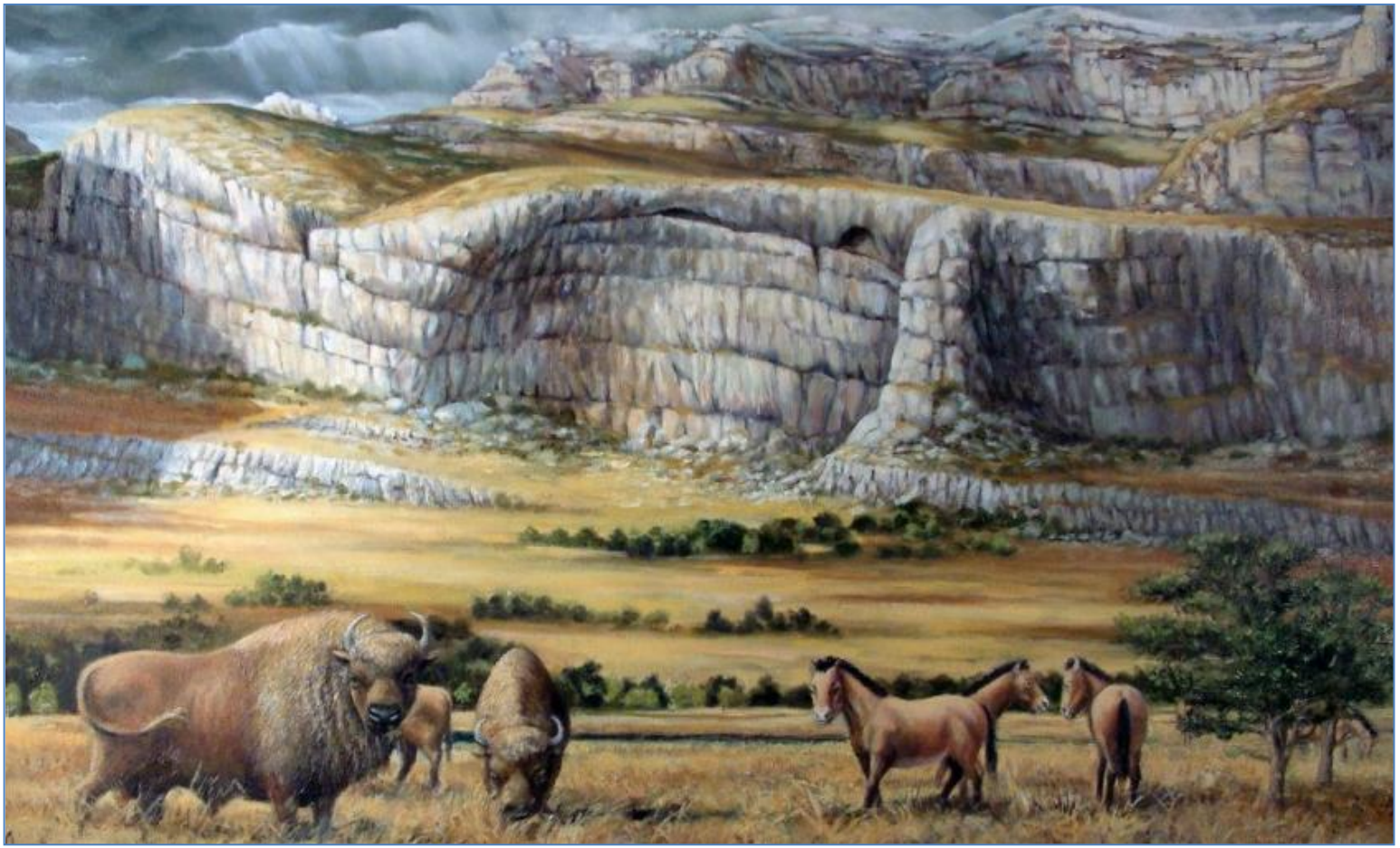
# Reconstituer et comprendre les variations climatiques à l'échelle du Quaternaire



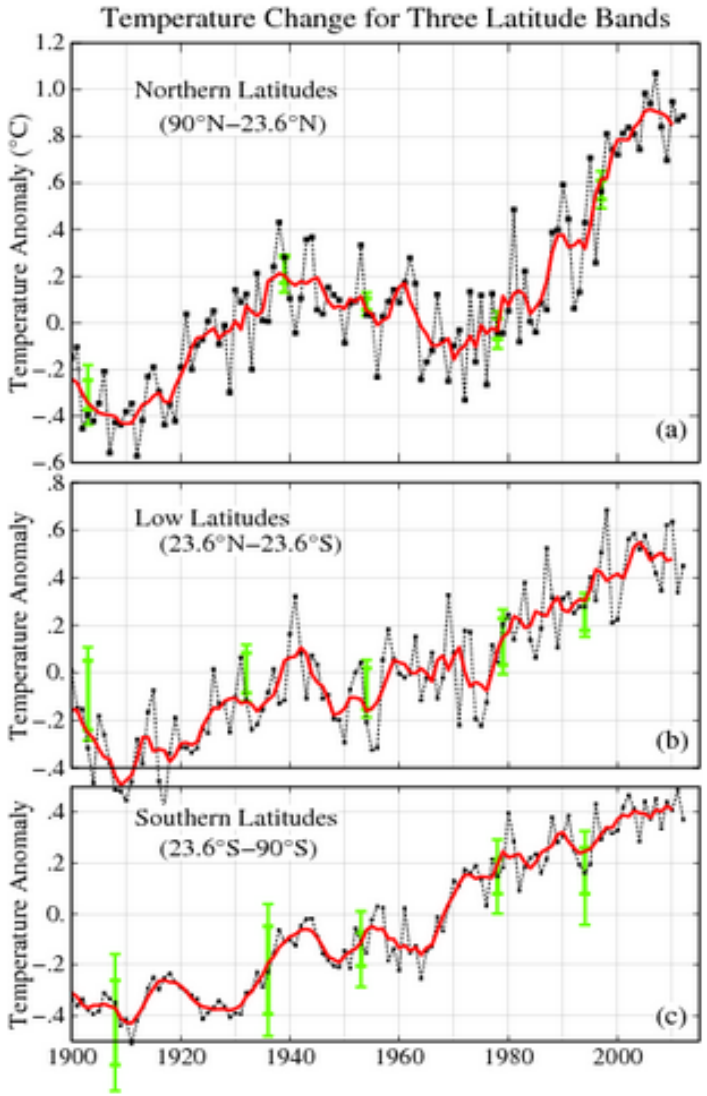
Reconstitution de l'environnement de la Grotte Cosquer il y a – 20 000 ans (vue d'artiste)

I – Depuis la révolution industrielle, l'augmentation de la proportion dans l'atmosphère des gaz à effet de serre due aux émissions anthropiques constitue un forçage radiatif supplémentaire à l'origine de l'augmentation de la température moyenne du globe.

# Anomalies de température depuis 1850

National Aeronautics and Space Administration
Institut Goddard pour les études spatiales

## GISS analyse de température de surface




Etude de 3 bandes de latitude couvrant 30%, 40% et 30% de la superficie mondiale.

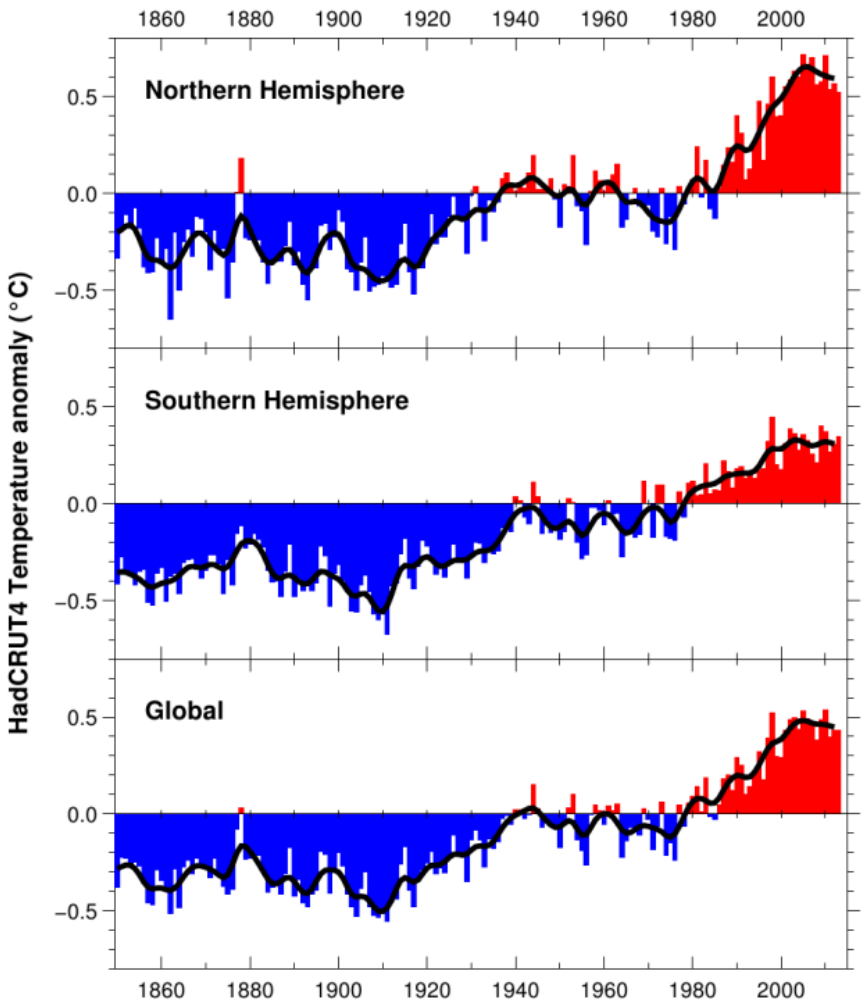
— moyenne annuelle

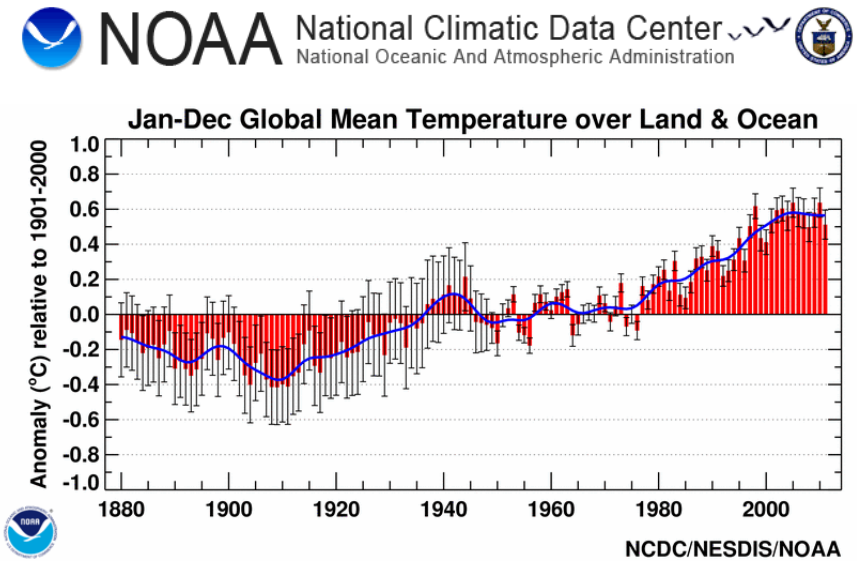
— moyenne sur cinq ans

| estimations des incertitudes

# Anomalies de température depuis 1850

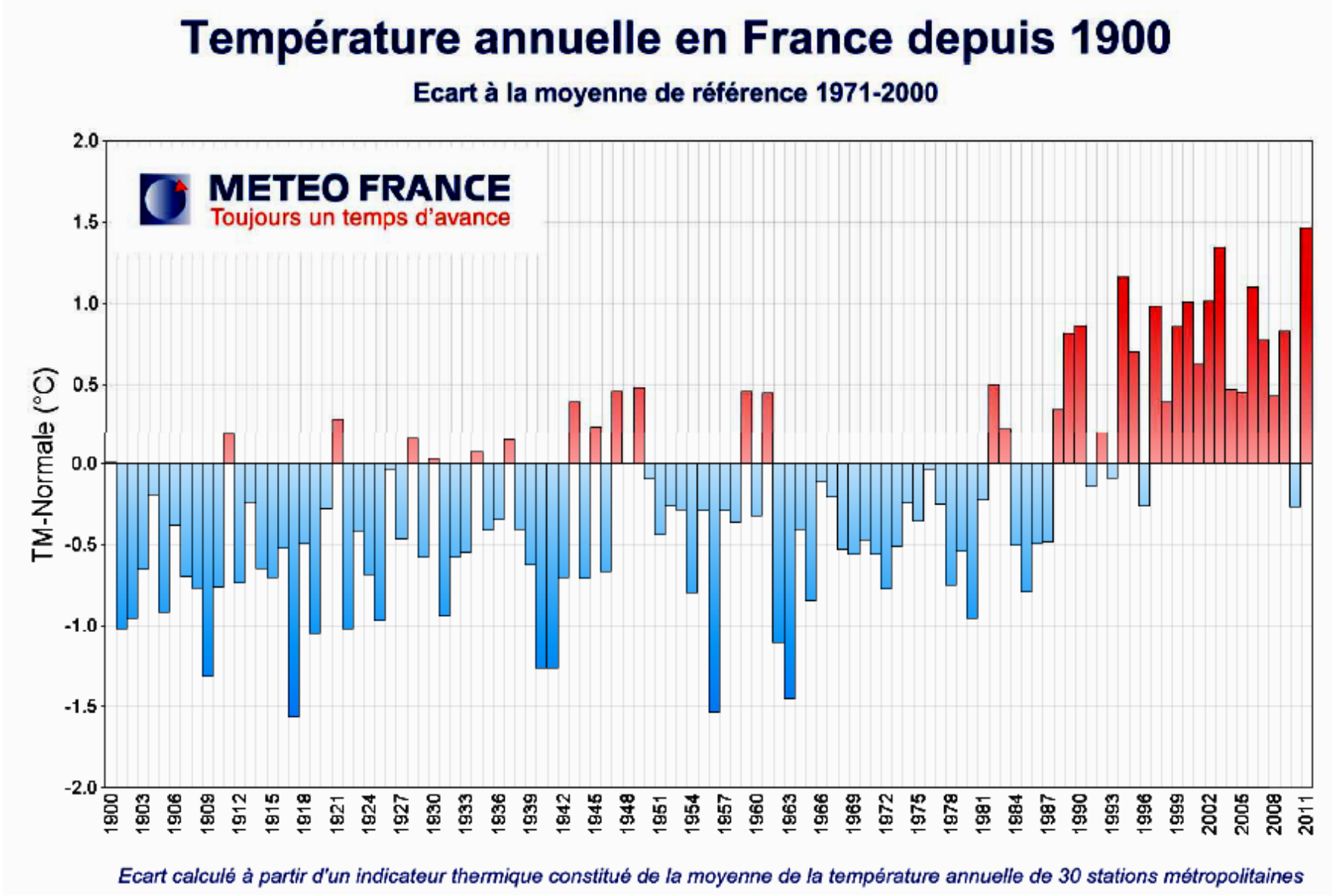
par le CRU (Climatic Research Unit, University of East Anglia)



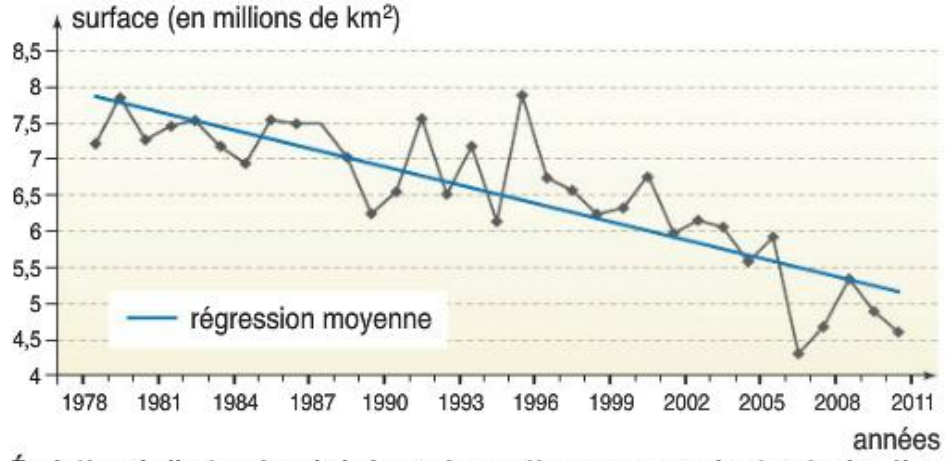




Une anomalie positive indique que la température observée est plus chaude que la valeur de référence, tandis qu'une anomalie négative indique que la température observée est plus froide que la valeur de référence

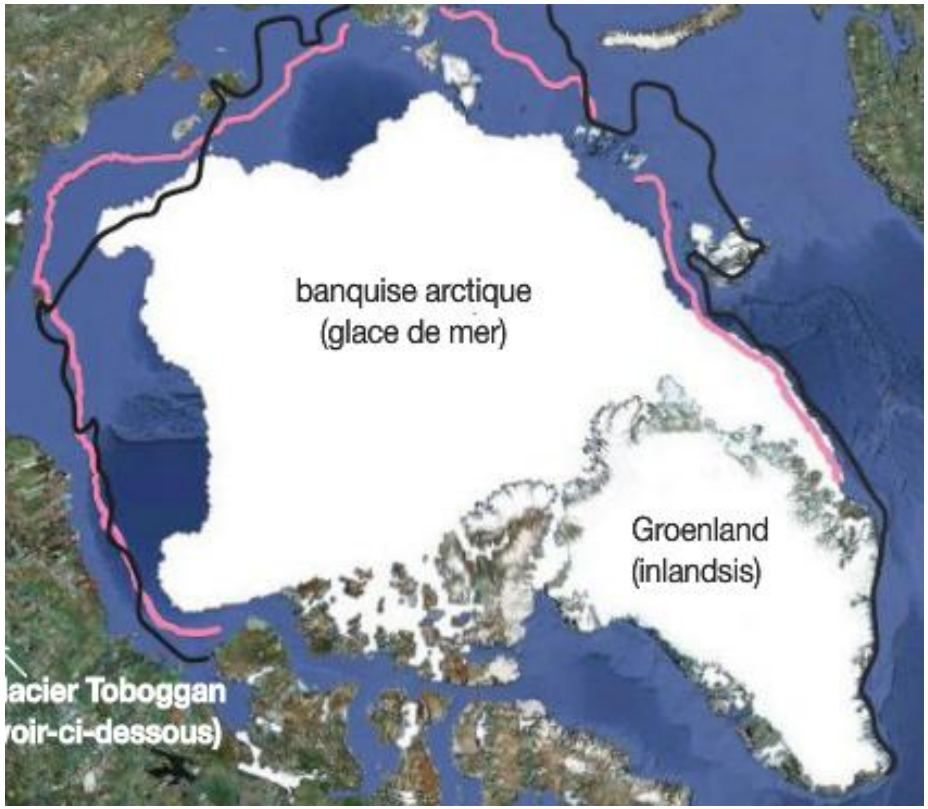
# Anomalies de température depuis 1900



# Réponse glaciaire aux changements climatiques




**Évolution de l'extension de la banquise arctique au cours des trente dernières années**



# Réponse glaciaire aux changements climatiques

La Mer de Glace est le plus gros glacier de France. Ce glacier alpin proche du Mont-Blanc mesure au total sept kilomètres de long, son épaisseur est d'environ deux cents mètres et sa surface est de trente cinq kilomètres carrés.

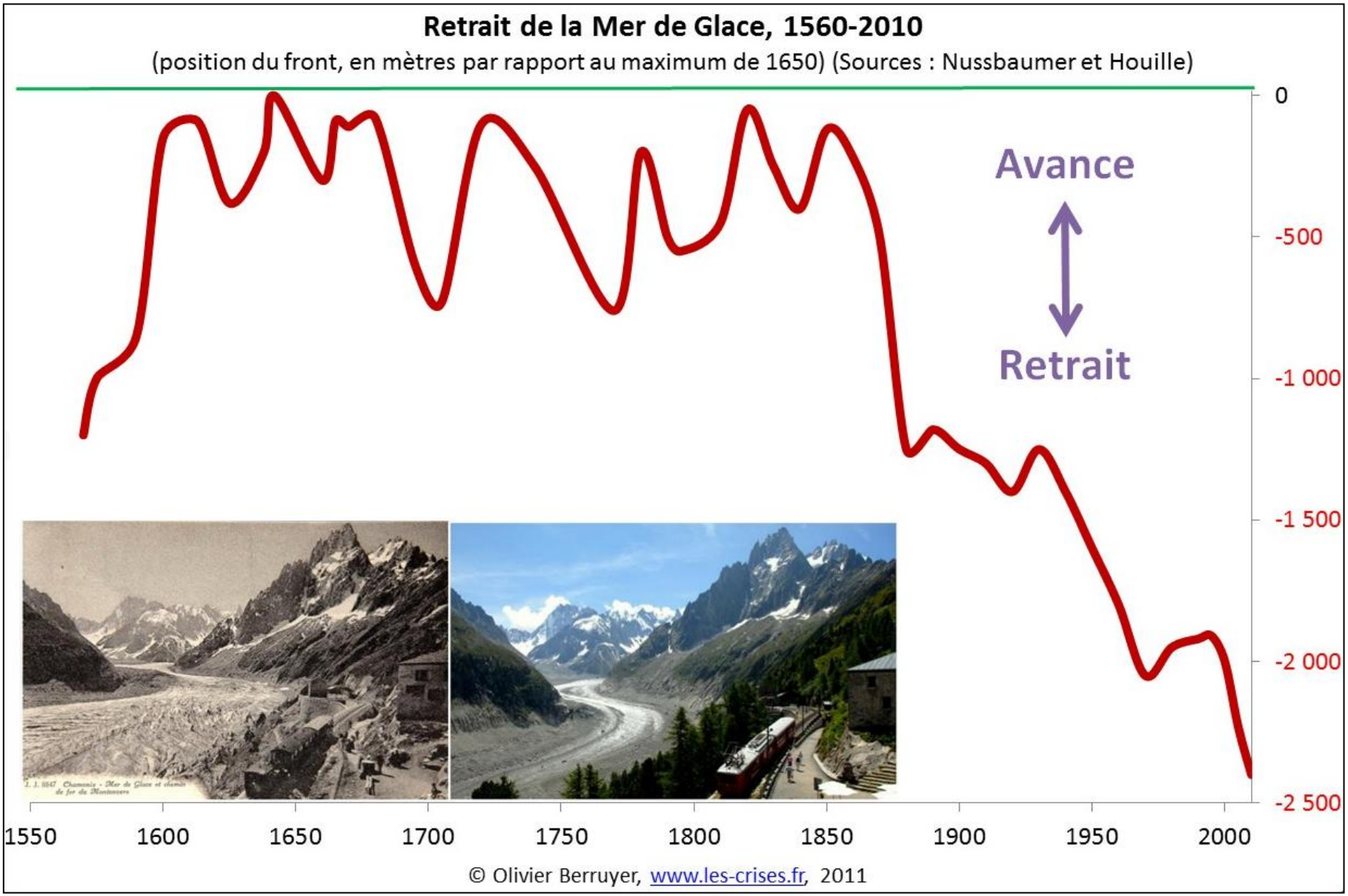
*La Mer de Glace vers 1915. L'épaisseur du glacier atteignait presque 250 mètres sous la gare du Montenvers. (Coll. L. Moreau)*

# Réponse glaciaire aux changements climatiques

La Mer de Glace est le plus gros glacier de France. Ce glacier alpin proche du Mont-Blanc mesure au total sept kilomètres de long, son épaisseur est d'environ deux cents mètres et sa surface est de trente cinq kilomètres carrés.

*En 2011, l'épaisseur au centre n'est plus que de 90 mètres sous le Montenvers (Cl. L. Moreau, données LGGE)*

# Réponse glaciaire aux changements climatiques



# Les dates d'ouverture des vendanges

Depuis le Moyen Âge, les dates de début des vendanges du raisin sont décrétées par les notables de chaque village et notées dans des registres municipaux ou paroissiaux. **Les plus anciennes séries de données, de Bourgogne, datent du 13ème siècle** (Chuine et al, 2004).
Les dates de vendanges sont influencées par la température du printemps et de l'été (Le Roy Ladurie, 2005). Lorsque ces saisons sont chaudes, elles favorisent la croissance de la vigne et la date de vendanges est précoce. Les dates de vendanges sont donc utilisables comme indicateurs (« proxies ») de la température du printemps et de l'été de l'année.
Les archives historiques sont parfois biaisées par des facteurs humains. Par exemple, les dates de vendanges au 18ème siècle sont plus tardives que celles des siècles précédents. Cet écart est dû au fait que les vignerons, pour faire un meilleur vin, vendangent plus tard dans la saison (Le Roy Ladurie, 2005).

