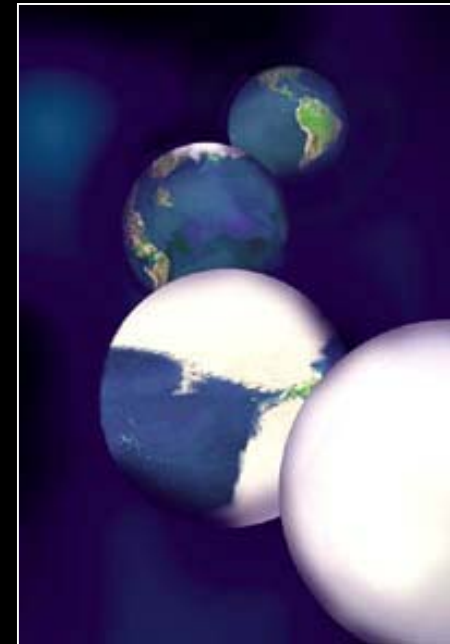
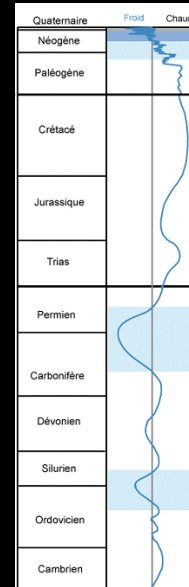
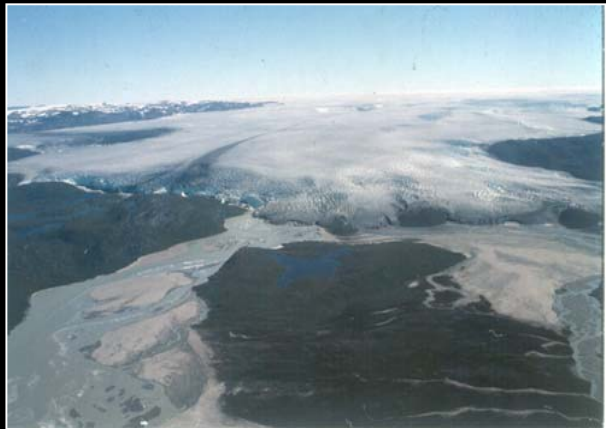


# Les variations climatiques,

mythes, réalités et questions.



**Tout ou partie de ce que je vais vous raconter ce soir, dont je vous ai parlé lors de l'Evolution et bien d'autres choses encore sur la Terre et le Système Solaire est disponible sur :**

**<http://planet-terre.enslyon.fr/planetterre/>  
(chercher *planet terre* sur Google, planet sans « e »).**

**Ce site contient environ un millier d'articles / dossiers / conférences (images + son) en ligne**

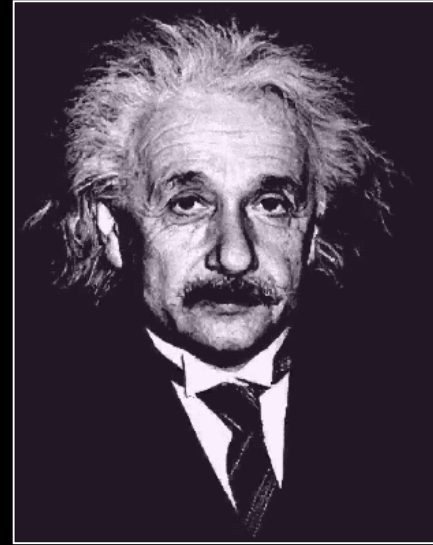


# Un préambule nécessaire : la relativité des échelles de temps.

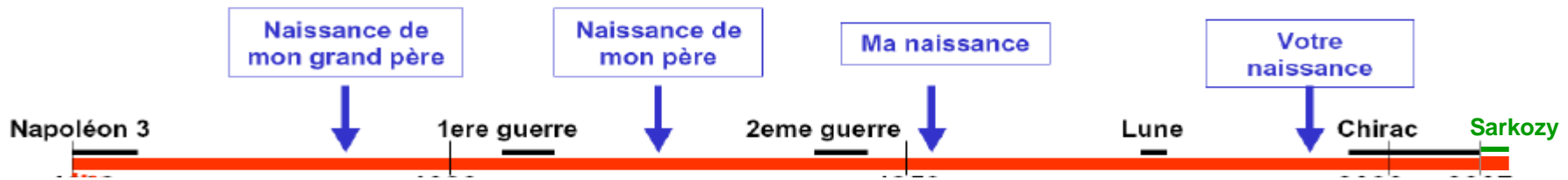
D'ici 1 heure, on va aboutir à des contradictions apparentes avec ce que tout le monde dit, du genre « on est dans une période de refroidissement climatique, et le CO2 n'a jamais été aussi bas que maintenant ». C'est vrai, mais c'est une question d'échelle d'observation.

Pour une abeille née le 1er mars et mourant le 30 juin, on est évidemment en période de réchauffement climatique. A la « dimension » de sa vie, elle a raison.

Pour un éphémère qui « naît » le 1er mai à 18h et qui meurt ce même 1er mai à 24h, on est bien sur en période de refroidissement climatique. A la « dimension » de sa vie, il a raison, et ce n'est qu'apparemment contradictoire avec ce que constate l'abeille



# Donc, attention messieurs-dames les non-géologues/astronomes : nous allons jongler avec les différentes échelles de temps !



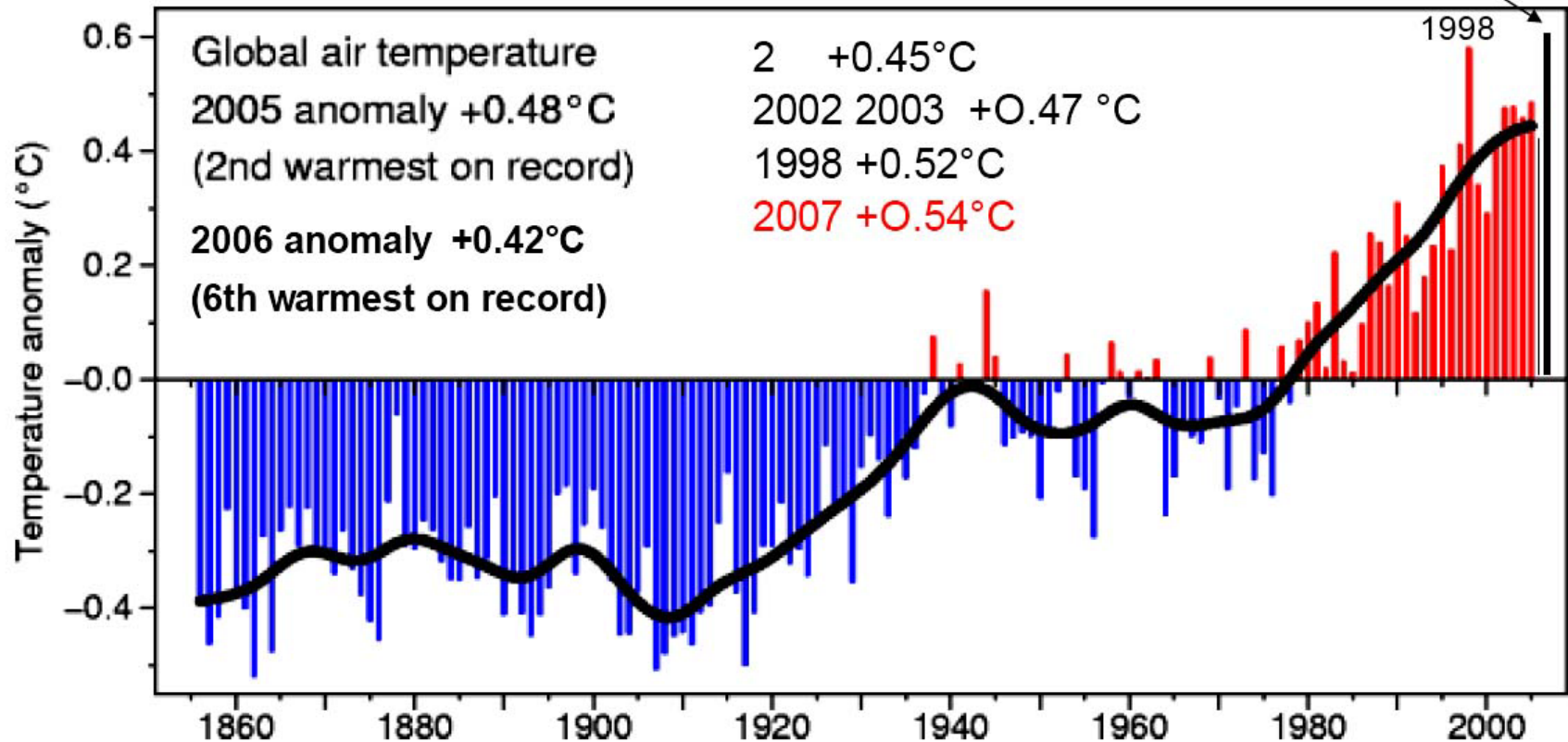
Il y a plusieurs « échelles de temps ». On va d'abord parler de l'évolution du climat à l'échelle de temps d'une famille (siècle). Dans les 90 minutes qui suivent, on va parler à l'échelle de 1 000 ans, de 700 000 ans, de 600 000 000 d'années, de 4 500 000 000. On a parfois du mal à se représenter à quoi cela correspond!

## L'échelle de 150 ans

(Extrait d'un cours fait il y a 2 ans devant des élèves de seconde à Villefranche-sur-Saône)

# Les variations historiques (post 1860) du climat : la première courbe qui fait peur !

JONES-FOLLAND prediction for 2007  
(January 4 2007)

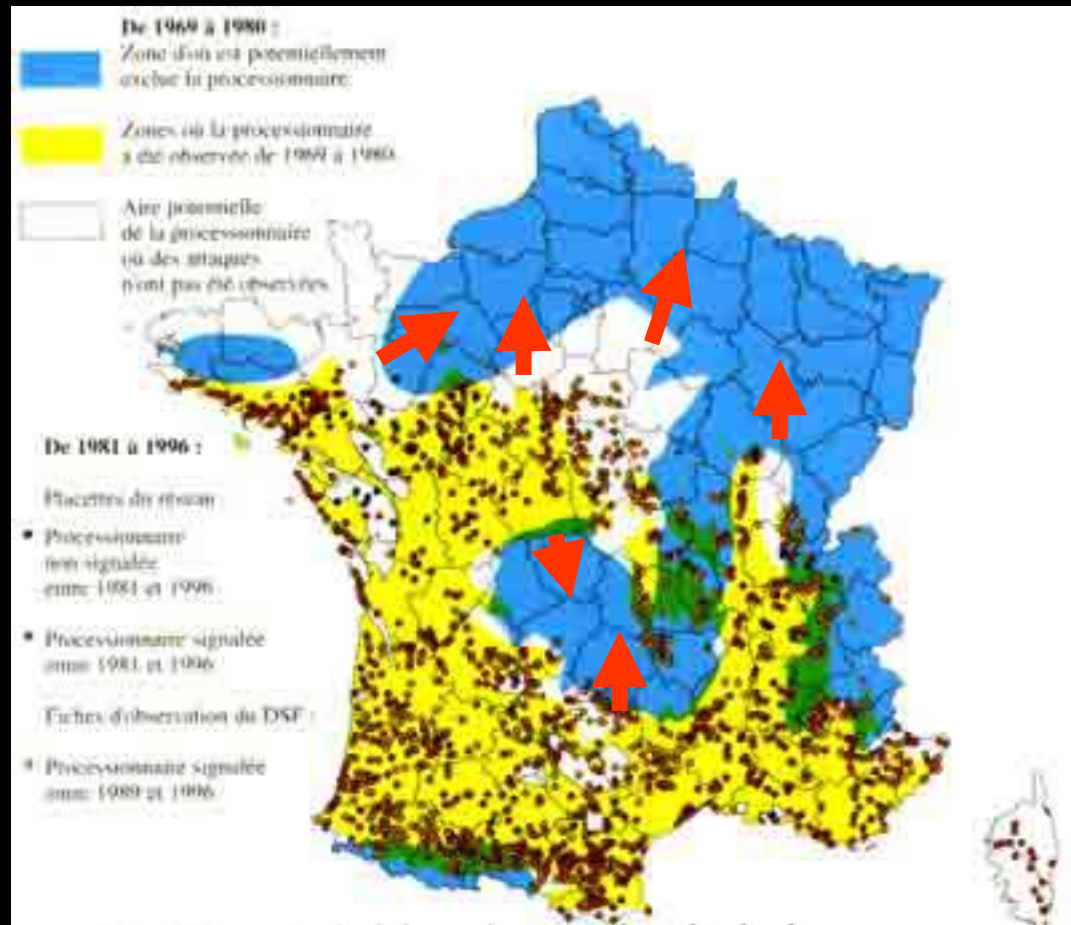


Le 0, par convention, c'est la température de 1960

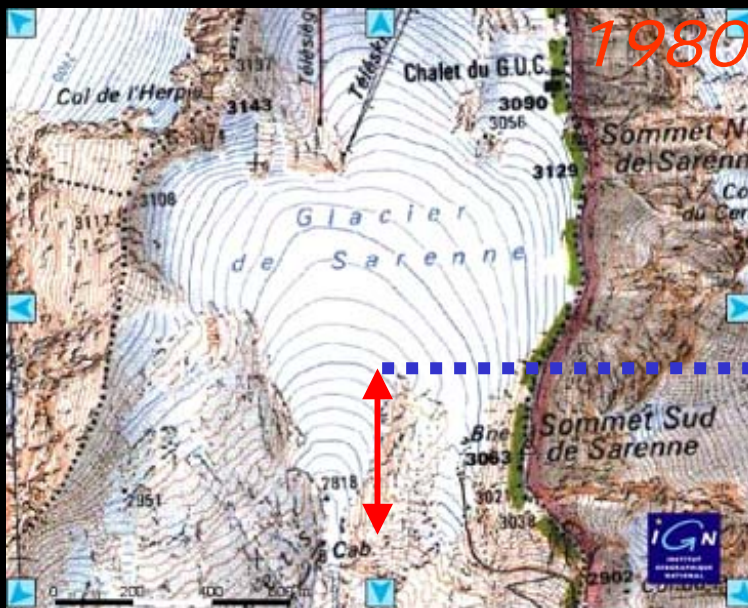
## Variation de la température moyenne mondiale

Climatic Research Unit, UEA, 2006

**Cette hausse de la température mondiale se voit aussi localement dans la progression vers le nord de l'habitat de certaines espèces animales ...**



**... comme la chenille processionnaire**



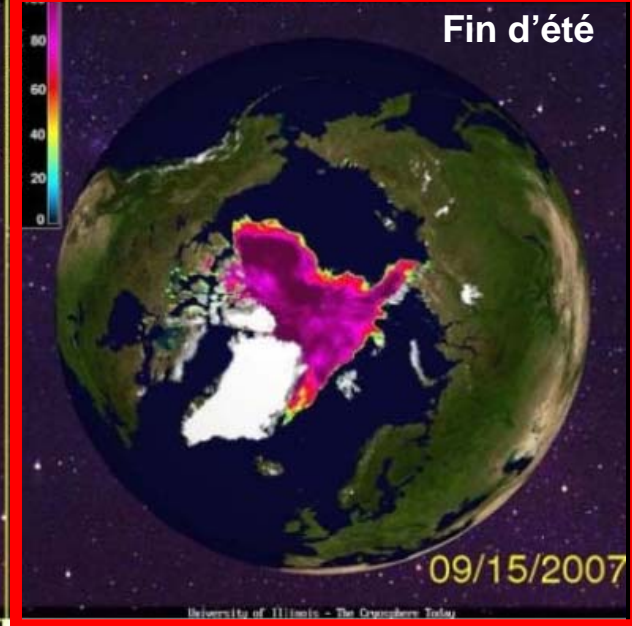
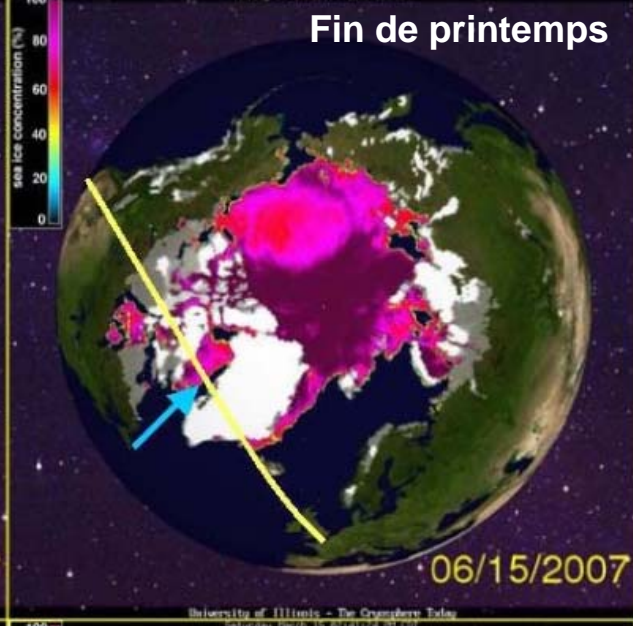
**Ca se voit aussi dans le récent recul des glaciers alpins (ou pyrénéens)**



Photographie / Pierre Thomas

**Ca se voit aussi avec le recul de la banquise estivale. Chaque été, la banquise se disloque.**

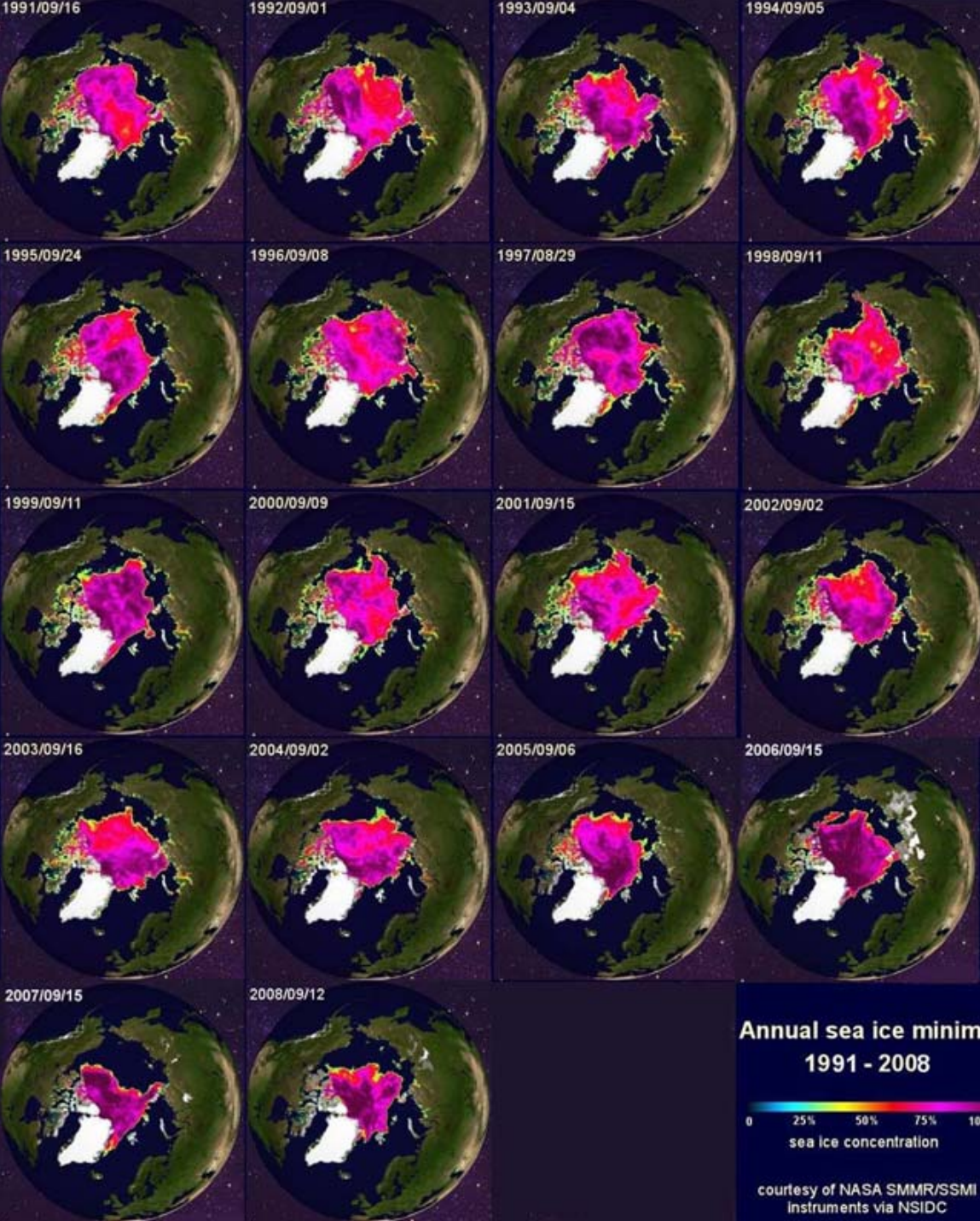




**Variations annuelles de la surface de la banquise nord de mars 2007 à mars 2008.**

**Images :  
University of Illinois  
- The Cryosphere Today**

**C'est cette banquise estivale qui se réduit d'années en années**



**La réduction de  
la banquise  
estivale nord  
depuis 1991**

**Annual sea ice minima  
1991 - 2008**

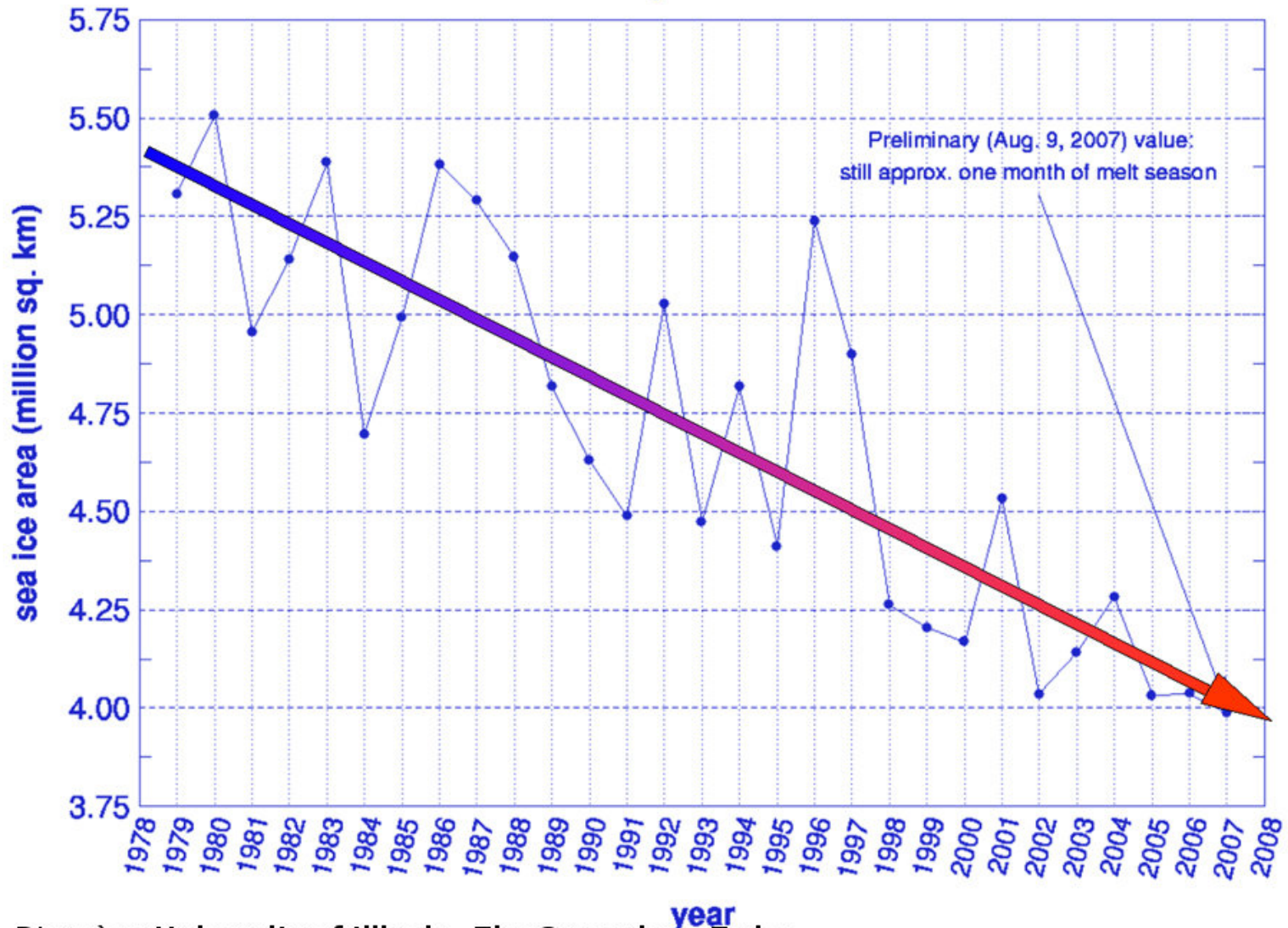
0 25% 50% 75% 100%

sea ice concentration

courtesy of NASA SMMR/SSM/I  
Instruments via NSIDC

# Sea ice area at summer minimum

million square kilometers

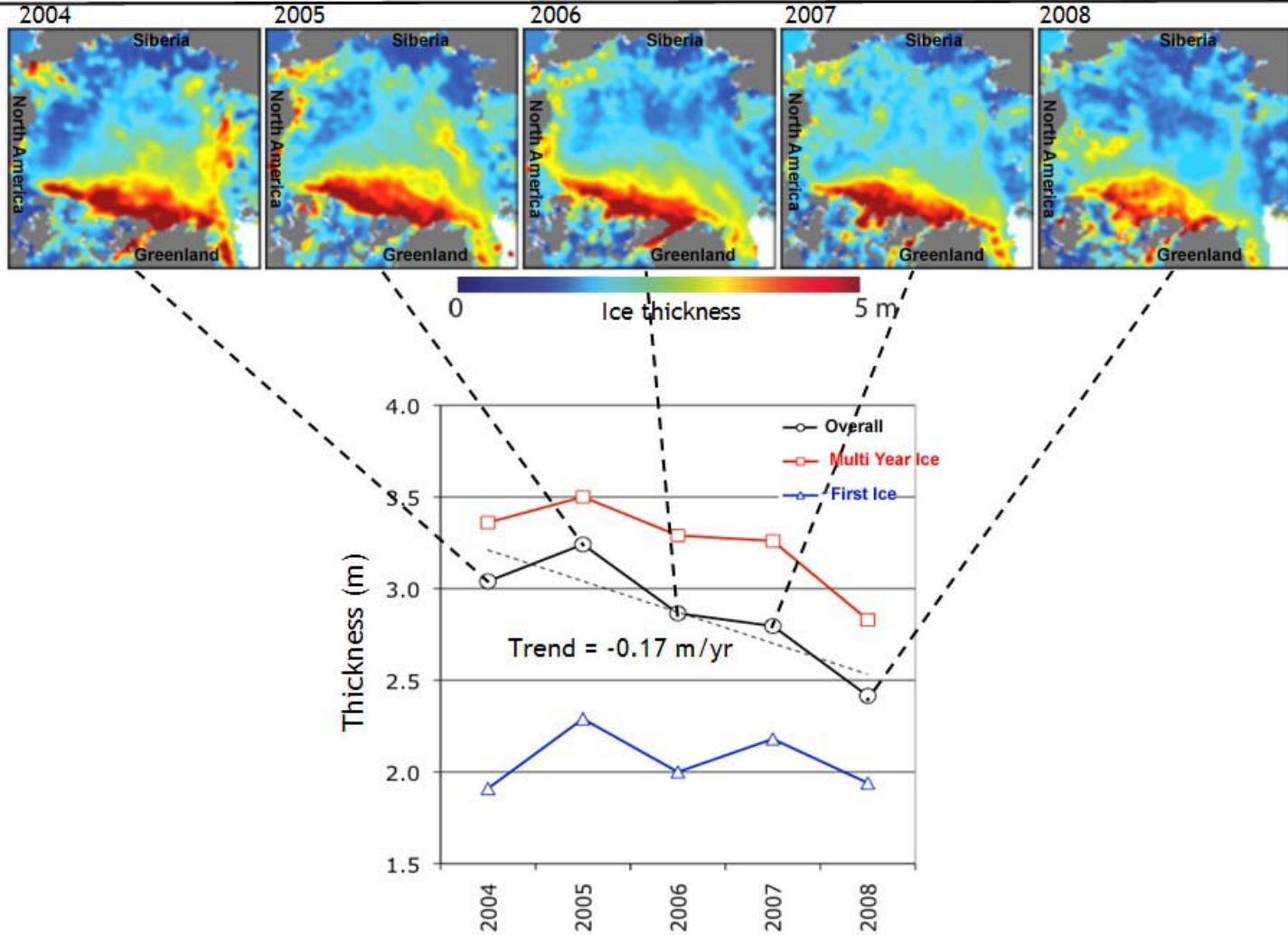


D'après : University of Illinois - The Cryosphere Today

**La tendance globale (flèche bleu et rouge) montre une diminution moyenne de 1.500.000 km<sup>2</sup> (3 fois la surface de la France) en 30 ans.**



# Trend in winter sea ice thickness

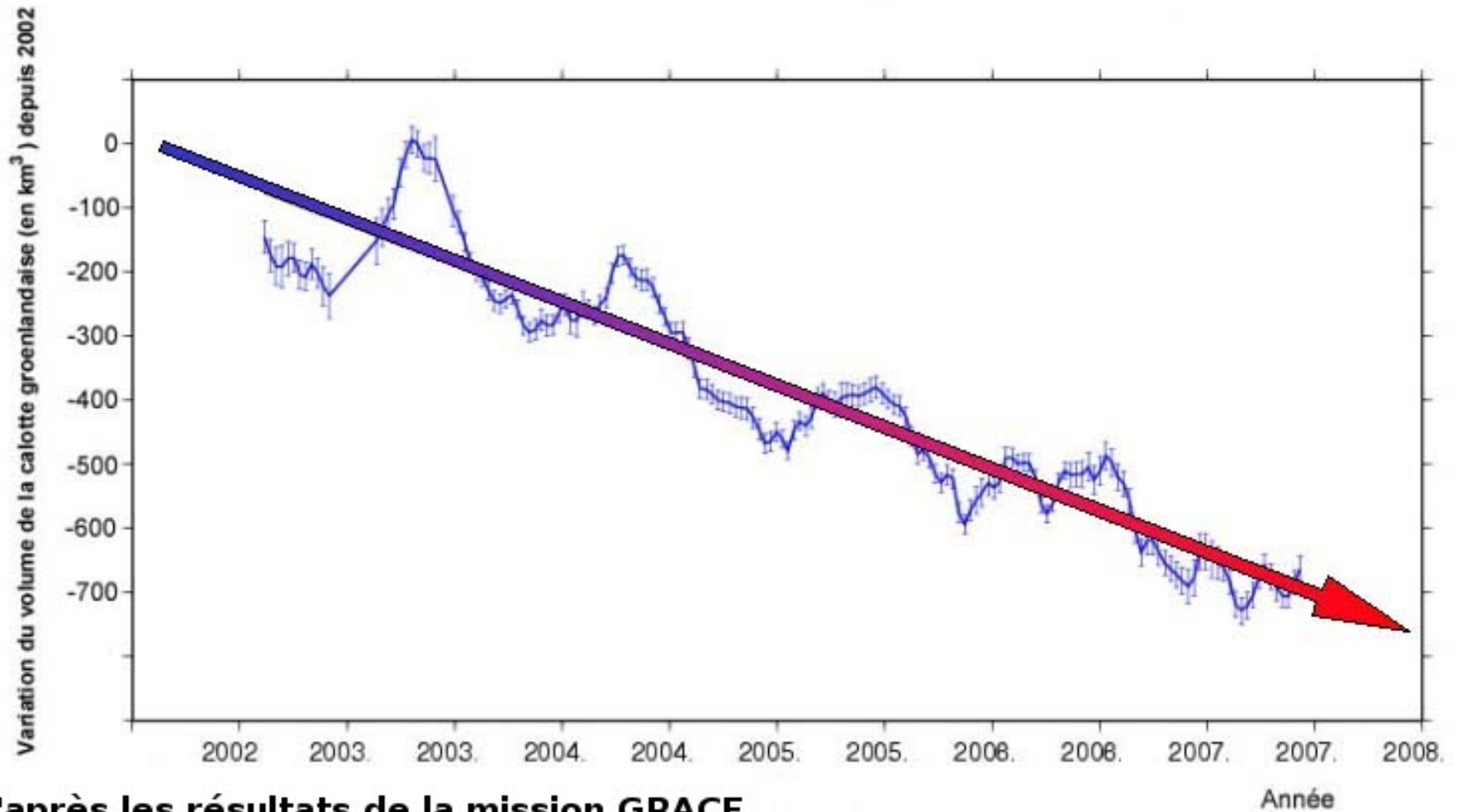


**Quand à la banquise hivernale, si elle ne réduit pas de surface, elle diminue d'épaisseur.**

# Il y a la banquise, mais aussi les calottes glaciaires continentales (groenlandaise et antarctique)



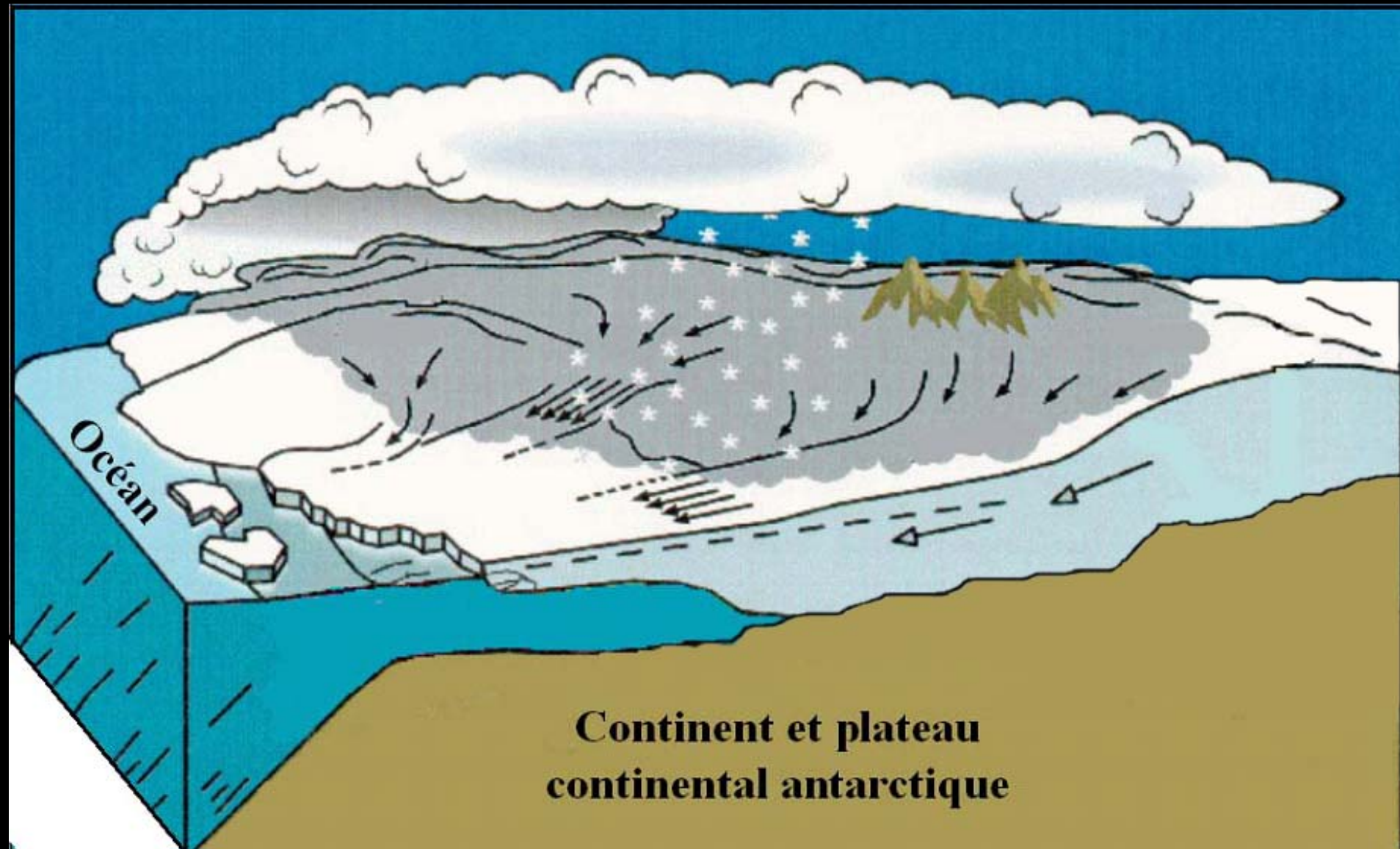
Photographie : Pierre Thomas



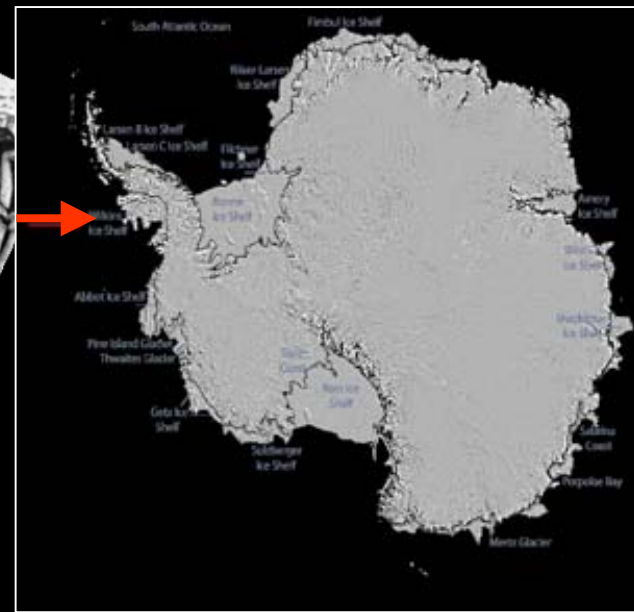
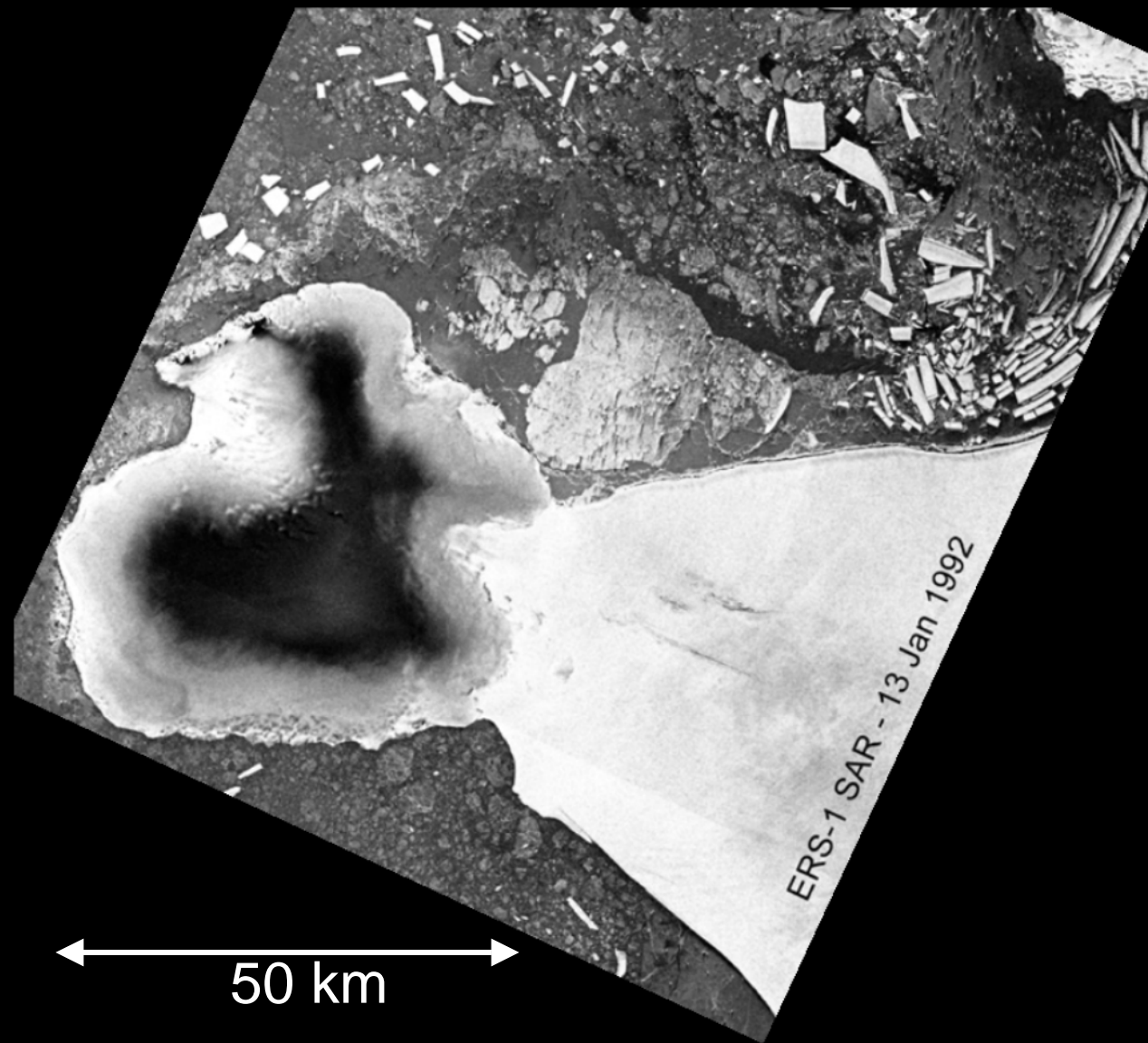
D'après les résultats de la mission GRACE

