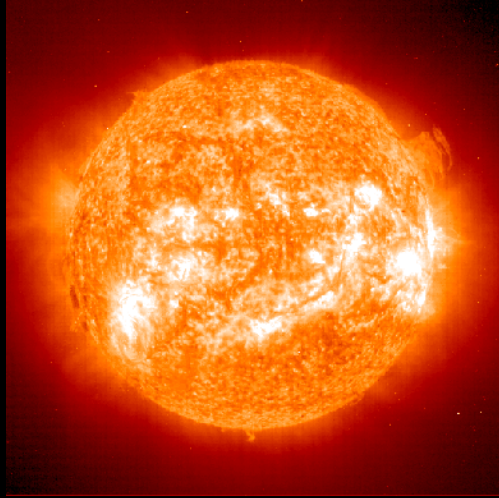


Les variations climatiques

Pierre Thomas, ENS Lyon, (Villefranche, mars 2007)



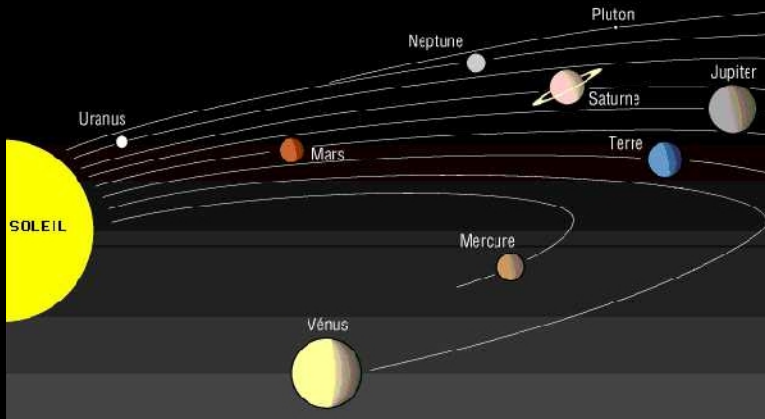
Qu'est ce qui peut bien faire varier le climat ?



L'activité du soleil ?



La position des continents ?



L'orbite de la Terre ?



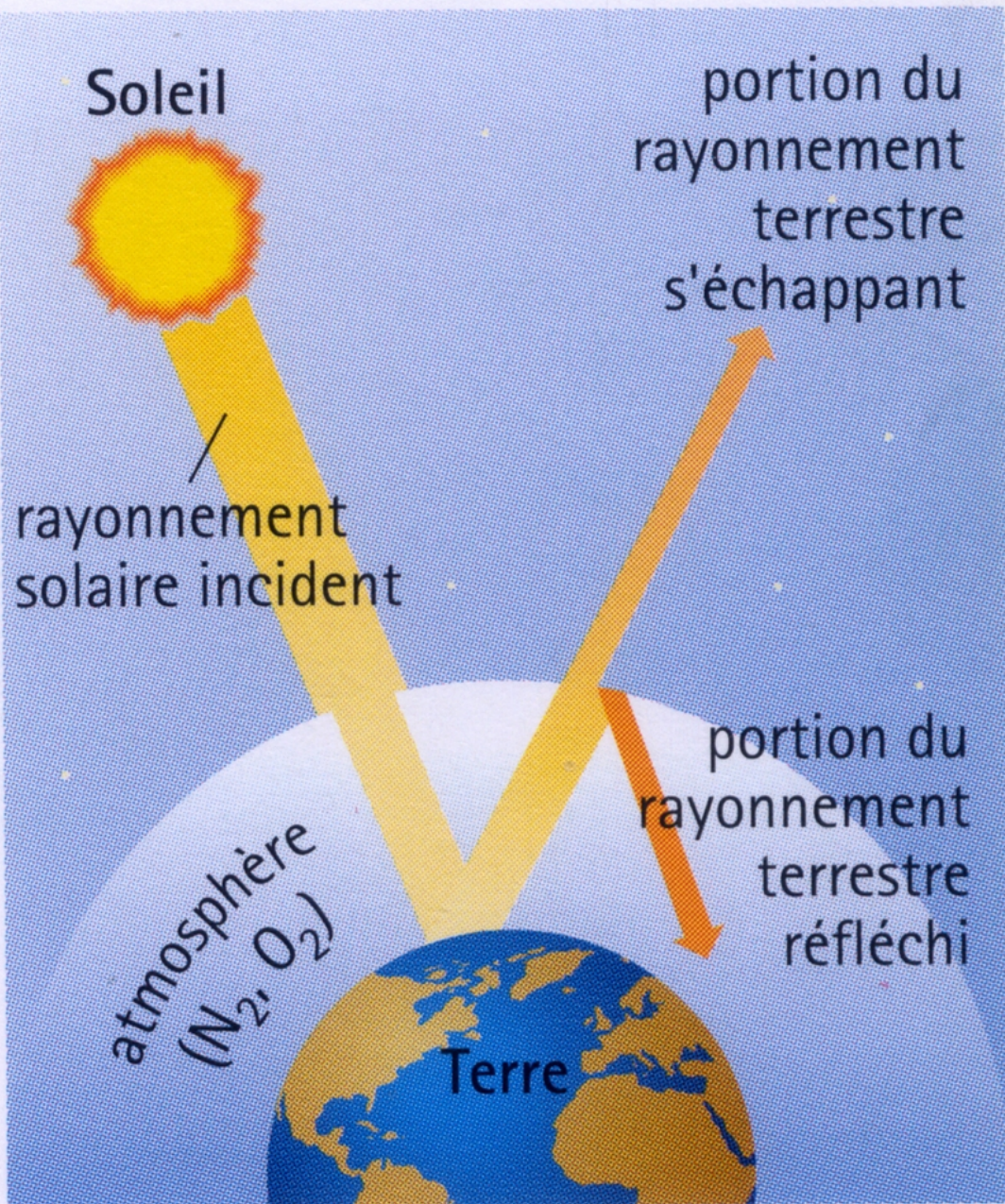
La composition de l'atmosphère
et l'effet de serre (que l'humanité
influence) ?

L'effet de serre

Ce qu'on dit : l'atmosphère, comme la vitre d'une serre, arrête les “Infra-Rouge” et retient la chaleur !

Le paradoxe : la Terre, comme toute serre, renvoie vers l'extérieur autant d'énergie qu'elle n'en reçoit du soleil

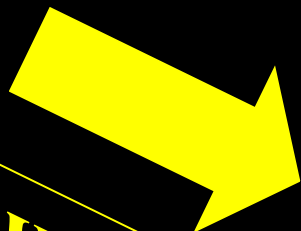
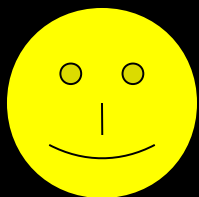




Ce que n'est pas l'effet de serre.

Sur ce schéma, sur les 342 W / m² qui arrivent, il en reste environ la moitié, qui « doit » être absorbée puisqu'elle ne repart pas.

A ce rythme, il faudrait environ $3 \cdot 10^8$ secondes pour porter tout l'océan à 100°C, soit environ 10 ans



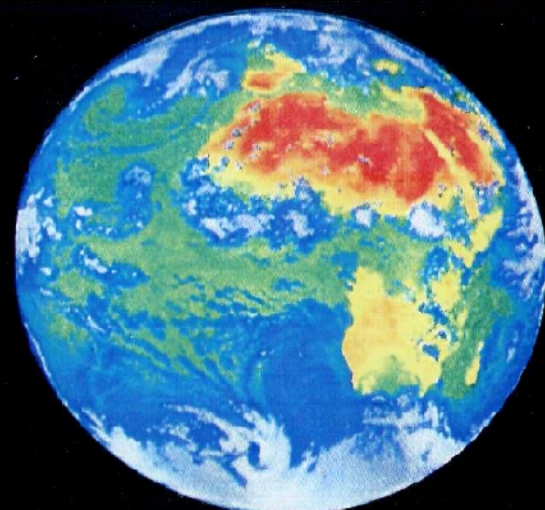
342 W / m^2
moyenne jour-nuit,
été hivers



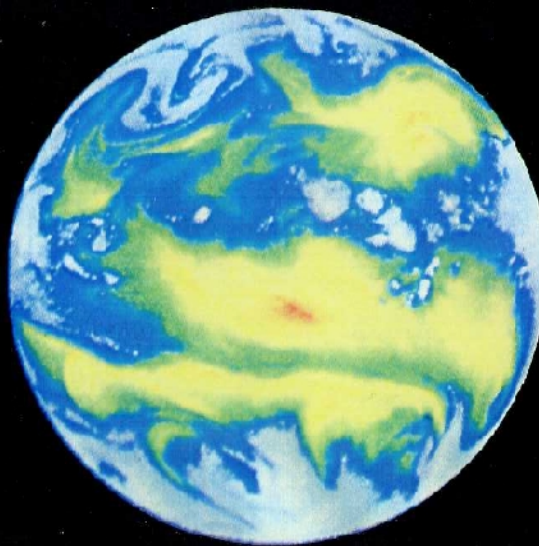
342 W / m^2
total du visible réfléchi
+ Infra-Rouge ré-émis



Visible (réfléchi)



Infra-Rouge proche

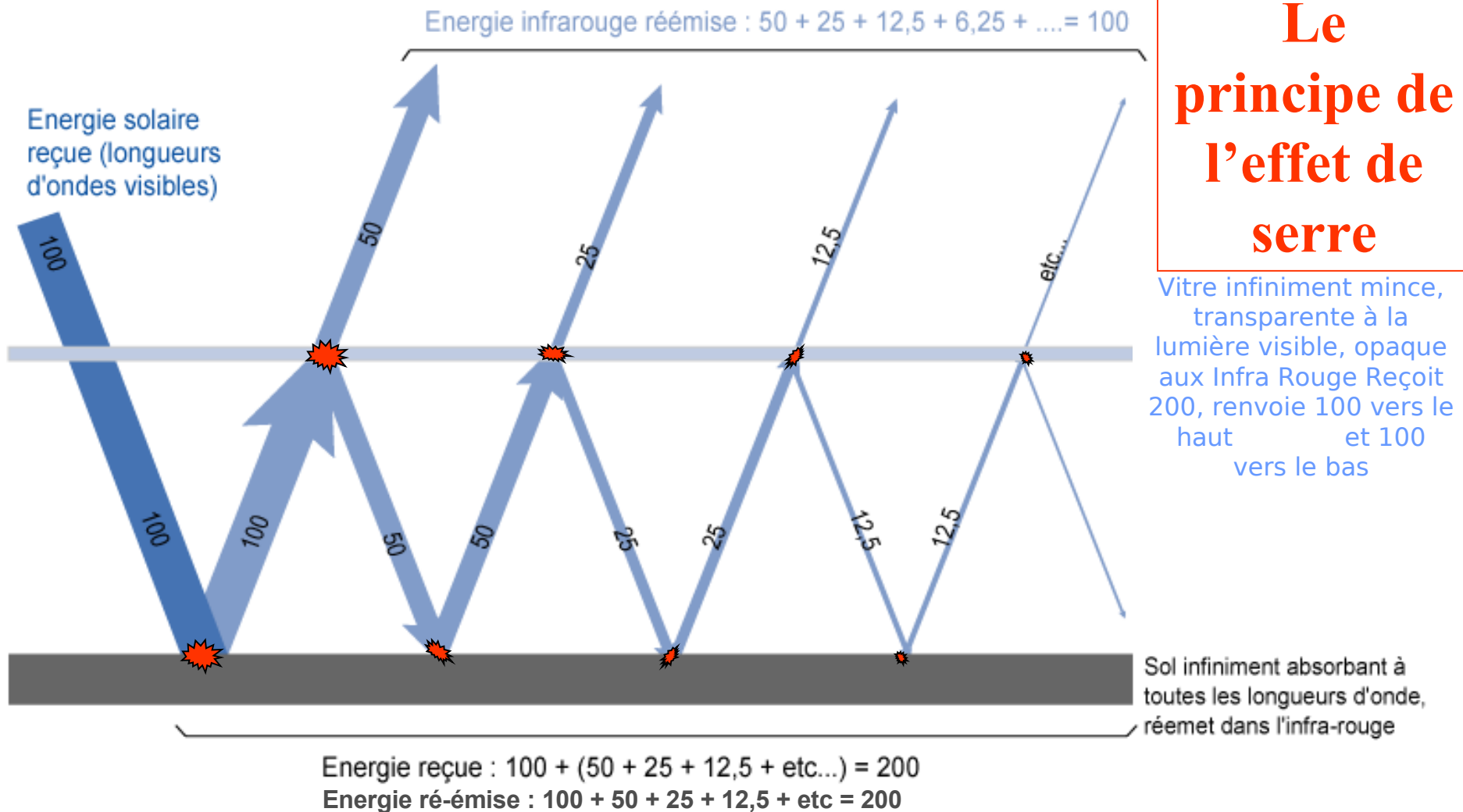


Infra-Rouge moyen



Infra-Rouge lointain

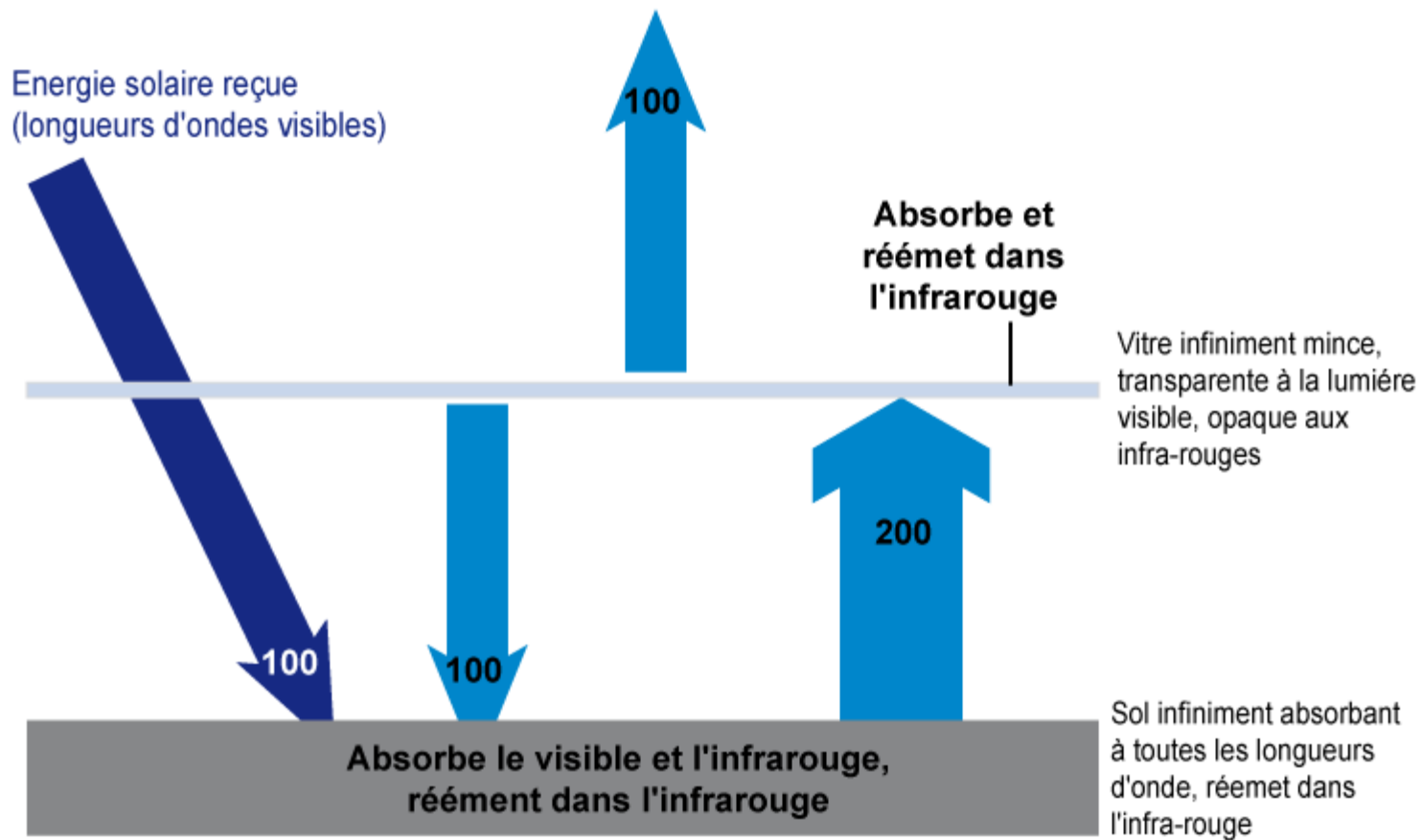
Le principe de l'effet de serre



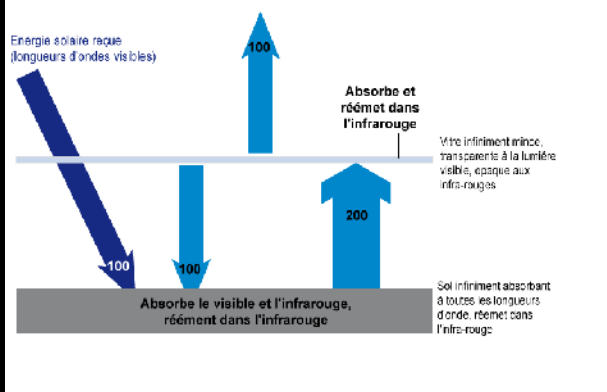
Modèle simple de "l'effet de serre" atmosphérique

$\sum_{n=0}^{\infty} x^n$ (avec $x < 1$) tend vers $1/(1-x)$.

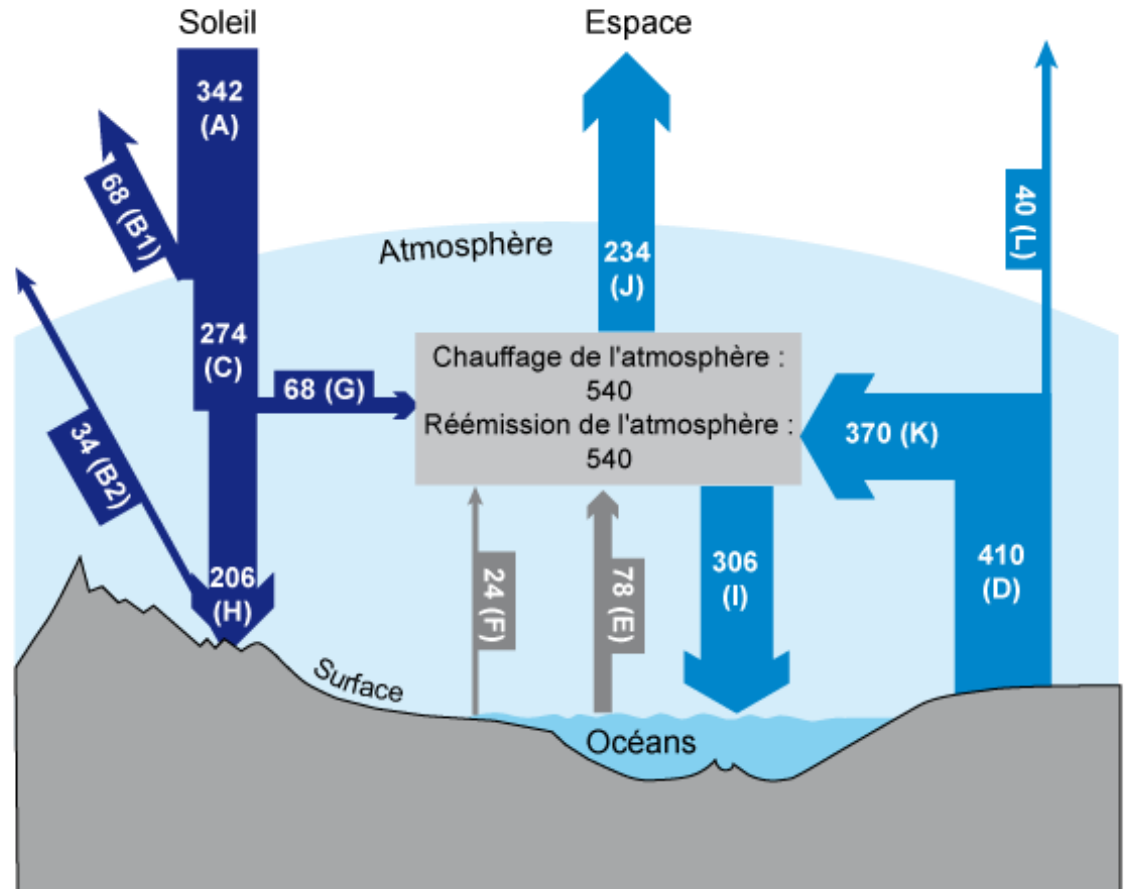
Dans notre cas où $x = 1/2$, $\sum_{n=0}^{\infty} (1/2)^n$ tend vers $1/(1-1/2) = 2$.



Avec la même énergie incidente et renvoyée par le système serre + sol, le sol reçoit 2 fois plus d'énergie avec serre que sans serre. Et comme $E = \sigma T^4$, si E est multiplié par 2, T l'est par $\sqrt[4]{2} = 1,19$ ($273^\circ\text{K} \times 1,19 = 324^\circ\text{K}$, soit 51°C)



Le modèle



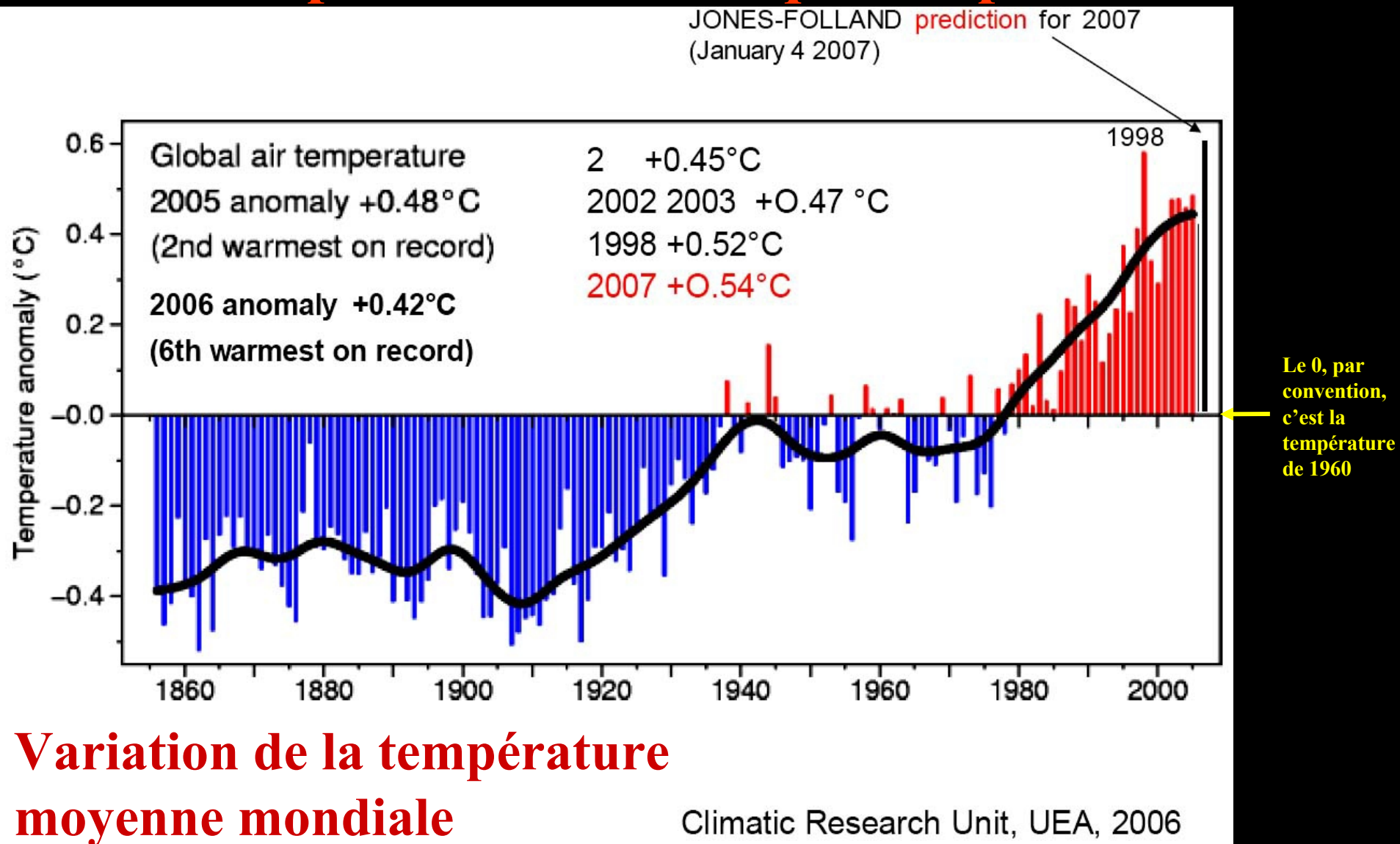
- > Transferts non radiatifs (évaporation - condensation - dynamique de l'air)
- > Rayonnement solaire (λ de 0,2 à 3 μm)
- > Rayonnement d'origine tellurique (IR, λ de 3 à 100 μm)

Unités : Watts.m⁻²

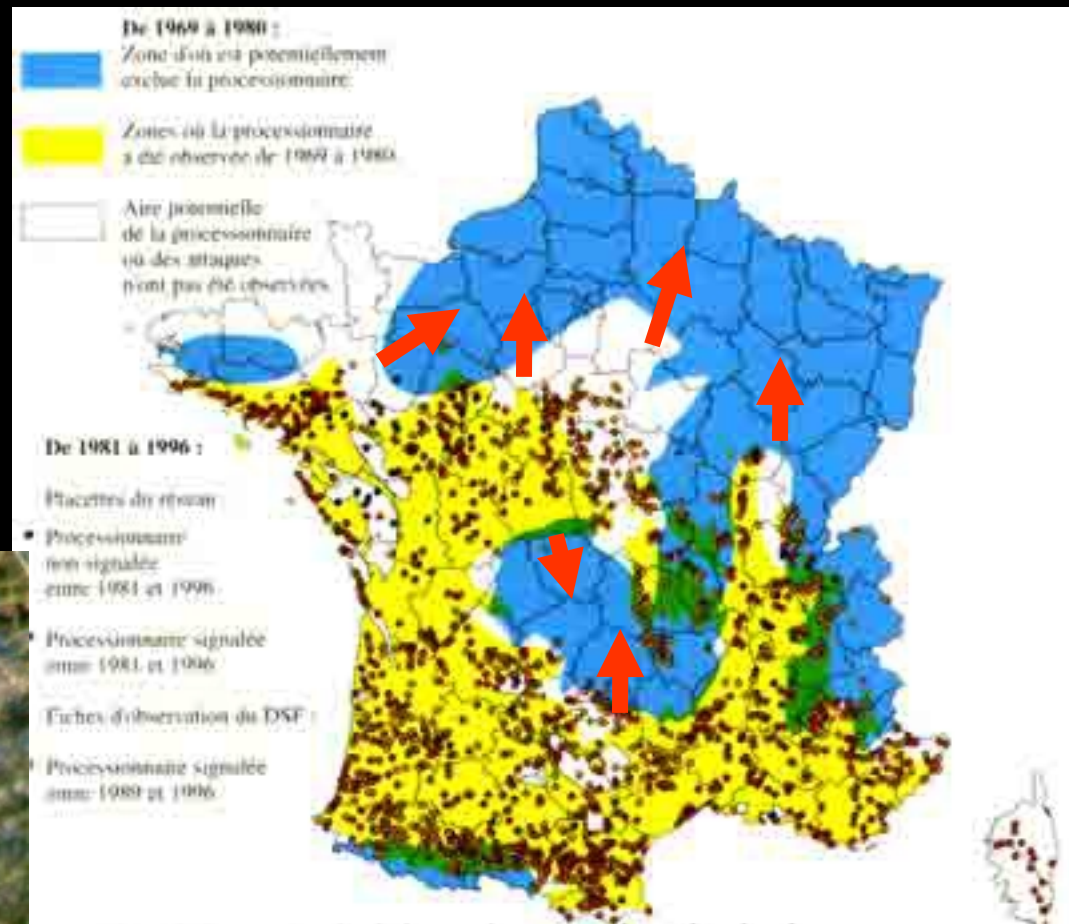
La réalité naturelle :
T passe de -18°C
théorique à $+15^{\circ}\text{C}$ de
moyenne réelle (255 à
288K) soit une
multiplication par 1,13.

