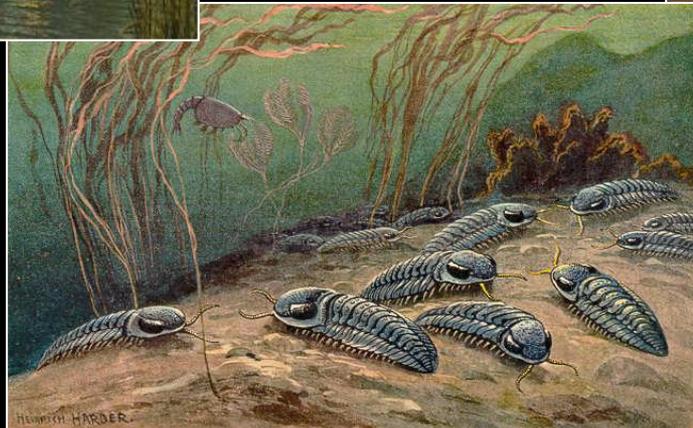
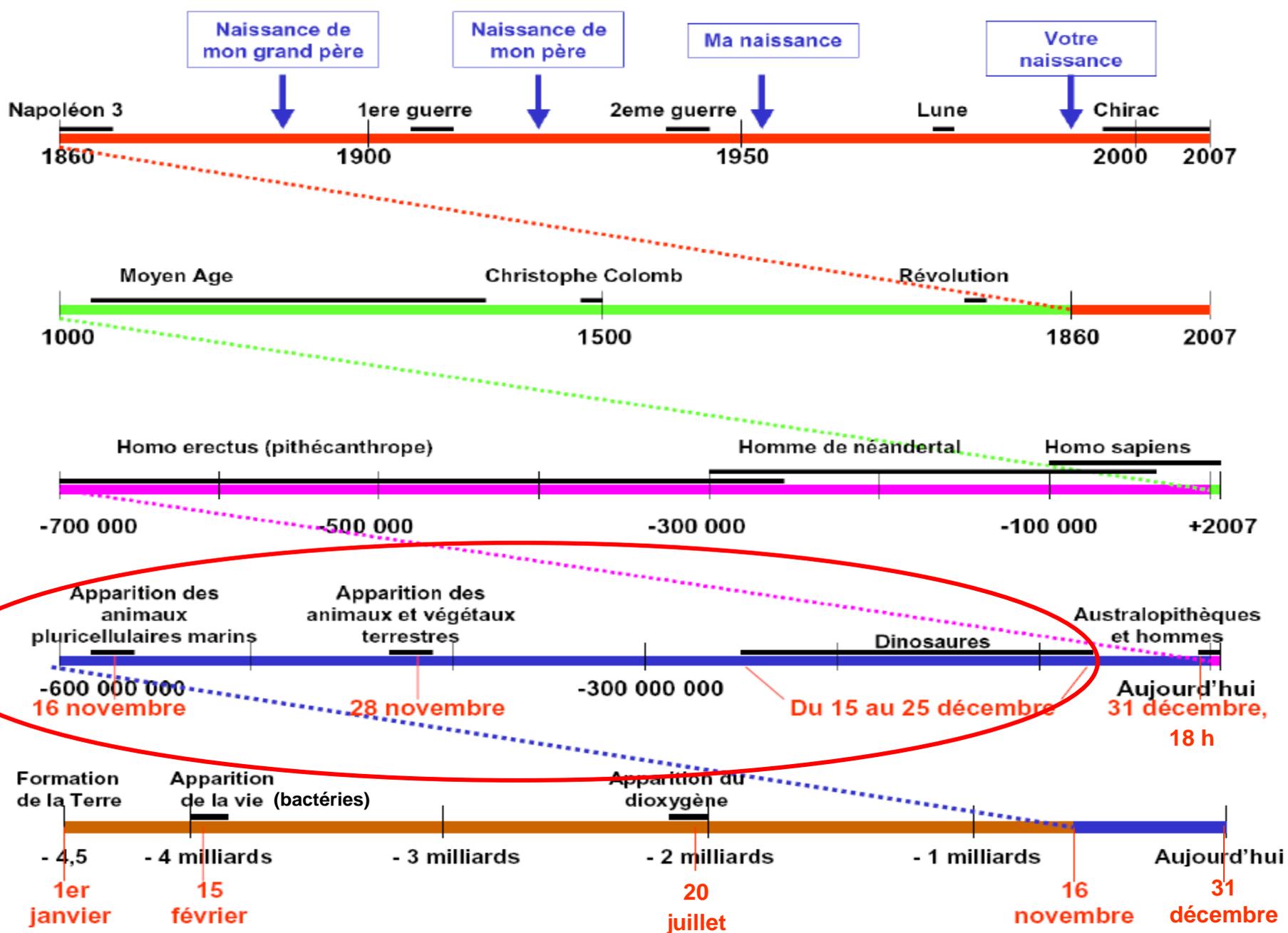


Et maintenant, l'histoire des climats et de l'atmosphère à l'échelle des 600 derniers millions d'années (depuis qu'il y a des animaux « complexes »), puis de 4 milliards d'années.





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



Photographie : Pierre Thomas

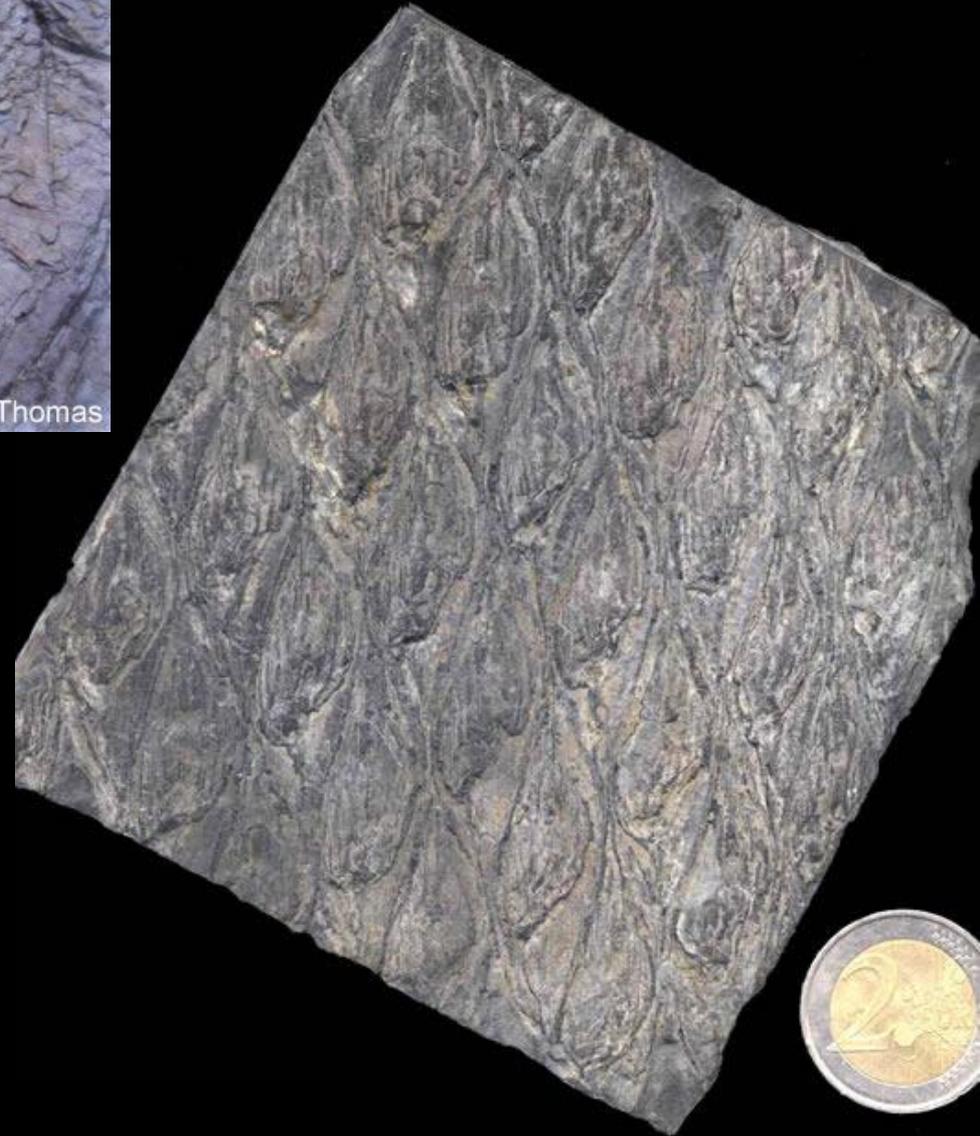
- 290 Ma (Carbonifère supérieur) : des couches de charbon, des fossiles de troncs d'arbres





Photographie : Pierre Thomas

**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**



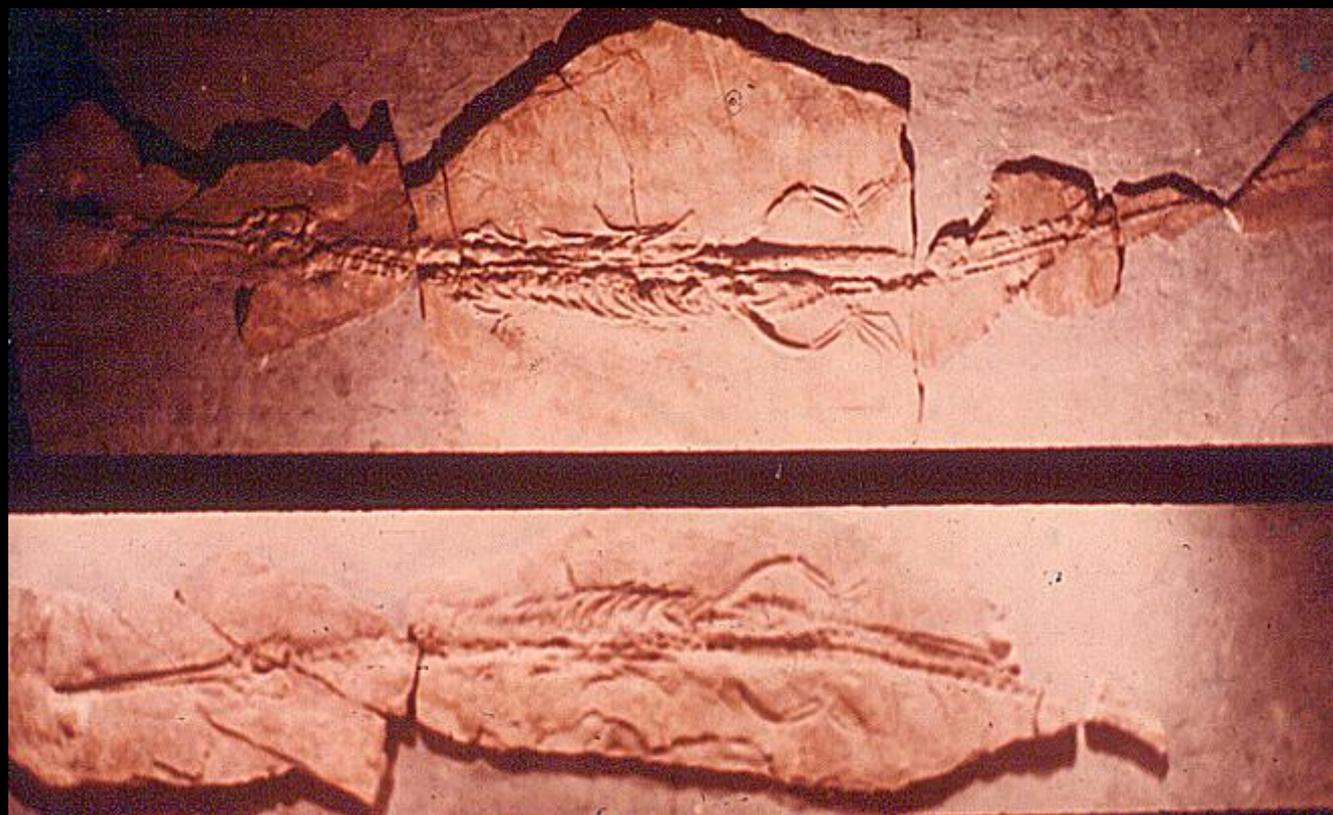
**Des drôles de
roches rouges
datant de
– 90 Ma
(Crétacé)**



**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



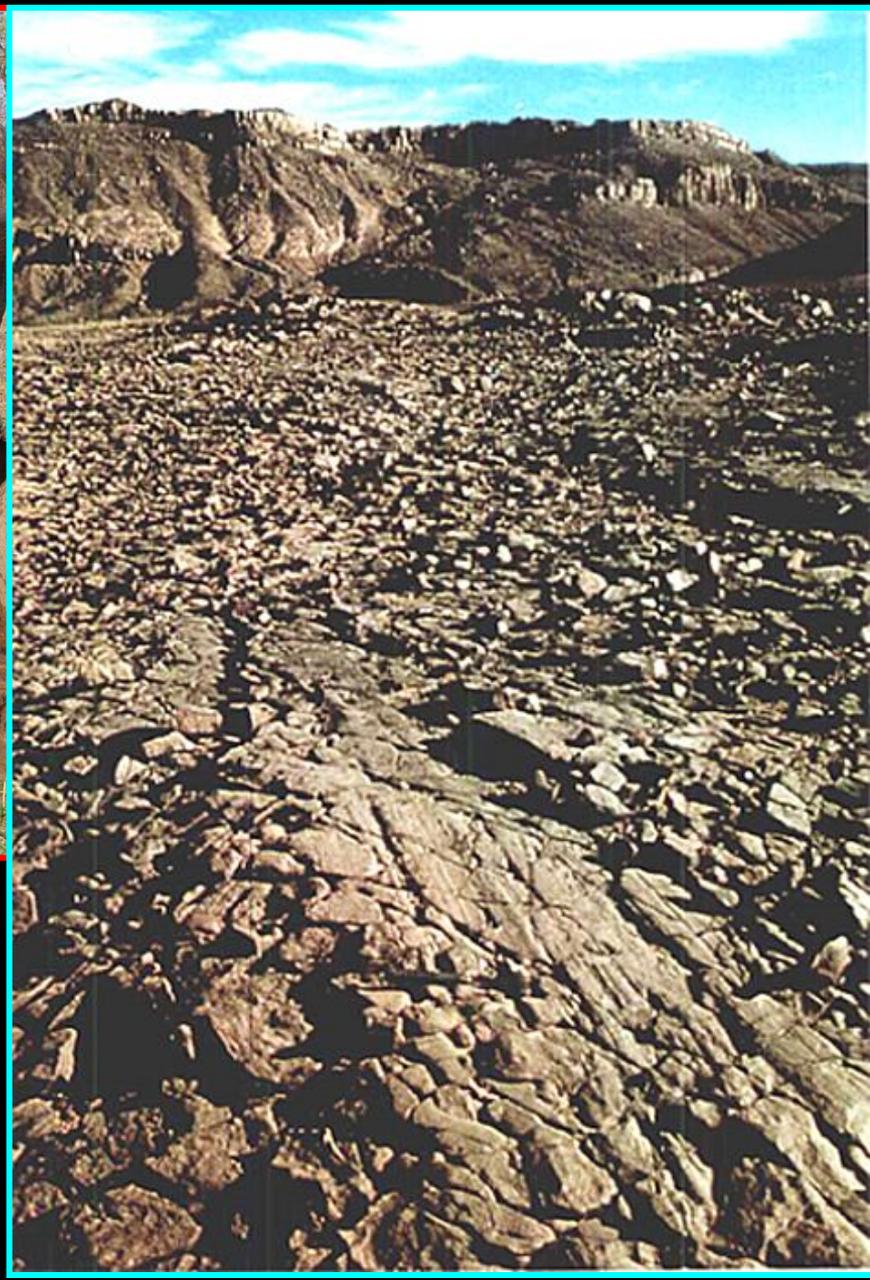
La Namibie aujourd'hui

Un autre endroit où le climat a changé : la Namibie



La Namibie aujourd'hui

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

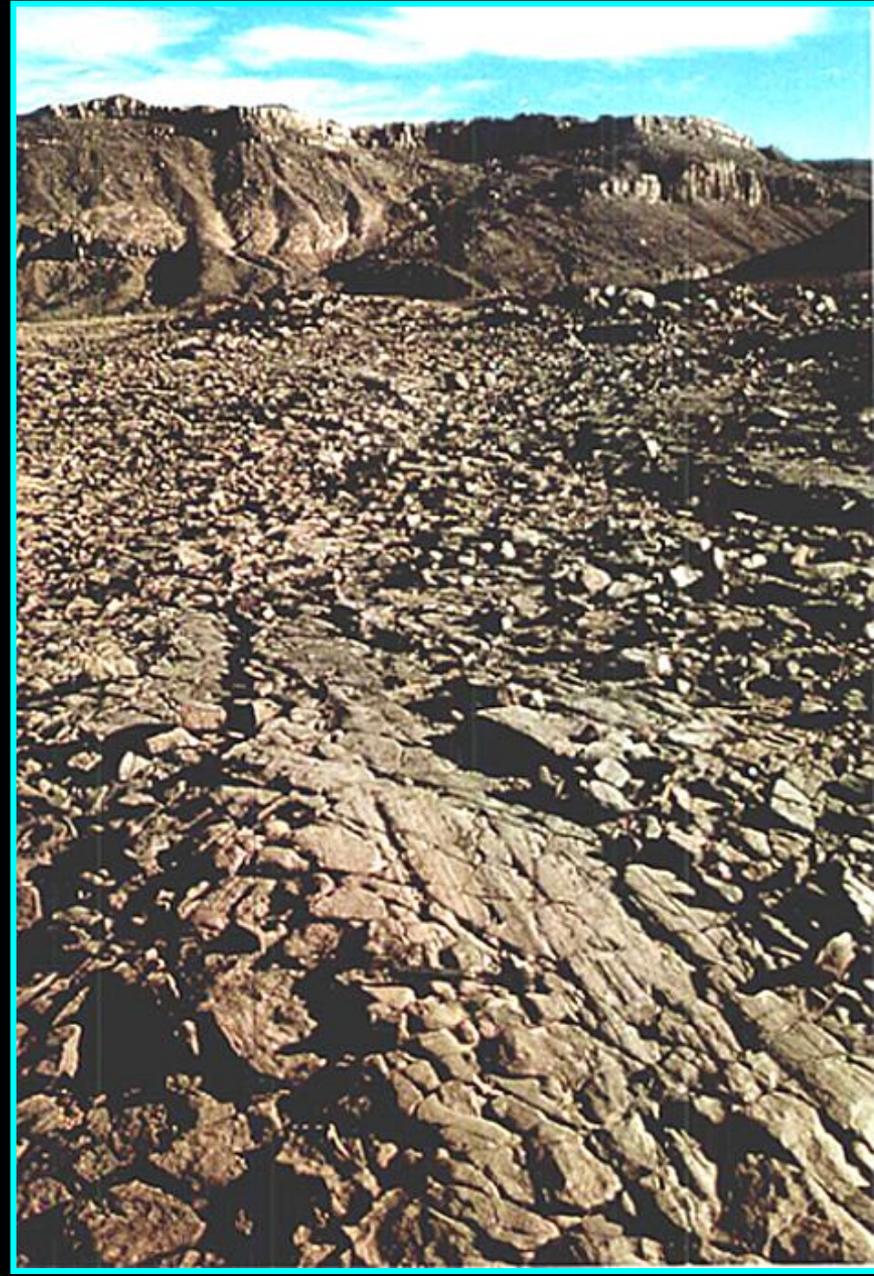


Un autre endroit où le climat a changé : la Namibie



Stries glaciaire au Groenland
(- 200 ans)

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

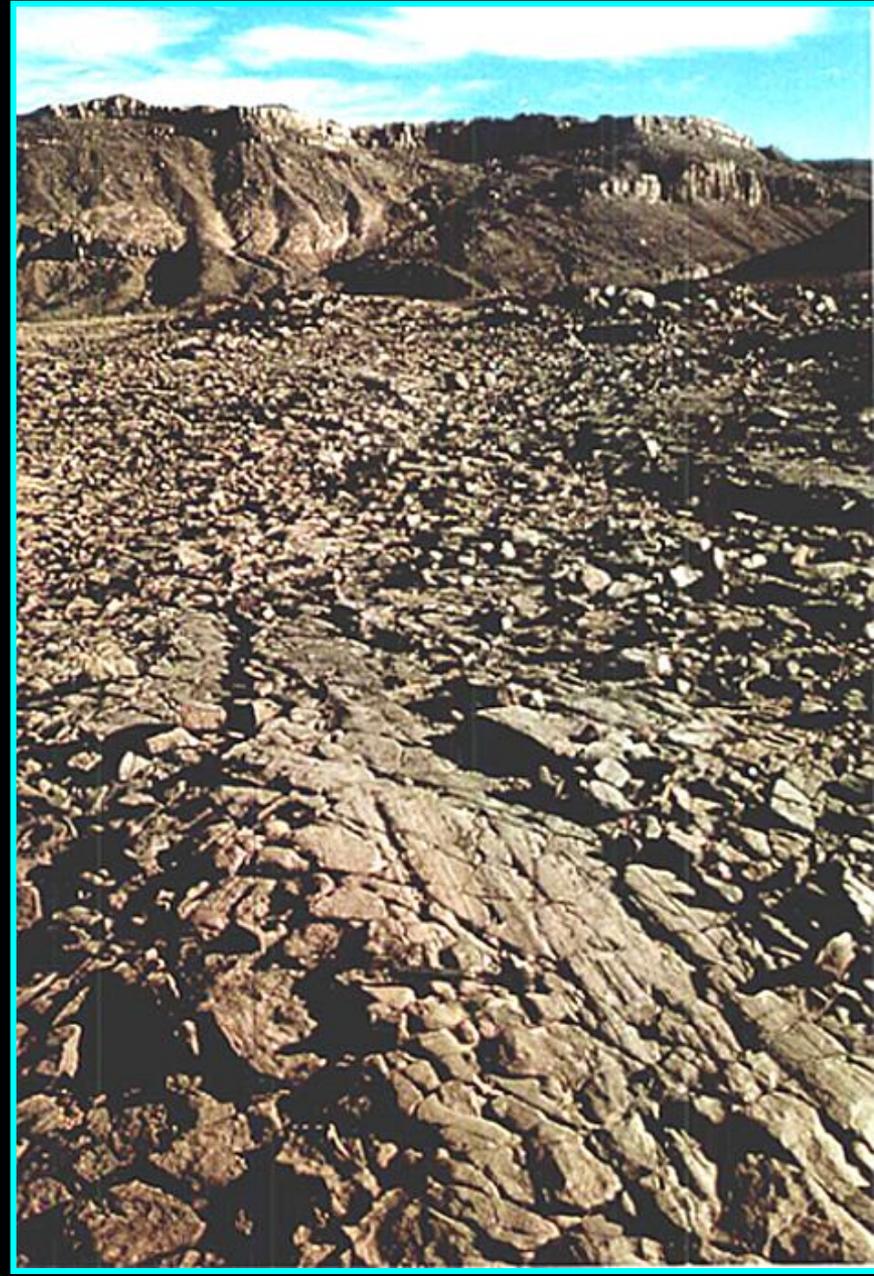


Un autre endroit où le climat a changé : la Namibie



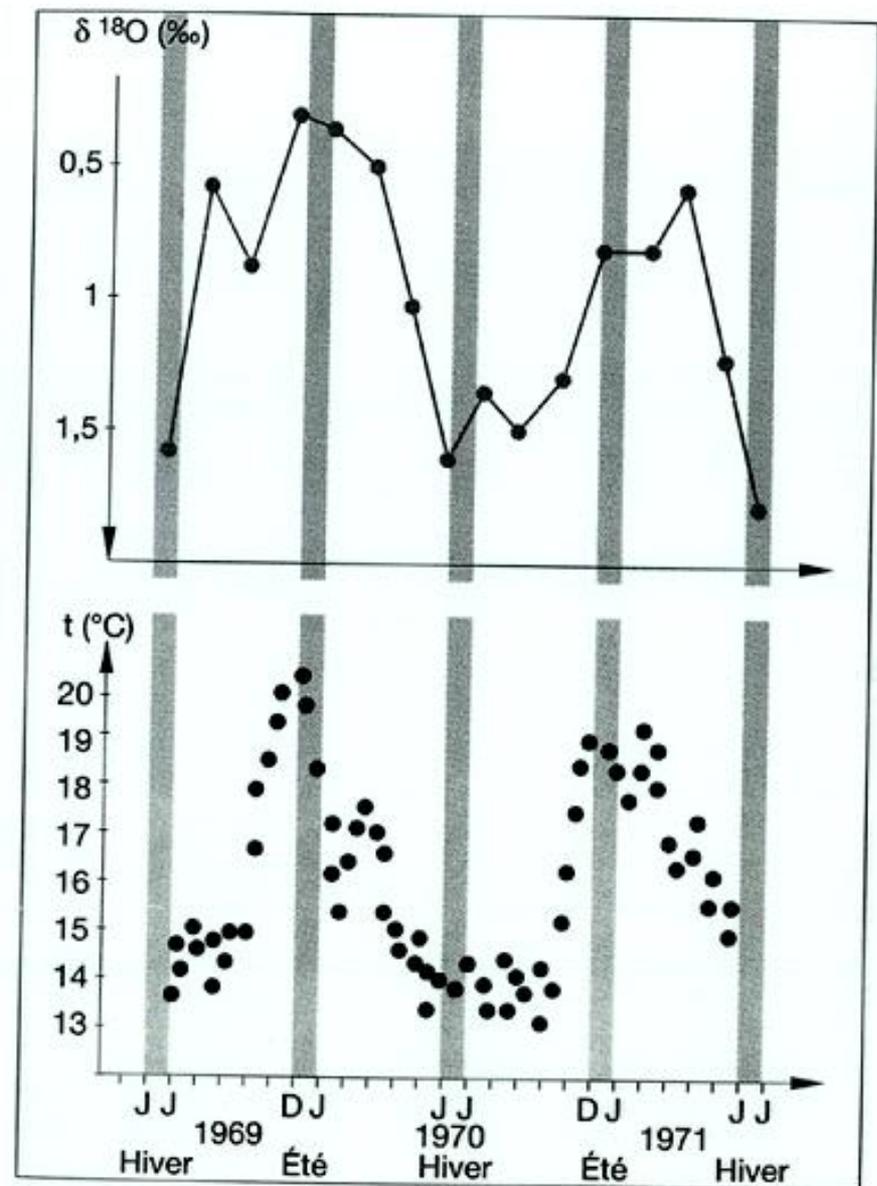
La France il y a - 300 Ma

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



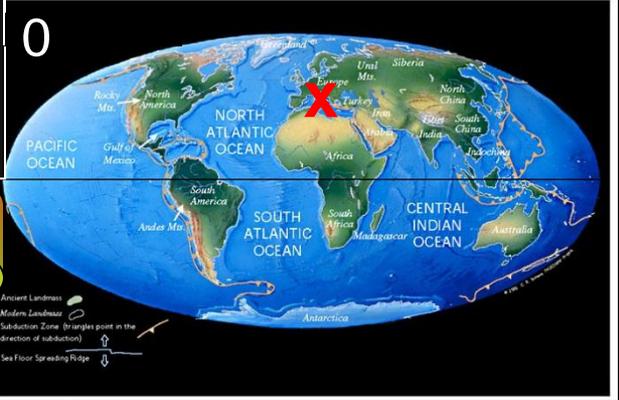
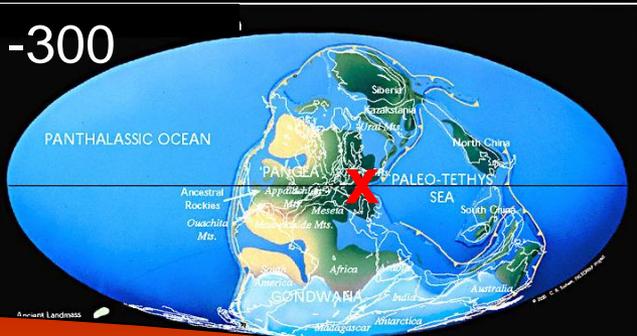
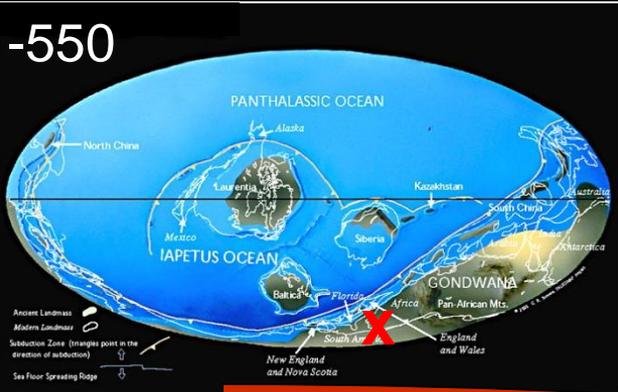
D'autres moyens existent, pour trouver les paléoclimats, mais c'est plus cher.