Le « petit âge glaciaire » au Moyen Age

Le  piège aux oiseaux - Bruegel l'ancien, peintre flamand, 1605

## 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)

"Réchauffement climatique médiéval"

"Petit âge glaciaire"

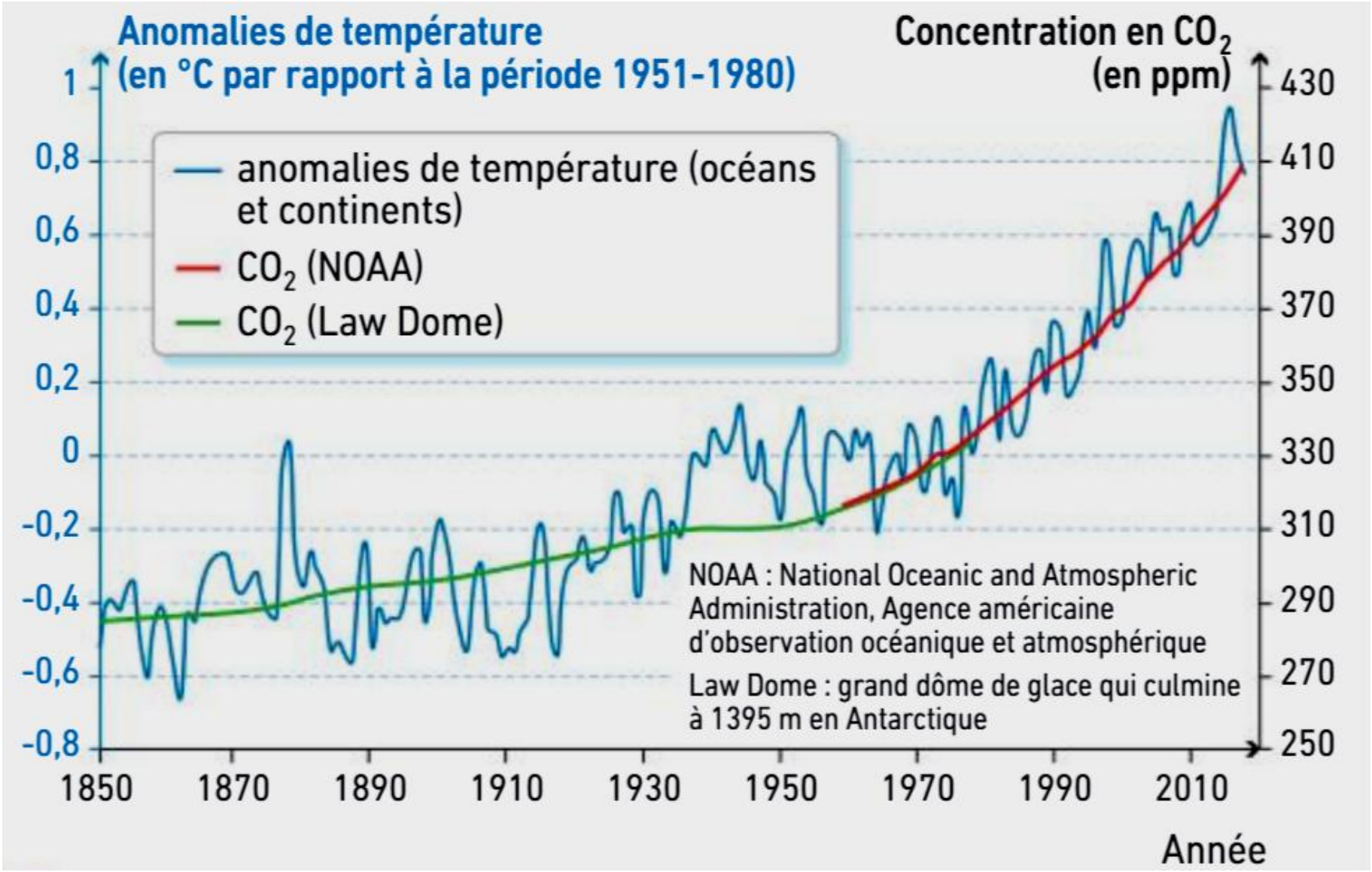
Température Moyenne 1000-2000

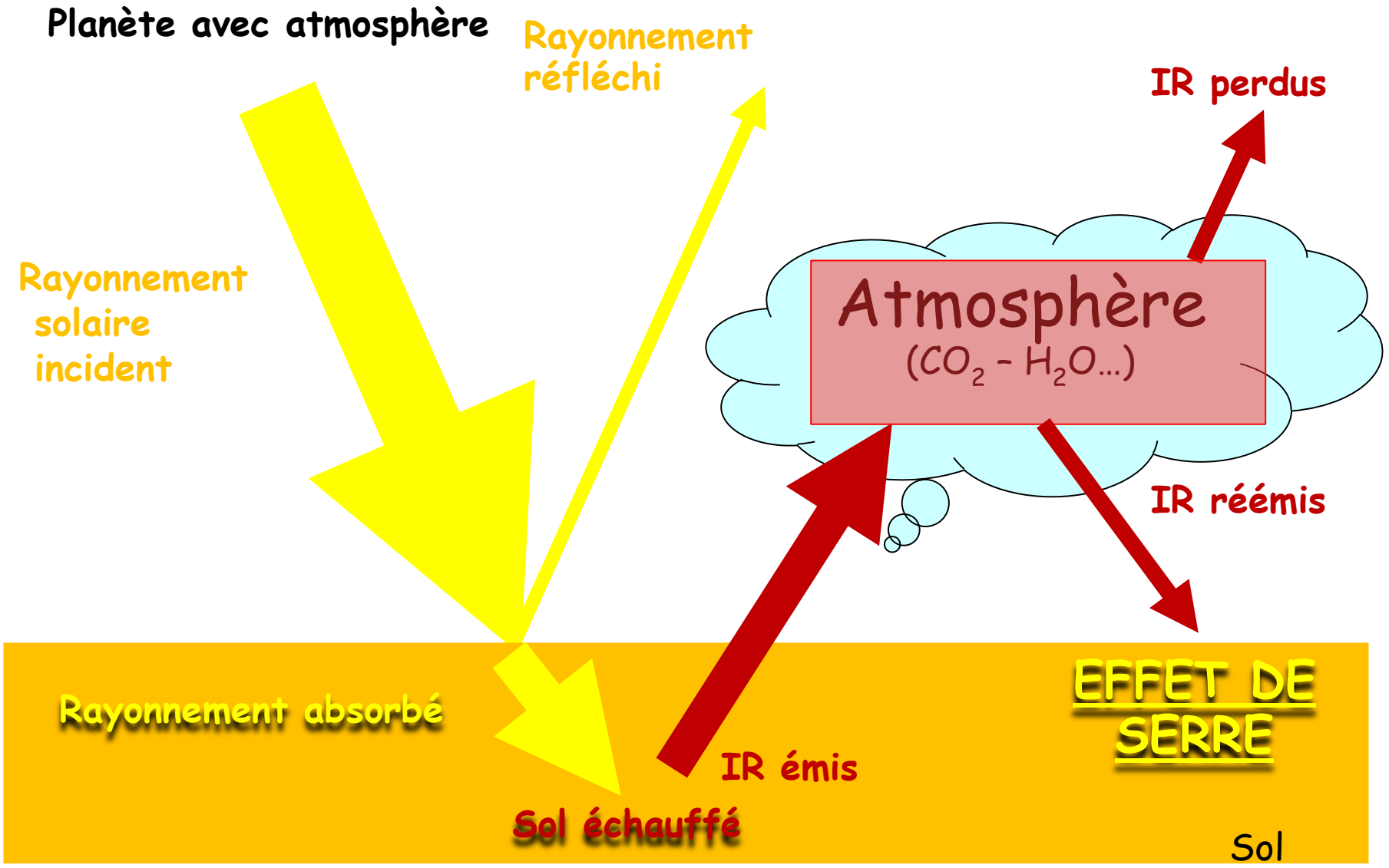
1,3 1,1 0,9 0,7 0,5 0,3 0,1 -0,1 -0,3 -0,5

0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000

© Olivier Berruyer, www.les-crises.fr, 2011

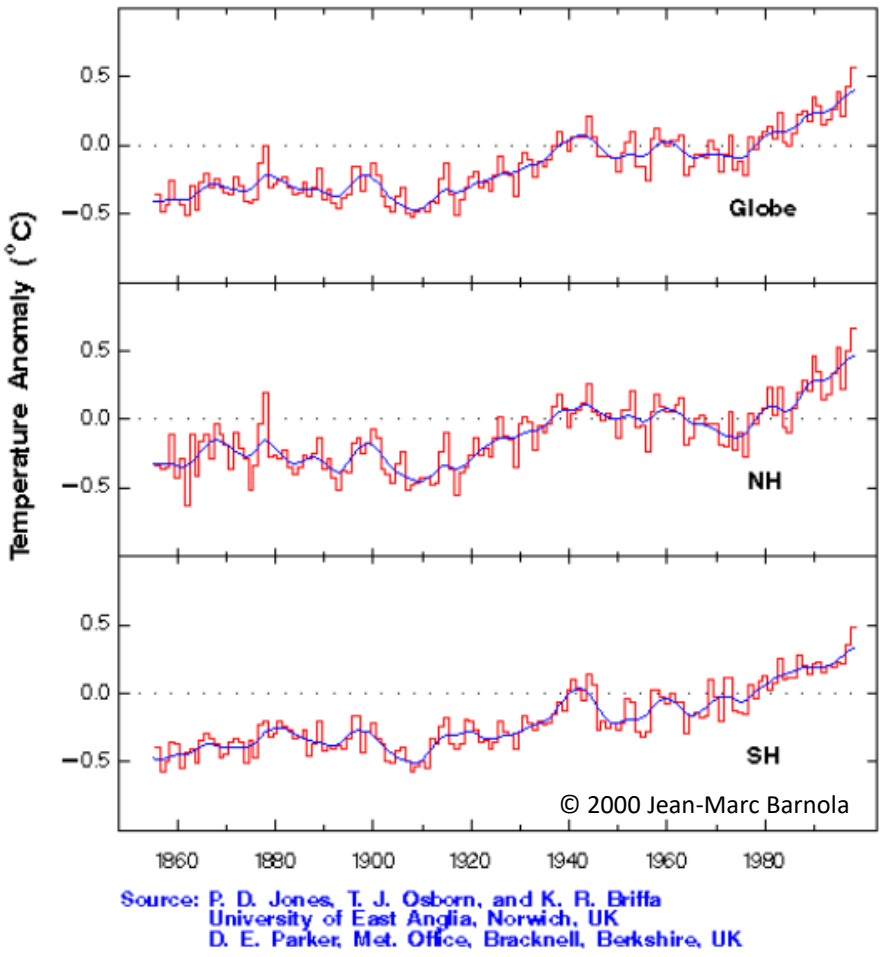
**Corrélation taux CO2 et anomalies de température depuis 1850**



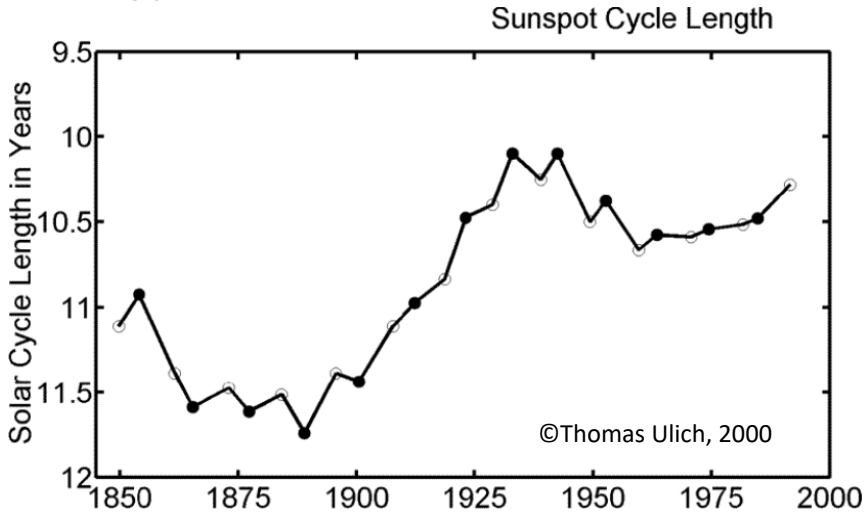

Planète avec atmosphère
Rayonnement réfléchi
IR perdus
Rayonnement solaire incident
Atmosphère
($CO_2$ - $H_2O$...)
IR réémis
Rayonnement absorbé
IR émis
EFFET DE SERRE
Sol échauffé
Sol

# Corrélation entre tâches solaires, taux de CO2 et température globale

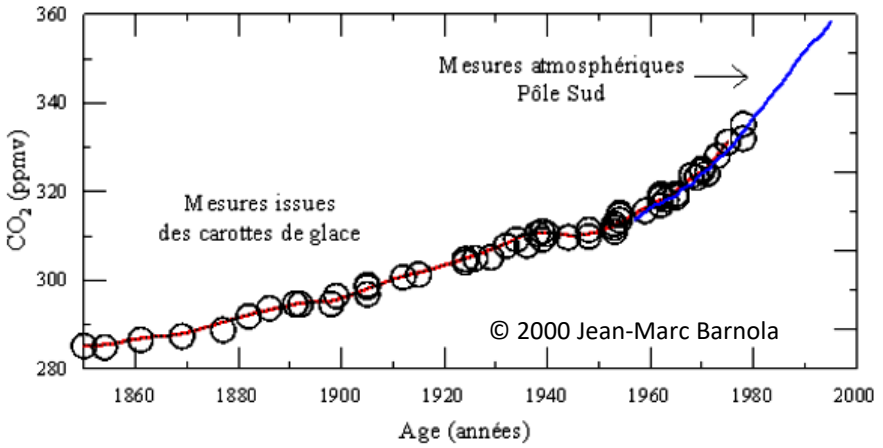
## Evolution de la température moyenne depuis 1850



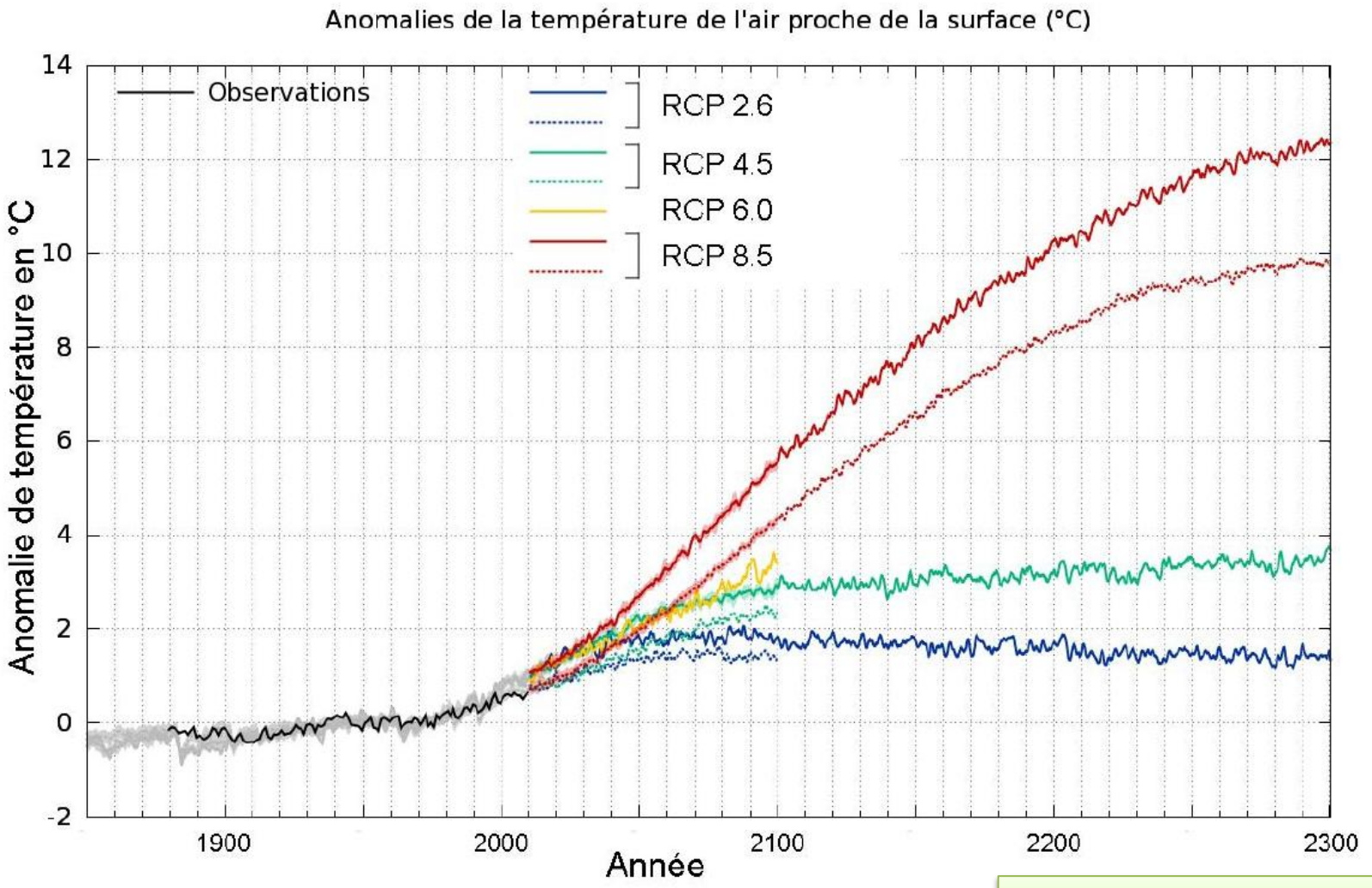

## Variation de l'activité solaire depuis 1850




## Variation de la teneur en CO2 atm depuis 1850



# Prévisions des modèles climatiques




+ 1 à + 5 °C en 2100

D'après Daniel Rowlands , d'Oxford (Nature Geoscience).

1. Depuis 150 ans, la température globale a augmenté d'environ + 1,5°C

2. L'origine humaine du changement climatique est clairement établie depuis les années 2000, les facteurs naturels ne pouvant expliquer une telle augmentation de température.

a. *La proportion du CO2 atmosphérique (gaz à effet de serre) augmente depuis 1850 (de 280 ppm à 405 ppm environs)*
b. *Cette augmentation est en grande partie liée à la consommation des carburants fossiles.*
c. *Ainsi, cette perturbation du cycle biogéochimique du carbone due aux activités humaines provoque un forçage radiatif supplémentaire (effet de serre additionnel) à l'origine de l'augmentation de la température globale depuis la révolution industrielle*
d. *D'autres phénomènes naturels (volcanisme, activité solaire...) peuvent aussi influencer le bilan radiatif, donc le climat.*

3. L'étude et la compréhension des climats passés sont indispensables pour anticiper le changement climatique à venir.

II. A l'échelle du Quaternaire, des indices de nature différente (paléoécologiques, géologiques, préhistoriques, isotopiques... ), permettent de reconstituer des variations climatiques, plus particulièrement des alternances de périodes glaciaires et interglaciaires depuis -800 000 ans. Ces reconstitutions se basent sur la principe de l'actualisme (hypothèse qui stipule les phénomènes géologiques du passé se réalisent de la même façon qu'actuellement)

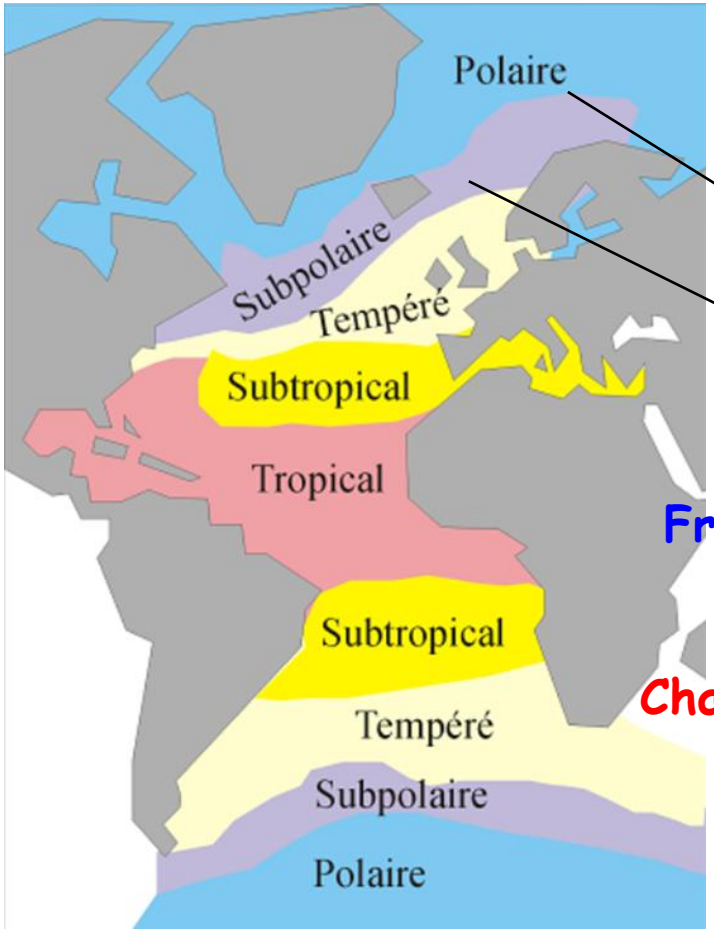
# Des archives pour identifier des changements climatiques au cours des derniers millénaires

| Méthode | | Support | Période couverte (années) |
|---|---|---|---|
| • Mesures instrumentales | | • Résultats de mesures | • 150 (exceptionnellement 300) |
| • Indicateur climatique (ou proxy) | – Dates des floraisons, vendanges, récoltes, etc. | • Témoignages écrits | • 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.**

# Information sur la température à partir d'une espèce de foraminifère

**Distribution des bioprovinces à foraminifères planctoniques en Atlantique Nord**




*d'après Bé et Tolderlund, 1971*

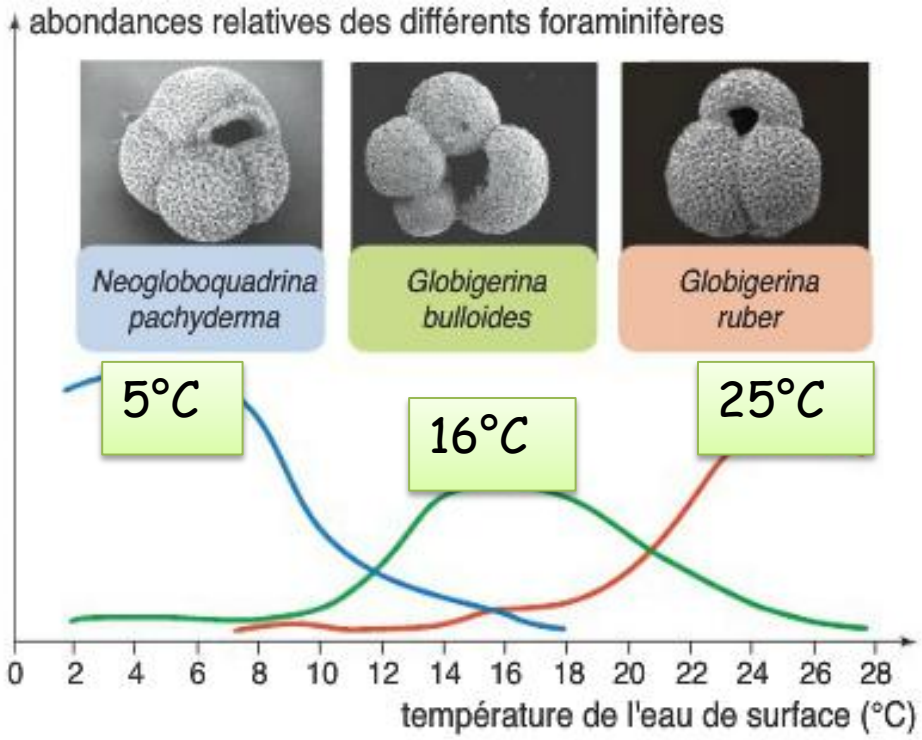
Le test des foraminifères, robuste, a permis leur conservation dans les sédiments marins très anciens (fossile). Ils apparaissent au Cambrien, il y a plus de 500 millions d'années, et se développent jusqu'à aujourd'hui.
Présents dans presque toutes les mers du globe, ils sont souvent très nombreux dans les sédiments.