C'est cet effet de serre
naturel que l'homme est
en train d'augmenter

Les variations historiques du climat : la première courbe qui fait peur



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

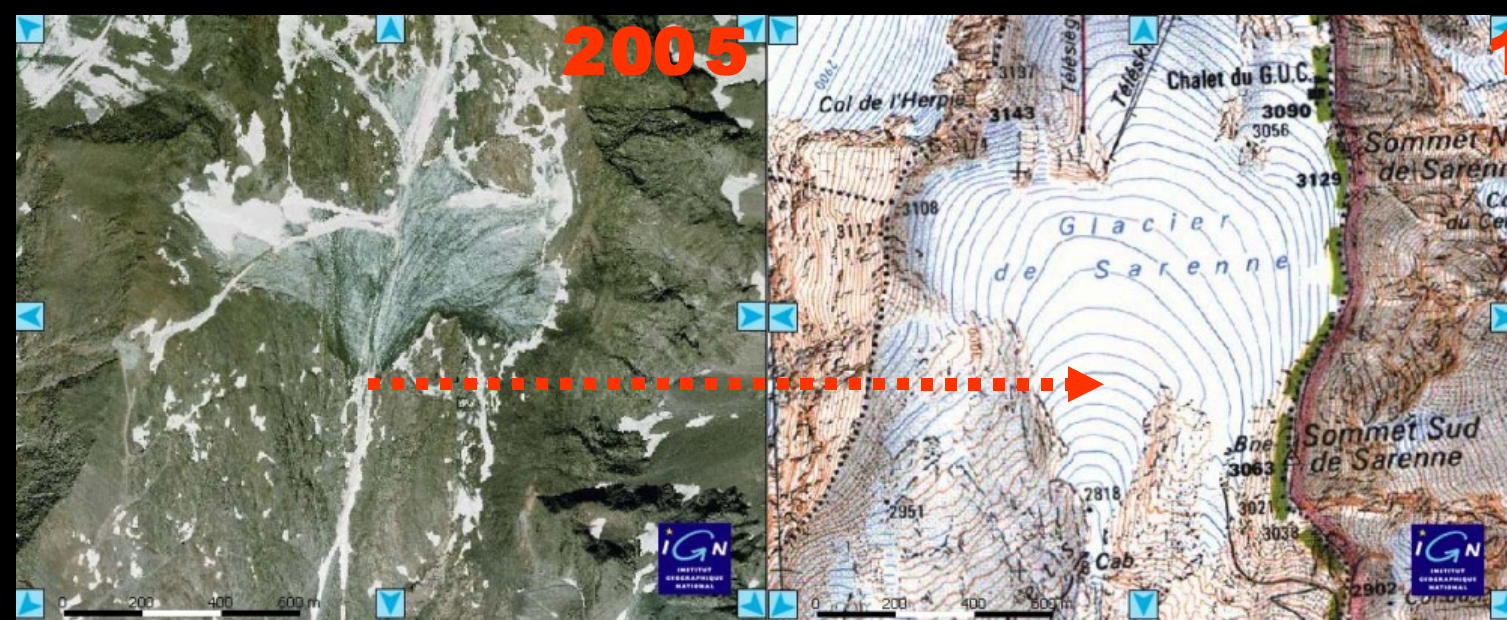


... comme la chenille processionnaire



2005

1980



Ça se voit aussi dans le récent recul des glaciers alpins

Les variations du CO₂ atmosphérique

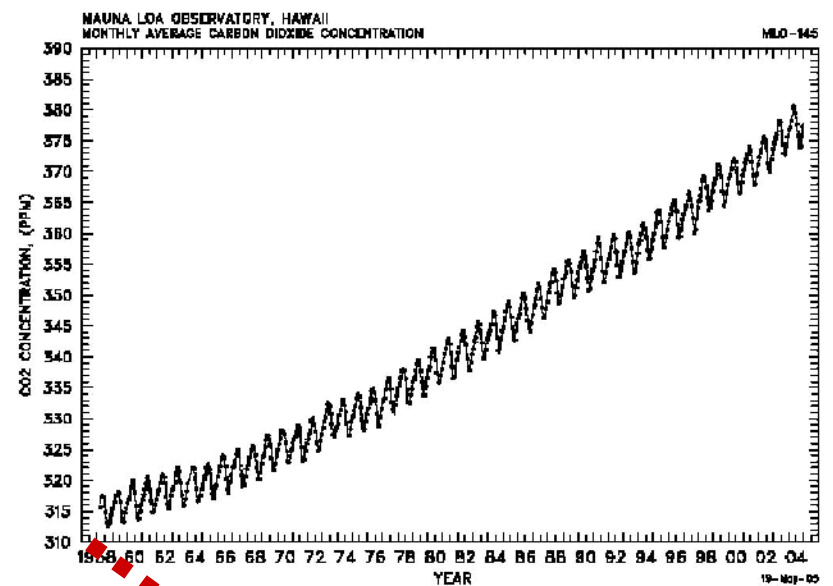


Figure VII-1 : Évolution de la concentration du gaz carbonique dans l'air, d'après les mesures de l'observatoire du Mauna Loa, Hawaï (unités : parties par million). L'oscillation annuelle est due principalement à l'absorption du gaz carbonique par la végétation pendant le printemps et l'été de l'hémisphère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

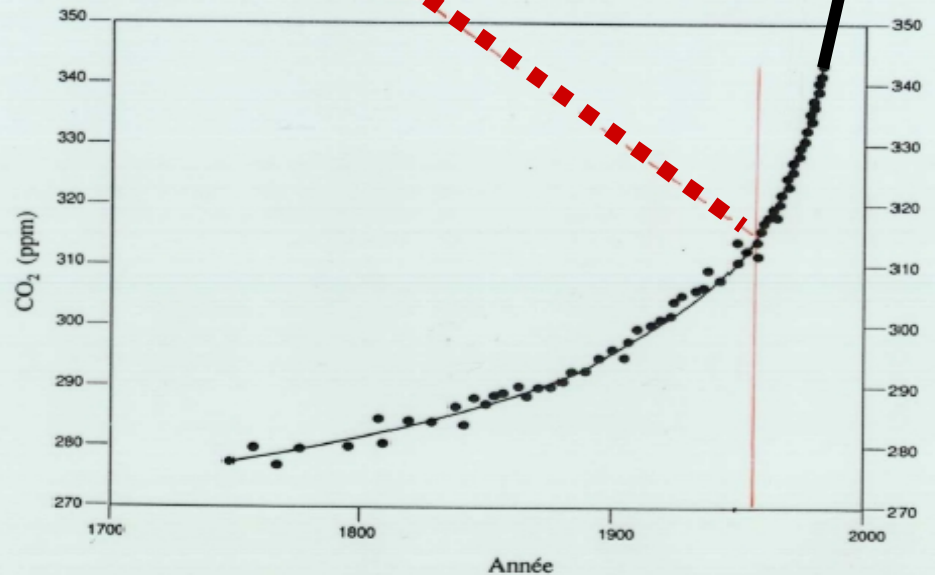
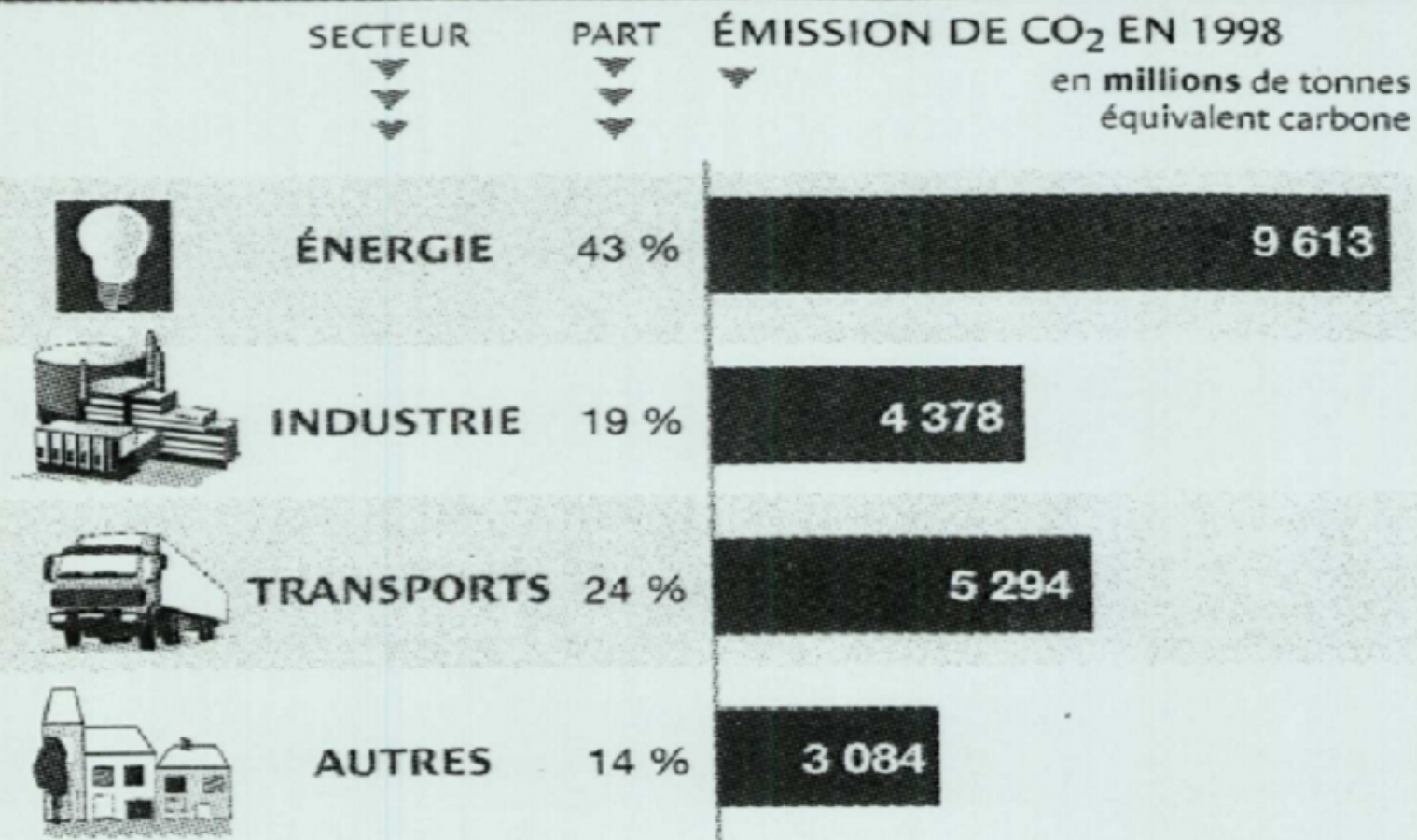


Figure VII-2 : Évolution séculaire de la concentration atmosphérique du gaz carbonique, d'après l'analyse chimique des bulles d'air scellées dans les glaces arctiques, et des mesures directes pour les trente dernières années.

Les sources de CO₂ liées à l'activité humaine



Source : AIE



Les Etats-Unis, premier émetteur mondial des gaz à effet de serre (2000)

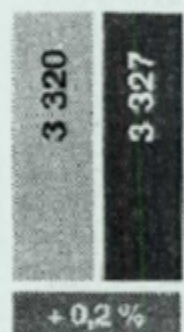
▶ ÉMISSION DE CO₂ PAR PAYS...

en millions de tonnes

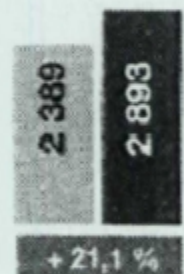
ÉTATS-UNIS



UNION-
EUROPÉENNE



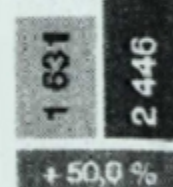
CHINE



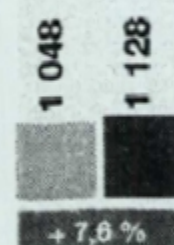
RUSSIE



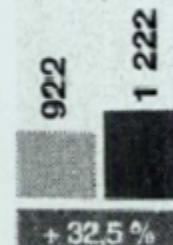
ASIE
(sauf Chine
et Japon)



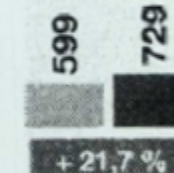
JAPON



AMÉRIQUE
LATINE



AFRIQUE



+8,9 %

Evolution 1998/90 en %

▶ ... ET PAR HABITANT EN 1998

en tonnes

20,10



8,47



2,30



9,64



1,13



8,92



2,15



0,96

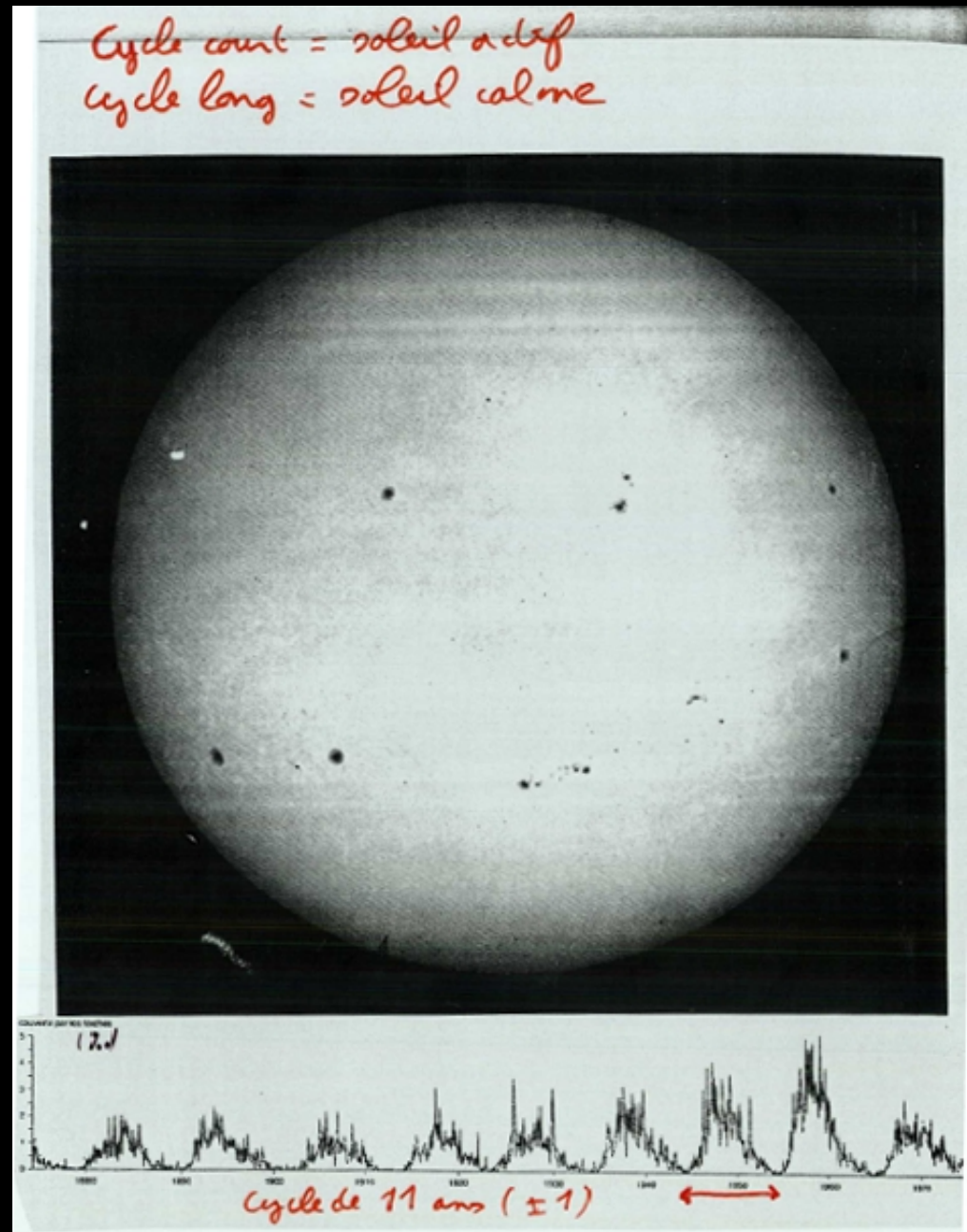


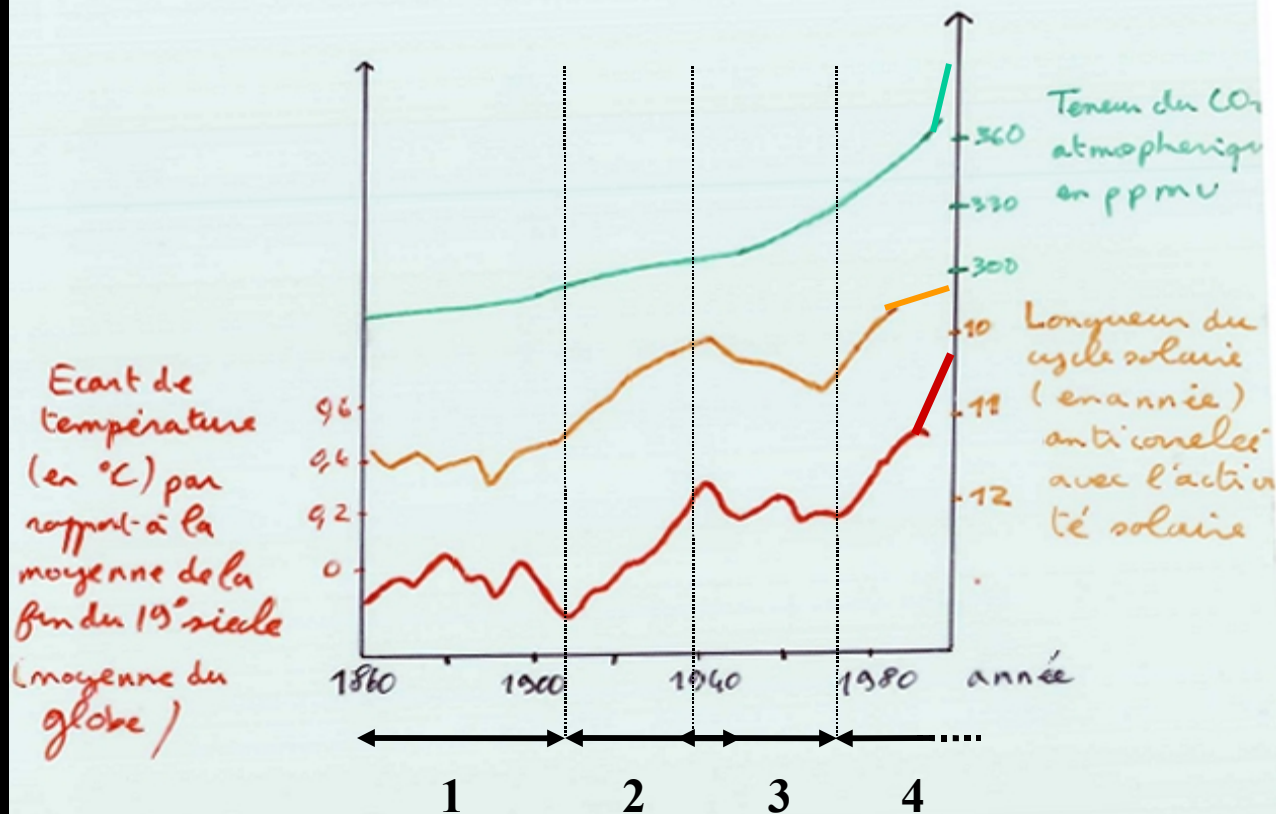
Et si l'augmentation
de température était
due au seul soleil,
comme le dit ce cher
George (Bush) ?



2000/09/22 00:00 UT

ESA / Nasa



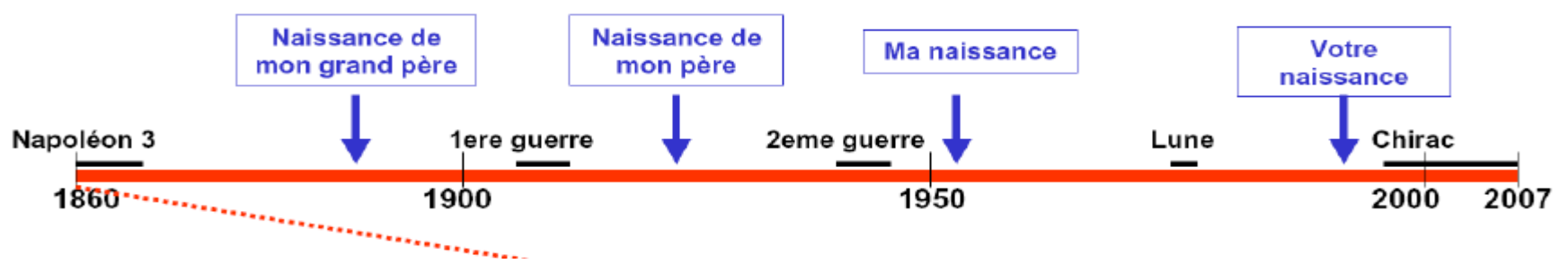


Évolutions comparées de

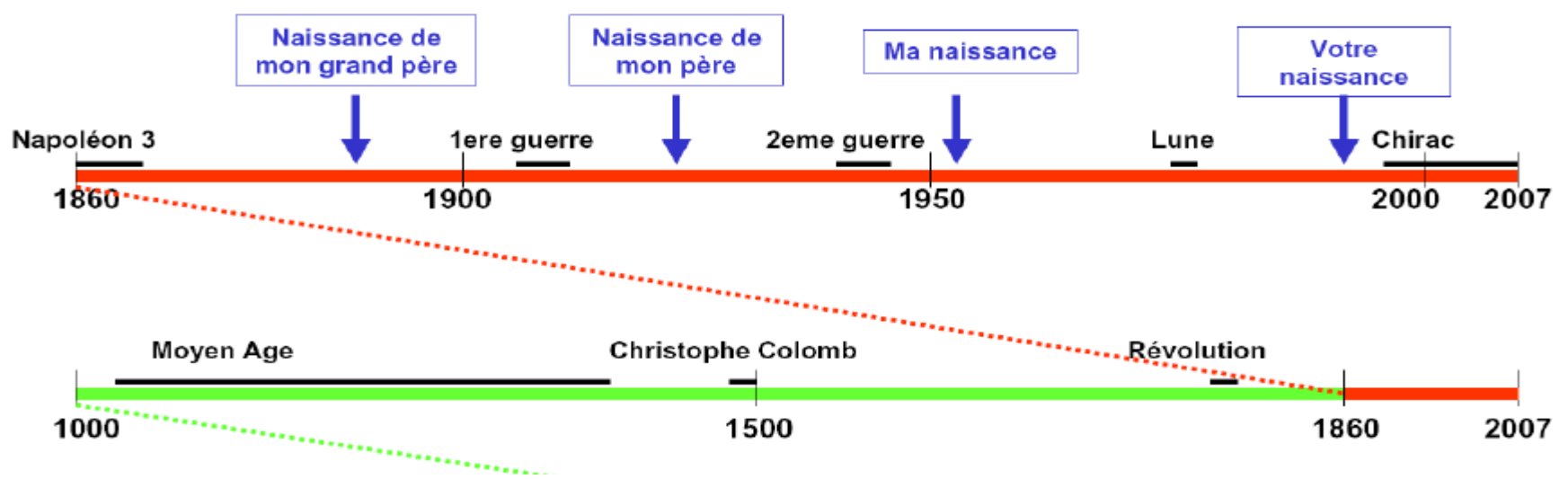
- la teneur en CO₂ atmosphérique
- l'activité solaire
- la température moyenne

Si on en croit la période 3, le soleil est responsable d'environ 50% de l'augmentation de la température, le CO₂ des 50 autres %. Et comme on ne commande pas au soleil ...

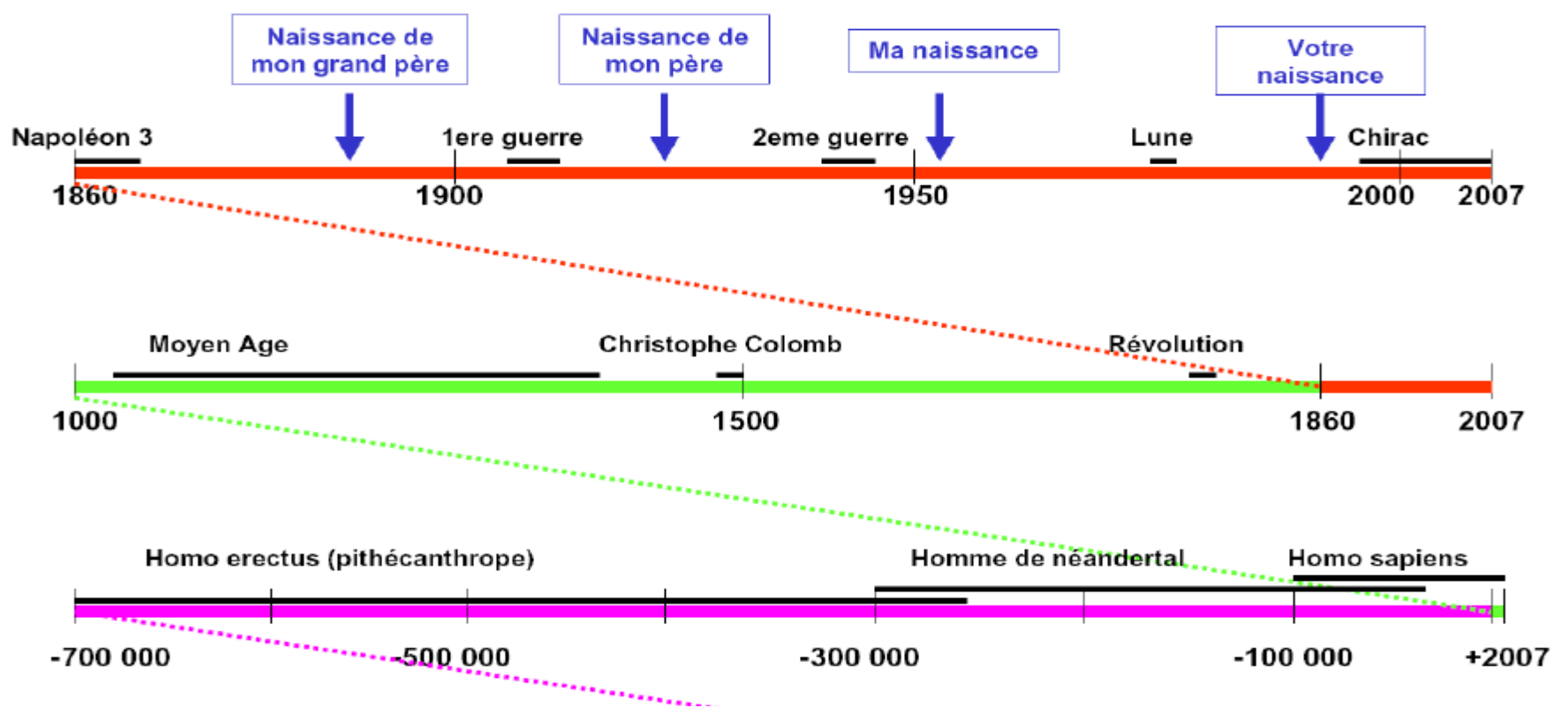
Il y a plusieurs « échelles de temps ». On vient de parler de l'évolution du climat à l'échelle de temps d'une famille (siècle). Dans les heures qui suivent, on va parler à l'échelle de 1000 ans, de 700 000 ans, de 600 000 000 d'années, de 4 500 000 000 ans. On a du mal à se représenter à quoi cela correspond !



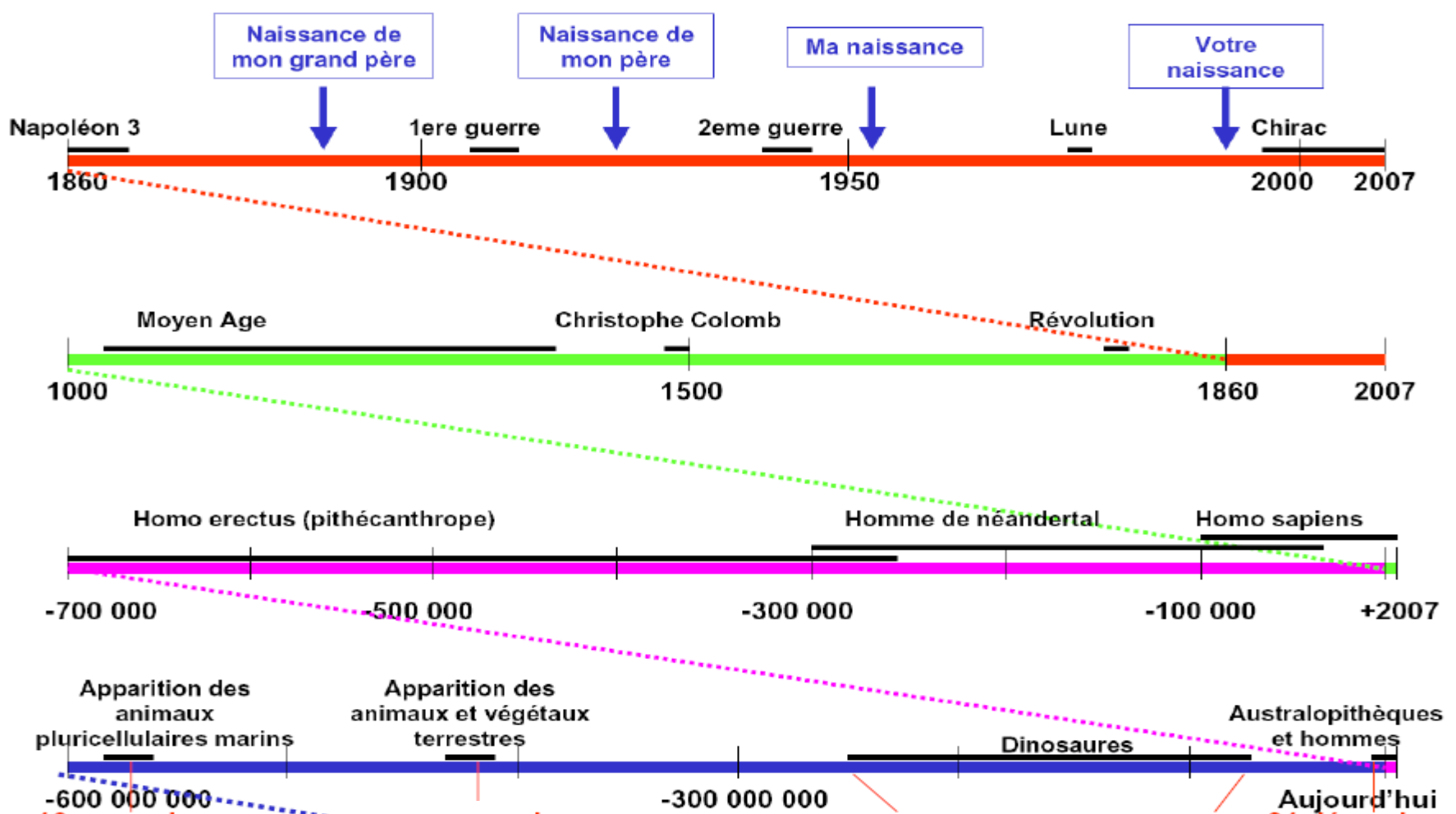
L'échelle de 150 ans



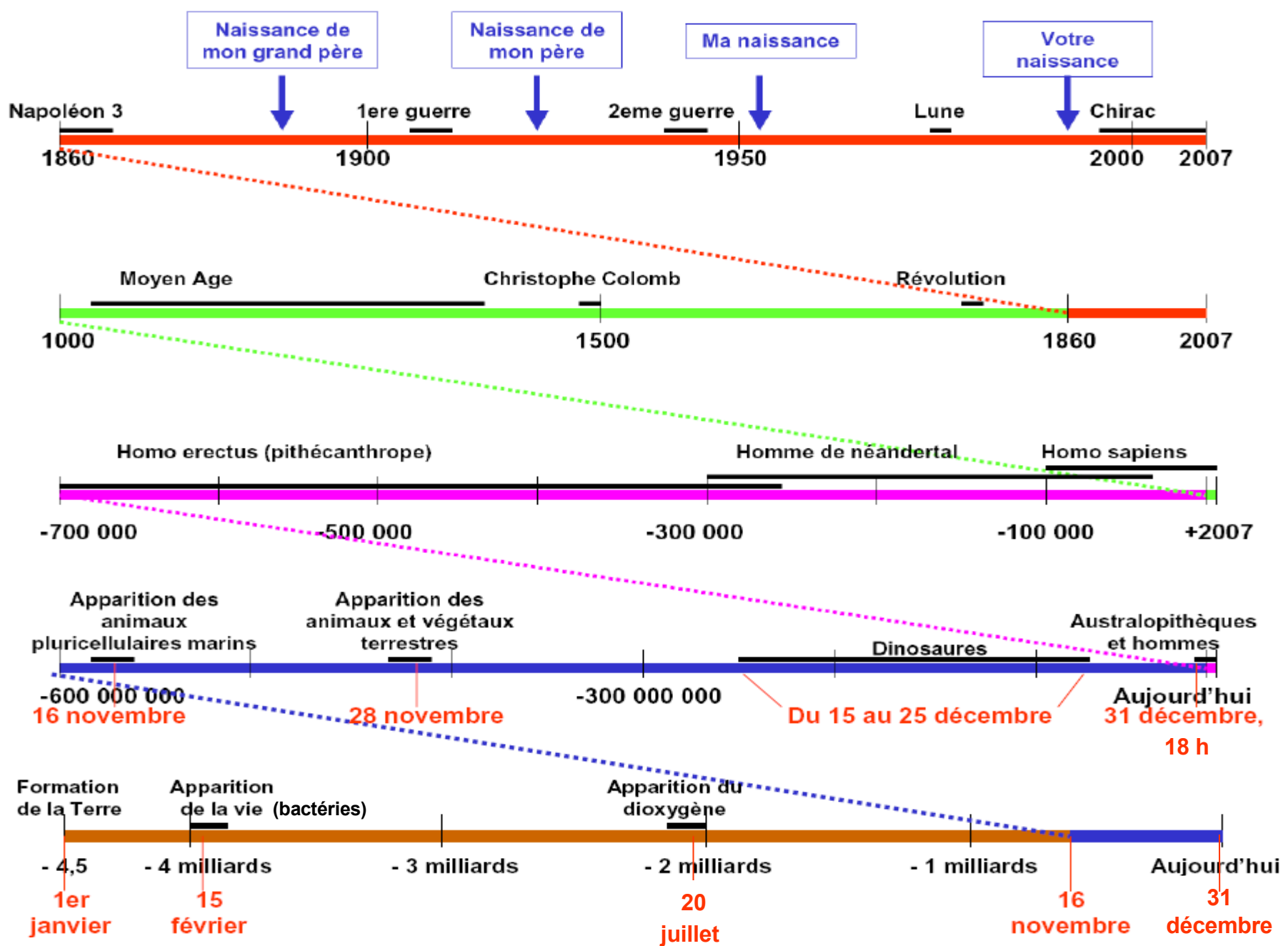
L'échelle de 1 000 ans



L'échelle de 700 000 ans

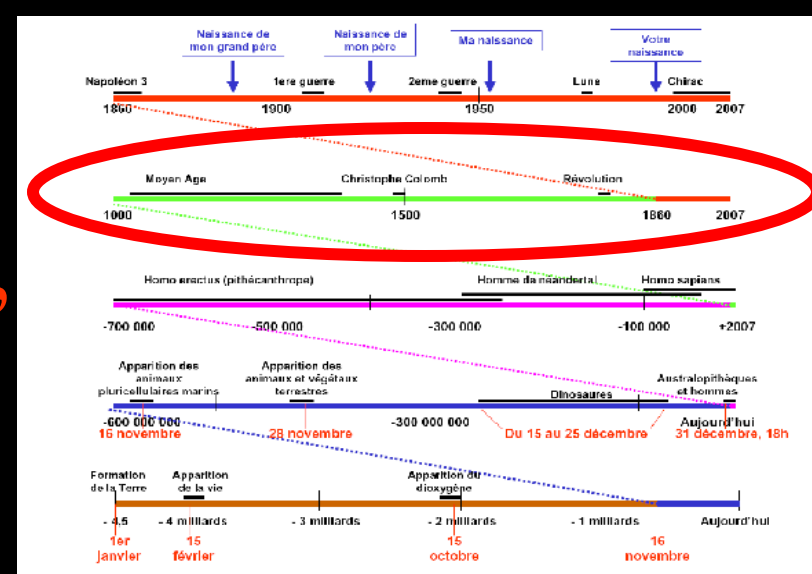


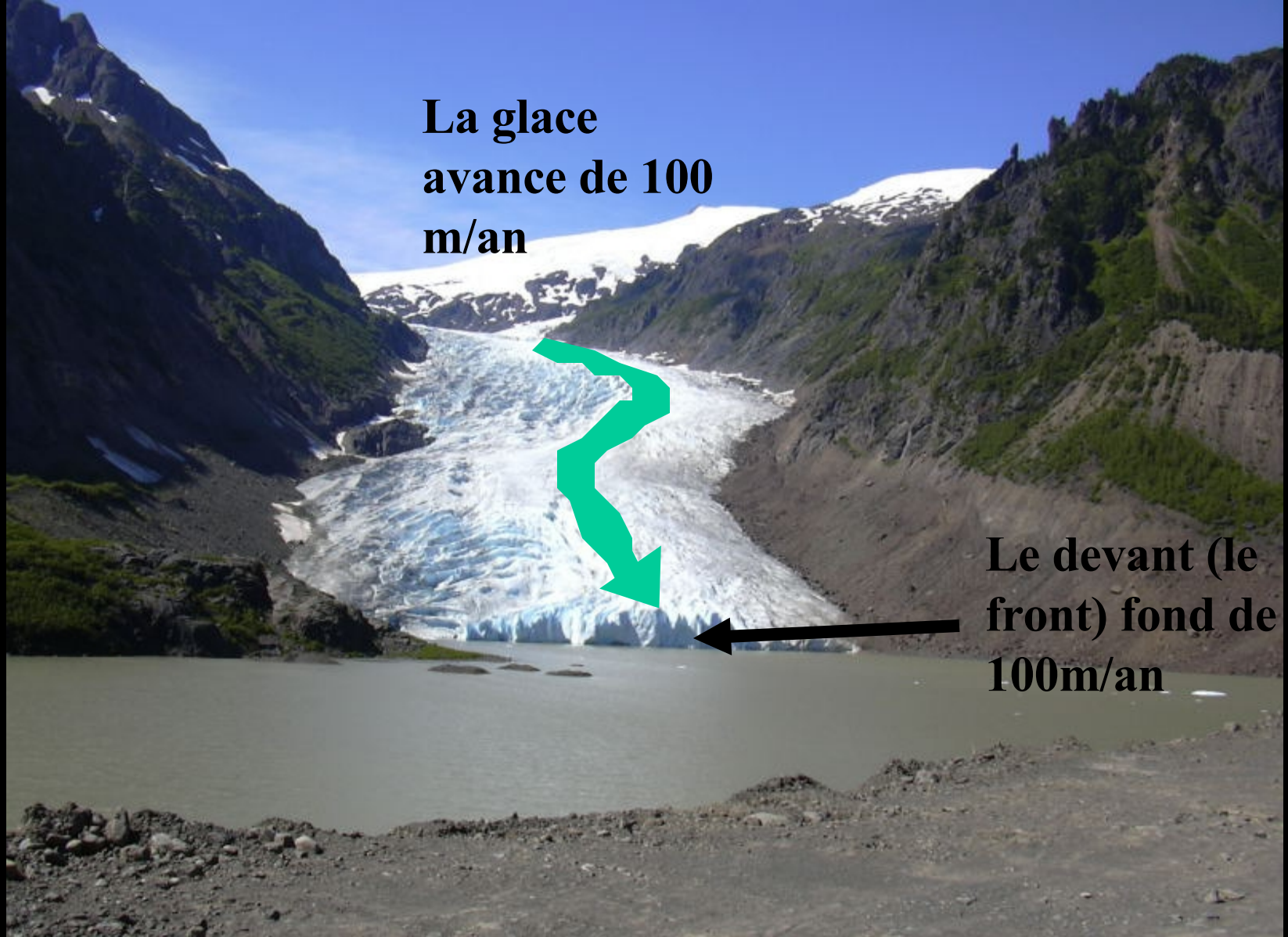
L'échelle de 600 000 000 ans



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

L'échelle de 1000 ans.
Comment fait-on avant 1850,
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 glacier reculent.
Voici le glacier de l'Invernet en 2000**



