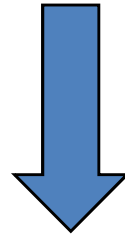
Artemisia  
Cyperaceae  
Betula  
Helianthemum  
Poaceae  
autres pollens (< 4 % chacun)

à 10,75 m de profondeur  
13 600 ans BP

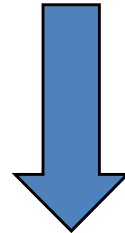
réchauffement

**Spectres polliniques** établis pour deux époques différentes dans les sédiments du lac d'Amsoldingen.

**un spectre pollinique**



Reconstitution de l'association végétale  
**(biome)** présente à une époque



indicatrice d'un **climat** particulier

Pour une région donnée



addition des spectres polliniques

**= un diagramme pollinique**



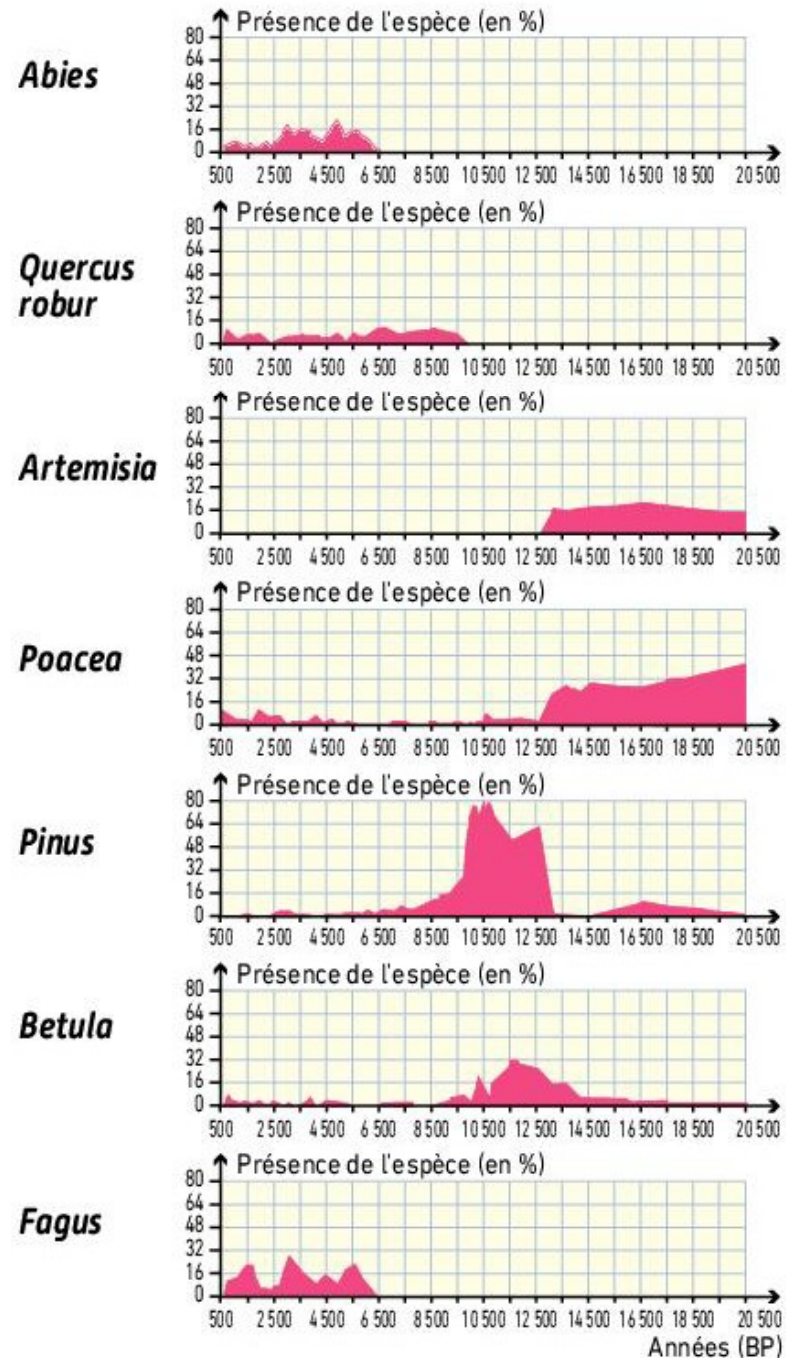
Evolution des biomes au cours du temps.



grandes variations climatiques récentes.



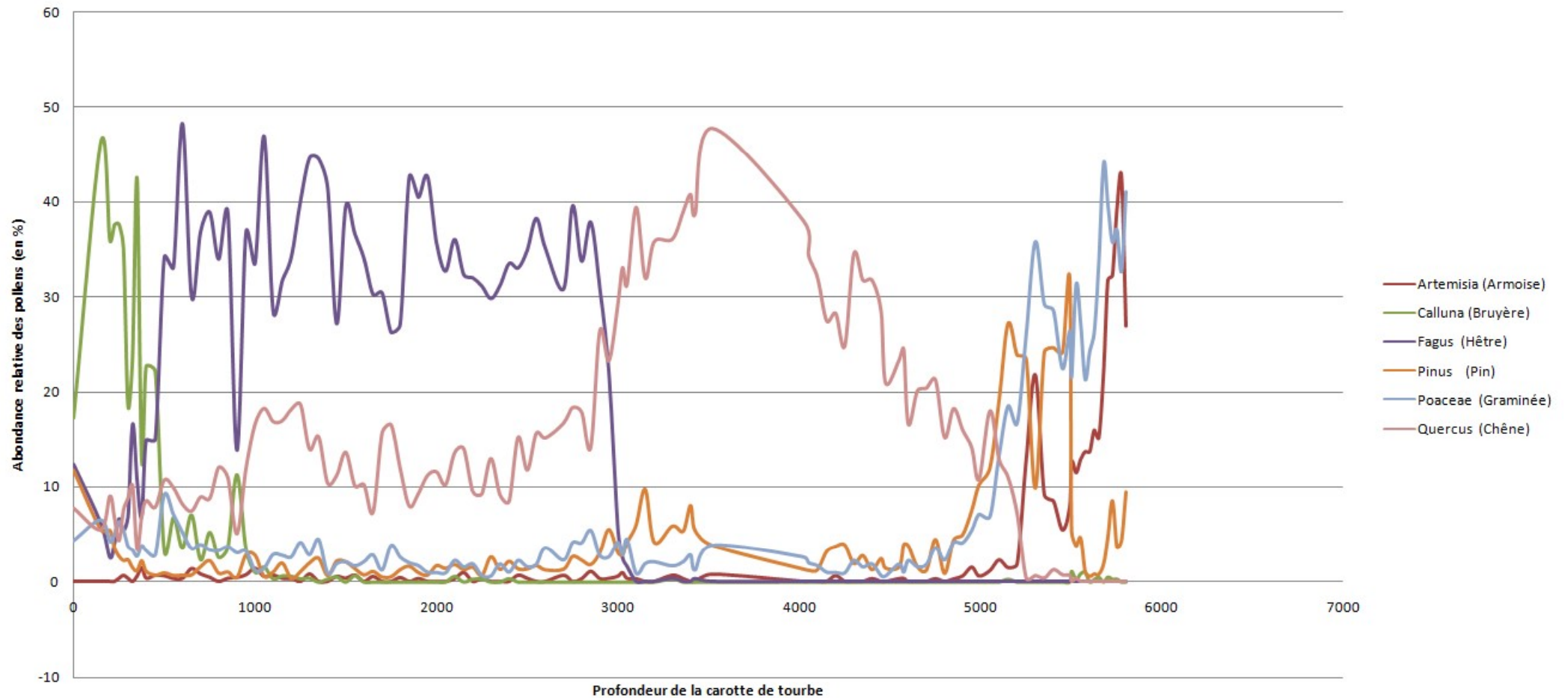
# Les pollens, archives du climat



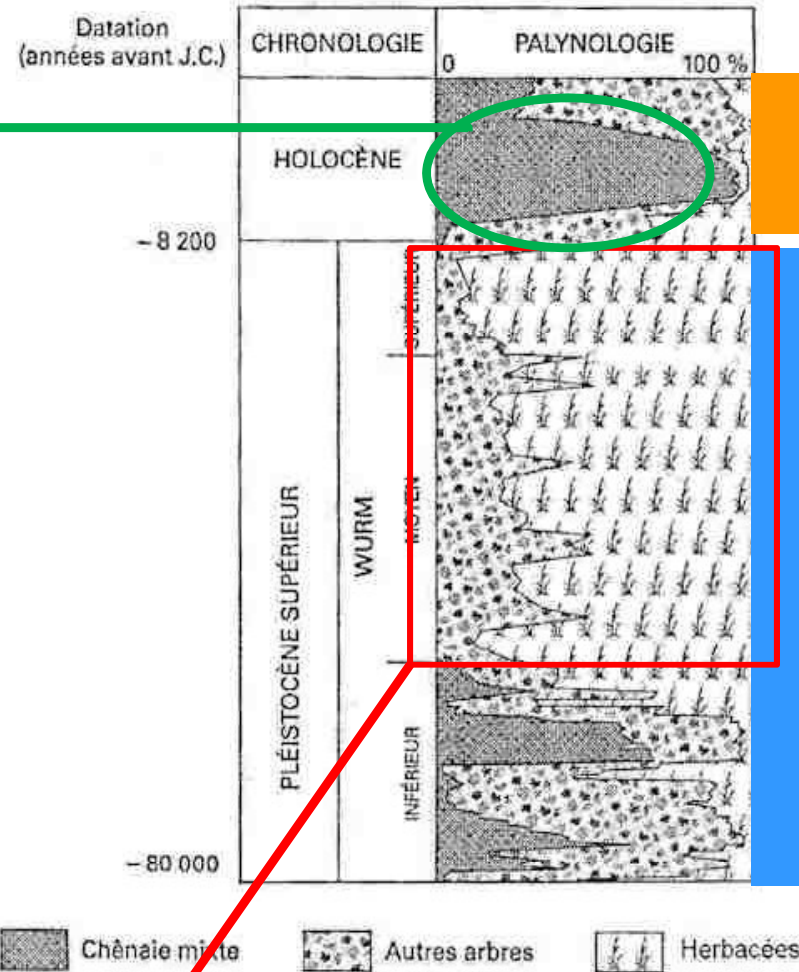
**C** Diagramme pollinique du lac d'Amsoldingen établi pour sept espèces caractéristiques.

# Les pollens, archives du climat

Abondance relative des pollens en fonction de la profondeur de la carotte de tourbe prélevée dans le lac de Chambedaze en Auvergne



# Les pollens, archives du climat



Période inter-glaciaire (donc réchauffement)

Période glaciaire du Wurm

## Exigences écologiques d'espèces végétales actuelles

| Espèces         | Températures moyennes en °C | Conditions climatiques |
|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| Chêne pédonculé | 10 à 15                     | tempérées à chaudes    |
| Pin sylvestre   | 7 à 13                      | tempérées              |
| Epicéa          | 5 à 8                       | froides et humides     |
| Herbacées       | < 5                         | froides et sèches      |

# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

## I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

### A. les changements climatiques du quaternaire

### B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques

1. Les données de l'archéologie (TD1)

2. Les grains de pollens

3. Les rapports isotopiques dans les cristaux de glace

# Principe du thermomètre isotopique

Il est possible de retrouver les températures du passé

concentration des isotopes

- de l'oxygène ( $^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$ )
- de l'hydrogène ( $^2\text{H}$  (D) et  $^1\text{H}$ )

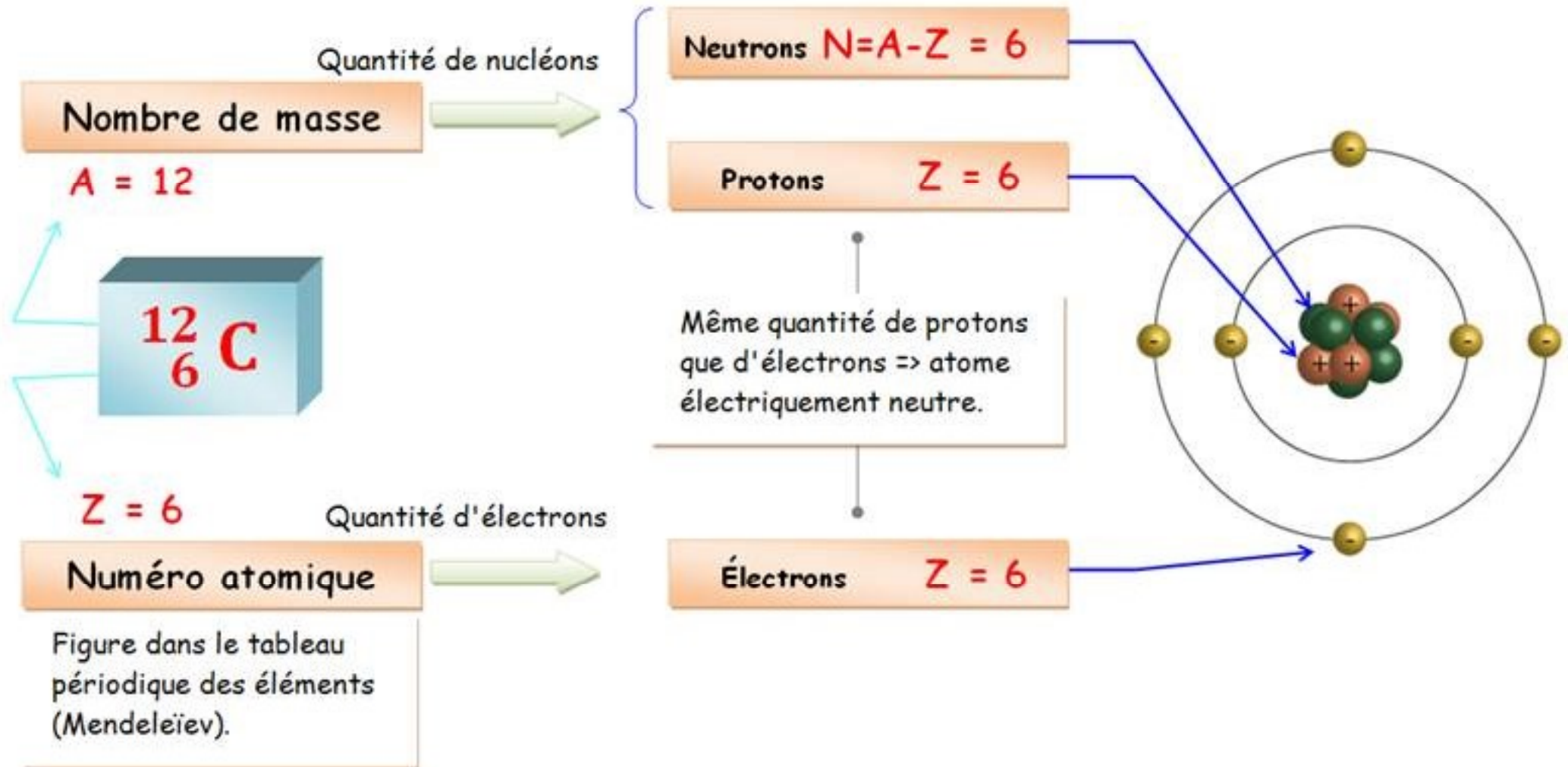
dans l'eau  
donc dans la glace....



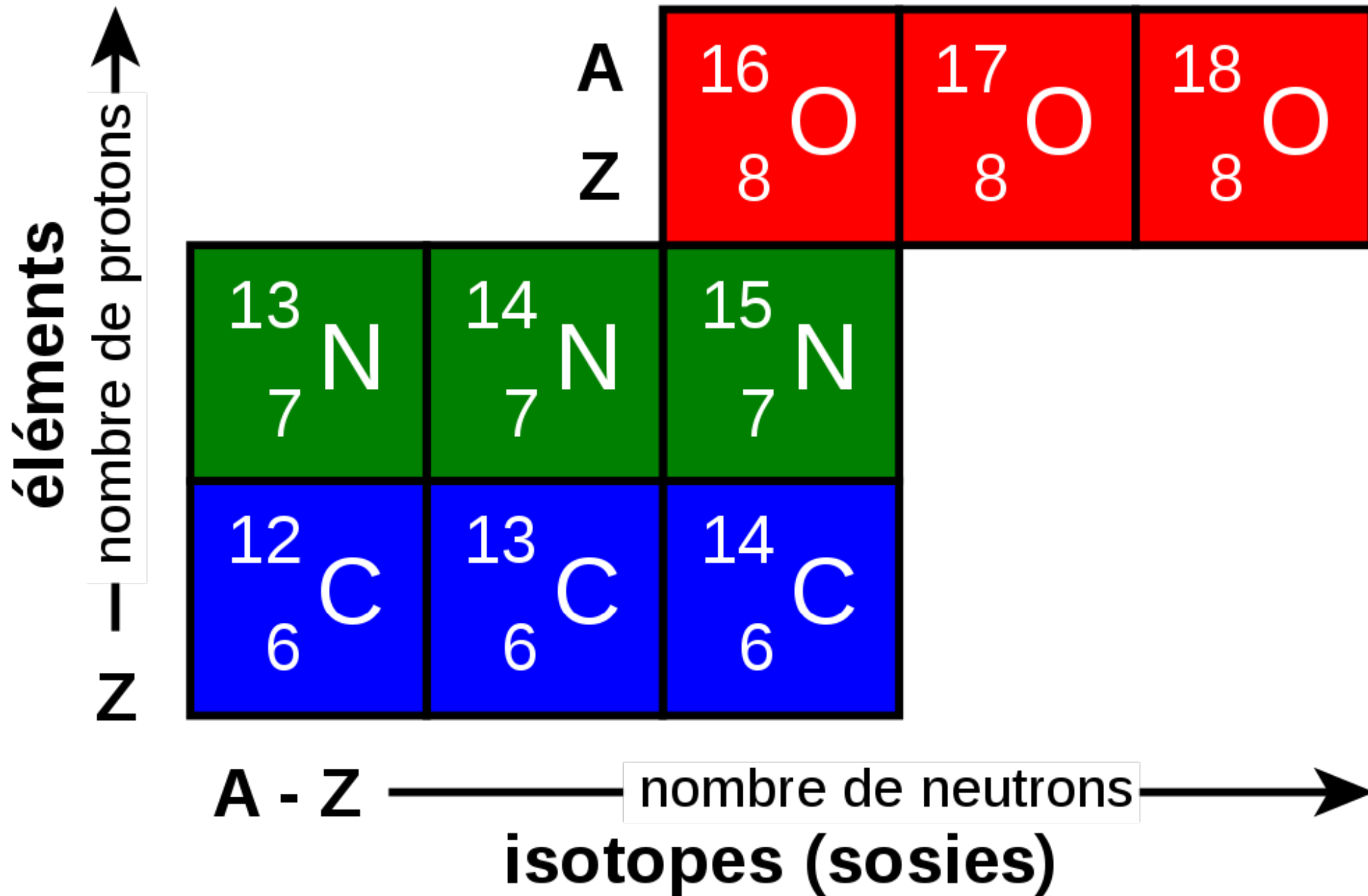
.....  
Prélevée par carottage



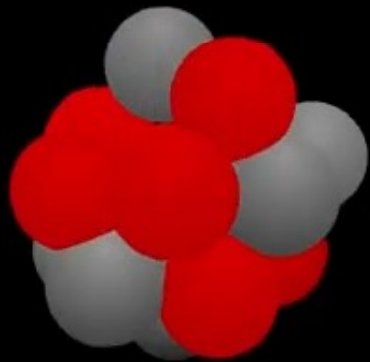
# Principe du thermomètre isotopique



# Principe du thermomètre isotopique

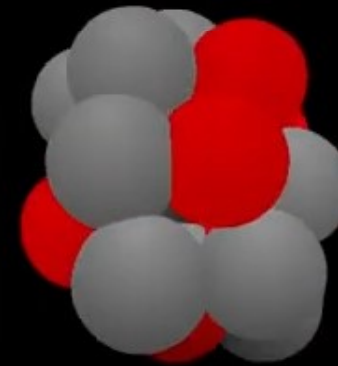


## Noyaux d'oxygène



8 protons  
8 neutrons

<sup>16</sup>O



8 protons  
10 neutrons

<sup>18</sup>O



## Principe du thermomètre isotopique

$\delta$  = rapport isotope lourd / isotope léger d'un échantillon rapporté au même rapport sur un standard

si le rapport de l'échantillon est inférieur ou égal au standard, le  $\delta$  est négatif.