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 »).

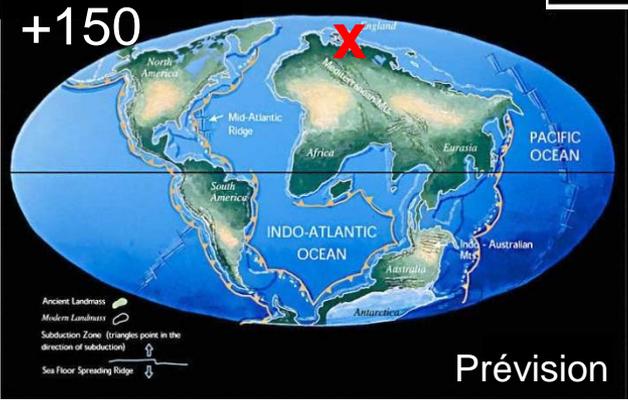


3 Relation entre le δ des carbonates des diverses couches d'un test de *Patella tabularis* (Mollusque gastéropode marin, prélevé sans l'hémisphère Sud) et la température de l'eau.

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



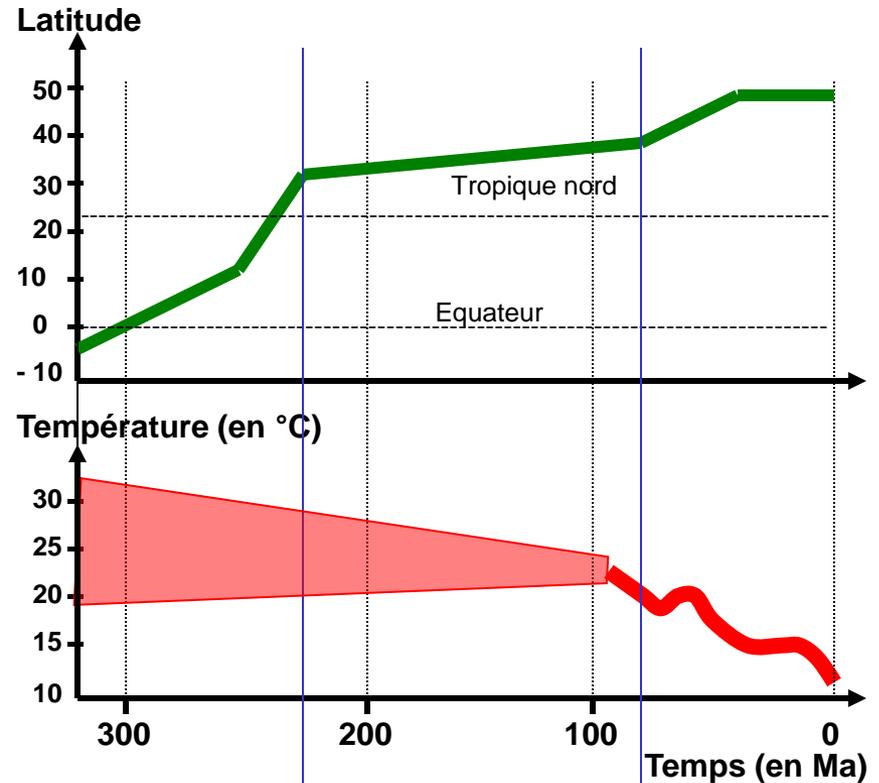
Il faut donc étudier les climats anciens pour toutes les régions du monde !

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



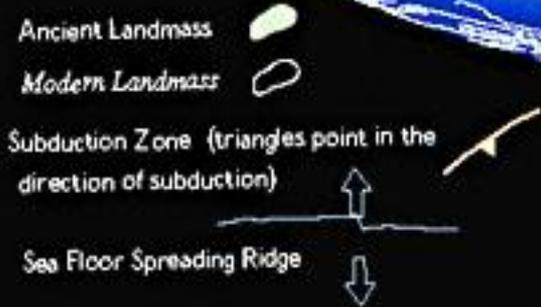
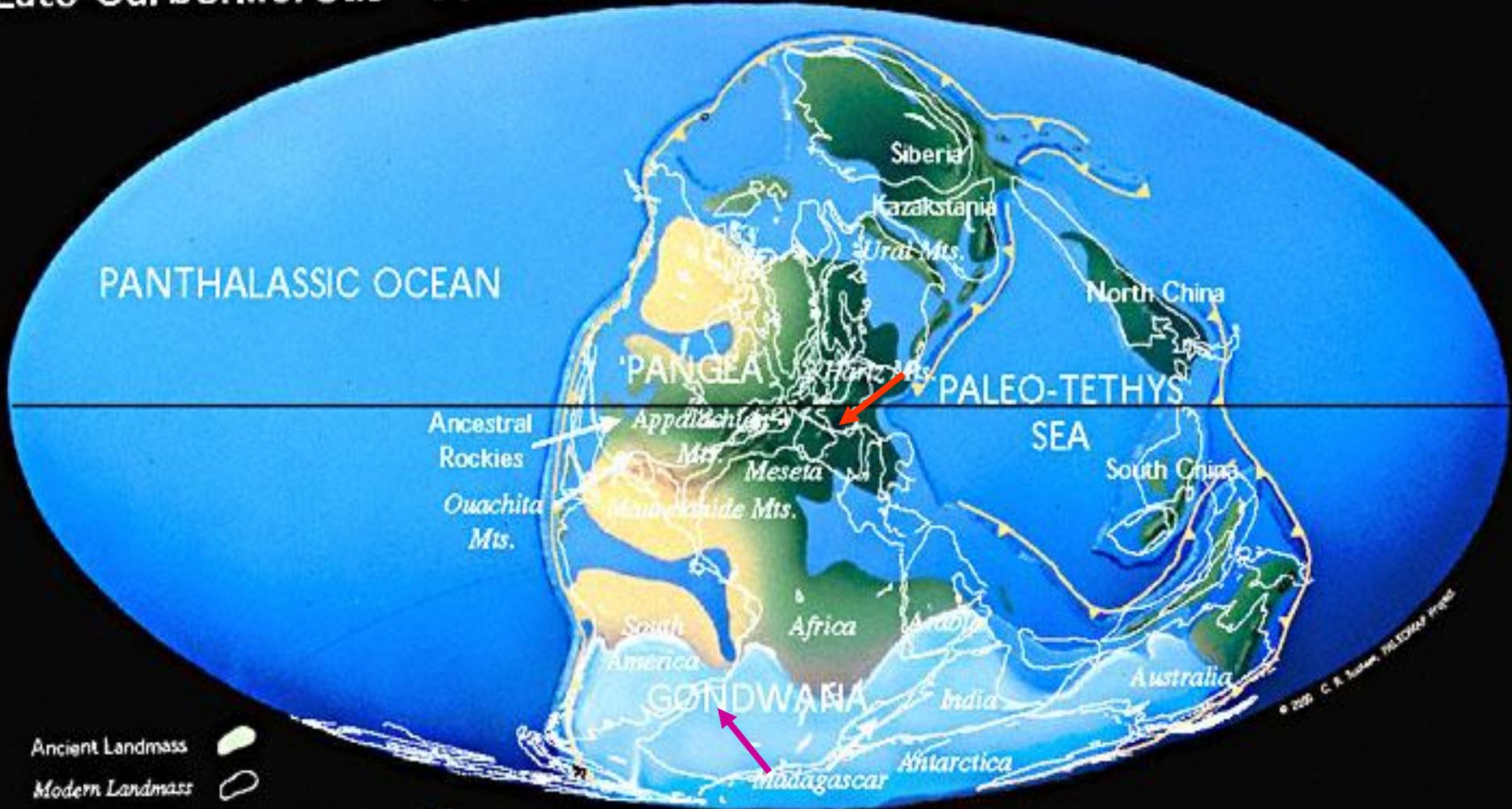
Evolution de la température moyenne annuelle (données précises ou « estimations » peu précises) et de la paléo-latitude du sud de l'Angleterre



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

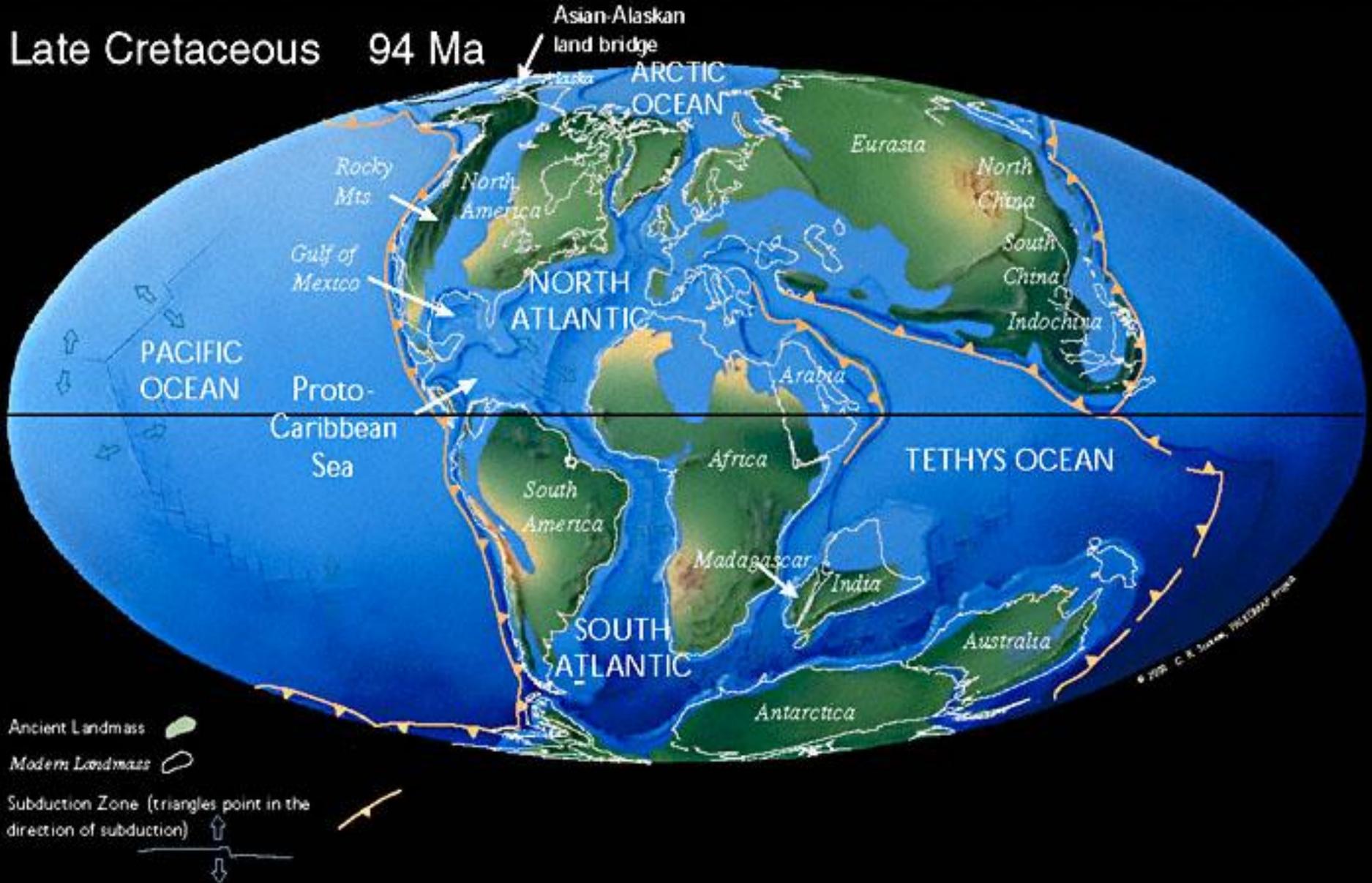
On fait des reconstitutions paléo-géographico-climatiques

Late Carboniferous 306 Ma



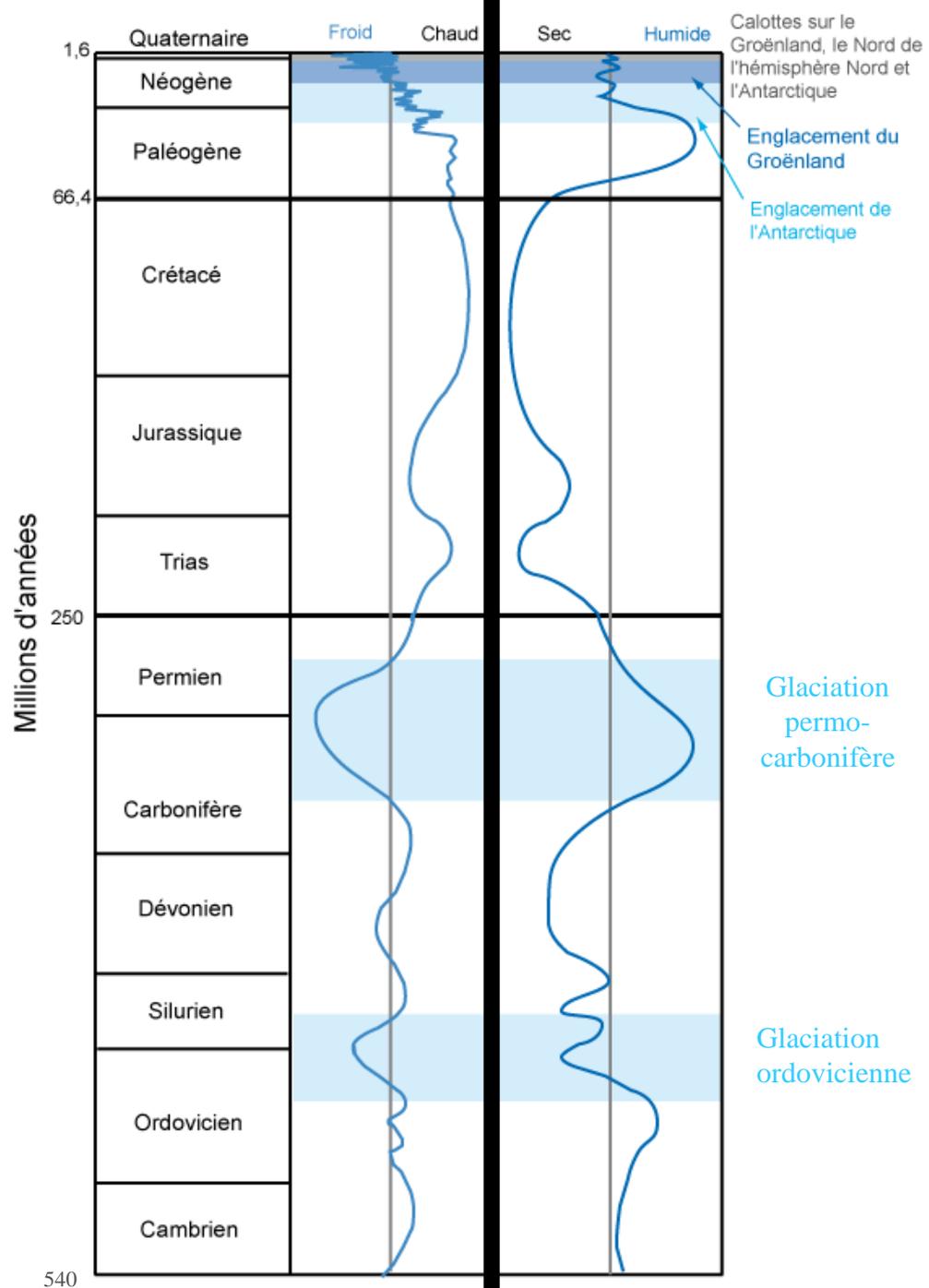
<http://www.scotese.com/earth.htm>

Et oui, le temps change !

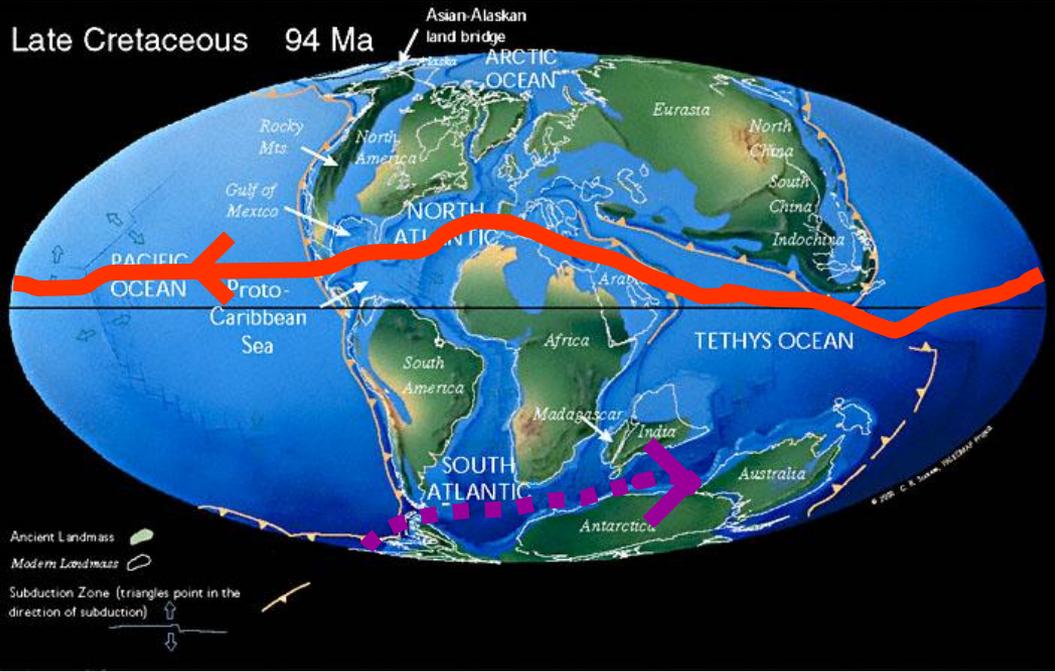


Les variations globales du climat depuis le début de l'ère primaire (- 540 Ma).

On vit actuellement en période froide

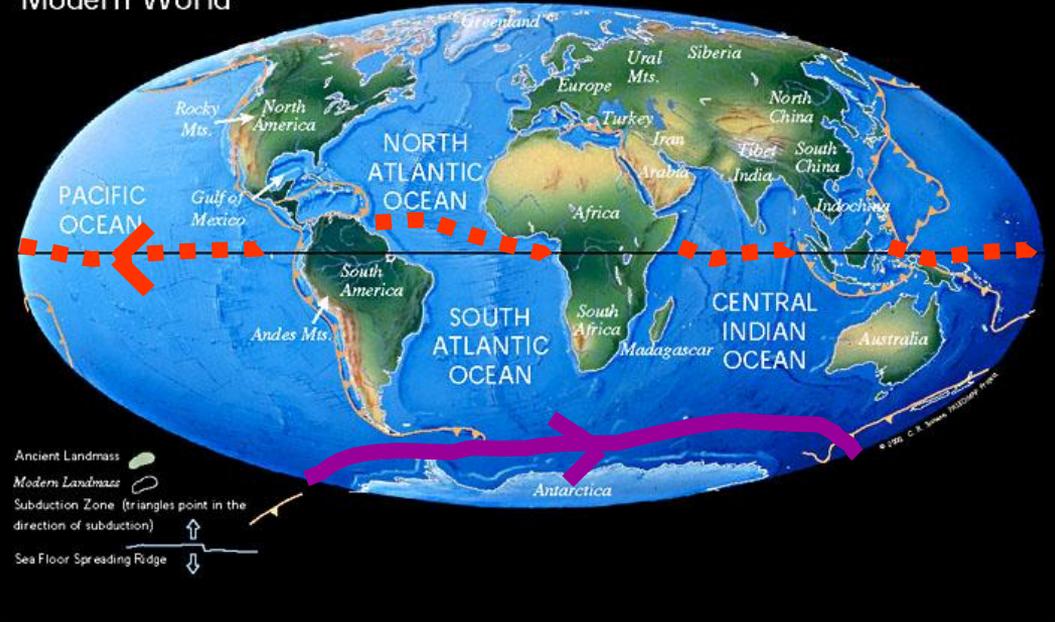


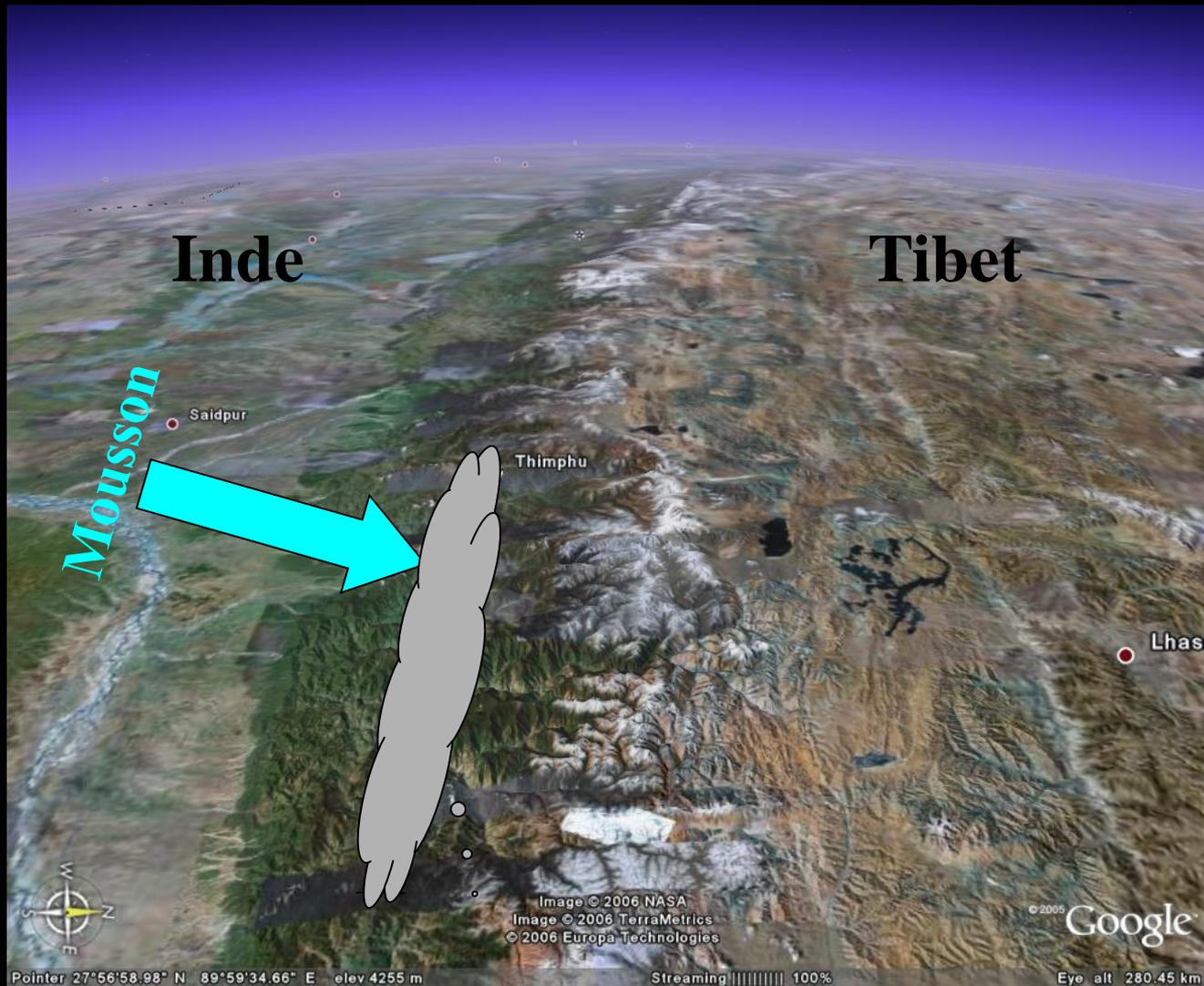
Late Cretaceous 94 Ma



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 ...**

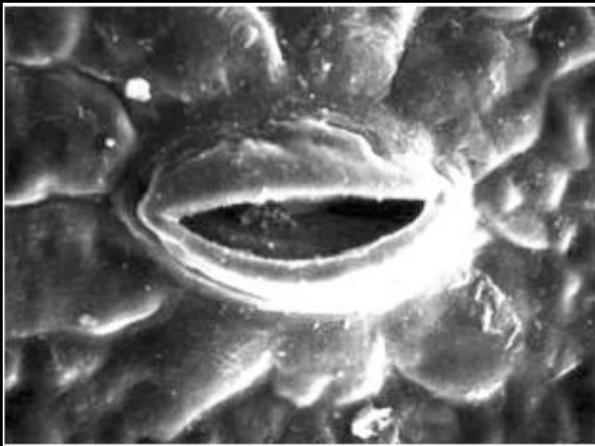
Ces variations climatiques globales peuvent être dues à des variations du CO₂ atmosphérique

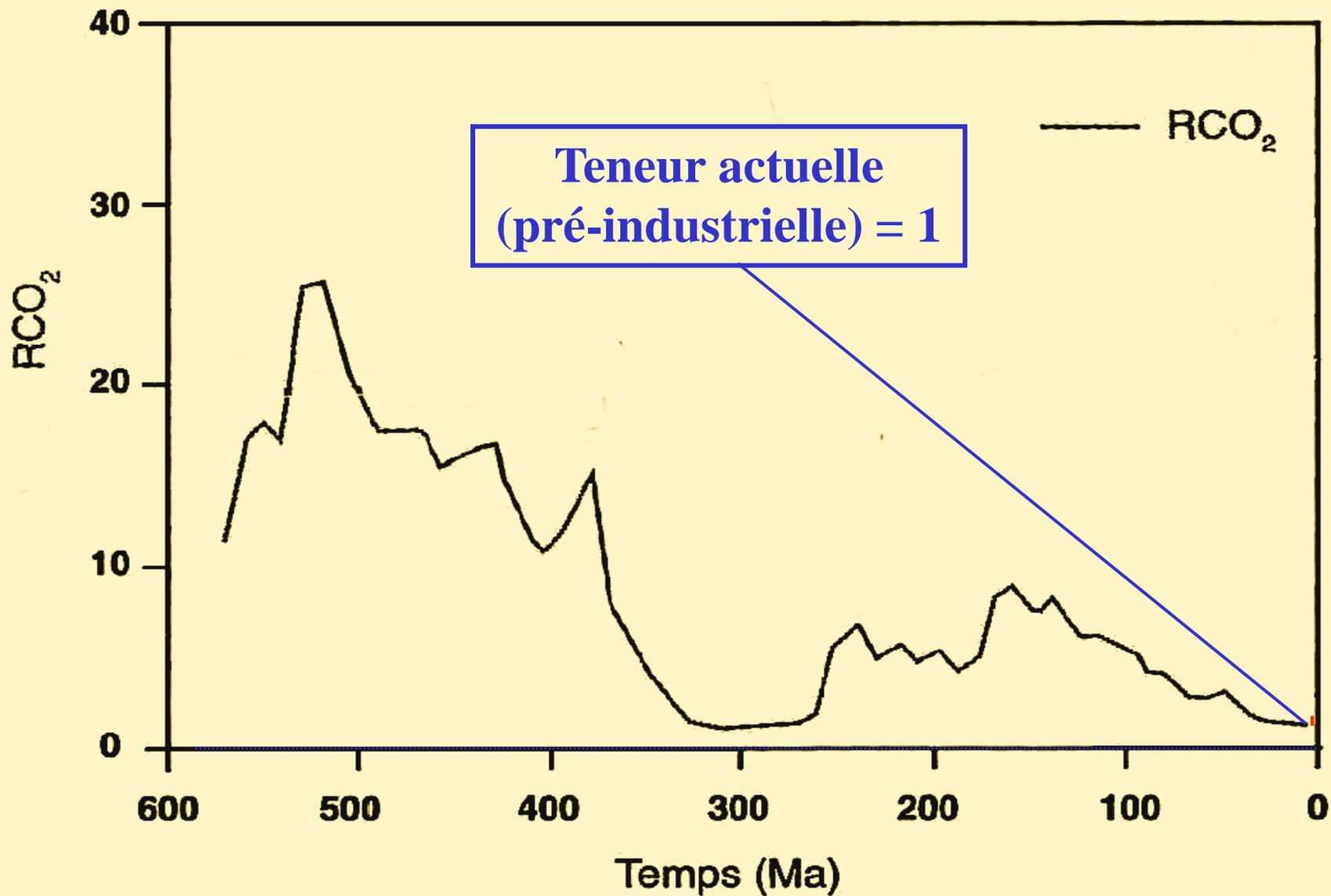


Comment mesure-t-on le CO₂ ante-glaciaire ?