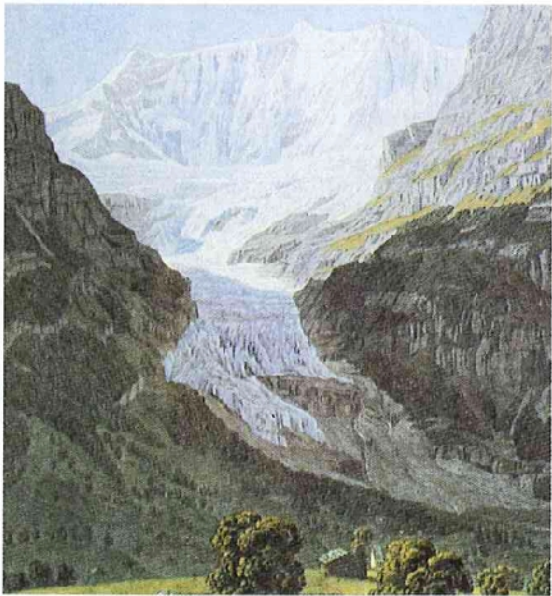
**En 1970. On voit le recul en 30 ans,
recul très récent (pas encore d'herbe)**



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



Figure I.6. Le glacier inférieur de Grindelwald



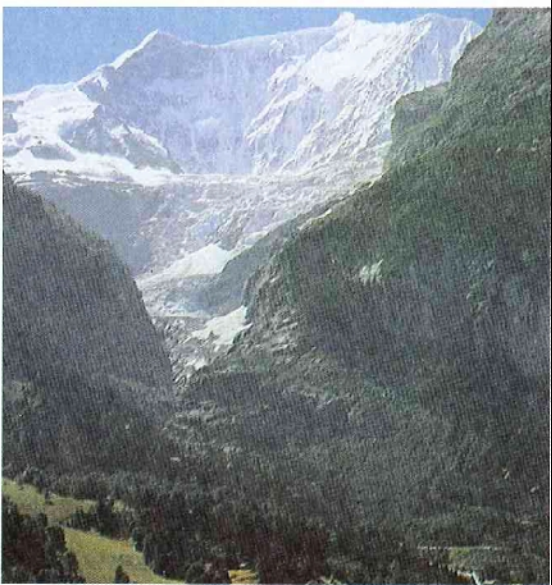
1. vers 1806 (d'après J.J. Biedermann; point g sur la figure I.5),



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, 1986 point O sur la figure I.5),

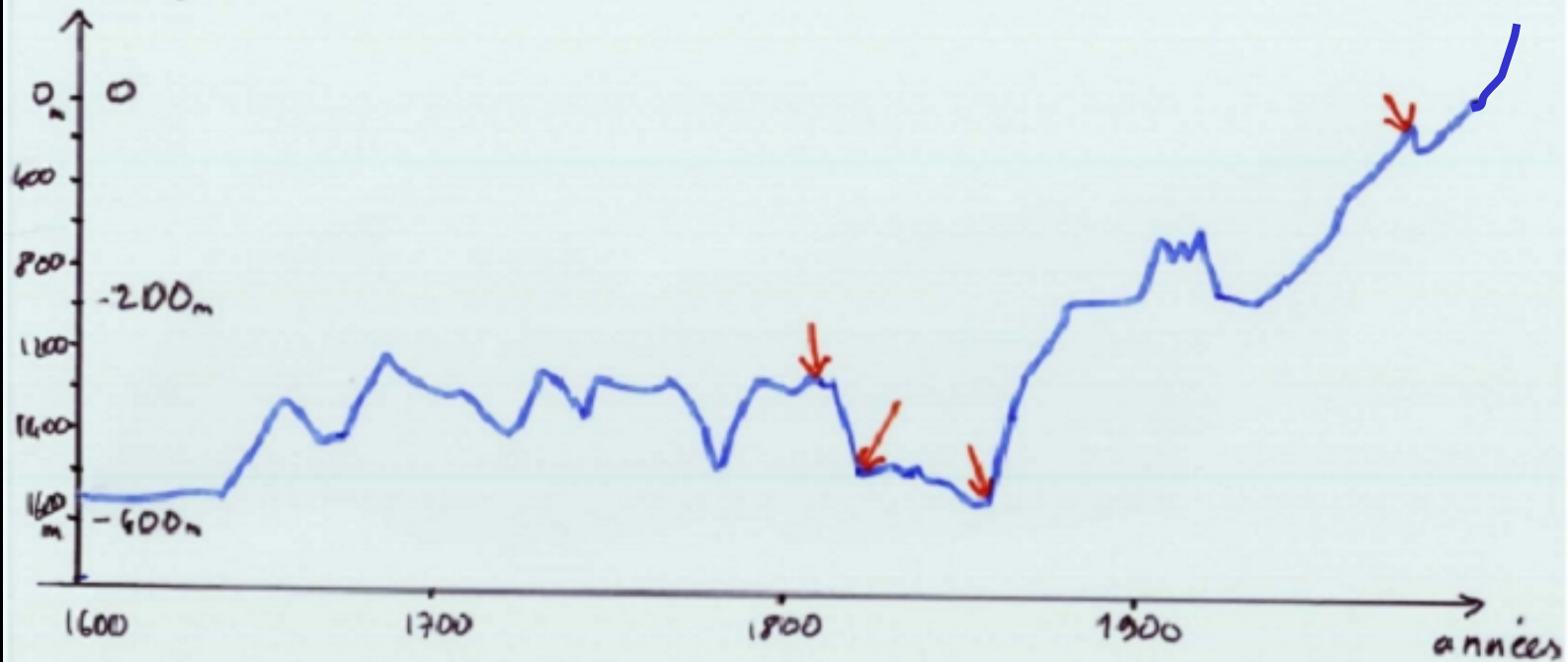


4. en 1974 (photo; tiré de Schotterer, 1988).

Un glacier bien documenté : le glacier inférieur de Grindelwald.

Cette époque froide, qui se termine vers 1850 est appelée « Petit Age Glaciaire »

Longueur du glacier / altitude du front
(0 = longueur 2000)



Variations de l'altitude du front et de
la longueur du "glacier inférieur de
Grindelwald" (Alpes suisses)

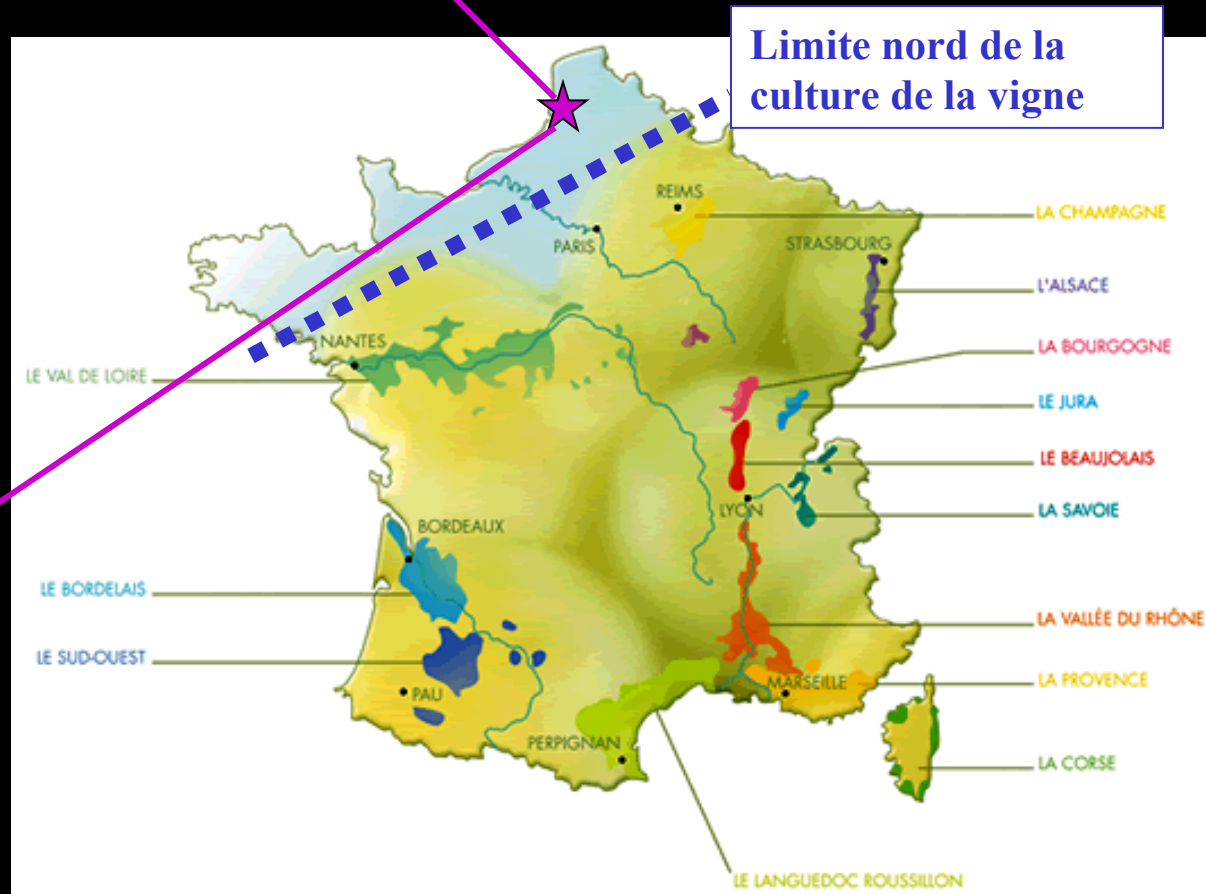
**Voici comment
Breughel (16^{ème} siècle)
voyait le « petit âge
glaciaire »**





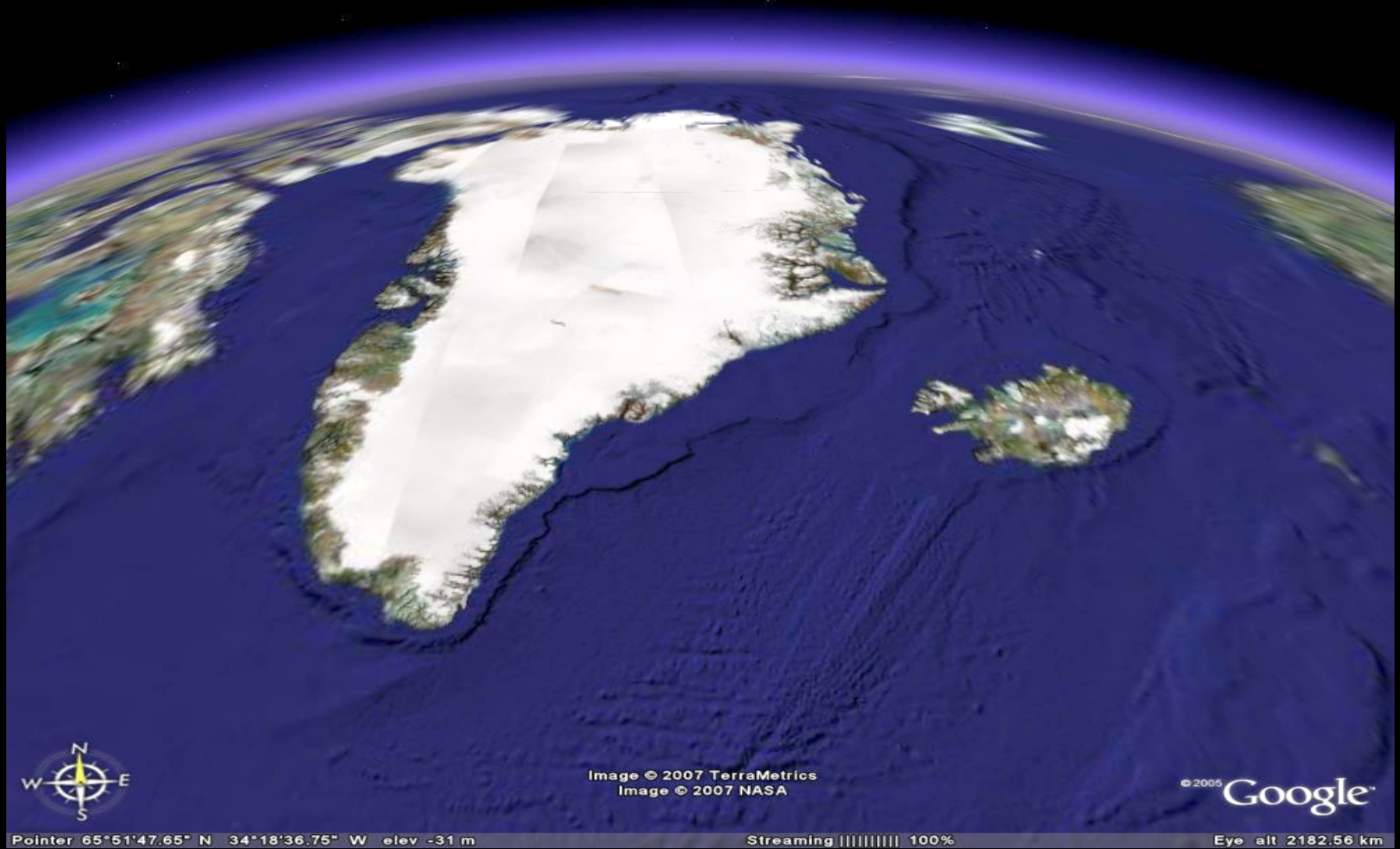
**Cathédrale d'Amiens
(13^{ème} siècle), 3 siècles
avant Breughel**

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



Au 13^{ème} siècle, il faisait assez chaud en Picardie pour cultiver la vigne. Le climat était plus chaud qu'aujourd'hui





À cette époque (13^{ème} siècle), les Vikings appelaient cette grande île le « pays vert » (Groenland), car la côte était verte et des éleveurs pouvaient élever leur bétail

**Et que fait le
soleil pendant ce
temps là ?
L'activité solaire
est « piégée »
dans les arbres**

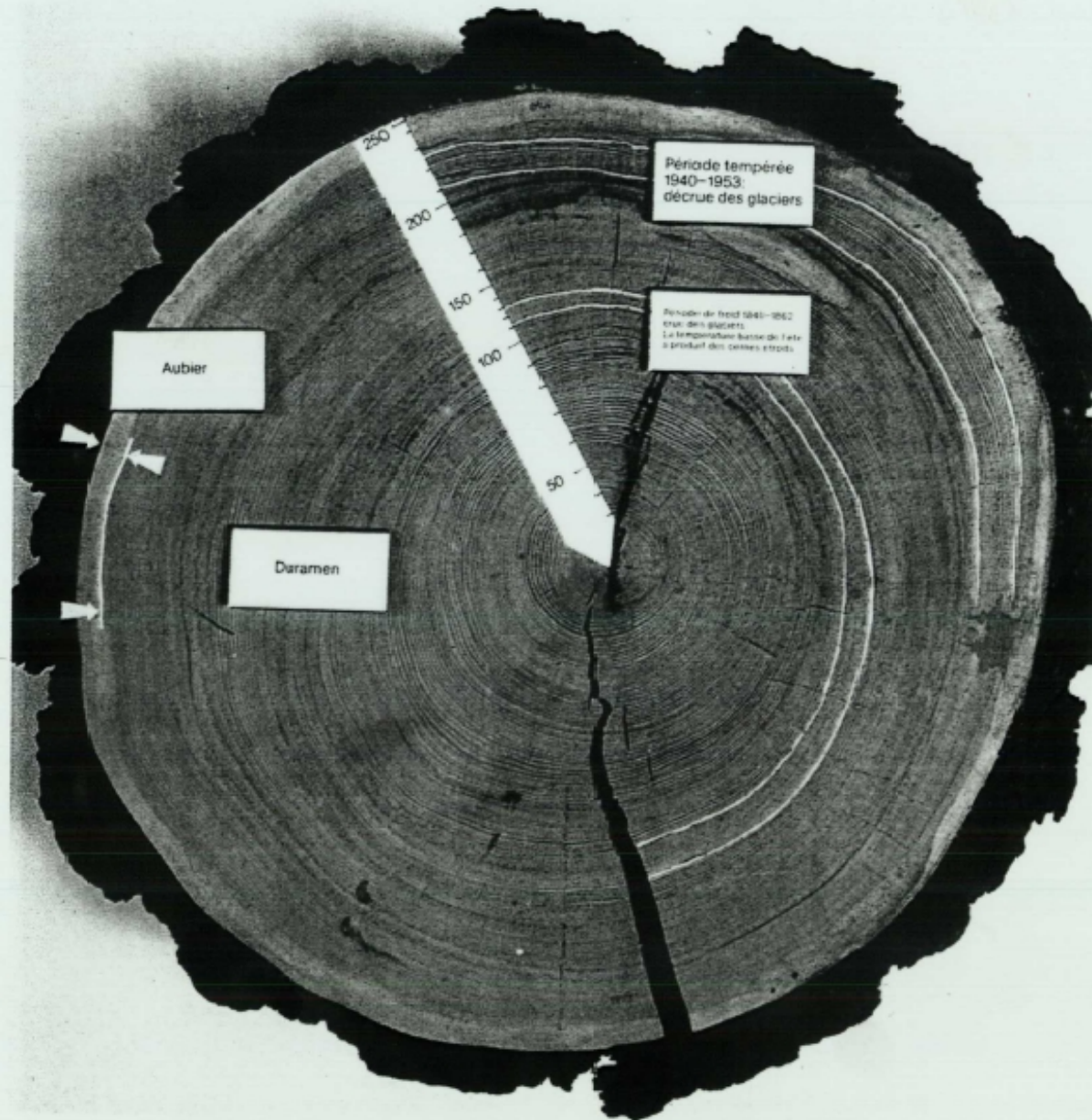
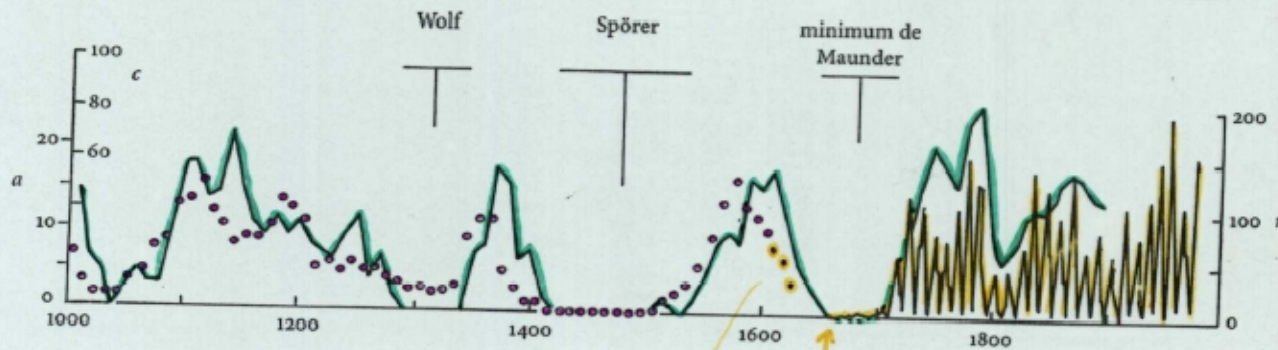


Figure 1.3. Cernes des arbres (ONST, 1981). Photo par B. Meier; préparation de la coupe par l'Institut Fédéral de Recherches Forestières, Birmensdorf.

1000 ans d'activité solaire



— nombre de taches
— C14 des arbres (conique de l'âge)
... nombre des aurores boréales

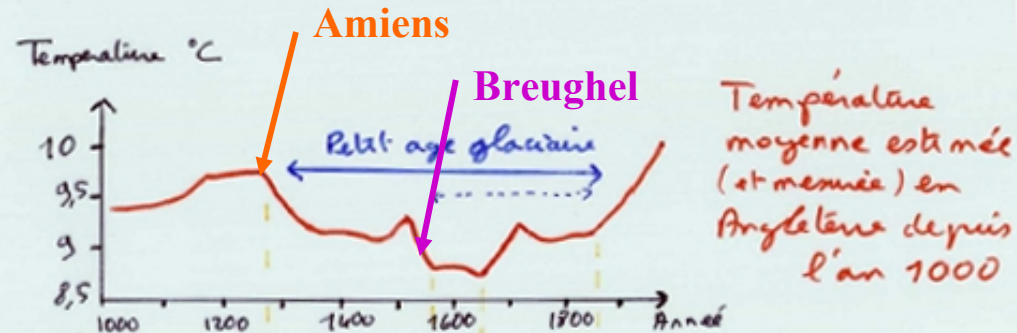
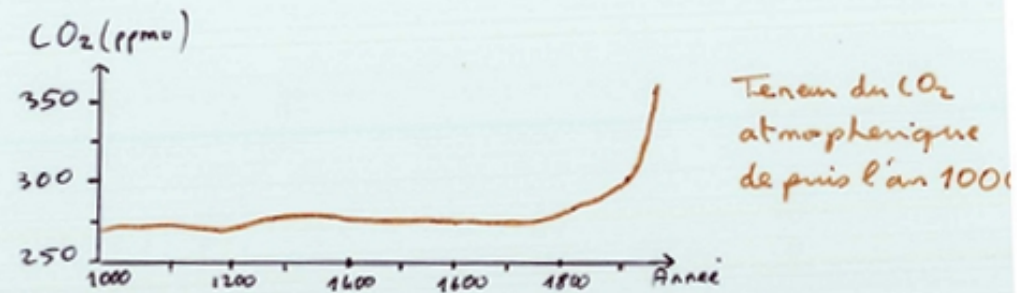


L'activité solaire
depuis 1000 ans

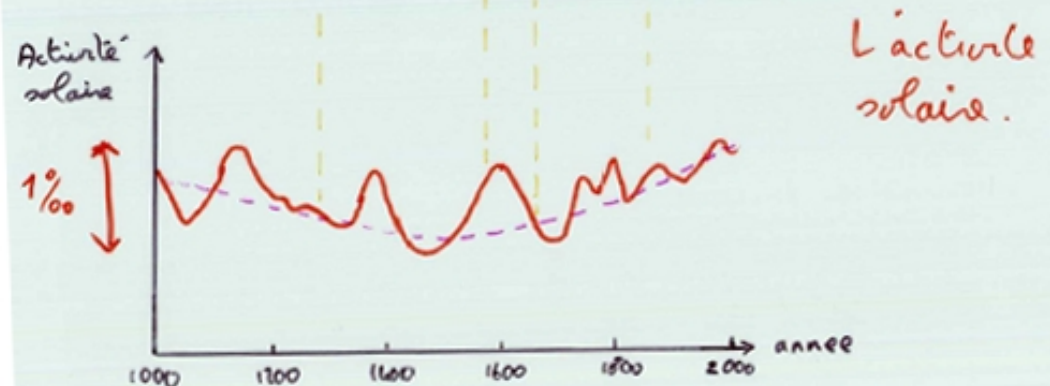
↑ Début des
mesures systématiques
Mesures ponctuelles

Le moins que l'on puisse dire, c'est que la relation entre les candidats au forçage et le résultat n'est pas clair.

Il reste du travail à faire pour comprendre



Température moyenne en Angleterre et teneur en CO₂ atmosphérique



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^{er} 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):

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

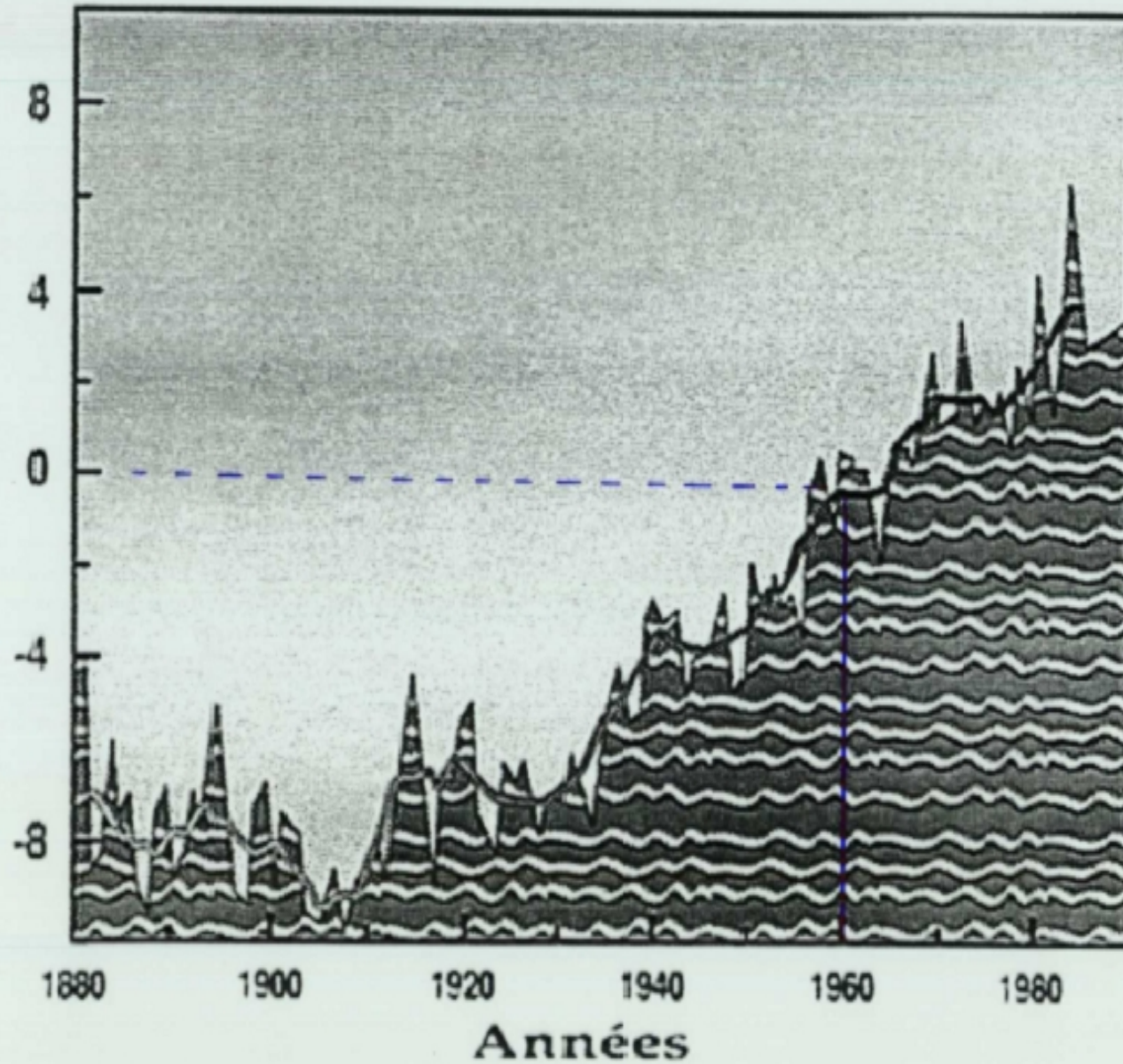
Si c'est toute la tranche d'eau de l'océan (5 000 m) qui se réchauffe, ça monte de 5m. Mais pour ça, il faudra attendre.

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.

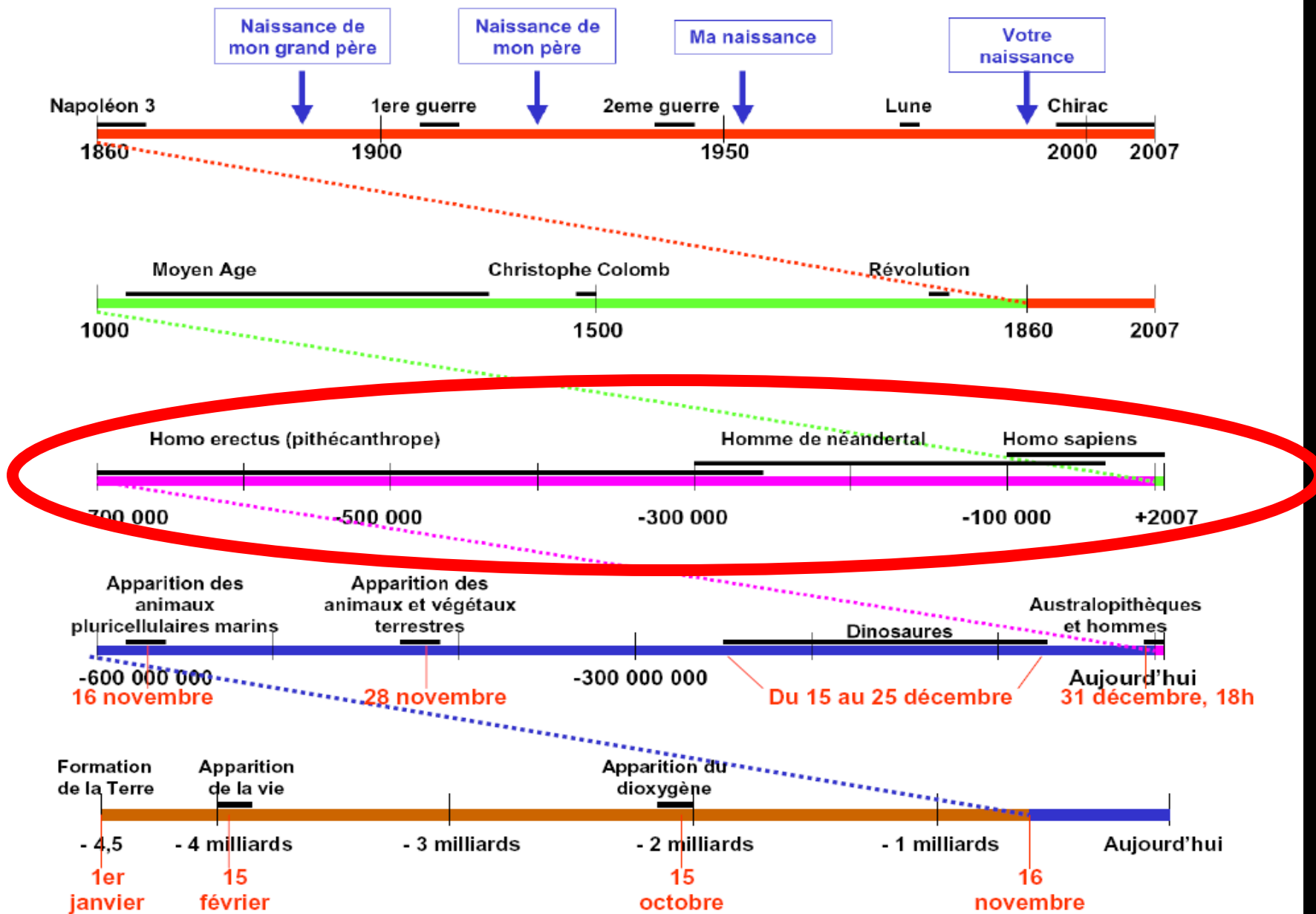
Nos petits enfants devront apprendre à nager, surtout si ils habitent aux Pays Bas, au Bangladesh ...



