

# Paléoclimatologues : les historiens du climat



**Anne-Lise Develle**

*Docteur en Géosciences de  
l'Environnement*

*Paléoclimatologue continental*

# Plan de la présentation

① La paléoclimatologie

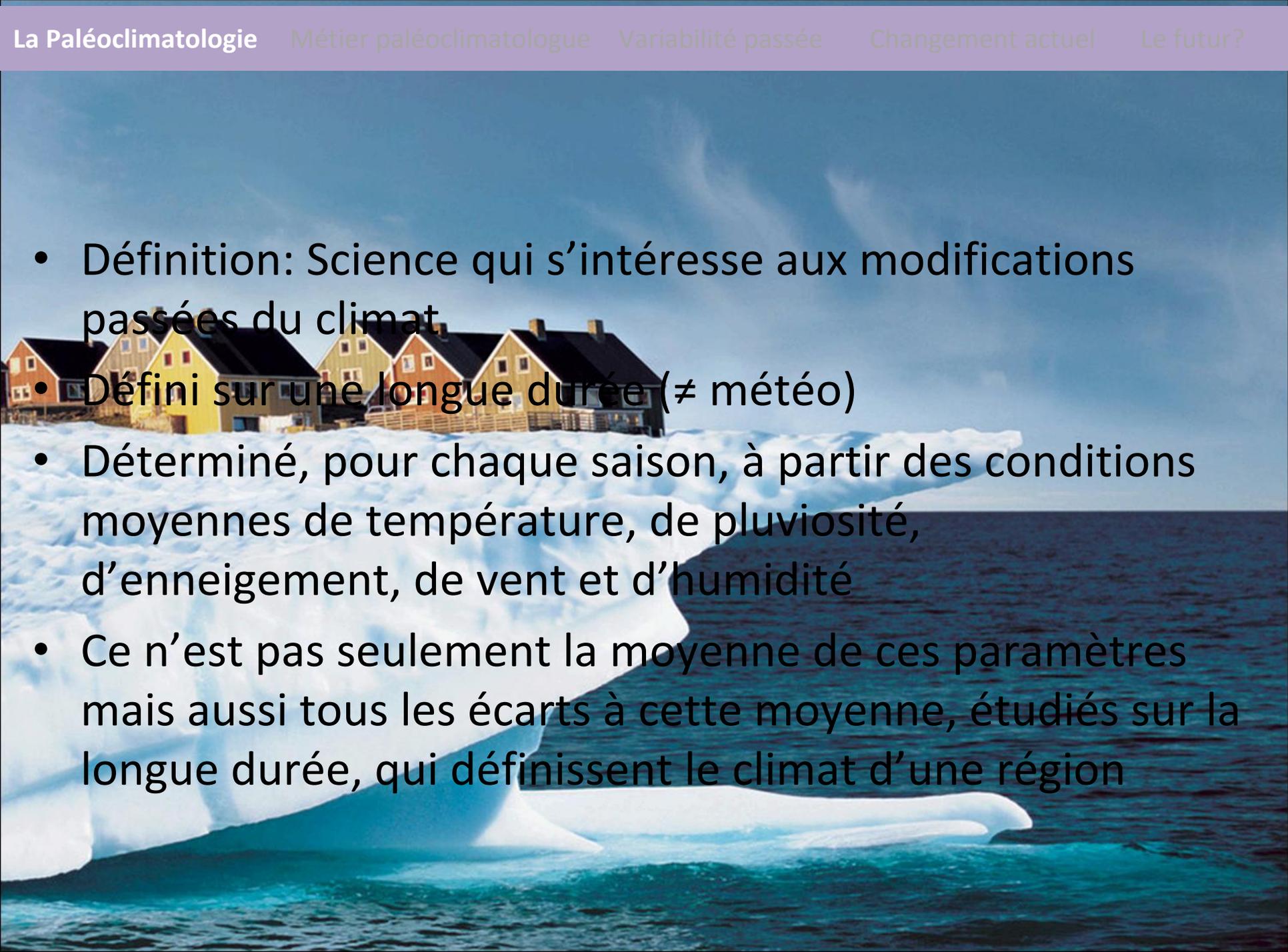
② Metier paléoclimatologue

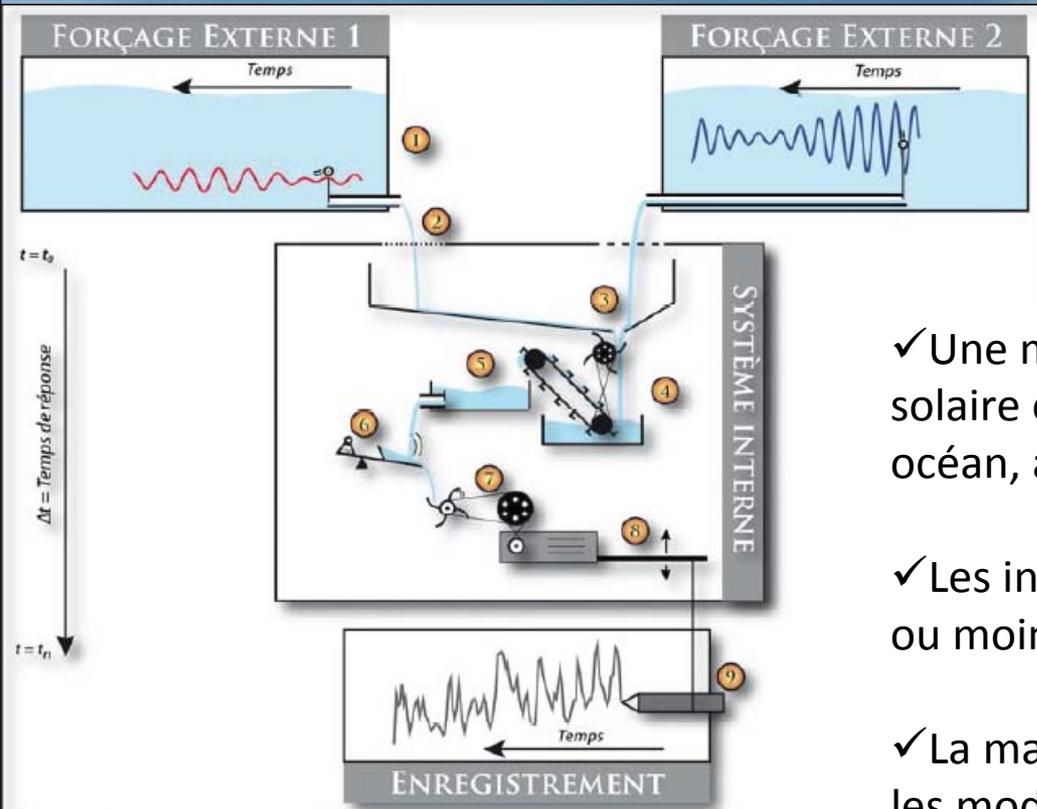
③ La variabilité paléoclimatique passée

④ Le changement climatique actuel

⑤ Et le futur?



- 
- Définition: Science qui s'intéresse aux modifications passées du climat
  - Défini sur une longue durée ( $\neq$  météo)
  - Déterminé, pour chaque saison, à partir des conditions moyennes de température, de pluviosité, d'enneigement, de vent et d'humidité
  - Ce n'est pas seulement la moyenne de ces paramètres mais aussi tous les écarts à cette moyenne, étudiés sur la longue durée, qui définissent le climat d'une région

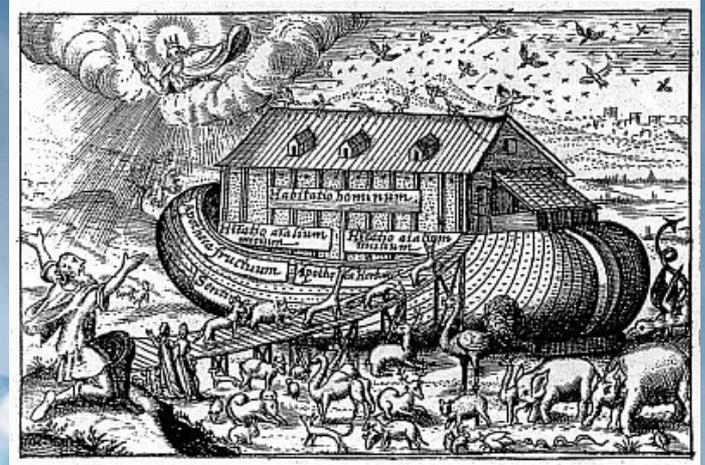
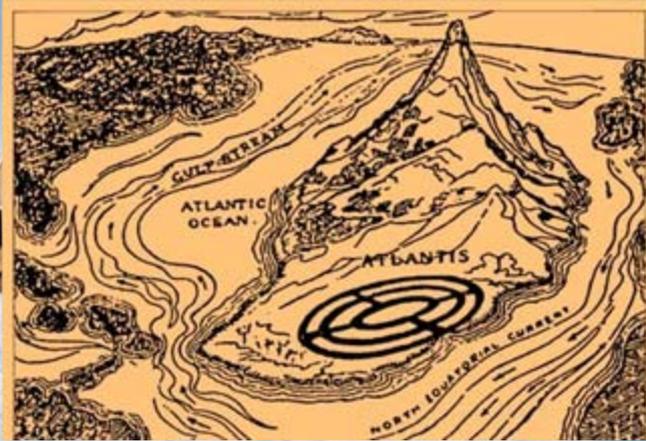


## La machine climatique

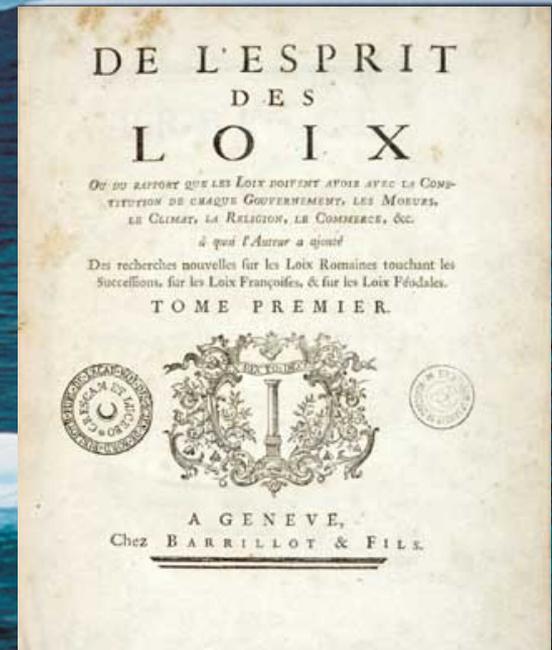
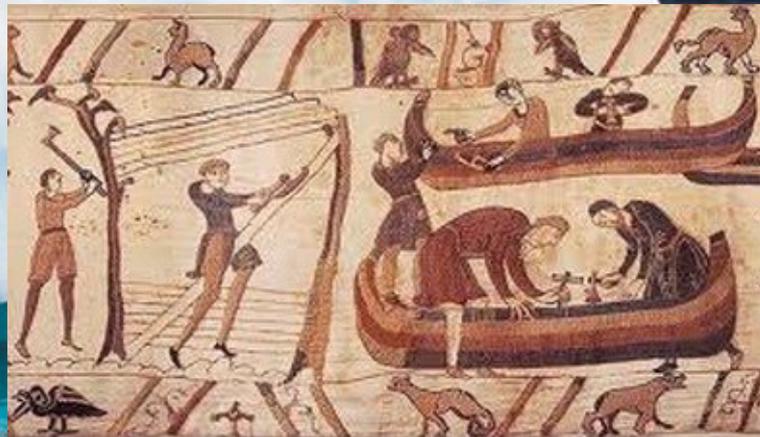
- ✓ Une machine complexe dans laquelle l'énergie solaire est à l'origine des interactions entre océan, atmosphère, continent, glace.
- ✓ Les indicateurs (proxy) climatiques y sont plus ou moins sensibles.
- ✓ La machine subit différents forçages externes, les modifie, possède elle-même des interactions
- ✓ Le signal d'un indicateur paléoclimatique donné sera plus ou moins sensible et fidèle aux réactions de l'ensemble du système

# Une science relativement jeune

Références anciennes : le Déluge, mythe de l'Atlantide



Montesquieu. « L'esprit des lois »



Louis Agassiz (1807-1873) – Première théorie scientifique sur l'idée d'une grande glaciation en Europe (1837).

Basée sur l'observation de blocs erratiques et stries glaciaires -> traces d'activités glaciaires anciennes.



Penck and Brückner, 1909. Théorie pluri-glaciaire au cours du Quaternaire (glaciations Günz, Mindel, Riss et Würm)

Objectifs :

- mieux **comprendre les climats du passé** et leur impact et rétroactions sur les écosystèmes.
- **Envisager et préparer l'avenir** dans un contexte de changement climatique actuel.

**Défis et méthodes**

1. **Objet d'étude**

2. **Chronologie**

3. **Outils de reconstruction  
(variabilité climatique)**

+ jeune

Haut



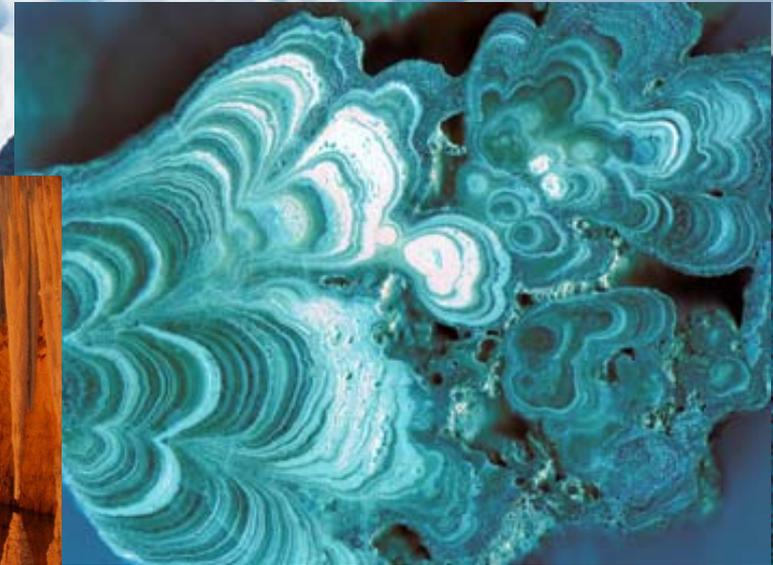
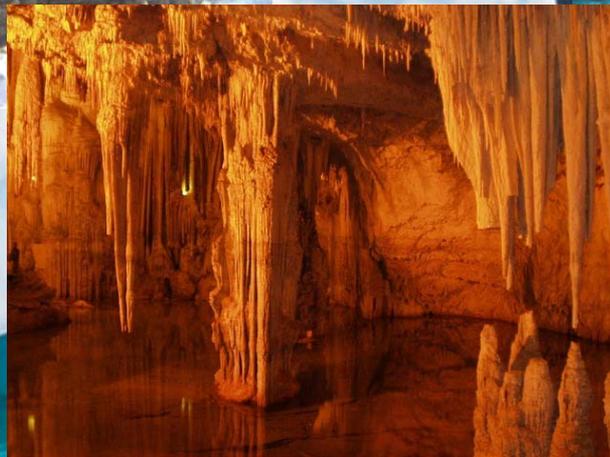
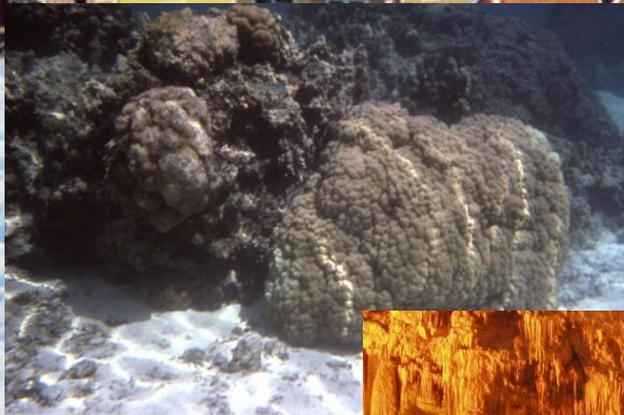
+ vieux

Bas

## Objets d'études

- Coraux, stalagmites, cernes d'arbres ou travertins

Enregistrements haute résolution  
(laminations annuelles)



## Objets d'études

- Sédiments/roches d'origine lacustre ou marine, les carottes de glace



# Méthodes de datation

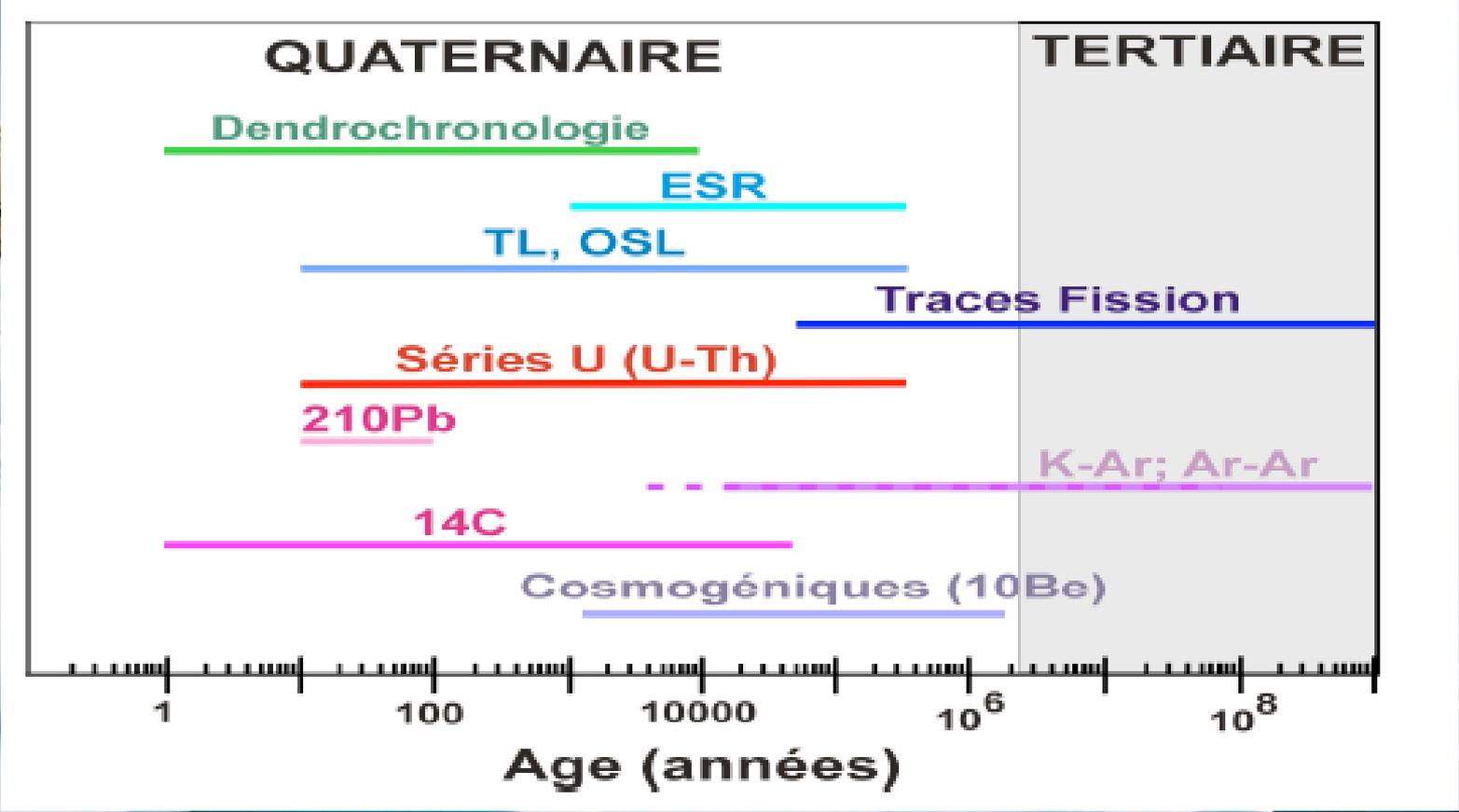
## Datations radiométriques ou absolues

- Isotopes radioactifs
  - Naturels cosmogéniques
  - Naturels terrestres
  - Artificiels
- Radiations
- Réactions chimiques
- Varves
- Dendrochronologie

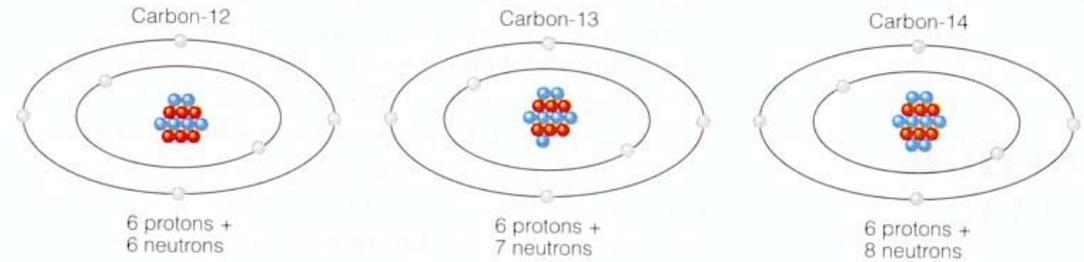
## Corrélations stratigraphiques : datations relatives

- Paléomagnétisme
- Isotopes de l'oxygène
- Téphrostratigraphie
- Biostratigraphie

Toutes les méthodes de datation ne sont pas adaptées aux mêmes échelles de temps....



