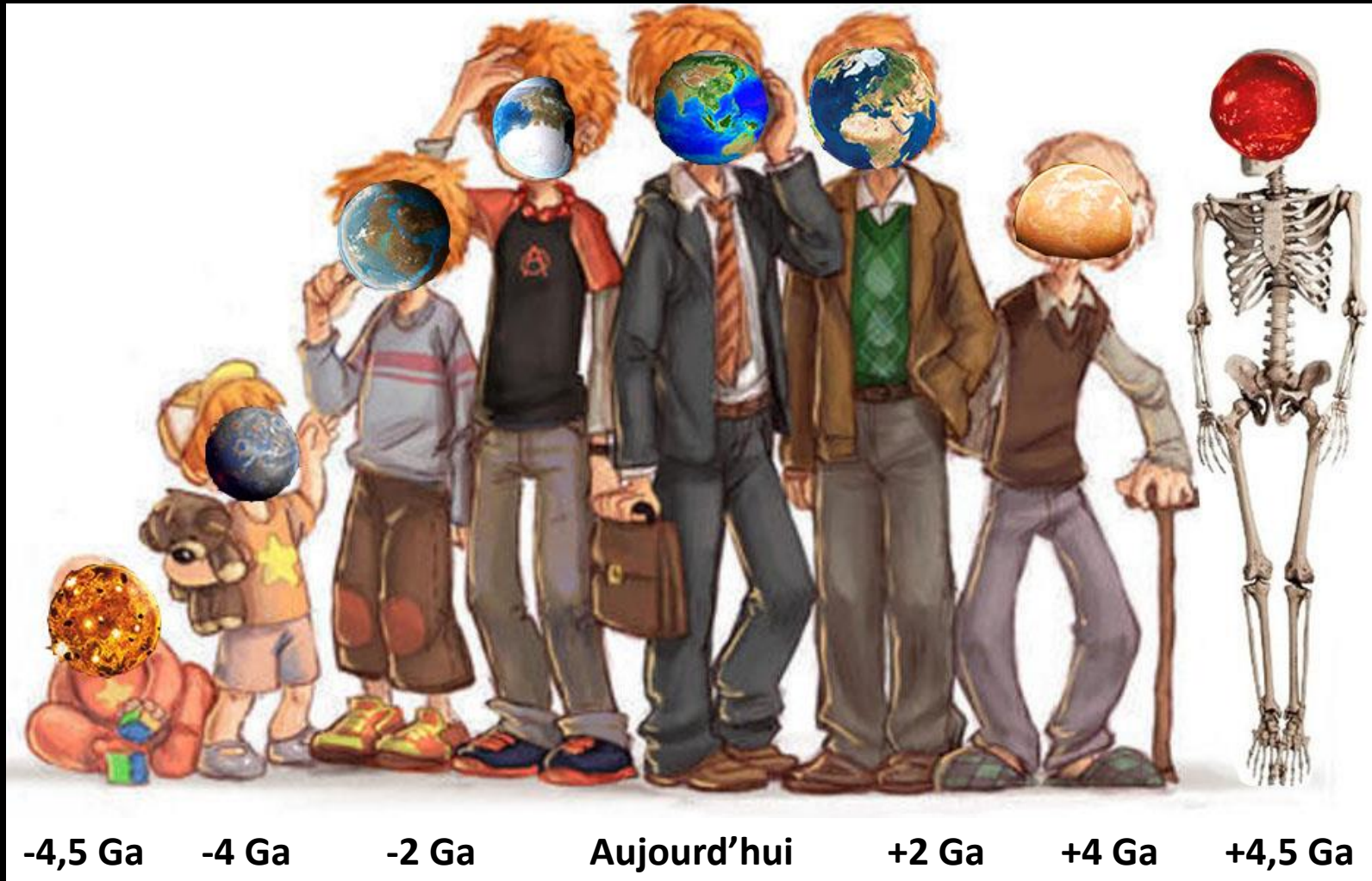
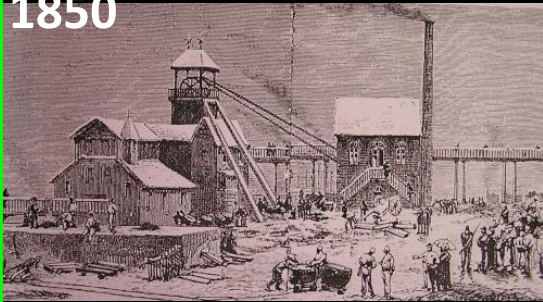


Neuf milliards d'années d'histoire de la Terre, histoire passée et à venir.



Une difficulté : la relativité du temps. Par exemple, 450 ans de combustion de carbone fossile et de perturbations intenses du climat (avant qu'on ait tout épuisé), 450 ans qui nous paraissent si long (c'est comme depuis les Guerres de Religions et la St-Barthélémy), qu'est-ce que ça représente ?

1850



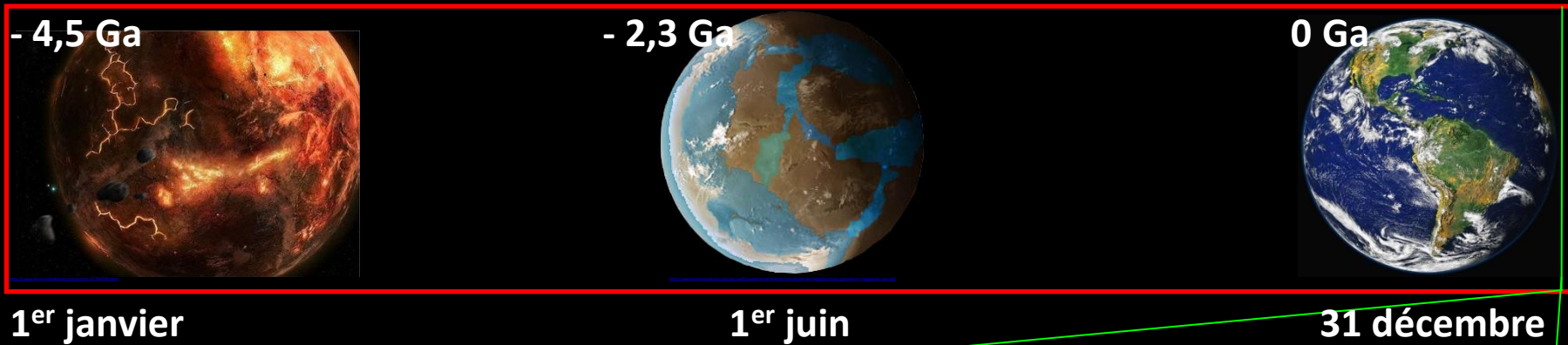
2018



2300



Une difficulté : la relativité du temps. Par exemple, 450 ans de combustion de carbone fossile et de perturbations intenses du climat (avant qu'on ait tout épuisé), 450 ans qui nous paraissent si long (c'est comme depuis les Guerres de Religions et la St-Barthélémy), qu'est-ce que ça représente ? 10^{-7} (1 / 10 000 000) de l'histoire passée de la Terre !



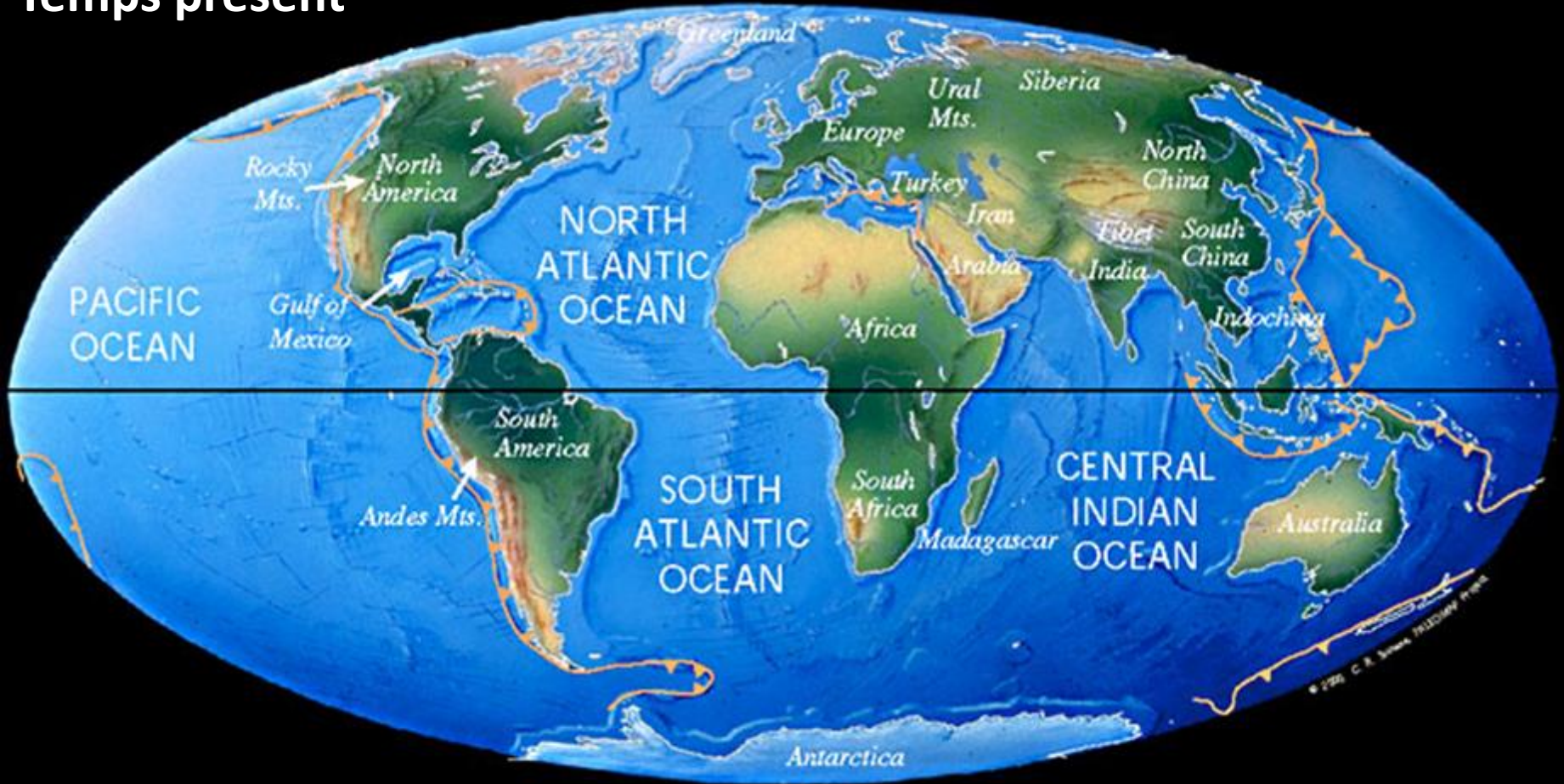
Autre façon d'appréhender ce que signifie 9 milliards d'années (4,5 Ga passées + 4,5 Ga futures). Je dispose d'1h 15 = 75 mn = 4500 secondes pour vous parler de ces 9 milliards d'années, soit $\frac{1}{2}$ seconde par million d'années. Le genre Homo existe depuis environ 2 Ma. Je ne disposerais que d'1 seconde pour vous parler de l'histoire de l'humanité si ... Nous sommes bien peu de chose !



=



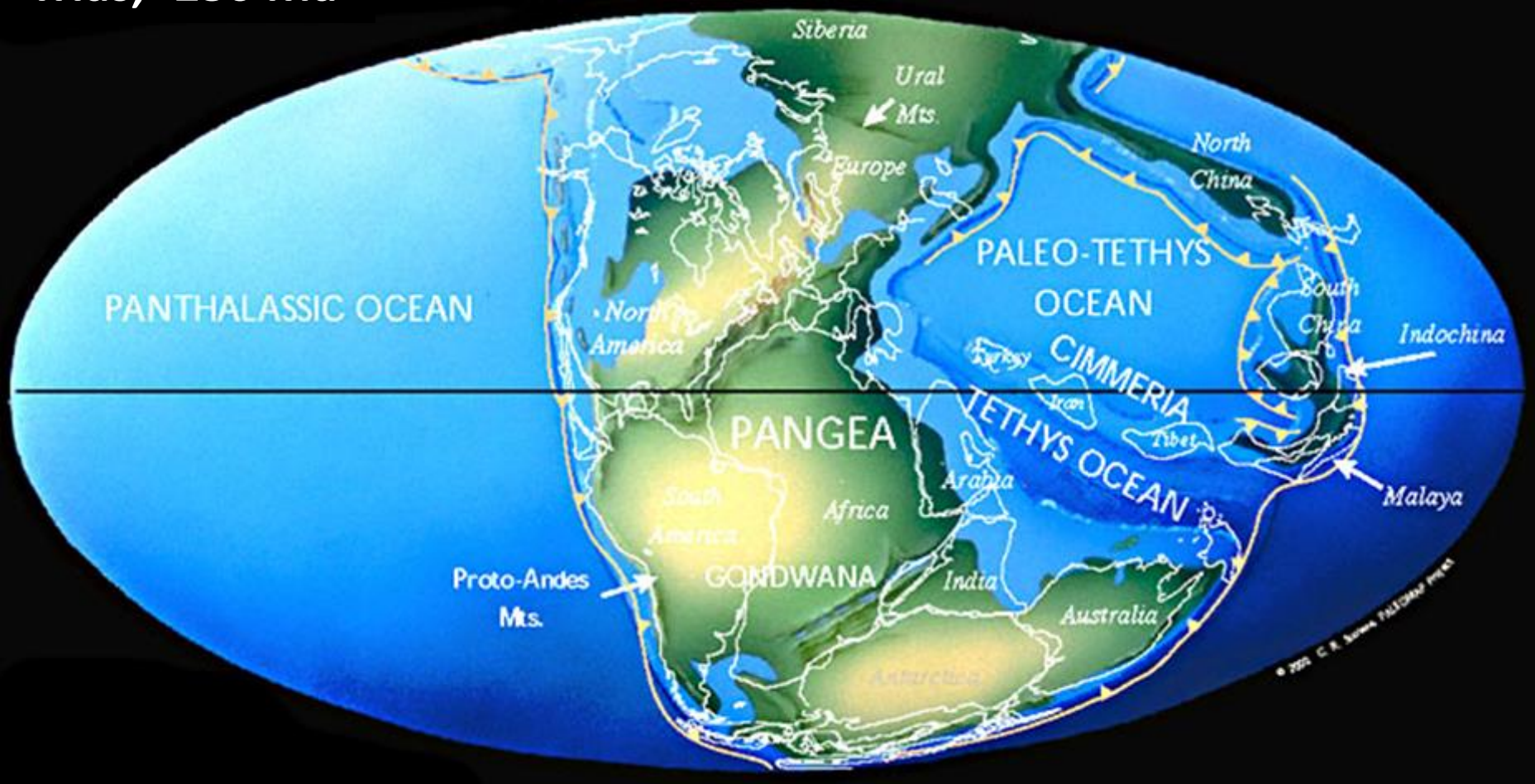
Temps présent



La planète Terre évolue. Les continents dérivent, les climats et la végétations changent ...

Par exemple voici 4 « étapes » de cette évolution depuis 700 millions d'années (Ma).

Trias, -230 Ma



Si on compare à la Terre actuelle avec cette Terre à -240 Ma, deux changements manifestes : la position des continents et l'absence de glace aux pôles.

Dévonien inférieur, -230 Ma



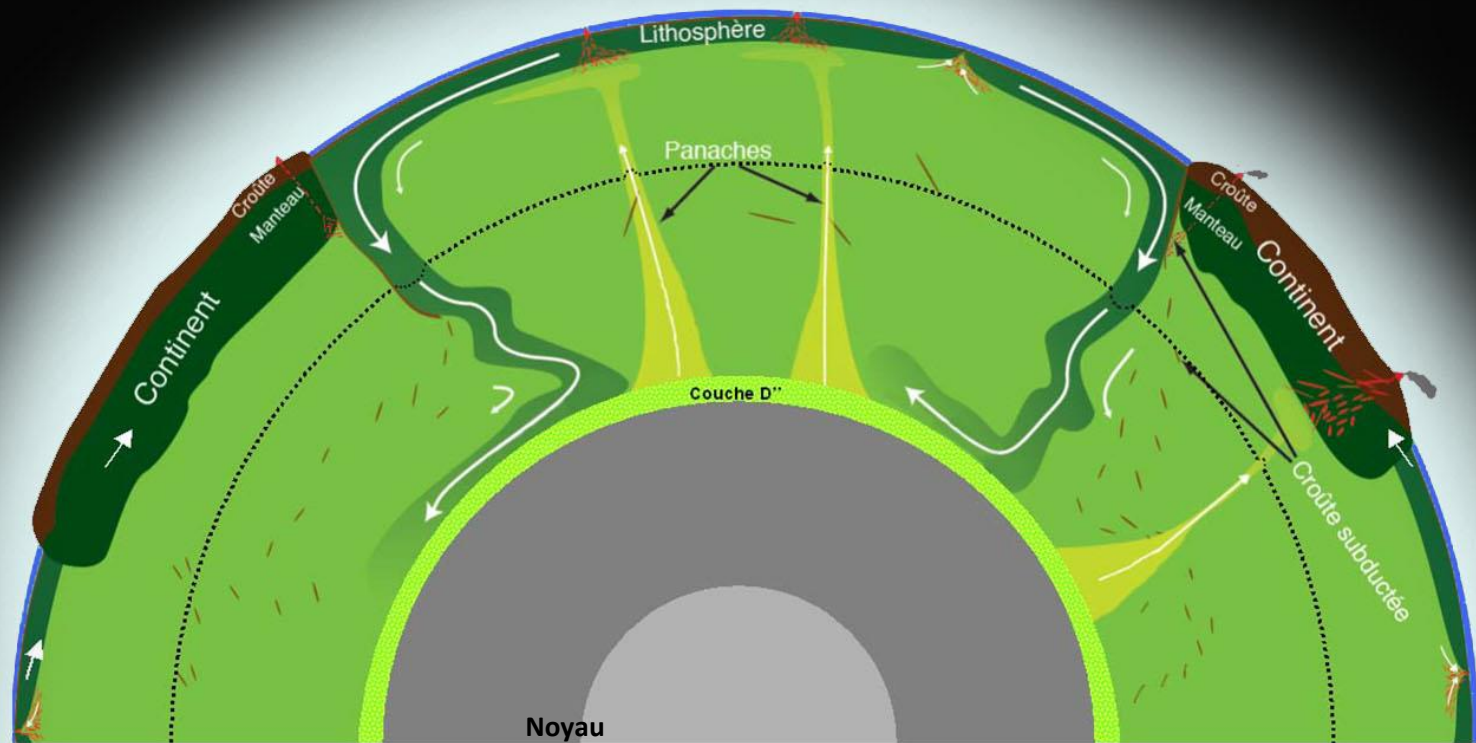
Si on compare la Terre de -390 Ma avec celle du schéma précédent (-240 Ma), encore deux changements : la position des continents et l'absence de végétation sur les continents sauf très localement.