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)





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

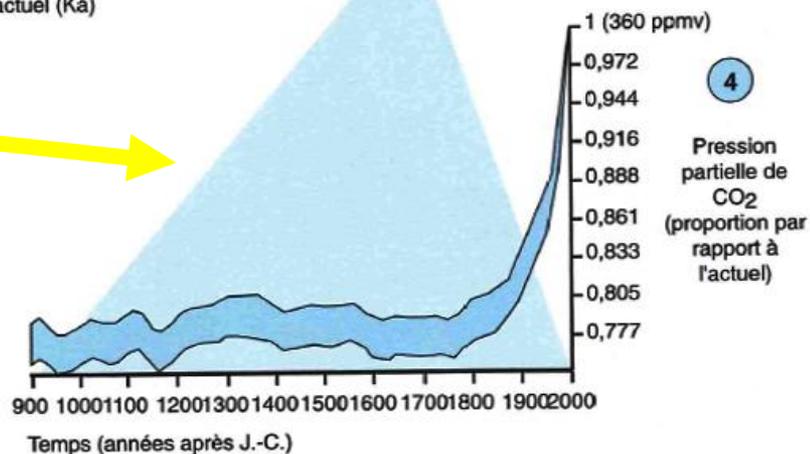
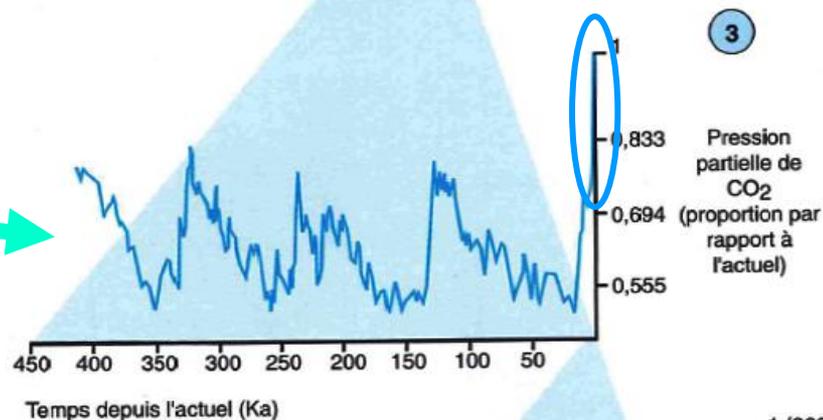
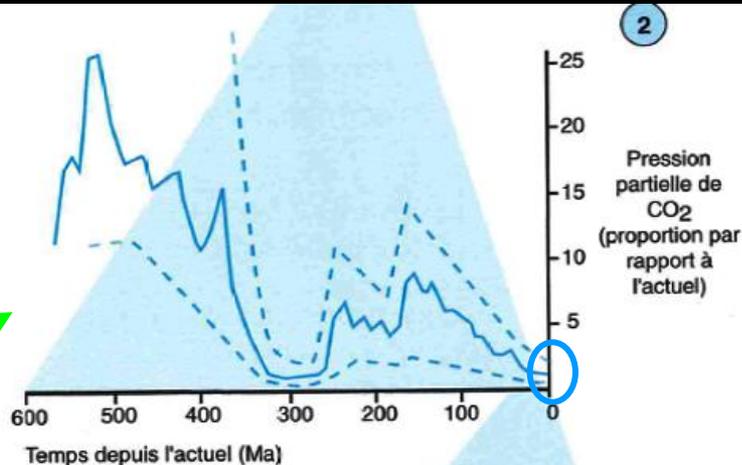
Et voici un résumé des variations de CO₂

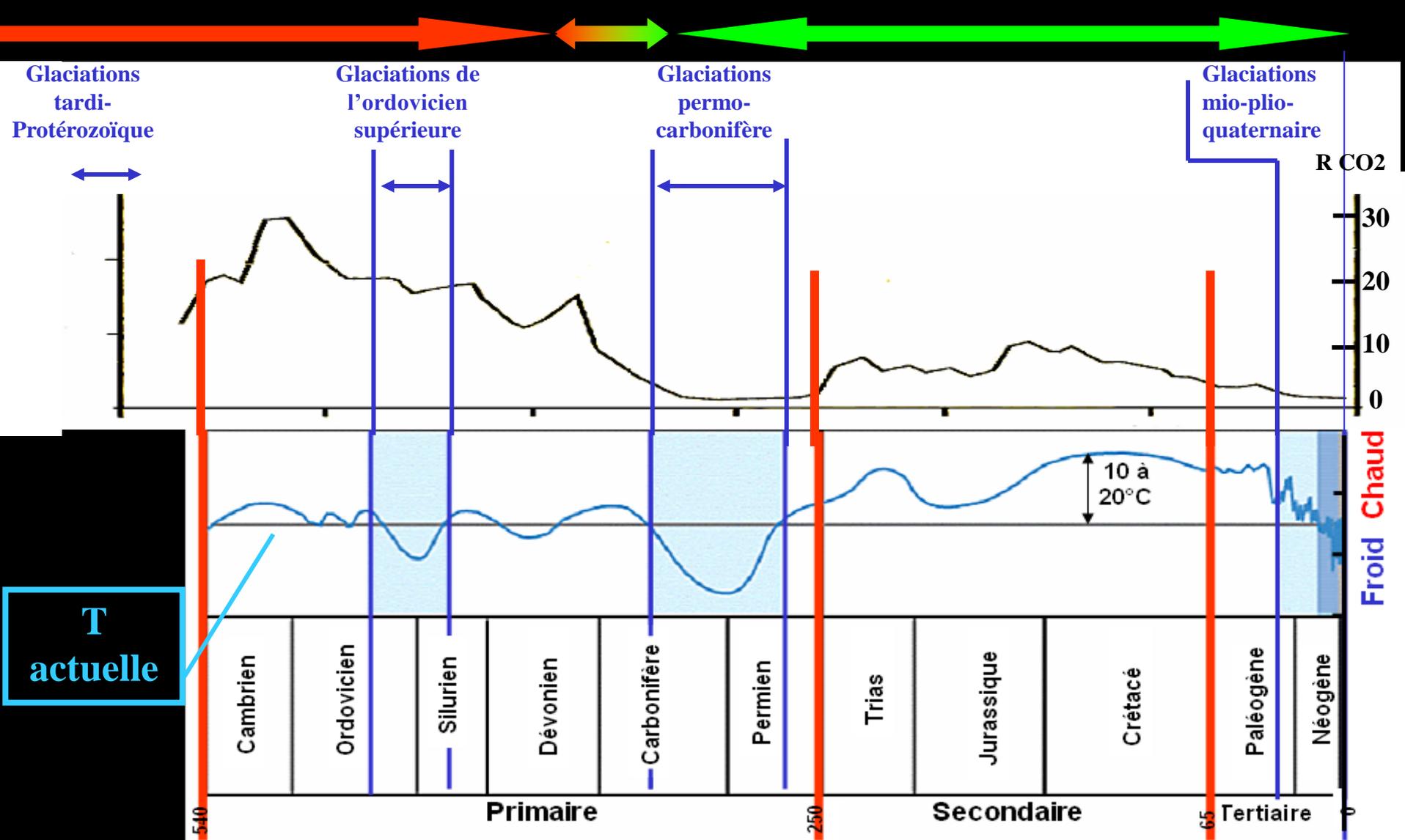
- Depuis 600 000 000 ans

- Depuis 420 000 ans

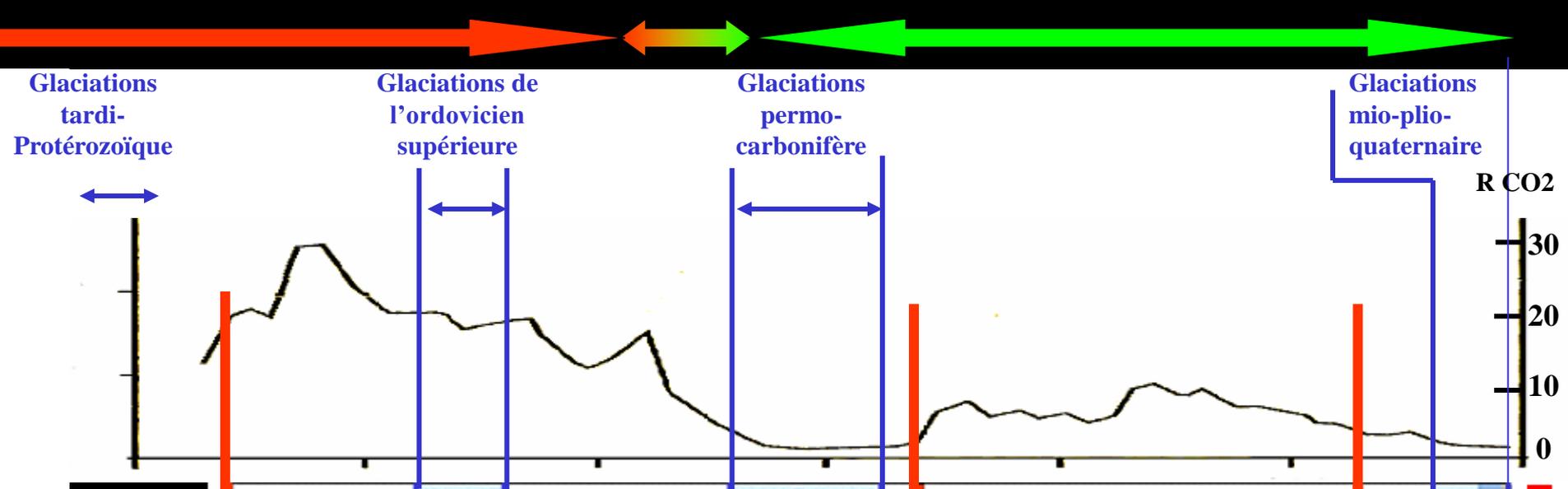
- Depuis 1000 ans (celles dont parle la presse).

Relatif, tout est relatif !





Les relations température globale et taux de CO₂. 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 ?

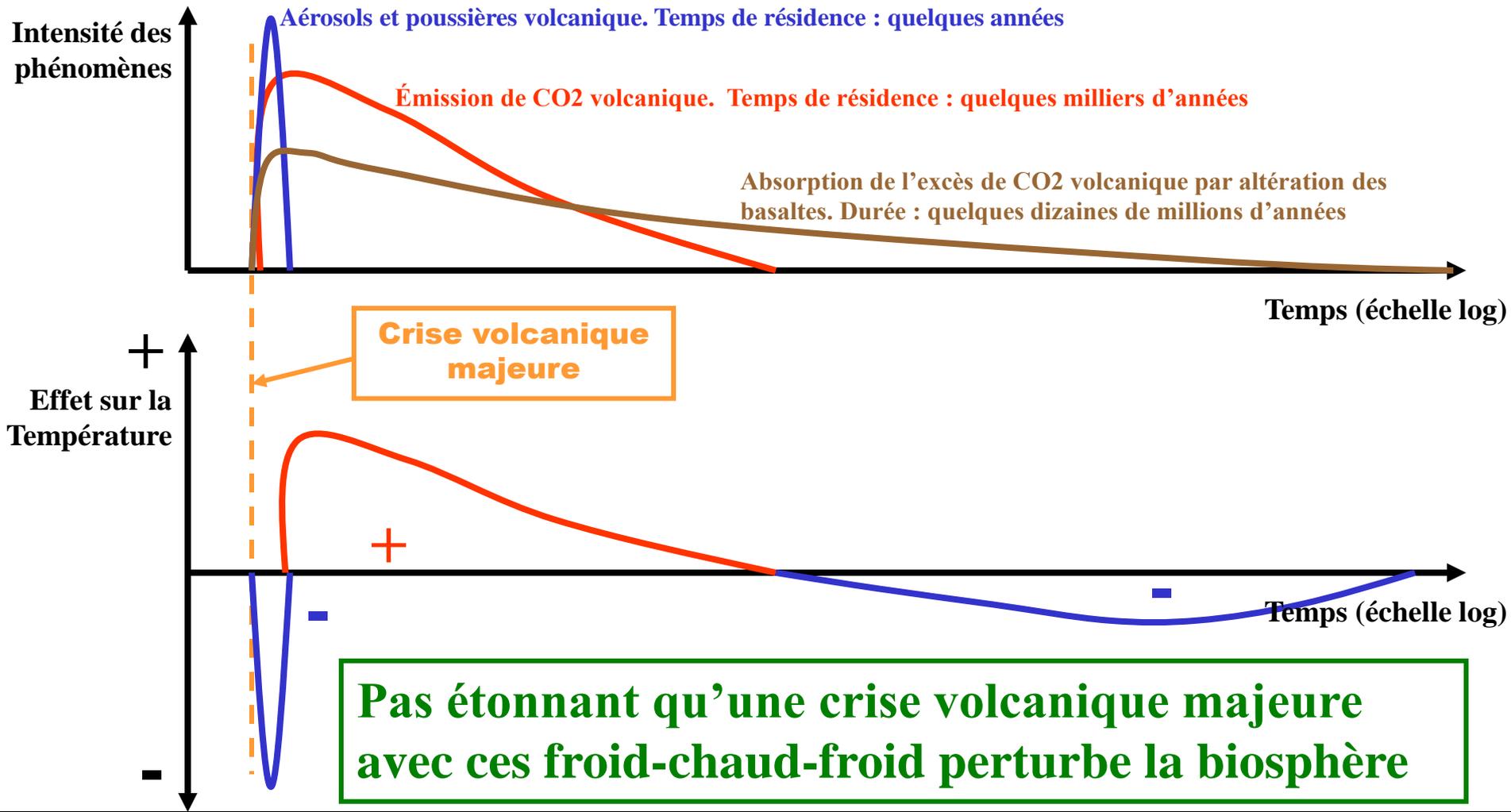
Les orogénèses ?

La formation de roches carbonées ?

Autres choses ?

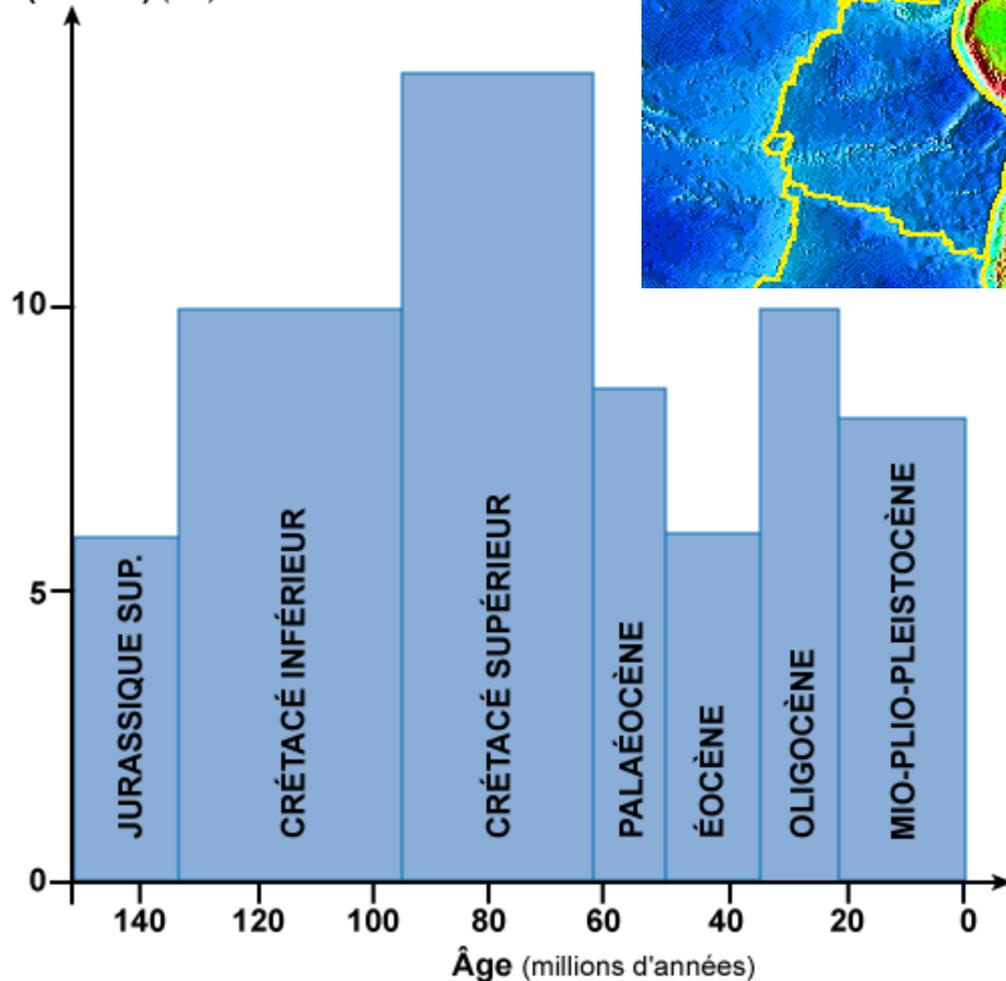
Qu'est ce qui peut faire varier le CO2 atmosphérique ? Des éruptions volcaniques aériennes ?

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 CO₂ de 2 façons différentes :

- du « CO₂ volcanique »
- du CO₂ d'altération, altération dans la mer (riche en Mg⁺⁺) :



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 CO₂
(CO₂ + silicates calciques --> silice + calcaire)
- . Baisse du CO₂ ---> baisse de l'effet de serre
- . Baisse de l'effet de serre ---> baisse de la
température





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)

Formation de l'Himalaya, consommation de CO₂, 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 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, SiO_3Ca .

Questions :

- Rapeller l'action du CO₂ 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 SiO_3Ca ont une masse de 116g, que N CO₂ ont une masse de 44g (avec N = nombre d'Avogadro), calculer combien l'altération d'1 kg de silicate calcique absorbe de CO₂
(REPONSE : 0,380 KG)

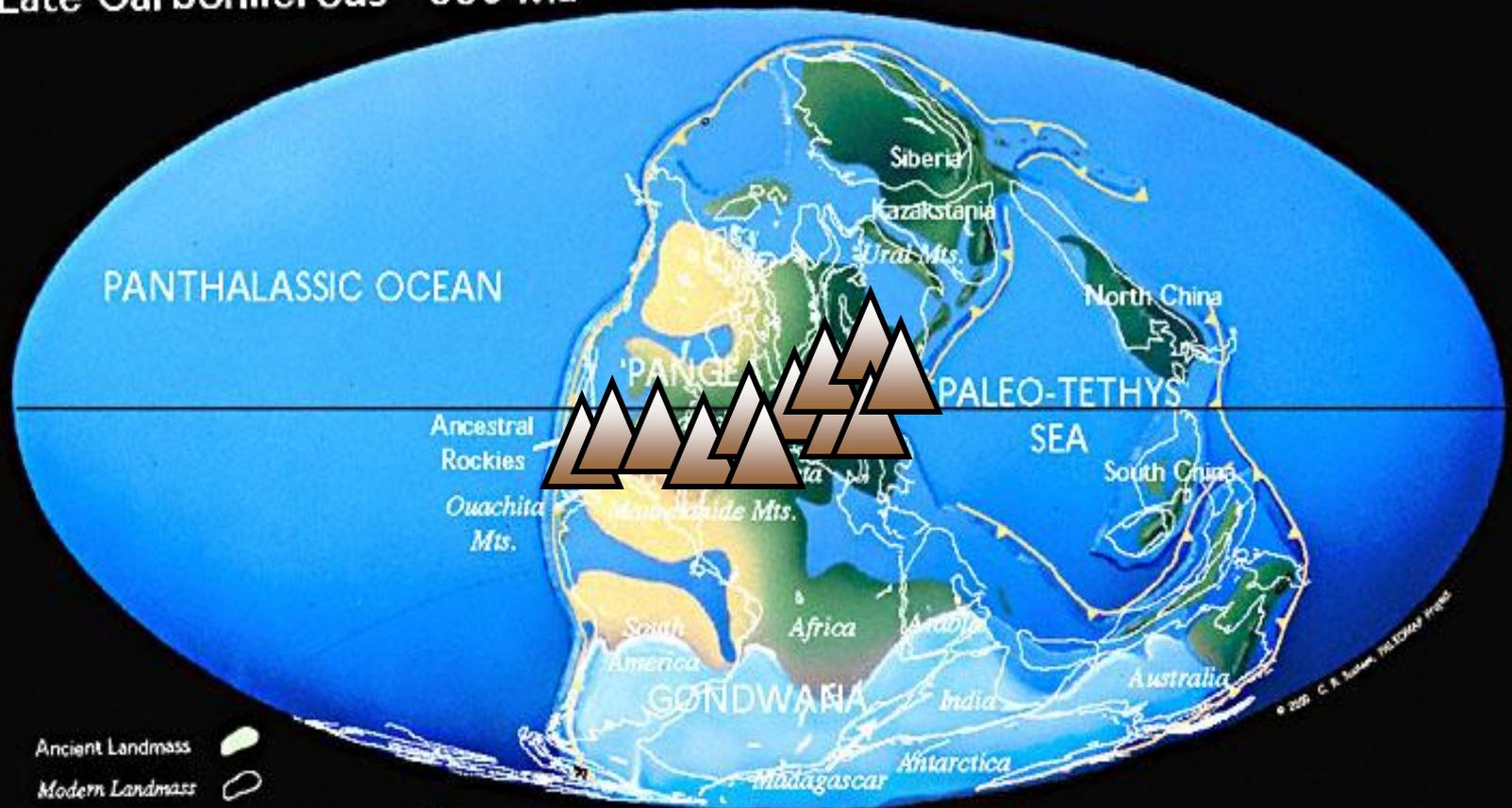
c - Calculer la masse de roches altérées et érodées en Himalaya depuis 20 M.A., et la masse de silicate calcique altéré ?
(REPONSE : $5,4.10^{18}$ KG DE ROCHES ALTEREES, SOIT $1,62.10^{17}$ KG DE SILICATE CALCIQUE ALTERE).

- Calculer combien l'altération en Himalaya a absorbé de CO₂ depuis 20 MA
(REPONSE : $6,2.10^{16}$ KG, SOIT $6,2.10^4$ GT DE CO₂)

- Comparer cette absorption de CO₂ que vous venez de calculer au $2,75.10^3$ GT de CO₂ de l'atmosphère, et au 14.10^4 GT de CO₂ dissout dans l'océan
(REPONSE : CA CORRESPOND A 22 FOIS LE CO₂ ATMOSPHERIQUE ACTUEL, ET A 44% DU CO₂ OCEANIQUE)

- Cette absorption de CO₂ vous permet-elle de proposer une explication (au moins partielle) pour expliquer le refroidissement de la Terre et la glaciation qui ont commence il y a 20 MA ?

Late Carboniferous 306 Ma



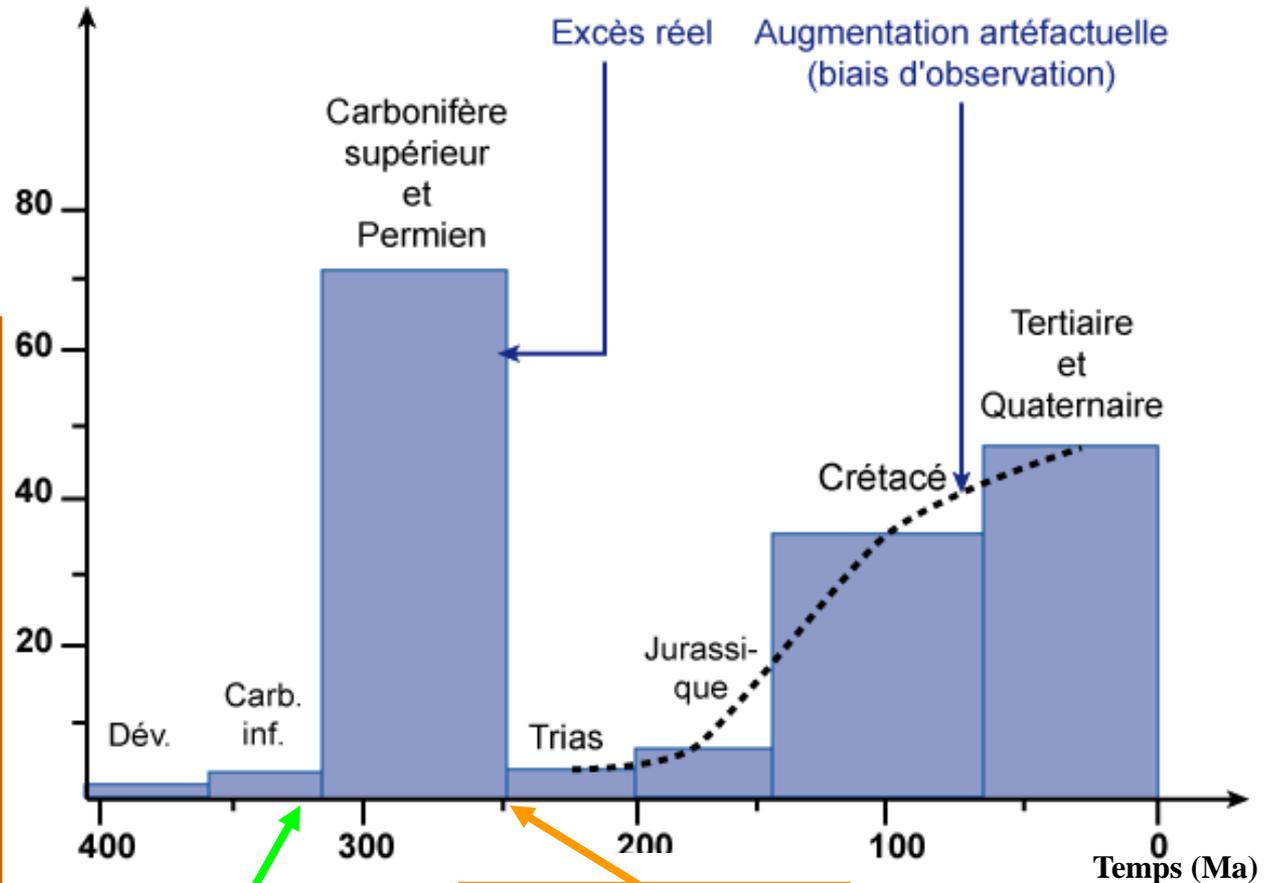
- Ancient Landmass
- Modern Landmass
- Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction)
- Sea Floor Spreading Ridge

Outre la baisse du CO2 post-Crétacé, cela peut aussi participer à la baisse du CO2 et de la température du Carbonifère (orogénèse hercynienne, en position équatoriale)

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



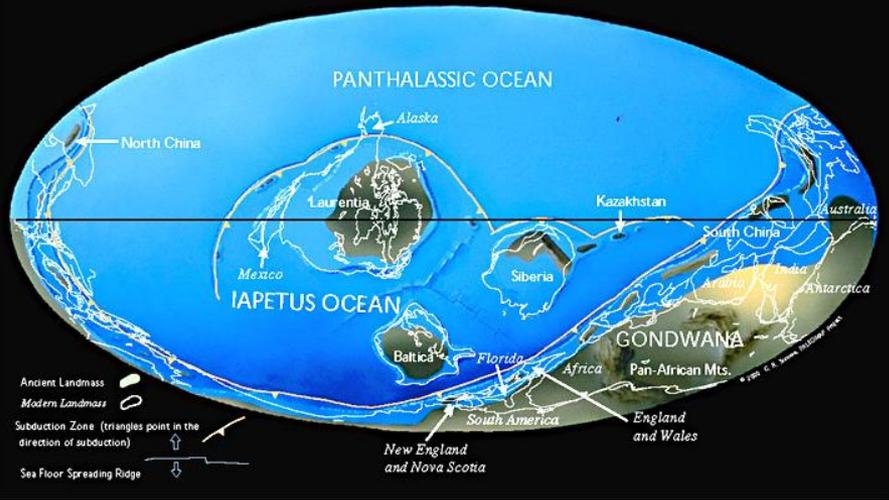
Réserve de charbon exploitable
(milliards de tonnes / millions d'années)