## Le radiocarbone ou $^{14}\text{C}$



**Figure 8.11 Naturally Occurring Isotopes of Carbon** The three isotopes of carbon. Note that in each case there are six protons in the nucleus and six electrons in the energy-level shells. The differences lie in the numbers of neutrons in the nucleus.

$^{14}\text{C}$  est un isotope instable du carbone

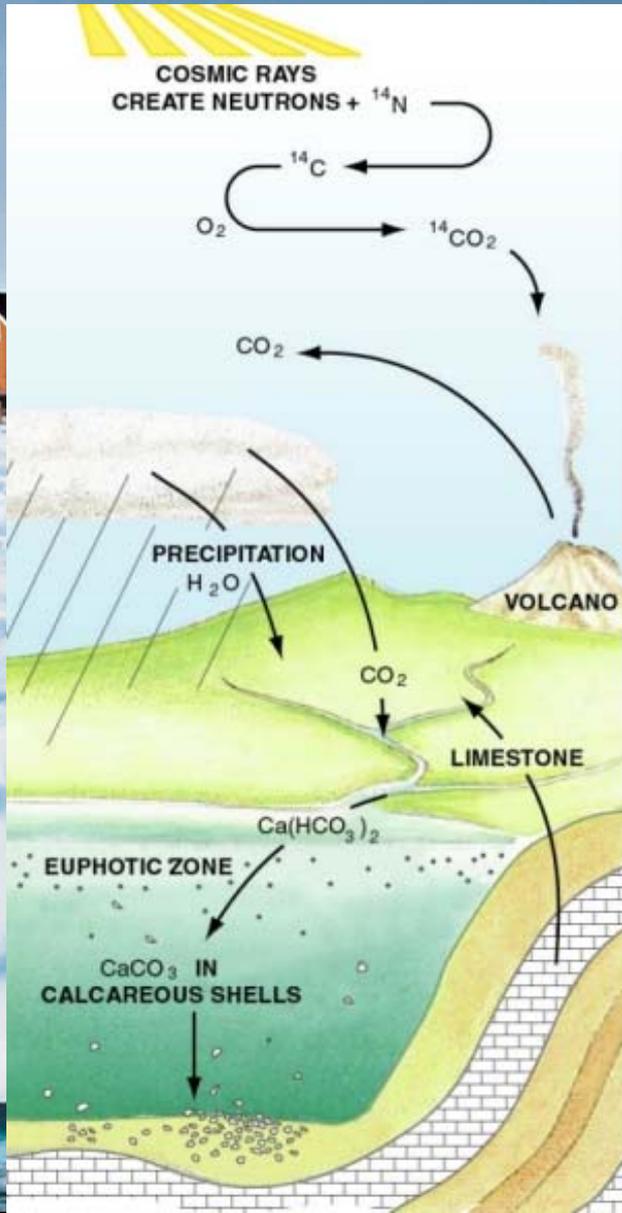
=> se désintègre avec émission d'un rayonnement  $\beta^-$

=> on obtient à nouveau du  $^{14}\text{N}$ :



désintégration du  $^{14}\text{C}$  se réalise selon une fonction exponentielle du temps qu'on appelle **la demi vie** (= 5570 ans)

=> il faut ce laps de temps pour que la moitié du  $^{14}\text{C}$  initial se désintègre en  $^{14}\text{N}$ .



## Où trouver le $^{14}\text{C}$ ?

Dans l'atmosphère :

Réaction rapide avec oxygène atmosphérique

=> formation de  $^{14}\text{CO}_2$ .

=> incorporation de  $^{14}\text{C}$  dans la chaîne alimentaire (photosynthèse) et dans les réactions de précipitations des carbonates  $(\text{CaHCO}_3)_2$  comme le  $^{12}\text{C}$

**Le  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  de la matière vivante et des carbonates = celui de l'atmosphère.**

Matériel utilisé : bois fossilisé, de la tourbe, des pollens, carbonates organiques ou inorganiques

## A la mort de l'organisme,

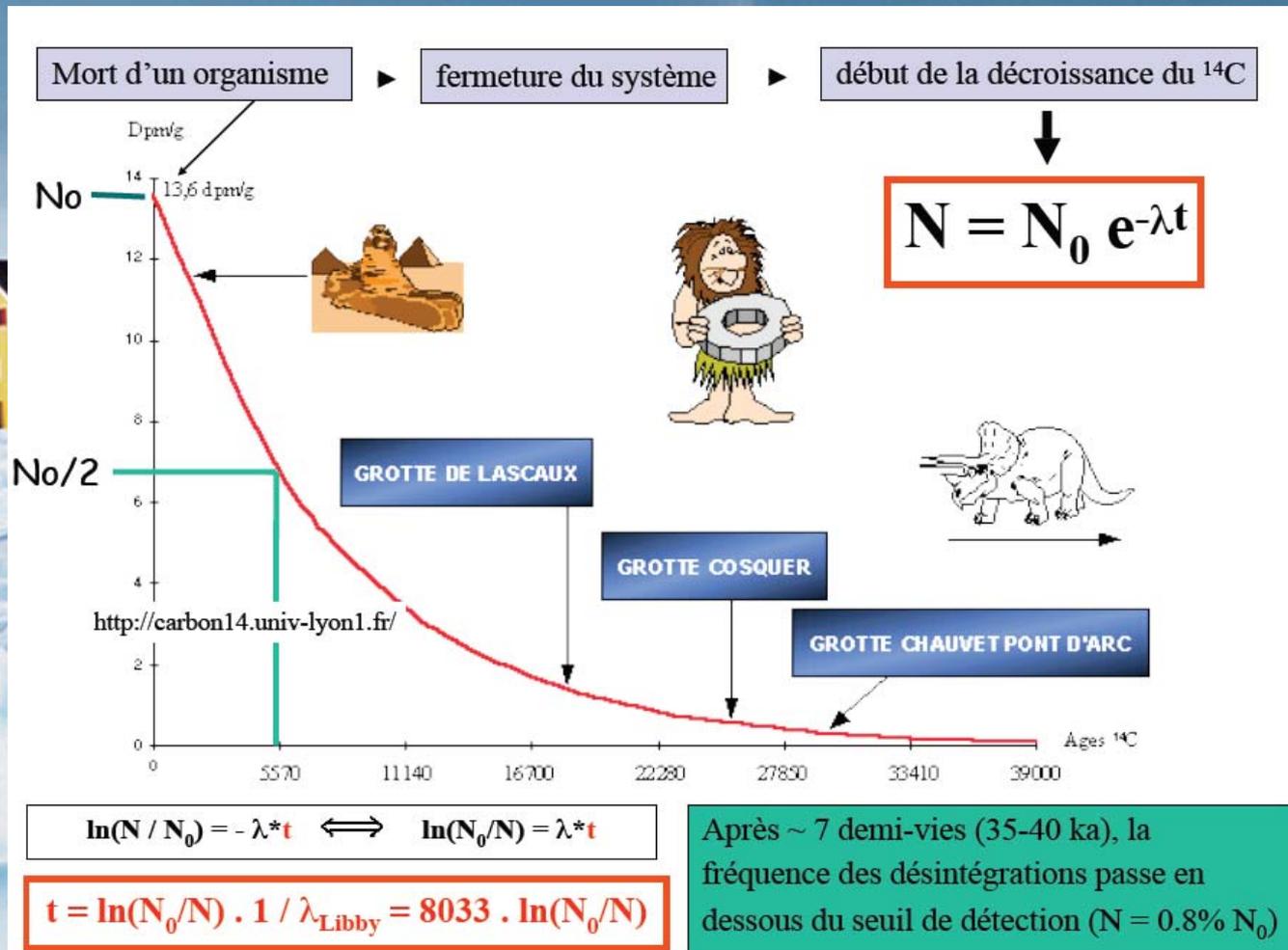
- Les échanges avec l'atmosphère sont coupés et la décroissance du  $^{14}\text{C}$  commence avec une activité initiale ( $A_0$ ) qui est celle de l'atmosphère au temps  $t$  de a vie de l'organisme.

En théorie, on peut dater des matériaux contenant du carbone 14 en utilisant la loi de décroissance radioactive :

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ d'où } t = \ln(A/A_0)/\lambda$$

où  $A$  est l'activité en  $^{14}\text{C}$  de l'échantillon,  $A_0$  est l'activité initiale de l'échantillon et  $\lambda$  est la constante de désintégration du  $^{14}\text{C}$ .





**Période d'utilisation du carbone 14 : environ 50 000 ans**

## Datation relative : exemple du paléomagnétisme

Variations du champ magnétique terrestre (paléomagnétisme, magnétostratigraphie)

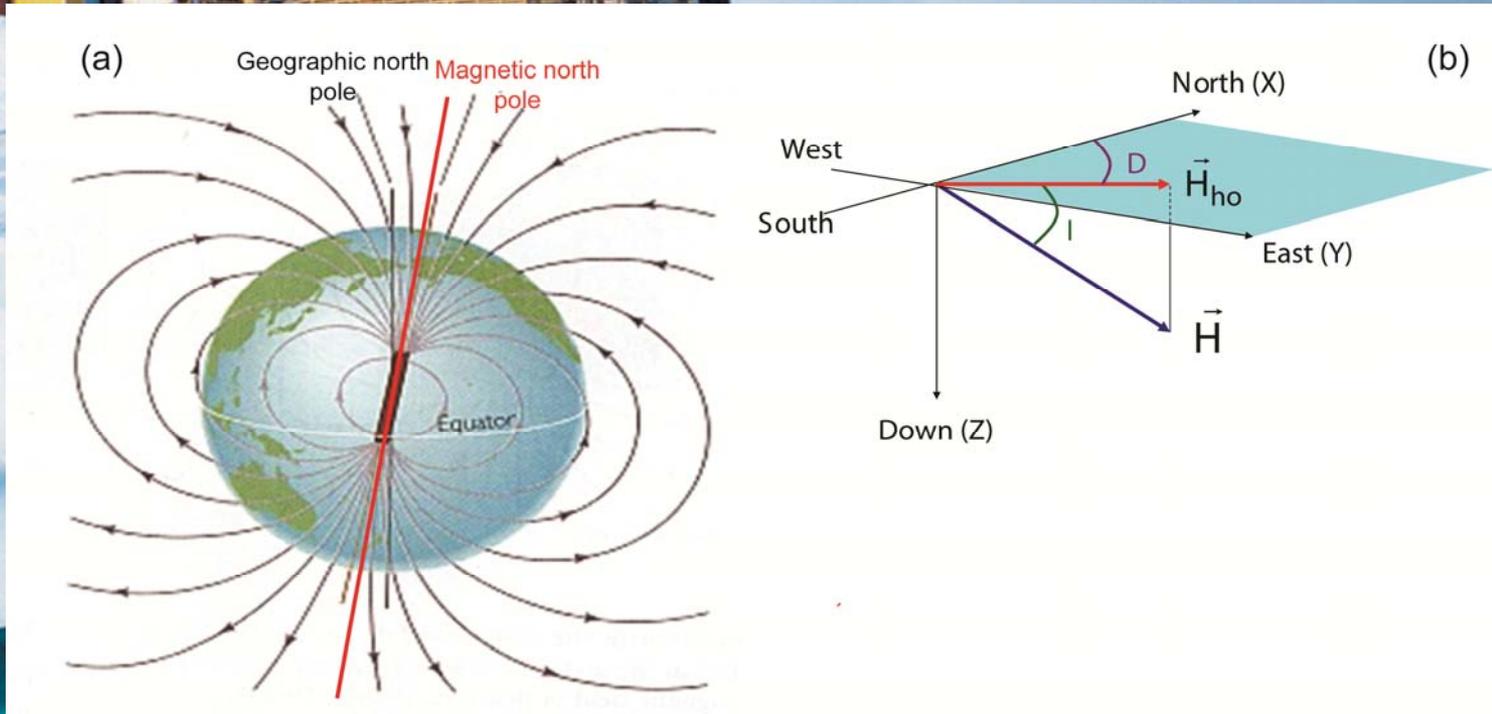
Deux méthodes couvrant deux échelles de temps différentes

Plusieurs millions d'année :  
corrélations des inversions  
du champs géomagnétique

Plusieurs millier jusqu'à un  
million d'années : excursions  
du champs géomagnétique

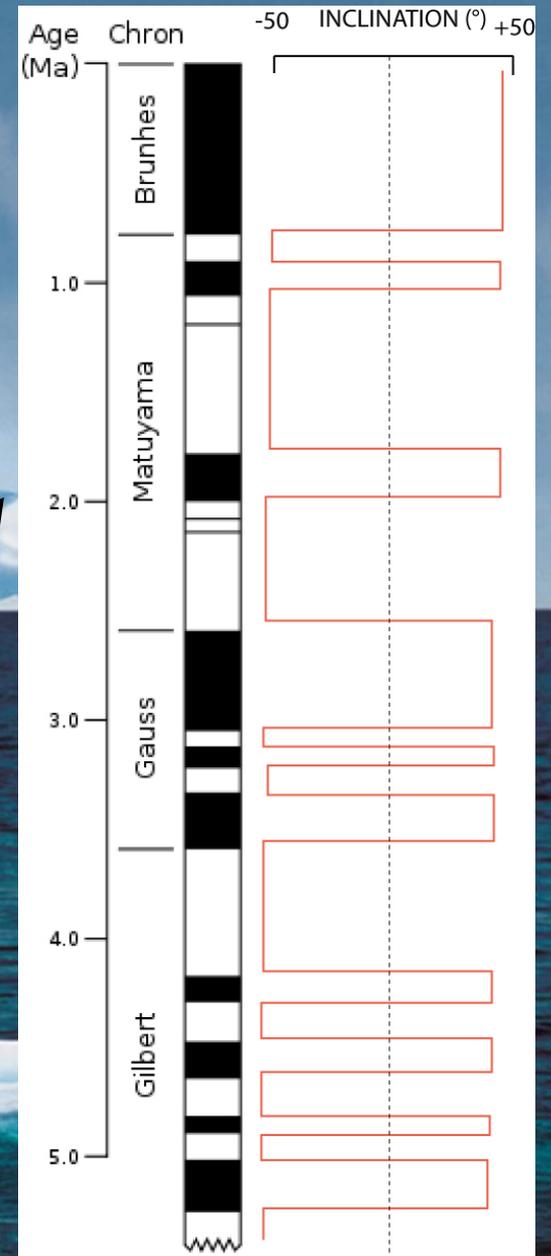
**Mesure** : sur carottes de sédiments ou de roche avec un magnétomètre cryogénique.

**Paramètres mesurés** : Aimantation rémanente naturelle (reflet de la paléointensité du champ magnétique) et inclinaison (représente la direction du champ magnétique).



- Au cours des temps géologiques, les directions du champ magnétique s'inversent plusieurs fois.
  - Polarité normales/inverses
- L'inclinaison s'inverse donc également

✓ Exemple dans l'hémisphère nord (inclinaison positive en polarité normale)  
✓ Latitude 34°N donne une inclinaison de 50°  
✓ Polarité normale: inclinaison mesurée +50°  
✓ Polarité inverse : inclinaison mesurée -50°



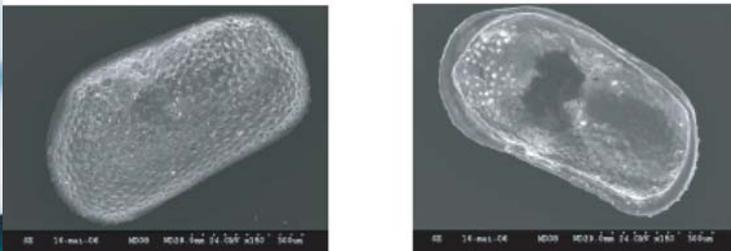
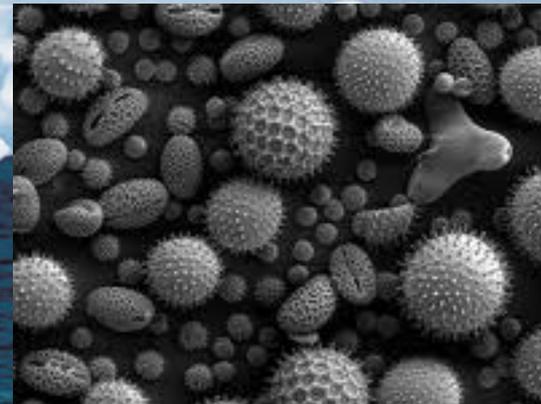
## Outils de reconstruction : Indicateurs biologiques

Pollens :

- De la dizaine d'année au millions d'années
- Assemblages végétaux à l'instant t
- Traitement statistique et modélisation -> modèles de végétation

Température  
Pluviométrie  
Salinité des eaux

*Selon la même démarche :  
diatomées, ostracodes,  
foraminifères....*



# Indicateurs sédimentologiques

Teneurs en :

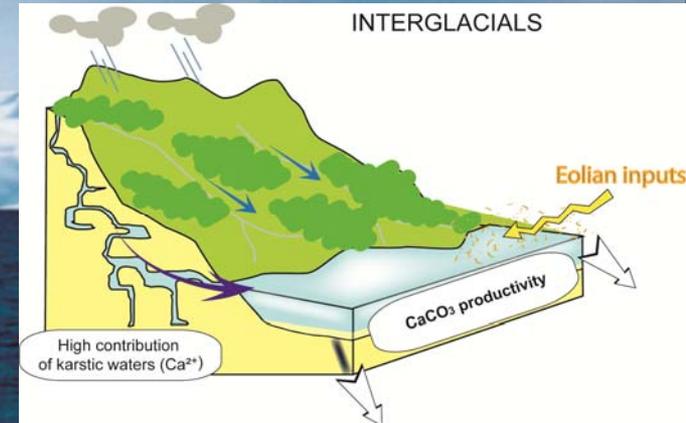
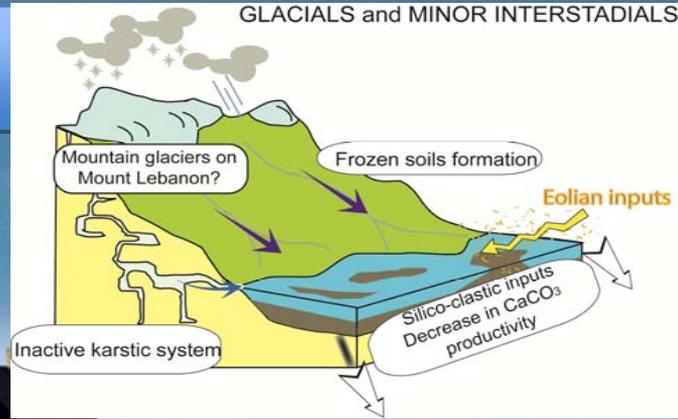
- Carbonate
- Matière organique
- Magnétisme des sédiments
- Granulométrie
- Phases minérales majeures....



