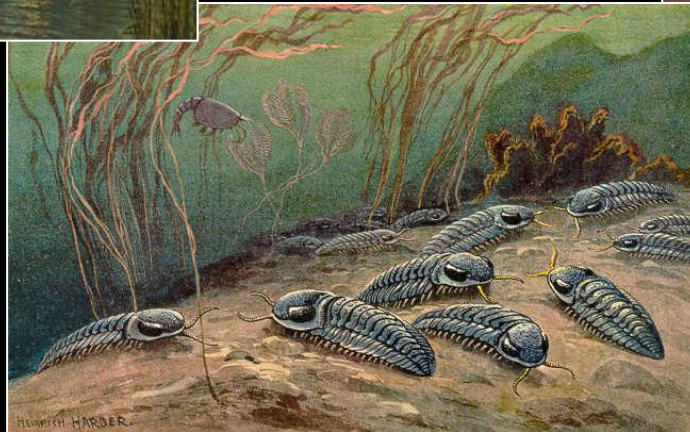
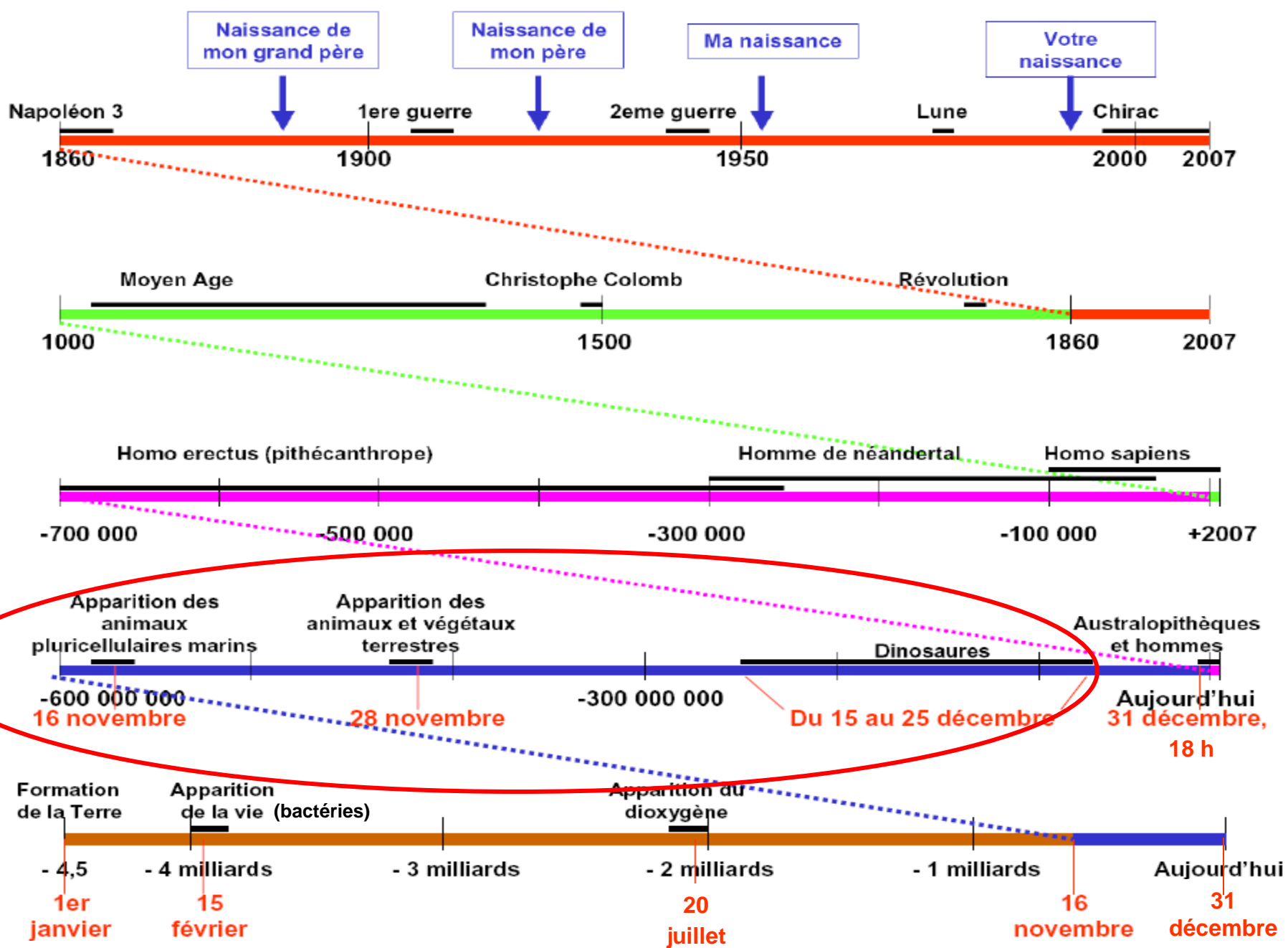


**Et maintenant, l'histoire des climats et de l'atmosphère à l'échelle des 600 derniers millions d'années (depuis qu'il y a des animaux « complexes »), puis de 4 milliards d'années.**





**L'échelle de 600 000 000 Ma (en « oubliant » les 10 derniers %)**



# LE CLIMAT DU LANGUEDOC ET DE LA PROVENCE

Au lieu de « bronzer idiot » sur les plages, promenons nous dans l'arrière pays.

On y trouve :

- 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





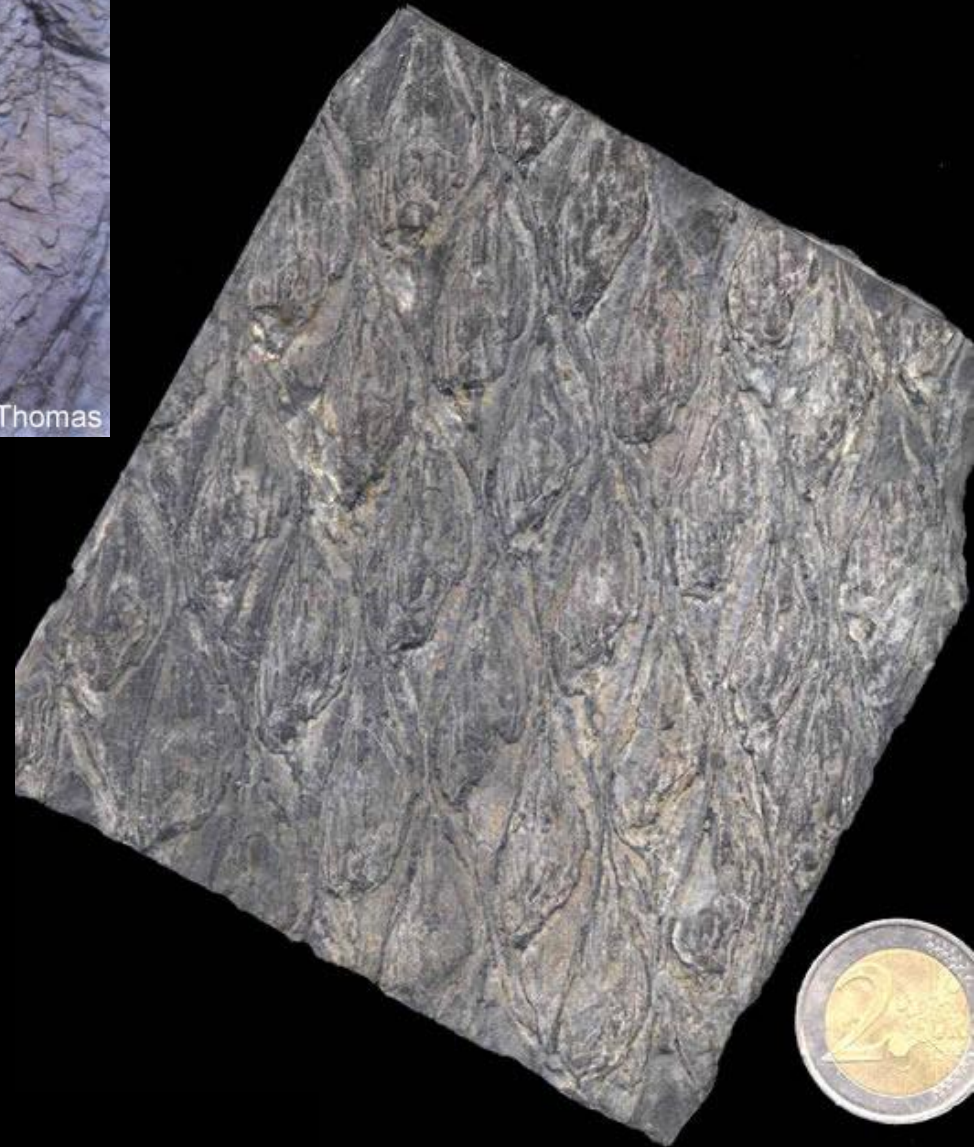
**- 290 Ma (Carbonifère supérieur) : des couches de charbon, des fossiles de troncs d'arbres**







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







**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  
(Permien)**



# Des étendues d'eau temporaires en climat chaud et sec



- 250 Ma

Aujourd'hui





Photographie : Pierre Thomas



Photographie : Pierre Thomas

**Des dépôts de  
gypse et de sel  
datant de  
– 210 Ma (Trias)**



Photographie : Pierre Thomas



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





**Des falaises calcaires de – 150 Ma (Jurassique),  
avec des ...**





**... coraux fossiles**







**Le Languedoc et la  
Provence il y a 150 Ma**





**Des drôles de  
roches rouges  
datant de  
– 90 Ma  
(Crétacé)**



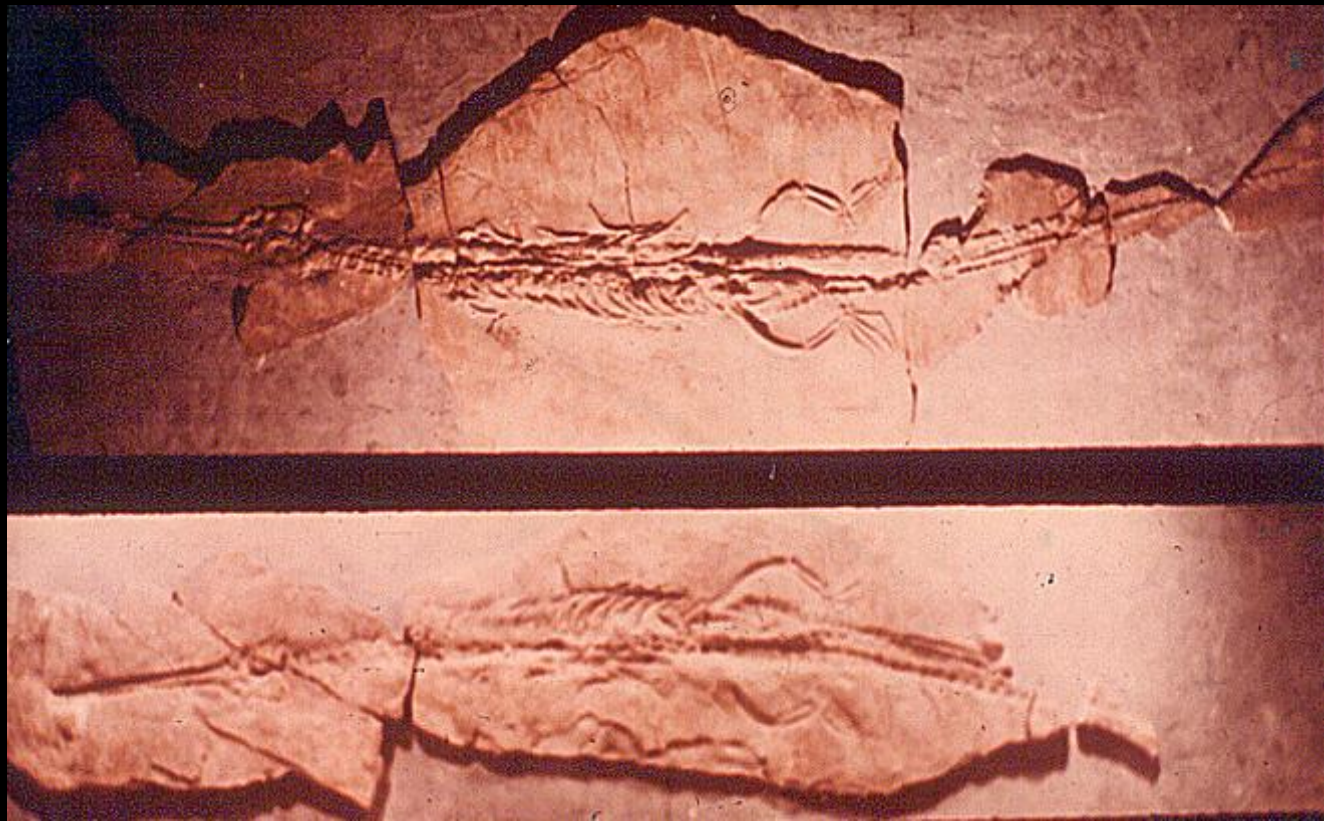


**Il y a 90 Ma, le  
Languedoc et la  
Provence étaient  
recouverts d'une  
cuirasse latéritique**





**Et il y a 30 Ma (Oligocène), il ne faisait pas bon  
se baigner dans les lacs du Midi !**



**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 !**





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



La Namibie aujourd'hui

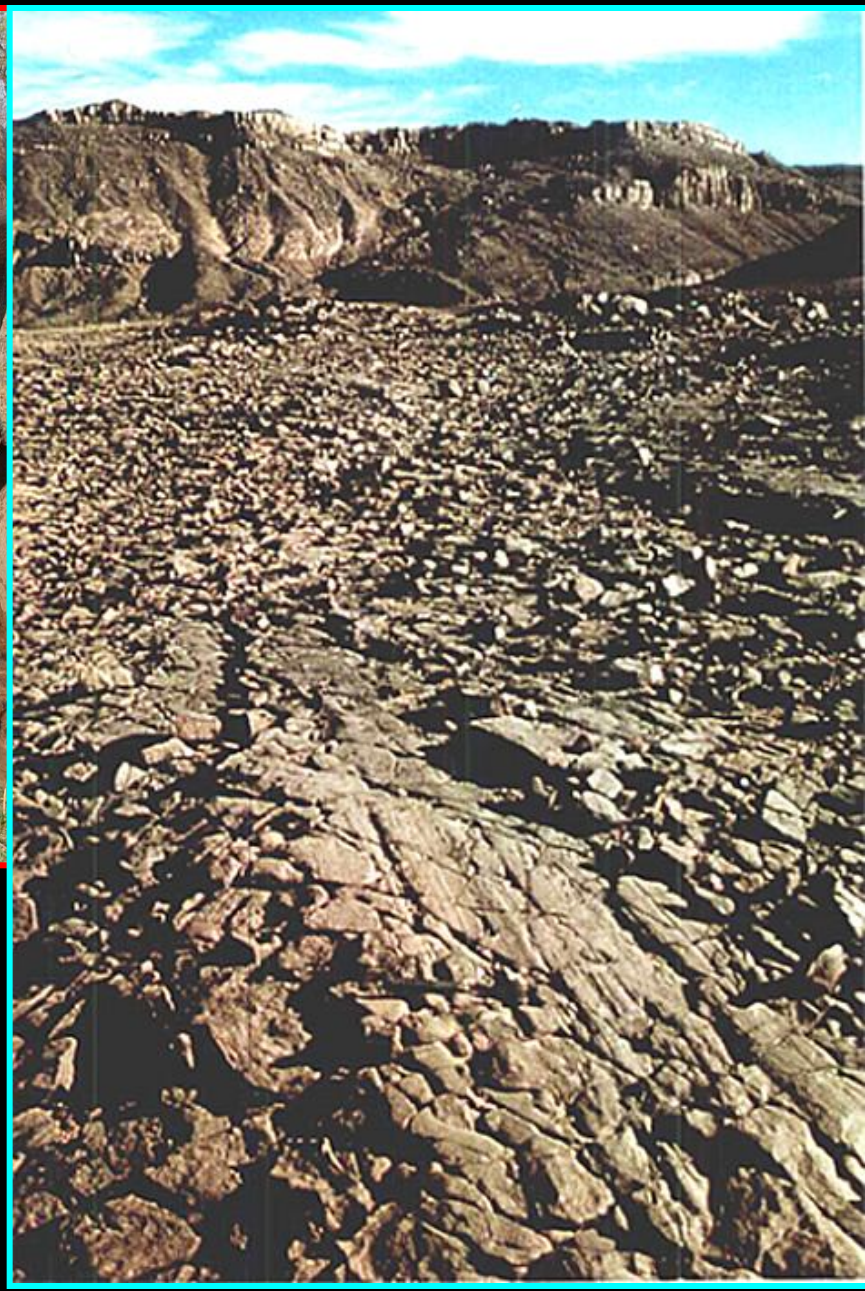


# Un autre endroit où le climat a changé : la Namibie



La Namibie aujourd'hui

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



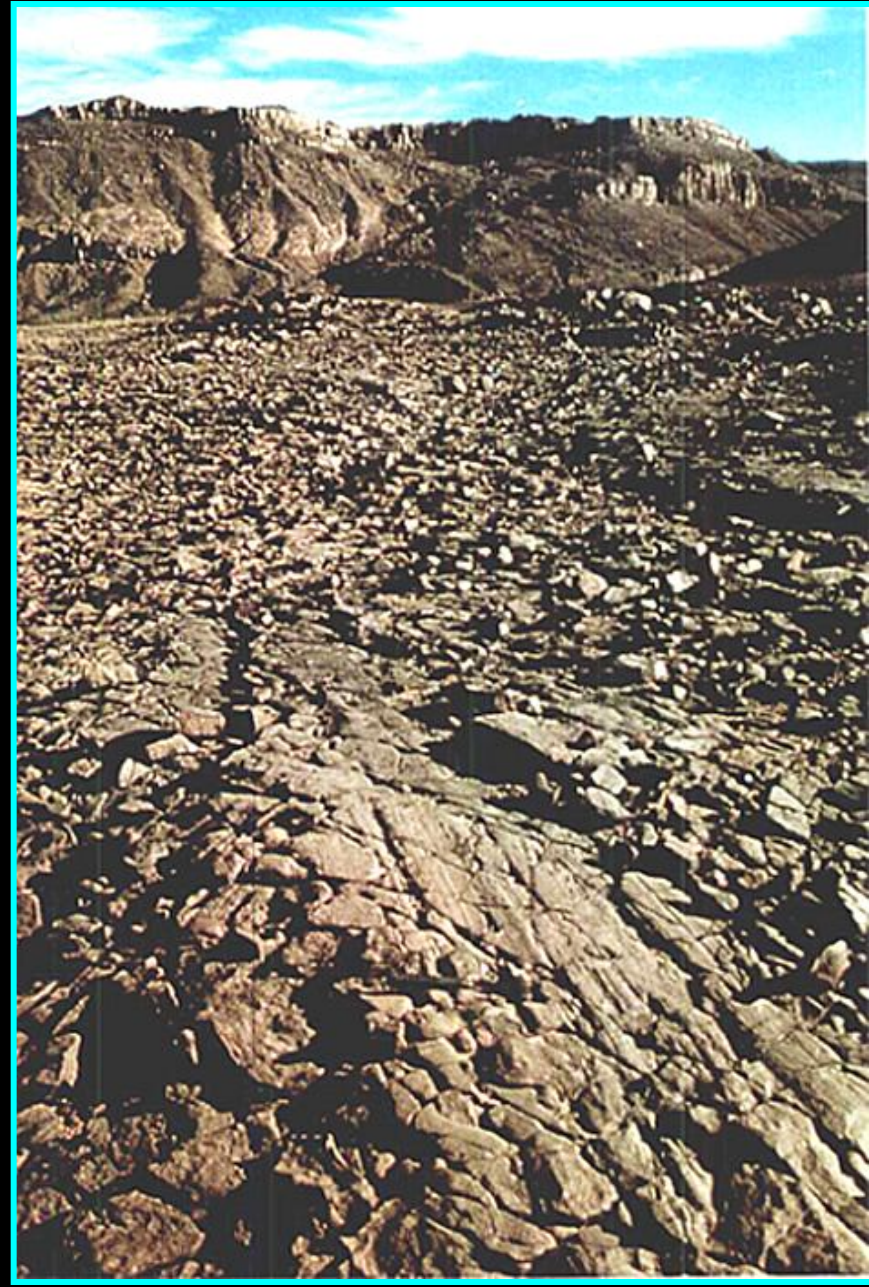


# Un autre endroit où le climat a changé : la Namibie



Stries glaciaire au Groenland  
(- 200 ans)

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



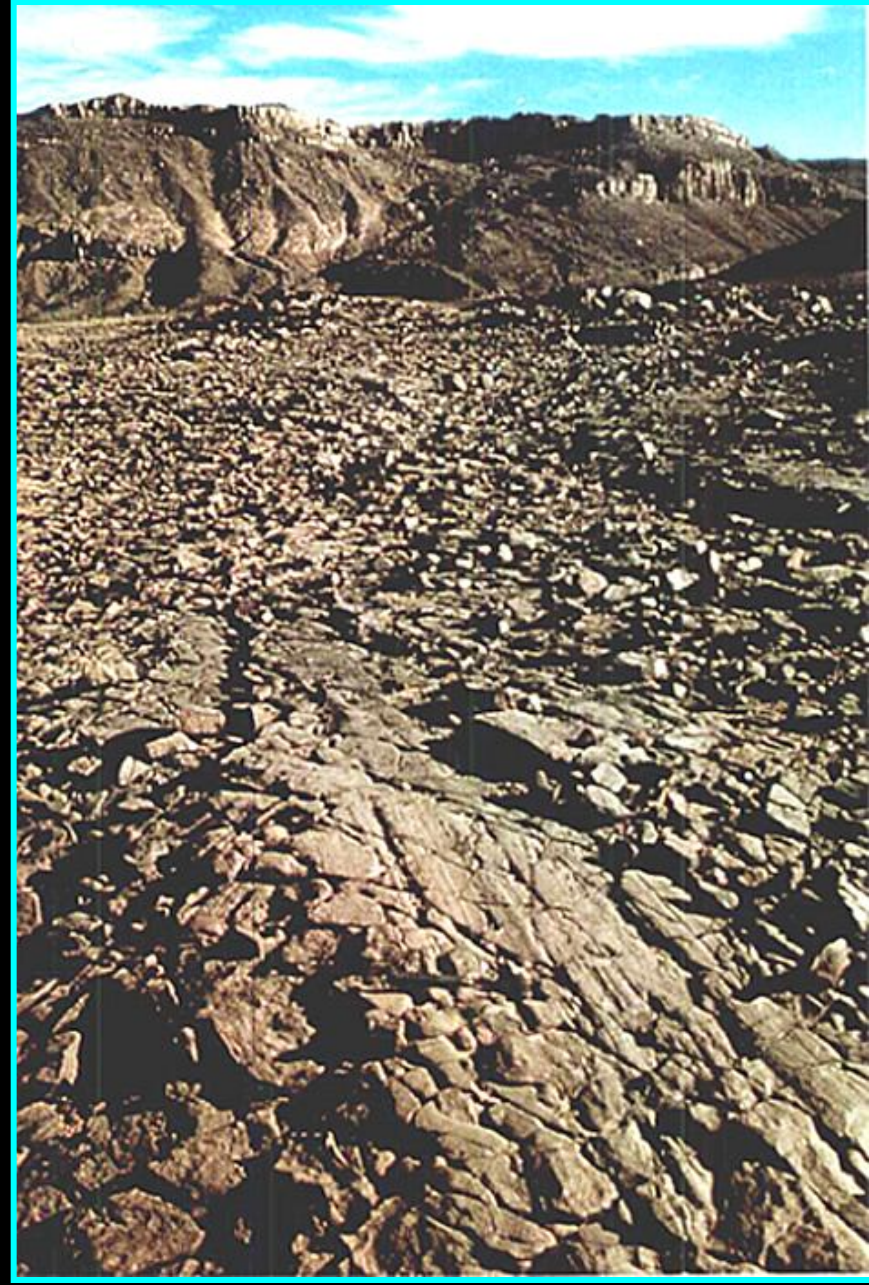


# Un autre endroit où le climat a changé : la Namibie



La France il y a - 300 Ma

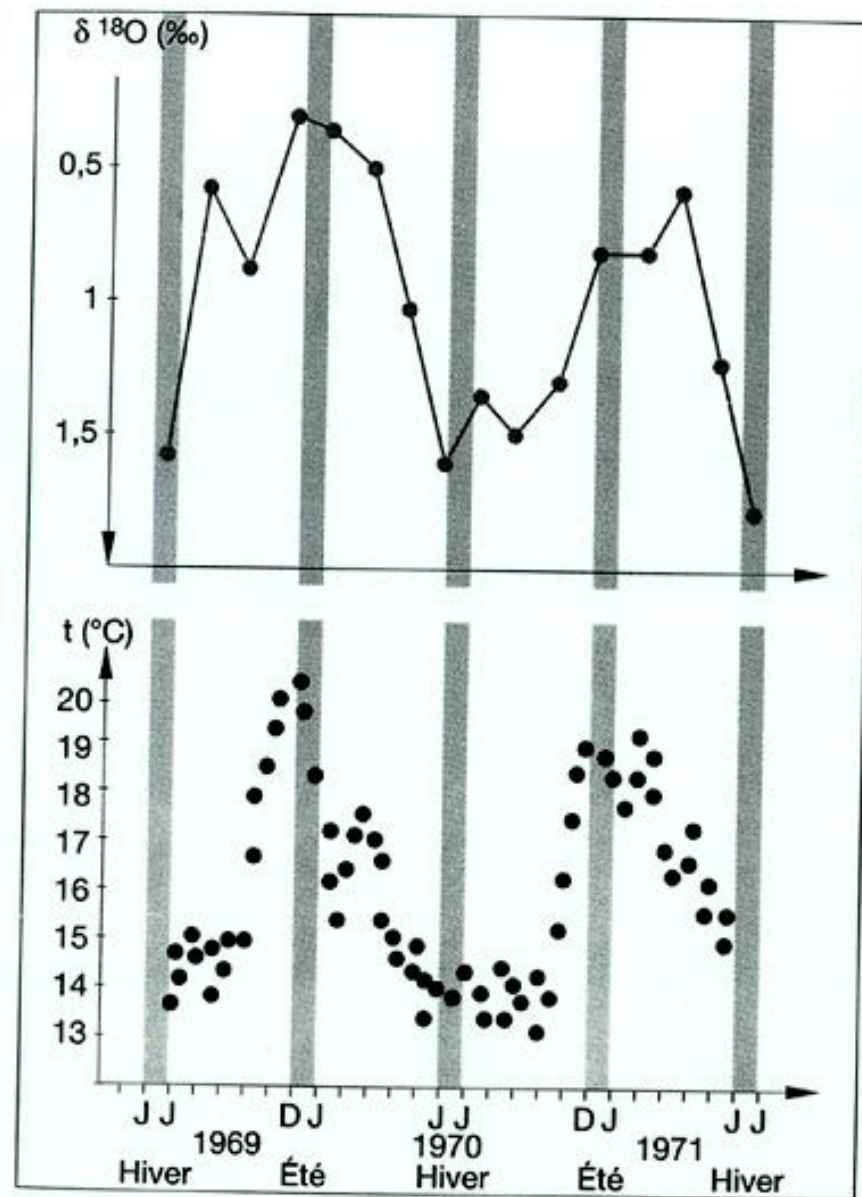
Stries glaciaire en Namibie  
(- 300 millions d'années)





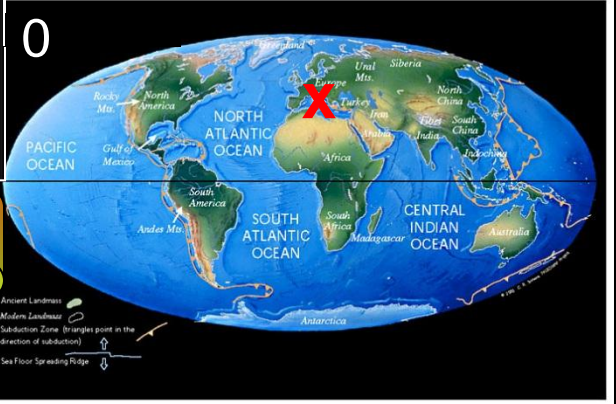
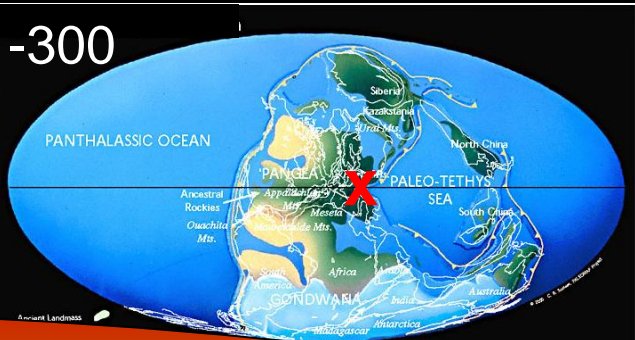
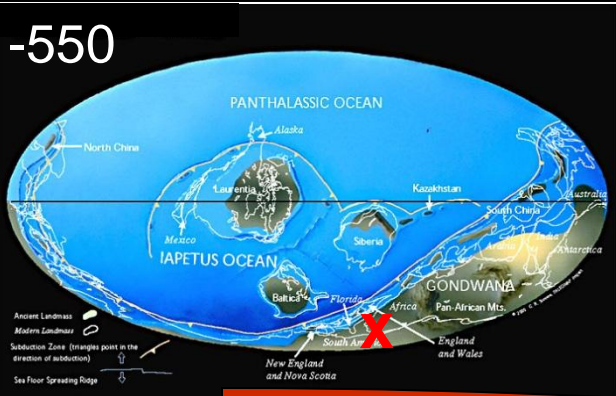
D'autres moyens existent, pour trouver les paléoclimats, mais c'est plus cher.