Année

**Diminution du volume de la calotte groenlandaise mesurée par satellite (depuis 2002). Le recul chronologique est certes faible, mais la tendance (provisoire ?) est très alarmante : 700 / 2 500 000 km<sup>3</sup> en 5 ans !**



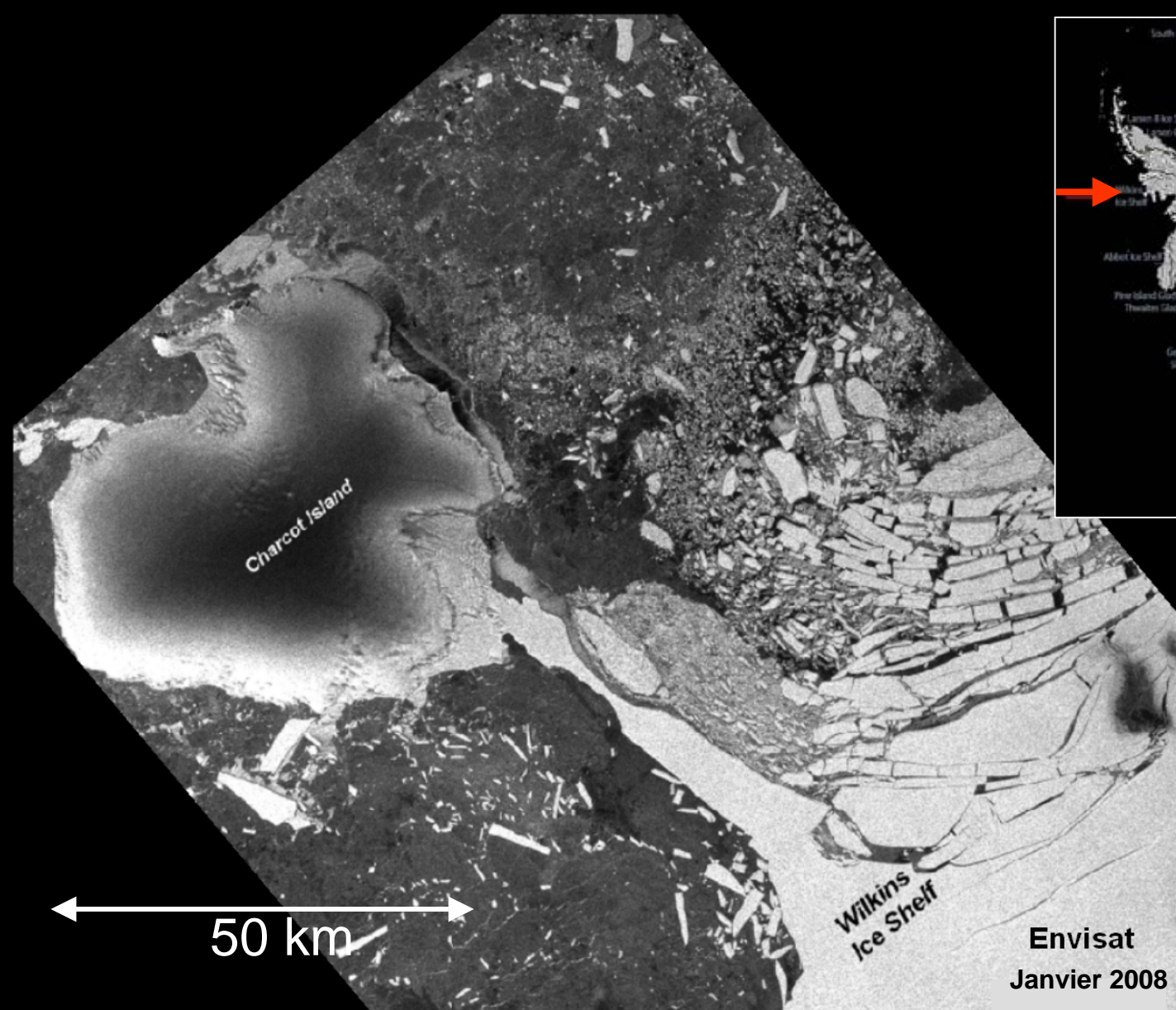
**Parfois, un glacier continental « déborde » sur la mer, et forme une plate-forme de glace (ice shelf)**



**Janvier 1992**

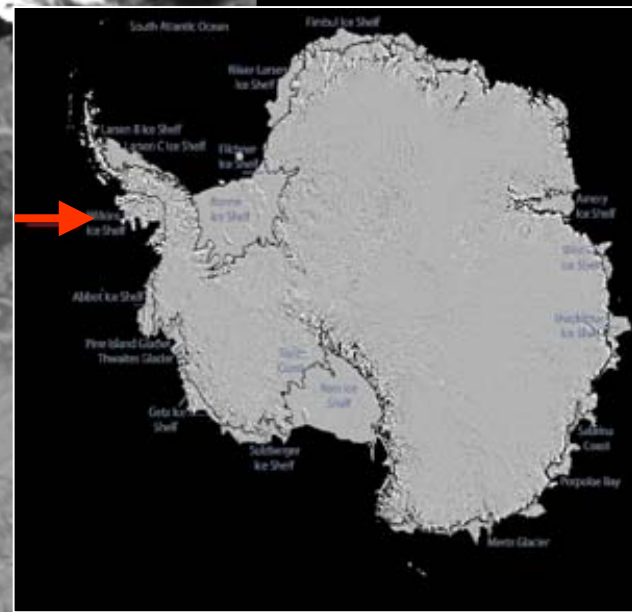
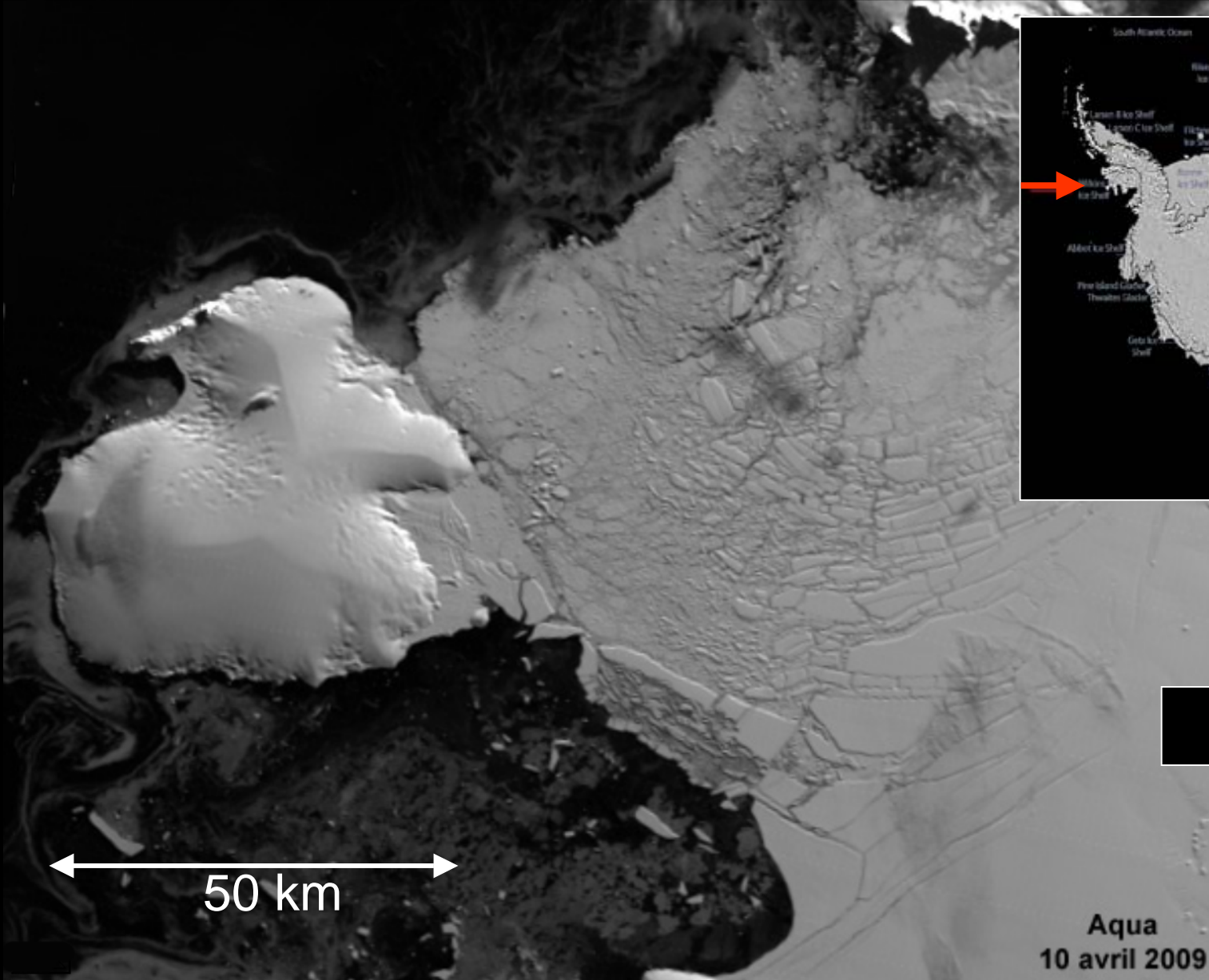
**Ces plate-formes de glace se réduisent elles-aussi.  
Ici, 17 ans d'histoire de la plate-forme Wilkins**





**Janvier 2008**

**Ces plate-formes de glace se réduisent elles-aussi.  
Ici, 17 ans d'histoire de la plate-forme Wilkins**



**Avril 2009**

**Ces plate-formes de glace se réduisent elles-aussi.  
Ici, 17 ans d'histoire de la plate-forme Wilkins**

## **Autre donnée : la dilatation des mers**

**L'eau se dilate de 0,026 % quand sa température augmente de 1° C. Ce n'est pas beaucoup.**

**Mais ...**

**Si le 1<sup>er</sup> km de la mer voit sa température augmenter de 4°C (moyenne des estimations pour dans 1 siècle), ça fait une augmentation de (en cm):**

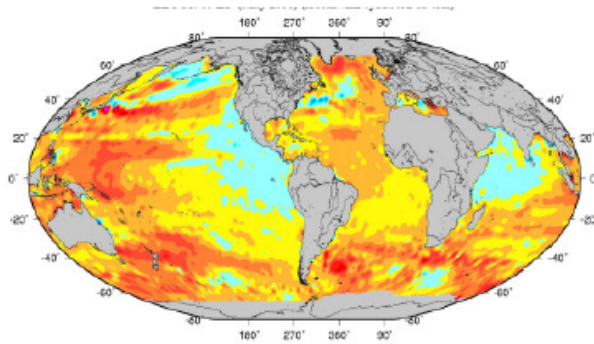
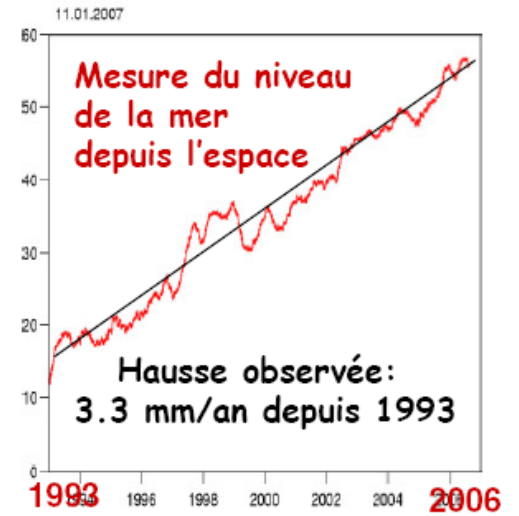
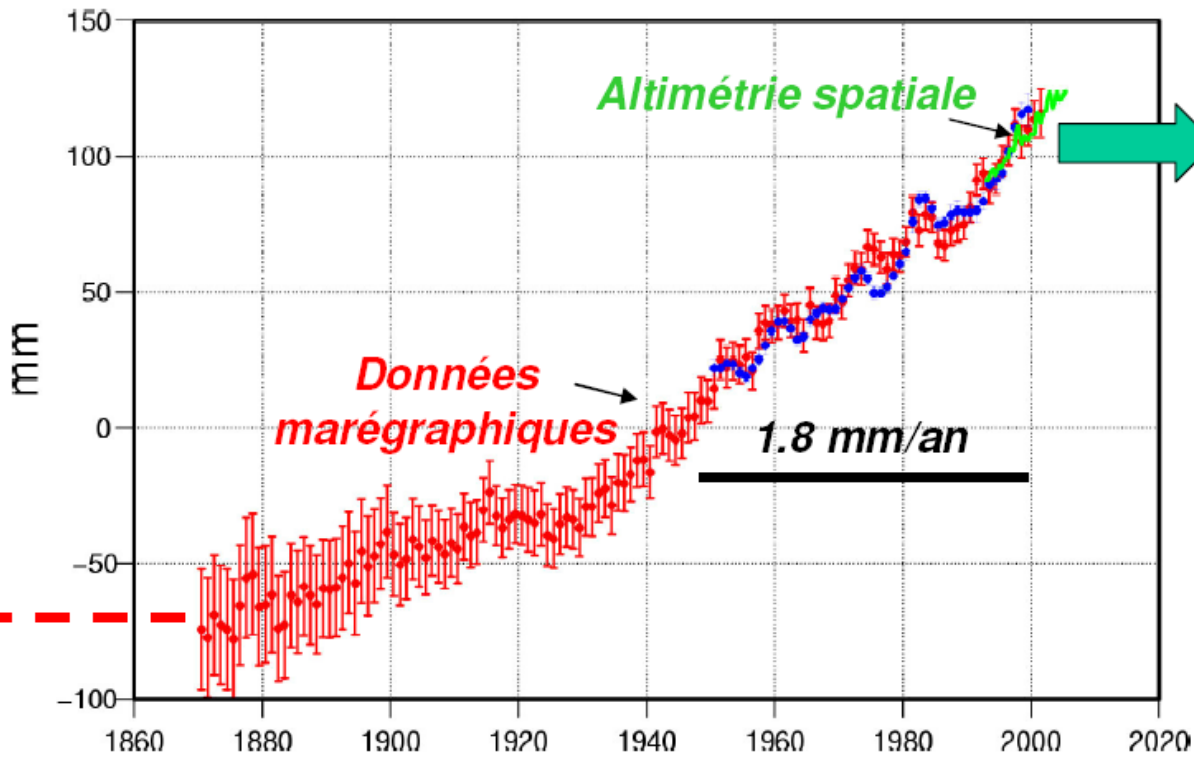
$$100\ 000 \times 4 \times 0,026\% = 100\ \text{cm} = 1\ \text{m}.$$

*Si c'est toute la tranche d'eau de l'océan (5 000 m) qui se réchauffe, ça monte de 5m. Mais pour ça, il faudra attendre.*

**Si on y ajoute les quelques dm dus à la fonte partielle des glaciers de montagne, ça fait entre 1m et 1,5 m d'augmentation du niveau de la mer dans 1 siècle.**

**Nos petits enfants devront apprendre à nager, surtout si ils habitent aux Pays Bas, au Bengladesh ...**

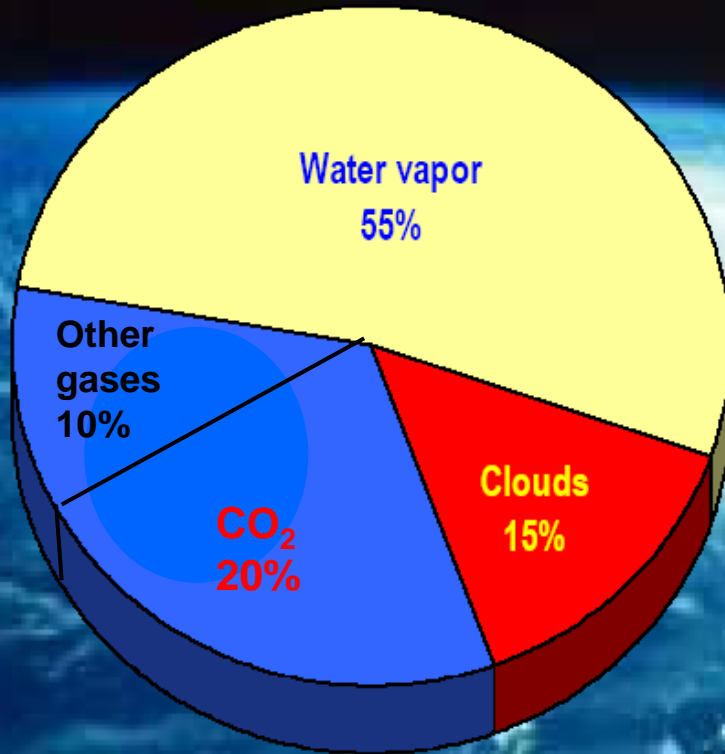




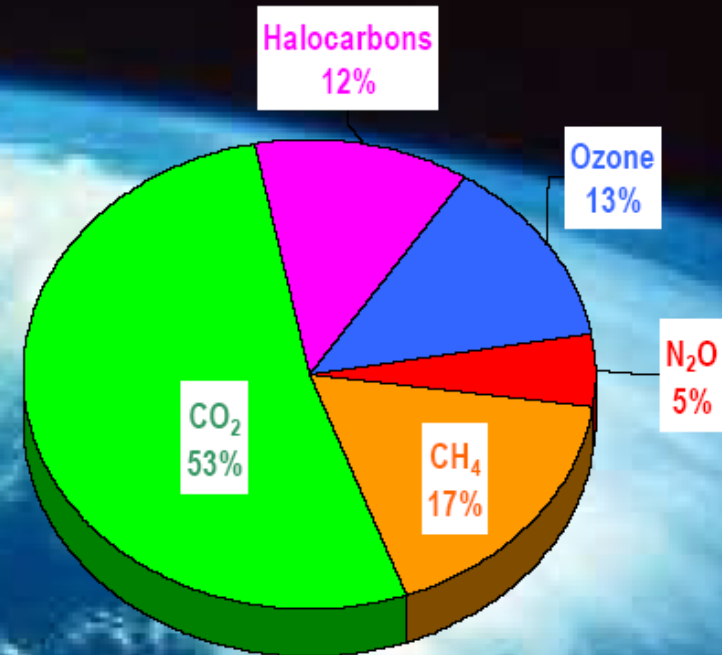
Mais la hausse n'est pas uniforme!  
 Jaune/rouge ↗  
 bleu ↘

**Là aussi, cela a déjà commencé ! La mer est montée de 20 cm depuis le début de la 3eme République**

# Greenhouse gases



**Naturel**  
**(155 W/m<sup>2</sup>)**



**Additionnel**  
**(2.8 W/m<sup>2</sup>)**

**Les principaux accusés : les Gaz à Effet de Serre (GES)**

# Les variations du CO<sub>2</sub> atmosphérique

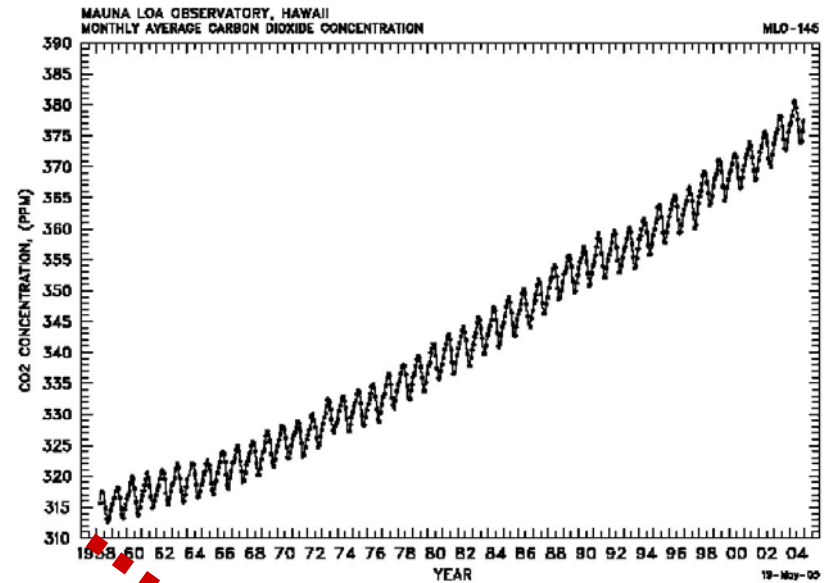


Figure VII-1 : Évolution de la concentration du gaz carbonique dans l'air, d'après les mesures de l'observatoire du Mauna Loa, Hawaï (unités : parties par million). L'oscillation annuelle est due principalement à l'absorption du gaz carbonique par la végétation pendant le printemps et l'été de l'hémisphère Nord.

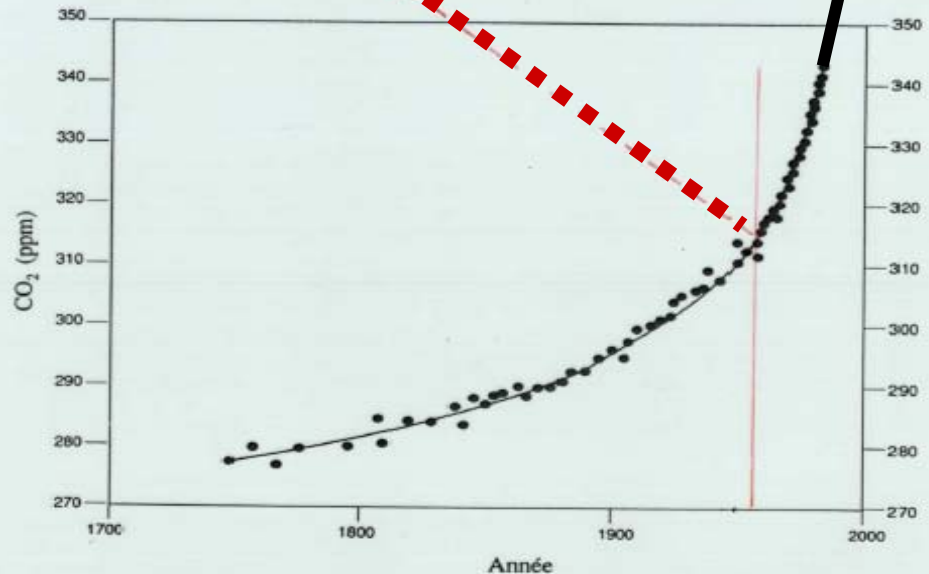
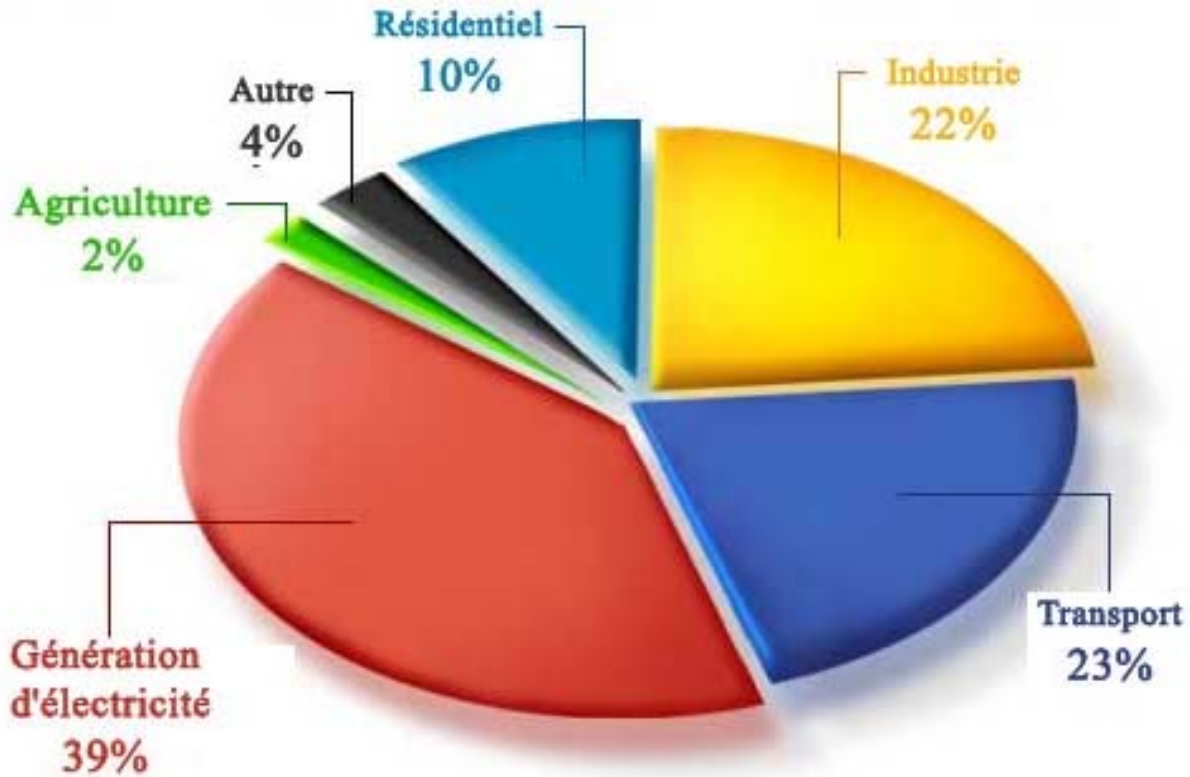


Figure VII-2 : Évolution séculaire de la concentration atmosphérique du gaz carbonique, d'après l'analyse chimique des bulles d'air scellées dans les glaces arctiques, et des mesures directes pour les trente dernières années.



# Production de dioxyde de carbone par secteur



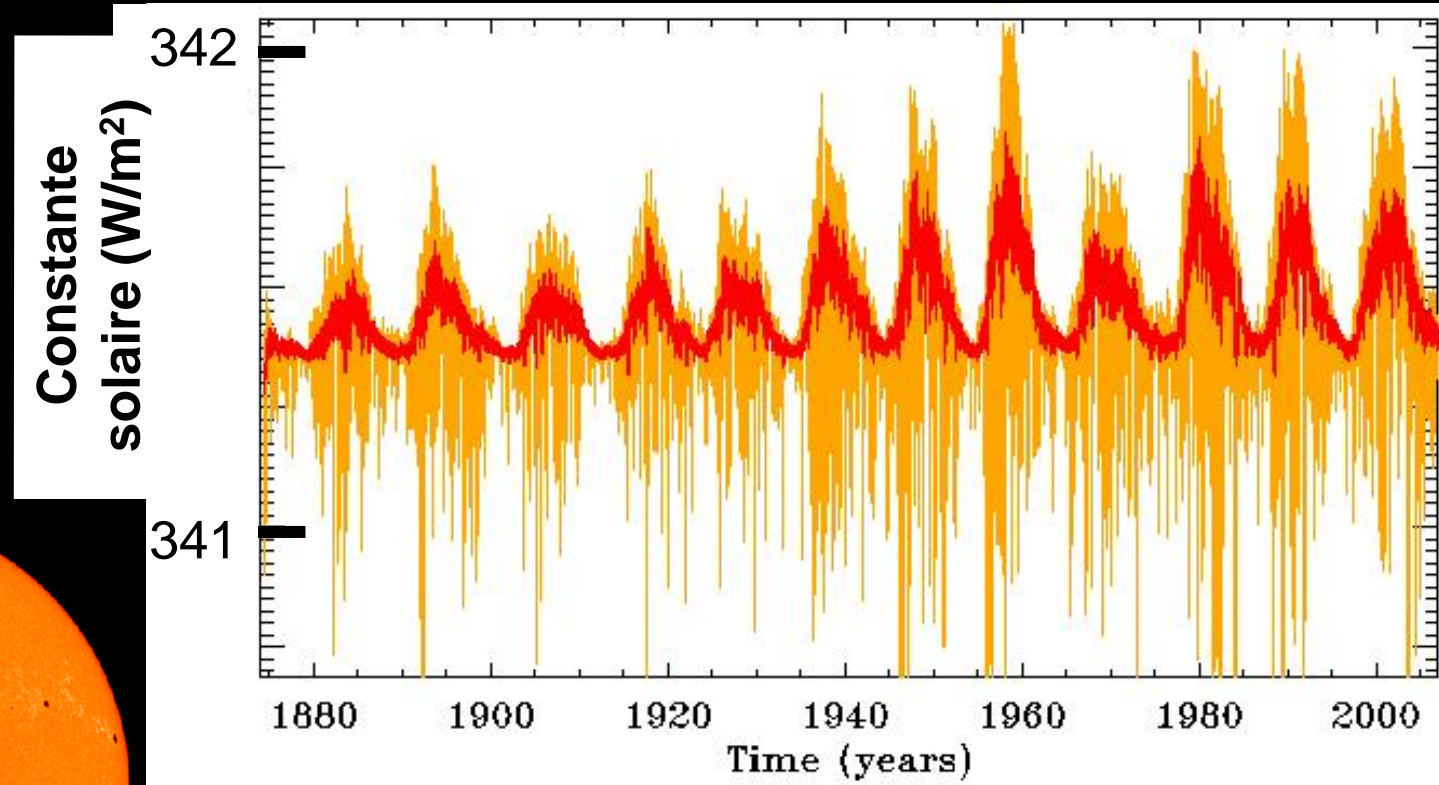
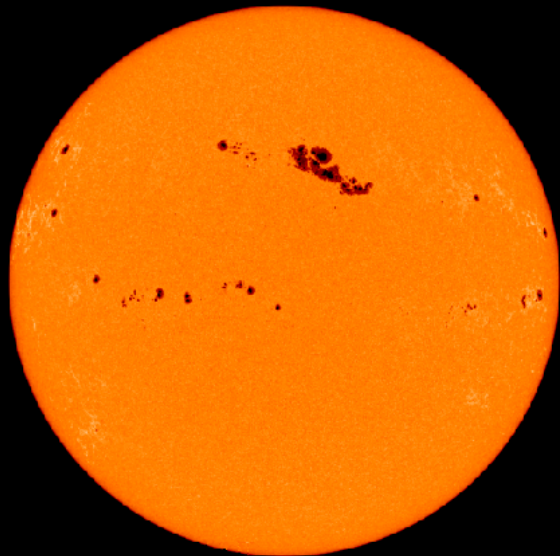
**Pour quoi faire ?**

Total : 25 milliards de tonnes de CO2 / an





**Et si l'augmentation de température était due au seul soleil, comme le disait ce cher George (Bush) et le disent encore d'autres « négationnistes » ?**



**L'augmentation moyenne est de  $0,12 \text{ W/m}^2$  en 120 ans**

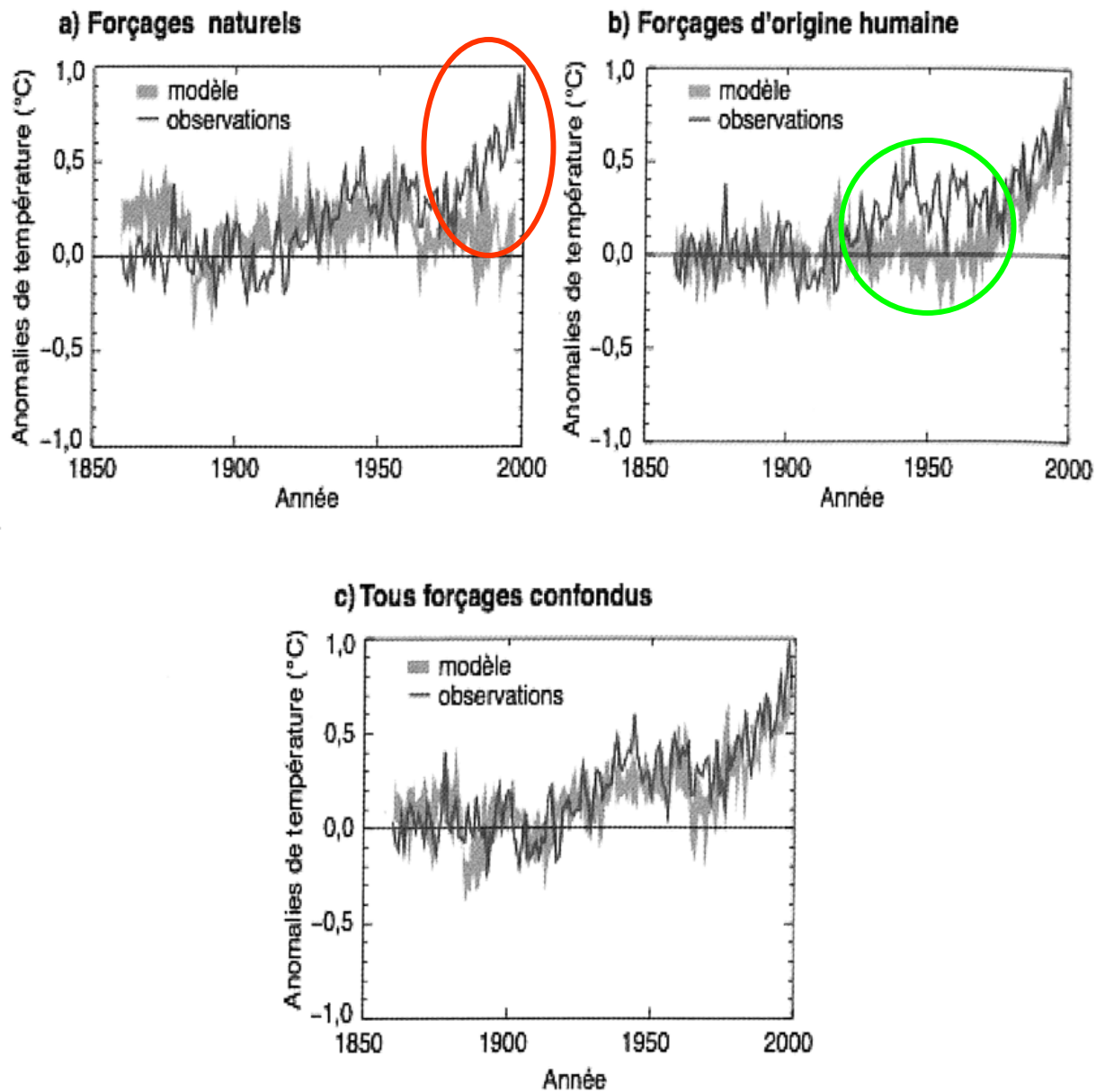


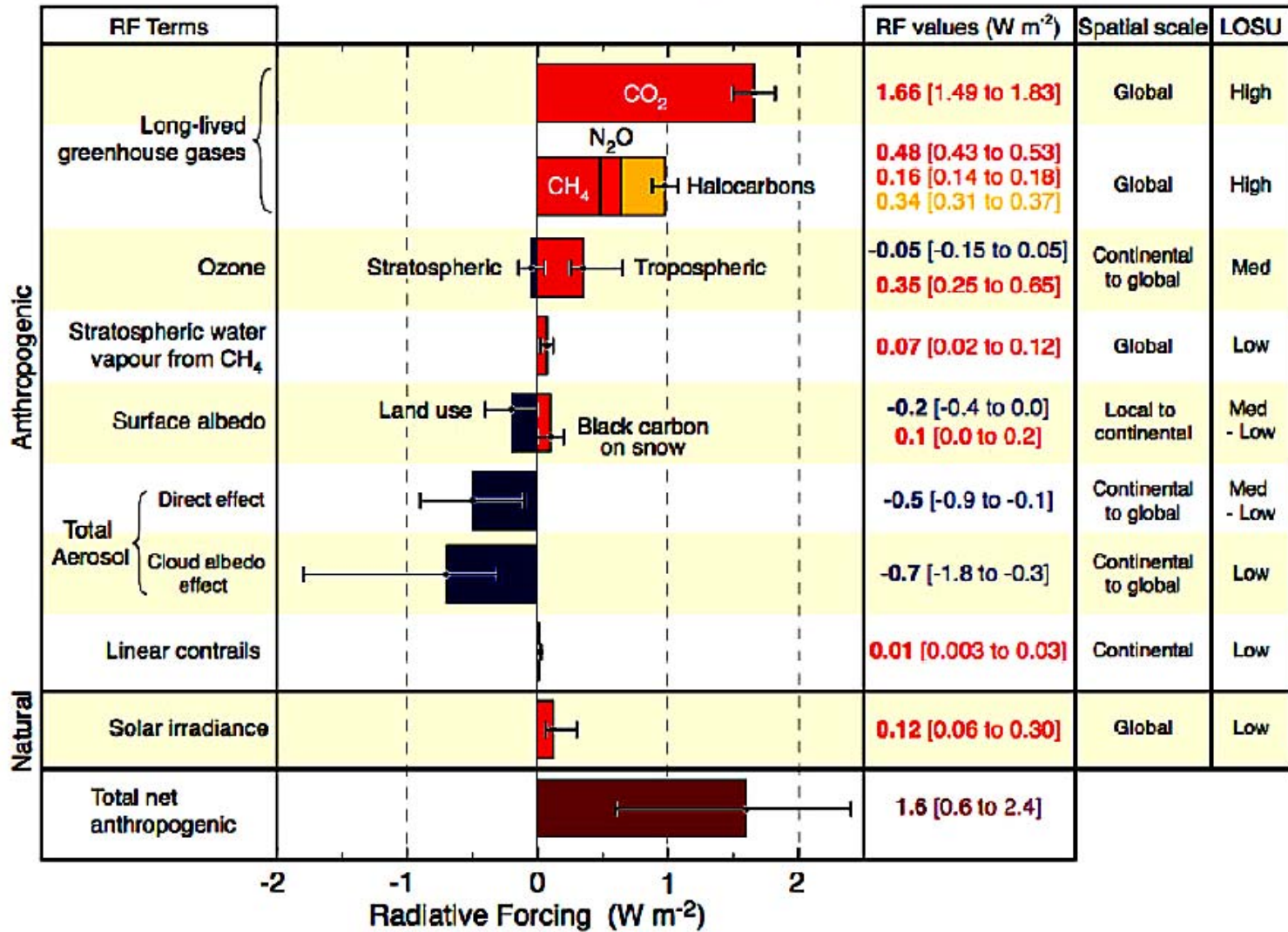
Figure 17.27. Comparaison des températures calculées par les modélisations et observées depuis 1860.

Le graphique (b) permet de constater que l'inclusion des forçages anthropiques permet d'expliquer une part non négligeable de l'évolution constatée mais c'est la modélisation (c), qui combine les forçages naturels et anthropiques, qui reproduit le mieux les observations.  
Source : GIEC.