- ✓ Architecture et nature des sédiments
- ✓ Proximité et intensité des apports
- ✓ Calculs de flux sédimentaires
- ✓ Identification des sources



- Erosion/Comblement du bassin versant
- Pluviométrie
- Circulations atmosphériques
- Productivité lacustre



## Indicateurs géochimiques

Isotopes stables (Oxygène  $^{18}\text{O}$ ,  
Carbone  $^{13}\text{C}$ )

Éléments majeurs (Aluminium,  
Calcium, Silice, Potassium etc...)

Isotopes radiogénique lourds  
(Néodyme, Strontium,  
Plomb)....

Pluviométrie et température

Processus environnementaux

Changements de circulation  
atmosphérique, traçage des  
sources de sédiments

# Isotopes stables de l'Oxygène

Des isotopes sont des atomes du même élément chimique qui ne diffèrent que par le nombre de neutrons de leur noyau

Deux isotopes n'ont pas la même masse atomique

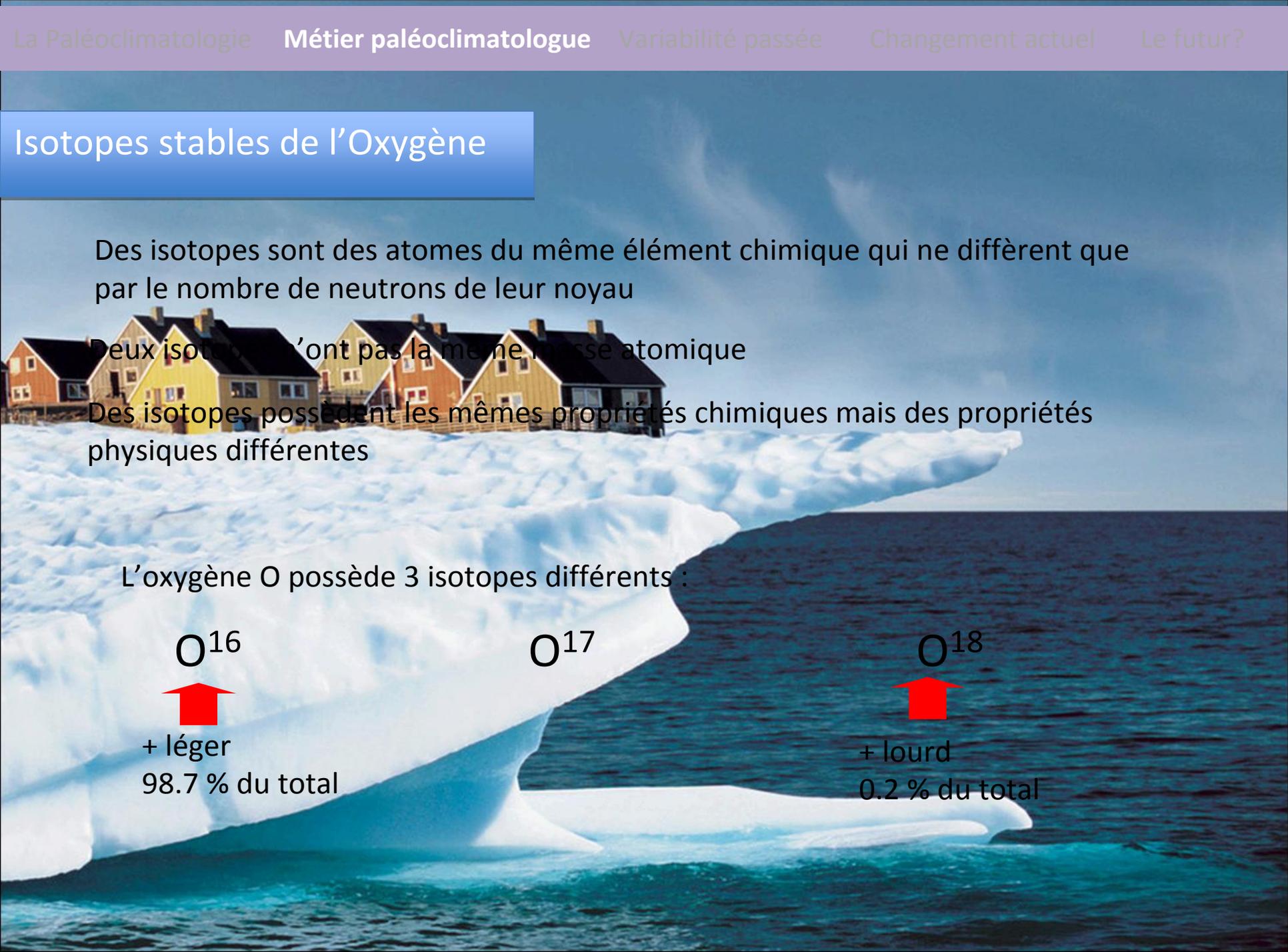
Des isotopes possèdent les mêmes propriétés chimiques mais des propriétés physiques différentes

L'oxygène O possède 3 isotopes différents :

$O^{16}$   
↑  
+ léger  
98.7 % du total

$O^{17}$

$O^{18}$   
↑  
+ lourd  
0.2 % du total



# Isotopes stables de l'Oxygène

Le rapport  $O^{18}/O^{16}$  actuel moyen de l'eau de mer  $H_2O$  est de 1/500 soit  $2 \cdot 10^{-3}$

On constate que, dans les glaces des calottes polaires, ce rapport est systématiquement légèrement plus faible

$$(O^{18}/O^{16})_{\text{glace}} = 1,96 \cdot 10^{-3}$$

Cela signifie qu'il existe un processus naturel qui conduit à un fractionnement de ce rapport

Ce fractionnement se note :

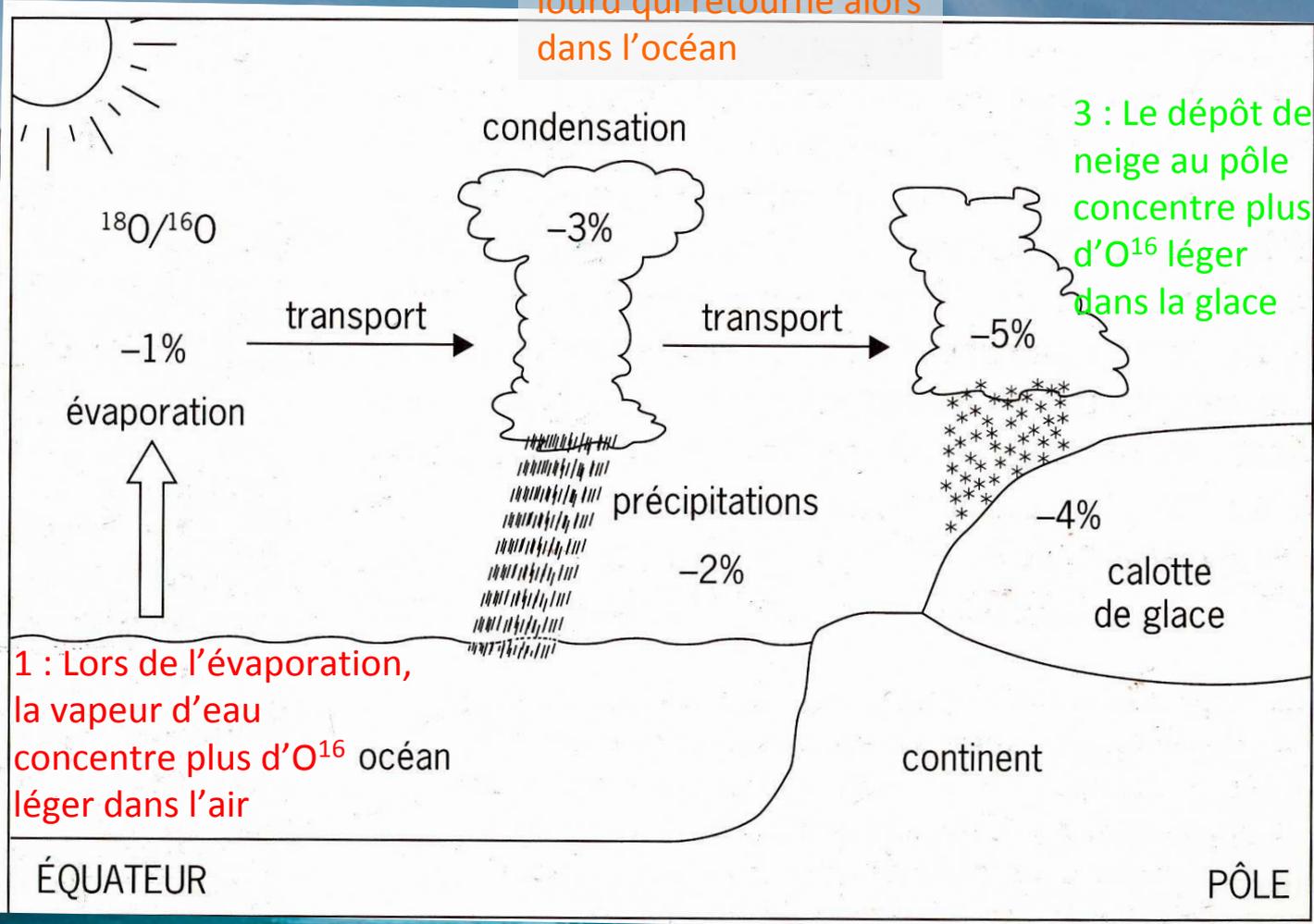
$$\delta^{18}O \text{ en } \text{‰} = \left[ \frac{\left( \frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{\text{échantillon}}}{\left( \frac{^{18}O}{^{16}O} \right)_{\text{PDB}}} - 1 \right] \times 1000$$

Cela est lié à une différence de propriétés physiques entre ces 2 isotopes de l'oxygène

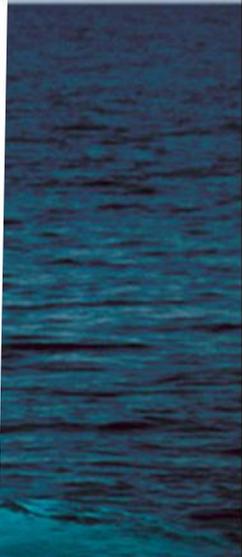
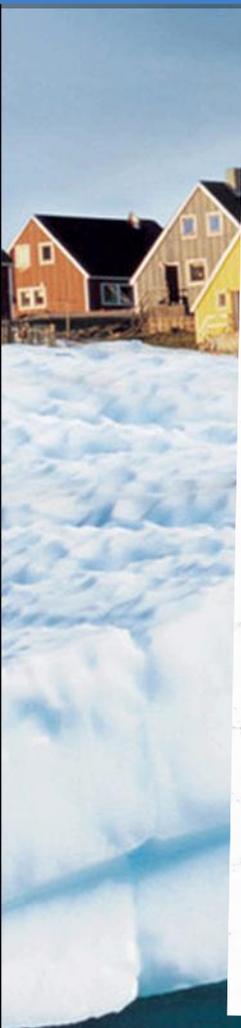
# Isotopes stables de l'Oxygène

2 : Les précipitations entraînent prioritairement l'O<sup>18</sup> lourd qui retourne alors dans l'océan

3 : Le dépôt de neige au pôle concentre plus d'O<sup>16</sup> léger dans la glace



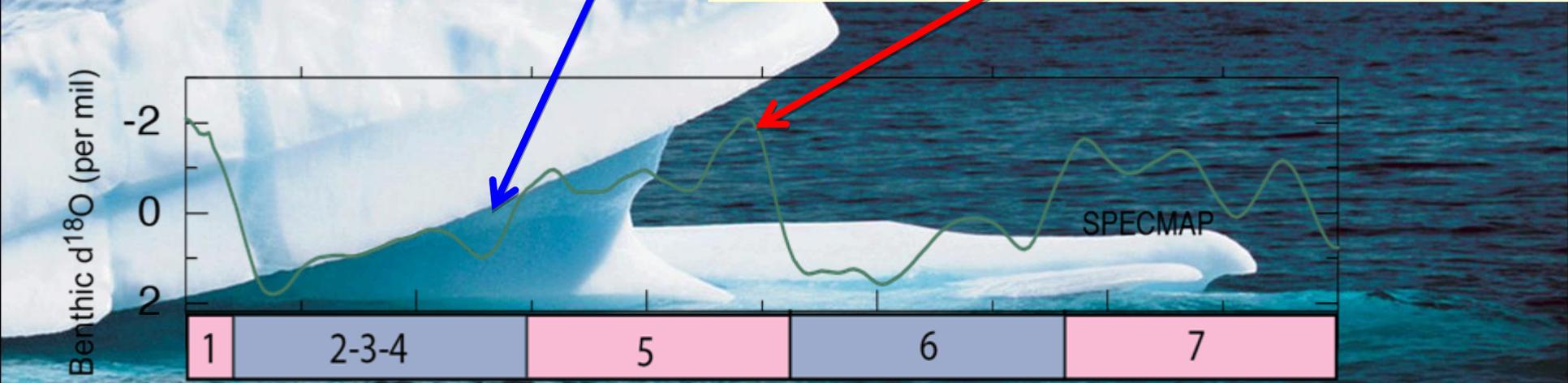
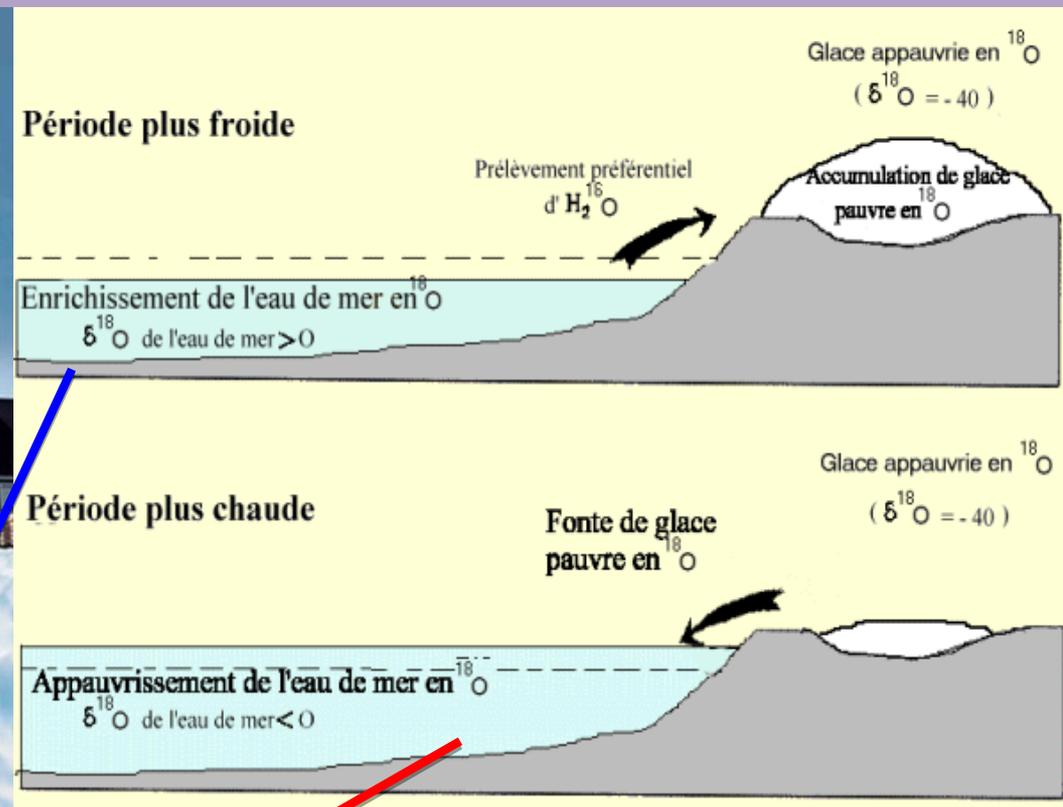
1 : Lors de l'évaporation, la vapeur d'eau concentre plus d'O<sup>16</sup> léger dans l'air



# Isotopes stables de l'Oxygène

Pendant les périodes froides, on va favoriser le dépôt de neige et de glace, que ce soit aux pôles ou dans les glaciers de montagne

-> On va alors appauvrir le réservoir d'eau océanique en  $^{16}\text{O}$  en stockant de plus en plus cet isotope dans les neiges et les glaces polaires