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

Standard = eau océanique moyenne normalisée

# Principe du thermomètre isotopique

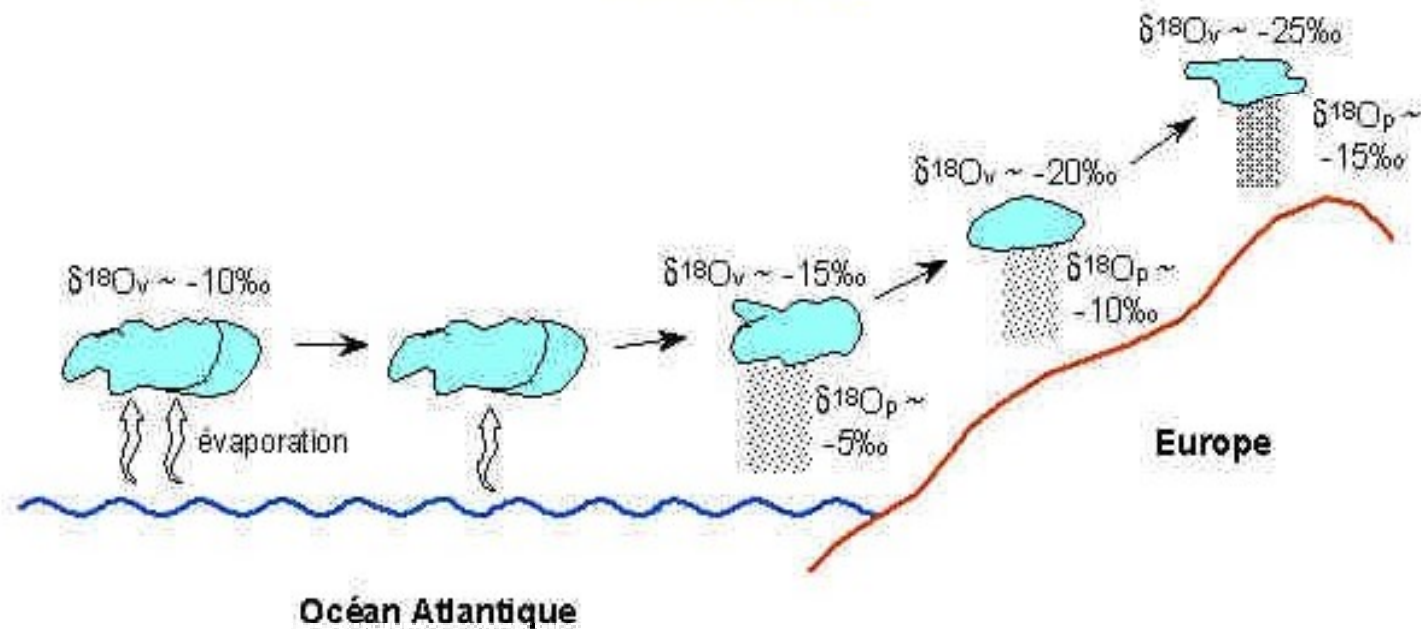
## Spectrométrie de masse à rapport isotopique





# Principe du thermomètre isotopique

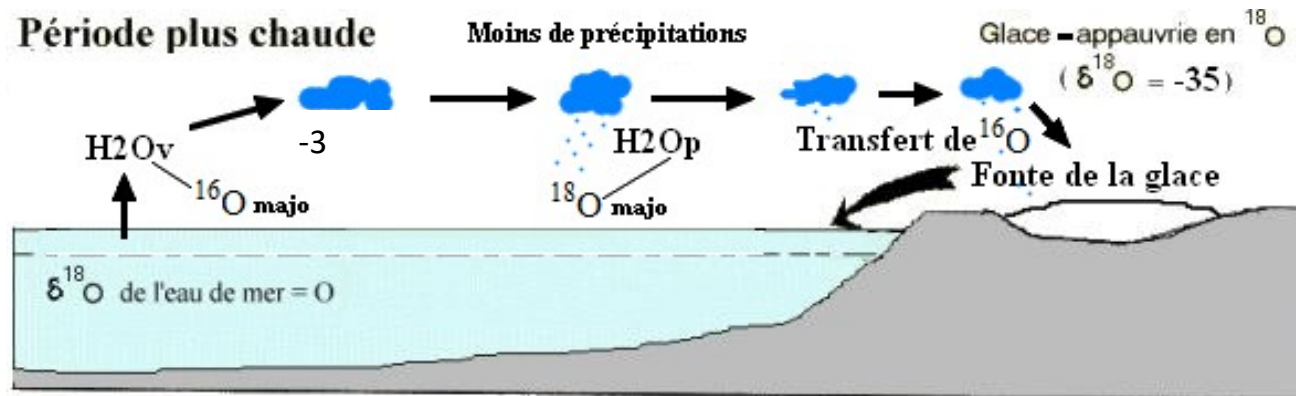
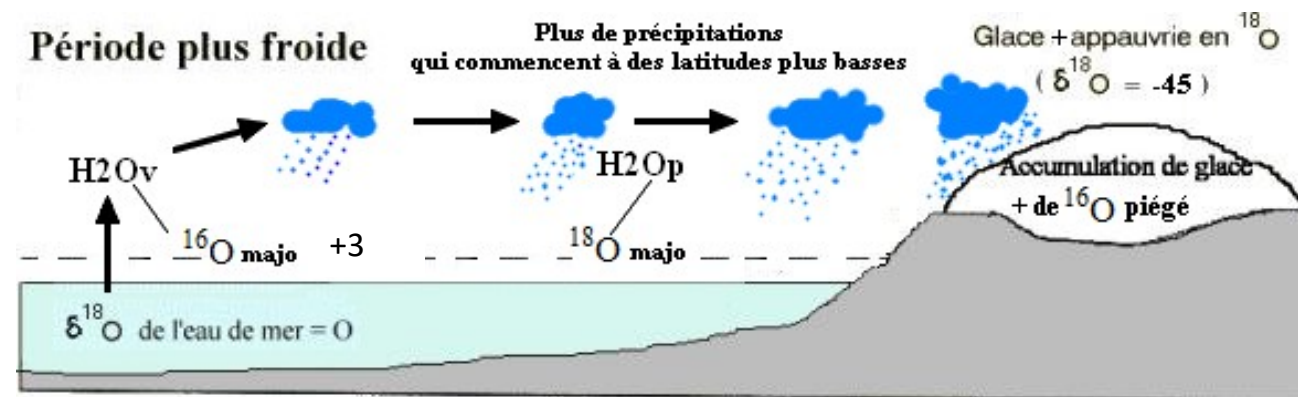
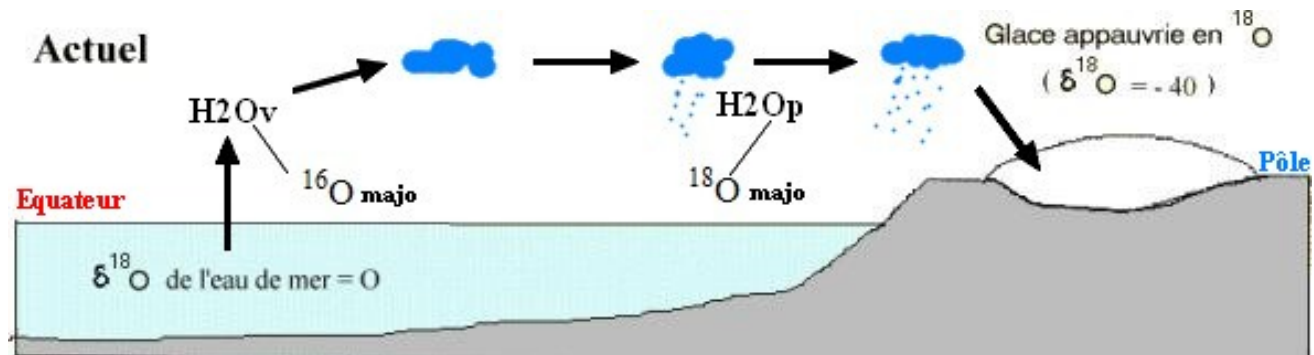
## Le fractionnement isotopique et ses conséquences



$^{18}\text{O}$  s'évapore moins que  $^{16}\text{O}$ , mais se condense davantage. Donc entre l'océan Atlantique et les régions de précipitation (Europe ou pôle), la valeur du  $\delta^{18}\text{O}$  diminue.

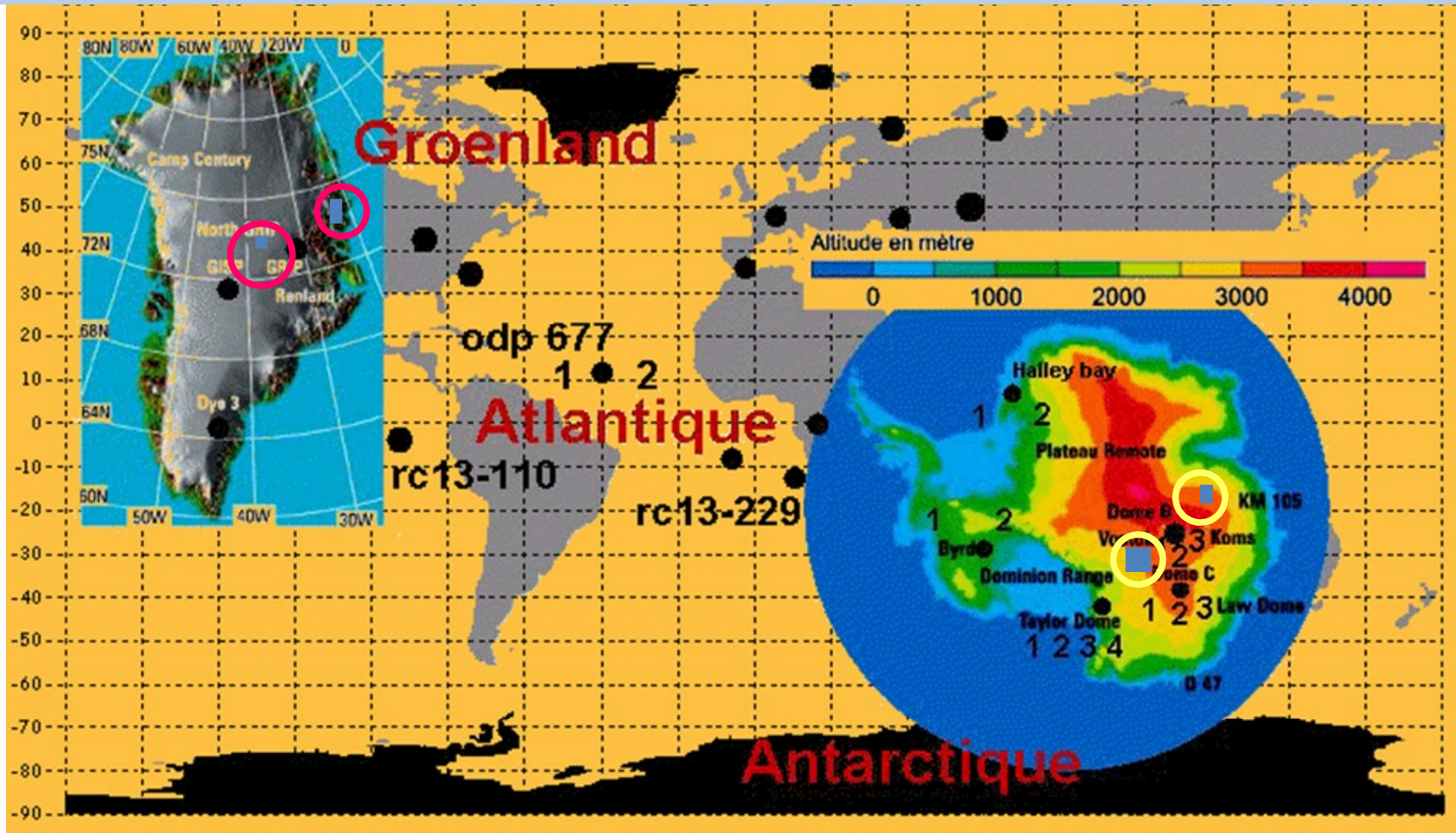
Plus la température globale diminue, moins l'évaporation du  $^{18}\text{O}$  est importante et plus sa condensation est élevée. Donc la valeur du  $\delta^{18}\text{O}$  dans les précipitations au niveau des pôles est encore plus faible.

# Principe du thermomètre isotopique





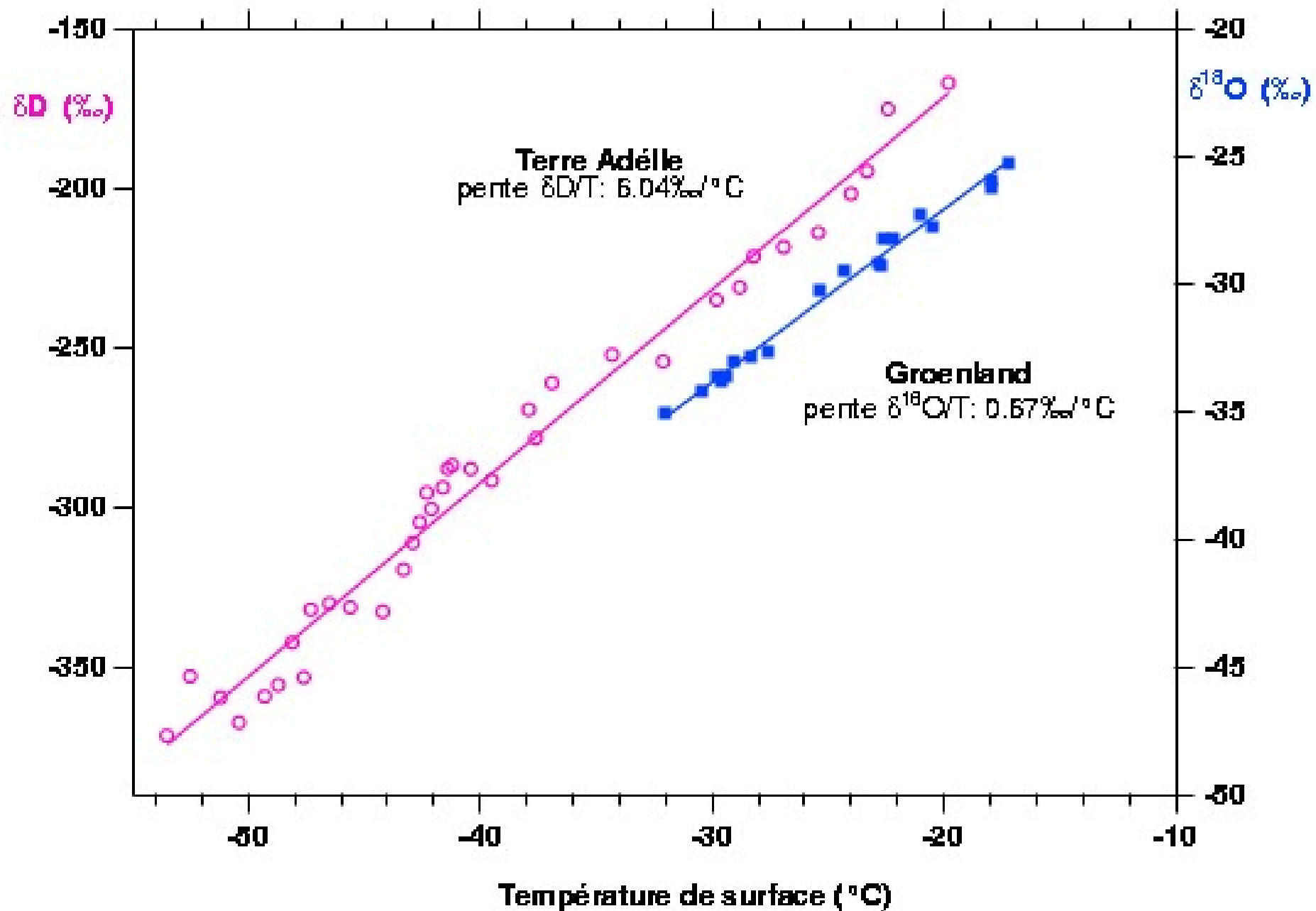
# Principe du thermomètre isotopique



Carte de localisation des carottages

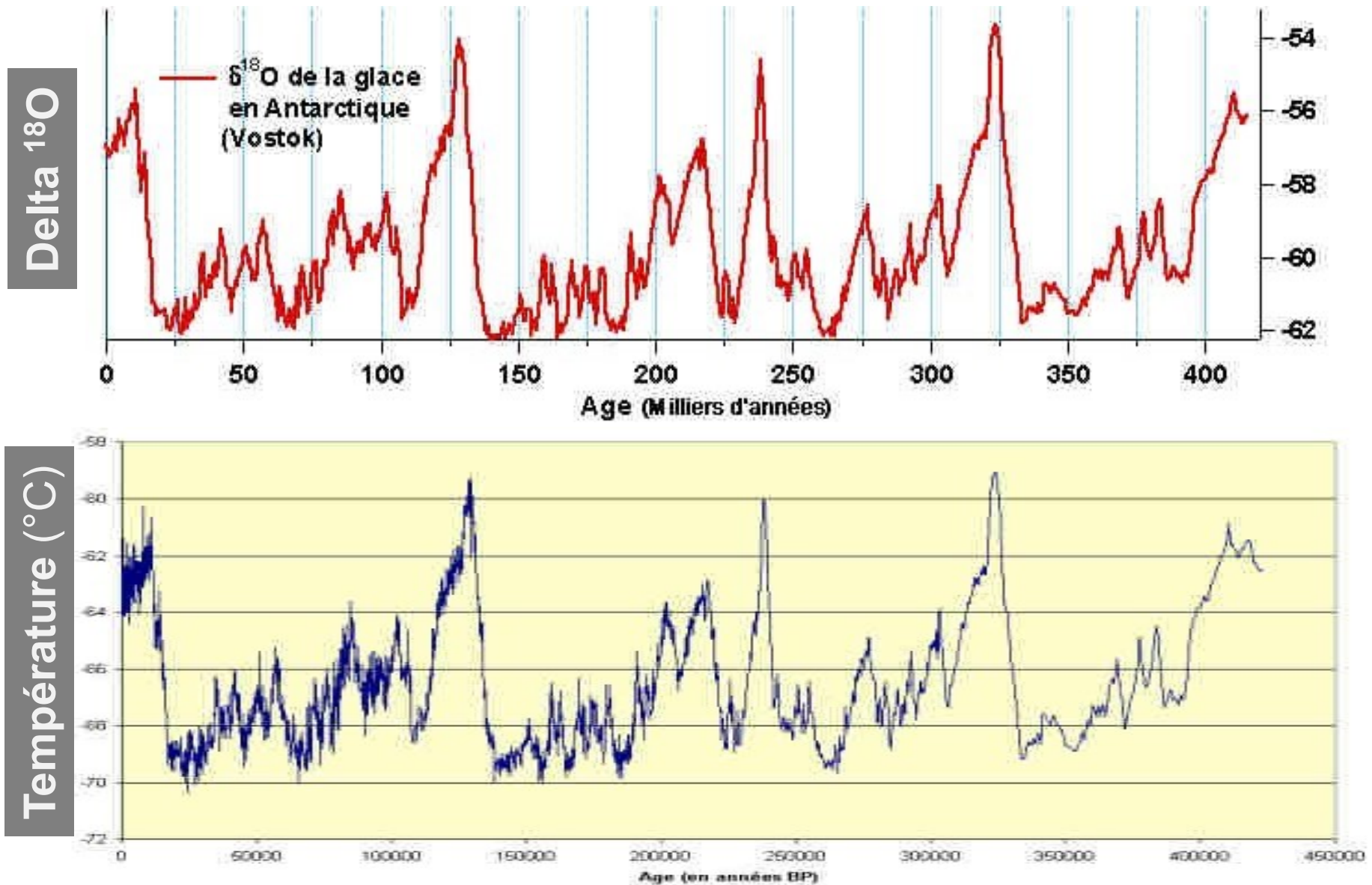
# Principe du thermomètre isotopique

LE THERMOMETRE ISOTOPIQUE (Jouzel et al., 1994)



# Principe du thermomètre isotopique

## Exploitation des données



( périodes glaciaires / interglaciaires)



# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

## I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

### A. les changements climatiques du quaternaire

### B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques

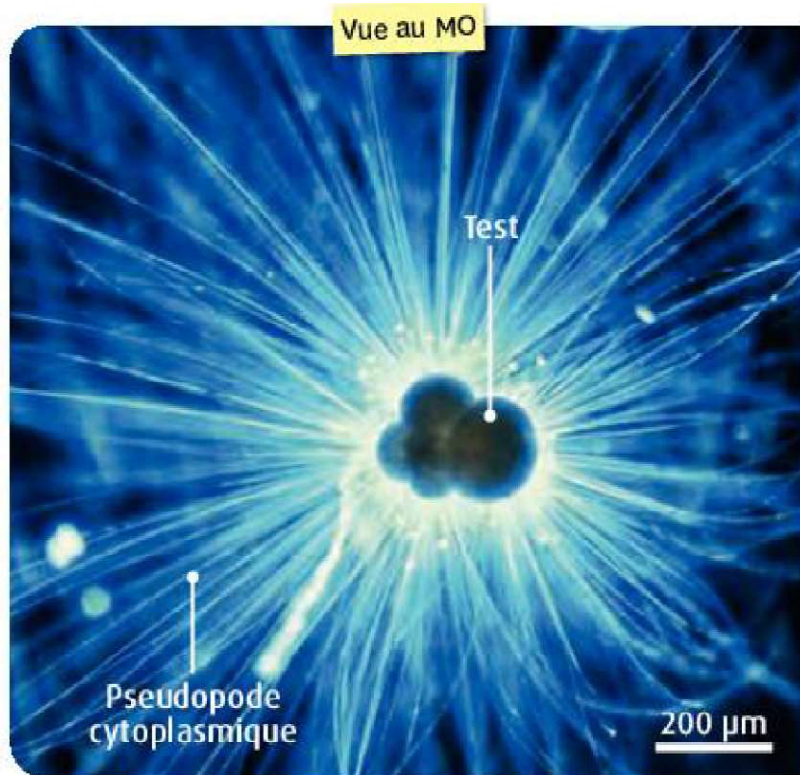
1. Les données de l'archéologie (TD1)

2. Les grains de pollens

3. Les rapports isotopiques dans les cristaux de glace

4. Les microfossiles marins

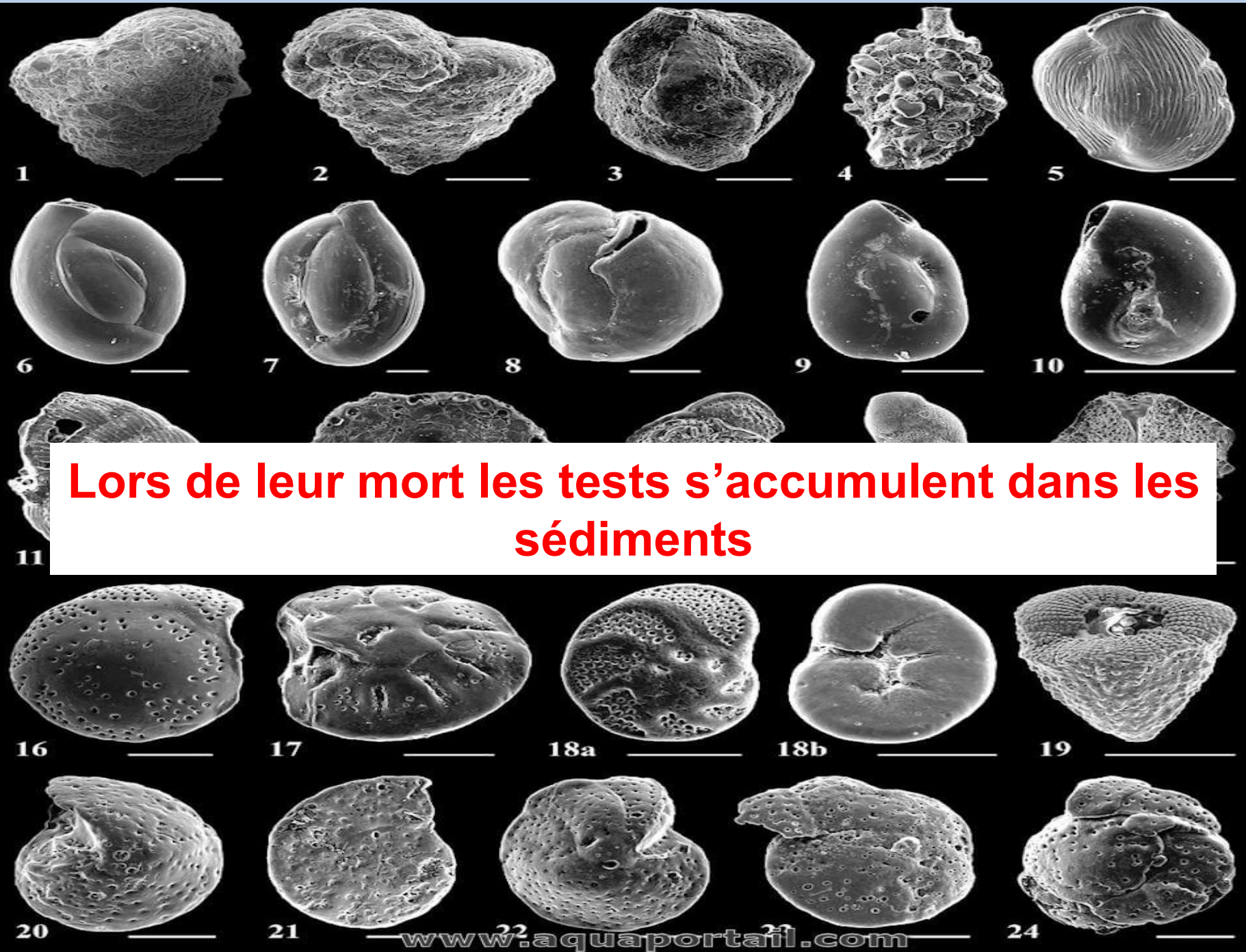
# Les foraminifères



**4 Un foraminifère et son test observés au microscope.** Les foraminifères sont des organismes unicellulaires planctoniques ou benthiques qui élaborent leur squelette externe calcaire, ou test, à partir des constituants (ions carbonate et calcium) présents dans l'eau. Ces tests calcaires sont des constituants des carbonates océaniques.