**Le forçage  
purement  
anthropique  
n'explique pas toute  
l'anomalie 1930-  
1970, n'en déplace  
aux ayatollahs  
verts.**

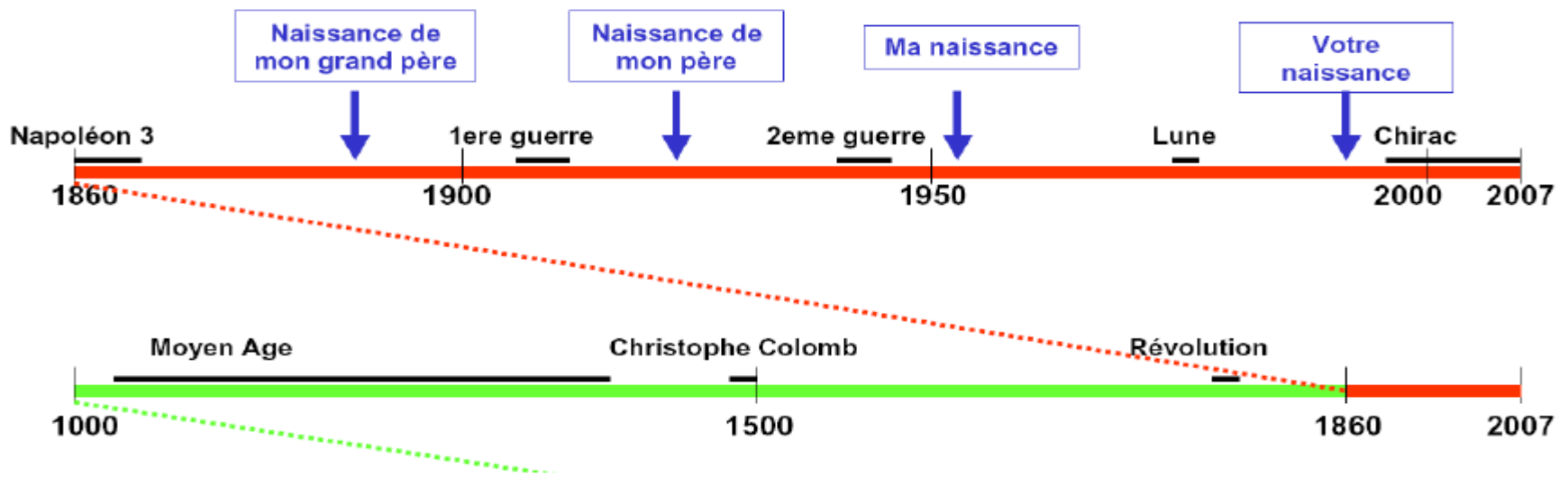
**Mais le forçage  
naturel (soleil)  
n'explique pas du  
tout l'anomalie  
depuis 1980, n'en  
déplace aux  
relativistes et autres  
négationnistes du  
climat.**

# Radiative Forcing Components / 1860



©IPCC 2007: WG1-AR4

**Les pourcentages des différents « acteurs ». La variation solaire compte 10 à 15 fois moins que la variation du CO<sub>2</sub>**

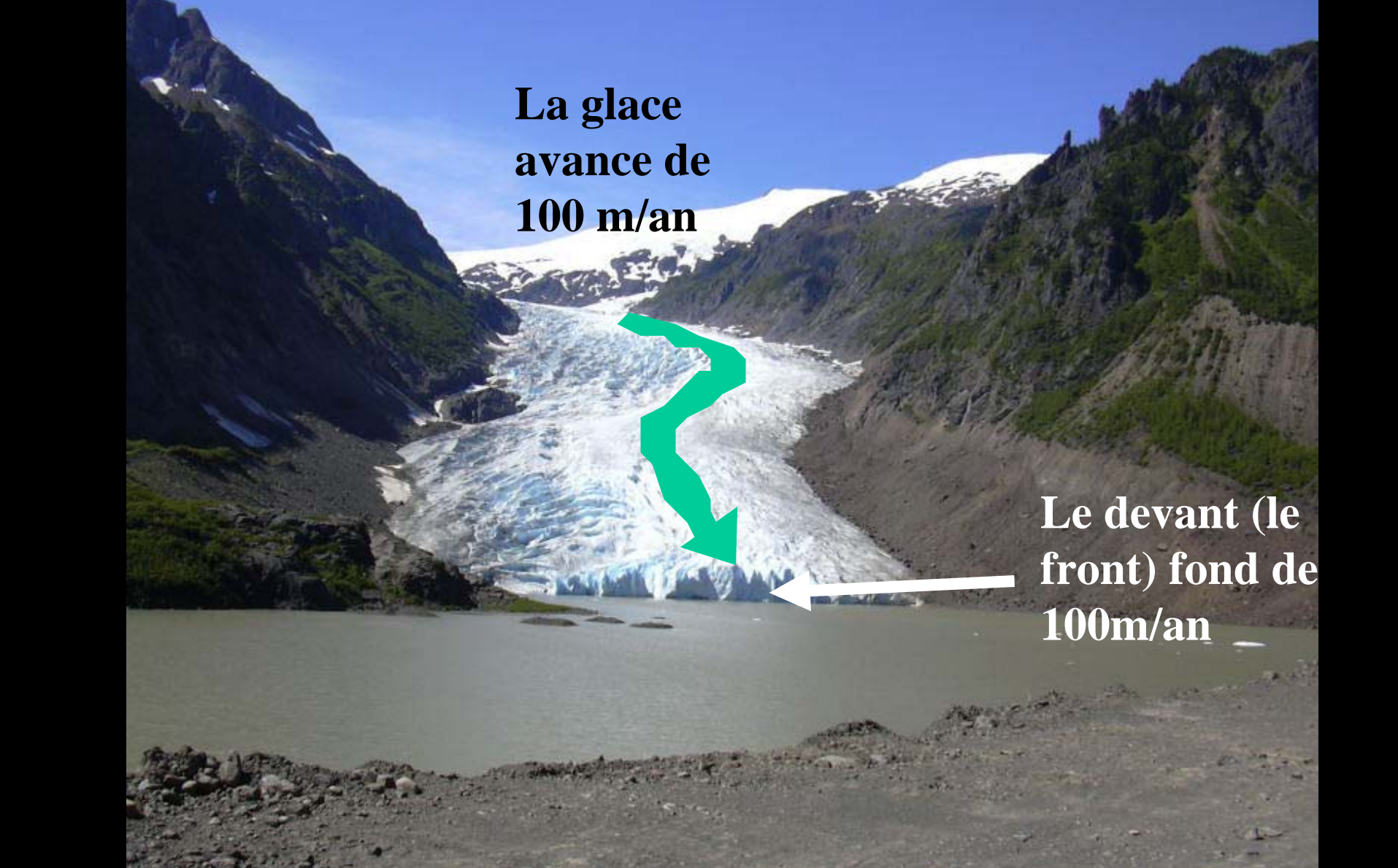


**L'échelle de 1000 ans. Comment fait-on avant 1860, avant l'invention de la météo « mondiale », avant la généralisation des thermomètres ... ?**

**L'échelle de 1 000 ans**

**Comment fait-on avant 1860, avant l'invention de la météo, des thermomètres ... ? On utilise les glaciers, les chroniques historiques ...**





**La glace  
avance de  
100 m/an**

**Le devant (le  
front) fond de  
100m/an**

**Un glacier, comment ça marche ? Si la fonte du front compense la descente de la glace, le glacier est stable.  
Sinon, le glacier avance ou recule**

**Depuis 1850, les glaciers reculent.  
Voici le glacier de l'Invernet en 2000**



**En 1970. On voit le recul en 30 ans,  
recul « récent »**



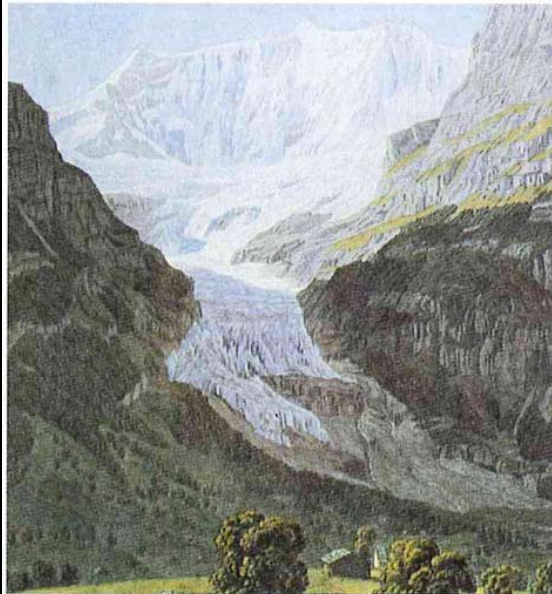


**Le même en 1850. On voit le recul « récent », 2 fois plus faible en 4 fois moins de temps. Le recul « récent » va 2 fois plus vite que l'historique**



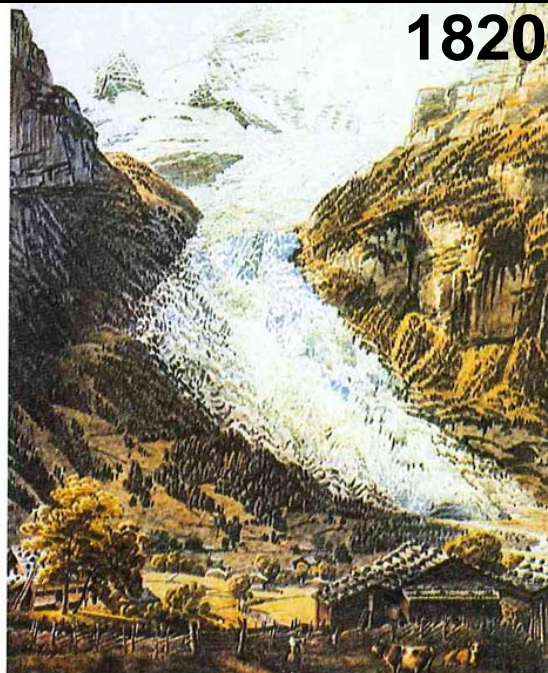
Figure I.6. Le glacier inférieur de Grindelwald

1808



1. vers 1808 (d'après J.J. Biedermann; point g sur la figure I.5),

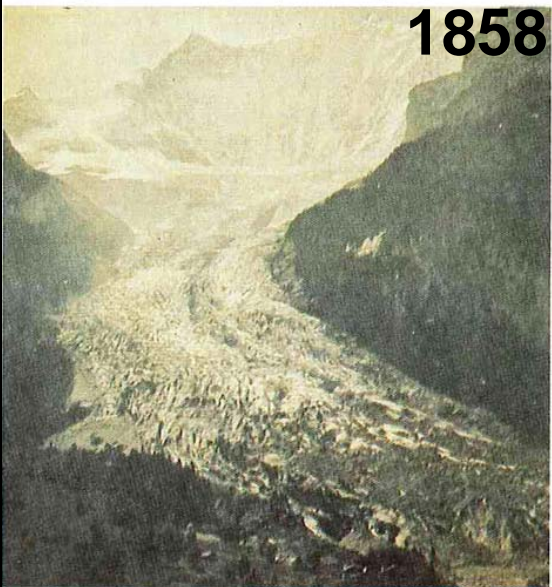
1820



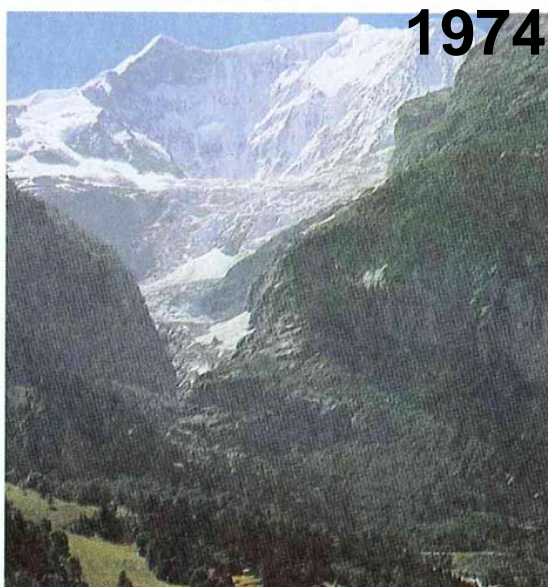
2. vers 1820, alors que son front se situe environ 1600 m en aval du front actuel parmi les champs et les maisons d'une vallée très habitée et aisément accessible (aquarelle 42,8 x 33,6 cm; collection privée; photo H. Zumbühl, Université de Berne; ONST, 1981),

3. en 1858 (photo; tiré de Schotter, 1988 point O sur la figure I.5),

1858



1974

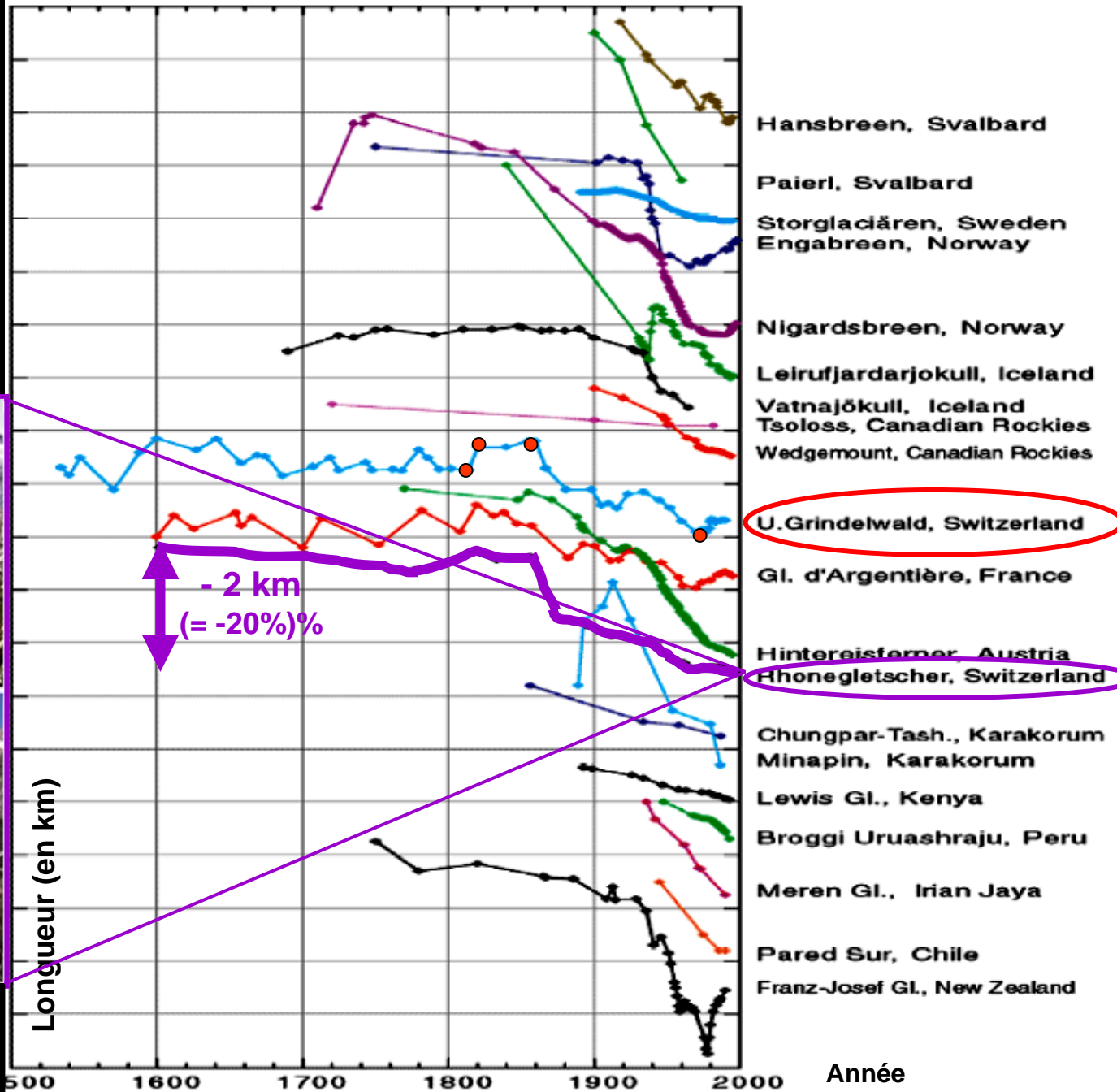


4. en 1974 (photo; tiré de Schotterer, 1988).

**Un glacier bien documenté : le glacier inférieur de Grindelwald.**

**Cette époque froide, qui se termine vers 1860 est appelée « Petit Age Glaciaire »**

# Variation de la longueur de quelques glaciers de montagne



**On peut étudier les  
chroniques  
« historiques ».  
Un exemple  
« photogénique » :**

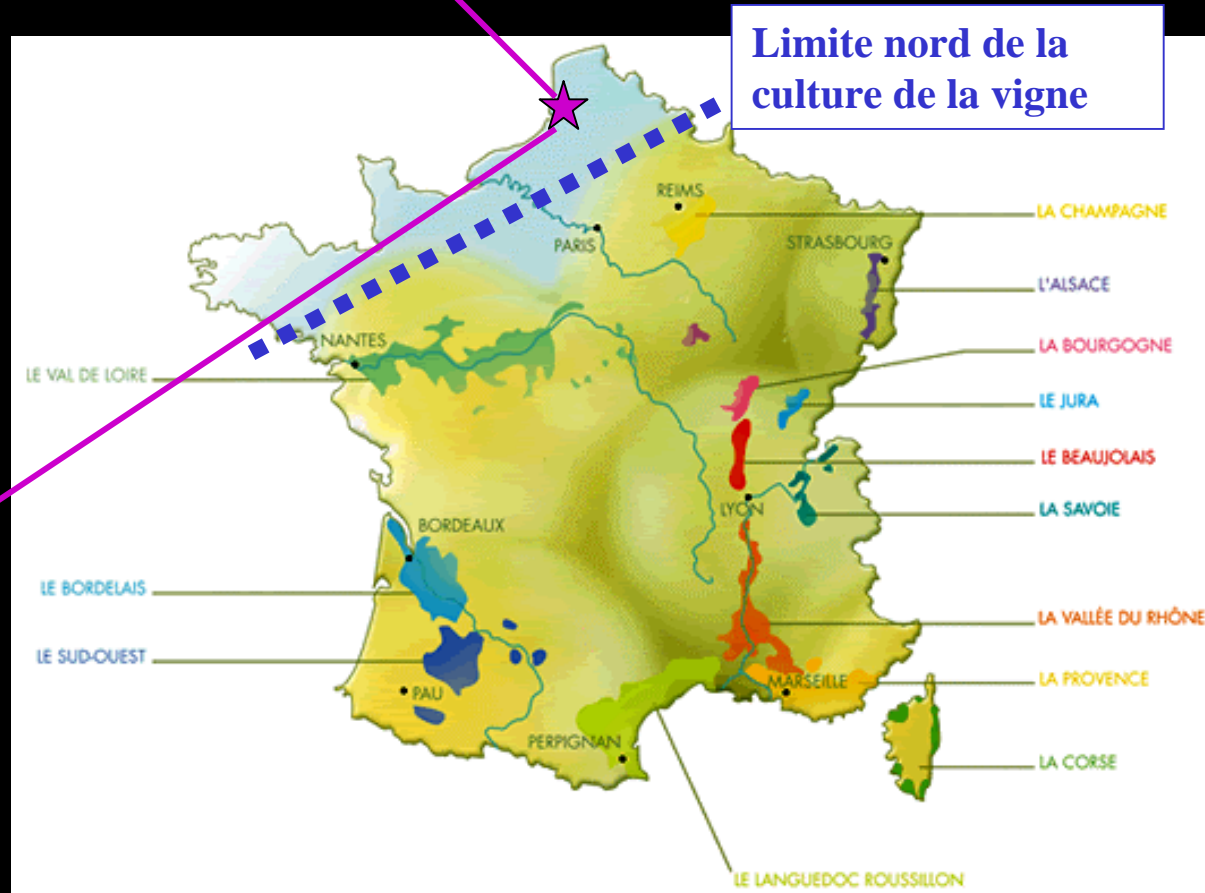


**Voici comment  
Breughel (16eme  
siècle) voyait le « petit  
âge glaciaire »**



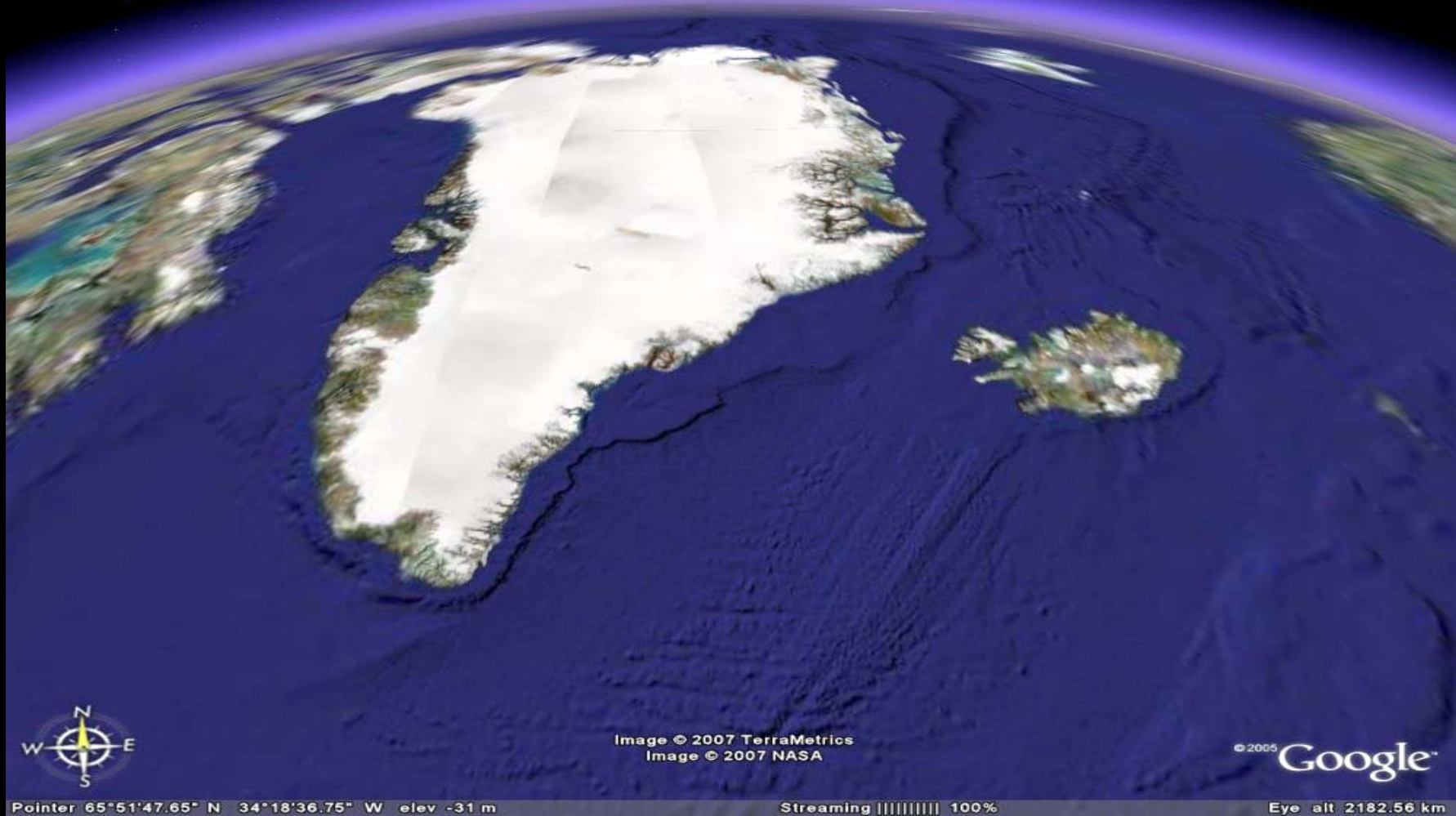
**Cathédrale d'Amiens**  
**(13ème siècle),**  
**3 siècles avant**  
**Breughel**

**Allons à Amiens, en Picardie.**  
**C'est trop au nord pour**  
**qu'on y cultive de**  
**la vigne !**

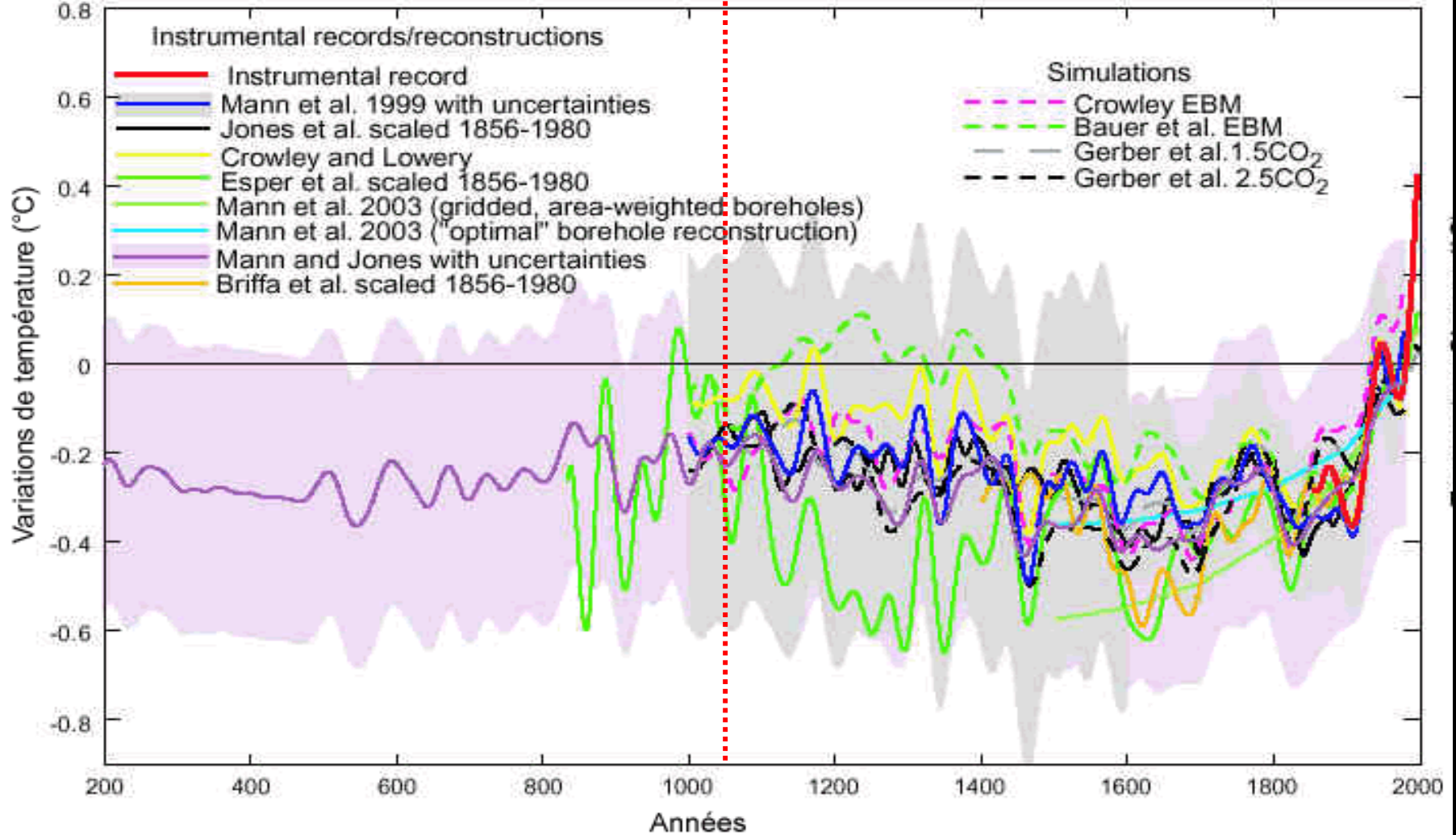


**Au 13eme siècle, il faisait assez chaud en Picardie pour cultiver la vigne. Le climat était plus chaud qu'aujourd'hui. C'est un des exemples de l'études des pratiques agricoles, de l'extension des cultures ...**



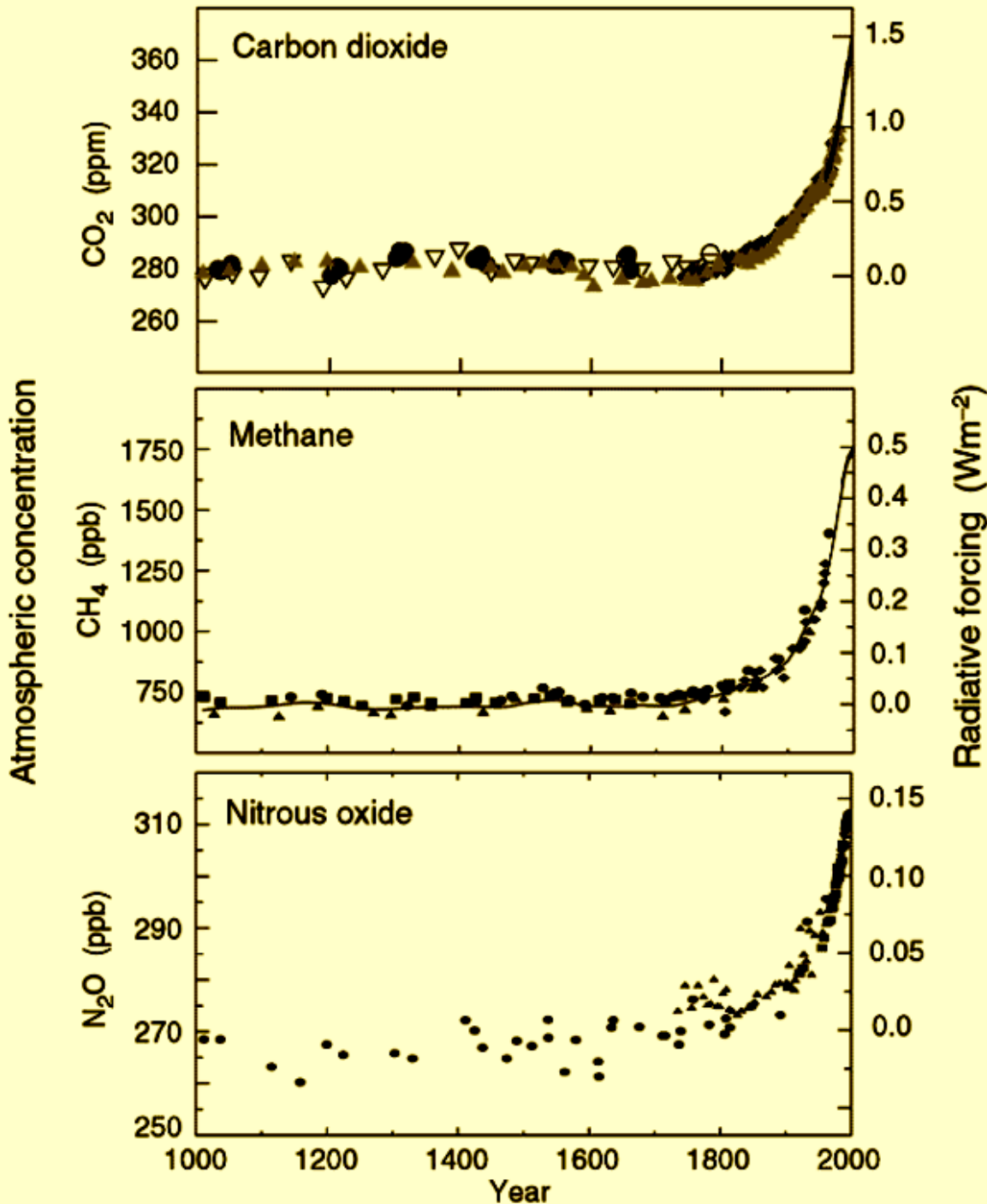


**Un autre exemple : à cette époque (13eme siècle), les Vikings appelaient cette grande île le « pays vert » (Groenland), car la côte était verte et des éleveurs pouvaient élever leur bétail**



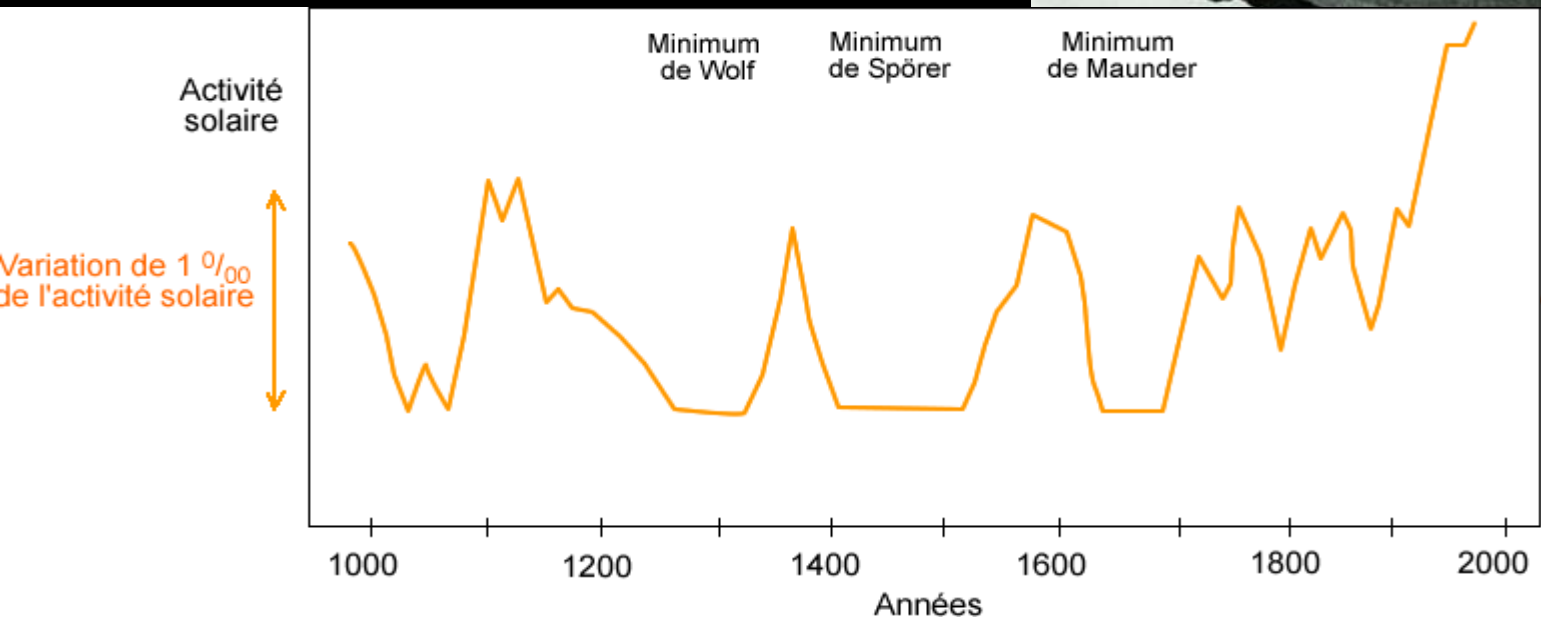
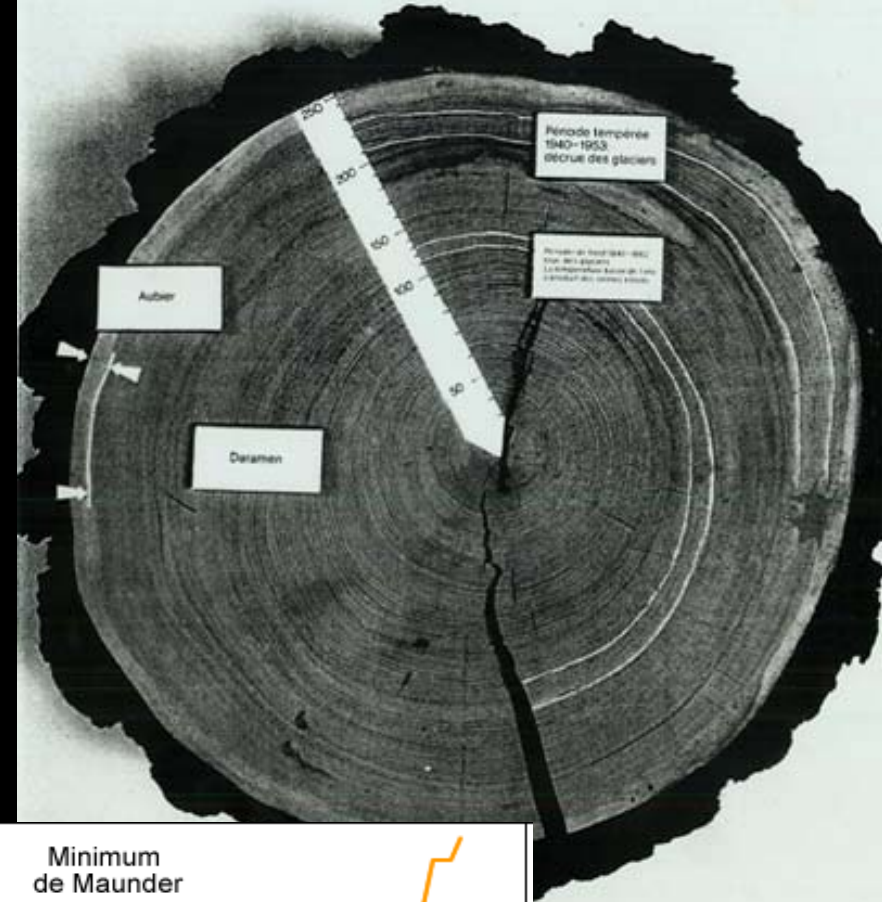
**On peut essayer de synthétiser tout ça (ces méthodes semi-quantitatives, plus d'autres comme les isotopes dans les glaciers, pour les régions avec glaciers)**

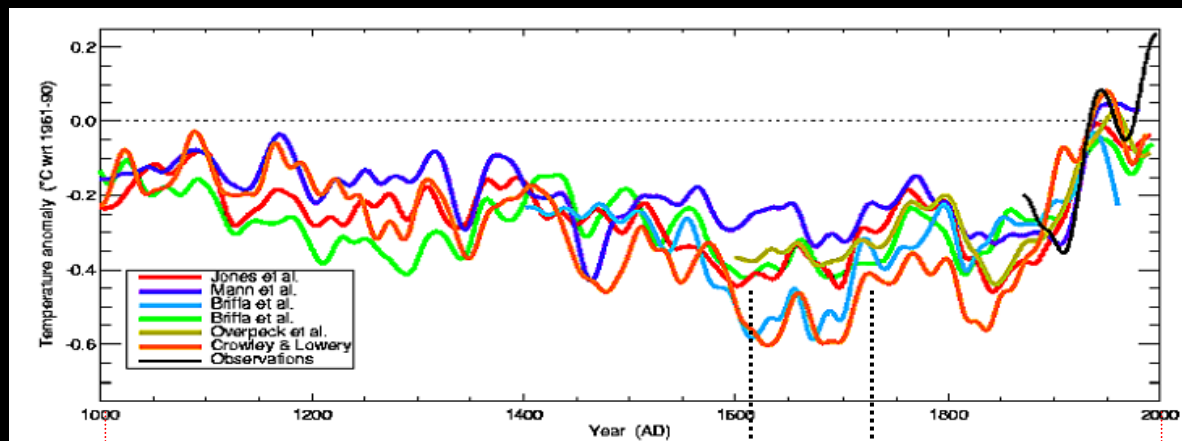




**Et pendant ce temps, que font les GES ? Ce ne sont pas eux les responsables de ces variations !**

**L'activité solaire est connue par les travaux astronomiques depuis 1610. On la retrouve « piégée » dans les arbres (isotopes cosmogéniques) pour les époques antérieures.**

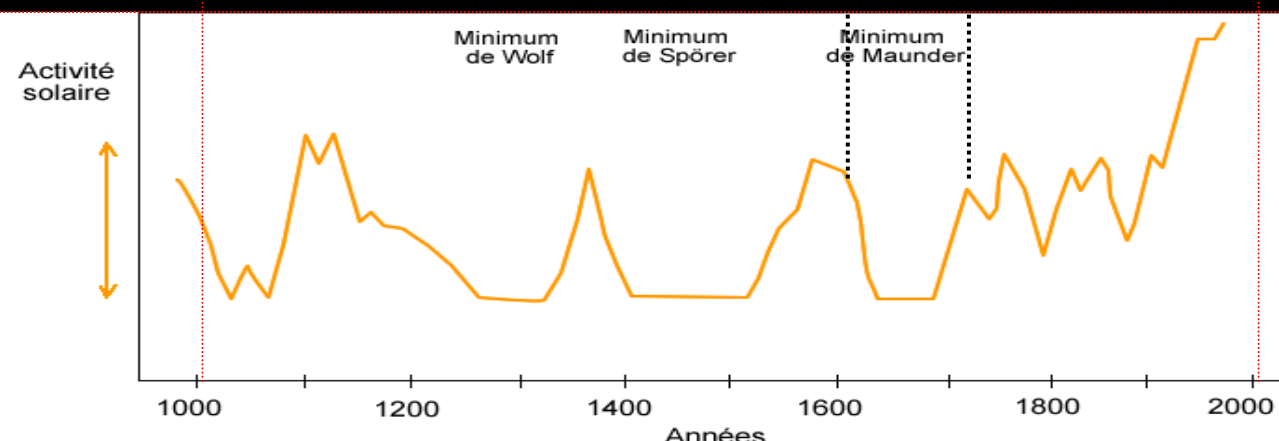
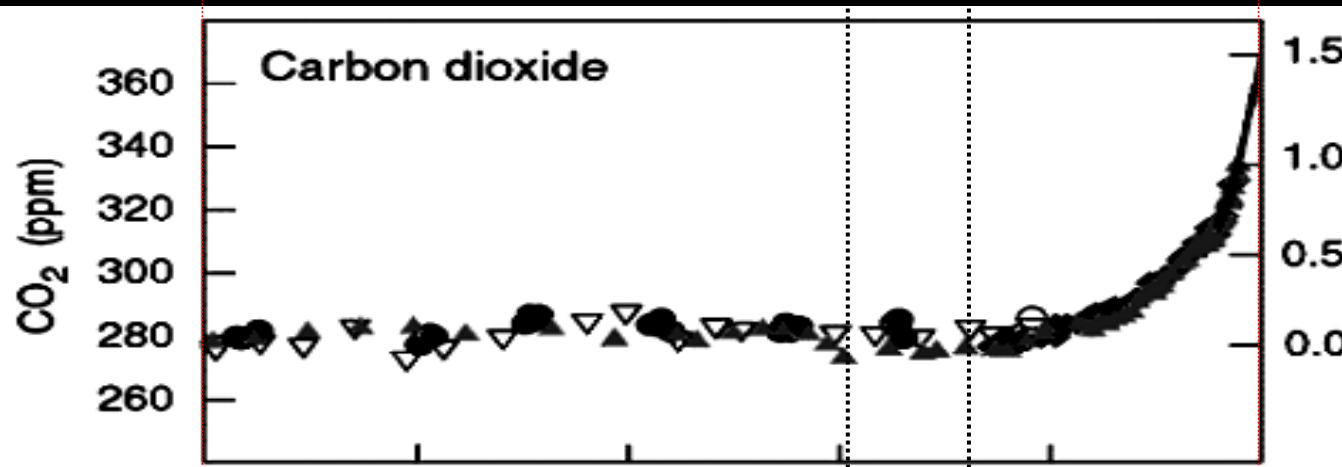