Cryogénien, -700 Ma

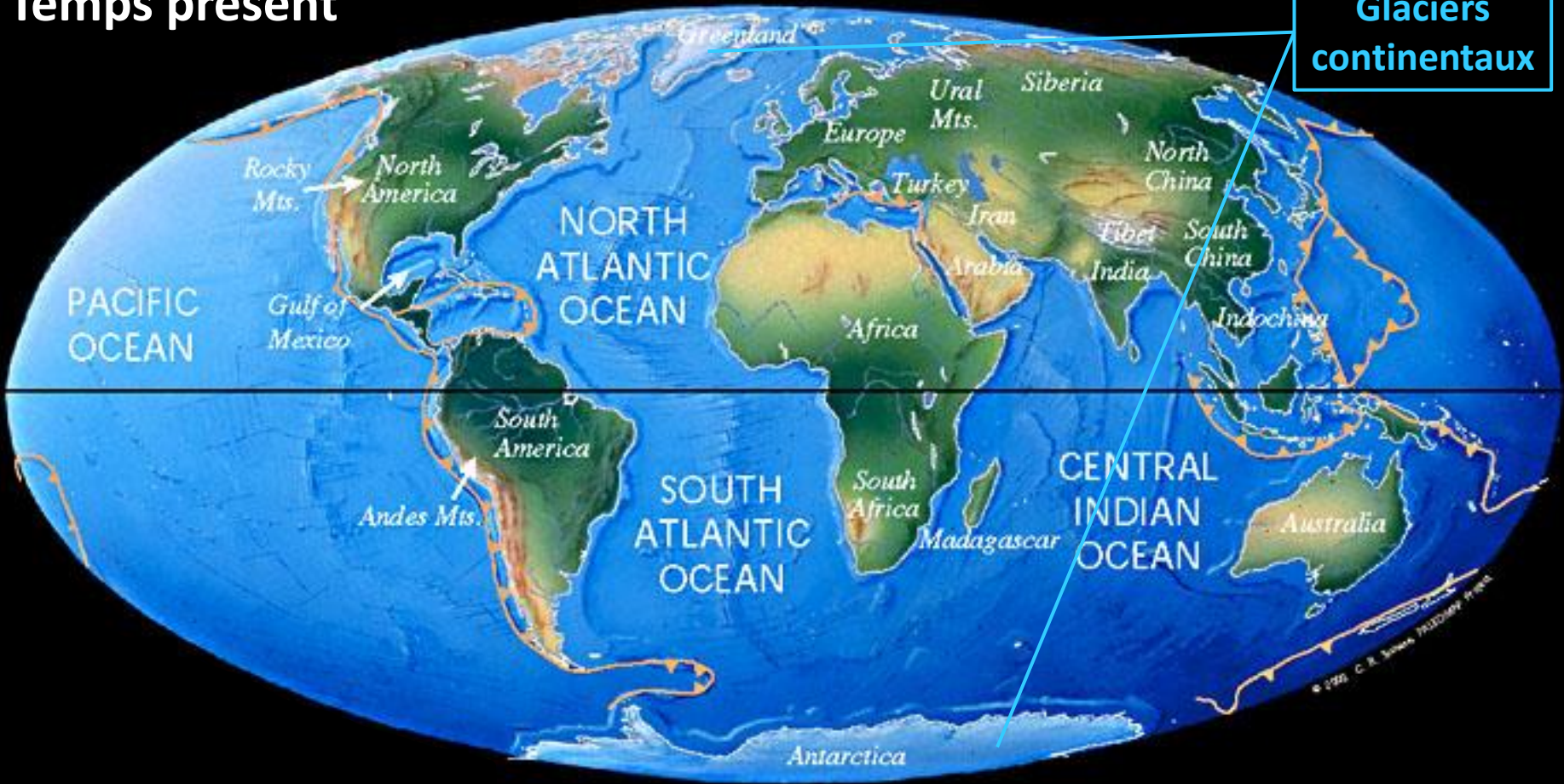


Entre -700 et -390, encore deux changements manifestes : la position des continents et une totale couverture de glace sur les océans et les continents.

Nous allons détailler quelques un de ces changements, et leur(s) cause(s) probable(s) : la dynamique interne, les changements atmosphériques et océaniques, les changements de la biosphère, les changements du soleil, les variations de l'orbite de la Terre ...



Temps présent

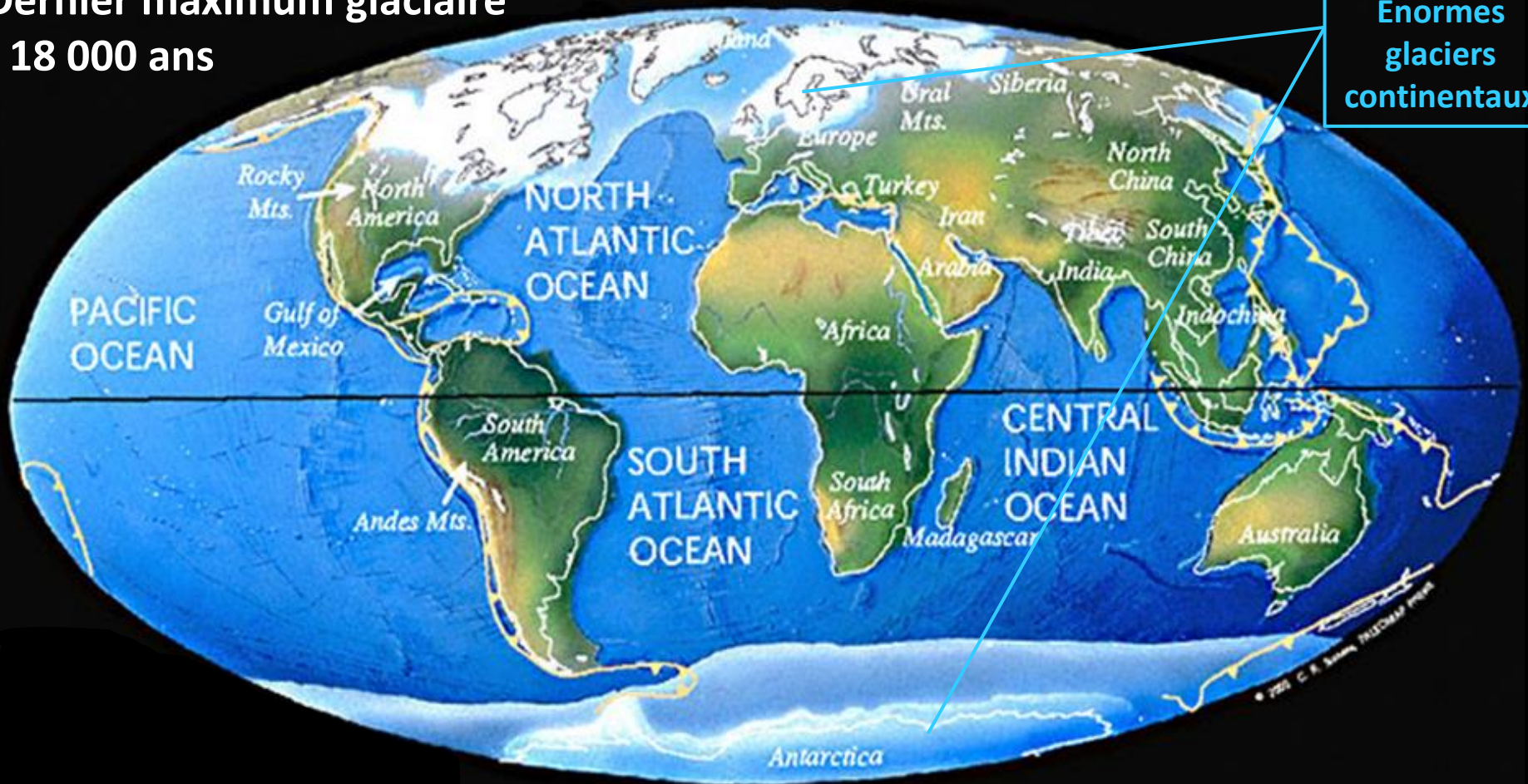


Glaciers continentaux

Premier changement, entre aujourd'hui et ...

Dernier maximum glaciaire

- 18 000 ans

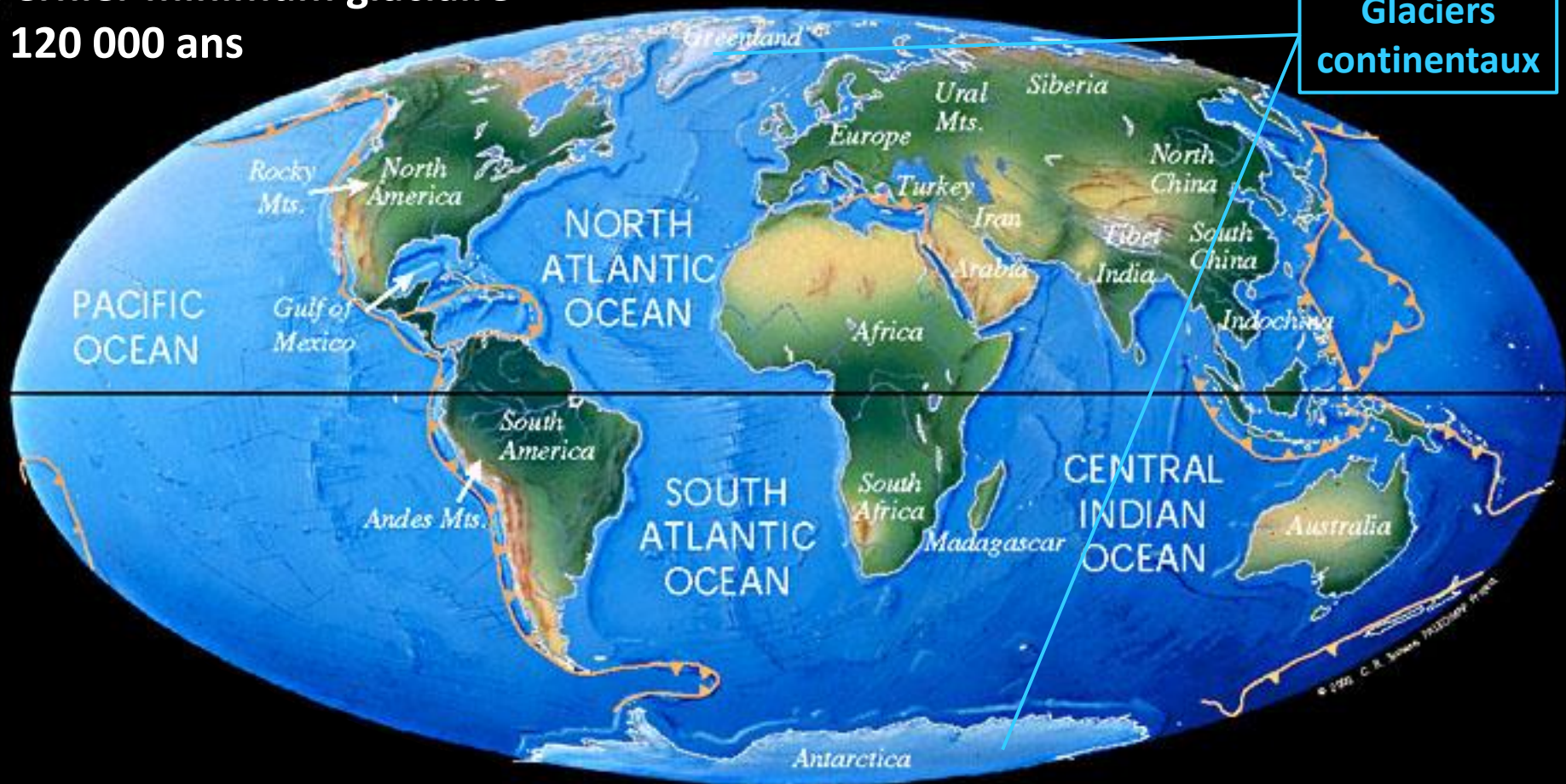


Enormes glaciers continentaux

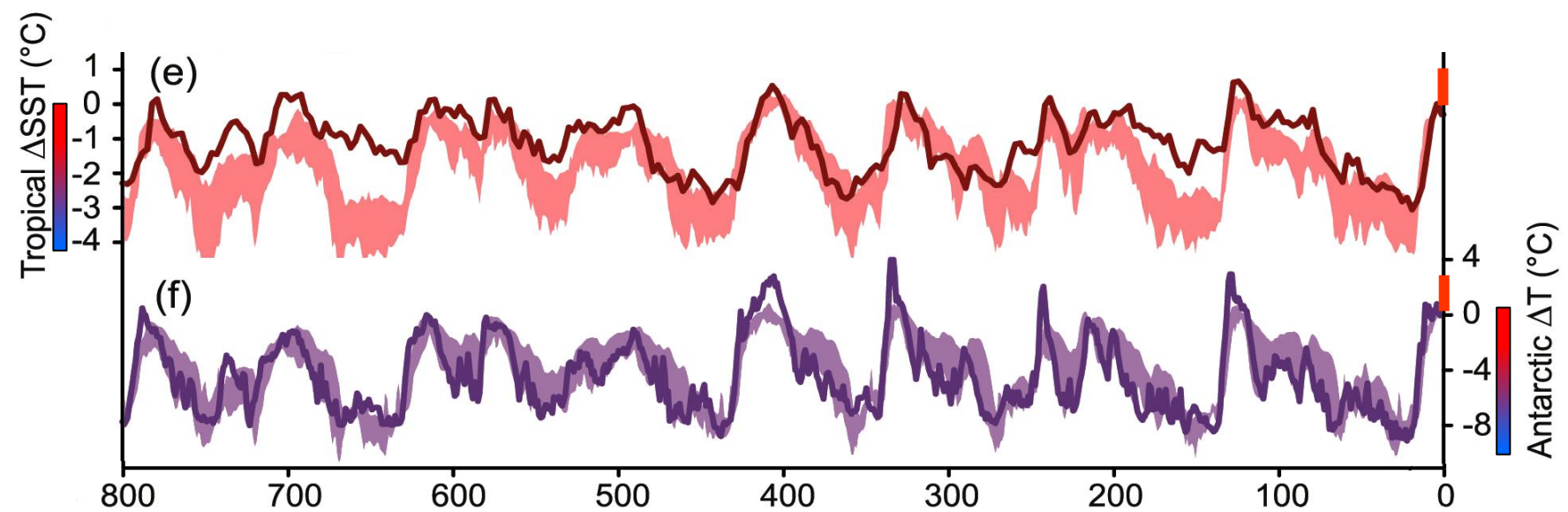
Premier changement, entre aujourd'hui et ... il y a 18 000 ans. Le climat s'est drastiquement réchauffé, alors qu'en si peu de temps les déplacements des continents (moins de 1000 m) n'y sont pour rien.

Dernier minimum glaciaire

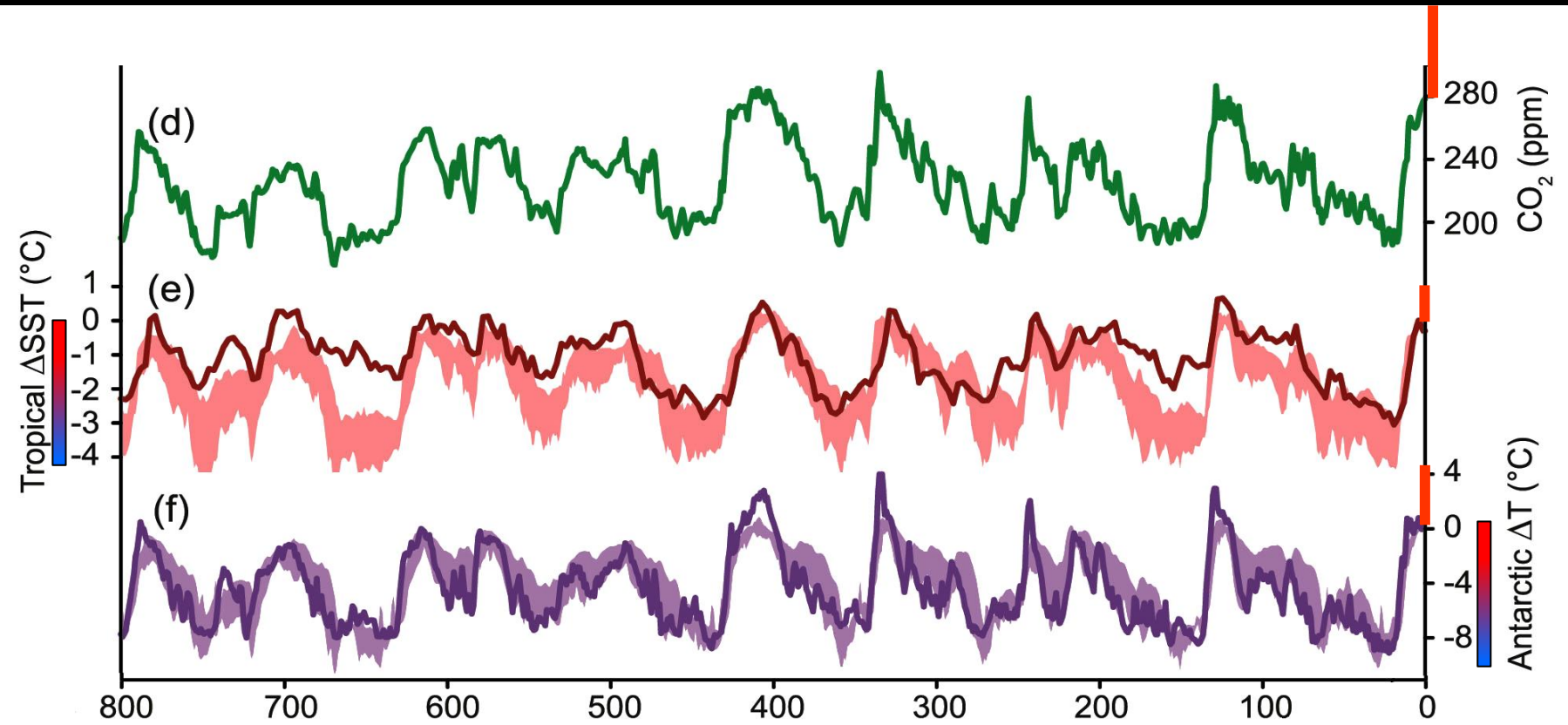
- 120 000 ans



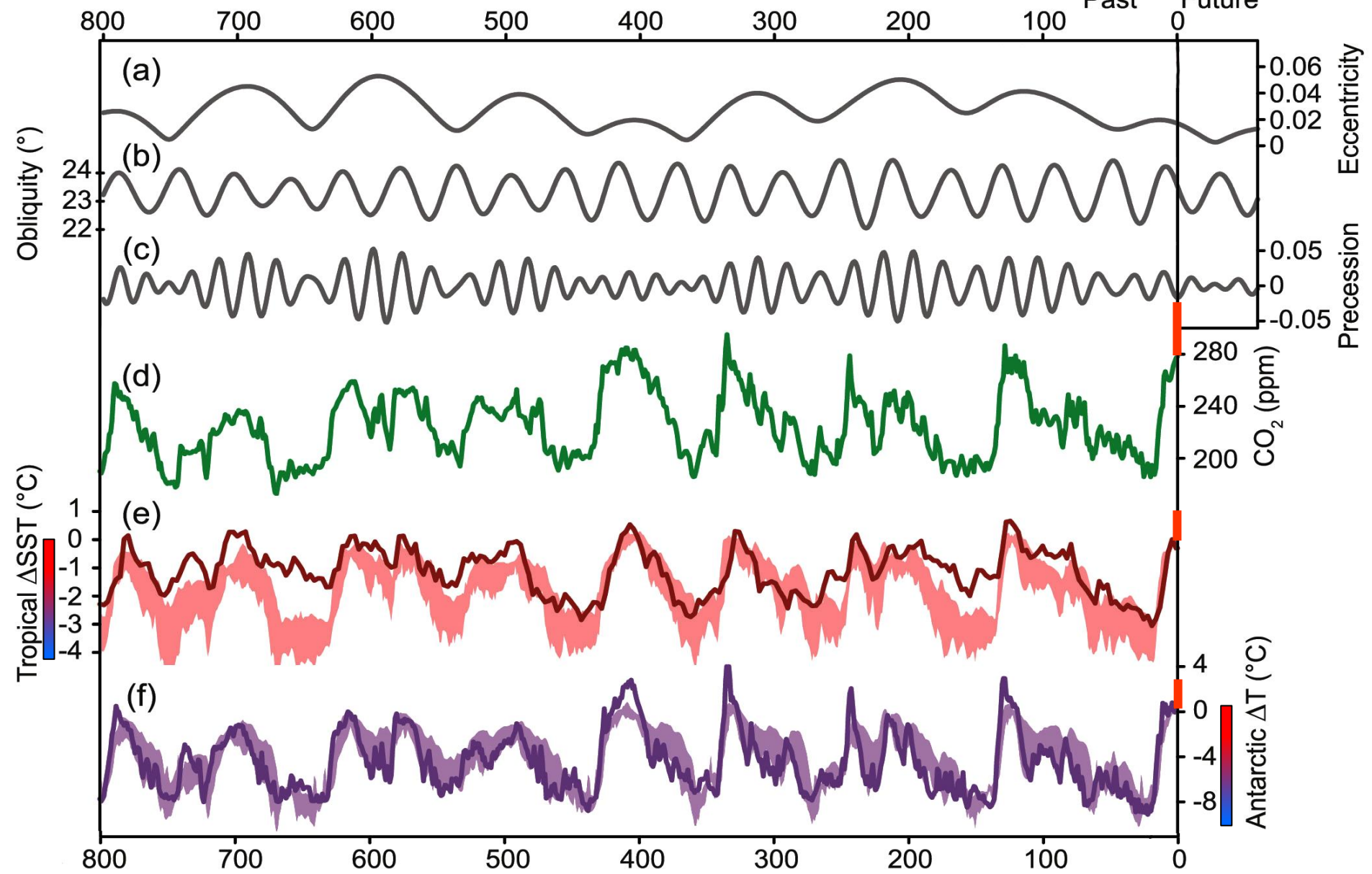
Et retour au climat « moderne » il y a 120 000 ans, et ainsi de suite pendant 1 000 000 d'années.