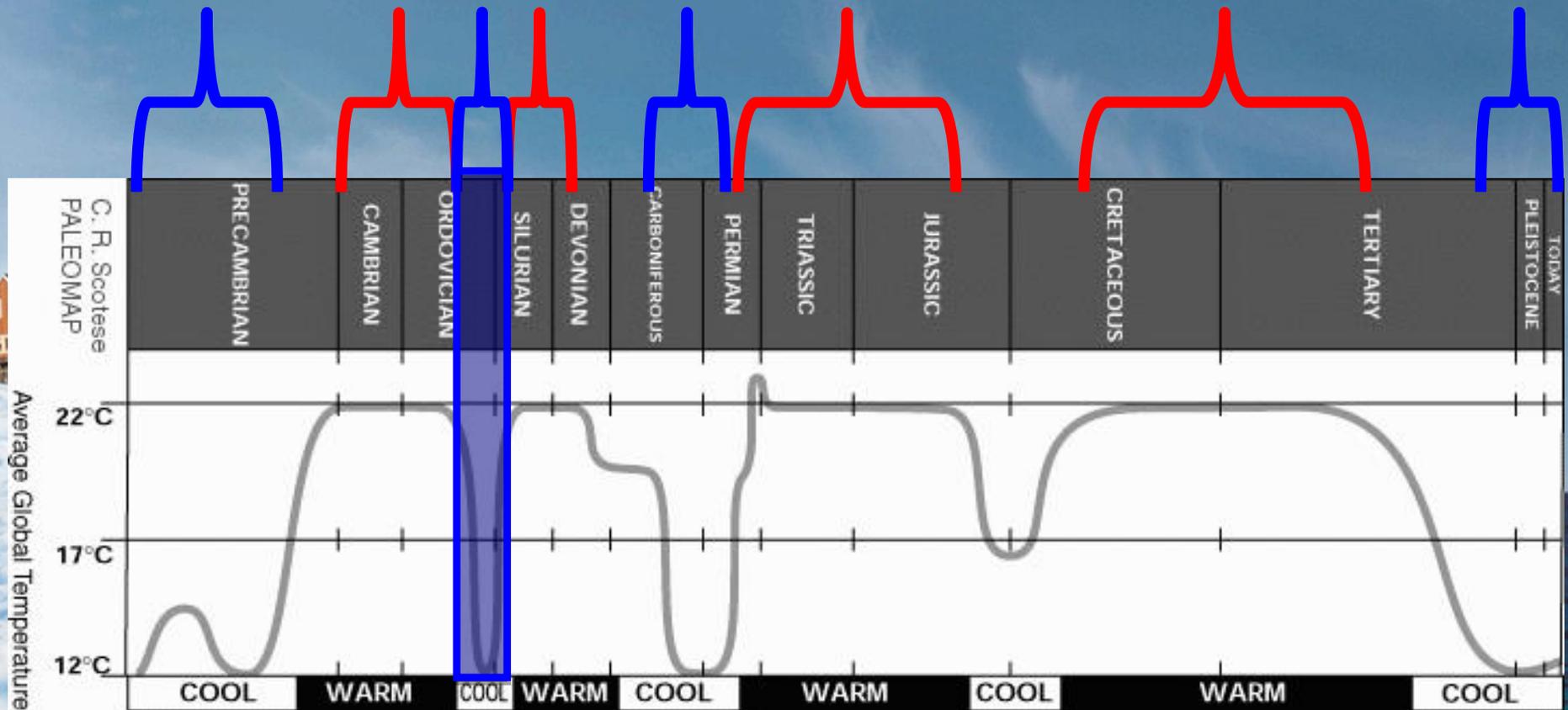
La Terre a connu au cours de son histoire de nombreux changements climatiques

La faune et la flore se sont adaptées à ces conditions, malgré des extinctions massives

Certains types de roches indiquent des conditions climatiques particulières

Les facteurs de changements climatiques peuvent être soit dépendants de notre planète soit extérieurs à notre planète





### Glaciation fini-ordovicienne

A grande échelle, le climat de la Terre a oscillé entre la "glacière" et la "serre" au cours des 2 derniers milliards d'années

# Glaciation fini-ordovicienne, il y a 450 millions d'années BP (before present)

Présence d'un continent géant (Gondwana) localisé au pôle sud

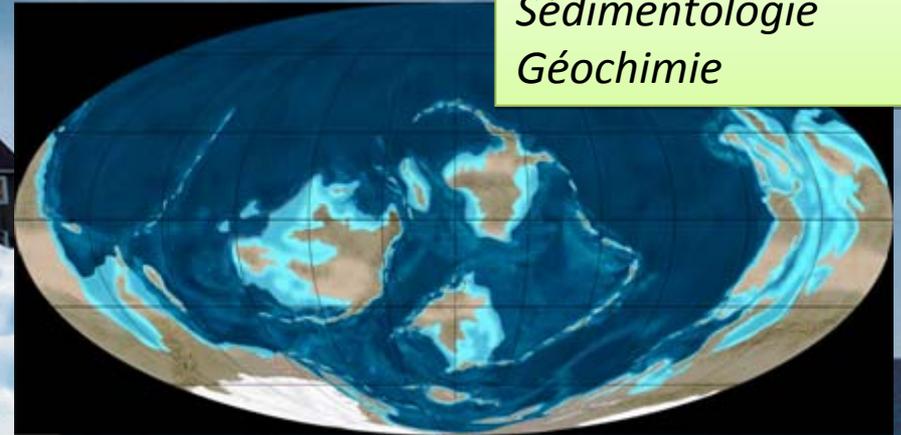
Création de la supercontinente

Présence de stries glaciaires sur de larges zones continentales : calotte polaire énorme

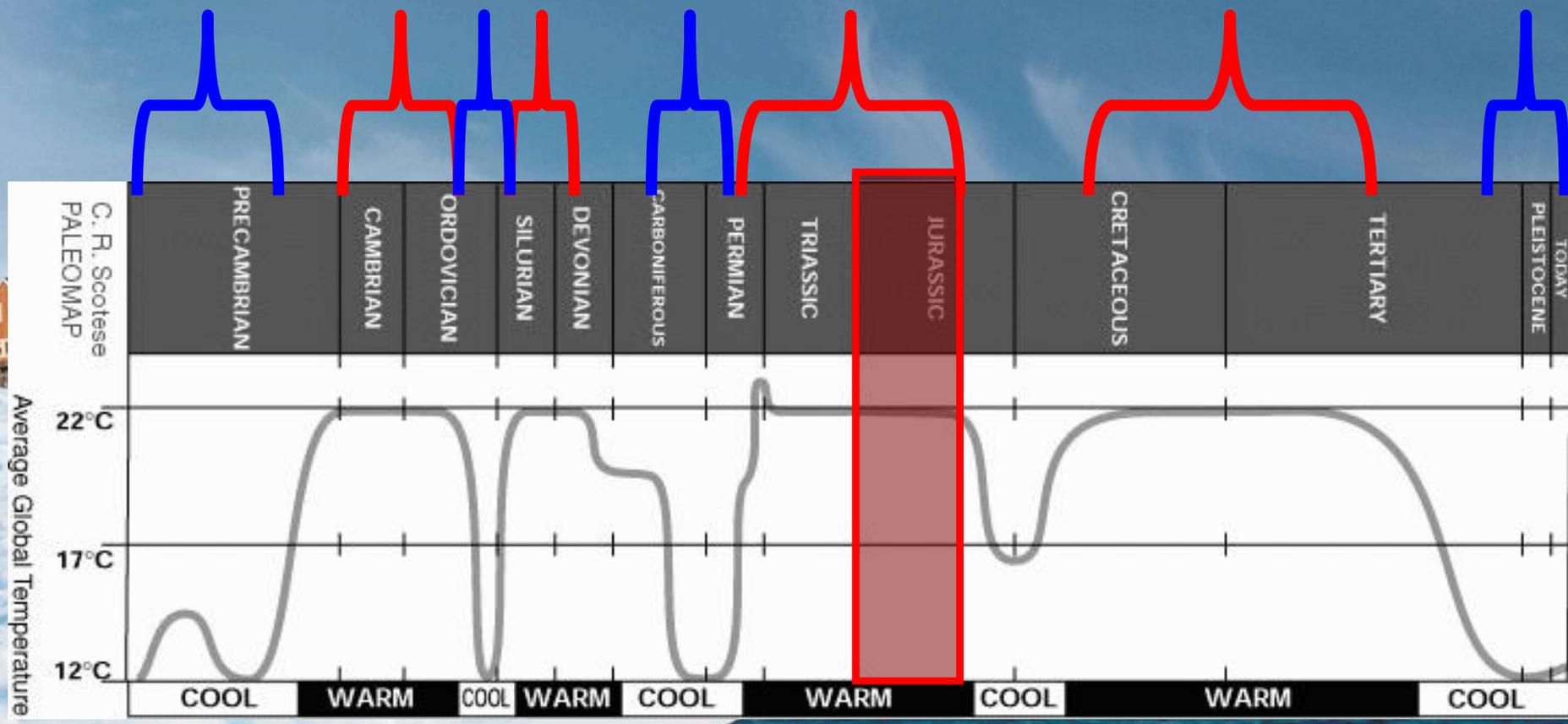
Variations des teneurs en matière organique et en isotopes stables de l'oxygène

-> **indiquant une phase de refroidissement importante et globale**

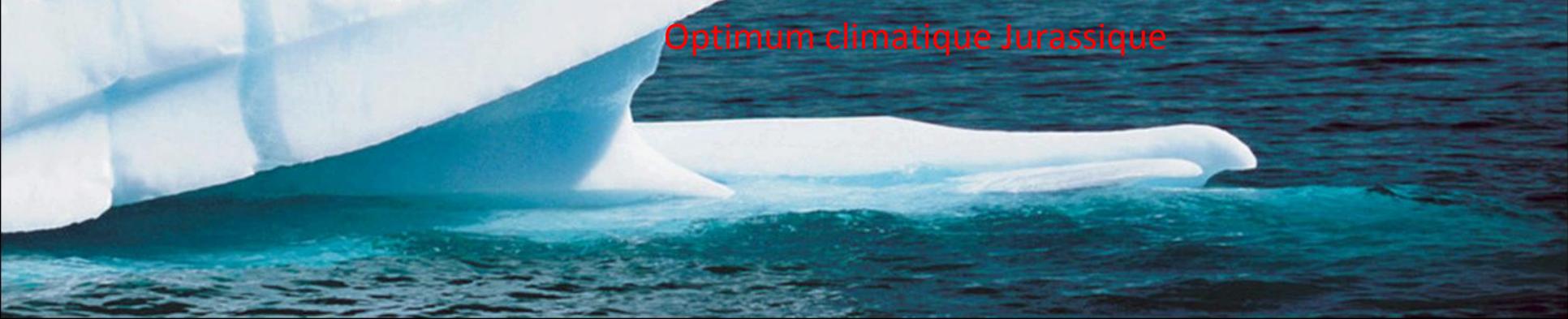
**OUTILS :**  
*Paléomagnétisme*  
*Sédimentologie*  
*Géochimie*



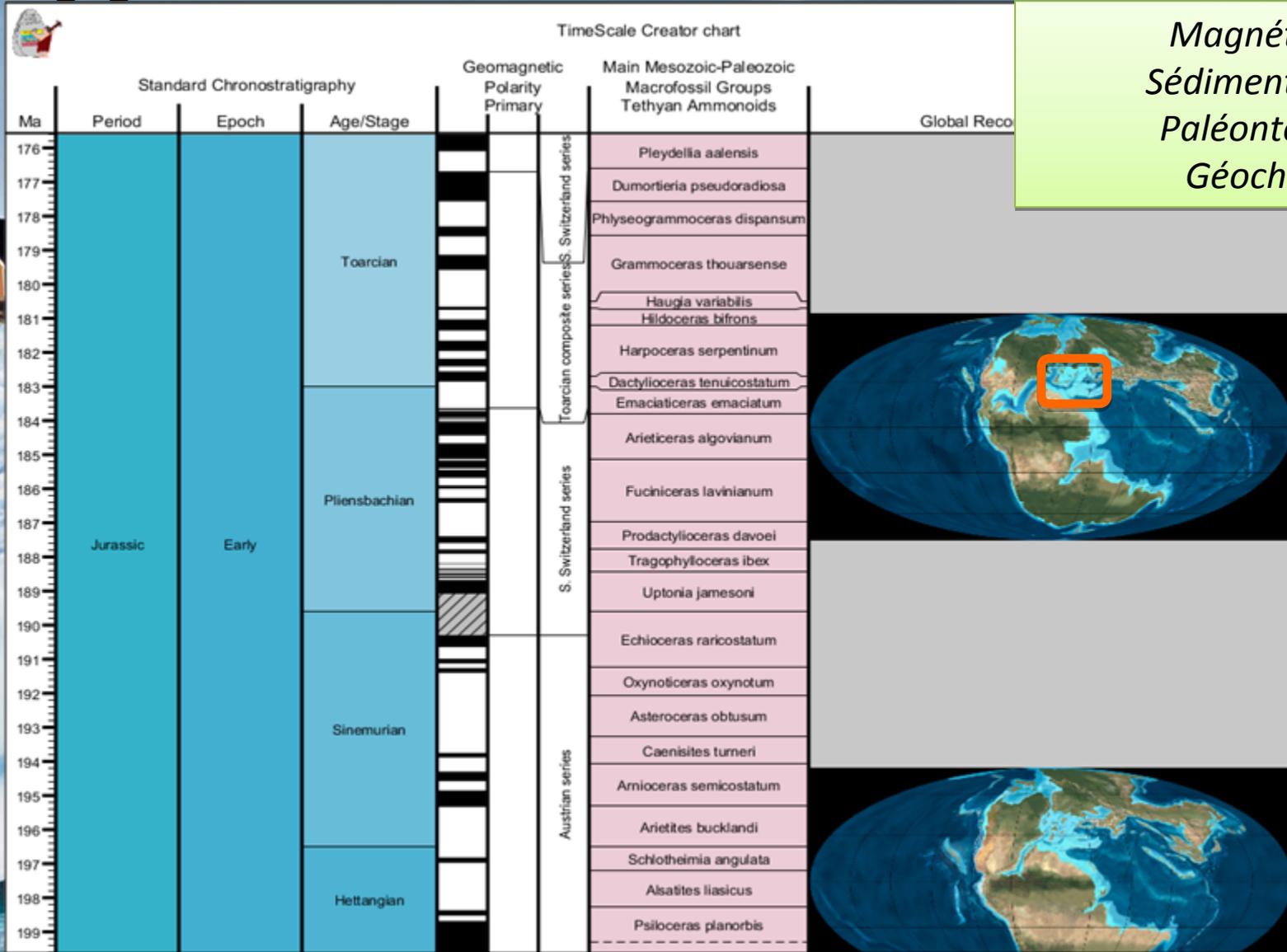
*Plancher glaciaire Ordovicien (Niger)*



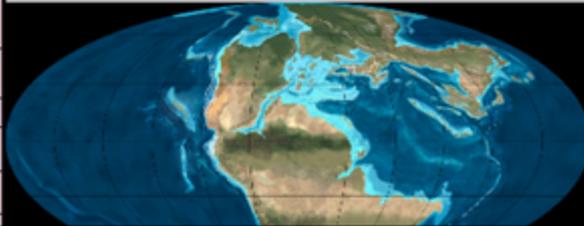
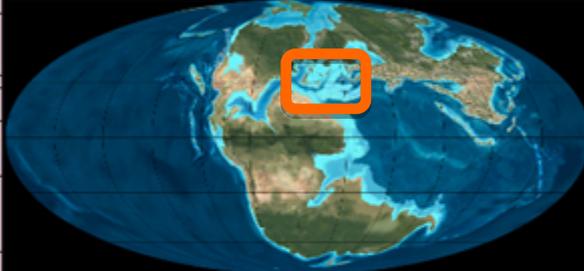
Optimum climatique Jurassique



# Le Jurassique en Bourgogne



Magnétisme  
Sédimentologie  
Paléontologie  
Géochimie



## Le Jurassique en Bourgogne

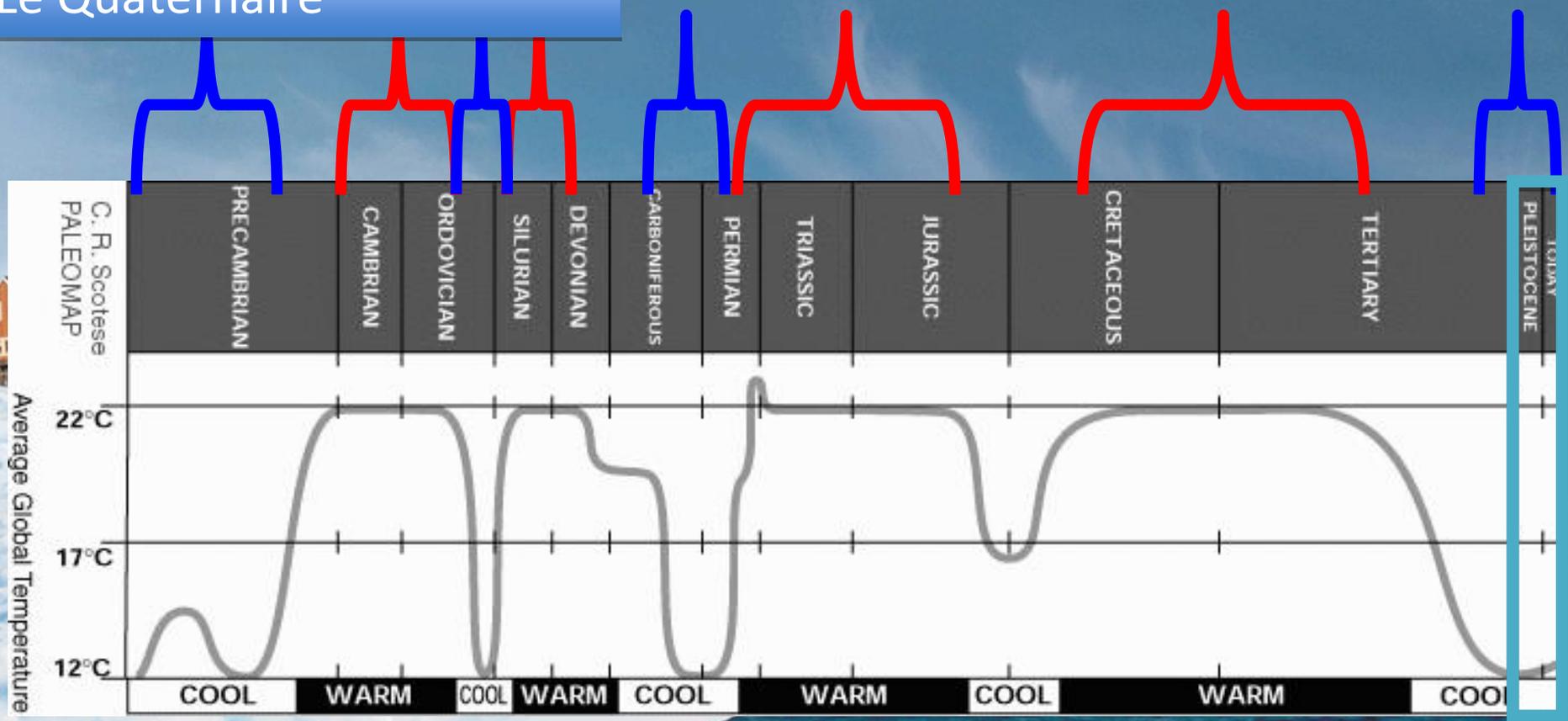


Présence de fossiles exclusivement marins (coraux, ammonites, bivalves et dents de requins)

Formations carbonatées importantes. Similitudes avec plateforme des Bahamas actuelle.



# Le Quaternaire



Le Quaternaire



# Le Quaternaire

- 1.65 millions d'années
  - Développement du genre « Homo »
- Alternances de périodes chaudes (interglaciaires) avec périodes froides (glaciaires). Les changements du climat quaternaire à l'échelle globale sont caractérisés par les avancées et les retraits des calottes Laurentide et Fennoscandienne.