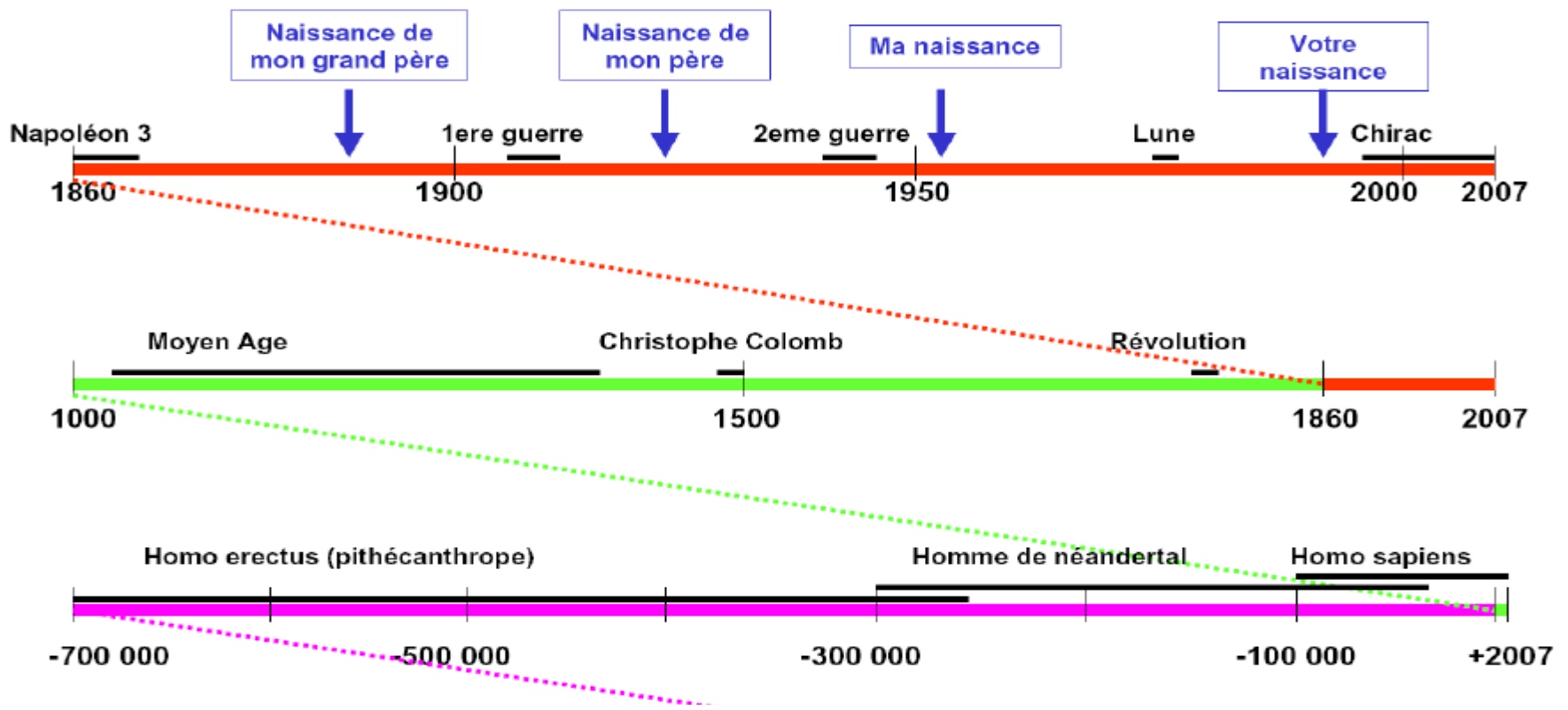


**Comparaison  
température /  
CO<sub>2</sub> / soleil.**

**Le moins que  
l'on puisse  
dire, c'est que  
les relations  
ne sont pas  
claires.**

**Il reste du  
travail à faire  
pour  
comprendre !**



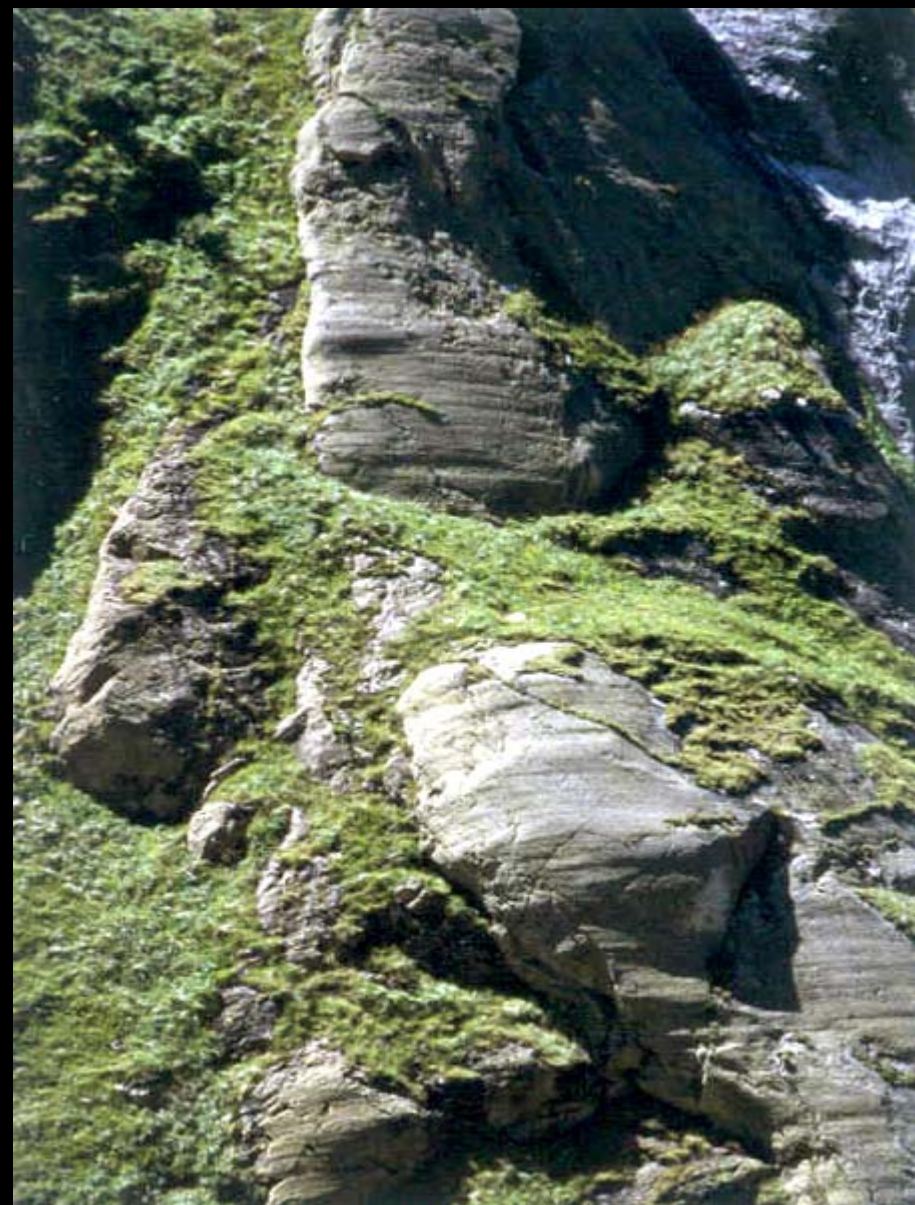


**L'échelle du million d'années. Comment fait-on avant les chroniques et objets « historiques » ... ?**

**L'échelle de 1 000 000 d'années**

# Les variations climatiques pré-historiques







**Les Alpes ,il y a –20 000 et – 140 000 ans**



**Jusqu'où allaient ces glaciers des Alpes ? A Lyon !**



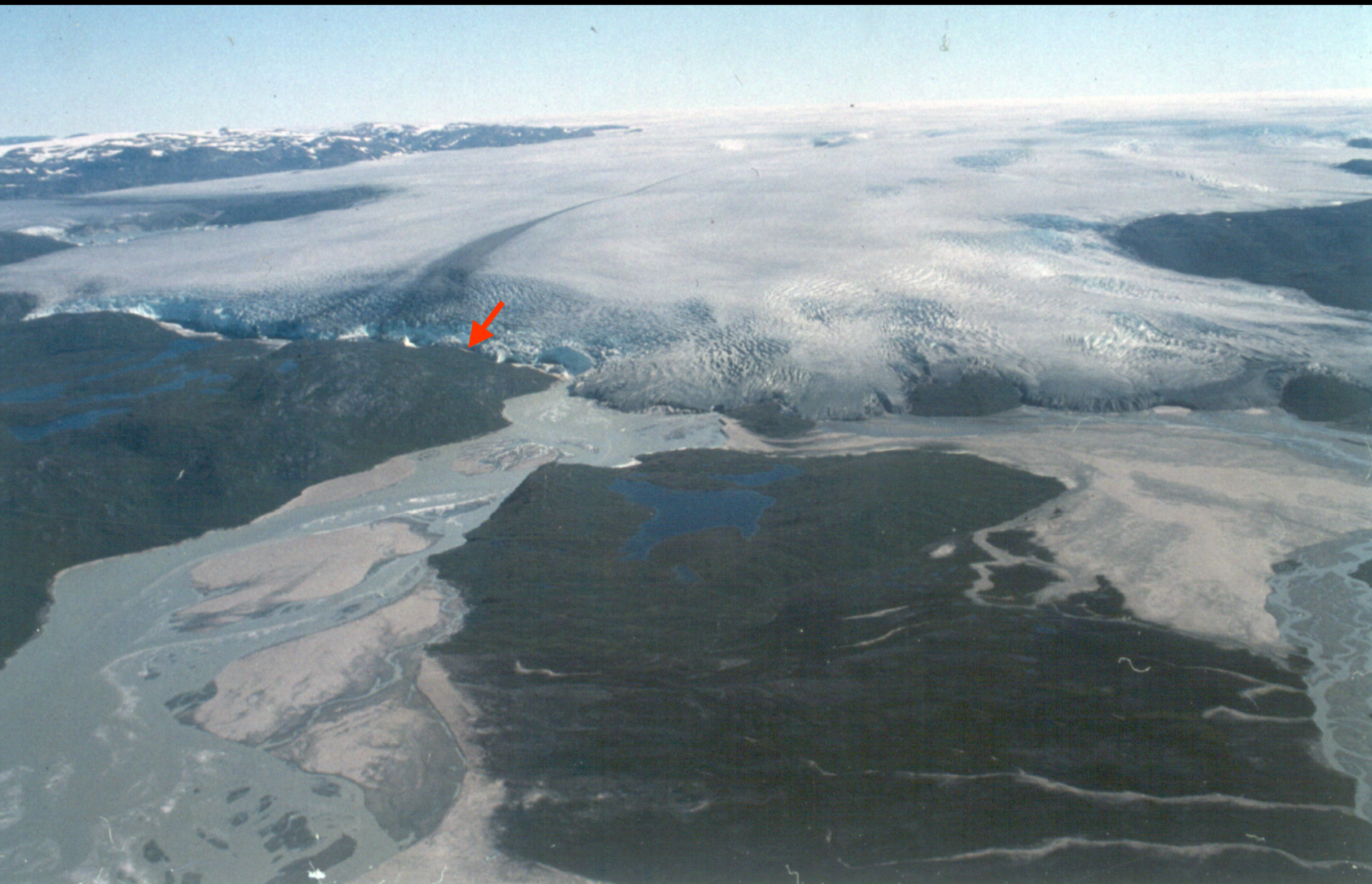
# Le Gros Cailloux de la Croix Rouse (Lyon), aujourd'hui



# La Croix Rouse il y a 140 000 ans



# Lyon il y a 140 000 ans



*Le Gros  
Cailloux*

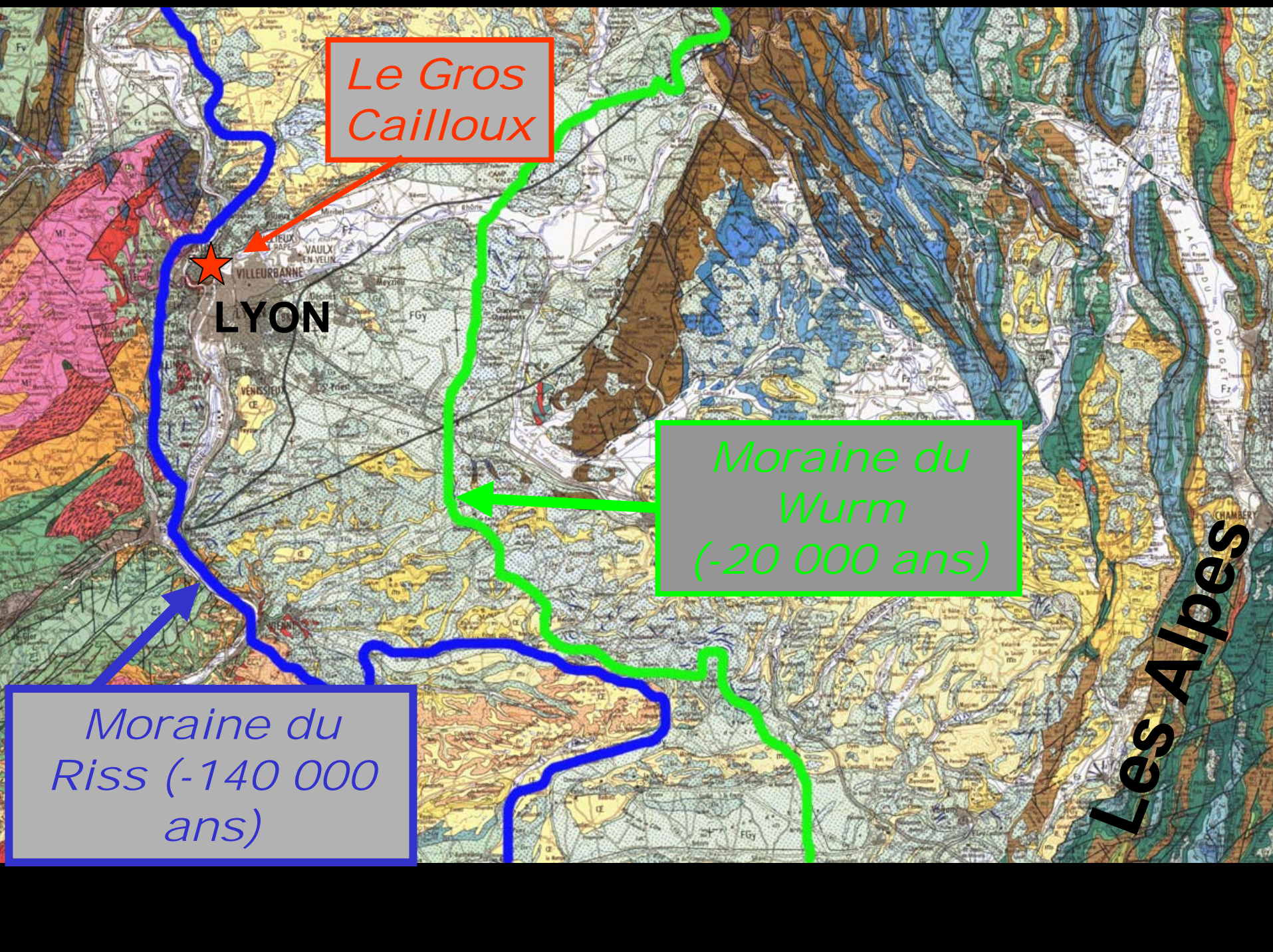


**LYON**

*Moraine du  
Wurm  
(-20 000 ans)*

*Moraine du  
Riss (-140 000  
ans)*

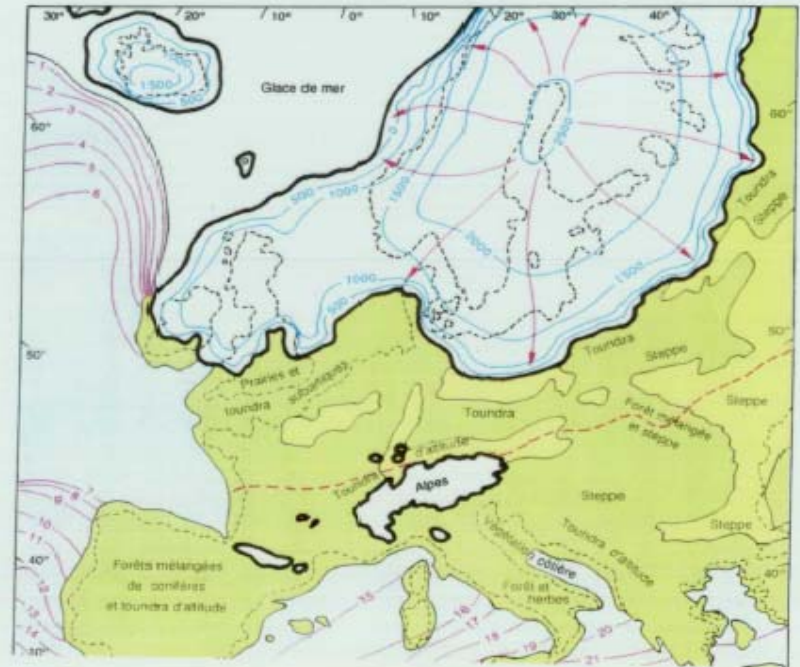
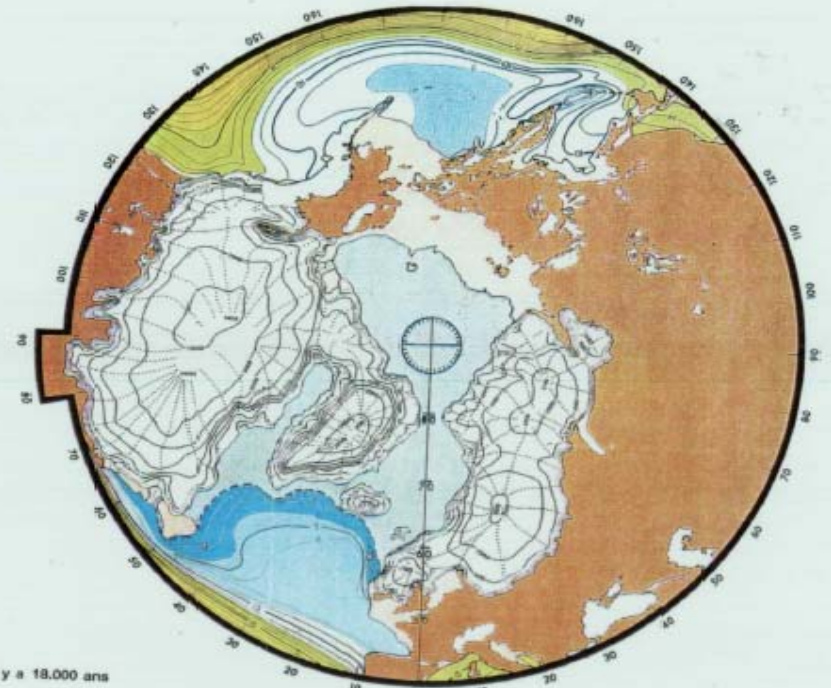
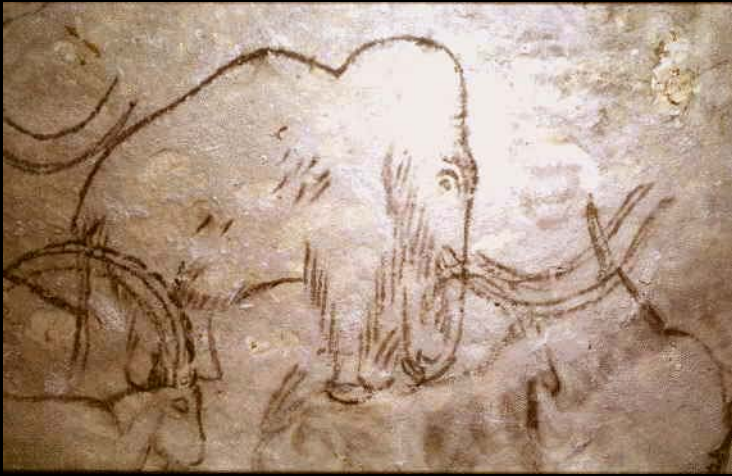
**Les Alpes**

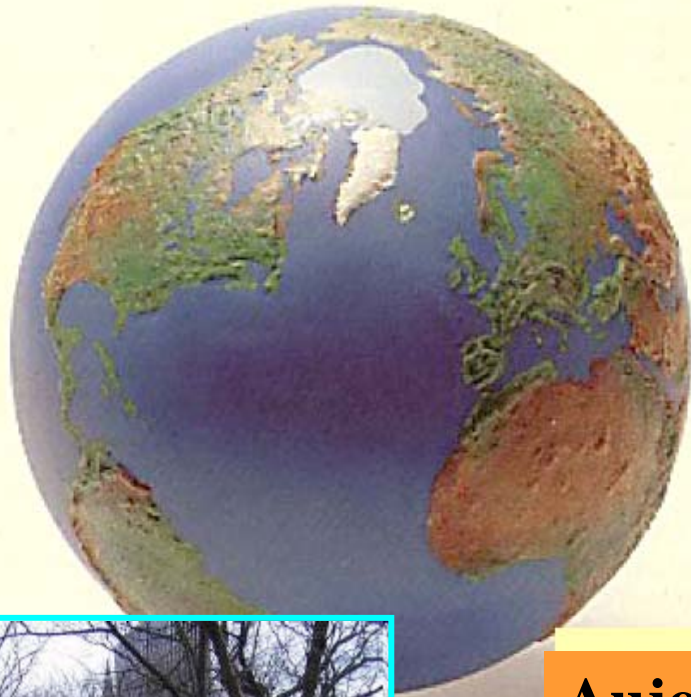


# La Crois Rousse il y a 20 000 ans



# L'Europe il y a 20 000 ans





**Aujourd'hui**

**New York** ● ● **Londres**



**- 20 000 ans**

**Et il n'y a pas que l'Europe  
qui est touchée ; c'est un  
phénomène mondial**

**Bloc erratique et surface  
striée dans Central Park à  
New York**



Comment  
quantifier ces  
variations  
climatiques ?

## La qualité isotopique.

Elle s'exprime en rapport, en ‰ ou en  $\delta$ .

Le rapport isotopique R d'un échantillon est:

$$R = \text{isotope lourd} / \text{isotope léger}$$

Ce n'est pas facilement maniable, car il s'agit souvent de valeur très petite. Par exemple pour le carbone atmosphérique :

$$C^{13}/C^{12} = R = 0,0038.$$

$$R_{\text{‰}} = 3,8 \text{ ‰}$$

**Censuré !**

une esp...  
de l'échantillon est

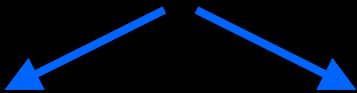
$$\delta = 1000 \times [(R \text{ échantillon} / R \text{ standard}) - 1]$$

Exemple du carbone avec le C atmosphérique comme standard :

R standard	= 0,00380	$\delta_s = 0,0$
R échantillon 1	= 0,00381	$\delta_1 = +2,6$
R échantillon 2	= 0,00379	$\delta_2 = -2,6$

Attention, il existe plusieurs standards pour un même isotope (SMOW et PDB pour  $^{18}O$  par exemple)





**Il y a des  
molécules  
d'eau légères**



**d'autres  
lourdes**

**En fonction de la  
température, évaporation,  
condensation et  
précipitation séparent plus  
ou moins ces molécules**

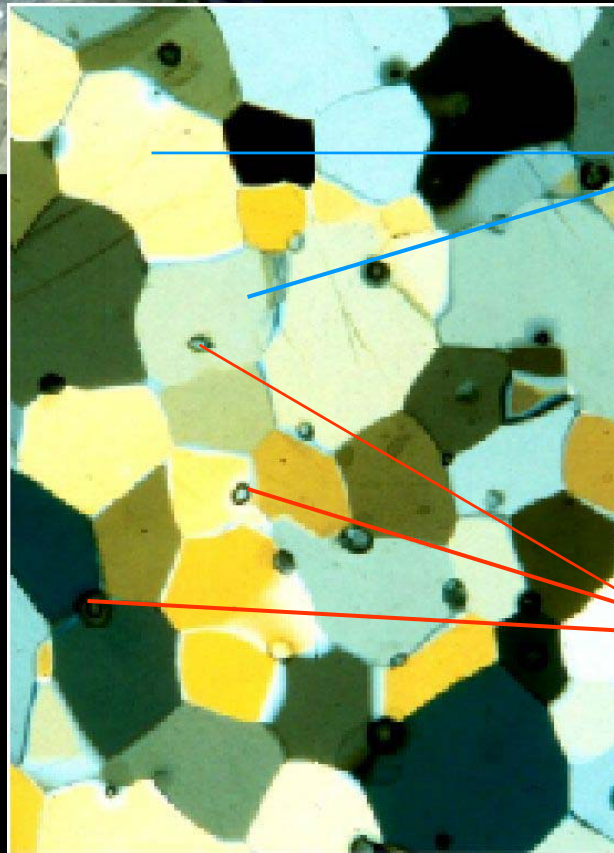
# A la recherche du Saint Graal des climatologues



**En dosant eau lourde et eau légère dans la glace, ancienne neige, on pourra connaître la température qu'il faisait localement quand il neigeait**

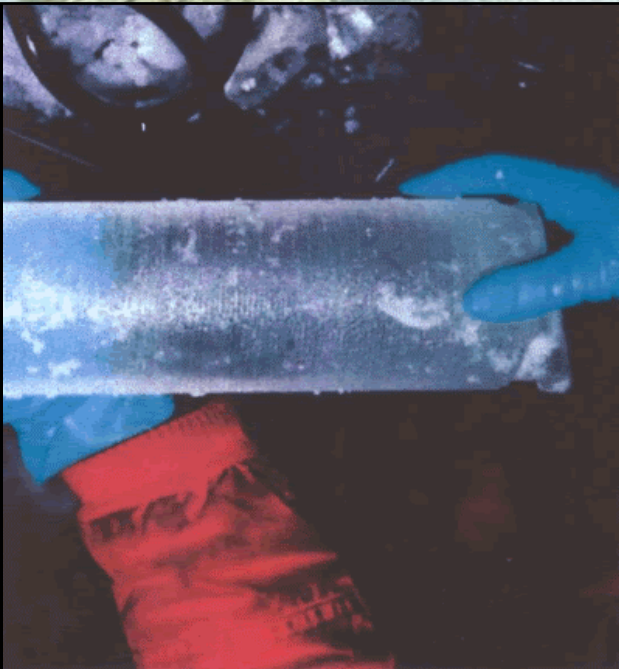


**Le Saint Graal des climatologues : des carottes de glace, qui contiennent des bulles d'air qu'on peut analyser**

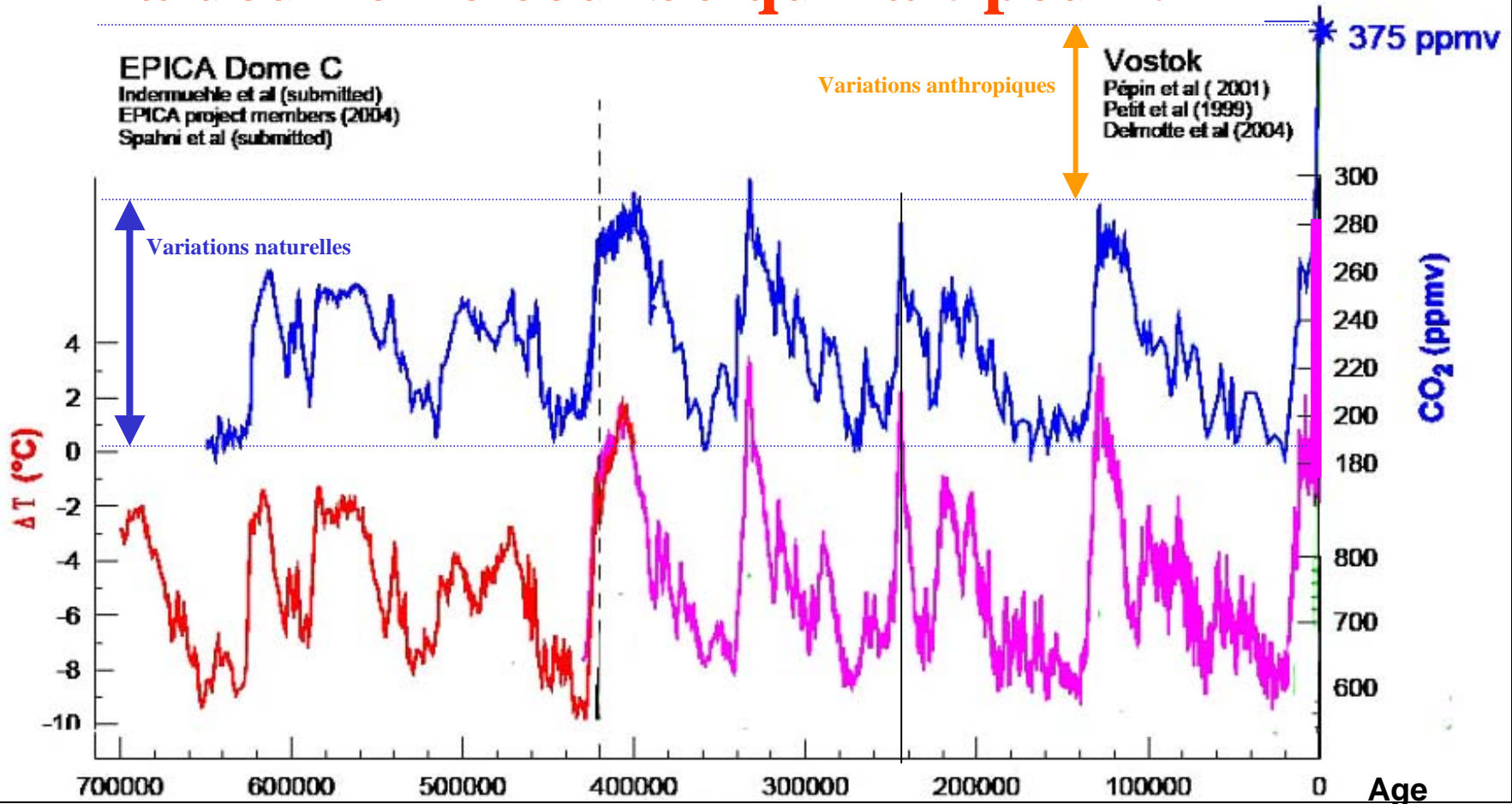


**Cristaux de glace, qui donnent la température**

**Bulle d'air, qui donnent la composition de l'atmosphère**



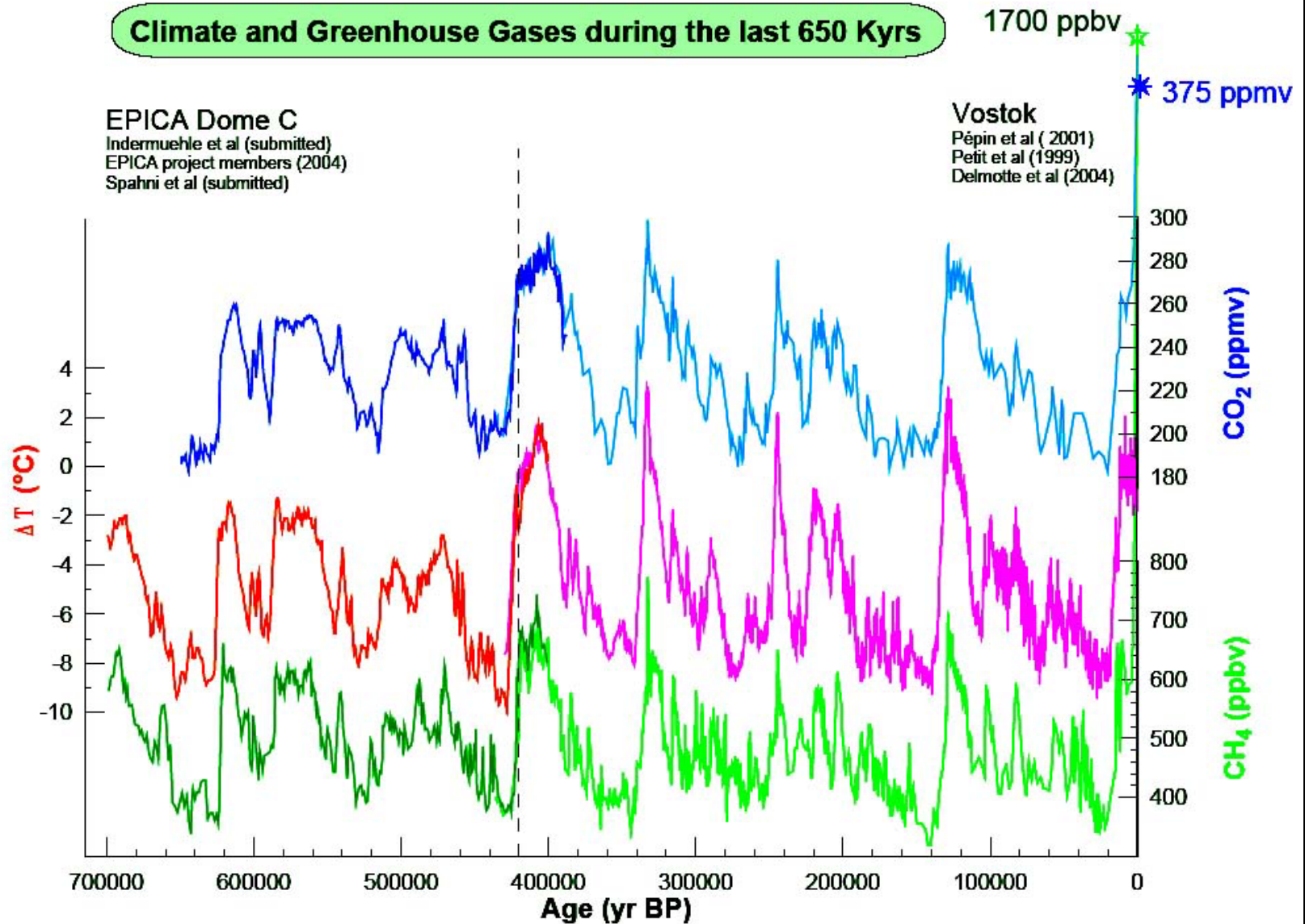
# La deuxième courbe qui fait peur !



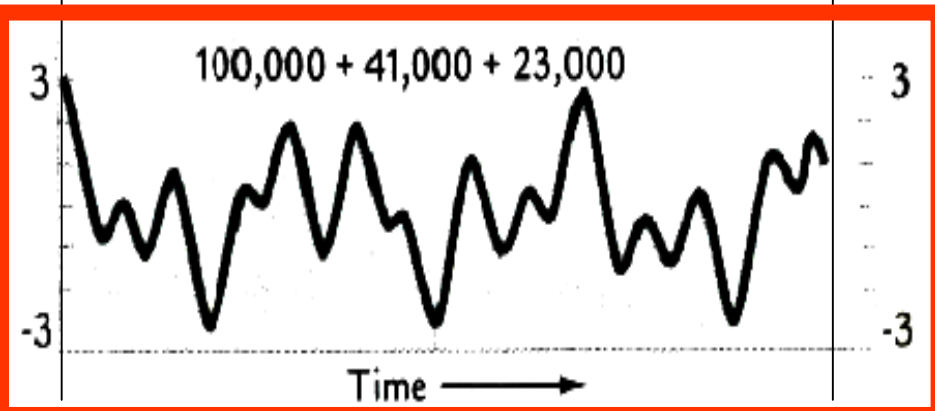
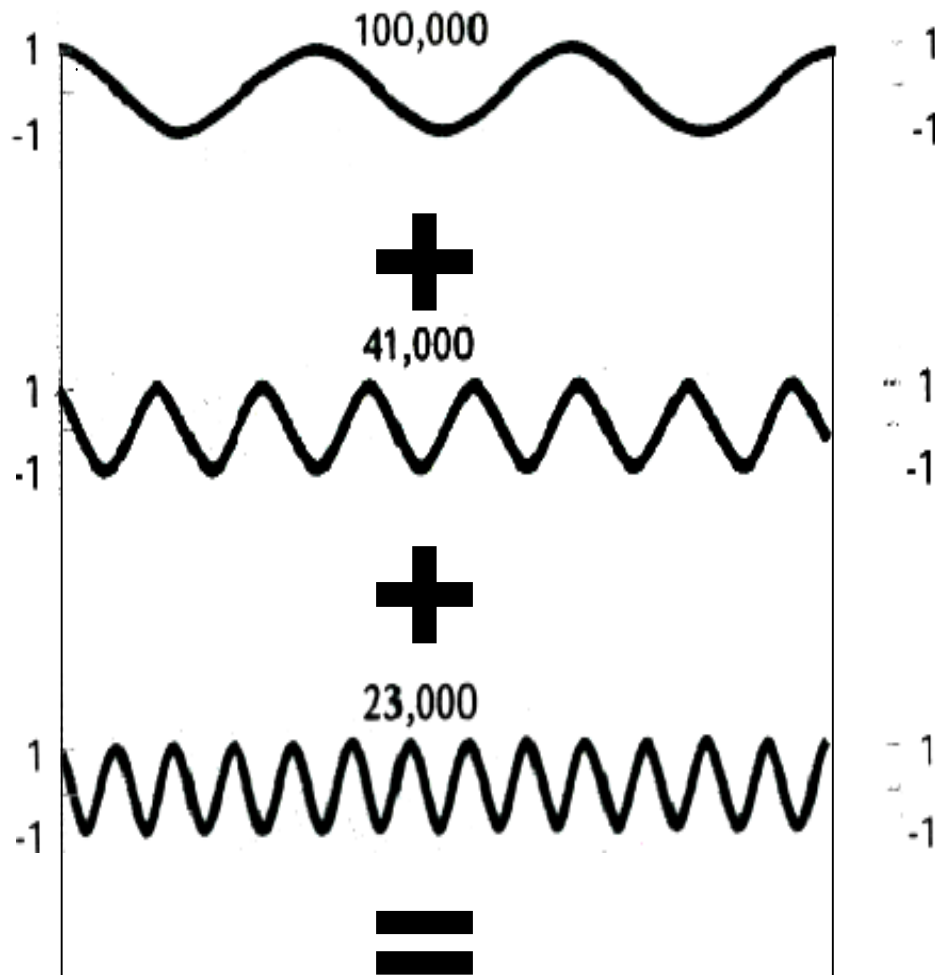
La température antarctique varie de  $+2$  à  $-10^{\circ}\text{C}$  par rapport à la température actuelle ( $-40^{\circ}\text{C}$ ). Le  $\text{CO}_2$  varie de 200 à 280 ppmv ; il est aujourd'hui à 375. Les variations sont parfaitement corrélées.