Et il faut être sûr de connaître la composition isotopique de la mer de l'époque ! (vous verrez ça un peu avec Frédéric, et dans le module « géochimie environnementale »).

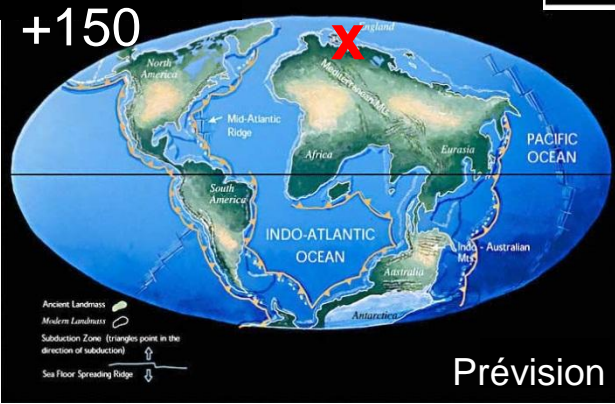


**3** Relation entre le  $\delta$  des carbonates des diverses couches d'un test de *Patella tabularis* (Mollusque gastéropode marin, prélevé sans l'hémisphère Sud) et la température de l'eau.

# Mais ce changement du climat en France (ou en Namibie), 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 !

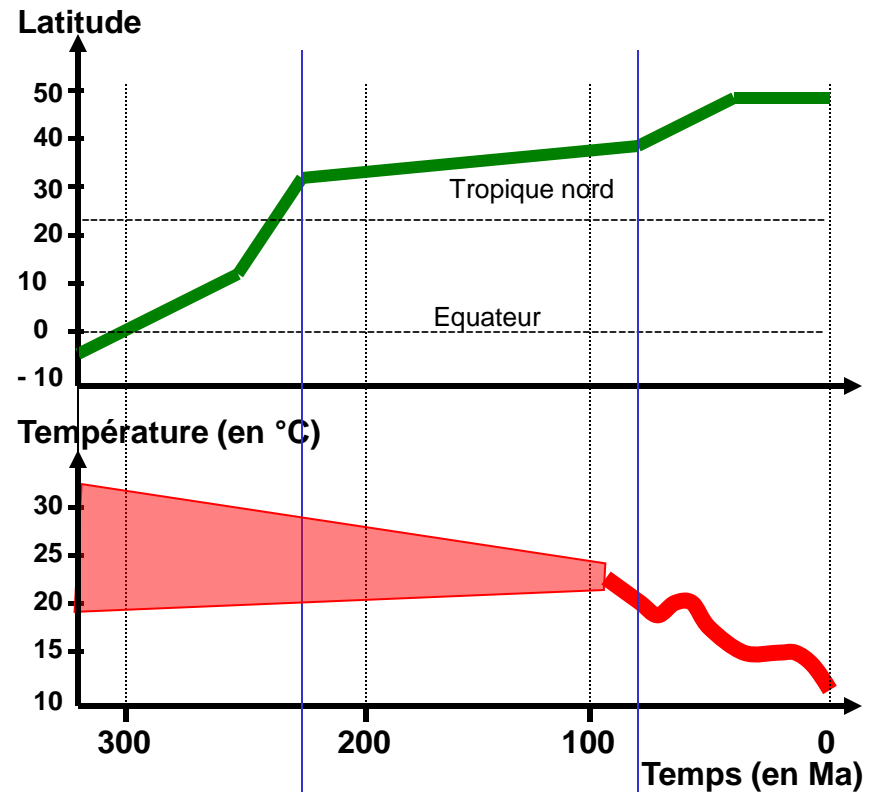
Prévision



**Voici une étude qui met en relation les climats anglais (voisin de celui de la France) et la position de l'Angleterre (liée à la France) au cours du temps**



**Evolution de la température moyenne annuelle (données précises ou « estimations » peu précises) et de la paléo-latitude du sud de l'Angleterre**

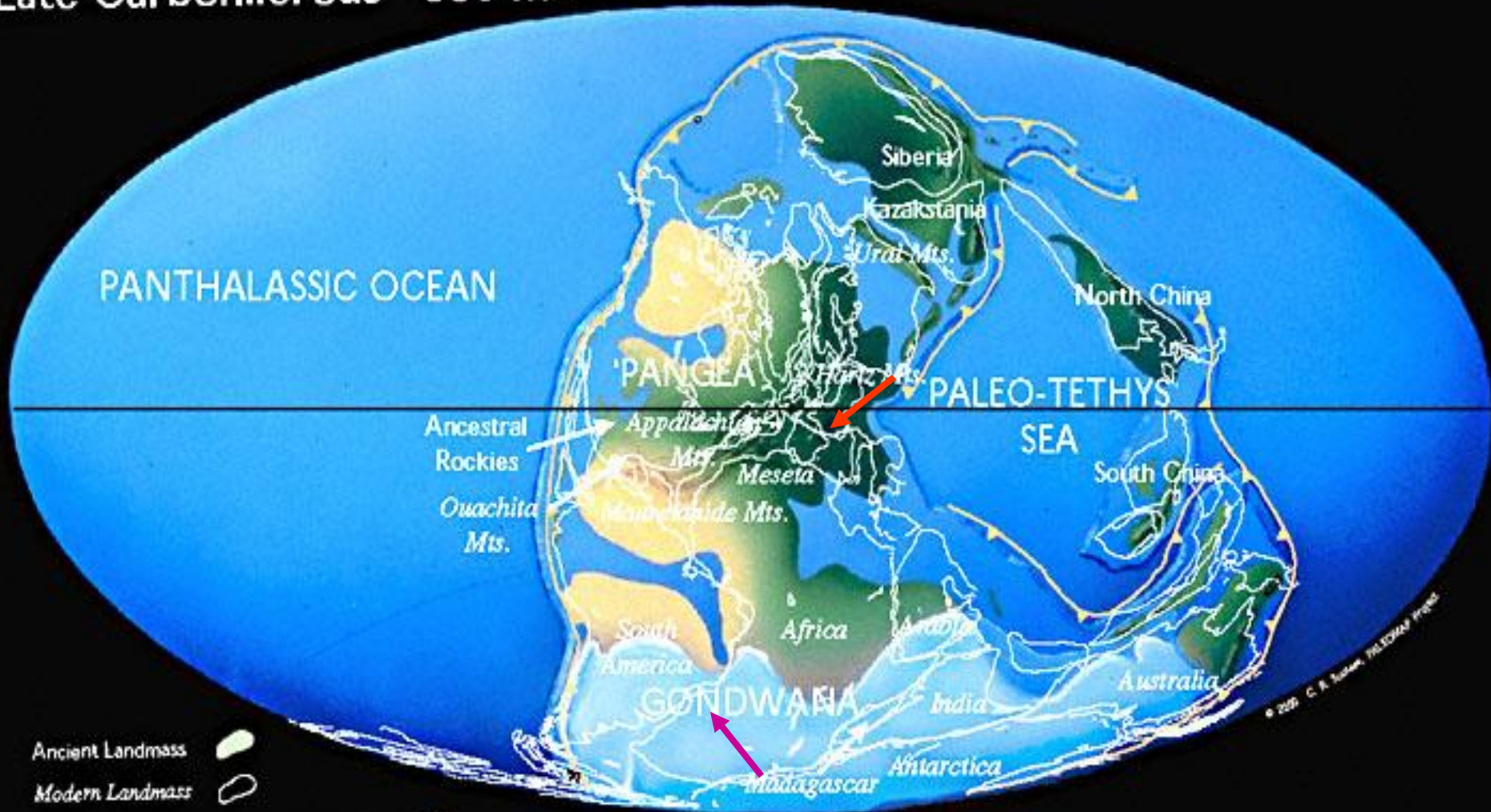


300 Ma - 230 Ma	230 Ma - 100 Ma	100 Ma - 0 Ma
La latitude augmente	La latitude est approximativement stable	La latitude est approximativement stable
La température est approximativement stable	La température est approximativement stable	La température baisse
Le climat mondial se réchauffe	Le climat mondial est stable	Le climat mondial se refroidi



# On fait des reconstitutions paléo-géographico-climatiques

Late Carboniferous 306 Ma



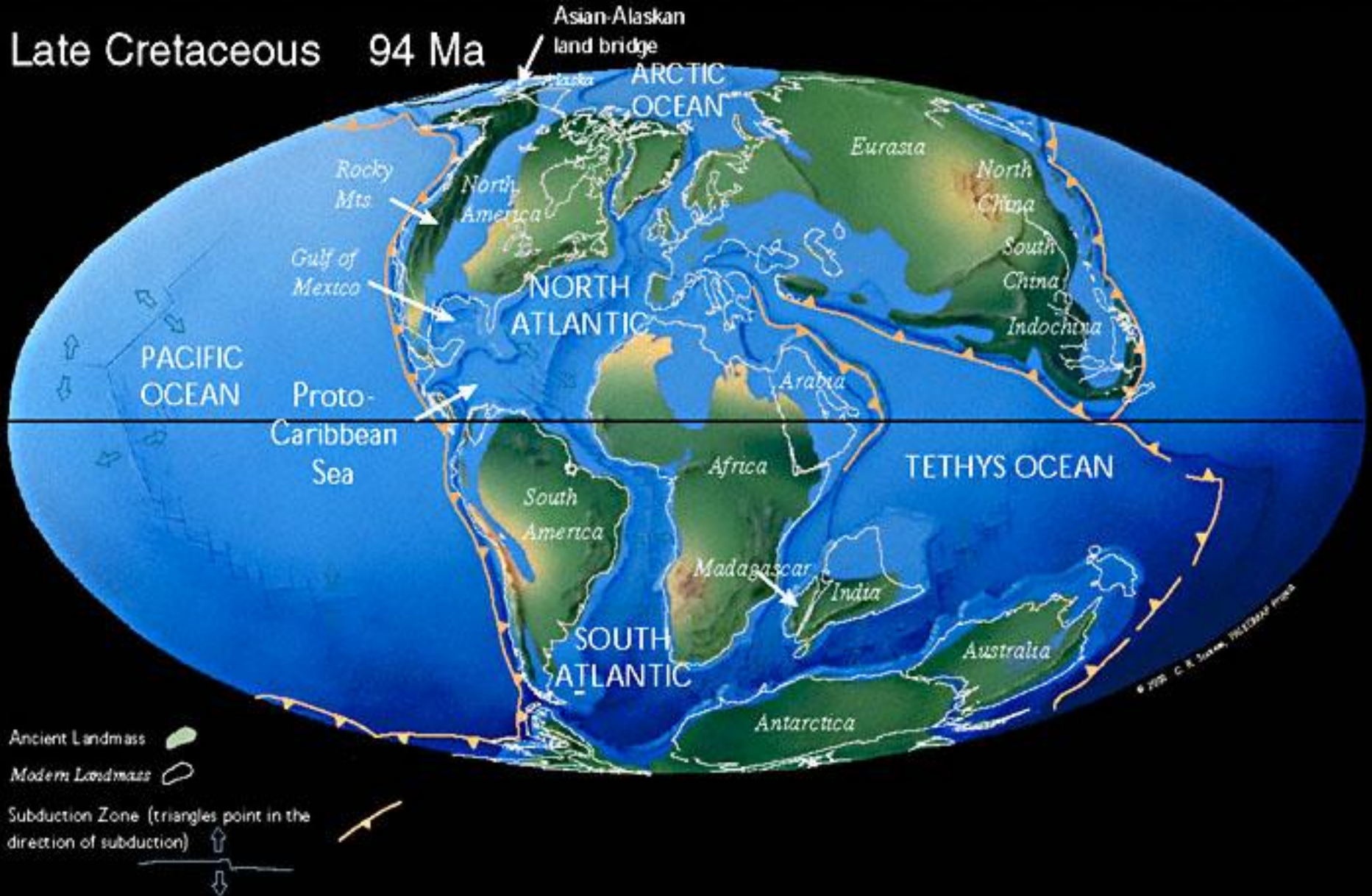
Ancient Landmass  
Modern Landmass

Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction)

Sea Floor Spreading Ridge

<http://www.scotese.com/earth.htm>

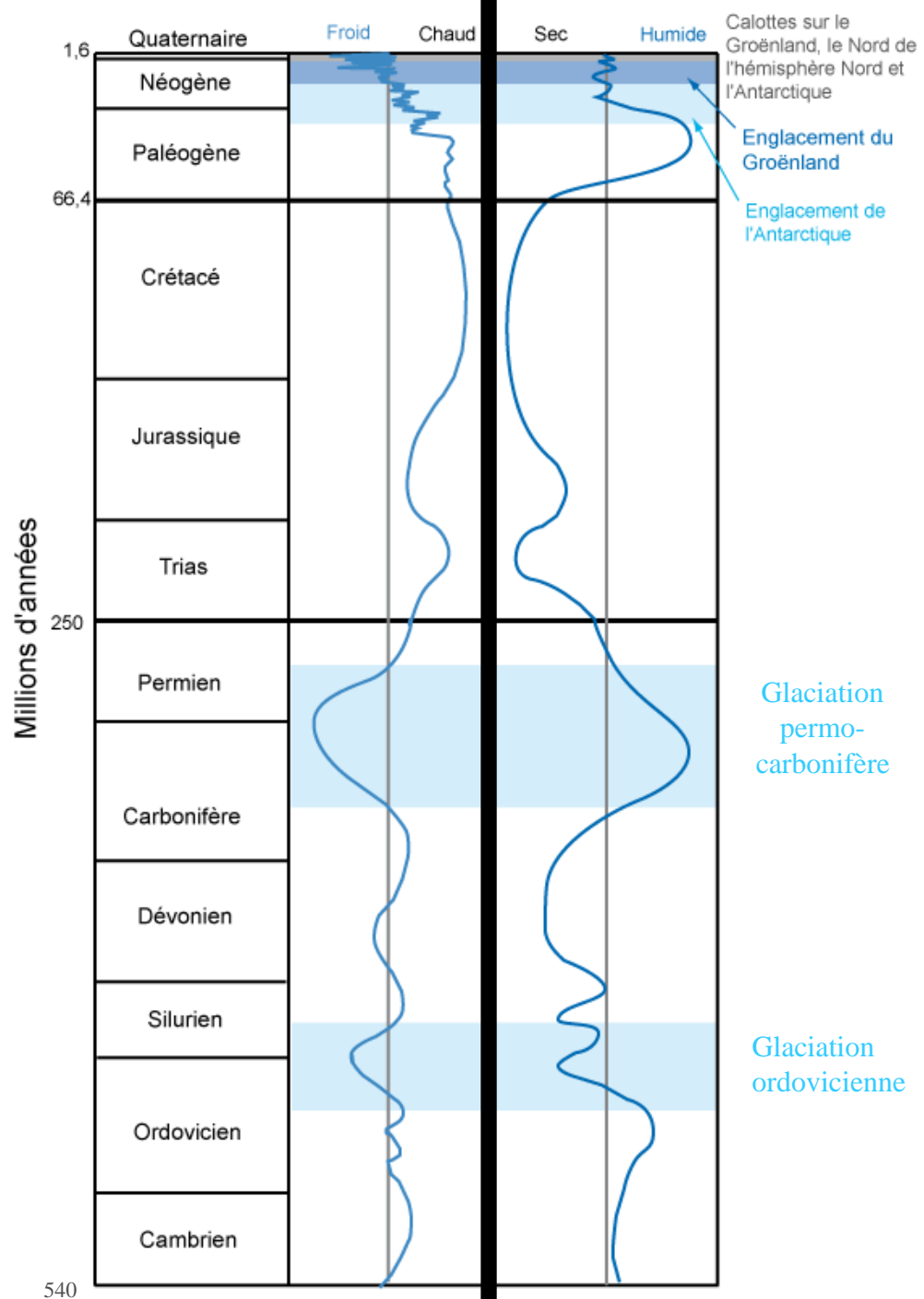
# Et oui, le temps change !





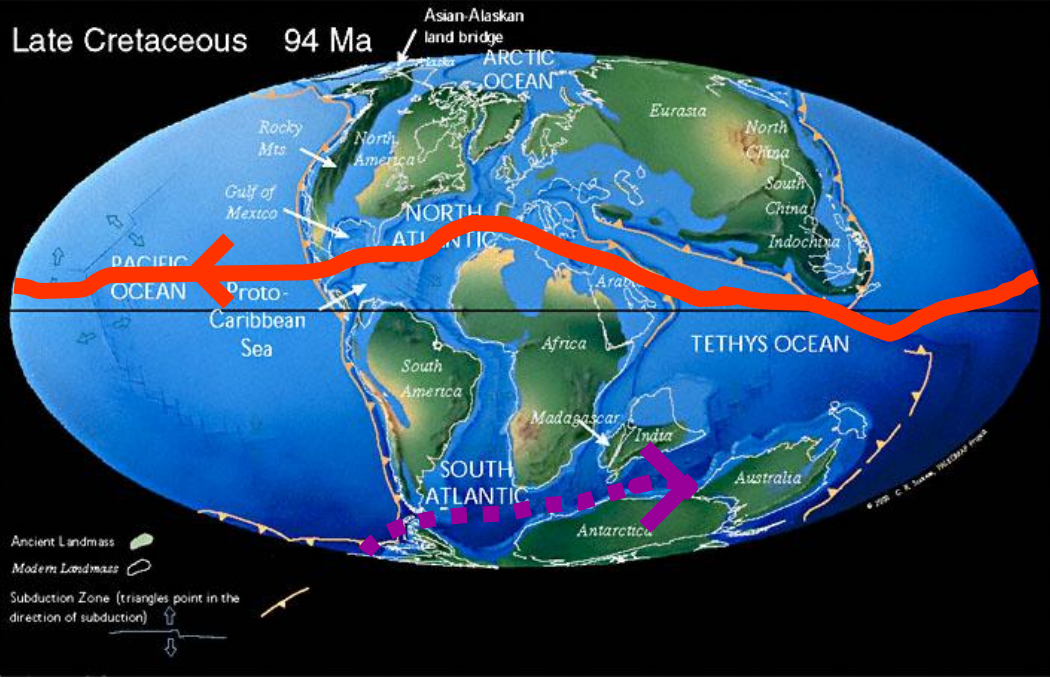
**Les variations globales du climat depuis le début de l'ère primaire (- 540 Ma).**

**On vit actuellement en période froide**



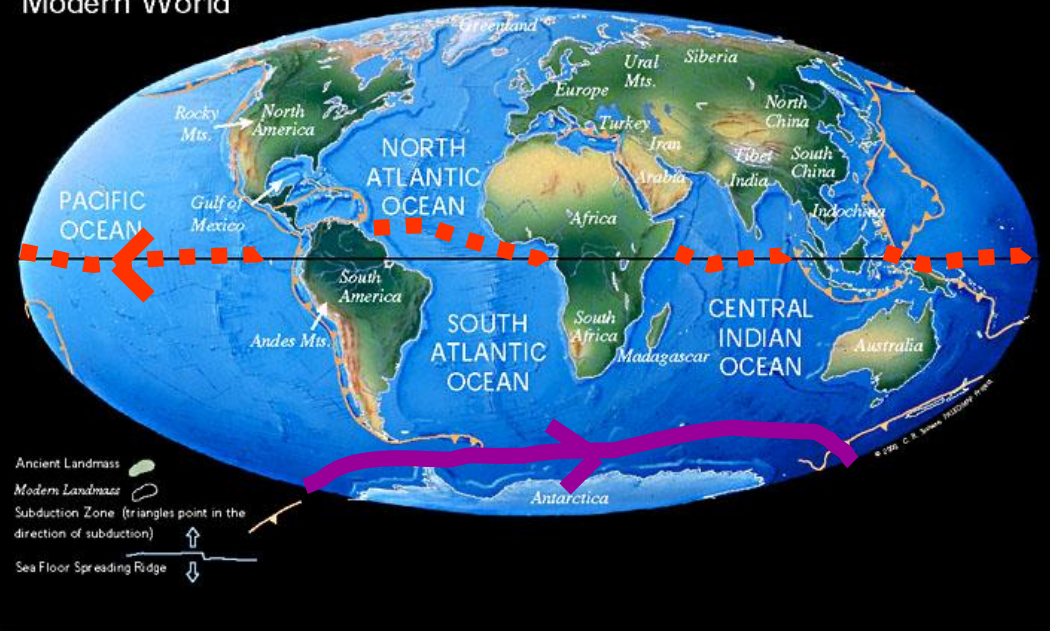


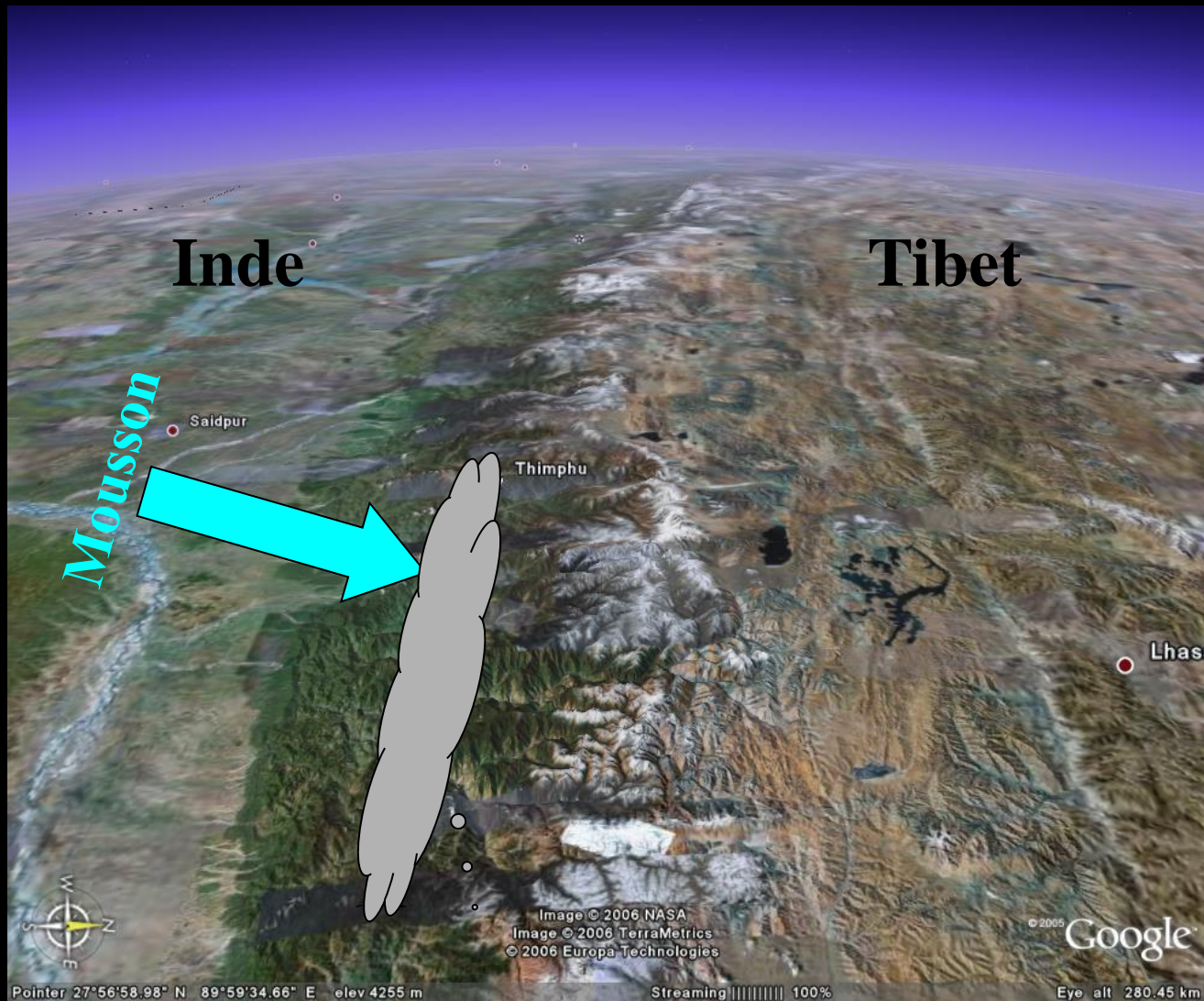
Late Cretaceous 94 Ma



Quelles peuvent être les causes de ces variations globales du climats ? La position des masses continentales influence les circulations océaniques (par exemple courant circum équatoriale / circum polaire) et atmosphériques

Modern World





**De la  
position des  
chaînes de  
montagnes  
qui change  
les  
circulations  
atmosphé-  
riques ...**



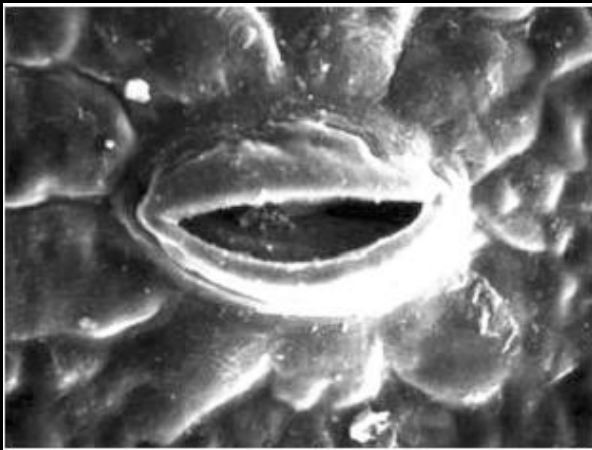
# Ces variations climatiques globales peuvent être dues à des variations du CO<sub>2</sub> atmosphérique

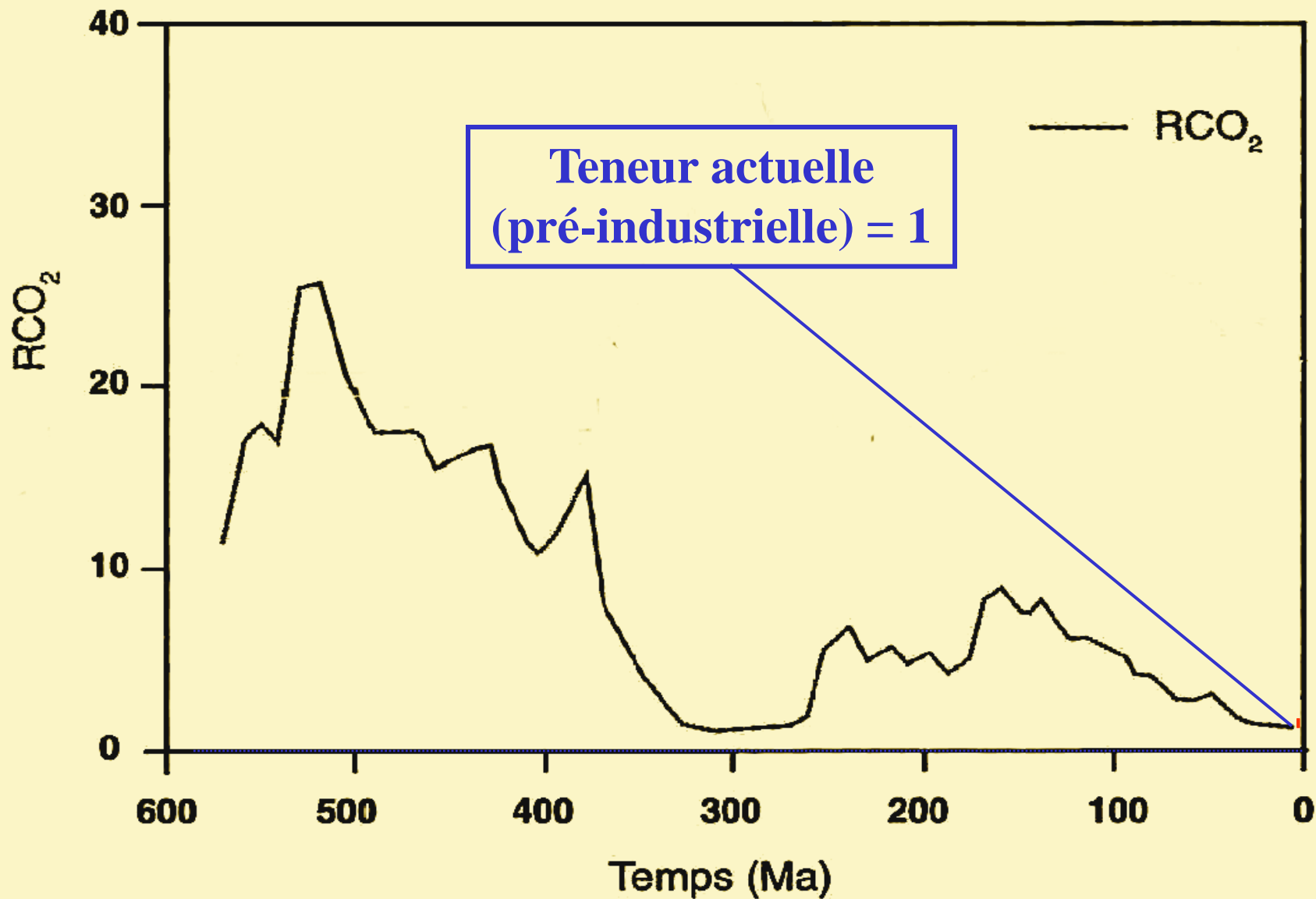


Comment mesure-t-on le CO<sub>2</sub> ante-glaciaire ?