Les forçages de cette variabilité sont à la fois internes et externes au système



# Le Quaternaire



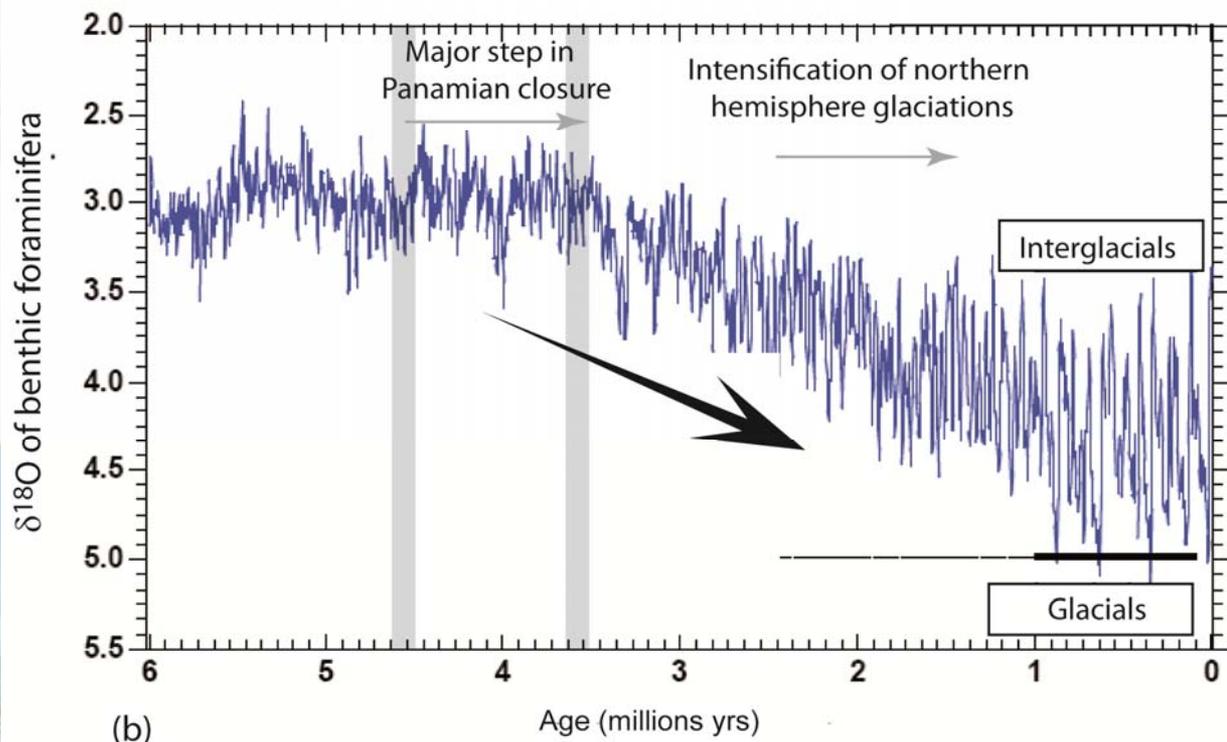
## FORCAGE TERRESTRE

- Déplacement des masses continentales (tectonique des plaques).
- Modification de la circulation océanique globale (moteur thermique)

Intensification des glaciations dans l'hémisphère nord

*Haug and Tiedemann 1998*

(a)



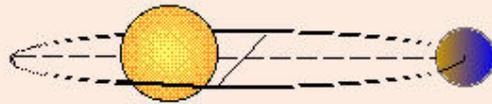
(b)

# Le Quaternaire

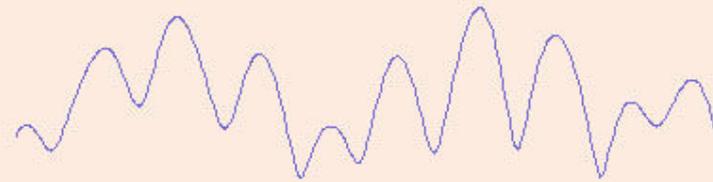
**FORCAGE ORBITAL** - Théorie astronomique des paléoclimats (Milutin Milankovitch, 1941 – Théorie astronomique du climat)



Variations de l'EXCENTRICITE de l'orbite terrestre



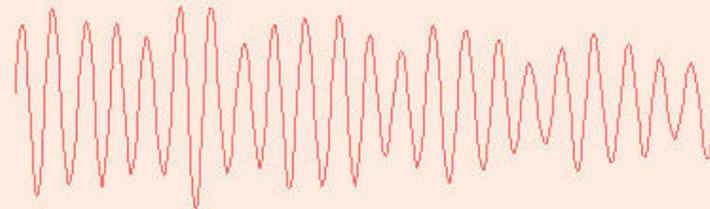
périodicités de 100 et 413 ka



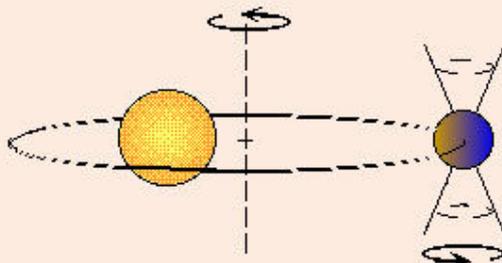
Variations de l'OBLIQUITE de l'axe de rotation



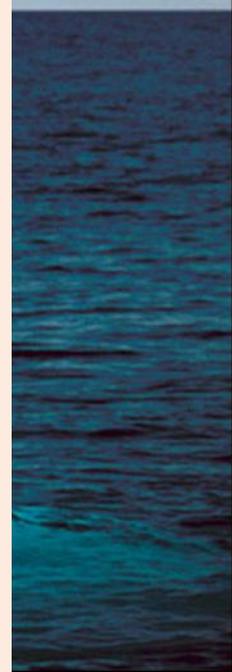
périodicité de 41 ka



PRECESSION de l'axe de rotation et ROTATION de l'orbite terrestre

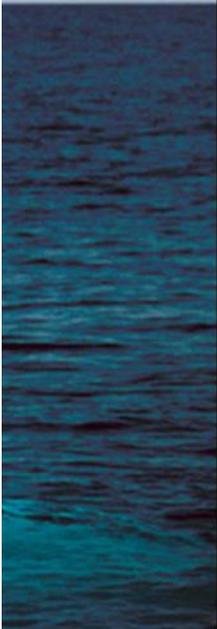
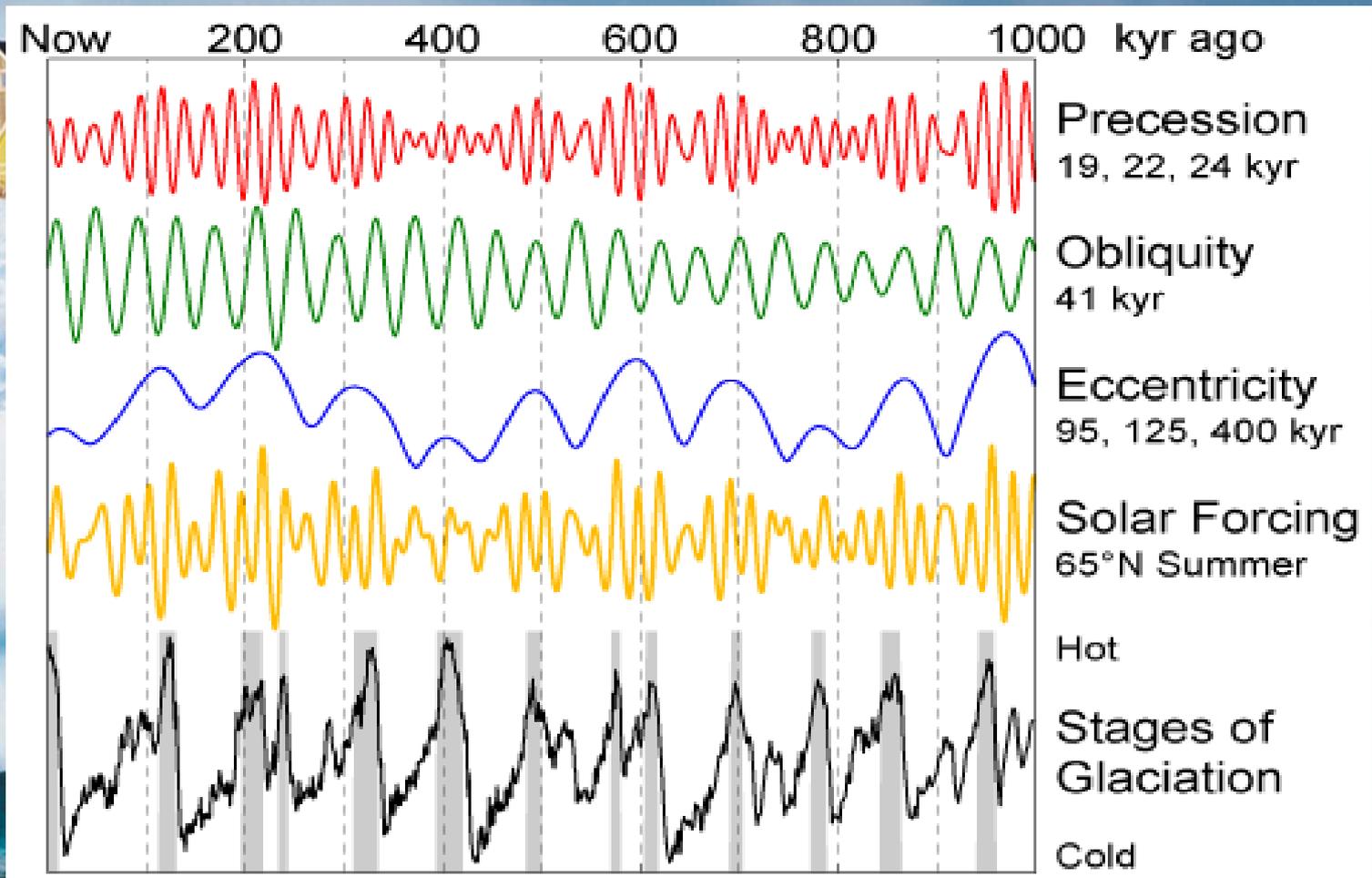


périodicités de 23 et 19 ka



# Le Quaternaire

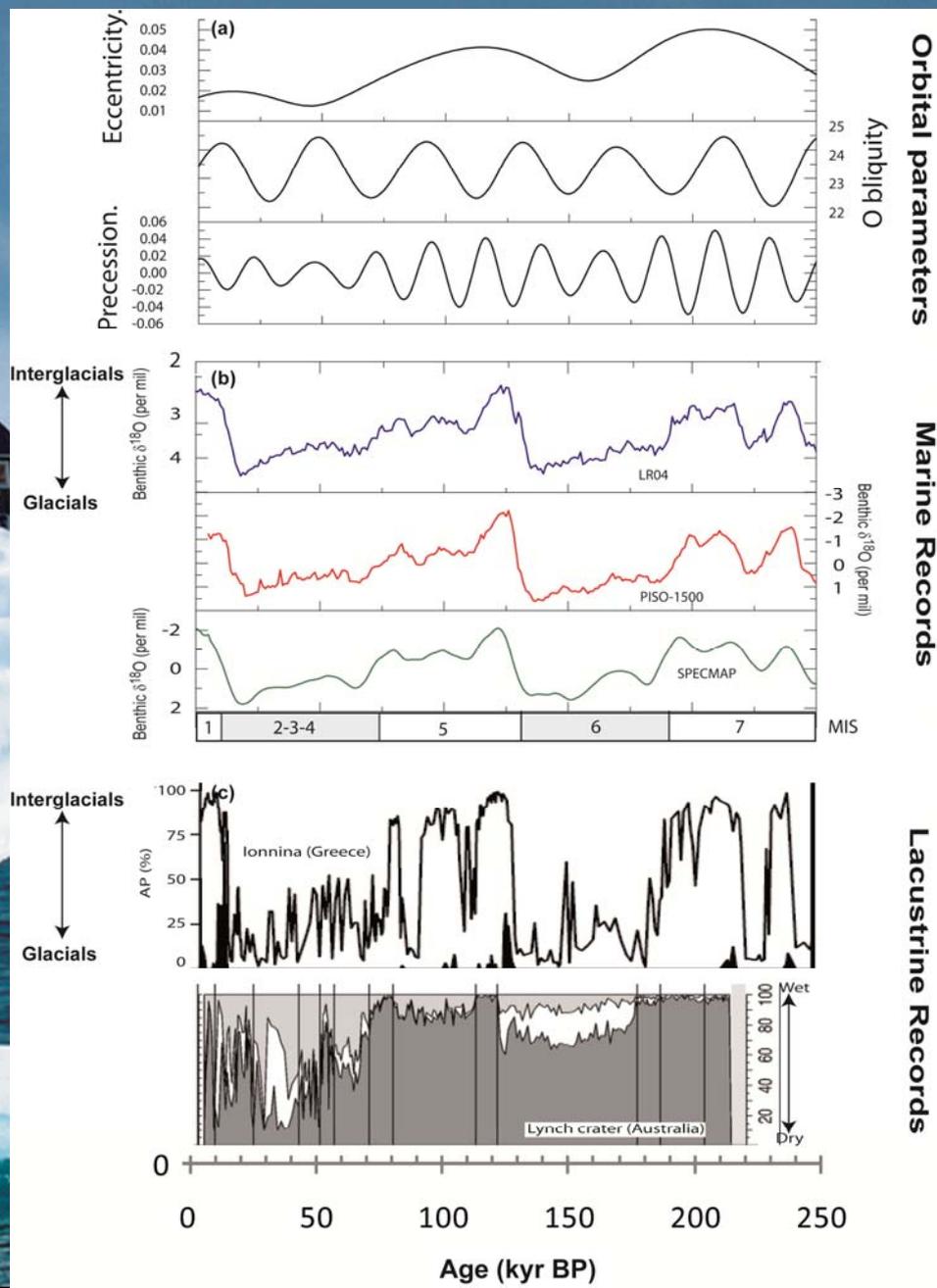
La variabilité climatique glaciaire/interglaciaire est contrôlée par les paramètres orbitaux terrestres -> quantité d'énergie solaire reçue par l'hémisphère nord -> développement des calottes polaires (inlandsis)



# Le Quaternaire

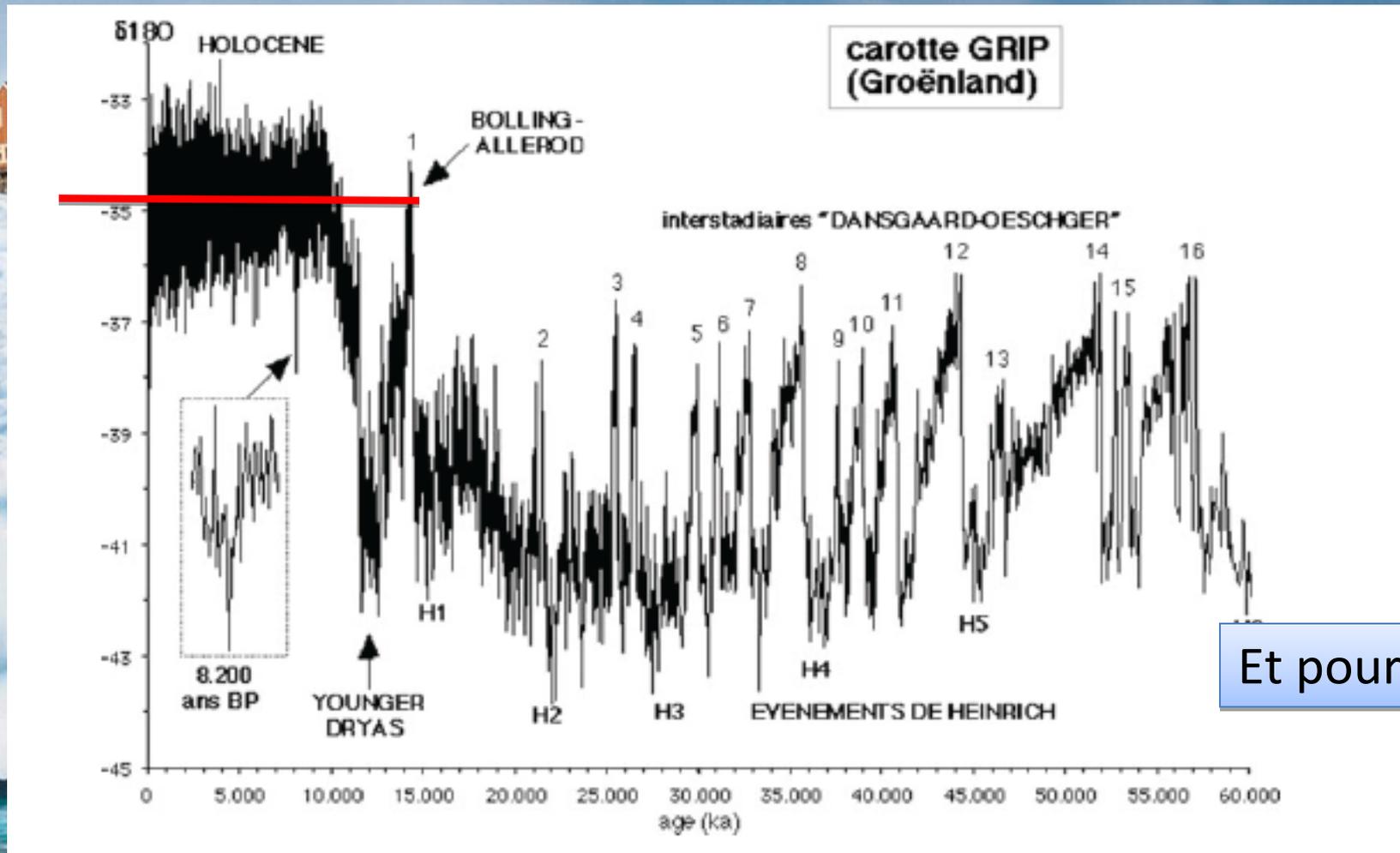


Un signal climatique global



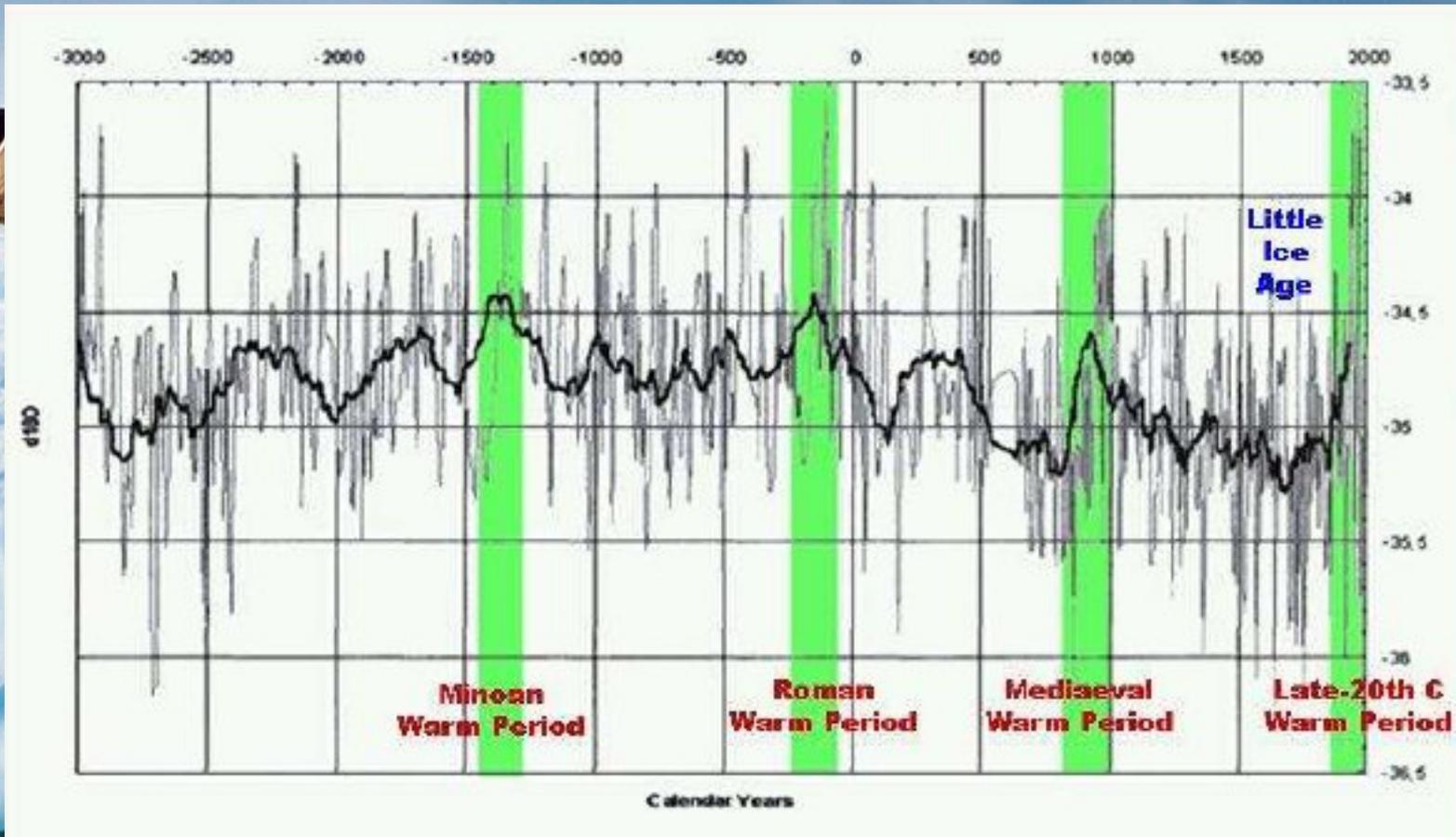
# Variabilité climatique Holocène (derniers 10 000 ans)