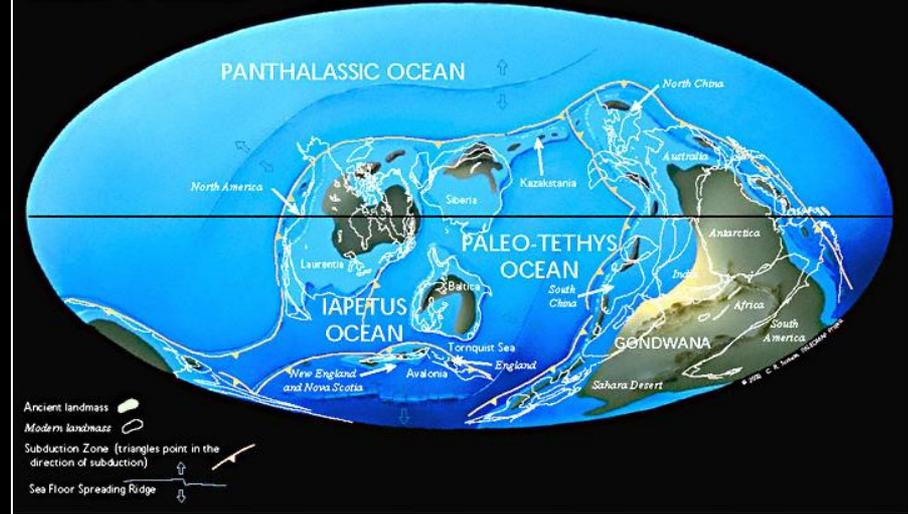
Extension du couvert végétal ligneux

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

Late Cambrian 514 Ma



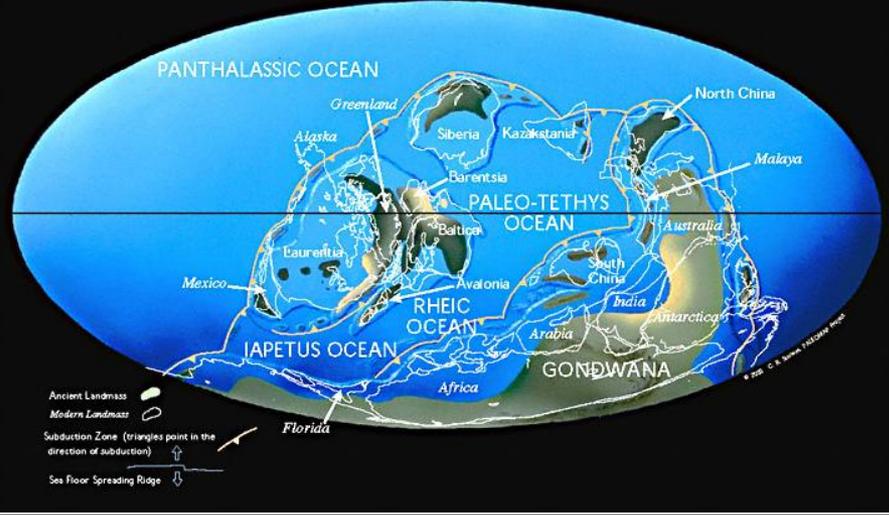
Middle Ordovician 458 Ma



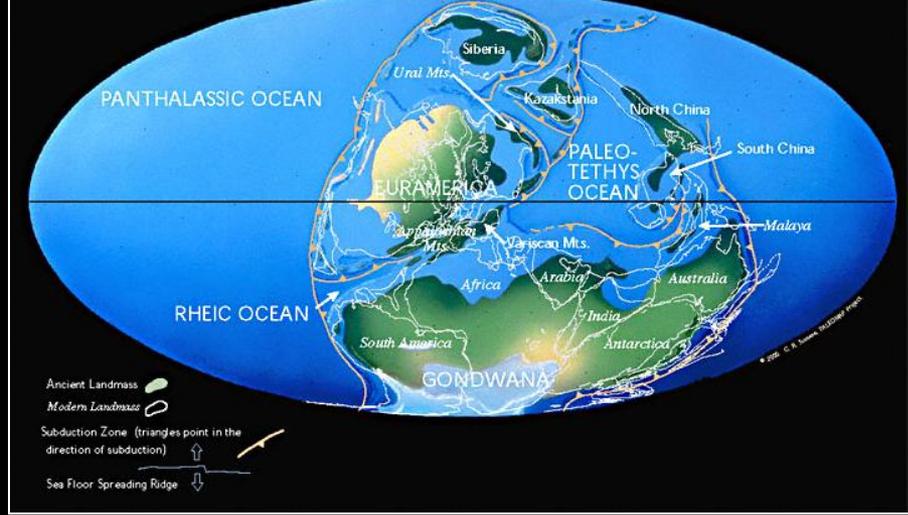
Cambrien : pas de glaciers polaires

Ordovicien : glaciers polaires au sud

Middle Silurian 425 Ma



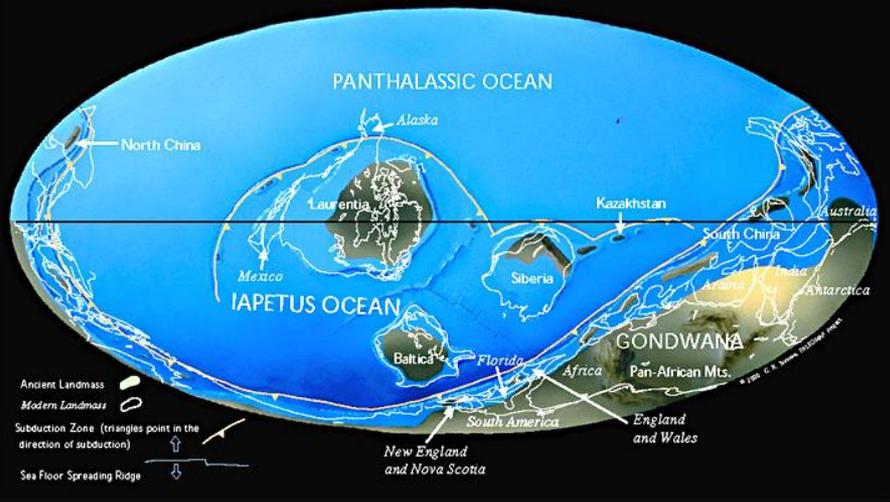
Early Carboniferous 356 Ma



Silurien : pas de glacier polaires

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

Late Cambrian 514 Ma



Middle Ordovician 458 Ma

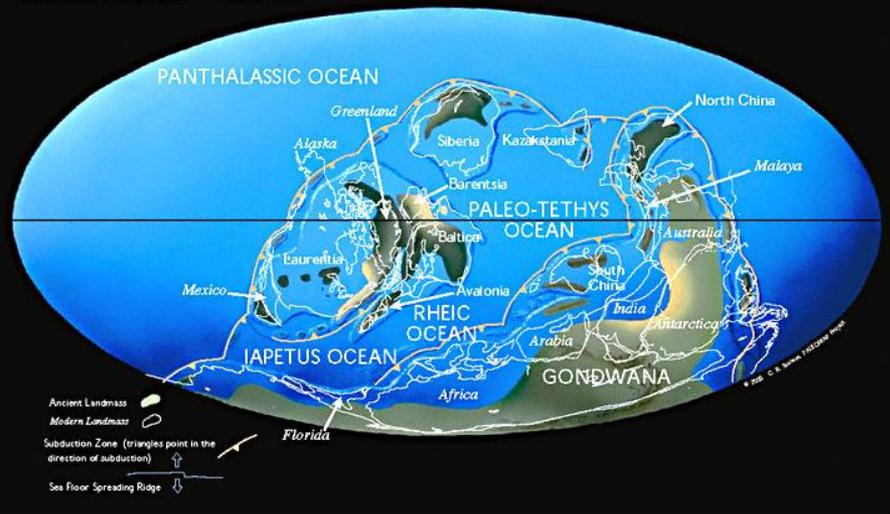


Cette glaciation ordovicienne est très mal comprise !

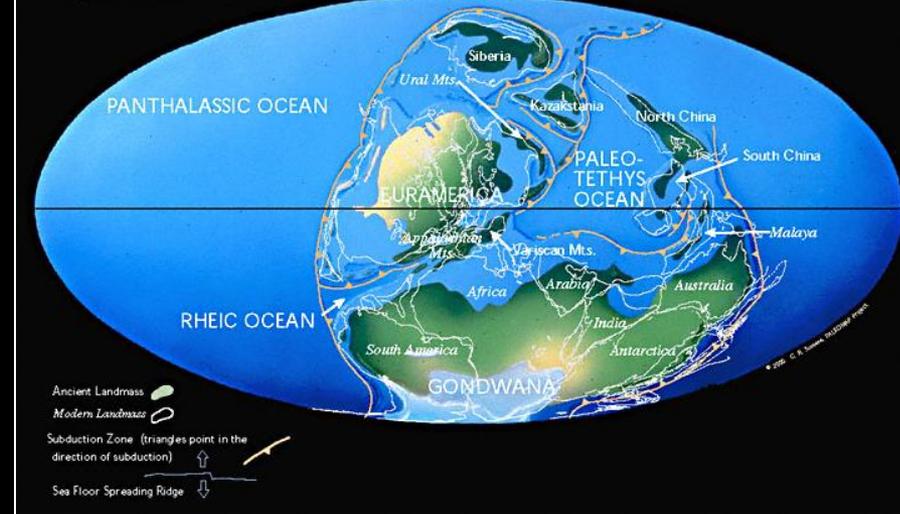
Cambrien : pas de glaciers polaires

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'O₂ 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'O₂ atmosphérique.

Cette hypothèse implique que la fixation d'O₂ par Fe⁺⁺⁺, SO₄⁻⁻ est négligeable depuis le début de l'ère primaire.

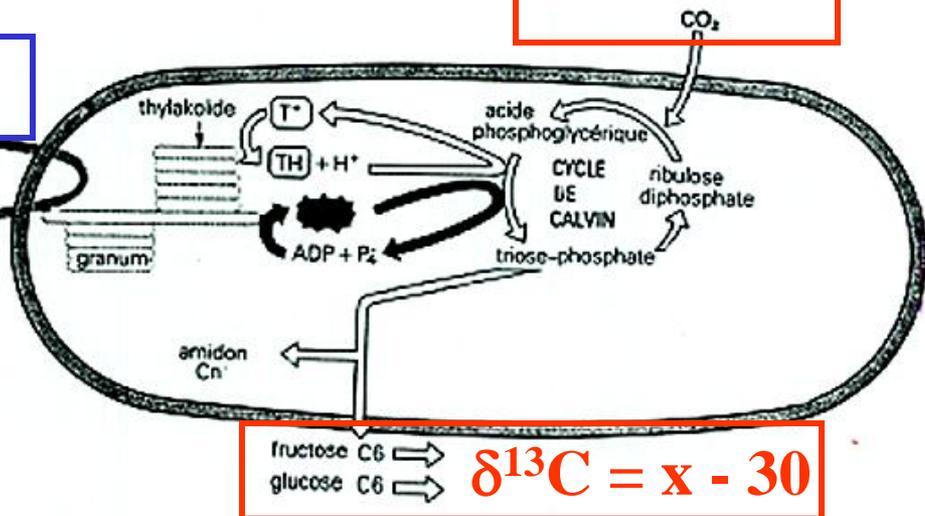
Comment connaître la quantité de carbone réduit présent à une époque donnée ?

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).

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

O_2

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



Principe de la méthode :

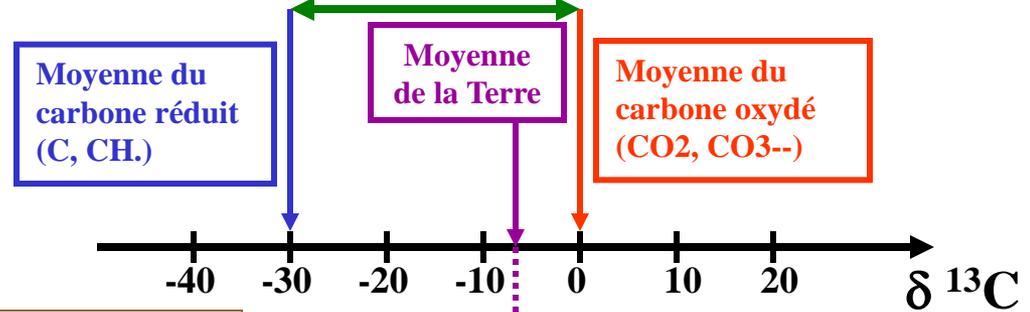
- 1 - on sait que le $\delta \text{C}13$ de la Terre est de -7 (chondrite)*
- 2 - La photosynthèse, de par ses mécanismes chimiques, sépare les isotopes de C.

La matière organique est plus riche en $\text{C}12$ d'une trentaine d'unités δ que les CO_2 , HCO_3^- et 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

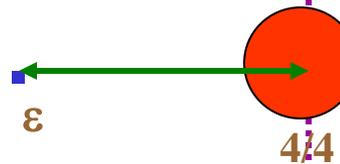
Fractionnement de la photosynthèse



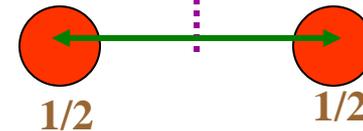
Actuellement, en gros, 3/4 de carbonates et 1/4 de carbone réduit



Au début de la vie, 4/4 de carbonates et ε de carbone réduit



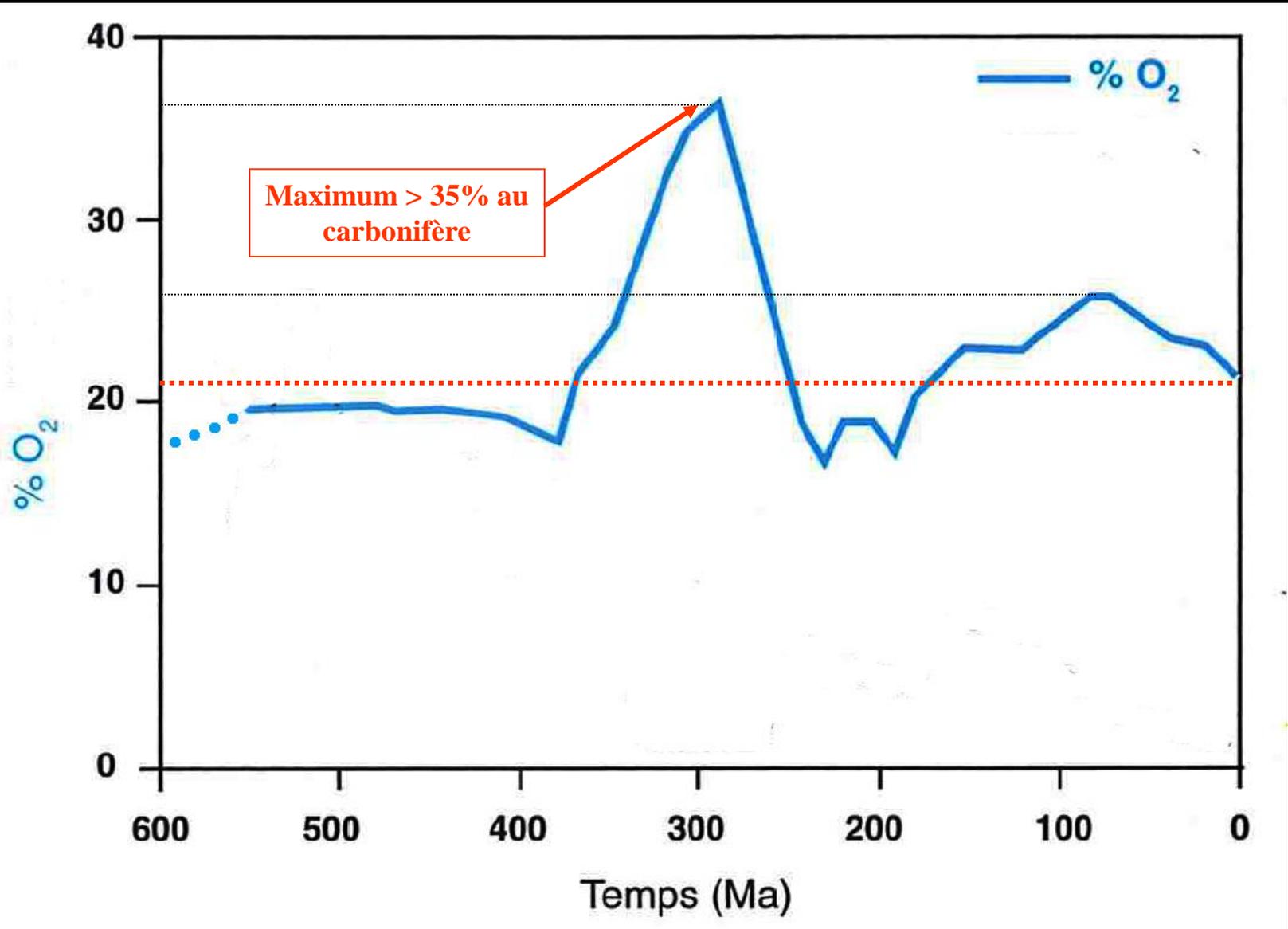
Peut-être y a t'il eu ou y aura t'il 1/2 de carbonates et 1/2 de carbone réduit



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'O₂ atmosphérique



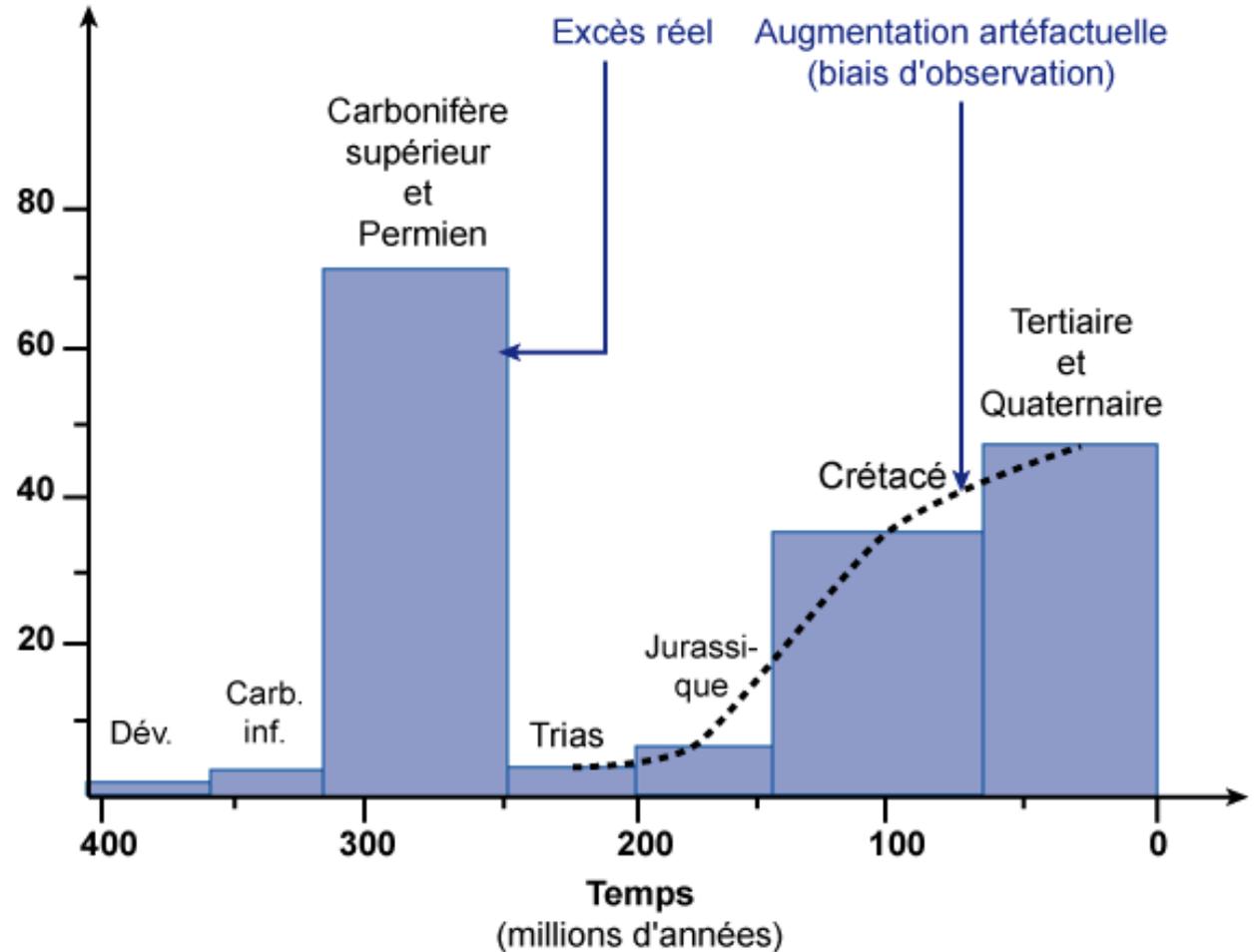
Le résultat



Une explication du maximum carbonifère

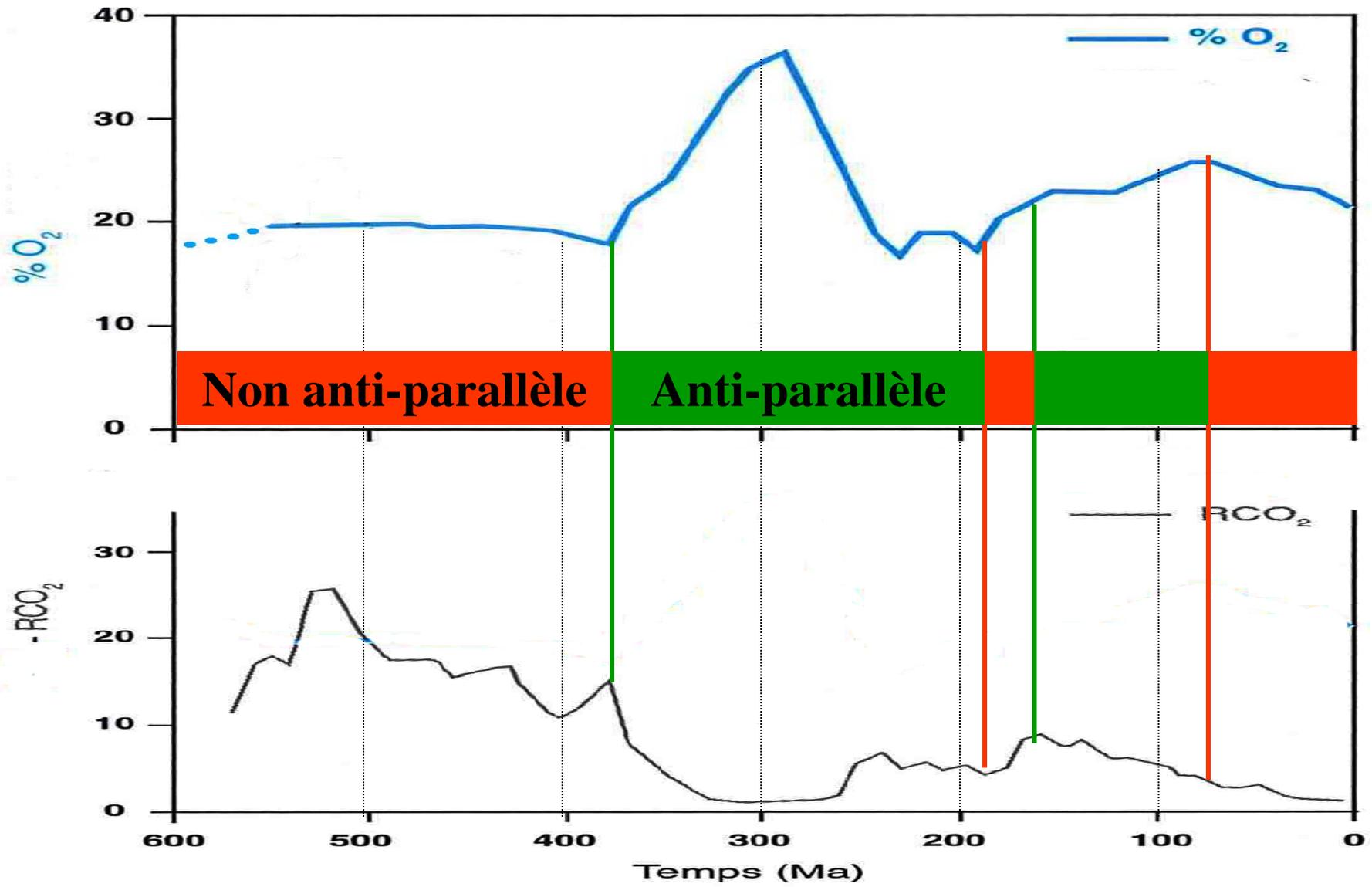


Réserves de charbon exploitable
(milliards de tonnes / millions d'années)



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





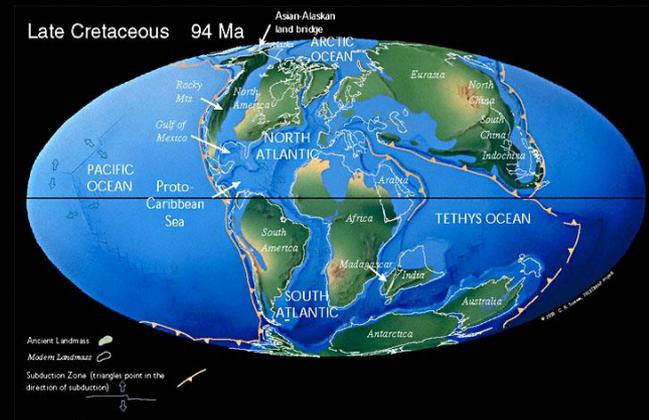
Evolution comparée O₂ / CO₂. Parfois, c'est antiparallèle. Le couple photosynthèse-fossilisation de la matière organique domine. Souvent ce n'est pas antiparallèle. D'autres facteurs font varier le CO₂

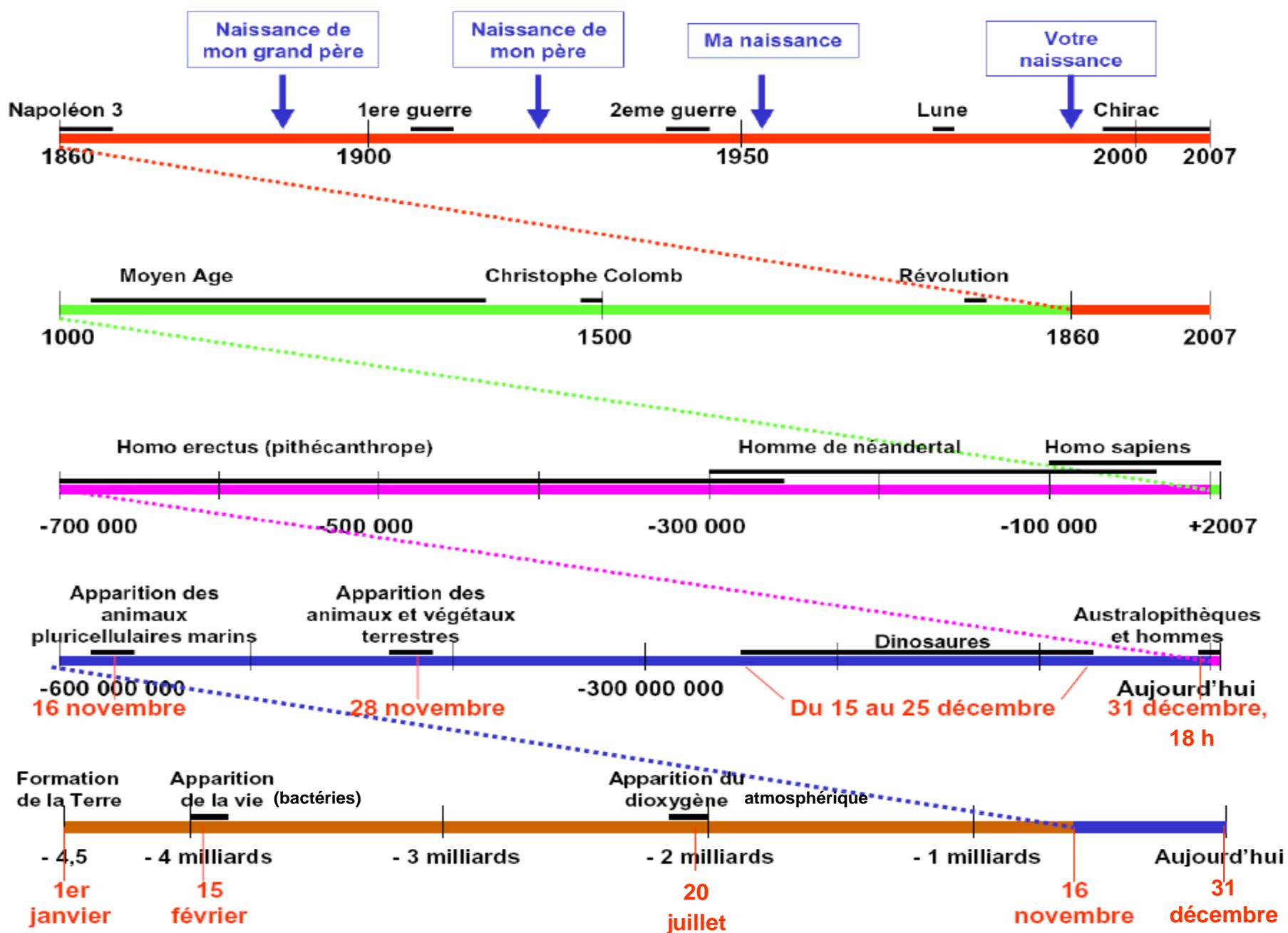
Pourquoi un maximum d'O₂ au Carbonifère, c'est à dire un maximum de fossilisation de matière organique ?