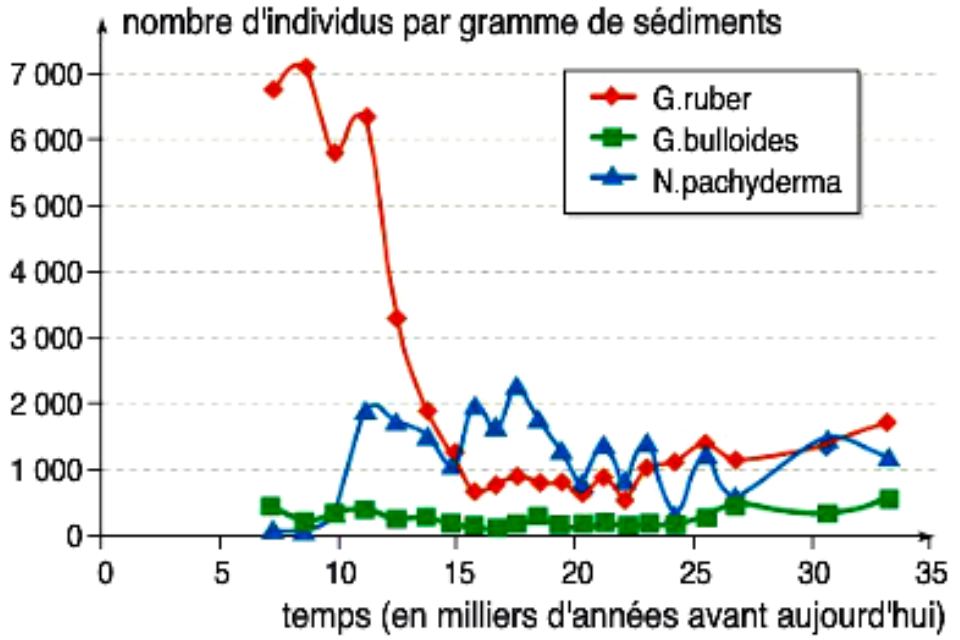
**Froid**

**Chaud**

| Bioclimatic group | Species |
|---|---|
| Arctic | *Neogloboquadrina pachyderma* (s.) |
| Subarctic | *Neogloboquadrina pachyderma* (d.) |
| | *Globigerina bulloides* |
| | *Globigerina quinqueloba* |
| Subtropical | *Globigerinoides ruber* |
| | *Globigerina falconensis* |

# Information sur la température à partir d'une espèce de foraminifère

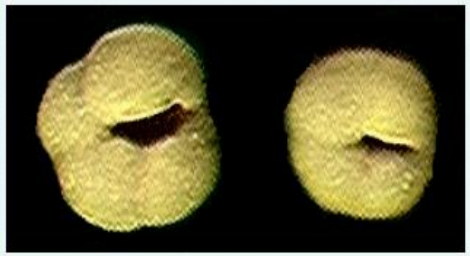


# Information sur la température à partir d'une espèce de foraminifère

## Test à enroulement senestre

**Période froide**

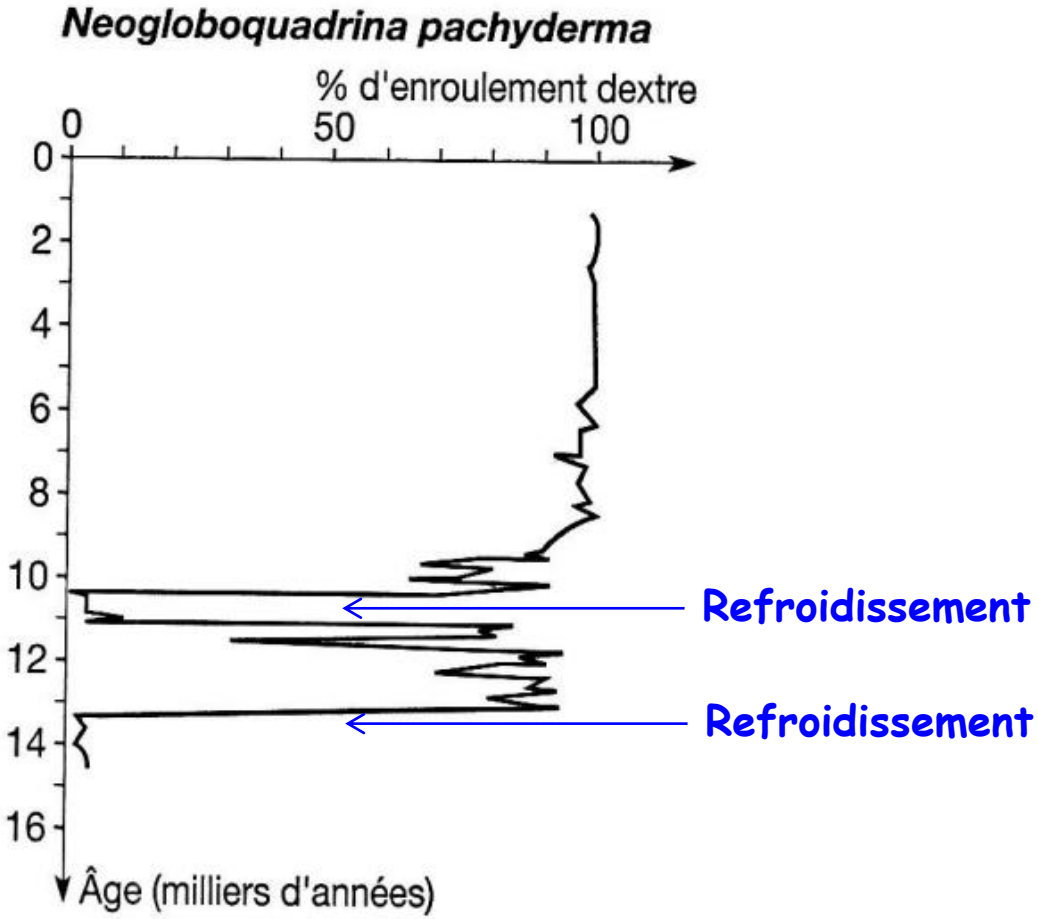


*Neogloboquadrina pachyderma*
(left coiling)

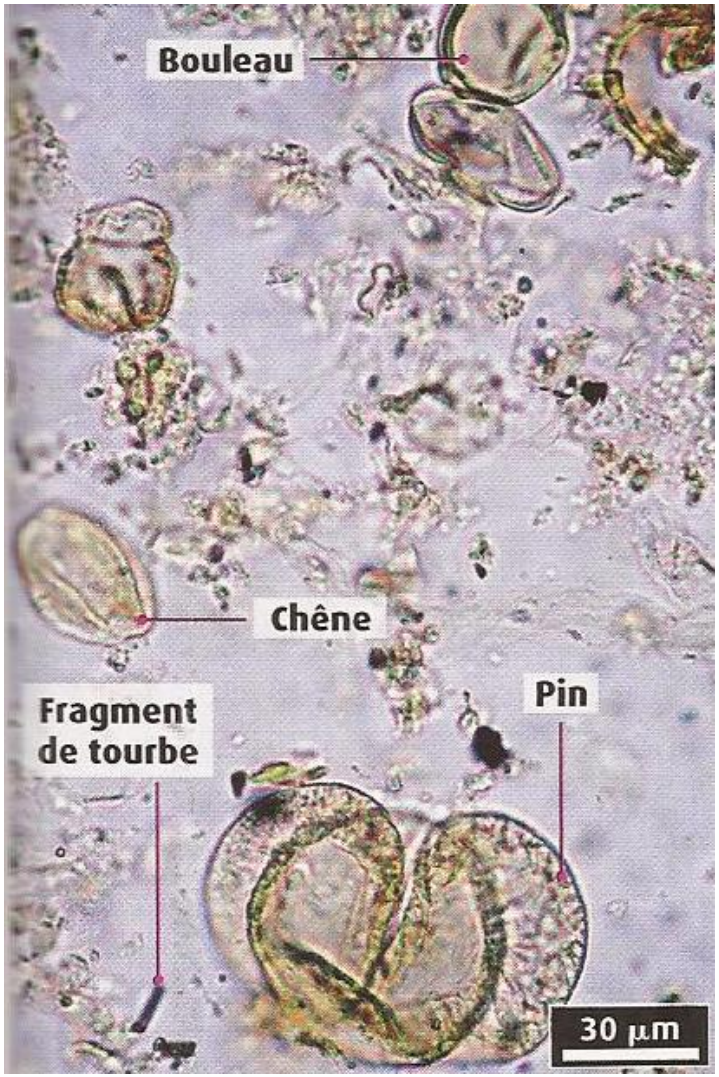
## Test à enroulement dextre

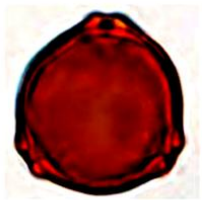
**Période chaude**

*Neogloboquadrina pachyderma*
(right coiling)



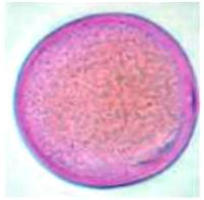
# Les pollens, archives climatiques



15 micromètres

Bouleau



40 micromètres

Graminée

## Clé de détermination des grains de pollens

| | | | |
|---|---|---|---|
| GRAIN ISOLE" | SANS PORE NI SILLON | SANS BALLONNET | Peuplier |
| | | AVEC BALLONNETS | Pin ; Epicéa |
| | AVEC PORE | UN PORE | Graminée |
| | | TROIS PORES | Bouleau ; Noisetier |
| | | PLUS DE TROIS PORES | Aulne ; Charme |
| | AVEC SILLON | UN SILLON | Fougère (spore) |
| | | TROIS SILLONS | Chêne ; Erable |
| | AVEC PORE ET SILLON | TROIS PORES ET TROIS SILLONS | Hêtre ; Tilleul |
| | | PLUS DE TROIS PORES ET TROIS SILLONS | Pissenlit |
| GRAINS MULTIPLES" | DEUX GRAINS | | Scheuchzeri (plante de milieu humide) |
| | QUATRE GRAINS | | Bruyère |
| | PLUS DE QUATRE GRAINS | | Robinier |

Sources : d'après Atelier scientifique POLLENS du lycée des Feuillants à Poitiers
et *Guide de dendrologie : arbres, arbustes et arbrisseaux des forêts françaises* de M. JACAMON - Éditions ENGREF.

# Les pollens, archives climatiques

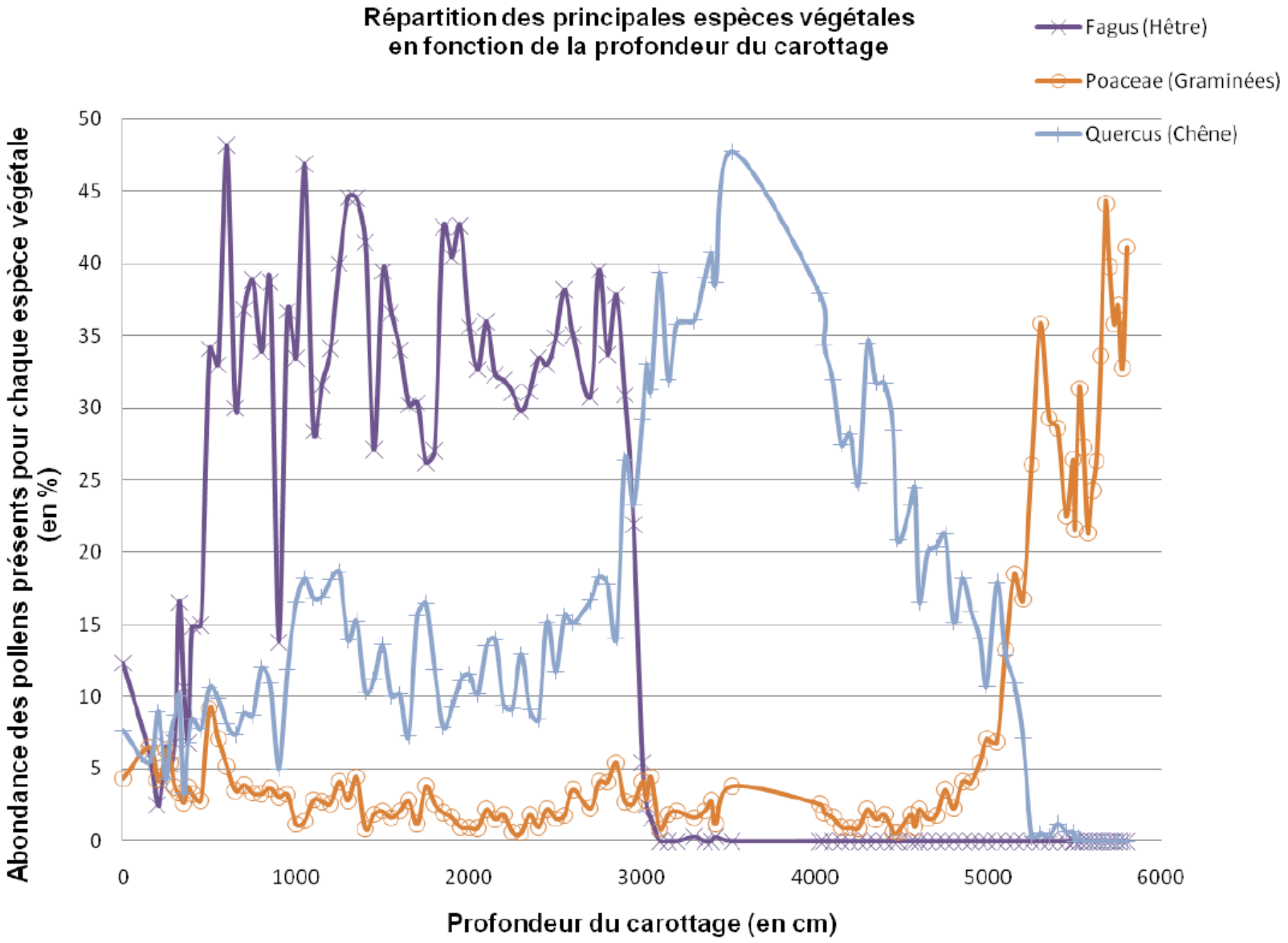
| caractéristiques écologiques / Espèces | Exigences | Caractérise |
|---|---|---|
| **Graminée** *(Poacée)* | Supporte les très grands froids | les steppes de tous climats ; ces végétaux restent les seuls présents lorsque les arbres sont absents par suite des conditions climatiques très dures |
| **Epicéa commun** (***Picea*** *Excelsa*) | Très résistant au froid<br>Préfère une humidité élevée, de la lumière. Craint sécheresse et vent<br>*Végétaux associés : Sapin et Hêtre ou plus haut Mélèze et Pin à crochets* | l'étage montagnard supérieur (700 à 1700 voire ) |
| **Pin sylvestre** (***Pinus*** *sylvestris*) | Supporte la chaleur et un éclairement fort<br>Ne craint pas les gelées de printemps<br>Craint les fortes pluies | la plaine jusqu'à l'étage montagnard avec une aire de répartition très vaste |
| **Sapin** (***Abies*** *sp.*) | Réclame une humidité assez élevée<br>Peu exigeant en chaleur, craint les étés secs et les gelées de printemps<br>*Végétaux associés : en général le Hêtre, parfois l'Epicéa, l'Erable* | l'étage montagnard de la zone tempérée (de 400 à ) |
| **Bouleau** *(**Betula** sp.)* | Résiste au froid ; très exigeant en eau.<br>Craint la sécheresse | les climats océaniques ou les étages montagnards humides ou la forêt de l'Europe du nord |
| **Aulne vert** *(**Alnus** viridis)* | Résiste aux très grands froids<br>Préfère les milieux humides; craint la sécheresse<br>*Végétaux associés : Bouleau, Noisetier* | l'Europe du nord et le climat montagnard en Europe moyenne (jusqu'à ) |
| **Chêne** (*Quercus* sp.) | Préfère les climats relativement chauds sans sécheresse prolongée ; exige de la lumière<br>Craint les gelées de printemps<br>*Végétaux associés : Charme* | les plaines, collines, montagnes peu élevées |
| **Hêtre** (***Fagus*** *sylvatica*) | Réclame une humidité atmosphérique et un sol drainé<br>Craint les gelées de printemps<br>*Végétaux associés : Erable, Charme.* | Toutes les altitudes de la plaine aux plateaux de l'étage montagnard (400 à ) |

# Les pollens, archives climatiques

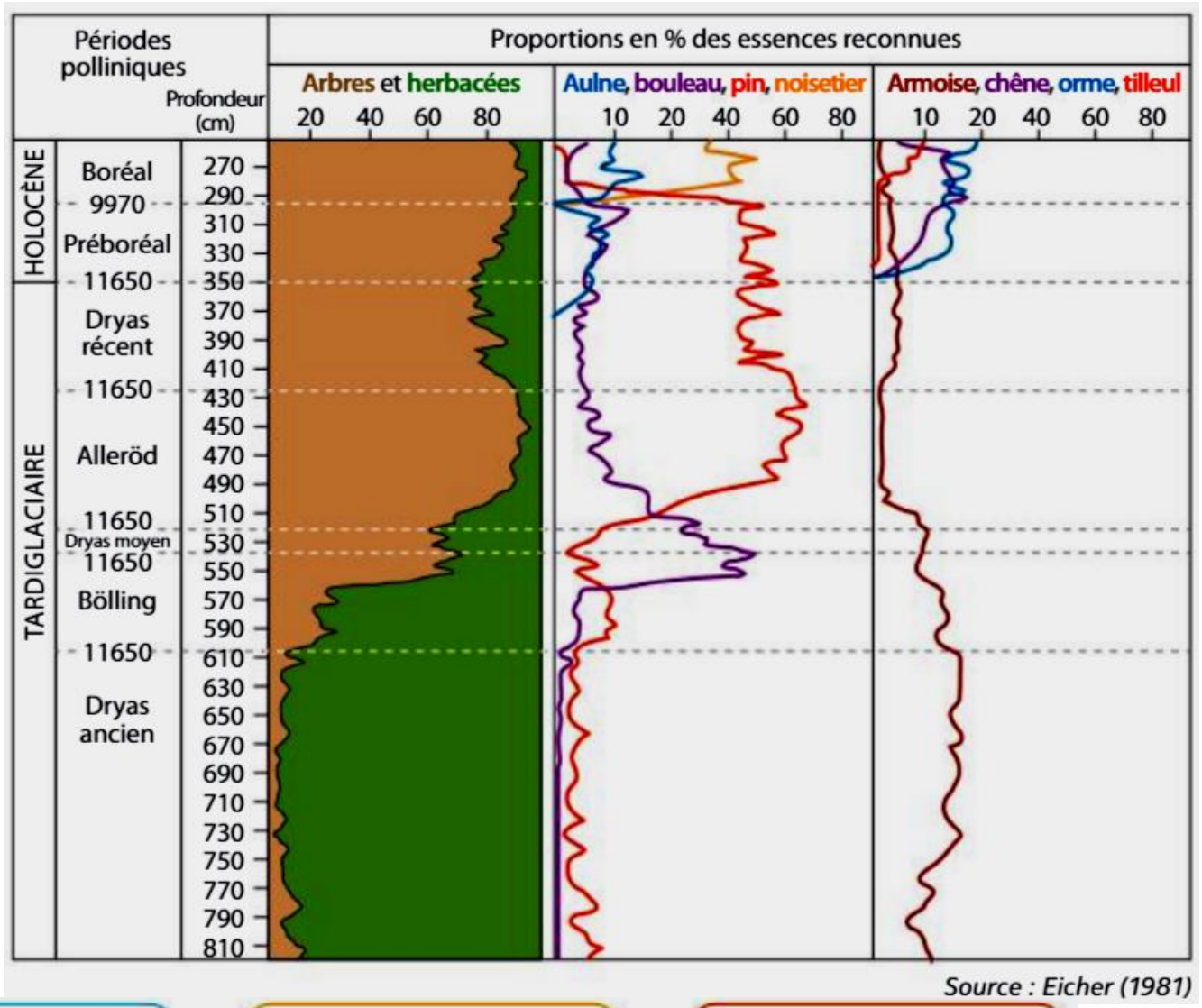
Site Name: Lac de Chambedaze,  FRA
Latitude:  45.45
Longitude:  2.88
Abondance relative des pollens (en %)

| Profondeur en centimètres | Alnus (Aulne) | Artemisia (Armoise) | Betula (Bouleau) | Fagus (Hêtre) | Fraxinus (Frêne) | Poaceae (Graminées) | Quercus (Chêne) | Rumex (Oseille) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0,93 | 0 | 8,02 | 12,35 | 3,7 | 4,3 | 7,72 | 0,62 |
| 150 | 1,7 | 0 | 1,02 | 6,12 | 0,34 | 6,5 | 5,44 | 2,72 |
| 200 | 1,08 | 0 | 2,88 | 2,52 | 0,36 | 4,2 | 8,99 | 1,44 |
| 225 | 1,58 | 0 | 0,4 | 3,95 | 0,79 | 5 | 6,72 | 2,77 |
| 250 | 0,33 | 0,33 | 2,64 | 6,6 | 0,33 | 6,3 | 4,29 | 7,26 |
| 275 | 4,08 | 0,63 | 3,76 | 5,33 | 0,31 | 5,4 | 7,52 | 1,57 |
| 300 | 2,27 | 0,32 | 3,9 | 6,82 | 0,32 | 3,7 | 8,77 | 2,92 |
| 325 | 2,16 | 0 | 3,96 | 16,55 | 0,36 | 3,28 | 10,07 | 2,88 |
| 350 | 3,65 | 0,56 | 5,62 | 10,67 | 0,56 | 2,64 | 3,37 | 1,12 |
| 375 | 5,04 | 1,44 | 11,87 | 6,83 | 0,36 | 3,74 | 6,83 | 1,44 |
| 400 | 2,13 | 0,35 | 2,84 | 14,89 | 0 | 3,24 | 8,51 | 2,13 |
| 450 | 3,58 | 0,65 | 5,54 | 14,98 | 0,65 | 2,8 | 7,82 | 2,93 |
| 500 | 6,53 | 0,59 | 4,45 | 34,12 | 1,48 | 9,17 | 10,68 | 2,08 |
| 550 | 4,01 | 0,31 | 4,32 | 33,02 | 0 | 7,08 | 9,88 | 1,54 |
| 600 | 4,23 | 0,33 | 3,58 | 48,21 | 0,98 | 5,18 | 8,14 | 1,95 |
| 650 | 4,38 | 1,35 | 4,04 | 29,97 | 0 | 3,46 | 7,41 | 5,05 |
| 700 | 3,88 | 0,78 | 2,71 | 36,82 | 0,78 | 3,87 | 8,91 | 3,1 |
| 750 | 7,86 | 0,44 | 6,11 | 38,86 | 0,44 | 3,3 | 8,73 | 0,87 |
| 800 | 7,3 | 0 | 11,16 | 33,91 | 0,86 | 3,26 | 12,02 | 1,72 |
| 850 | 9,93 | 0,33 | 6,95 | 38,74 | 0,66 | 3,65 | 10,93 | 0 |
| 900 | 0 | 0,42 | 4,6 | 13,81 | 0 | 3,02 | 5,02 | 0 |
| 950 | 9,09 | 0,7 | 5,94 | 36,71 | 1,05 | 3,21 | 11,89 | 0 |
| 1000 | 6,21 | 1,38 | 2,76 | 33,45 | 1,72 | 1,16 | 16,55 | 0,69 |
| 1050 | 3,12 | 0,52 | 3,65 | 46,88 | 1,04 | 1,39 | 18,23 | 2,08 |
| 1100 | 8,58 | 0,66 | 13,53 | 28,38 | 0,33 | 2,83 | 16,83 | 0,33 |
| 1150 | 1,6 | 0,32 | 2,88 | 31,63 | 1,28 | 2,73 | 16,93 | 2,56 |
| 1200 | 3,02 | 0,3 | 2,42 | 34,14 | 0,3 | 2,58 | 18,13 | 1,21 |
| 1250 | 2,03 | 0 | 6,1 | 40 | 2,03 | 4,1 | 18,64 | 0 |
| 1300 | 4,65 | 0,78 | 5,04 | 44,57 | 0,78 | 2,8 | 13,95 | 0,78 |
| 1350 | 4,27 | 0 | 3,05 | 44,51 | 1,83 | 4,42 | 15,24 | 0 |
| 1400 | 4,88 | 0 | 1,52 | 41,46 | 0,61 | 0,85 | 10,37 | 0 |
| 1450 | 2,66 | 0,53 | 2,13 | 27,13 | 1,6 | 1,85 | 11,17 | 0,53 |
| 1500 | 6,12 | 0,34 | 2,72 | 39,46 | 0,68 | 2,05 | 13,61 | 1,02 |
| 1550 | 3,36 | 0,67 | 2,35 | 36,58 | 0,67 | 1,62 | 10,07 | 0 |
| 1600 | 7,14 | 0 | 4,08 | 34,01 | 0,34 | 2,06 | 10,2 | 0,68 |
| 1650 | 5,21 | 0,52 | 11,98 | 30,21 | 1,04 | 2,78 | 7,29 | 1,04 |
| 1700 | 5,8 | 0 | 9,82 | 30,36 | 3,12 | 1,19 | 15,62 | 0,45 |
| 1750 | 5,34 | 0 | 3,88 | 26,21 | 0,97 | 3,79 | 16,5 | 0,49 |
| 1800 | 4,1 | 0,41 | 13,52 | 27,05 | 2,46 | 2,55 | 11,89 | 0 |
| 1850 | 2,54 | 0 | 1,59 | 42,54 | 0,95 | 1,95 | 7,94 | 0 |
| 1900 | 3,4 | 0,31 | 3,09 | 40,43 | 1,23 | 1,64 | 9,26 | 0,31 |
| 1950 | 2,3 | 0 | 1,31 | 42,62 | 2,95 | 0,95 | 11,15 | 0 |
| 2000 | 2,97 | 0 | 3,96 | 35,64 | 1,65 | 0,92 | 11,55 | 0,33 |