Une période relativement stable à l'échelle du quaternaire



# Variabilité climatique Holocène (derniers 10 000 ans)

La variabilité climatique Holocène existe et ses effets sont très étudiés du fait de la présence permanente de l'Homme



# Variabilité climatique Holocène (derniers 10 000 ans)

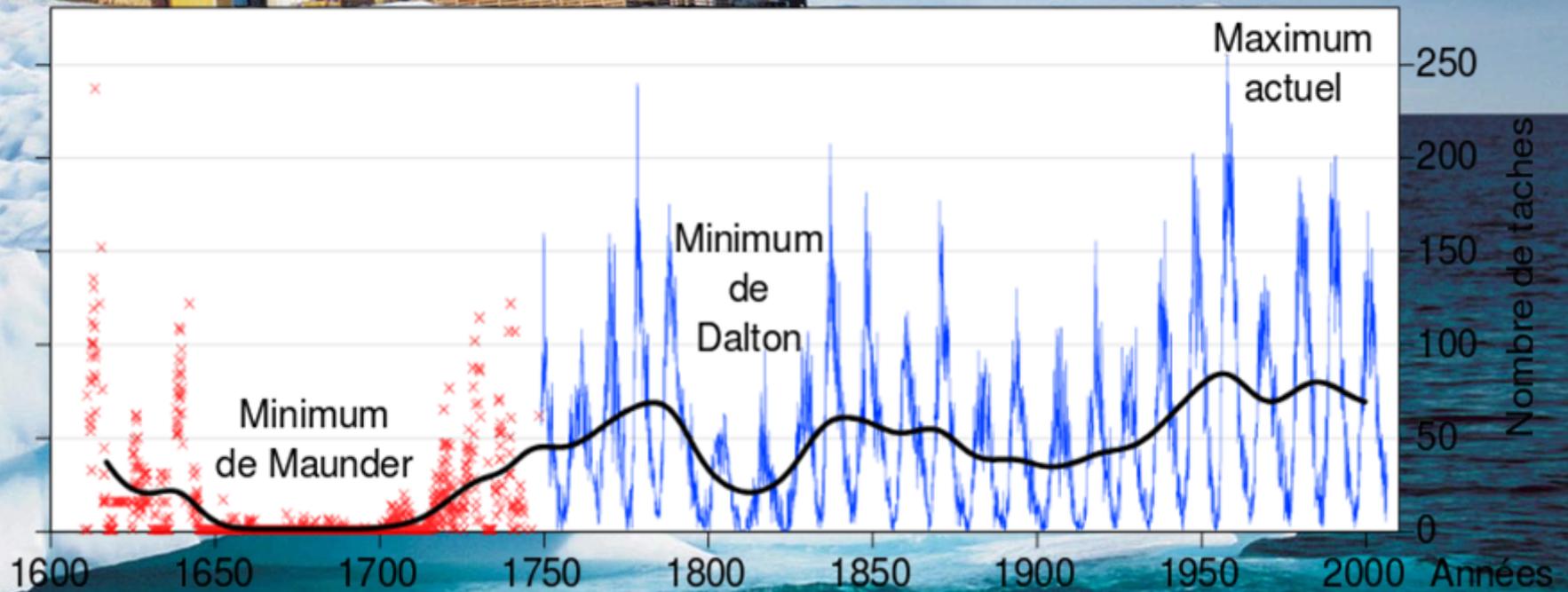
Facteurs de forçage nombreux et encore sujets à discussion

**Forçages externe:** insolation, activité solaire, volcanisme?



## Evolution du nombre de taches solaires par an

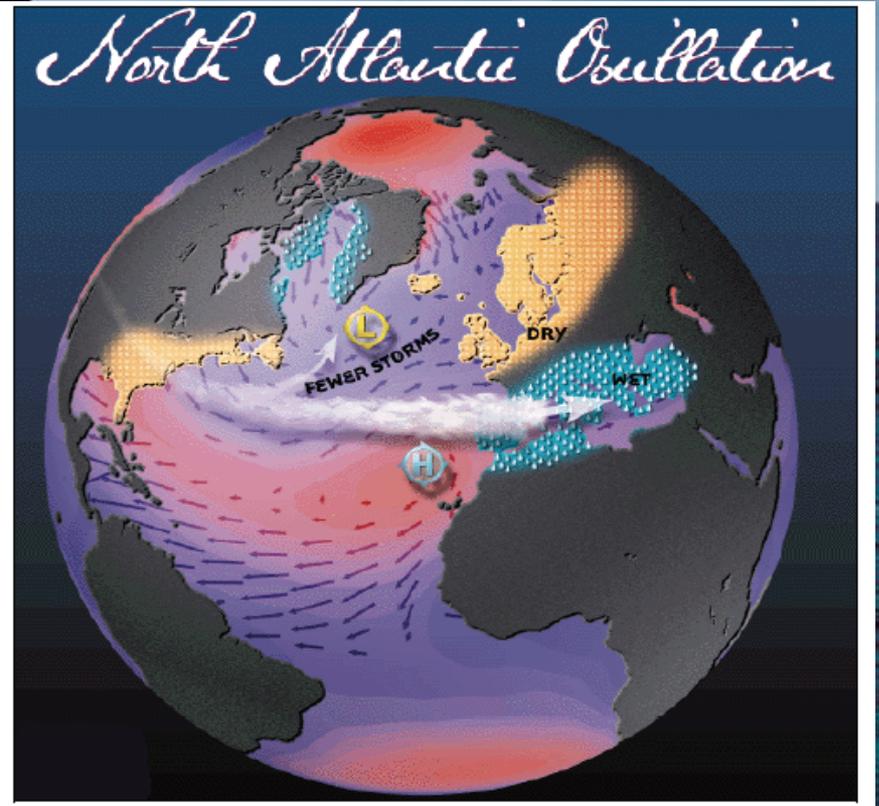
× Observations sporadiques  
| Observations régulières



# Variabilité climatique Holocène (derniers 10 000 ans)

Facteurs de forçage nombreux et encore sujets à discussion

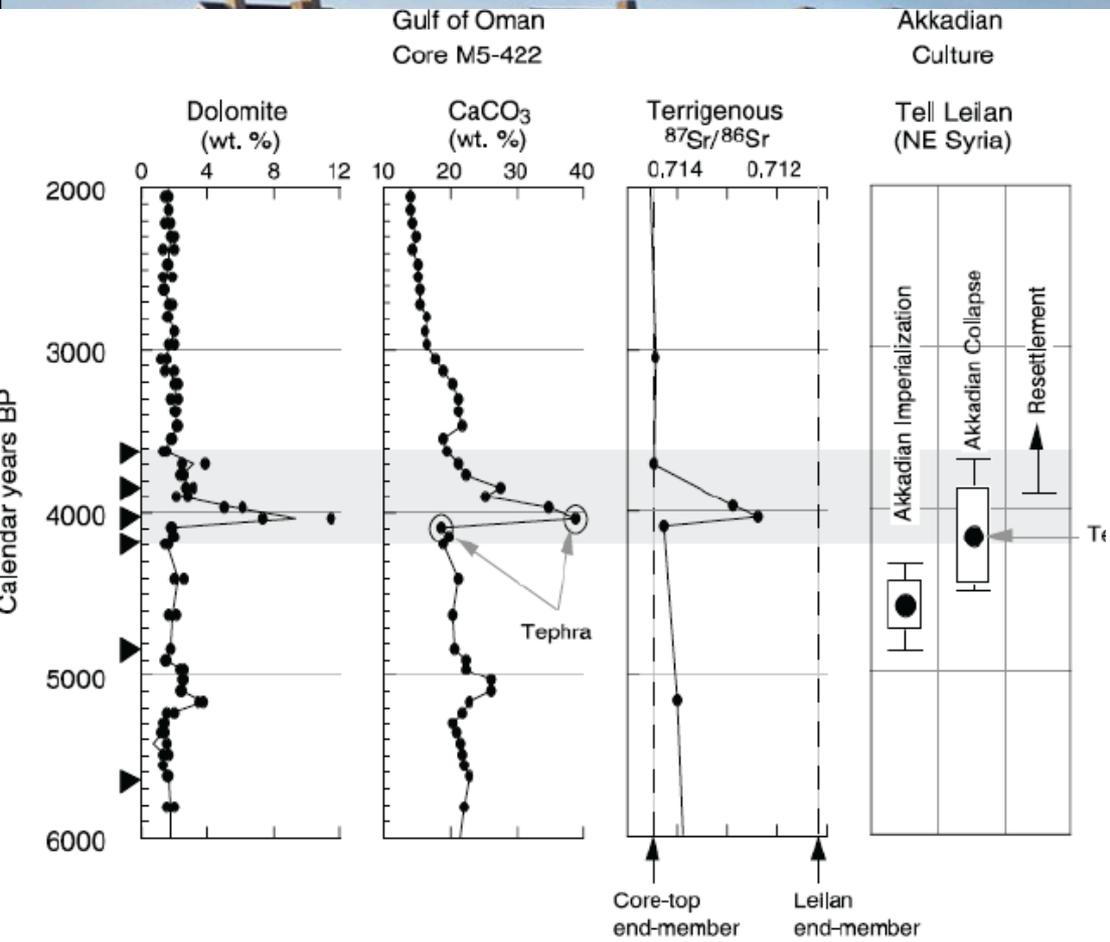
**Forçages internes** : inertie des calottes polaires, oscillations des circulations océaniques,



# Relation Hommes - Climat



Chute de l'empire akkadien (4170±150 ans BP)



- abandon abrupt des plaines agricoles du Nord et une migration vers le Sud de la Mésopotamie (Weiss et al, 1993 ; Weiss, 2000).
- un retour à la sédentarisation seulement autour de 3900 cal BP
- changement climatique majeur mis en évidence sur une carotte sédimentaire du Golf d'Oman (Cullen et al, 2000).
- une période particulièrement aride pendant 300 ans à partir de 4025 +/- 125 ans.

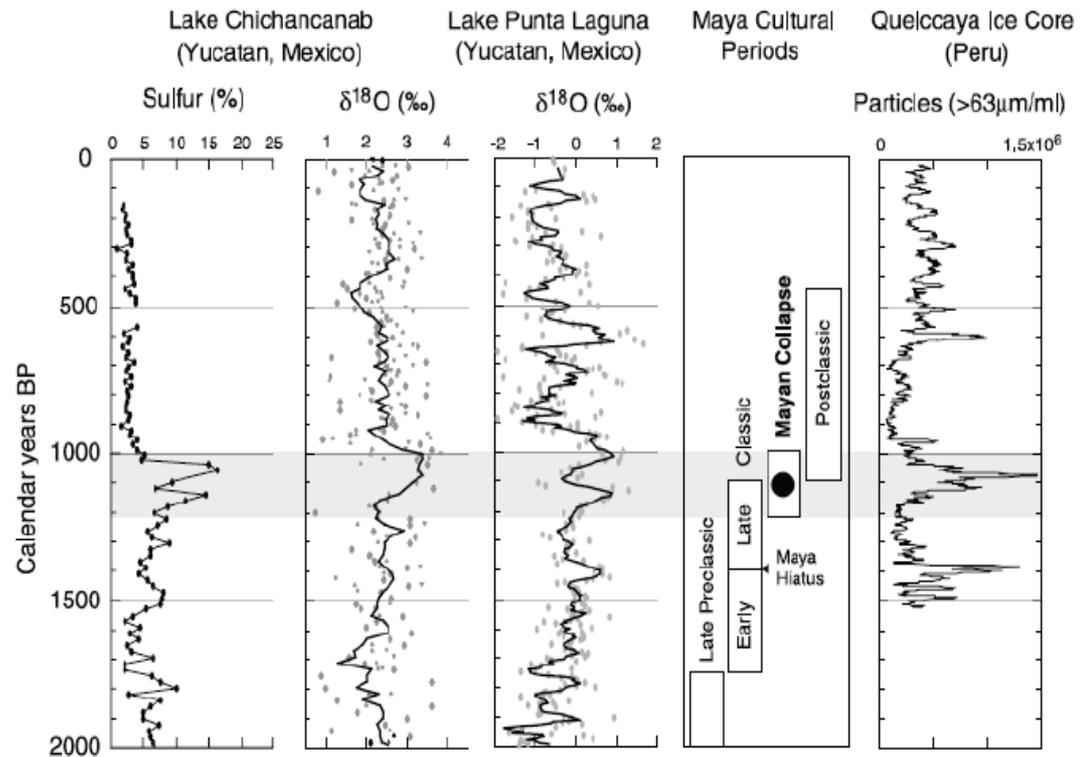
# Relation Hommes - Climat

Chute de la civilisation Maya ((1000 ans BP)

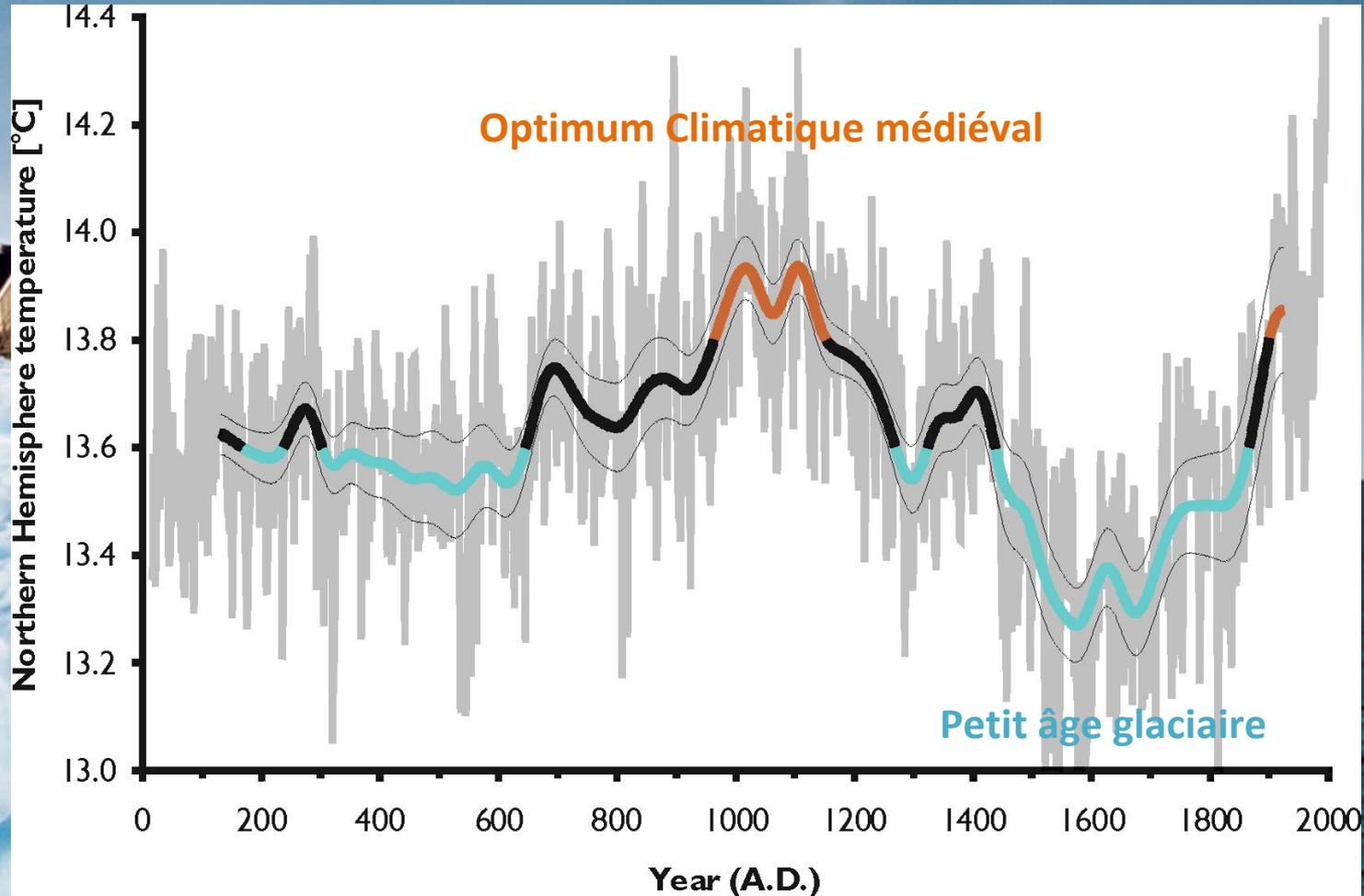


Les variations de  $\delta^{18}O$  dans le Lac Chichancanab, montrent qu'autour de 1200 à 1000 ans BP, l'Amérique centrale a subi la plus grosse période sèche des 8 000 dernières années (Hodell et al, 1995 ).

Hypothèse corroborée par les apports importants de poussières au Pérou pendant la même période



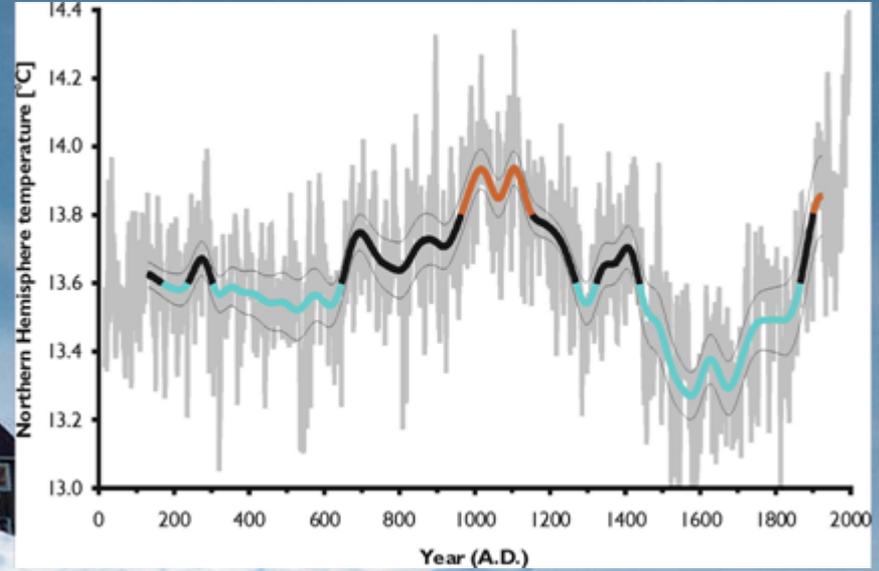
# Le dernier millénaire...