**Les foraminifères** organismes unicellulaires aquatiques fabriquent un test calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) qui les caractérise

# Les foraminifères





## Les foraminifères

Deux méthodes pour obtenir des informations sur les paléotempératures de l'eau de mer à partir des tests fossilisés :

- En faisant une étude statistique des espèces de foraminifères présentes dans les sédiments
- En mesurant le  $\delta^{18}\text{O}$  des tests carbonatés

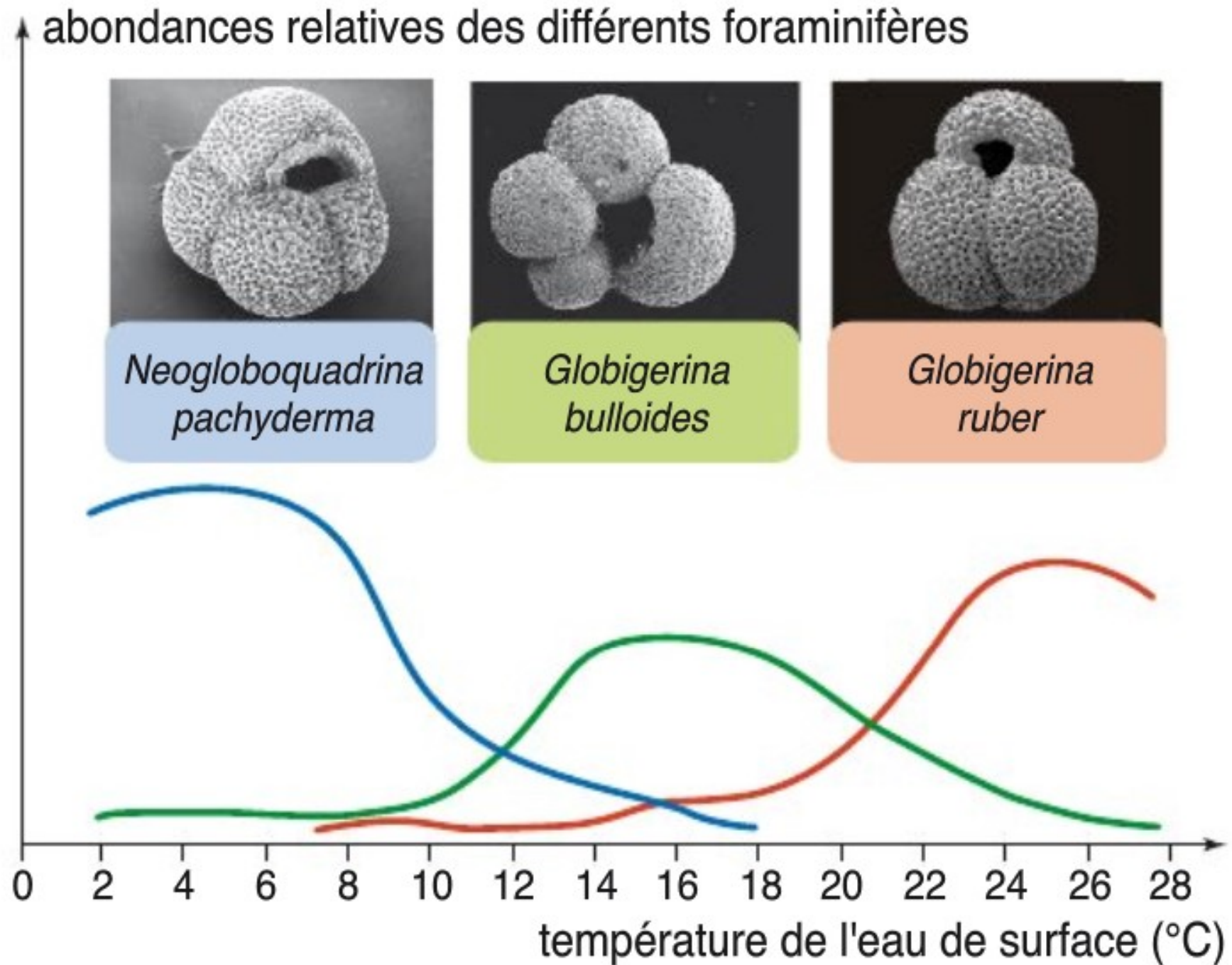
## Les foraminifères

Deux méthodes pour obtenir des informations sur les paléotempératures de l'eau de mer à partir des tests fossilisés :

- En faisant une étude statistique des espèces de foraminifères présentes dans les sédiments

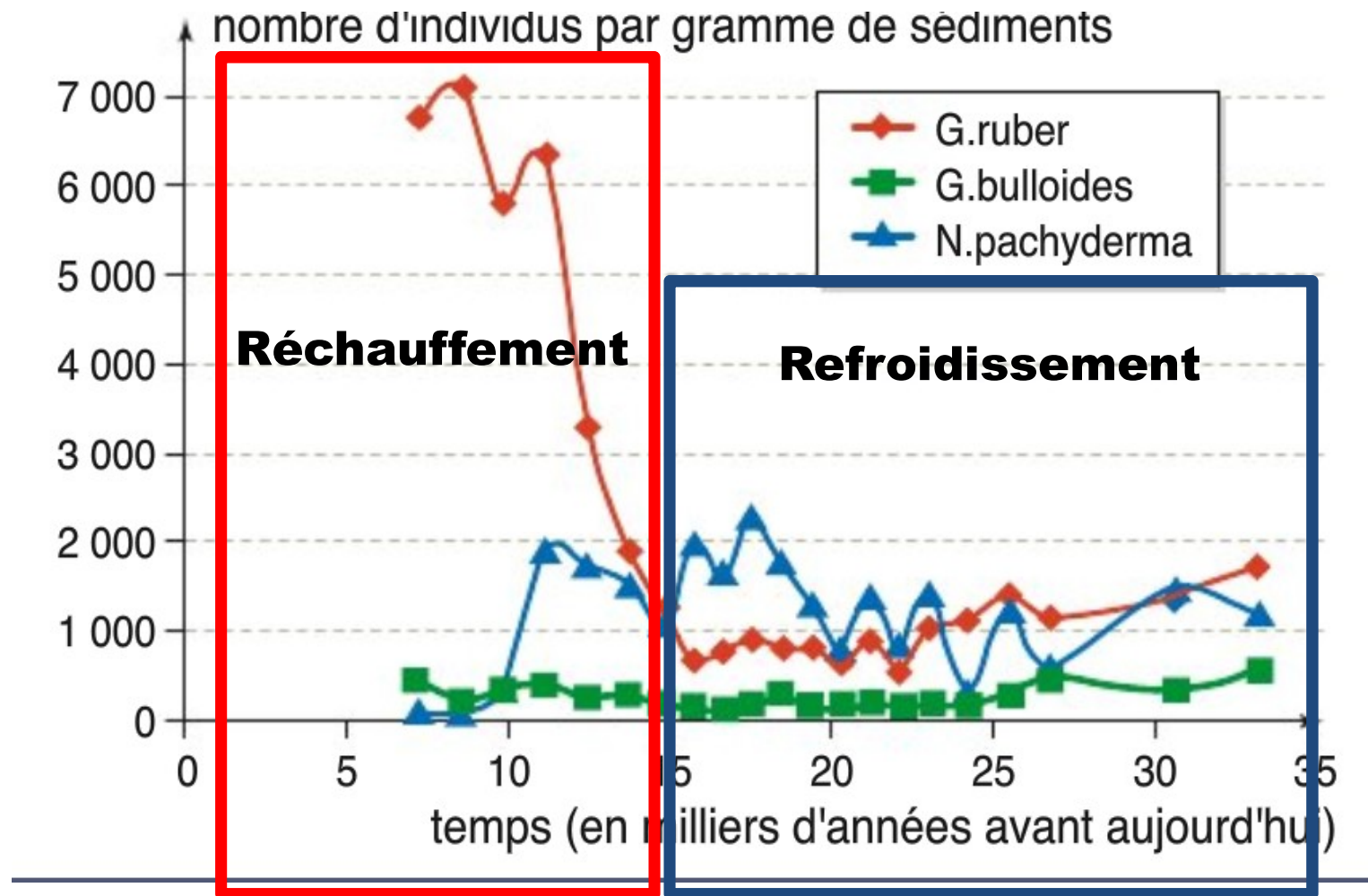
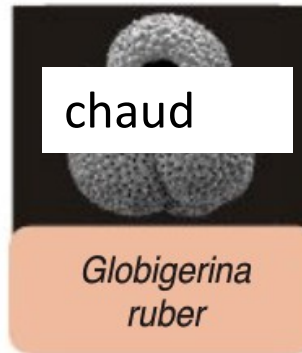
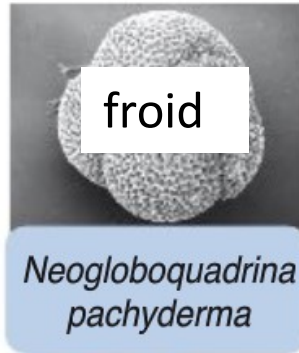


# Les foraminifères



# Les foraminifères

↑ abondances relatives des différents foraminifères



Deux méthodes pour obtenir des informations sur les paléotempératures de l'eau de mer à partir des tests fossilisés :

- En mesurant le  $\delta^{18}\text{O}$  des tests carbonatés

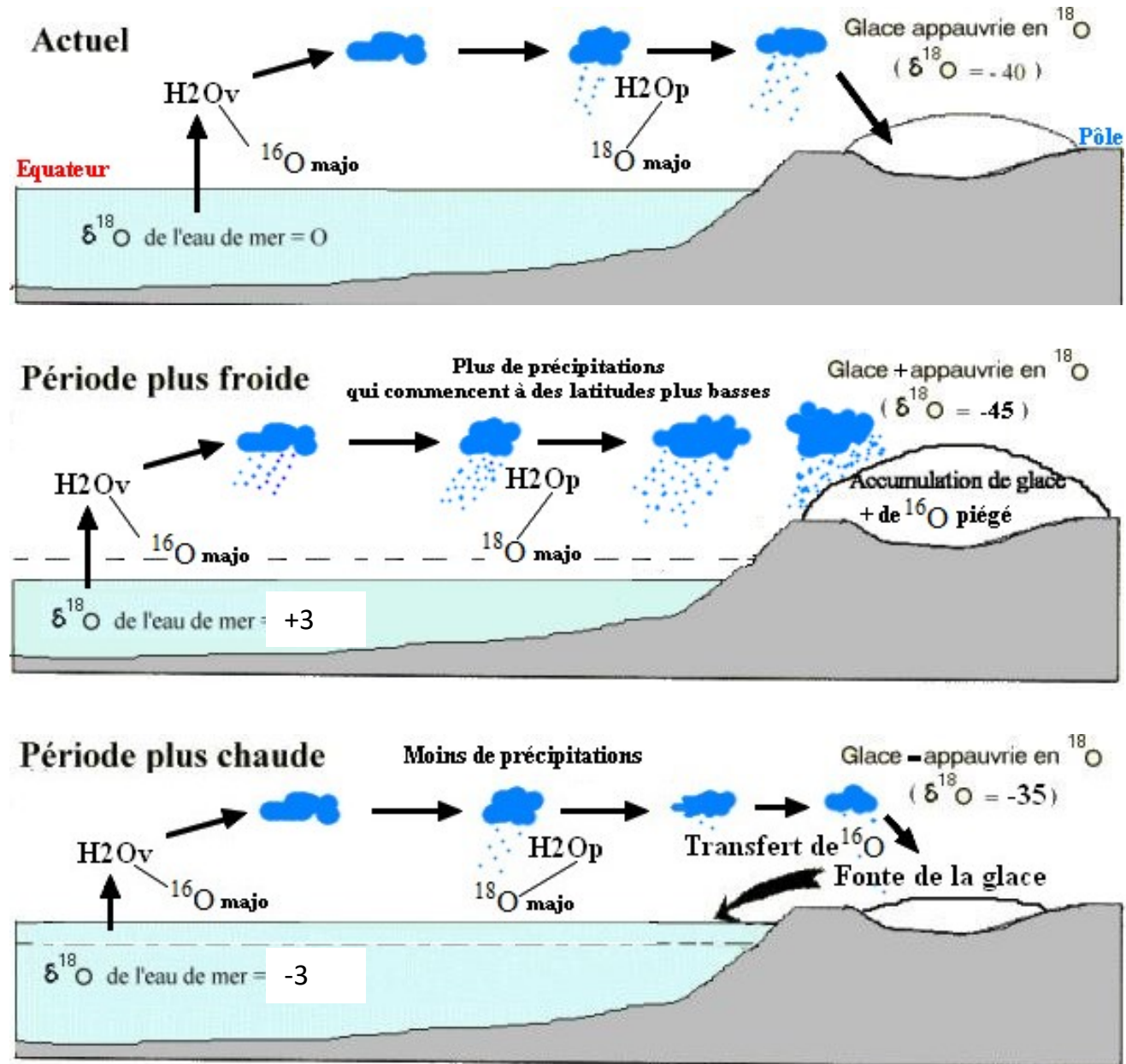
# Les foraminifères

Le test carbonaté ( $\text{CaCO}_3$ ) contient  $^{18}\text{O}$  et  $^{16}\text{O}$ , dont la composition varie avec la **température** de l'eau de mer environnante

En période glaciaire, l'immobilisation de grandes quantités de glace aux pôles réduit le stock d'eau océanique

- ☐ la glace est **appauvrie** en isotopes lourds
- ☐ les eaux océaniques sont **enrichies** en  $^{18}\text{O}$ .

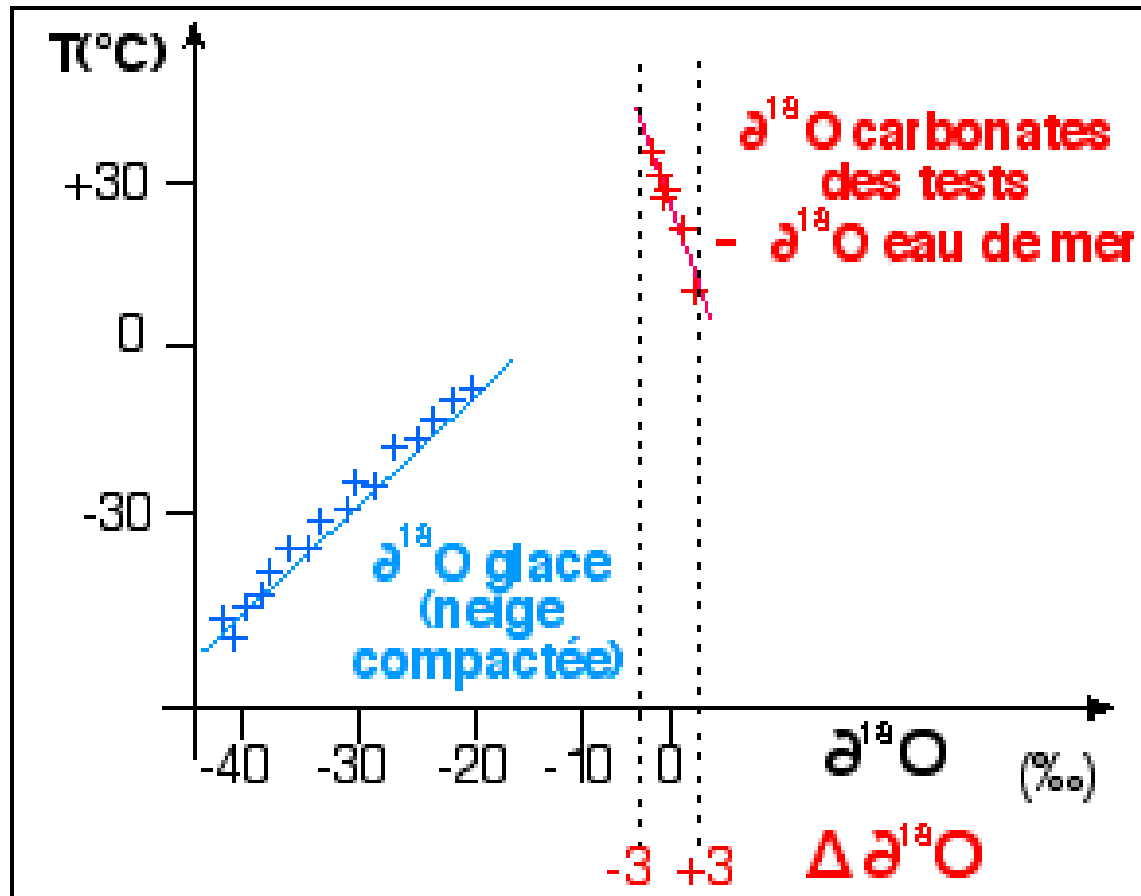
# Principe du thermomètre isotopique





# Les foraminifères

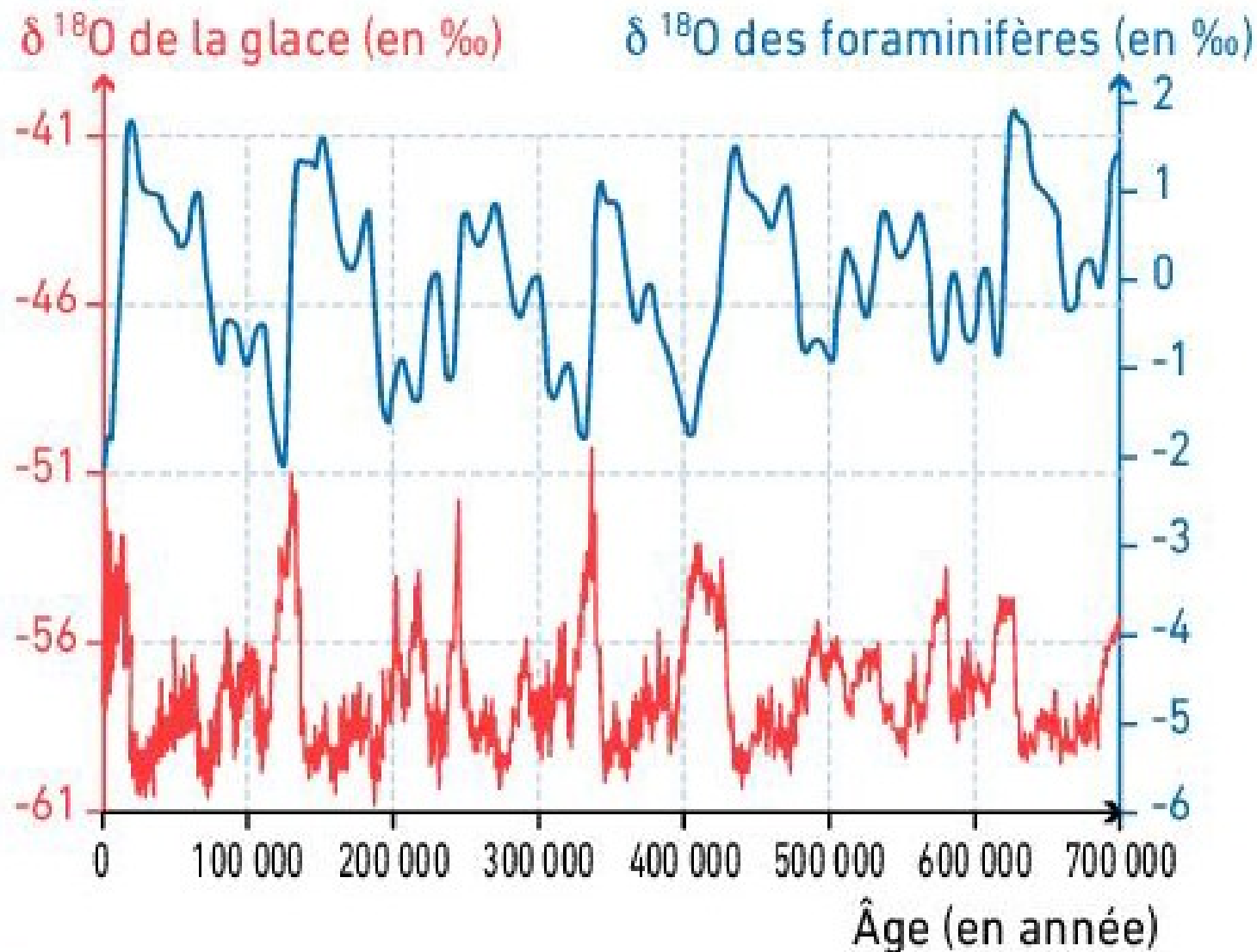
Evolution du  $\delta^{18}\text{O}$  des tests carbonatés de Foraminifères en fonction de la température moyenne de l'eau.