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>)





**Et voici ce que donne les plus récents modèles  
(Berner, 2003)**



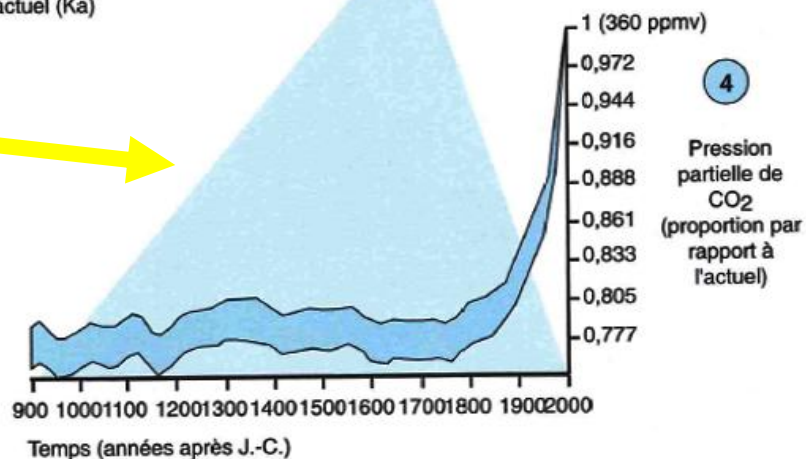
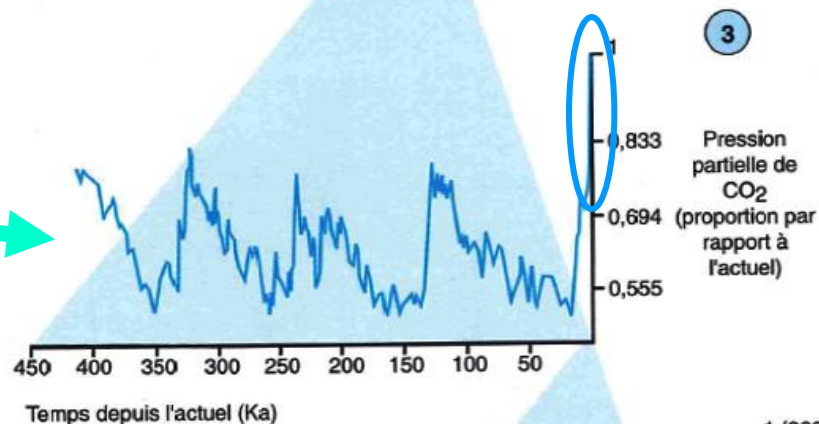
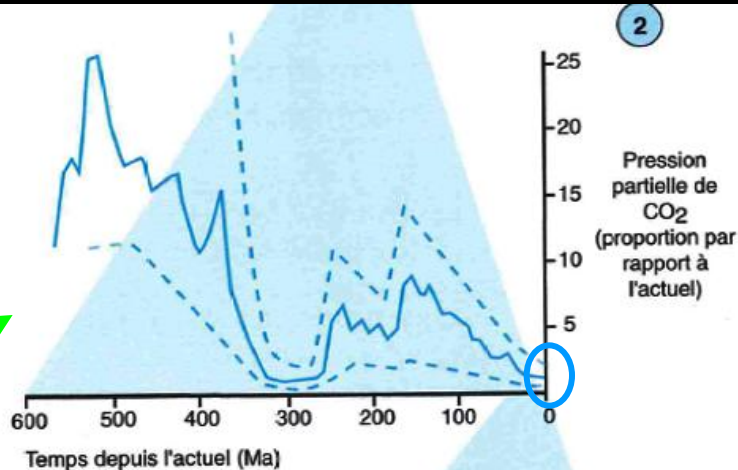
# Et voici un résumé des variations de CO<sub>2</sub>

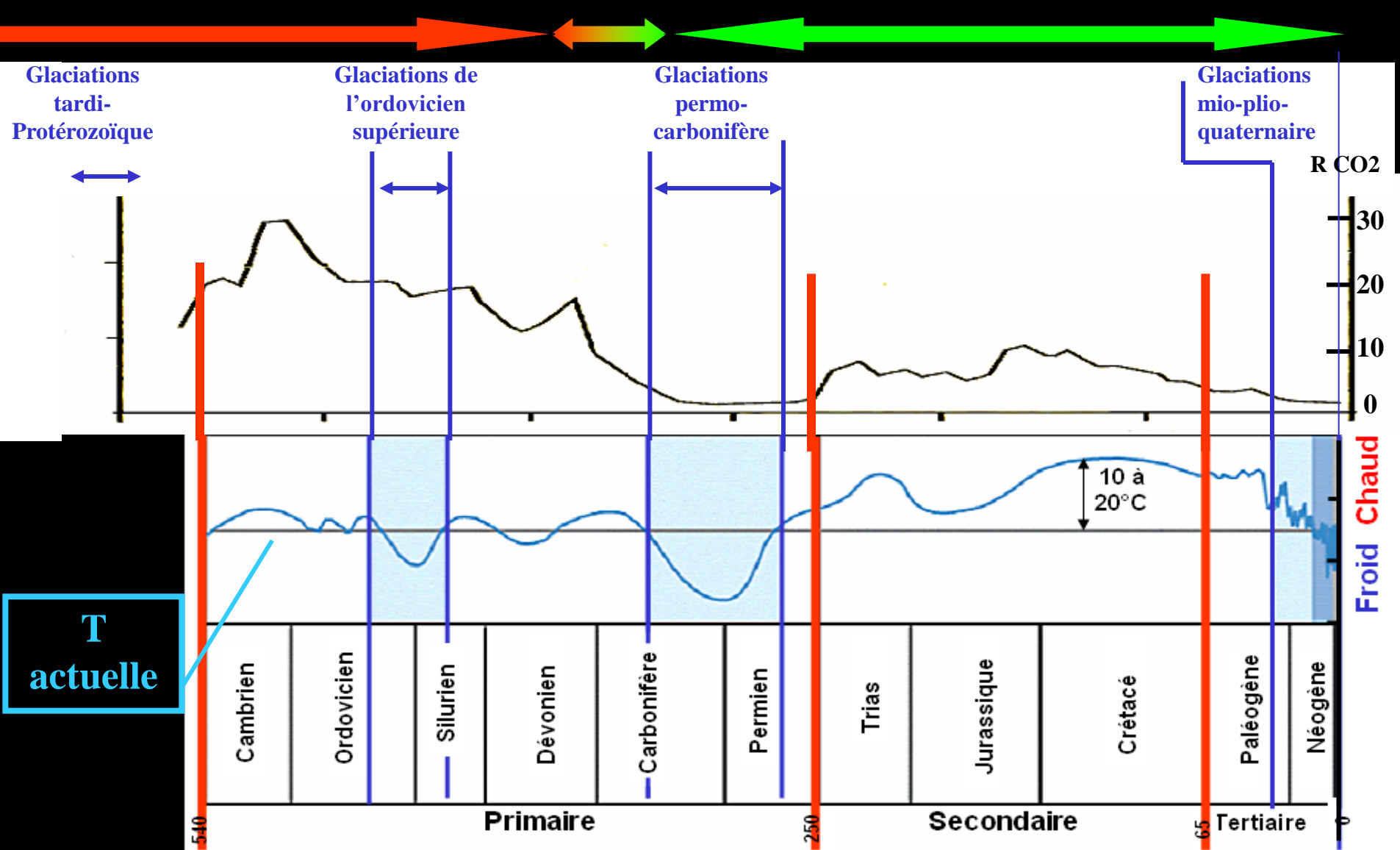
- Depuis 600 000 000 ans

- Depuis 420 000 ans

- Depuis 1000 ans (celles dont parle la presse).

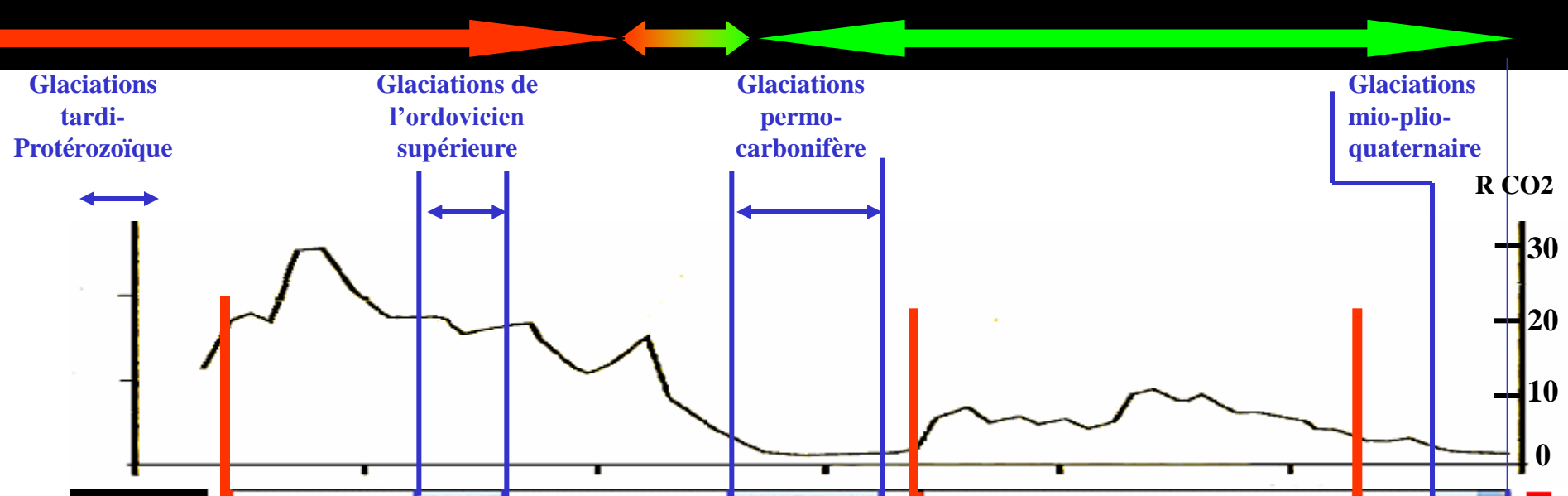
Relatif, tout est relatif !





**Les relations température globale et taux de CO<sub>2</sub>. Ça « marche » après le Carbonifère, pas avant ! Il nous reste du travail pour tout comprendre !**





**Mais qu'est-ce qui peut faire varier le CO2 avec ces variations amples mais lentes et continues sur des millions d'années ?**

**Le volcanisme ?**

**Les orogénèses ?**

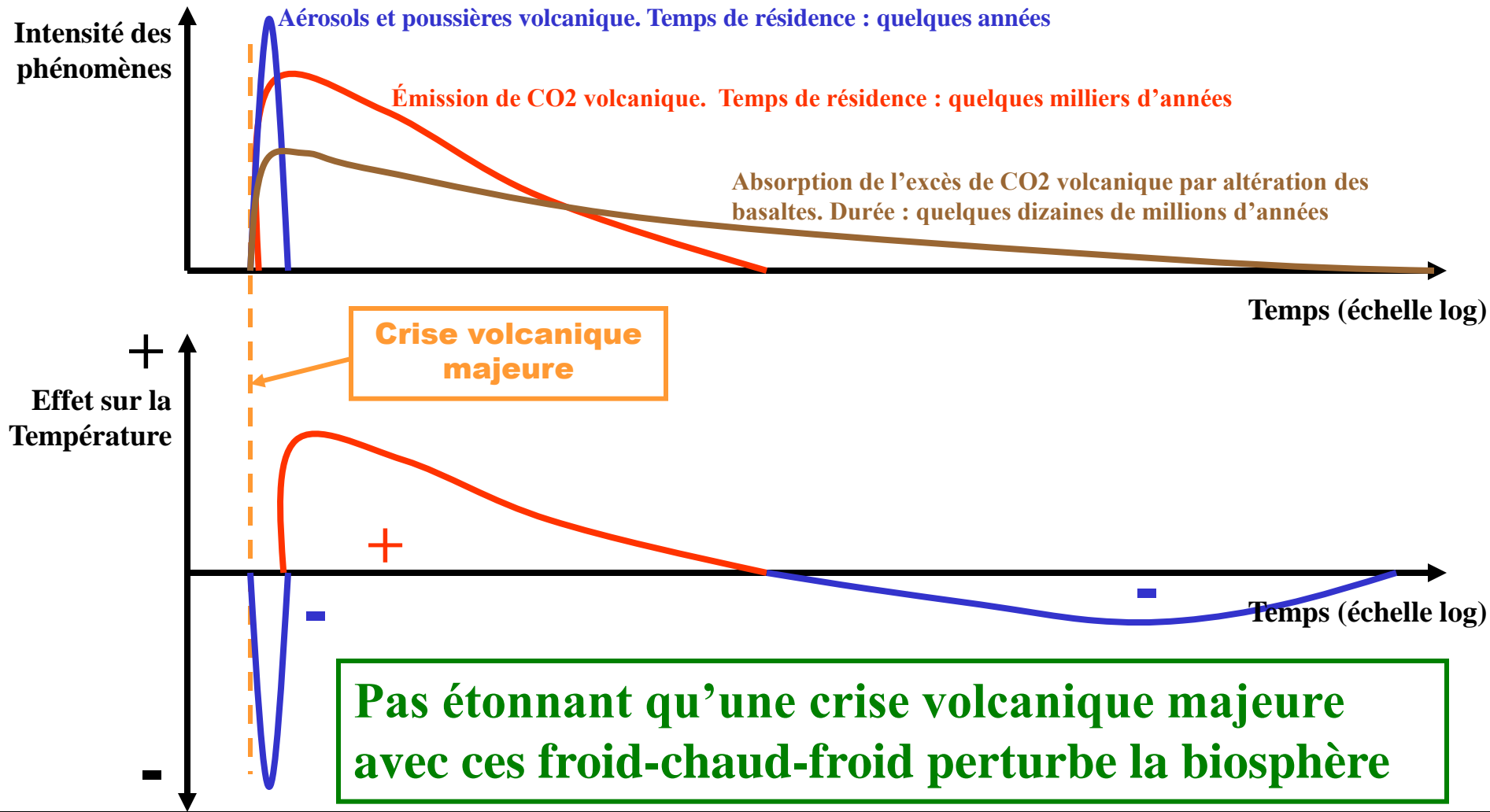
**La formation de roches carbonées ?**

**Autres choses ?**

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

## Des éruptions volcaniques aériennes ?

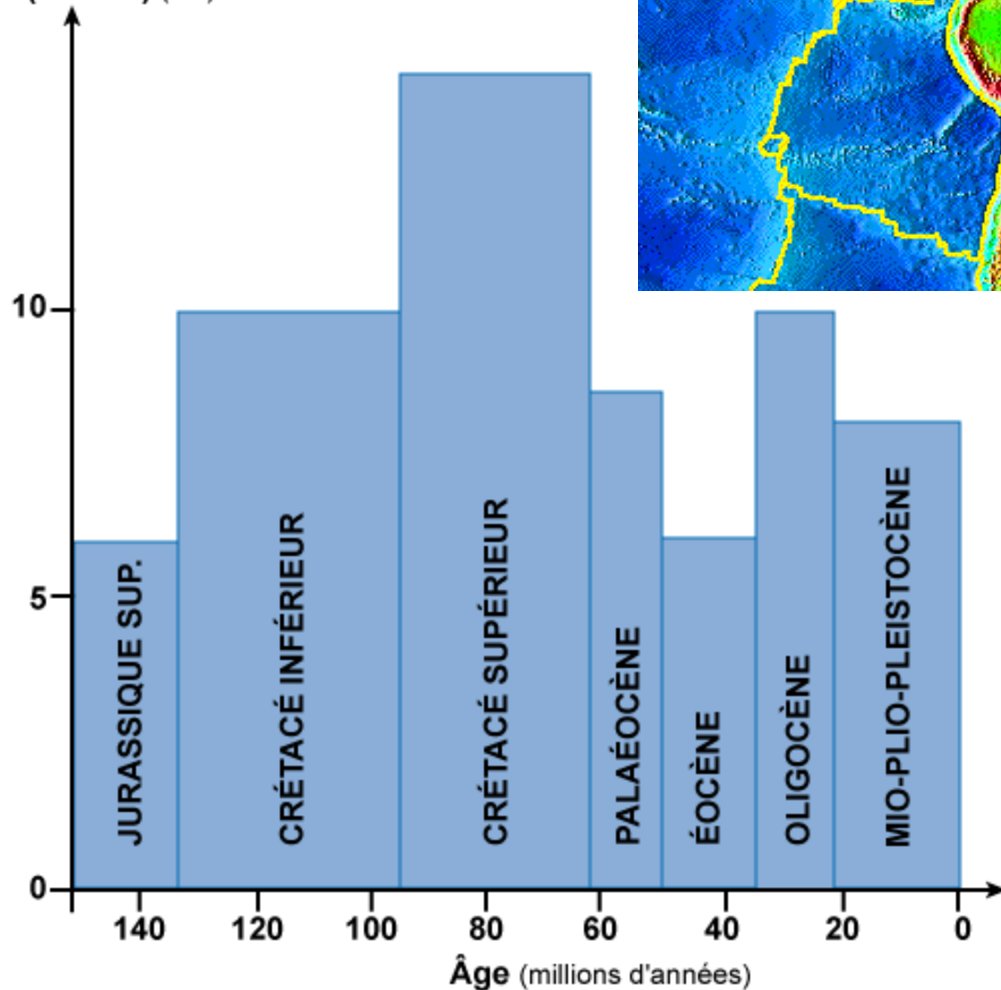
### Les effets climatiques théoriques d'une crise volcanique aérienne majeure





**Au cours du temps, la vitesse des dorsales (ici la dorsale pacifique) varie du simple au triple. Les dorsales rejettent**

Vitesse d'ouverture  
(double) (cm)



**du CO<sub>2</sub> de 2 façons différentes :**

- du « CO<sub>2</sub> volcanique »
- du CO<sub>2</sub> d'altération, altération dans la mer (riche en Mg<sup>++</sup>) :



# Les paroxysmes orogéniques, agents de refroidissement du climat mondial ?

**Pourquoi pas !**

**C'est une hypothèse très  
séduisante, en plus des effets  
sur la circulation des masses  
d'air et d'eau.**

- . Paroxysme orogénique ---> reprise d'altération  
et d'érosion
- . Altération ---> consommation de CO<sub>2</sub>  
(CO<sub>2</sub> + silicates calciques --> silice + calcaire)
- . Baisse du CO<sub>2</sub> ---> baisse de l'effet de serre
- . Baisse de l'effet de serre ---> baisse de la  
température







## Formation de l'Himalaya, consommation de CO<sub>2</sub>, refroidissement du climat et glaciation

Depuis 20 MA se forme la chaîne de l'Himalaya. Cette chaîne de montagne, la plus importante du monde depuis longtemps, est la proie d'une érosion et d'une altération intense. Les sédiments qui en sont issus (argiles, grès ... ) se retrouvent maintenant dans la plaine du Gange, et dans les deltas (surtout sous-marin) du Gange et de l'Indus. On estime qu'environ  $2.10^6 \text{ km}^3$  de roches ont ainsi été érodées et altérées. Ces roches, continentales, ont une masse volumique de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , et contiennent du calcium, virtuellement contenu dans environ 3% de silicate calcique,  $\text{SiO}_3\text{Ca}$ .

Questions :

- Rapeller l'action du CO<sub>2</sub> sur les silicates calciques lors de l'altération ?  
**(REPONSE :  $\text{SiO}_3\text{Ca} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$ )**

b - Sachant que N  $\text{SiO}_3\text{Ca}$  ont une masse de 116g, que N CO<sub>2</sub> ont une masse de 44g (avec N = nombre d'Avogadro), calculer combien l'altération d'1 kg de silicate calcique absorbe de CO<sub>2</sub>  
**(REPONSE : 0,380 KG)**

c - Calculer la masse de roches altérées et érodées en Himalaya depuis 20 M.A., et la masse de silicate calcique altéré ?  
**(REPONSE :  $5,4.10^{18}$  KG DE ROCHES ALTEREES, SOIT  $1,62.10^{17}$  KG DE SILICATE CALCIQUE ALTERE).**

- Calculer combien l'altération en Himalaya a absorbé de CO<sub>2</sub> depuis 20 MA  
**(REPONSE :  $6,2.10^{16}$  KG, SOIT  $6,2.10^4$  GT DE CO<sub>2</sub>)**

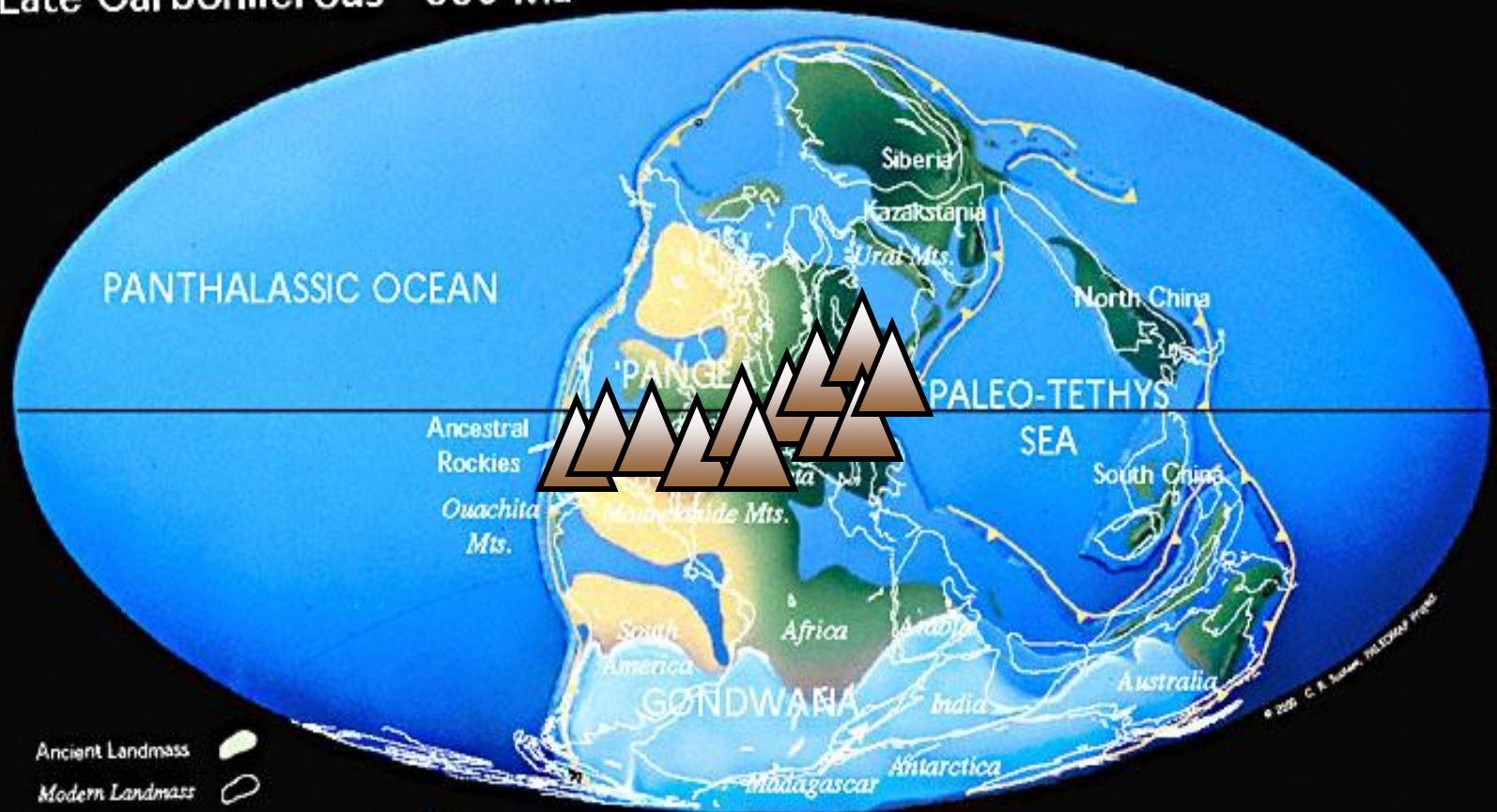
- Comparer cette absorption de CO<sub>2</sub> que vous venez de calculer au  $2,75.10^3$  GT de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, et au  $14.10^4$  GT de CO<sub>2</sub> dissout dans l'océan  
**(REPONSE : CA CORRESPOND A 22 FOIS LE CO<sub>2</sub> ATMOSPHERIQUE ACTUEL, ET A 44% DU CO<sub>2</sub> OCEANIQUE)**





- Cette absorption de CO<sub>2</sub> vous permet-elle de proposer une explication (au moins partielle) pour expliquer le refroidissement de la Terre et la glaciation qui ont commencé il y a 20 MA ?

Attention, en octobre 2009, j'ai entendu in séminaire qui tendrait à prouver que la réalité n'est pas forcément aussi simple que ce modèle (qui en plus était volontairement hyper-simplifié)



Late Carboniferous 306 Ma



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

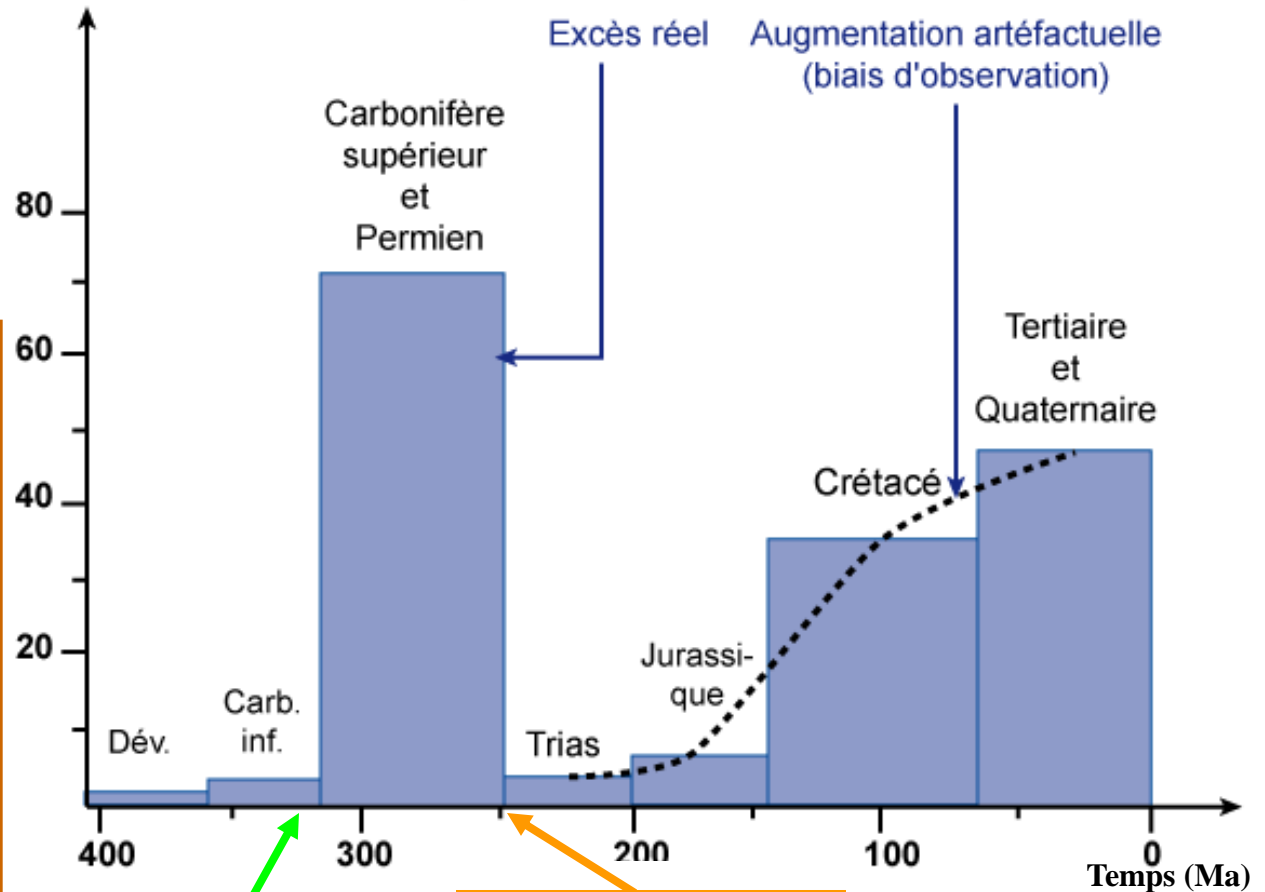
**Outre la baisse du CO<sub>2</sub> post-Crétacé, cela peut aussi participer à la baisse du CO<sub>2</sub> et de la température du Carbonifère (orogénèse hercynienne, en position équatoriale)**



# Une deuxième explication, non incompatible avec la première, pour le minimum carbonifère



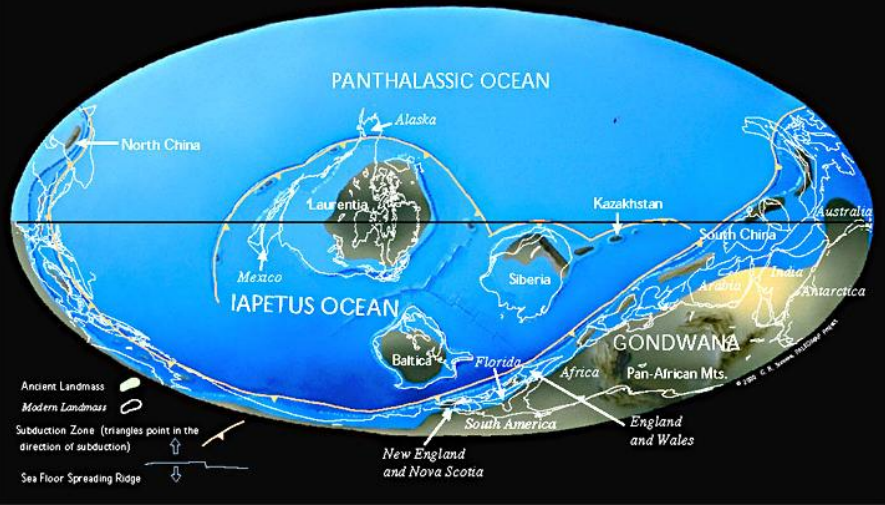
Réserve de charbon exploitable  
(milliards de tonnes / millions d'années)