Autre notation chronologique : AD (après JC) ≠ BC (avant JC)

# Relation Hommes - Climat

## Exemple Optimum Climatique Médiéval



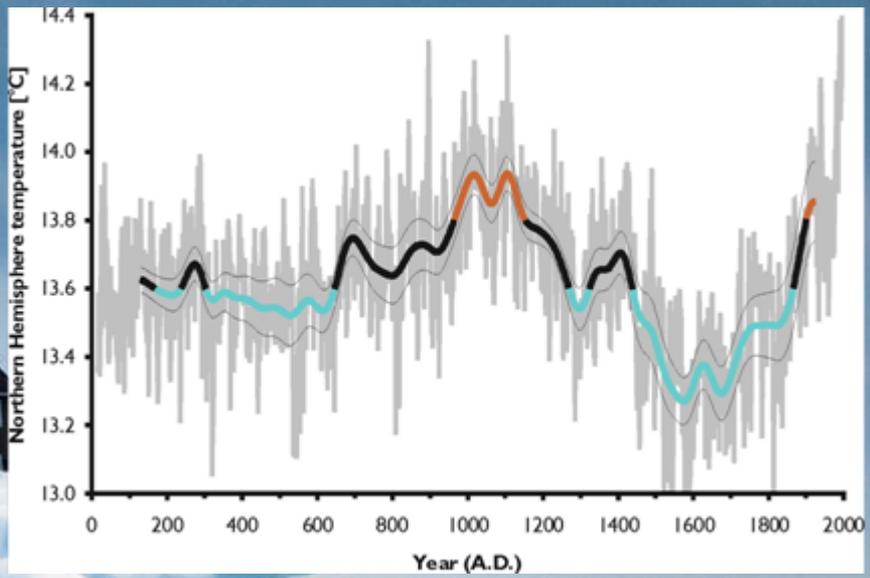
Étés plus chauds, hiver moins froids et moins humides.  
Essor agricole et démographique  
(amélioration des techniques agricoles)

# Relation Hommes - Climat

## Petit Age Glaciaire ( env. 1550-1850 ans AD)

Une période caractérisée par des hivers extrêmement froids et des étés instables.

Avancée généralisée des fronts de glaciers



# Relation Hommes - Climat

## Le Petit Age Glaciaire et la révolution Française

Depuis 1690, la dégradation climatique entraîne mauvaises récoltes famines et maladies  
Hiver 1709,  $-30^{\circ}\text{C}$  à Paris et  $-15^{\circ}\text{C}$  à Bordeaux  
Les rivières gèlent  
Les gelées se poursuivent jusqu'en juin 1709.

L'éruption du Laki (Islande) en 1783 dégage un nuage de soufre qui endommage gravement les cultures en Angleterre et en France.

Été 1788, une sécheresse entraîne très peu de récolte. Pas de réserve pour l'hiver  
Hiver 1788- 1789 particulièrement rigoureux et long.

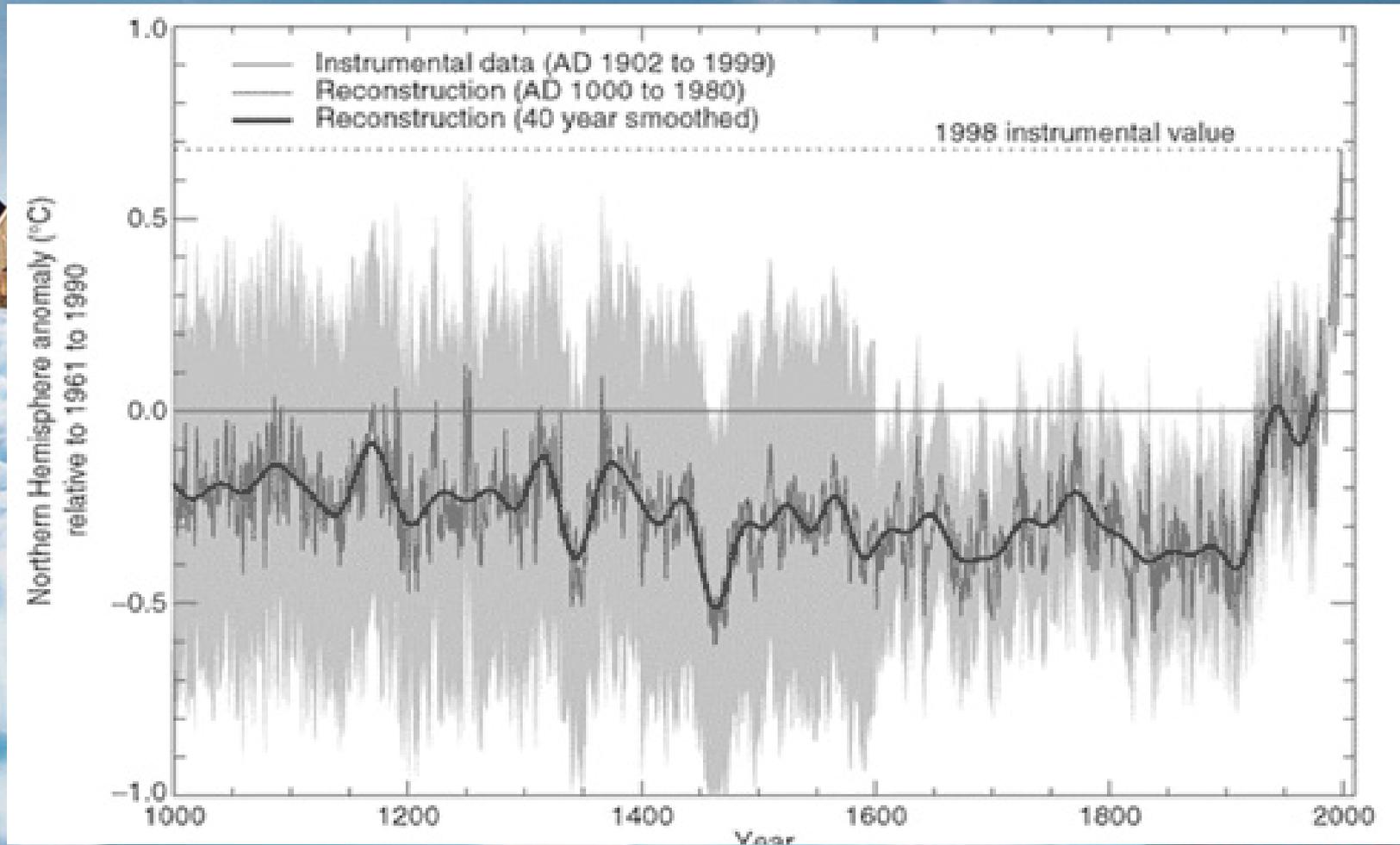


Rivière gelée (1709 ans AD)

La mauvaise gestion des caisses royales ne permet pas de pallier aux problèmes de la population pendant cette période.

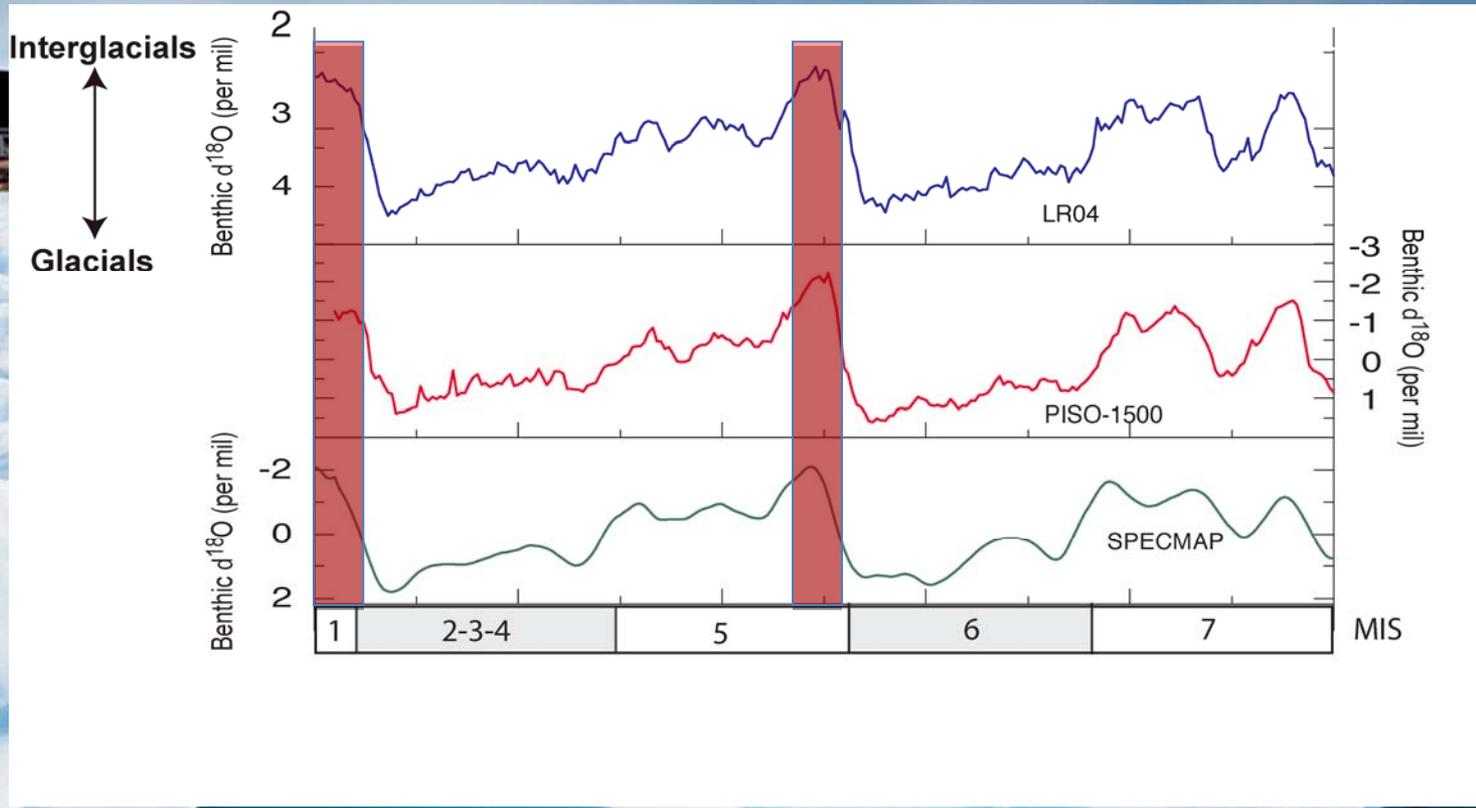


## Une évolution hors normes des températures



# Facteurs de forçage

Un réchauffement naturel depuis 10 000 ans  
Cohérence avec la variabilité glaciaire/interglaciaire

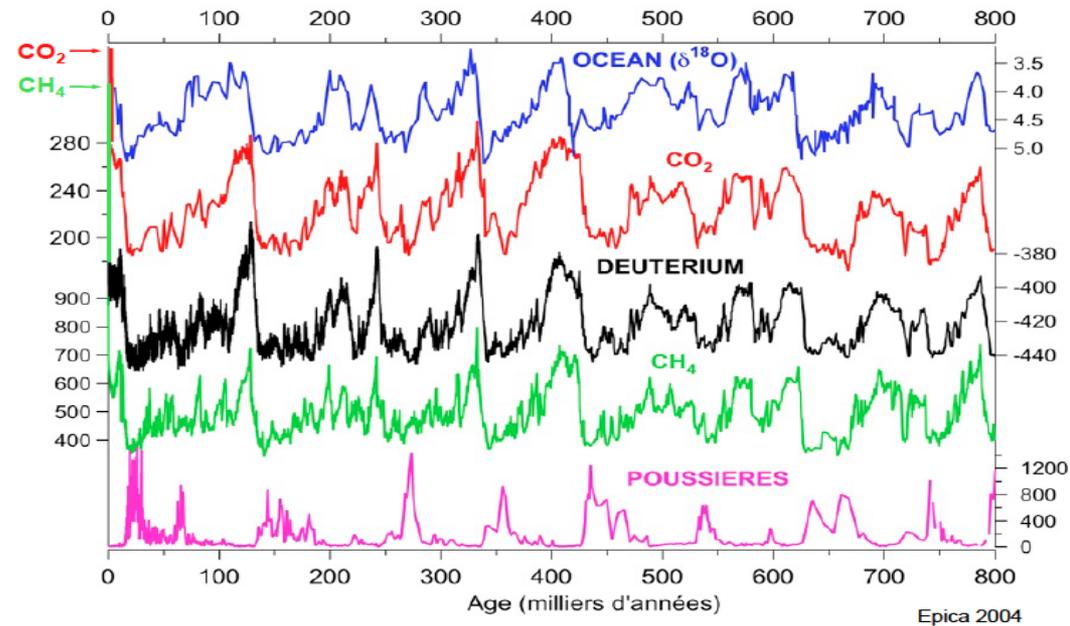


## Mais depuis un siècle

Augmentation exponentielle de la concentration des gaz à effets de serre dans l'atmosphère qui coïncide et avec le développement des activités industrielles

On observe l'influence d'un nouveau paramètre : l'impact anthropique

Les cycles glaciaire-interglaciaires et le message de la glace : couplage entre température et CO<sub>2</sub>

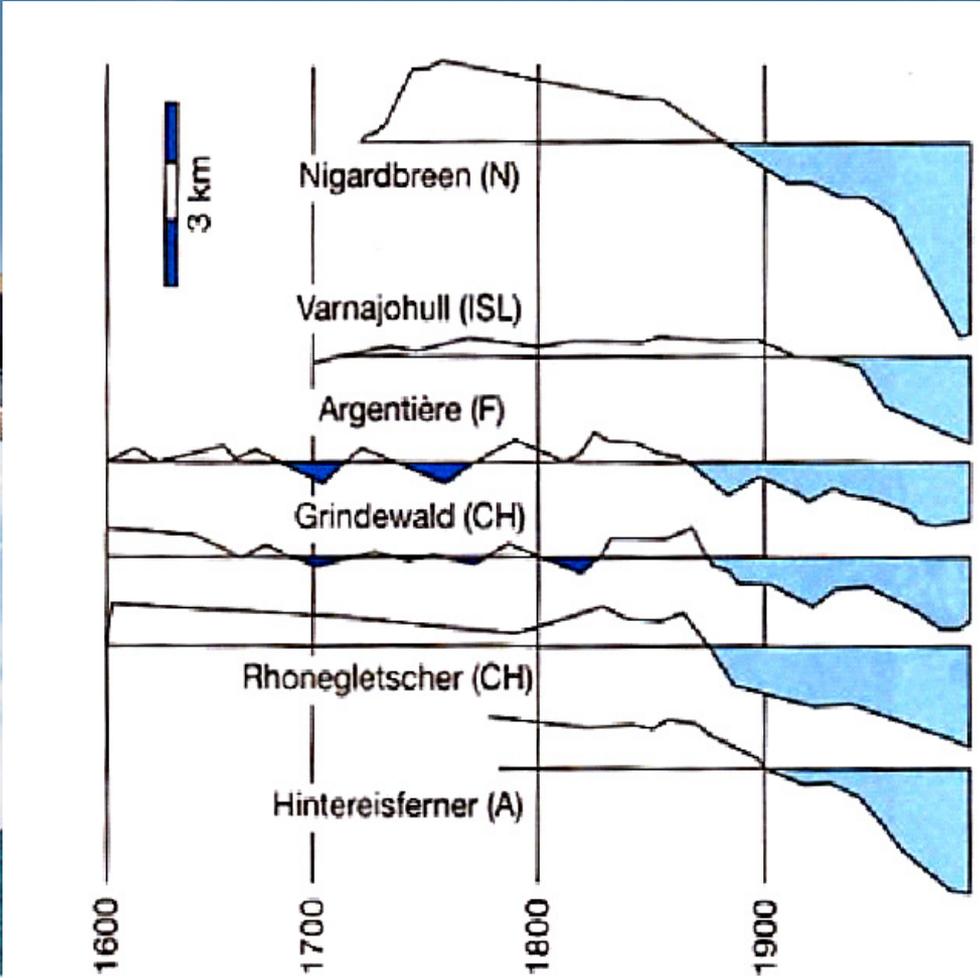


Entrée dans une nouvelle période, l'Anthropocène (Crutzen et Stoermer 2000)

# Impact anthropique



Exemple : le recul des glaciers alpins



Recul de quelques glaciers d'Europe occidentale, depuis 1600 AD

## Travaux du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur le Climat (créé en 1988 par l'ONU))

**Objectifs : évaluer, sans parti pris et de manière méthodique, l'état des connaissances relatives au changements climatiques en fonction des facteurs à la fois naturels mais également politiques et socio-économiques**

### Evaluation

- Synthèse des publications scientifiques
- Relations Hommes-Climat (scientifique, technique, socio-économique)

### Expertise

- Mise en place de rapports synthétiques
- Trois axes de développement en lien avec le changement climatique (principes physiques/vulnérabilité adaptation/atténuation)

### Simulation

- Changement climatique actuel (impact anthropique)
- Prédications pour les climats futurs

Travaux du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur le Climat (créé en 1988 par l'ONU))

Qu'est ce qu'une simulation scenario climatique?