# Les pollens, archives climatiques



# Diagramme pollinique simplifié de la tourbière de Chirens, Isère (38)



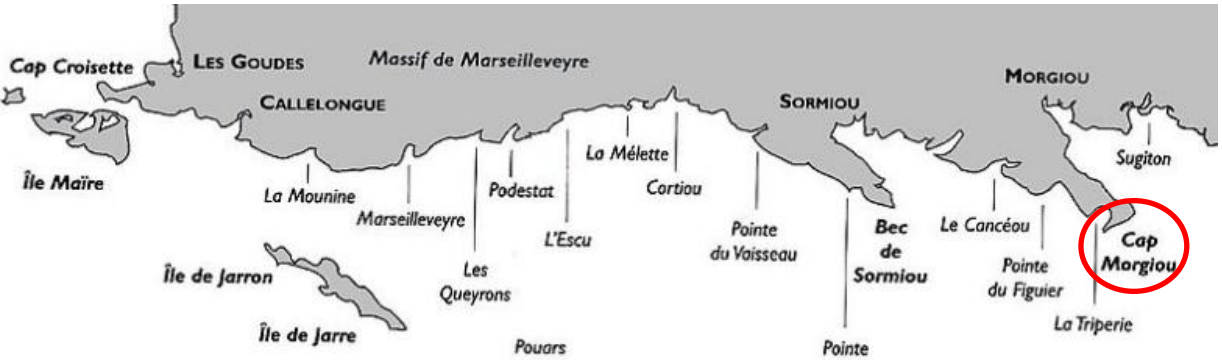

*Source : Eicher (1981)*

**Froid et sec**
Poacées, herbacées, Pin, Armoise

**Tempéré**
Bouleau, Orme, Aulne vert, Noisetier

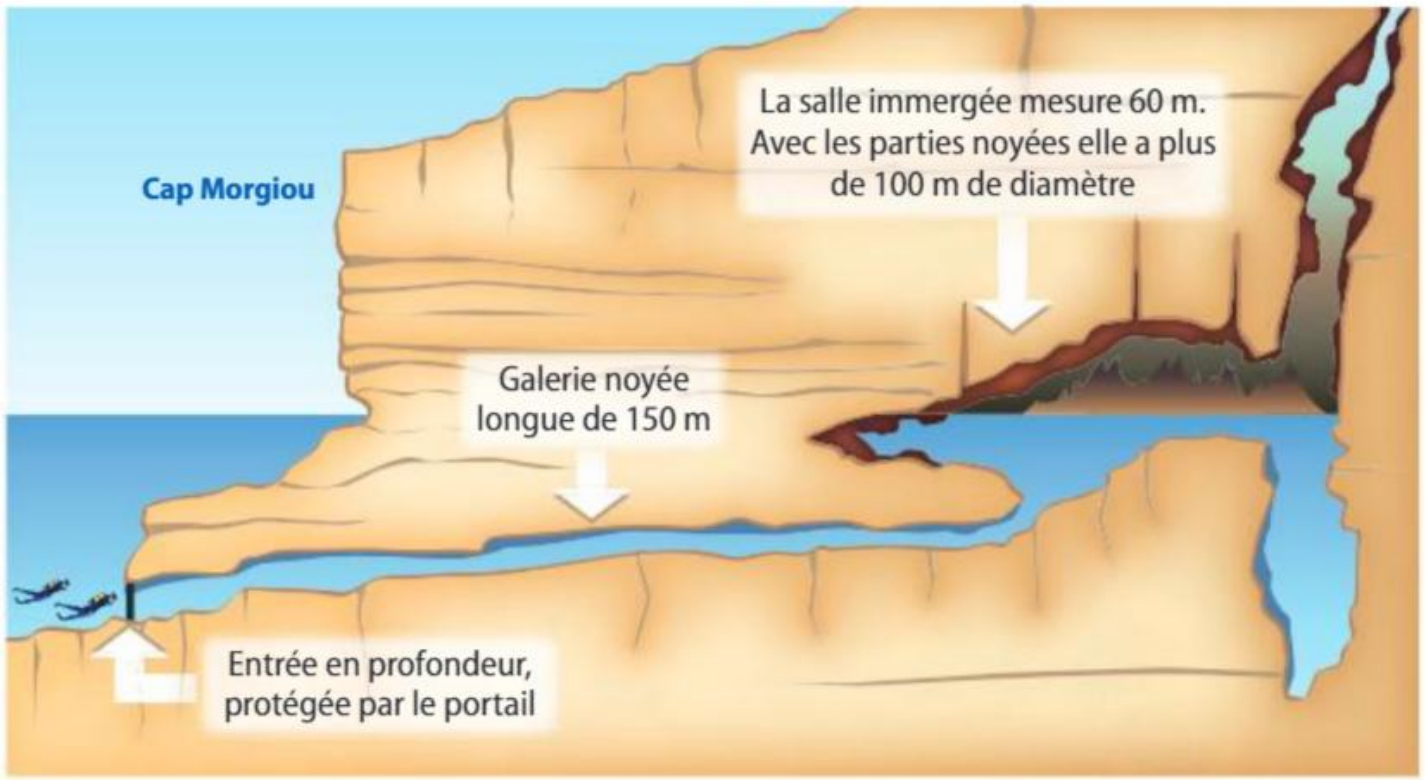
**Tempéré à chaud**
Chêne, Tilleul

# Grotte Cosquer




Cap Morgiou et emplacement de la grotte Cosquer

# Grotte Cosquer



# Grotte Cosquer

*Grand Bison*

*Bouquetins*

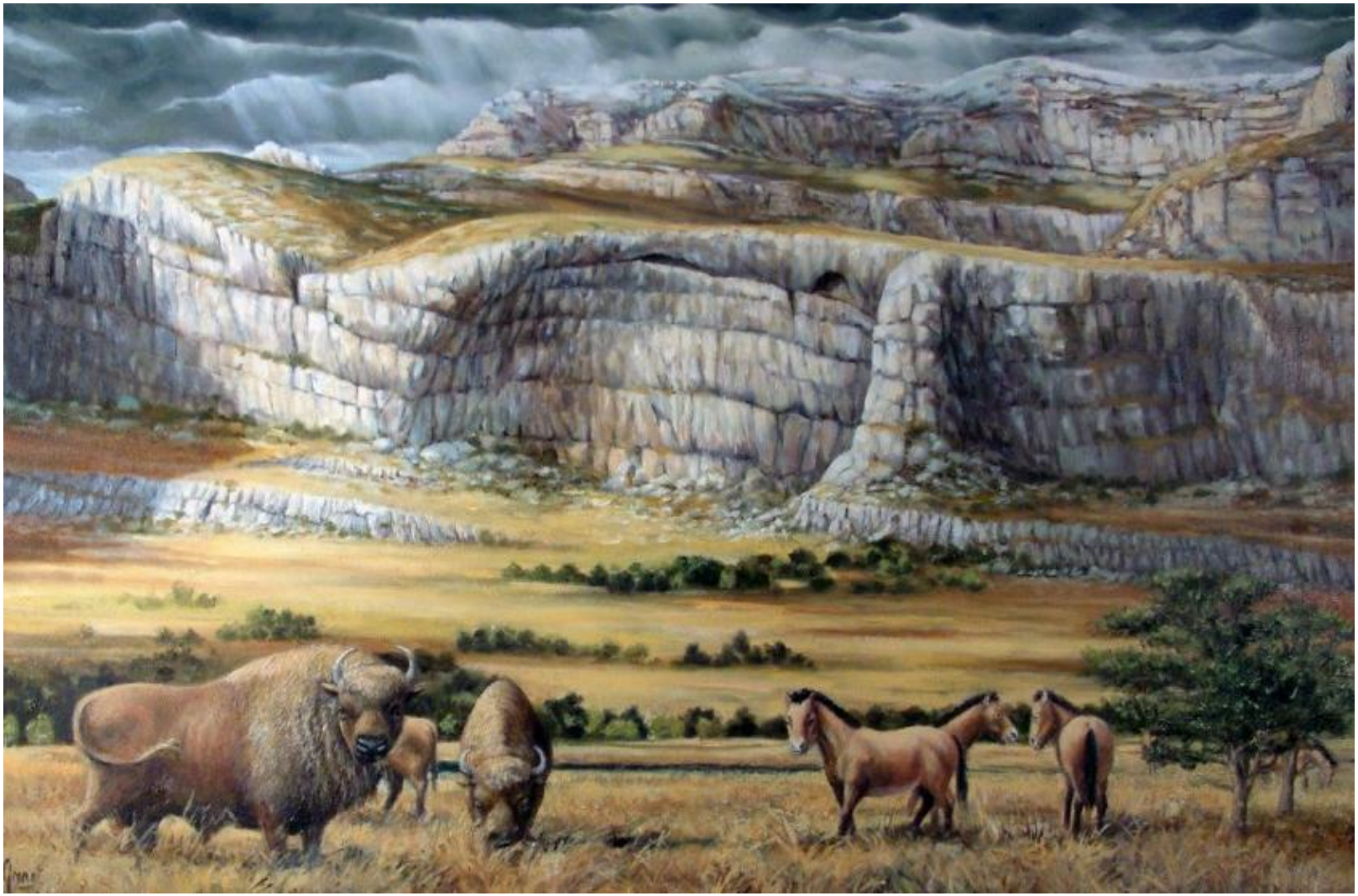
Datations des peintures rupestres entre -27 000 et -19 000 BP

*Cerf*

*Pingouins*

**Grotte Cosquer**

Reconstitution de l'environnement il y a – 20 000 ans (vue d'artiste)

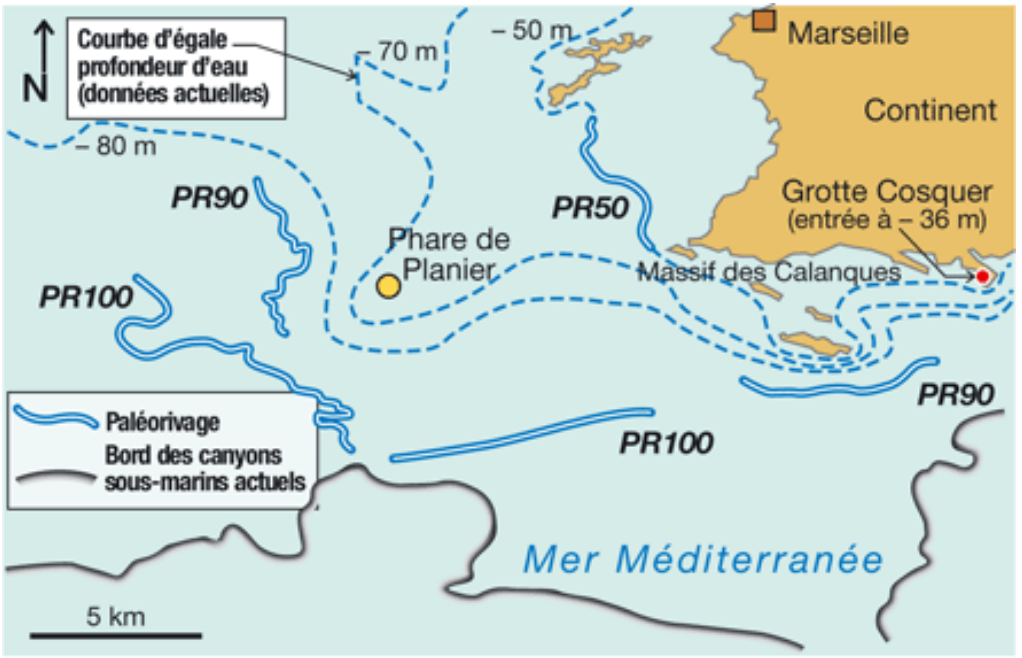


# Grotte Cosquer

## Reconstruction de la localisation des glaciers il y a 20 000 ans en Europe

## Paléorivages au large de Marseille

(source CeFEG)




**PR50** = 50 m de profondeur; -8500 ans
**PR 90** = 90 m de profondeur; -11 700 ans
**PR 100** = 100 m de profondeur; -13 850 ans
Bord des canyons = - 20 000 ans

1. **Différents indices climatiques continentaux (traces laissées par les glaciers après leur fonte, pollens fossiles…etc) contribuent à reconstituer les évolutions climatiques récentes (depuis – 120 000 ans).**

a. Des indices paléo-écologiques (traces laissées par la flore ou la faune à une époque donnée) permettent de reconstituer le climat local et ses changements.

- Un grain de pollen est entouré d'exine, une structure résistante qui se conserve avec le temps.
- Les pollens récoltés dans des pièges sédimentaires (tourbières par exemple) témoignent de la végétation du passé.
- Or, la végétation et sa répartition obéit à des préférences écologiques et dépend donc étroitement du climat.
[Exemple : graminée, bouleau, pin = climat froid ; chêne, tilleul = climat plus tempéré]
- Ainsi, l'interprétation d'un diagramme pollinique (nature et proportions des pollens dans une carotte sédimentaire en fonction de la profondeur) permet de reconstituer des paléoclimats successifs.
- L'interprétation des diagrammes polliniques repose sur les principes de l'actualisme (les espèces fossiles ont les mêmes exigences que les espèces actuelles) et de superposition (les couches les plus profondes sont les plus anciennes.

# Indices géologiques et glaciaires

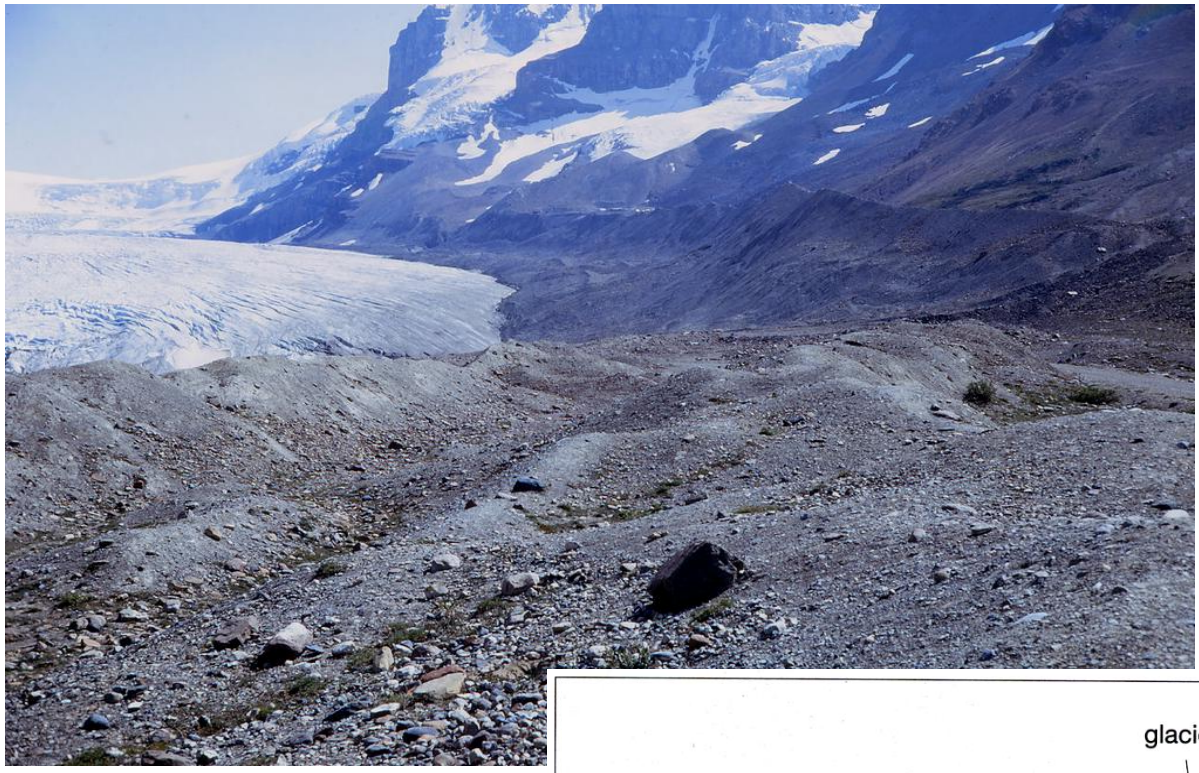
Moraines

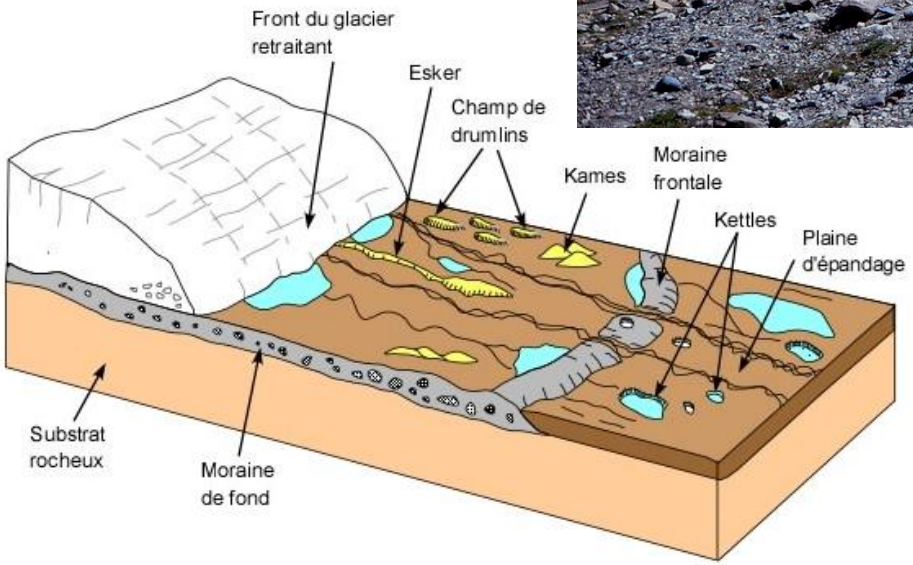
Stries glaciaires

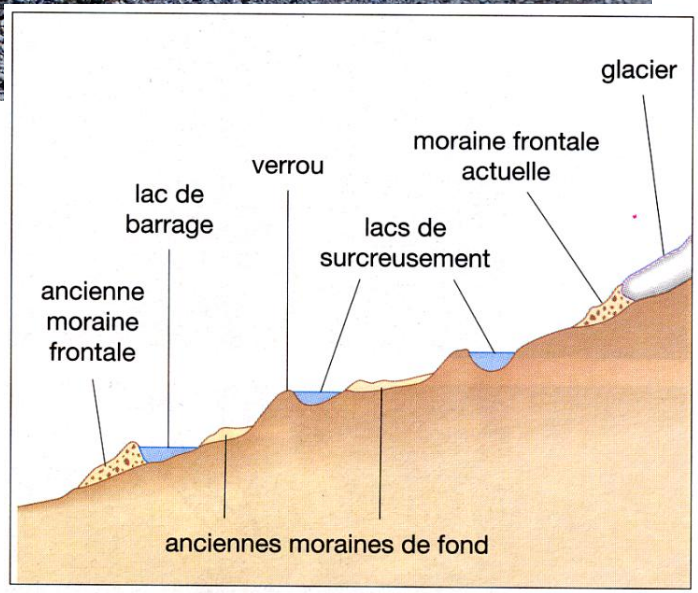
→ glaciation

# Indices géologiques et glaciaires

## Moraine frontale, parc national de Jasper, Alberta, Canada



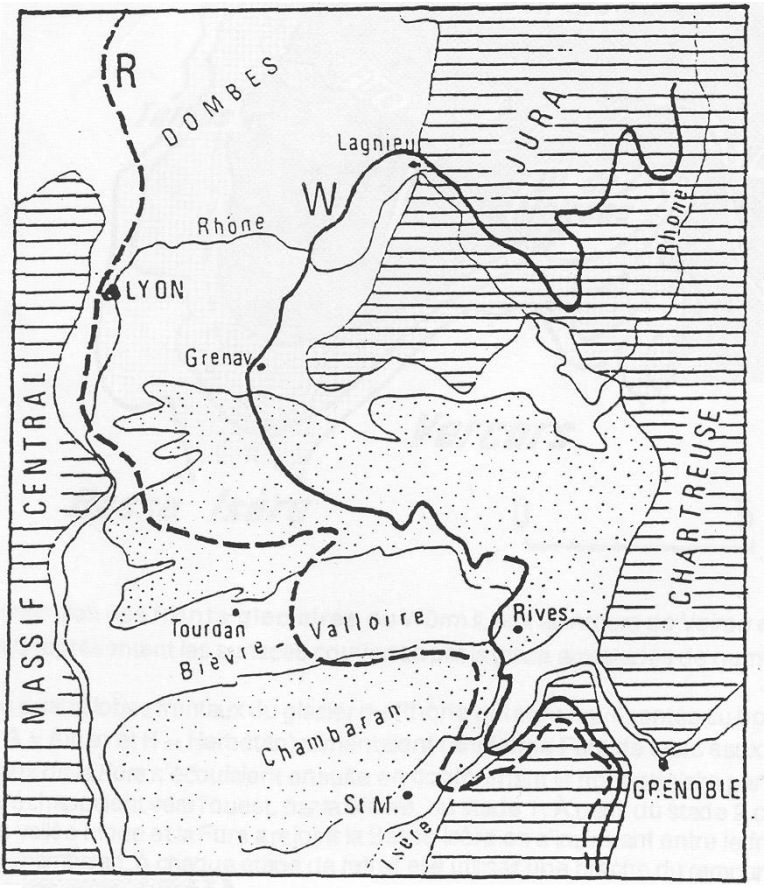


## Indices géologiques et glaciaires

Le « Gros Cailloux » de la Croix Rousse (Lyon) = bloc erratique. Représentent l'avancée maximale au Riss du glacier du Rhône