Piège tectonique du charbon ?

Difficulté de la dégradation de la lignine ?

Et pourquoi O₂ 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**



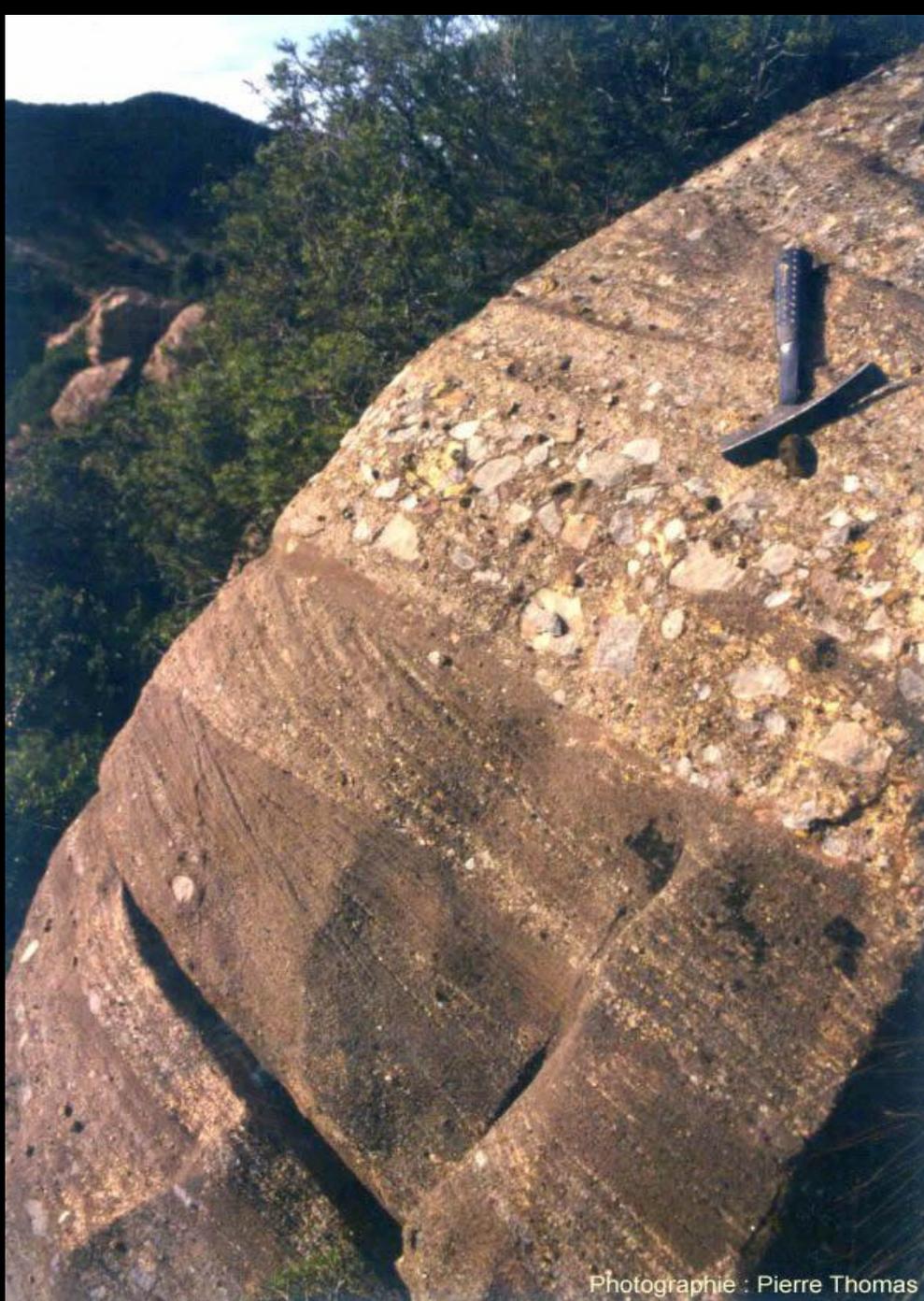
Photographie Pierre Thomas



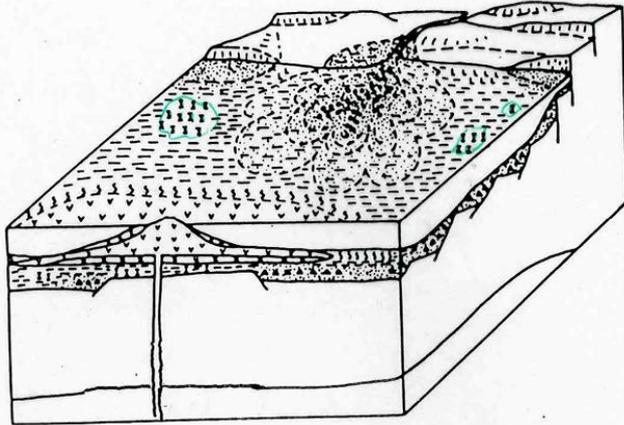
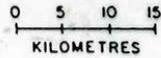
Photographie Pierre Thomas

Ceux la aussi !





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

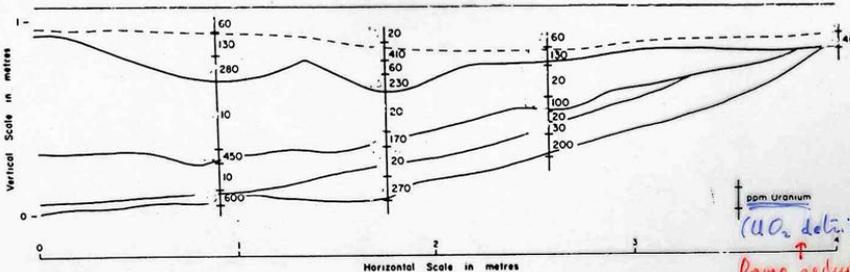
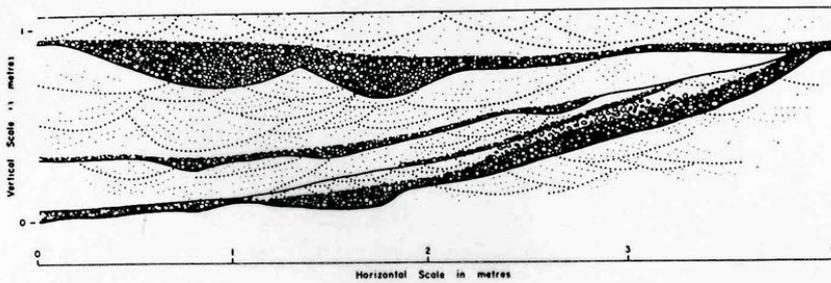


- CONGLOMERATES
- CARBONATES
- IRONSTONES = *ferrous carbonate = B.I.F.*
- MUD
- SILT
- SAND
- BRECCIA
- } LAVA
- } LAVA
- VOLCANICLASTICS
- STRATIFIED
- SULPHIDE-FACIES IRONSTONES
- HYDROTHERMAL CIRCULATION

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

-Des torrents qui roulent des galets de pyrites (FeS_2) et de pechblende (UO_2), instables en milieu oxydant

L'atmosphère ne contenait pas d' O_2



ppm uranium
(UO₂ de la tique)
forme réduite de l'uranium

Le précambrien de la région de Johannesburg



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

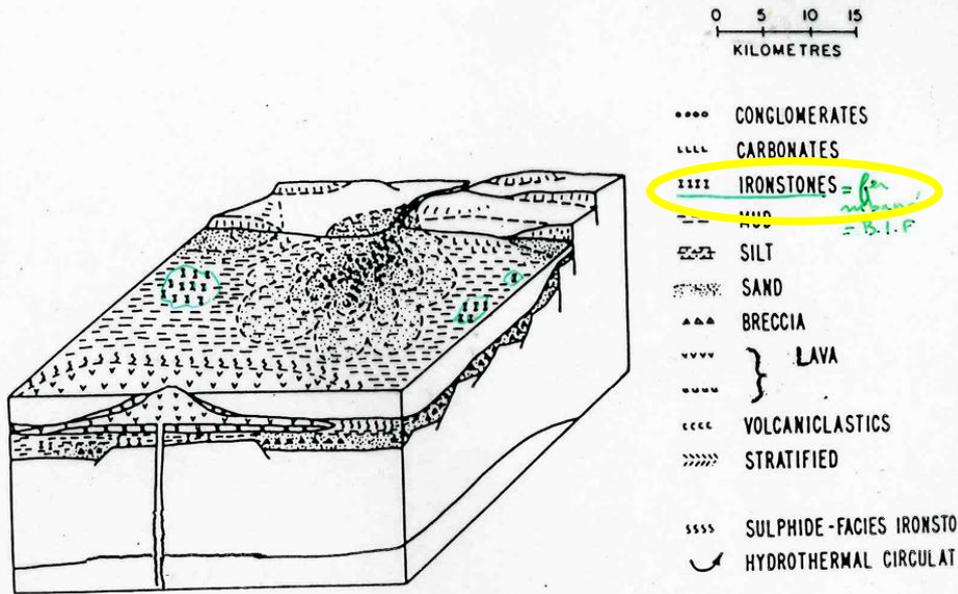
5 cm



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



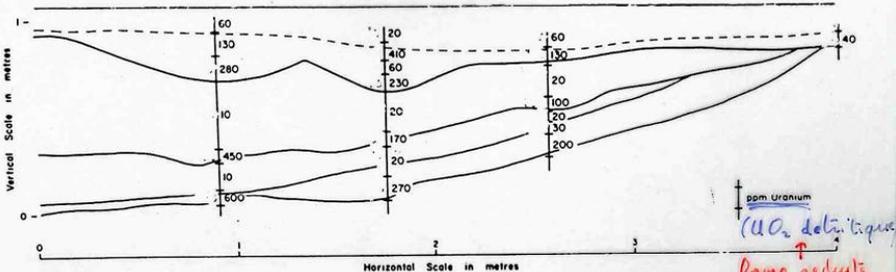
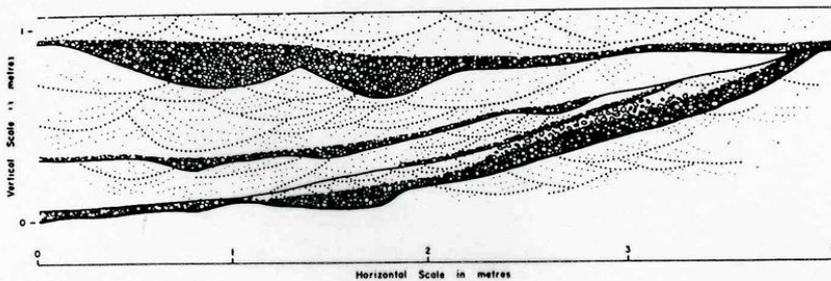
**La pyrite (FeS_2) n'est pas stable en présence d' O_2 .
Alors dans un torrent ...**



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

- Des torrents qui roulent des galets de pyrites (FeS_2) et de pechblende (UO_2), instables en milieu oxydant

-Des milieux localisés avec des BIF (banded Iron Formation) contenant du Fe_2O_3



Le précambrien de la région de Johannesburg

Les BIF, des alternances d'oxyde ferrique avec Fe^{+++} (Fe_2O_3 ou Fe_3O_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)

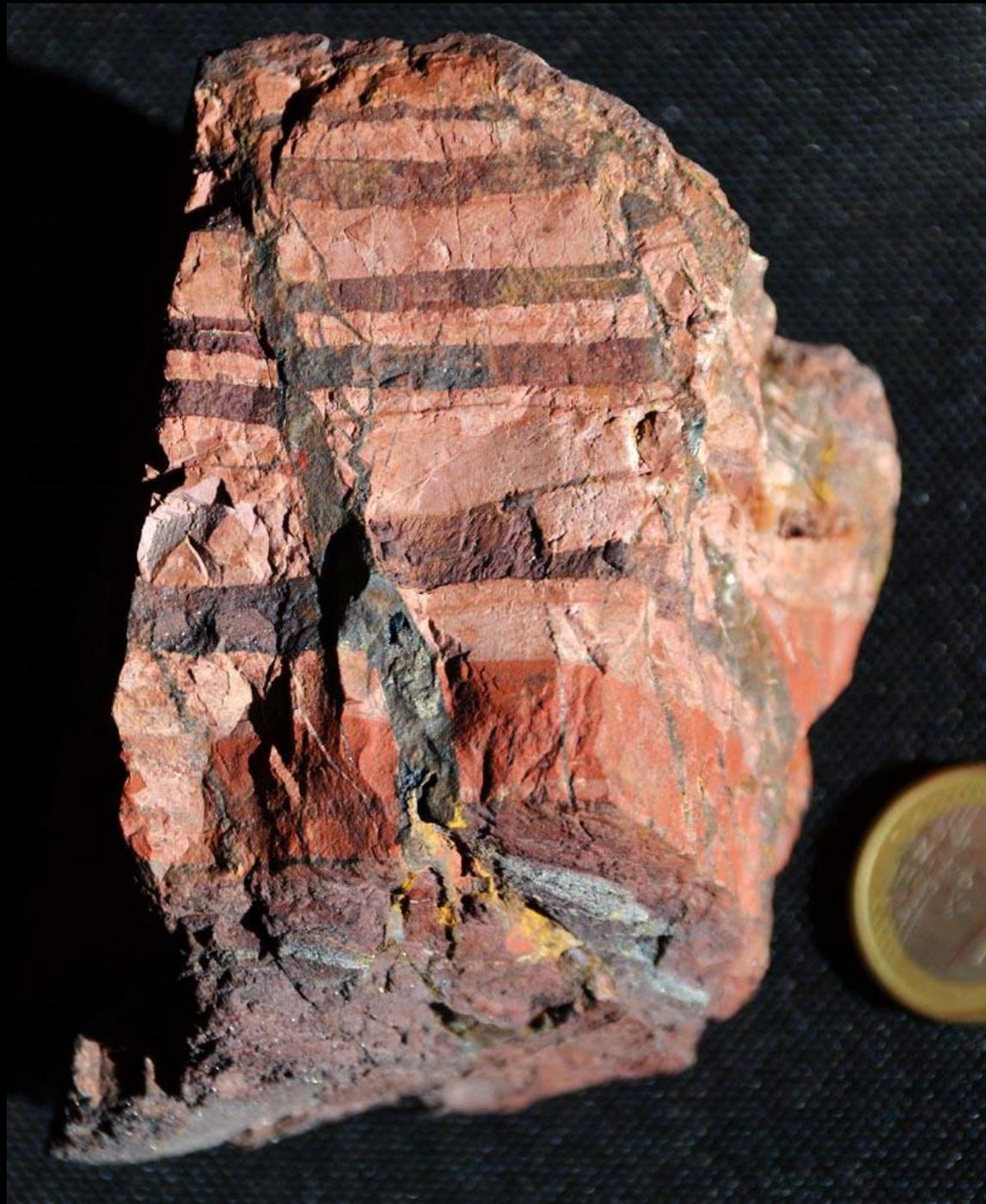


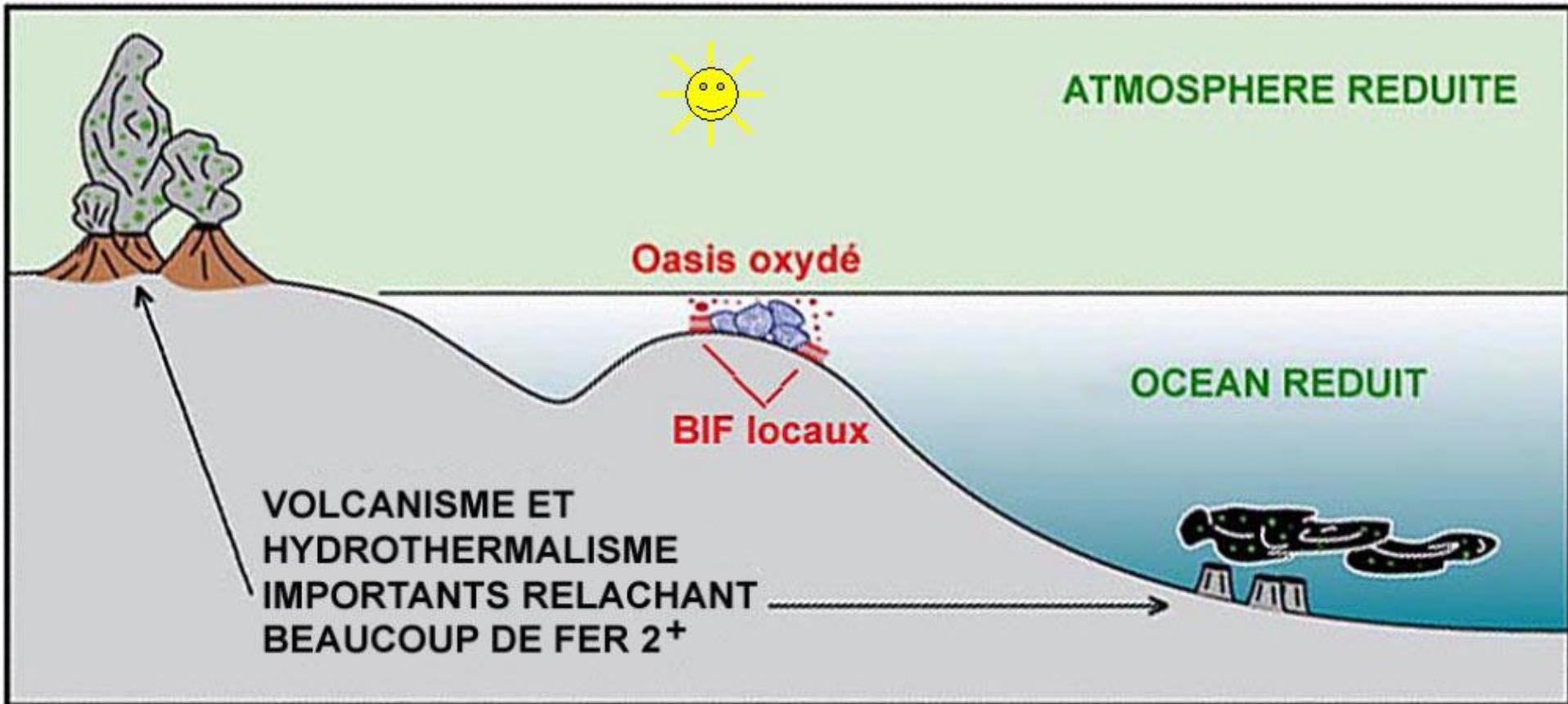
BIF du groupe de Fig Tree (3,25 Ga, Af. du Sud)



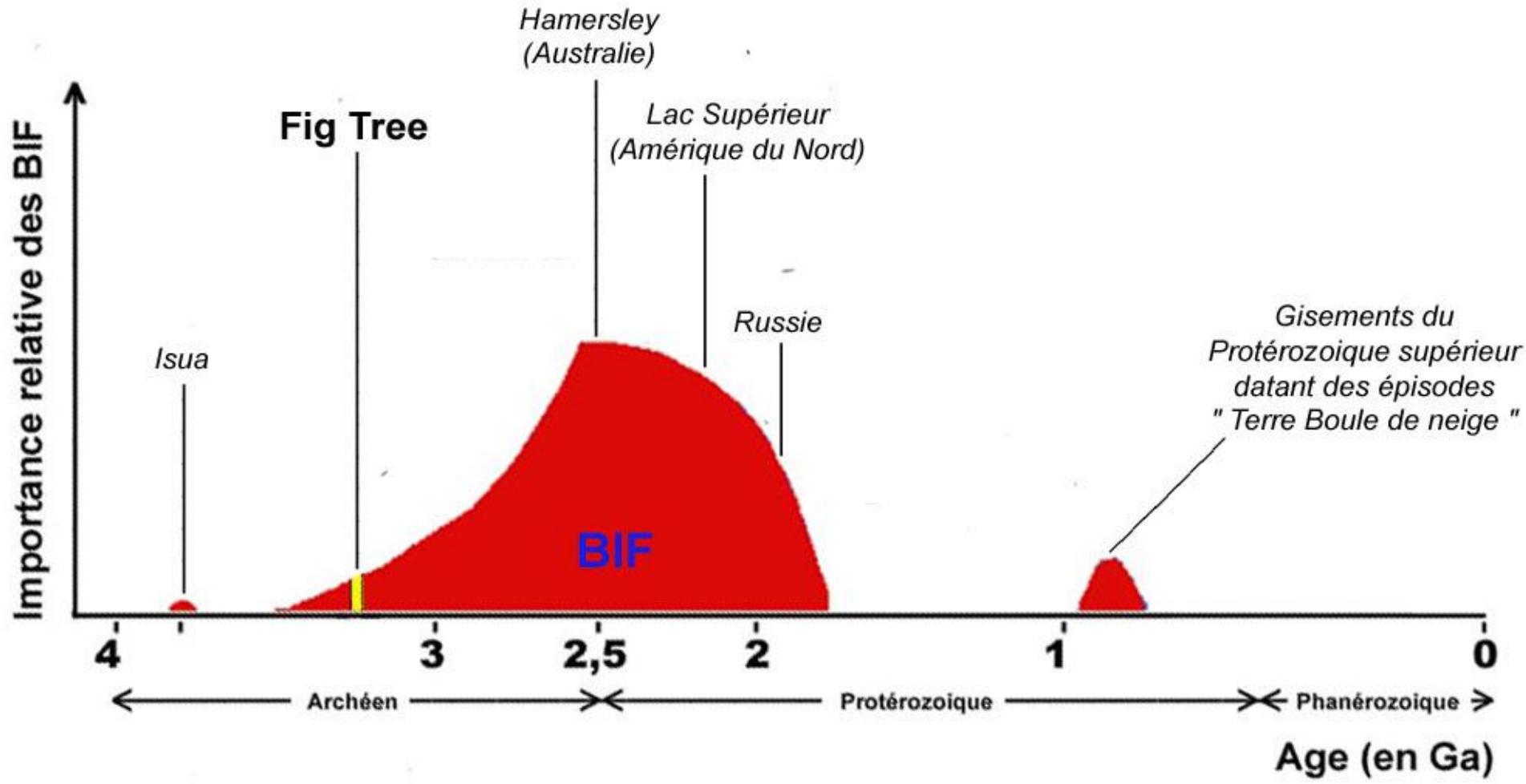
**Gros plan sur les fers rubanés du groupe de Fig Tree
(3,25 Ga, Af. du Sud)**



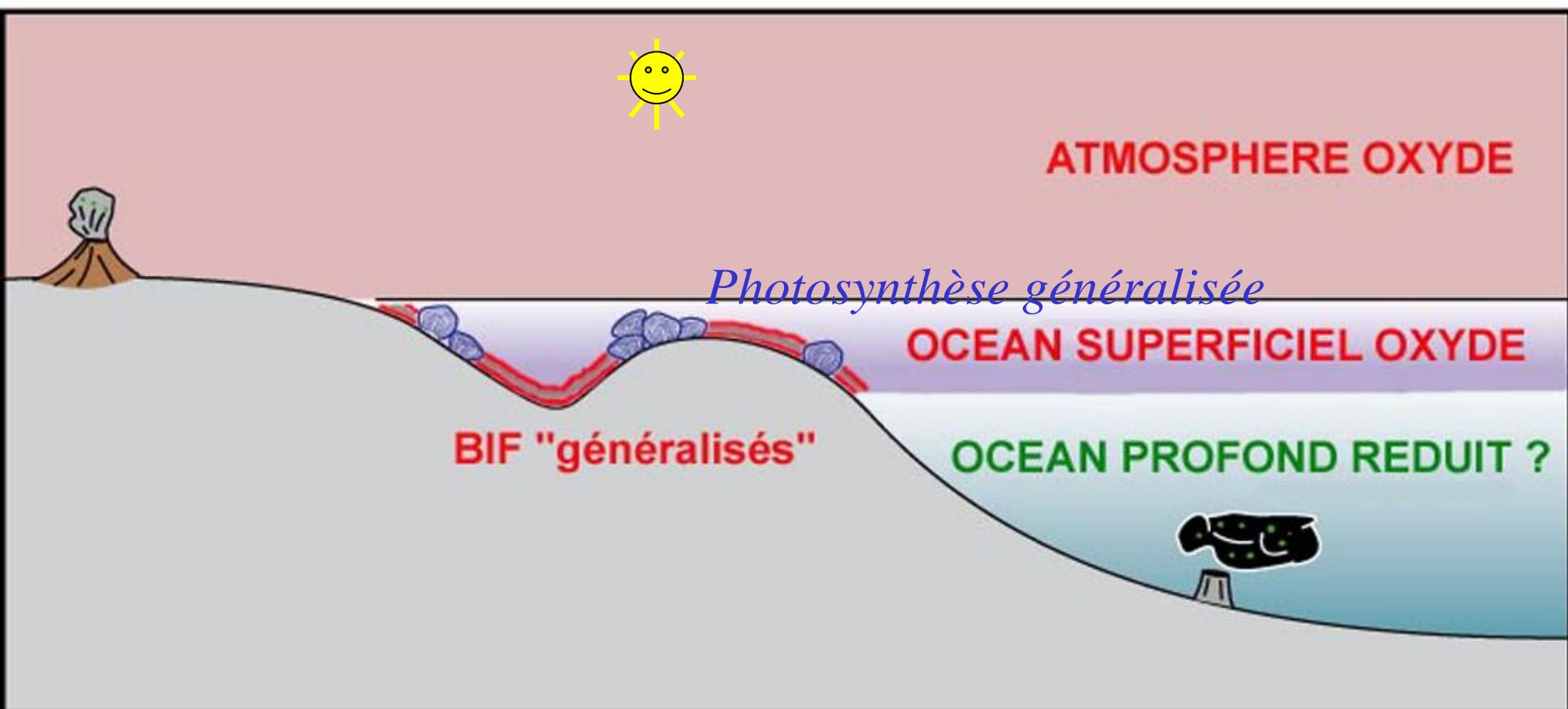




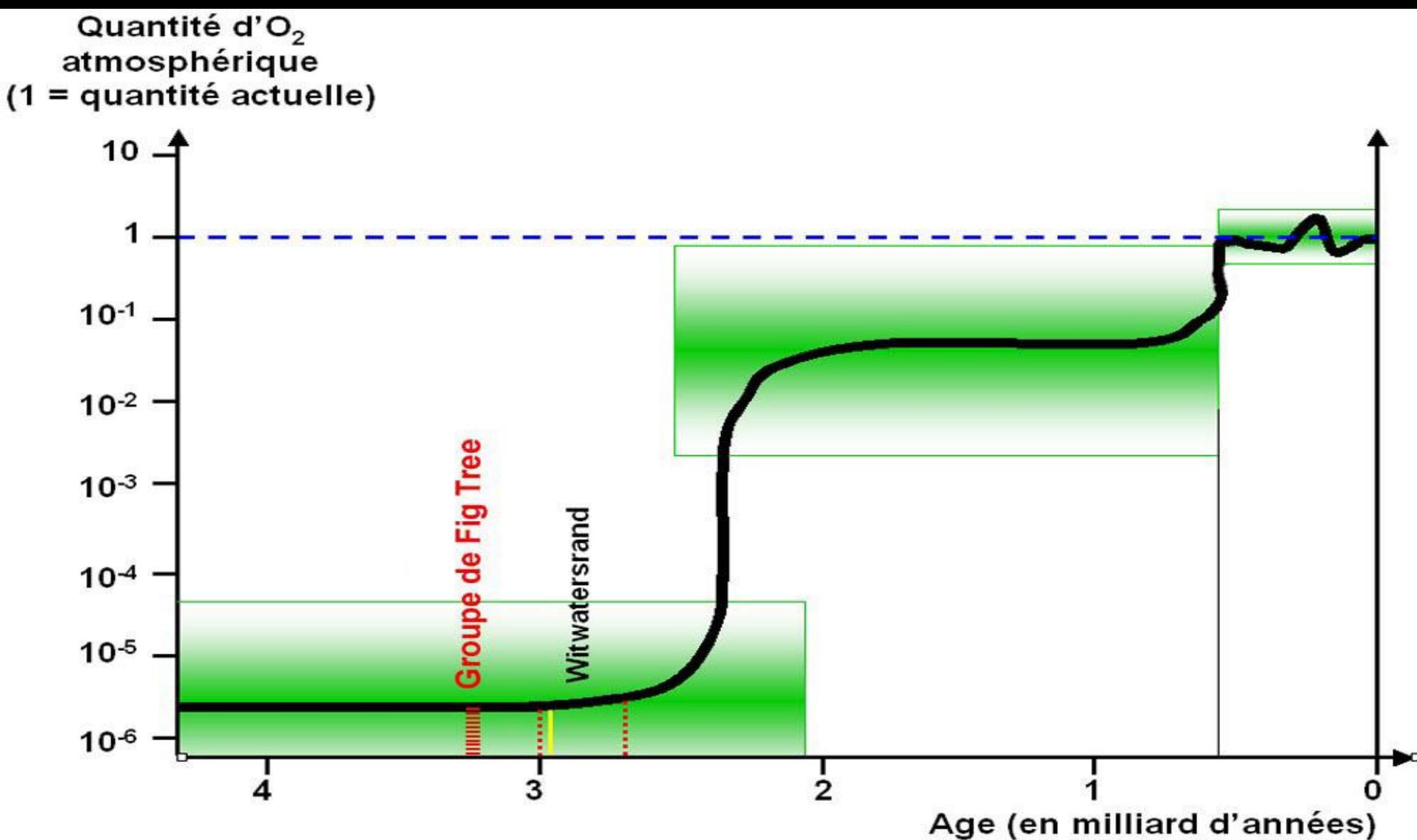
La Terre vers -3,2 -2,9 Ga : atmosphère réduite, eau de mer réduite, riche en Fe^{2+} (dissout car soluble). Oasis de vie photosynthétique créant des « îlots » oxydés où précipite du Fe^{3+} sous forme de Fe_2O_3 , insoluble.