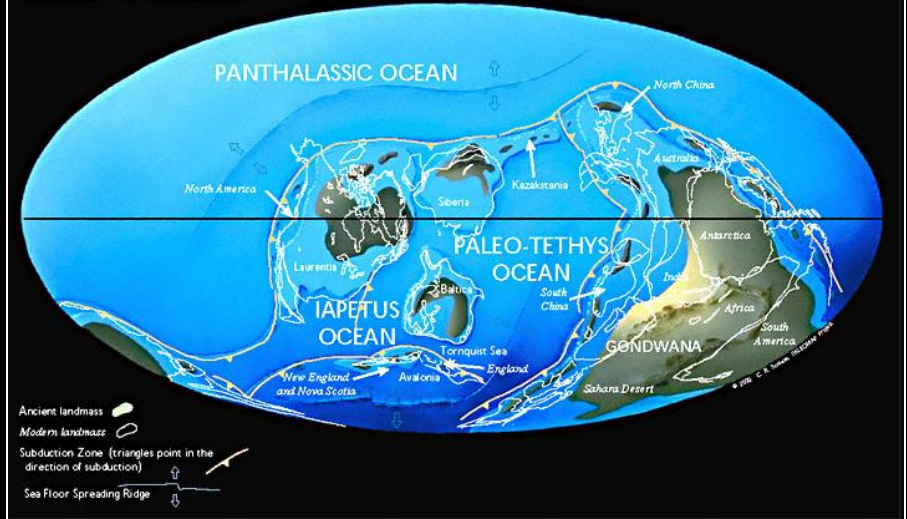
Extension du couvert végétal ligneux

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

Late Cambrian 514 Ma



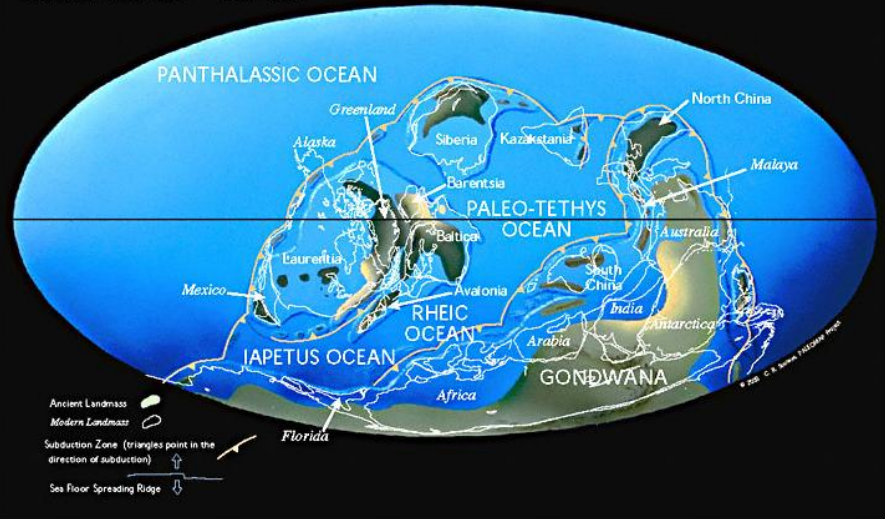
Middle Ordovician 458 Ma



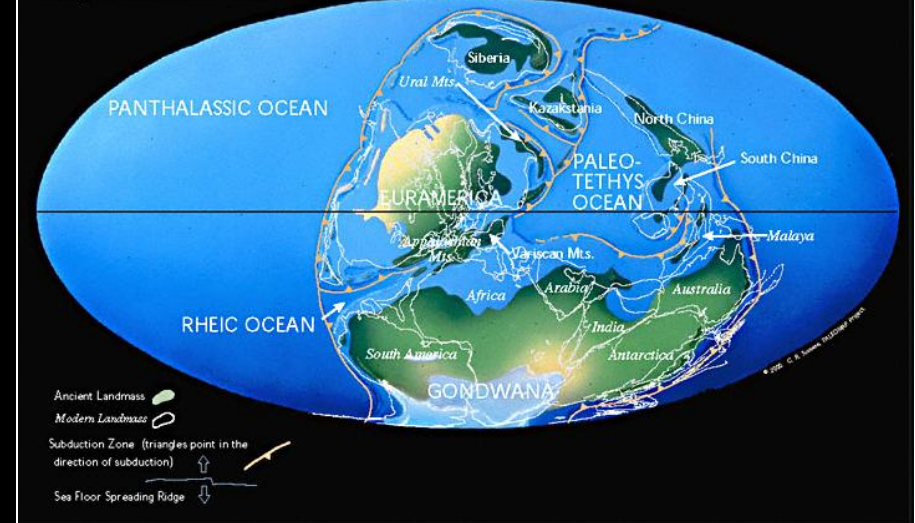
**Cambrien : pas de glaciers polaires**

**Ordovicien : glaciers polaires au sud**

Middle Silurian 425 Ma



Early Carboniferous 356 Ma

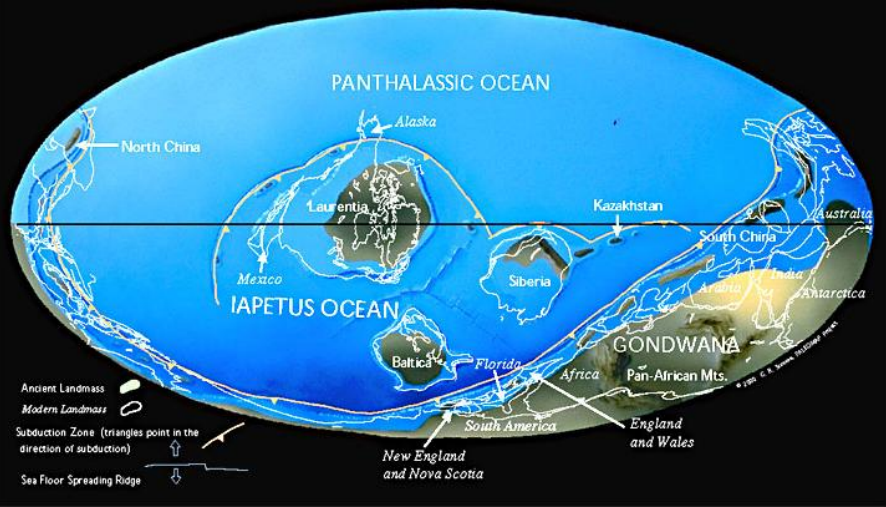


**Silurien : pas de glacier polaires**

**Carbonifère inférieur : début des glaciers polaires, maximum au Carb. Sup.**



Late Cambrian 514 Ma



Middle Ordovician 458 Ma

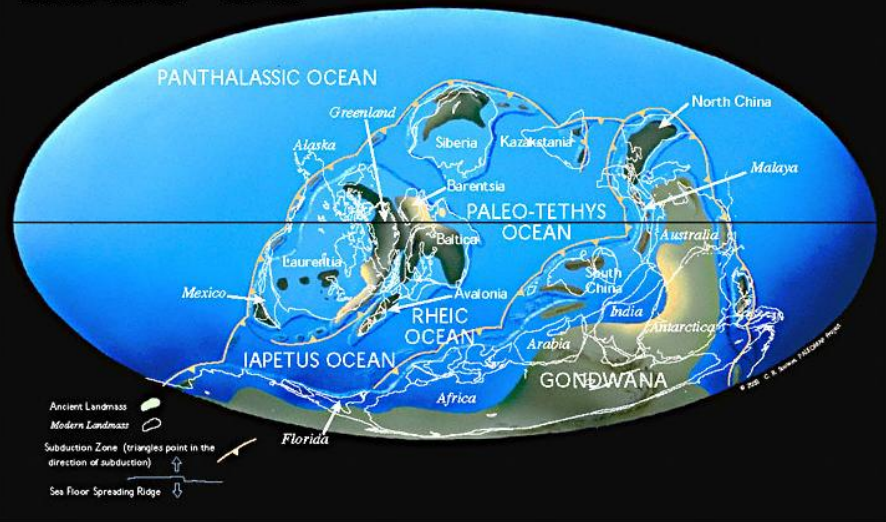


**Cette glaciation ordovicienne est très mal comprise !**

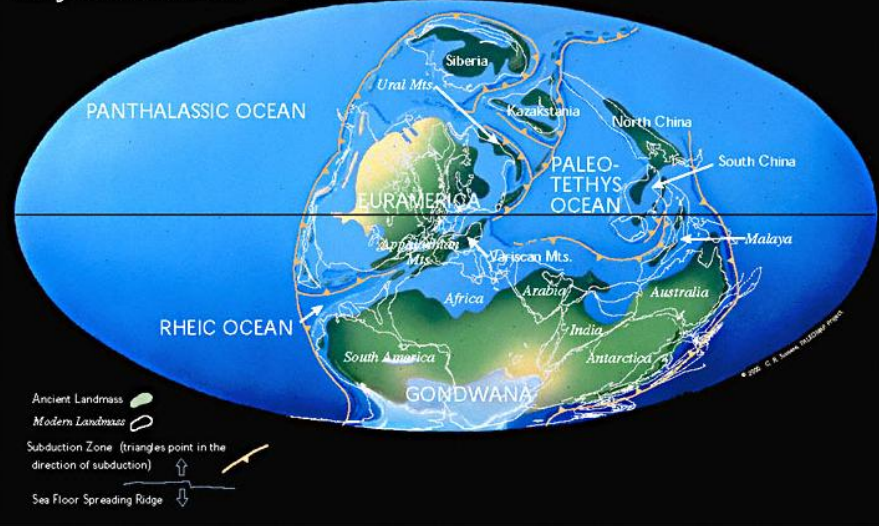
**Cambrien : pas de glaciers polaires**

**Ordovicien : glaciers polaires au sud**

Middle Silurian 425 Ma



Early Carboniferous 356 Ma



**Silurien : pas de glacier polaires**

**Carbonifère inférieur : début des glaciers polaires, maximum au Carb. Sup.**



**Comment mesure-t-on l'O<sub>2</sub> atmosphérique entre la fin du précambrien et le quaternaire?**

**Réponse : très difficilement, d'ou de grandes incertitudes.**

**On fait des bilans géochimiques et/ou sédimentologiques. En voici un exemple avec utilisation des isotopes du carbone.**

**Hypothèse : on suppose que toutes variations de la quantité de carbone réduit présent à l'instant t (biomasse mais surtout roches carbonées) se traduisent par une variation d'O<sub>2</sub> atmosphérique.**



**Cette hypothèse implique que la fixation d'O<sub>2</sub> par Fe<sup>+++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>--</sup> est négligeable depuis le début de l'ère primaire.**

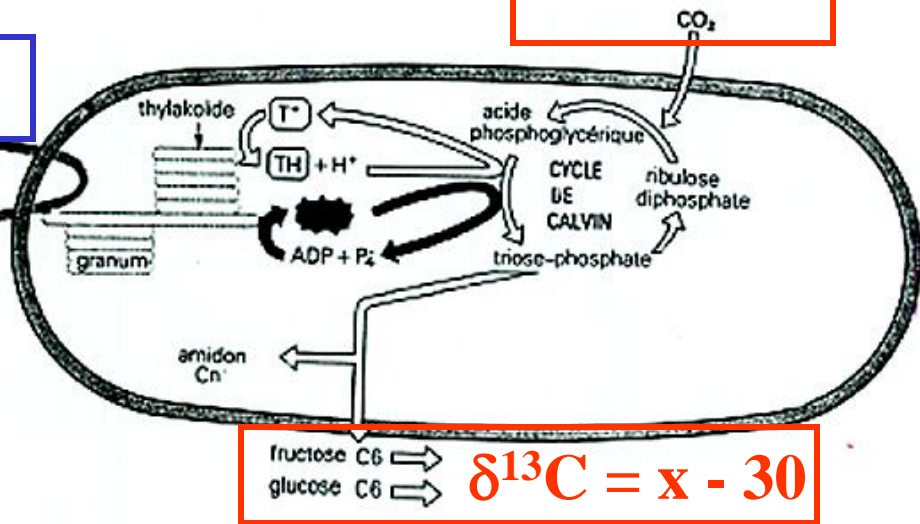
**Comment connaître la quantité de carbone réduit présent à une époque donnée ?**

**Pas en faisant le bilan du carbone réduit présent dans les roches sédimentaires existant à cette époque, car on n'est pas sûr que les roches de ces époques affleurant aujourd'hui soient représentatives (il nous manque en particulier tous les sédiments océaniques).**

$2 \text{H}_2\text{O}$

$\text{O}_2$

$$\delta^{13}\text{C} = x$$



$$\delta^{13}\text{C} = x - 30$$

### Principe de la méthode :

- 1 - on sait que le  $\delta \text{C}13$  de la Terre est de -7 (chondrite)\*
- 2 - La photosynthèse, de par ses mécanismes chimiques, sépare les isotopes de C.

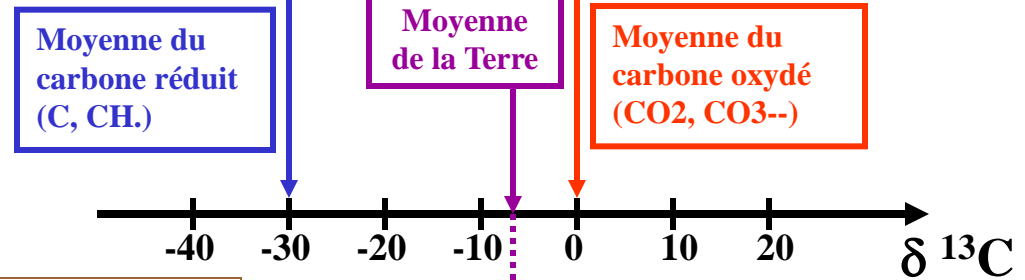
La matière organique est plus riche en C12 d'une trentaine d'unités  $\delta$  que les  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{--}$  ambiants.

Le carbone global de la Terre ( $\delta = -7$ ) se répartit de la façon suivante : les 3/4 sont sous forme de carbonates ( $\delta = 0$ )\*, et 1/4 sous forme de carbone réduit ( $\delta = -30$ )\*, ce qui fait bien la moyenne de :  $3/4 \times 0 + 1/4 \times (-30) = -7$

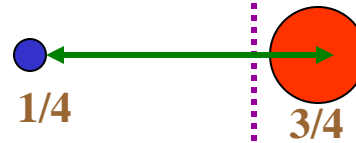
**La photosynthèse, ou tout autres mécanismes de synthèse utilisant le cycle de Calvin (ou un mécanisme voisin) a deux conséquences géologiquement observables : un fractionnement isotopique du C, et la « genèse » d'un milieu oxydant**



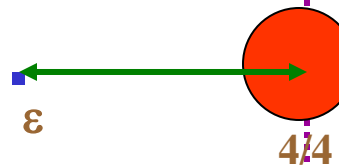
## Fractionnement de la photosynthèse



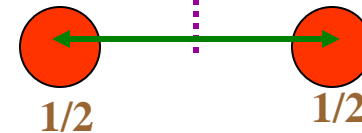
Actuellement, en gros, 3/4 de carbonates et 1/4 de carbone réduit



Au début de la vie, 4/4 de carbonates et  $\varepsilon$  de carbone réduit



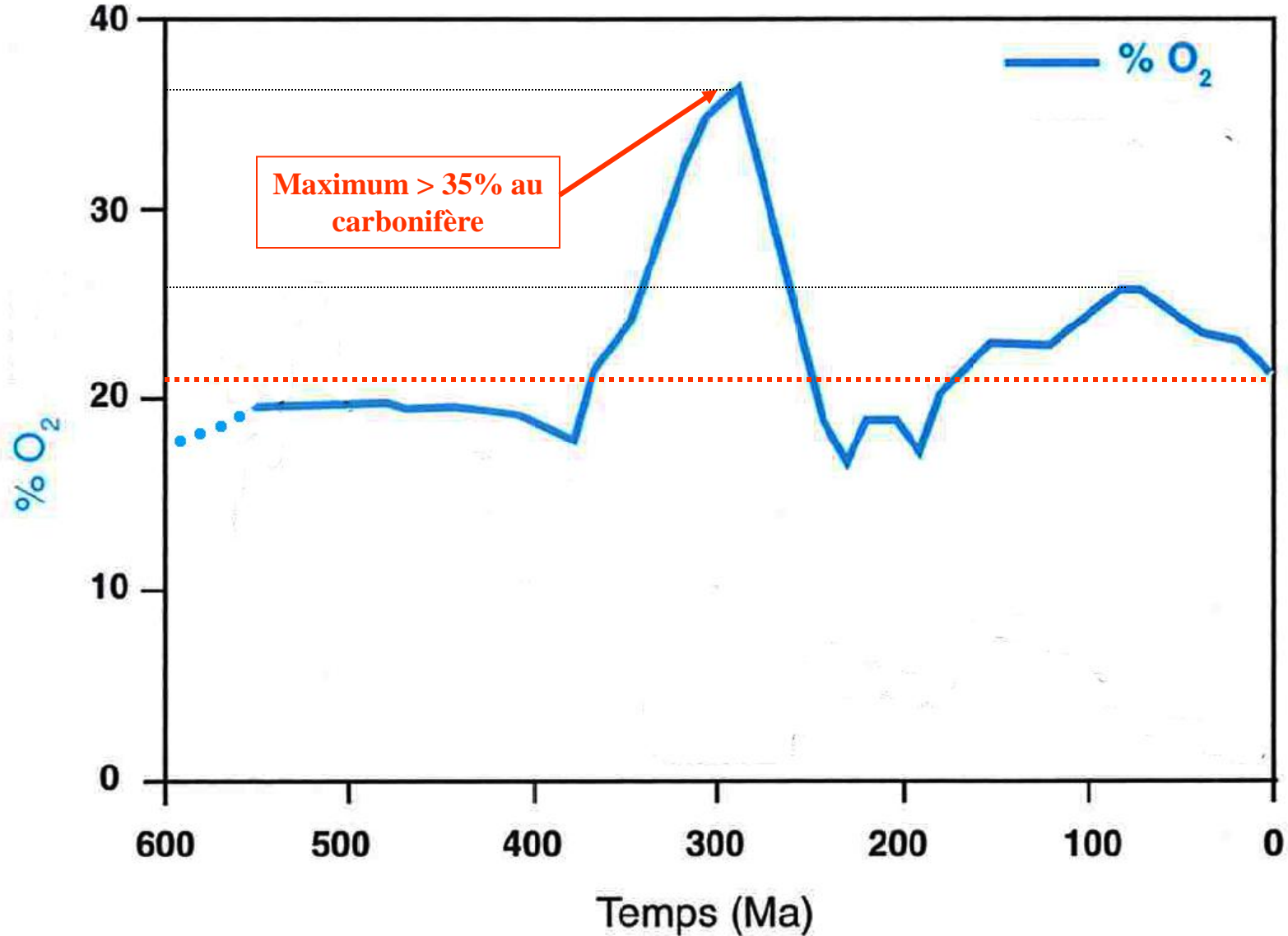
Peut-être y a t'il eu ou y aura t'il 1/2 de carbonates et 1/2 de carbone réduit



Mesurer le  $\delta^{13}\text{C}$  des roches (carbone réduit ou oxydé) revient à estimer le rapport C réduit / C oxydé, donc la quantité de C réduit. De la quantité de C réduit (organique), on déduit l'O<sub>2</sub> atmosphérique



# Le résultat

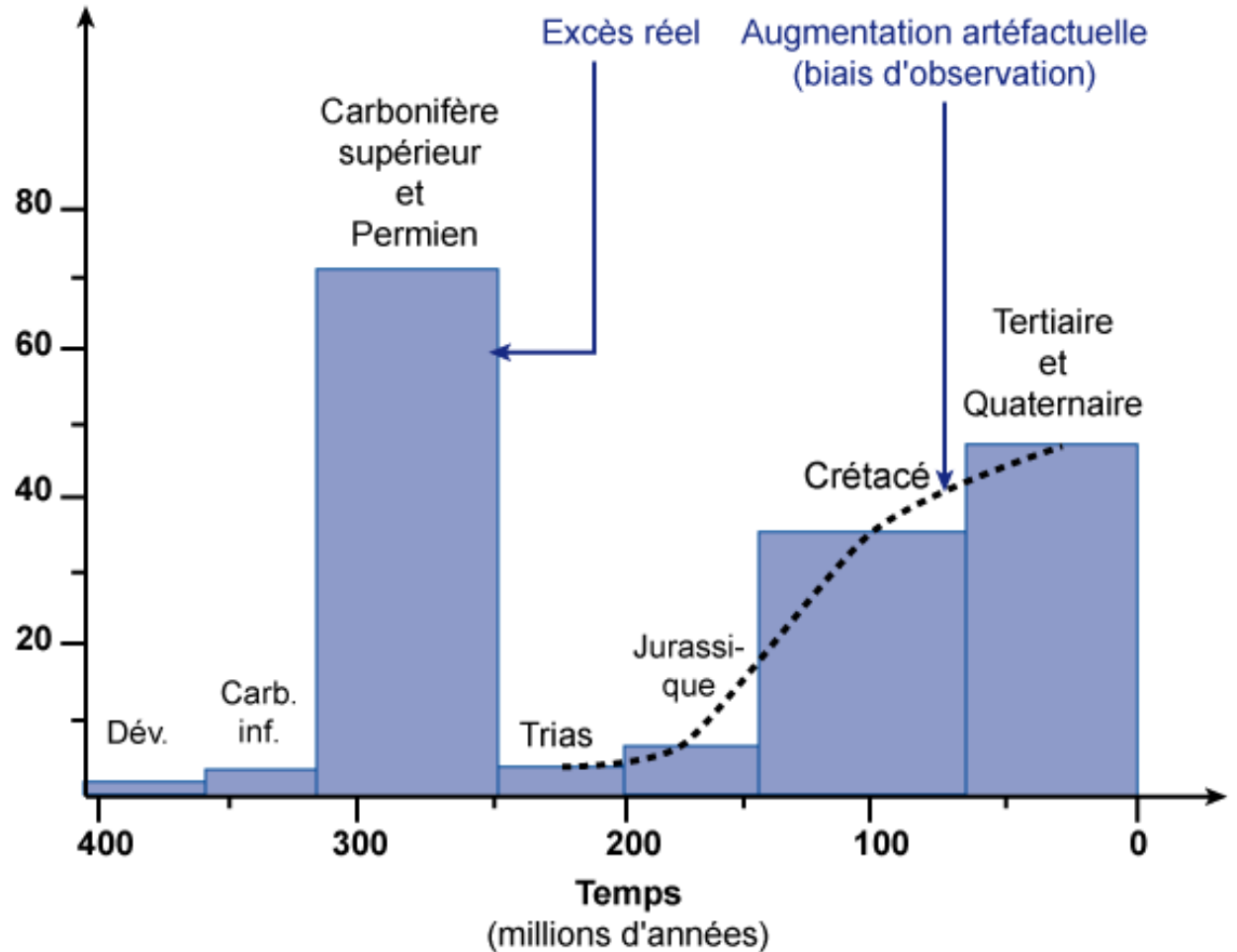




# Une explication du maximum carbonifère



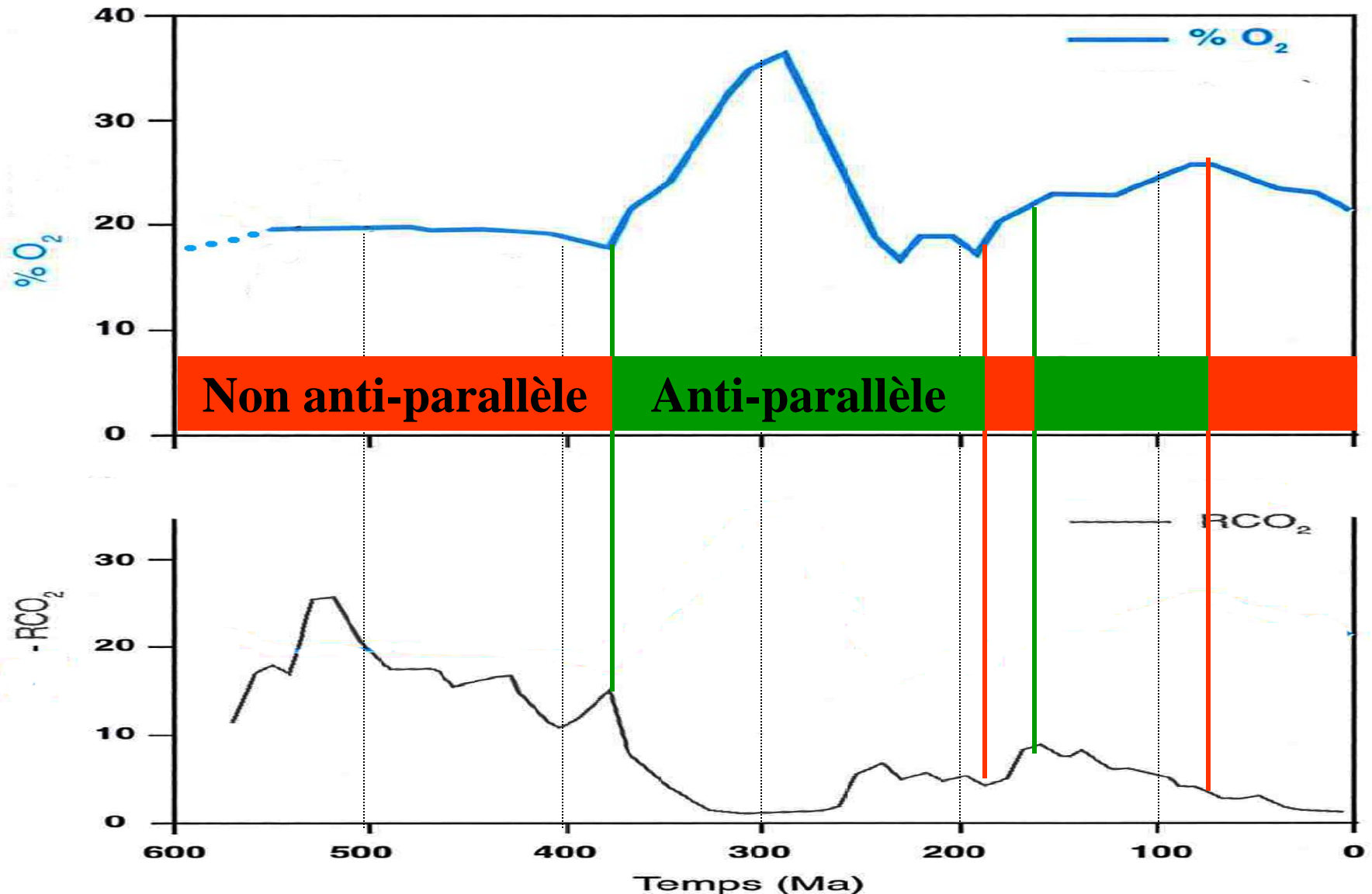
**Réserves de charbon exploitable**  
(milliards de tonnes / millions d'années)



**On aurait pu  
le savoir  
depuis 150 ans  
si les  
disciplines  
scientifiques  
n'étaient pas si  
cloisonnées**







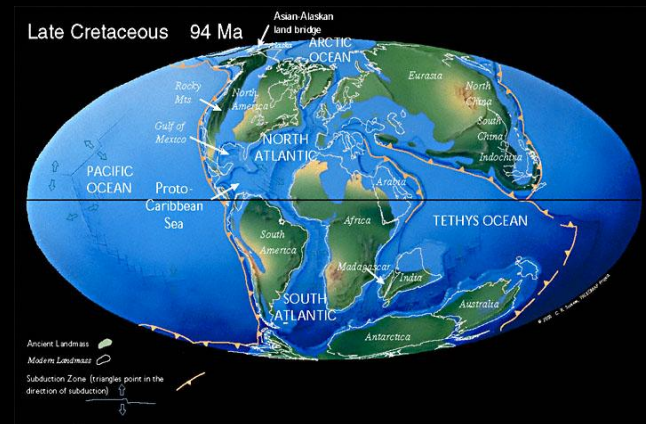
**Evolution comparée O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>. Parfois, c'est antiparallèle. Le couple photosynthèse-fossilisation de la matière organique domine. Souvent ce n'est pas antiparallèle. D'autres facteurs font varier le CO<sub>2</sub>**