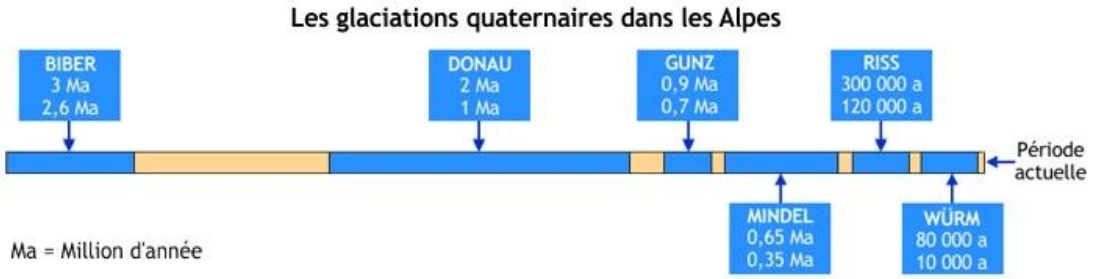
# Indices géologiques et glaciaires



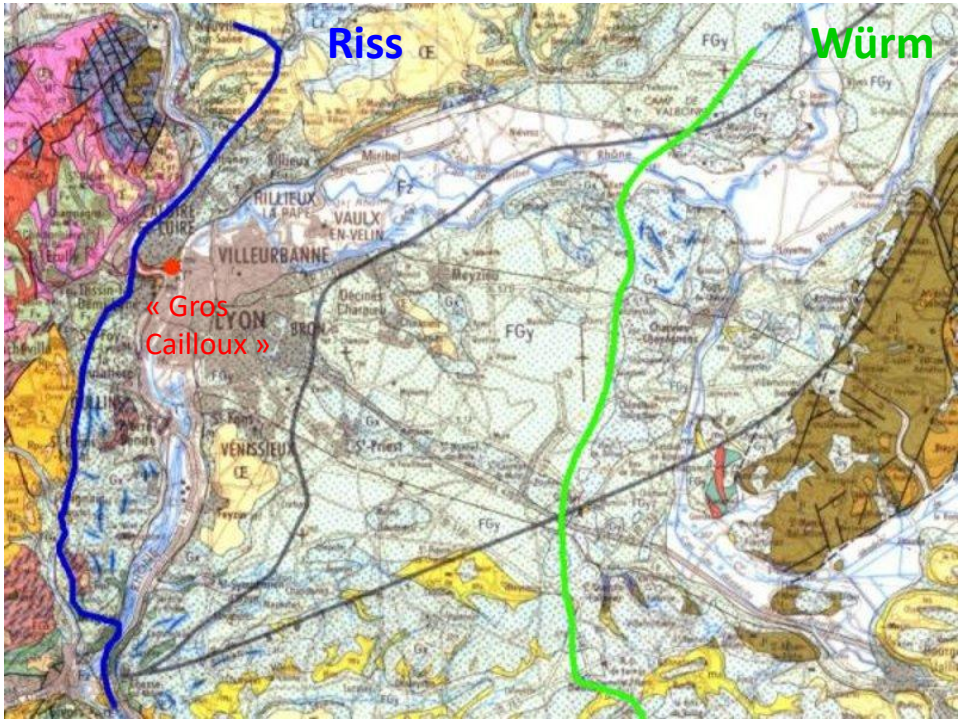

R Front rissien

W - würmien

Mio-Pliocène




carte BRGM 1/250 000 de Lyon

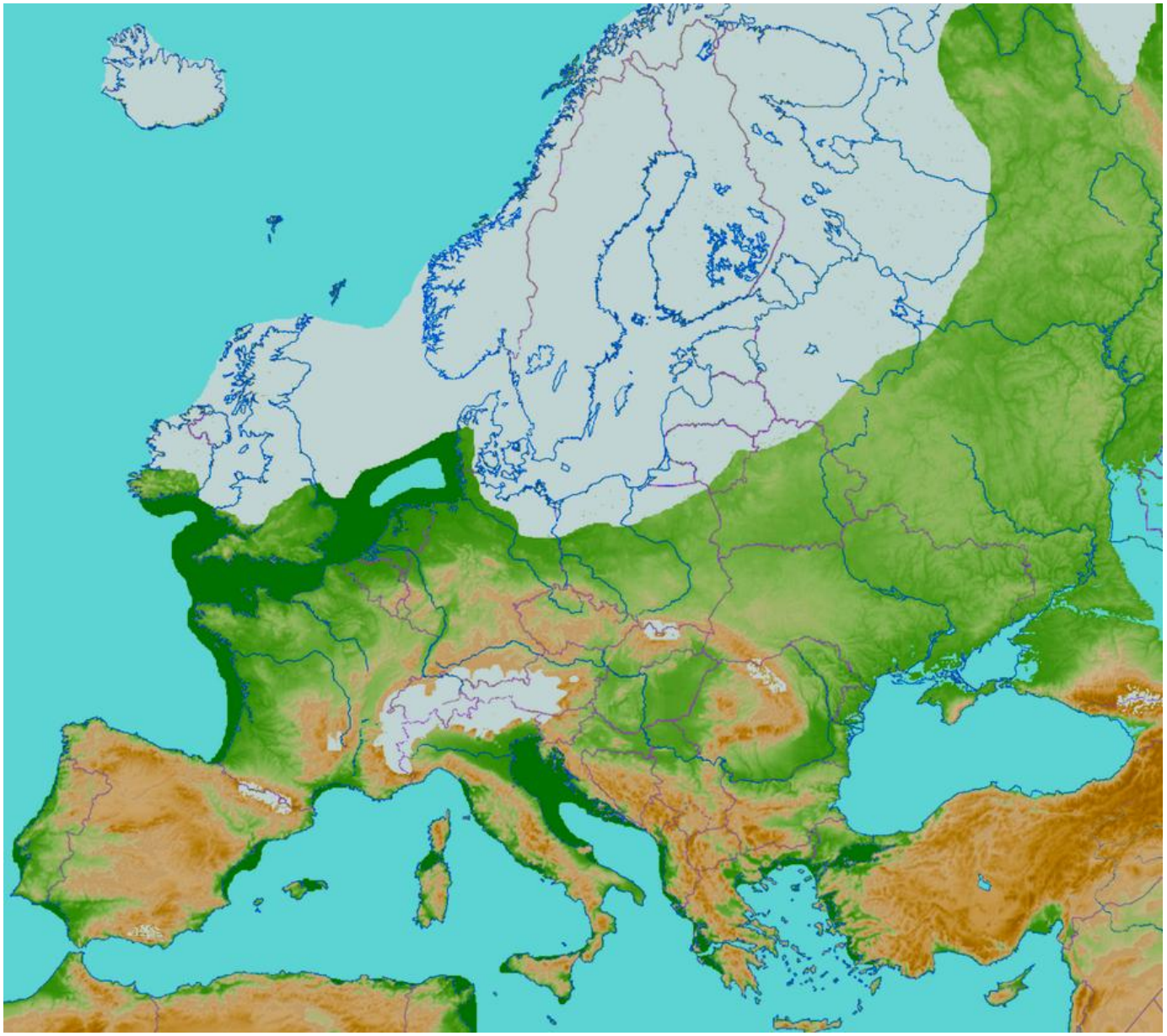



Les moraines du Riss sont plus éloignées que celles du Würm, la datation se fait grâce aux débris végétaux que l'on retrouve dans ces moraines

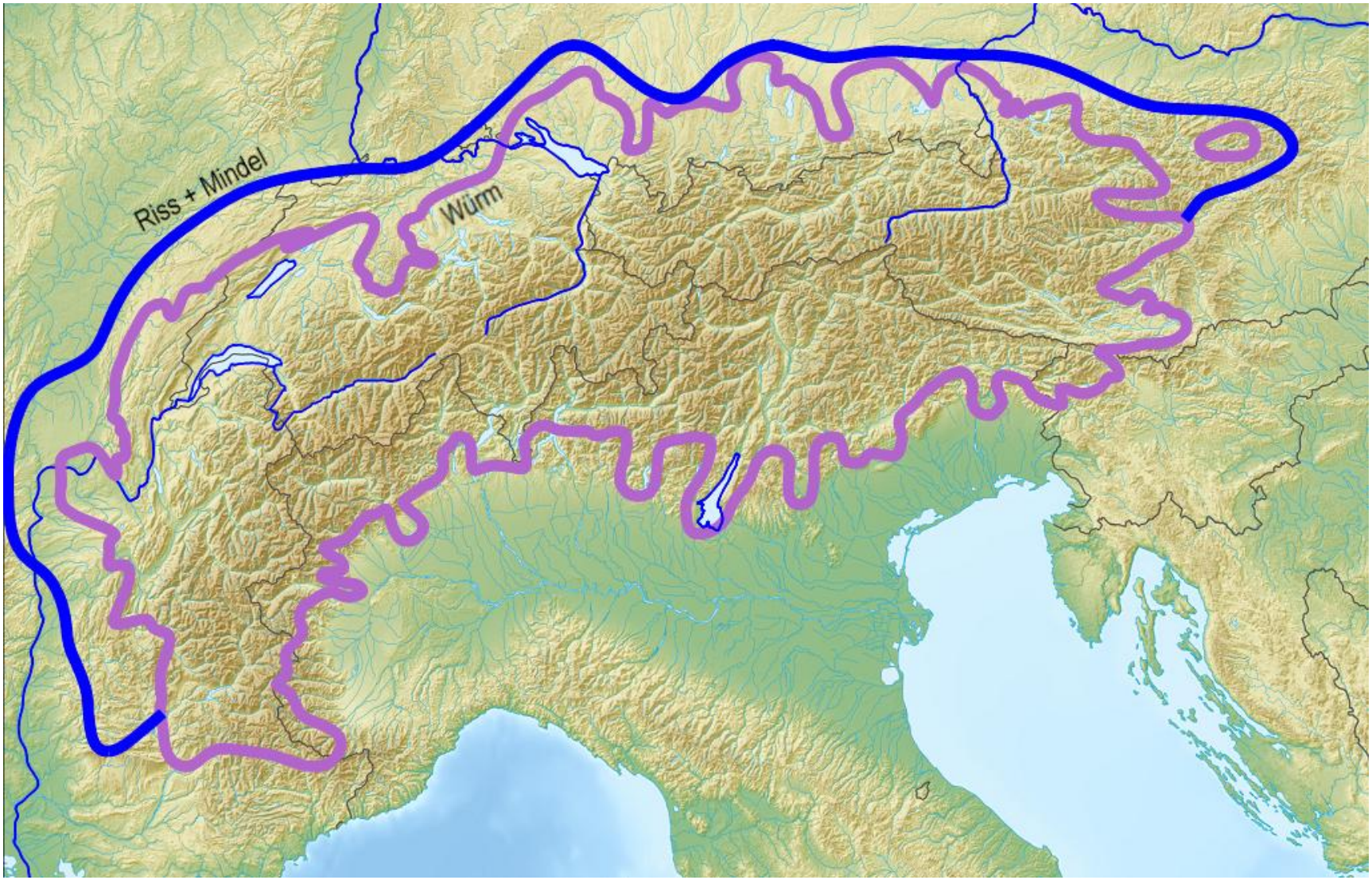
b. Des indices géologiques, notamment les sédiments glaciaires, constituent des archives climatiques permettant de reconstituer l'étendue des glaciers et des calottes polaires dans le passé.

- Des striations peuvent être interprétées comme les traces caractéristiques laissées par le passage des glaciers (agents d'érosion très puissants)
- Les moraines sont des fragments de roche de toute taille (matériaux tombant des montagnes ou arrachés au socle raboté par un glacier). Ces matériaux, transportés sur de grandes distances puis déposés sur les bords des glaciers, témoignent de l'extension glaciaire à une époque donnée.
- Les blocs erratiques sont des fragments de roche de taille relativement importante qui ont été déplacés par le glacier parfois sur de grandes distances. Lors de la fonte du glacier, le bloc erratique est abandonné sur place et témoigne de l'extension glaciaire.

# Paléogéographie de l'Europe durant la dernière glaciation (Würm)



**Paléogéographie de l'Europe durant la dernière glaciation (Würm)**



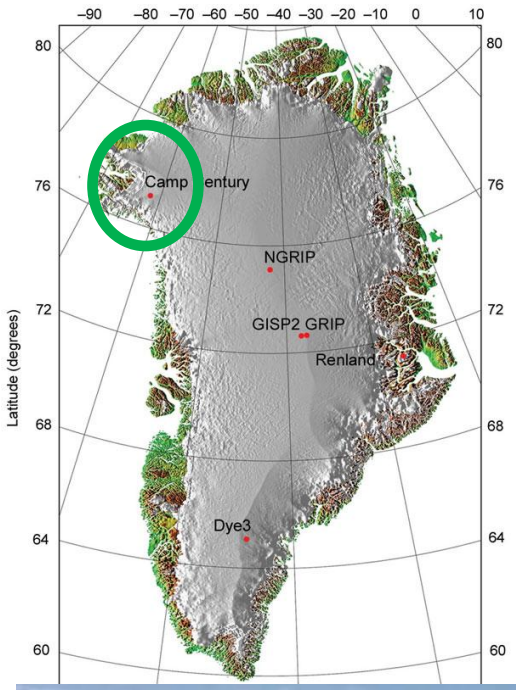

Extension maximale de la glaciation de Würm (en violet) dans les Alpes ; bleu: Glaciation de Riss.

d. Ainsi, différents indices climatiques permettent de dire que le Pléistocène supérieur (-120 000 ans ; -11 000 ans) était une période globalement froide tandis que l'Holocène (depuis -10 000 ans jusqu'à nos jours) est marqué par un réchauffement (interglaciaire).

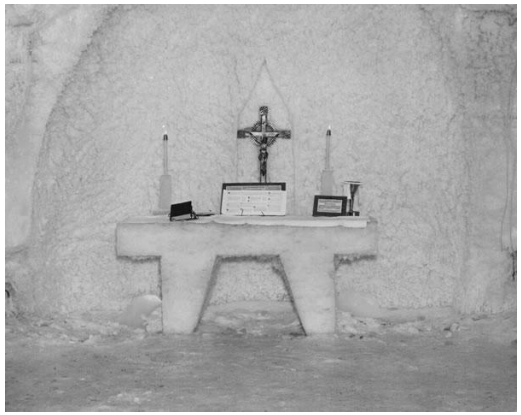
- Le maximum glaciaire (moment le plus froid) a été atteint il y a -20 000 ans.
- Le Nord de l'Europe et le Alpes étaient alors recouverts d'une calotte de glace.
- Cette période se traduit par une avancée des côtes (car niveau de la mer 120m plus bas qu'actuellement)

2. L'étude des rapports isotopiques de l'oxygène ($\delta^{18}O$) dans les carottes polaires antarctiques et les sédiments carbonatés montre sur les 800 000 dernières années des changements climatiques globaux, planétaires, et périodiques, sous la forme d'une succession de cycles qui coïncident avec les variations cycliques de composition de l'atmosphère en gaz à effet de serre (déduites de l'analyse des bulles d'air piégées dans la glace)

# dO18 des glaces, un thermomètre isotopique

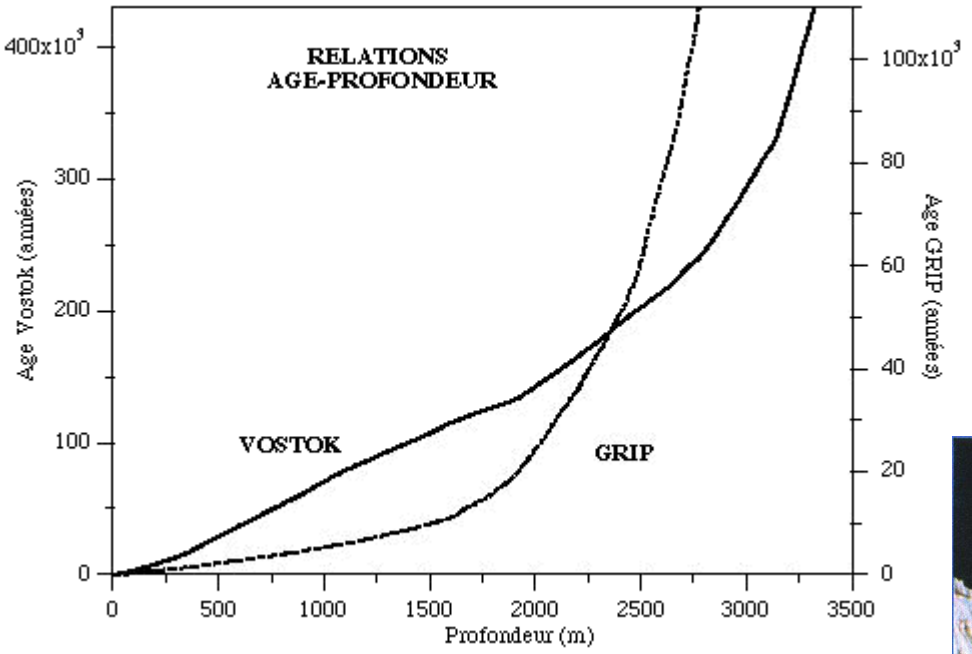



## Camp century (Groenland)

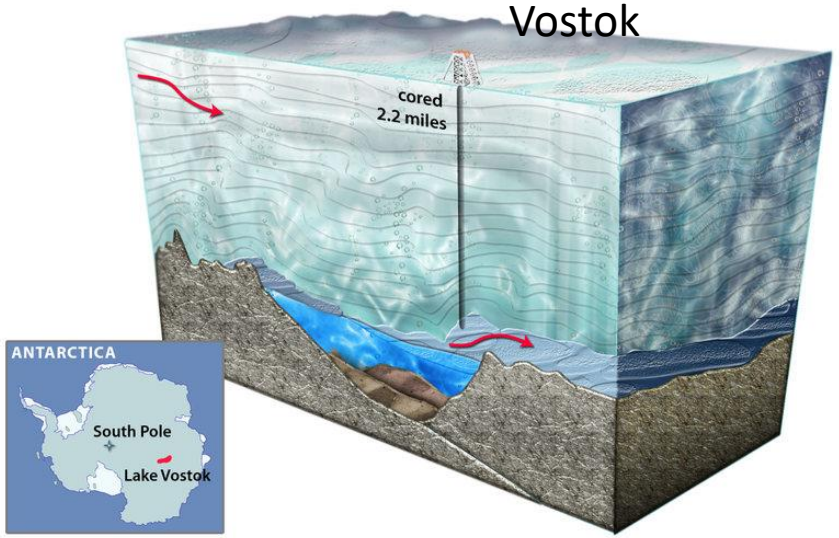


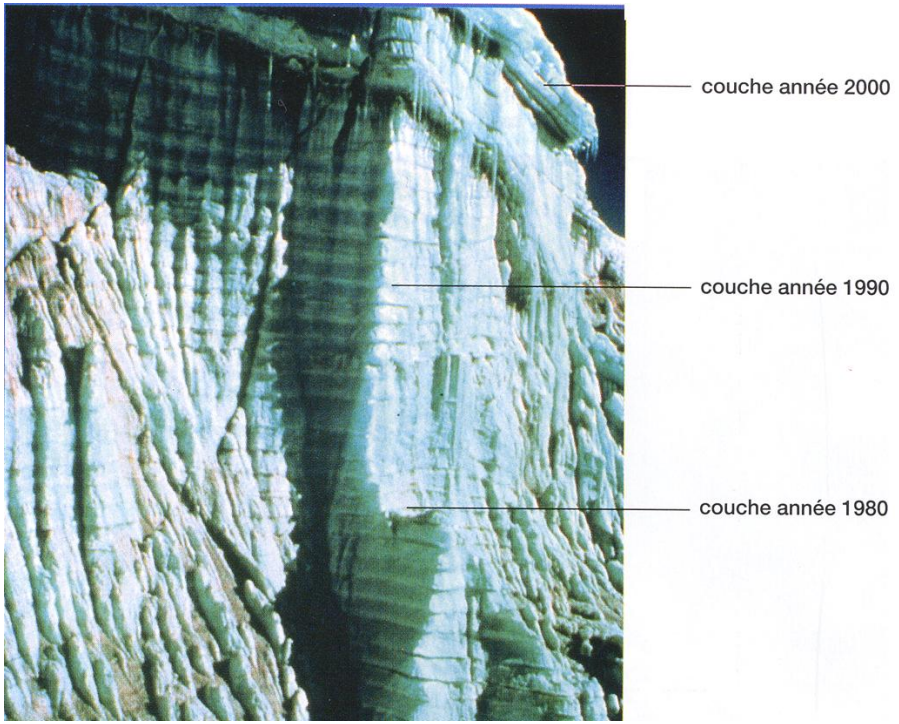
# dO18 des glaces, un thermomètre isotopique

**Age en fonction de la profondeur au Groenland et en Antarctique**




Vostok

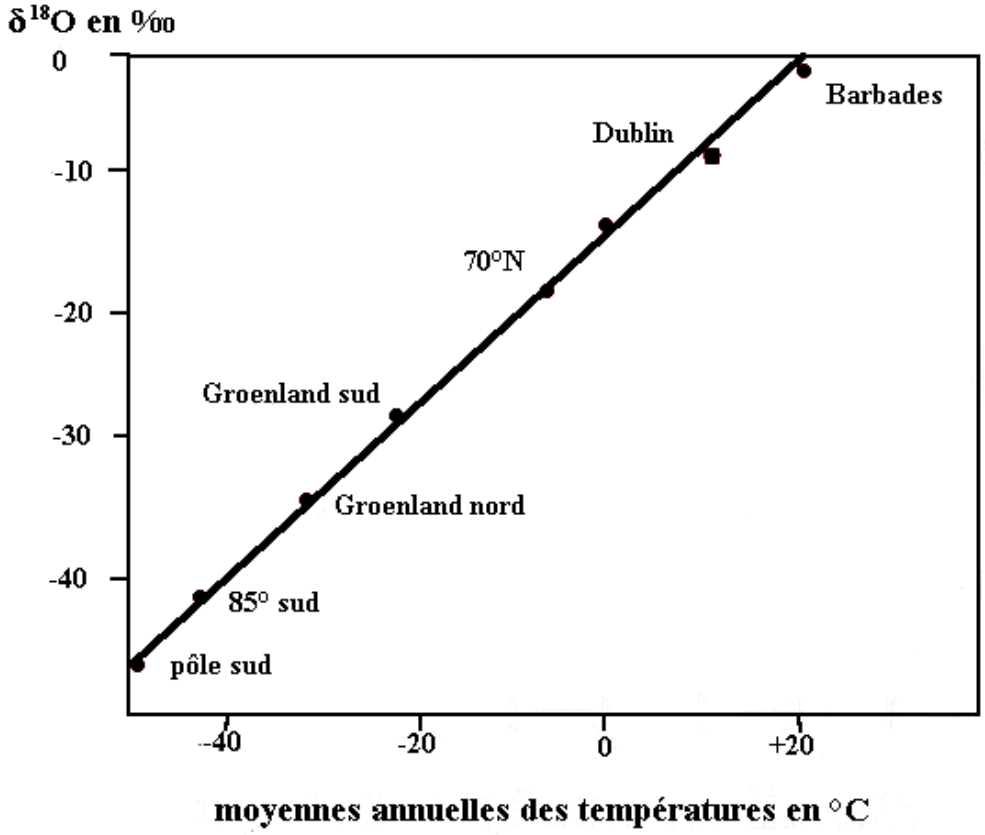


**dO18 des glaces, un thermomètre isotopique**

$$\delta^{18}\mathrm{O} = 1000 \left[ \frac{\left(\frac{^{18}\mathrm{O}}{^{16}\mathrm{O}}\right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{18}\mathrm{O}}{^{16}\mathrm{O}}\right)_{\text{référence}}} - 1 \right]$$

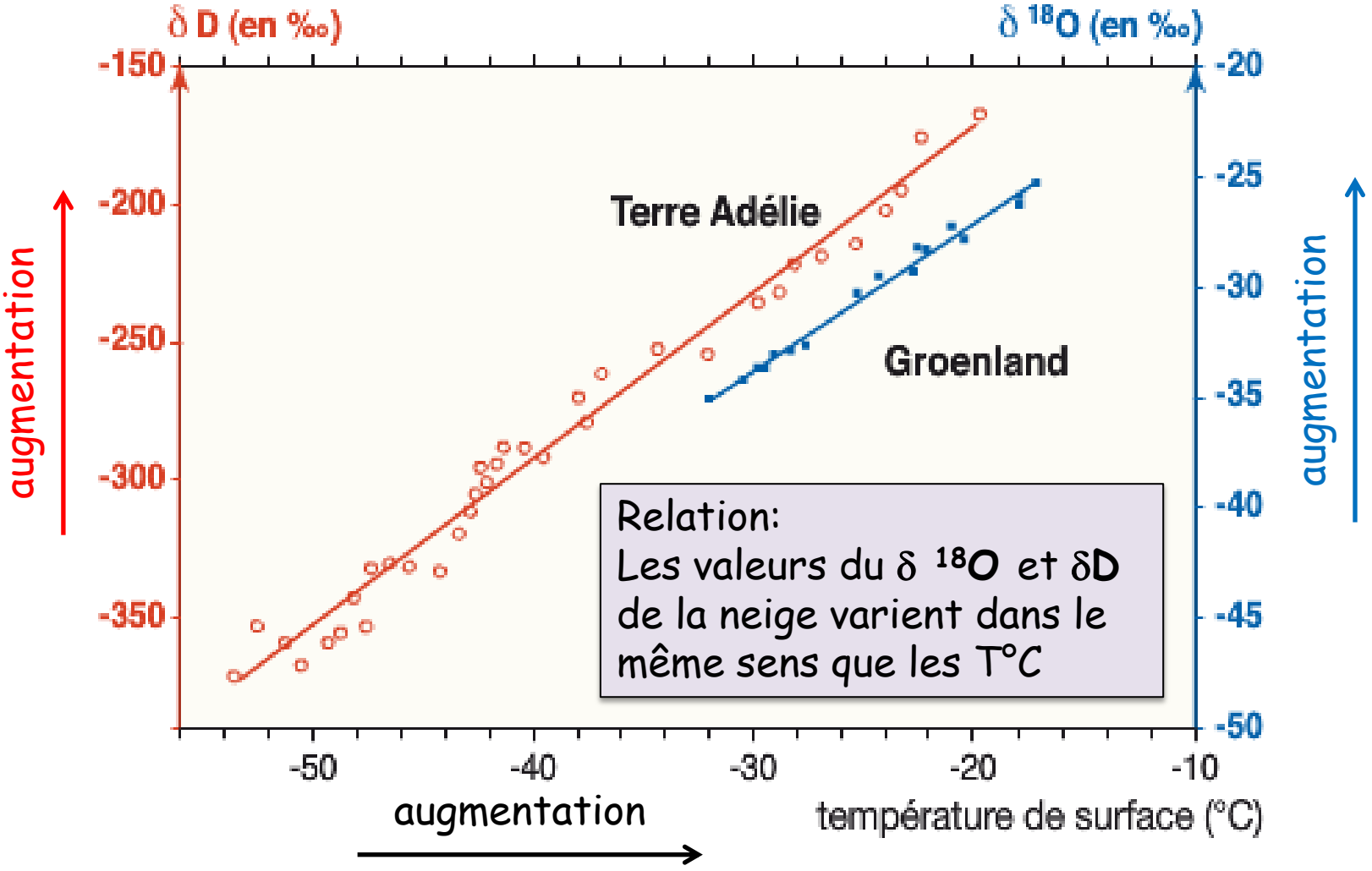
# dO18 des glaces, un thermomètre isotopique