Voici les 800 000 dernières années de variations climatiques (zones intertropicale et antarctique) ...



... corrélées aux variations du CO₂ atmosphérique ...



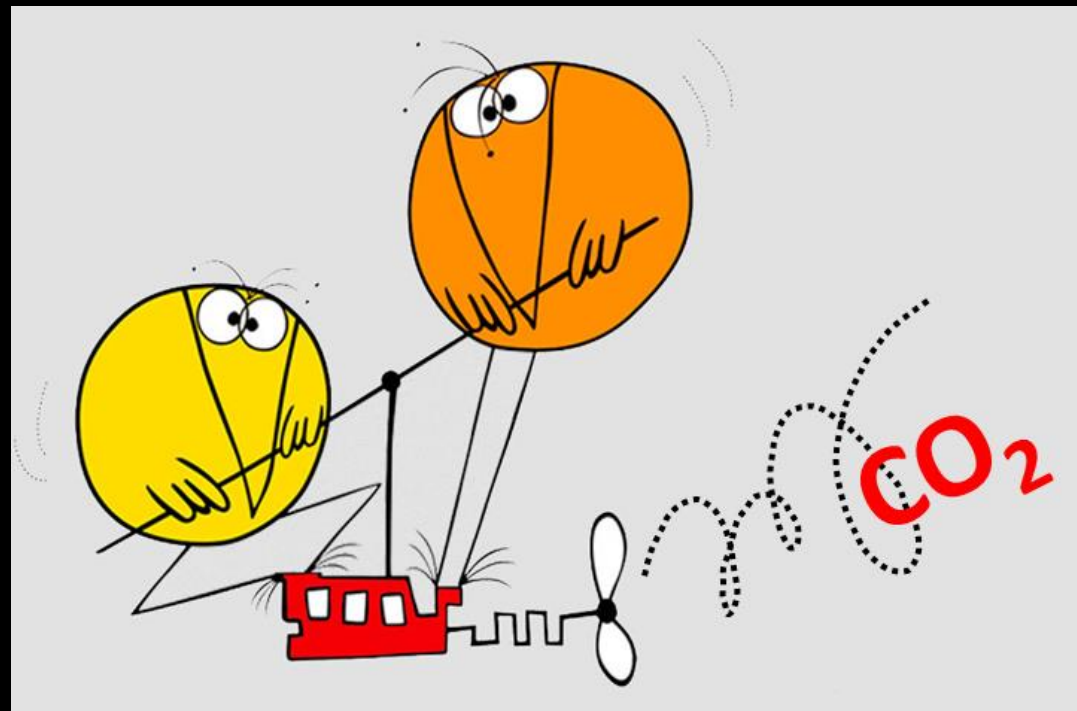
... et aux variations des paramètres orbitaux de la Terre.
Un bel exemple de rétroactions positives.

En effet, l'effet des variations d'ensoleillement (due aux paramètres astronomiques) sur la température est théoriquement très faible, bien inférieur à ce qui est constaté.

L'effet des variation du CO_2 atmosphérique sur la température (effet de serre) se comprend très bien.

Mais pourquoi les variations de CO_2 et de température

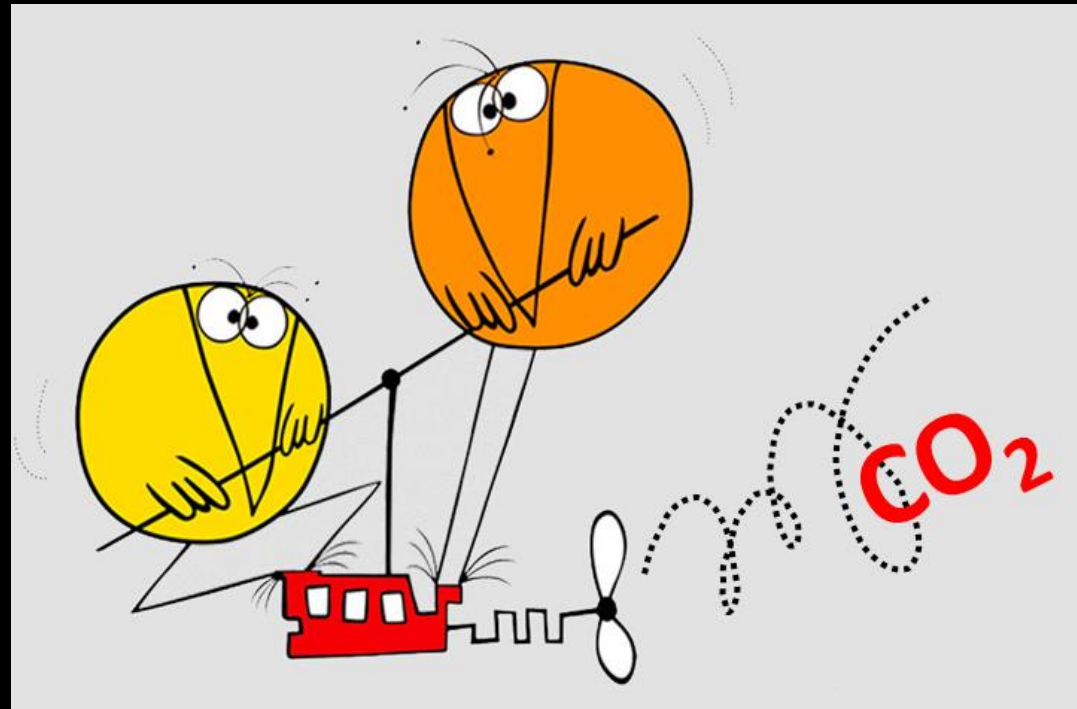
sont-elles liées aux si petites variations des paramètres orbitaux de la Terre ?



Si l'astronomie augmente un peu la température,
(1) il y aura un peu moins de glace et de neige, et
(2) la température de l'océan augmentera un peu.

- Un peu moins de neige et de glace → La Terre renvoie moins d'énergie vers l'espace et la température monte.
- Un océan un peu plus chaud contient moins de CO_2 dissout, qui part dans l'atmosphère, ce qui fait monter la température.

Et inversement si l'astronomie fait baisser un peu la température.



-15 Ma

Groenland couvert de Toundra

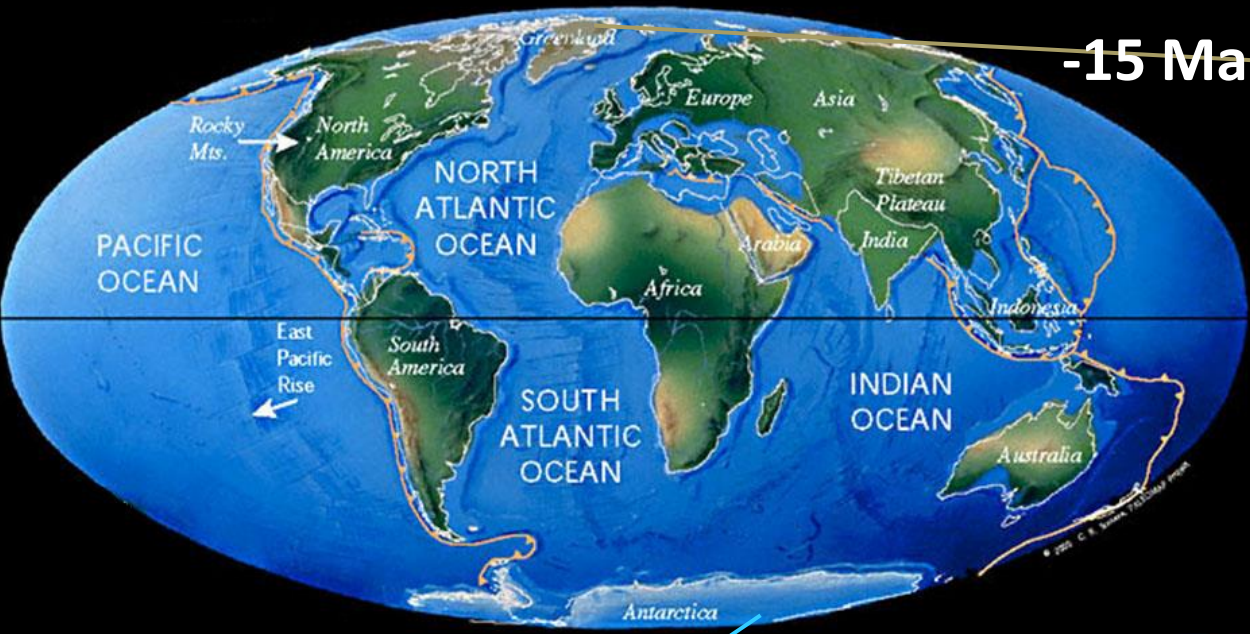
Groenland couvert de forêts

-50 Ma

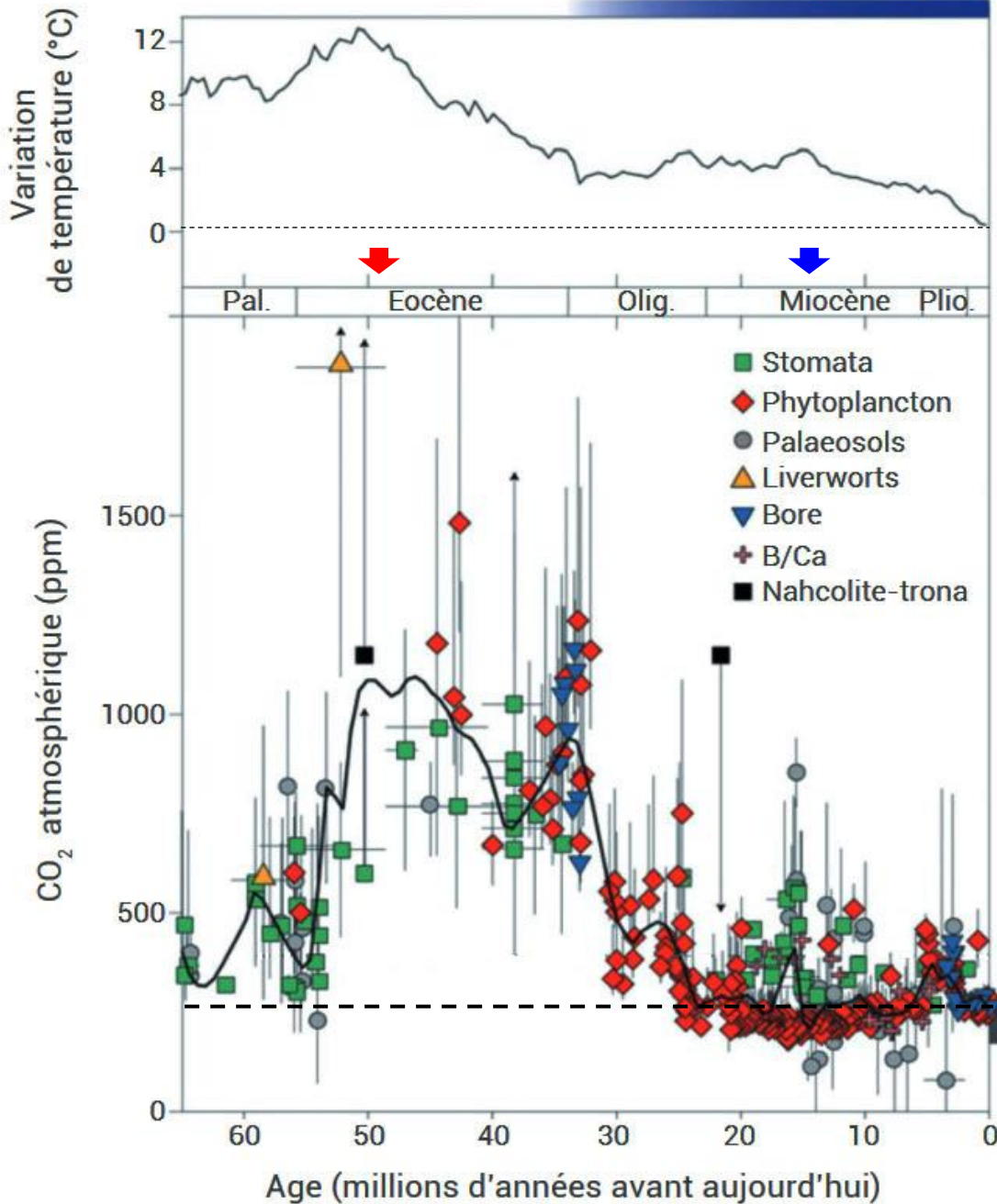
Calotte polaire antarctique

Antarctique couverte de forêts

Deuxième changement :
le refroidissement depuis 50 Ma.



Calotte de glace antarctique

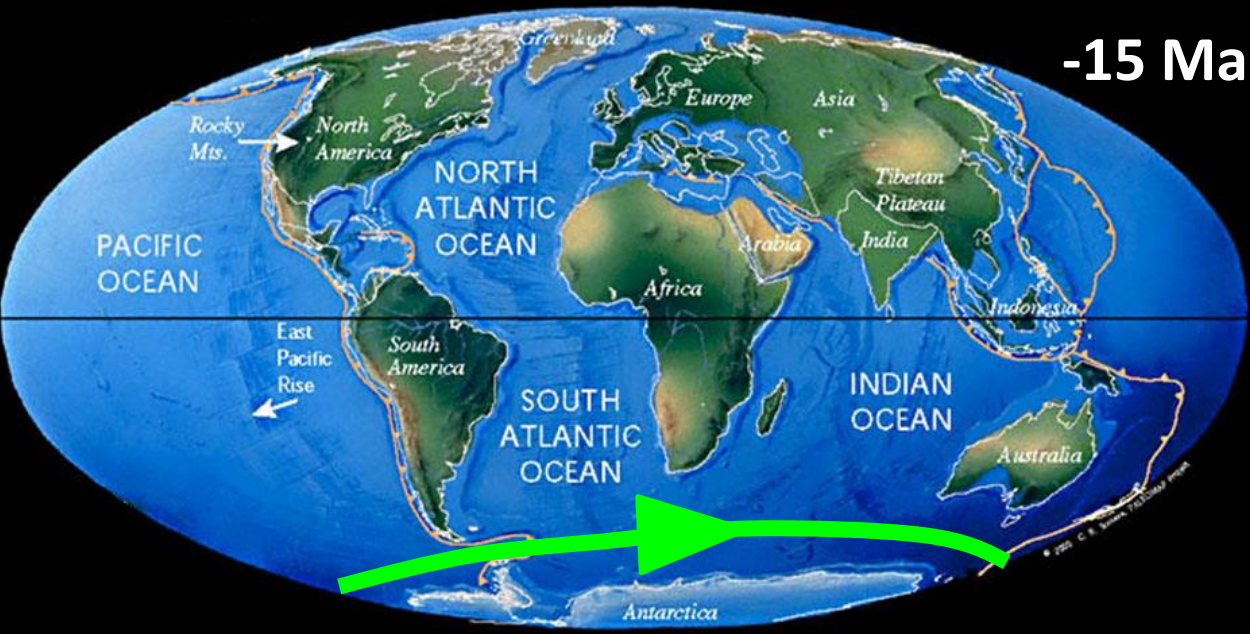


La température se déduit de données géologiques, paléontologiques ...

Le CO₂ se déduit de données géologiques, paléobiologiques ... indirectement liées à la teneur en CO₂ atmosphérique.

On voit une très nette baisse de température (-8 à 12°C) qui semble corrélée à une baisse du CO₂ (/4)

-15 Ma



-50 Ma



Première cause : les séparations Antarctique / Australie et Antarctique / Patagonie permettent l'établissement d'un courant circum-antarctique

ce qui modifie complètement la température de tout l'océan et par la même le climat mondial.

-15 Ma



-50 Ma



**Deuxième cause :
la collision
Afrique + Arabie + Inde
dans l'Eurasie fabrique
une énorme chaîne de
montagne. Or, altérer
et éroder une chaîne de
montagne absorbe
beaucoup de CO₂, ce qui fait baisser l'effet de serre.**



Une chaîne de montagne « jeune » est la proie de l'altération (réactions chimiques) et de l'érosion.

L'altération, une réaction chimique, ou plutôt une suite de réactions, qui se passent dans et sous le sol, là où les roches sont altérées par les eaux de pluies et du sol (eaux chargées de CO_2), puis dans les eaux des fleuves et la mer, là où arrivent ces eaux et les produits de dégradations des roches.