**Pourquoi un maximum d'O<sub>2</sub> au Carbonifère, c'est à dire un maximum de fossilisation de matière organique ?**

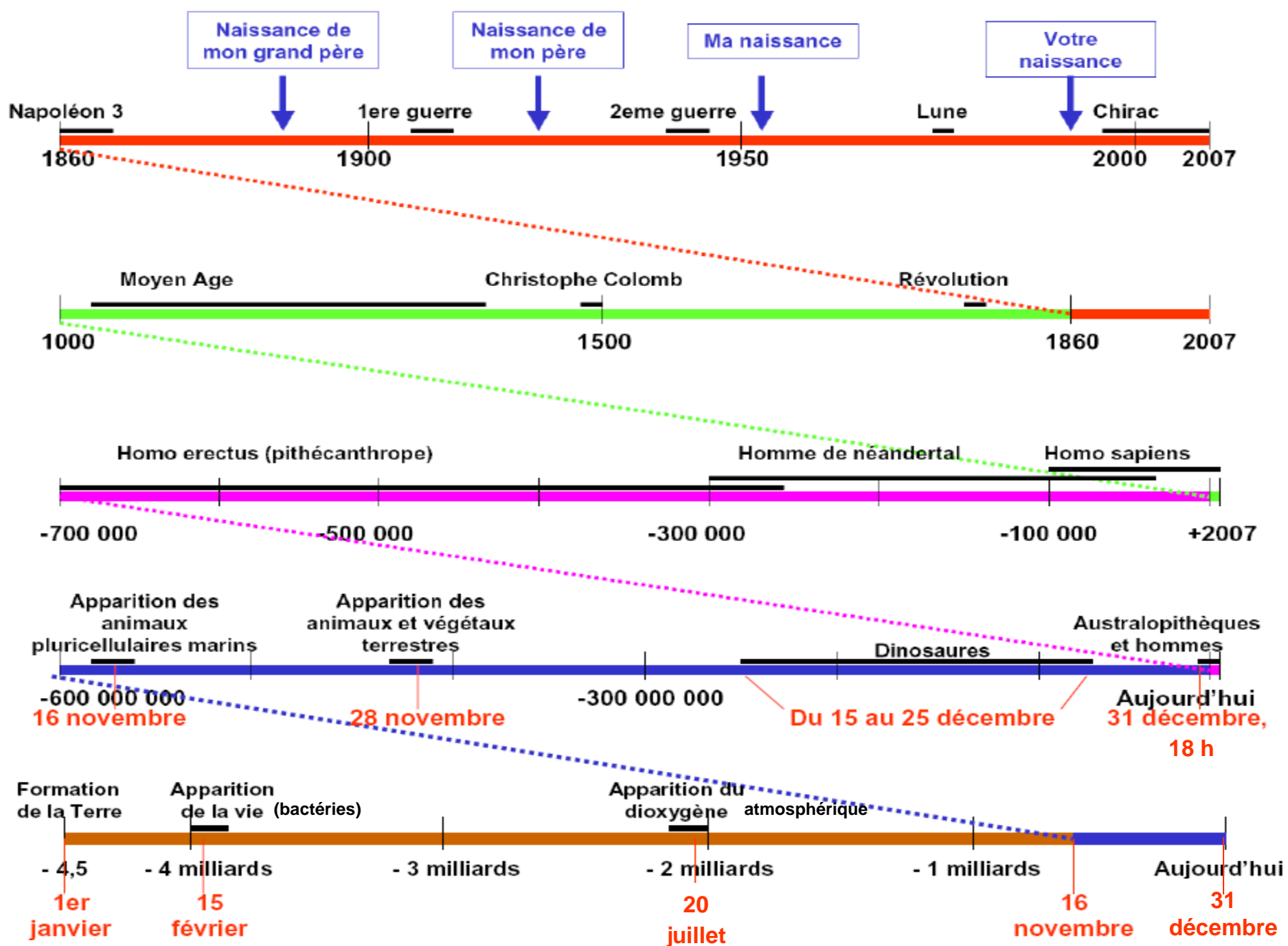
**Piège tectonique du charbon ?**

**Difficulté de la dégradation de la lignine ?**

**Et pourquoi O<sub>2</sub> augmente au Jurassique et Crétacé, avec un maximum Crétacé ? Haut niveau de la mer et hautes températures qui favorisent l'existence de plateforme peu profonde mal oxygénées ?**







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

**Comment connaître  
l'atmosphère  
pré-phanérozoïque ? On  
étudie les sédiments  
protérozoïques et archéens.  
Contrairement à une  
croyance largement  
répandue, il existe des  
sédiments non  
métamorphisés jusqu'à  
-3,5 Ga (principalement  
Australie et Afrique du  
Sud). Ici, des fentes de  
dessiccation du groupe de  
Moodies (3,22 Ga), Afrique  
du Sud**





# Comment connaître l'atmosphère pré-phanérozoïque ?



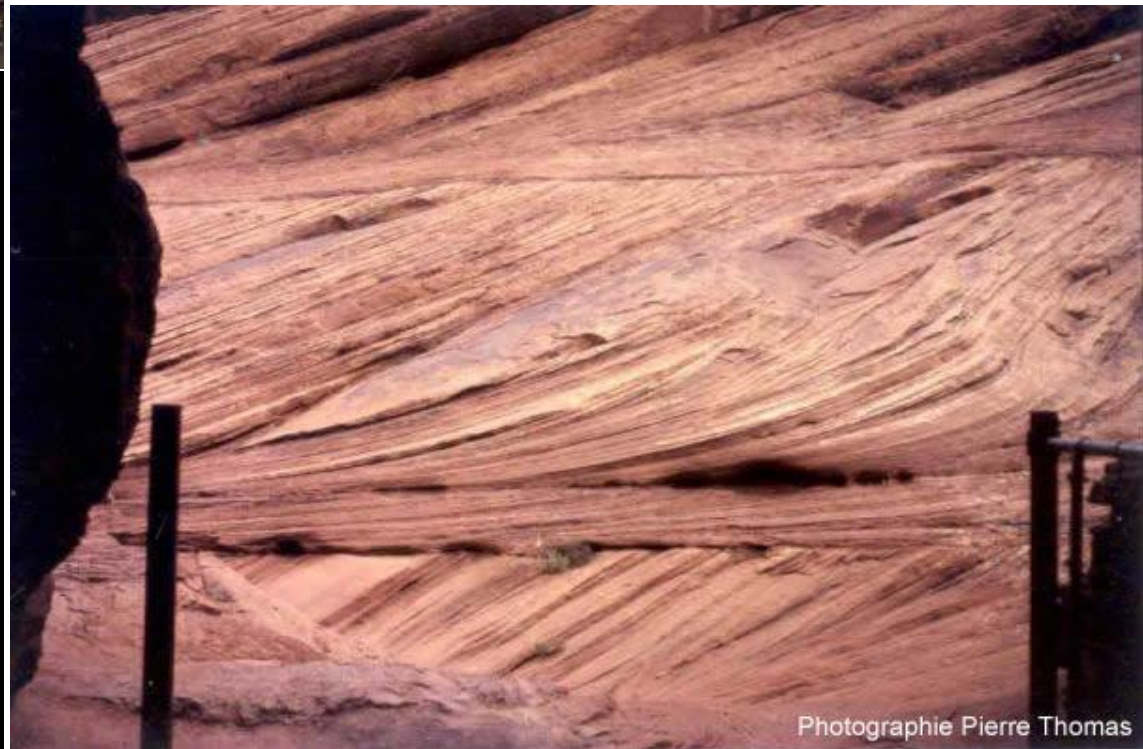
Ces sédiments, ça ne marche pas !



**Ceux là, des  
sédiments éoliens,  
marcheraient**



Photographie Pierre Thomas



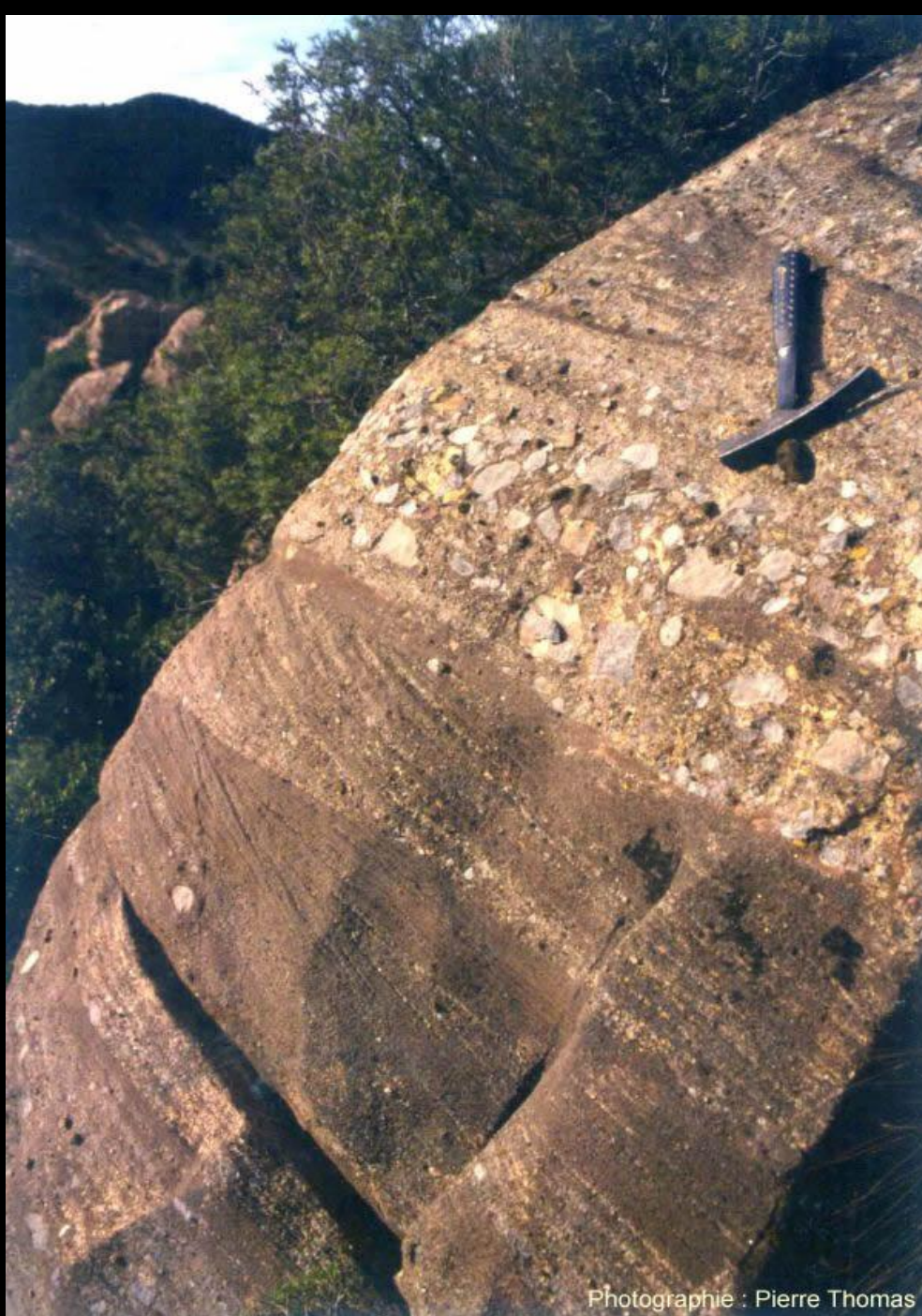
Photographie Pierre Thomas



**Ceux la aussi !**

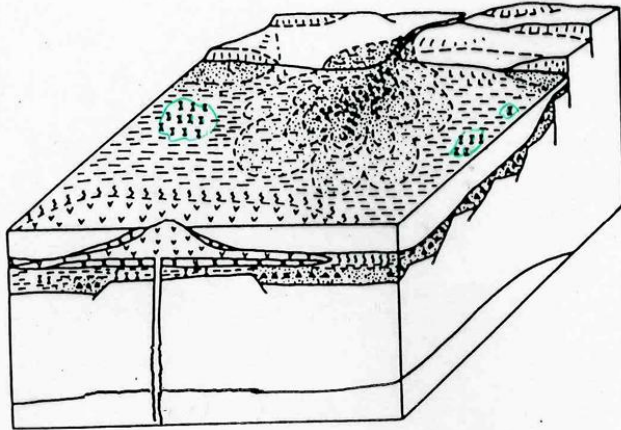
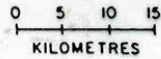




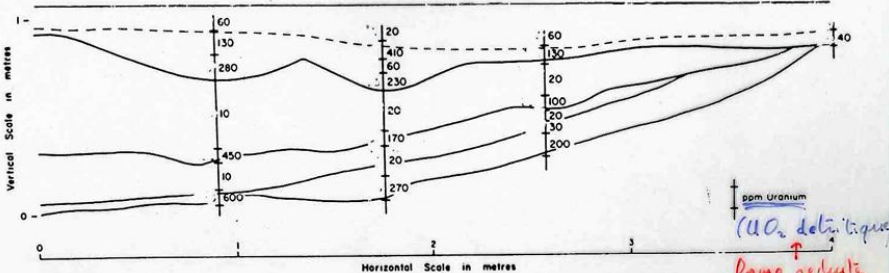
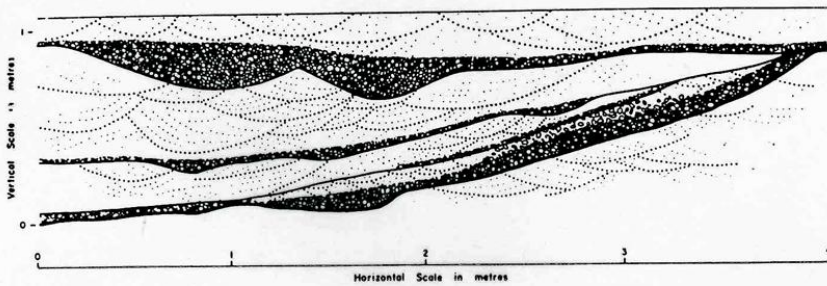


**Et ceux la aussi,  
que vous connaissez  
dans 15 jours  
d'ailleurs !**





- ..... CONGLOMERATES
- ..... CARBONATES
- ..... IRONSTONES = *for uranium = B.I.F.*
- ..... MUD
- ..... SILT
- ..... SAND
- ..... BRECCIA
- ..... } LAVA
- ..... } LAVA
- ..... VOLCANICLASTICS
- ..... STRATIFIED
- ..... SULPHIDE-FACIES IRONSTONES
- ..... HYDROTHERMAL CIRCULATION



ppm uranium  
*(UO<sub>2</sub> detritique)*  
*forme réduite de l'uranium*

Le précambrien de la région de Johannesburg

# Une reconstitution de l'Archéen sud africain (vers-2,9 Ga), le Witswatersrand :

-Des torrents qui roulent des galets de pyrites (FeS<sub>2</sub>) et de pechblende (UO<sub>2</sub>), instables en milieu oxydant

L'atmosphère ne contenait pas d'O<sub>2</sub>



**Un exemple de  
conglomérat à  
galet de pyrite  
du  
Witswatersrand**

5 cm





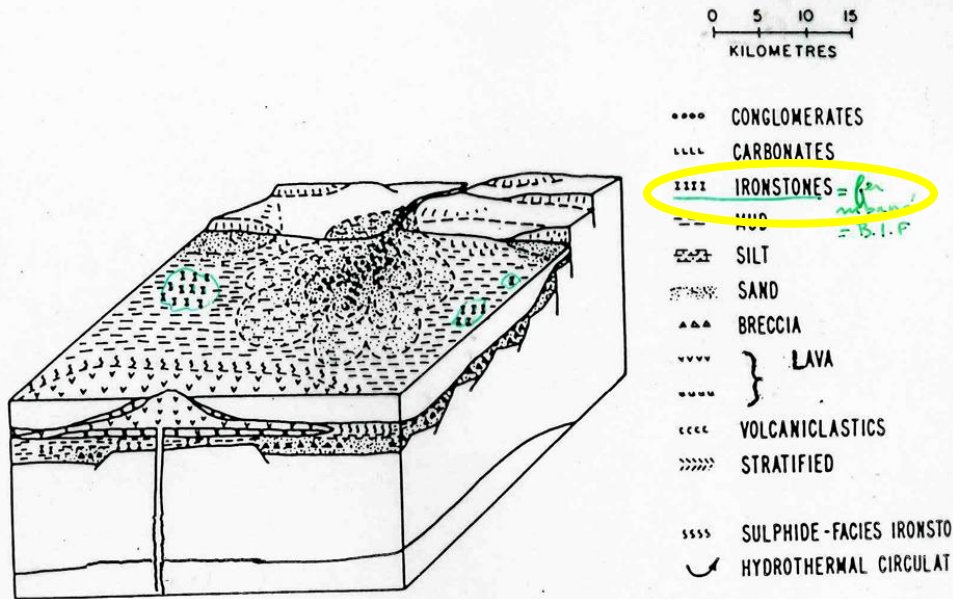
**Un exemple de  
conglomérat à  
galet de pyrite  
du  
Witswatersrand**





**La pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) n'est pas stable en présence d' $\text{O}_2$ .  
Alors dans un torrent ...**

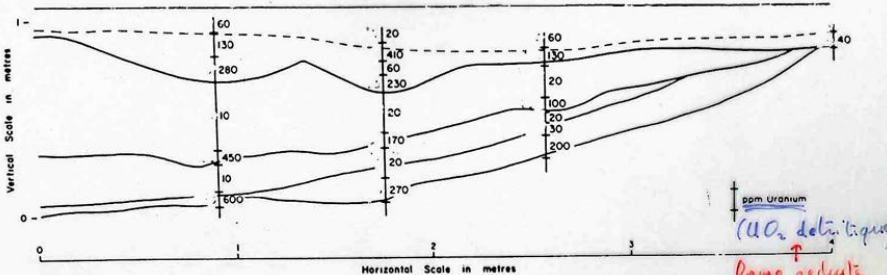
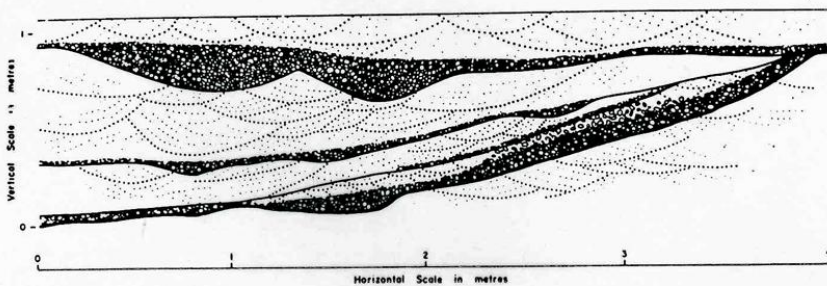




## Une reconstitution de l'Archéen sud africain (vers-2,9 Ga) :

- Des torrents qui roulent des galets de pyrites ( $\text{FeS}_2$ ) et de pechblende ( $\text{UO}_2$ ), instables en milieu oxydant

-Des milieux localisés avec des BIF (banded Iron Formation) contenant du  $\text{Fe}_2\text{O}_3$



Le précambrien de la région de Johannesburg



**Les BIF, des alternances d'oxyde ferrique avec  $\text{Fe}^{+++}$  ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) et de silice. Ce sont les principales réserves de minerais de fer du monde**







**BIF du groupe de Fig Tree (3,25 Ga, Af. du Sud)**





**BIF du groupe de Fig Tree (3,25 Ga, Af. du Sud)**





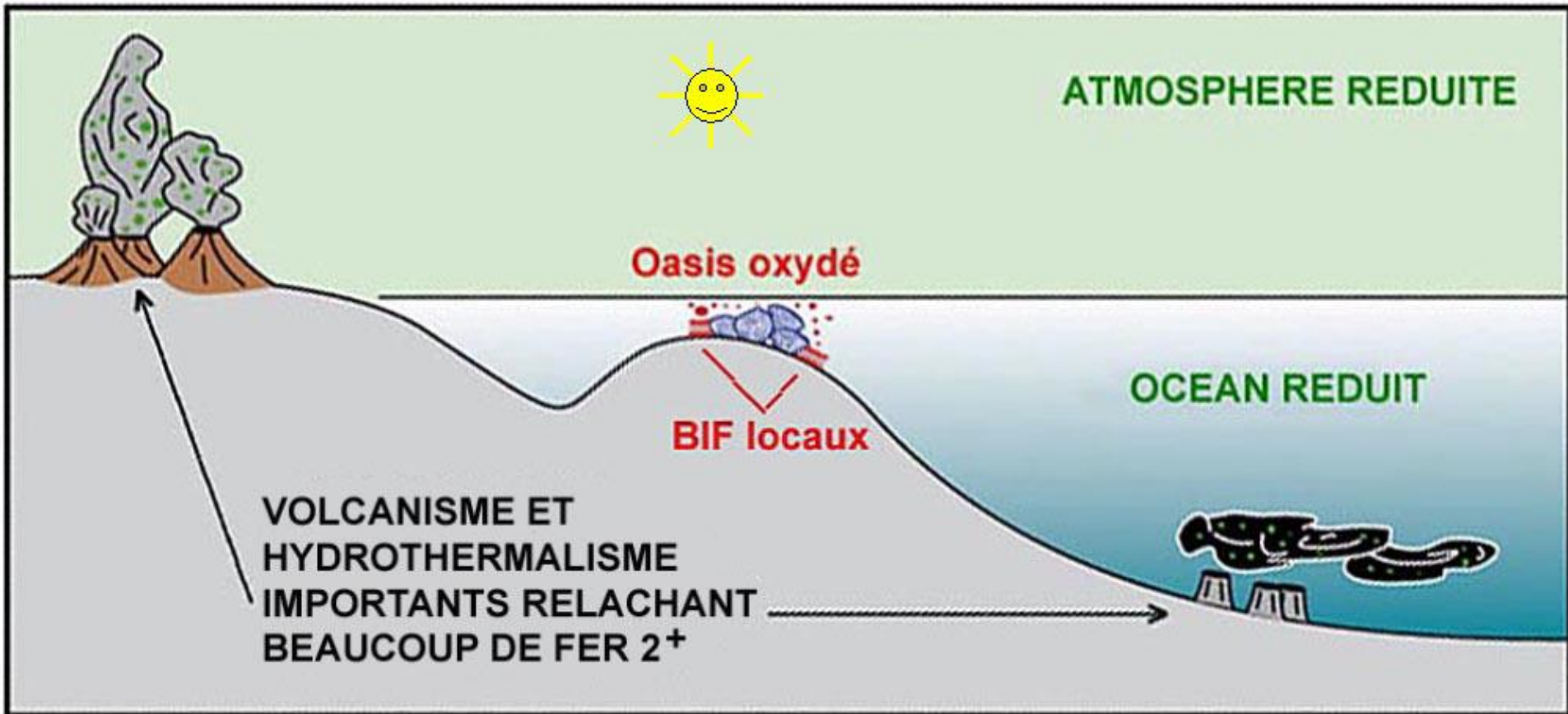
**Gros plan sur les fers rubanés du groupe de Fig Tree  
(3,25 Ga, Af. du Sud)**





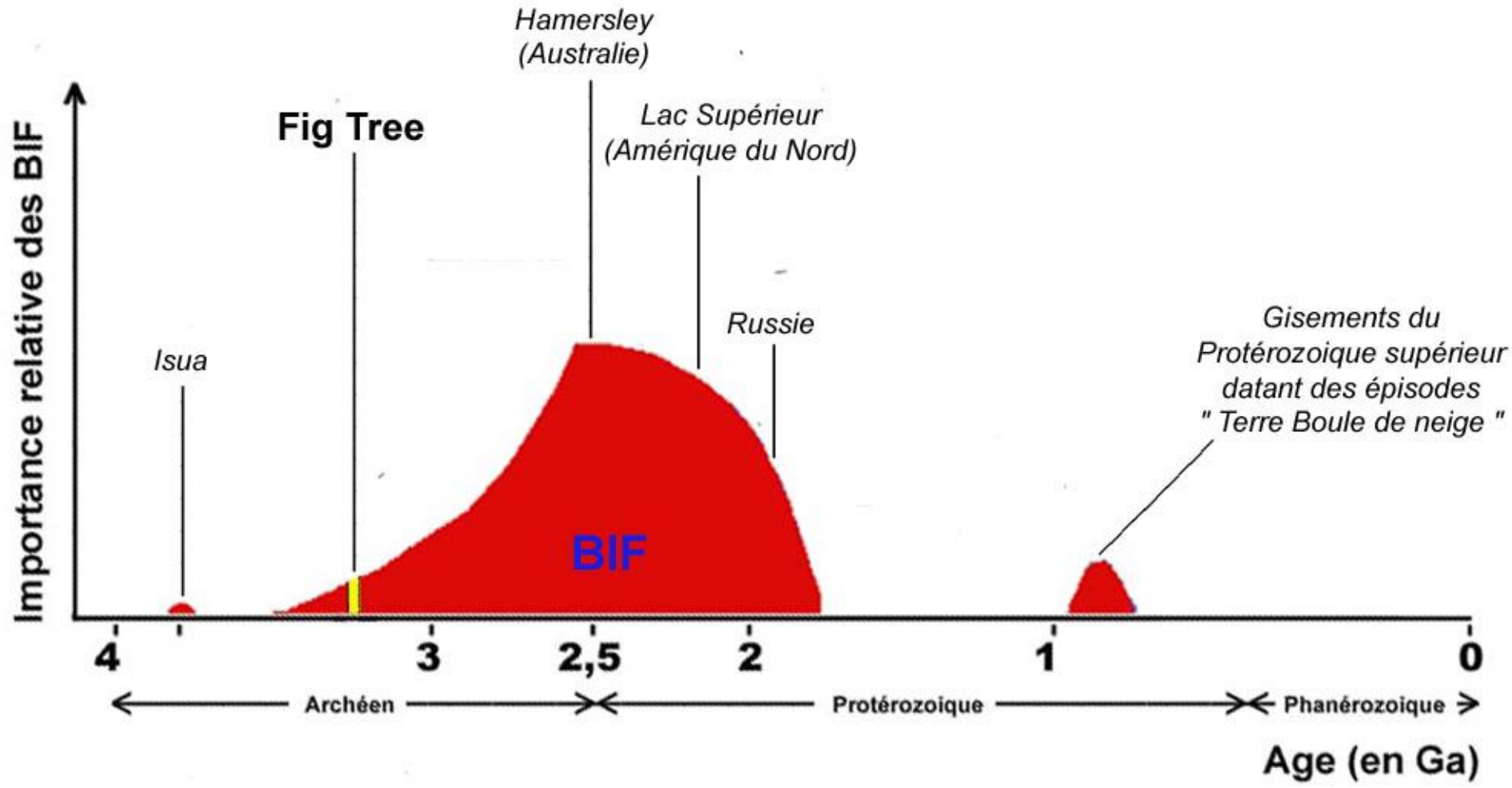




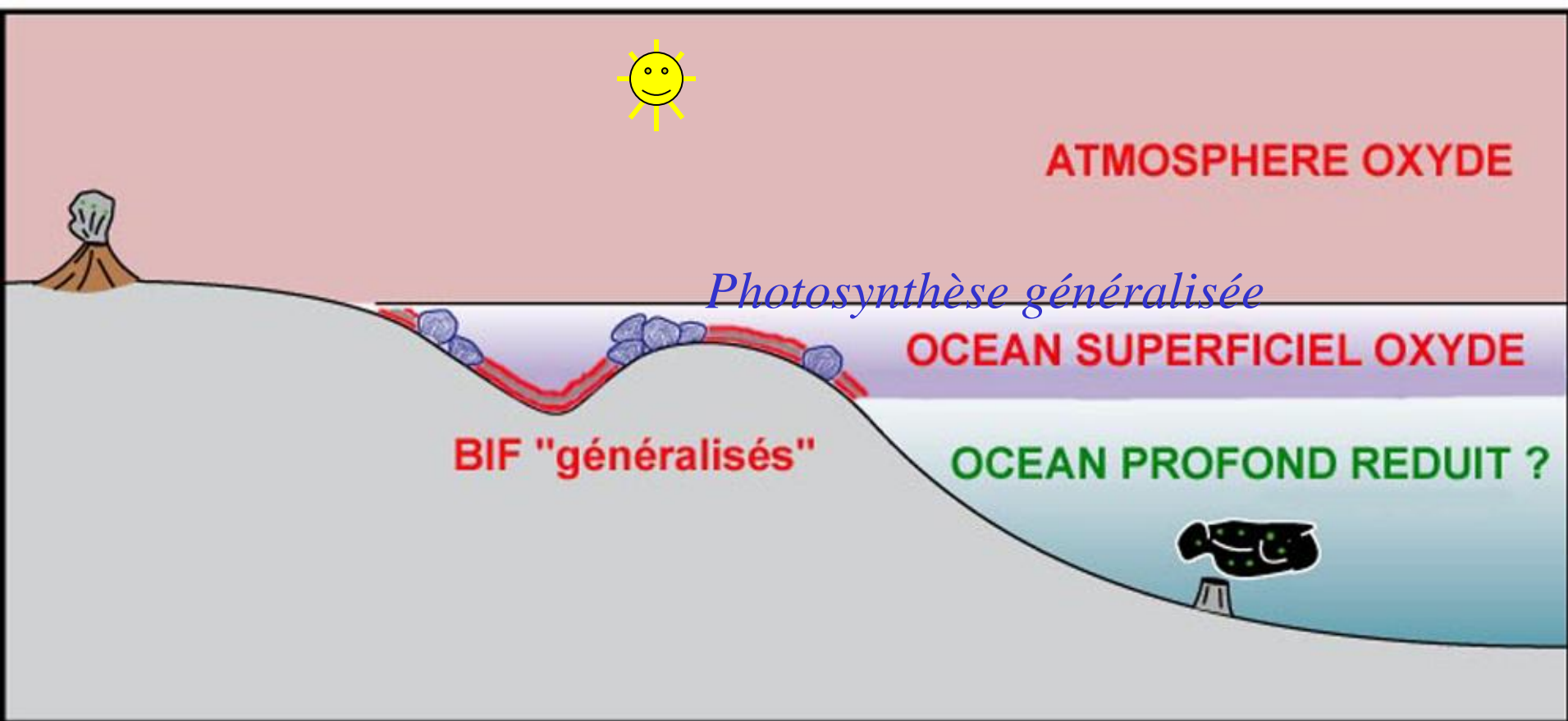


**La Terre vers -3,2 -2,9 Ga : atmosphère réduite, eau de mer réduite, riche en  $\text{Fe}^{2+}$  (dissout car soluble). Oasis de vie photosynthétique créant des « ilots » oxydés où précipite du  $\text{Fe}^{3+}$  sous forme de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , insoluble.**