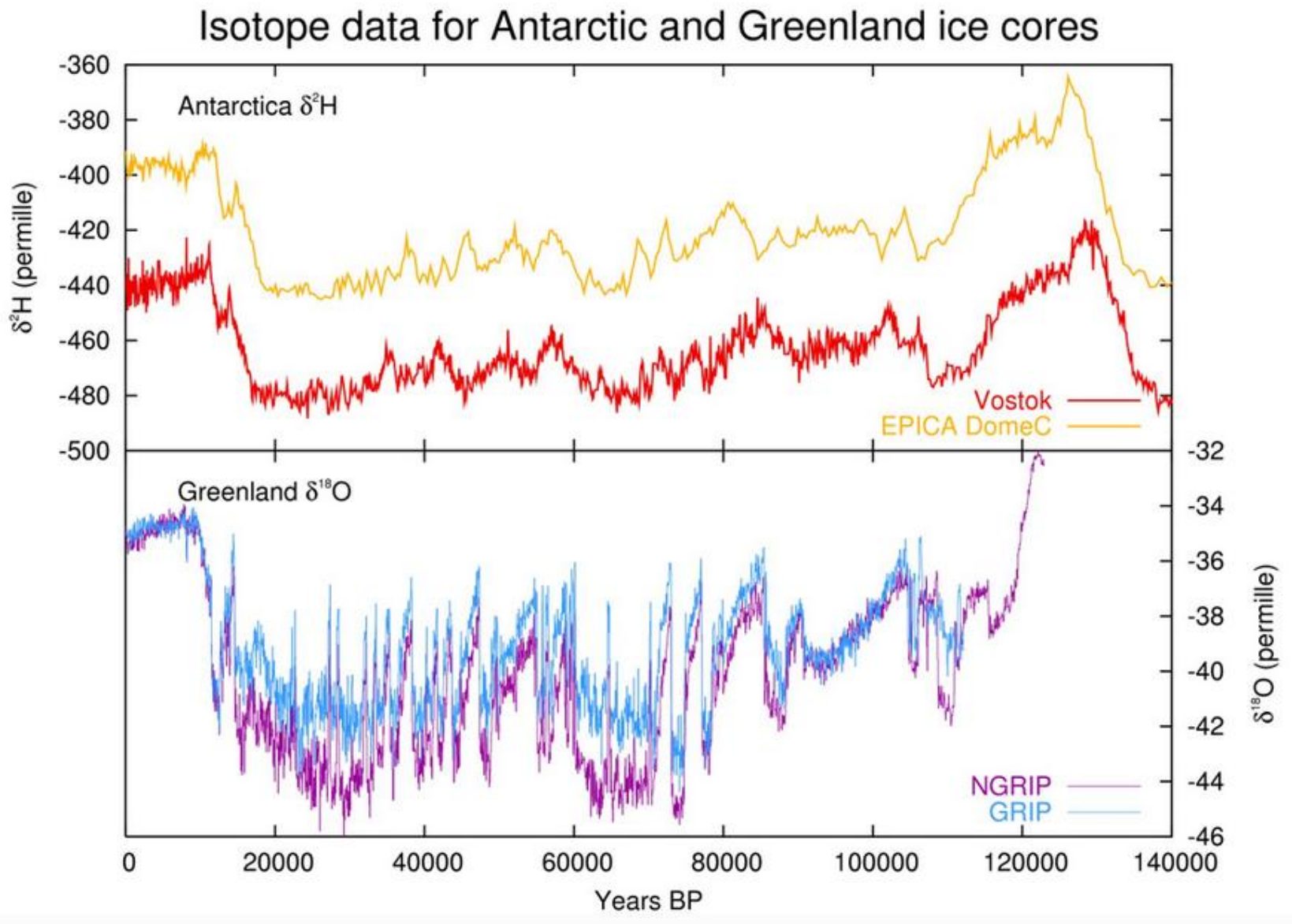

Source : http://acces.ens-lyon.fr/acces/terre/paleo/variations/paleoclimats/ressources/im_cor2

# dO18 des glaces, un thermomètre isotopique

Calibrage du thermomètre isotopique au Groendland et en Antarctique



# dO18 des glaces, un thermomètre isotopique



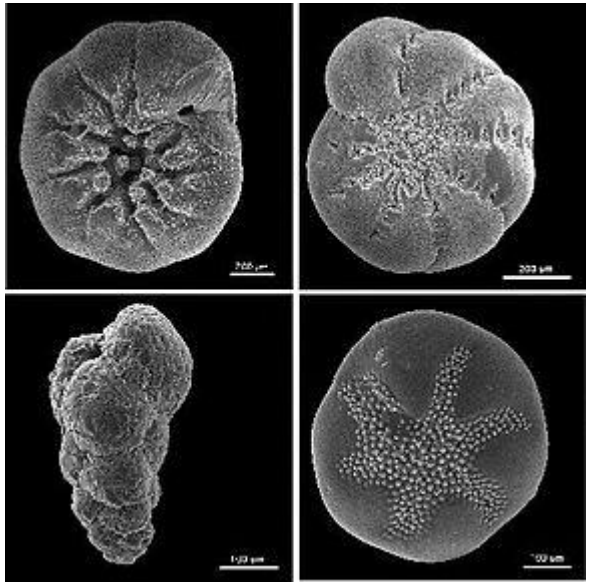
a. Les rapports isotopiques de l'oxygène ($\delta^{18}O$) et de l'hydrogène ($\delta^{18}D$) des molécules d'eau de la glace continentale permettent d'estimer la température de l'air au moment de la chute de neige car ils varient dans le même sens.

- *Les glaces polaires se forment à partir de l'accumulation et du tassement des chutes de neige au cours des années. La succession des couches en fonction de la profondeur correspond à l'ordre de dépôt au cours du temps. Un carottage permet de remonter le temps : la couche la plus ancienne est la plus profonde (principe de superposition).*
- *L'oxygène est présent sous forme de différents isotopes à la surface de la Terre. La valeur en $^{18}O$ étant faible, le rapport de la teneur en isotope lourd sur celle en isotope léger est exprimé par un écart (δ) en fonction d'un standard (valeur moyenne de l'eau de l'océan actuel)*

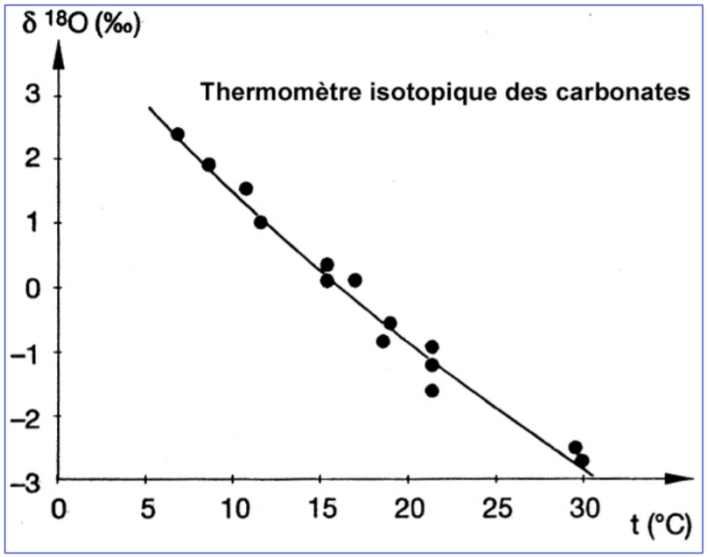
- L'isotope $^{18}O$ est plus lourd que l'isotope $^{16}O$, il s'évapore plus difficilement et précipite plus préférentiellement dans les eaux de pluie (ou la neige). Ce fractionnement isotopique a pour conséquence de faire varier la concentration de la neige en $^{18}O$ en fonction de la température.
- Ainsi en mesurant la composition isotopique des couches de glace d'une carotte de glace, il est possible de déterminer la température qui régnait lors du dépôt de la neige à l'origine de la glace.
- Une diminution des rapports isotopiques dans la glace correspond à une diminution de la température de l'air soit un refroidissement (et inversement).

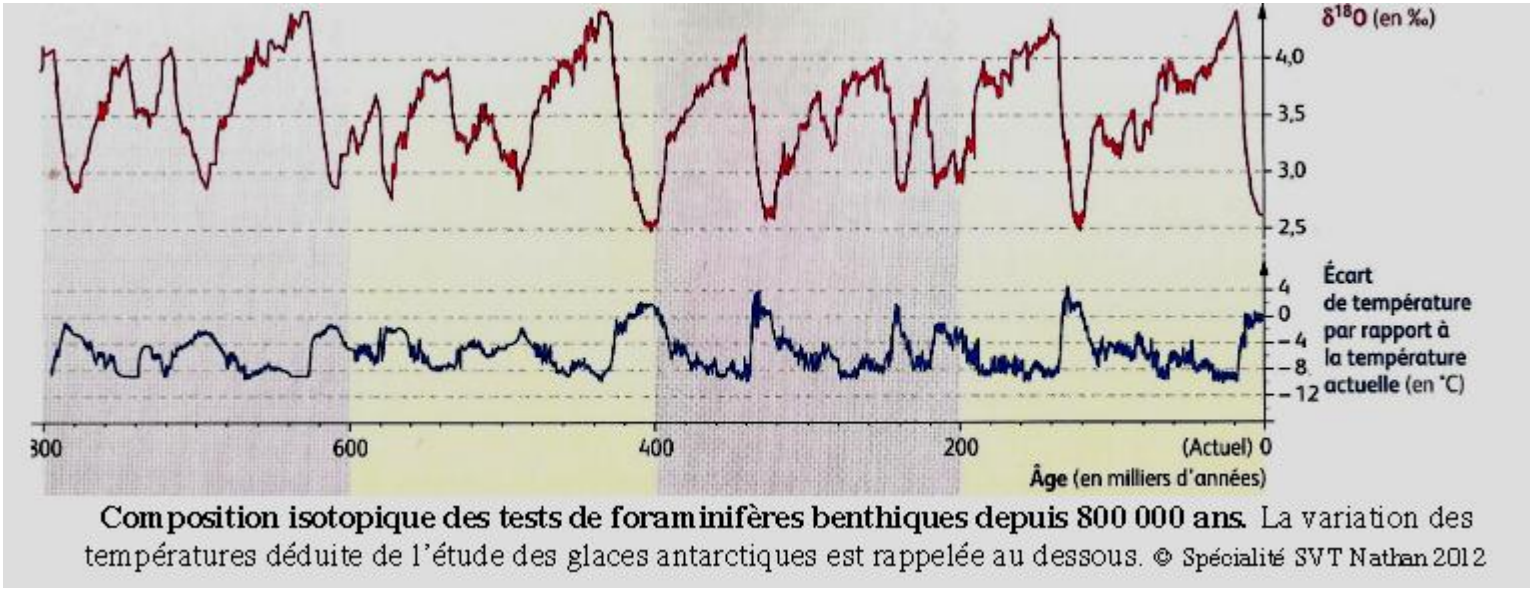
# dO18 des sédiments, un thermomètre isotopique

Foraminifères observés au MEB



Plus le dO18 est élevé, plis la température est basse




**Composition isotopique des tests de foraminifères benthiques depuis 800 000 ans.** La variation des températures déduite de l'étude des glaces antarctiques est rappelée au dessous. © Spécialité SVT Nathan 2012

b. Les tests carbonatés des foraminifères constituent des archives climatiques au niveau océanique. Dans ce cas, le rapport isotopique ($\delta^{18}O$) varie dans le sens opposé de la température de l'eau de mer.

- *Les fonds océaniques sont recouverts de couches sédimentaires superposées selon leur ordre de dépôt (datation relative possible) et formées par accumulation de tests (coquille calcaire) de foraminifères fossiles (organismes unicellulaires benthiques)*
- *Les tests calcaires CaCO3 sont formés à partir des atomes O en solution dans l'eau de mer soit avec $^{18}O$ et $^{16}O$.*
- *En mesurant actuellement ce rapport dans de nombreuses coquilles de foraminifères, à des latitudes différentes, les scientifiques ont établi que le ($\delta^{18}O$) des tests carbonatés est inversement proportionnel à la température moyenne de l'eau.*

*[Remarque : Le rapport $^{18}O/^{16}O$ qui sert de référence pour le calcul du ($\delta^{18}O$) est celui des coquilles fossiles d'âge crétacé, époque au cours de laquelle il n'y avait pas de calotte glaciaire à la surface de la terre]*

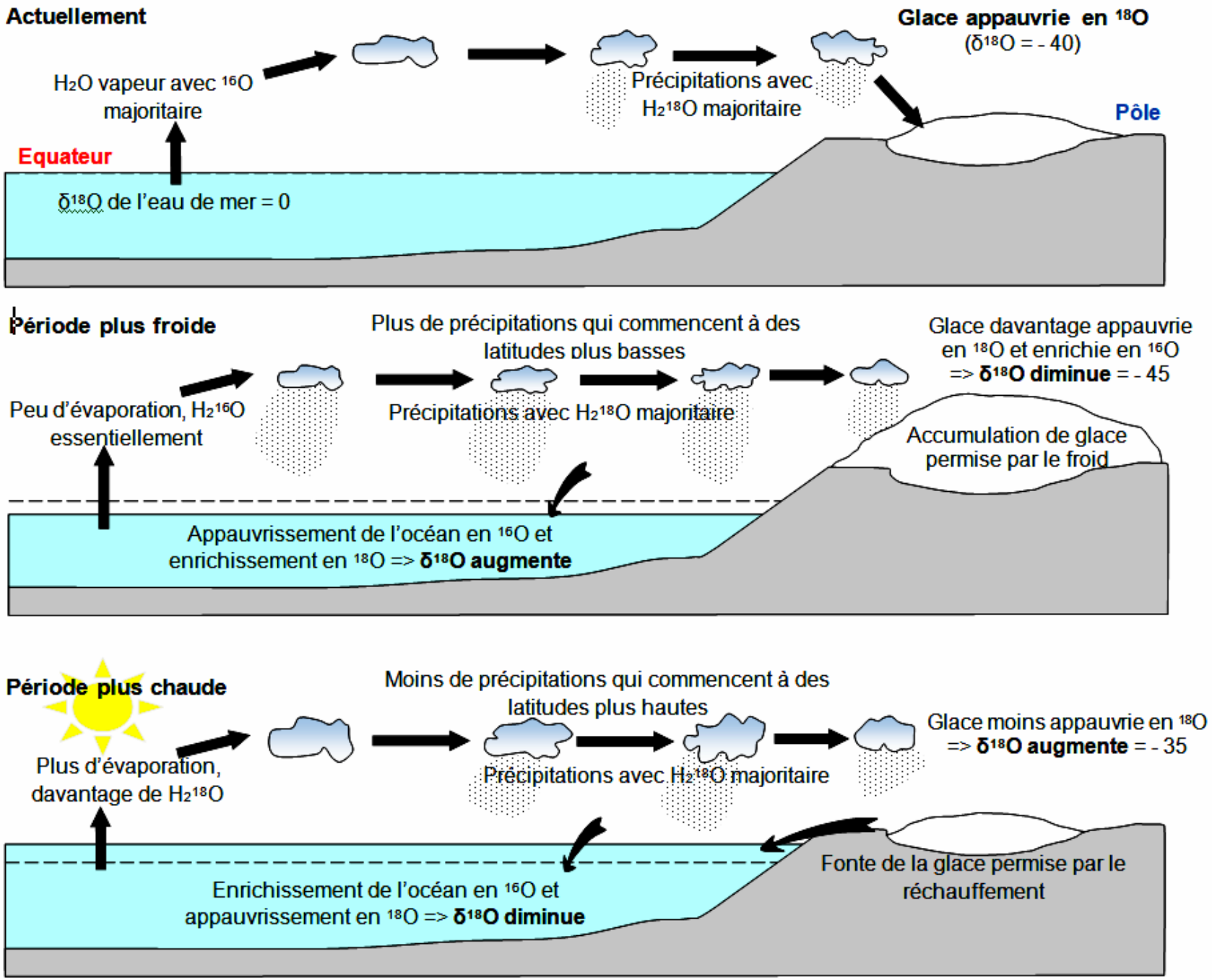
- *Ainsi, pour un sédiment donné formé à une époque donnée, l'augmentation du rapport isotopique ($\delta^{18}O$) des carbonates traduit une diminution de la température et inversement.*

***Schéma 1 : Principe du fractionnement isotopique et de la corrélation rapport isotopique / climat***

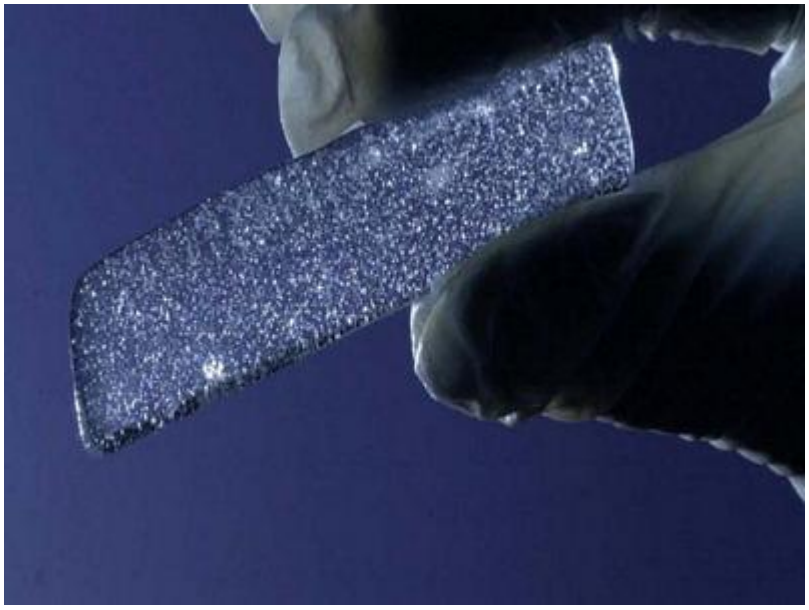
*[Remarque : L'étude statistique des espèces de foraminifères présents dans les sédiments permet aussi de reconstituer les paléoclimats car certaines espèces ont des exigences écologiques précises :*

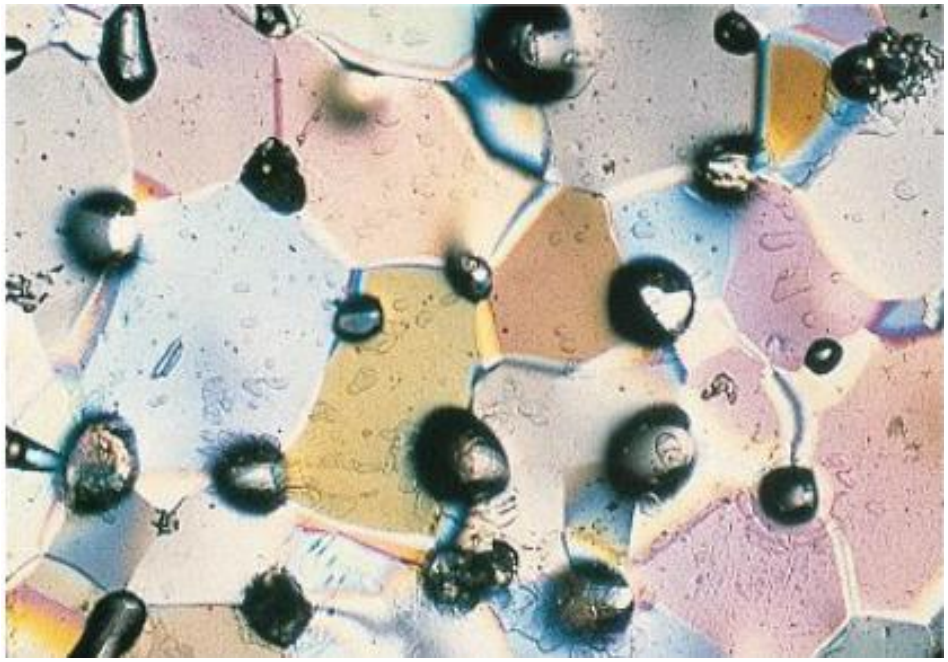
*- Globigérines dans les eaux chaudes*

*- Radiolaires dans les aux froides, aux latitudes plus élevées]*

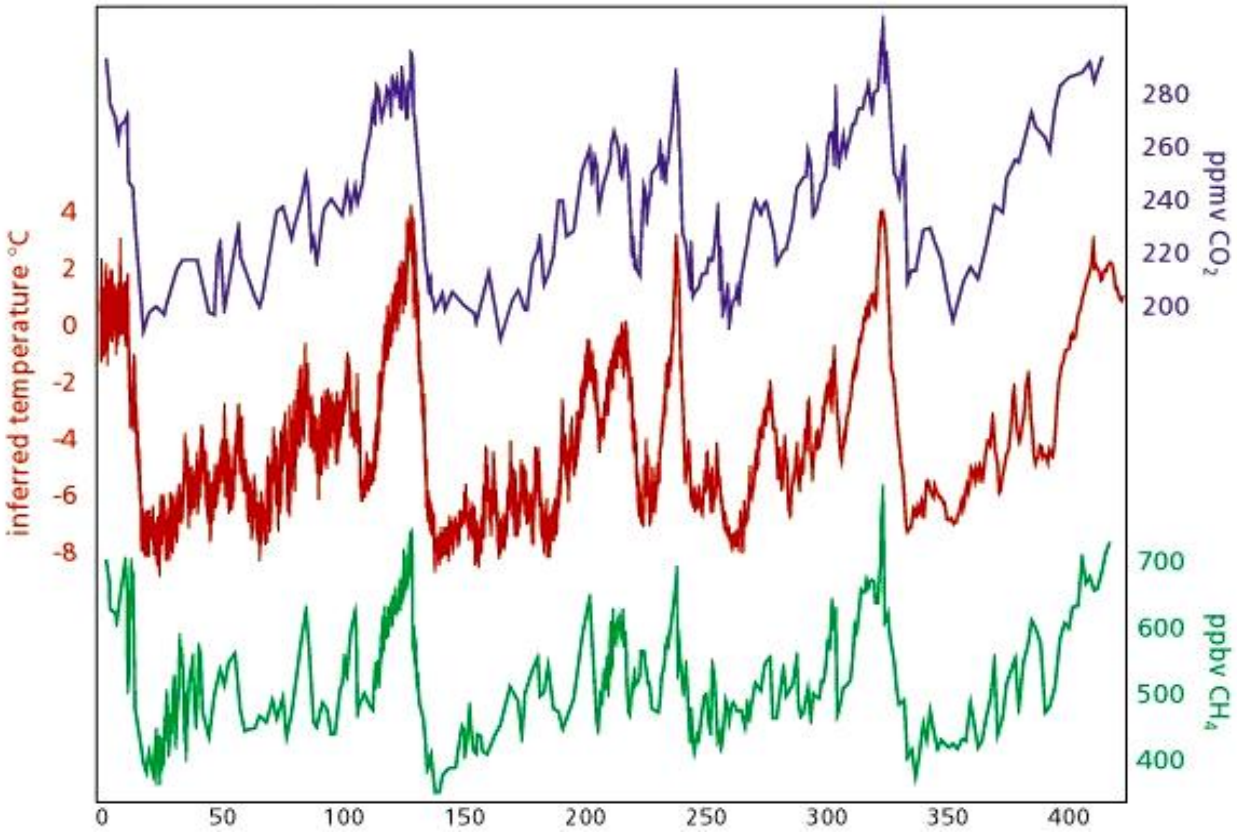

Actuellement
Glace appauvrie en $^{18}O$
($\delta^{18}O$ = - 40)
$H_2O$ vapeur avec $^{16}O$ majoritaire
Précipitations avec $H_2{}^{18}O$ majoritaire
Pôle
Equateur
$\delta^{18}O$ de l'eau de mer = 0
Période plus froide
Plus de précipitations qui commencent à des latitudes plus basses
Glace davantage appauvrie en $^{18}O$ et enrichie en $^{16}O$
=> **$\delta^{18}O$ diminue** = - 45
Peu d'évaporation, $H_2{}^{16}O$ essentiellement
Précipitations avec $H_2{}^{18}O$ majoritaire
Accumulation de glace permise par le froid
Appauvrissement de l'océan en $^{16}O$ et enrichissement en $^{18}O$ => **$\delta^{18}O$ augmente**
Période plus chaude
Moins de précipitations qui commencent à des latitudes plus hautes
Glace moins appauvrie en $^{18}O$
=> **$\delta^{18}O$ augmente** = - 35
Plus d'évaporation, davantage de $H_2{}^{18}O$
Précipitations avec $H_2{}^{18}O$ majoritaire
Fonte de la glace permise par le réchauffement
Enrichissement de l'océan en $^{16}O$ et appauvrissement en $^{18}O$ => **$\delta^{18}O$ diminue**