Niveau de la mer (cm)



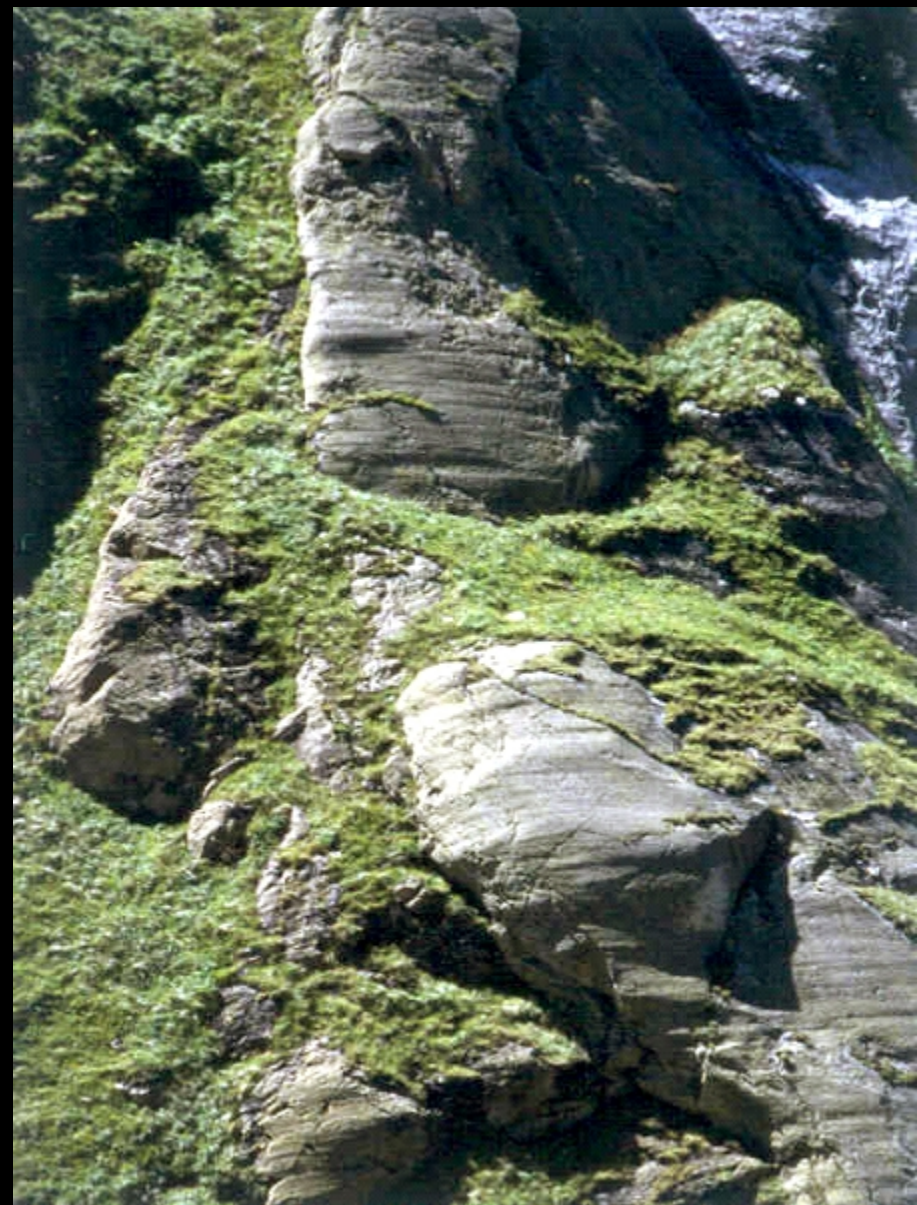
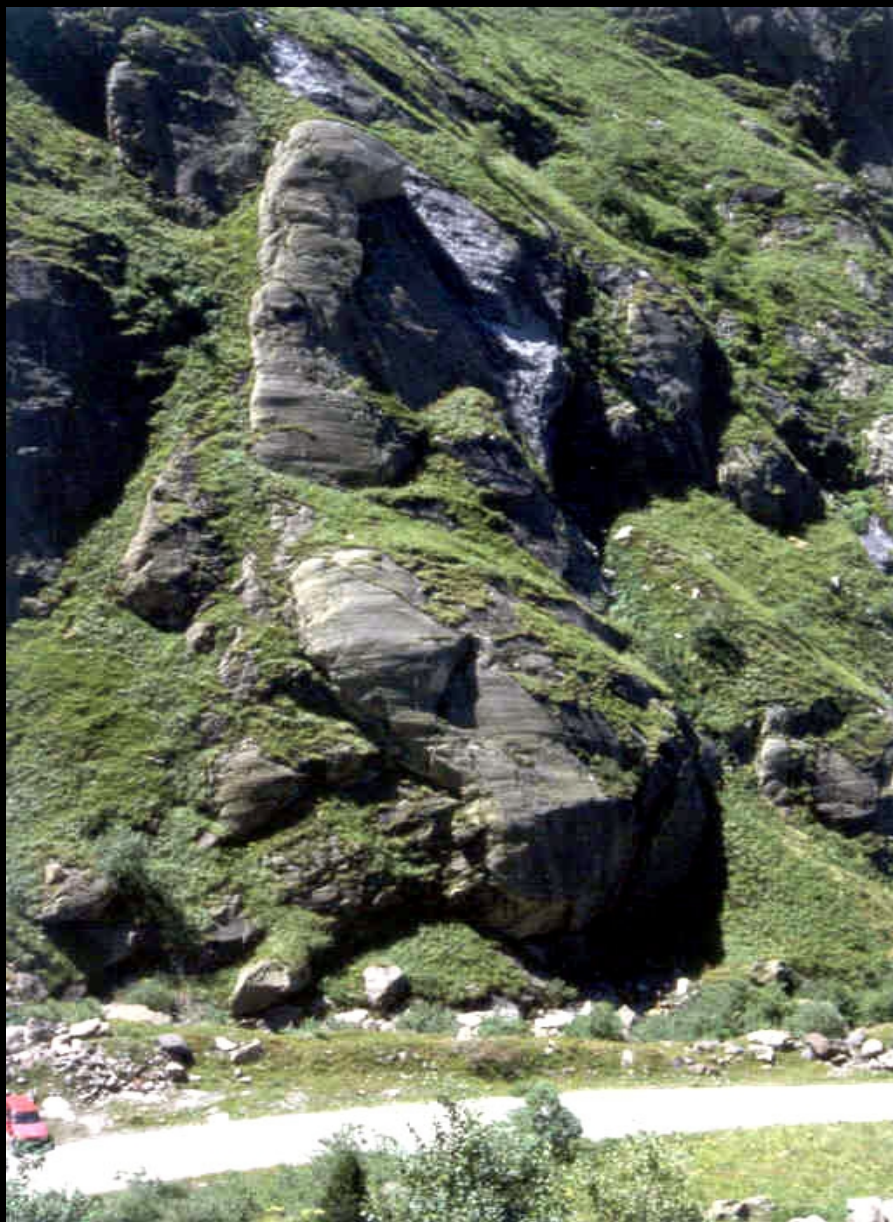
Et ça a déjà commencé !



Les variations climatiques pré-historiques



Les variations climatiques pré-historiques





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



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



La Croix Rousse il y a 140 000 ans



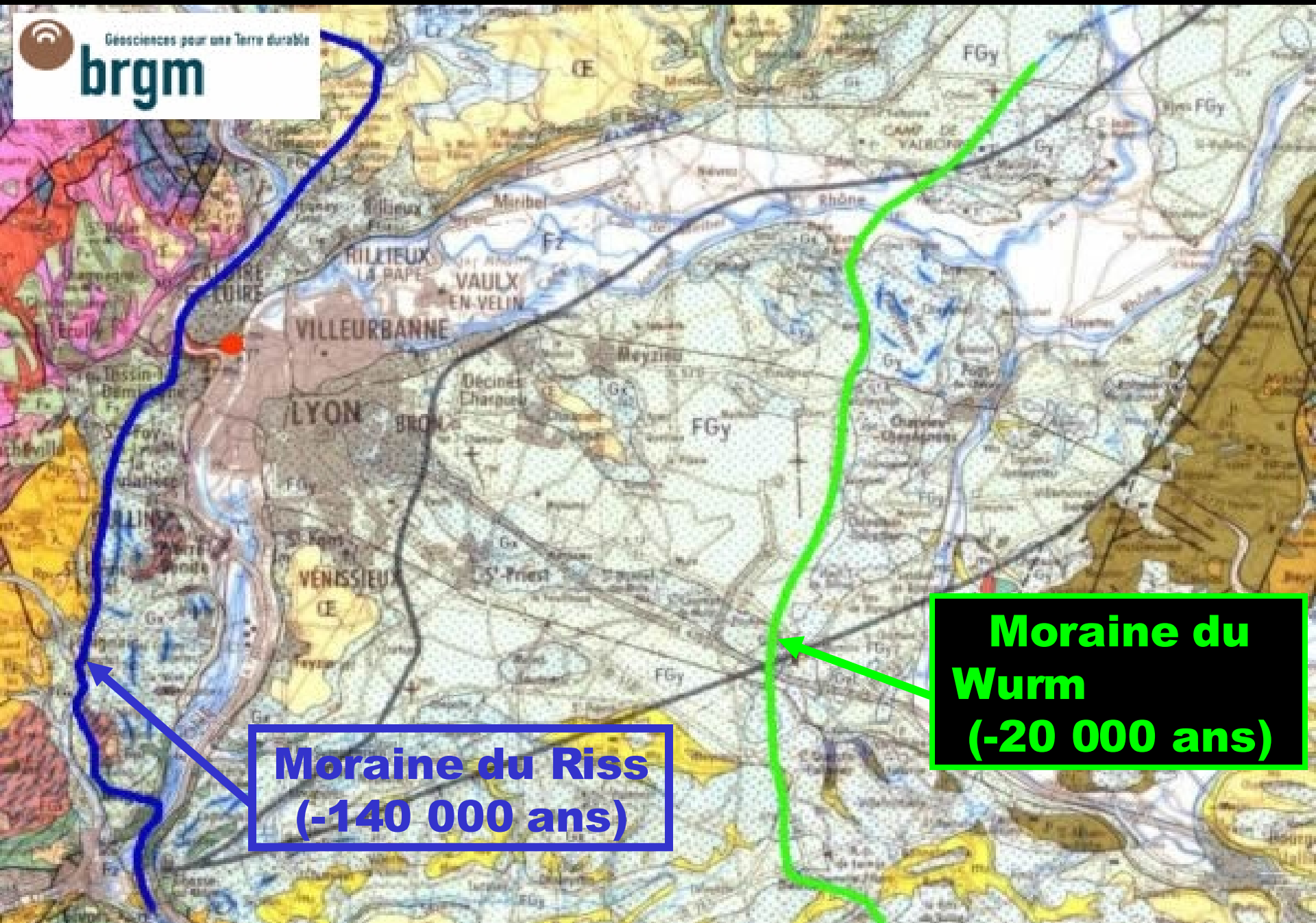
Lyon il y a 140 000 ans





Géosciences pour une Terre durable

brgm



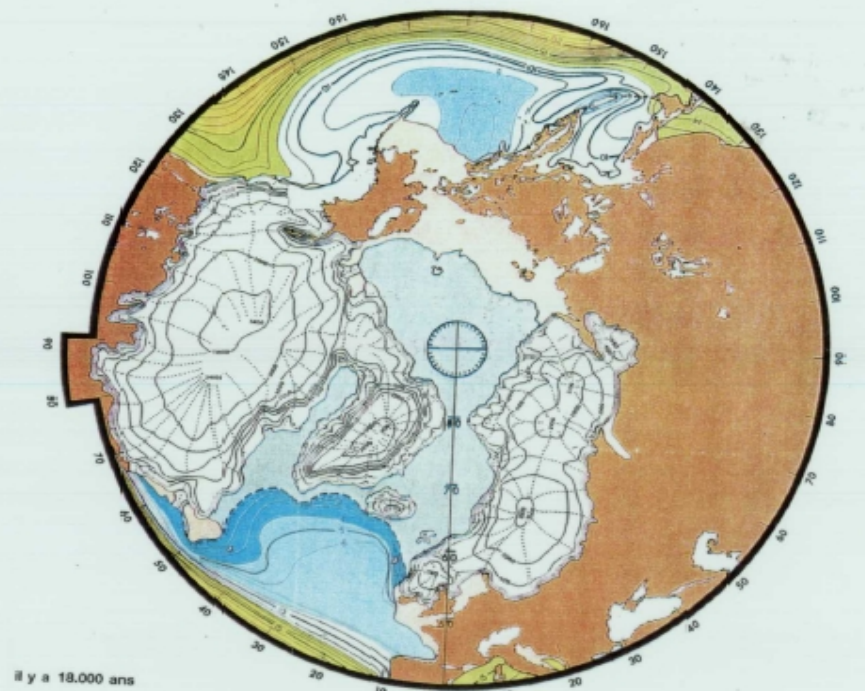
**Moraine du Riss
(-140 000 ans)**

**Moraine du
Wurm
(-20 000 ans)**

La Crois Rousse il y a 20 000 ans



L'Europe il y a 20 000 ans





Aujourd'hui



- 20 000

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

Comment quantifier ces variations climatiques ?

La qualité isotopique.

Elle s'exprime en rapport, en ‰ ou en δ .

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 :

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

$$R_{(‰)} = 3,8 ‰$$

une espèce
de l'échantillon et celle

Censuré !

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

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**

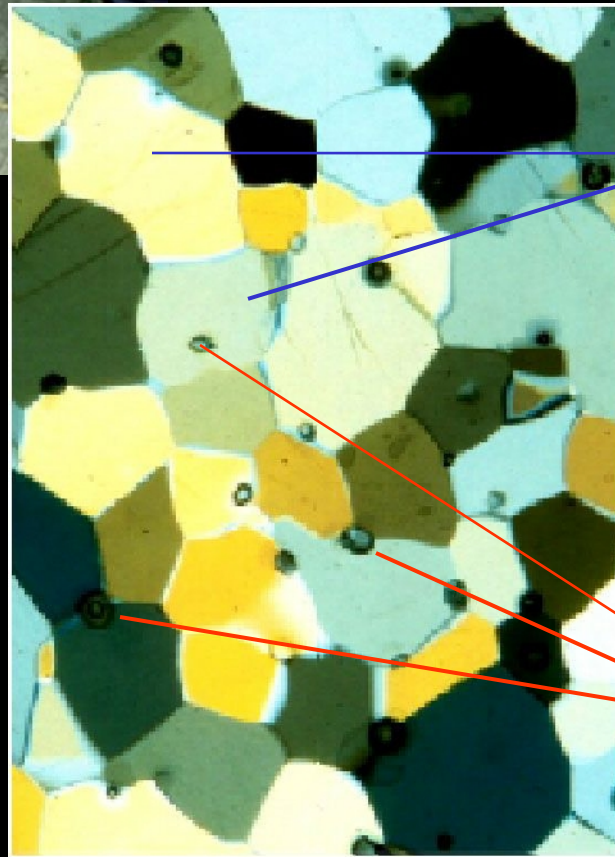
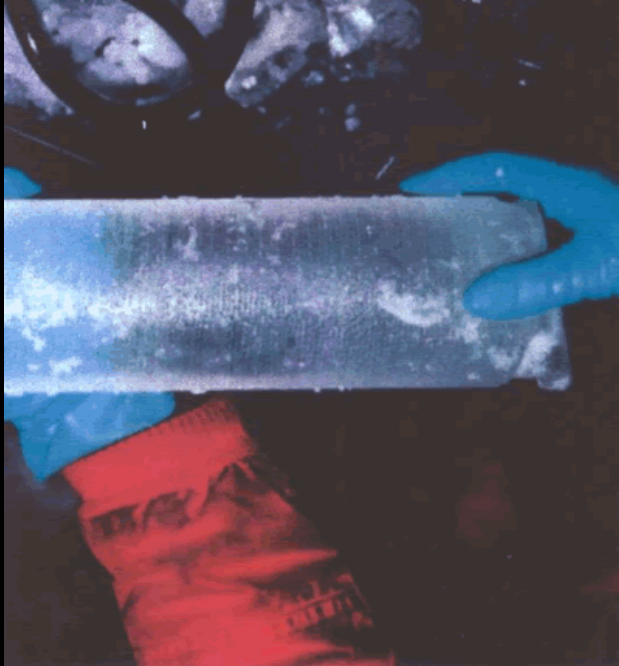
A la recherche du Saint Graal des climatologues



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



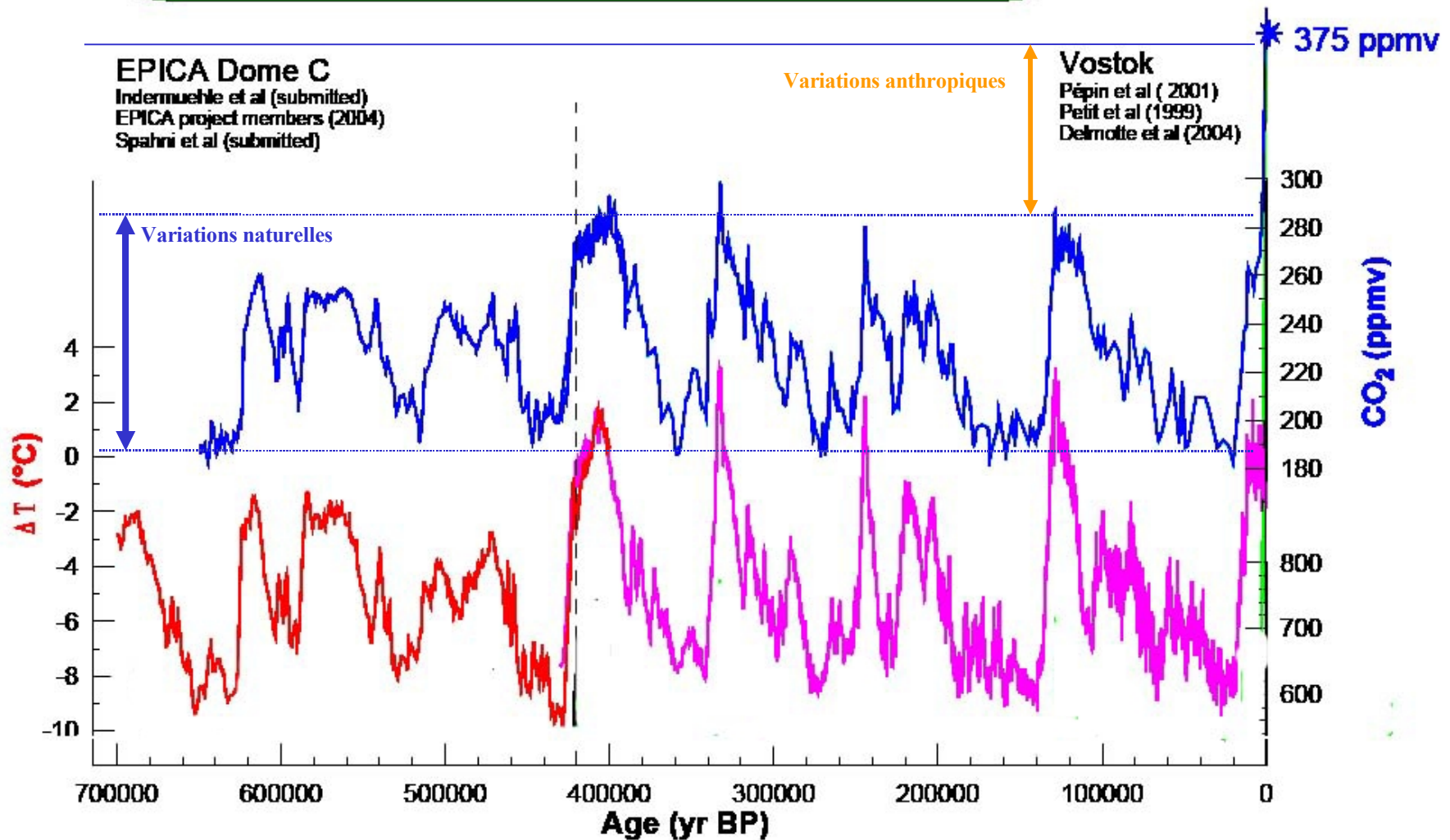
Le Saint Graal des climatologue : des carottes de glaces, qui contiennent des bulles d'air qu'on peut analyser



**Cristaux
de glace**

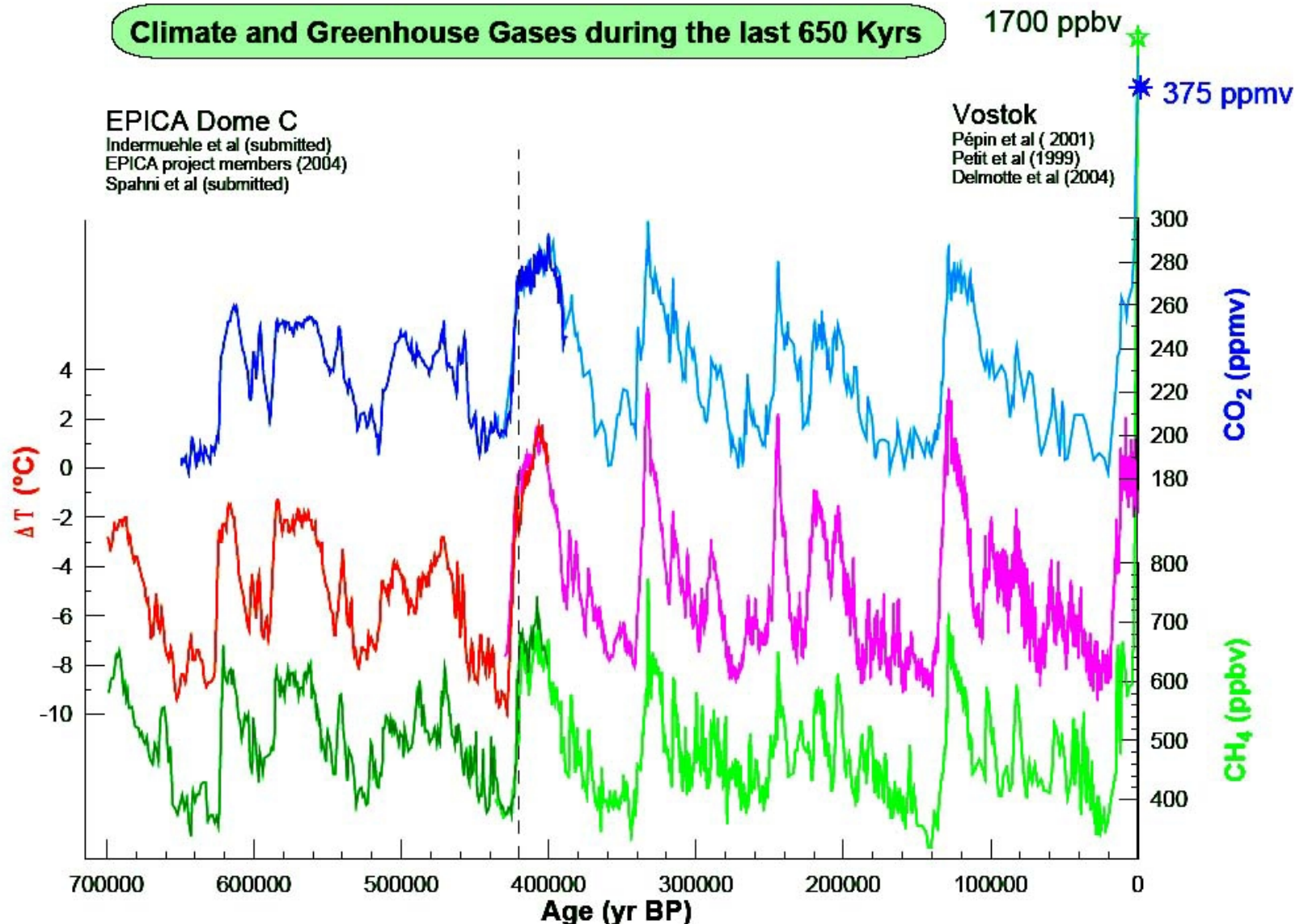
Bulle d'air

Climate and Greenhouse Gases during the last 650 Kyr



La température antarctique varie de +2 à -10°C par rapport à la température actuelle (-40°C). Le CO₂ varie de 200 à 280 ppmv ; il est aujourd'hui à 375. Les variations sont parfaitement corrélées. Les variations de température commencent quelques siècles celles de CO₂

Climate and Greenhouse Gases during the last 650 Kyr



**Un autre gaz a effet de serre, le méthane (CH₄)
montre la même corrélation**

Avec des méthodes voisines, on sait mesurer le volume des glaces polaires



$\delta^{18}O$ de la
glace (‰)

-36
-38
-40
-42
-44
-46

Température
à Vostok
(°C)

-38
-40
-42
-44
-46

$\delta^{18}O$ des foraminifères
benthiques (‰)

+29
+28,5
+28

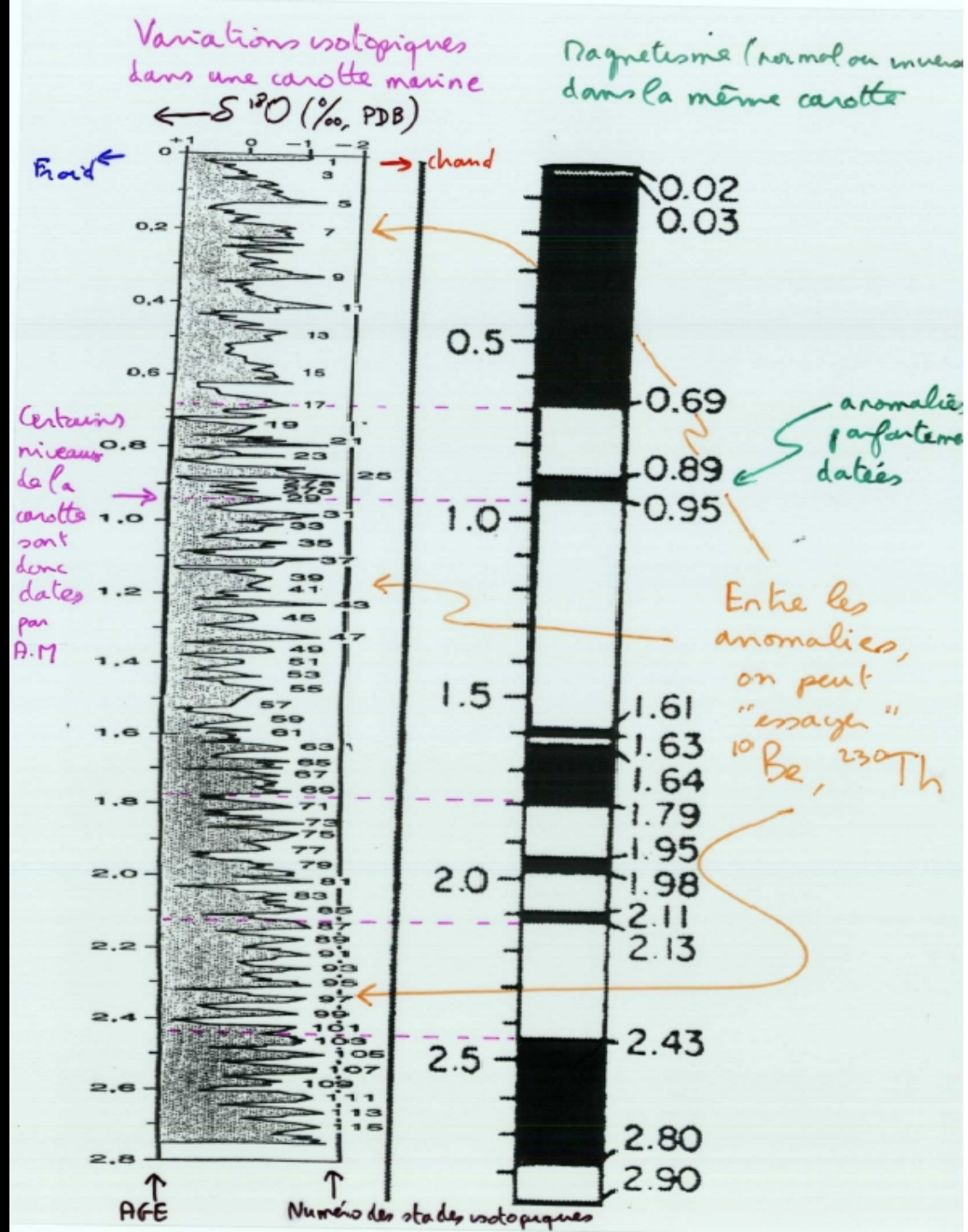
Volume total
des glaces
(\times actuel)

← niveau de la
mer à 120 m

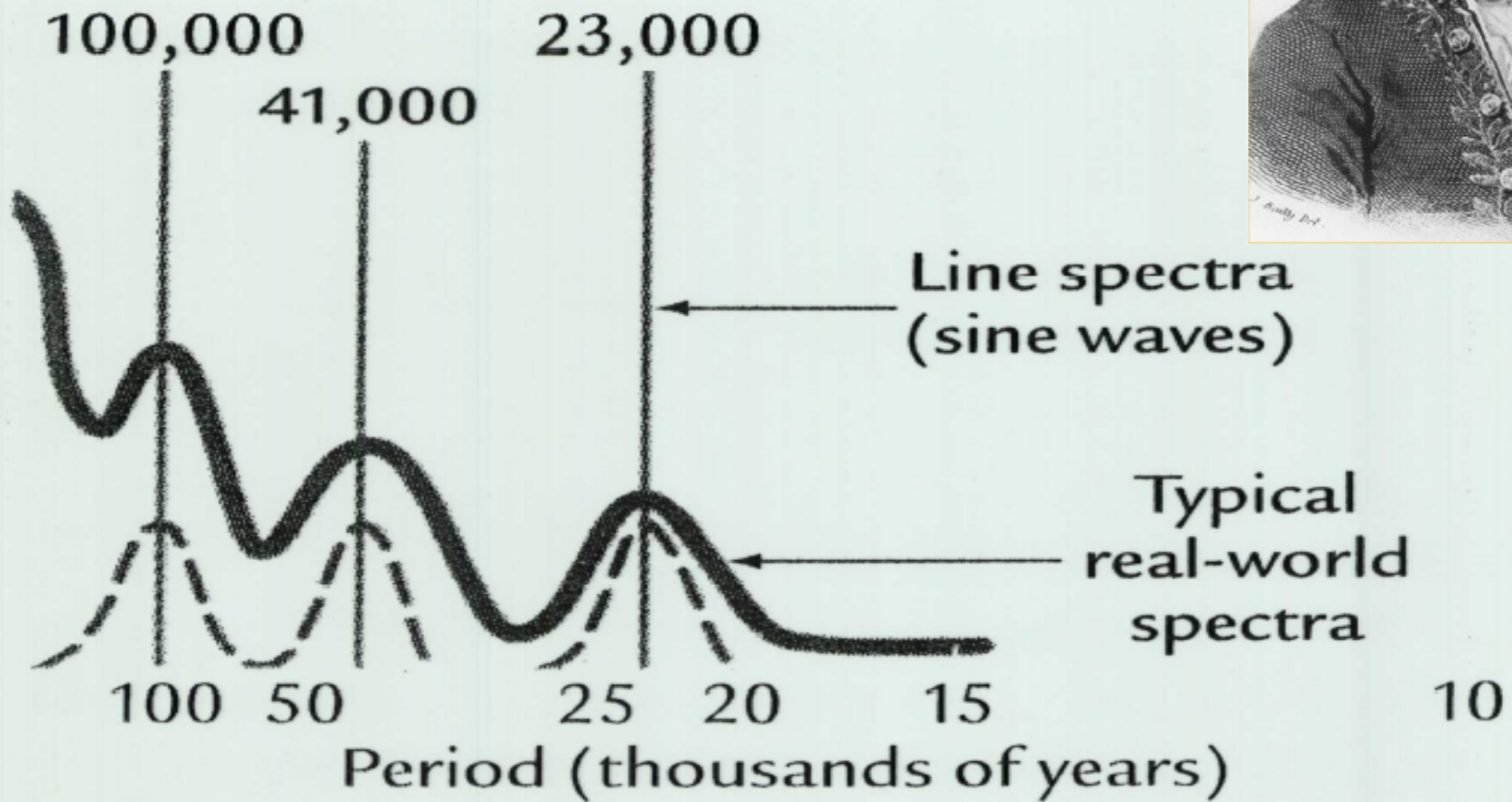
← niveau de la
mer actuel

-700 000 -600 000 -500 000 -400 000 -300 000 -200 000 -100 000 0 Temps (années)
(actuel)

Qu'est ce qui peut expliquer ces variations, qui existe depuis au moins 3 Ma ?