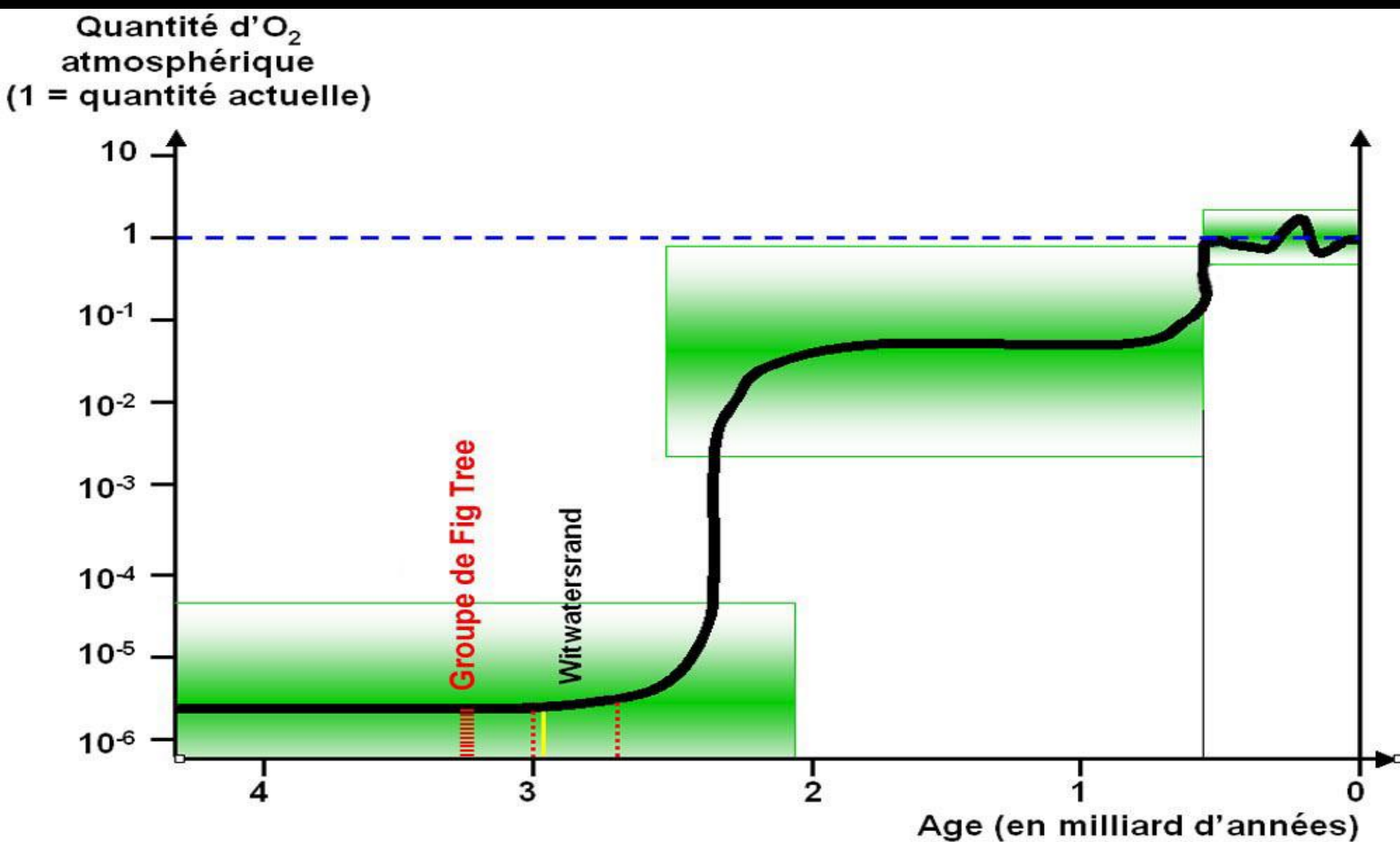


**Les BIF « explosent » vers -2,5 Ga, pour disparaître (presque) définitivement vers -1,8 Ga.**



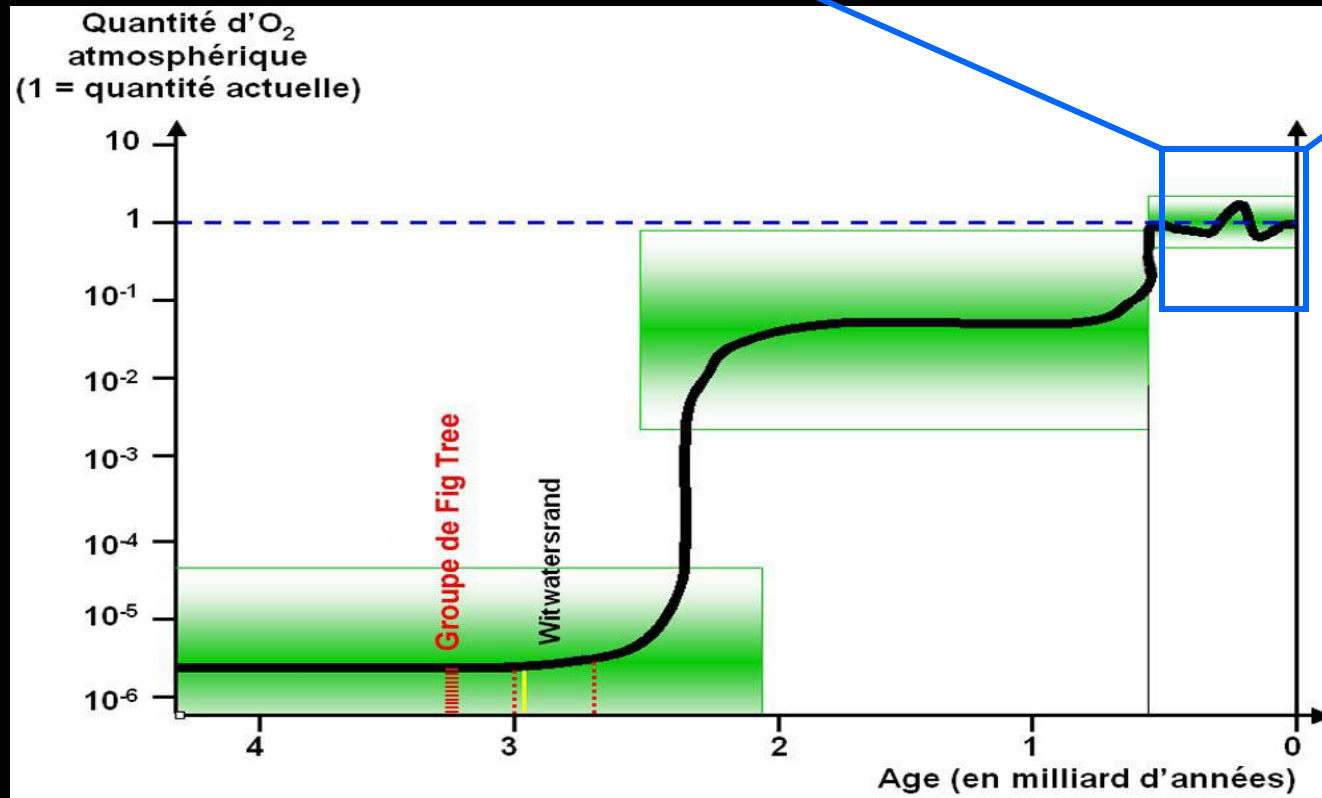
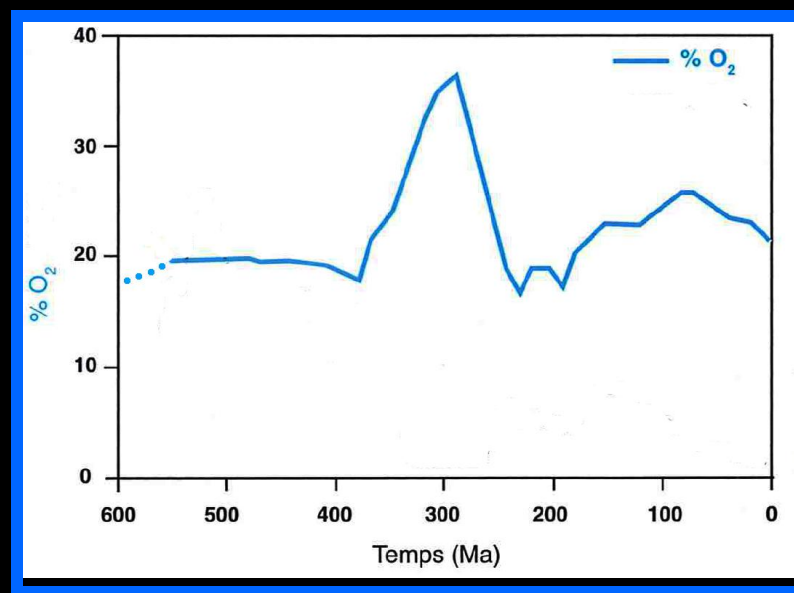
**La « révolution » de -2,6 à -2 Ga. Explosion de la photosynthèse (et de la fossilisation de la matière organique). L'atmosphère et l'océan (d'abord superficiel, puis profond) deviennent oxydés. Tout le  $Fe^{++}$  devient  $Fe^{+++}$  et précipite sous forme d'énormes niveaux de BIF omniprésents. A la fin, la précipitation cesse, faute de  $Fe^{++}$ .**





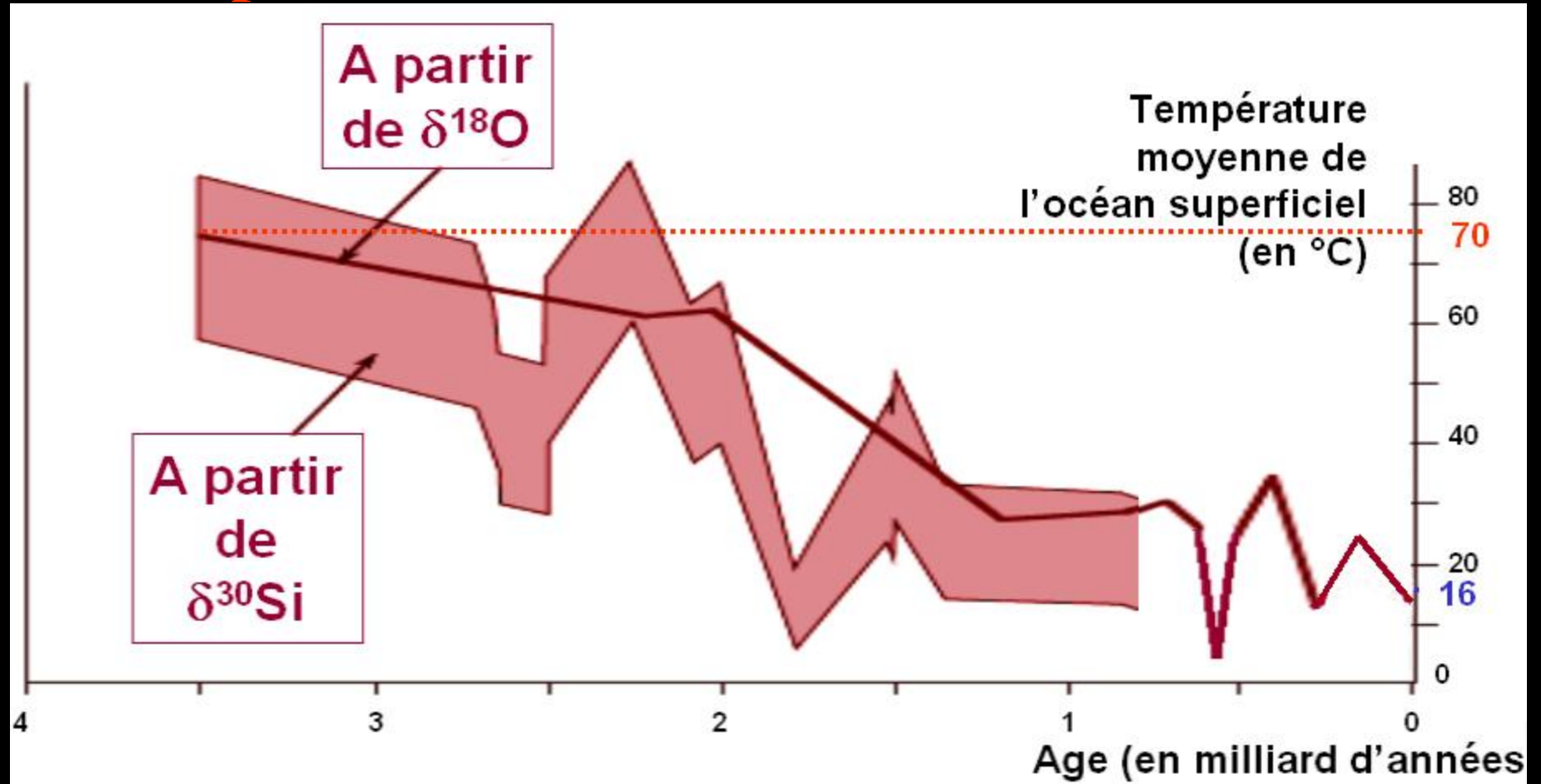
**C'est avec de telles données qu'on reconstitue l'évolution de l'O<sub>2</sub> atmosphérique au cours du temps (courbes rouge) avec une énorme barre d'erreur (zone verte)**

# Les variations phanérozoïques de l'O<sub>2</sub> atmosphérique (échelle linéaire) dans l'évolution globale (échelle log)





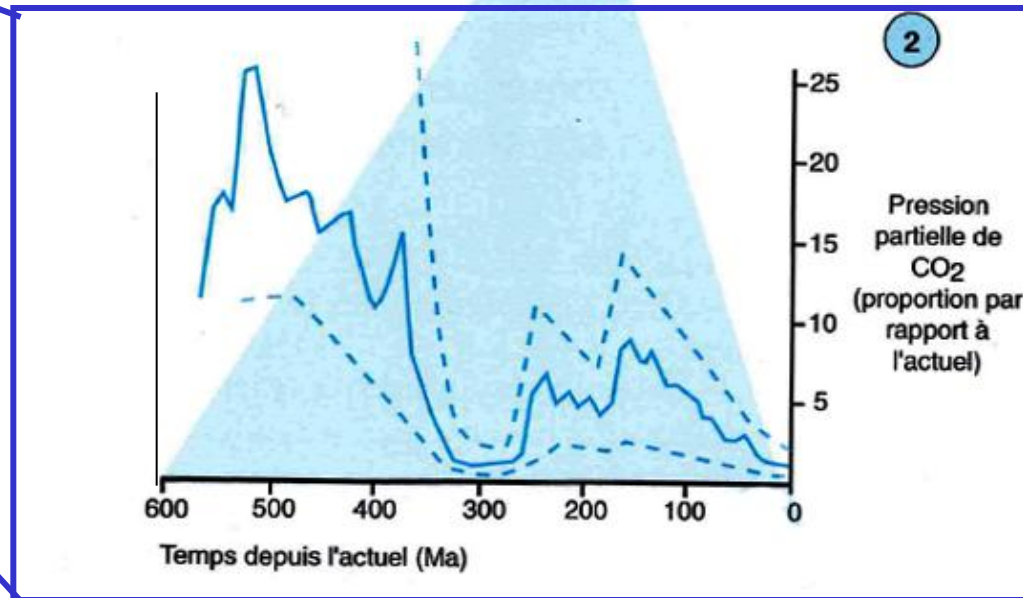
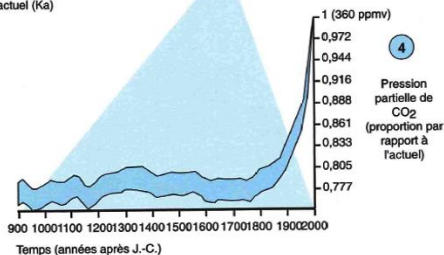
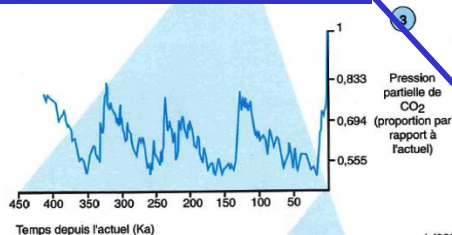
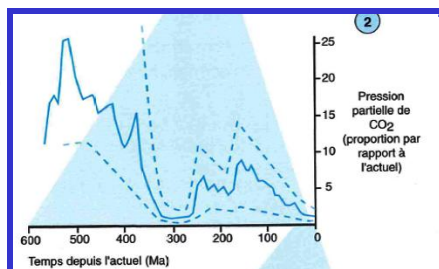
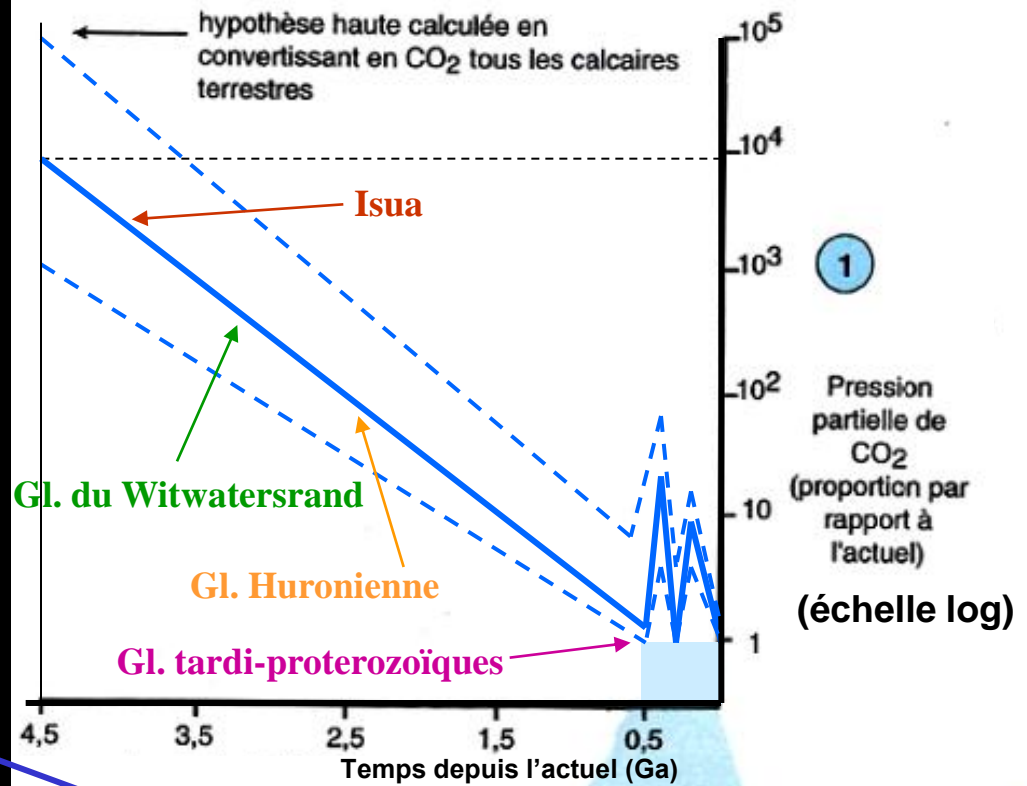
# La température à l'échelle de l'histoire de la Terre.



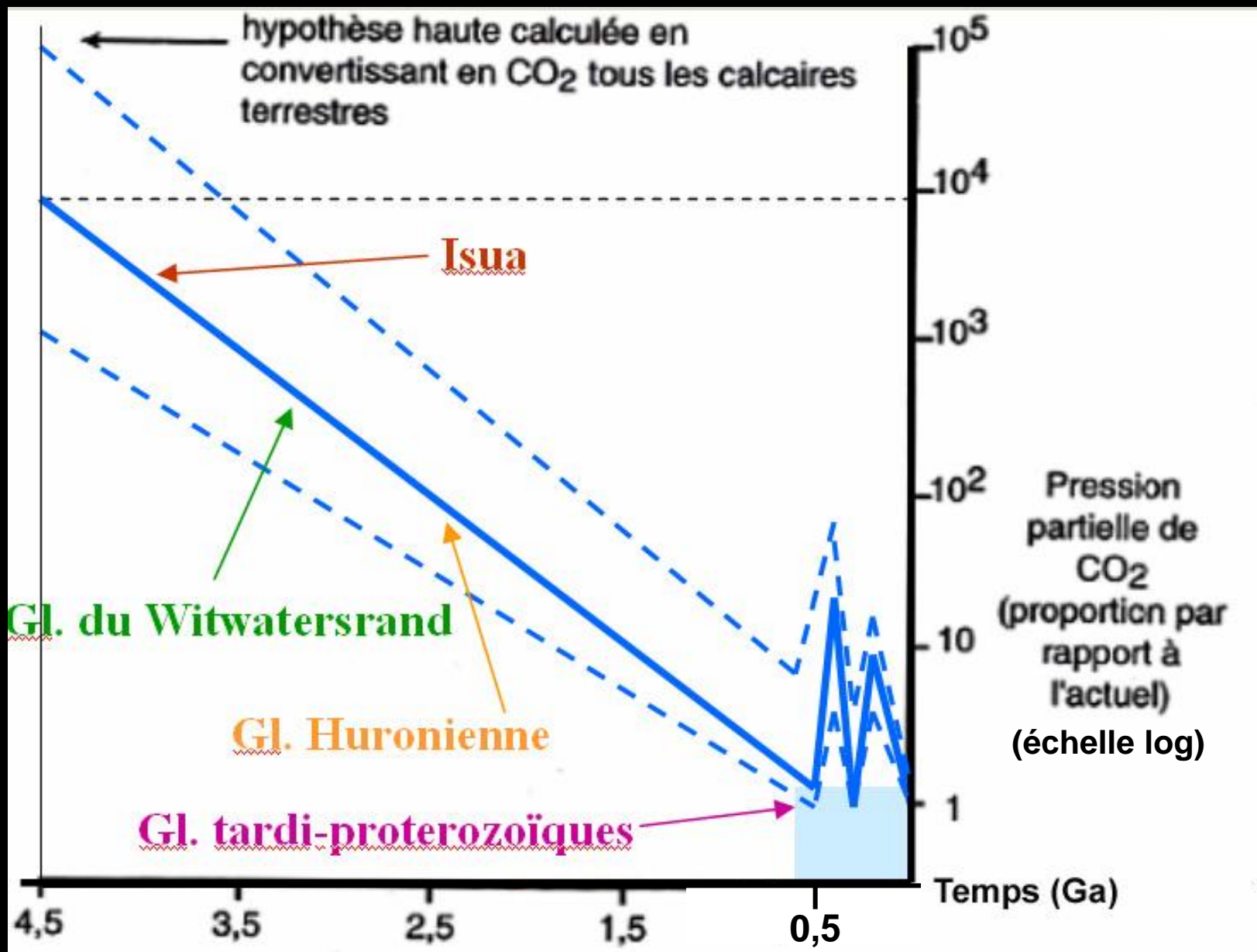
Que fait la température (courbes très approximatives) ?  
Vers + 70° jusqu'à -2 Ga.

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

Et pendant ce temps là,  
 le CO<sub>2</sub> baisse : une  
 diminution exponentielle  
 (au irrégularités près).  
 Le CO<sub>2</sub> est divisé par 10  
 tout les milliards  
 d'années (10 000 à  
 100 000 en tout).

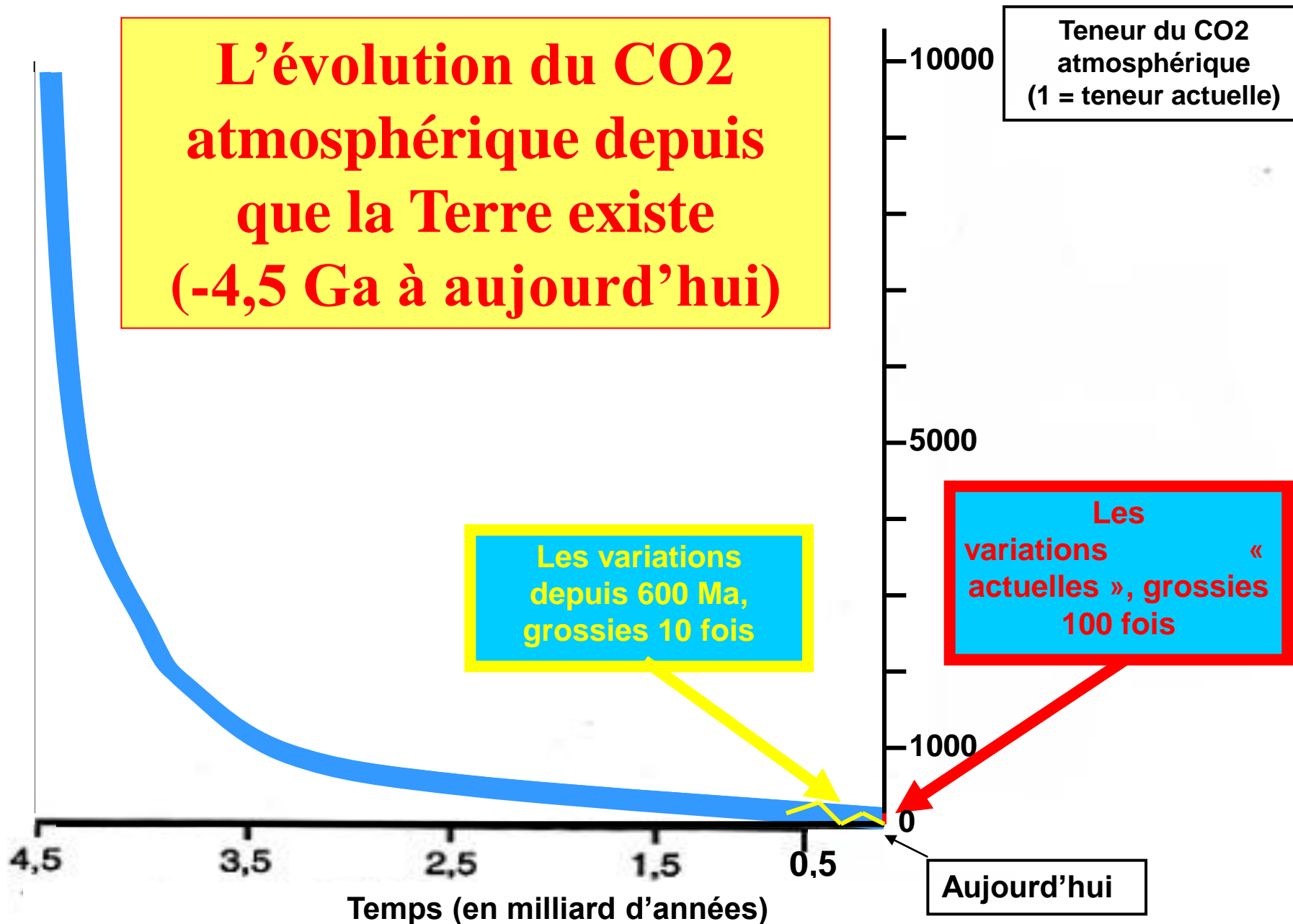






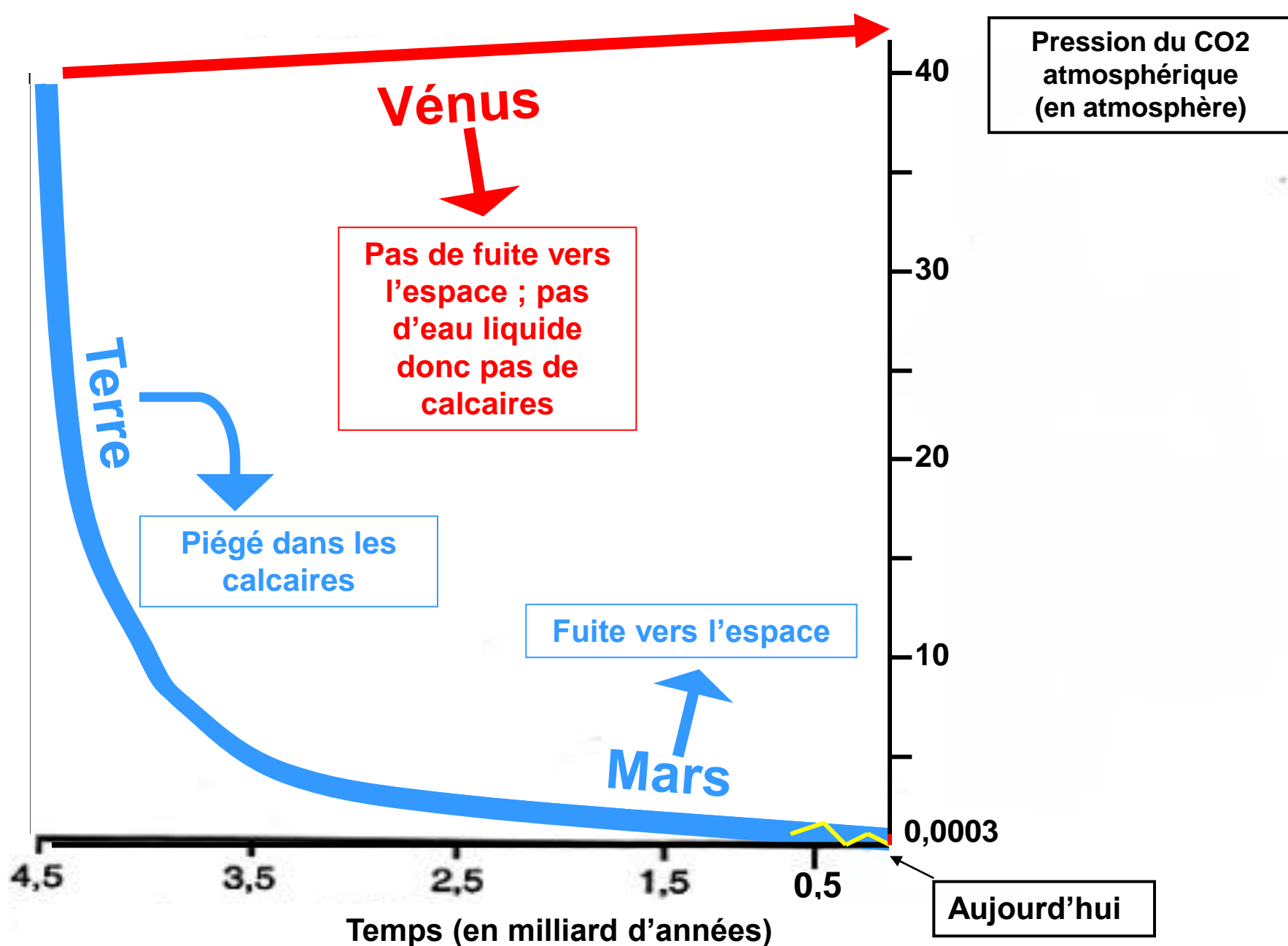
**Une courbe d'évolution du CO<sub>2</sub> que bien peu de gens connaissent, à l'échelle de la durée de la Terre**