Les variations de température commencent quelques siècles avant celles de  $\text{CO}_2$

## Climate and Greenhouse Gases during the last 650 Kyr

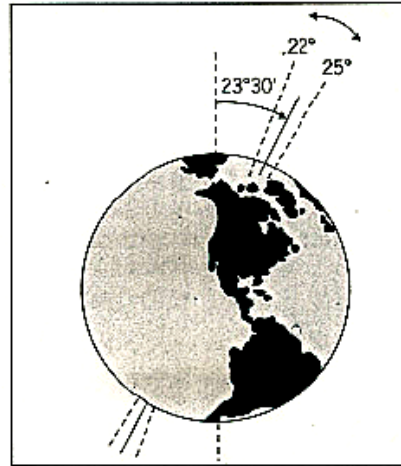
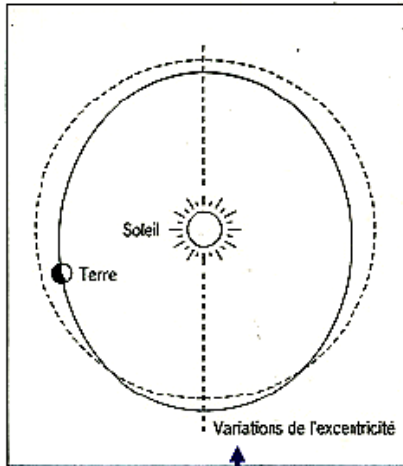
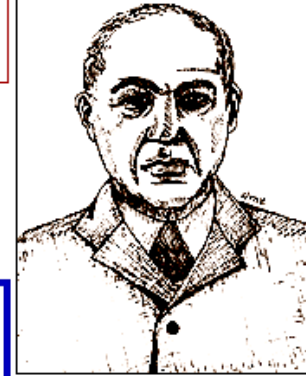


**Un autre gaz a effet de serre, le méthane (CH<sub>4</sub>)  
montre la même corrélation**



**Un traitement mathématique classique (Fourier, 19eme siècle) montre que cette courbe (et d'autres faites avec les sédiments marins sur quelques millions d'années) possède une triple périodicité : 23 000, 41 000 et 100 000 ans**

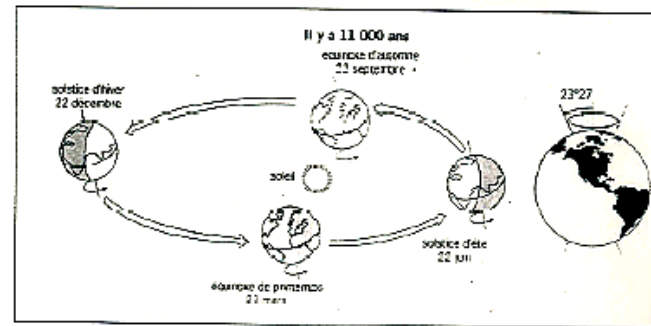
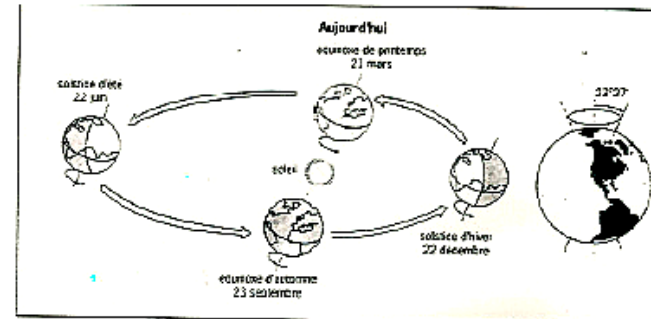
# Milankovitch



Obliquité:  
~ 41 000 ans

Excentricité:  
~ 100 000 ans

Précession des  
équinoxes:  
~ 23 000 ans



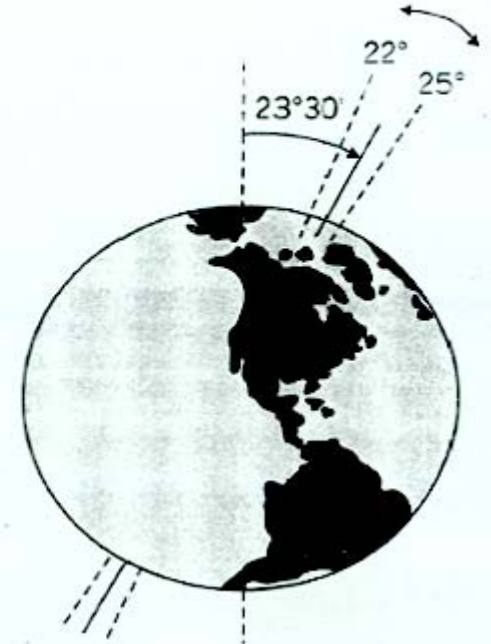
Ces valeurs des 3 périodes sont « astronomiques »



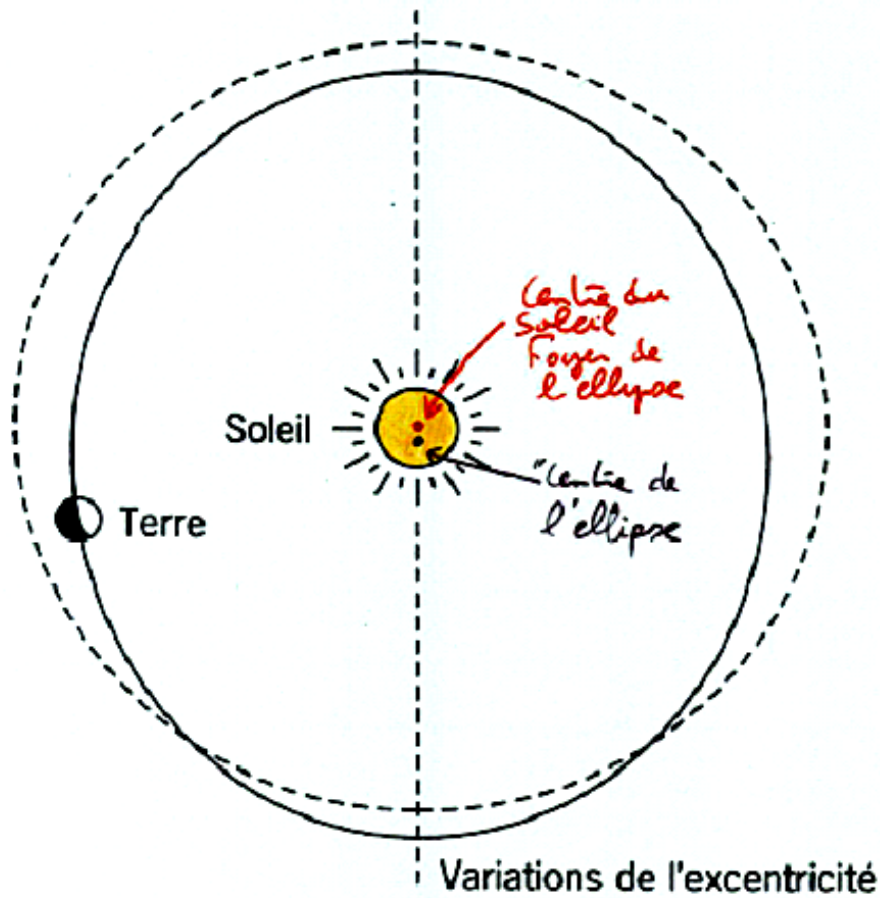
**La précession  
des équinoxes  
( $T = 23\ 000$  ans).  
Ne fait varier ni  
l'ensoleillement  
global, ni le  
contraste des  
saisons. Mais ...**



**La variation  
d'obliquité  
( $T = 41\ 000$  ans).  
Ne fait pas varier  
l'ensoleillement  
global, mais fait  
varier le  
contraste des  
saisons**





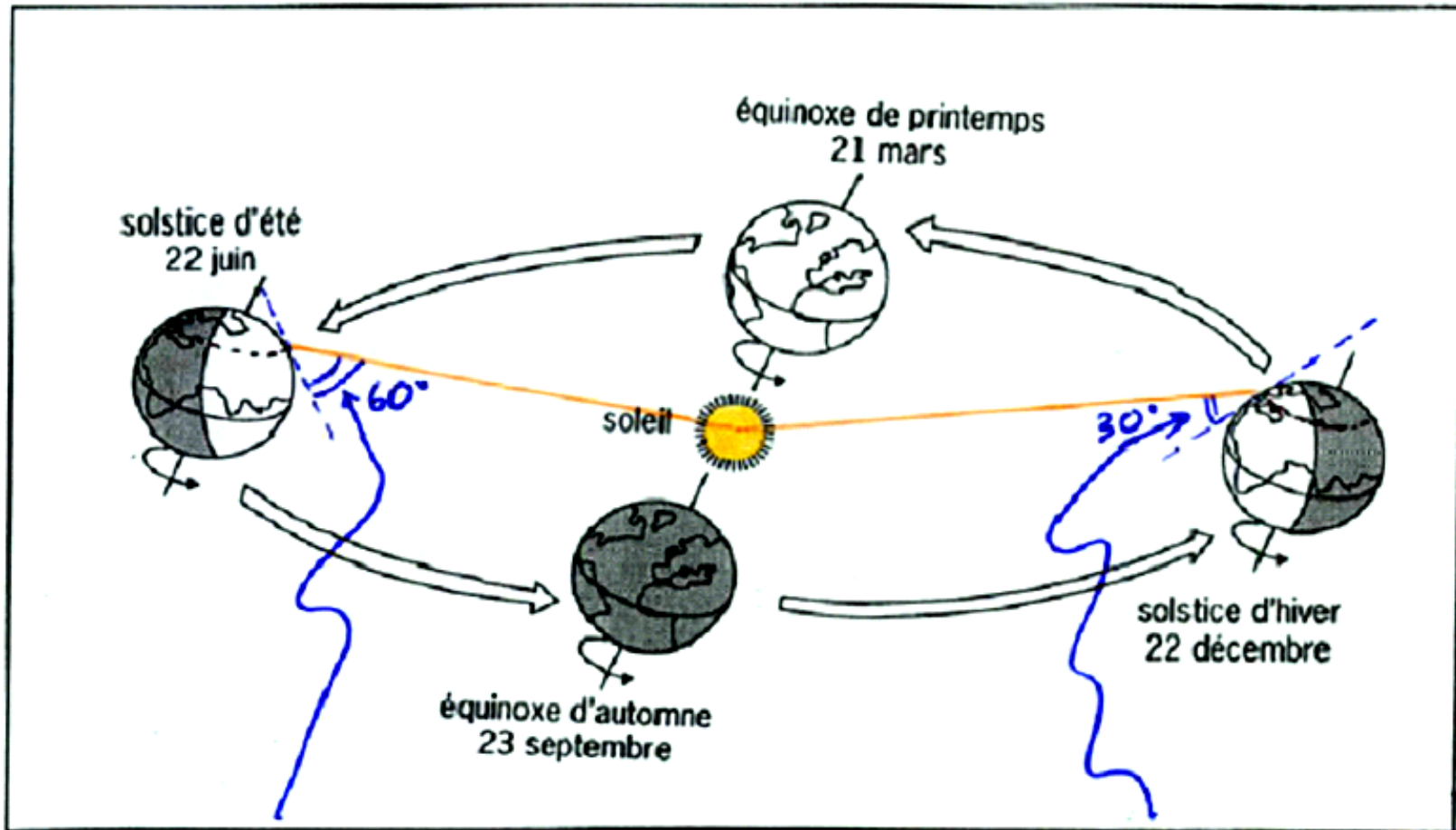


Les variations de l'excentricité de l'orbite terrestres ( $T = 100\ 000$  et  $400\ 000$  ans).

La distance moyenne annuelle Terre/soleil varie en fonction de cette ellipticité, ce qui entraîne une variation d'ensoleillement .

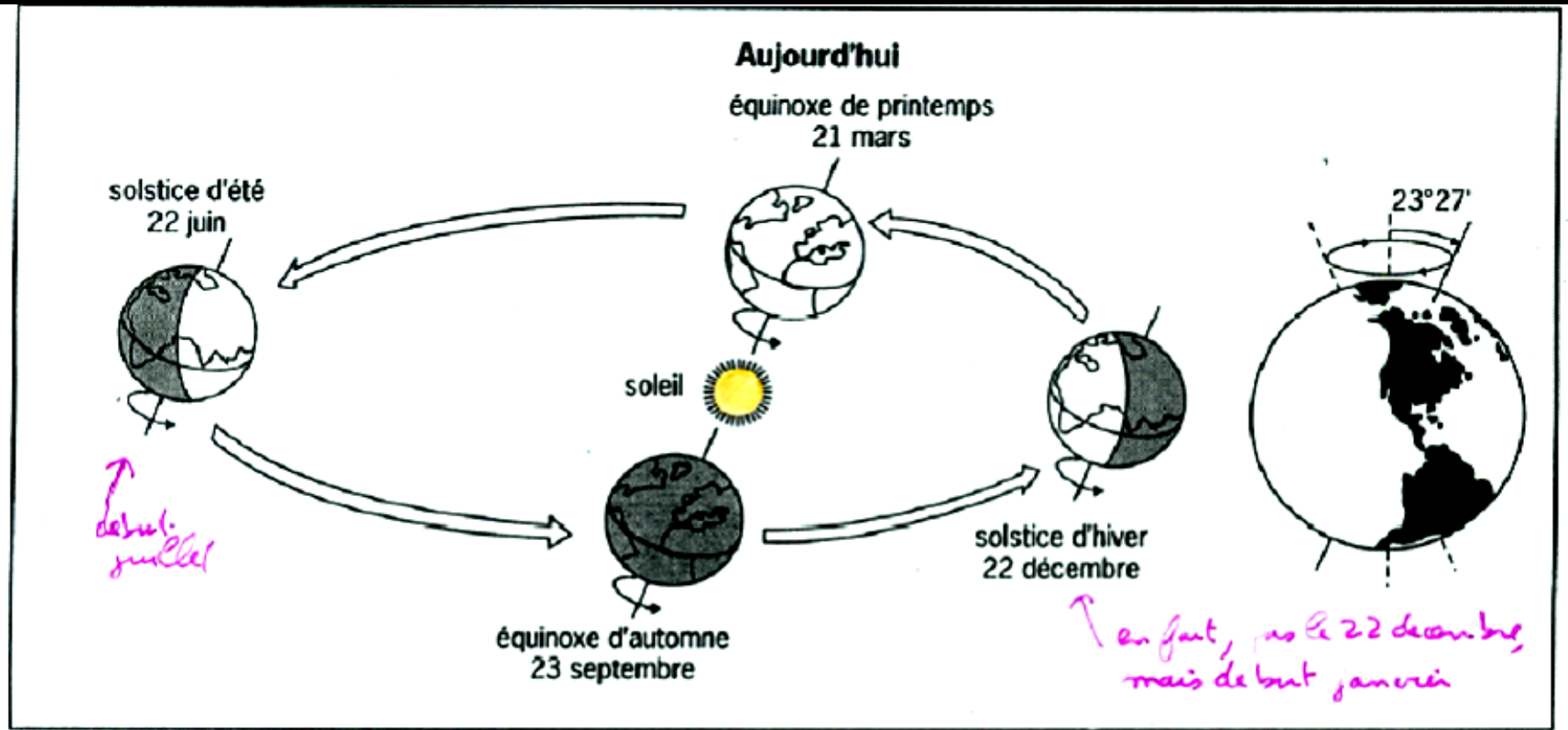
La variation globale d'ensoleillement annuel peut varier de  $0,7\ \text{W/m}^2$  (0,2%)

# Les saisons, une histoire d'axe incliné !



Les rayons du soleil arrivent avec un angle fort.

Les rayons du soleil arrivent avec un angle faible.

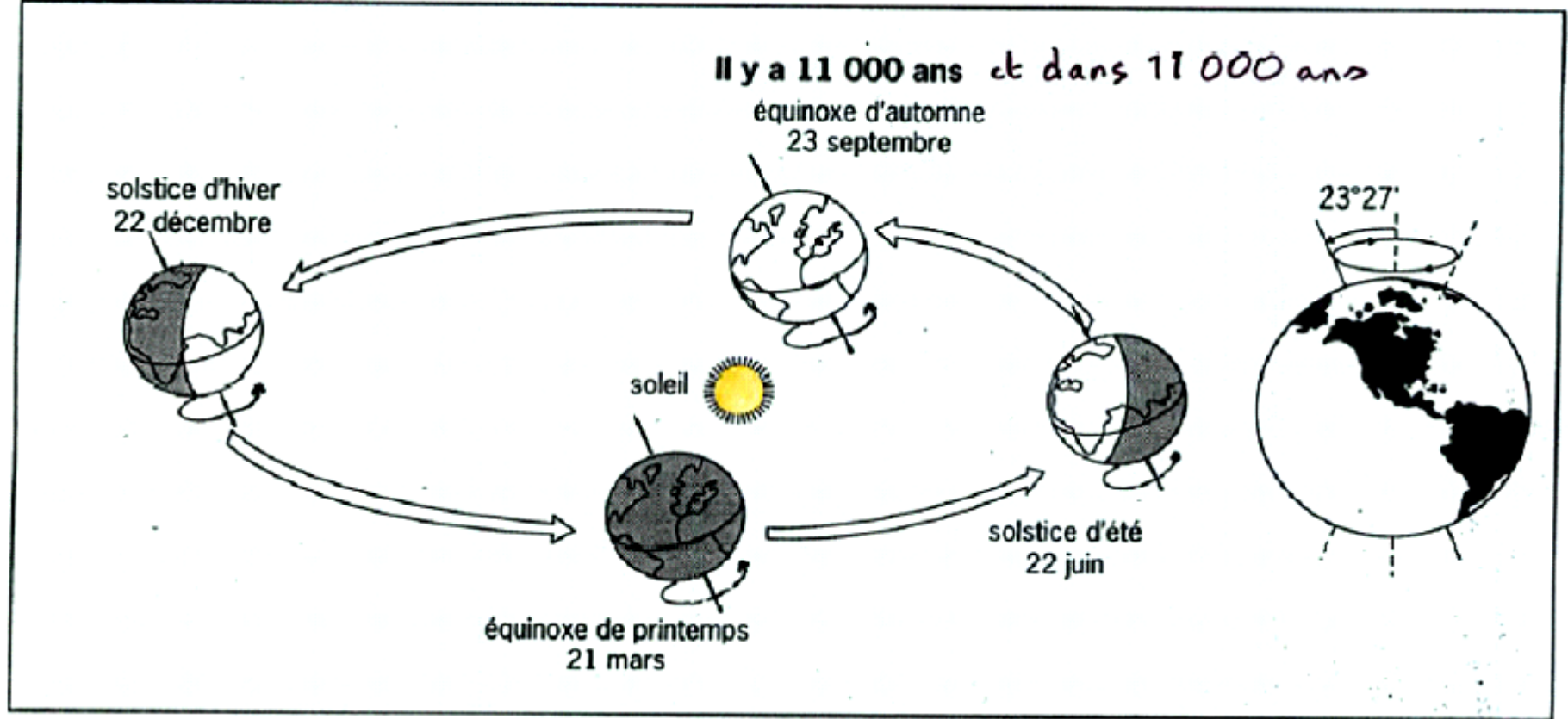


**Occupons nous de l'hémisphère nord.**

**L'hiver, on est « près » du soleil → hivers pas trop froids.**

**L'été, on est loin du soleil → étés pas trop chauds.**

**C'est l'inverse dans l'hémisphère sud !**



**Occupons nous de l'hémisphère nord il y a 11 500 ans (ou dans 11 500 ans).**

**L'hiver, on était « loin » du soleil → hivers glacials**

**L'été, on était près du soleil → étés caniculaires.**

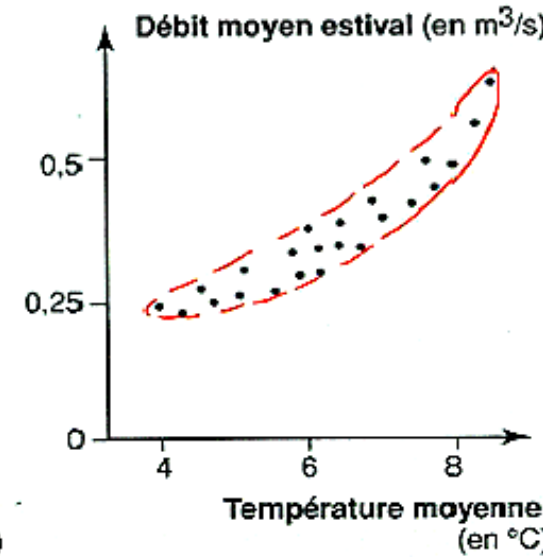
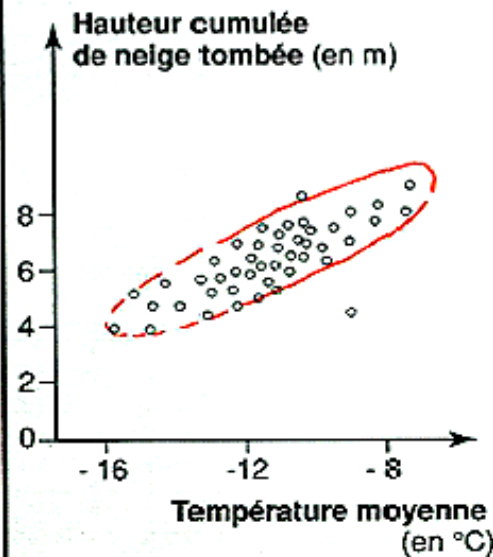
**C'est l'inverse dans l'hémisphère sud !**

# Qu'est ce que tout ça a à voir avec les glaciers ?



## 4 Glaciers et température

- Un glacier s'installe et croît quand les précipitations neigeuses d'hiver sont supérieures à la fonte d'été. Il décroît et disparaît quand la fonte estivale dépasse les précipitations hivernales.
- Ainsi, pour un glacier alpin situé entre 3 000 et 3 500 m, on a mesuré, pendant plusieurs dizaines d'années, chaque hiver, la hauteur cumulée des chutes de neige et la température moyenne. Chaque été, le débit moyen estival du torrent de fonte sortant du glacier et la température moyenne ont été mesurés.





**Comment d'aussi faibles variations d'insolation globale ( $0,5 \text{ w/m}^2$  en moyenne pour l'ensemble de la planète) peuvent-elles engendrer d'aussi fortes variations de température globale ( $5^\circ\text{C}$  en moyenne et  $10^\circ\text{C}$  dans les hautes latitudes) ???**

**Il y a plein de boucles de rétroaction positive, qui sont bien loin d'être toutes comprises.**

### **1 – L'albédo**

**Neiges et glaces ont un albédo élevé.**

**Un peu plus de froid (raison astronomique) → surface enneigée-englacée plus importante → plus de réflexion vers l'espace → il fait un peu plus de froid → ...**

### **2 – Le CO<sub>2</sub> océanique**

**Le CO<sub>2</sub> est plus soluble dans l'eau froide que dans l'eau chaude.**

**Un peu plus de froid (raison astronomique) → plus de CO<sub>2</sub> va dans l'océan et il en reste moins dans l'atmosphère → Baisse du CO<sub>2</sub> atmosphérique → l'effet de serre diminue → il fait un peu plus froid → ...**





### **3 – L'antagonisme Photosynthèse / respiration des sols**

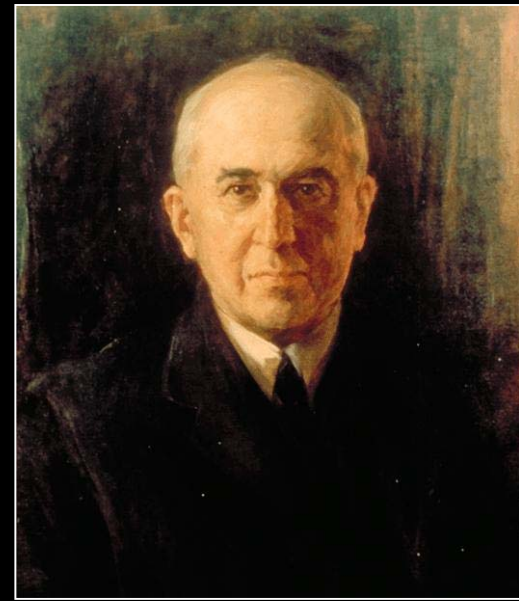
**La photosynthèse est (relativement) peu sensible aux variations de température. La respiration-décomposition de la matière organique des sols l'est beaucoup plus (comparez l'épaisseur des litières en forêts tropicale ou boréale) .**

**Un peu plus de froid (raison astronomique) → forte baisse de la décomposition des sols et seulement légère baisse de la photosynthèse → forte baisse de la libération de CO<sub>2</sub> alors que l'absorption de CO<sub>2</sub> ne baisse que peu → baisse du CO<sub>2</sub> atmosphérique → l'effet de serre diminue → il fait un peu plus froid → ...**

**Vous rajoutez le méthane dont la production est très thermo-sensible dans l'hémisphère nord, l'albédo des forêts ..., cela fait plein d'amplificateurs, difficiles à modéliser.**

**Quand on modélise ce qui aurait du se passer depuis 20 000 ans, on trouve une augmentation de Température 2 fois plus faible qu'elle n'a été « en vrai » , ce qui est très inquiétant, mais vraiment très inquiétant (on dit entre +1,5 et +6 ° pour ce siècle, ça sera peut-être +3 à +12) !!**

On est actuellement dans une période d'étés frais et d'hivers doux dans l'hémisphère nord, et ce depuis 5000 à 8000 ans. Une glaciation aurait pu commencer à s'installer. Pourquoi ne l'a t'elle pas fait ? Parce que l'ellipticité de l'orbite terrestre est trop faible actuellement, et ne permet pas de tempérer le chaud des étés et le froid des hivers.

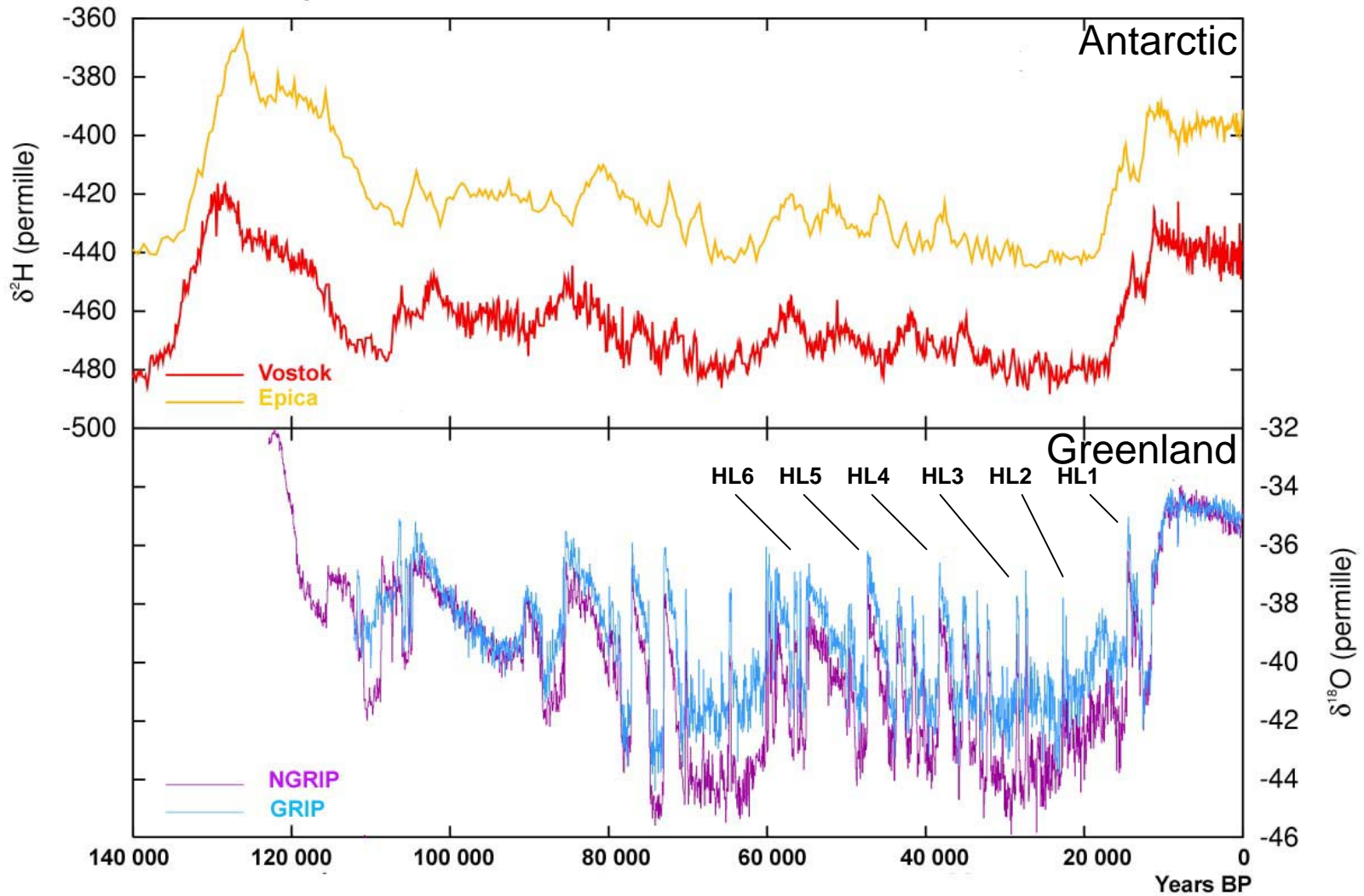


Quand va débiter la prochaine glaciation ? Milankovitch nous dit « peut-être dans 18 000 ans, pourquoi pas dans  $18\ 000 + 23\ 000 = 41\ 000$  ans, mais vraisemblablement dans  $18\ 000 + 23\ 000 + 23\ 000 = 64\ 000$  ans », quand l'ellipticité de l'orbite va redevenir significative

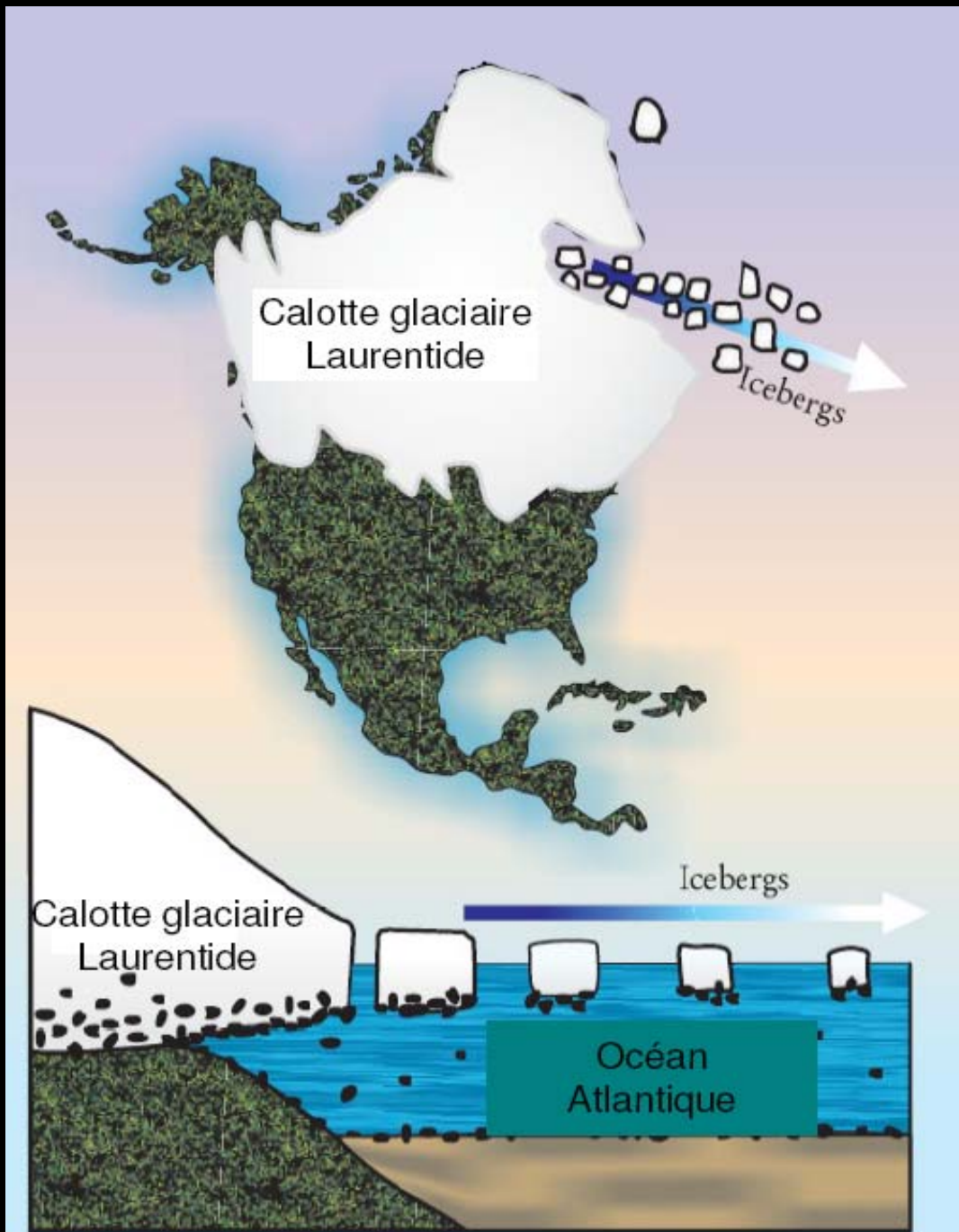




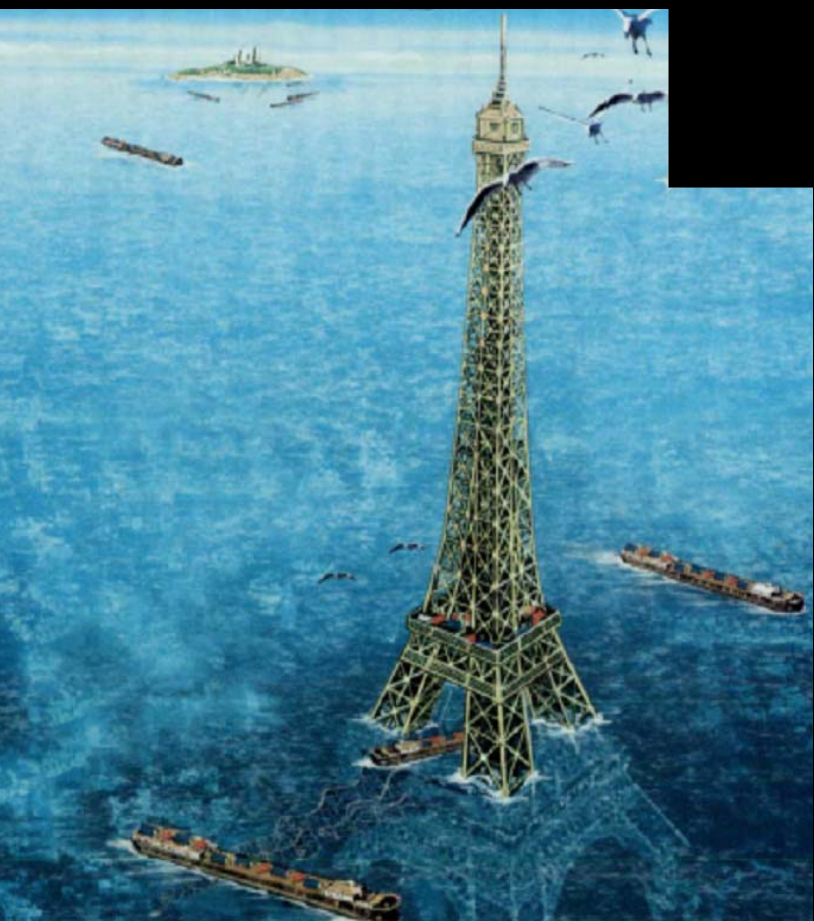
# Isotope data for Antarctic and Greenland ice cores



**Et à côté des variations astronomiques (très amplifiées par CO<sub>2</sub>), il y a des variations ultra-rapides autour de l'Atlantique nord : les événements de Heinrich (froid) et de Dansgaard-Oeschger (chaud)**



**La (les) cause(s) de ces évènements de Heinrich précédant parfois ceux de Dansgaard-Oeschger serai(en)t à rechercher dans des évènements glaciaires, océaniques ... C'est actuellement un important sujet de recherche**



# LA REMONTEE DU NIVEAU DES MERS

Si tous les glaciers du monde fondaient ...

Antarctique : 29 millions de km<sup>3</sup>

Groenland : 2,5 millions de km<sup>3</sup>

Glaciers de montagne : 0,2 million de km<sup>3</sup>

Si tout ça fondait, le niveau de la mer  
montrait de : 70 m + 7 m + 0,6 m,  
soit de 77 à 78 m

Pour l'Antarctique, ce n'est pas demain la  
veille (température moyenne de  $-30^{\circ}\text{C}$ ).

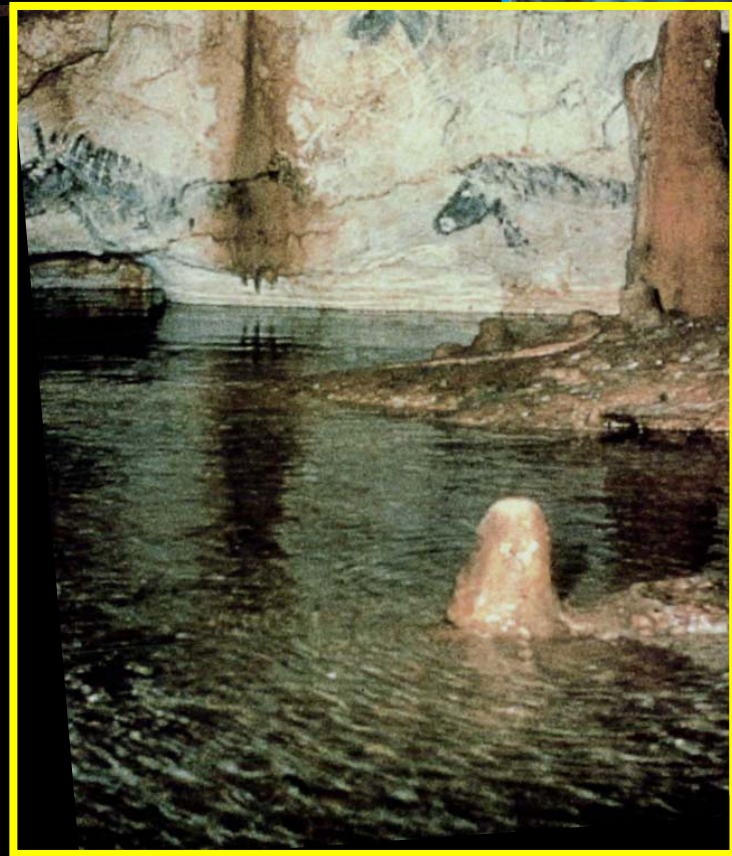
Pour le Groenland, ça peut arriver  
« demain » (au sens historique, c'est à dire  
dans quelques siècles à quelques  
millénaires).

Pour les glaciers de montagnes ... ça a  
déjà commencé !