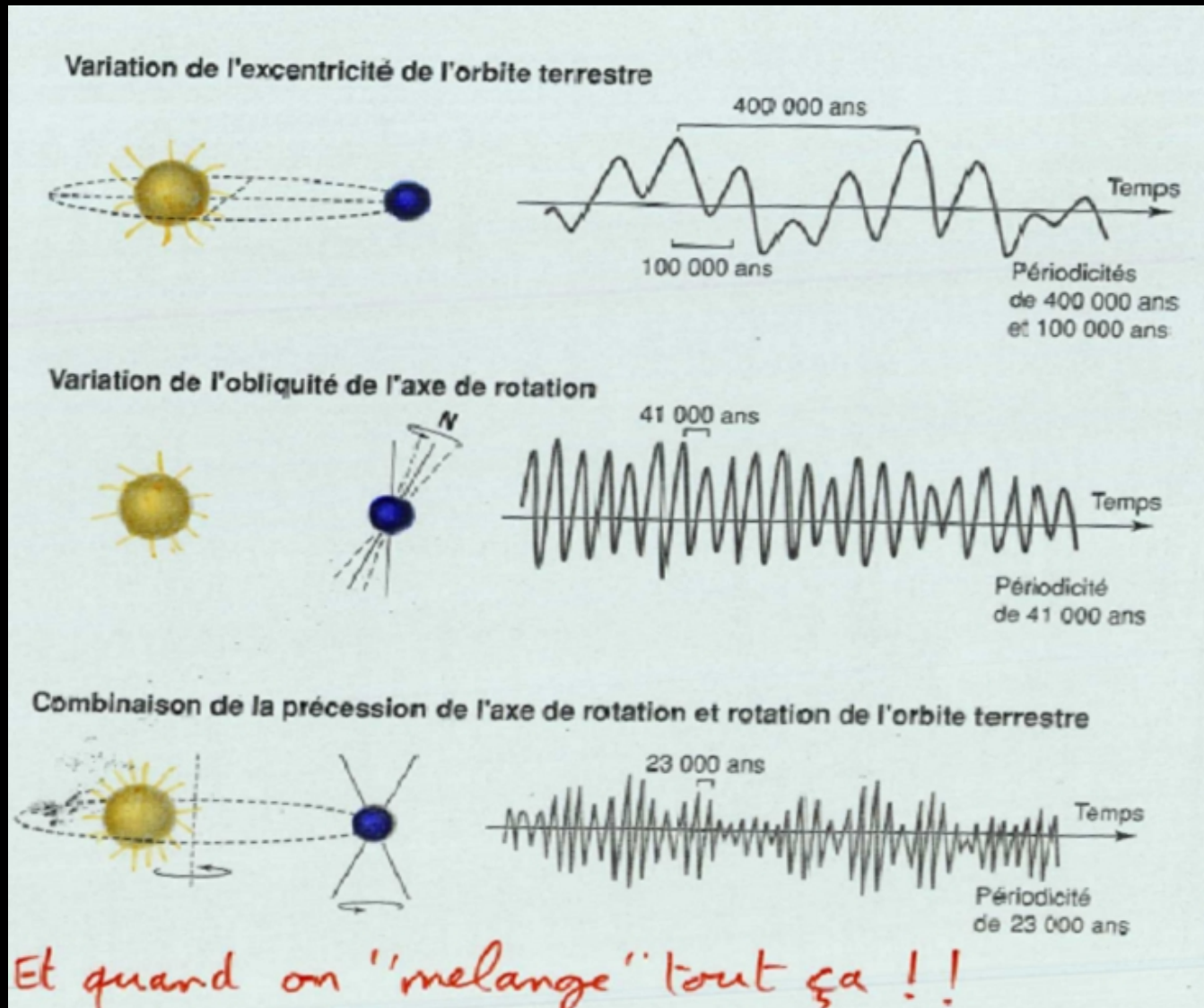


Faisons la transformé de Fourier de ces variations. Trois fréquences ressortent : 23 000, 41 000 et 100 000 ans.

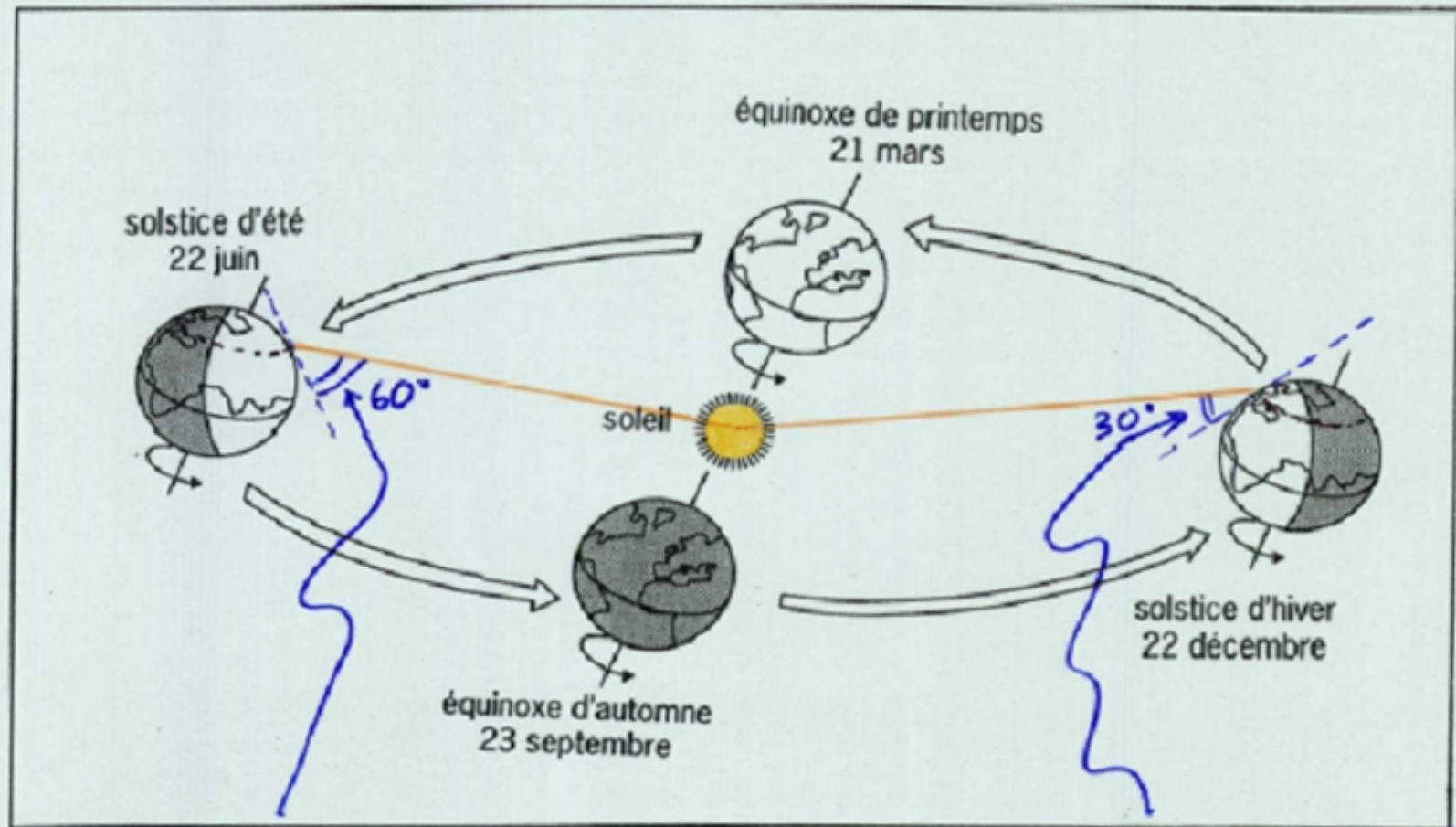


Spectral analysis

**Ces 3 chiffres magiques (23000, 41000 et 100000) font
« tilt » chez les astronomes : ce sont les périodes de
« variations orbitales » de la Terre**



Les saisons : une histoire d'axe incliné



Les rayons du soleil arrivent avec un angle fort

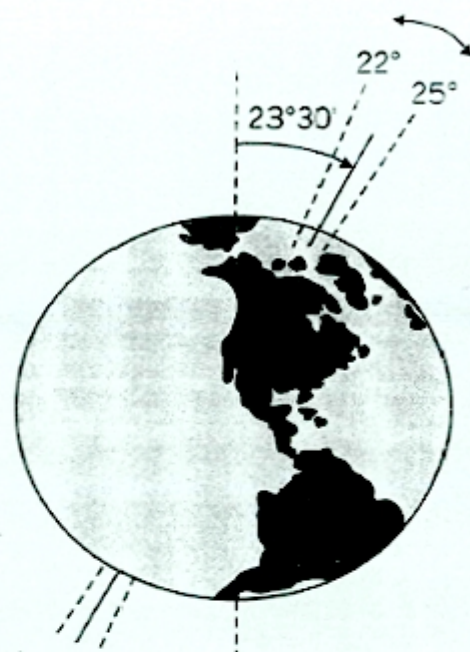
les rayons du soleil arrivent avec un angle faible



La précession des
équinoxes
($T = 23\,000$ ans)

Ne fait varier ni
l'ensoleillement moyen
ni le contraste des
saisons !

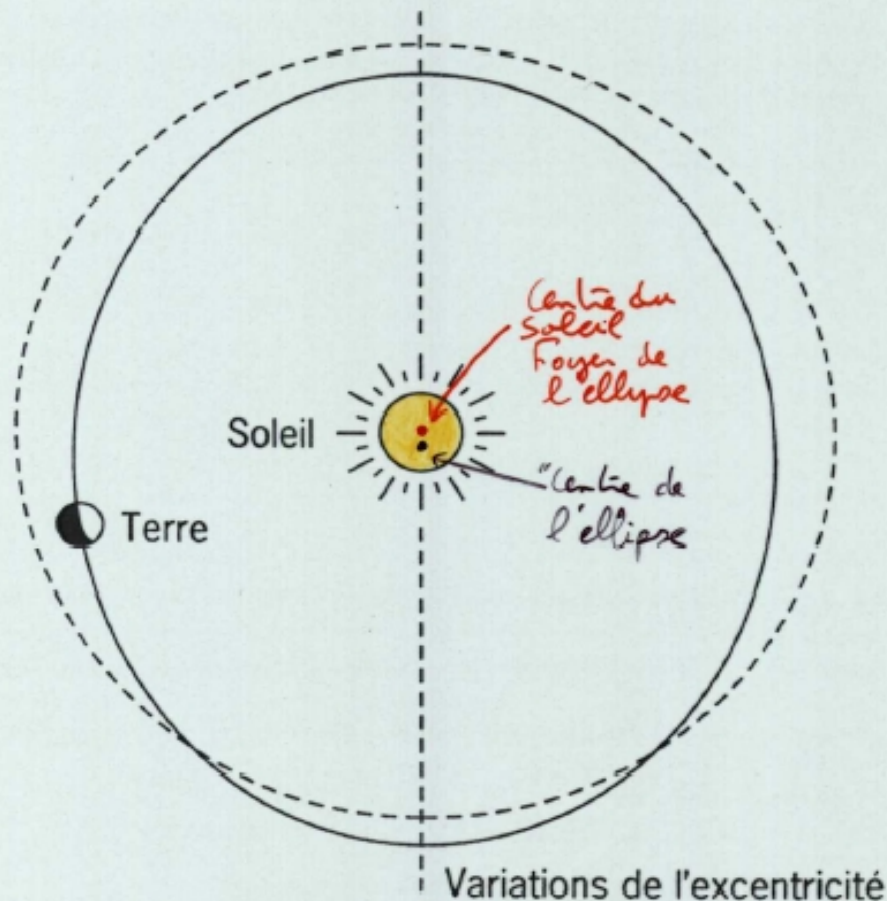
Mais



La variation de
l'obliquité de la Terre
($T = 41\,000$ ans)

Ne fait pas varier
l'ensoleillement
moyen

Fait varier le contraste
des saisons

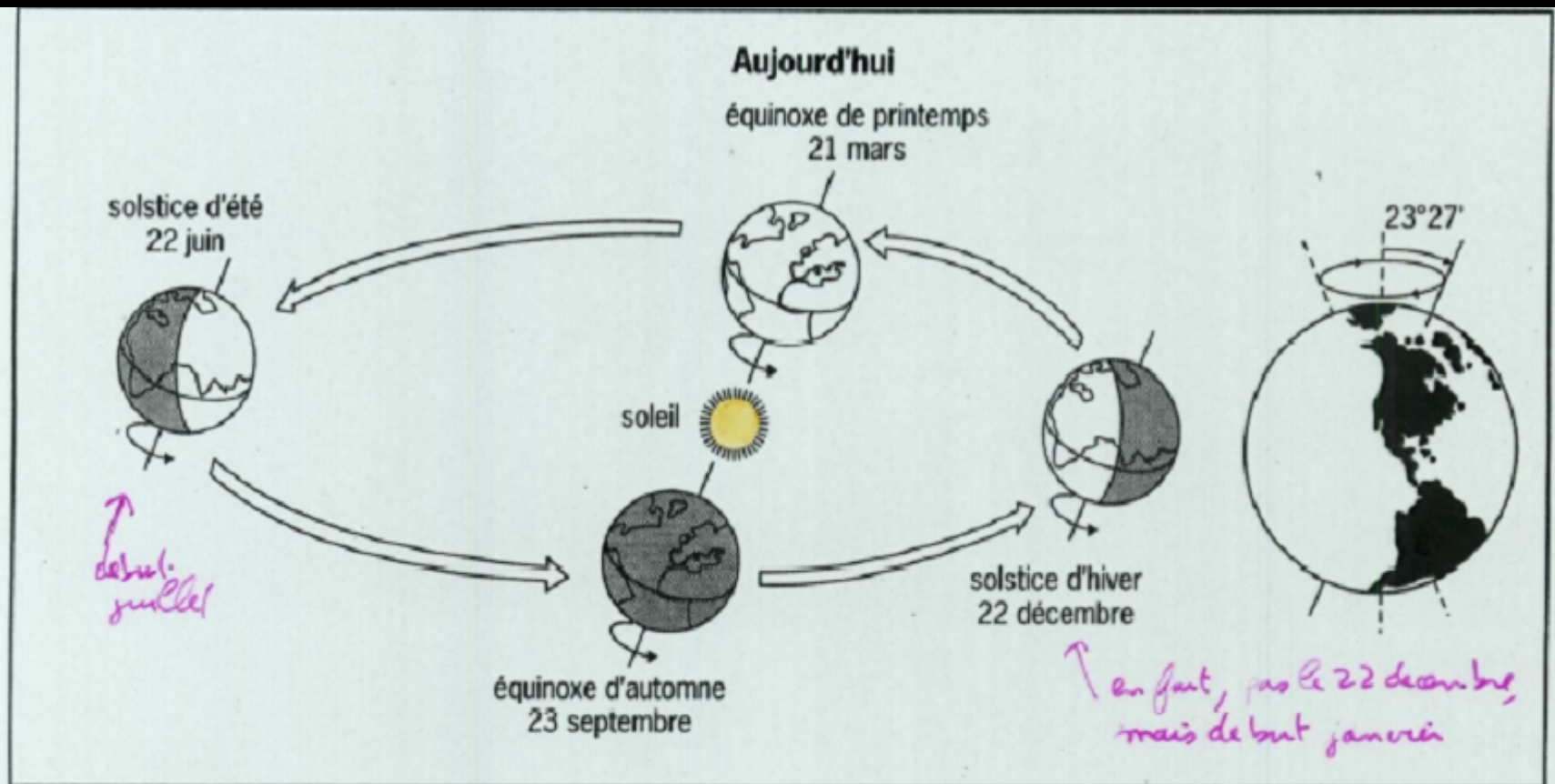


La variation de l'excentricité

L'excentricité de l'orbite terrestre varie entre une excentricité nulle (carré) et maximale (carré) avec une double périodicité (100 000 et 400 000 ans)

La distance Terre / soleil peut ainsi varier de 6.000.000 de km au maximum au cours d'une année.

La variation d'ensoleillement global au cours d'une année ne varie que de 0,2 % ($\frac{0,7 W}{340 W}$) maximum !

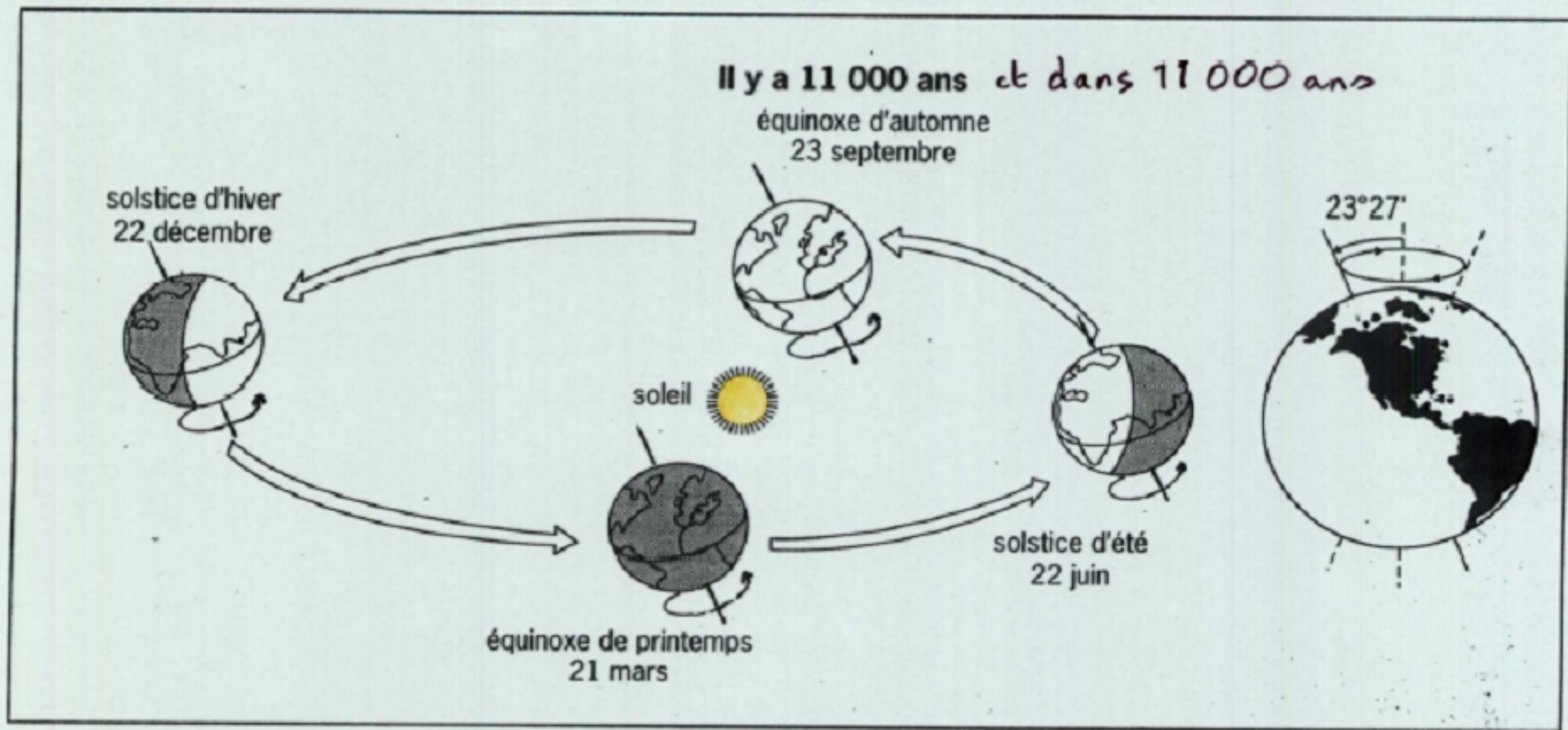


Occupons nous que de l'hémisphère nord !

L'hivers, "on" est près du soleil \Rightarrow hivers pas trop froid !

L'été, "on" est loin du soleil \Rightarrow été pas trop chaud !

Remarque : c'est l'inverse dans l'hémisphère sud : hivers très froid !
été très chaud !



Occupons nous que de l'hémisphère nord !

L'hiver, "on" est loin du soleil \Rightarrow hivers glaciaux
L'été, on est près du soleil \Rightarrow été torride

Remarque : c'est l'inverse dans l'hémisphère sud !

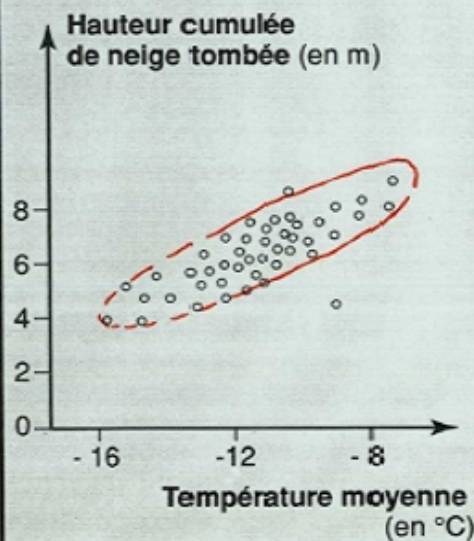
Qu'est-ce que tout ça a à voir avec les glaciers ?



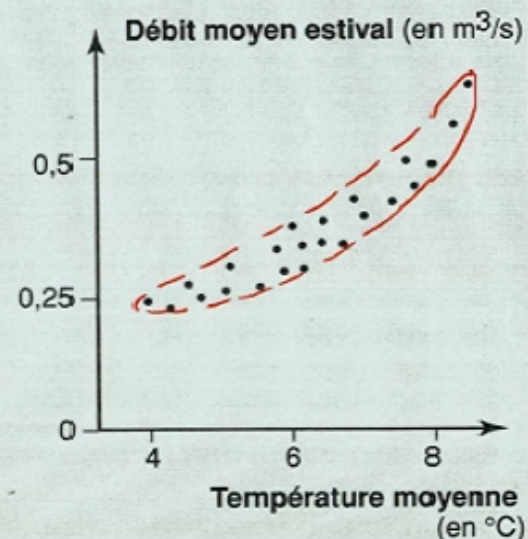
4

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.



En hiver



En été



Comment d'aussi faibles variations d'ensoleillement 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°C en moyenne et 10°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 CO₂ océanique

Le CO₂ est plus soluble dans l'eau froide que dans l'eau chaude.

Un peu plus de froid (raison astronomique) → plus de CO₂ va dans l'océan et il en reste moins dans l'atmosphère → Baisse du CO₂ atmosphérique → l'effet de serre diminue → il fait un peu plus froid → ...

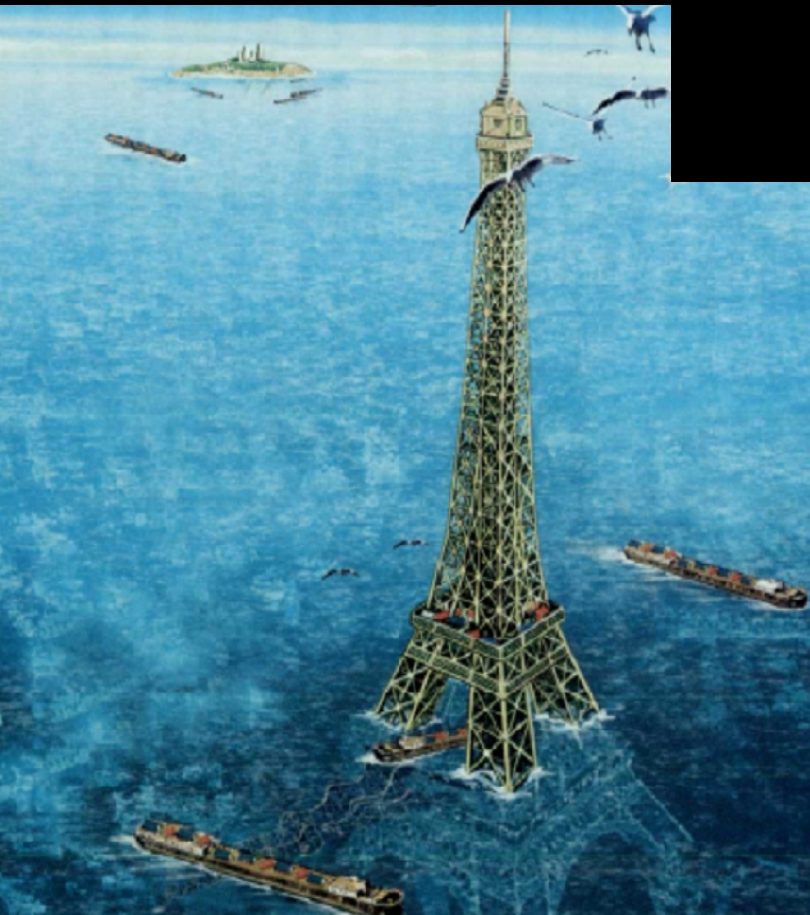


3 – L'antagonisme Photosynthèse / respiration des sols

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 CO₂ alors que l'absorption de CO₂ ne baisse que peu → baisse du CO₂ atmosphérique → l'effet de serre diminue → il fait un peu plus froid → ...

Vous rajoutez l'effet des aérosols absorbants, des aérosols réfléchissant, de l'albédo des forêts, de l'effet des nuages ... et vous comprendrez pourquoi les variations passées du climats sont difficiles à expliquer, et pourquoi les variations futures sont difficiles à prévoir !



LA REMONTEE DU NIVEAU DES MERS

Si tous les glaciers du monde fondaient ...

Antarctique : 29 millions de km^3

Groenland : 2,5 millions de km^3

Glaciers de montagne : 0,2 million de km^3

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°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 !

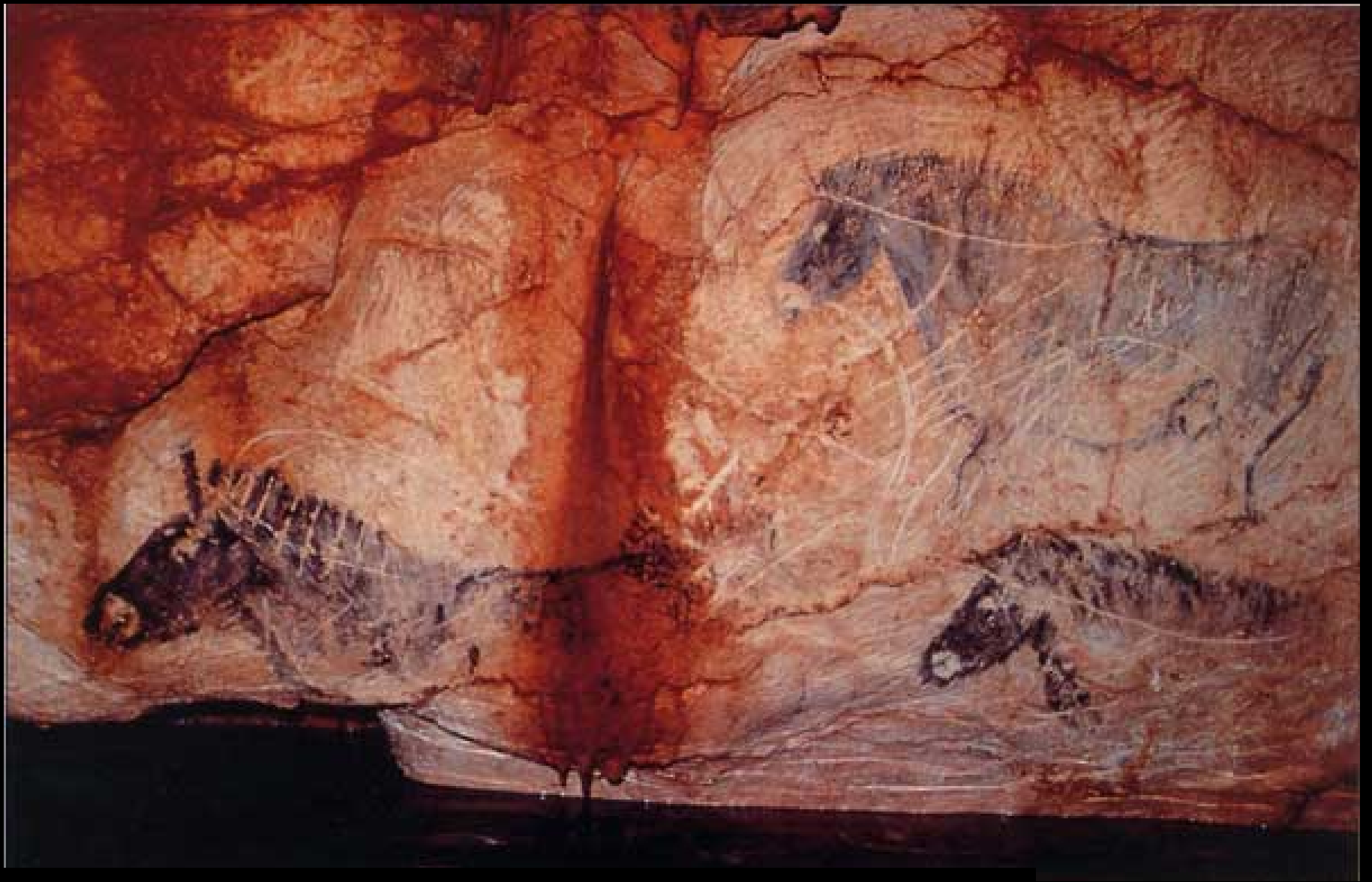
**Allons dans, ou
plutôt sous, les
calanques entre
Marseille et
Cassis, et
plongeons !**



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



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



Avec des chevaux ...