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



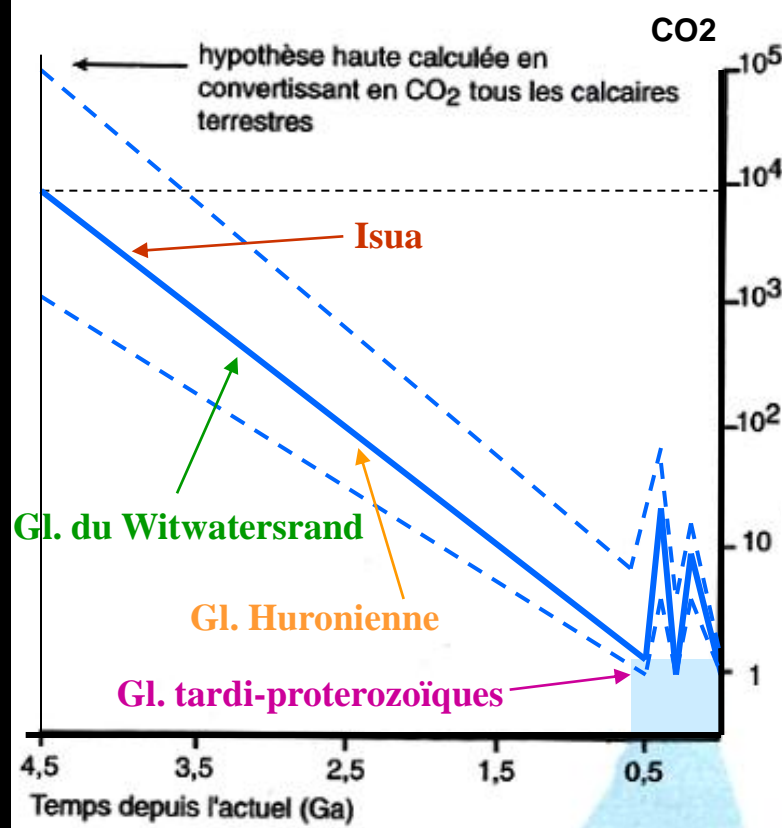
C'est encore plus « inattendu » en échelle linéaire



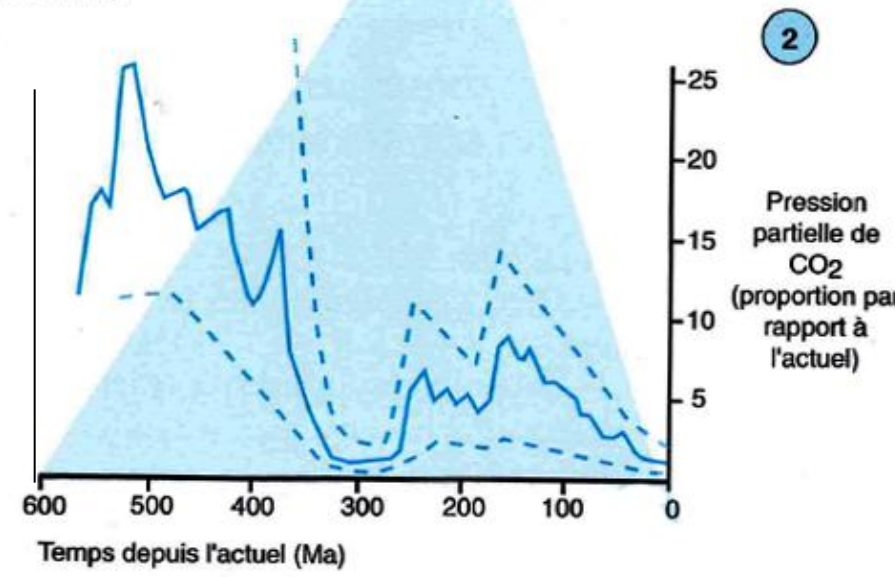
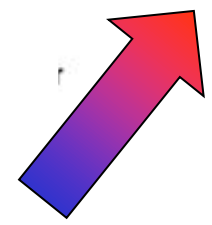
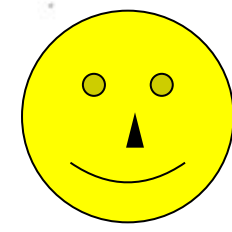


# Les destins comparés de Vénus, Terre et Mars

**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



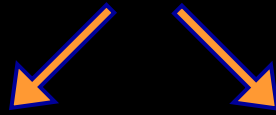
2



**Des évènements particuliers : les épisodes « Boule de neige » dont 3 « bien » documentées (Sturtienne, 750 Ma, Marinoéenne/Vanranger, 600 Ma et Gaskiers, 580 Ma) et peut-être d'autres beaucoup plus vieilles dans l'Archéen.**



# Des indices de glaciations vers – 750 Ma et vers –600/-580 Ma



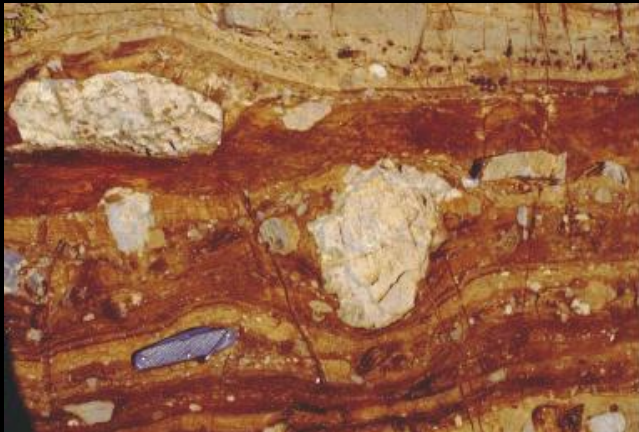
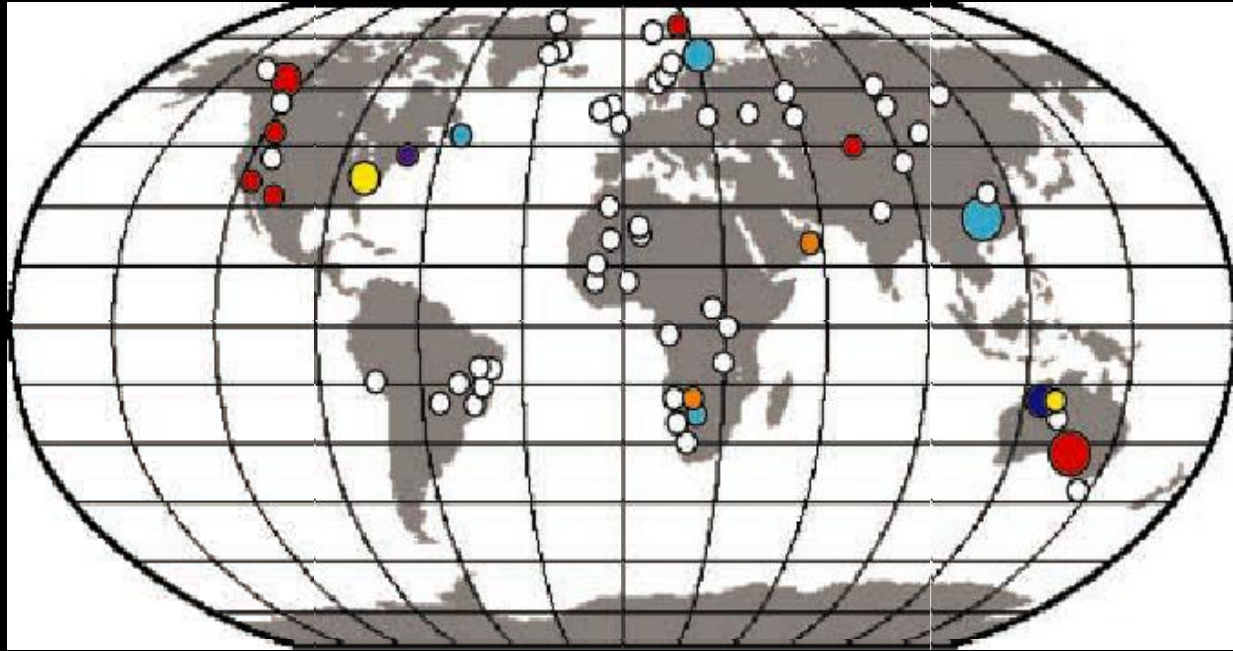
**Surfaces striées – Sédiments sans granoclasement avec des clastes de taille diverse (moraines) = mouvement de glaces sur les continents**



**Lamines du sédiment marin déformées par la chute d'un galet (dropstone) = calotte au niveau de la mer, icebergs abondants**



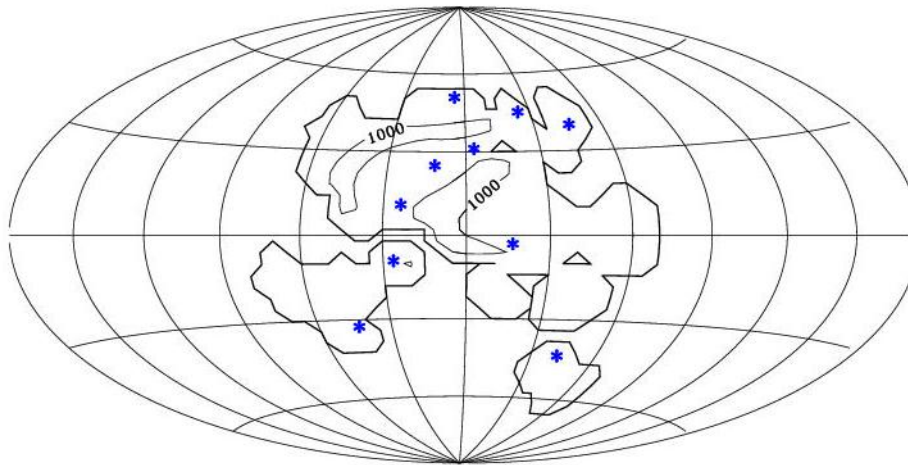
**On en trouve partout, sur toutes les latitudes  
actuelles**



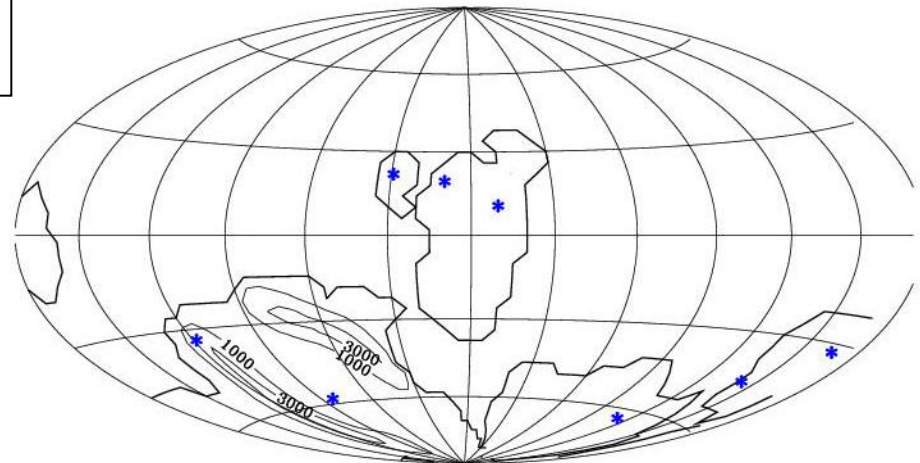
**Présence des formations glaciaires  
Néoprotérozoïque  
Sur tous les continents**

**Quand on replace les continents dans leur position de l'époque, on voit qu'il y avait des glaciers partout, même à l'équateur**

750 Ma



580 Ma



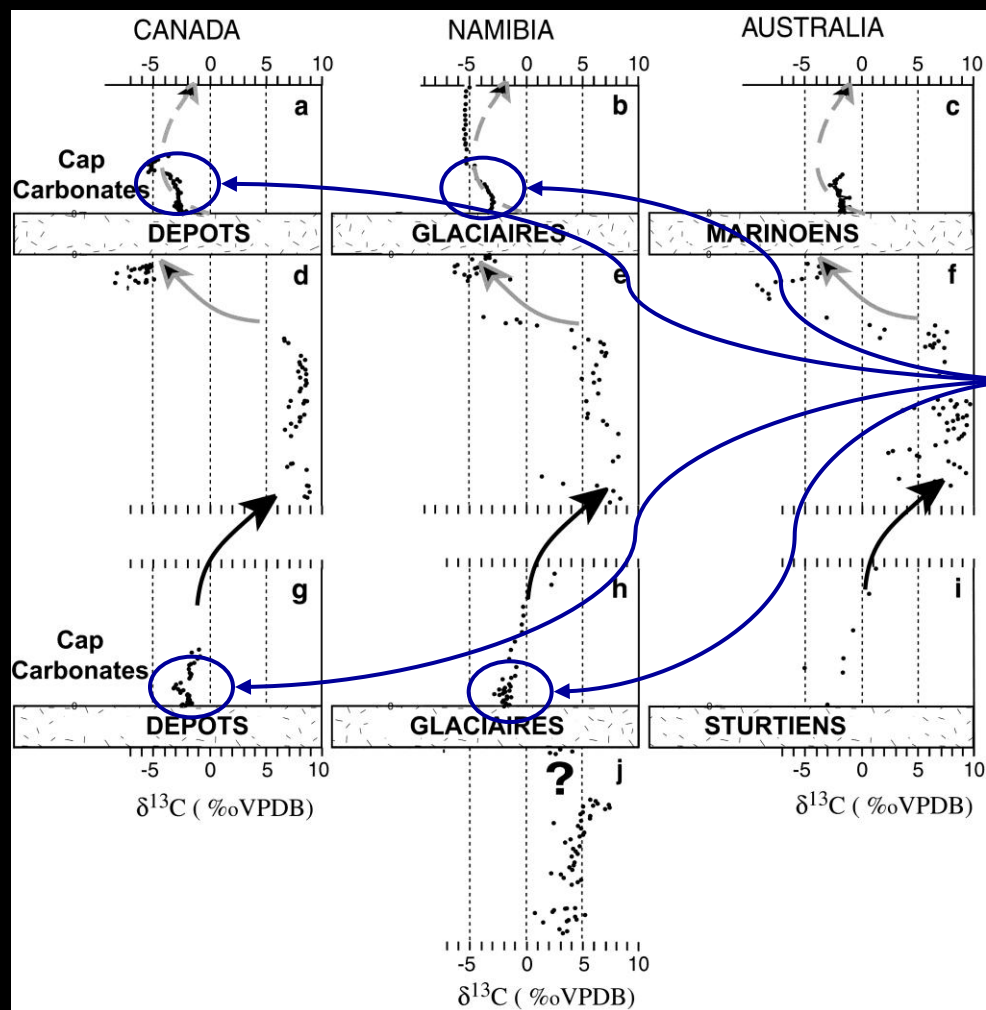


**Il y a souvent des BIF, les seuls BIF post 1,8 Ga associés aux sédiments marins (avec dropstone)**

**Ces sédiments glaciaires sont très souvent surmontés d'un épais niveau de carbonates (cap carbonates)**



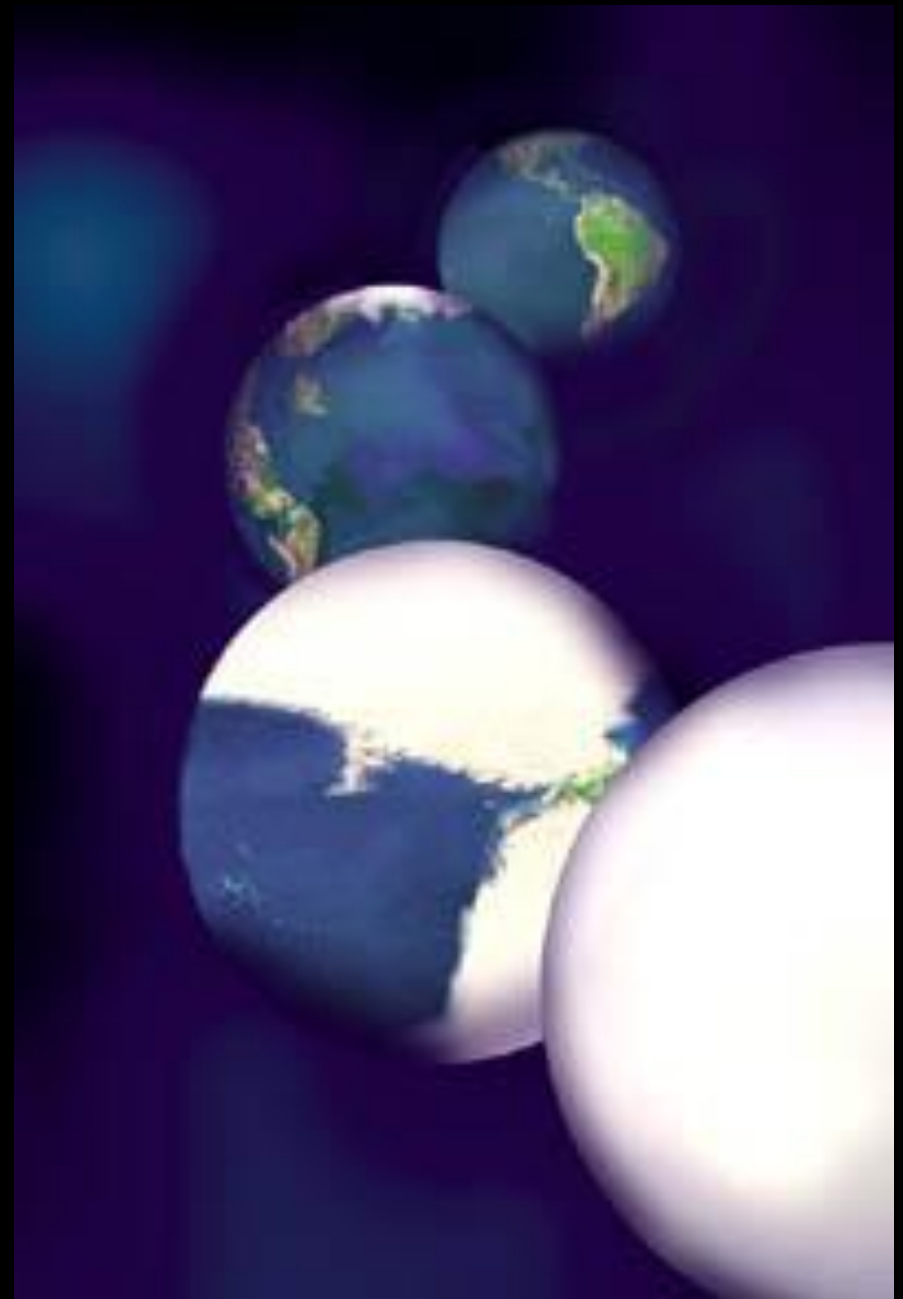
# Ces carbonates post glaciaires ont un $\delta^{13}\text{C}$ faible, voisin de celui du $\text{CO}_2$ mantellique



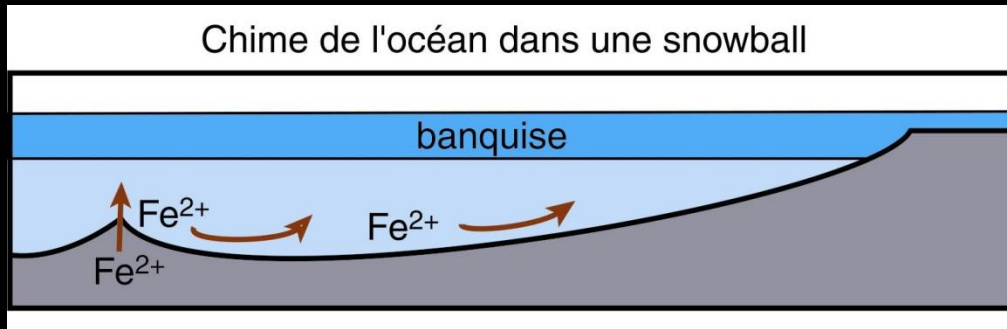
Pour les deux phases de refroidissement, les cap-carbonates post-glaciaires montrent un  $\delta^{13}\text{C}$  compris entre -5 et -2 ‰



**D'ou l'idée  
d'épisodes pendants  
lesquels tous les  
continents étaient  
recouverts de  
calottes et tous les  
océans de banquise :  
les épisodes « boules  
de neige » (snowball  
earth )**



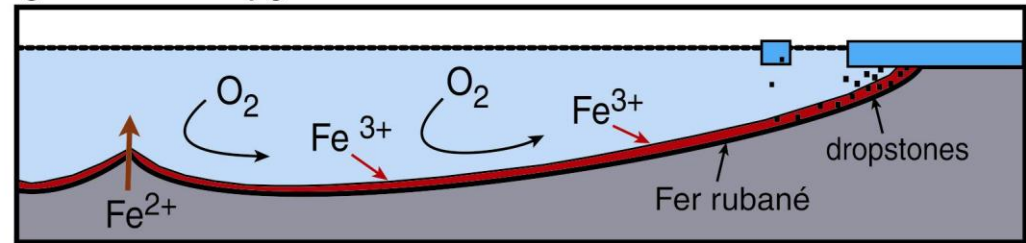
# Cela explique les sédiments glaciaires, mais aussi les seuls BIF post 1,8 Ga que l'on trouve à la fin de ces épisodes



*Glaciation globale se traduit par une stagnation et une anoxie des eaux océaniques*

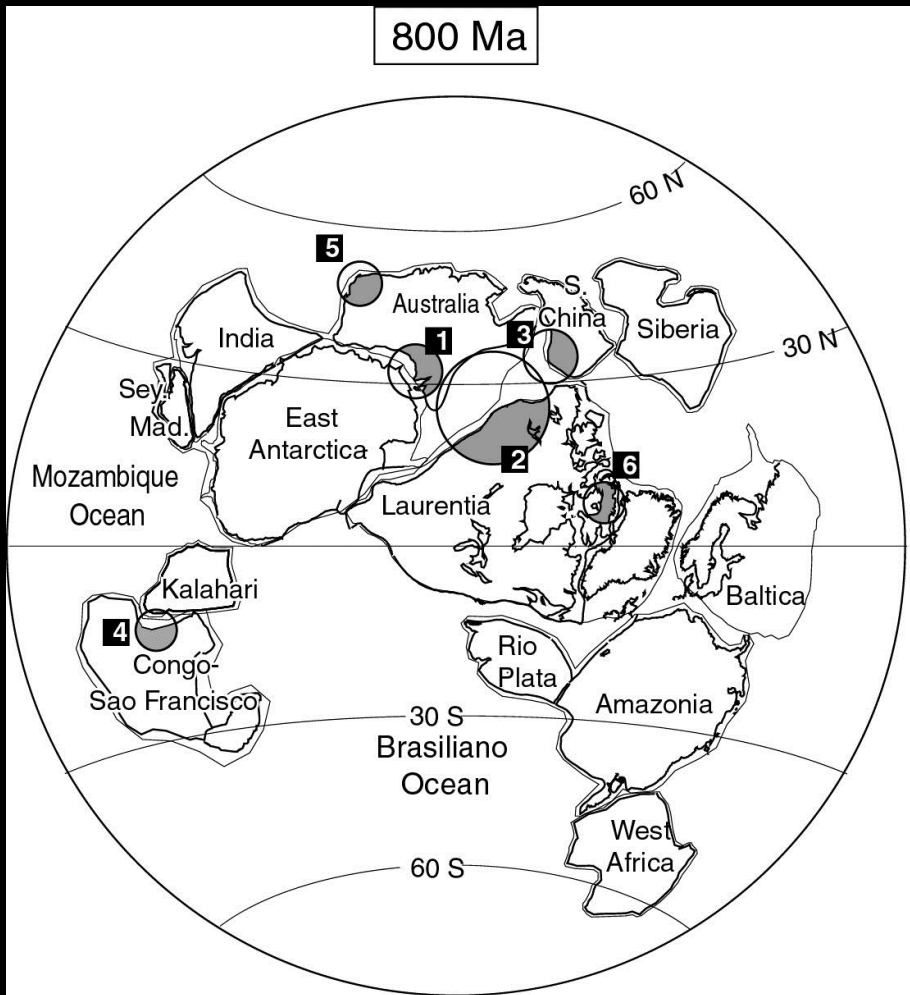


Déglaciation : oxygénation de l'océan = remobilisation du fer ferreux





# Une proposition de modèle explicatif



**1 La survie du supercontinent Rodinia depuis plus de quelques 200 Ma**

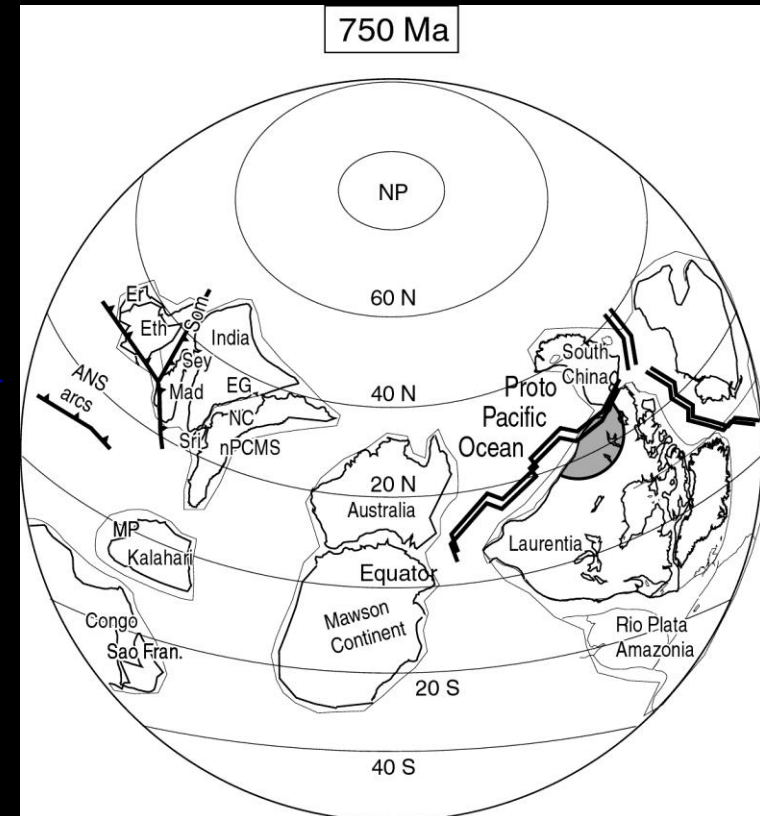
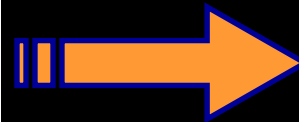
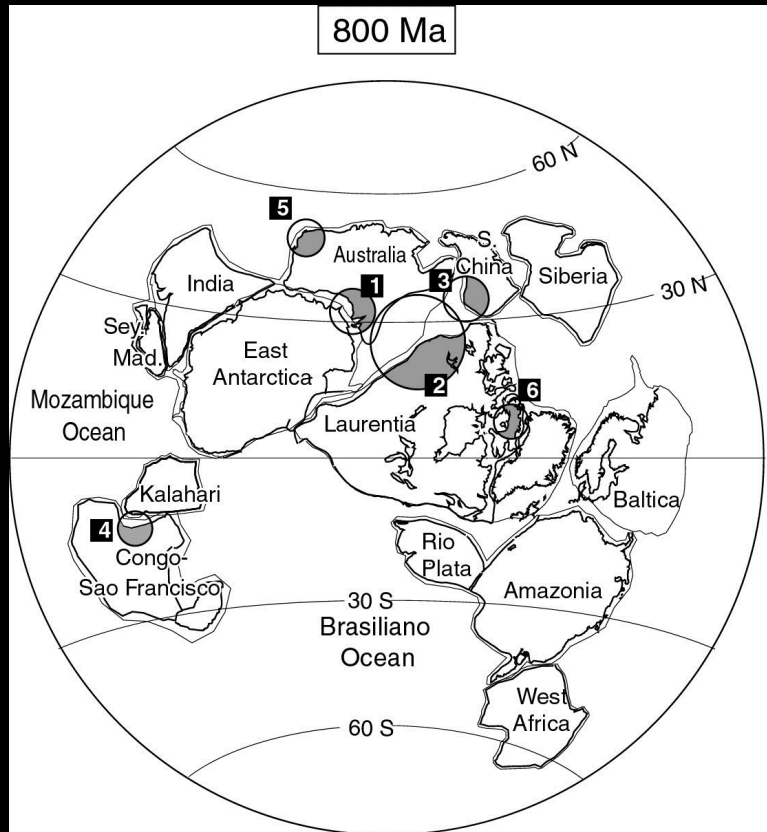
**2 Réchauffement de la lithosphère sous-jacente**