Roches (basalte,
granite ...)
contenant des
silicates de calcium

CO_2

H_2O

Ions Ca^{++}
et HCO_3^-

Dans les sols

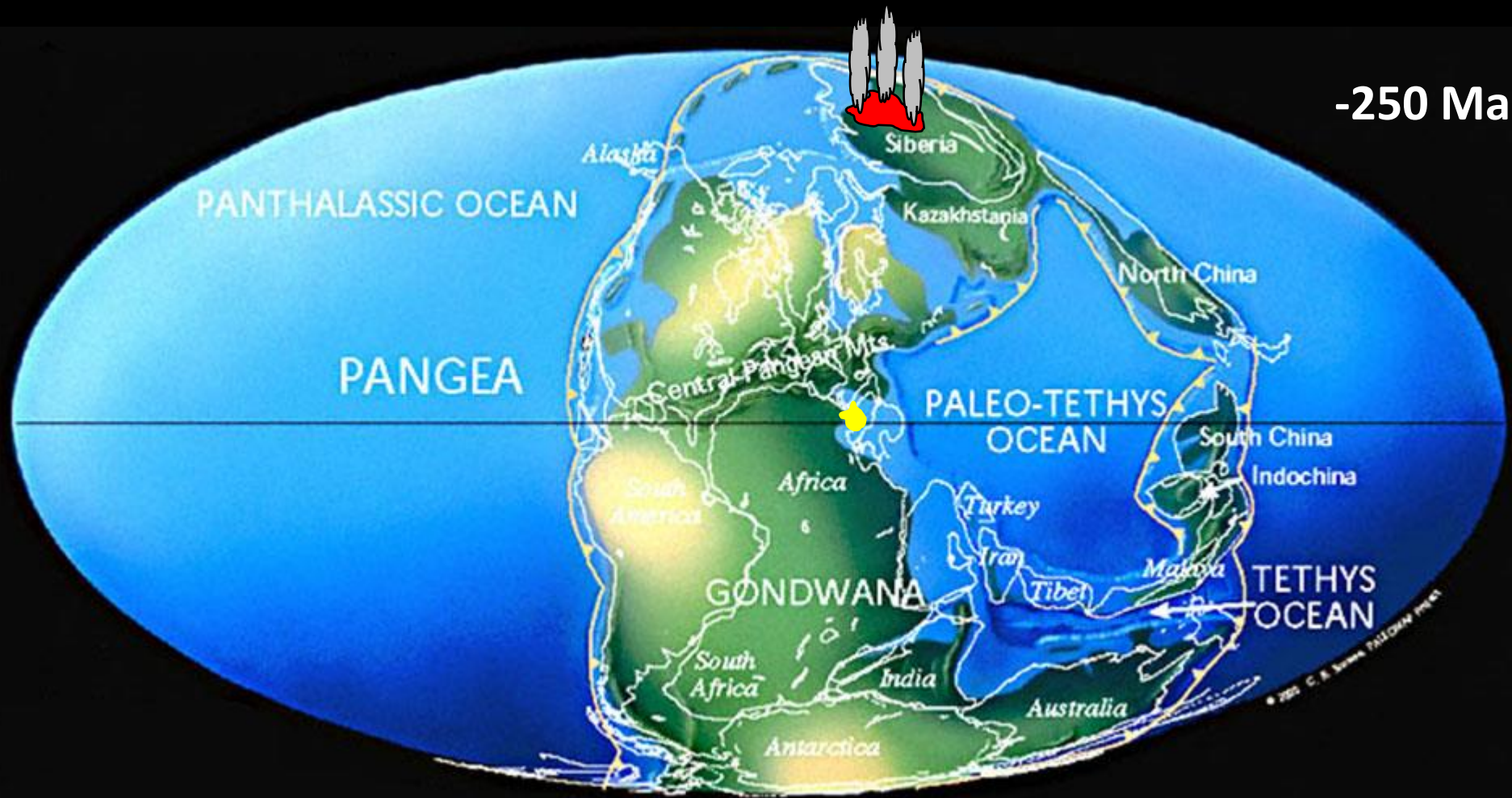
Argile

Photographie : Pierre Thomas

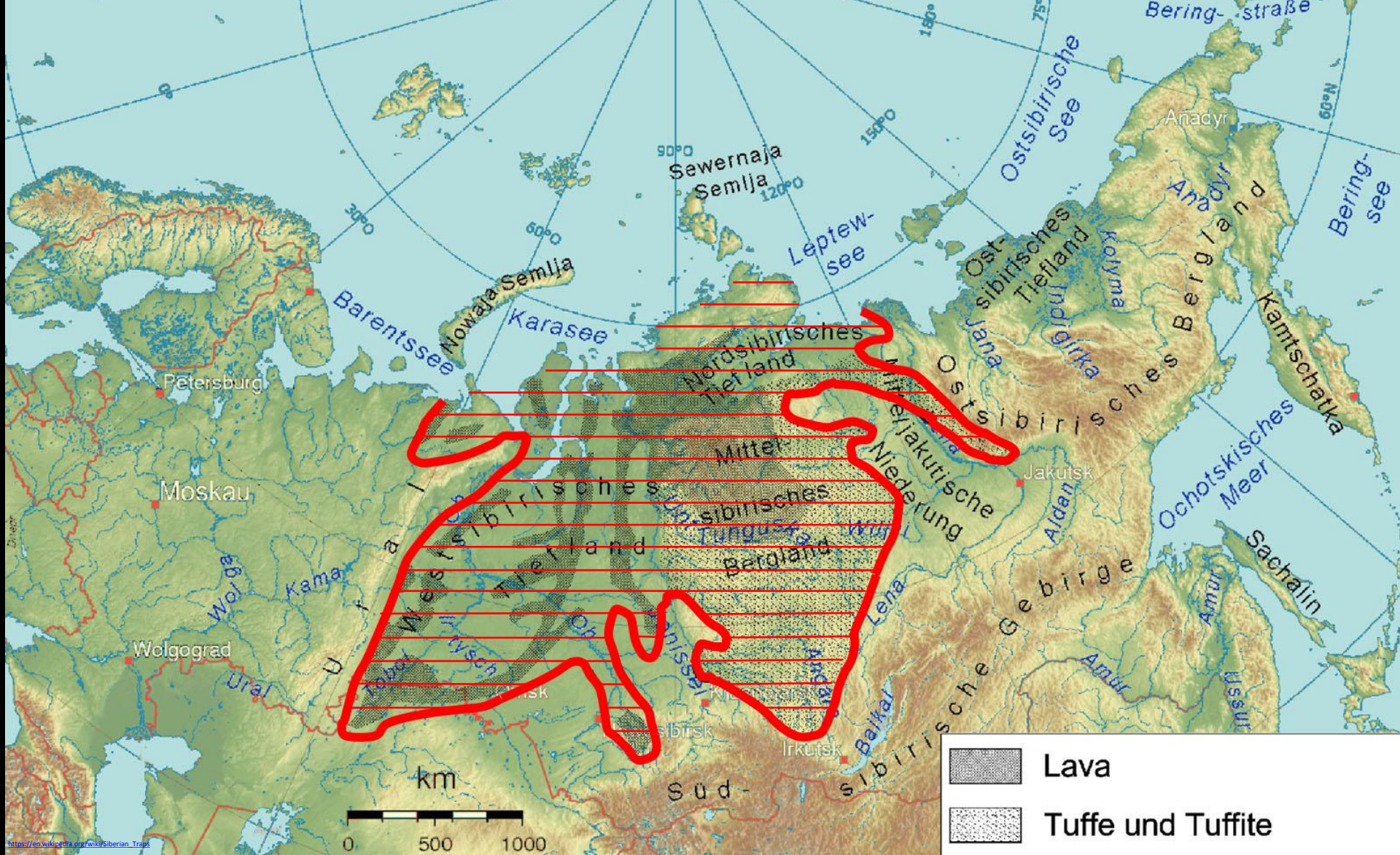
Dans la mer

Calcaire

Cette suite de réactions chimiques très complexes
« fabriquent » de l'argile et du calcaire ce qui
« consomment » irréversiblement du CO_2 ($\approx 0,1 \text{ Gt/an}$)



Troisième changement : le volcanisme sibérien d'il y a 250 Ma (fin du Permien), le plus important volcanisme aérien depuis 600 Ma, et la plus grosse crise biologique depuis ces mêmes 600 Ma.



Des centaines de milliers de km² (3 à 6 fois la France) recouverts de centaines de coulées et de couches de cendre (3 millions de km³) émises en moins de 5 Ma ...

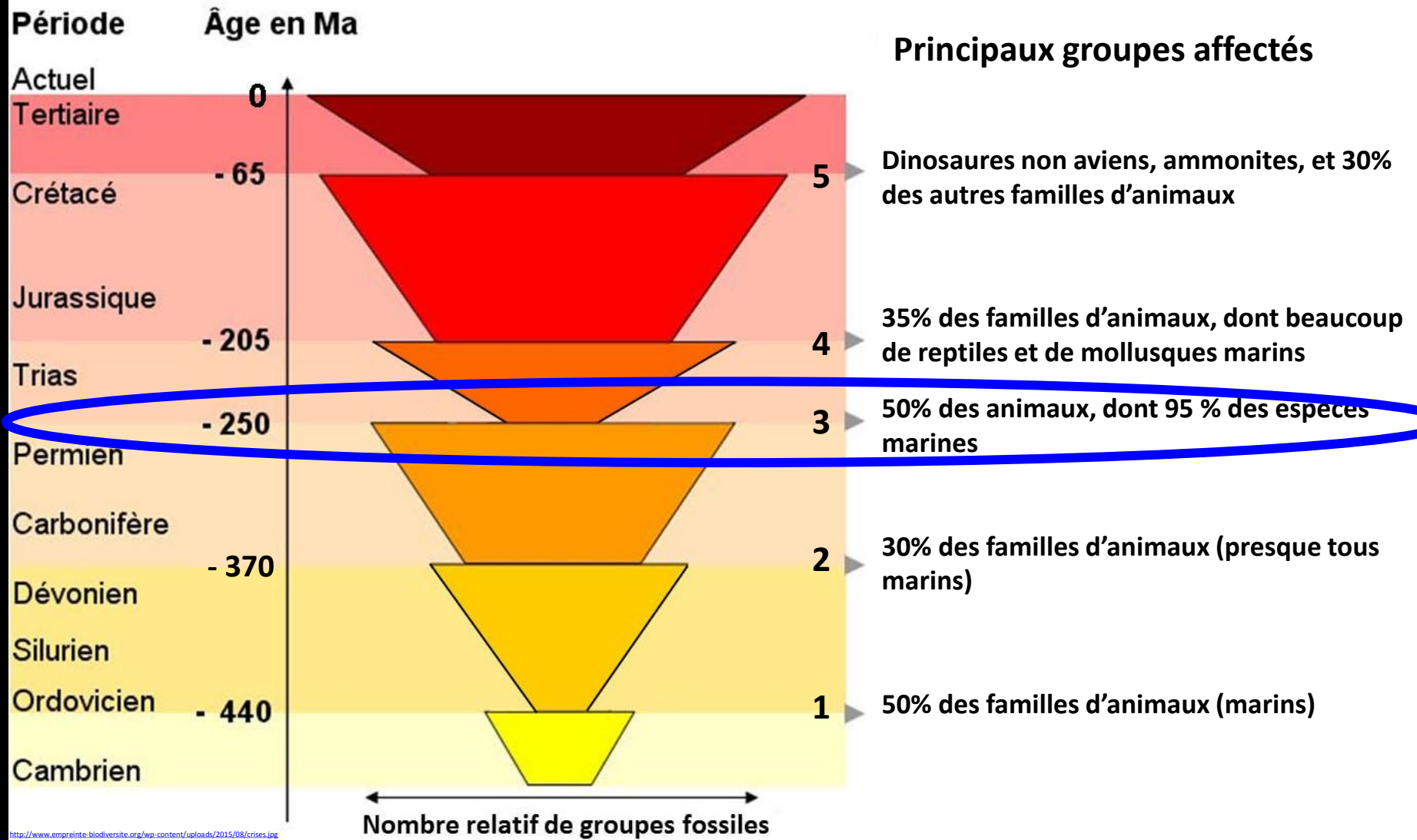


**... ce qui fait une épaisseur totale de 2 à 4 km de basalte !
On appelle ces empilements de coulées des « trapps ».
Perturbations climatiques garanties !**

Grâce aux fossiles, on sait depuis au moins 200 ans que des êtres vivants anciens ont aujourd'hui disparu.



Les cinq grandes crises phanérozoïques de la biodiversité animale

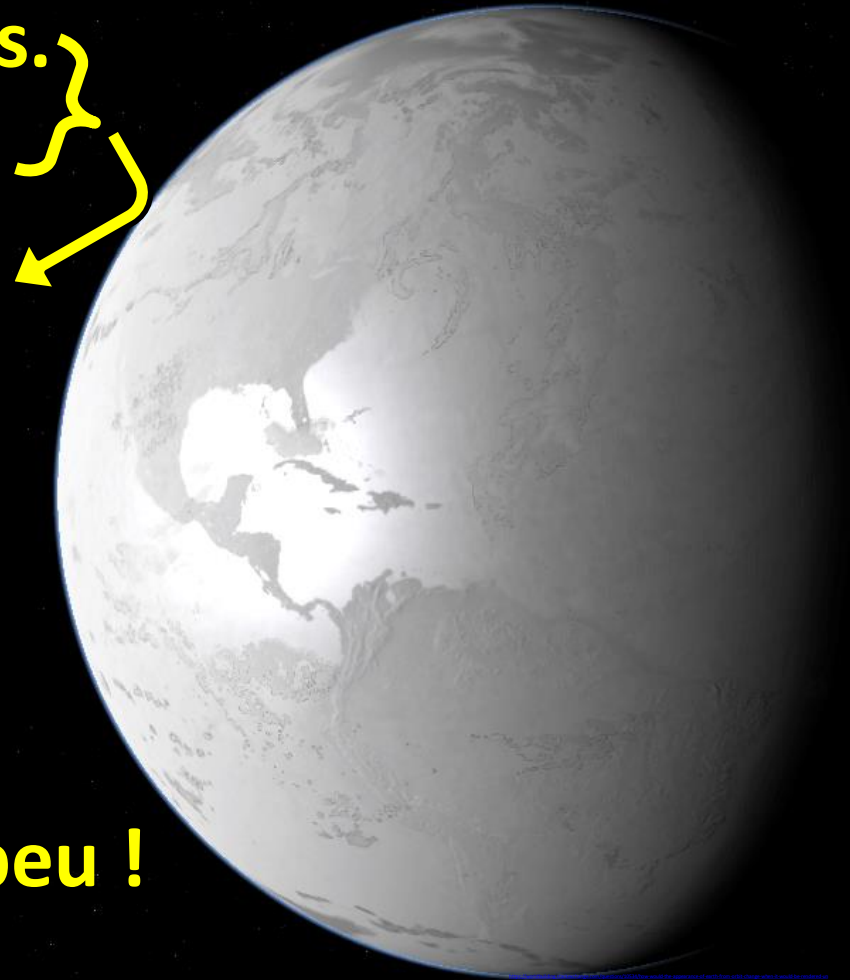


Ce volcanisme est contemporain de la plus importante des cinq extinctions de ces 600 derniers millions d'années.

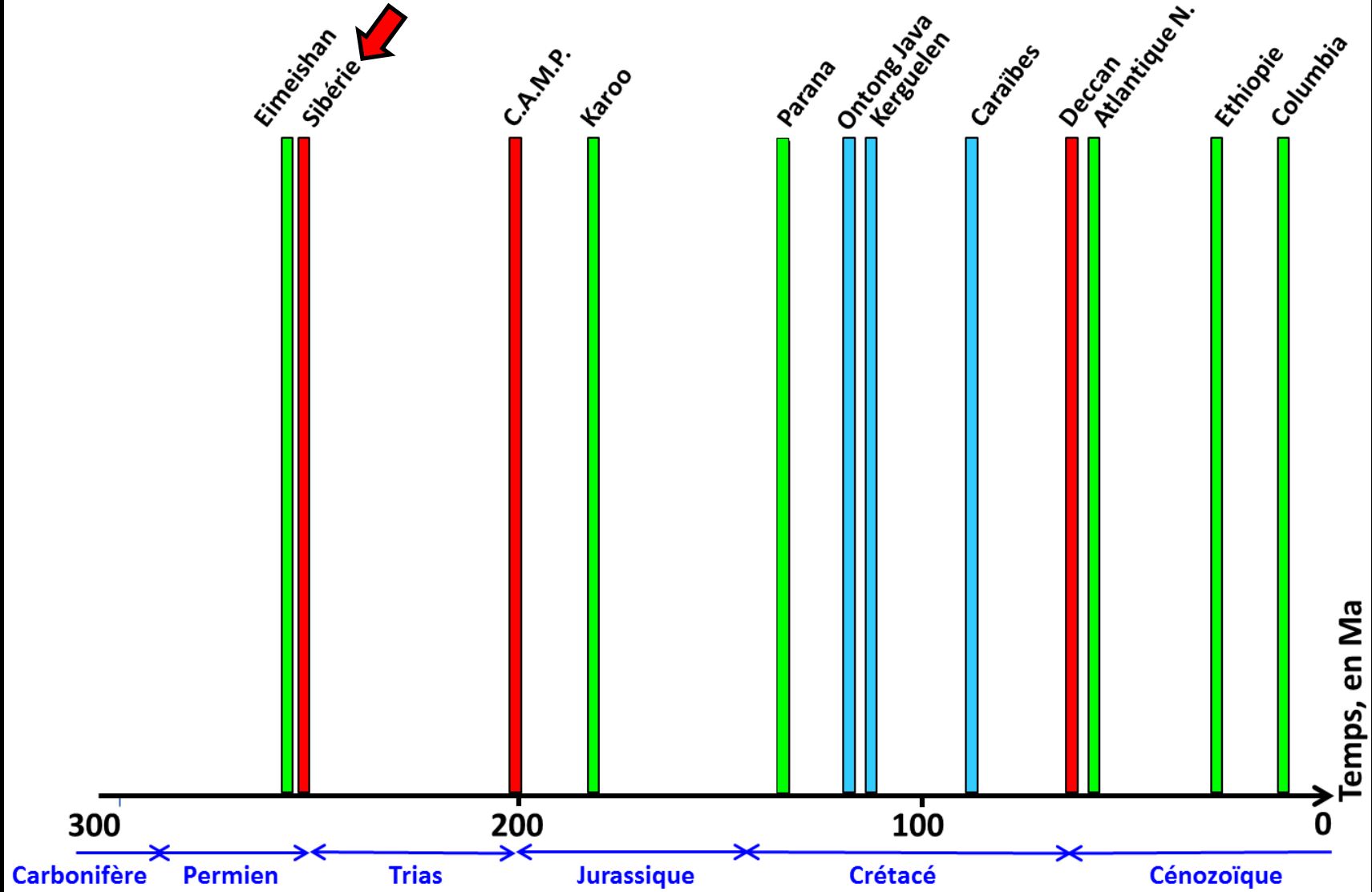
Mais pourquoi un tel épisode volcanique aurait-il engendré une méga-crise biologique ? Entre autre, à cause des perturbations climatiques et chimiques.

Une succession d'éruptions majeures entraîne :

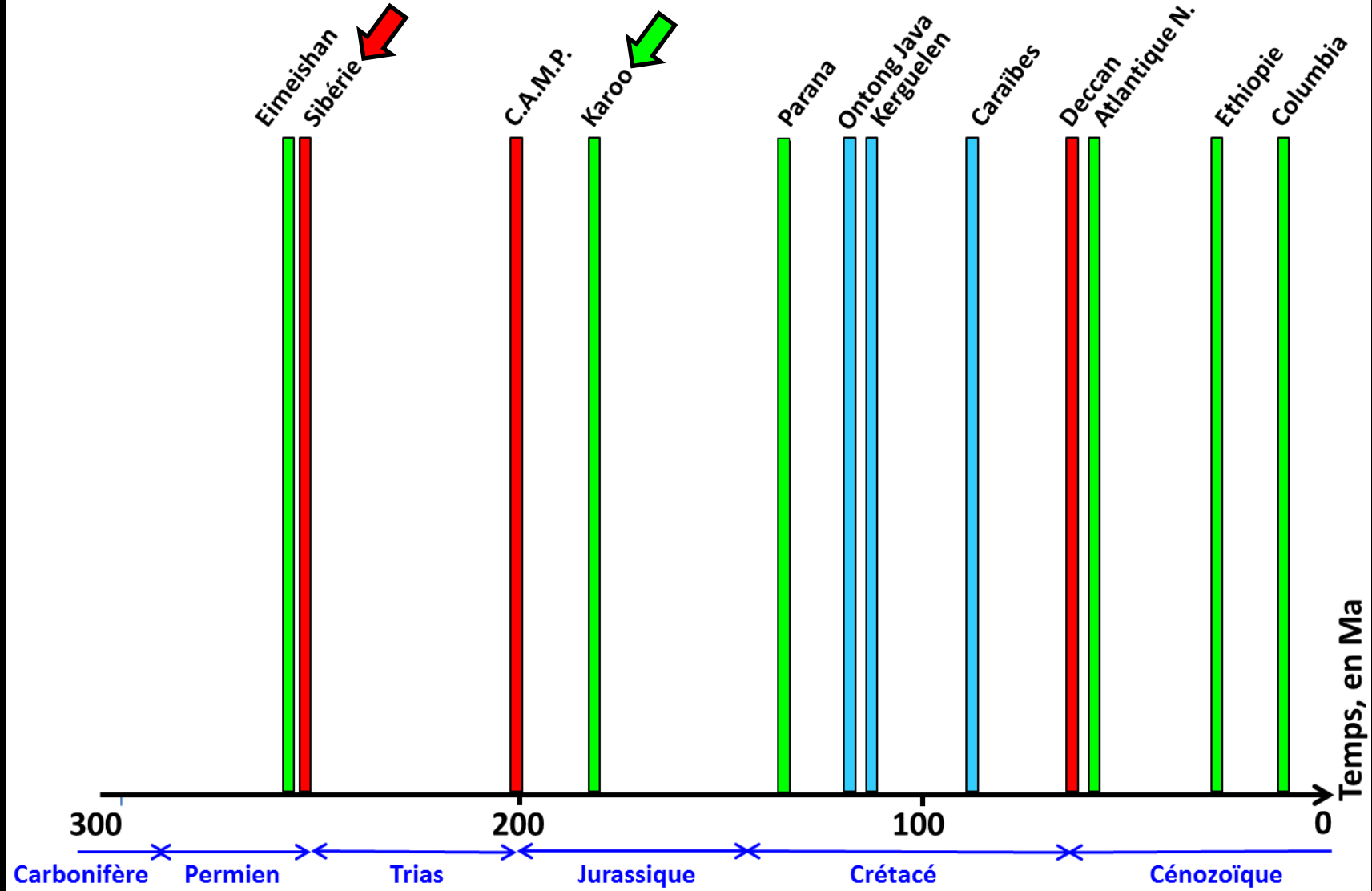
- **Poussières troposphériques.**
 - **Aérosols stratosphériques.**
- Forts et soudains refroidissements, intermittents.**
- **Acidification rapide de l'atmosphère et de l'océan.**