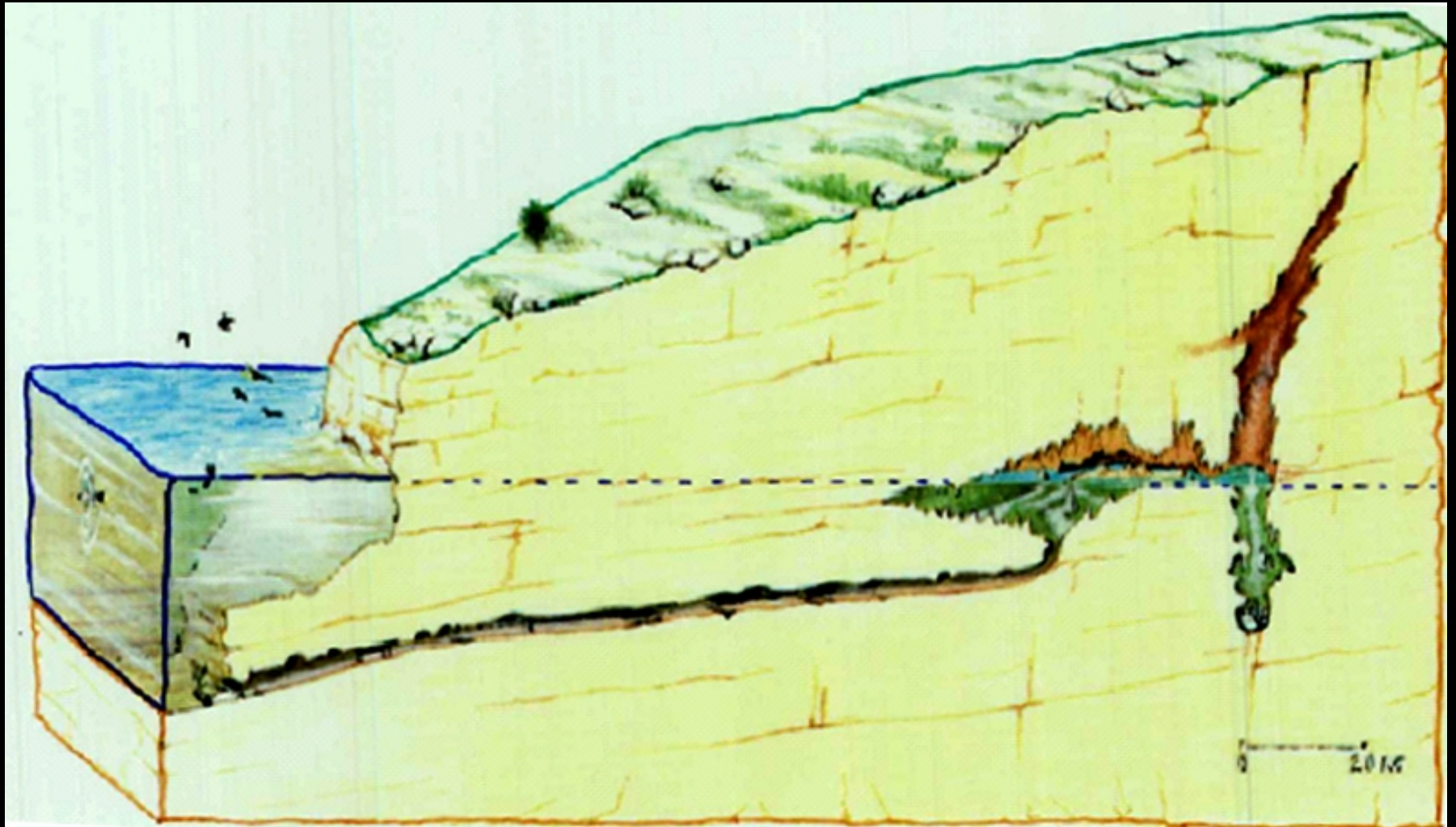
Un pingouin

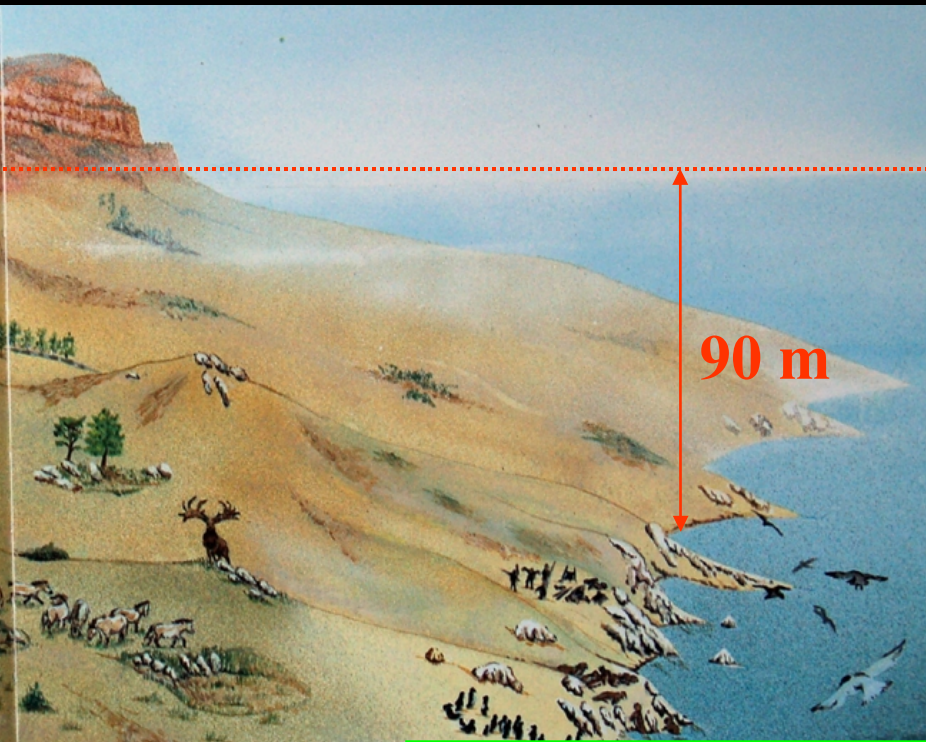


un phoque



La grotte Cosquer, vue en coupe





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



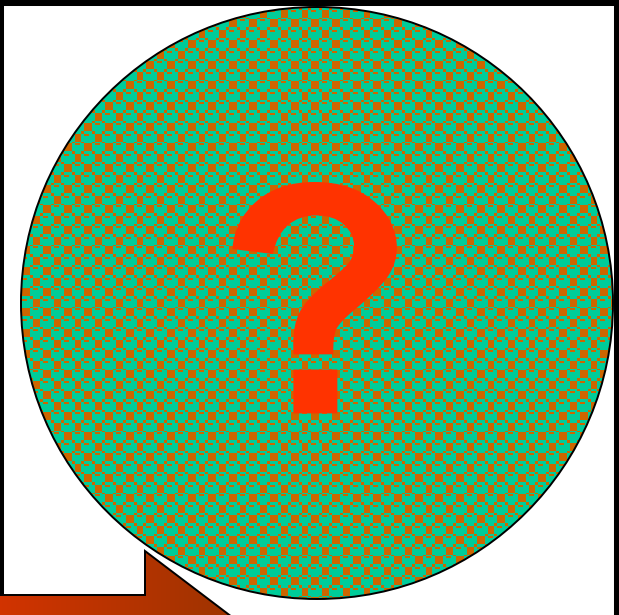
**Les calanques,
aujourd'hui**



20 000 ans



200 ans



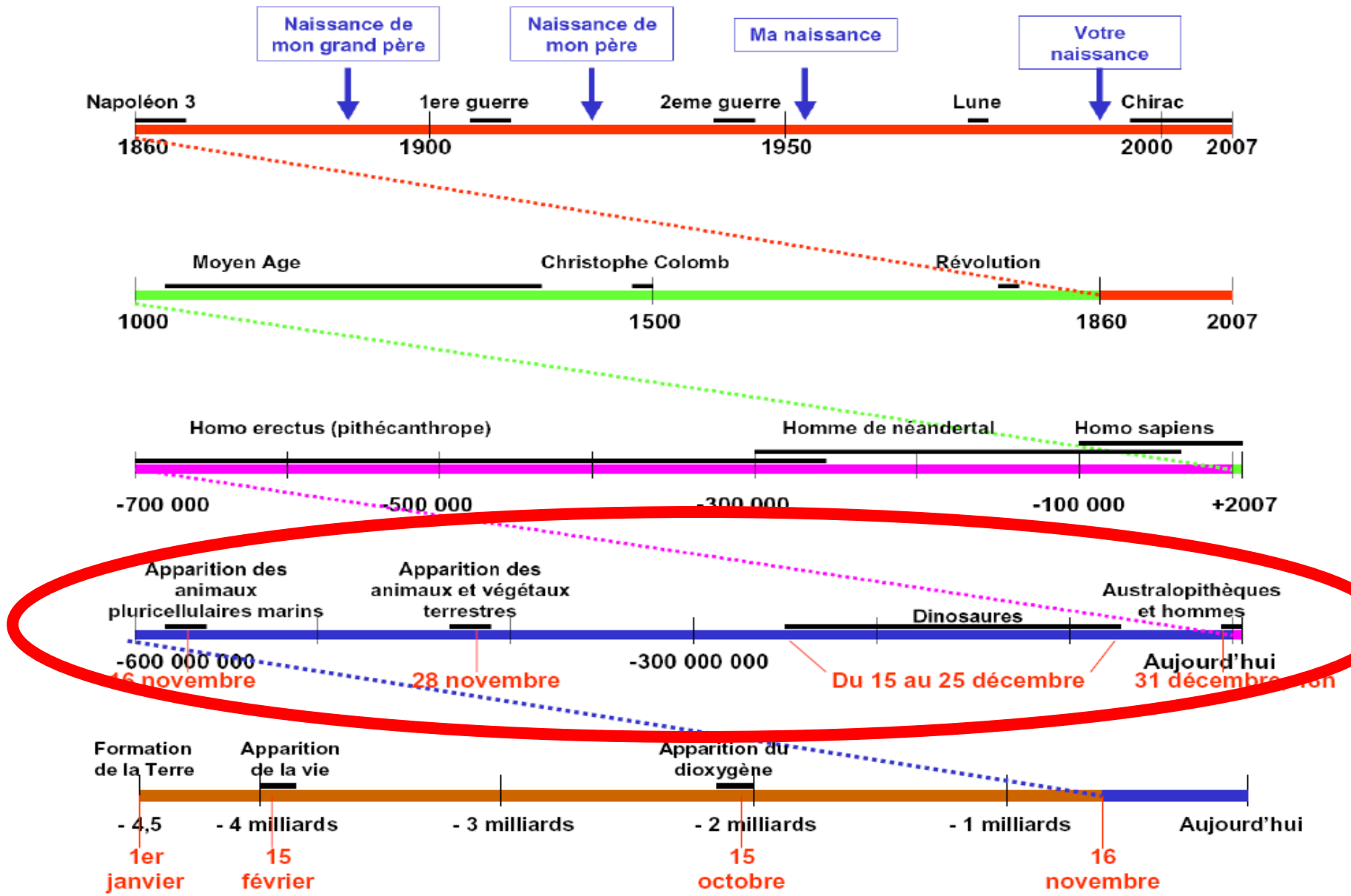
- 20 000 ans (Avant JC)
CO₂ = 200 ppmv
T moyen = 10°C
Niveau de la mer =
-120 m

+ 1 900 ans (Après JC)
CO₂ = 280 ppmv (380 en 2007)
T moyen = 14°C (15°C en 2007)
Niveau de la mer = 0 m (+0,2 en 2007)

+ 2 100 ans (Après JC)
CO₂ = 580 ppmv ????
T moyen = 19°C ???
Niveau de la mer +1
???

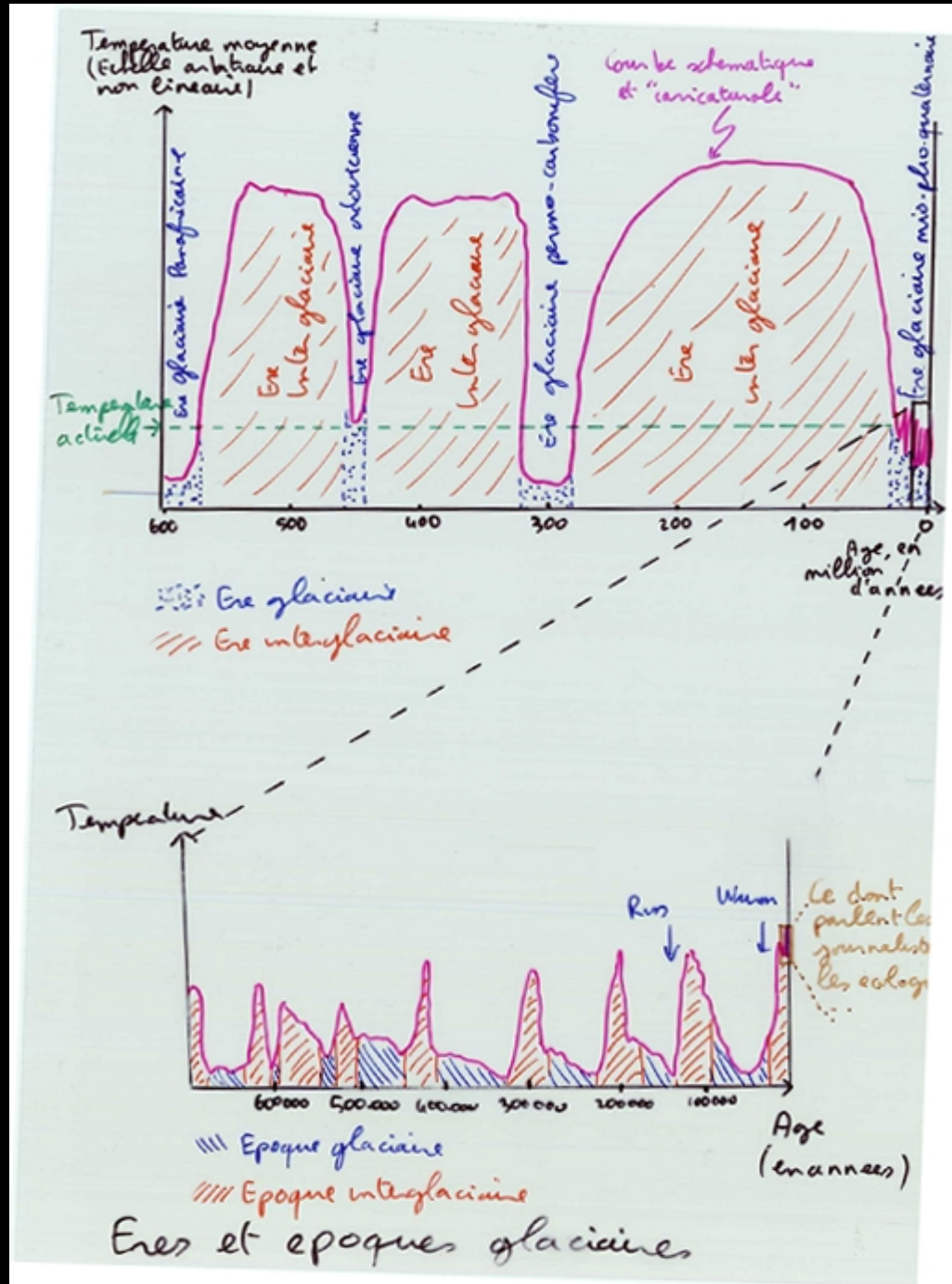
**Les leçons du passé récent sur l'avenir immédiat
(vos enfants et petits enfants).**

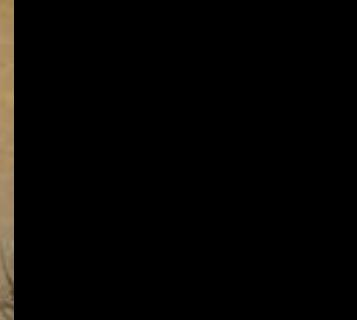
Pour l'avenir plus lointain (dans 1 millénaire) ????



Les variations depuis 600 000 000 d'années

A large Tyrannosaurus Rex stands in the foreground, looking towards a herd of Triceratops and other dinosaurs in a vast, open landscape under a dramatic, colorful sky with a rainbow and a crescent moon.





LE CLIMAT DU LANGUEDOC

Tout se voit sur 4 cartes géologiques jointives
(Bédarieux, Lodève, St Chinian, Pézenas).

On peut ramasser des échantillons somptueux,
faire de belles photos ... Une vraie mine de TP.
Où allez vous passer vos prochaines vacances ?

millions d'années

- ↙ -365 Dévonien : coraux
- 350 Carbonifère inférieur : coraux
- 290 Carbonifère supérieur : fougère arborescente
- 250 Permien : fente de dessiccation et argile rouge
- 210 Trias : évaporite
- 150 Jurassique : coraux
- 90 Crétacé : bauxite et latérite
- 30 Oligocène : palmier et crocodile (biblio !)
- 20 Miocène : coraux

○ Aujourd'hui : plus rien de tout ça.

➔ « Chaud » du Dévonien au Miocène .
Fort refroidissement post-Miocène



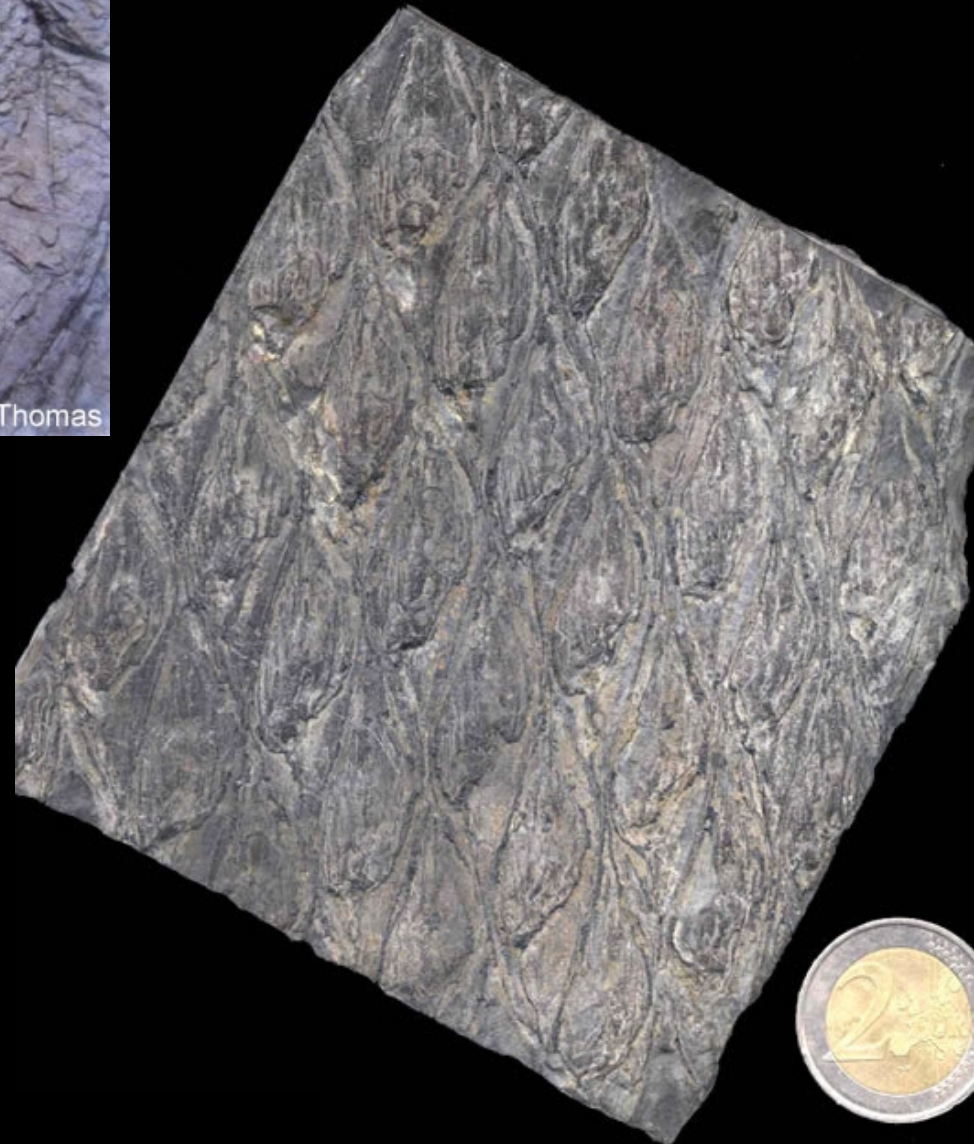
Photographie : Pierre Thomas

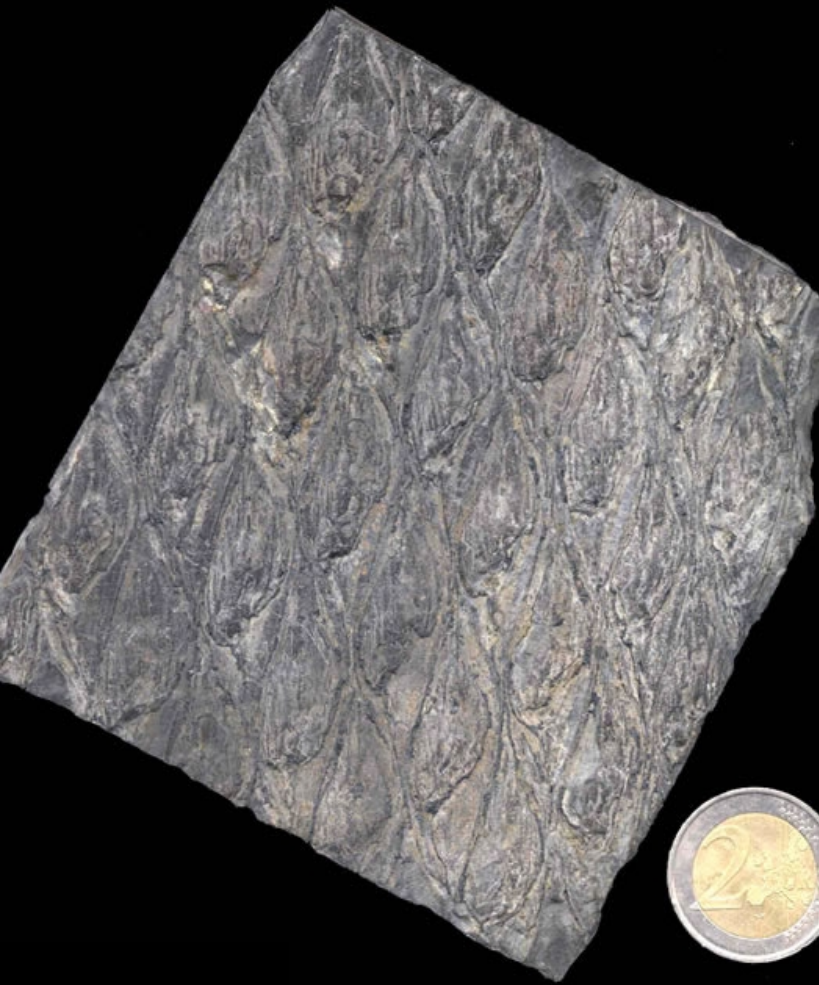
- 290 Ma : des couches de charbons, des fossiles de troncs d'arbres





**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 dû 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**



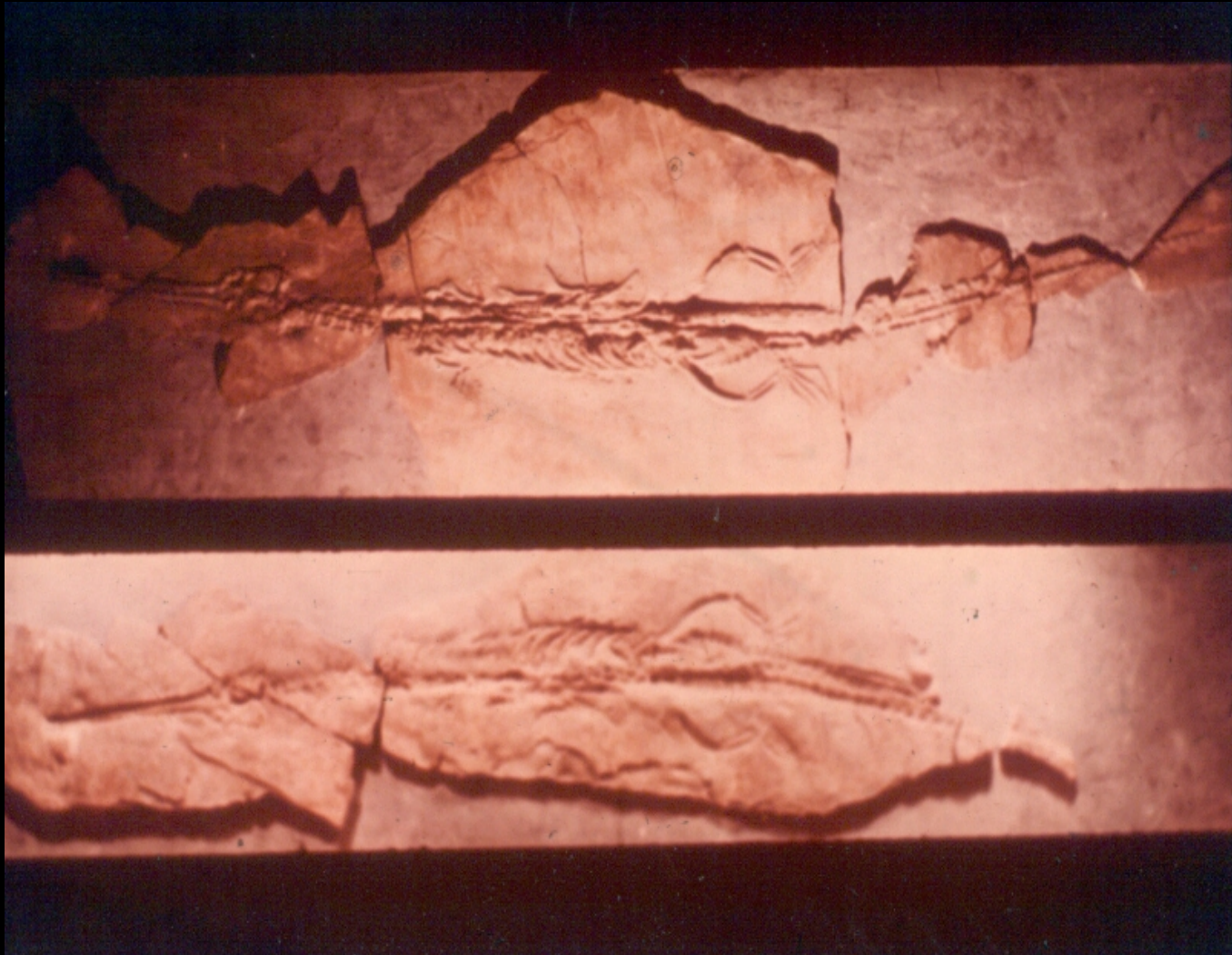
**Des drôles de
roches rouges
datant de – 90 Ma**



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

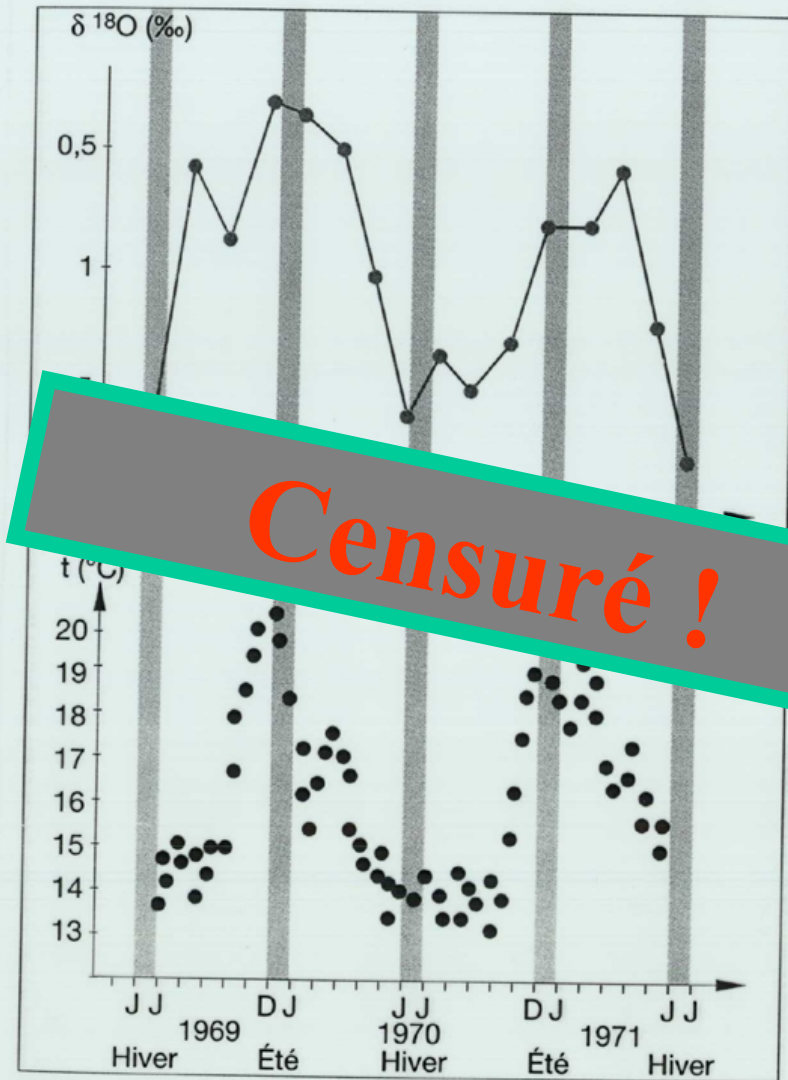


**Et il y a 30 Ma, il ne faisait pas bon se baigner
dans les lacs languedociens !**



D'autres moyens existent, mais c'est plus cher.

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

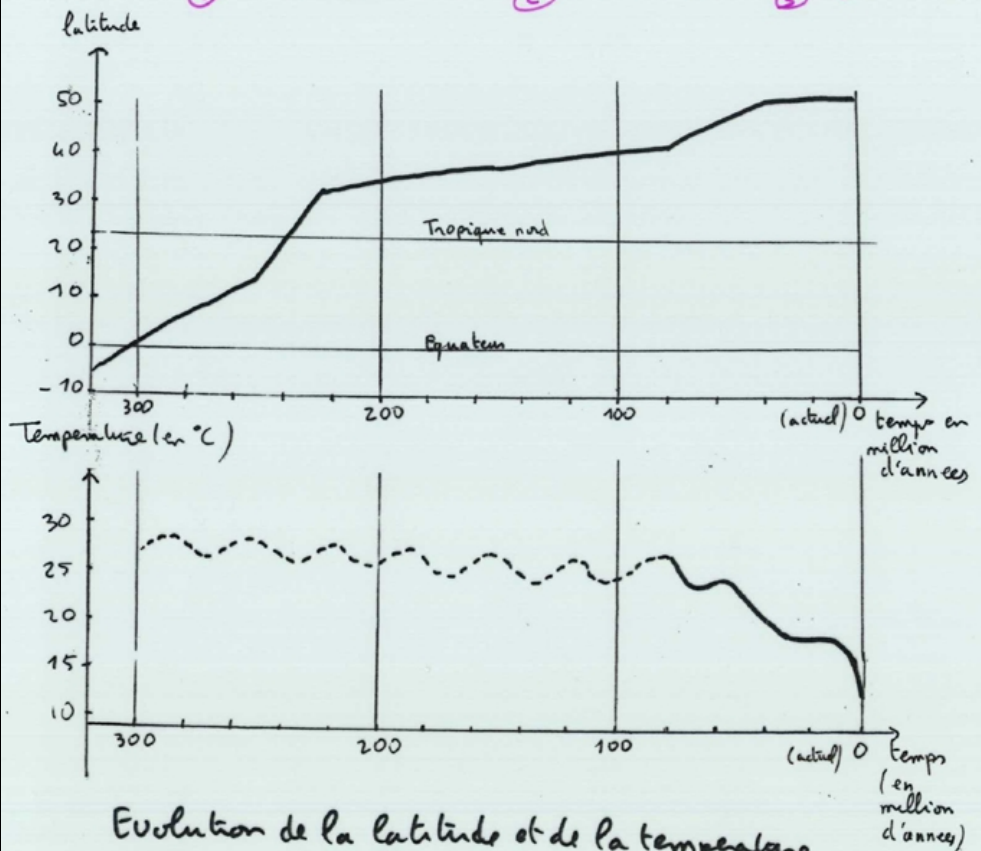
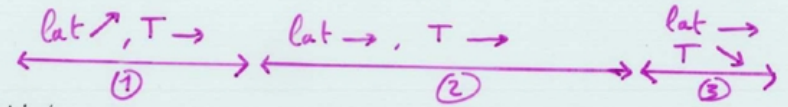


3 Relation entre le δ des carbonates des diverses couches d'un test de *Patella tabularis* (Mollusque gastéropode marin, prélevé sans l'hémisphère Sud) et la température de l'eau.

Avec tout ça, étudions les climats, par exemple de l'Angleterre. Ils ont changé. Mais si c'était l'Angleterre qui avait changé de place ?