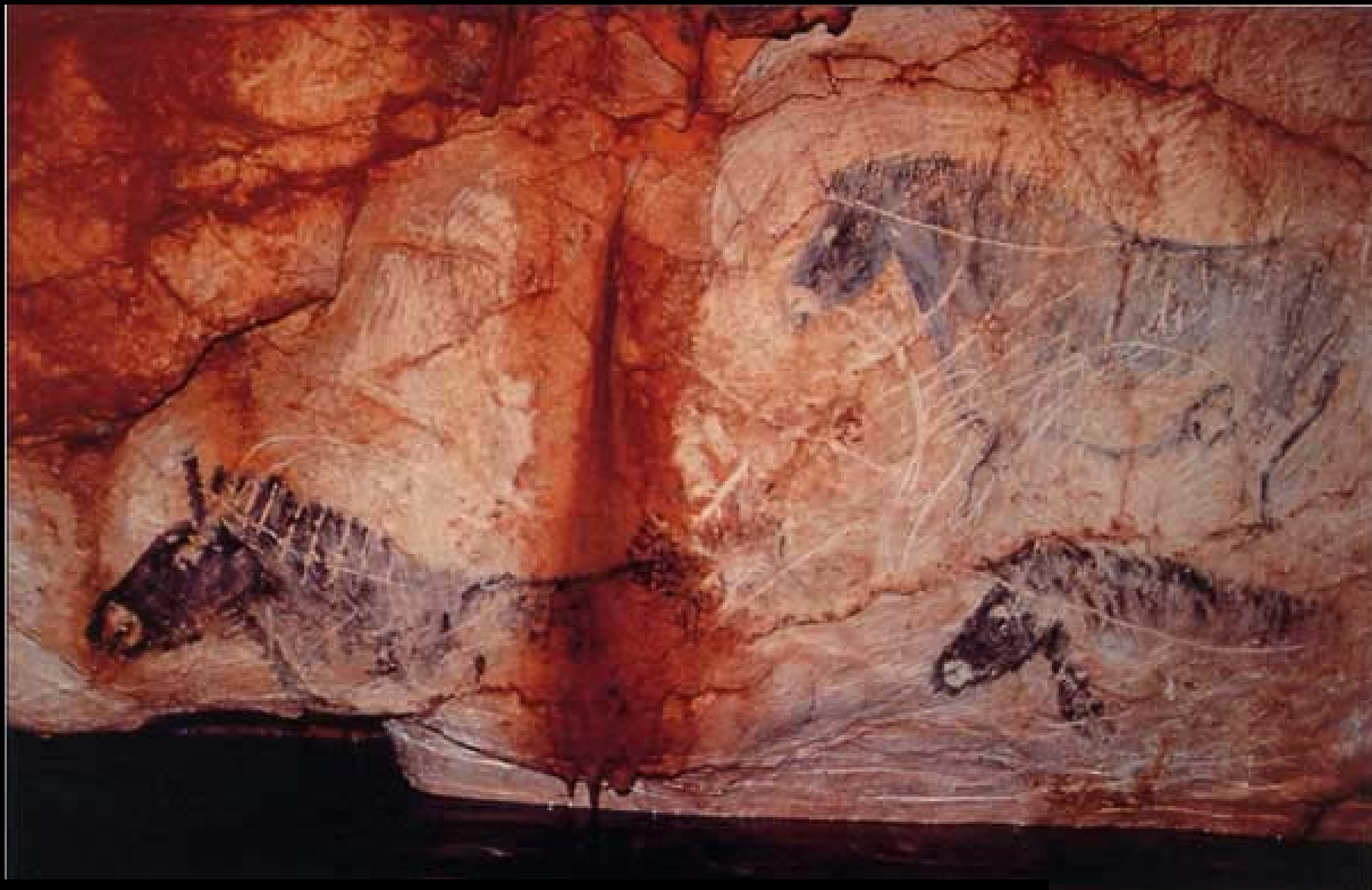
**Allons dans, ou  
plutôt sous, les  
calanques entre  
Marseille et  
Cassis, et  
plongeons !**



**On nage (en  
scaphandre)  
dans des  
boyaux  
immergés**



**Et on sort dans  
une salle  
« ornée »**



**Avec des chevaux ...**

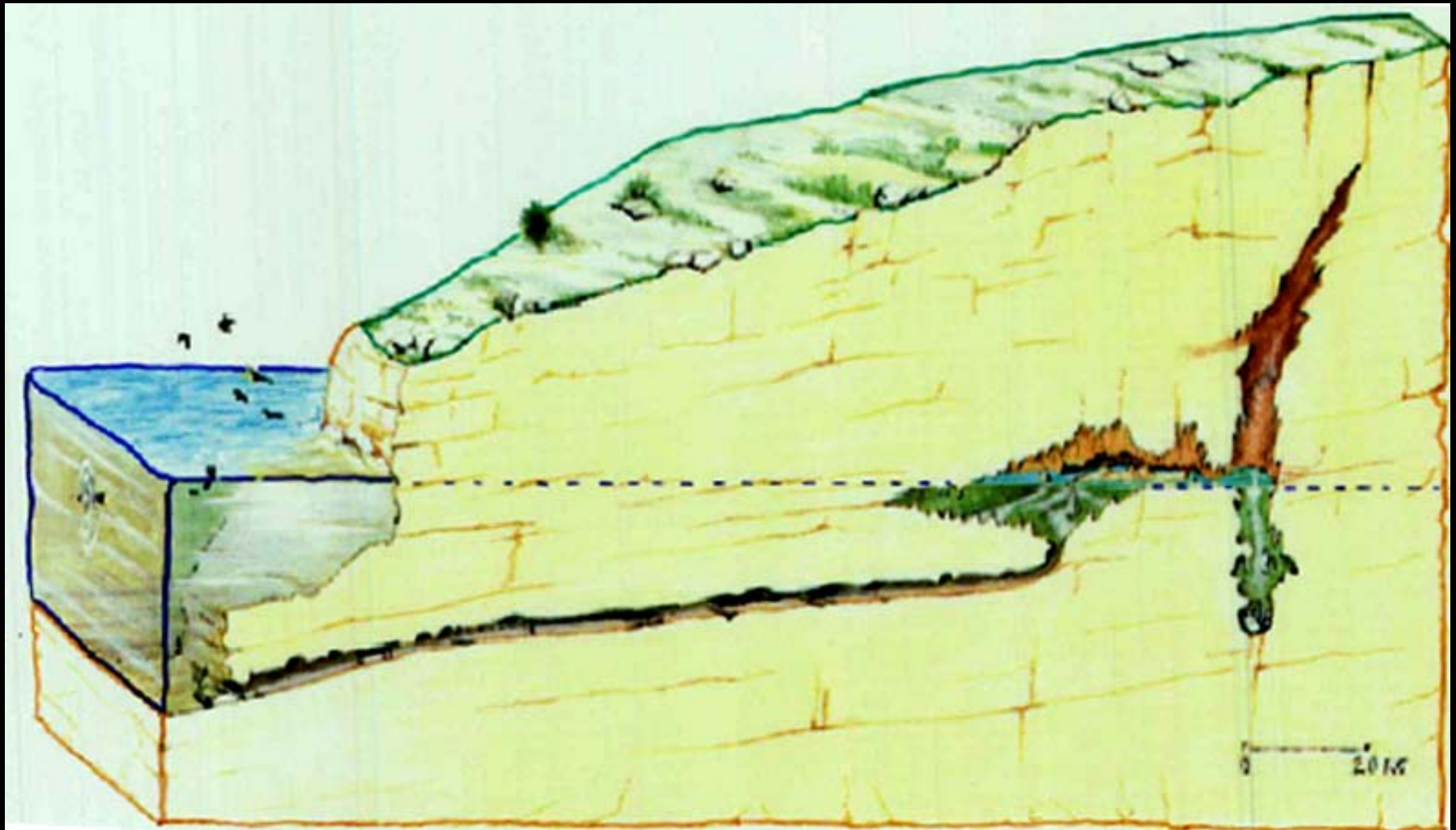
**Un pingouin**



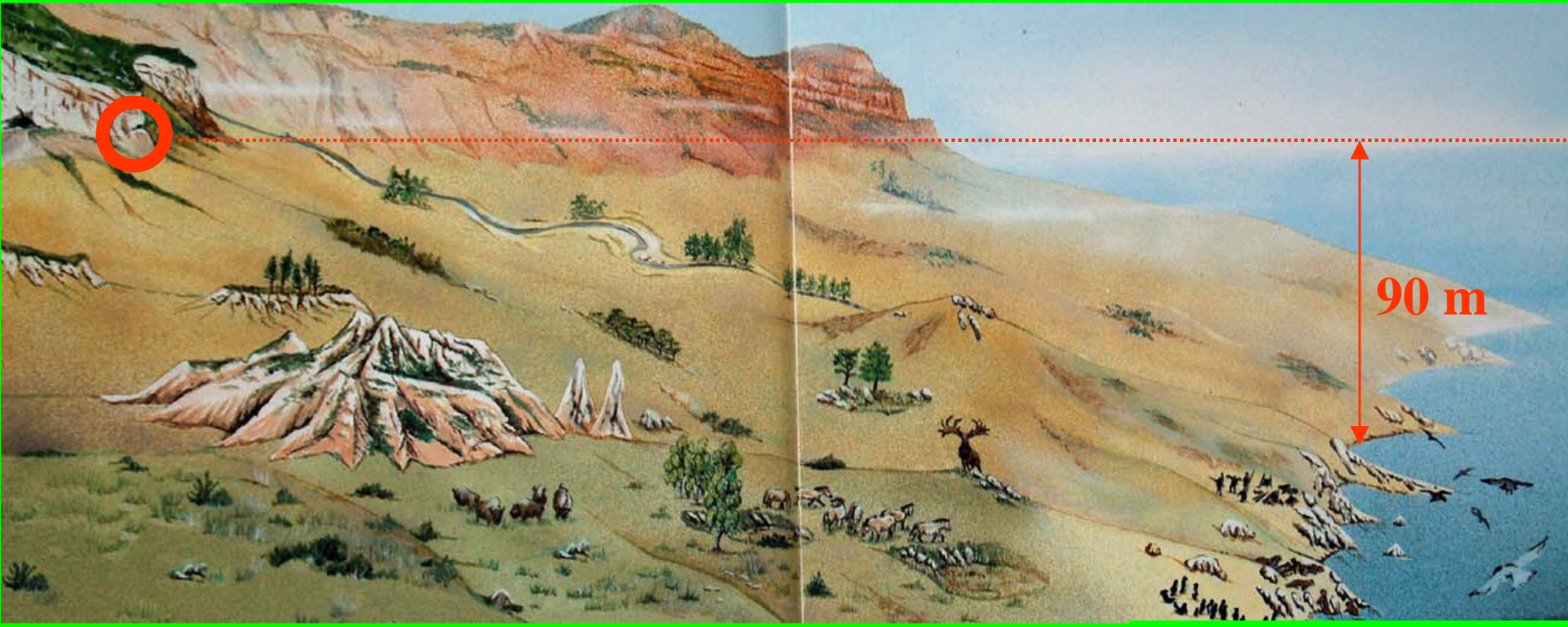
**un phoque**



# La grotte Cosquer, vue en coupe



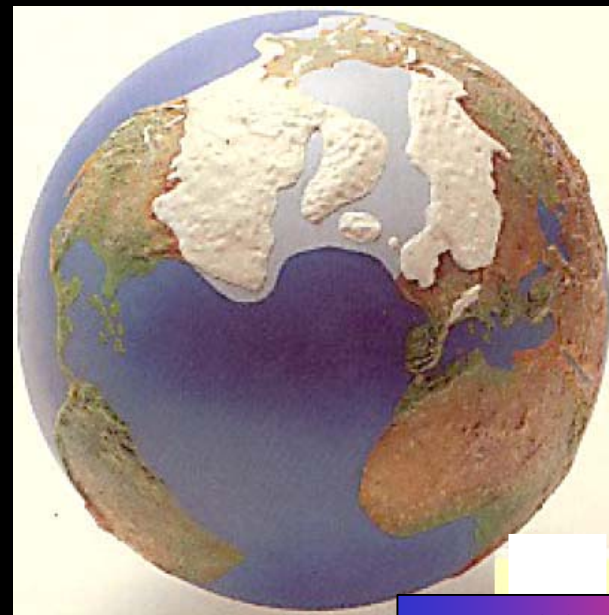




**Les calanques,  
il y a 27 000 ans**



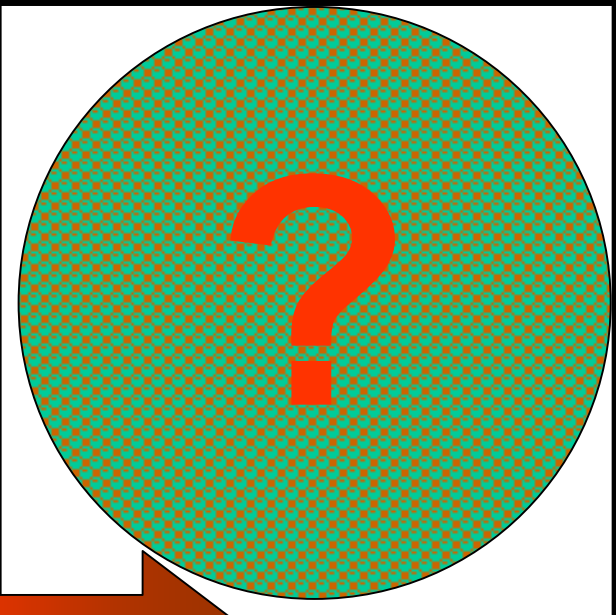
**Les calanques,  
aujourd'hui**



20 000 ans



200 ans



- 20 000 ans (Avant JC)

CO<sub>2</sub> = 200 ppmv

T moyen = 10°C

Niveau de la mer = -120 m

+ 1 900 ans (Après JC)

CO<sub>2</sub> = 280 ppmv (380 en 2009)

T moyen = 14°C (15°C en 2009)

Niveau de la mer = 0 m (+0,2 en 2009)

+ 2 100 ans (Après JC)

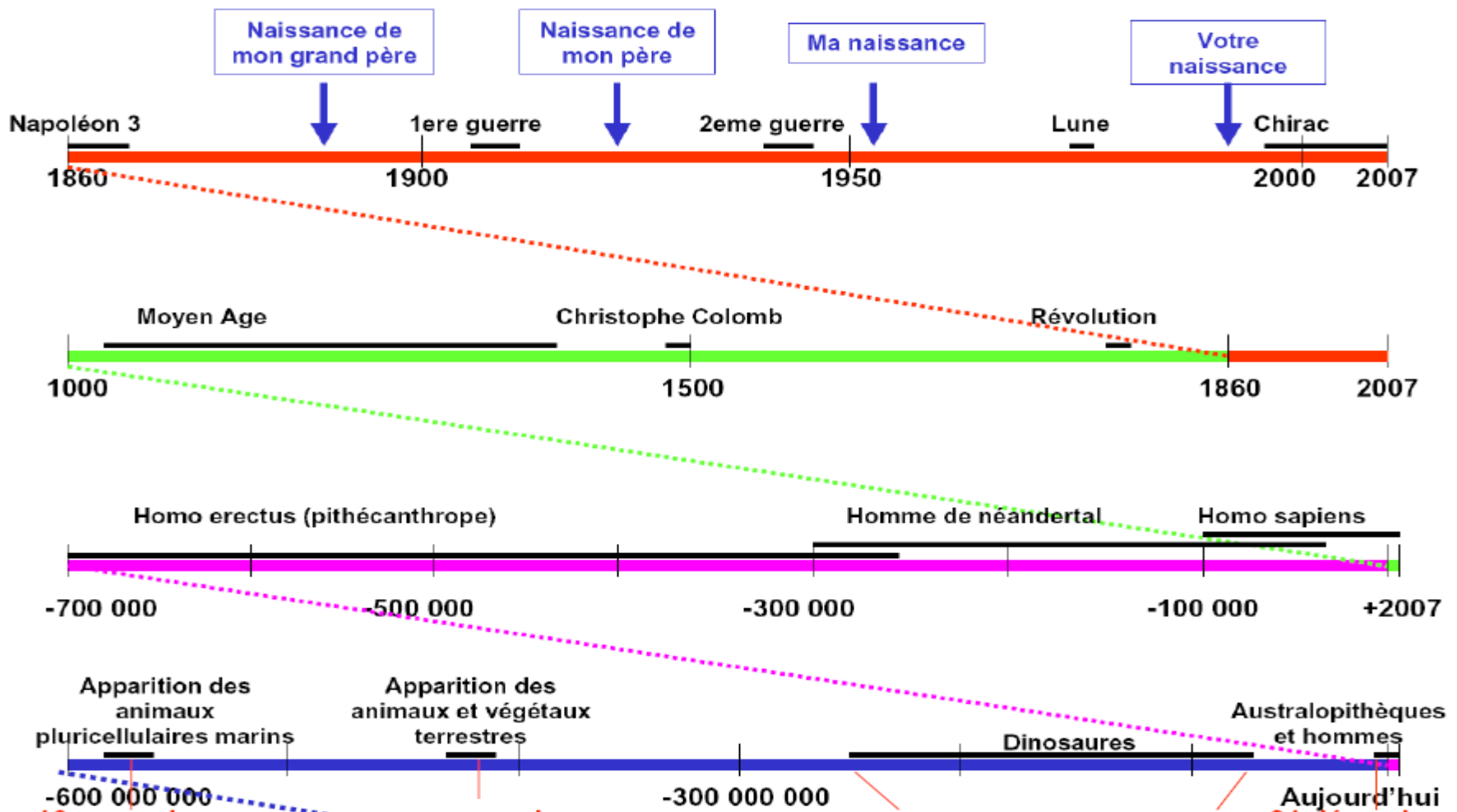
CO<sub>2</sub> = 580 à ?????? ppmv

T moyen = 19 à ????? °C

Niveau de la mer + 1 à + ? m

**Les leçons du passé récent (Cro-Magnon) sur  
l'avenir immédiat (nos petits enfants).**

**Pour l'avenir un peu plus lointain (dans quelques siècles à  
millénaires) ça reviendra sans doute « normal » (plus de pétrole ou  
de charbon à brûler), sauf si ...**



**Quatrième échelle de temps : l'échelle de tout le phanérozoïque (600 000 000 ans)**

**L'échelle de 600 000 000 ans**



# LE CLIMAT DU LANGUEDOC ET DE LA PROVENCE

Après le festival, au lieu d'aller bronzer sur les plages, promenez vous dans l'arrière pays. Vous y trouverez :

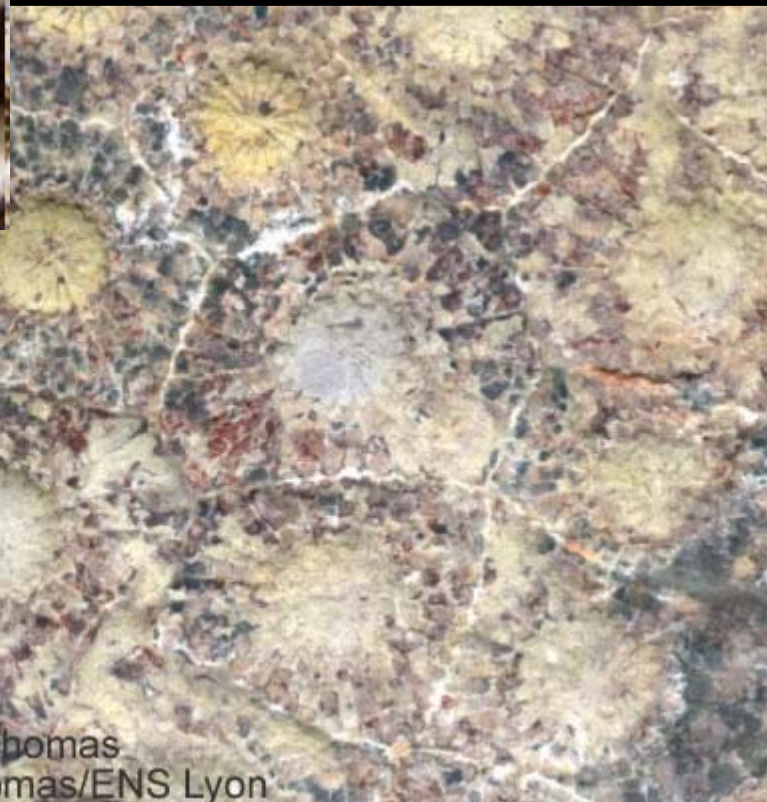
- 365 Ma (Dévonien) : coraux
- 290 Ma (Carbonifère) : fougères arborescentes
- 250 Ma (Permien) : fentes de dessiccation
- 210 Ma (Trias) ; gypse et sel
- 150 Ma (Jurassique) coraux
- 90 Ma (Crétacé) : latérite
- 30 Ma (Oligocène) : crocodiles et colibris
- 20 Ma (Miocène) coraux

Aujourd'hui, rien de tout ça.

→ Climat chaud de – 365 à – 20 Ma, avec refroidissement majeur depuis – 20 Ma



**Que trouve-t-on  
dans le Dévonien  
(-365 Ma) de  
Montagne  
Noire ?**



**Des coraux  
fossiles !**

Photographie : Pierre Thomas  
Echantillon : Pierre Thomas/ENS Lyon



Photographie : Pierre Thomas

**- 290 Ma : des couches de charbons, des fossiles de troncs d'arbres**





Photographie : Pierre Thomas

**Des troncs d'arbre  
avec de drôles  
« d'écailles »**





**Ce sont des troncs  
de fougères  
arborescentes**





**Dans le sud de  
la France, il y  
avait un climat  
chaud et  
humide il y a  
290 Ma**





**Les terrains d'il y a – 250 Ma**

# Des marécages en climat chaud



- 250 Ma

Aujourd'hui



Photographie : Pierre Thomas



Photographie : Pierre Thomas

**Des dépôts de  
gypse et de sel  
datant de  
– 210 Ma**



Photographie : Pierre Thomas

**Qui ont du se former  
dans un paysage  
voisin de ceux-ci**



# Des falaises calcaires de – 150 Ma, avec des ...



... coraux fossiles





**Le Languedoc il y a  
150 Ma**





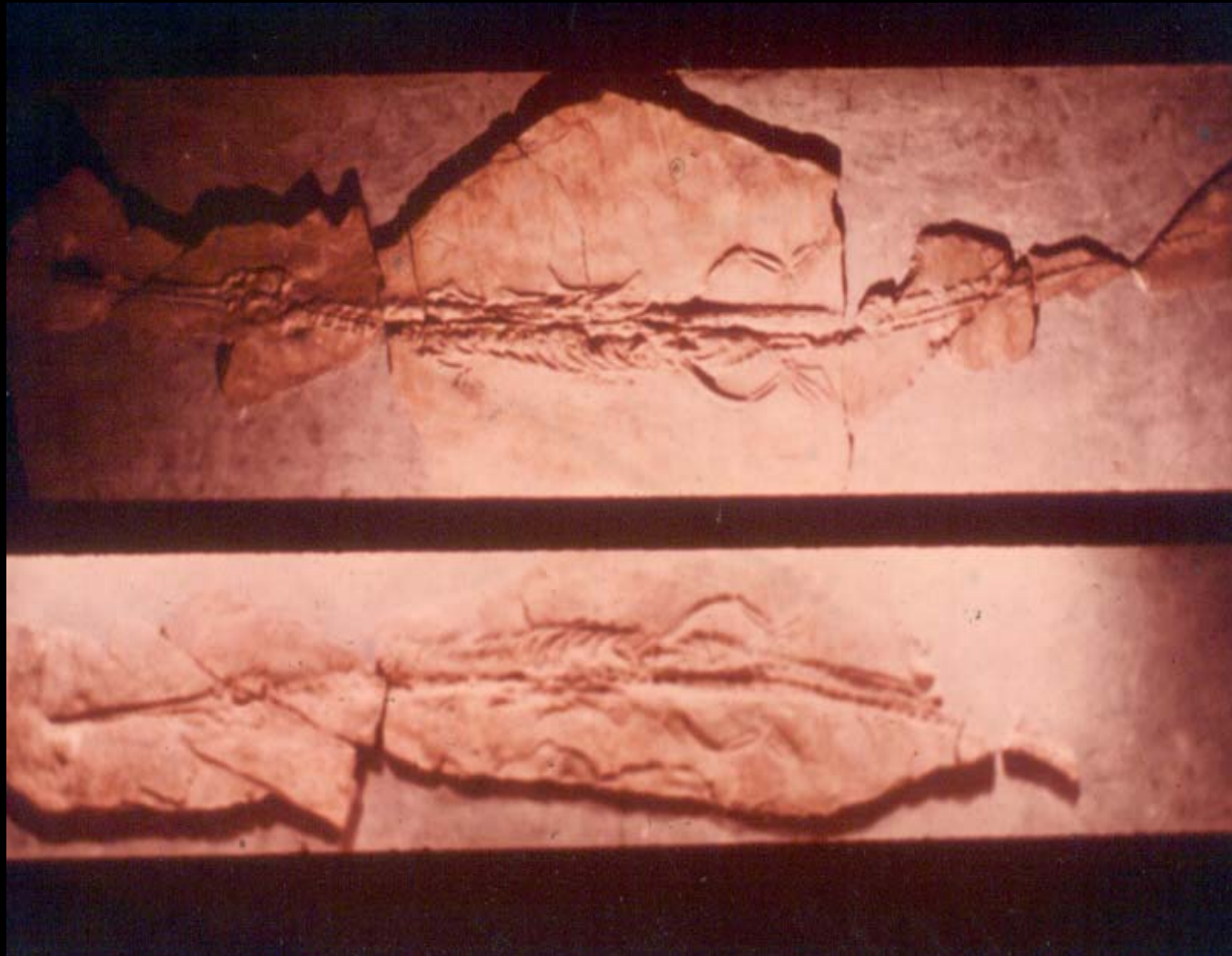
**Des drôles de  
roches rouges  
datant de  
– 90 Ma**



**Il y a 90 Ma, le  
Languedoc était  
recouvert d'une  
cuirasse latéritique**



**Et il y a 30 Ma, il ne faisait pas bon se baigner dans les lacs provençaux !**



**Par contre, autour des lacs, volaient des ...**



**... colibris**



Echantillon Nicolas Tourment



**Et il y a – 20 Ma  
(Miocène), toujours  
des coraux en  
Languedoc !**



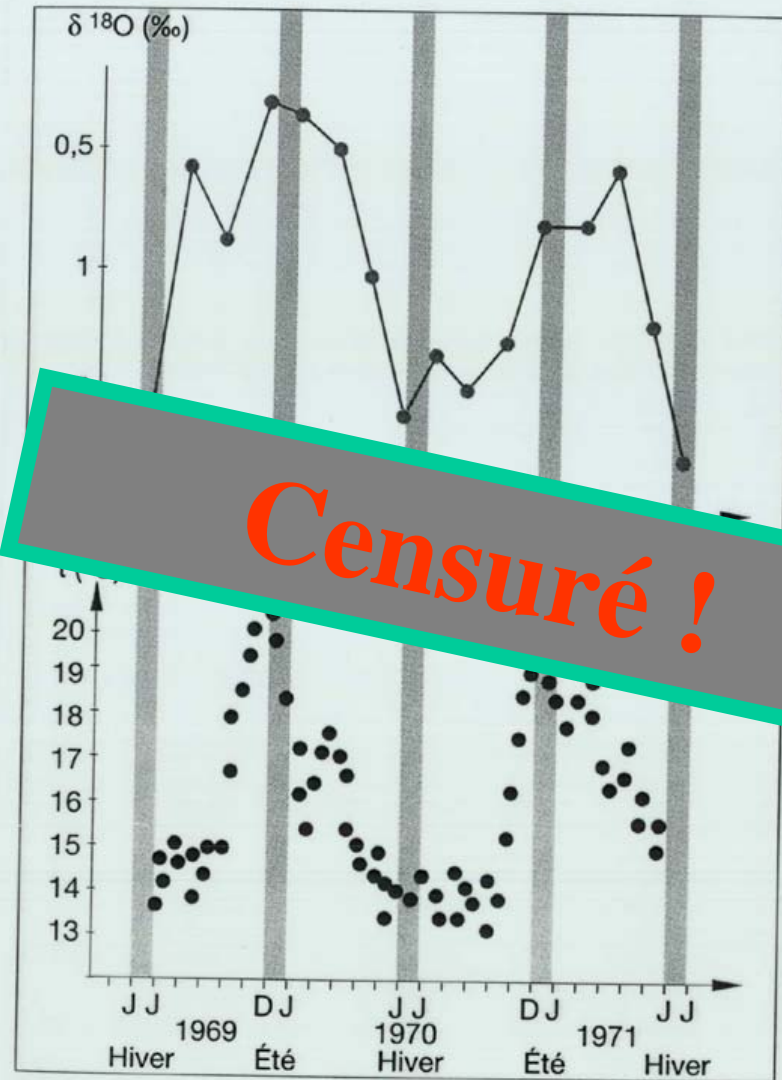
Photographie : Pierre Thomas  
Echantillon : Pierre Thomas/ENS Lyon

**Du Dévonien (-365 Ma) au Miocène (-20 Ma), en Languedoc / Provence, climat chaud, avec coraux, fougères arborescentes, crocodiles ...**  
**Aujourd'hui, rien de tout cela !**  
**Le temps change !**



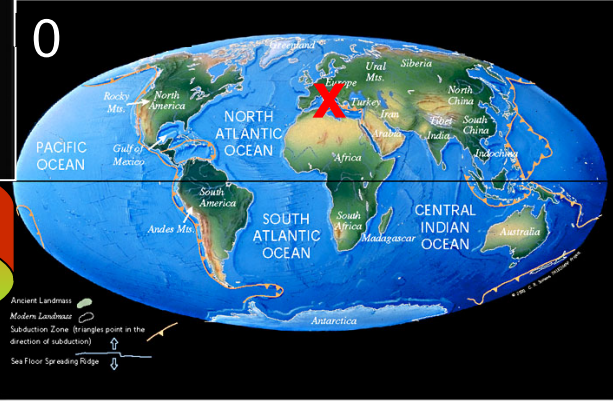
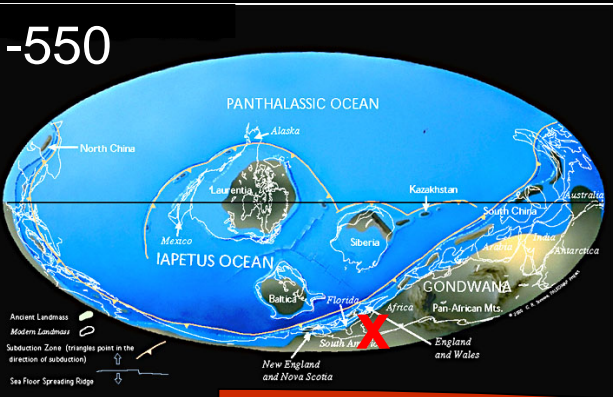
D'autres moyens existent pour déterminer les climats anciens, mais c'est plus cher (et plus long à expliquer).

Et il faut être sûr de connaître la composition isotopique de la mer de l'époque !



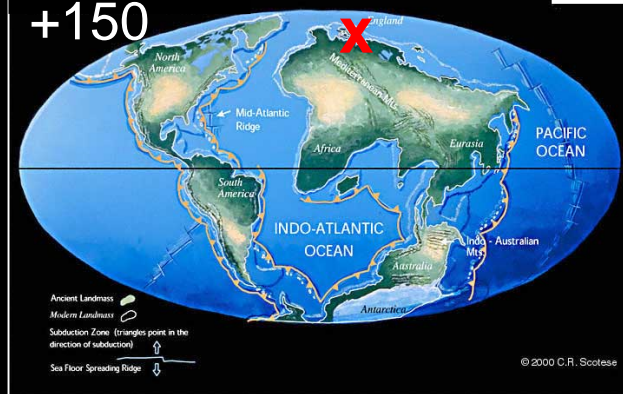
**3** Relation entre le  $\delta$  des carbonates des diverses couches d'un test de *Patella tabularis* (Mollusque gastéropode marin, prélevé sans l'hémisphère Sud) et la température de l'eau.

# Mais ce changement du climat en France, est-il du au changement du climat mondial, ou au déplacement de la France pour cause de « dérive des continents » ?



Le temps qui passe

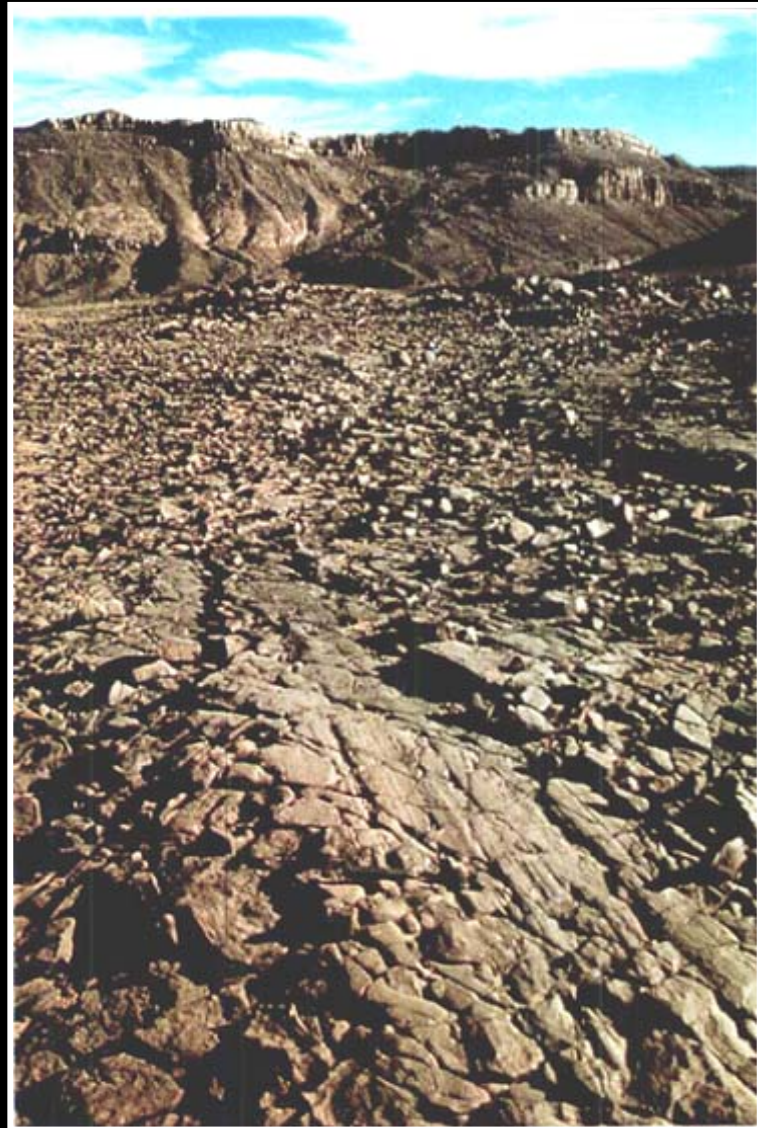
vers le futur



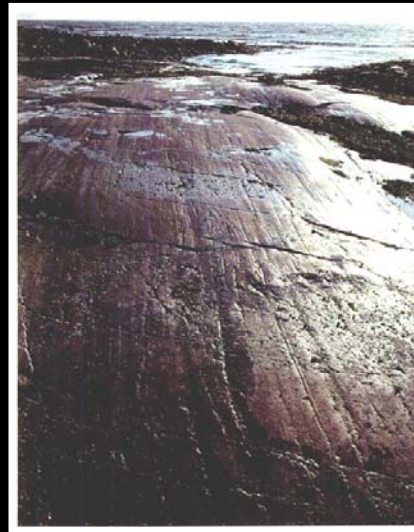
Il faut donc étudier les climats anciens pour toutes les régions du monde !



# Un autre endroit où le climat a changé : la Namibie



**Stries glaciaire en Namibie  
(- 300 000 000 d'années)**



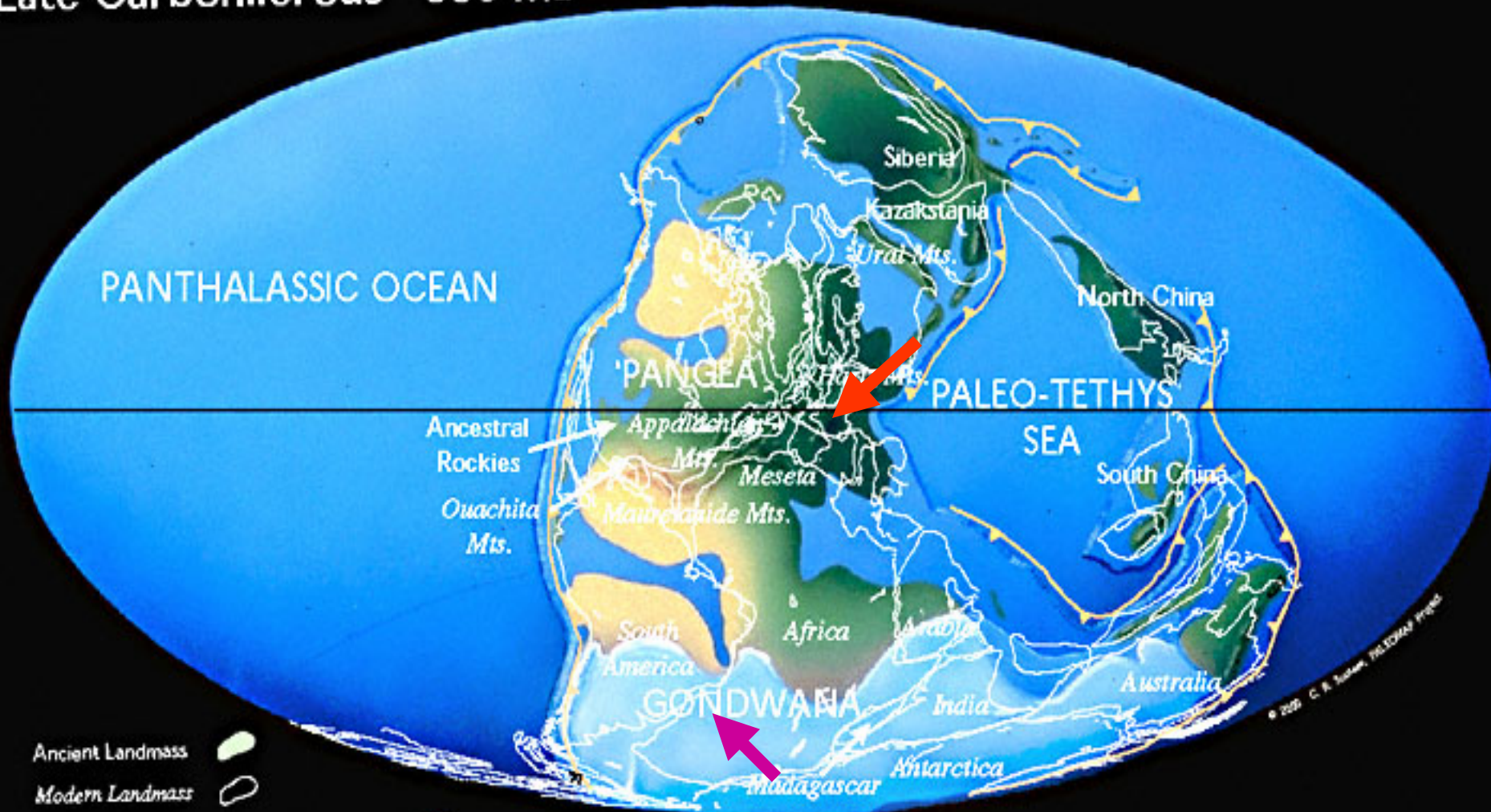
**Stries glaciaires au  
Groenland ( petit âge  
glaciaire, - 200 ans)**



**La France  
à - 300 000 000 d'années**

# On fait des reconstitutions paléo-géographico-climatiques

Late Carboniferous 306 Ma



Ancient Landmass

Modern Landmass

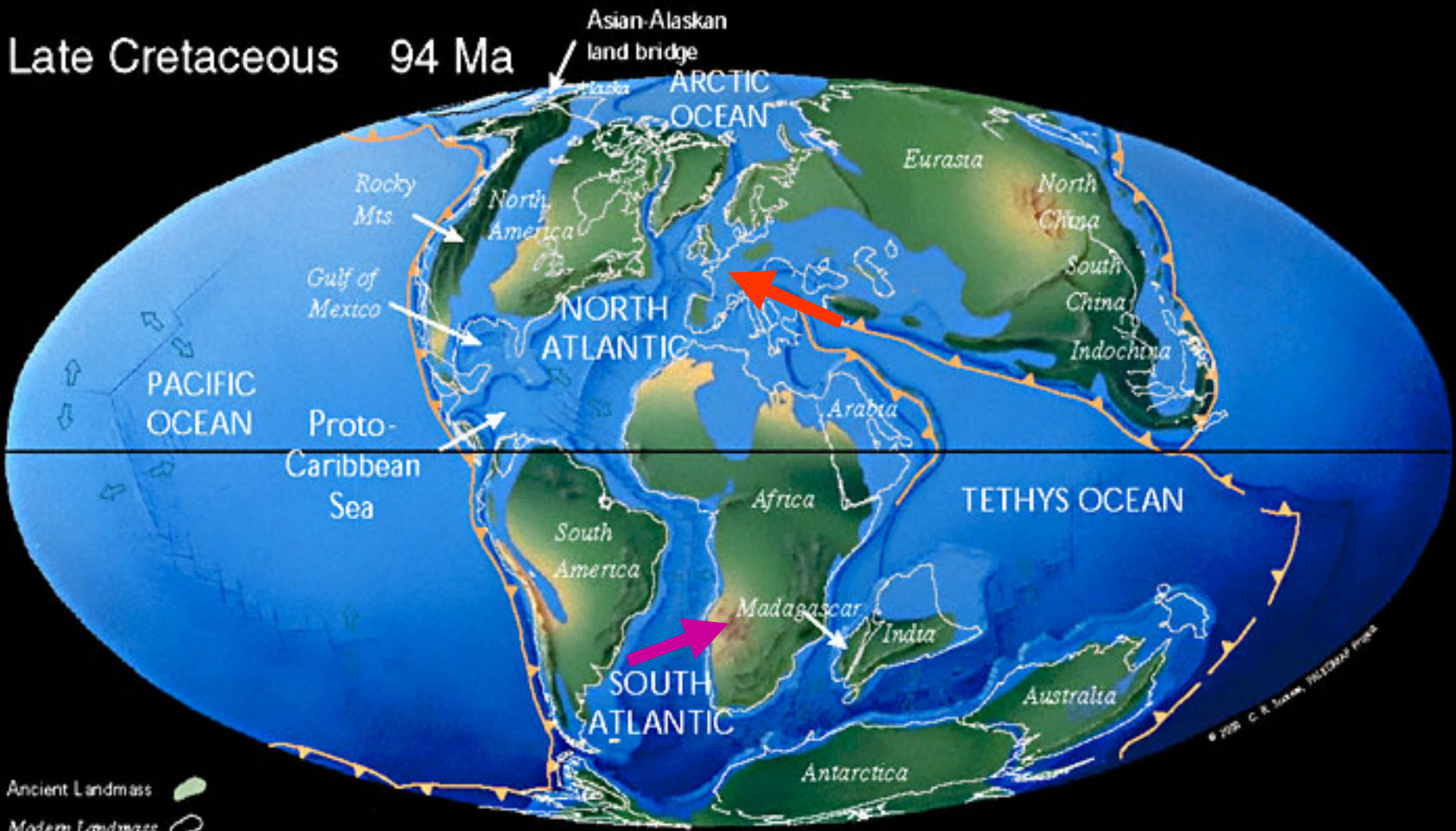
Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction)

Sea Floor Spreading Ridge

Le Carbonifère : une période froide, avec glaciers. Mais l'Europe est sous l'équateur

# Et oui, le temps change !

Late Cretaceous 94 Ma



Ancient Landmass  
Modern Landmass  
Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction)

**Le Crétacé, une période chaude. Il n'y a pas de glacier, même pas aux pôles**

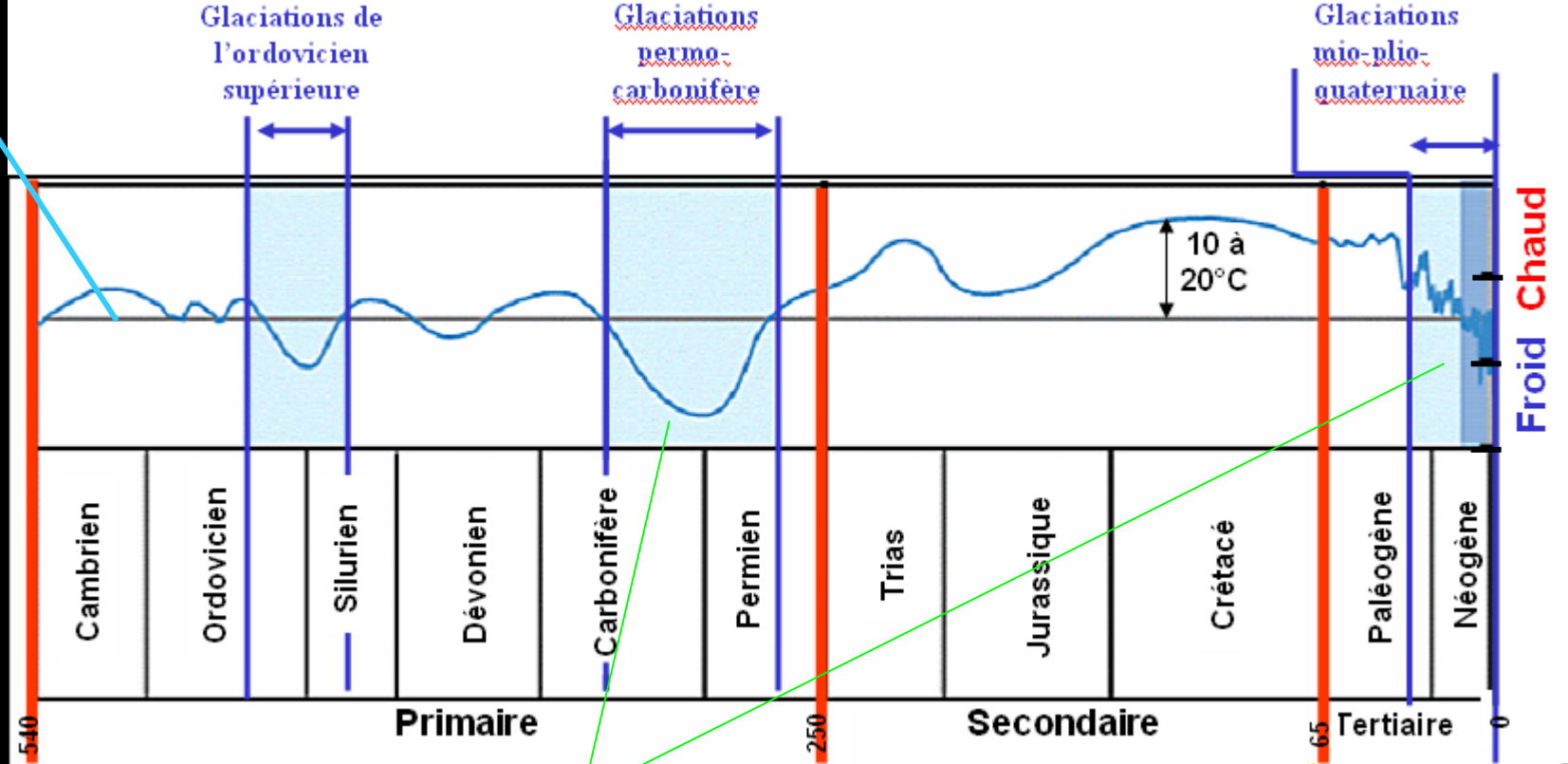
# Il n'arrête pas de changer !