**3 Émissions de basaltes mantelliques (traps) 830-780 Ma**

L'altération des basaltes consomme 8 fois plus de  $\text{CO}_2$  que celle des granites

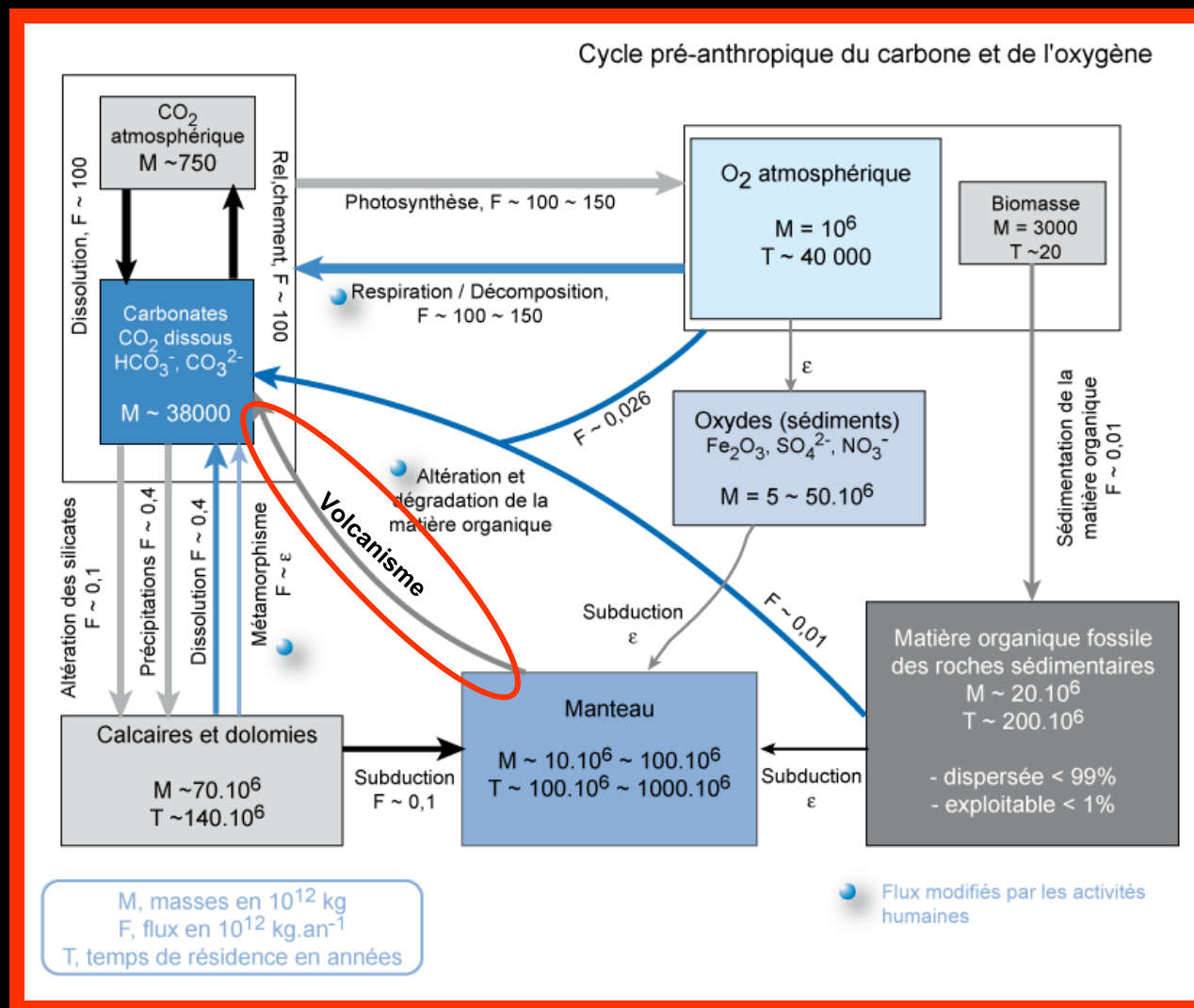


**4 Dislocation du supercontinent ... Intensification du runoff  
Augmentation de l'altération → augmentation de la pompe à CO<sub>2</sub>,  
baisse du CO<sub>2</sub> atmosphérique, baisse de l'effet de serre, et le  
phénomène s'emballé, car une fois que les glaciations ont dépassé une  
certaine ampleur, l'effet albedo prend le dessus**

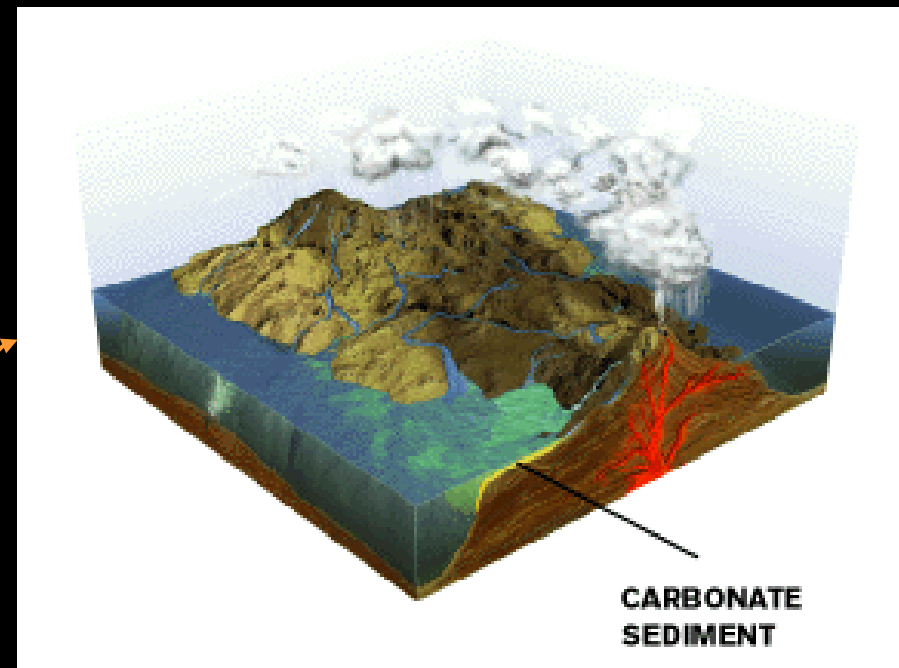




# Comment en est-on sorti ? A cette époque, dans le cycle du C, tout était figé ; tout sauf le volcanisme.

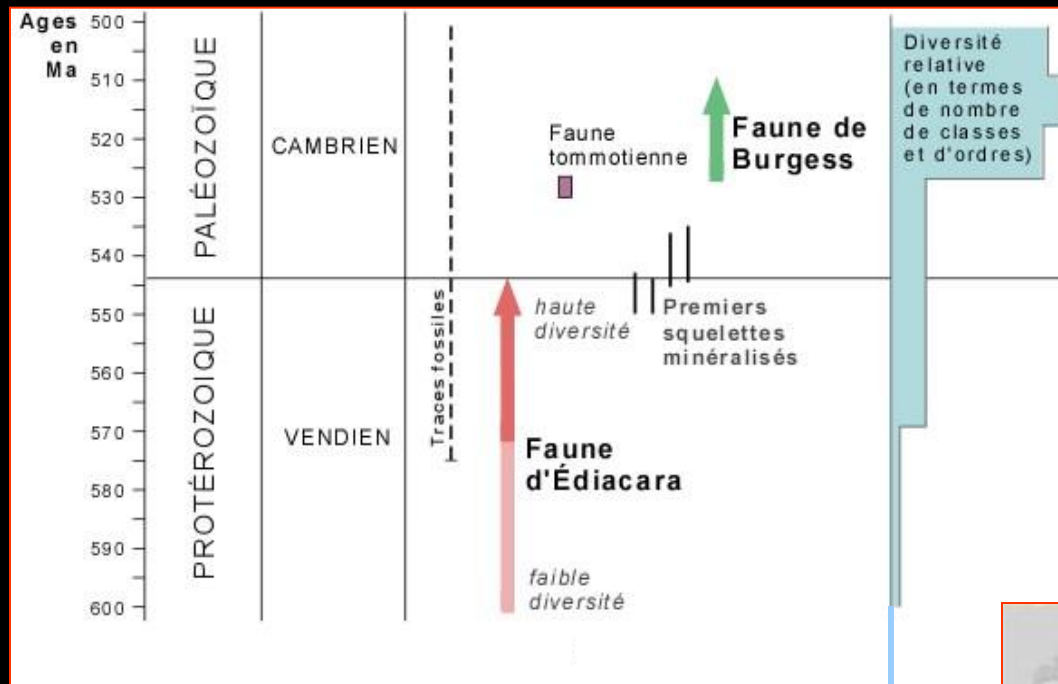


**Le CO<sub>2</sub> est monté ; l'effet de serre a augmenté, la T a augmenté, la déglaciation a commencé, des eaux riches en CO<sub>2</sub> ont altérés les continents, qui ont libéré du Ca, qui a précipité sous forme de carbonate**





# Or, 580 ma, partout dans le monde, c'est l'explosion de la diversité des métazoaires avec la faune dite d'Ediacara



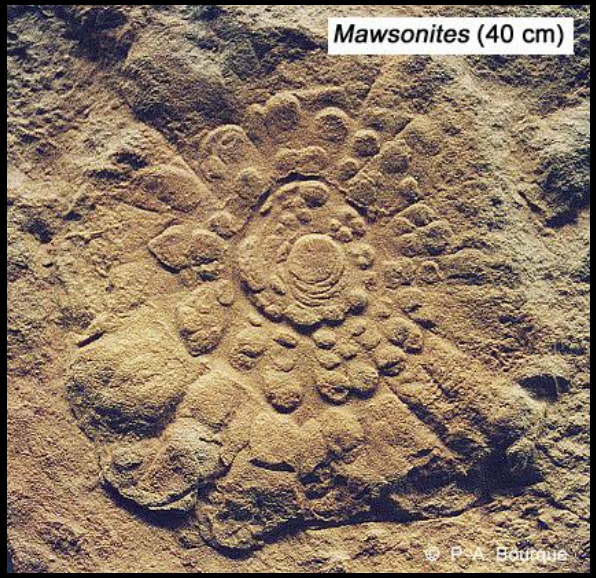


Dickinsonia



Spriggina

© P.-A. Bourque



Mawsonites (40 cm)

© P.-A. Bourque



© P.-A. Bourque

Charnia

Helminthopsis



Ediacara

© P.-A. Bourque

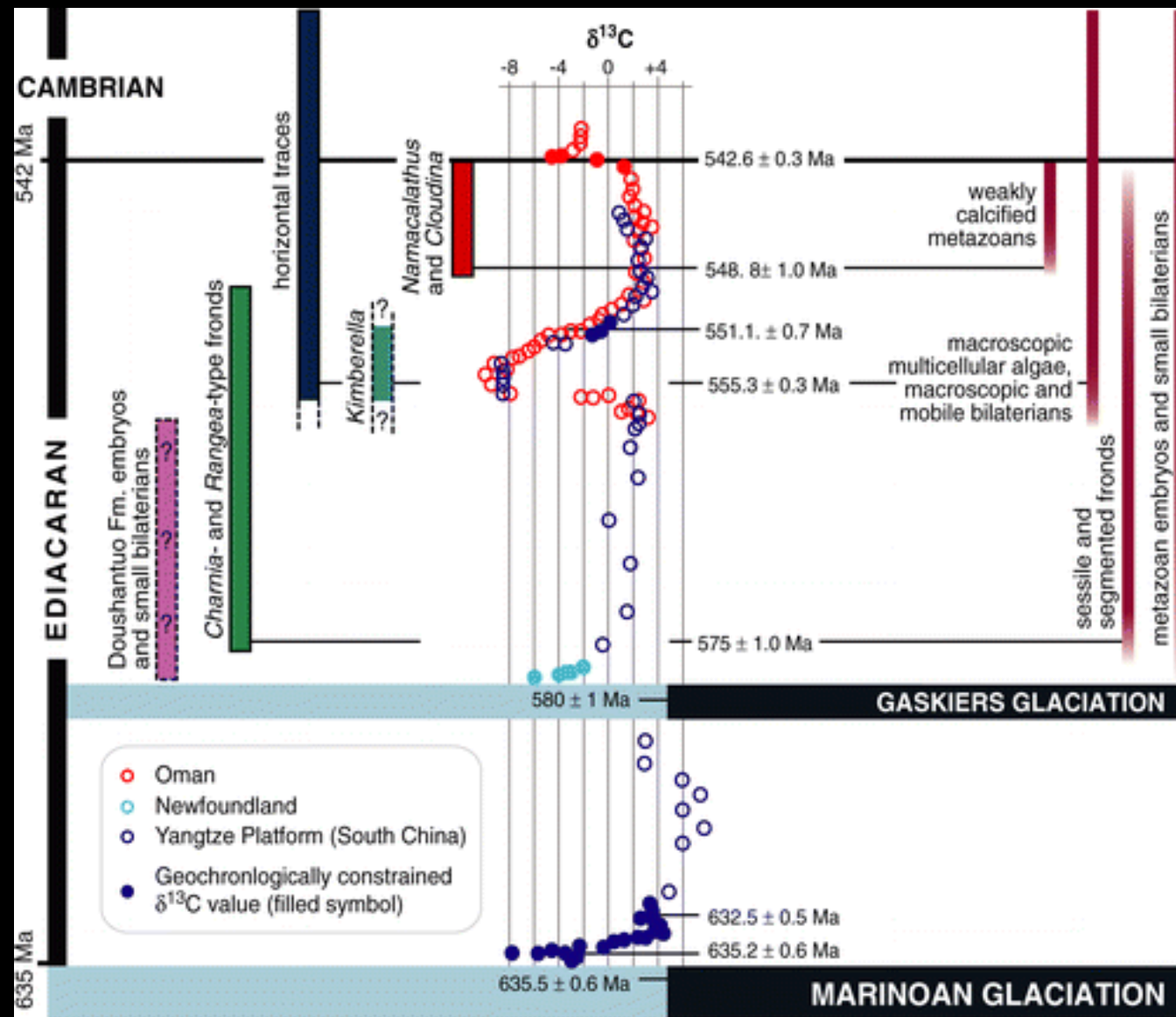


Tribrachidium

© P.-A. Bourque



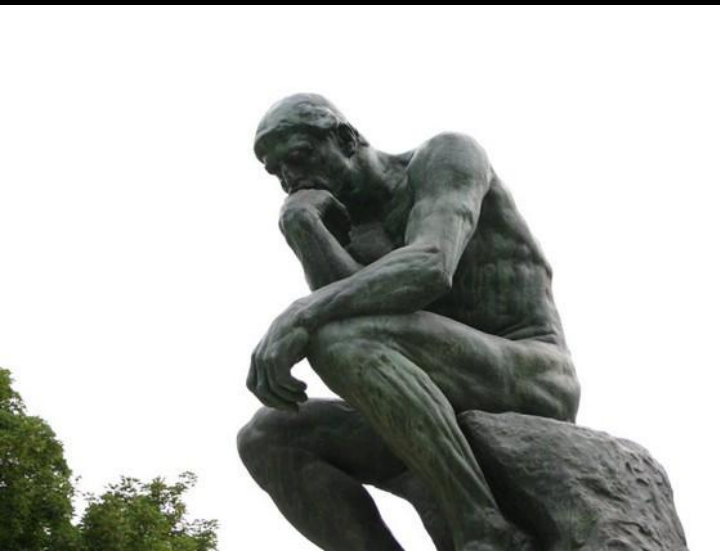




Et cette explosion « édiacarienne » c'est juste après le « dernier » épisode boule de neige



# En guise de conclusion de ce deuxième cours sur l'histoire externe de la Terre



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

(ou

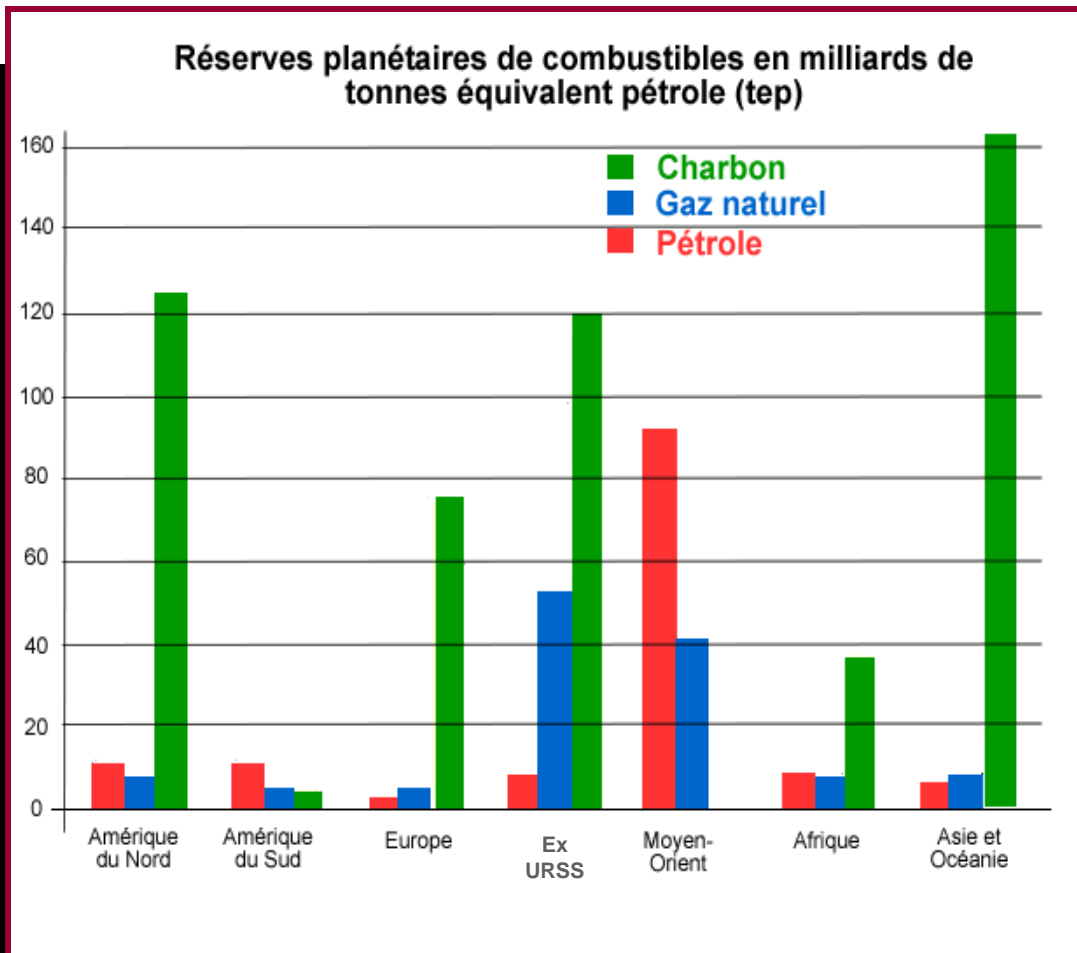
commentaire sur la relativité du temps)

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.**

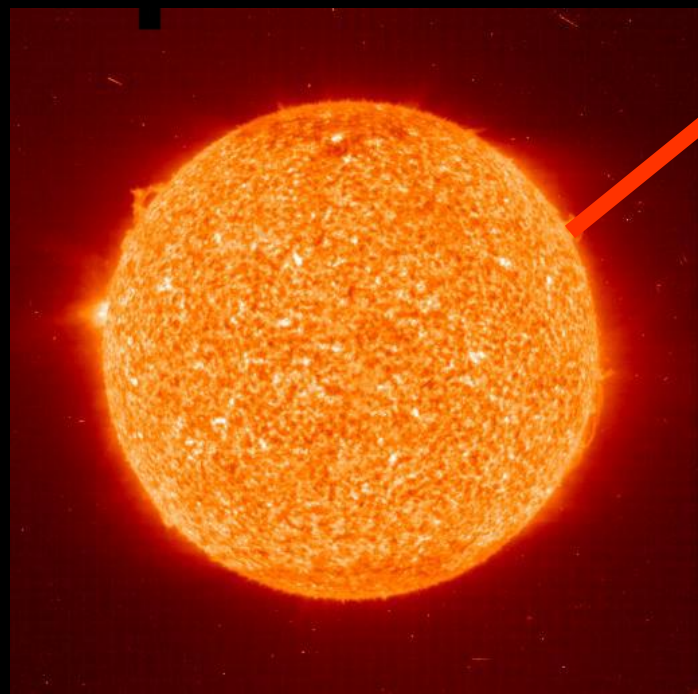
**Depuis 80 000 000 d'années, la tendance globale est à la baisse de CO<sub>2</sub> et de la température, malgré toutes les oscillations déjà vues. Pendant ces 80 000 000 d'années, le CO<sub>2</sub> a été divisé par 10 et la température moyenne a baissé de 10 à 20°C. Entre -300 000 000 et -80 000 000 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.**







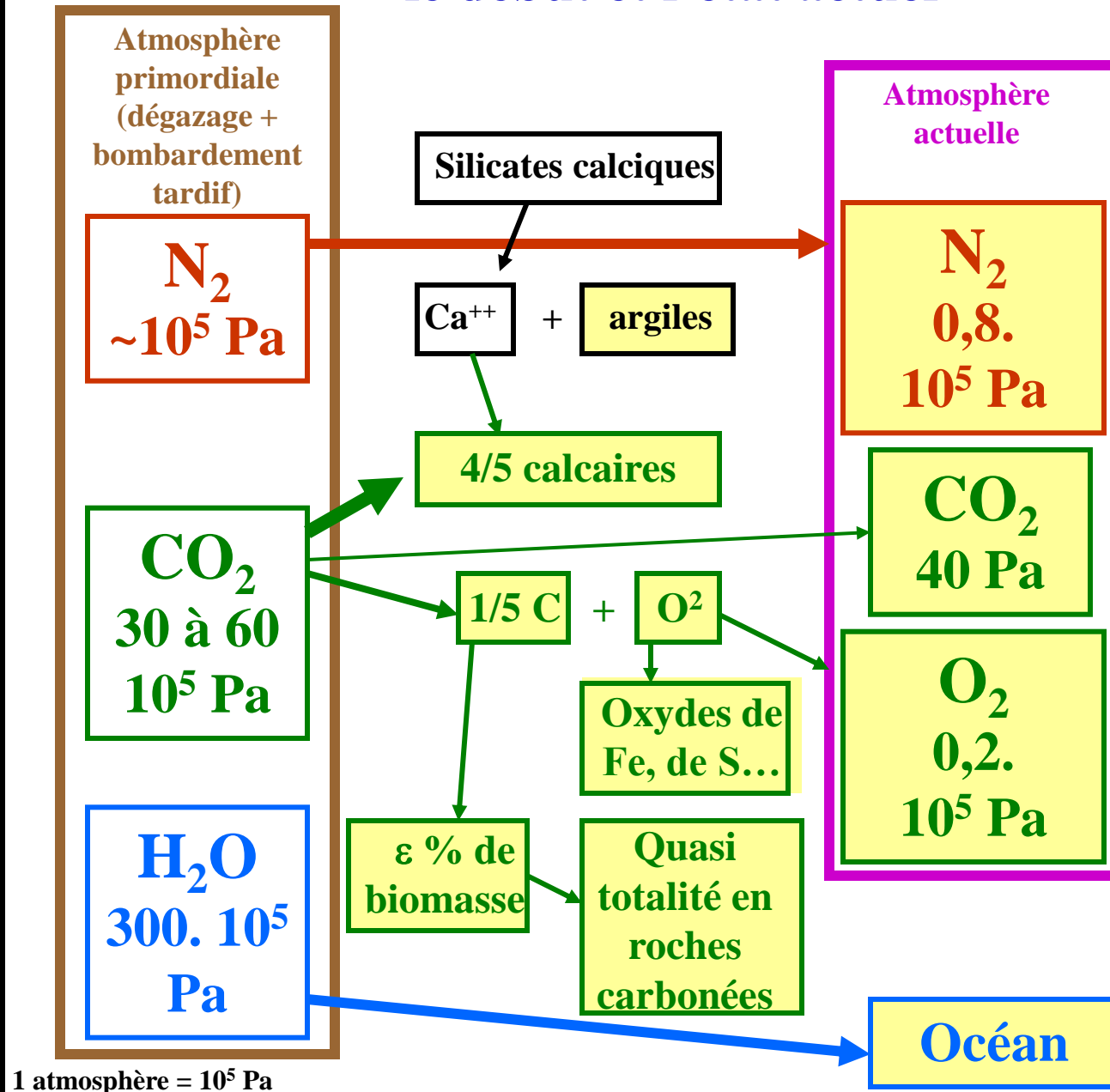
A l'échelle de 4,5 milliards d'années.  
Ces hauts et ces bas s'inscrivent dans deux tendances générales :

- (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).

# Les enveloppes fluides de la Terre : le début et l'état actuel

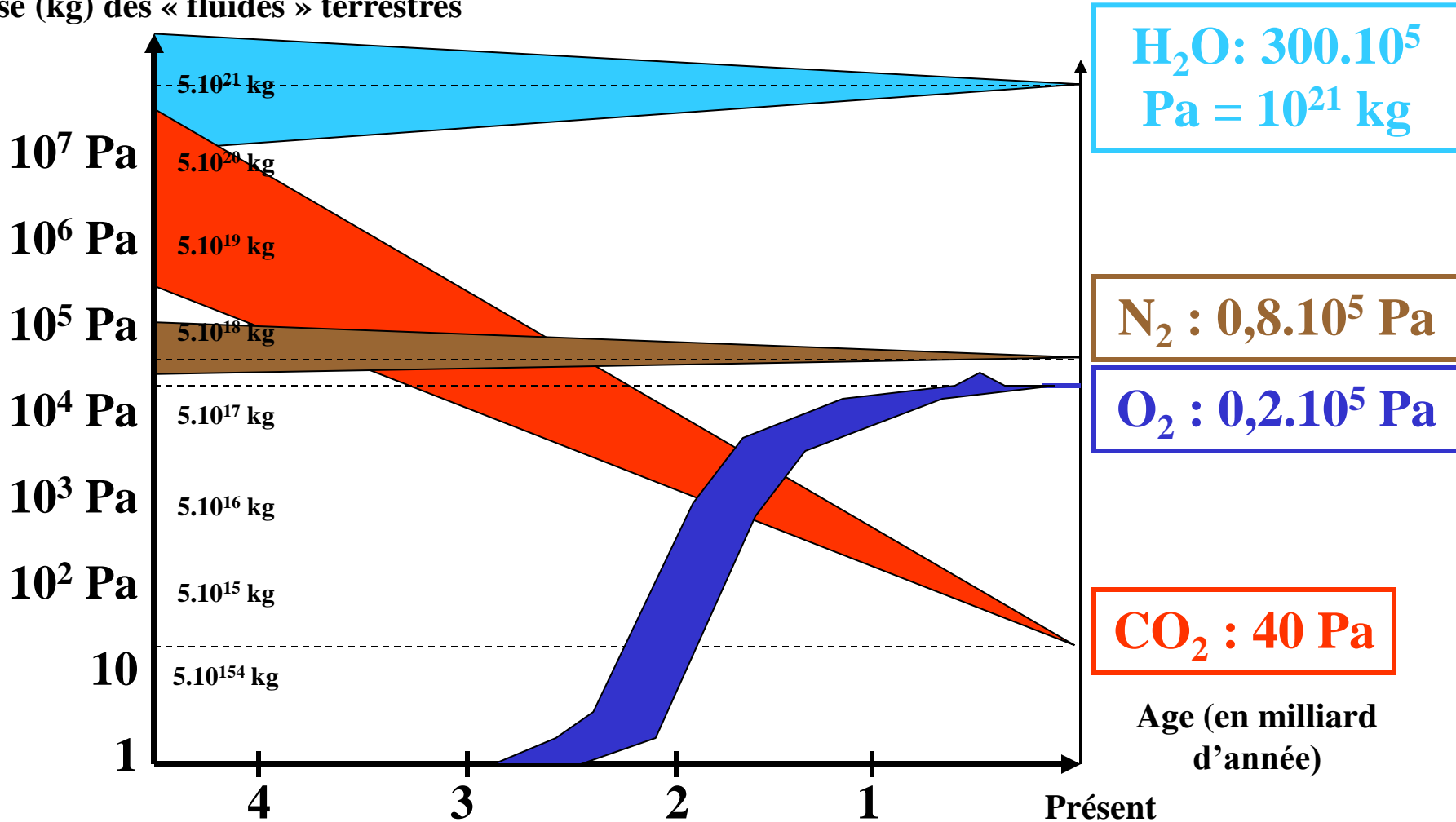
En guise de  
2eme  
conclusion, un  
résumé (très)  
simplifié de  
l'histoire de  
l'atmosphère  
de la Terre, ou  
plutôt 2  
instantanés  
sur le début et  
l'état actuel





# La même chose, avec en plus la dimension « temps » : la 1ere fois qu'on voit l'histoire de la terre et une seule figure

Pression partielle (Pa) et  
masse (kg) des « fluides » terrestres



1 atmosphère =  $10^5$  Pa



# **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**