3 "époques" (en simplifiant)



Evolution de la latitude et de la température moyenne annuelle du sud de l'Angleterre

— Données paléobotaniques précises

- - - estimation d'après les données paléobotaniques

① Le climat mondial se réchauffe

② Le climat mondial est stable (et chaud)

③ Le climat mondial se refroidit

Un autre endroit où le climat a changé : la Namibie



Stries glaciaire en Namibie
(- 300 millions d'années)



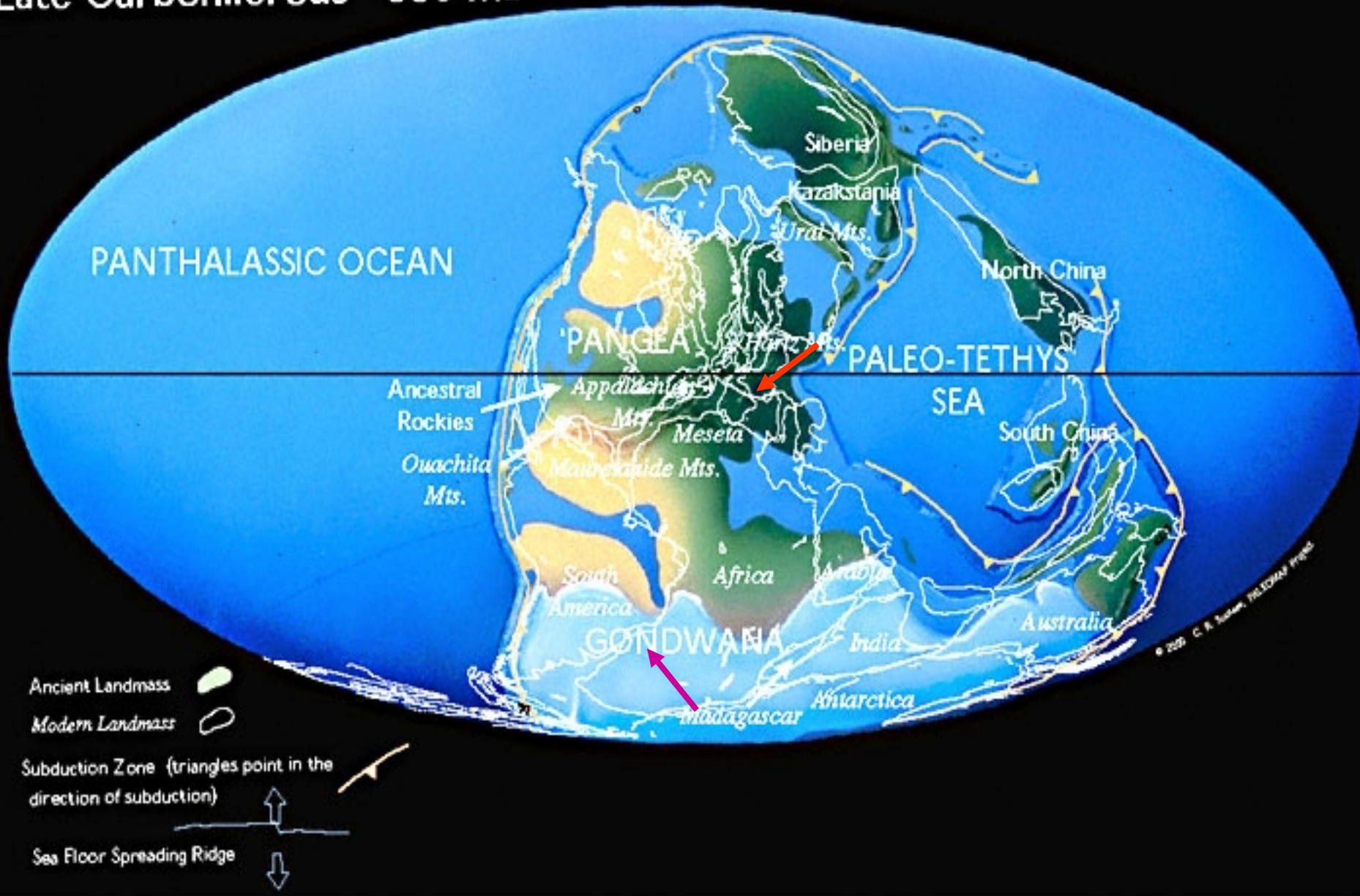
La
France à
- 300 Ma



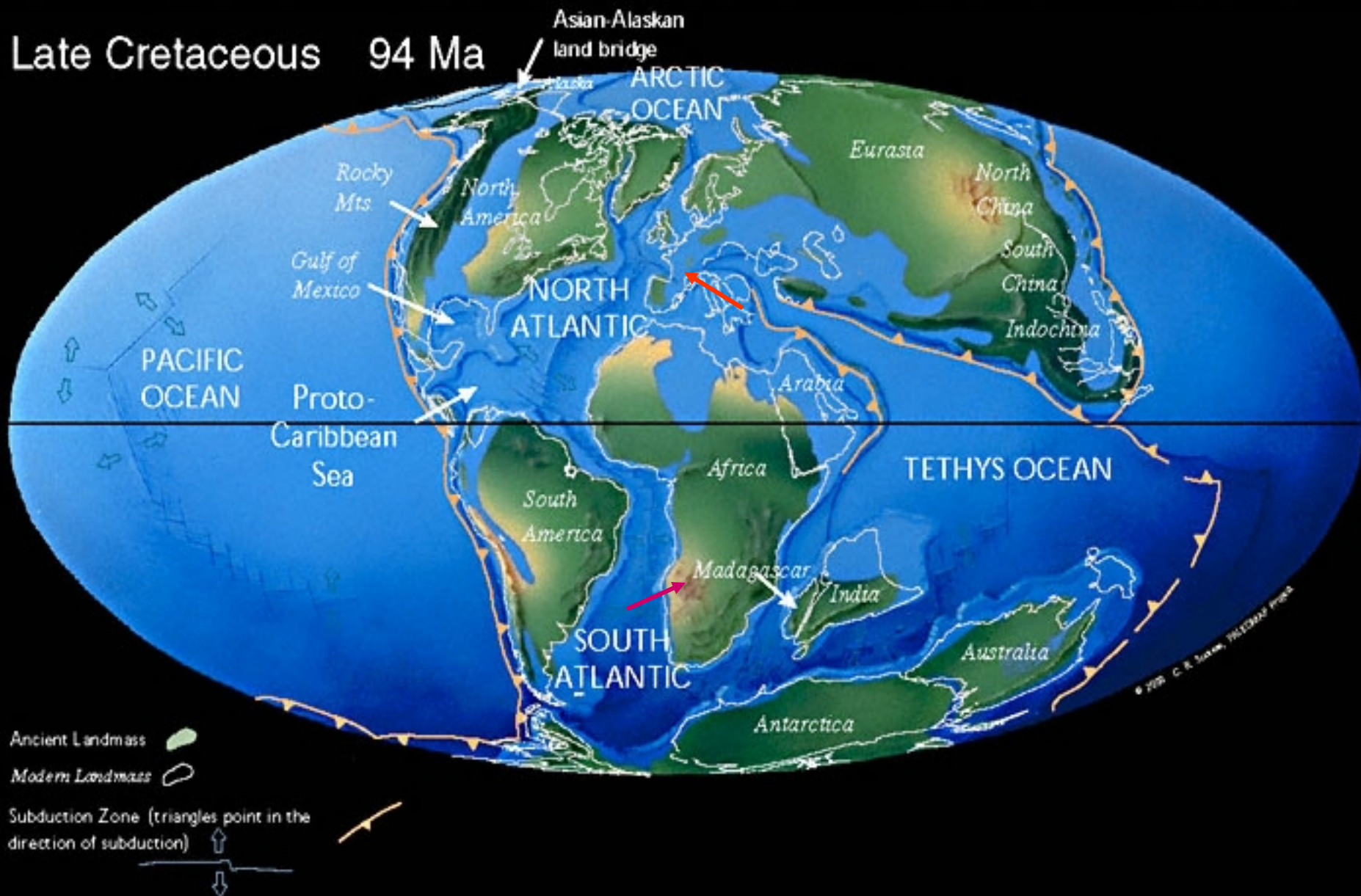
Stries glaciaires au Groenland (petit âge
glaciaire, - 200 ans)

On fait des reconstitutions paléo-géographico-climatiques

Late Carboniferous 306 Ma

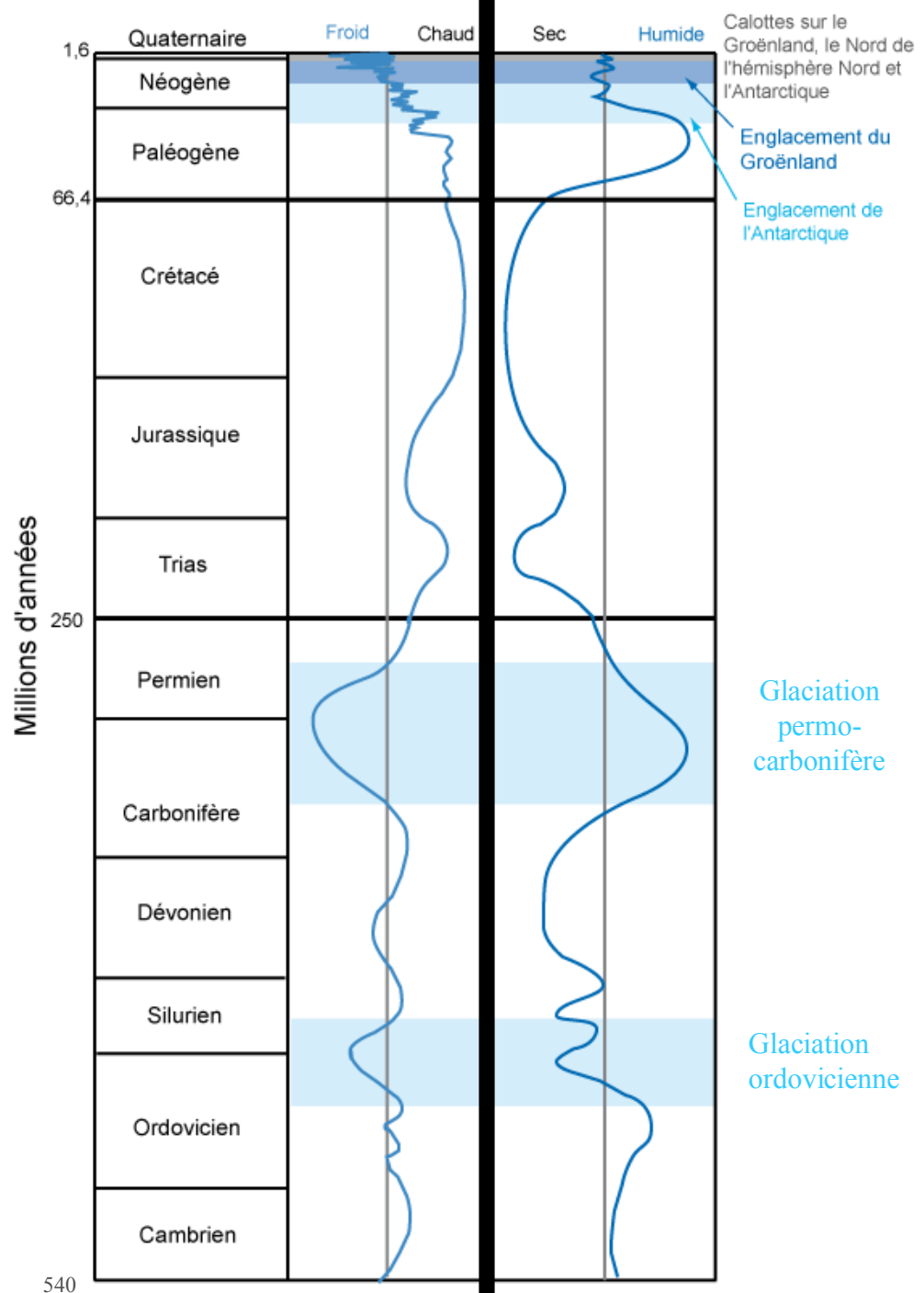


Et oui, le temps change !



**Les variations
globales du climat
depuis le début de
l'ère primaire
(- 540 Ma).**

**On vit
actuellement en
période froide**



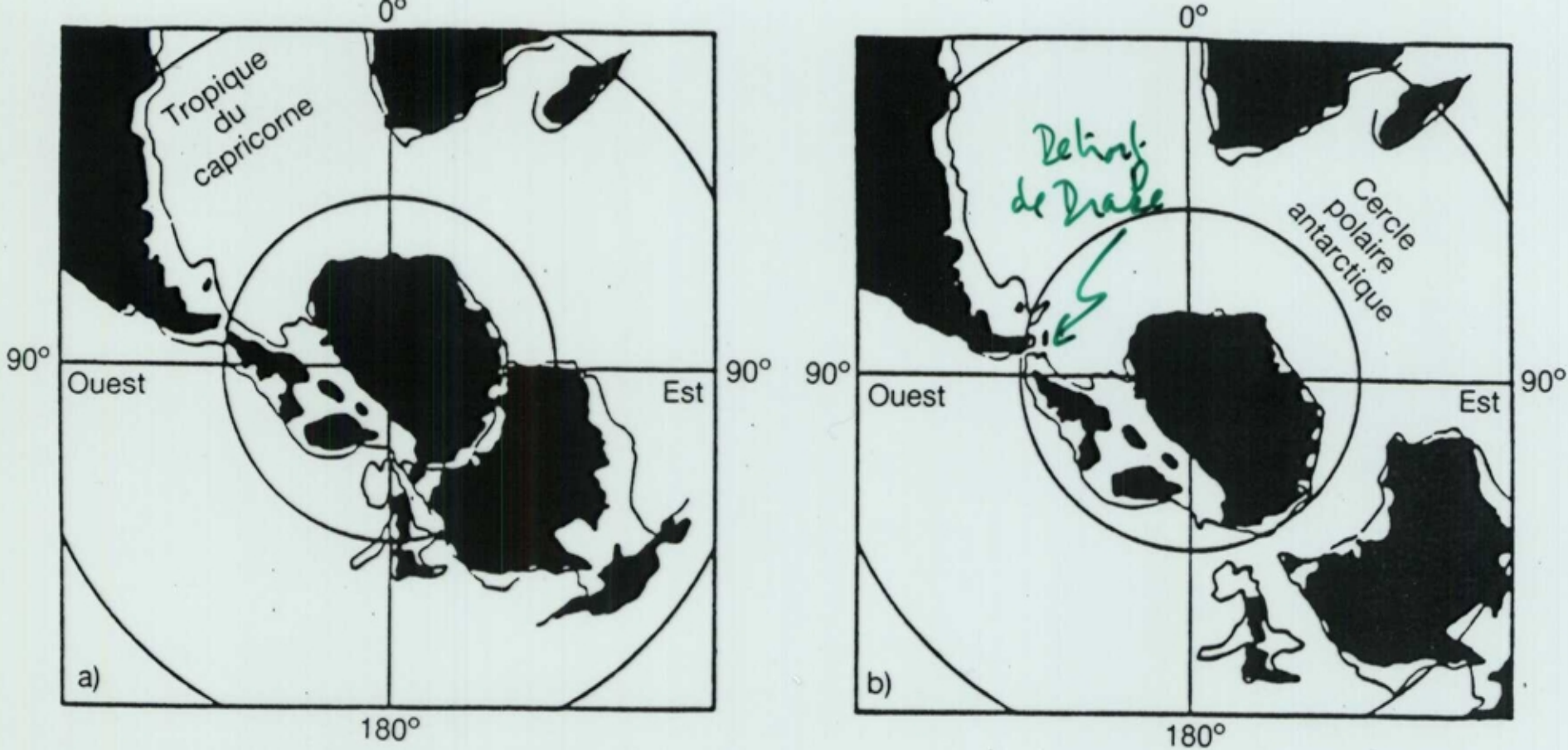


Figure I.10. Evolution paléogéographique de l'hémisphère sud au Cénozoïque (le canevas en latitude et longitude est celui d'aujourd'hui). a. Eocène (≈ 50 Ma BP); b. Oligocène (≈ 35 Ma BP). La séparation des continents de l'hémisphère sud (en particulier l'ouverture du Détroit de Drake entre la pointe de l'Amérique du Sud et la péninsule de l'Antarctique occidentale) a eu un impact profond sur la circulation océanique du courant Circum Polaire Antarctique et sur le climat de l'Antarctique (extrait de Tarling, 1978).

Ces variations globales peuvent être dues aux variations des courants marins et/ou atmosphériques, qui dépendent de la position des continents, des montagnes ...

**Elles peuvent aussi
être dues à des
variations du CO₂
atmosphérique**

Comment mesure-t-on le CO₂ 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 O₂)
- Avant 600 M.A. : effet du soleil. Les astronomes nous indiquent la constante solaire de l'époque, et, connaissant la température de l'époque, on modélise l'effet de serre, donc la teneur en CO₂.
- A l'origine de la Terre : rapport H₂O/C des chondrites, et transformation en CO₂ de tout le C mondial.

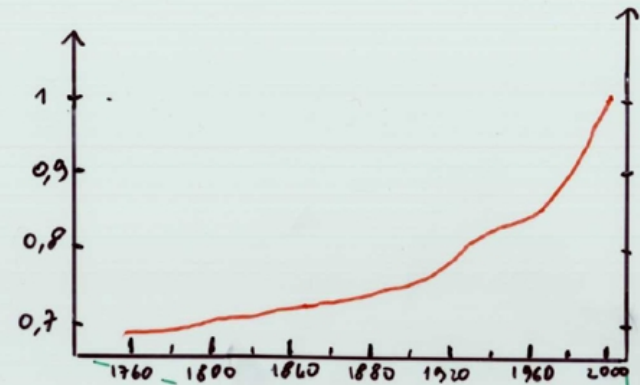
Et voici les variations de CO₂ :

- depuis 300 ans (celles dont parle la presse),

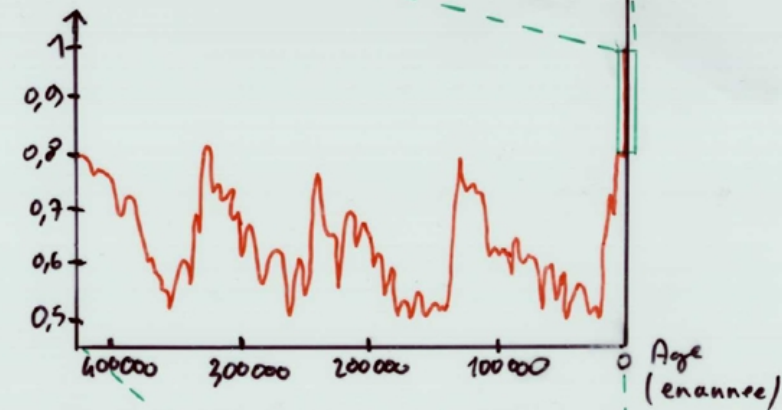
- depuis 420 000 ans

- depuis 600 000 000 ans

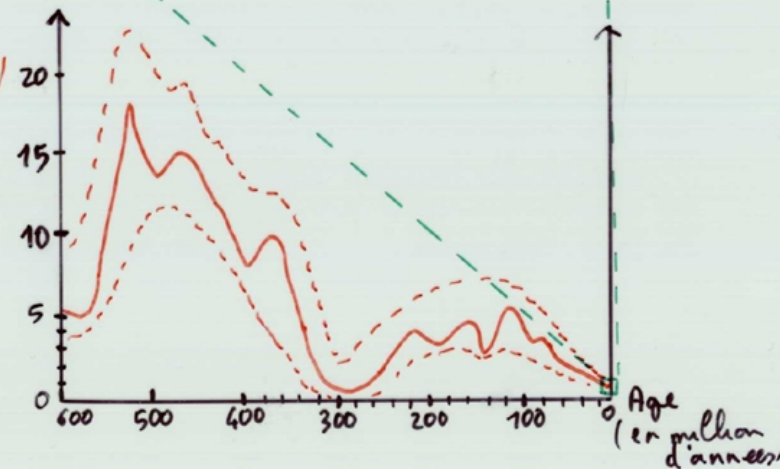
CO₂
(par rapport
à l'actuel)



CO₂
(par rapport à
l'actuel)



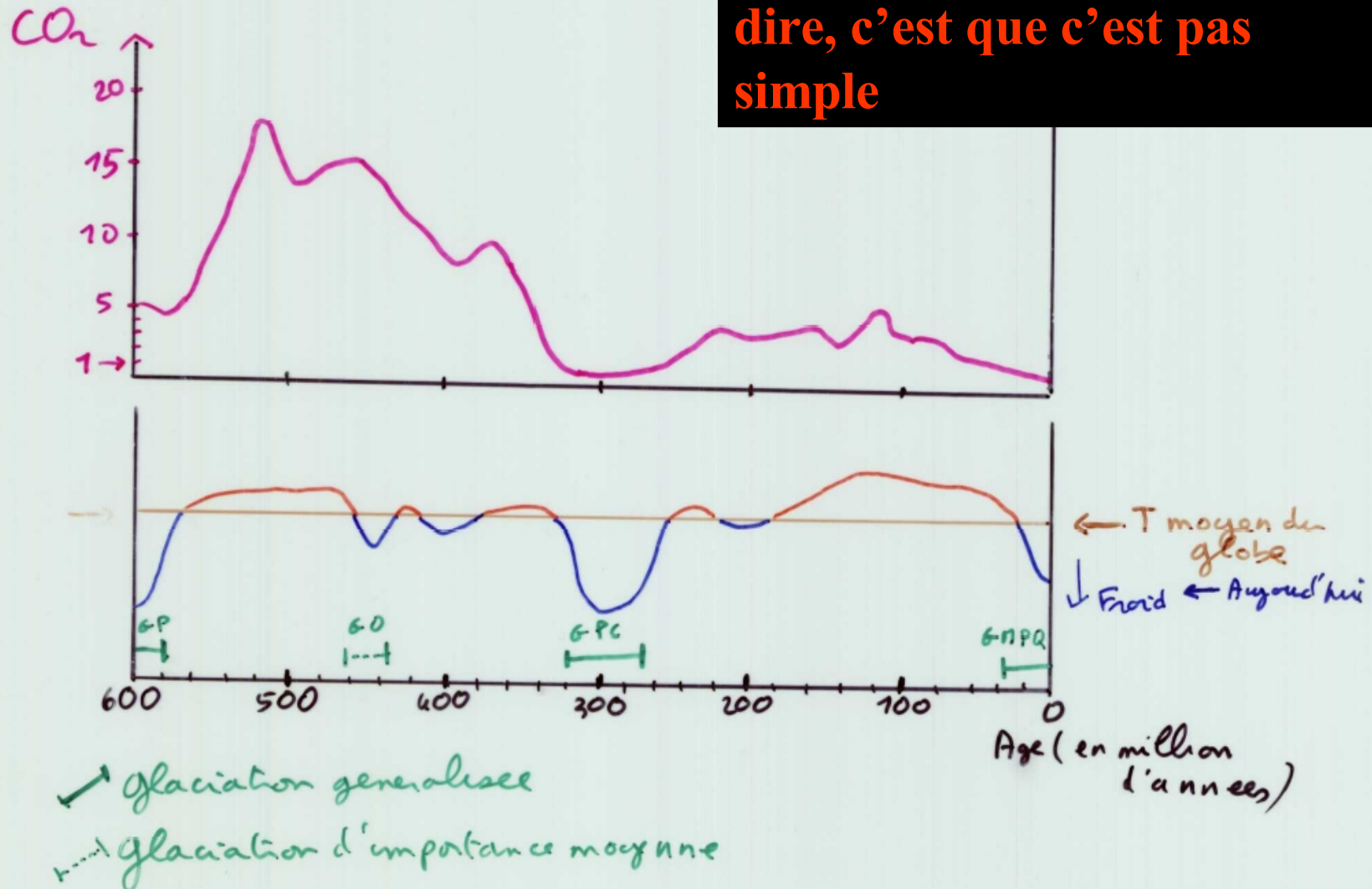
CO₂
(par rapport
à l'actuel)



Et voici les relations

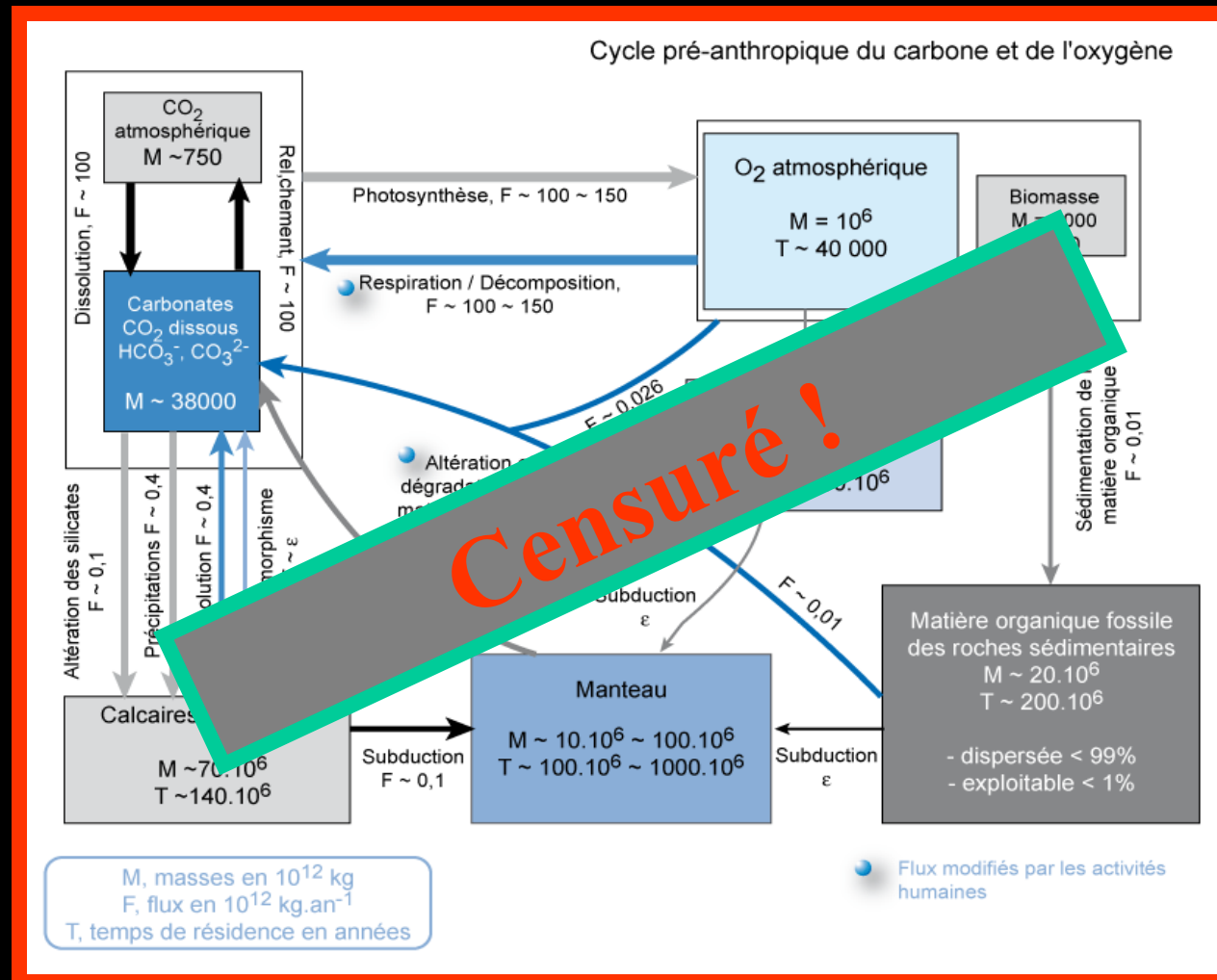
variations du climats / variations du CO₂

Le moins que l'on puisse dire, c'est que c'est pas simple

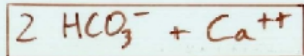


Qu'est ce qui peut faire varier le CO₂ atmosphérique ?

L'utilisation variable du carbone par la nature



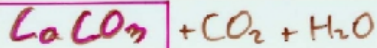
La précipitation/dissolution
des carbonates (en surface)



Précipitation
des carbonates

Dissolution des
carbonates

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



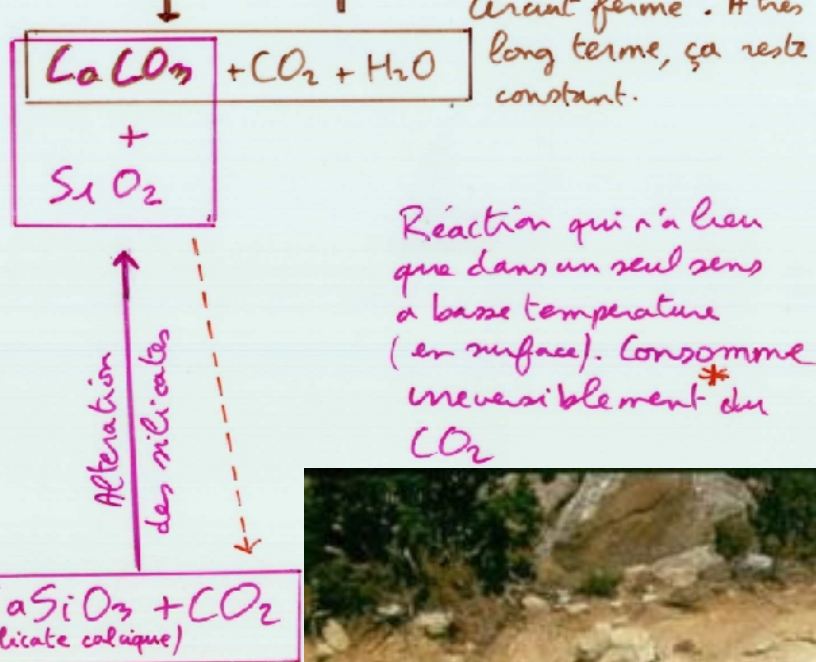
Fabrication et dissolution des calcaires (CaCO_3) : bilan presque nul



Photographie : Pierre Thomas

Dissolution : absorbe du CO_2

Précipitation : libère du CO_2



L'altération des silicates calciques : pompe « définitive » de CO₂

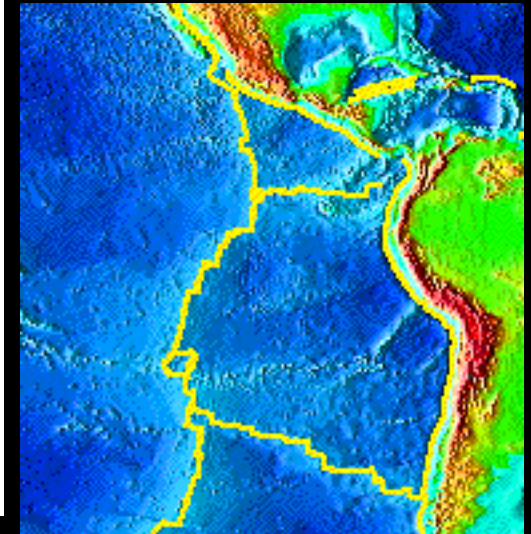
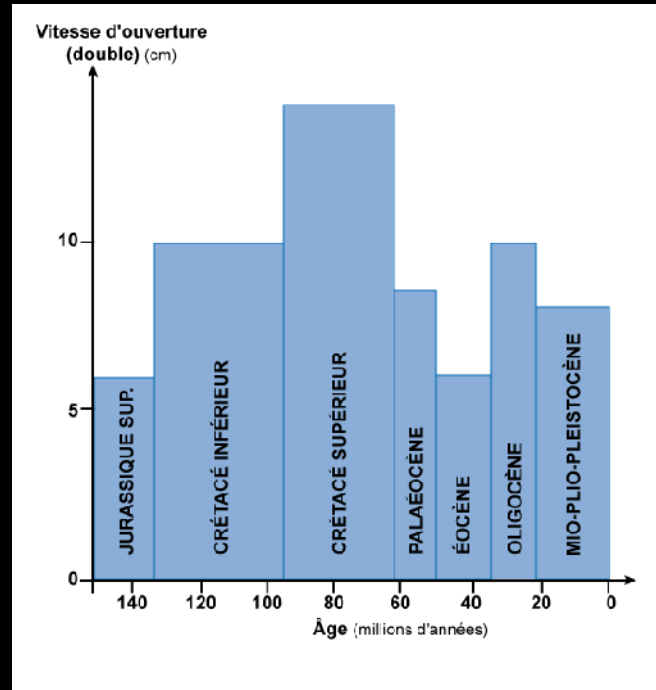


Photographie : Pierre Thomas

**La formation
des
montagnes,
qui favorise
érosion et
altération fait
baisser le
CO₂ et
refroidit le
climat
mondial**

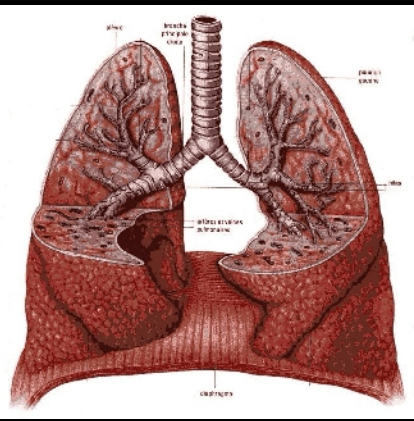


Et puis bien sûr il y a les volcans qui rejettent du CO₂



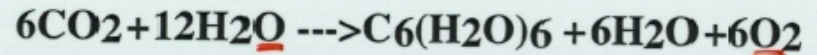
**Calcaire + montagne +
charbon et pétrole + volcan,
tout ça varie → Le CO₂ varie
→ Le climat varie**

Photosynthèse et respiration : bilan nul dans les écosystèmes équilibrés, sauf si ...