Forçages climatiques naturels

**Modèle atmosphérique**  
Trajectoires et positions  
des masses d'air  
Températures



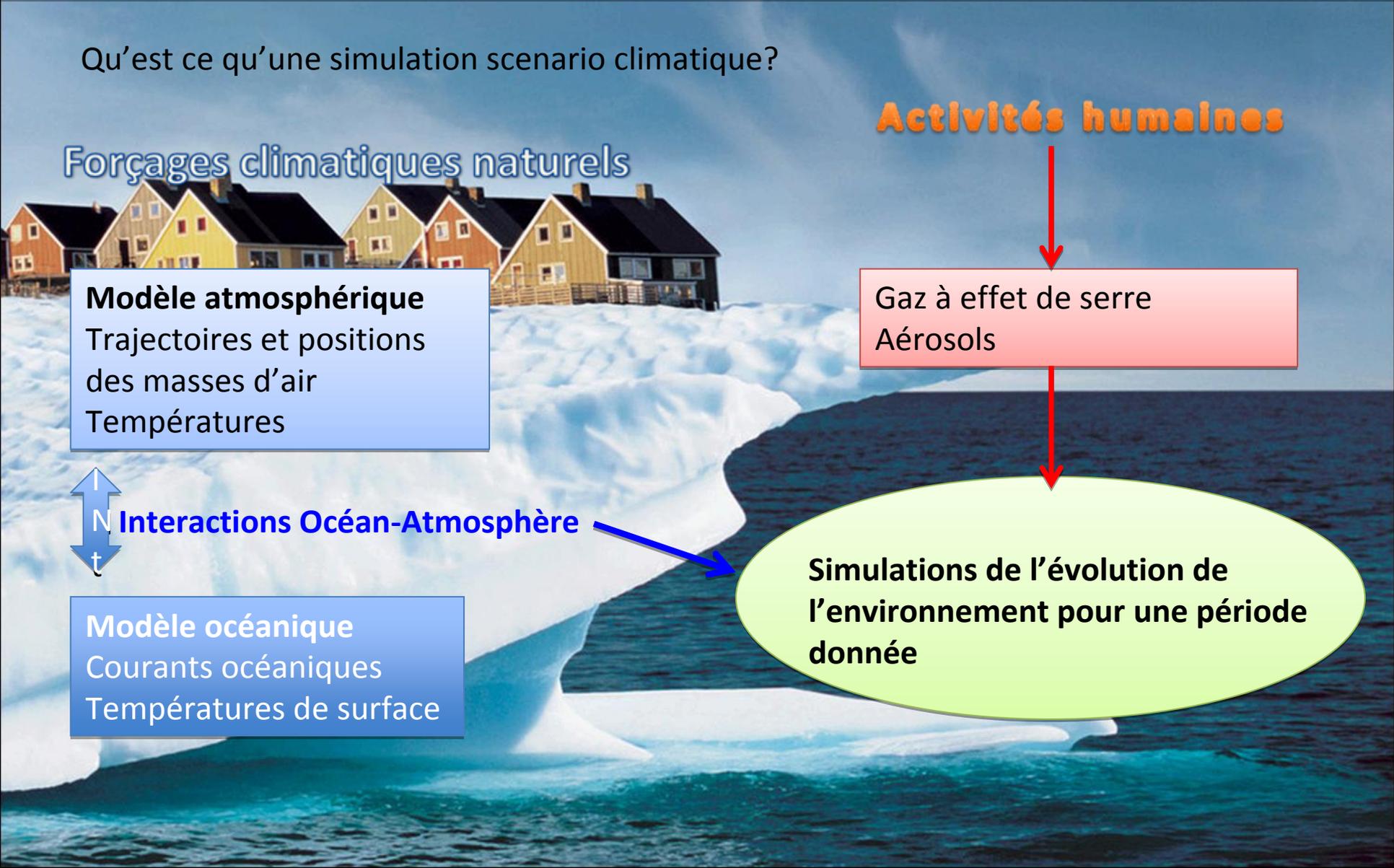
**Interactions Océan-Atmosphère**

**Modèle océanique**  
Courants océaniques  
Températures de surface

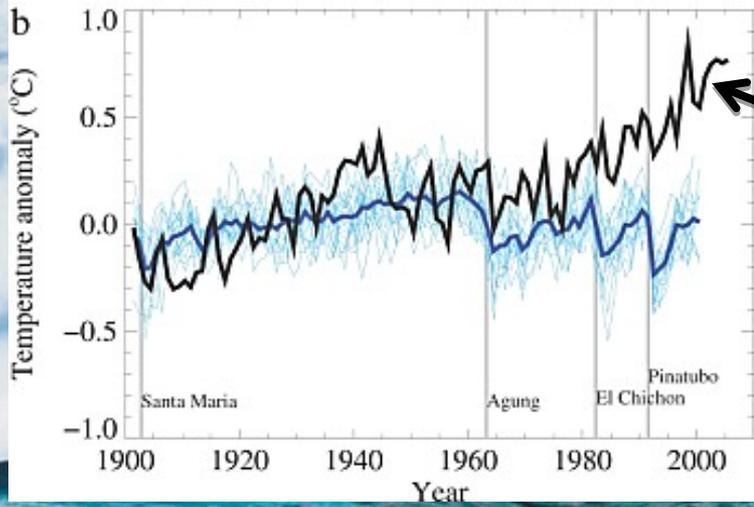
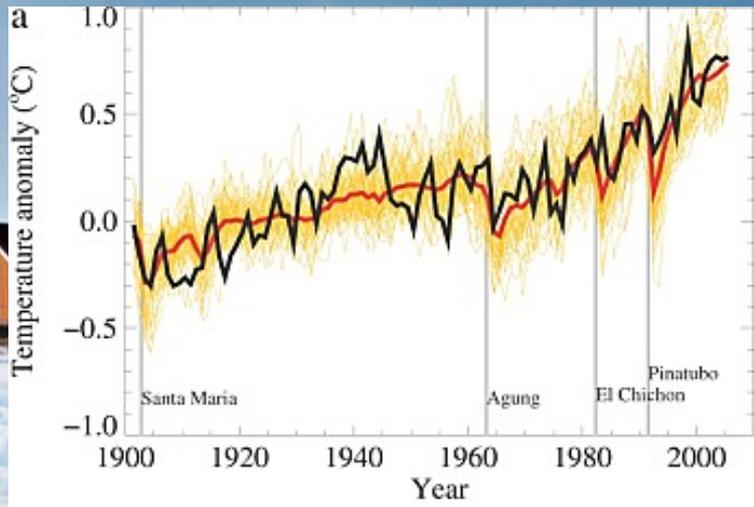
**Activités humaines**

Gaz à effet de serre  
Aérosols

Simulations de l'évolution de  
l'environnement pour une période  
donnée



# Simulations du climat actuel



Mise en évidence de l'impact de l'homme...

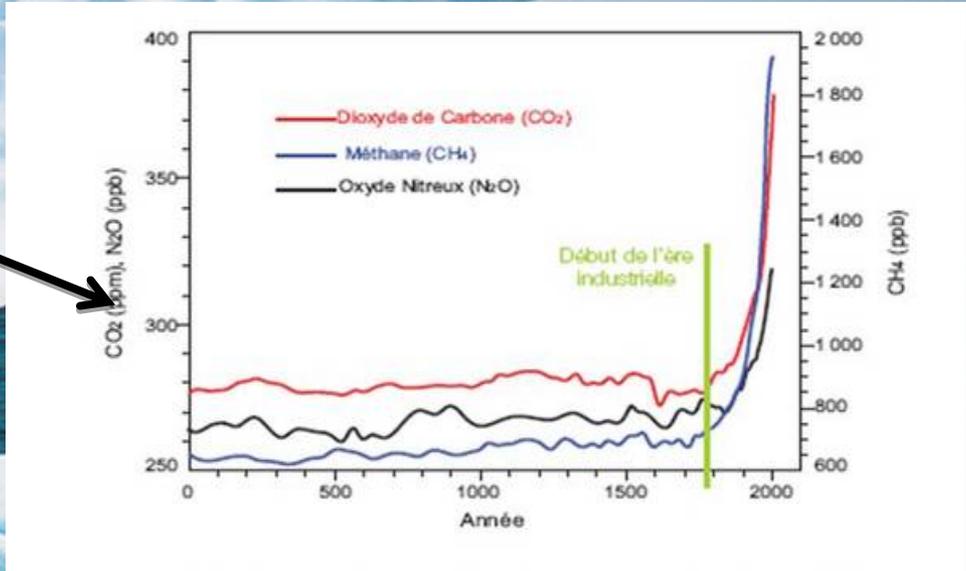
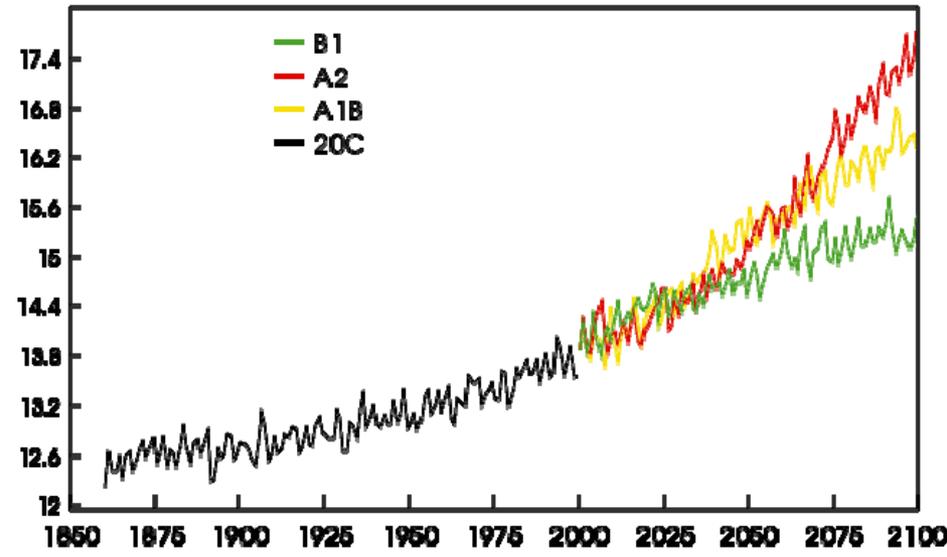
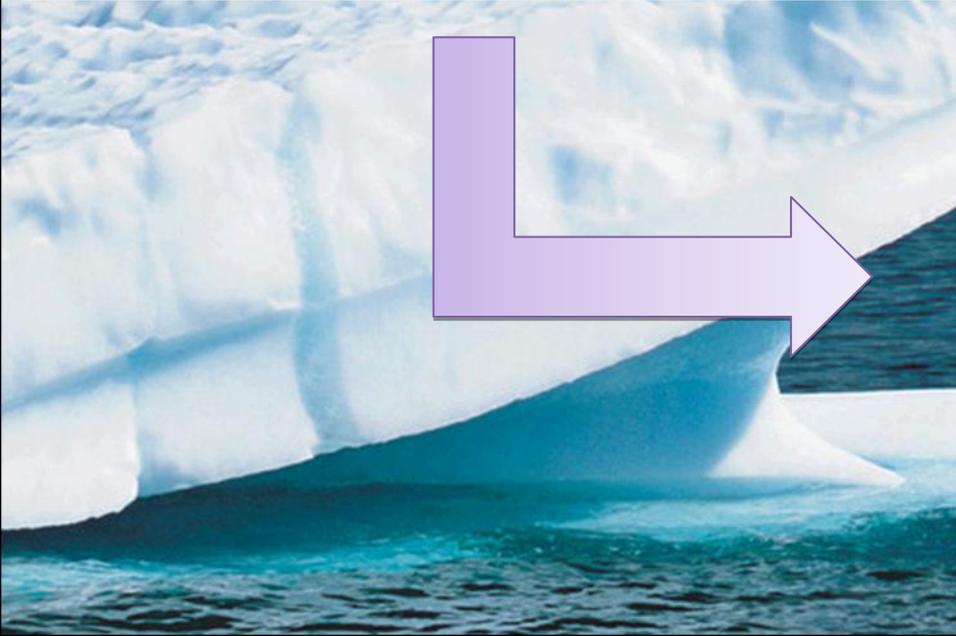


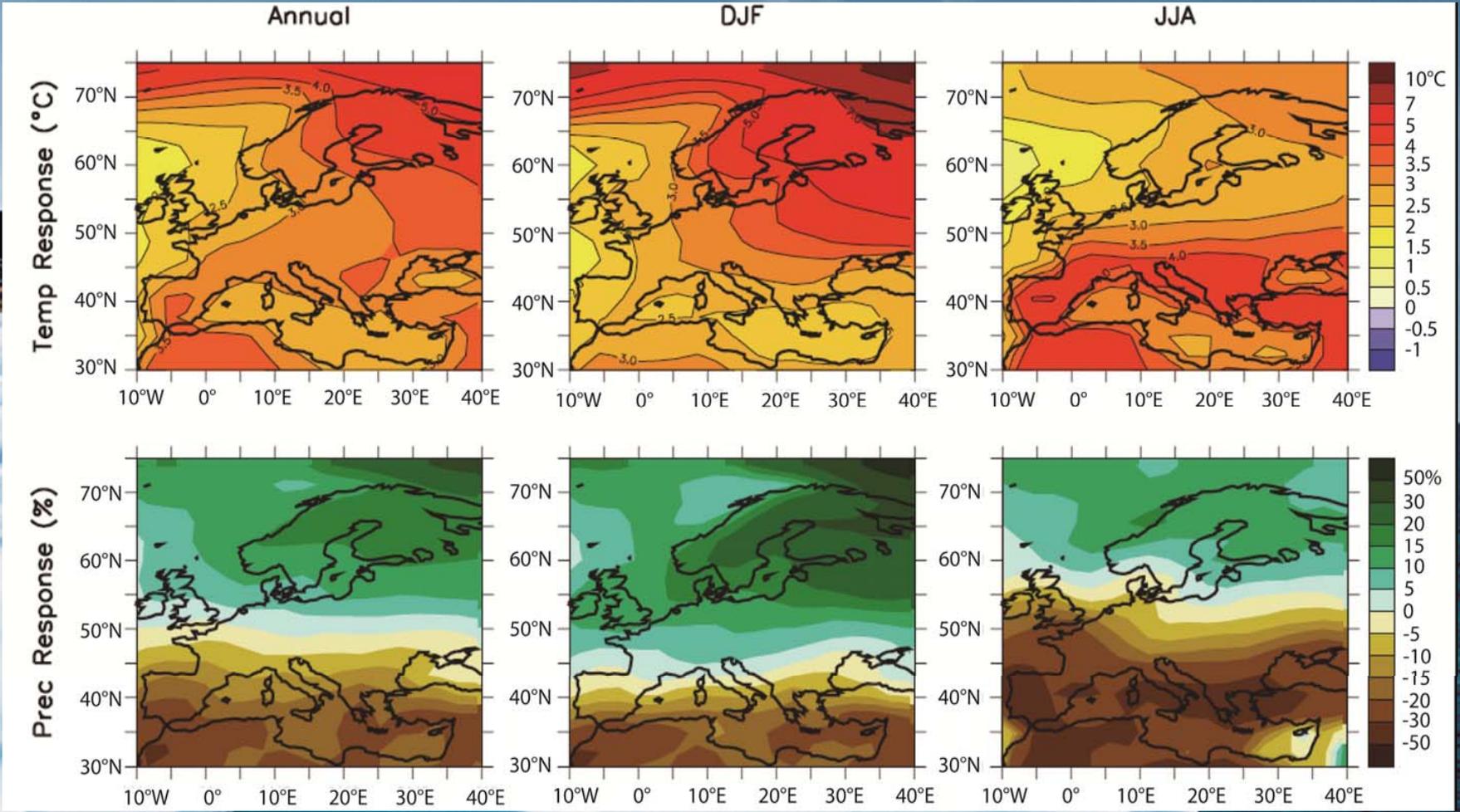
Figure 1 - Evolution des concentrations des principaux gaz à effet de serre (GIEC, 2007)

# Simulations futures : intégration de données socio-économiques

	Objectifs plus économiques	Objectifs plus environnementaux
<u>Mondialisation</u> (Monde homogène)	A1 Croissance économique rapide (groups: A1T/A1B/A1FI) 1.4 - 6.4 °C	B1 Durabilité environnementale globale 1.1 - 2.9 °C
<u>Régionalisation</u> (Monde hétérogène)	A2 Développement économique avec une orientation régionale 2.0 - 5.4 °C	B2 Durabilité environnementale locale 1.4 - 3.8 °C



# Prédictions du climat futur : spatialisation du changement



*Températures and précipitations attendues pour la période 2080-2099 en Europe  
Simulation MMD-A1B (21 modèles, IPCC 2007).*

Bien que les recherches avancent il reste encore de nombreuses incertitudes...

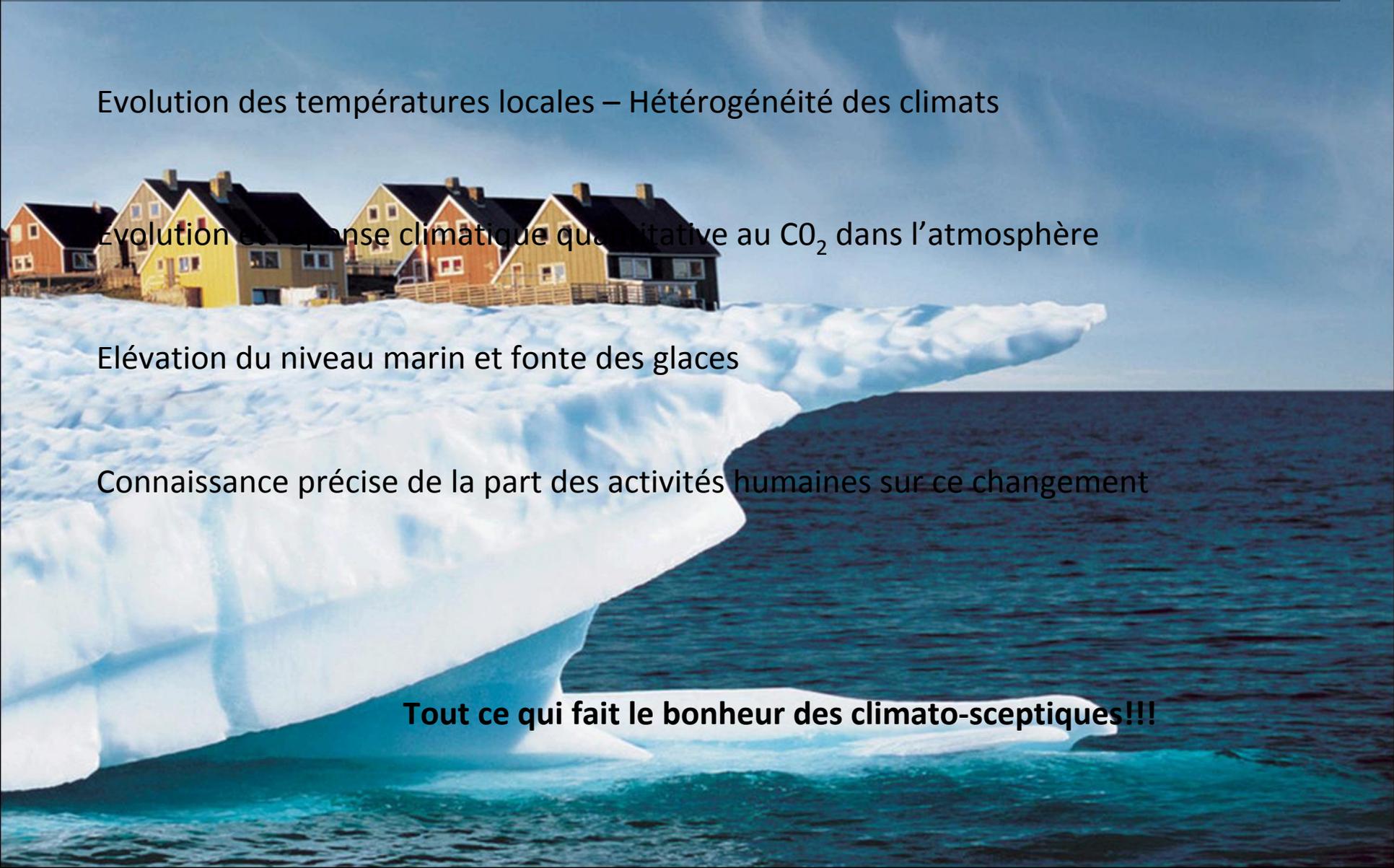
Evolution des températures locales – Hétérogénéité des climats

Evolution de la réponse climatique quantitative au CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère

Elévation du niveau marin et fonte des glaces

Connaissance précise de la part des activités humaines sur ce changement

**Tout ce qui fait le bonheur des climato-sceptiques!!!**



Merci de votre attention!