## Modern World

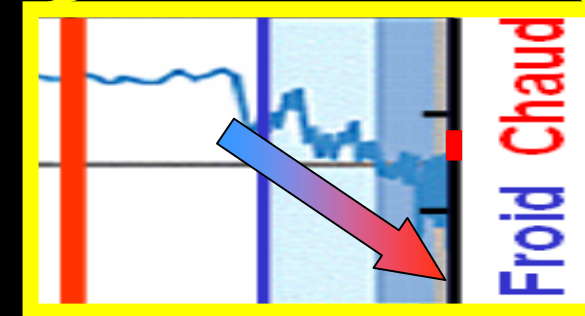


Le quaternaire : de nouveau une période froide, avec glaciers. Et comme l'Europe n'est plus sous l'équateur ...

**T**  
actuelle



Il y a très certainement des variations rapides dans les temps très anciens, mais on ne les connaît pas !



Depuis 35 Ma, le climat mondial se refroidit sévèrement (-10 à -15°C) !

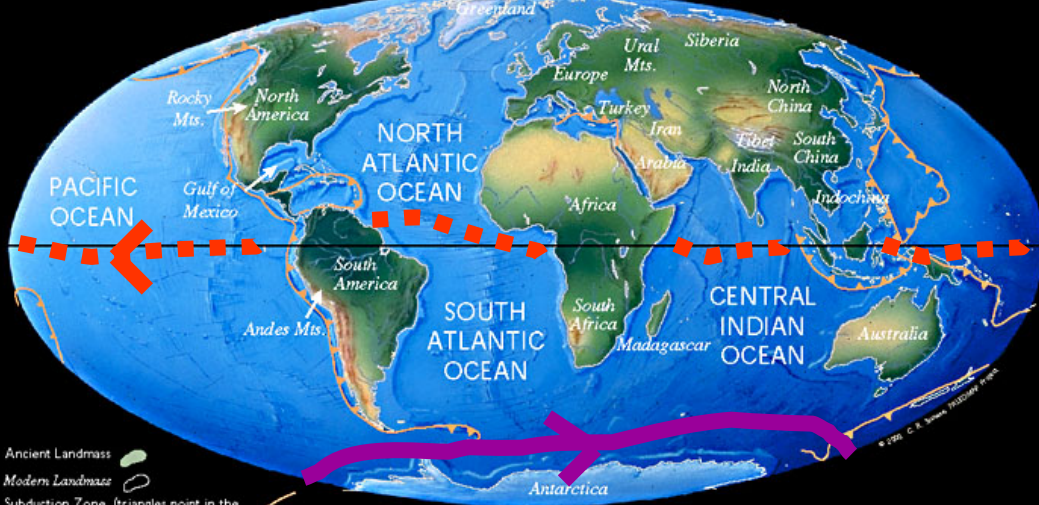
Avec tout ça, on peut quantifier les variations globales du climat depuis le début de l'ère primaire (- 540 Ma).  
On vit actuellement en période froide !

Late Cretaceous 94 Ma



Ancient Landmass  
Modern Landmass  
Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction)

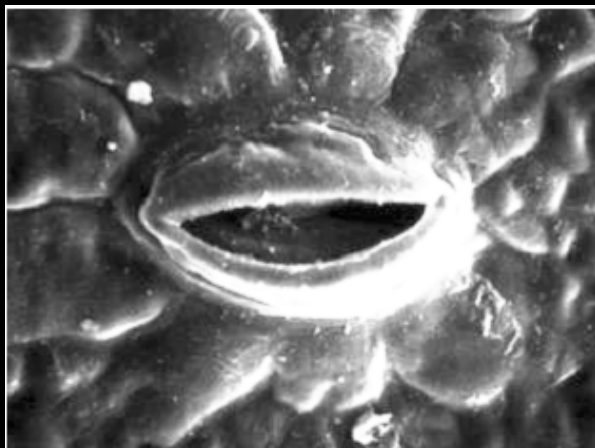
Modern World



Ancient Landmass  
Modern Landmass  
Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction)  
Sea Floor Spreading Ridge

Quelles peuvent être les causes de ces variations globales du climats ? Beaucoup de causes possibles. Par exemple, la position des masses continentales influence les circulations océaniques (par exemple circum équatoriale / circum polaire) et atmosphériques

# Ces variations climatiques globales peuvent être dues à des variations du CO<sub>2</sub> atmosphérique

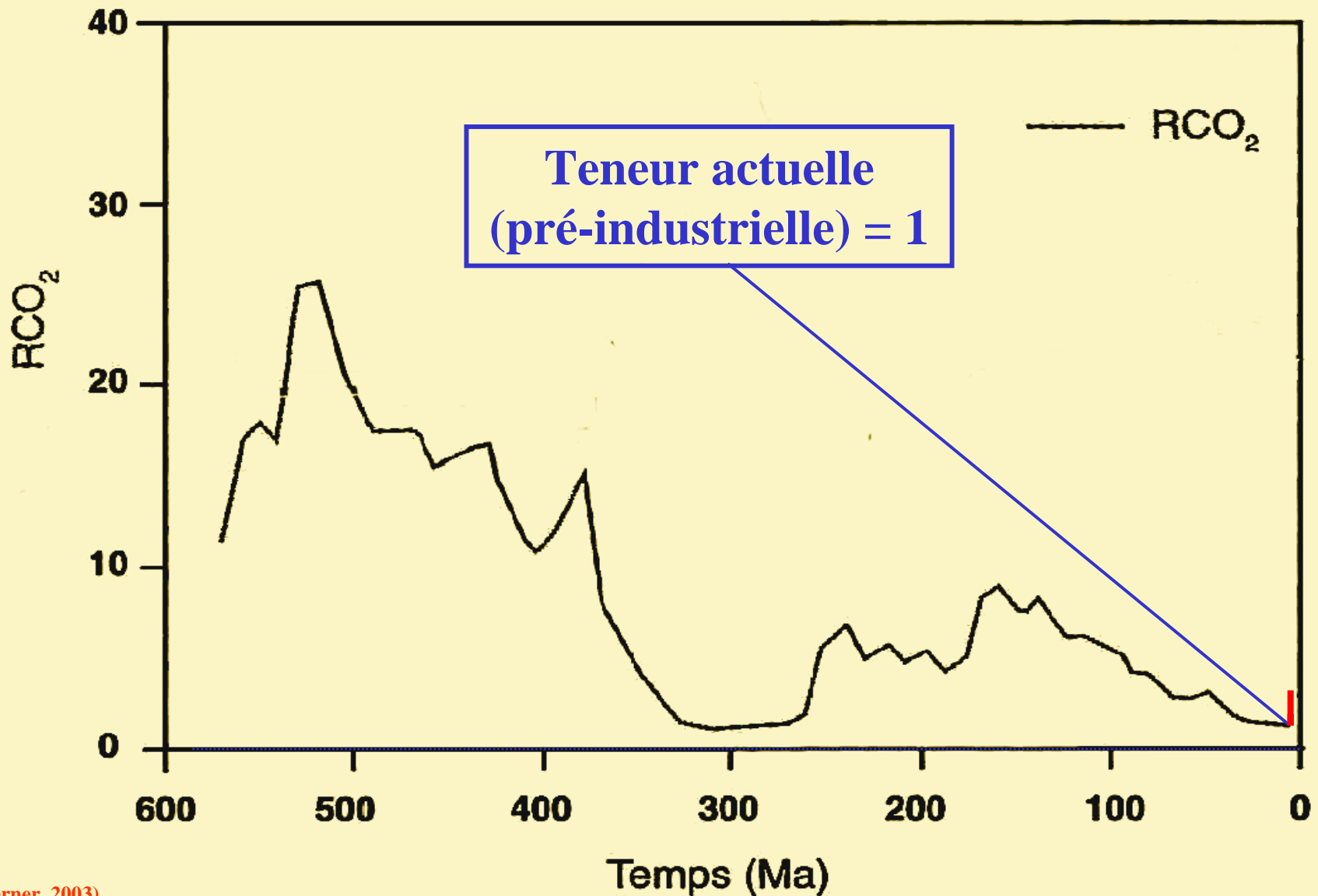


Comment mesure-t-on le CO<sub>2</sub> ante-glaciaire ?

Très difficilement !!

- A partir du jurassique : bulles d'air piégées dans de l'ambre.
- A partir du carbonifère : indice stomatique.
- Depuis 600 M.A. : bilans sédimentologiques et géochimiques (cf O<sub>2</sub>)





(Berner, 2003)

**Et voici ce que donne les plus récents modèles.  
Comme vous voyez, le CO<sub>2</sub> n'a jamais été plus bas**



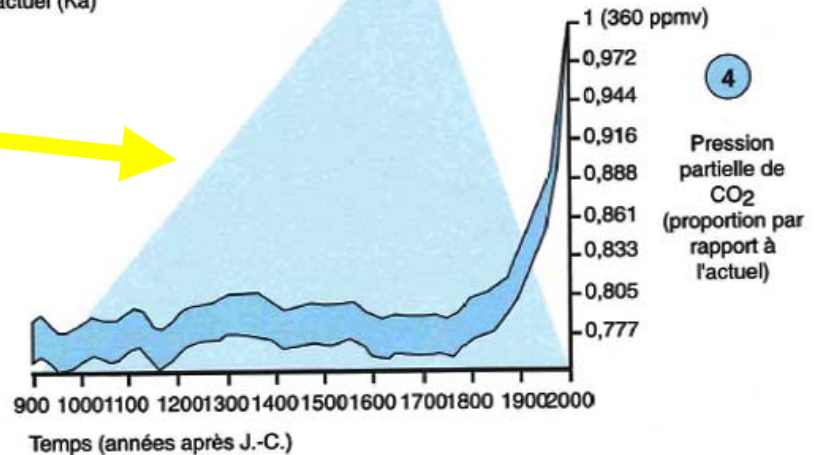
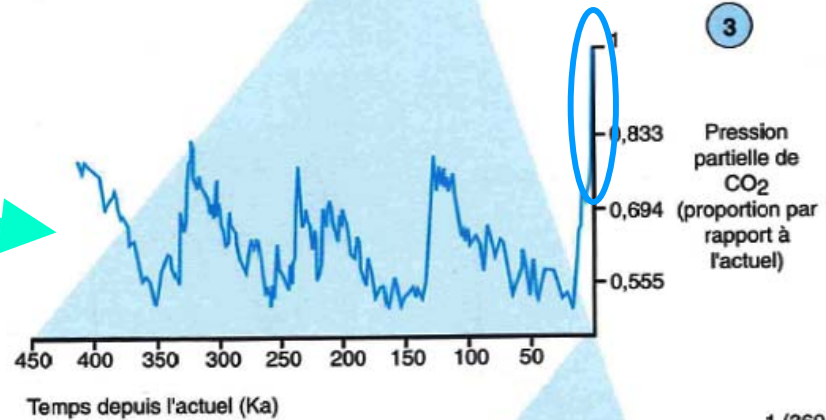
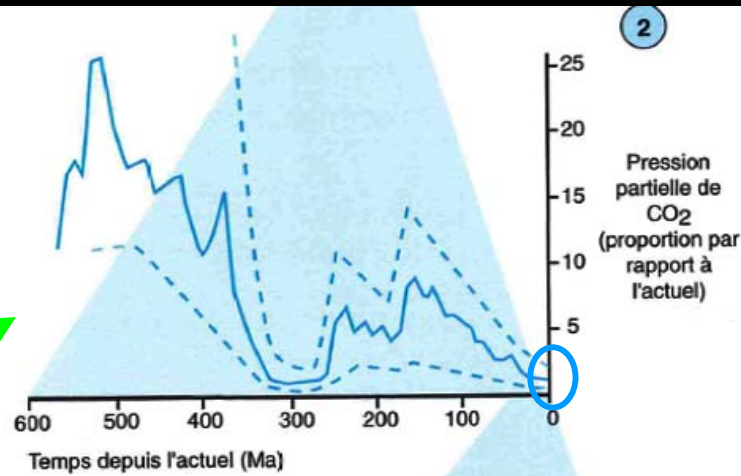
# Et voici un résumé des variations de CO<sub>2</sub>

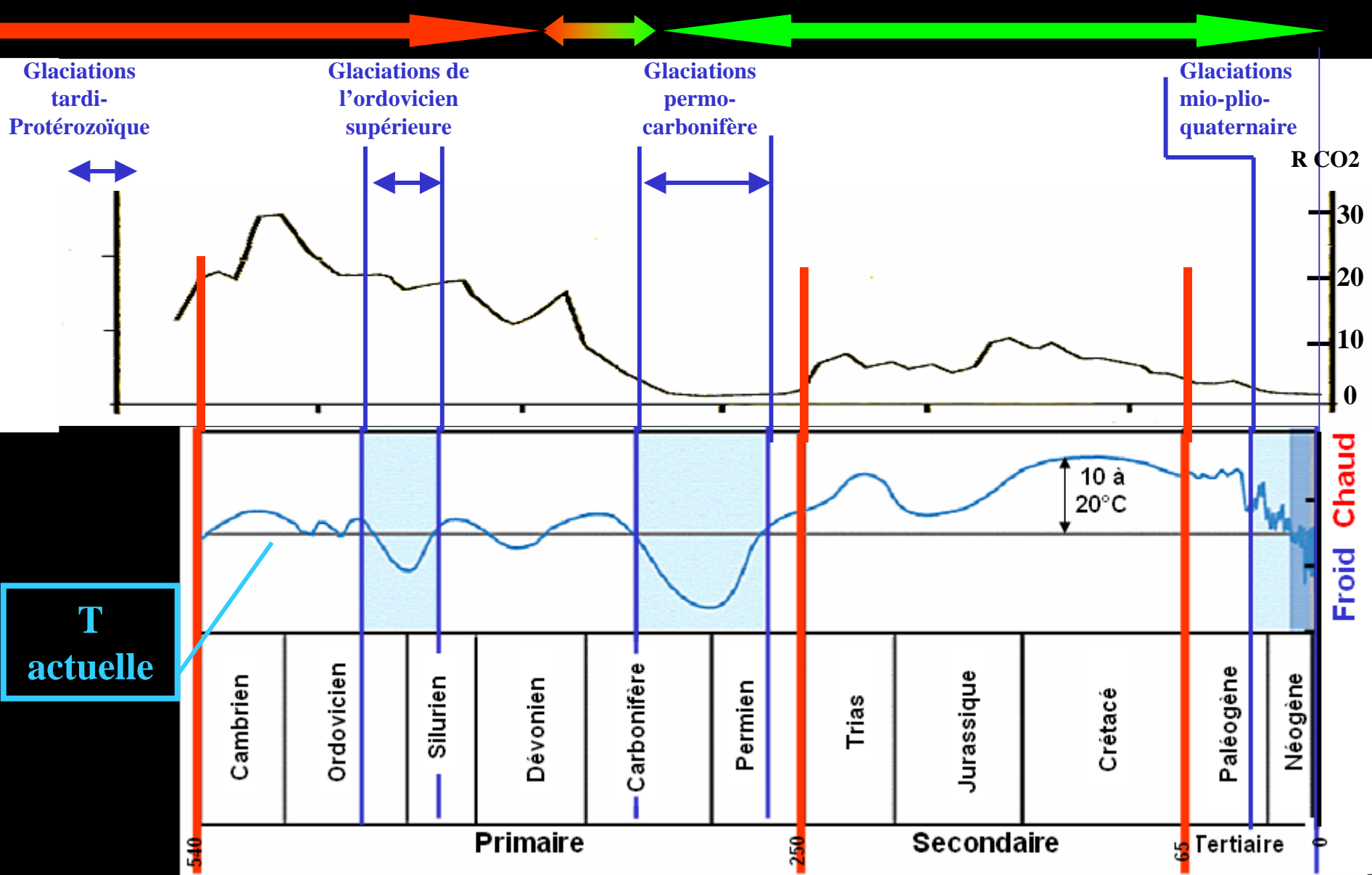
- Depuis 600 000 000 ans

- Depuis 420 000 ans

- Depuis 300 ans (celles dont parle la presse).

Relatif, tout est relatif !

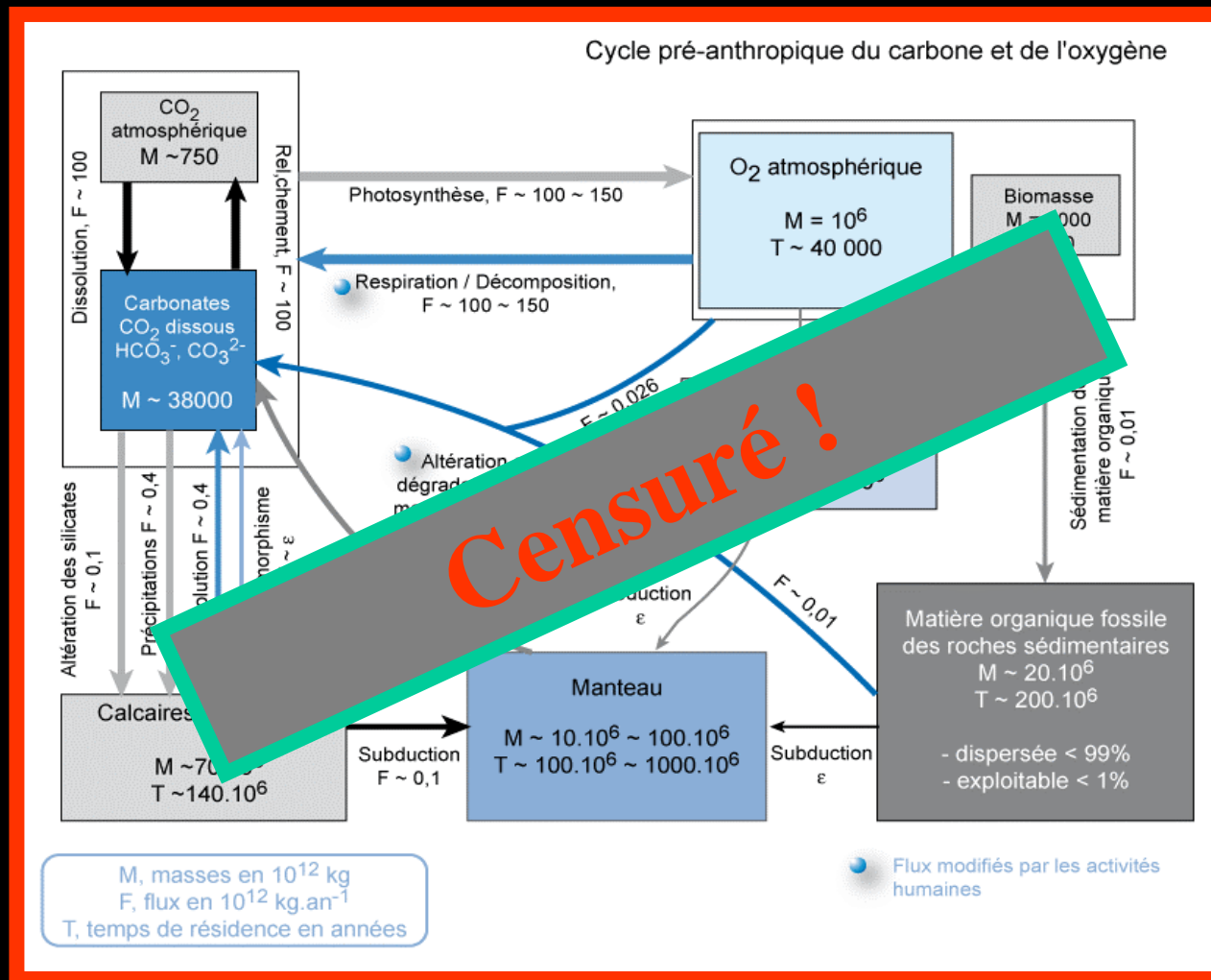




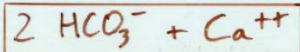
**Les relations température globale et taux de CO<sub>2</sub>.  
Ca « marche » après le Carbonifère, pas avant !**

# Qu'est ce qui peut faire varier le CO2 atmosphérique ?

## L'utilisation variable du carbone par la nature !



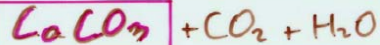
La précipitation/dissolution  
des carbonates (en surface)



Précipitation  
des carbonates

Dissolution des  
carbonates

Equilibre totalement réversible, réglé par la vie (photosynthèse, respiration, squelettes...) par le Ph, par la température.  
"Circuit fermé". A très long terme, ça reste constant.



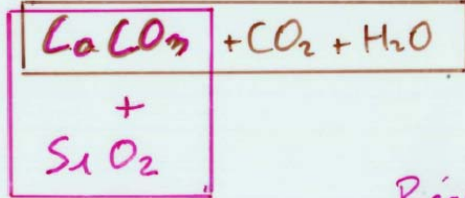
# Fabrication et dissolution des calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) : bilan presque nul



Photographie : Pierre Thomas

**Dissolution : absorbe du  $\text{CO}_2$**

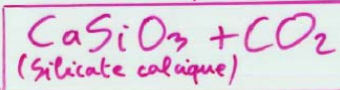
**Précipitation : libère du  $\text{CO}_2$**



à long terme, ça reste constant.

Réaction qui n'a lieu que dans un seul sens à basse température (en surface). Consomme irréversiblement\* du  $\text{CO}_2$

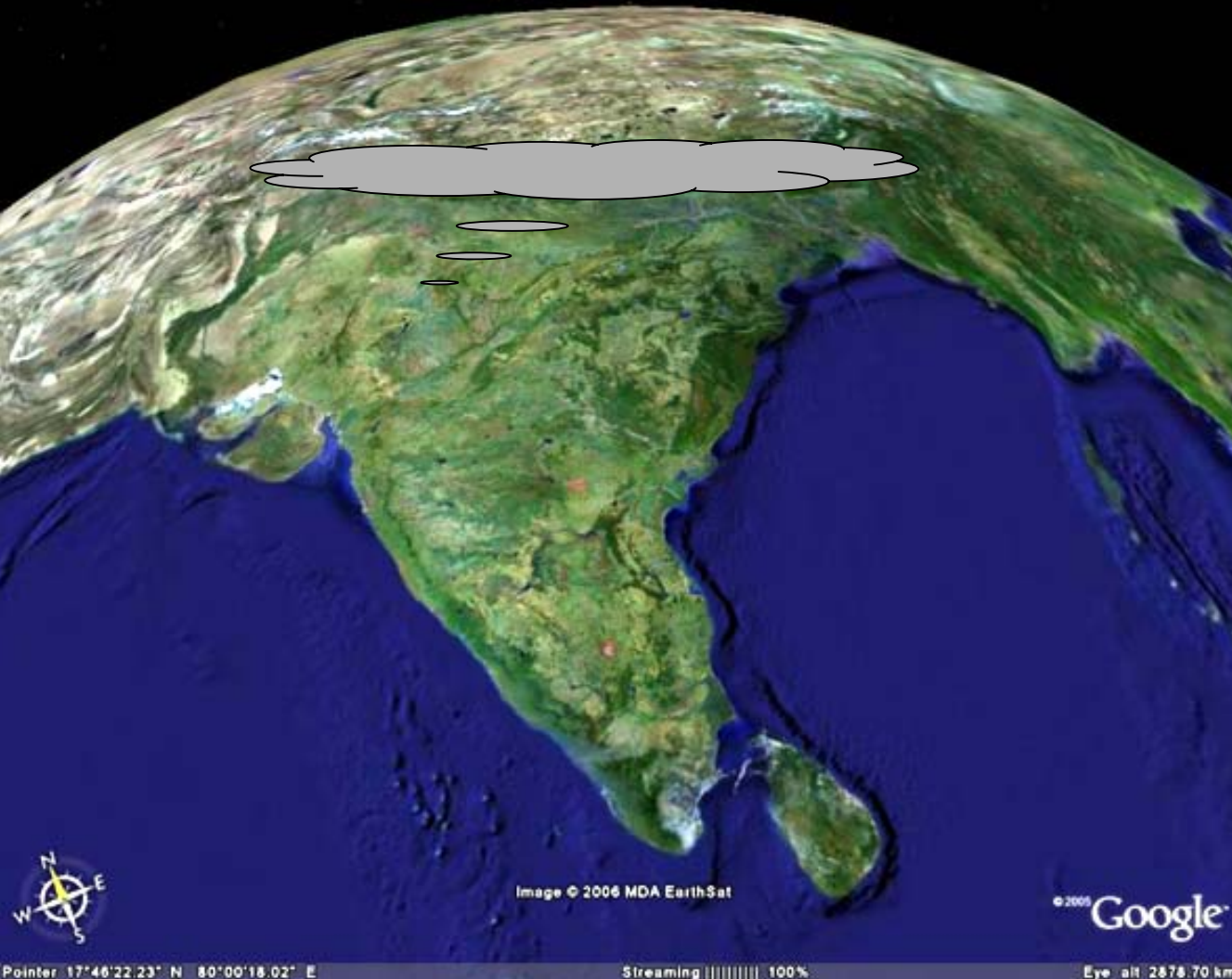
Altération  
des silicates



# L'altération des silicates calcaïques : pompe « définitive » de $\text{CO}_2$

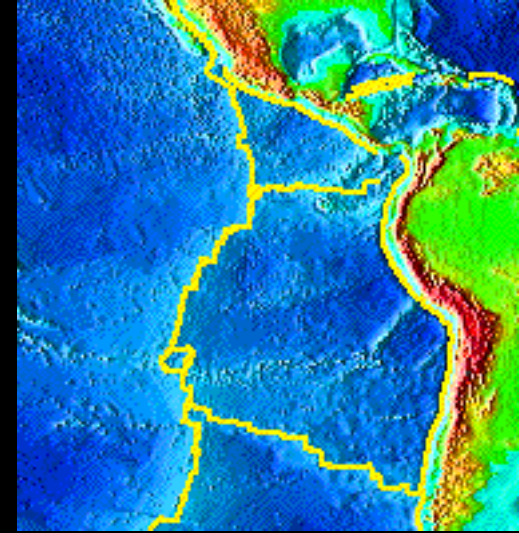
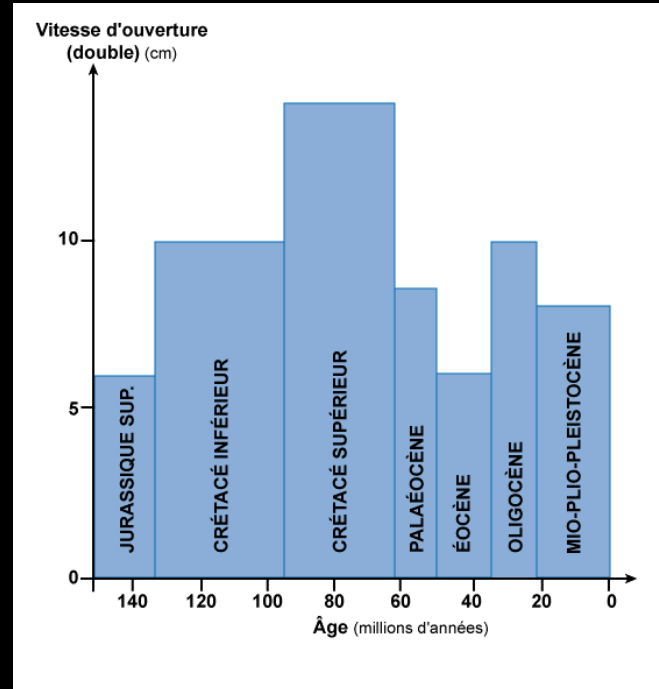


Photographie : Pierre Thomas

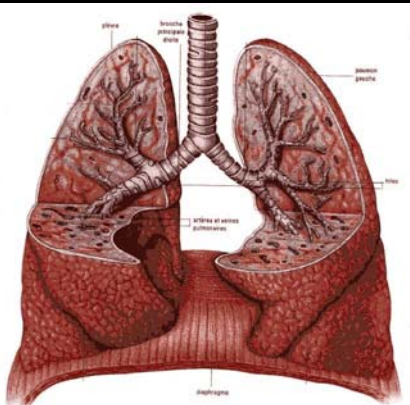


**La formation des montagnes, qui favorise érosion et altération fait baisser le CO<sub>2</sub> et refroidit le climat mondial. Depuis 100 Ma L'Himalaya est une gigantesque, lente mais inexorable pompe à CO<sub>2</sub>**

# Et puis bien sur il y a les volcans qui rejette du CO2



**Et la vie !  
Photosynthèse et  
respiration ont un  
bilan nul dans les  
écosystèmes  
équilibrés, sauf si ...**

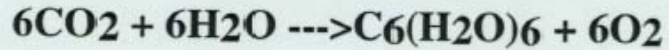


# PHOTOSYNTHÈSE

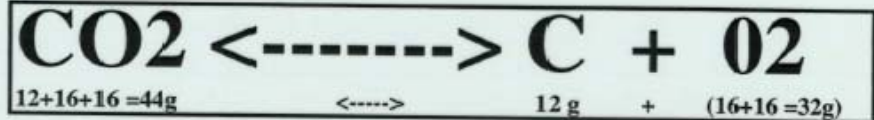
Equation tenant compte du mécanisme réactionnel



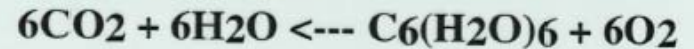
Première simplification, ne tenant pas compte des mécanismes réactionnels, mais valable quand au bilan de masse



Deuxième simplification, tenant encore moins compte des mécanismes réactionnels, mais toujours valable quand au bilan de masse



Simplification, ne tenant pas compte du mécanisme réactionnel, mais valable quand au bilan de masse



Equation tenant compte du mécanisme réactionnel

# RESPIRATION





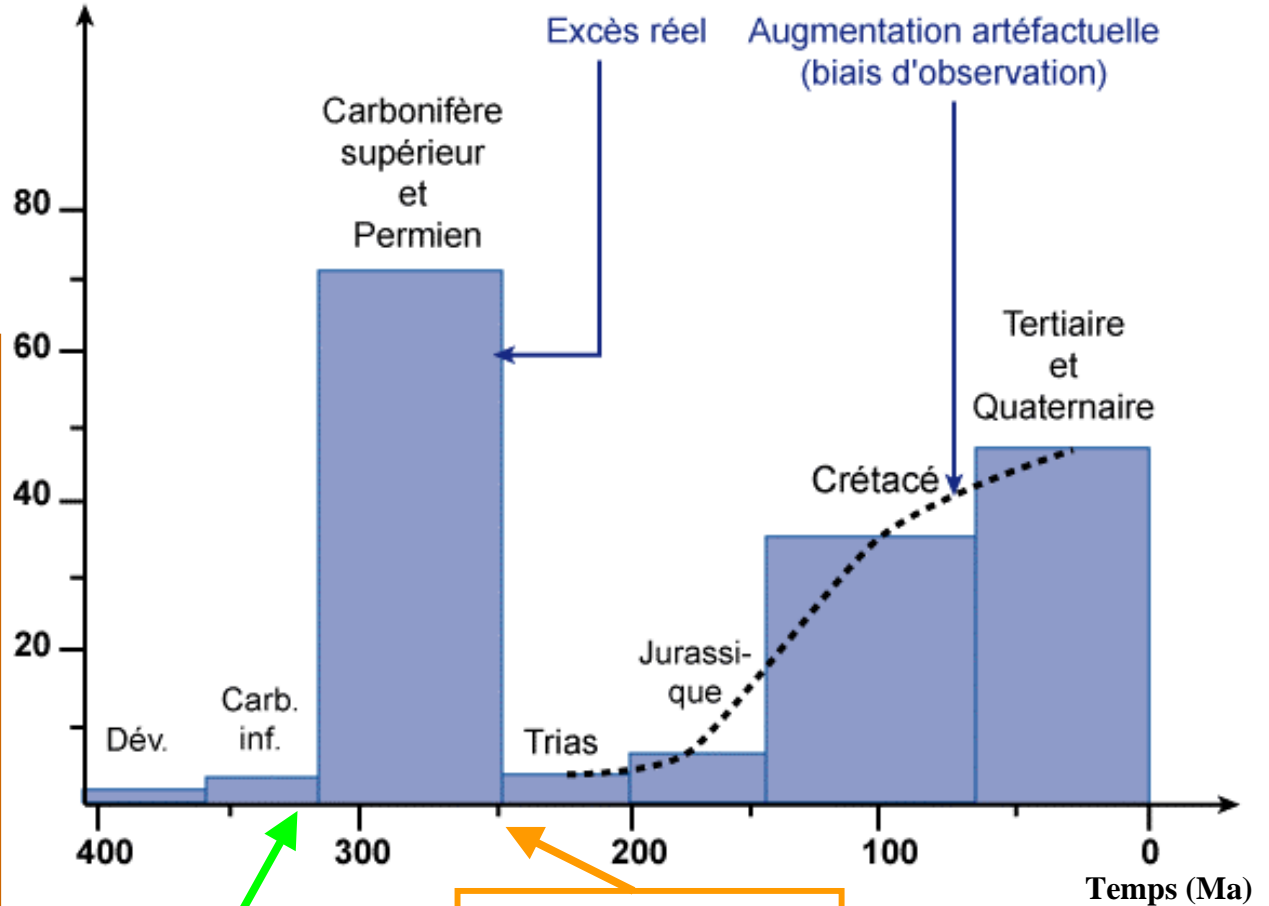
**... sauf si de la matière organique est fossilisée, ou si au contraire de la matière organique fossile est oxydée**



# Et il y a des époques où la géologie stocke beaucoup de Carbone.



Réserves de charbon exploitable  
(milliards de tonnes / millions d'années)



Extension du couvert végétal ligneux

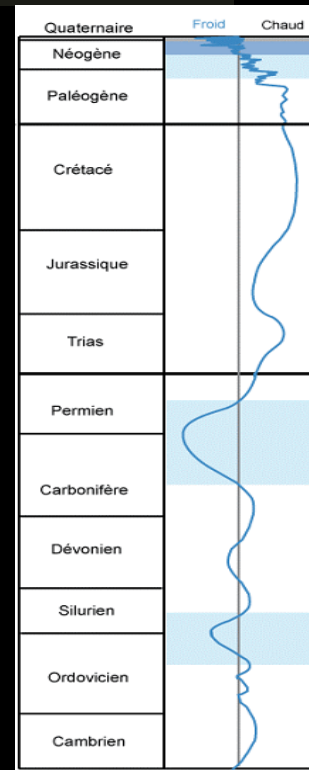
Apparition des asco et basidio-mycètes (très bon dégradeurs de la lignine)