+ le  $\delta^{18}\text{O}$  est faible, plus la paléotempérature est élevée

**(ATTENTION c'est l'inverse des glaces)**

# Les foraminifères



**B** Évolution des  $\delta^{18}\text{O}$  des foraminifères et de la glace au cours des 700 000 dernières années.

# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

## I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

### A. les changements climatiques du quaternaire

### B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques

1. Les données de l'archéologie (TD1)

2. Les grains de pollens

3. Les rapports isotopiques dans les cristaux de glace

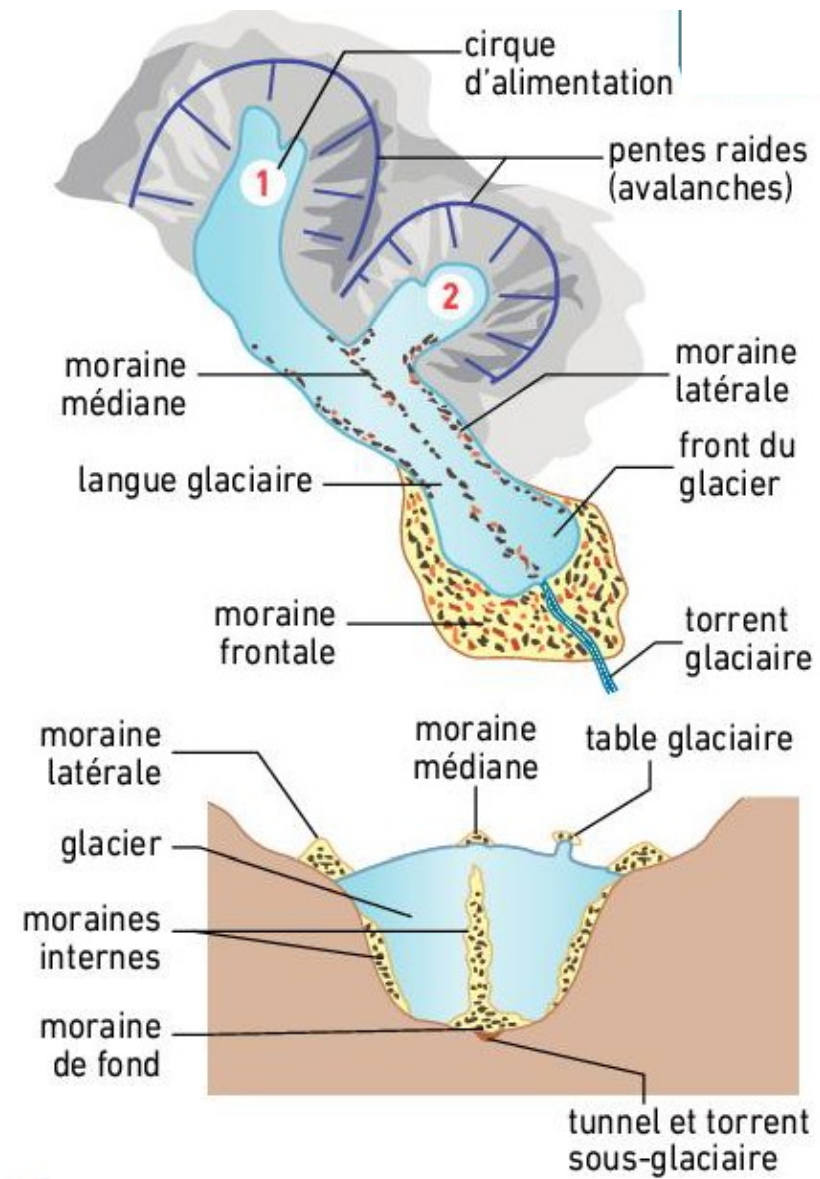
4. Les microfossiles marins

5. Les moraines glaciaires

# Les moraines glaciaires



**A** Une langue glaciaire et le front d'un glacier.



**B** Schéma d'un glacier, vu de haut et en coupe transversale.



# Les moraines glaciaires



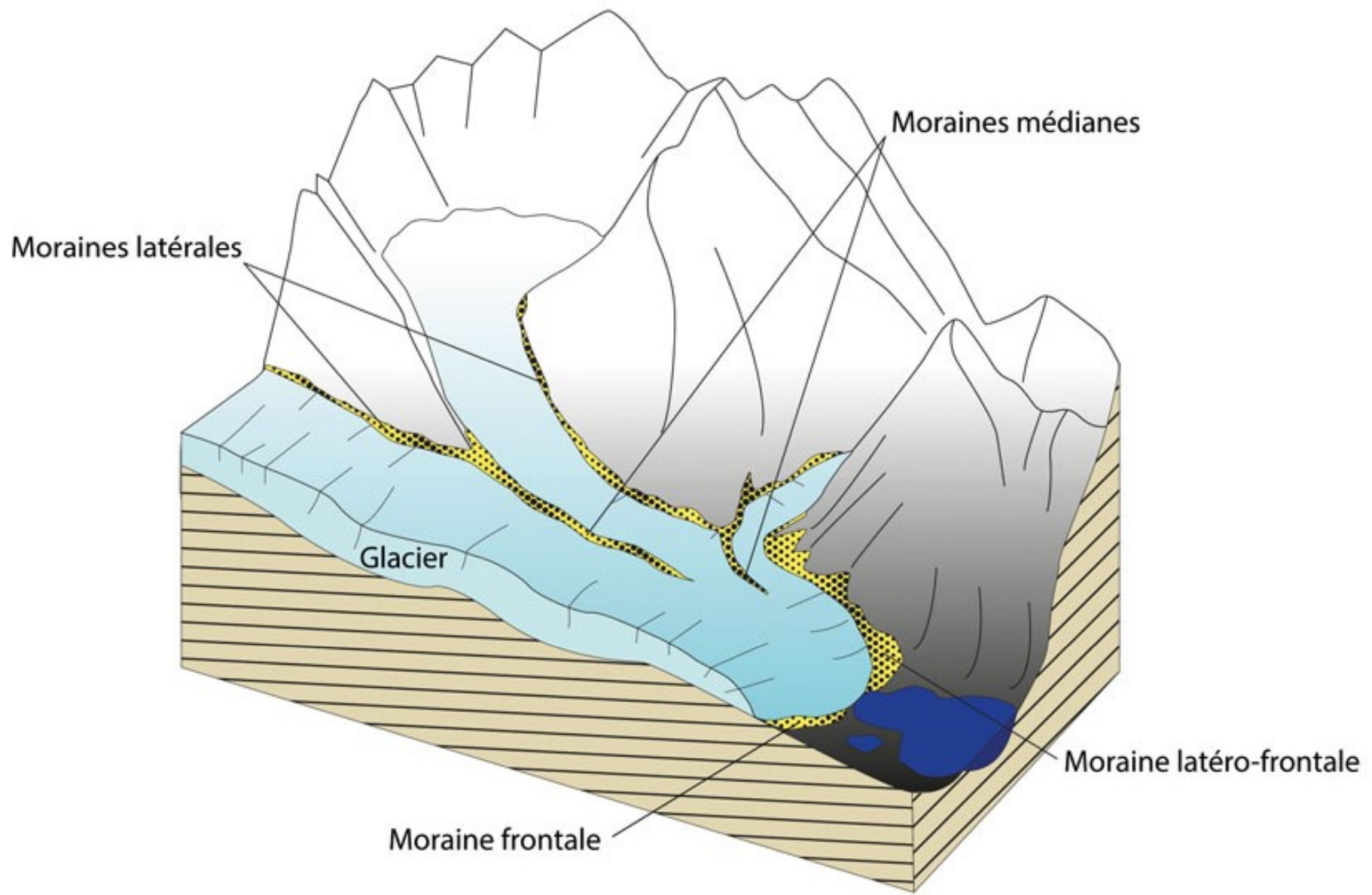
Langue glaciaire



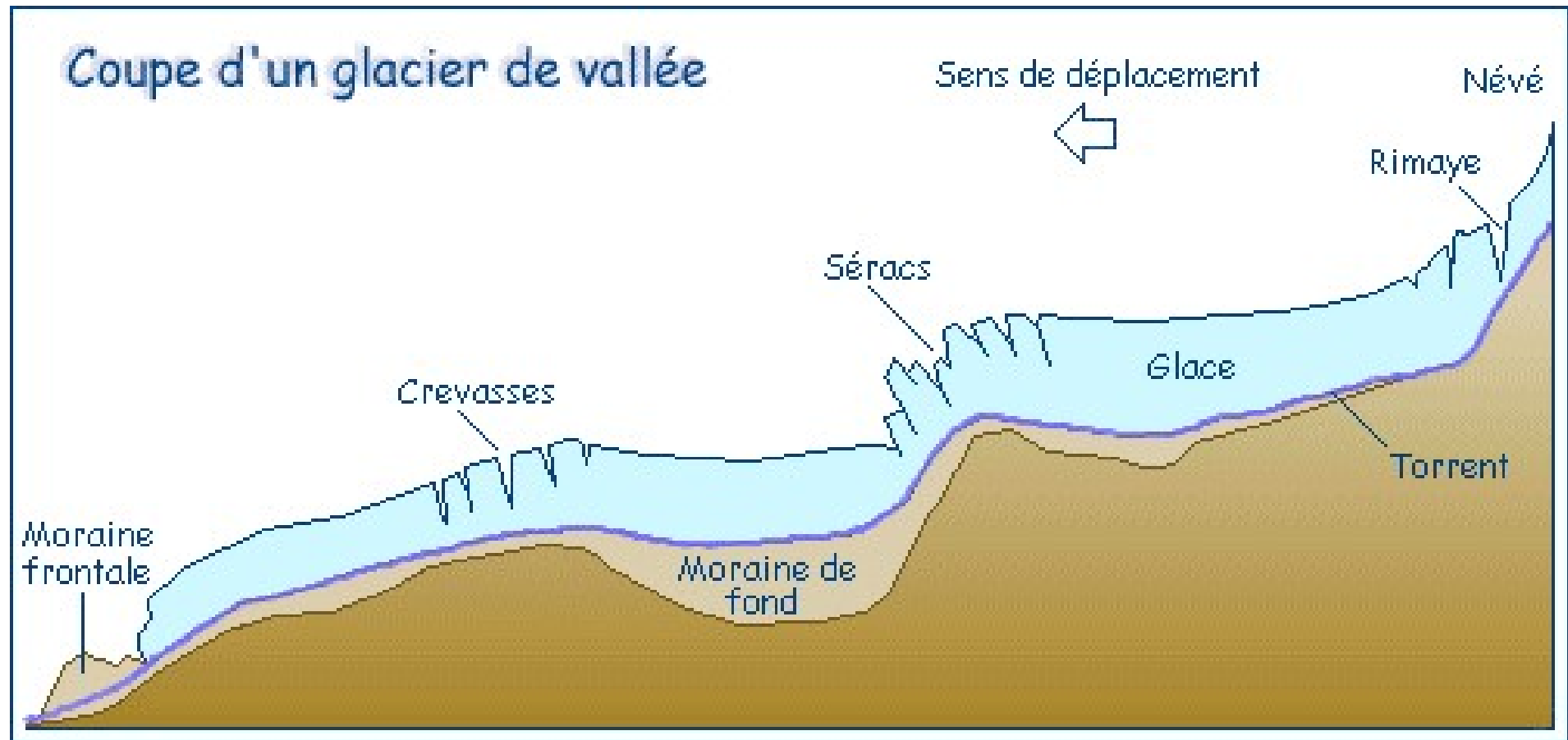
# Les moraines glaciaires



# Les moraines glaciaires



# Les moraines glaciaires





# Les moraines glaciaires



Nombreux blocs erratiques charriés par le glacier Athabasca,  
Canada.



# Les moraines glaciaires



Le « Gros Caillou » de la Croix-Rousse à Lyon, un **bloc erratique** déposé là par un ancien glacier.



# Les moraines glaciaires



Observation des **stries glaciaires**.



# Les moraines glaciaires



**Stries glaciaires**.....encore.....150 m plus haut que le fond de la vallée....

# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

A. les changements climatiques du quaternaire

**B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques**

**C. Les causes des variations climatiques du quaternaire**

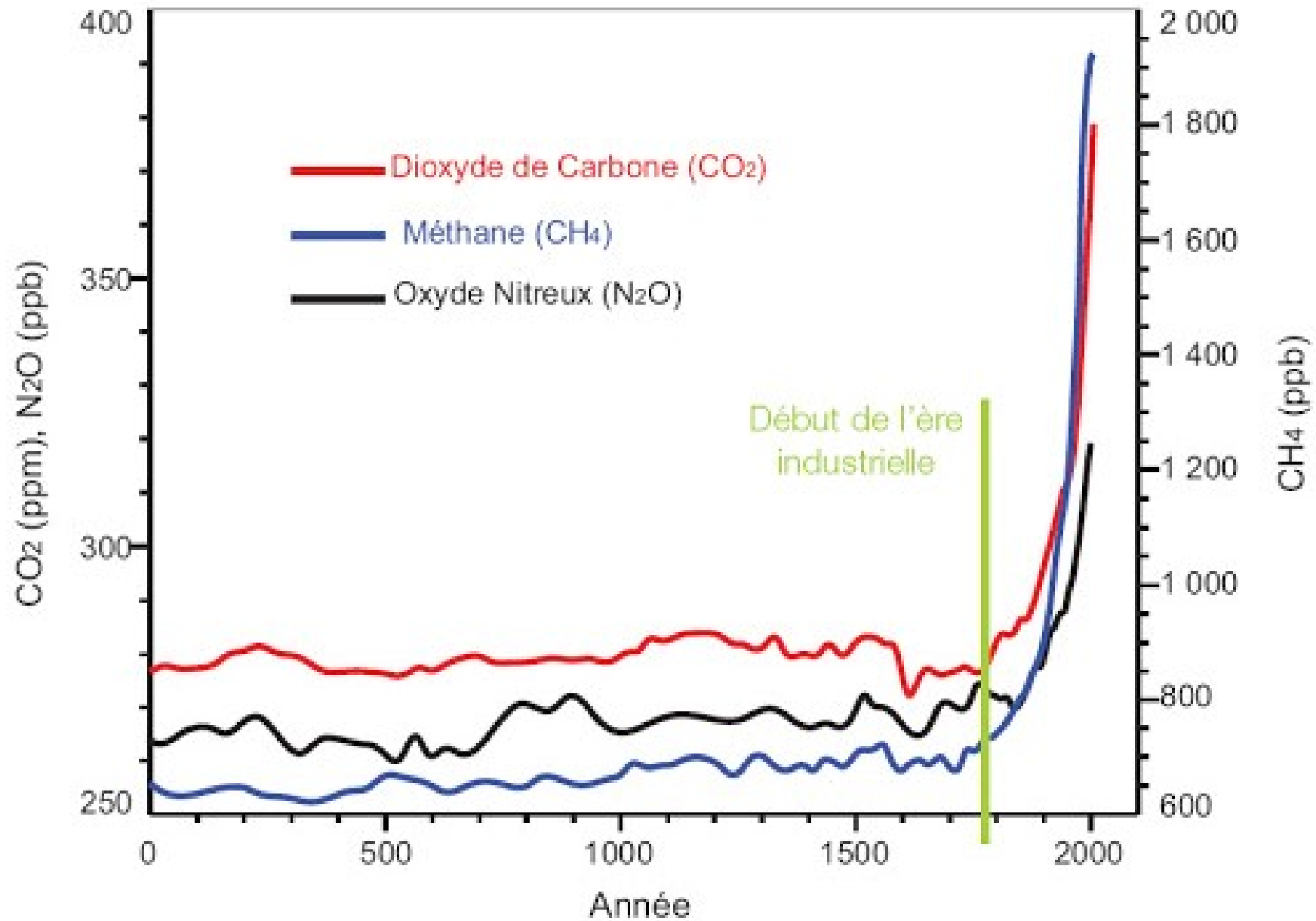
**1. les variations de la concentration en gaz à effet de serre (GES)**



# L'effet de serre

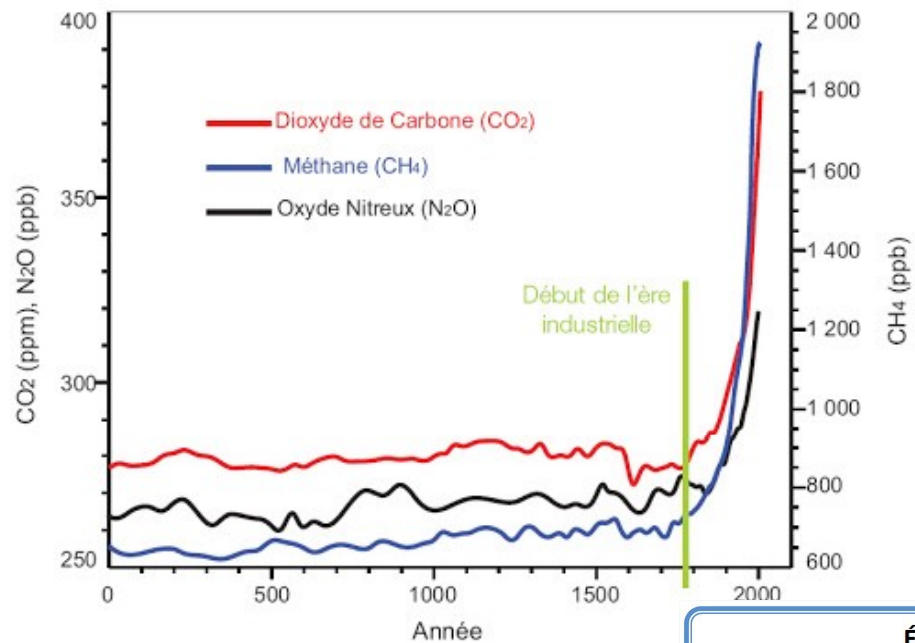


# Les gaz à effet de serre



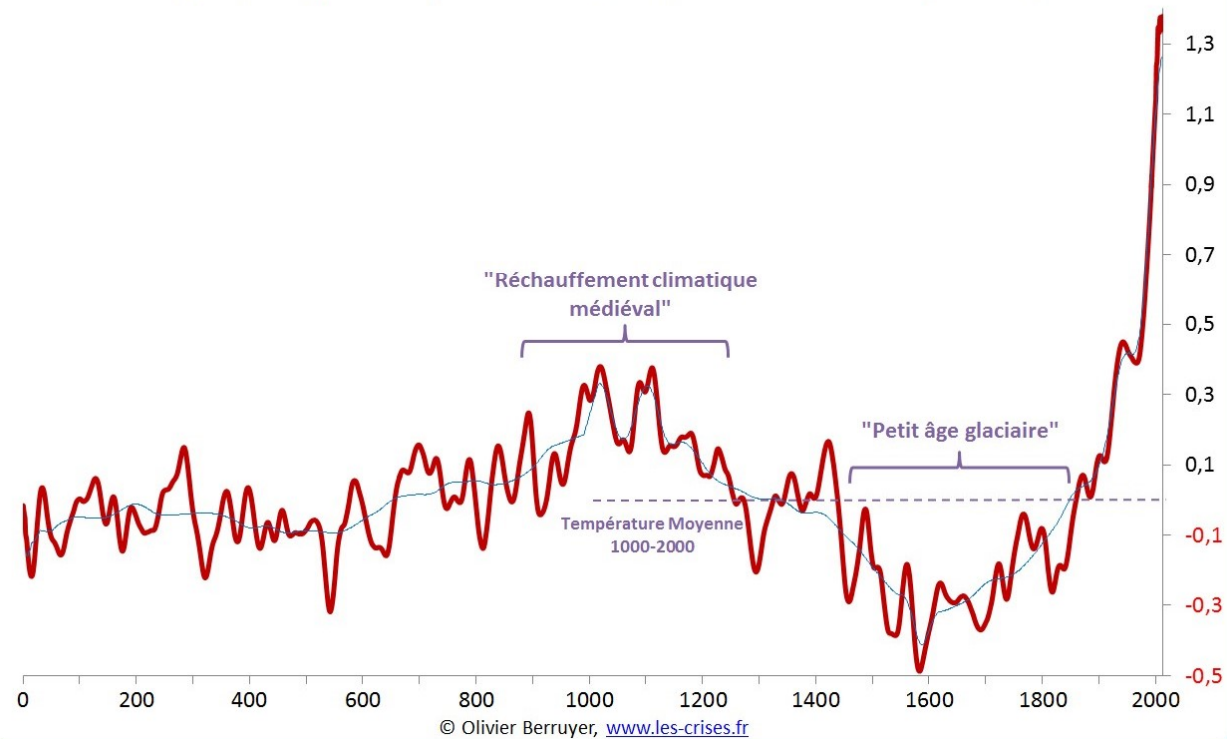
Source : <http://environnement.ted.fr>

# Les gaz à effet de serre



## Évolution de la température de l'Hémisphère Nord depuis 2 000 ans

(écart par rapport à la moyenne 1000-2000, en °C) (Sources : Sonechkin et al. puis NASA)



# **Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées**

## **I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines**

### **A. les changements climatiques du quaternaire**

### **B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques**

### **C. Les causes des variations climatiques du quaternaire**

#### **1. les variations de la concentration en gaz à effet de serre (GES)**

#### **2. Les paramètres orbitaux à l'origine des variations climatiques récentes**



# Les paramètres de MILANKOVIC



**Milutin Milanković (1879 – 1958)** est un ingénieur, un astronome, un géophysicien, un inventeur et un climatologue serbe (Wikipédia)

# Les paramètres de MILANKOVIC

## La théorie astronomique du climat

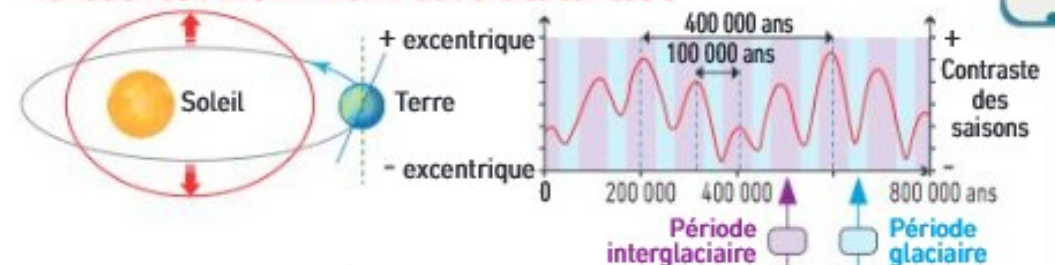
Publiée en 1941, la théorie astronomique du climat, de l'astronome croate Milutin Milanković, suppose que les variations climatiques quaternaires sont la conséquence des variations cycliques de différents paramètres de l'orbite terrestre :

- L'excentricité de l'orbite correspond au degré d'aplatissement de l'ellipse que décrit la Terre dans sa révolution autour du Soleil.
- L'obliquité correspond à l'angle d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite.
- La précession correspond à la position de l'axe de rotation de la Terre, suivant un mouvement d'oscillation ressemblant à celui de l'axe d'une toupie.