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

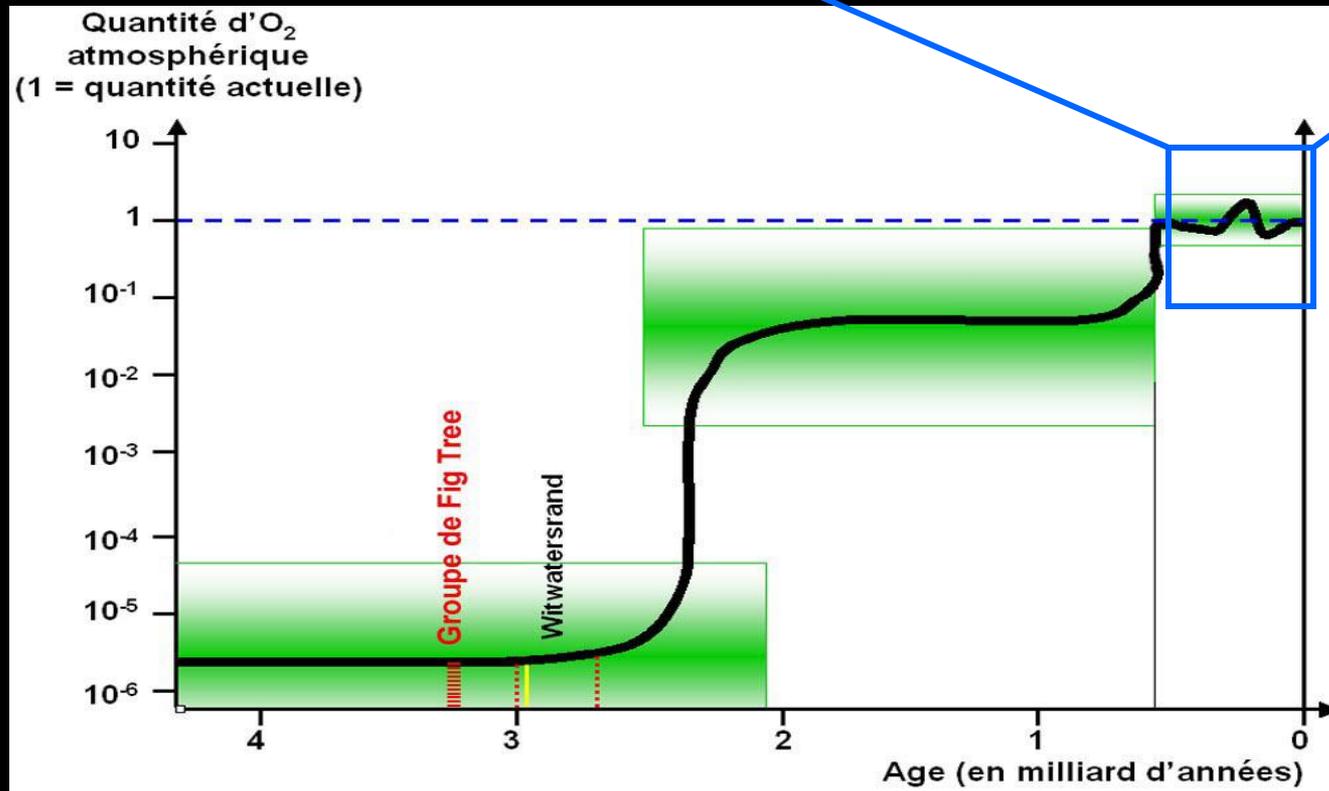
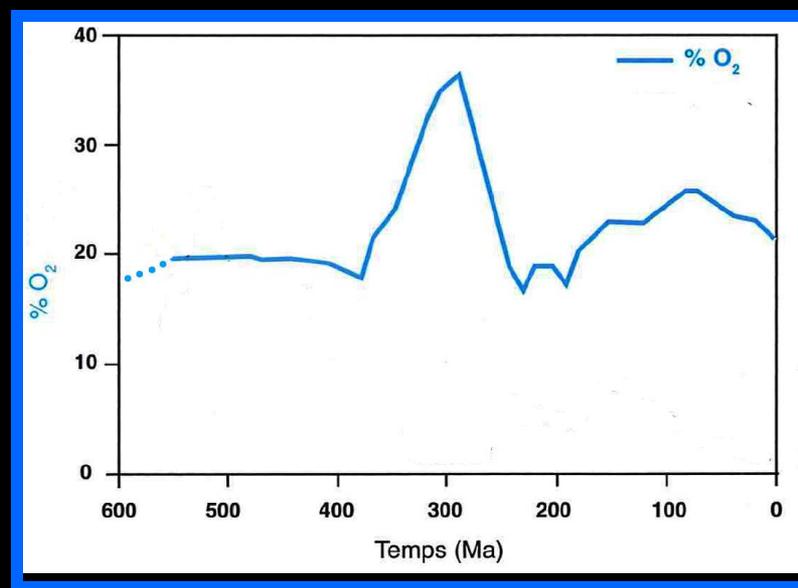


La « révolution » de -2,6 à -2 Ga. Explosion de la photosynthèse (et de la fossilisation de la matière organique). L'atmosphère et l'océan (d'abord superficiel, puis profond) deviennent oxydés. Tout le Fe^{++} devient Fe^{+++} et précipite sous forme d'énormes niveaux de BIF omniprésents. A la fin, la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

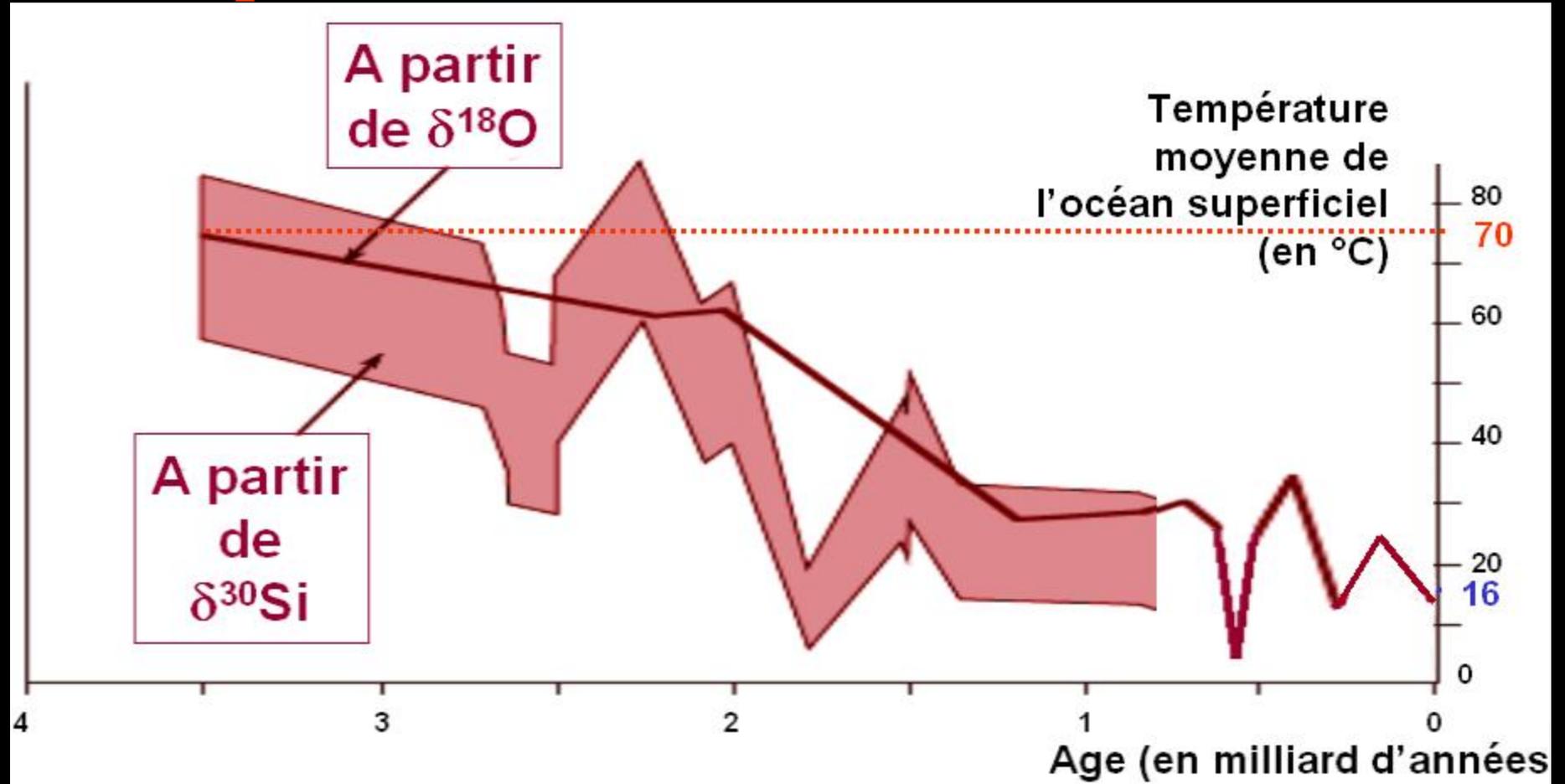


C'est avec de telles données qu'on reconstitue l'évolution de l'O₂ atmosphérique au cours du temps (courbes rouge) avec une énorme barre d'erreur (zone verte)

Les variations phanérozoïques de l'O₂ atmosphérique (échelle linéaire) dans l'évolution globale (échelle log)



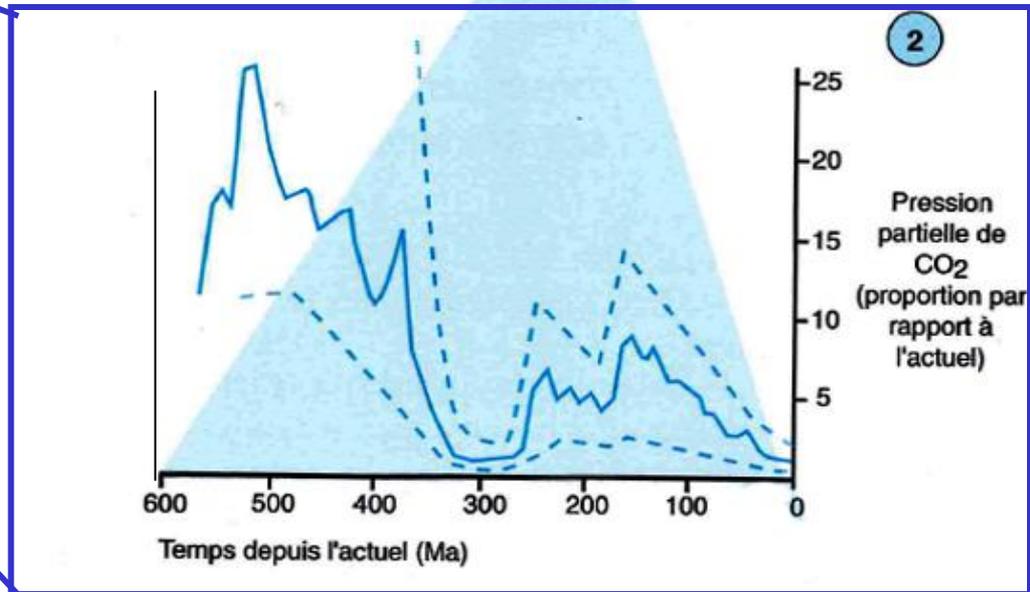
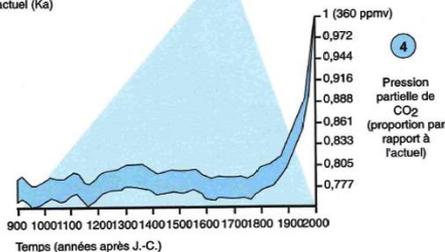
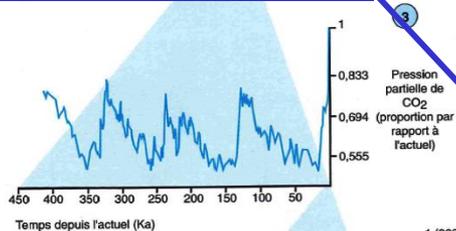
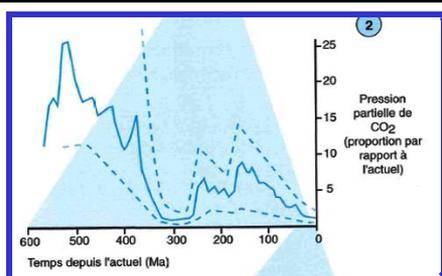
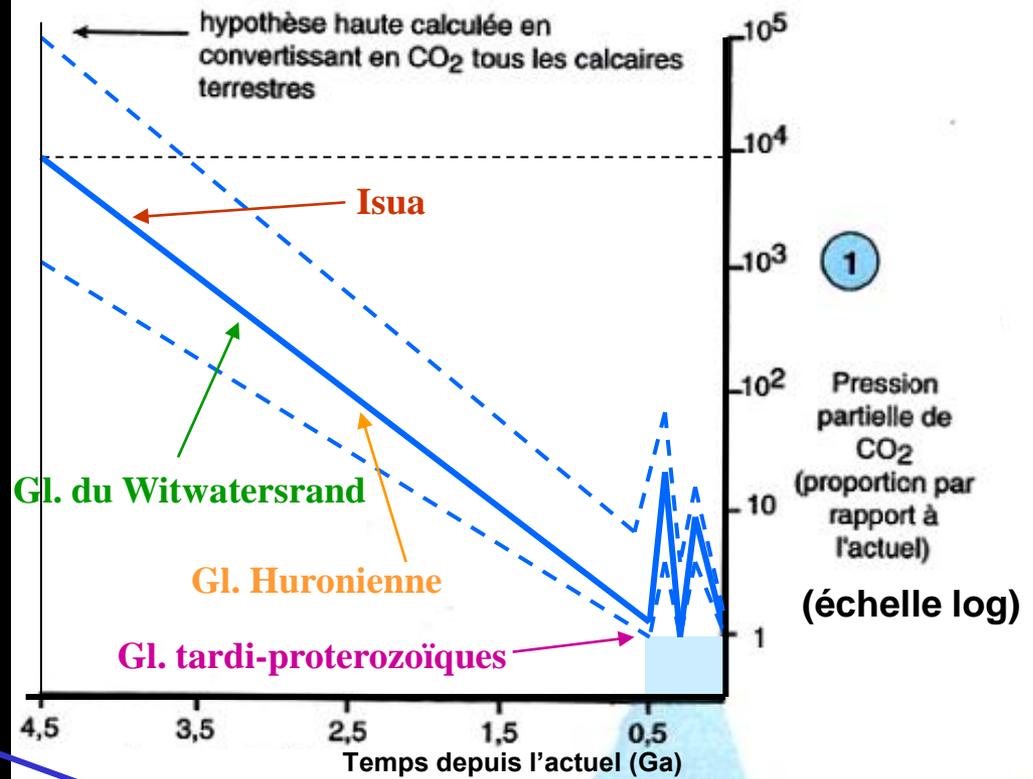
La température à l'échelle de l'histoire de la Terre.

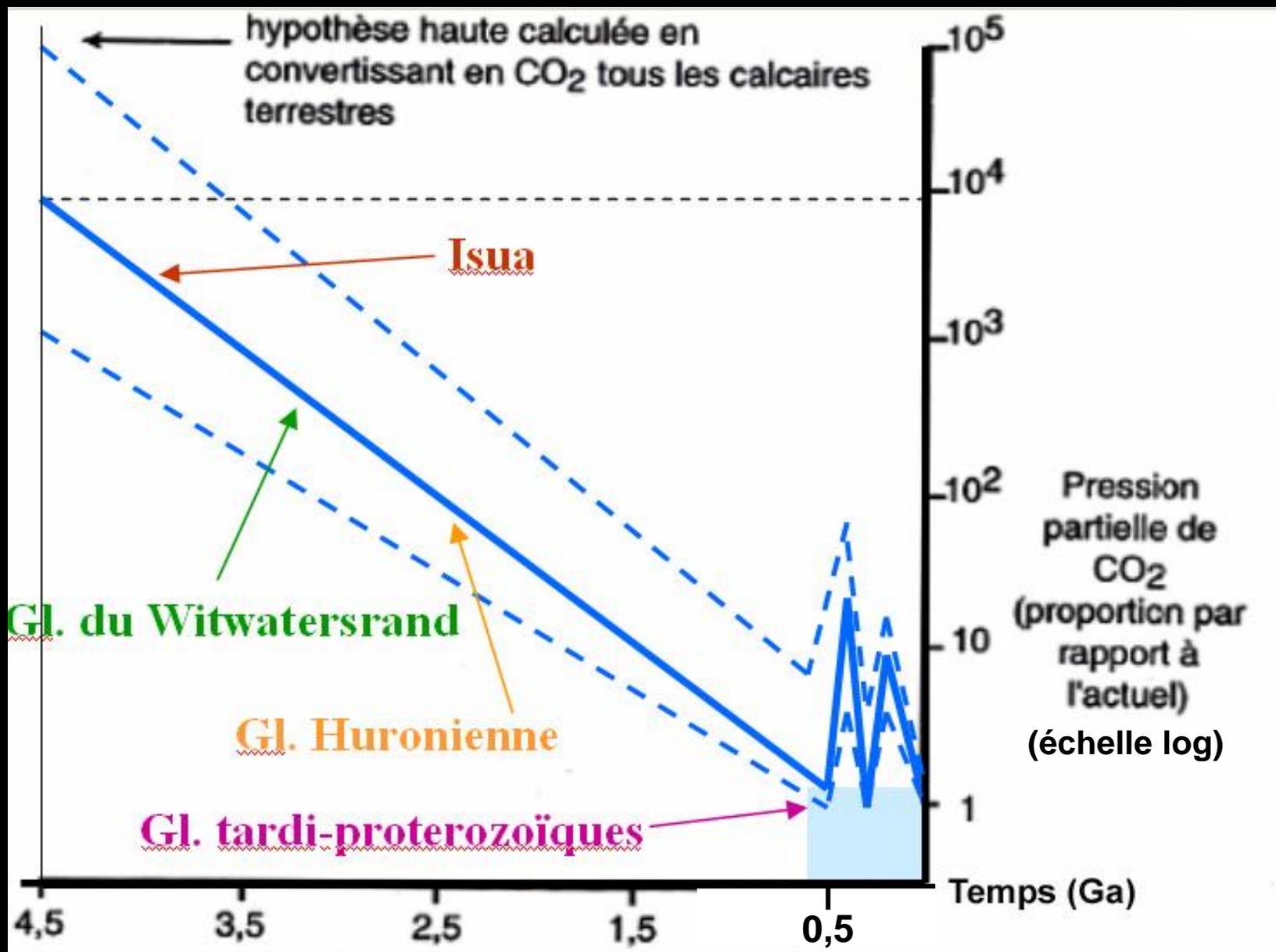


Que fait la température (courbes très approximatives) ?
Vers + 70° jusqu'à -2 Ga.

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

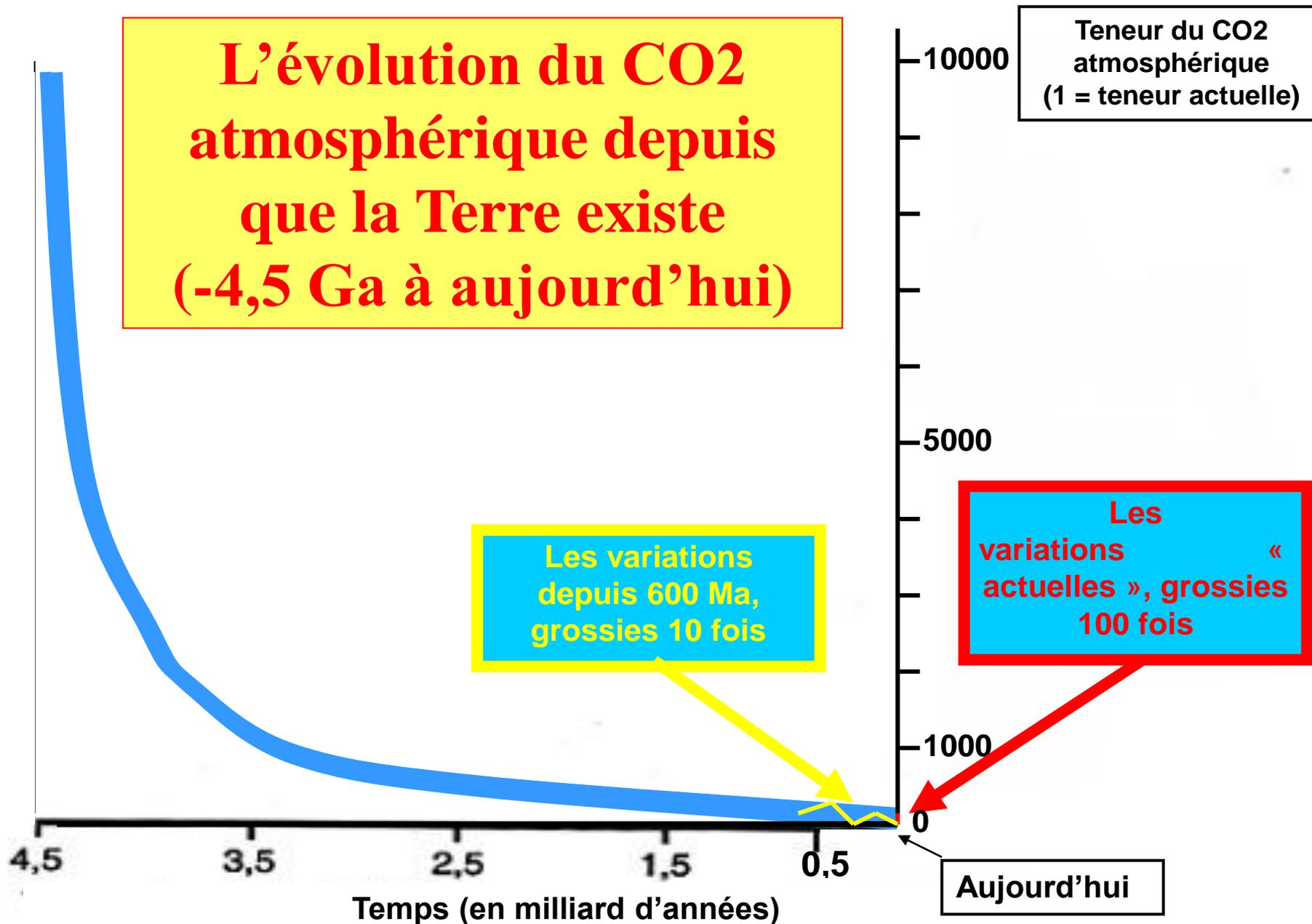
**Et pendant ce temps là,
le CO₂ baisse : une
diminution exponentielle
(au irrégularités près).
Le CO₂ est divisé par 10
tout les milliards
d'années (10 000 à
100 000 en tout).**



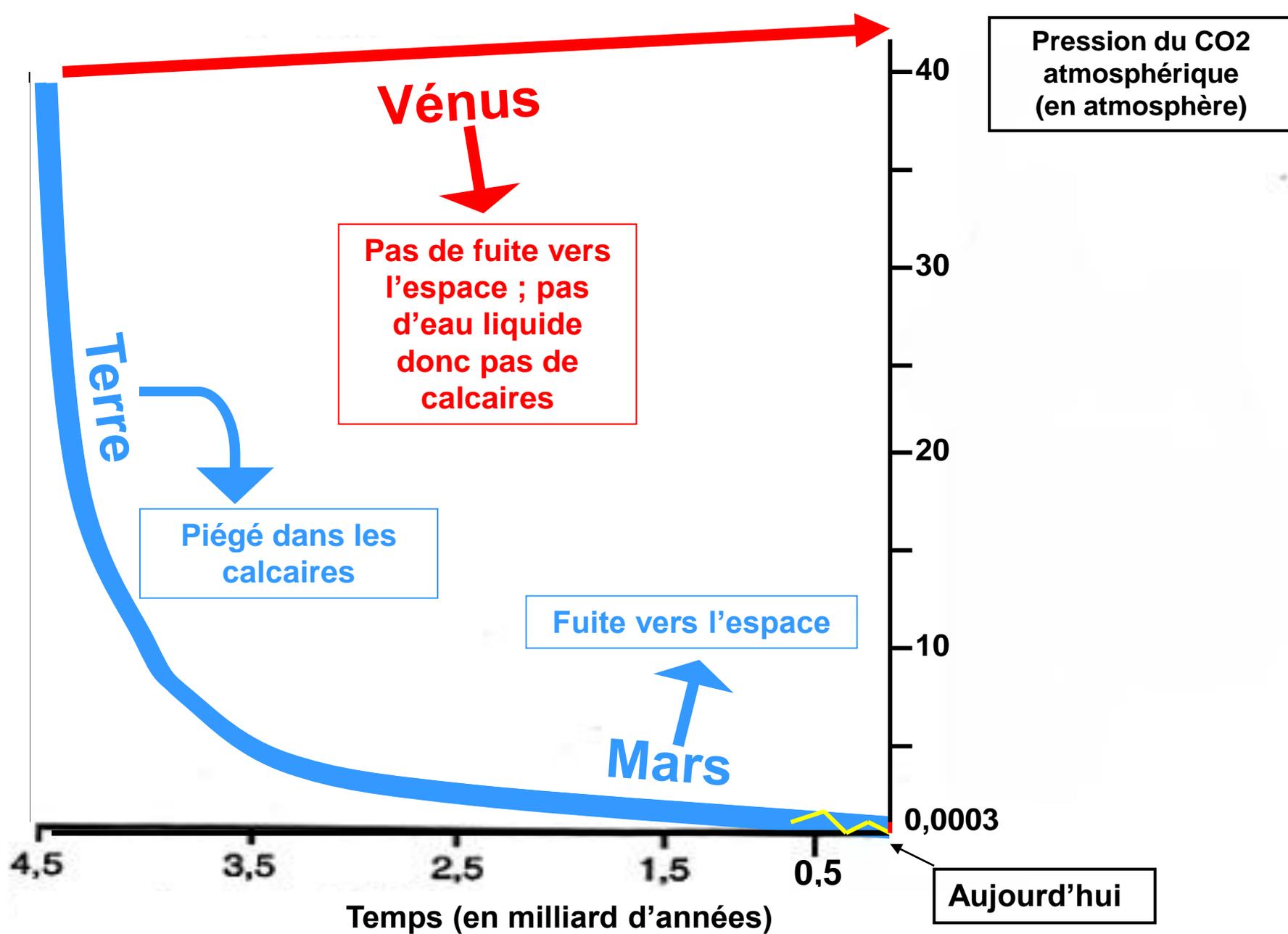


Une courbe d'évolution du CO_2 que bien peu de gens connaissent, à l'échelle de la durée de la Terre