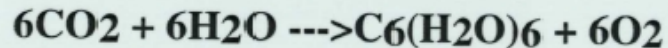


PHOTOSYNTHÈSE

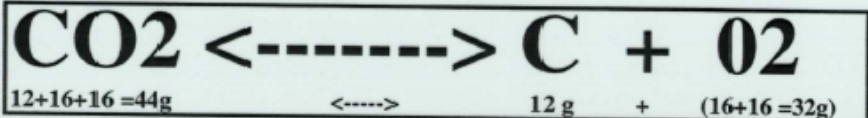
Equation tenant compte du mécanisme réactionnel



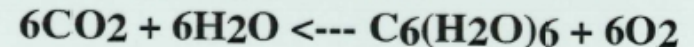
Première simplification, ne tenant pas compte des mécanismes réactionnels, mais valable quand au bilan de masse



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

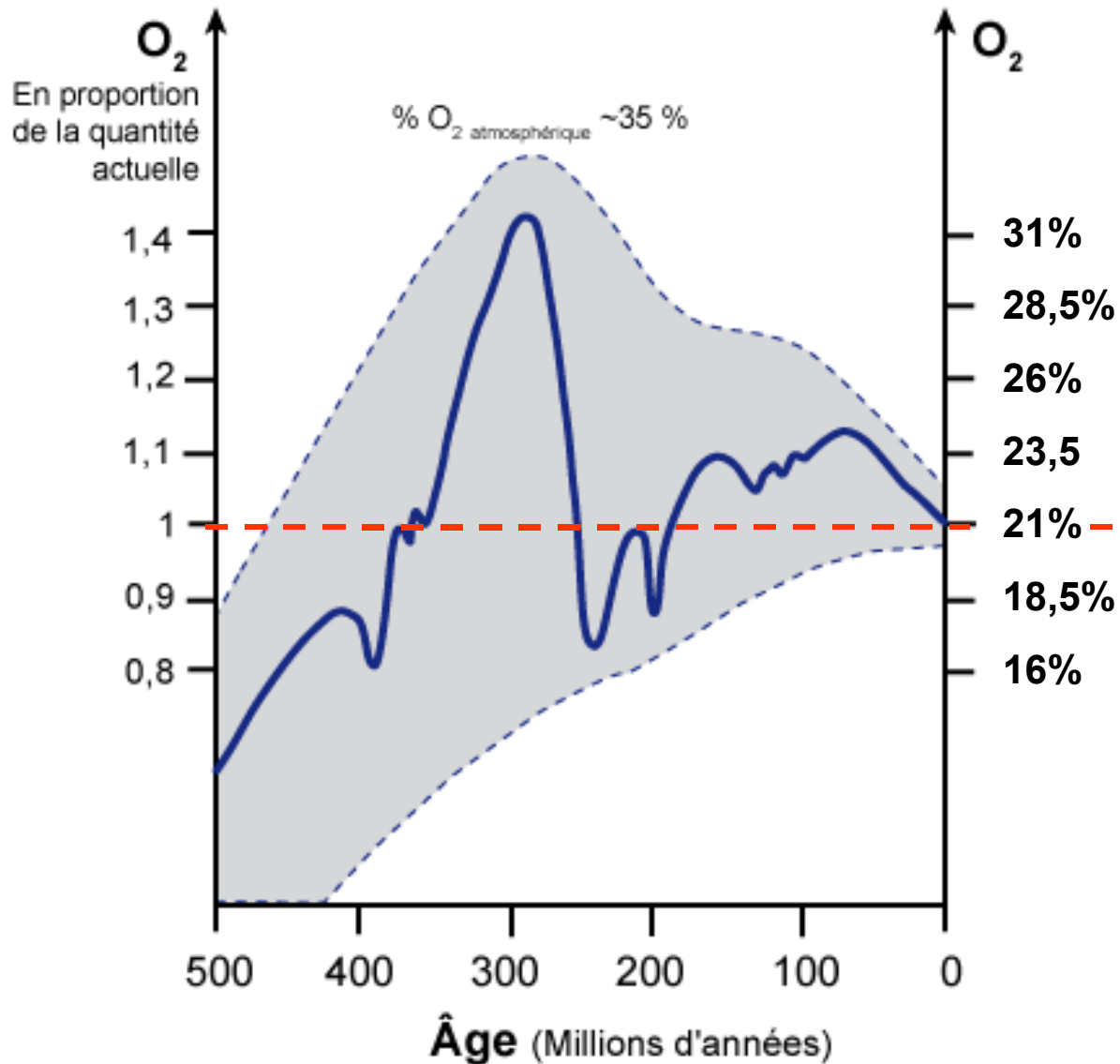




**Et l'Oxygène de l'atmosphère,
varie-il ?**

**Je censure la méthode, et
j'arrive tout de suite au
résultat**

Le résultat



— Aujourd'hui

**On aurait pu le
savoir depuis 150
ans si les
disciplines
scientifiques
n'étaient pas si
cloisonnées. Pour
que d'énormes
insectes puissent
voler, il faut 50%
de plus d'oxygène**



**Une forêt il y a 300
millions d'années**

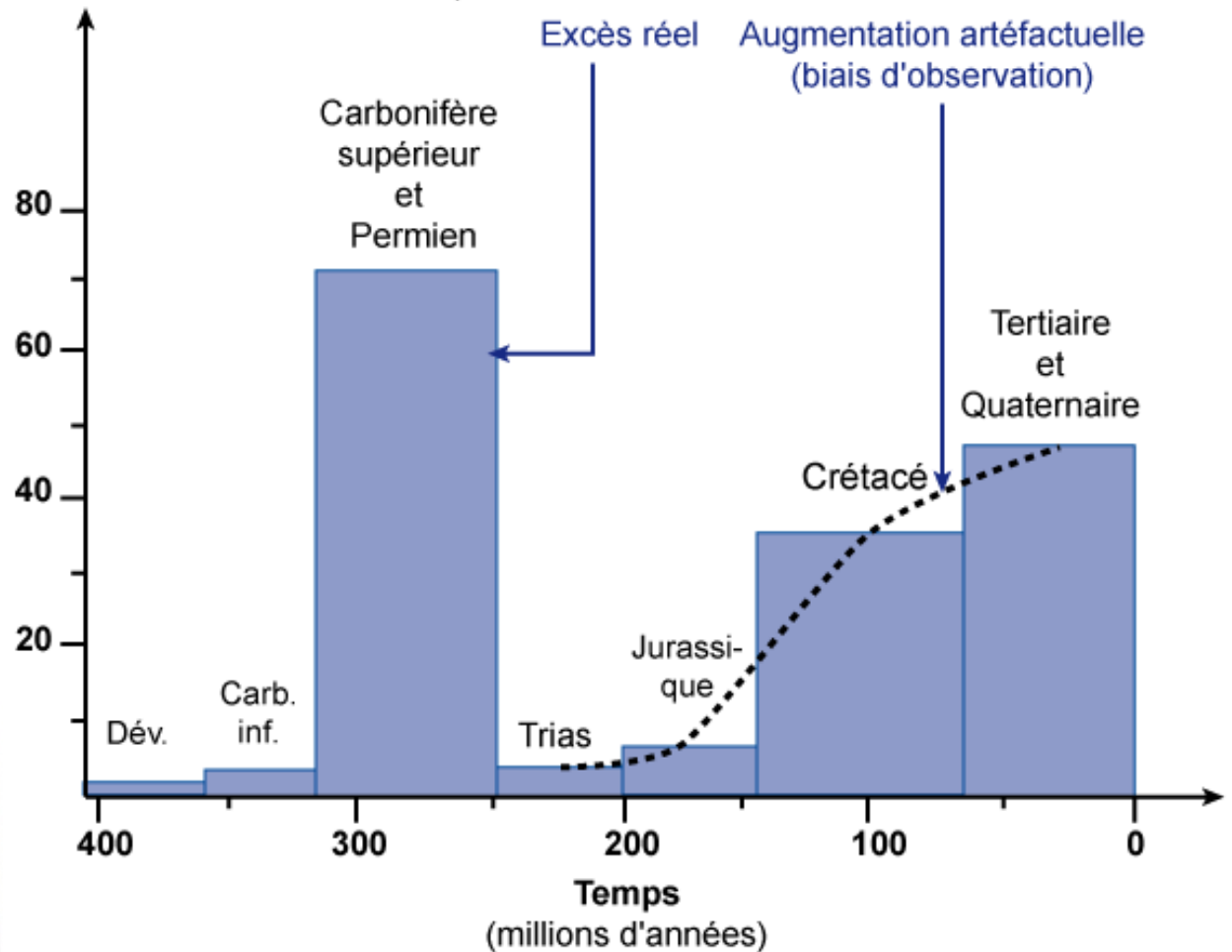
Une explication



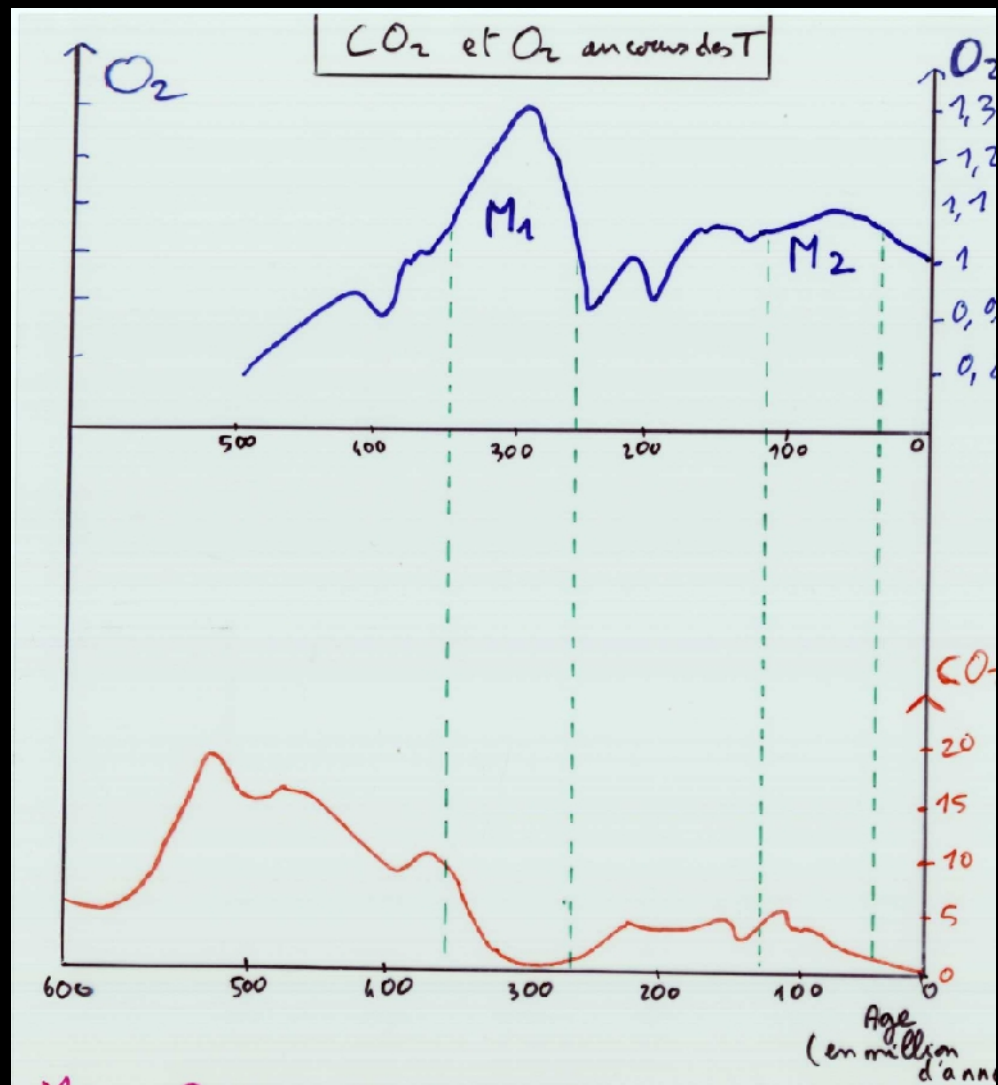
ou



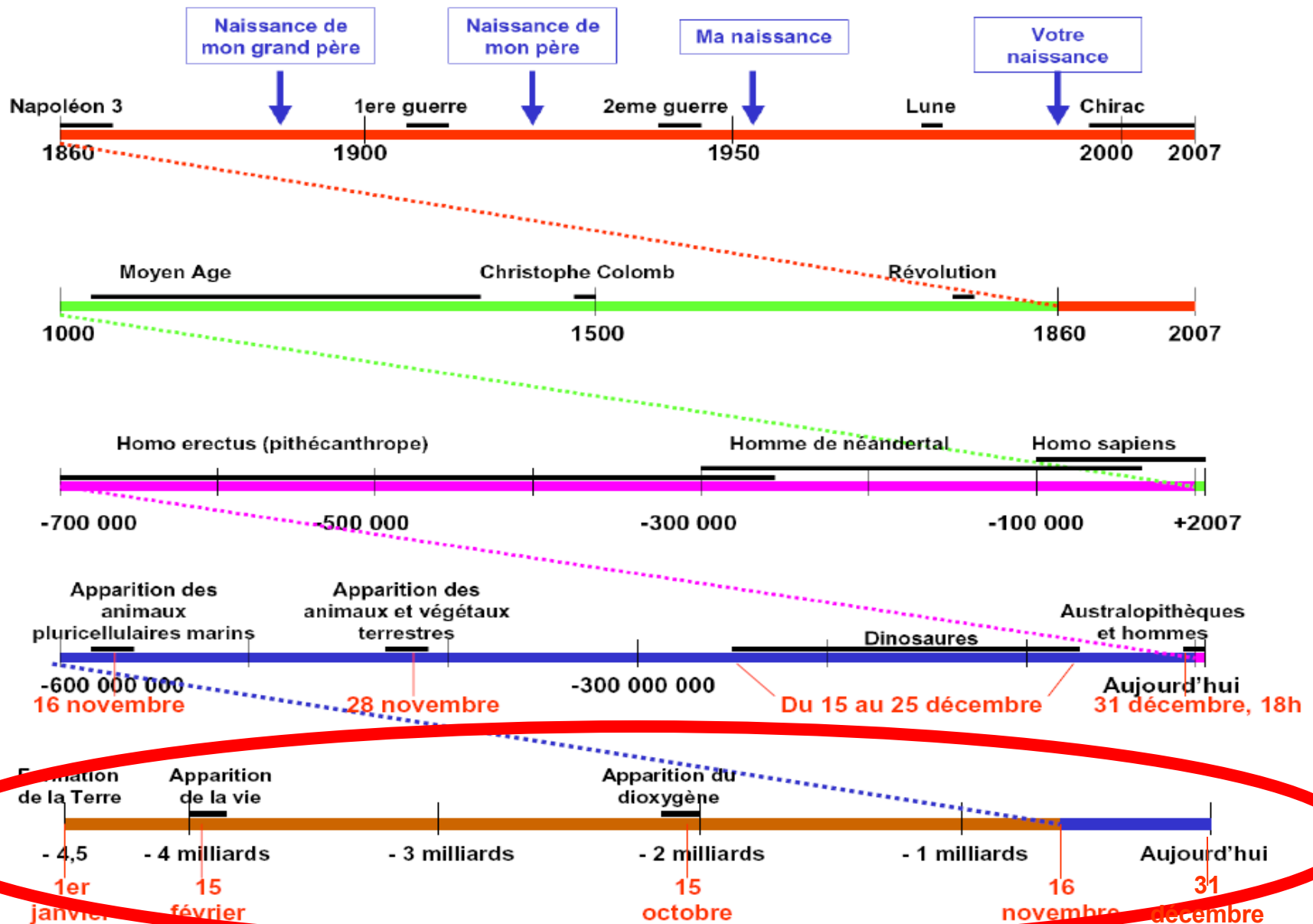
Réserves de charbon exploitable
(milliards de tonnes / millions d'années)



Relations entre les variations de CO_2 et d' O_2 . Rien n'est simple, mais tout peut (qualitativement) s'expliquer !



- M_1 : Maximum d' O_2 du carbonifère
Minimum de CO_2 du carbonifère
hypothèse : lignine / champignon, + chaîne herbivore
- M_2 : Maximum d' O_2 du Crétacé
Maximum de CO_2 du Crétacé
hypothèse : dorsale active $\rightarrow \text{CO}_2$
 \rightarrow transgression
 \rightarrow fossilisation marine



Les variations depuis 4,5 milliards d'années

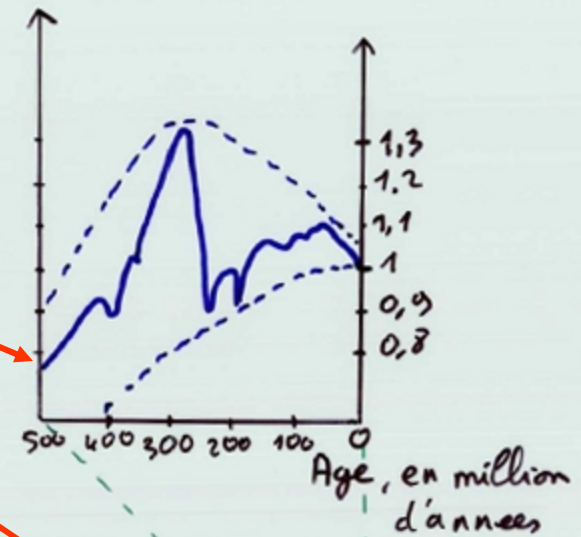


Et avant le début de
l'ère primaire ?

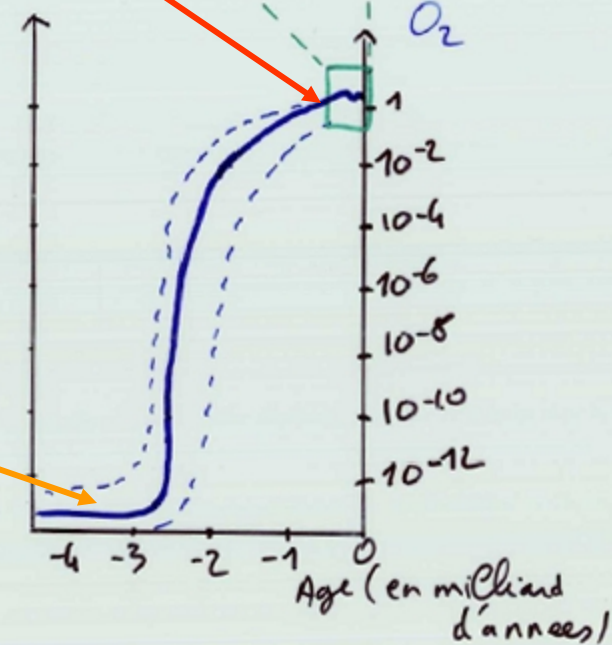
Voici l'évolution de
l'O₂

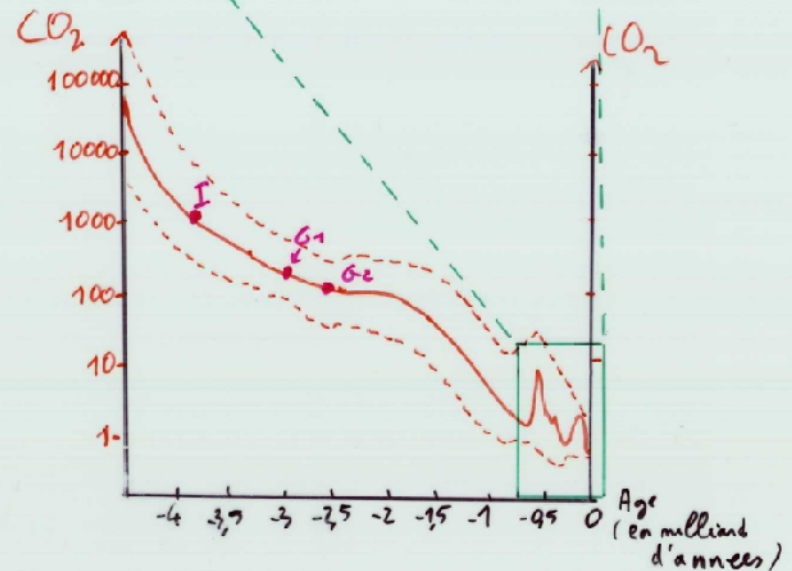
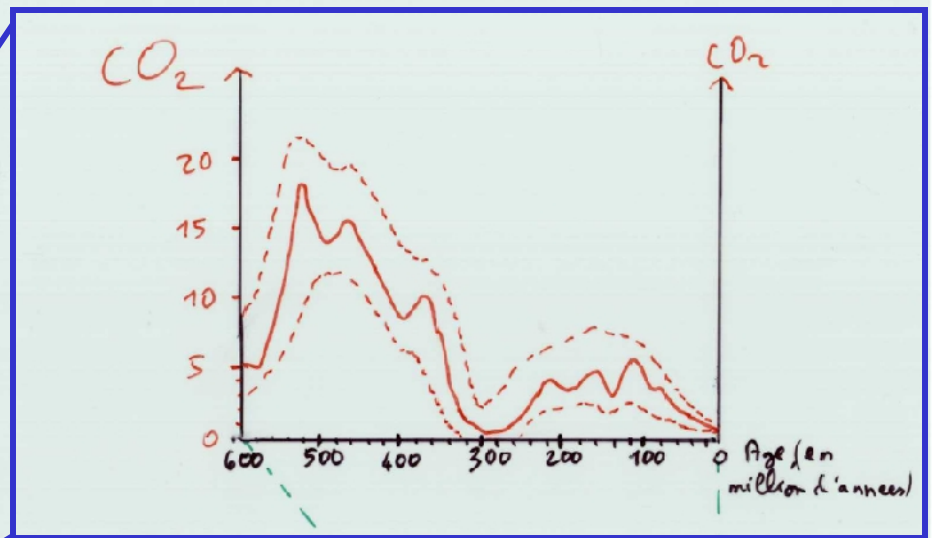
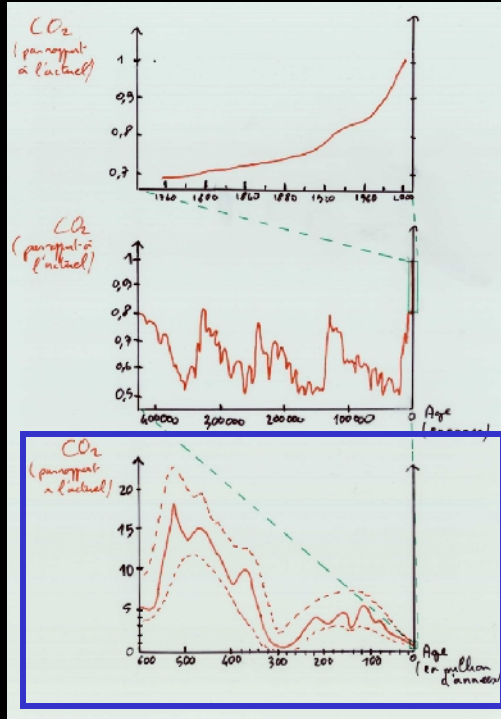


O₂, par
rapport à
l'atmosphère
actuelle



O₂
par rapport à
l'atmosphère
actuelle





I = sédiments d'Isna

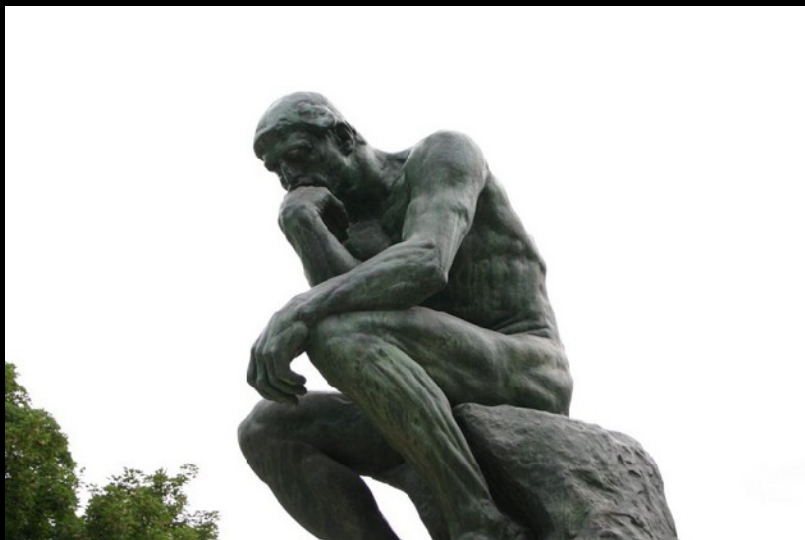
G₁ = glaciation du Witwatersrand

G₂ = glaciation Huronienne

Variations géologiques du CO₂ atmosphérique

**Et le CO₂
avant le début
de l'ère
primaire ?**

En guise de première conclusion



**Est-on dans une période de hausse ou de
baisse du CO₂ atmosphérique et de la
température ?**

(ou commentaires sur la relativité du temps)

A l'échelle de 100 ans

Depuis 1 siècle, le CO₂ a augmenté de 30 % et la température moyenne de la Terre a augmenté de 0,6-0,8°C. Les perspectives indiquent un doublement du CO₂ et une augmentation de la température de 2 à 6°C d'ici la fin du siècle. C'est ce que disent journaux, écologistes ...

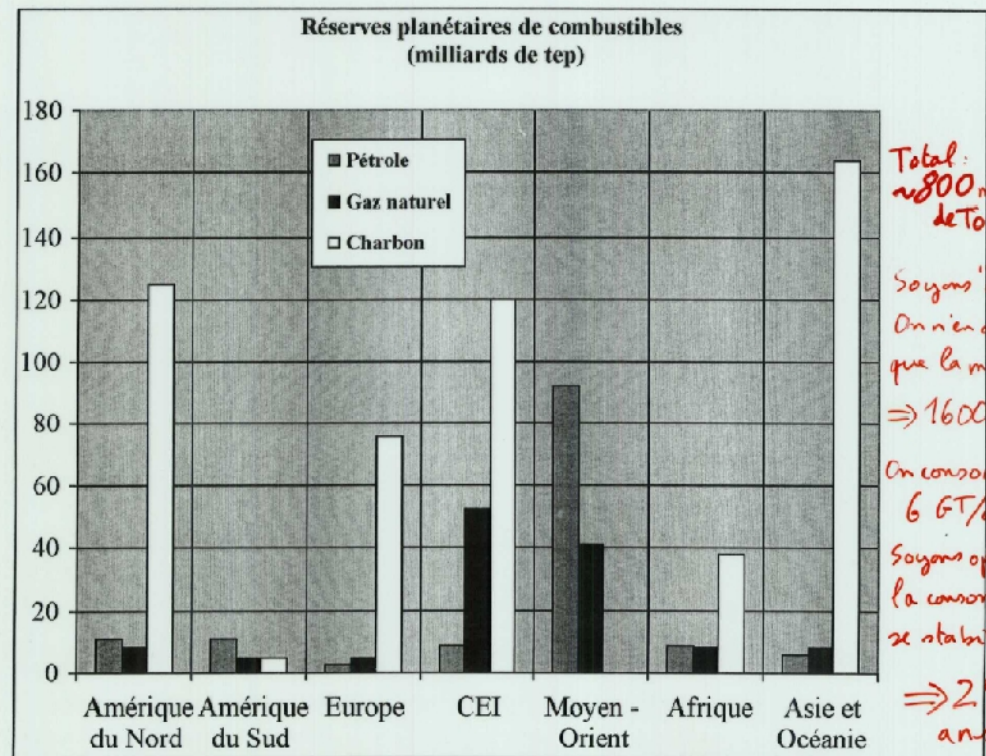
Prenons du recul « chronologique » et « géologique ».

A l'échelle des derniers 1000 ans

Depuis 1000 ans, la température moyenne ne fait que monter et descendre d'1 à 2°C, avec des périodes froides (ex : le Petit Age Glaciaire), et des périodes chaudes (ex : le Groenland vert des XI et XIIème siècle). Le CO₂ était stable pendant ce millénaire, et les hausses et baisses sont vraisemblablement dues à des variations de l'activité solaire. La hausse constatée depuis 150 ans est due pour partie à cette variation d'activité solaire (≈ 50%), et pour partie aux activités humaines. Et comme on ne peut agir sur le Soleil, agissons contre le CO₂ !

A l'échelle des prochains 1000 ans

Il y a entre 40 et 80 ans de réserve de pétrole, le double ou le triple de gaz, pour quelques siècles de charbon. Dans 100 à 500 ans, l'augmentation du CO₂ et de la température s'arrêteront par la force des choses et le CO₂ « redescendra » en quelques siècles. Mais d'ici là, Touareg et Hollandais en « baveront » ! Mais qu'est-ce que 1000 ans pour la planète ?



**Lyon dans
quelques
dizaines de
milliers
d'années**



A l'échelle de 1 000 000 d'années

La hausse précédente s'inscrit dans des oscillations naturelles et périodiques de température et du CO₂ qui durent depuis quelques millions d'années. La température moyenne de la Terre oscille naturellement entre +10 et +16 °C ; on est actuellement à +14°C. Mais on va peut-être atteindre +20°C dans 1 siècle, et sortir du domaine « habituel » des variations de Températures dans les quelques siècles qui viennent. Puis ça redeviendra normal, faute de CO₂ à relacher.

L'astronomie nous indique que la prochaine glaciation commencera dans 40 000 à 80 000 ans.

Ces variations sont dues aux interactions complexes entre orbite de la Terre, océans, calottes glaciaires, CO₂ ...



A l'échelle de 100 000 000 d'années

Depuis 80 millions d'années, la tendance globale (malgré les oscillations de toutes échelles vues précédemment) est à la baisse du CO₂ (divisé par 6 en 80 000 000 ans) et à une baisse de la température de 10 à 15 ° (T moyen de 25 à 30°C il y a 80 000 000 d'années).

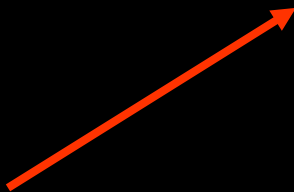
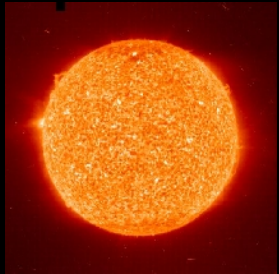
Entre -280 et - 80 millions d'années, la tendance était au contraire à la hausse du CO₂ (multiplié par 6) et de la température moyenne (qui est passée de 12°C à 25-30°C)

La Planète Terre a très bien résisté à ces variations, mais pas tous ses habitants (cf dinosaures)

Ces variations sont dues aux variations d'importance relative entre volcanisme, formation de montagnes, altération des roches, formation des calcaires ...

On peut supposer que le « froid » actuel durera tant que durera l'Himalaya (gigantesque pompe à CO₂), pour encore pas mal de millions d'années. Quand l'Himalaya sera « aplani », le CO₂ remontra, et la température aussi, à moins que d'autres montagnes ne se forment en pays intertropical.

CO2



A l'échelle de 4 500 000 000 d'années

Ces hauts et bas qui durent depuis quelques centaines de millions d'années s'inscrivent dans des « tendances générales » :

(1) le CO2 baisse ; il a été divisé par 100 000 depuis l'origine de la Terre.

Cette diminution est due à l'accroissement lent et progressif de la quantité des calcaires terrestres.

(2) Pendant la même époque, l'énergie rayonnée par le soleil a augmenté de 50 % .

(3) Et en gros, aux innombrables oscillations près, la hausse du soleil a été compensée par la baisse du CO2 : La température de la Terre est toujours restée entre 0 et 100°C (sauf une ou deux fois il y a – 650 000 000 d'années, époque où la Terre a sans doute été une boule de glace, gelée des pôles à l'équateur).

Pourvu que ça dure !!!!!!!

En guise de conclusion finale



LA FIN DE LA VIE SUR TERRE

La puissance rayonnée par le soleil a déjà augmenté de 40% depuis 4 GA, et ça va continuer !!

Deux solutions sont envisageables :

1 - L'augmentation de l'activité solaire sera compensée par une diminution de l'effet de serre, due à la précipitation des carbonates qui "pompe" le CO₂ (ça marche très bien comme ça depuis 4 GA).

--> La température restera constante, mais le CO₂ deviendra tellement bas que la photo-synthèse deviendra impossible (la teneur en CO₂ est déjà le facteur limitant de la photosynthèse)*.

2 - La précipitation des calcaires n'absorbera pas assez de CO₂ et l'effet de serre ne diminuera pas assez.

--> La température augmentera et la vie deviendra impossible**.

Dans les 2 cas, ce sera la fin de la vie

* Depuis quelques dizaines de millions d'années, la vie a "inventée" la photosynthèse en C₄, beaucoup plus efficace.

** Les bactéries hyperthermophiles nous montrent qu'il ne faut pas désespérer.