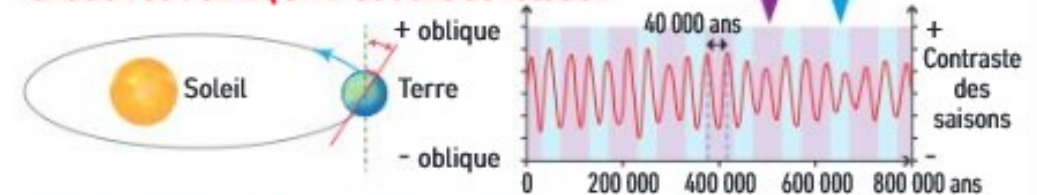
Ces différents paramètres ont une influence sur la quantité d'énergie solaire reçue par la Terre au cours de l'année et également sur le contraste entre les saisons. Ils produiraient des variations climatiques cycliques, appelées **cycles de Milanković\***.

Cette théorie ne fût largement admise dans la communauté scientifique qu'au début des années 1970.

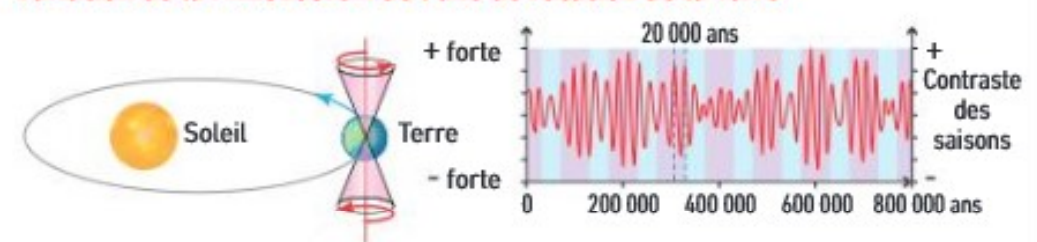
### Variation de l'EXCENTRICITÉ de l'orbite terrestre



### Variation de l'OBLIQUITÉ de l'axe de rotation

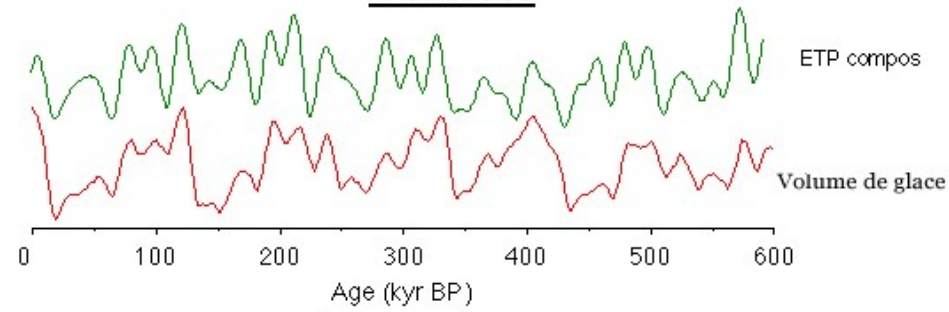


### Variation de la PRÉCESSION de l'axe de rotation de la Terre

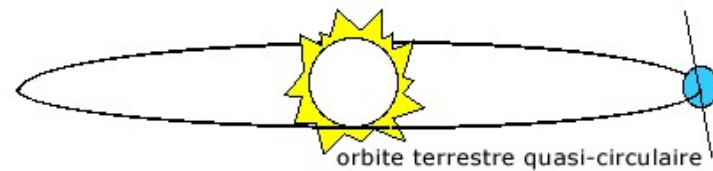


■ Variation des paramètres (excentricité, obliquité et précession) de l'orbite terrestre.

## Données



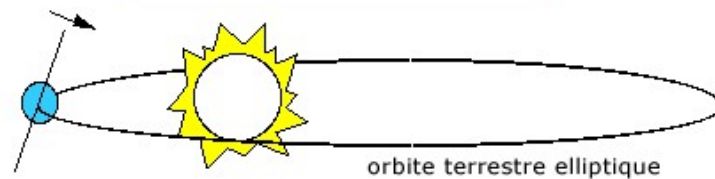
### Période glaciaire



Excentricité faible  
Inclinaison faible  
Grande distance Terre-Soleil en été

- > configuration orbitale favorisant une glaciation
- > faible contraste entre les saisons

### Période inter-glaciaire



Excentricité forte  
Inclinaison forte  
Faible distance Terre-Soleil en été

- > configuration orbitale favorisant une déglaciation
- > saisons contrastées (étés plus chauds, hivers plus froids)

# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

## I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

### A. les changements climatiques du quaternaire

### B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques

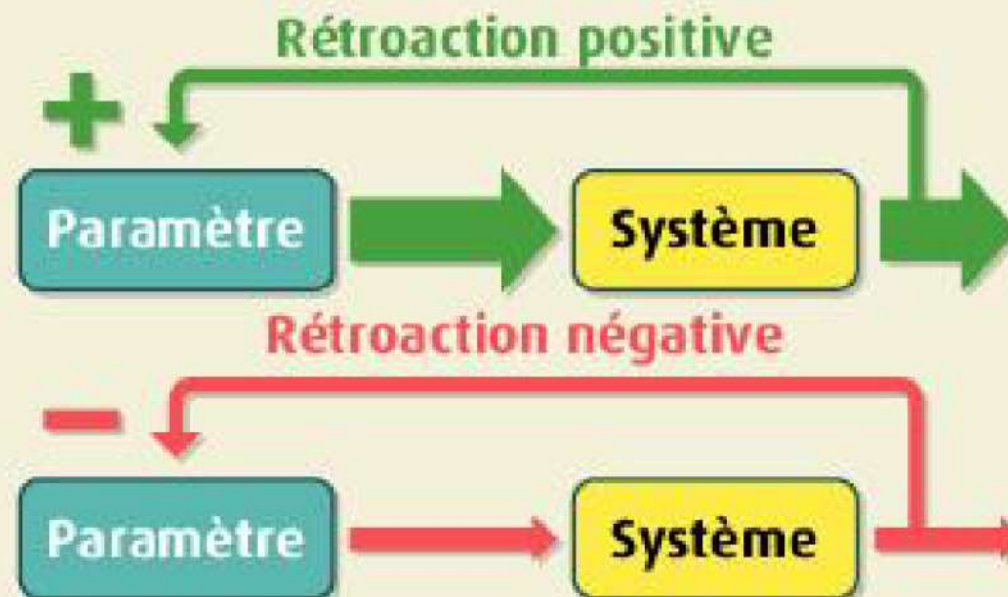
### C. Les causes des variations climatiques du quaternaire

1. les variations de la concentration en gaz à effet de serre (GES)
2. Les paramètres orbitaux à l'origine des variations climatiques récentes
3. Des mécanismes amplificateurs : l'albédo et la solubilité du CO<sub>2</sub>

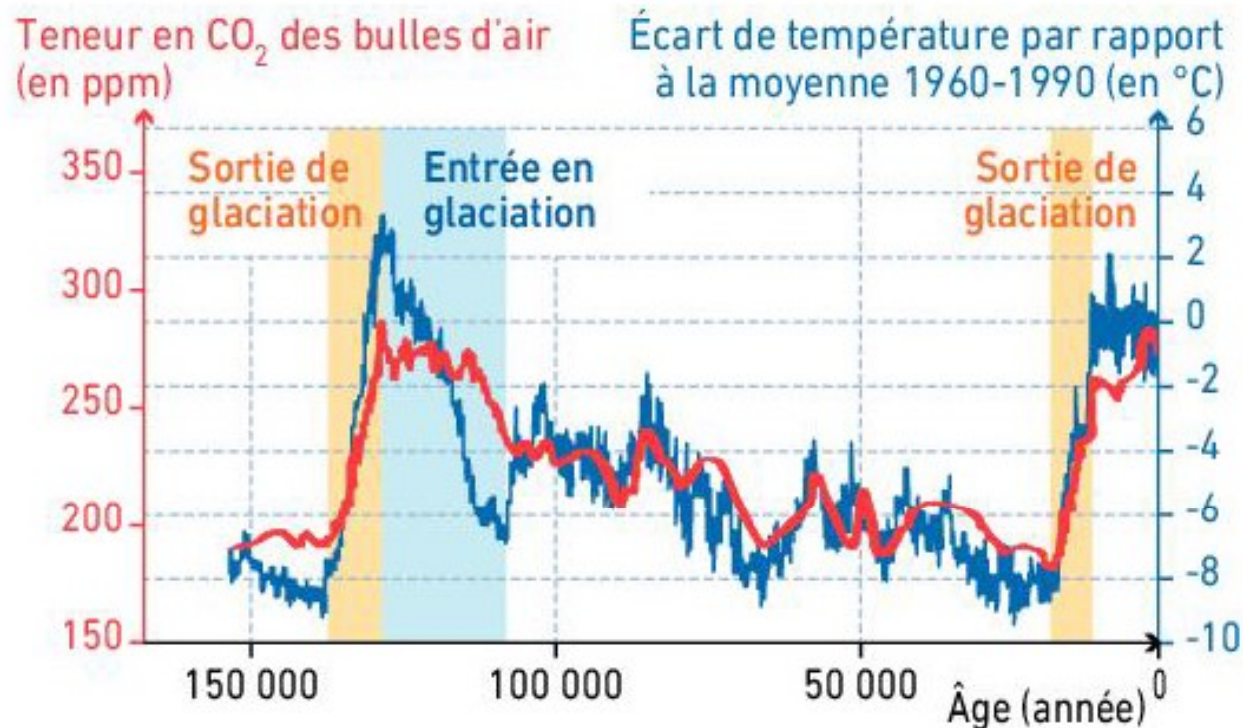


## Définition-clé

**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.

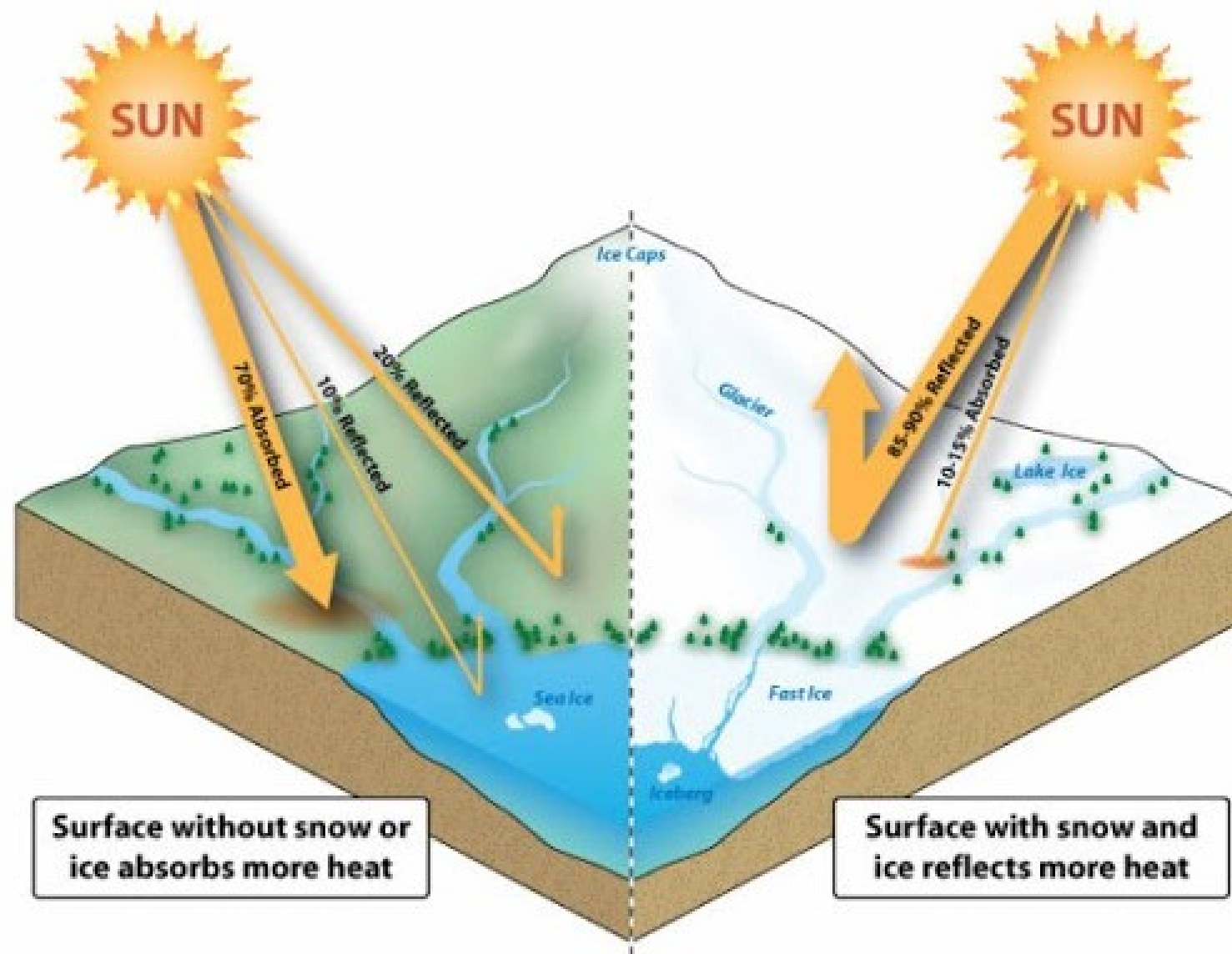


Les cycles climatiques du Quaternaire sont marqués par des phases rapides d'entrée ou de sortie de glaciation, décelées par les mesures isotopiques et l'analyse des bulles d'air des glaces, comme ici à Vostok (Antarctique). La vitesse de ces phases laisse penser que des phénomènes amplifient les changements climatiques initiés par les paramètres orbitaux (B).

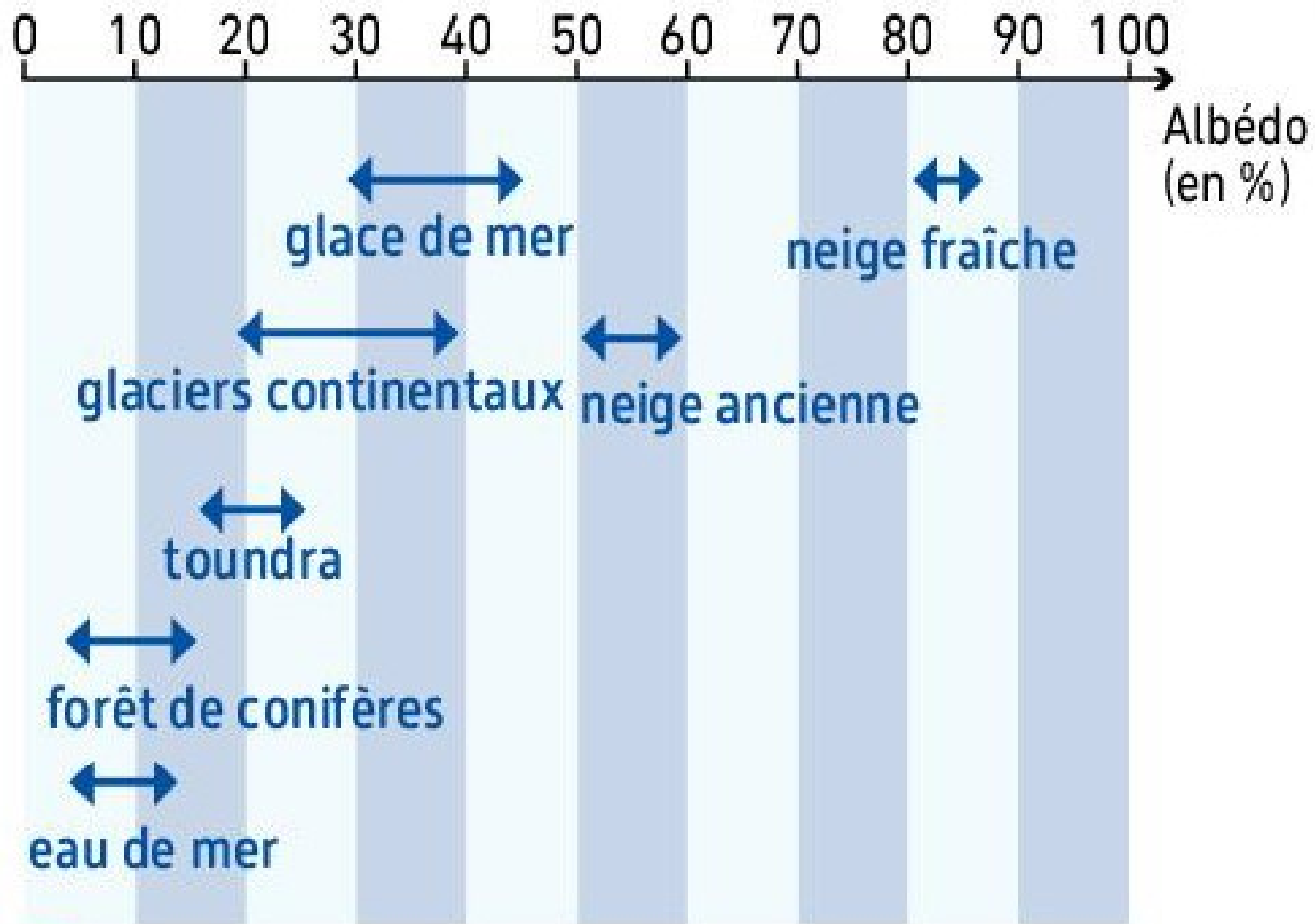


**B** Des entrées et sorties de glaciation très rapides.

# L'albédo



# L'albédo

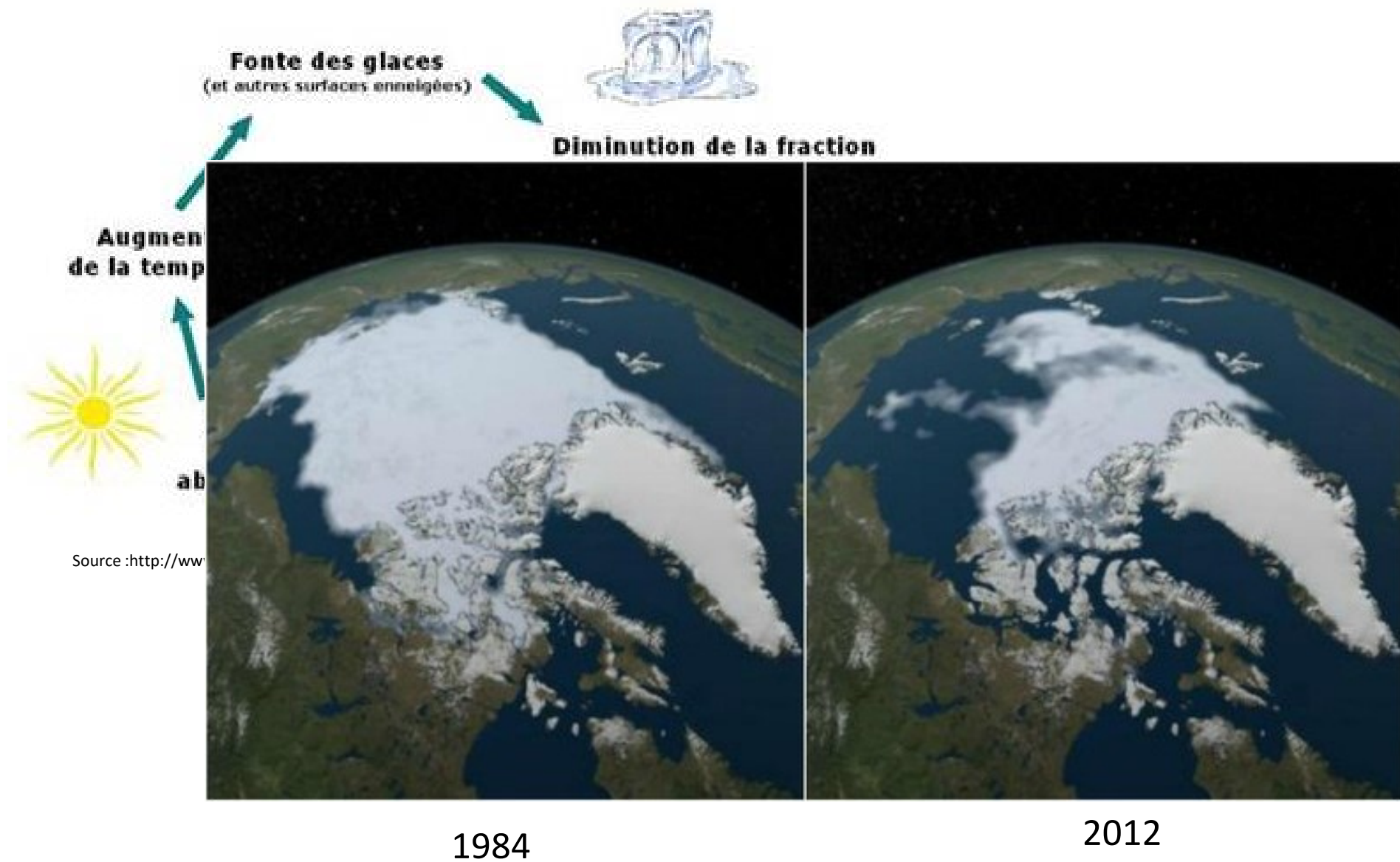


**B** Albédo de différentes surfaces.

Rappel : l'**albédo**\* est le % du rayonnement solaire incident réfléchi par la surface terrestre.