L'évolution du CO₂ atmosphérique depuis que la Terre existe (-4,5 Ga à aujourd'hui)

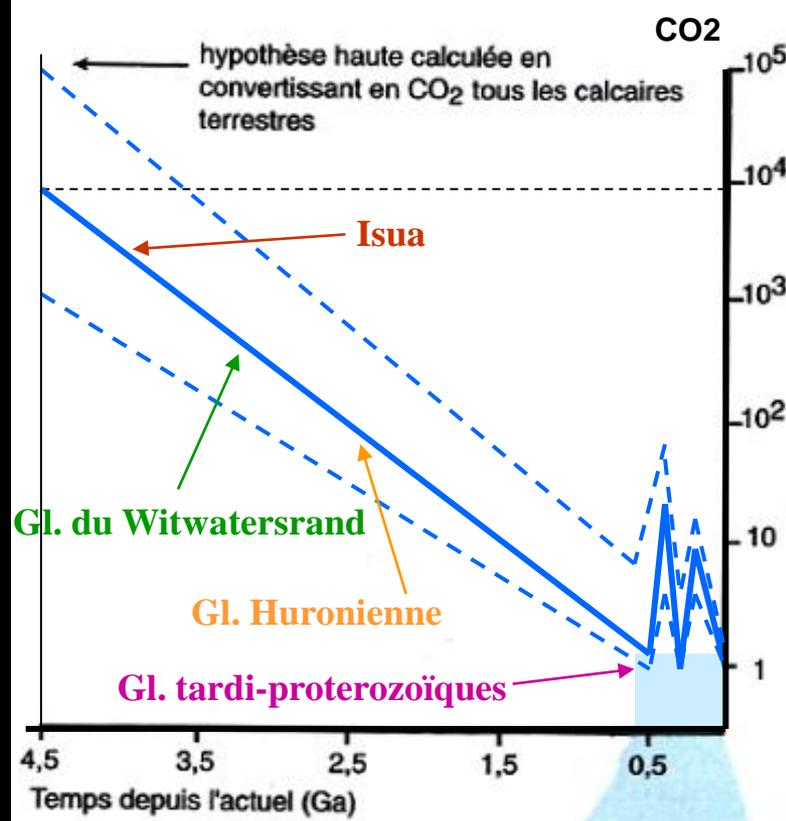


C'est encore plus « inattendu » en échelle linéaire

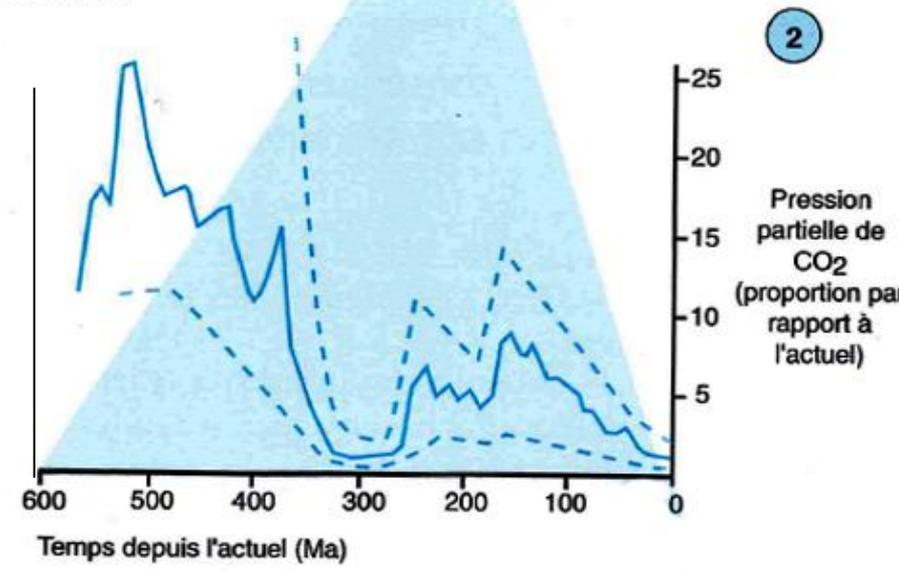
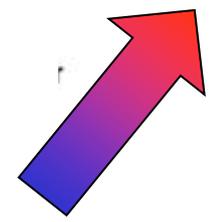
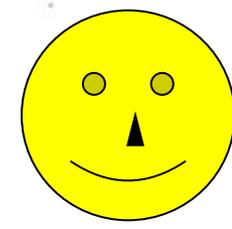


Les destins comparés de Vénus, Terre et Mars

Le CO₂ 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

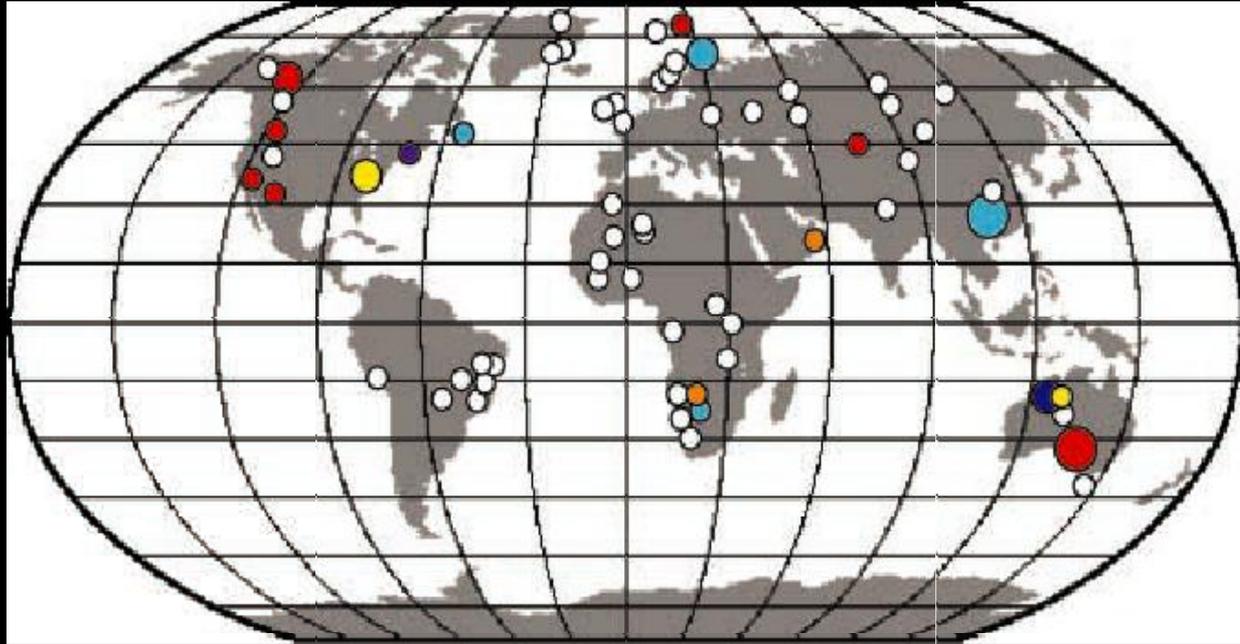


Surfaces striées – Sédiments sans granoclasement avec des clastes de taille diverse (moraines) = mouvement de glaces sur les continents



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

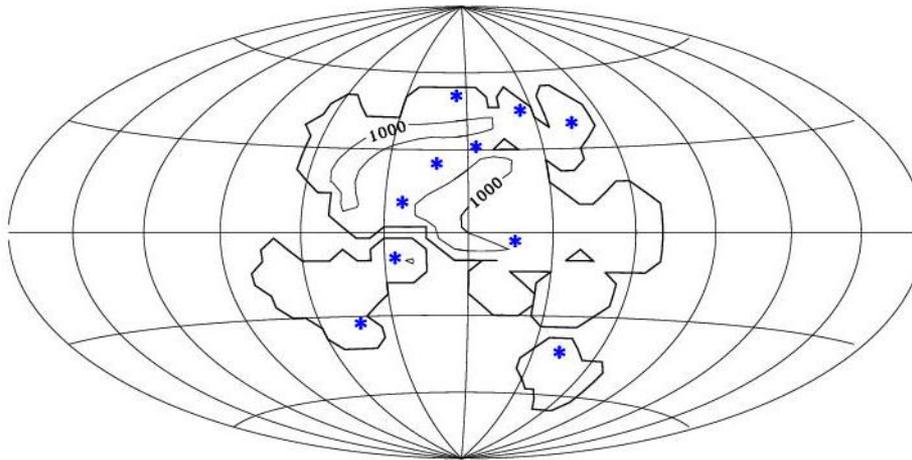
**On en trouve partout, sur toutes les latitudes
actuelles**



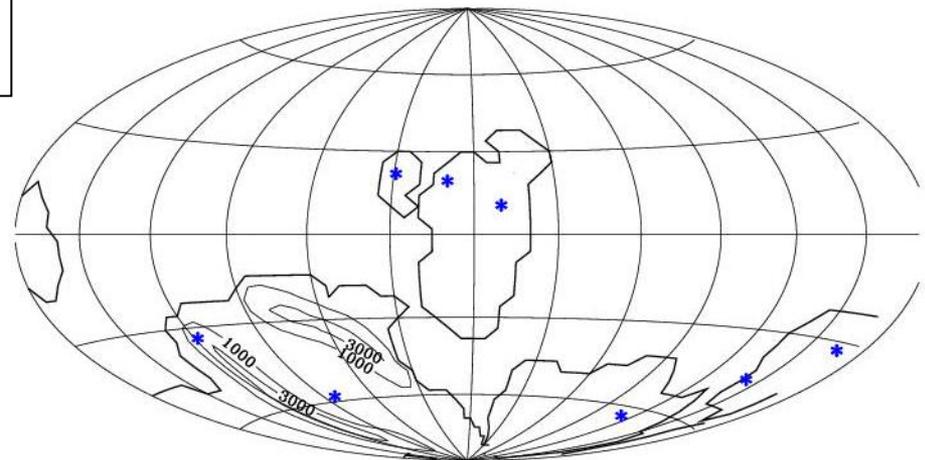
**Présence des formations glaciaires
Néoprotérozoïque
Sur tous les continents**

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

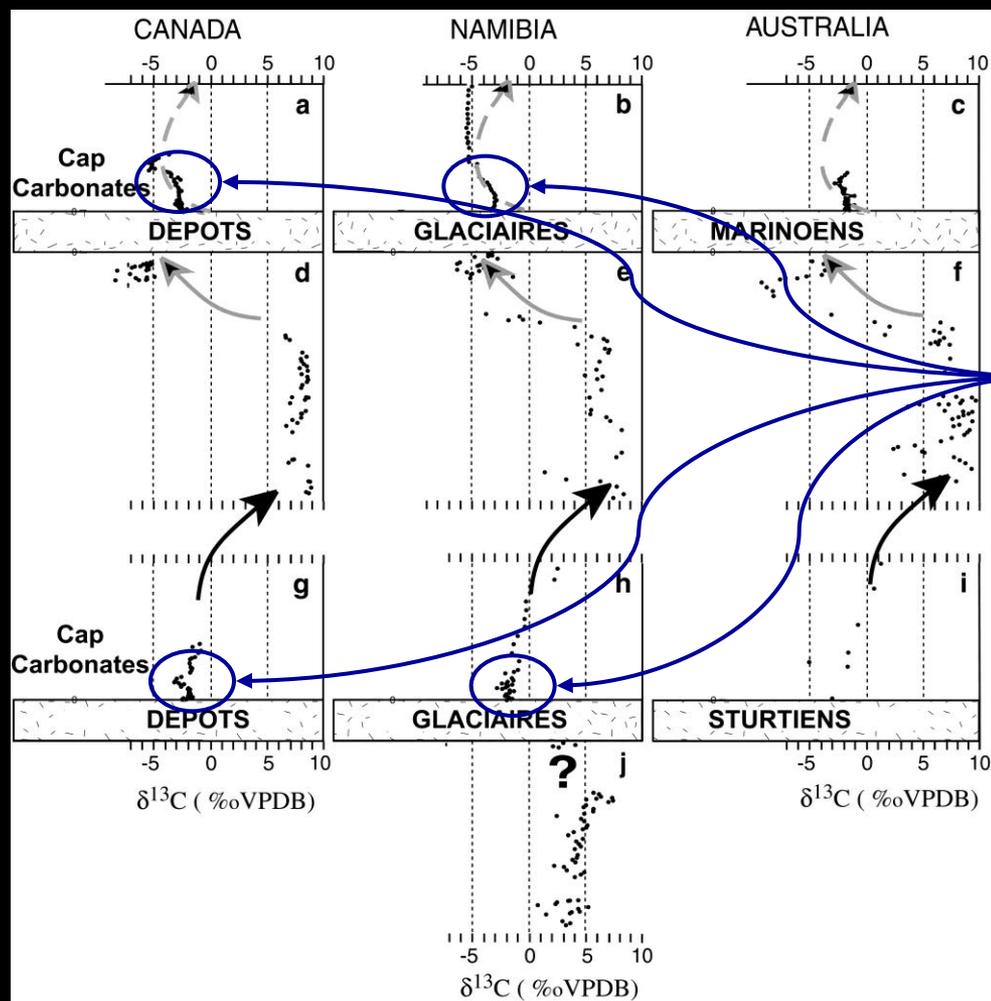


Il y a souvent des BIF, les seuls BIF post 1,8 Ga associés aux sédiments marins (avec dropstone)

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

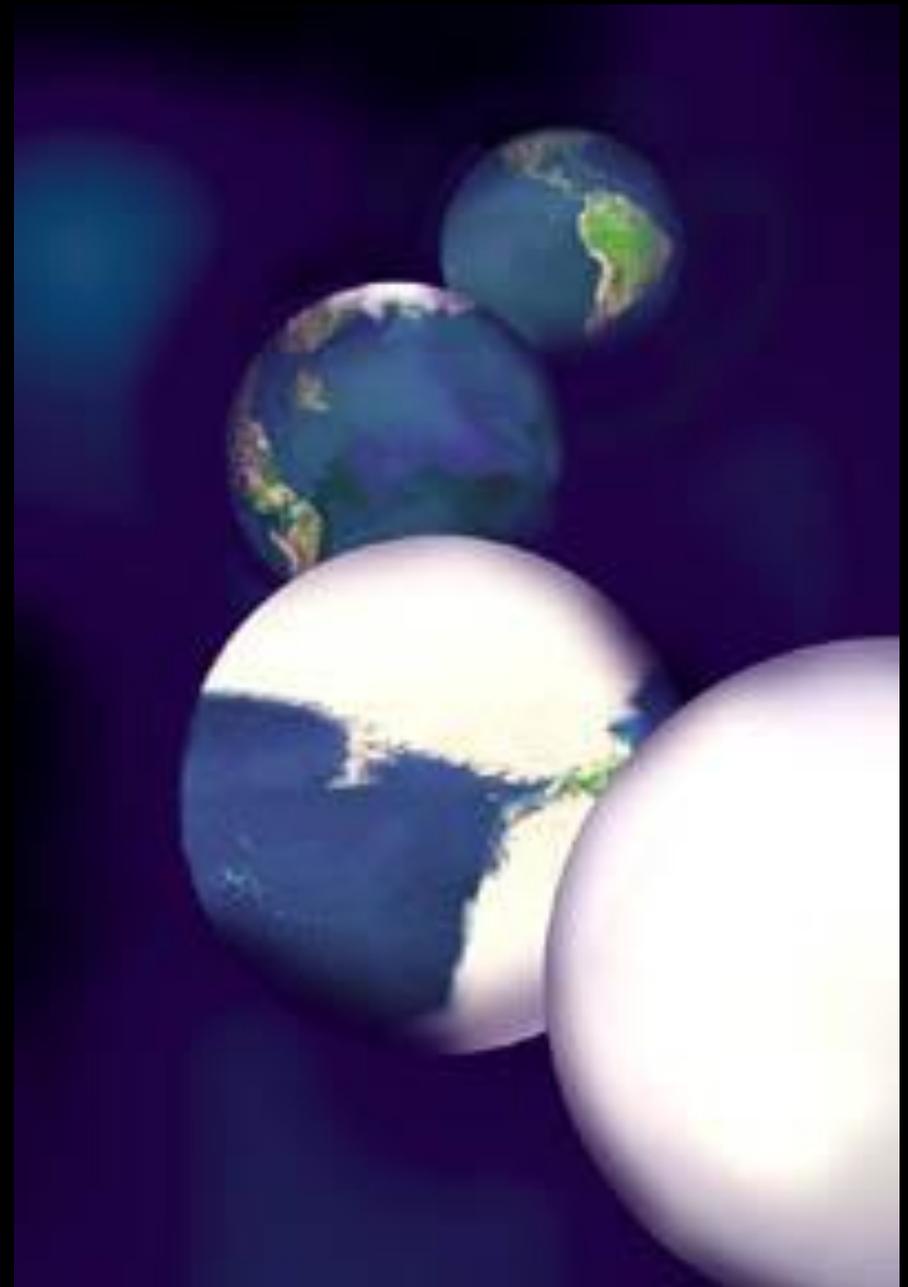


Ces carbonates post glaciaires ont un $\delta^{13}\text{C}$ faible, voisin de celui du CO_2 mantellique

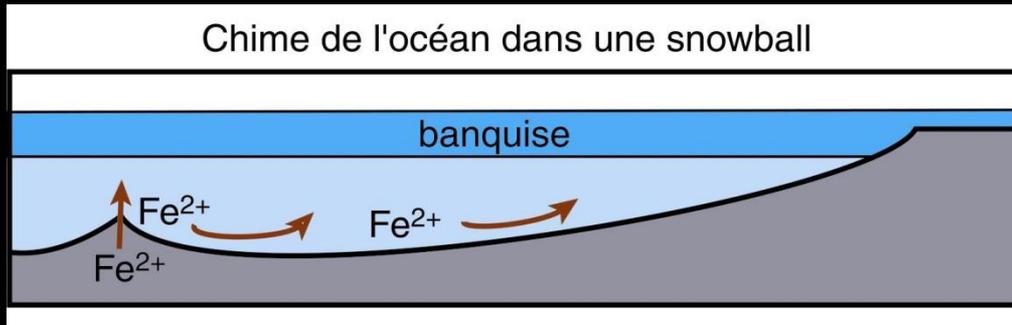


Pour les deux phases de refroidissement, les cap-carbonates post-glaciaires montrent un $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -5 et -2 ‰

**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)**



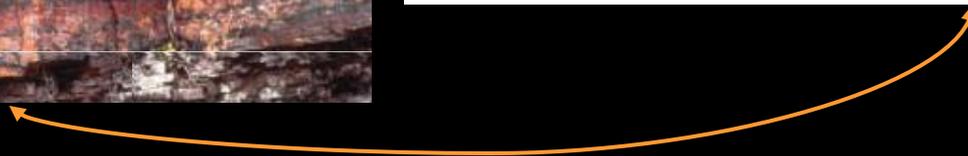
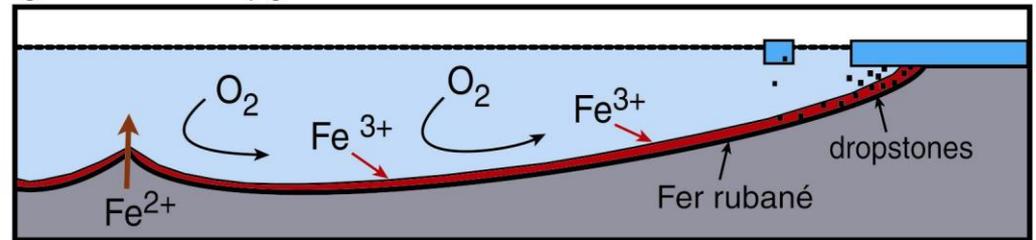
Cela explique les sédiments glaciaires, mais aussi les seuls BIF post 1,8 Ga que l'on trouve à la fin de ces épisodes



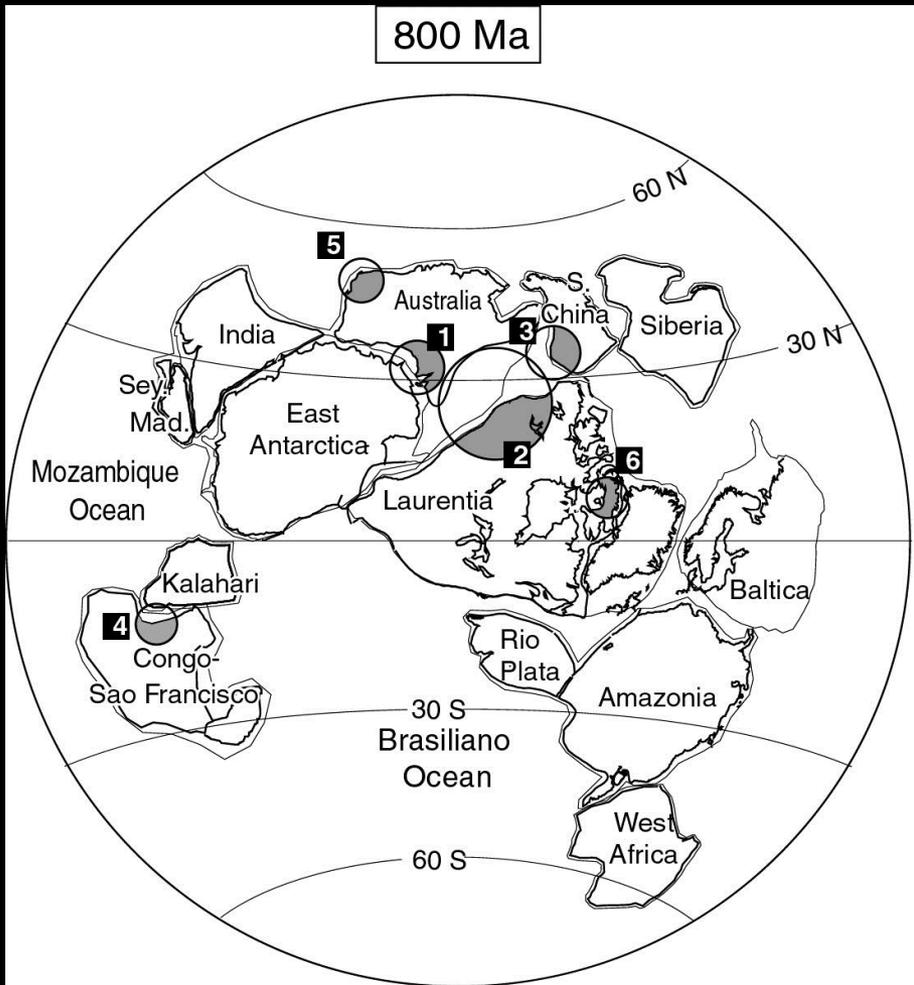
Glaciation globale se traduit par une stagnation et une anoxie des eaux océaniques



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

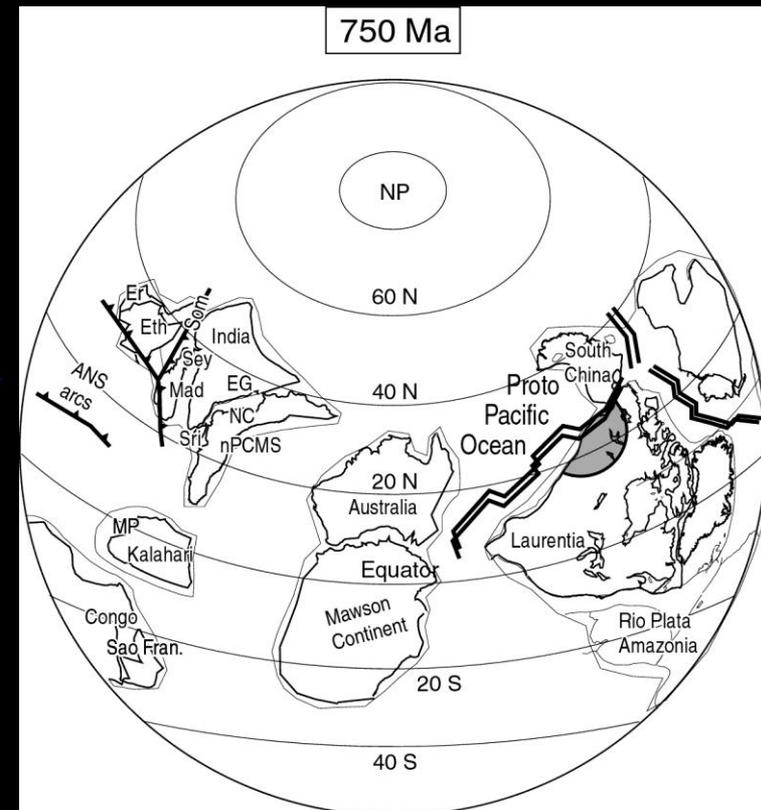
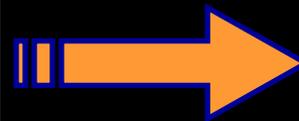
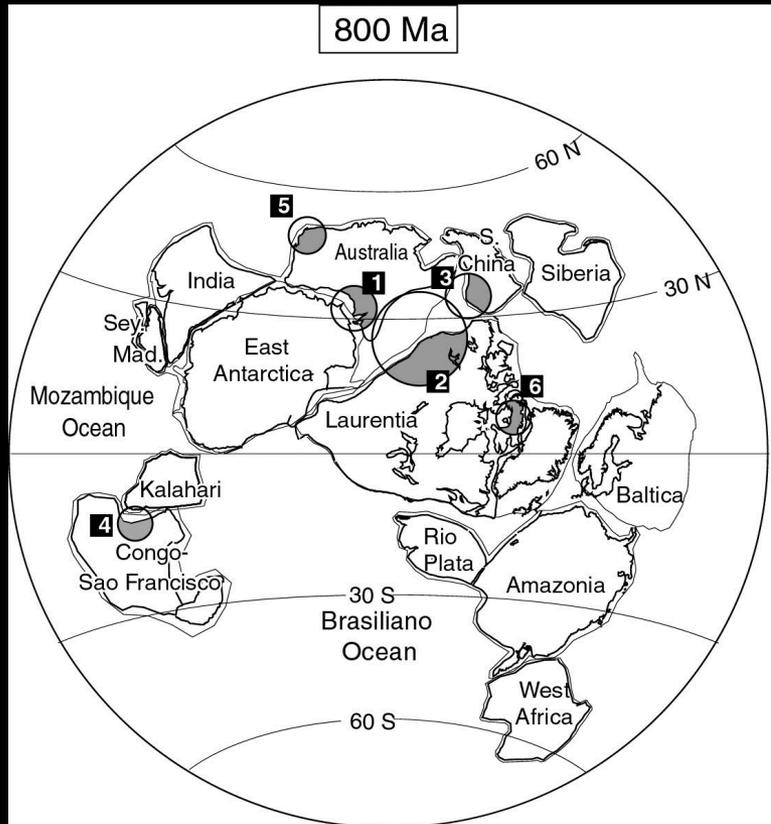
2 Réchauffement de la lithosphère sous-jacente