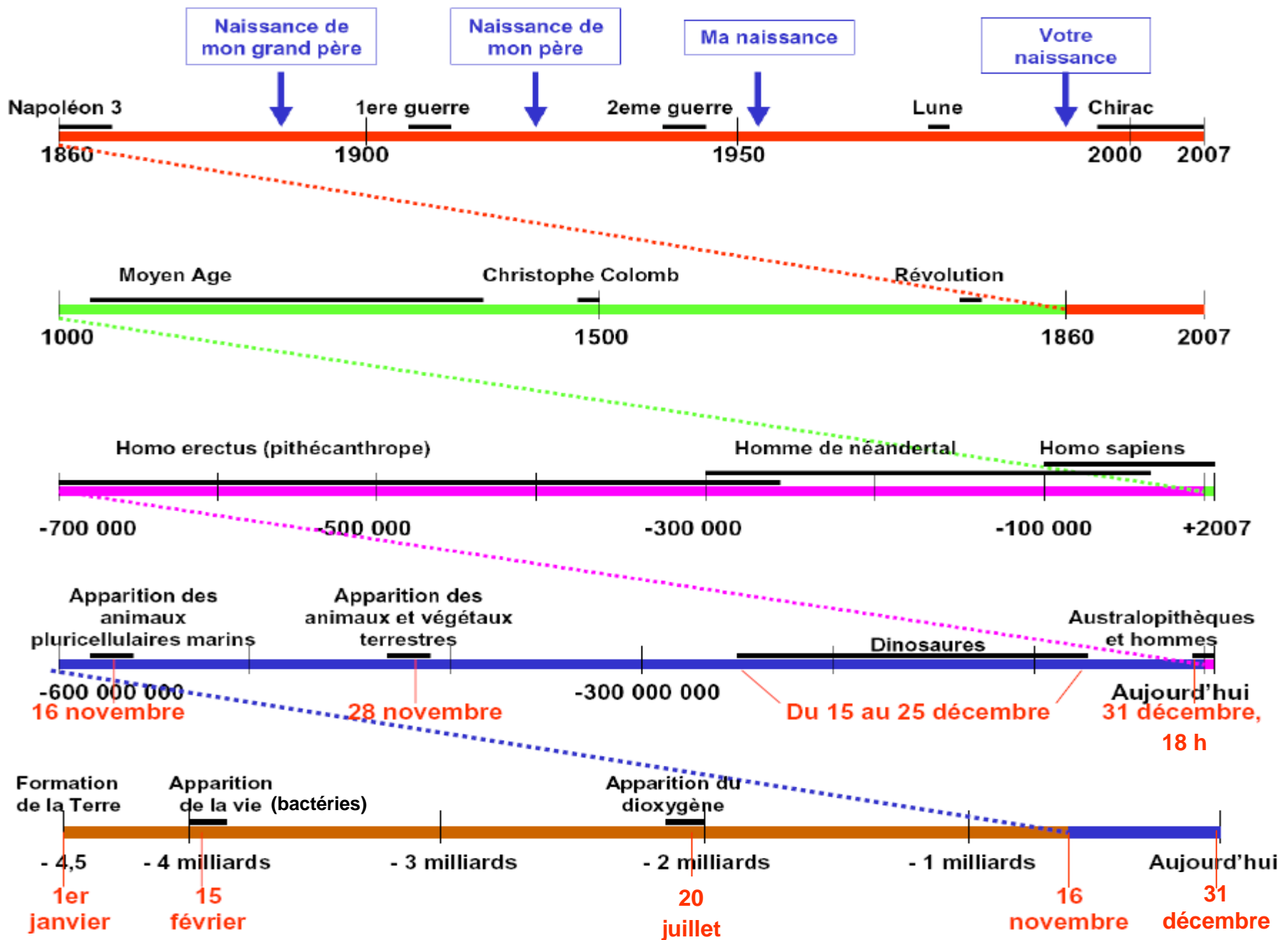


Photographie : Pierre Thomas



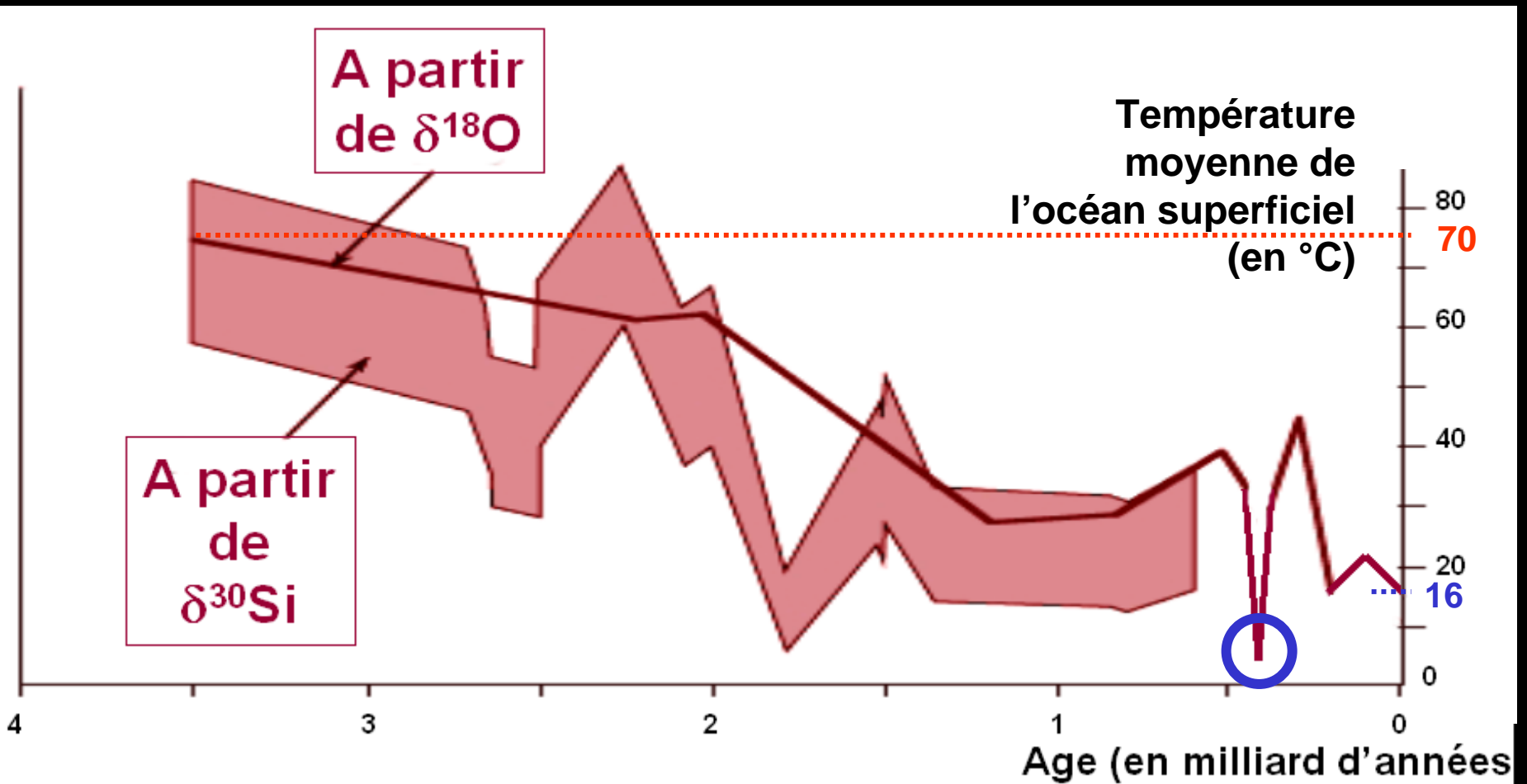
**Calcaires et silicates calciques  
+ montagne + vie, charbon et  
pétrole + volcans + ... ,  
tout ça varie avec le temps  
→ Le CO<sub>2</sub> varie  
→ Le climat mondial varie**





# L'échelle de 4 500 000 000 ans, l'âge de la Terre

# La température à l'échelle de l'histoire de la Terre.



Que fait la température (courbes très approximatives) ?  
Vers + 70° jusqu'à -2 Ga.

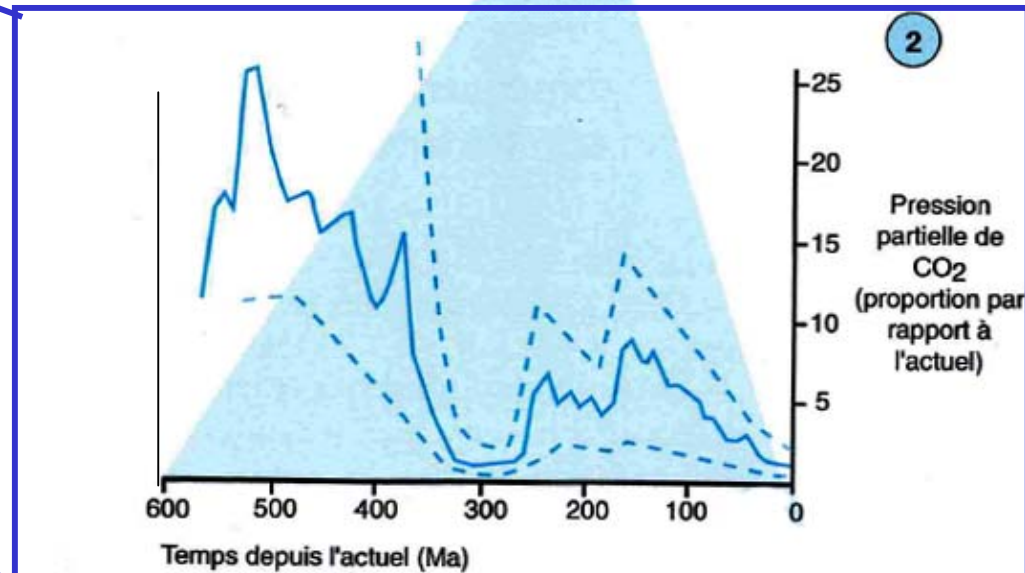
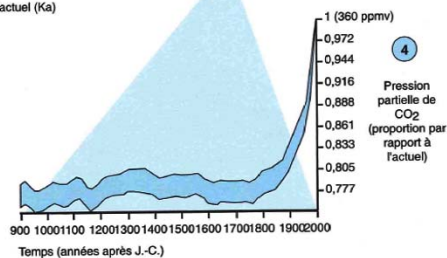
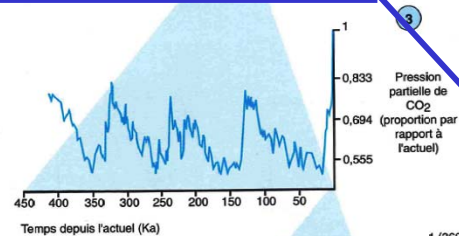
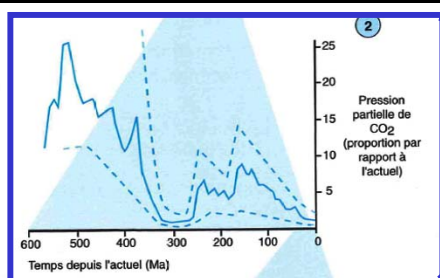
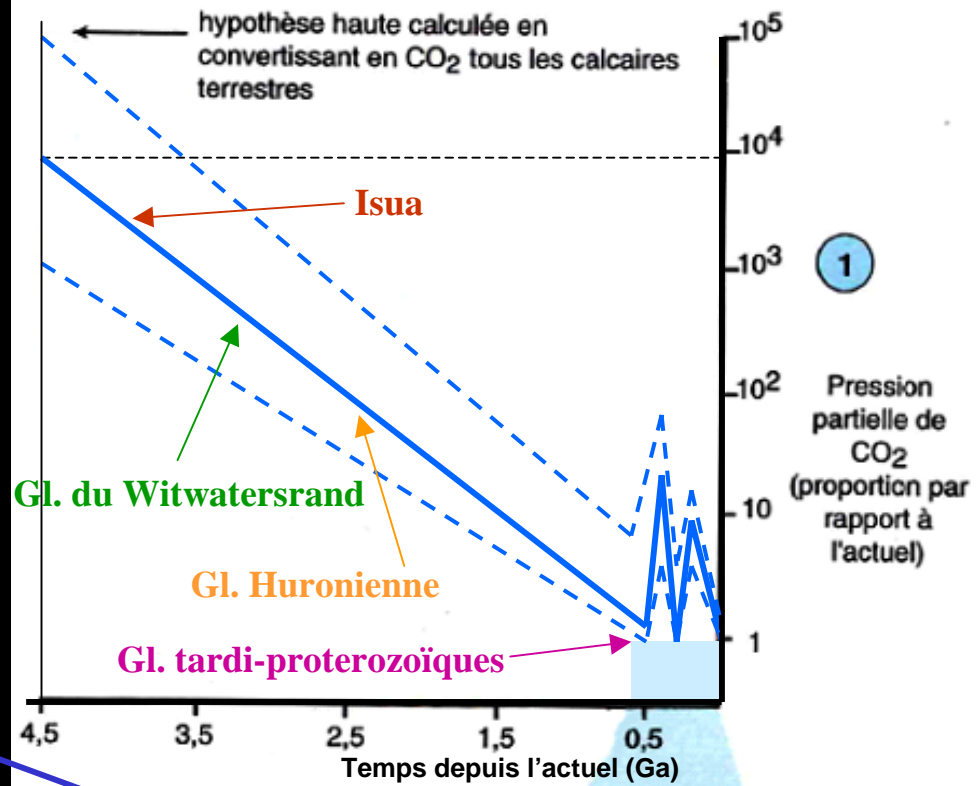
Presque comme « maintenant » (10 à 30°C) depuis 1 Ga !  
On n'a jamais été plus froid que maintenant, sauf ...

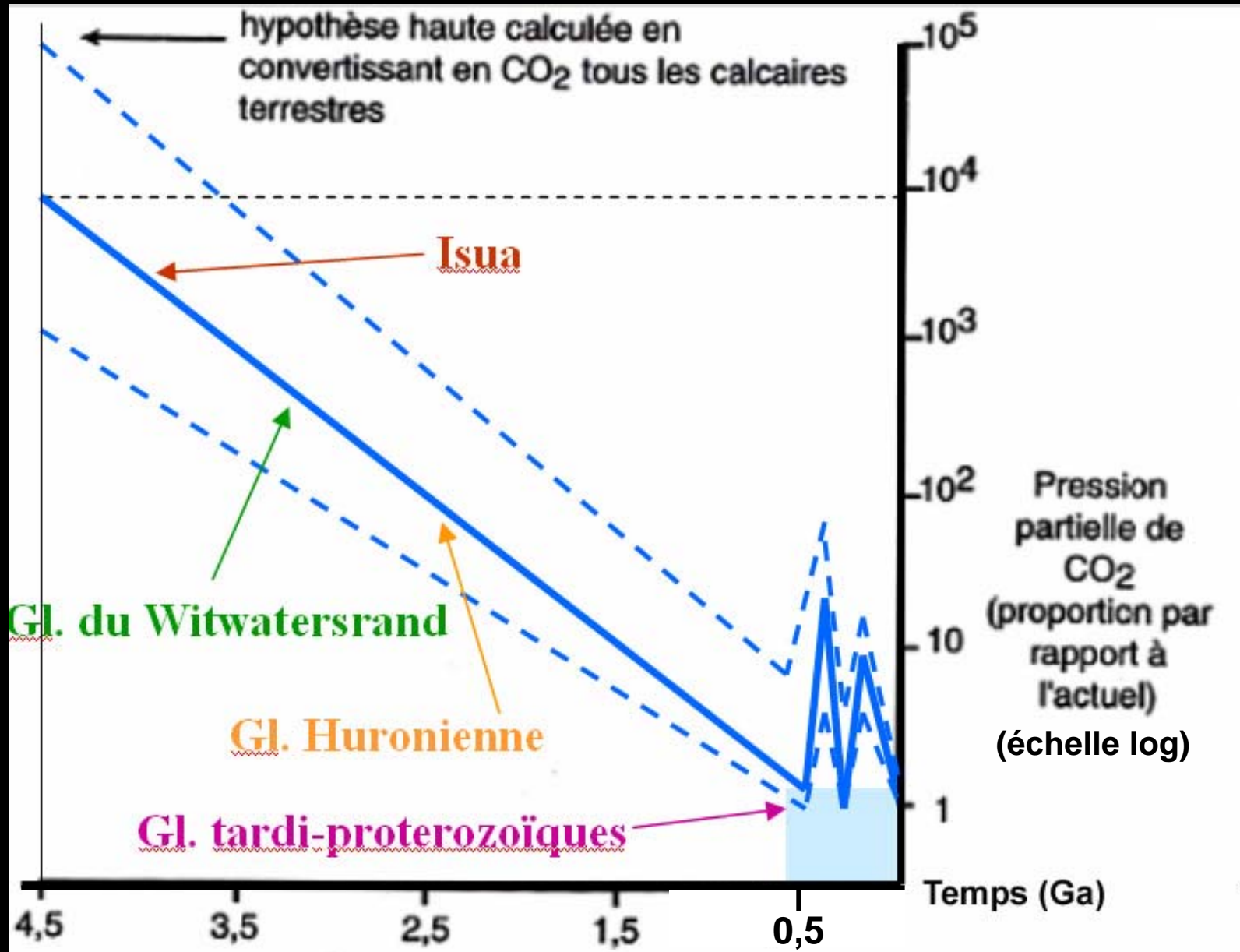
**Il y a eu quelques  
« emballements », vers le  
froid.**

**Il y a de nombreux indices  
géologiques montrant que  
vers – 750 Ma, il y aurait  
eu 3 épisodes pendant  
lesquels tous les  
continents étaient  
recouverts de calottes et  
tous les océans de  
banquise : les épisodes  
« boules de neige »  
(snowball earth )**



**Et pendant ce temps là,  
le CO2 baisse : une  
diminution exponentielle  
(au irrégularités près).  
Le CO2 est divisé par 10  
tout les milliards  
d'années (10 000 à  
100 000 en tout).**

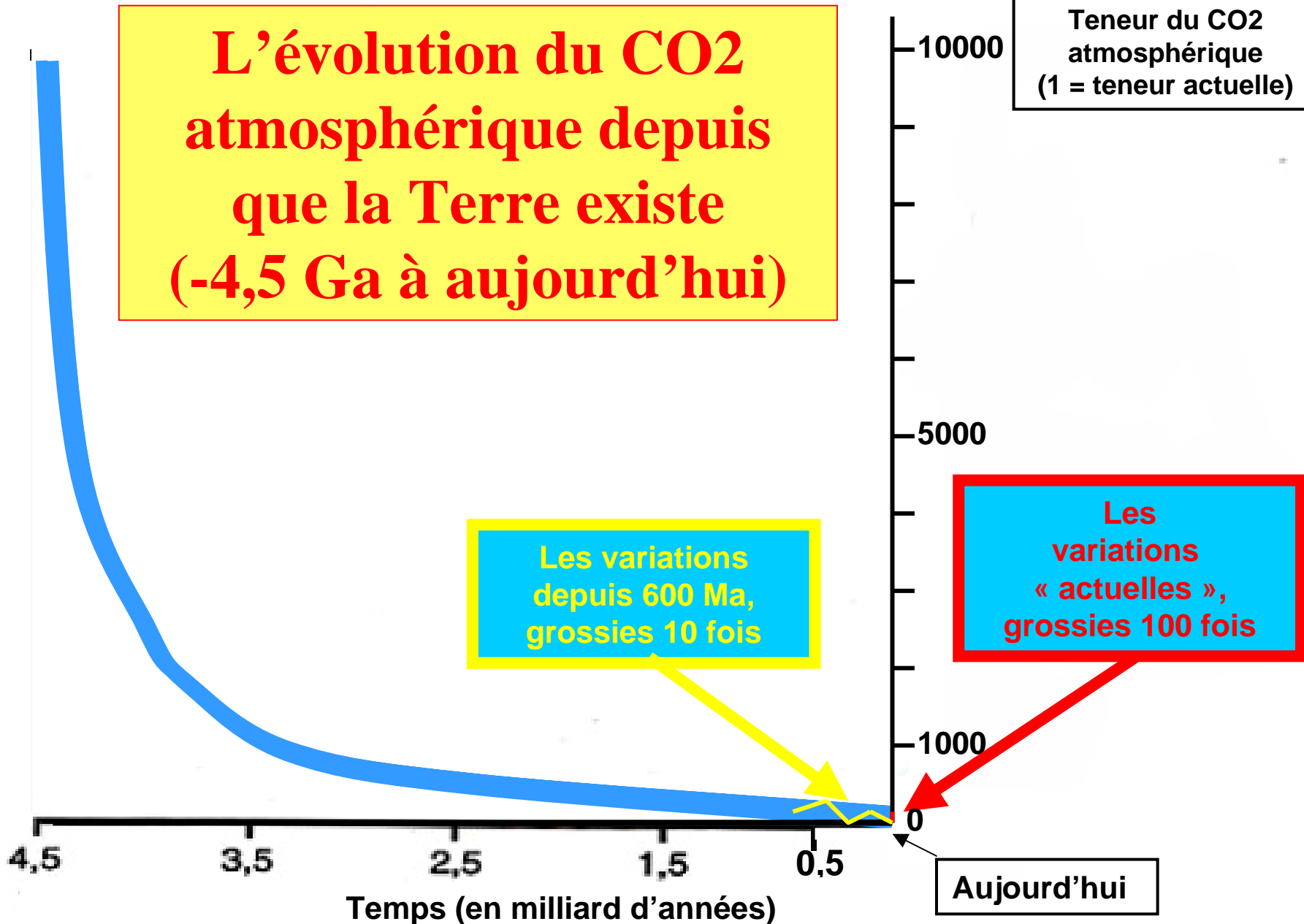




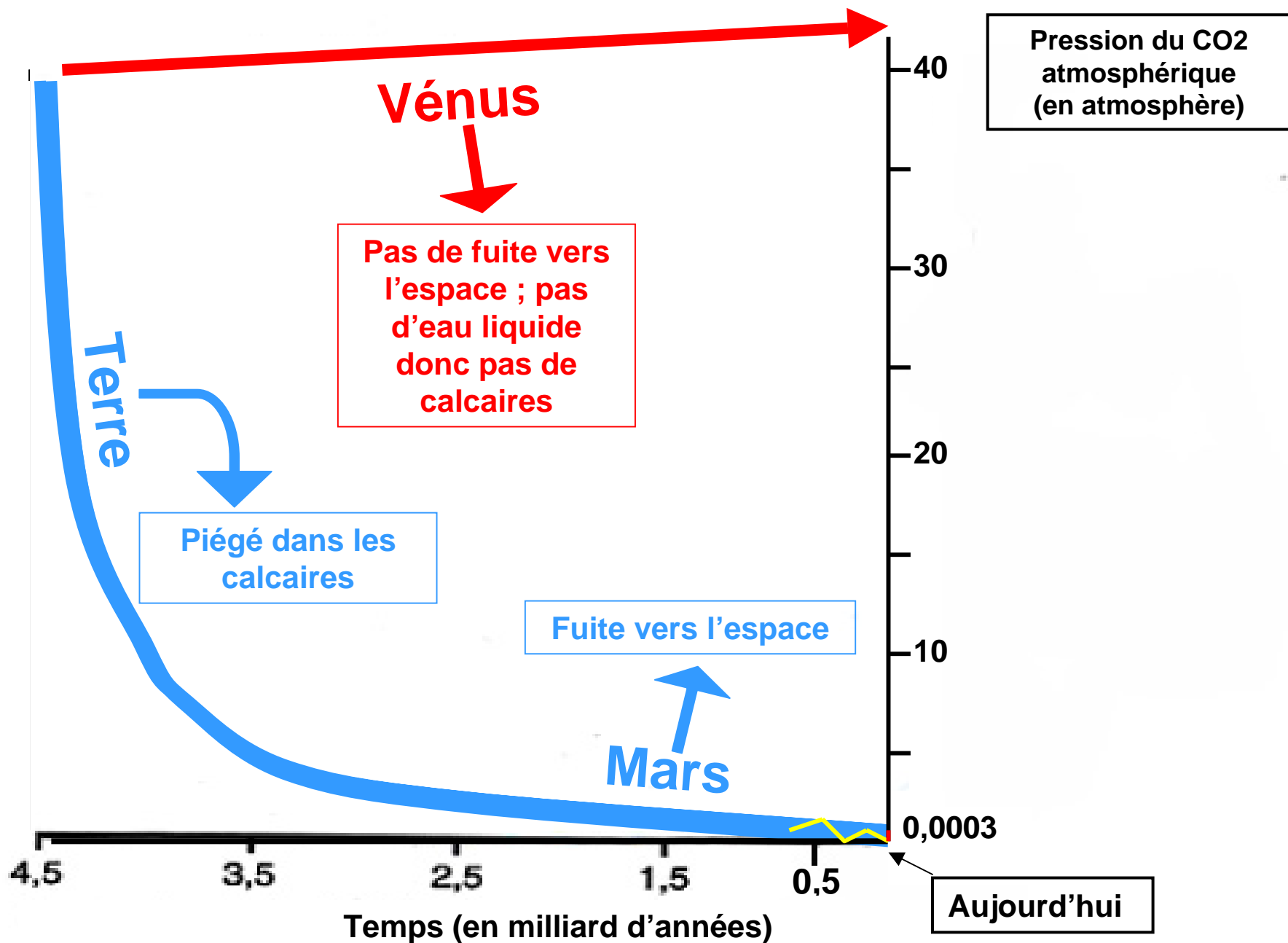
**Une courbe d'évolution du CO<sub>2</sub> que bien peu de gens connaissent, à l'échelle de la durée de la Terre**



# L'évolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique depuis que la Terre existe (-4,5 Ga à aujourd'hui)

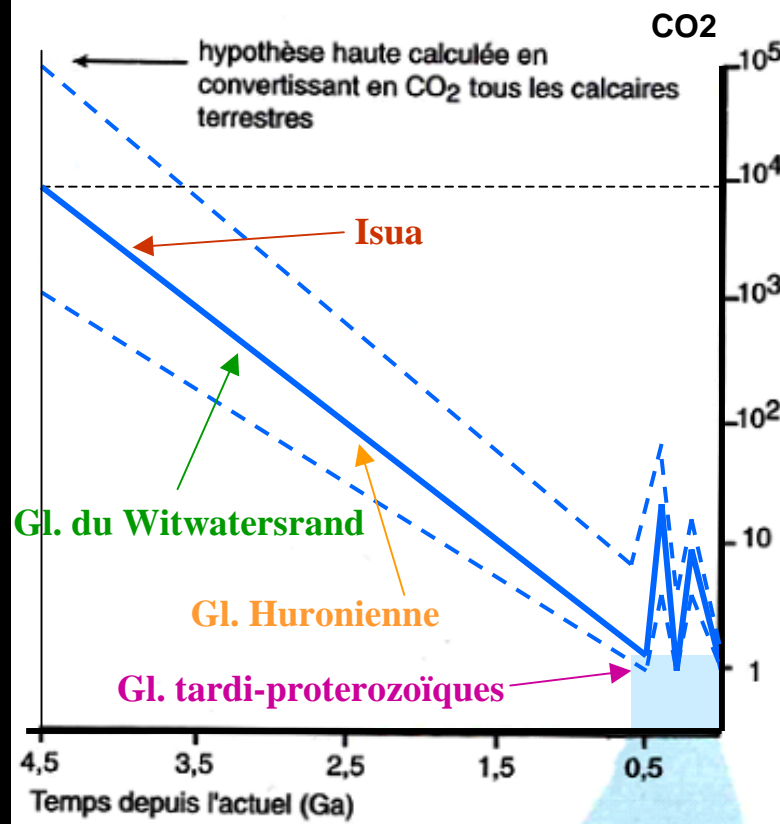


C'est encore plus « inattendu » en échelle linéaire

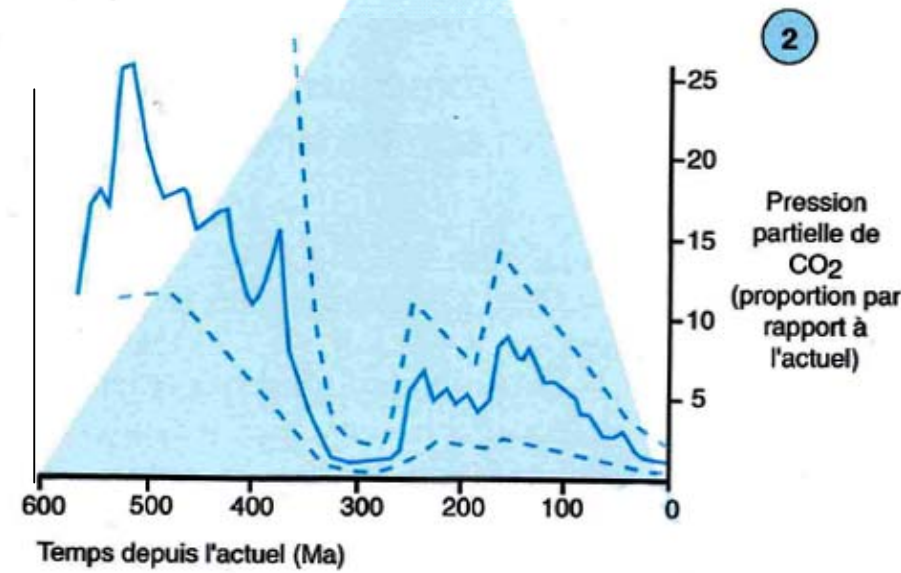
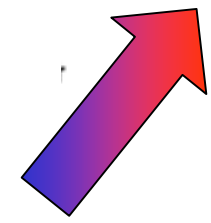
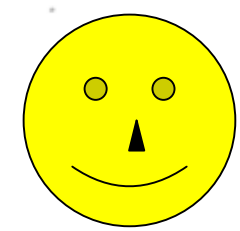


# Les destins comparés de Vénus / Terre et Mars

**Le CO<sub>2</sub> n'a jamais été plus bas que « maintenant », record battu, ou du moins égalé ! Heureusement, pendant ce temps là, le rayonnement solaire a augmenté de 50 % environ, et en gros, la température est toujours resté entre 0 et 100°C, sauf pendant les boules de neige ...**

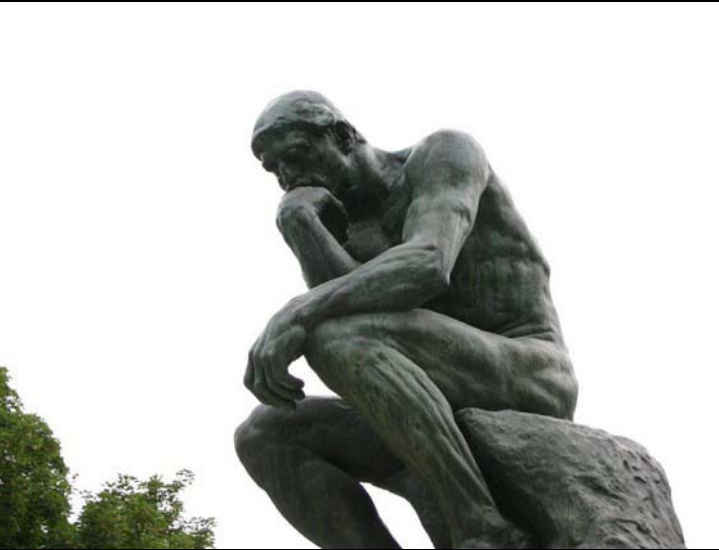


1



2

## En guise de conclusion



## Est-on dans une période de hausse ou de baisse de la température et du CO<sub>2</sub> atmosphérique ?

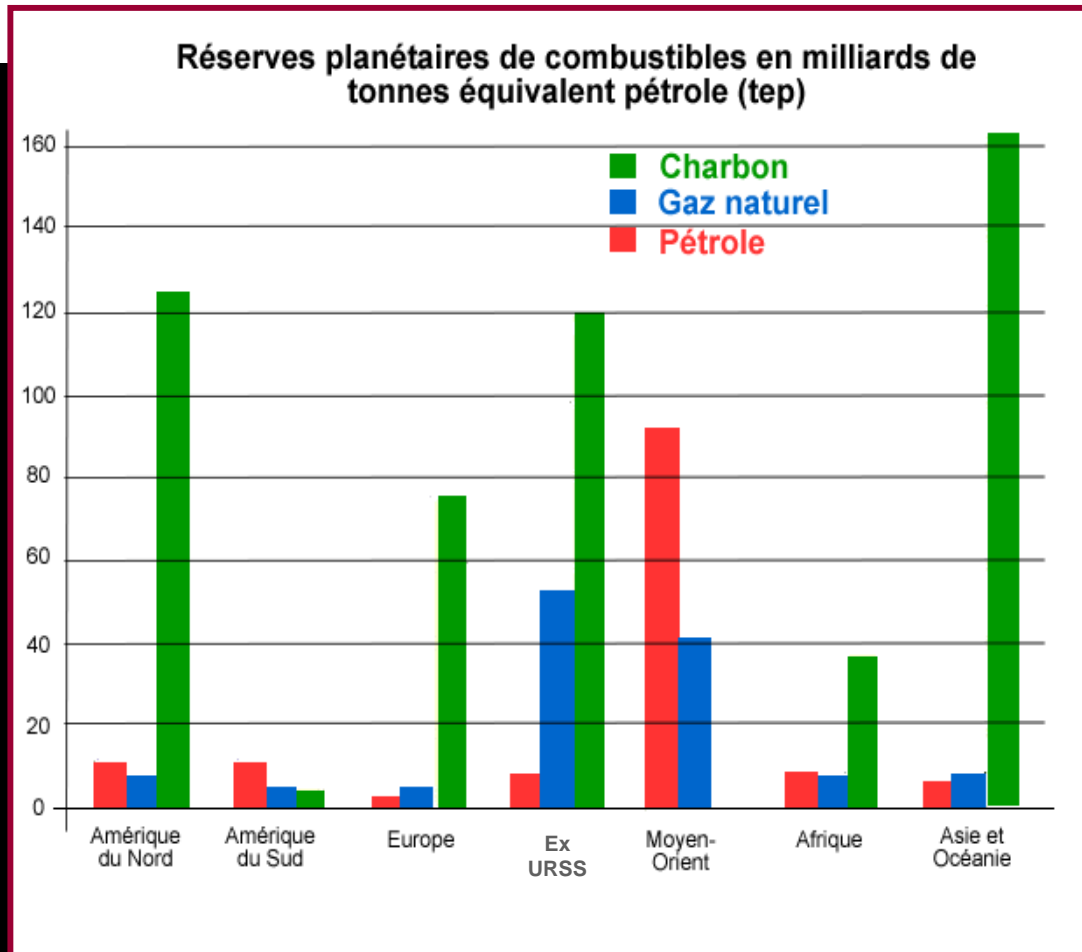
(ou commentaire sur la relativité du temps)

A l'échelle de 100 ans, le CO<sub>2</sub> a augmenté de 35% et la température moyenne de 0,8°C. Les perspectives indiquent un doublement du CO<sub>2</sub> et une augmentation de la température de 2 à 6°C d'ici la fin du siècle. C'est gravissime à cette échelle de temps !

Prenons du « recul chronologique »

A l'échelle du dernier millier d'années, la température ne fait que monter et descendre d'1 à 2 °C, avec des petits âges glaciaires, des périodes chaudes... Ces variations seraient en partie dues aux variations solaires. Mais la hausse actuelle (réelle) du soleil ne serait responsable que de 10 à 20% de la hausse des températures constatée depuis 150 ans. Et comme de toutes façons on ne peut pas agir sur le soleil ...

A l'échelle du prochain millier d'années. Il y a de 30 à 60 ans de réserve de pétrole, le double de gaz, pour quelques siècles de charbon. D'ici 200 à 300 ans, le CO2 et la température s'arrêteront d'augmenter par la force des choses (sauf si ...). CO2 et températures redescendront en quelques millénaires. Mais d'ici là, de nombreux écosystèmes (dont l'Humanité) en « baveront ». Mais qu'est-ce que quelques millénaires pour la planète ?



**Total : 800 milliards de tonnes de réserves.**

**Soyons « optimistes » : les géologues n'ont trouvé que la moitié des réserves → 1600 Gt**

**On consomme 7 Gt/an. Soyons « optimistes », la consommation se stabilise.**

**Cela donne  $1600 / 7 = 230$  ans de réserve**

**Lyon il y a  
et dans  
quelques  
dizaines de  
milliers  
d'années**



A l'échelle des derniers millions d'années.

La hausse précédente, anthropique et gravissime à l'échelle du siècle ou du millénaire, s'inscrit dans des variations naturelles et périodiques de la température et du CO<sub>2</sub> qui durent depuis quelques millions d'années. Ces variations naturelles sont dues aux interactions entre orbite de la Terre, calottes glaciaires, CO<sub>2</sub> ... La température moyenne de la Terre oscille entre +10 et +16°C ; on en est actuellement à +15, mais on va peut-être atteindre +20°C dans un siècle, et sortir du domaine « habituel » des variations de température ; et on va en sortir plus vite que d'habitude. Puis ça redeviendra normal, faute de CO<sub>2</sub> à relâcher. L'astronomie nous dit que la prochaine glaciation aura sans doute lieu dans 64 000 ans

**A l'échelle de plusieurs centaines de millions d'années.**

**Depuis 80 000 000 d'années, la tendance globale est à la baisse de CO<sub>2</sub> et de la température, malgré toutes les oscillations déjà vues. Pendant ces 80 000 000 d'années, le CO<sub>2</sub> a été divisé par 10 et la température moyenne a baissé de 10 à 20°C. Entre -300 000 000 et -80 000 000 au contraire, la tendance était à la hausse du CO<sub>2</sub> (x 10) et de la température (+ 10 à 20°C). La planète Terre a très bien résisté à ces variations (mais pas tous ses habitants).**

**Ces variations de CO<sub>2</sub> et de Température sont dues aux variations d'importances relatives entre volcanisme, formation des montagnes, formation des charbons et calcaires ...**

**On peut supposer que le froid actuel durera tant que durera l'Himalaya (qui est une gigantesque pompe à CO<sub>2</sub>), c'est à dire pour encore pas mal de millions d'années. Quand l'Himalaya sera aplani, le CO<sub>2</sub> remontra, et la température aussi, à moins que d'autres montagnes se forment en pays intertropical humide.**

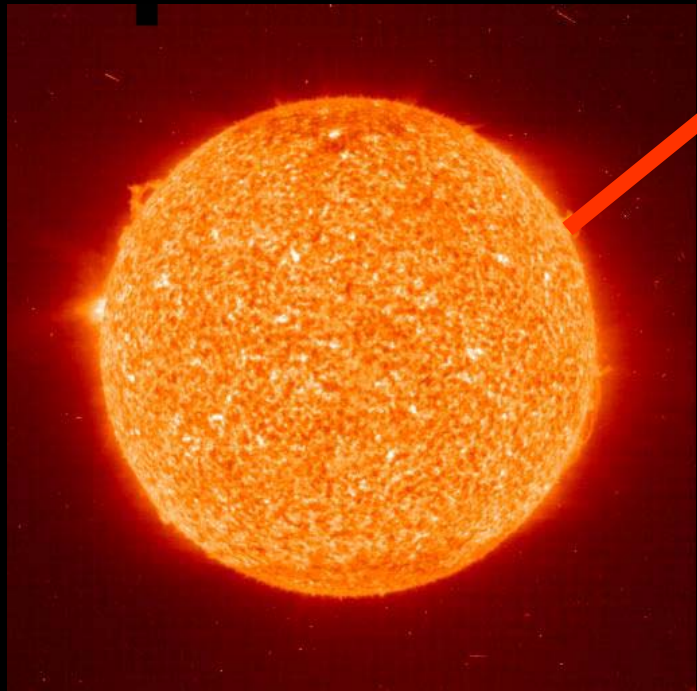




A l'échelle de 4,5 milliards d'années.  
Ces hauts et ces bas s'inscrivent dans deux tendances générales :

- (1) Le CO<sub>2</sub> baisse, baisse ... Il a été divisé par 10 000 à 100 000 depuis l'origine de la Terre. Cette diminution est due à l'accroissement lent et progressif de la quantité de calcaires sur Terre
- (2) pendant la même période, la puissance du soleil a augmenté d'environ 50%

→ La baisse du CO<sub>2</sub> a « presque » été compensée par la hausse du soleil. A quelques brèves périodes près (boules de neige), la température de la Terre est toujours restée entre 100 et 0°C.  
Mais une tendance globale à la baisse de température existe (de +70 à +20°C).







## **En guise de conclusion finale : LA FIN DE LA VIE SUR TERRE**

**La puissance rayonnée par le soleil a augmenté de 50% depuis 4,5 Ga, et ça va continuer. Le CO<sub>2</sub> baisse, baisse inexorablement (il en est à 0,03% !). Les deux phénomènes ne se compensent pas tout à fait, et la baisse du CO<sub>2</sub> semble l'emporter, avec baisse globale de la température depuis 4 Ga.**

**Deux futurs (très lointains) sont envisageables :**

**(1) Cela continue comme ça ; la Terre se refroidira légèrement, mais surtout le CO<sub>2</sub> va venir à manquer (c'est le facteur limitant de la photosynthèse)**

**→ « on » mourra » de faim, en pays froid.\***

**(2) La baisse du CO<sub>2</sub> s'arrête, alors l'augmentation du soleil l'emportera.**

**→ « on mourra » de chaud, le ventre plein.\***

**Dans les deux cas, se sera la fin de la vie, en attendant la fin de la Terre dans 4 à 5 milliards d'années**



**\* La photosynthèse en C<sub>4</sub> et les bactéries hyperthermophiles montrent qu'il ne faut pas désespérer**

**Tout ou partie de ce que je viens de vous raconter ce soir, dont je vous ai parlé lors de l'Evolution et bien d'autres choses encore sur la Terre et le Système Solaire est disponible sur :**

**<http://planet-terre.enslyon.fr/planetterre/>  
(chercher *planet terre* sur Google, planet sans « e »).**

**Ce site contient environ un millier d'articles / dossiers / conférences (images + son) en ligne**