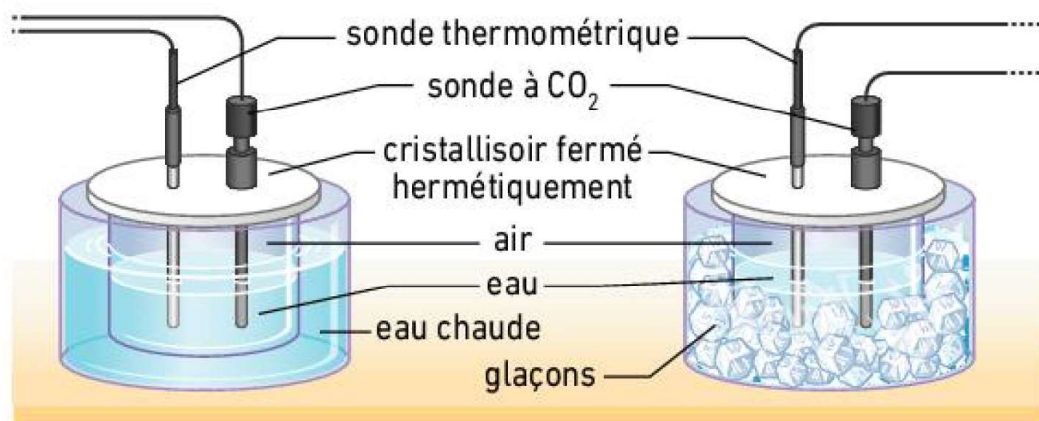
# L'albédo



# La solubilité du $\text{CO}_2$

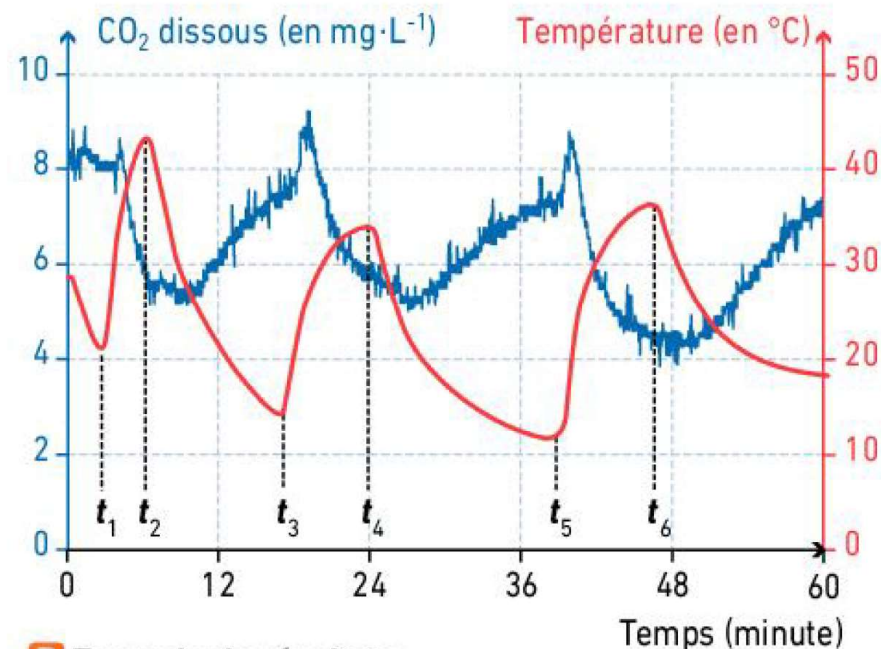
## Activité pratique

Cette expérience a pour objectif de déterminer l'influence de la température sur la capacité de l'eau à absorber le  $\text{CO}_2$  présent dans l'air. On verse dans un petit cristalliseur 150 mL d'eau, on y plonge une sonde à  $\text{CO}_2$  et une sonde thermométrique, puis on ferme hermétiquement le récipient.



**A** Montage expérimental.

Aux temps  $t_1$ ,  $t_3$  et  $t_5$ , on a plongé le cristalliseur dans de l'eau chaude. Aux temps  $t_2$ ,  $t_4$  et  $t_6$ , on a plongé le cristalliseur dans de l'eau refroidie par des glaçons.



**B** Exemple de résultats.

### Document 3 : Coefficient de solubilité du $\text{CO}_2$ dans l'eau de mer

Le  $\text{CO}_2$  atmosphérique peut se dissoudre dans l'eau. La quantité soluble par unité de volume dépend de la température de l'eau. La dissolution du  $\text{CO}_2$  dans l'eau est totalement réversible.

| Température ( $^{\circ}\text{C}$ )                                                                                  | 0    | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Coefficient de solubilité du $\text{CO}_2$ dans l'eau de mer ( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$ ) | 1,41 | 1,17 | 0,99 | 0,85 | 0,74 | 0,65 | 0,57 |

# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

## I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

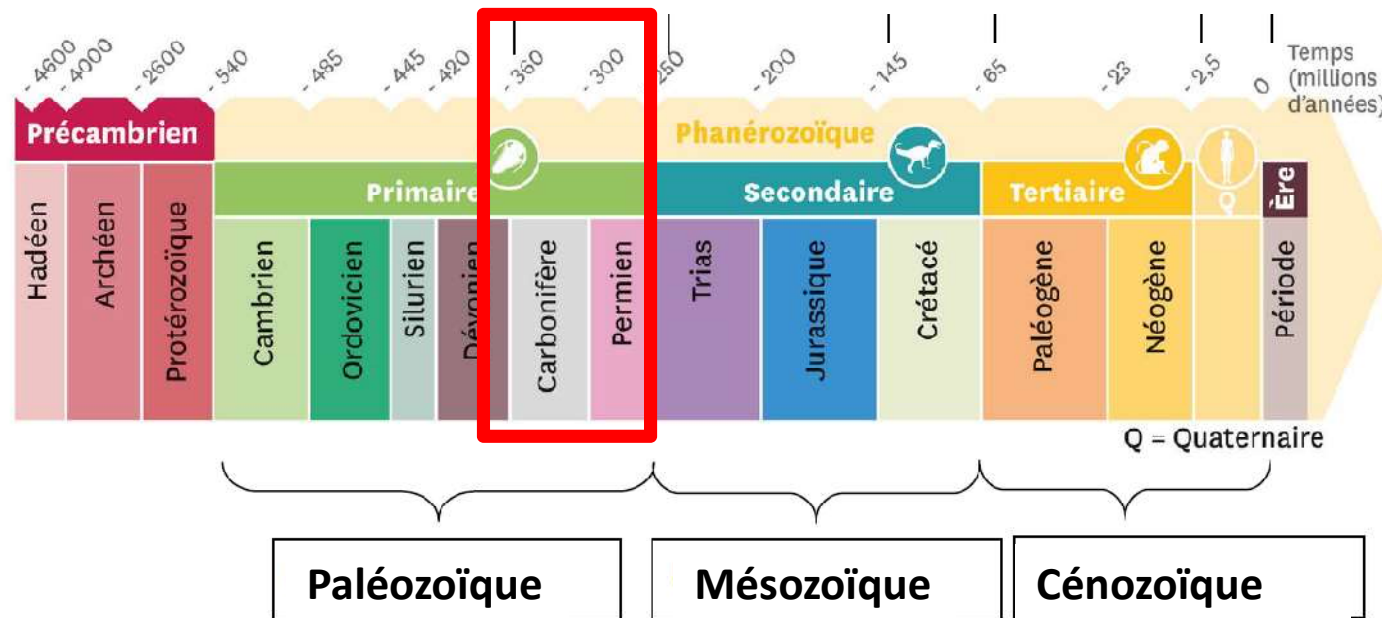
A. les changements climatiques du quaternaire

B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques

C. Les causes des variations climatiques du quaternaire

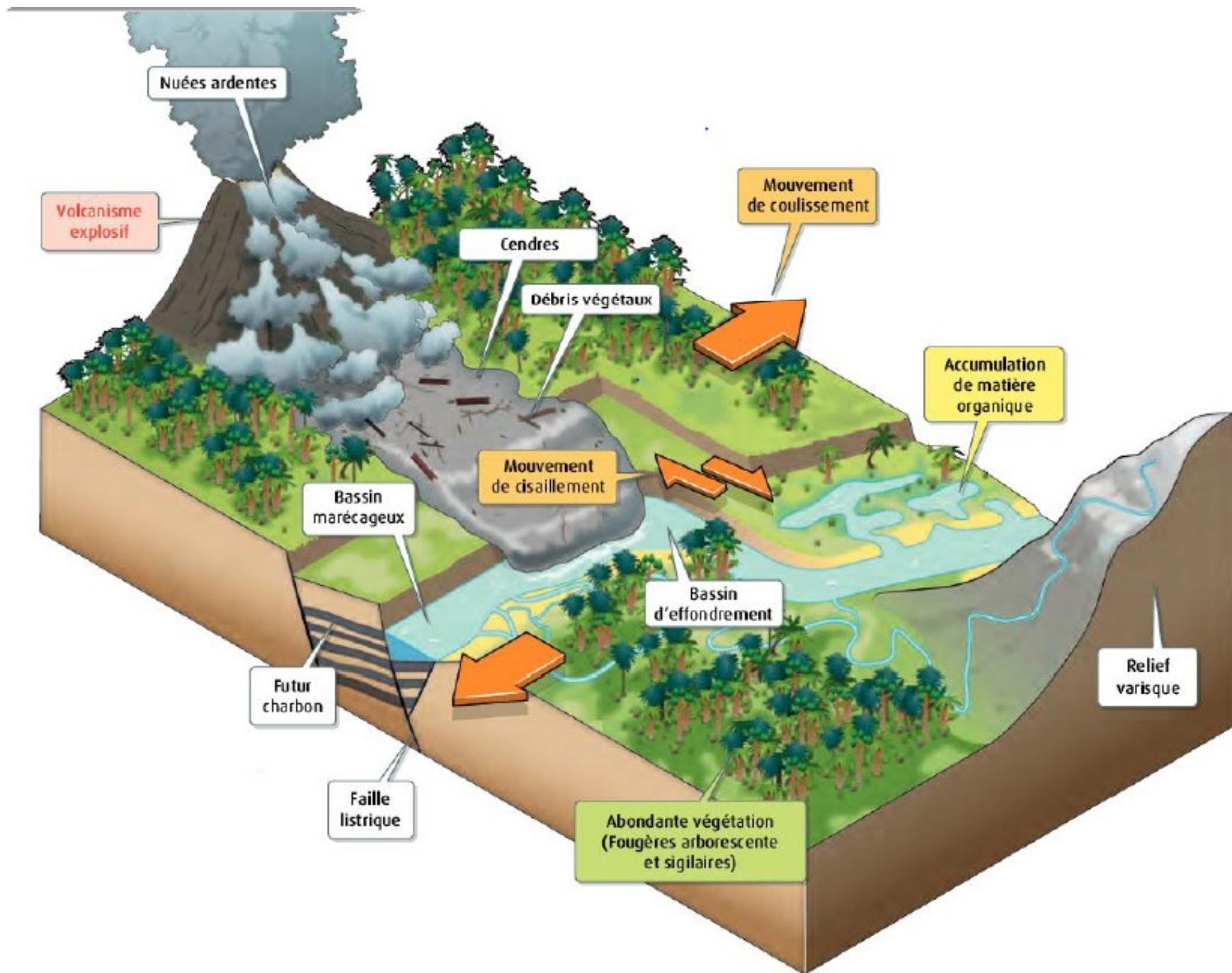
## II. Des variations climatiques anciennes – TD2

A. La glaciation Carbonifère-Permien (période comprise entre -360 et -250 Ma)



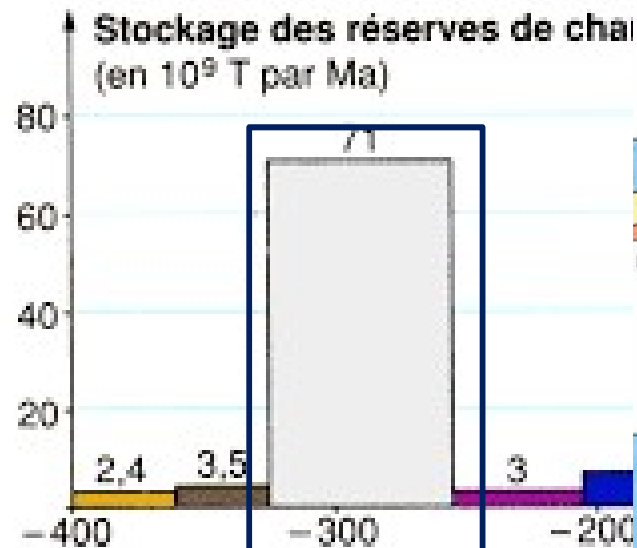


# Les origines de la glaciation Carbonifère – Permien : Le taux de CO<sub>2</sub>

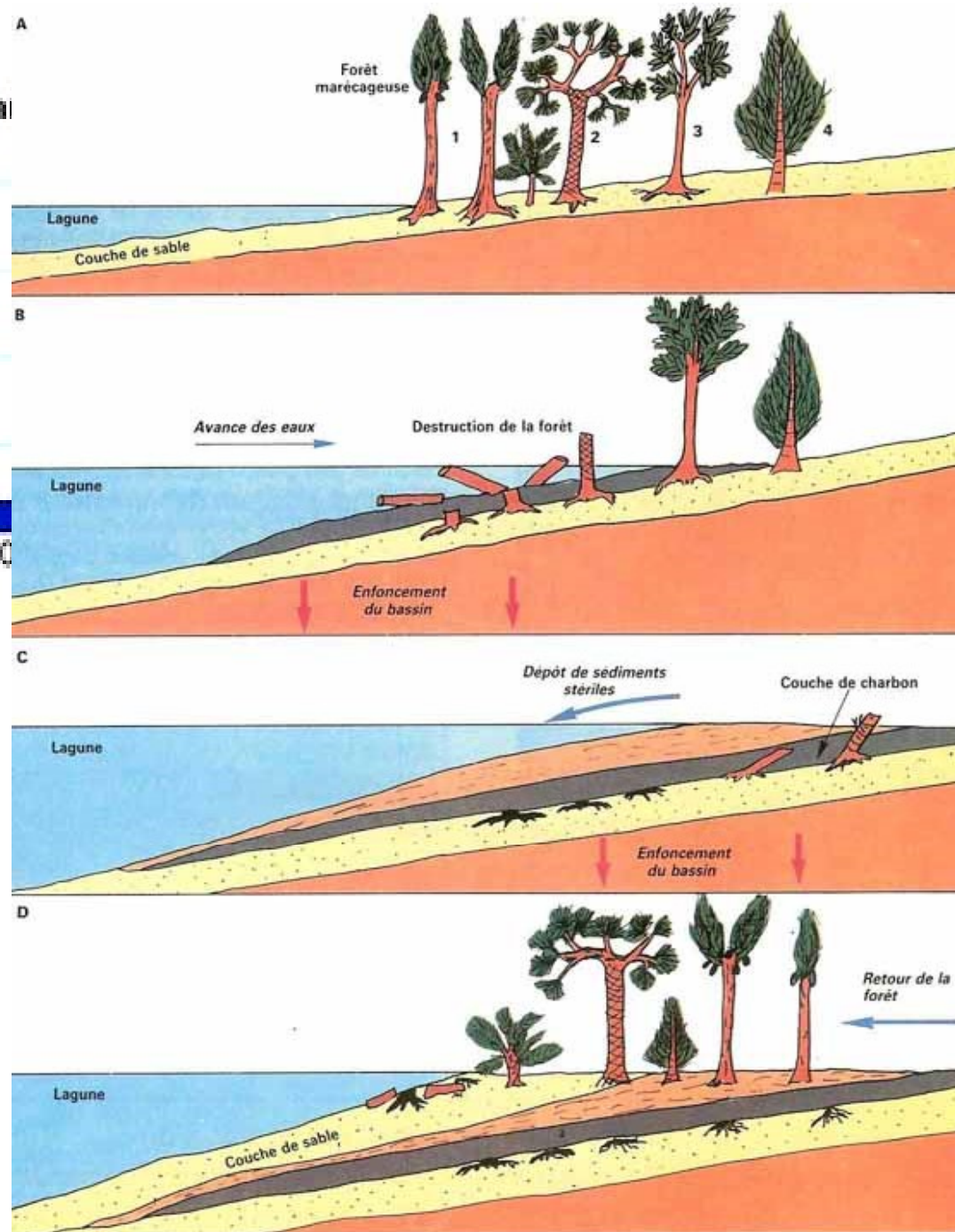




# Les origines de la glaciation Carbonifère – Permien : Le taux de CO<sub>2</sub>



CHARBONS



10. Formation du charbon. 1 - Sigillaire, 2 - Lépidodendron, 3 - Cordaïtes, 4 - Calamites.

# Les origines de la glaciation Carbonifère – Permien : Le taux de CO<sub>2</sub>

La fin de l'ère primaire est marquée par la réunion des blocs continentaux en un seul continent, la Pangée (voir p. 171). Ce mécanisme a entraîné plusieurs conséquences :

- La formation de la ceinture orogénique\* hercynienne, située au niveau de l'équateur et subissant une importante altération.
- La présence d'une masse continentale importante aux latitudes élevées de l'hémisphère Sud (A), favorisant la formation d'une calotte glaciaire.

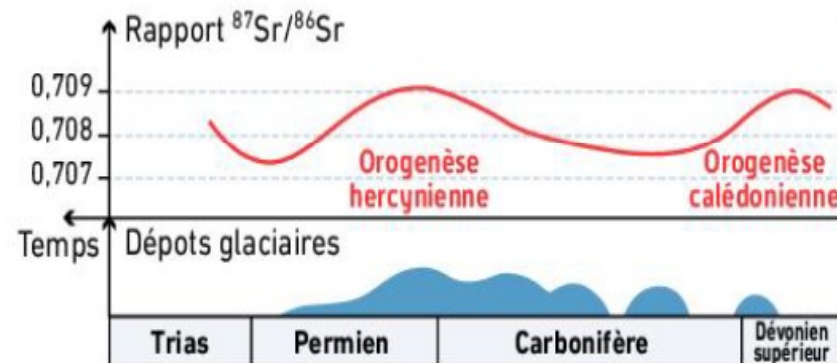
## Fin Carbonifère

-300 Ma

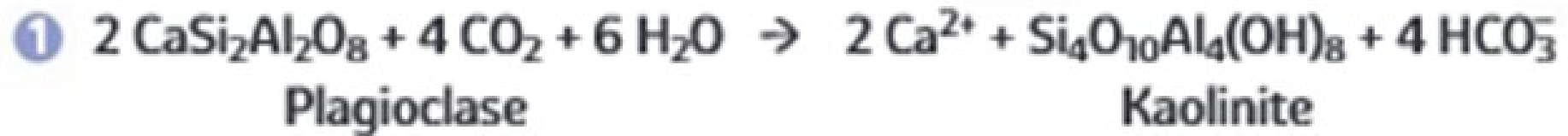


**A** Reconstitution paléogéographique de la fin du Carbonifère.

- Les sédiments détritiques issus de l'érosion de la chaîne hercynienne se sont déposés dans des bassins sédimentaires situés sur son pourtour. Cette importante sédimentation a favorisé le piégeage de la matière végétale qui a lentement évolué pour former le charbon.
- Les décomposeurs présents sur les continents à cette époque n'étaient pas capables de décomposer la lignine (voir p. 219). D'énormes quantités de matières végétales ont ainsi échappé à la décomposition.
- Le rapport isotopique du strontium dans les sédiments carbonatés océaniques est utilisé par les géologues comme marqueur de l'altération des roches continentales. Un rapport élevé traduit une forte altération (B).