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

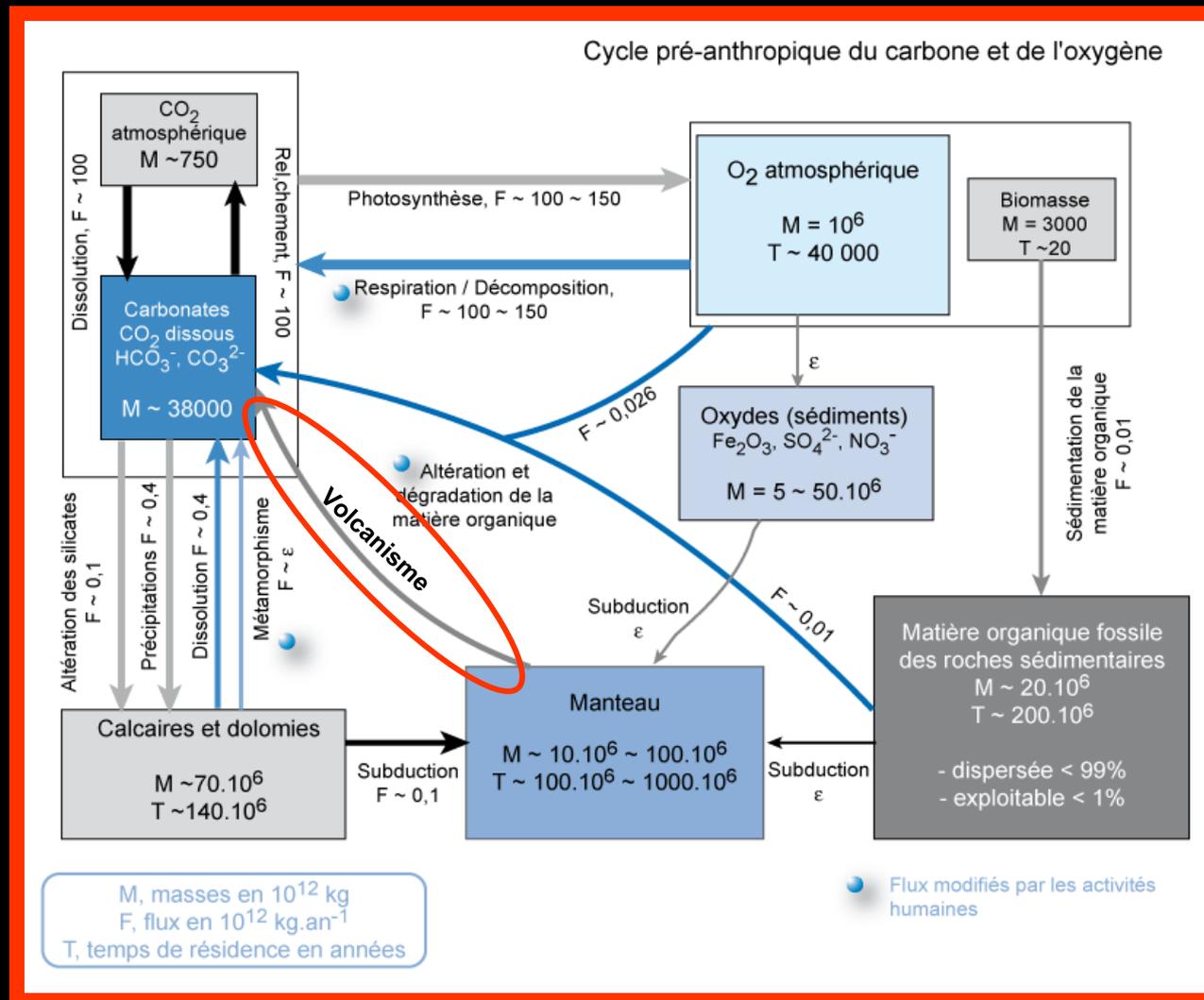
L'altération des basaltes consomme 8 fois plus de CO_2 que celle des granites



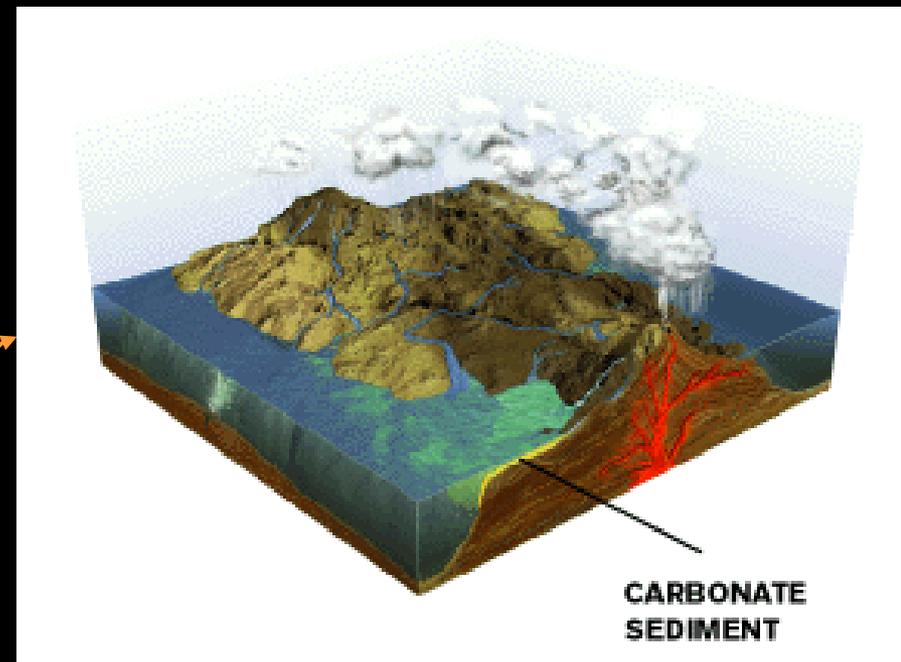
**4 Dislocation du supercontinent ... Intensification du runoff
Augmentation de l'altération → augmentation de la pompe à CO₂,
baisse du CO₂ atmosphérique, baisse de l'effet de serre, et le
phénomène s'emballé, car une fois que les glaciations ont dépassé une
certaine ampleur, l'effet albedo prend le dessus**



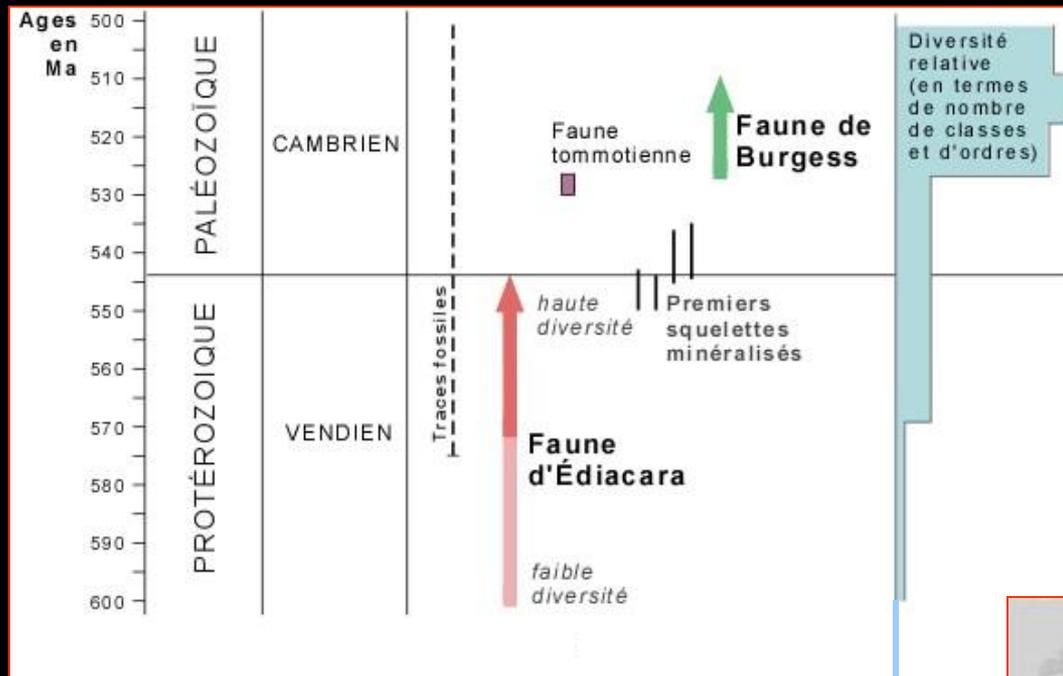
Comment en est-on sorti ? A cette époque, dans le cycle du C, tout était figé ; tout sauf le volcanisme.



Le CO₂ est monté ; l'effet de serre a augmenté, la T a augmenté, la déglaciation a commencé, des eaux riches en CO₂ 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

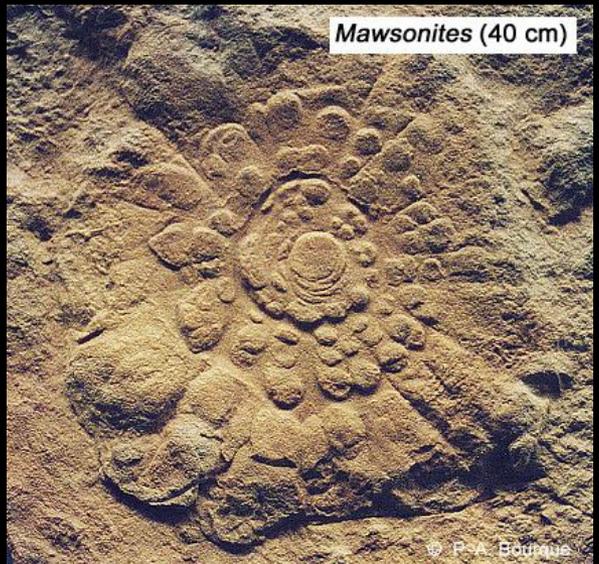


Dickinsonia



Spriggina

© P.-A. Bourque



Mawsonites (40 cm)

© P.-A. Bourque



Charnia

© P.-A. Bourque

Helminthopsis



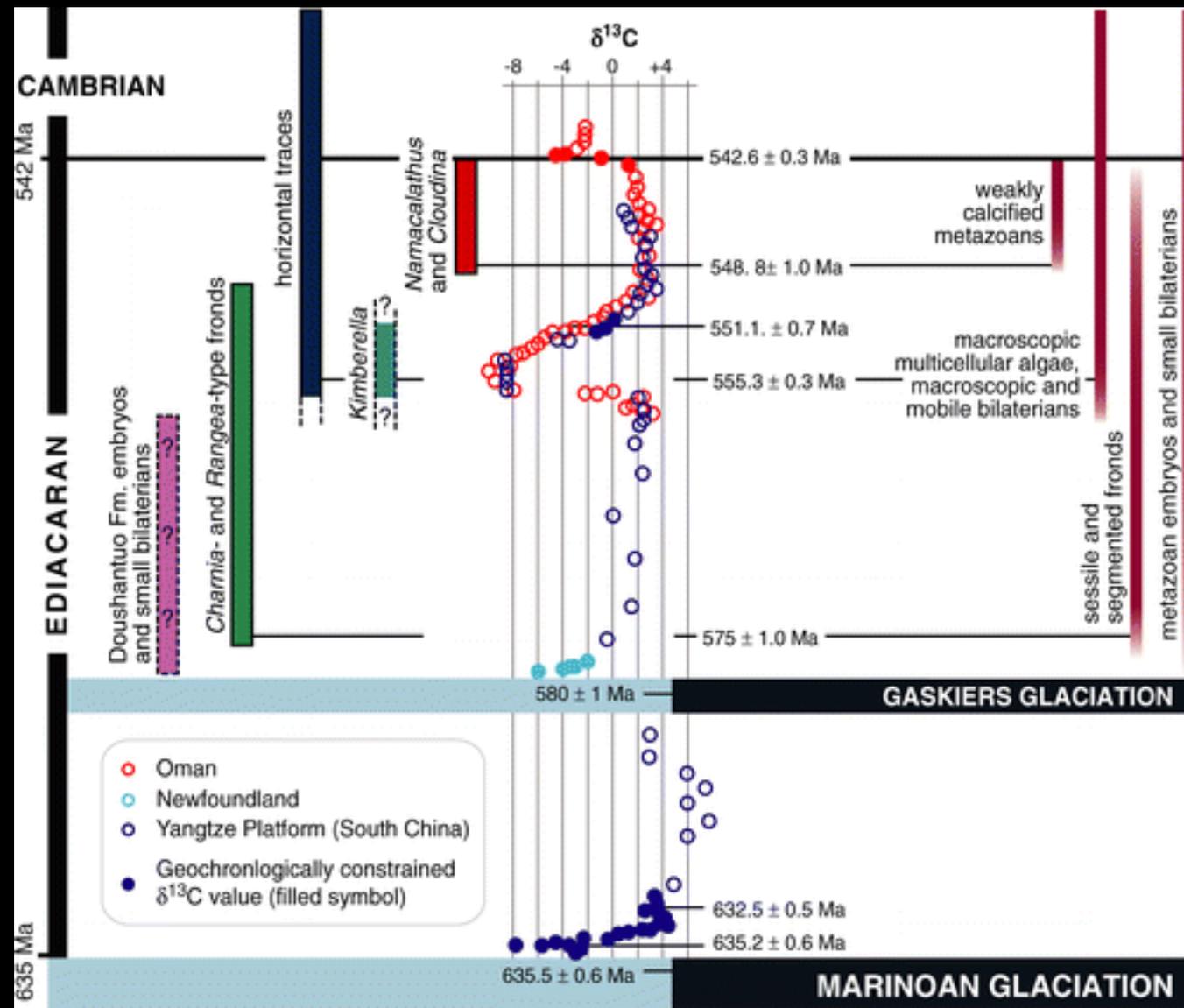
Ediacara

© P.-A. Bourque



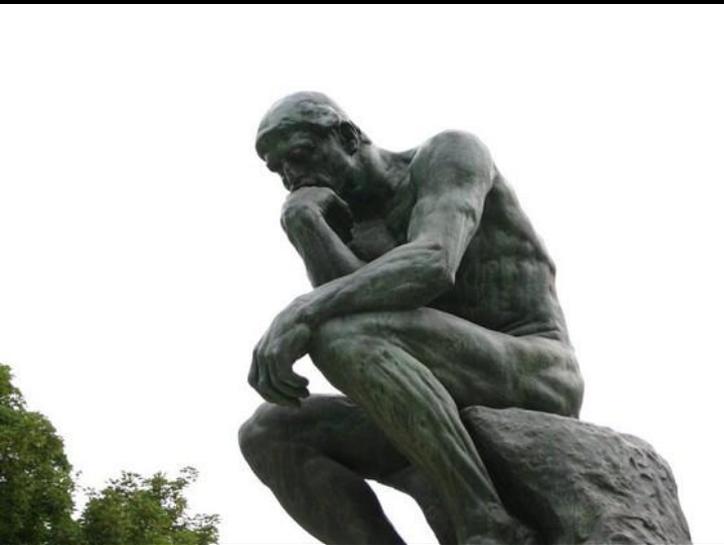
Tribrachidium

© 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 CO₂ atmosphérique ?

(ou

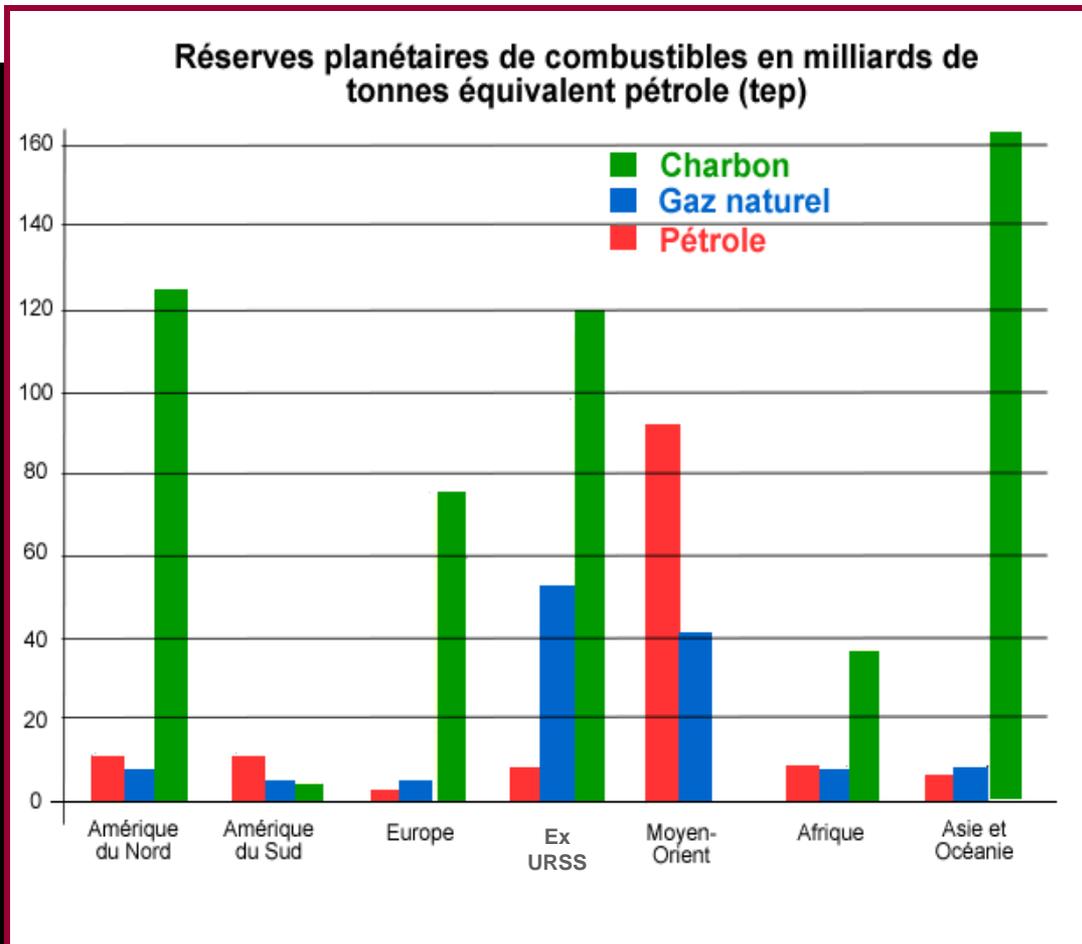
commentaire sur la relativité du temps)

A l'échelle de 100 ans, le CO₂ a augmenté de 35% et la température moyenne de 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 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 CO₂ qui durent depuis quelques millions d'années. Ces variations naturelles sont dues aux interactions entre orbite de la Terre, calottes glaciaires, CO₂ ... 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 CO₂ à relâcher. L'astronomie nous dit que la prochaine glaciation aura sans doute lieu dans 64 000 ans

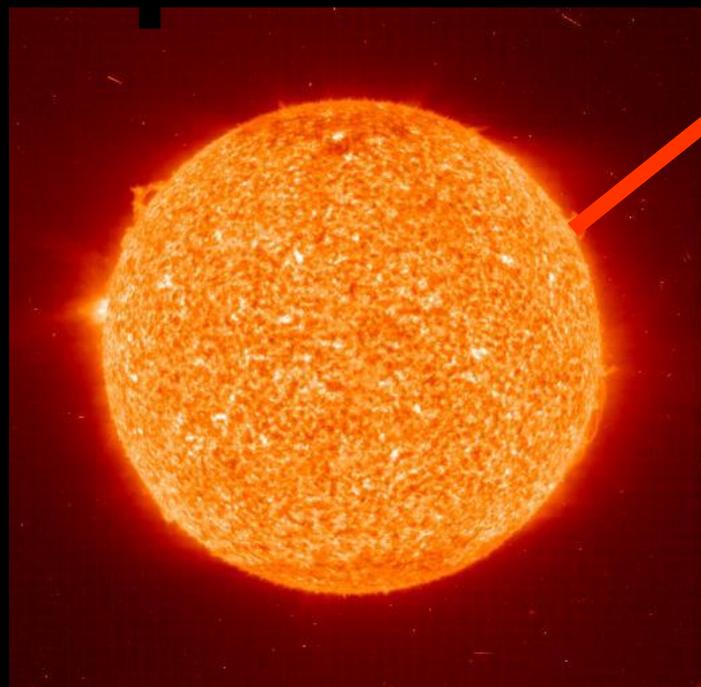
A l'échelle de plusieurs centaines de millions d'années.

Depuis 80 000 000 d'années, la tendance globale est à la baisse de CO₂ et de la température, malgré toutes les oscillations déjà vues. Pendant ces 80 000 000 d'années, le CO₂ 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 CO₂ (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 CO₂ 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 CO₂), c'est à dire 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 se forment en pays intertropical humide.





A l'échelle de 4,5 milliards d'années.

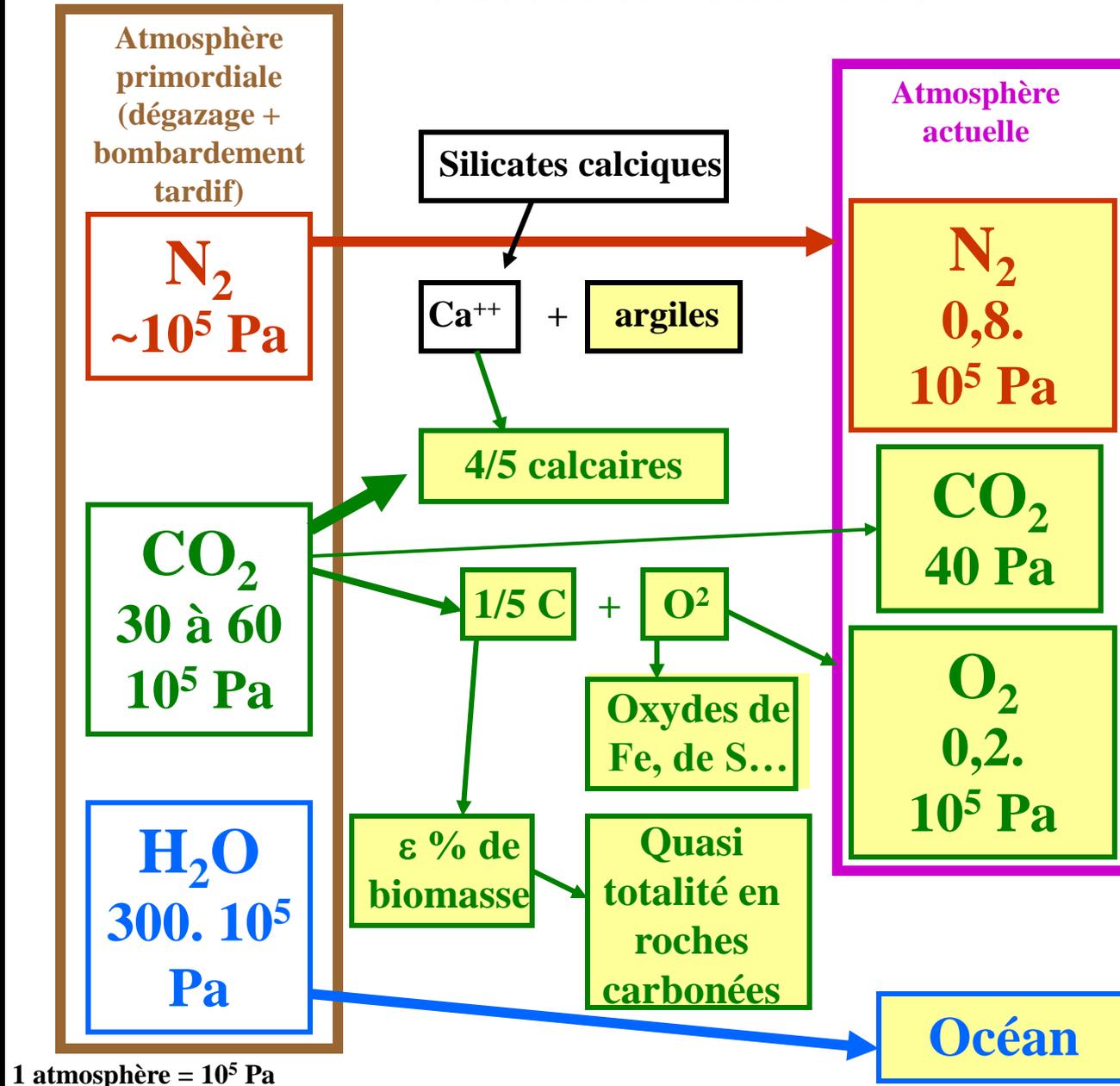
Ces hauts et ces bas s'inscrivent dans deux tendances générales :

- (1) Le CO₂ 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 CO₂ 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).

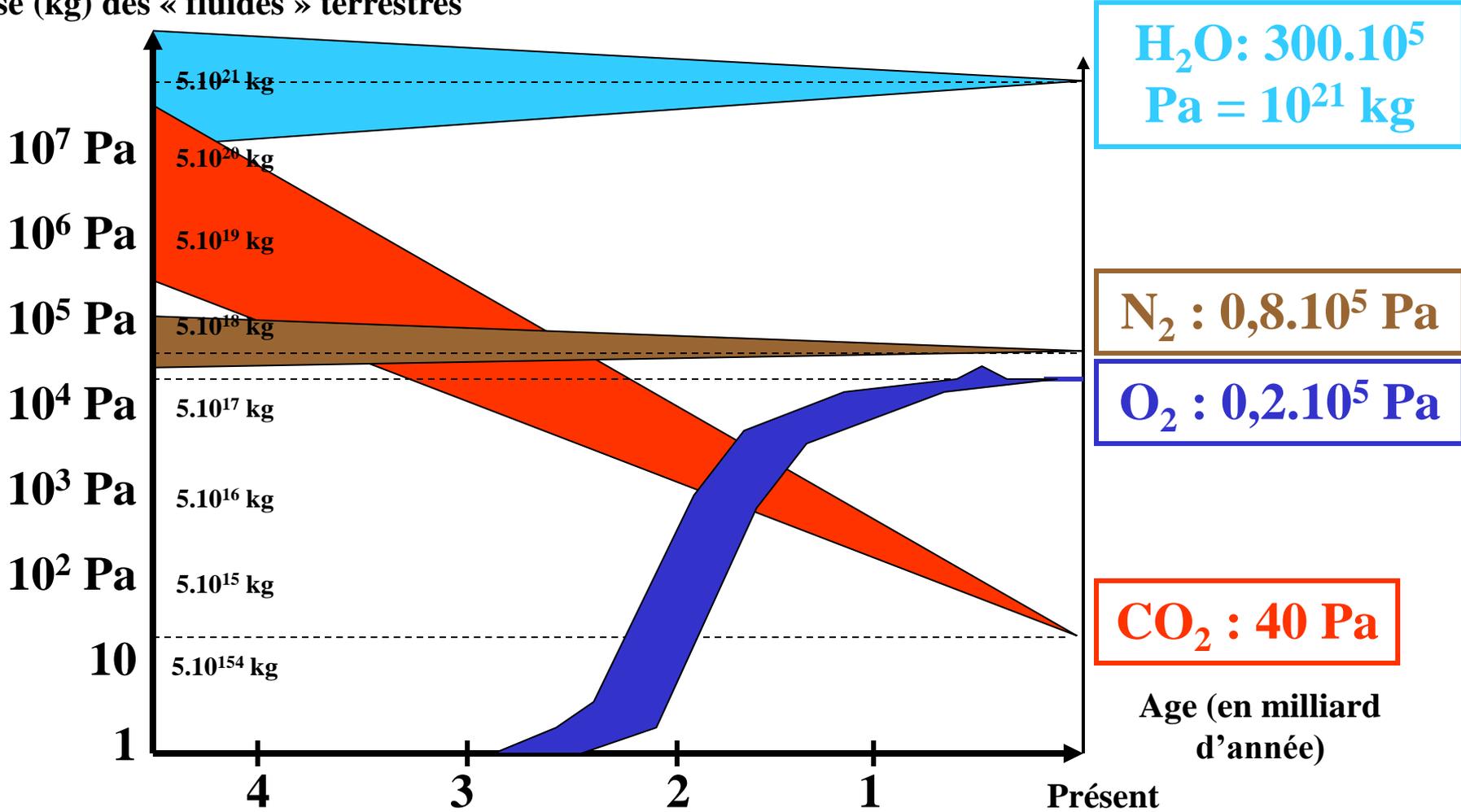
Les enveloppes fluides de la Terre : le début et l'état actuel

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





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 CO₂ baisse, baisse inexorablement (il en est à 0,03% !). Les deux phénomènes ne se compensent pas tout à fait, et la baisse du CO₂ 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 CO₂ va venir à manquer (c'est le facteur limitant de la photosynthèse)

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

(2) La baisse du CO₂ 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 C₄ et les bactéries hyperthermophiles montrent qu'il ne faut pas désespérer**