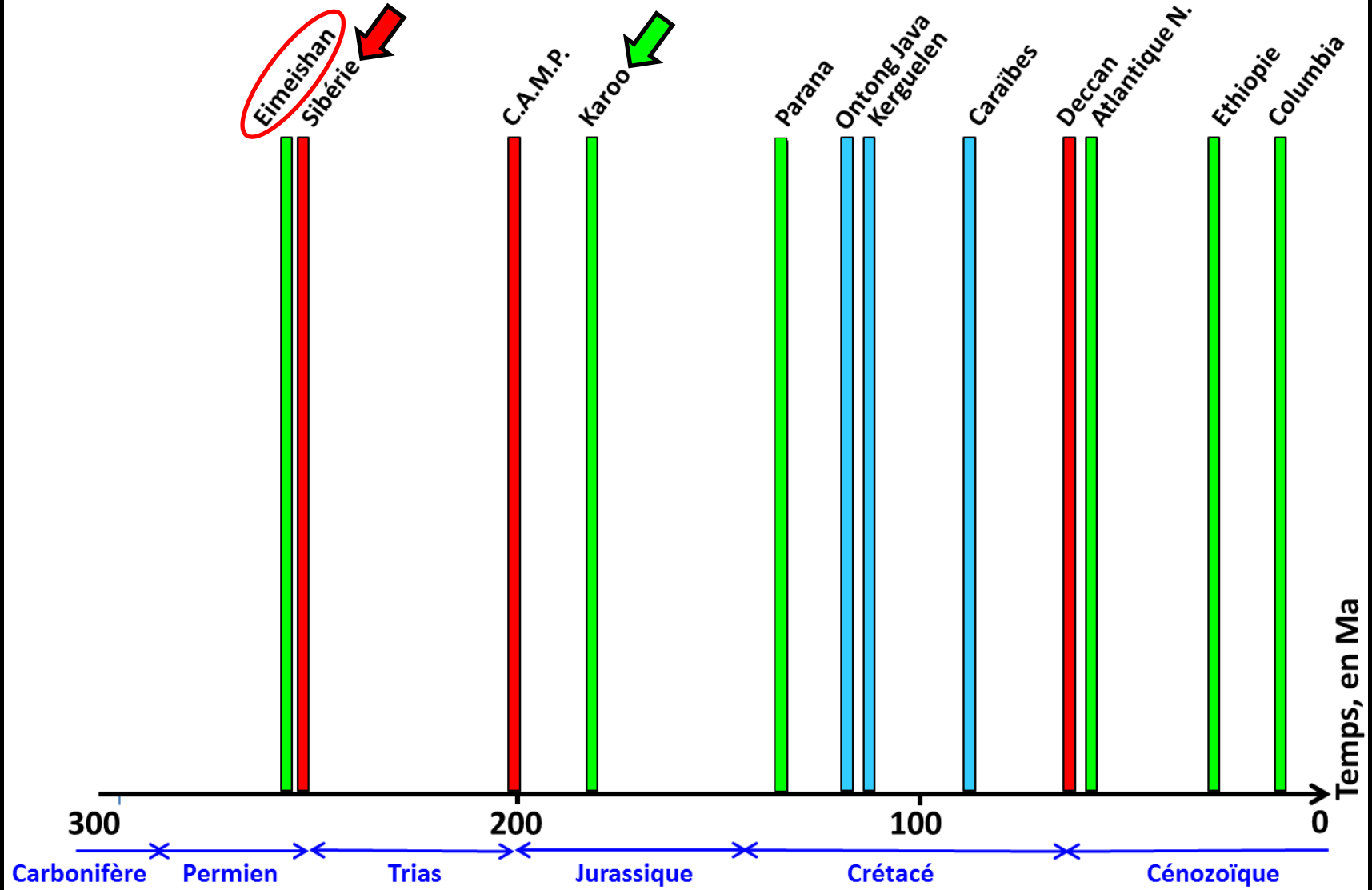
La biosphère n'apprécie que peu !



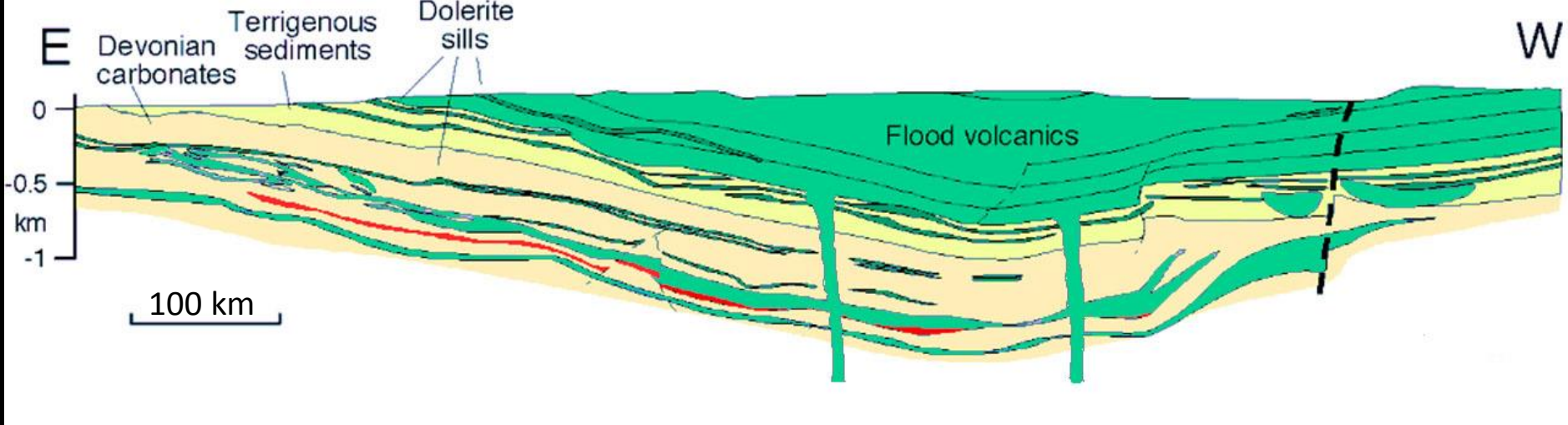
Il y a eu 12 épisodes magmatiques géants depuis 300 Ma. Qu'est ce que l'épisode sibérien a de plus que les autres ?



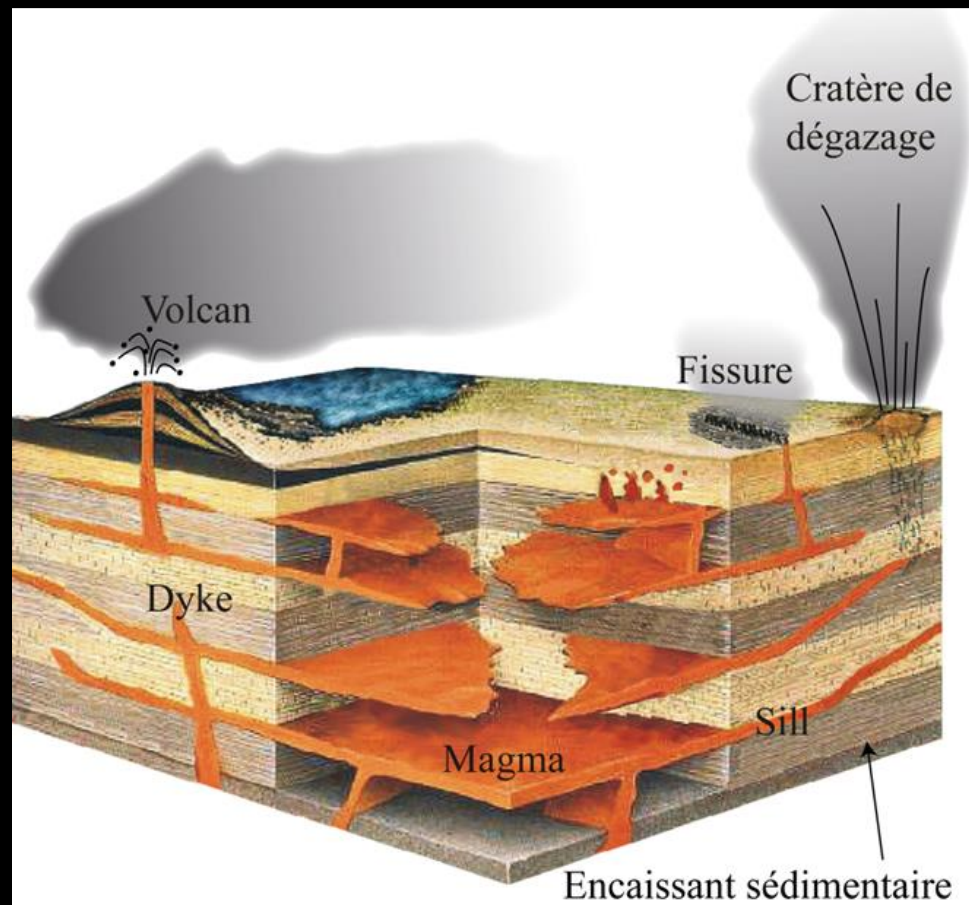
C'est le plus volumineux des épisodes aériens. Mais il est ex-aequo avec l'épisode du Karoo, qui n'a rien fait. Qu'est ce que la Sibérie a de plus que le Karoo ?



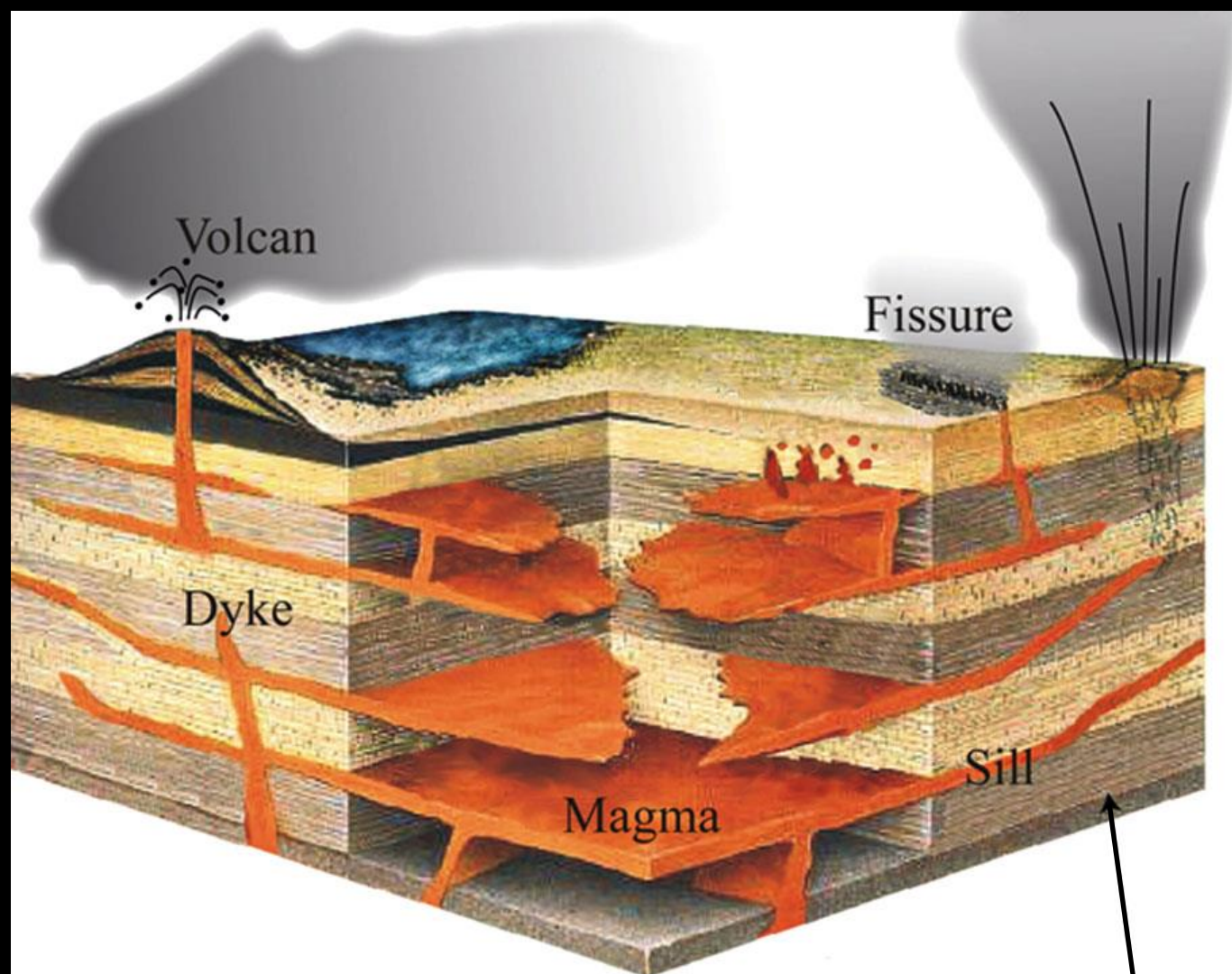
Tout d'abord, il arrive juste après un autre épisode, le volcanisme d'Eimeishan en Chine du Sud, volcanisme qui avait déjà du perturber le climat.



Mais comme chacun sait, il n'y a pas que la taille qui compte. Dans notre cas, il y a aussi, voire surtout, l'interaction du magma avec les roches qu'il traverse et/ou recouvre !



Le magma chauffe et décompose l'encaissant sédimentaire qui, en Sibérie, contient du gypse, du sel, du charbon, des sulfures ... Tout ça dégage un cocktail gazeux mortel qui s'ajoute aux gaz volcaniques.

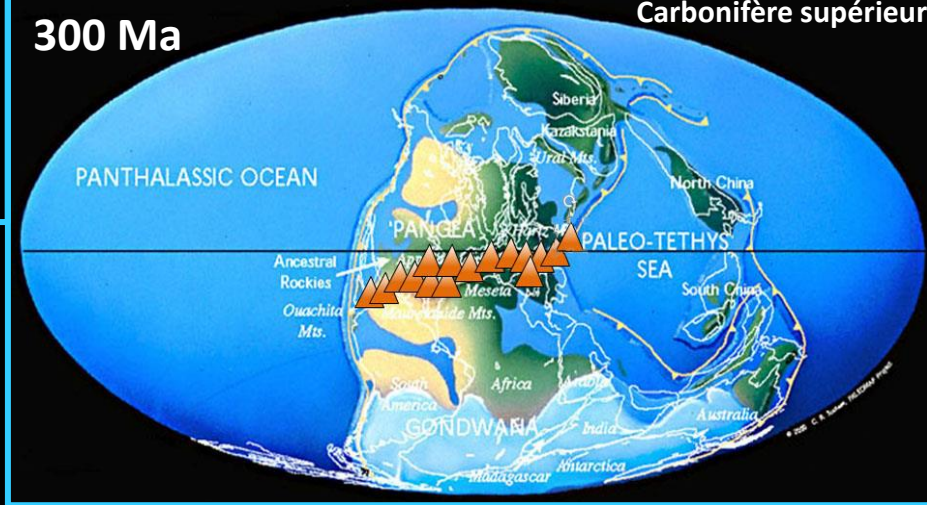


Encaissant sédimentaire contenant du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), du sel (NaCl), de la pyrite (FeS_2), du charbon ...

Continents presque rassemblés,
grandes montagnes (chaîne
hercynienne), végétation terrestre,
grands glaciers au pôle

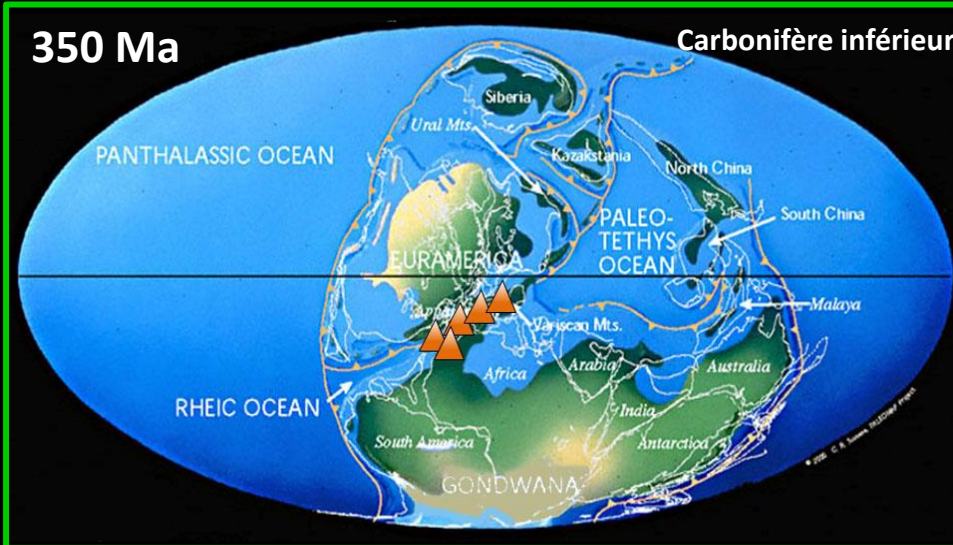
300 Ma

Carbonifère supérieur



350 Ma

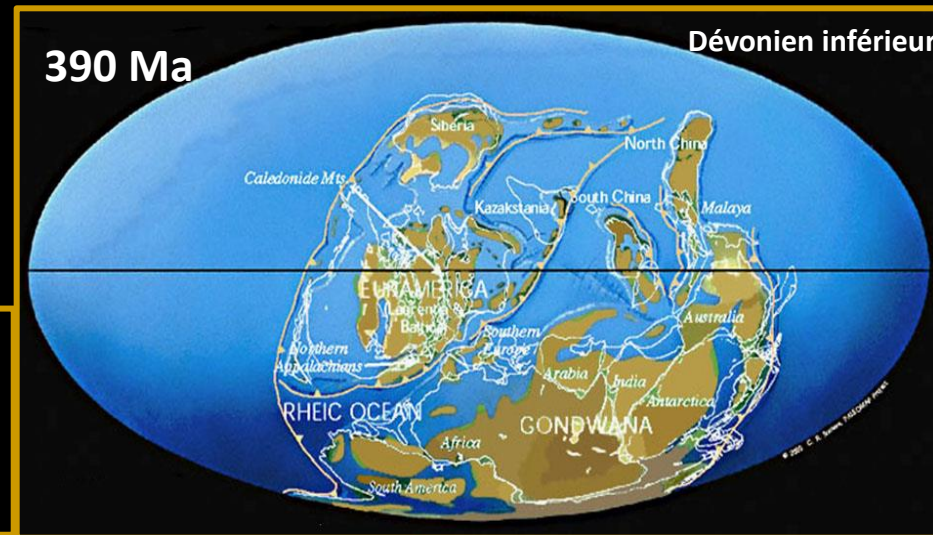
Carbonifère inférieur



Continents en cours de rassemblement,
végétation terrestre, petites montagnes,
petits glaciers au pôle

390 Ma

Dévonien inférieur



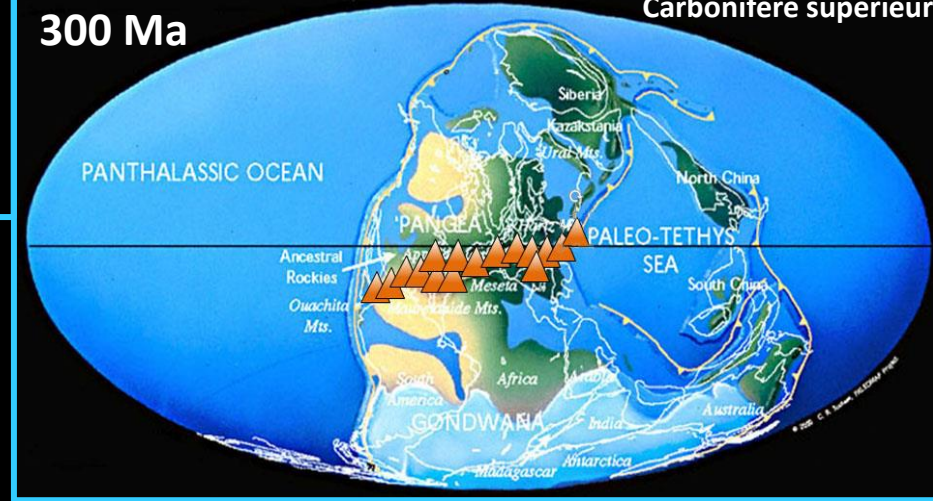
Continents séparés,
ni végétation
terrestre, ni
glaciers