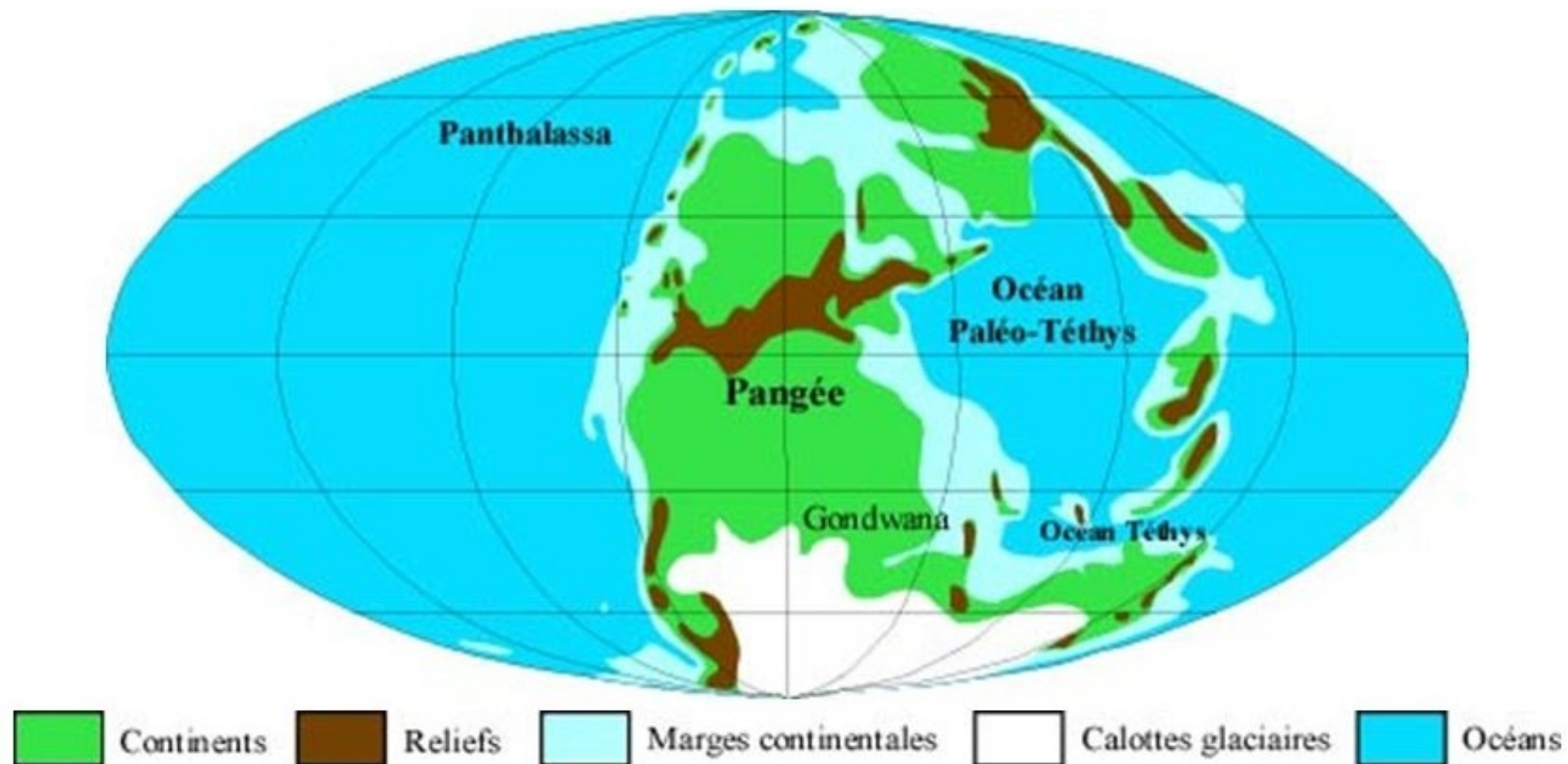
**B** Extension des dépôts glaciaires et rapport isotopique du strontium à la fin de l'ère primaire.



Equation chimique de l'altération d'un plagioclase (minéral constitutif du granite) et de la formation de calcaire



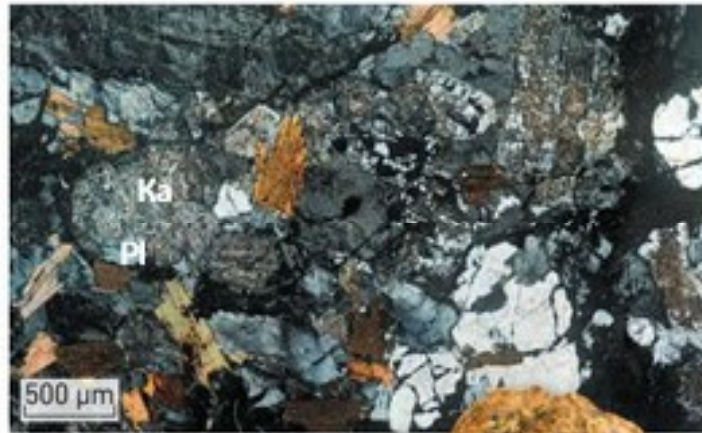
# Les origines de la glaciation Carbonifère – Permien : formation de la Pangée



**Reconstruction paléogéographique au Permien sup. (255 Ma).  
modifié d'après Scotese's Paleomap Project et Ron Blakey (1999)**

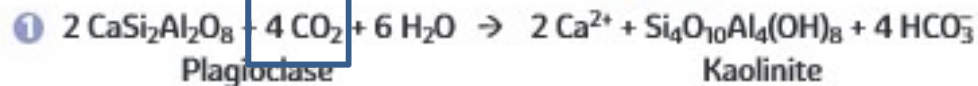


# Les origines de la glaciation Carbonifère – Permien : Le taux de CO<sub>2</sub>



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

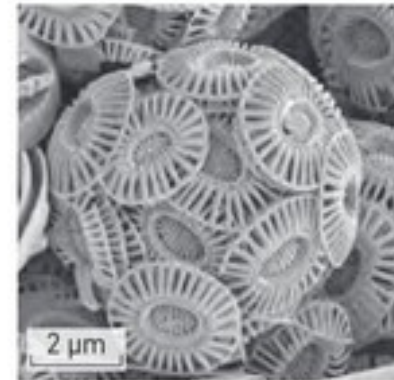
**B** Échantillon d'un granite altéré.



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.

4 CO<sub>2</sub> consommés pour un seul rejeté

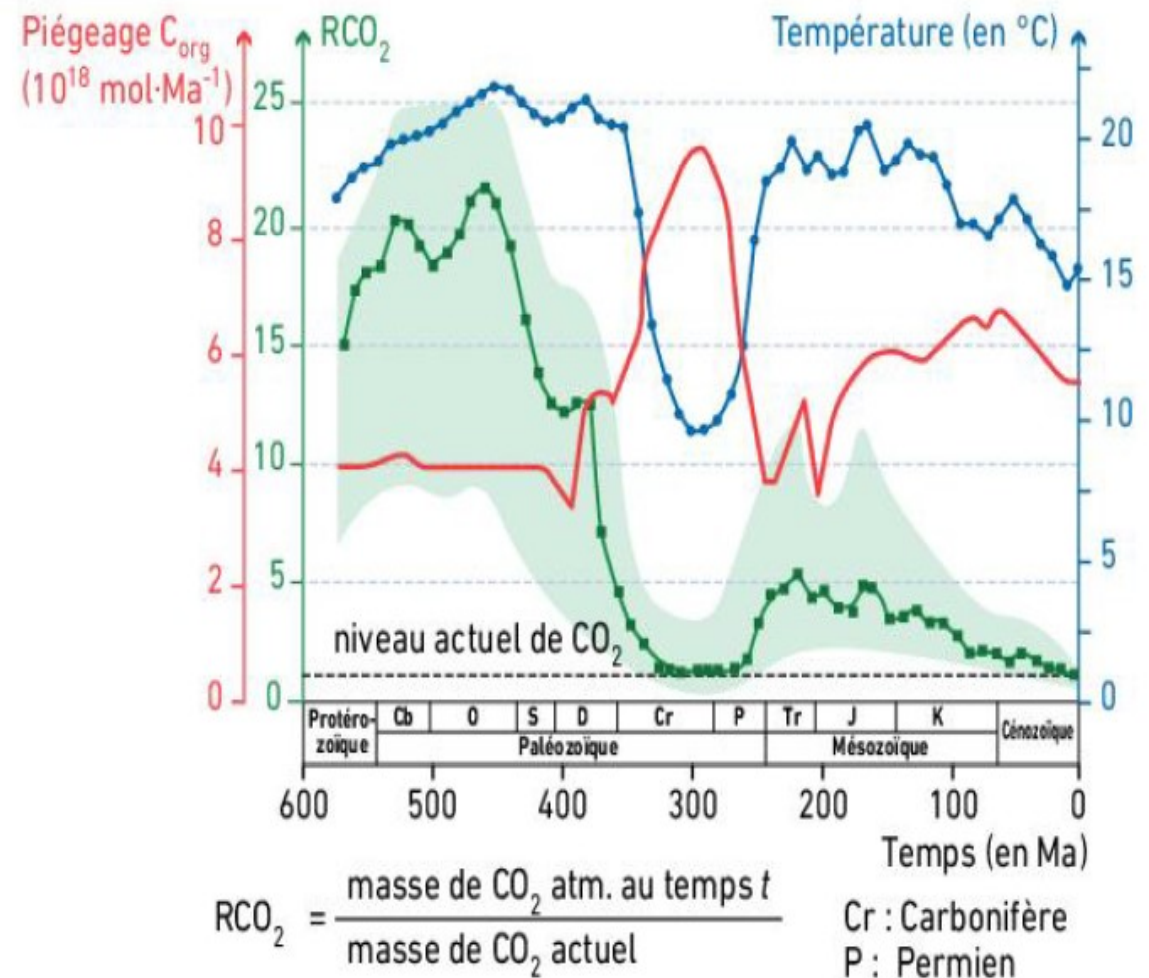
# Les origines de la glaciation Carbonifère – Permien : Le taux de CO<sub>2</sub>

Le graphique ci-contre présente les résultats de plusieurs modèles construits par les paléoclimatologues.

En **bleu** : modèle de température basé sur l'étude des isotopes de l'oxygène des sédiments océaniques.

En **vert** : modèle de l'évolution de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub>, prenant en compte plusieurs données (fossiles, indices stomatiques\*, roches sédimentaires...). La plage vert clair correspond à la zone d'incertitude.

En **rouge** : modèle du piégeage du carbone issu de la matière organique dans les roches sédimentaires (charbon, pétrole, gaz naturel).



# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

## I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

A. les changements climatiques du quaternaire

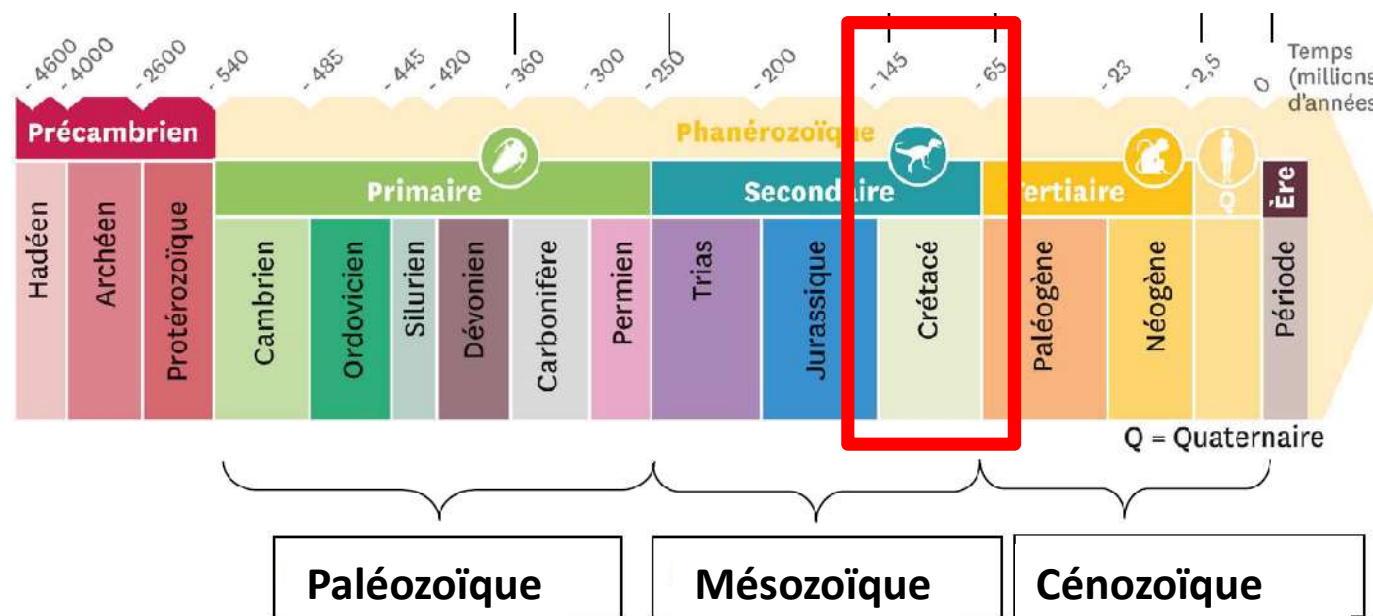
B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques

C. Les causes des variations climatiques du quaternaire

## II. Des variations climatiques anciennes – TD2

A. La glaciation Carbonifère-Permien (période comprise entre -360 et -250 Ma)

B. des indices d'un climat chaud au Crétacé (période comprise entre -145 et -65 Ma).





# Le réchauffement du Crétacé : les roches



**Latérite** : sol rouge riche en argile  
coloré par les oxydes de fer ou  
d'aluminium



Carrière de bauxite près de  
Bédarieux (Hérault)

**Bauxite** : minéral d'aluminium  
(roche riche en oxyde ferrique)



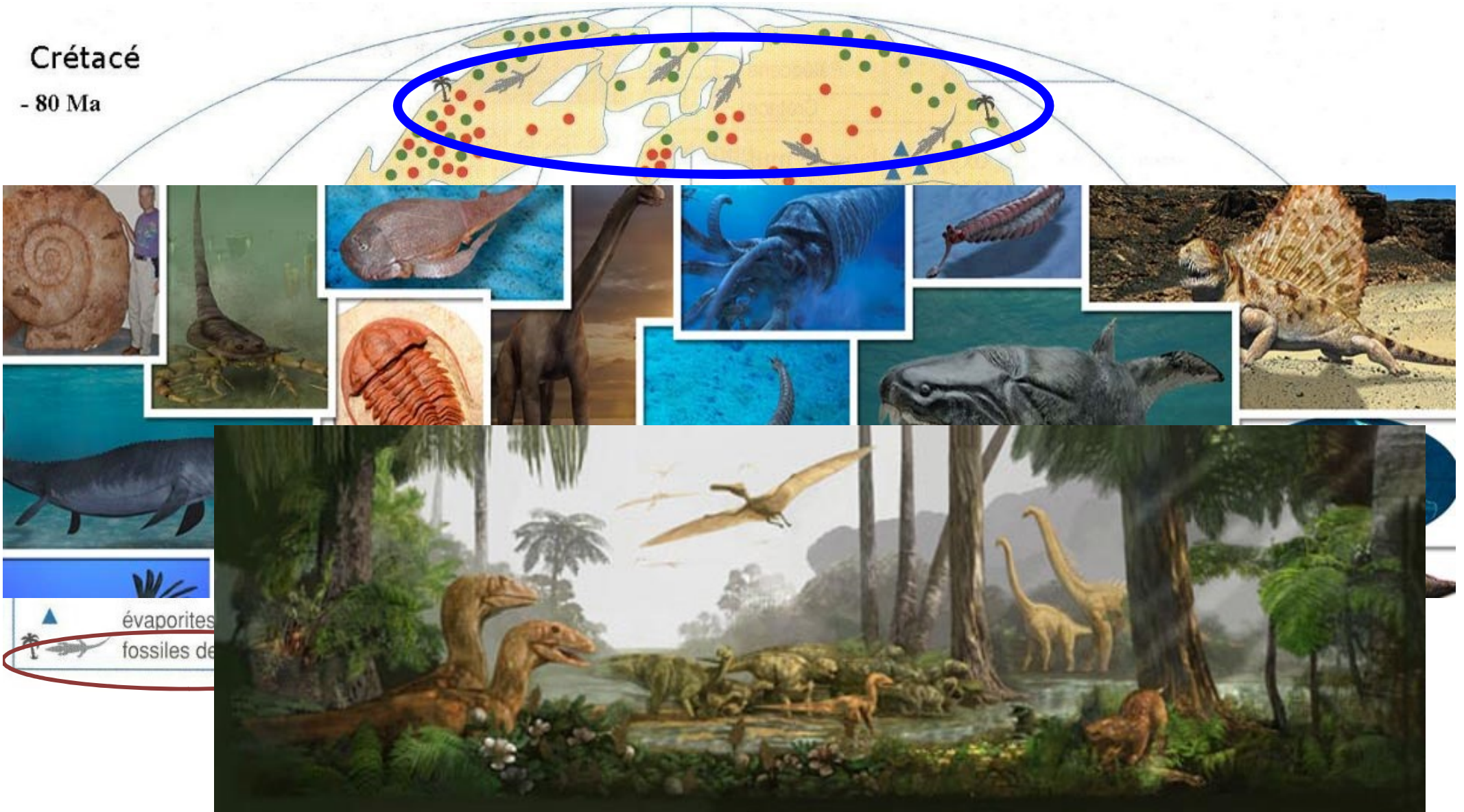
# Le réchauffement du Crétacé : les roches



# Le réchauffement du Crétacé : les roches et fossiles

Crétacé

- 80 Ma



# Le réchauffement du Crétacé : le taux de CO<sub>2</sub>



Feuille de Ginkgo biloba  
actuelle



Feuille de Ginkgo biloba  
fossile du crétacé

**Indice stomatique = (nombre de stomates/nombre de cellules épidermiques) x 100**

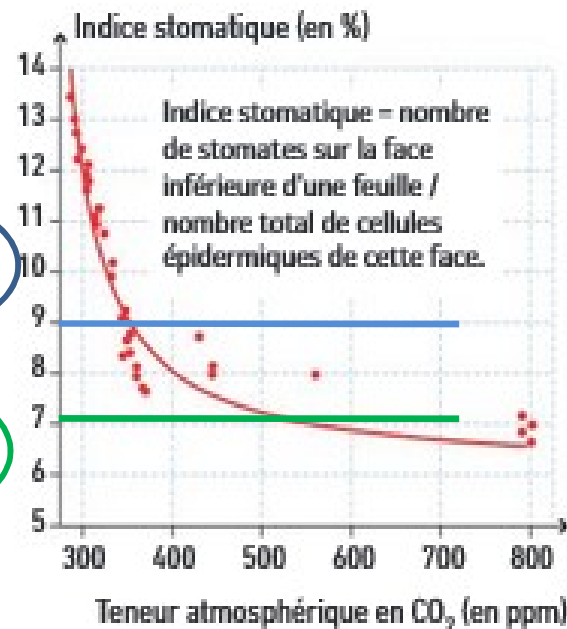
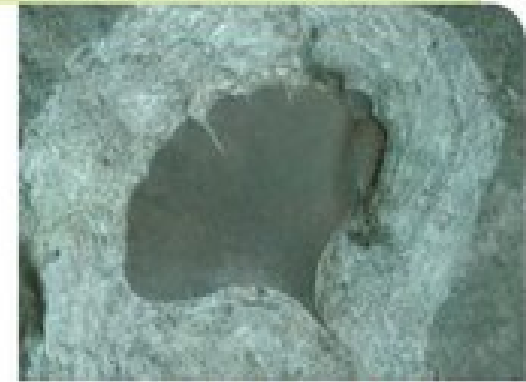


# Le réchauffement du Crétacé : le taux de CO<sub>2</sub>

## Des feuilles fossiles qui nous renseignent sur la teneur en CO<sub>2</sub>

Les paléobotanistes utilisent comme indice de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> la quantité de stomates\* (orifices permettant les échanges gazeux) au niveau des feuilles fossiles. Expérimentalement, ils ont montré que leur nombre diminuait avec la teneur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> (B).

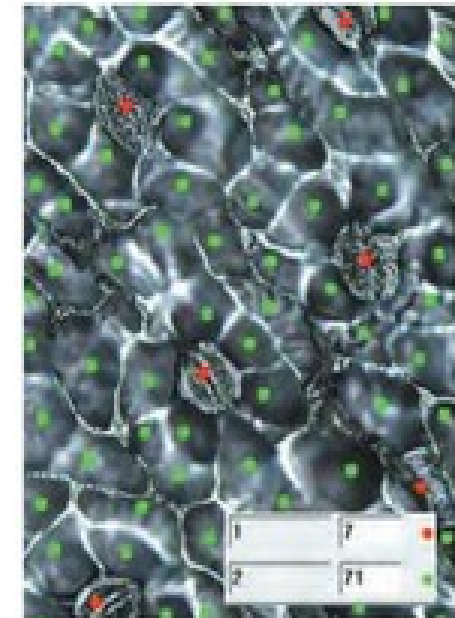
**A** Fossile de  
feuille de  
*Ginkgo biloba*.



**B** Le calcul de l'indice stomatique de plusieurs fossiles de feuilles de *Ginkgo biloba*, datant de la fin du Crétacé, a donné un résultat de 7,09 %.

### Activité pratique

- Recouvrir avec deux couches de vernis une surface d'environ 1 cm<sup>2</sup> de la face inférieure d'une feuille de *Ginkgo biloba*.
- Laisser sécher puis décoller doucement le film obtenu.
- Monter dans une goutte d'eau entre lame et lamelle.
- Observer au microscope et capturer une image numérique.
- À l'aide d'un logiciel (*Mesurim*), compter les stomates et les cellules épidermiques.
- Calculer l'indice stomatique de la feuille et le mettre en rapport avec la teneur atmosphérique actuelle en CO<sub>2</sub>.



**C** Comptage de stomates d'une  
feuille de *Ginkgo biloba* avec  
le logiciel *Mesurim*.  
Point rouge : stomate  
Point vert : cellule épidermique



# Le réchauffement du Crétacé : le taux de CO<sub>2</sub>



On évalue la production annuelle de magma au niveau des dorsales actuelles à  $20 \text{ km}^3$ . Ce magma contient des gaz, dont du CO<sub>2</sub>, qui sont libérés lors de la mise en place de ces roches (dégazage).

Les travaux récents permettent d'estimer la libération actuelle de CO<sub>2</sub> au niveau des dorsales entre  $2 \cdot 10^{10}$  et  $2 \cdot 10^{11} \text{ kg} \cdot \text{an}^{-1}$ . À titre de comparaison, les émissions de CO<sub>2</sub> d'origine anthropique sont d'environ  $36 \cdot 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{an}^{-1}$ .

Une partie de ce CO<sub>2</sub>, dissous dans l'eau, est transféré lentement vers l'atmosphère.

■ La formation de laves en coussin (*pillow lavas*) est typique du volcanisme de dorsale.