# Corrélation rapports isotopiques / taux de $CO_2$ des bulles d'air dans les glaces





Variations, en fonction de l'âge BP (before present), des températures moyennes, et des concentrations en $CO_2$ et $CH_4$ atmosphériques mesurées dans les échantillons de glaces prélevés par carottage à Vostok (en Antarctique)




Age ($10^3$ ans BP)

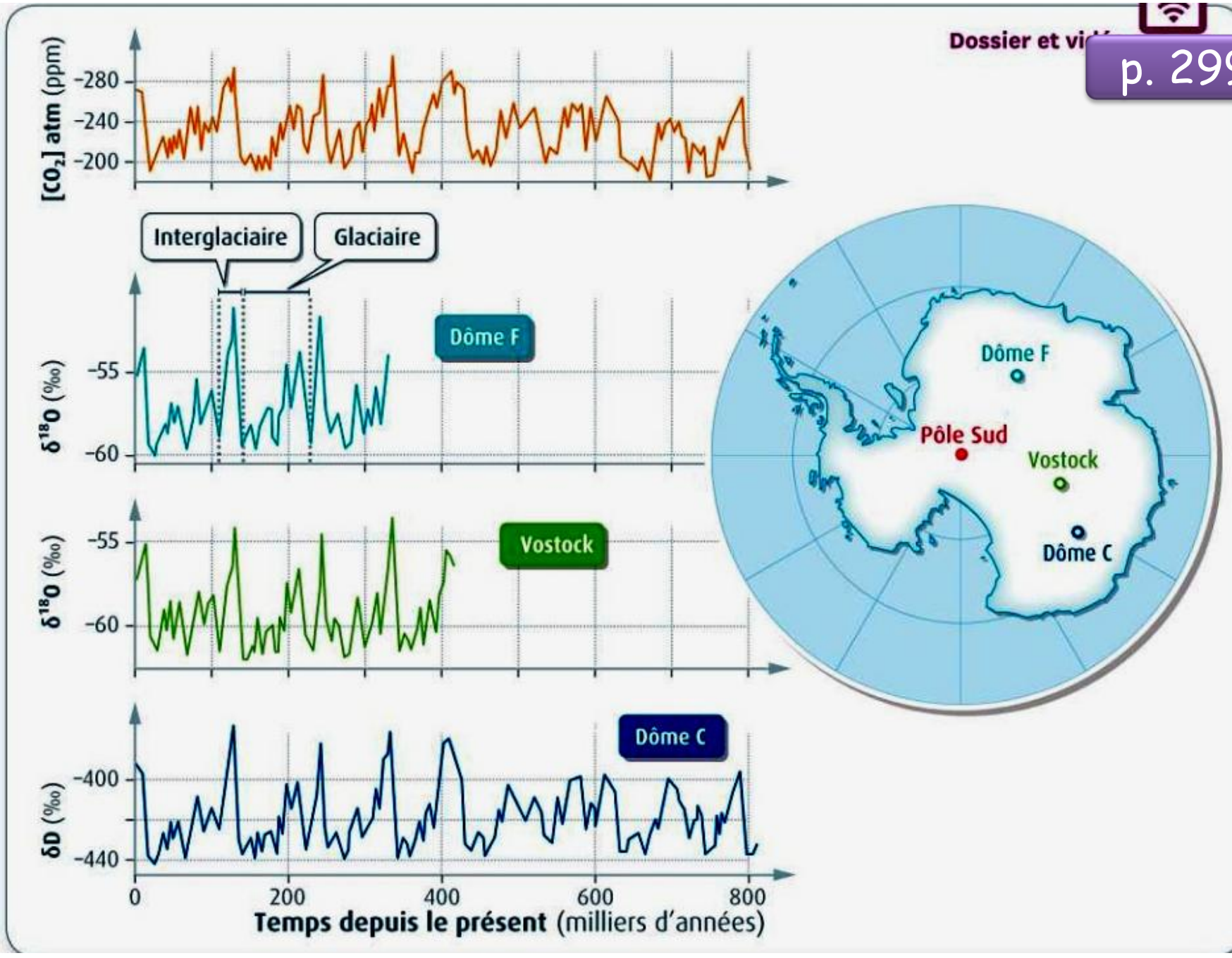
©JR petit et al., *Nature*, 399, 429-36, 1999

**Remarques** : l'époque actuelle est à "0 BP" ; les températures sont déduites des **concentrations en isotopes du dioxygène (**$\delta\ ^{18}O$)

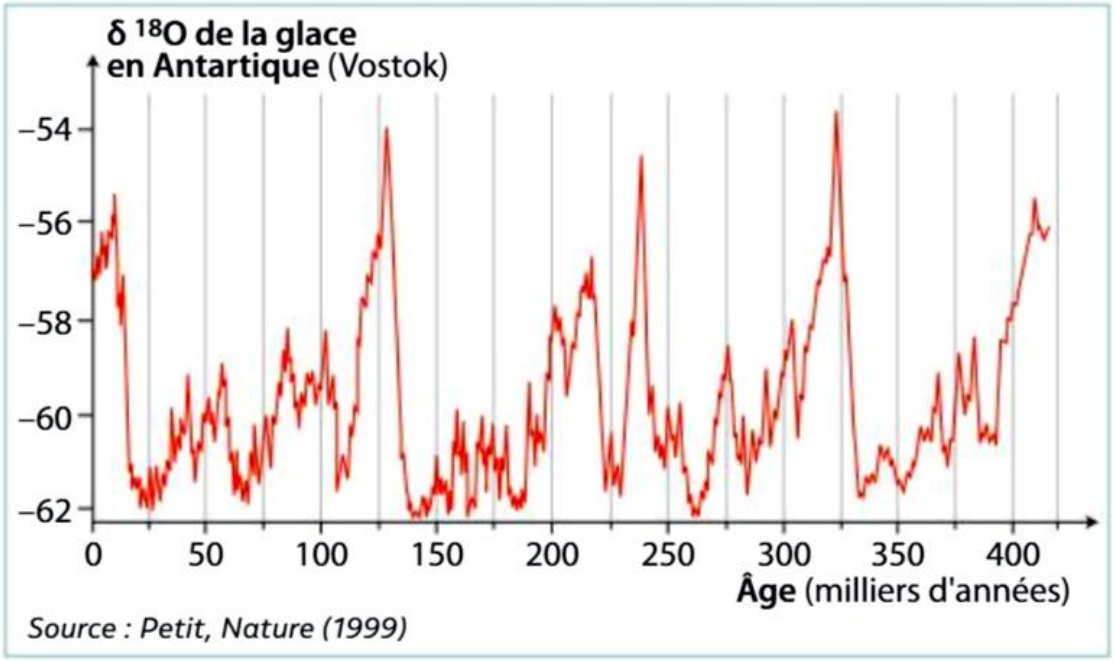
# Corrélation rapports isotopiques / taux de CO2 des bulles d'air dans les glaces

Dossier et vi…

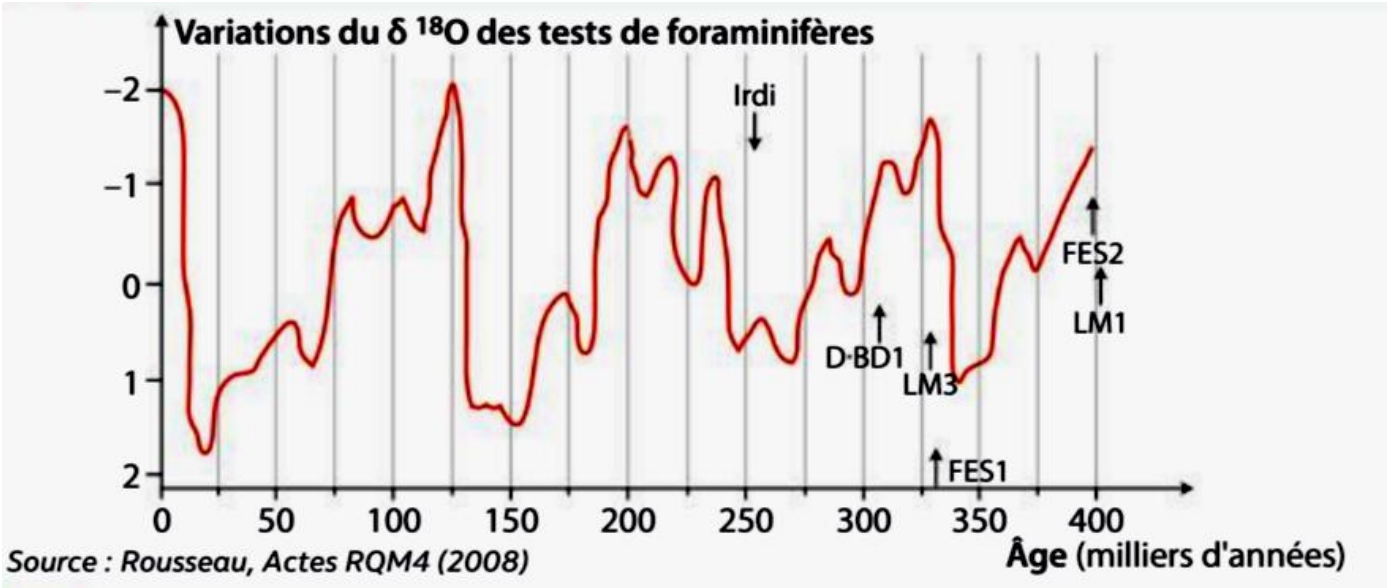
p. 299



**Variations du rapport isotopique dO18 dans les glaces antarctiques depuis 400 000 ans**




**Variations du rapport isotopique dO18 des foraminifères benthiques depuis 400 000 ans**



c. Les variations climatiques planétaires déduites de l'étude des foraminifères sont concordantes avec celles déduites de l'étude de la glace : même variations et même périodicité :

- Périodes glaciaires « froides » qui durent environ 80 – 100 000 ans.
- Périodes interglaciaires « chaudes » qui durent environ 20 000 ans.
- Ces périodes alternent tous les 100 000 ans avec une amplitude plus ou moins grande.
- Phases de réchauffement rapides qui alternent avec phases de refroidissement plus lentes

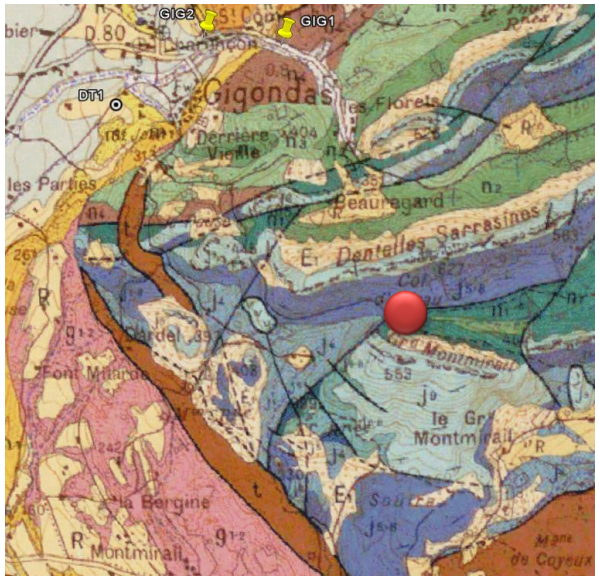
III. Les variations cycliques du climat au Quaternaire s'expliquent par des variations périodiques de paramètres orbitaux (forçages astronomiques) dont les effets ont pu être augmentés par des phénomènes amplificateurs (variations de solubilité du CO2, de l'albédo).

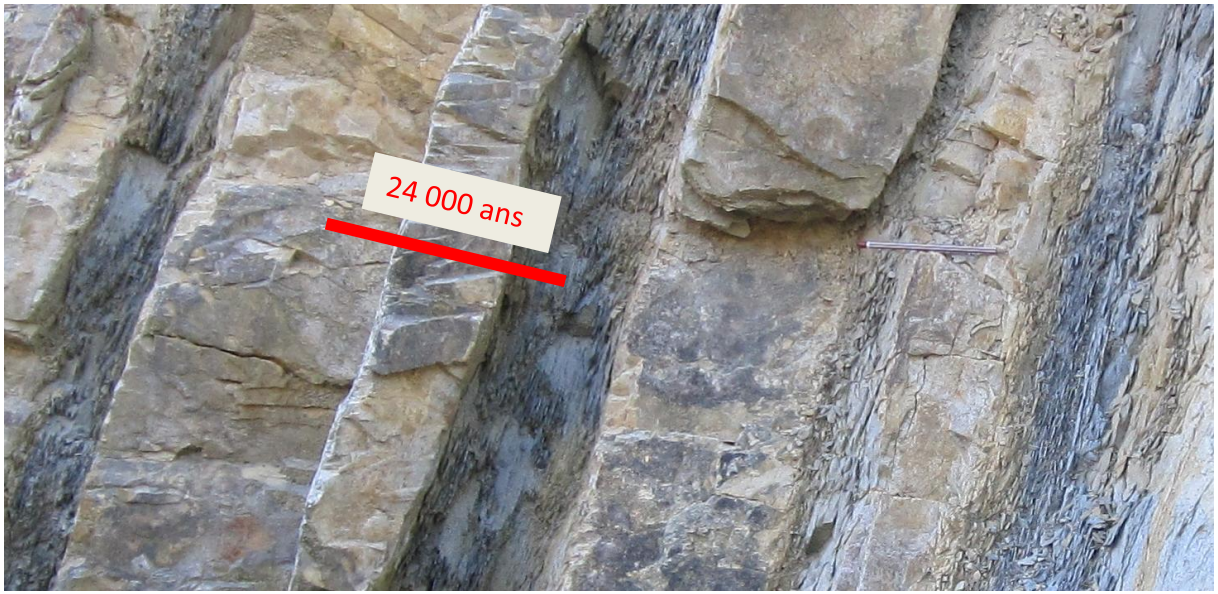
# Les données sédimentaires révèlent une périodicité

## Col d'Alsau, Dentelles de Montmirail, Vaucluse

Alternances marnes et calcaires redressées (Hauterivien, Crétacé inf).
La résolution temporelle est fine: 24 000 ans entre le milieu d'un banc calcaire et 1 banc marneux.

GPS: 44° 9'8.84"N, 5° 1'18.98"E



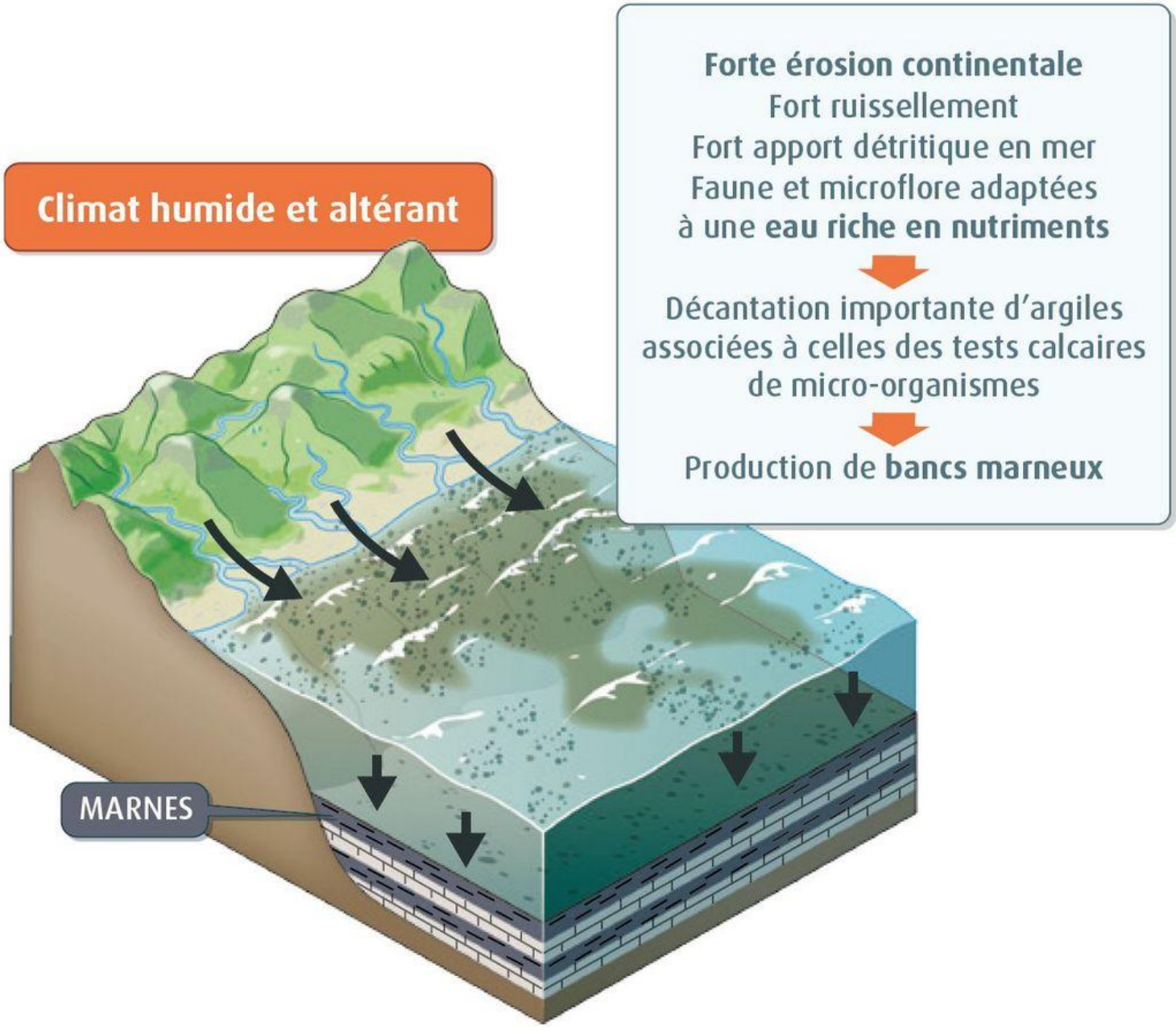
# Les données sédimentaires révèlent une périodicité

**Col d'Alsau, Dentelles de Montmirail, Vaucluse**

Alternances marnes et calcaires redressées (Hauterivien, Crétacé inf).
La résolution temporelle est fine: 24 000 ans entre le milieu d'un banc calcaire et 1 banc marneux.

Alternance régulière marnes / calcaires
→ Changements de conditions de sédimentation rapides et répétées.
→ Causes géodynamiques peu probables
→ Cycles climatiques ???

# Les données sédimentaires révèlent une périodicité



# Les données sédimentaires révèlent une périodicité

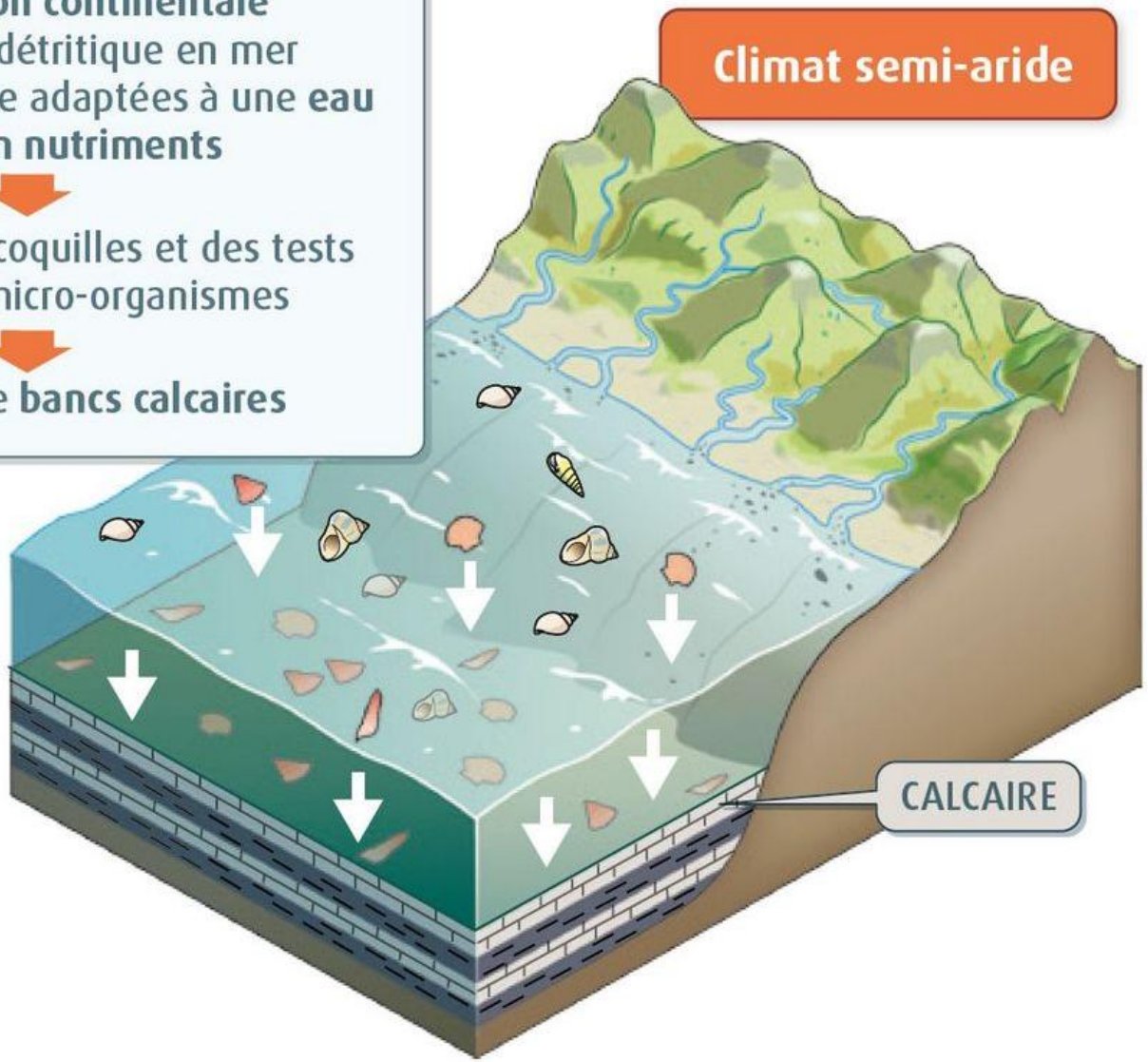
**Peu d'érosion continentale**
Faible apport détritique en mer
Faune et microflore adaptées à une **eau pauvre en nutriments**

↓

Décantation des coquilles et des tests calcaires de micro-organismes

↓

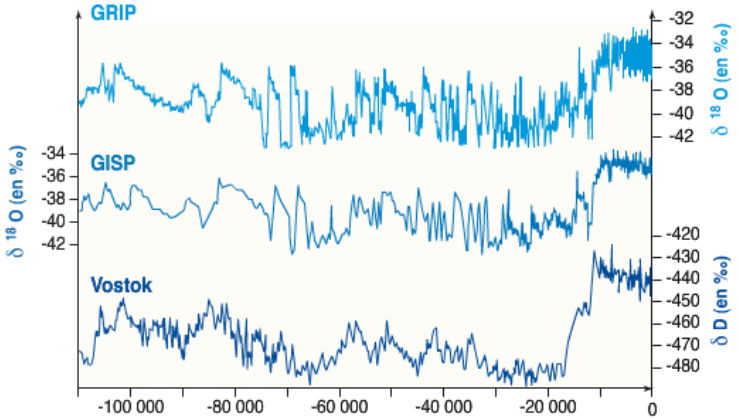
Production de **bancs calcaires**




© Belin Éducation/Humensis, 2020 Manuel SVT Terminale spécialité
© Droits réservés

# Les données isotopiques révèlent une périodicité

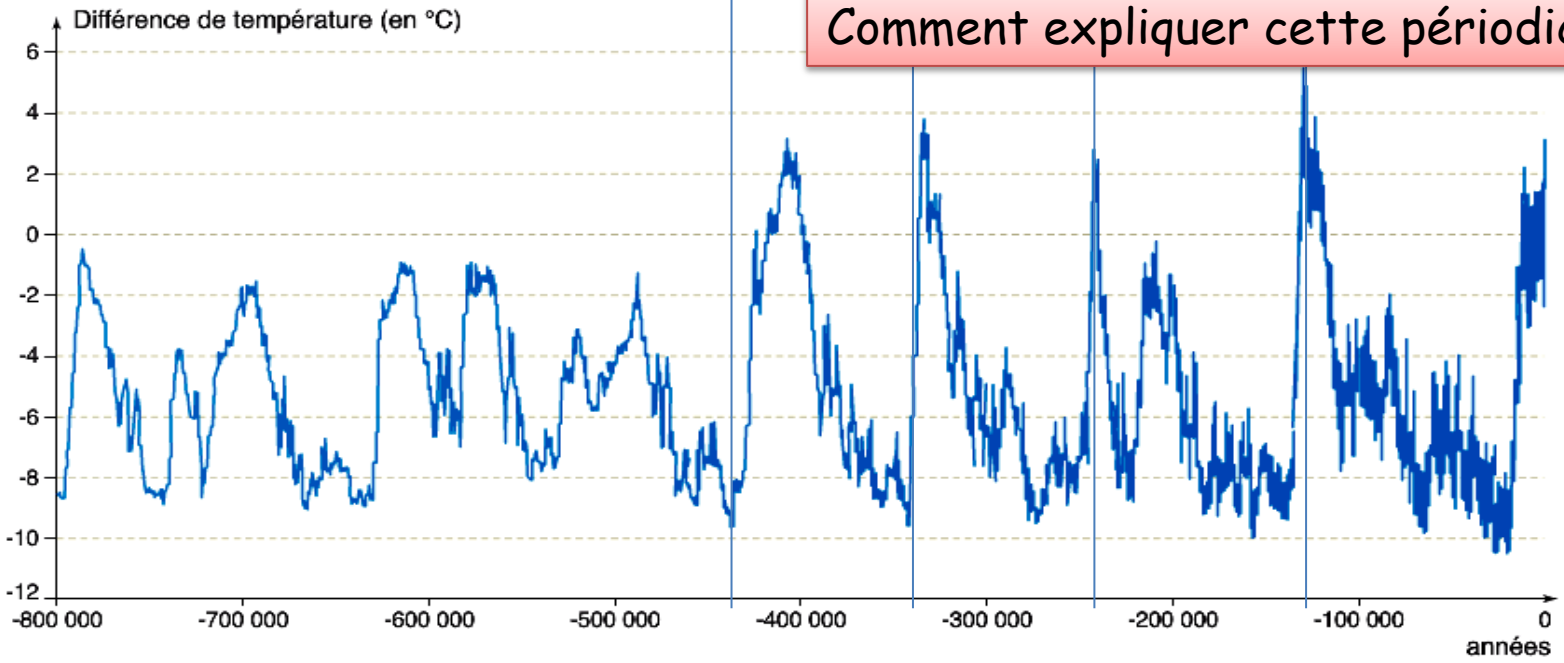
Les *enregistrements ci-contre* présentent les variations du $\delta^{18}O$ et du $\delta D$ (deutérium) dans les glaces extraites par carottage au niveau de trois forages, deux au Groenland (GRIP et GISP) et un en Antarctique (Vostok).