**Quatrième(s) changement(s), majeurissime(s), du
Dévonien inférieur au Carbonifère inférieur, puis supérieur.**

Continents presque rassemblés,
grandes montagnes (chaîne
hercynienne), végétation terrestre,
grands glaciers au pôle

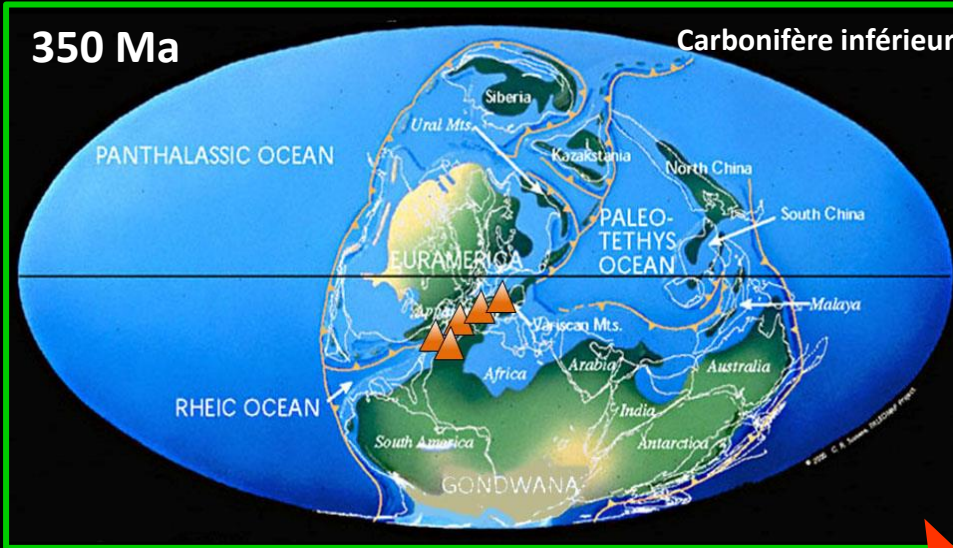
300 Ma

Carbonifère supérieur



350 Ma

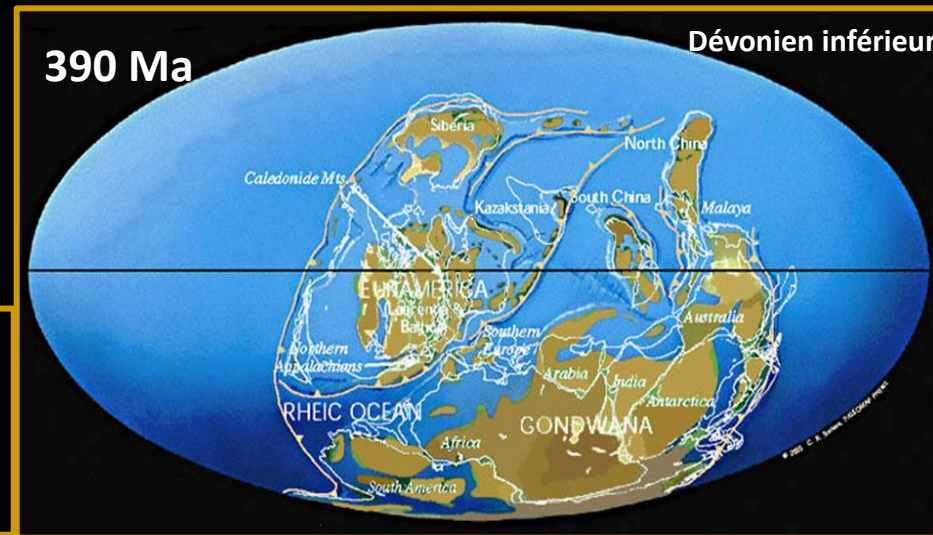
Carbonifère inférieur



Continents en cours de rassemblement, végétation
terrestre, petites montagnes, petits glaciers au pôle

390 Ma

Dévonien inférieur



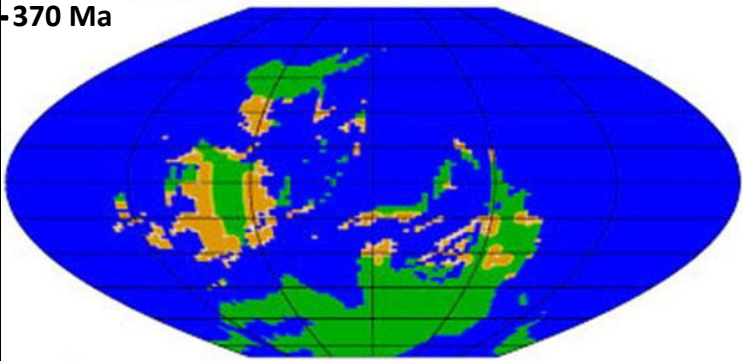
Et en plus, la 2^{ème}
grande extinction,
marine, vers
- 365/370 Ma.

Continents séparés,
ni végétation
terrestre, ni
glaciers

Quatrième(s) changement(s), majeurissime(s), du
Dévonien inférieur au Carbonifère inférieur, puis supérieur.

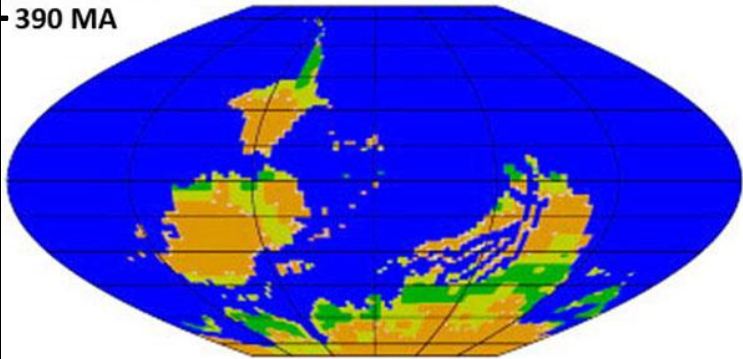
Dévonien supérieur

-370 Ma



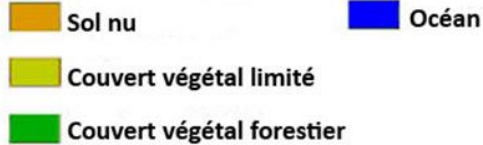
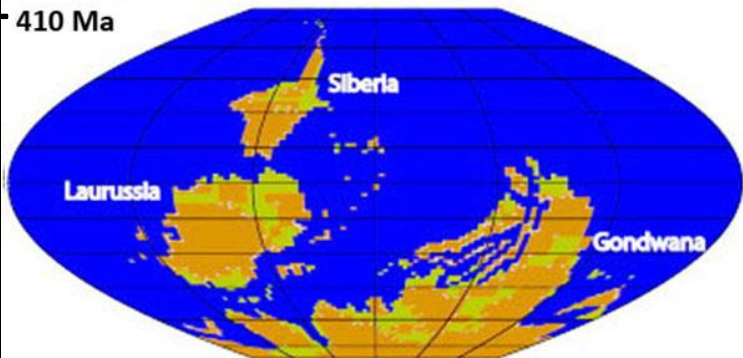
Dévonien moyen

-390 MA



Dévonien inférieur

410 Ma



D'après Le Hir et al 2011, modifié

La végétation arborescente a envahi les terres émergées de -390 à -370 Ma. On passe d'un sol quasiment nu, à un sol « moussus », puis à une forêt (mais bien différente des forêts actuelles).

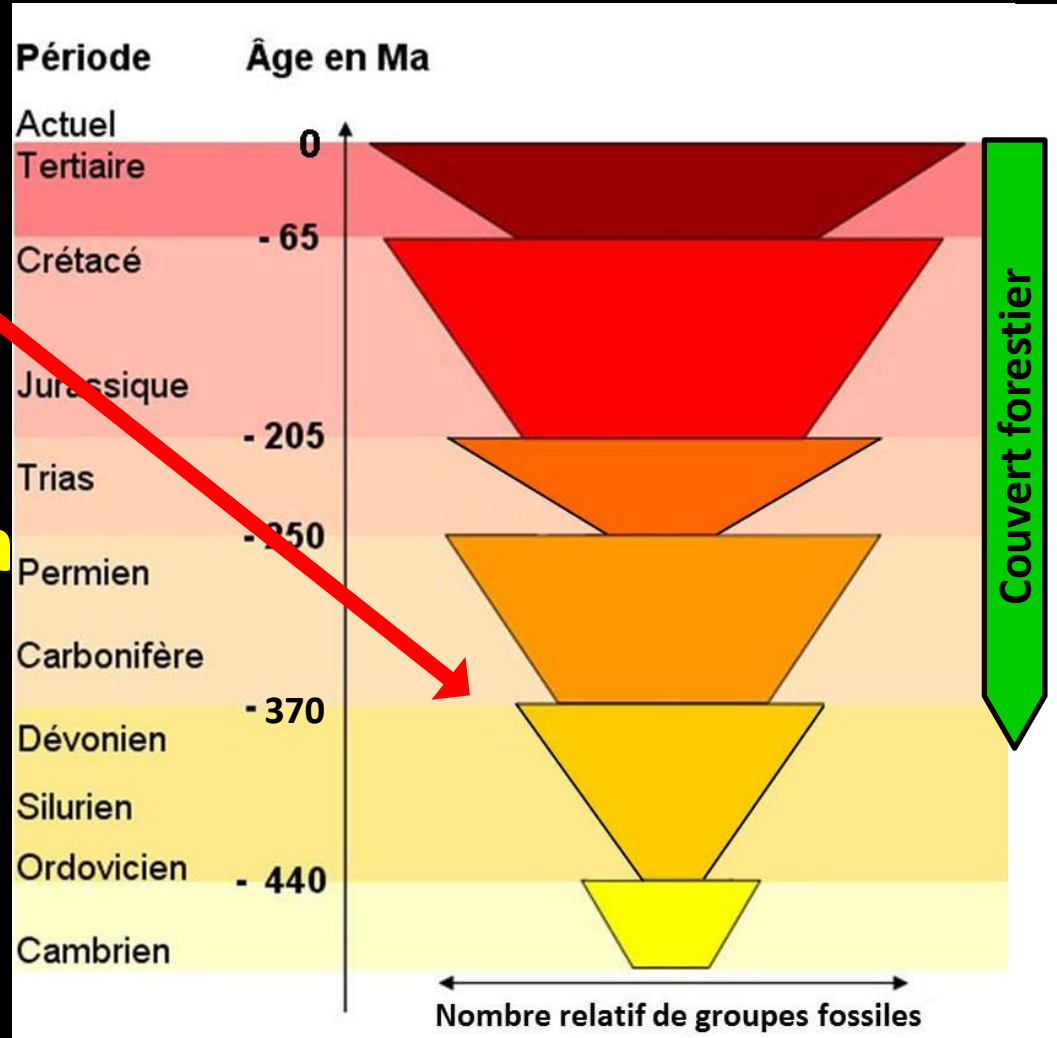


la face du monde a été changée parce que des mutations ont eu lieu. Ces mutations ont permis la synthèse (que la sélection darwinienne à favorisé) d'une dizaine d'enzymes transformant un acide aminé, la phénylalanine, en au moins trois alcools (dont l'alcool coumarylique) et un certain nombre d'autres enzymes polymérisant ces alcools. Ce polymère, c'est la lignine, molécule à la base du bois et autres tissus végétaux. Quelques mutations, et des continents avec seulement des mousses, des champignons et des bactéries, sont devenus des continents forestiers, qu'ils sont encore, et peuplés d'animaux nombreux et variés.

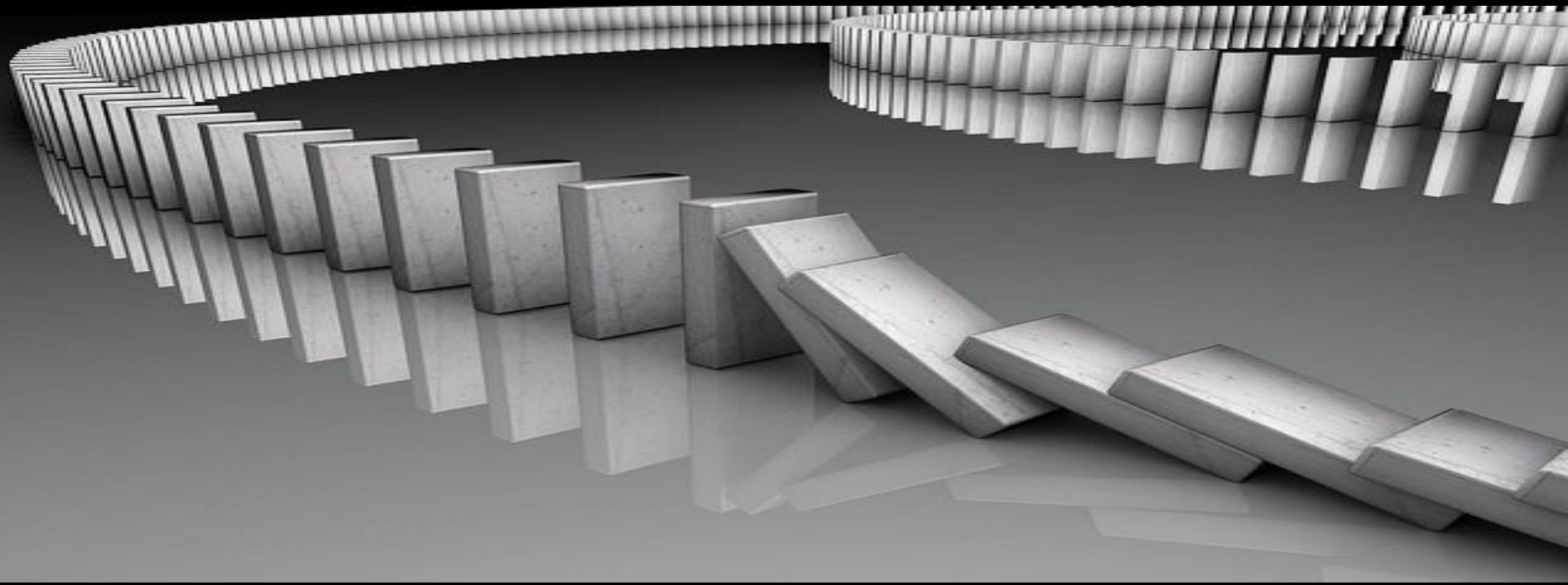


Y-a-t-il une relation entre cette extraordinaire augmentation de la biodiversité continentale et la grande crise biologique (marine) de la fin du Dévonien ?

D'abord, de quoi sont morts 30 à 40% des espèces marines à la fin du Dévonien (-370 Ma) ? Entre autre d'une anoxie quasi générale de l'océan mondial.



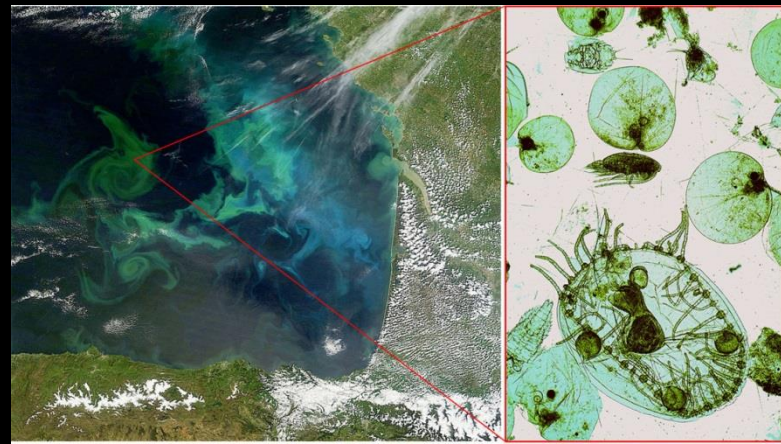
Cette anoxie serait la conséquence d'enchaînements inéluctables qu'un scientifique de l'époque aurait eu du mal à anticiper et à quantifier : la vie, les arbres (terrestres) ont été cause de mort pour la vie marine ! Une leçon pour notre action présente, car, théoriquement, nous réfléchissons un plus que les arbres ! Nous devrions savoir ce que nous faisons.



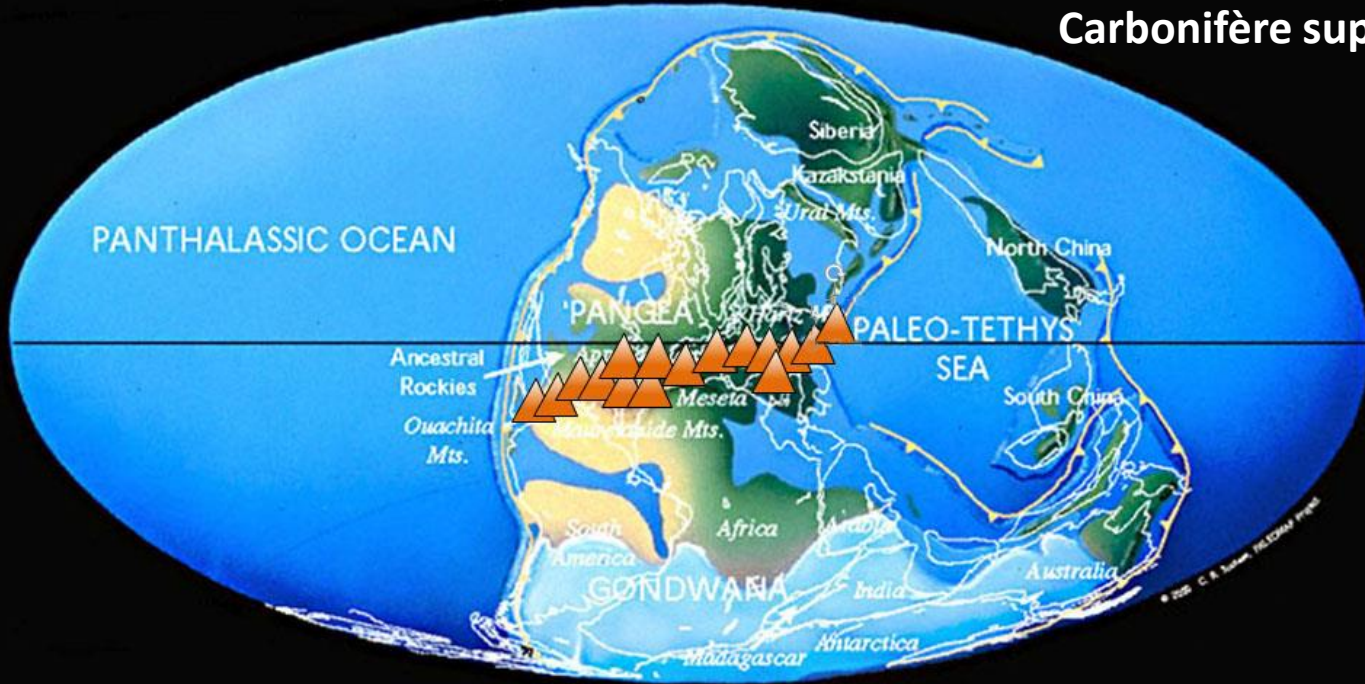
- Des arbres poussent.
- Il y a à cette époque peu de décomposeurs ; la matière organique s'accumule dans des sols, qui avant n'existaient pas.
- Ces sols vivent et « respirent » ce qui secrète acides humiques et CO_2 .
- Acides et CO_2 attaquent les roches du sous-sol ce qui libère des sels minéraux.
- L'érosion et les fleuves amènent à la mer et des sels minéraux et de la matière organique des sols, beaucoup plus qu'avant, et des arbres morts.