# Le réchauffement du Crétacé : le taux de CO<sub>2</sub>

## L'expansion océanique au cours des temps géologiques

### Activité pratique

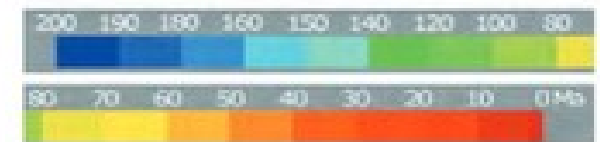
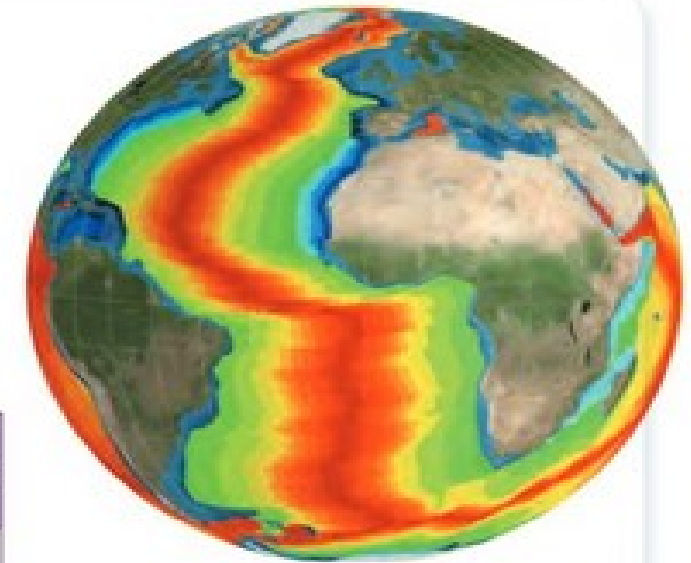
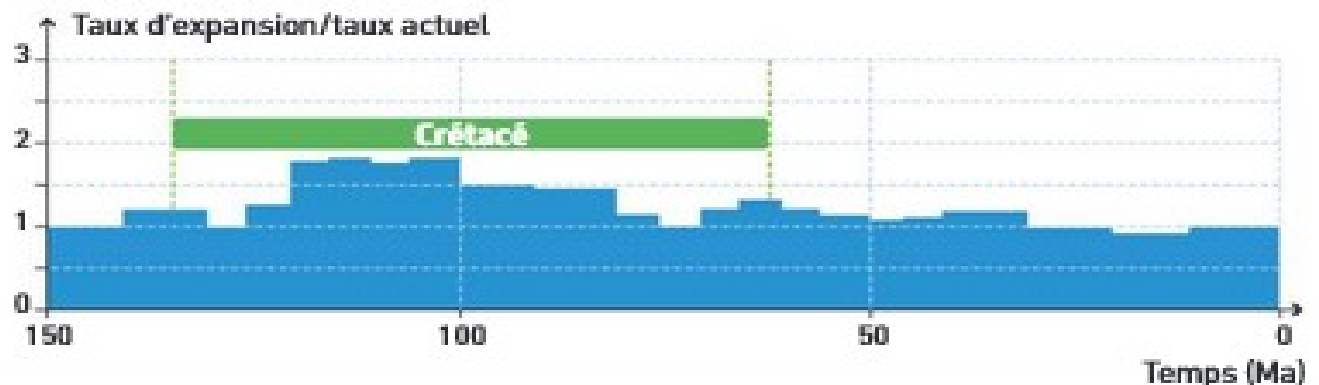
Afin d'estimer la vitesse d'expansion océanique au cours des temps géologiques :

- Sur le logiciel *Tectoglob3D*, afficher la carte de l'âge des fonds océaniques.
- Dans différents domaines océaniques et à différentes latitudes, mesurer la largeur des fonds océaniques produits pour chaque grande période.
- En déduire la vitesse moyenne de l'expansion océanique au cours de ces périodes.

| Période                                               | Jurassique moyen et supérieur | Crétacé inférieur | Crétacé supérieur | Cénozoïque |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|------------|
| Âge, arrondi à la dizaine (Ma)                        | 180 à 140                     | 140 à 100         | 100 à 60          | 60 à 0     |
| Largeur des fonds océaniques formés durant la période | 2 100 km                      | 4 300 km          | 4 500 km          | 6 600 km   |
| Durée de la période (Ma)                              | 40                            | 40                | 40                | 60         |
| Vitesse moyenne d'expansion (km·Ma <sup>-1</sup> )    | 53                            | 108               | 113               | 110        |

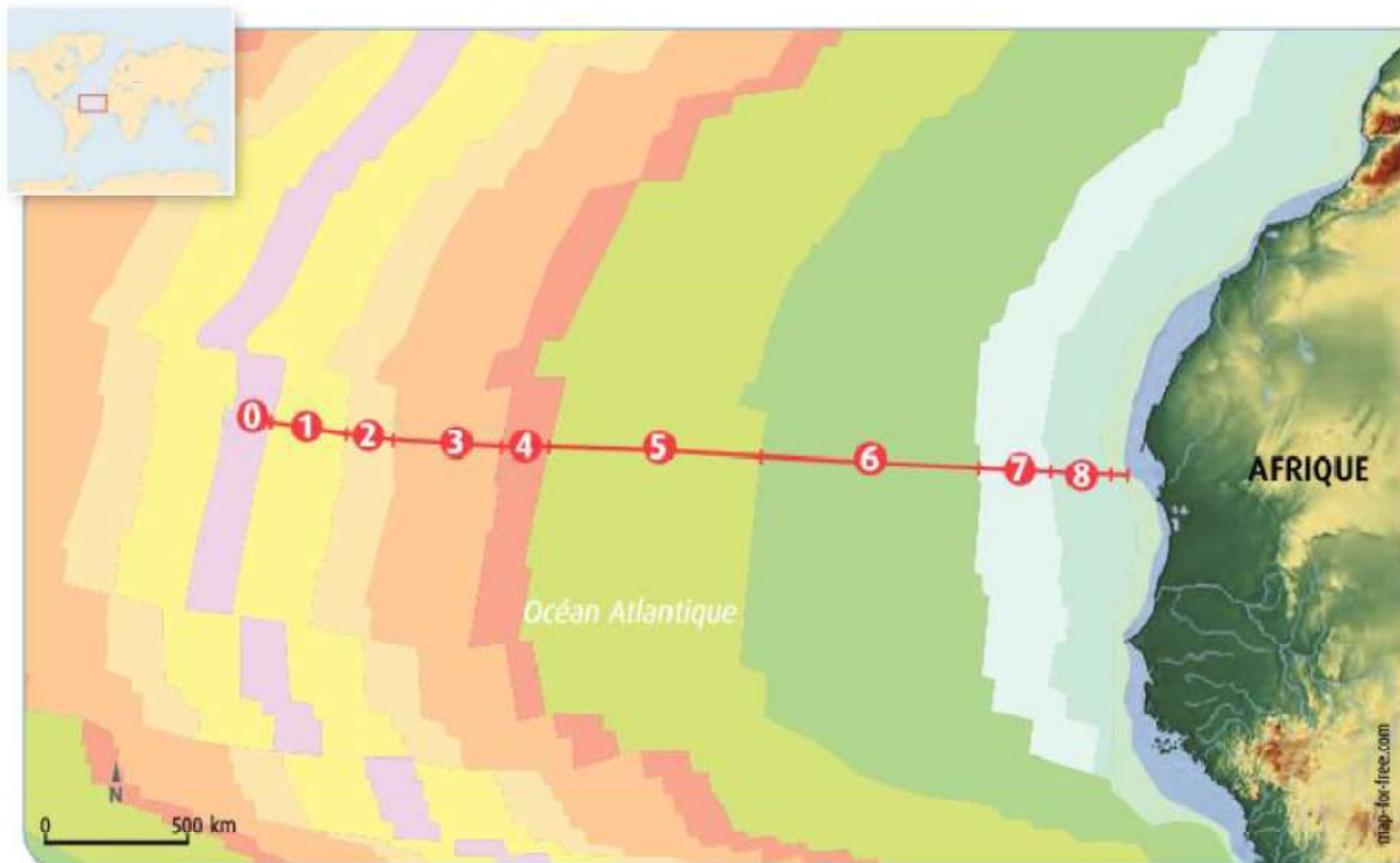
**A** Exemple de résultats.  
Océan Pacifique, vers 20 °N.

**B** Résultats obtenus par une équipe de chercheurs en estimant l'ensemble de production de lithosphère océanique par rapport à l'activité actuelle des dorsales.



**C** Âge des fonds océaniques dans l'océan Atlantique (*Tectoglob3D*).

# Le réchauffement du Crétacé : le taux de CO<sub>2</sub>



| Segment / Série stratigraphique | Longueur de lithosphère produite (km) | Durée (Ma) |
|---------------------------------|---------------------------------------|------------|
| 0 / Pliocène Quaternaire        | 64                                    | 5,3        |
| 1 / Miocène                     | 239                                   | 17,7       |
| 2 / Oligocène                   | 152                                   | 10,9       |
| 3 / Eocène                      | 358                                   | 22,1       |
| 4 / Paléocène                   | 142                                   | 10         |
| 5 / Crétacé supérieur           | 708                                   | 34,5       |
| 6 / Crétacé inférieur           | 721                                   | 44,5       |
| 7 / Jurassique supérieur        | 248                                   | 18,5       |
| 8 / Jurassique moyen            | 263                                   | 10,6       |

**1 Âge des fonds océaniques de l'Atlantique central de la dorsale à la côte africaine.** Au cours du Crétacé, la fragmentation de la Pangée (voir unité 2, doc 6) est associée à une intense accréation de la lithosphère océanique notamment au niveau de l'océan Atlantique. La lithosphère mise en place à la dorsale comprend une croûte océanique épaisse (lithosphère dite magmatique).



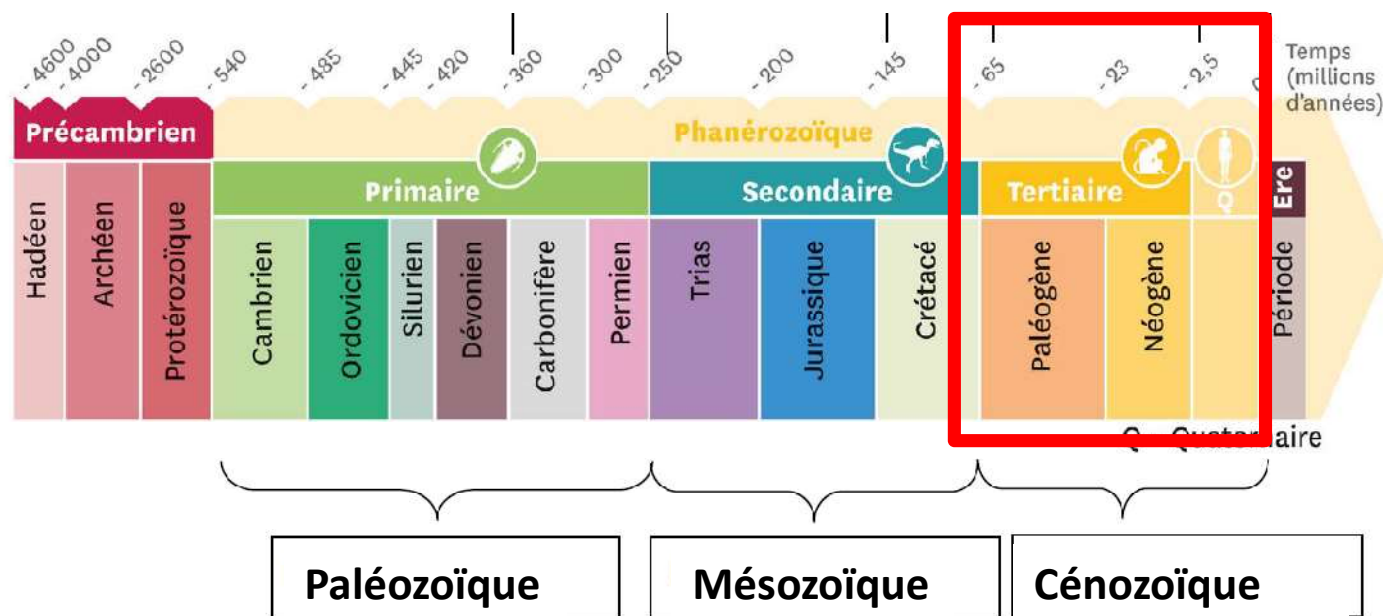
# Chapitre 1 : Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

## I. Les variations climatiques du quaternaire (depuis 2.5 Ma) et leurs origines

- A. les changements climatiques du quaternaire
- B. Les marqueurs (= indices) de ces changements climatiques
- C. Les causes des variations climatiques du quaternaire

## II. Des variations climatiques anciennes – TD2

- A. La glaciation Carbonifère-Permien (période comprise entre -360 et -250 Ma)
- B. des indices d'un climat chaud au Crétacé (période comprise entre -145 et -65 Ma).
- C. Le refroidissement Cénozoïque (période comprise entre -65 Ma et aujourd'hui).



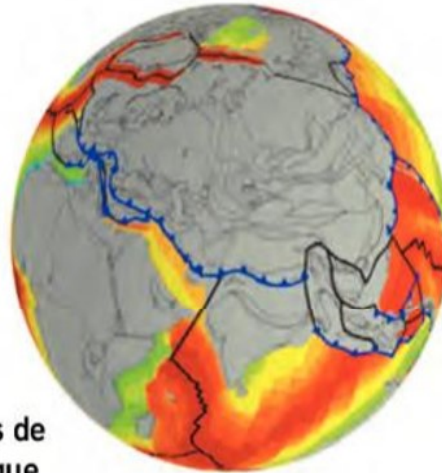


# Le refroidissement du Cénozoïque

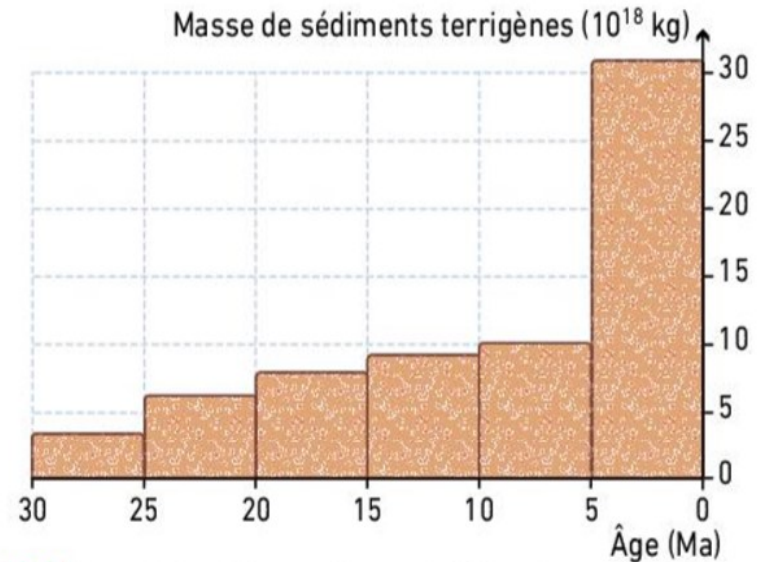
Le Cénozoïque est une période de réunion des blocs continentaux et de formation de chaînes de montagnes, dont les principales forment la ceinture orogénique alpine (voir p. 160). Dès leur formation, les reliefs montagneux sont soumis à l'altération et à l'érosion\*. Ce phénomène est quantitativement 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.

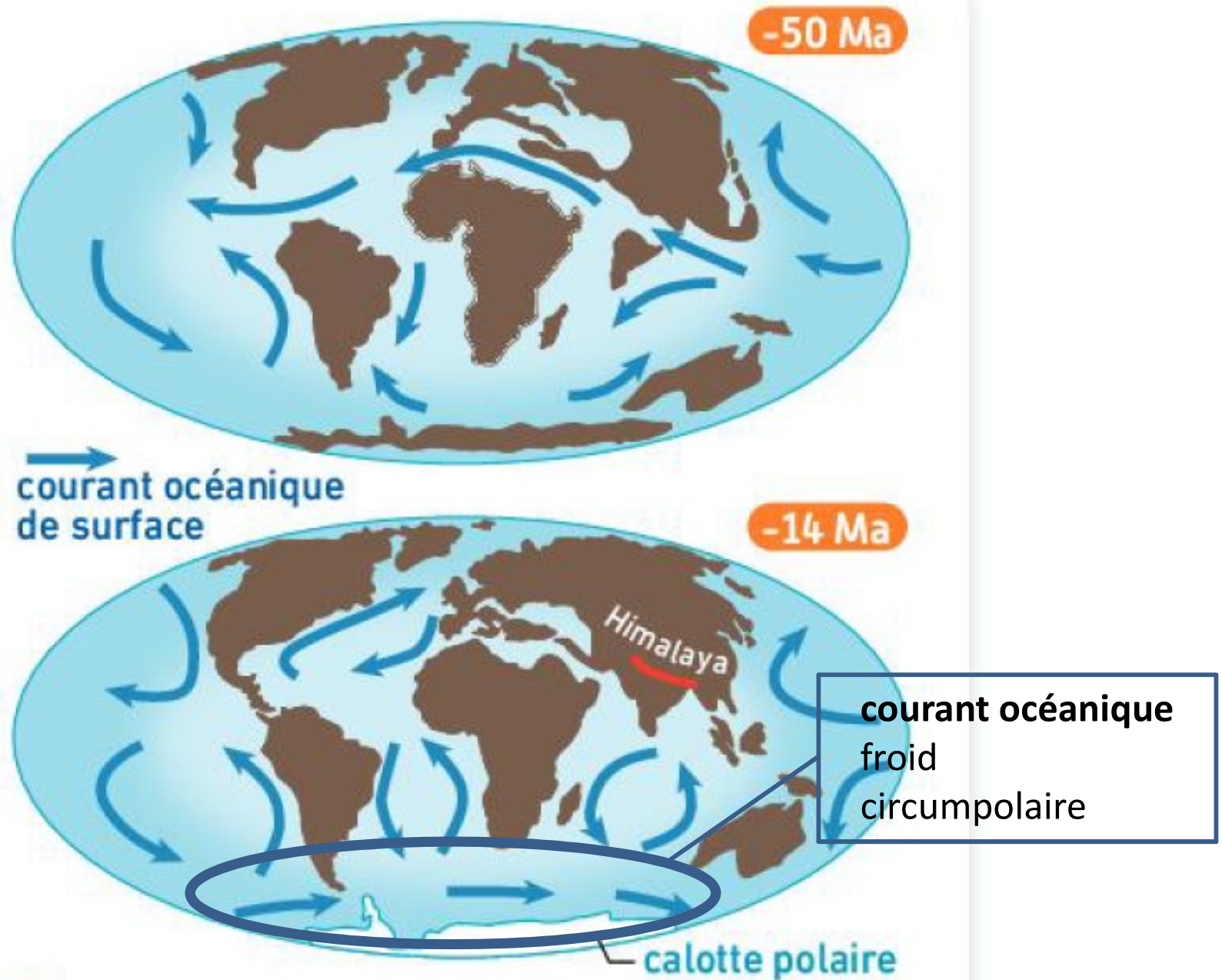


**B** Formation de chaînes de montagnes au Cénozoïque.



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

# Le refroidissement du Cénozoïque



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

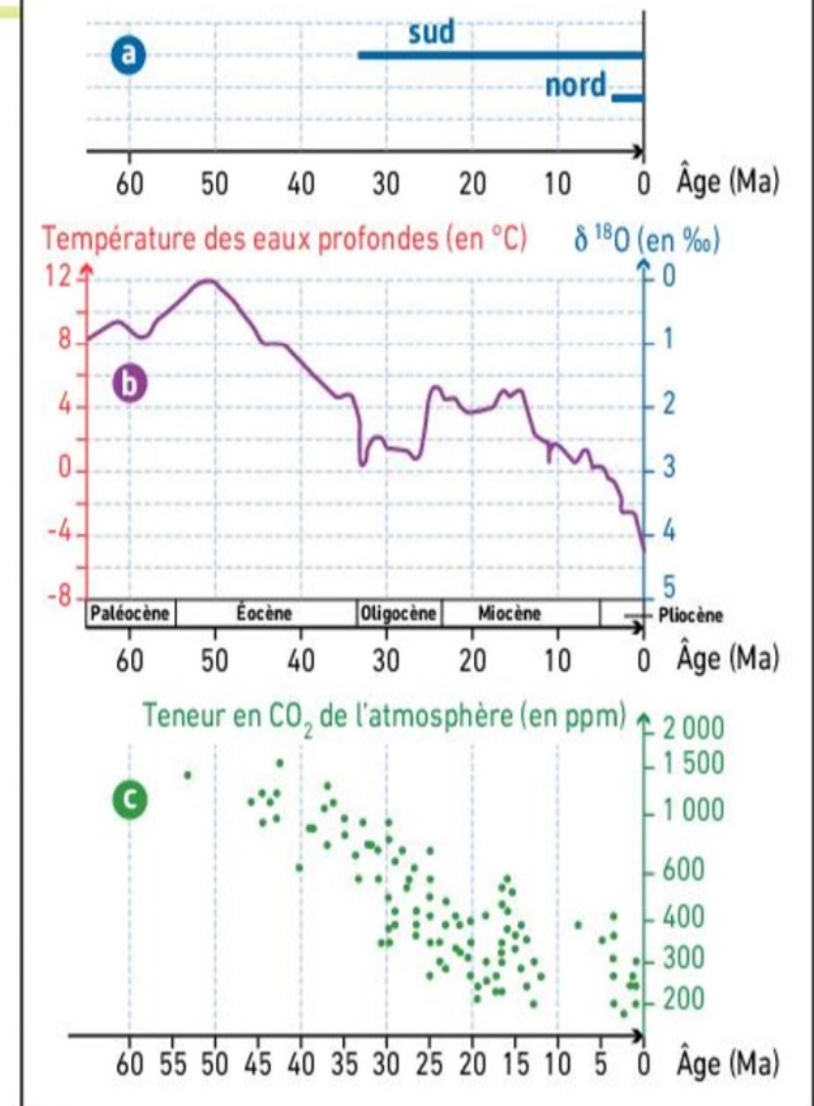


# Le refroidissement du Cénozoïque

## Climat et CO<sub>2</sub> au 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> à partir de l'étude de rapports isotopiques du carbone dans les sédiments carbonatés (« Paleo-CO<sub>2</sub> 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 <sup>12</sup>C par rapport au <sup>13</sup>C, mais lorsque la teneur en CO<sub>2</sub> diminue, l'écart entre l'incorporation des deux isotopes décroît.



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