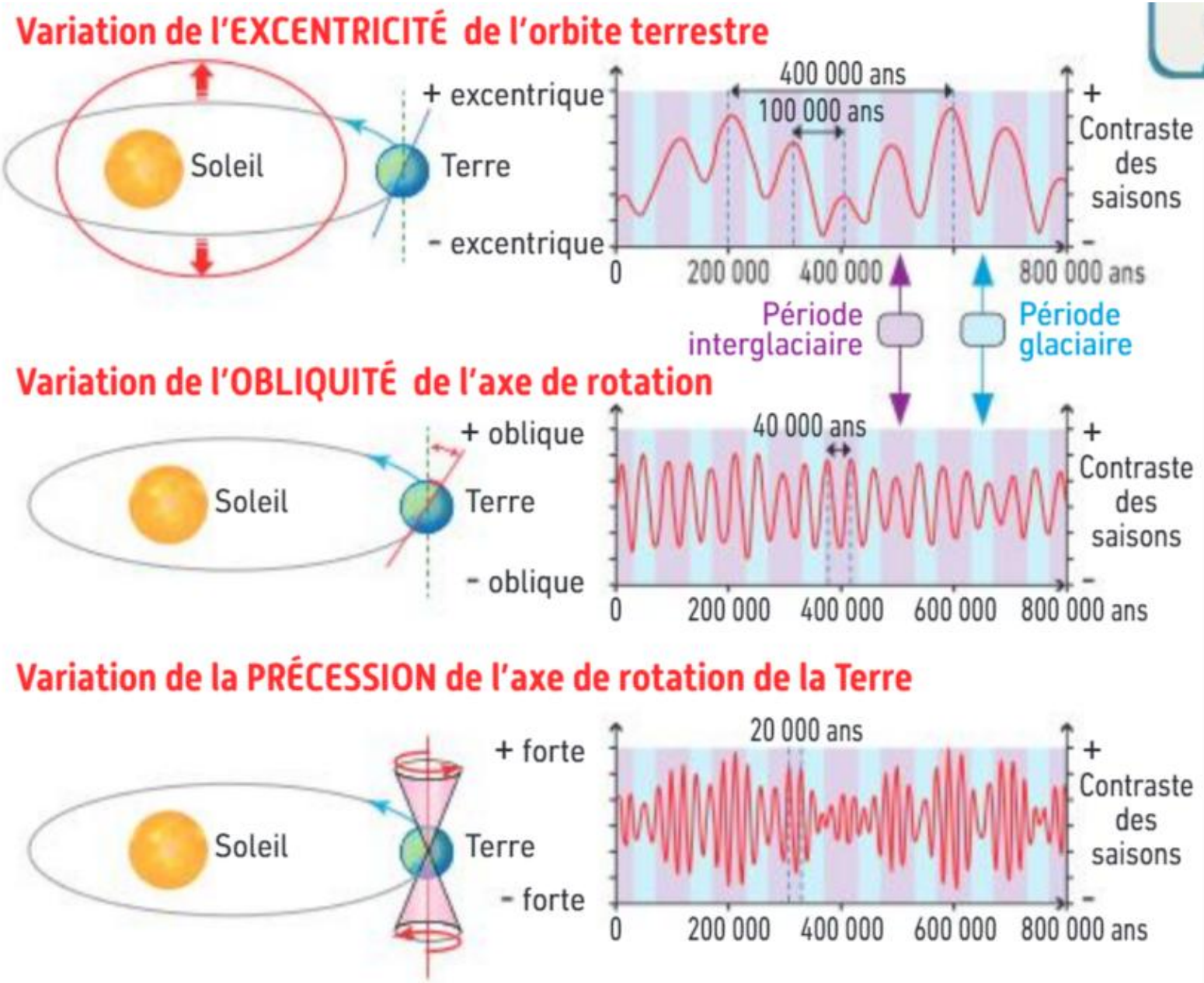

GRIP : Greenland Ice core Project (équipe européenne).
GISP : Greenland Ice Sheet Project (équipe américaine).

100 000 ans

Comment expliquer cette périodicité ?



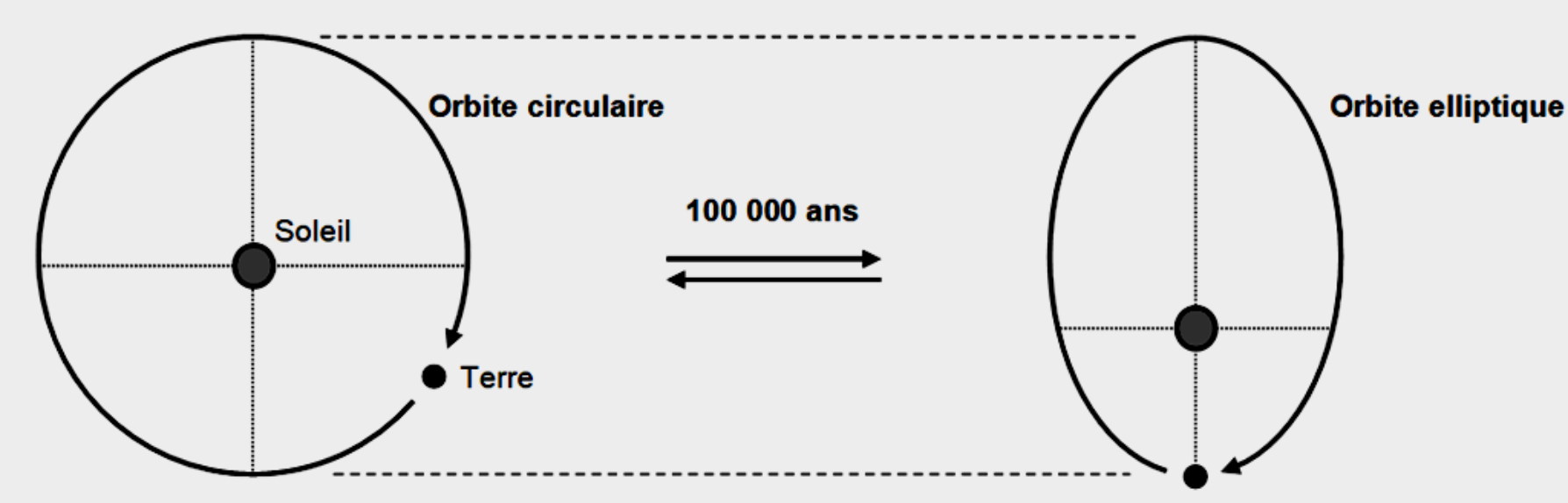
# Variations des paramètres orbitaux



1. **Les rapports isotopiques montrent des variations cycliques coïncidant avec des variations périodiques des paramètres orbitaux de la Terre susceptibles de modifier la quantité d'énergie thermique reçue par la Terre (donc le climat).**

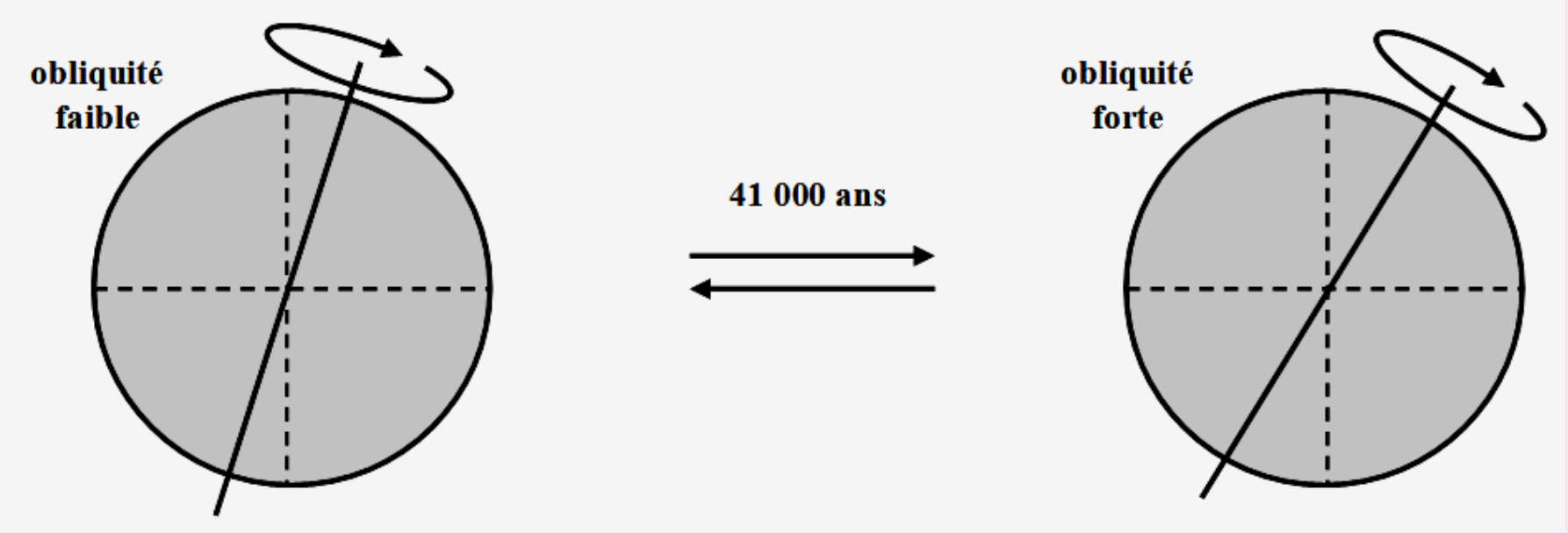
*a. Les changements de position d'astres massifs du système solaire (Jupiter, Saturne) ou d'objets proches de la Terre (Vénus) provoquent de légères modifications des attractions gravitationnelles que subit la Terre. Ces variations engendrent des modifications périodiques des paramètres orbitaux de la Terre (Cycles de Milankovitch) → variations de puissance solaire reçue → modification du bilan radiatif.*

- Excentricité : L'orbite de la Terre autour du Soleil décrit tantôt un cercle, tantôt une ellipse.




→ La tendance elliptique diminue la distance moyenne entre la Terre et le Soleil ce qui a pour effet d'augmenter l'insolation annuelle moyenne.

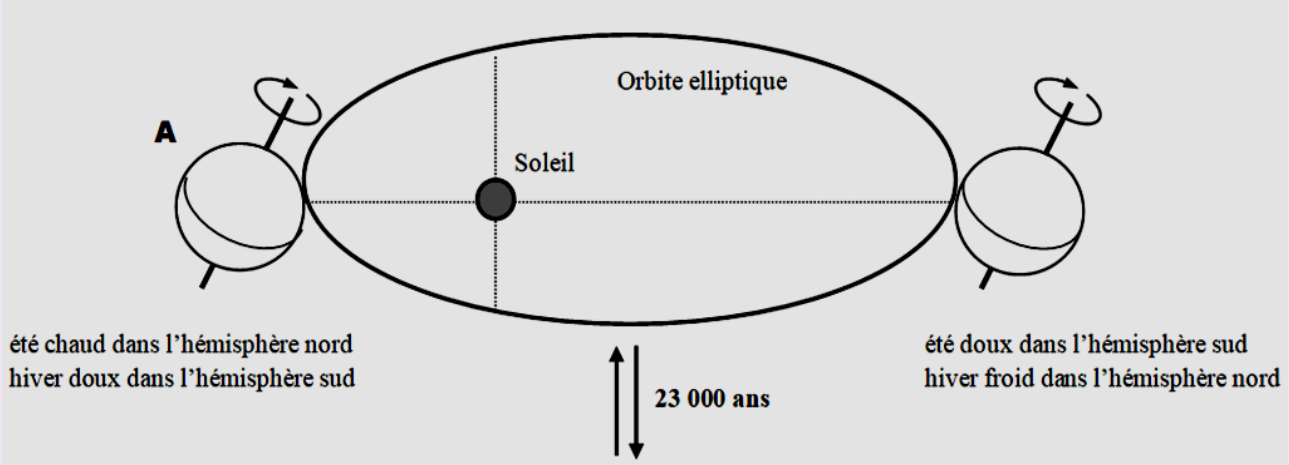
- Obliquité : variation de l'angle d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur elle-même (de 21 à 24°)

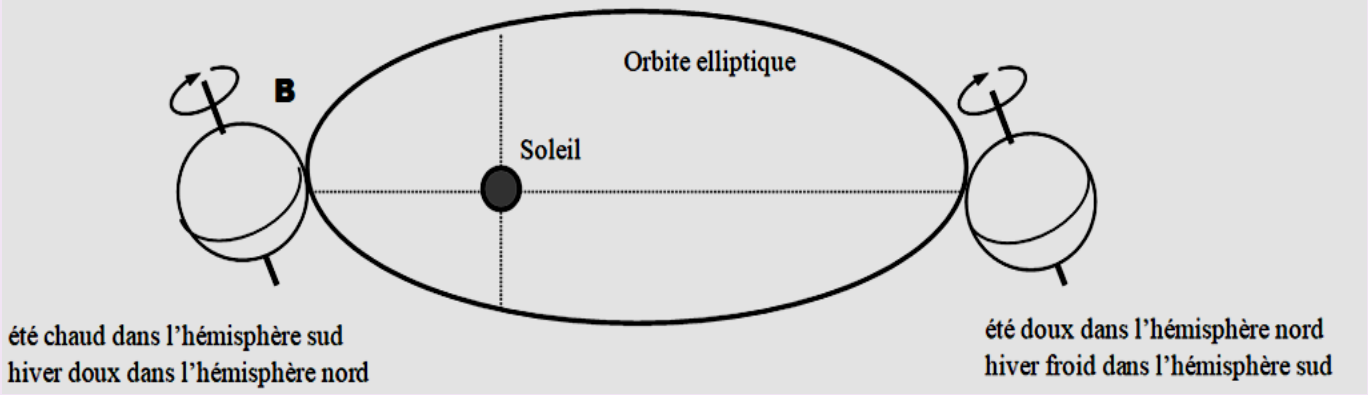



→ plus l'inclinaison est faible plus le contraste saisonnier est faible → étés plus frais → les glaces formées pendant l'hiver ne fondent pas complètement → accumulation de glace qui augmente l'albédo → glaciation

- Précession : Changement de direction de l'axe de rotation (l'axe tourne comme une toupie)

Sur les schémas ci-dessous, lorsque la Terre est au plus proche du Soleil (à gauche) c'est tantôt le pôle nord qui pointe vers le soleil (en A), tantôt le pôle sud (en B).

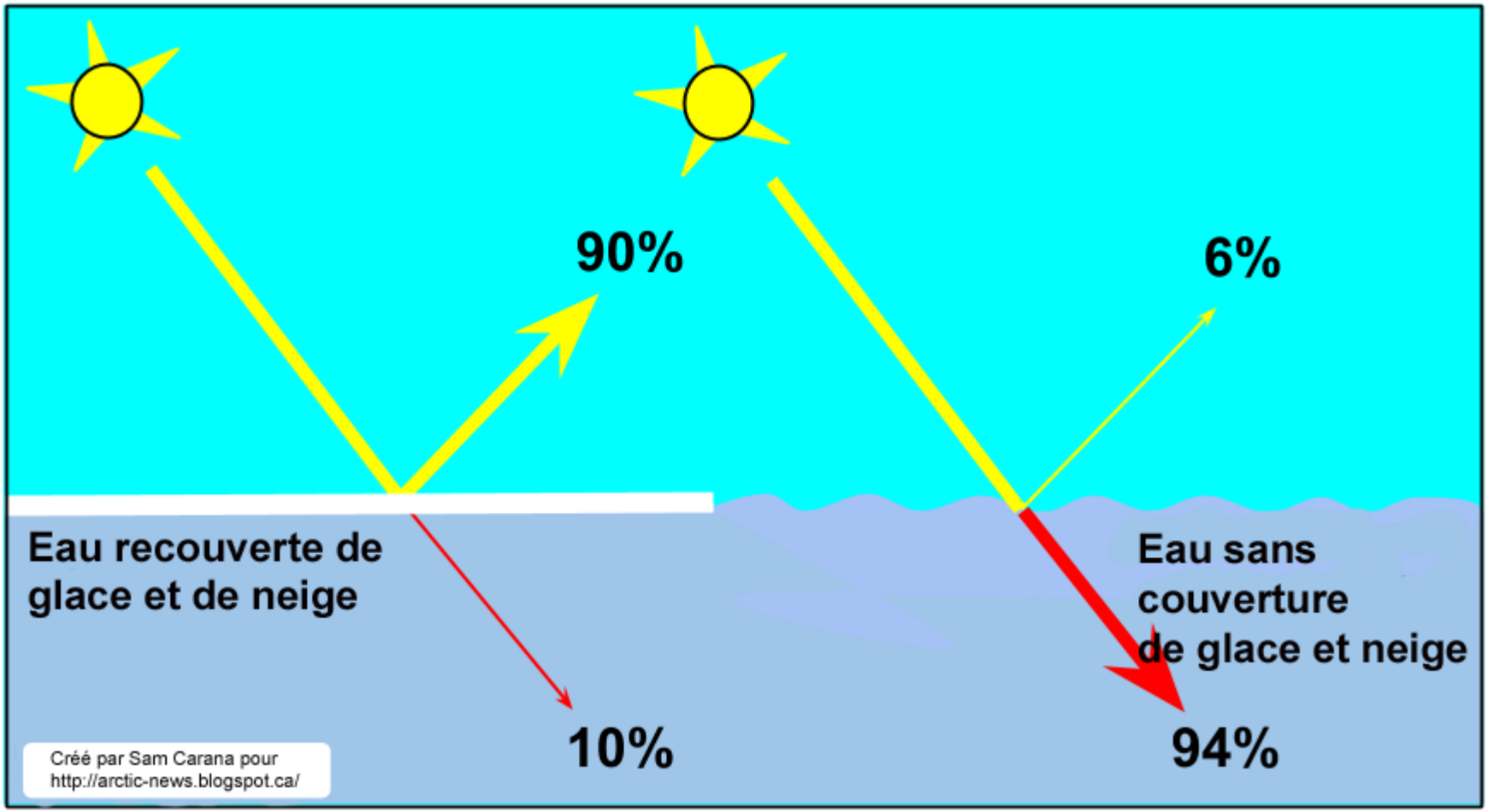


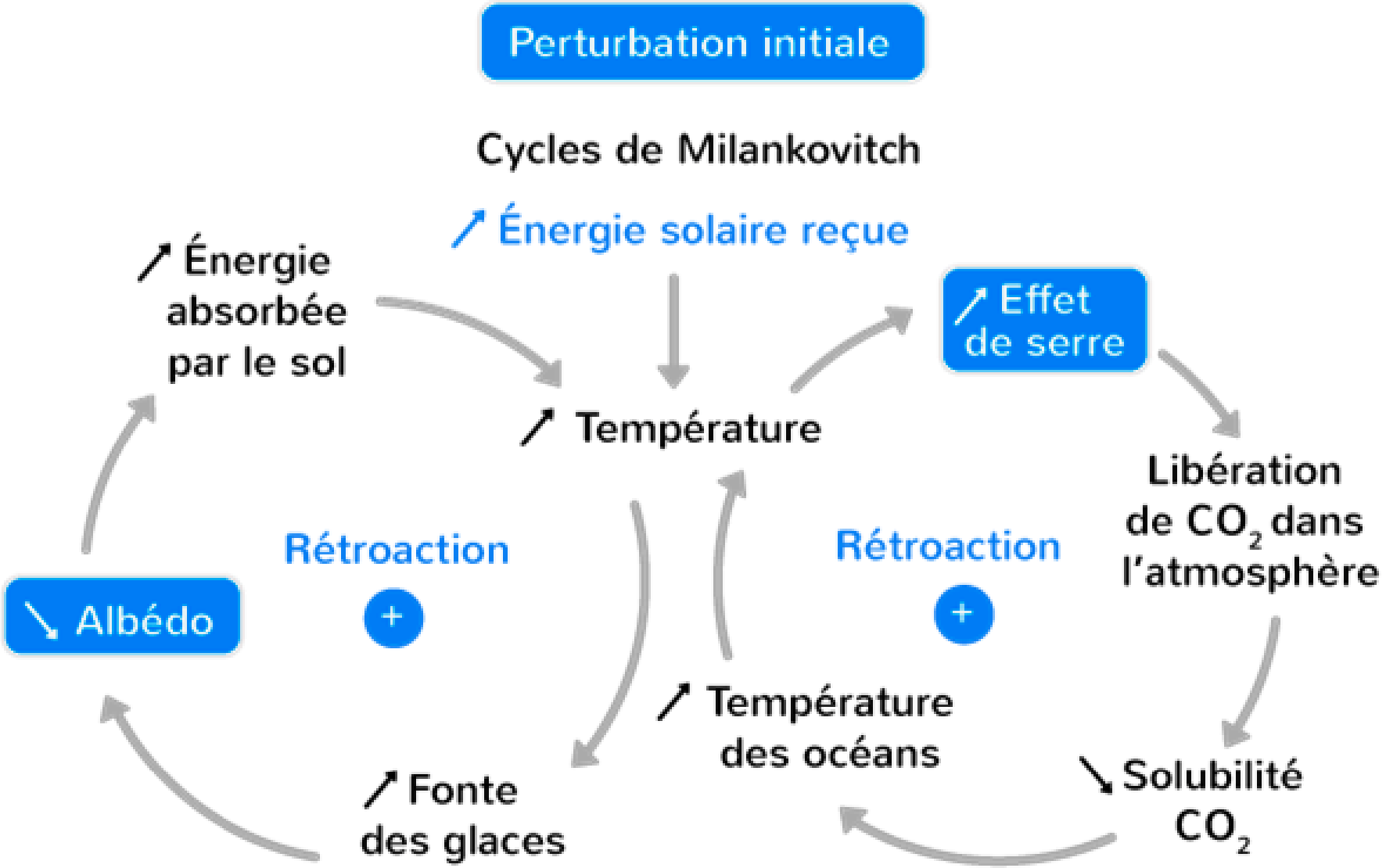

→ Modifie les contrastes saisonniers de chacun des hémisphères

*b. Les variations périodiques des paramètres orbitaux se répètent avec des périodes de 100 000 ans, 41 000 ans et 23 000 ans qui coïncident avec les variations climatiques du quaternaire déduites des données isotopiques.*

# La fonte des glaces diminue l'albédo donc augmente le réchauffement



**Boucles de rétroactions entrainant une sortie de glaciation**



a. Lors d'un refroidissement, initié par une diminution de l'insolation, neige et glace augmentent l'albédo moyen de la Terre. La planète réfléchit davantage le rayonnement solaire, ce qui amplifie son refroidissement. Le réchauffement a des effets inverses. On est donc en présence d'un mécanisme amplificateur (= d'une rétroaction positive).