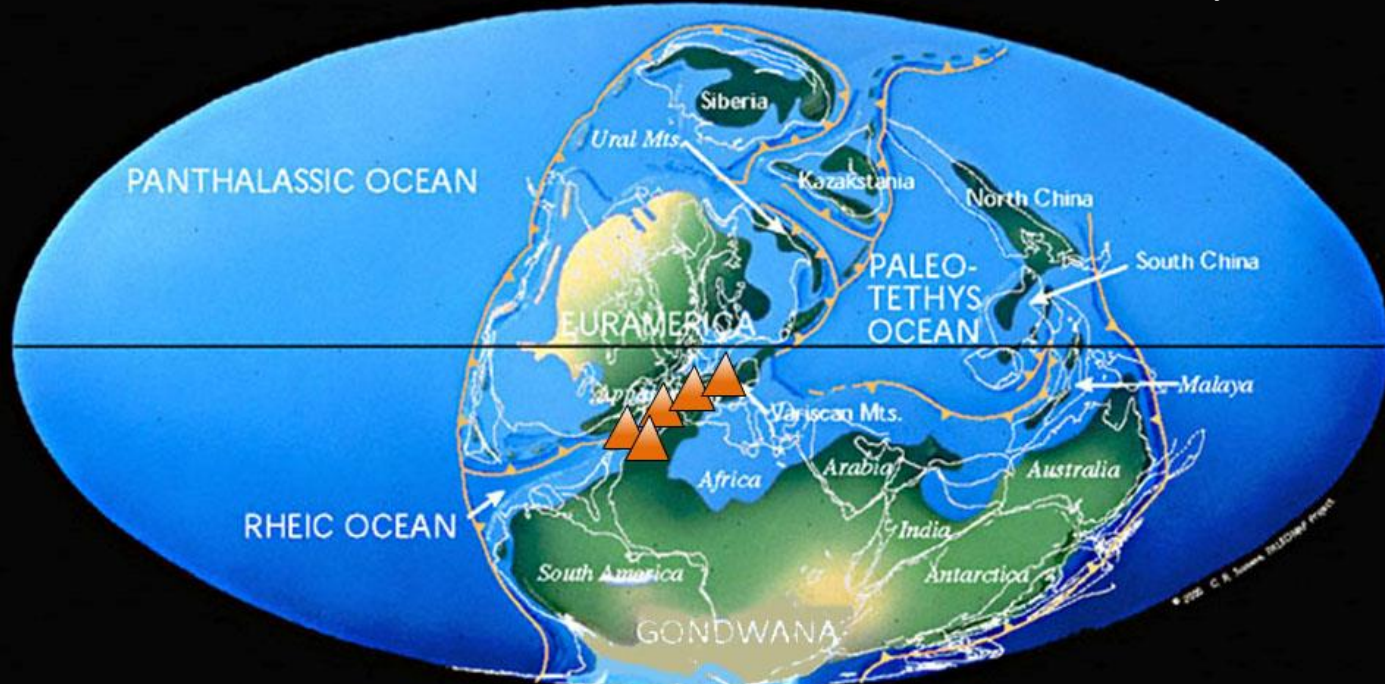
- L'arrivée de sels minéraux à la mer entraîne des blooms algaires et planctoniques.
- Les cadavres algaires et planctoniques, la matière organique venue des sols, et du bois mort s'accumulent sur les côtes ou tombent au fond de la mer.
- La décomposition de ces cadavres consomme tout l'oxygène et eutrophise de très larges secteurs des mers.
- Une grande proportion des animaux marins meurent privés d'oxygène.



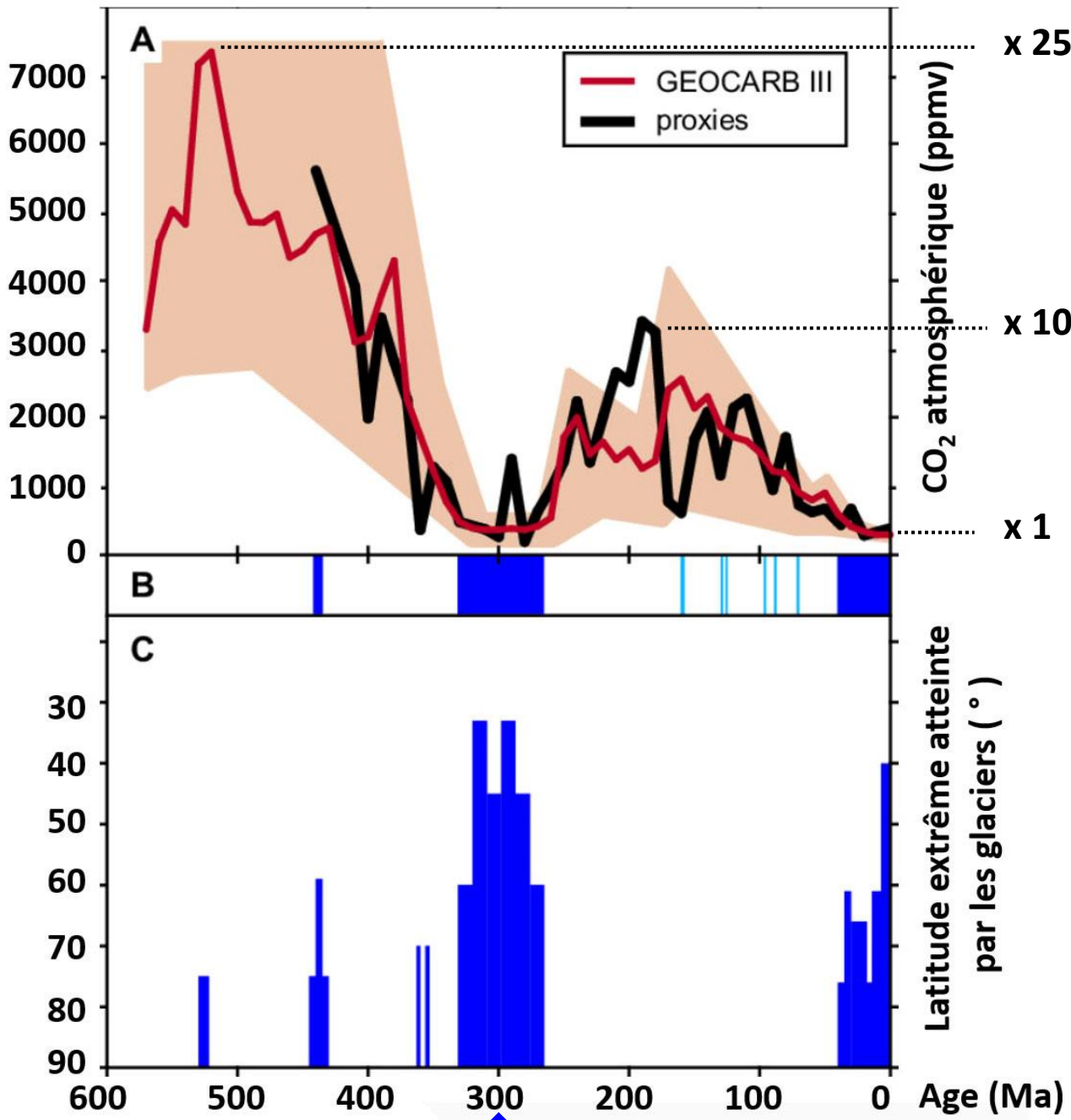
Carbonifère supérieur, -300 Ma



Carbonifère inférieur, -350 Ma



Puis vint le plus terrible coup de froid de ces 550 derniers millions d'années.

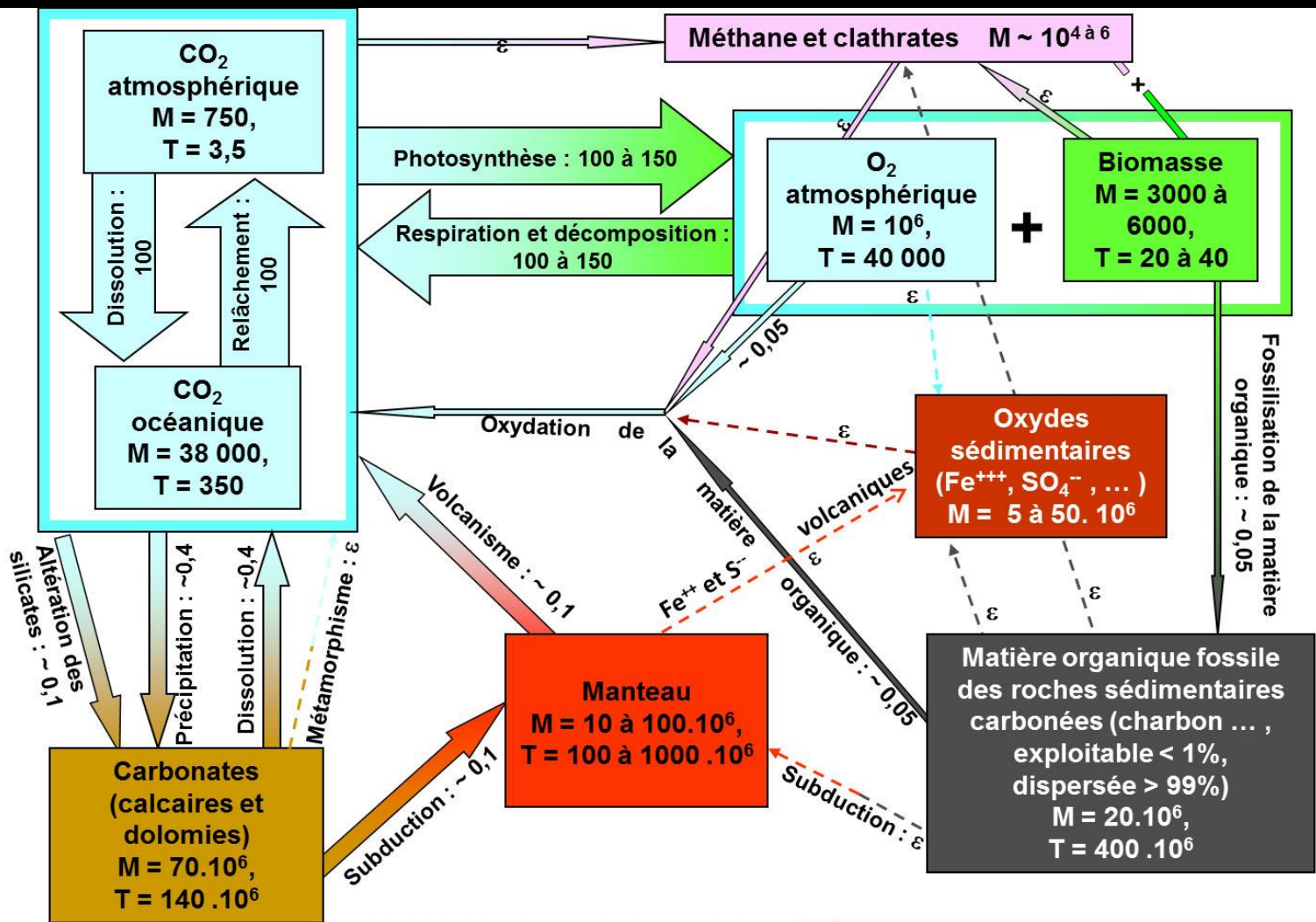


Ce coup de froid où les glaciers vont jusqu'au 30^{ème} parallèle (latitude actuelle de Sydney) est dû à un CO₂ très très bas (comme maintenant). Pourquoi ce CO₂ est-il très très bas ?





Parce que l'altération de la chaîne hercynienne en construction « pompe » du CO₂ pour faire du calcaire, comme le fait aujourd'hui la chaîne alpino-himalayenne depuis 40 millions d'années.



Le cycle du Carbone/Oxygène

Masse en Gt (10⁹ t = 10¹² kg) de C ou d'O
 Temps de résidence en année
 Flux : en Gt / an

Mais il n'y a pas que le tandem altération-calcaire qui fait baisser le CO₂, il y a la « fabrication » de carbone fossile, en particulier de charbon dans cette période Carbonifère

Le Carbonifère est une période où les décomposeurs seraient relativement peu efficaces, et où on fait donc beaucoup de charbon, d'où son nom.

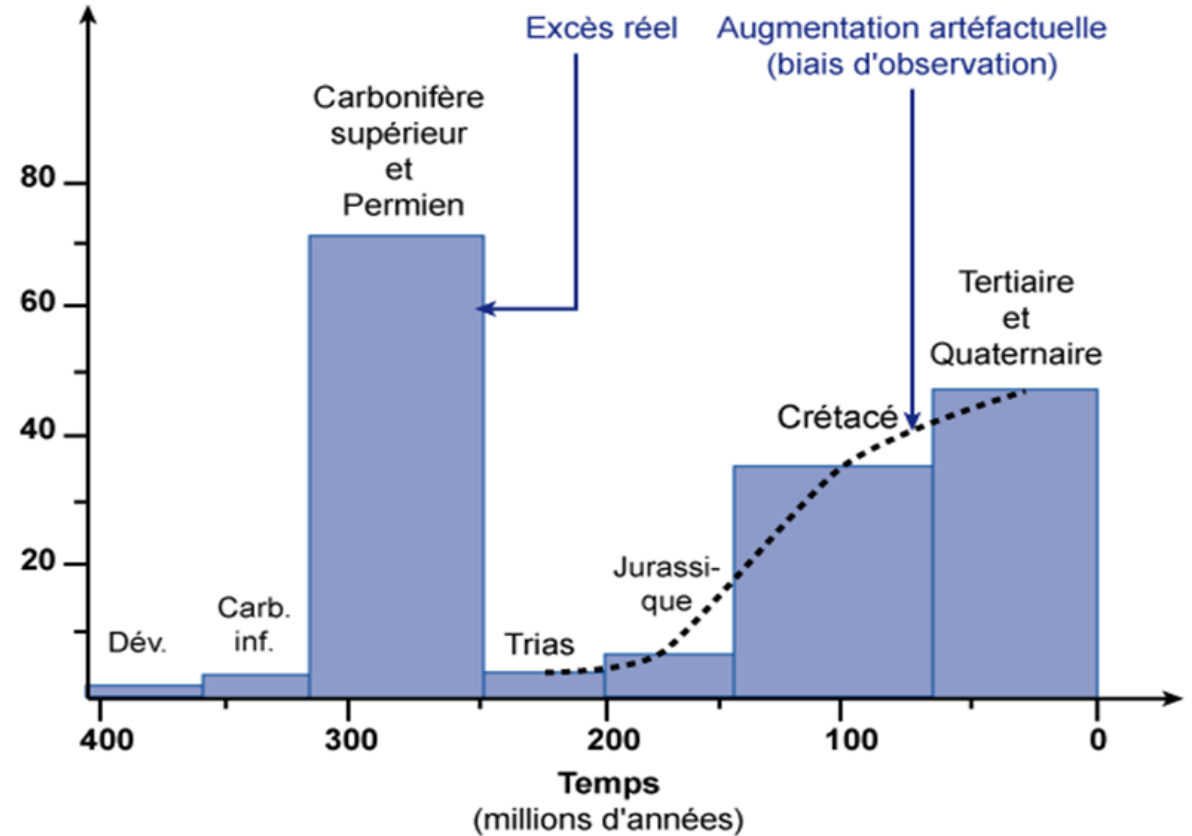


Photographie : Pierre Thomas

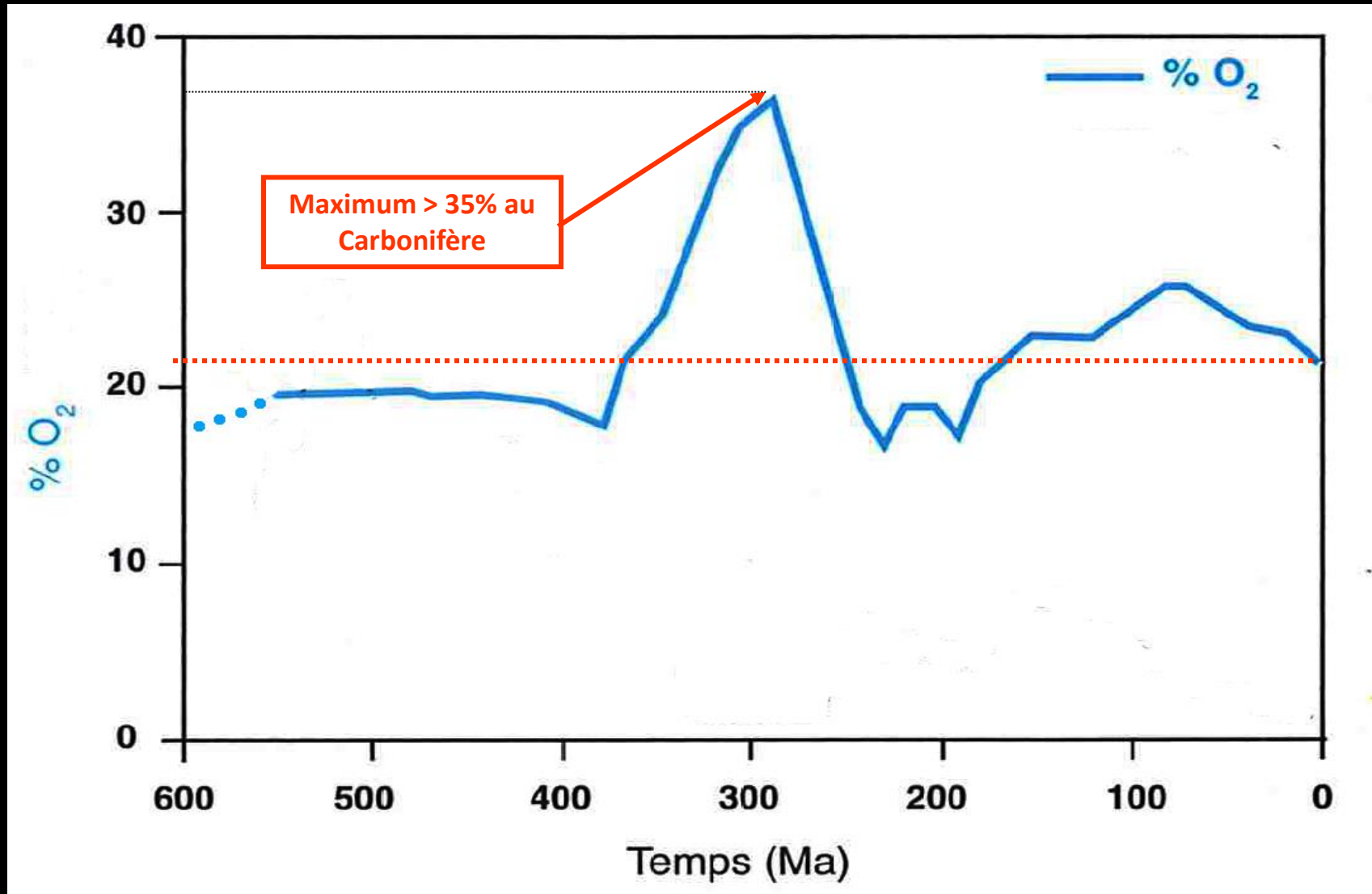
Le Carbonifère est une période où les décomposeurs seraient relativement peu efficaces, et où on fait donc beaucoup de charbon, d'où son nom.



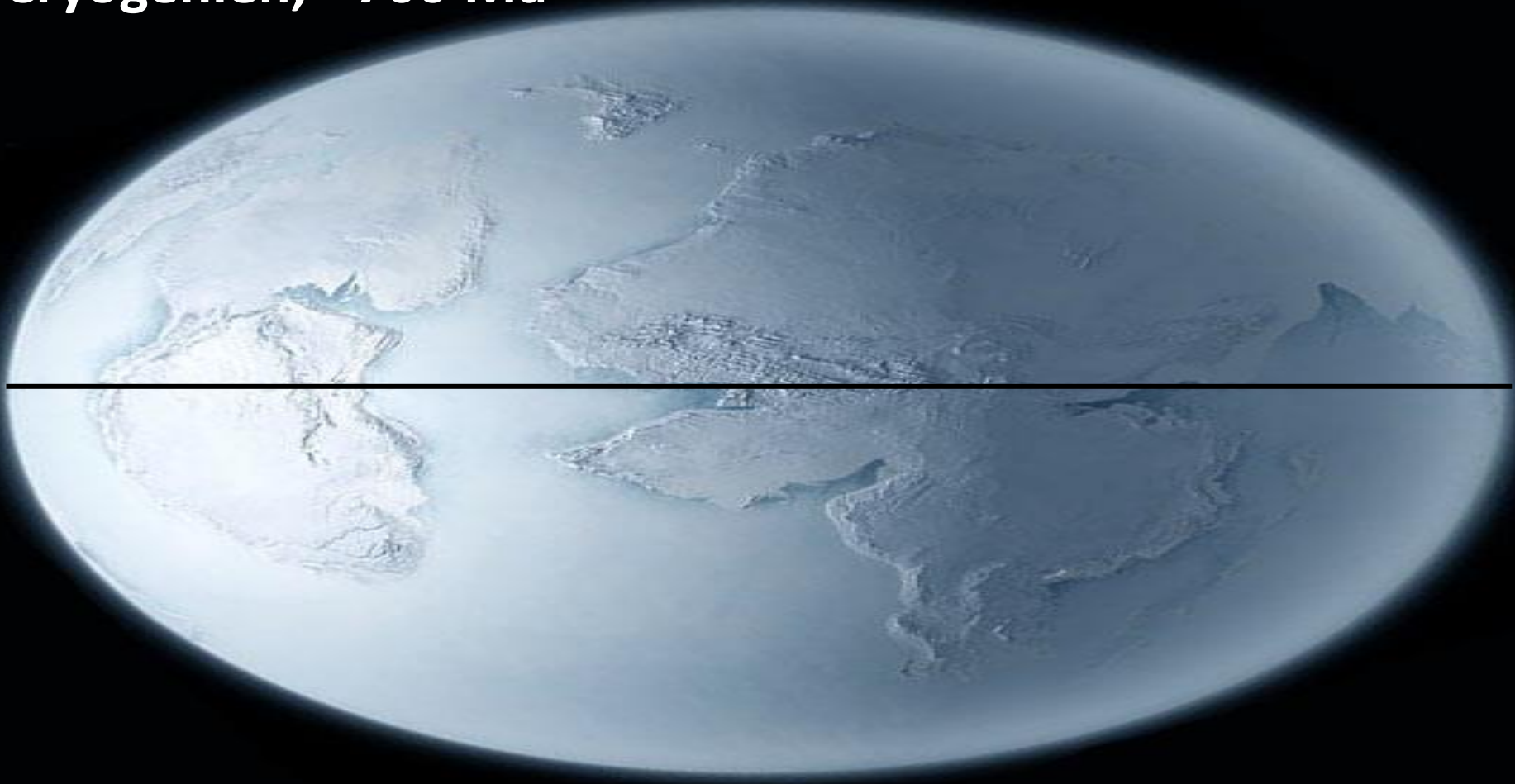
Réserves de charbon exploitable
(milliards de tonnes / millions d'années)



Une conséquence « annexe » : la teneur de l'atmosphère en di-oxygène atteint son maximum >35%, contre 21% aujourd'hui .

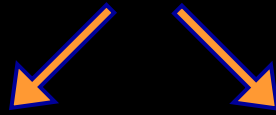


Cryogénien, - 700 Ma



Cinquième et dernier changement détaillé ici, et quel changement : les épisodes « boule de neige ».

On trouve « partout » des indices de glaciations vers -700 Ma. Et on en retrouve d'autres moins forts vers -640 Ma (et d'autres encore moins forts vers -580 Ma).



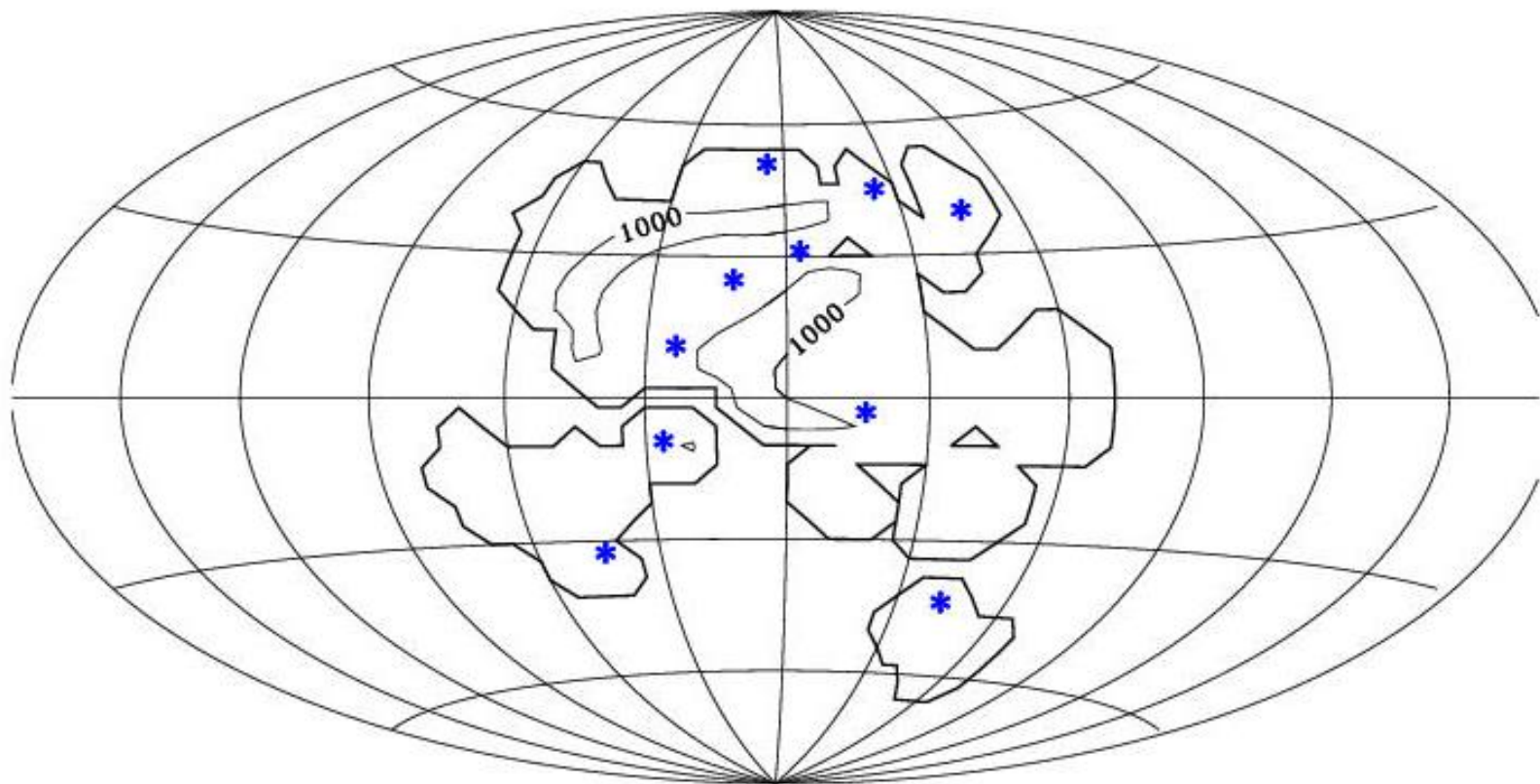
Surfaces striées – Sédiments sans granoclassement avec des clastes de taille diverse (moraines) = mouvement de glaces sur les continents.



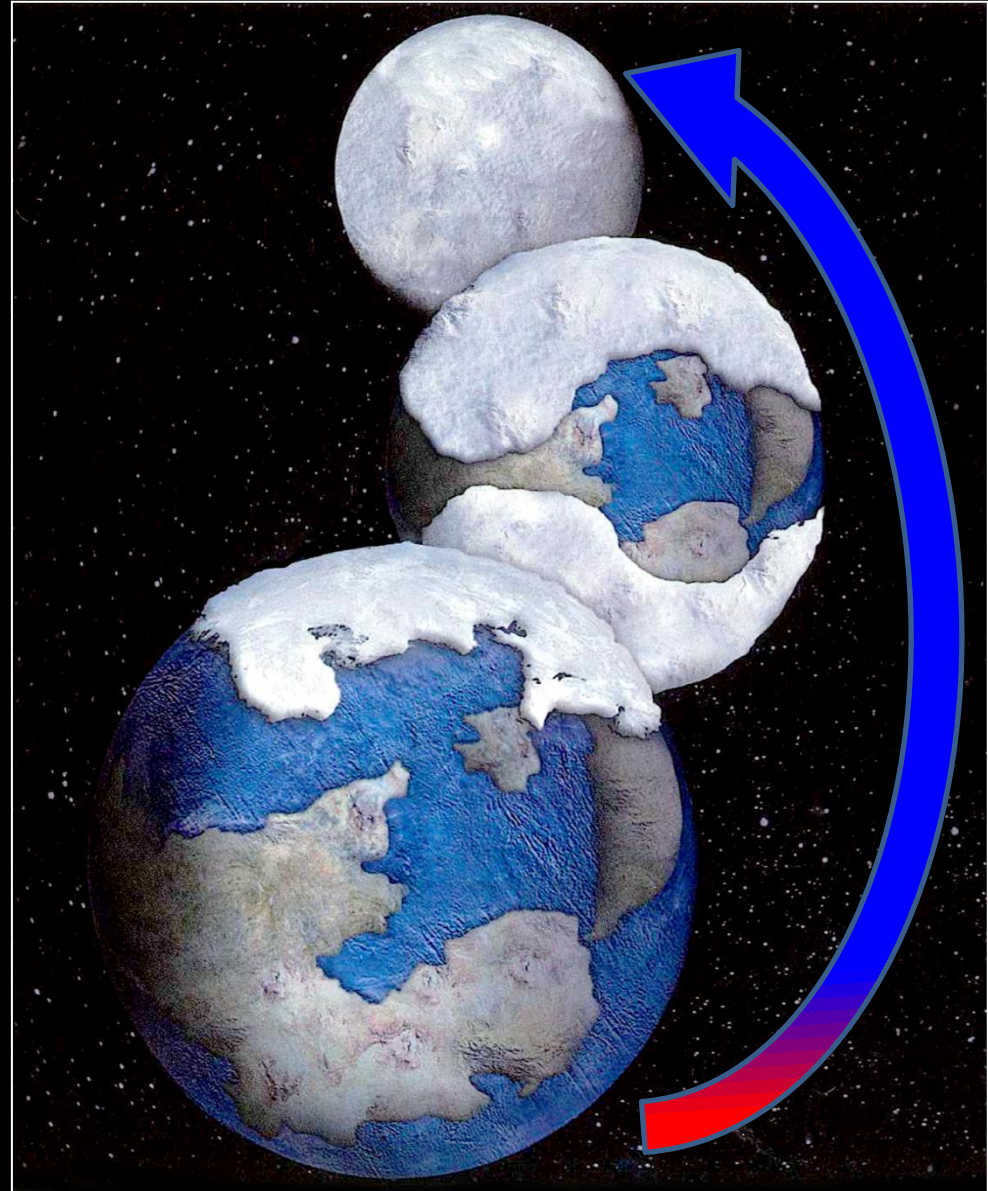
Lamines du sédiment marin déformées par la chute d'un galet (dropstone) = calottes glaciaires au niveau de la mer libérant des icebergs abondants.

Quand on replace les continents dans leur position de l'époque, on voit qu'à -700 Ma, il y avait des glaciers et des icebergs partout, même à l'équateur.

700 Ma

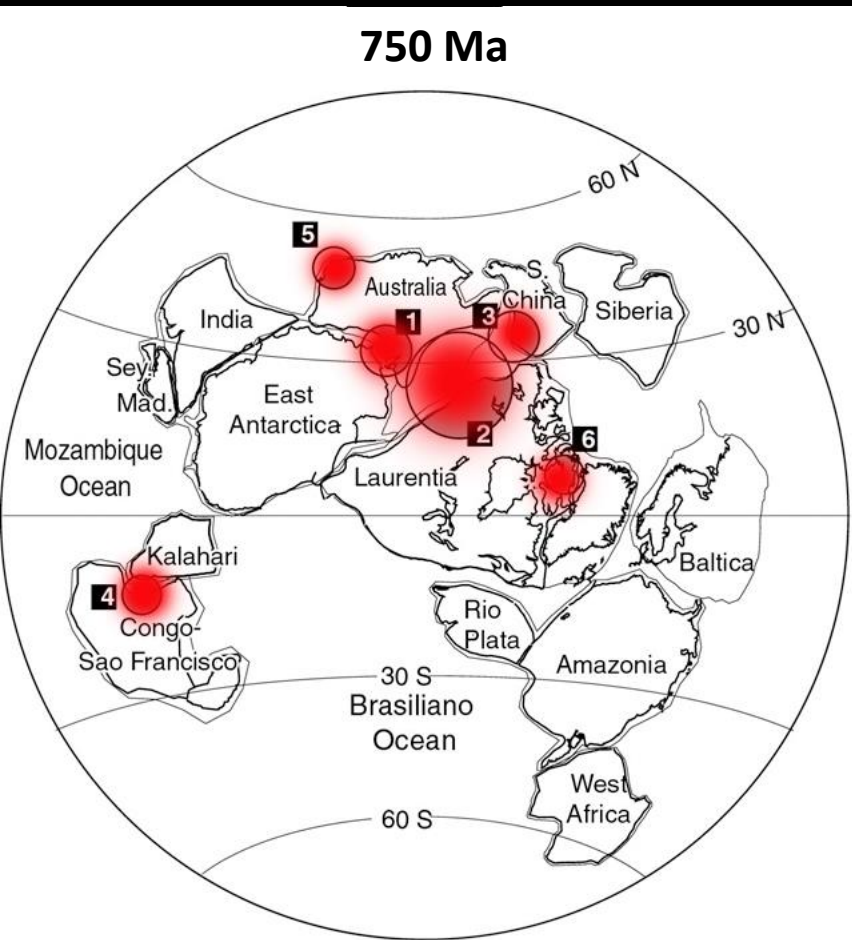


**D'ou l'idée d'épisodes
pendants lesquels
(presque) tous les
continents étaient
recouverts de calottes et
(presque) tous les océans
de banquise : les épisodes
« boules de neige »
(snowball earth). Il y a un
relatif consensus pour une
glaciation générale à -700
Ma, moins pour les autres,
qui restent néanmoins
« sévères ».**

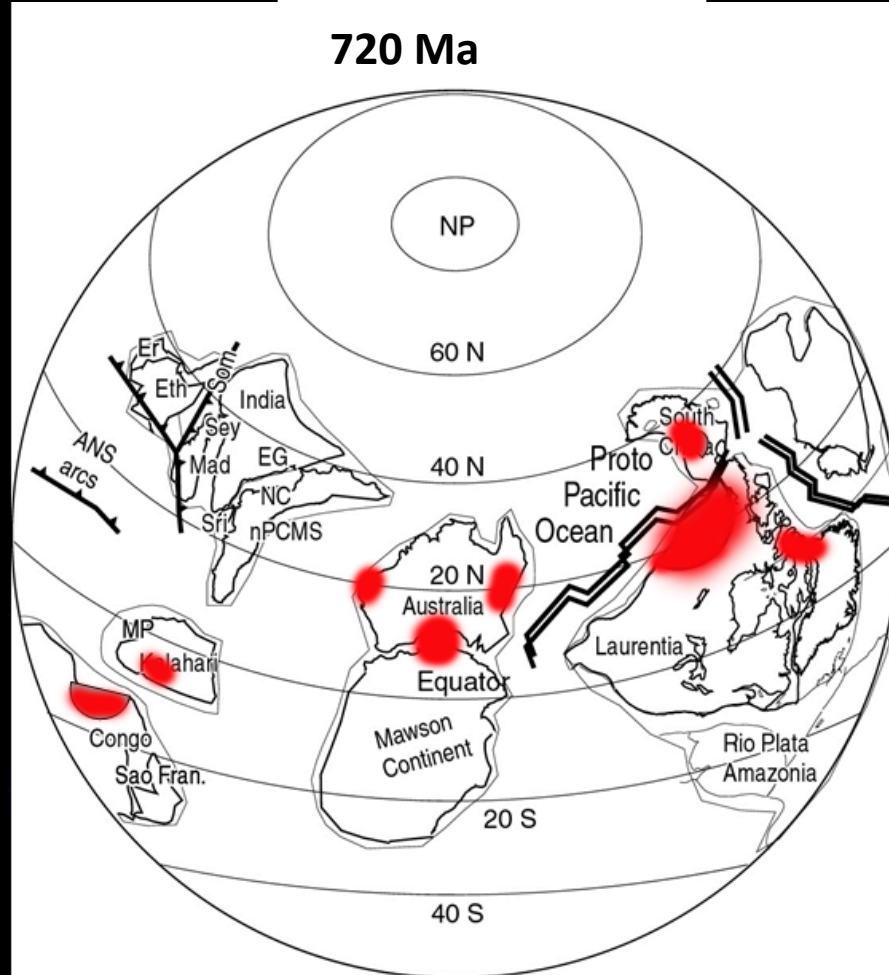


Une proposition de modèle explicatif (partiel) :

Il y a $\approx 750-800$ Ma, les continents étaient tous regroupés en



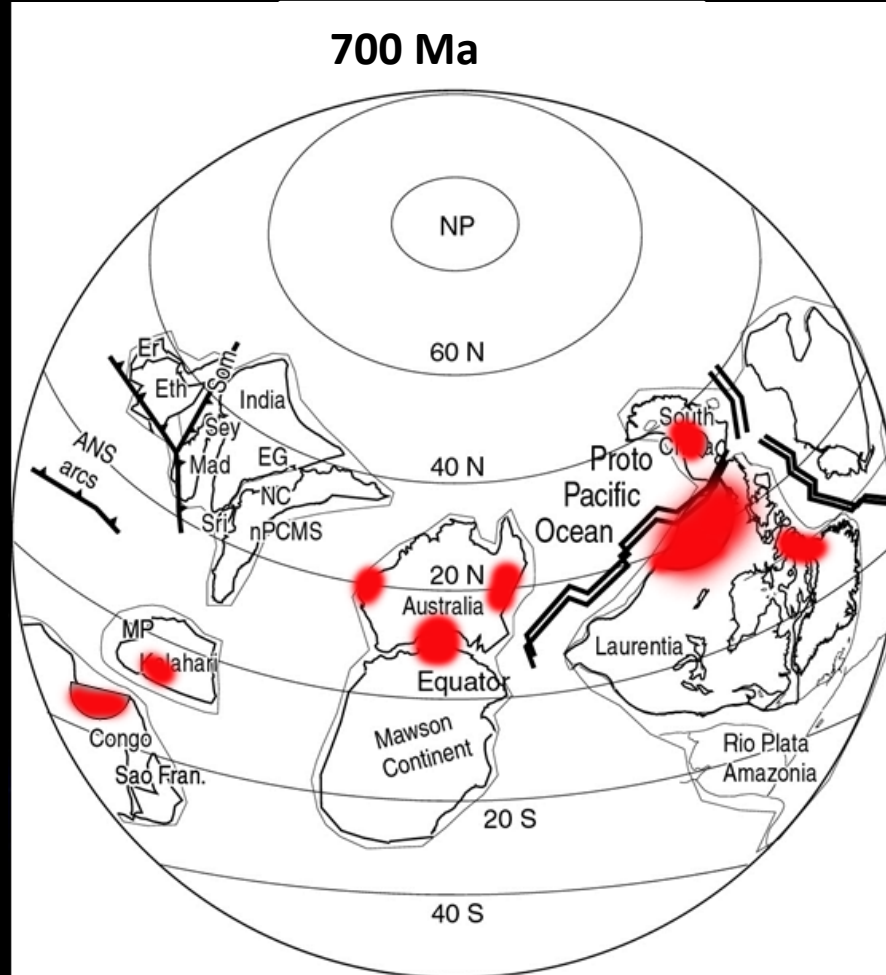
un continent unique, la Rodinia (comme il y a 250 Ma). La vie, marine surtout, un peu continentale, était constituée quasi-exclusivement d'unicellulaires. Des gigas trapps se mettent en place vers 750 Ma, surtout au centre du continent, là où le climat était relativement sec. Ça a du faire une méga-crise de biodiversité chez les unicellulaires, mais bien peu documentée paléontologiquement parlant.



Vers -720 Ma, cette Rodinia commence à se disloquer. Les vastes affleurements de basaltes se retrouvent « près » de la mer, et en position intertropicale, en climat plus humide. Ils sont la proie de l'altération. Or l'altération des basaltes libère beaucoup de calcium qui fixe le CO_2 pour faire du calcaire.

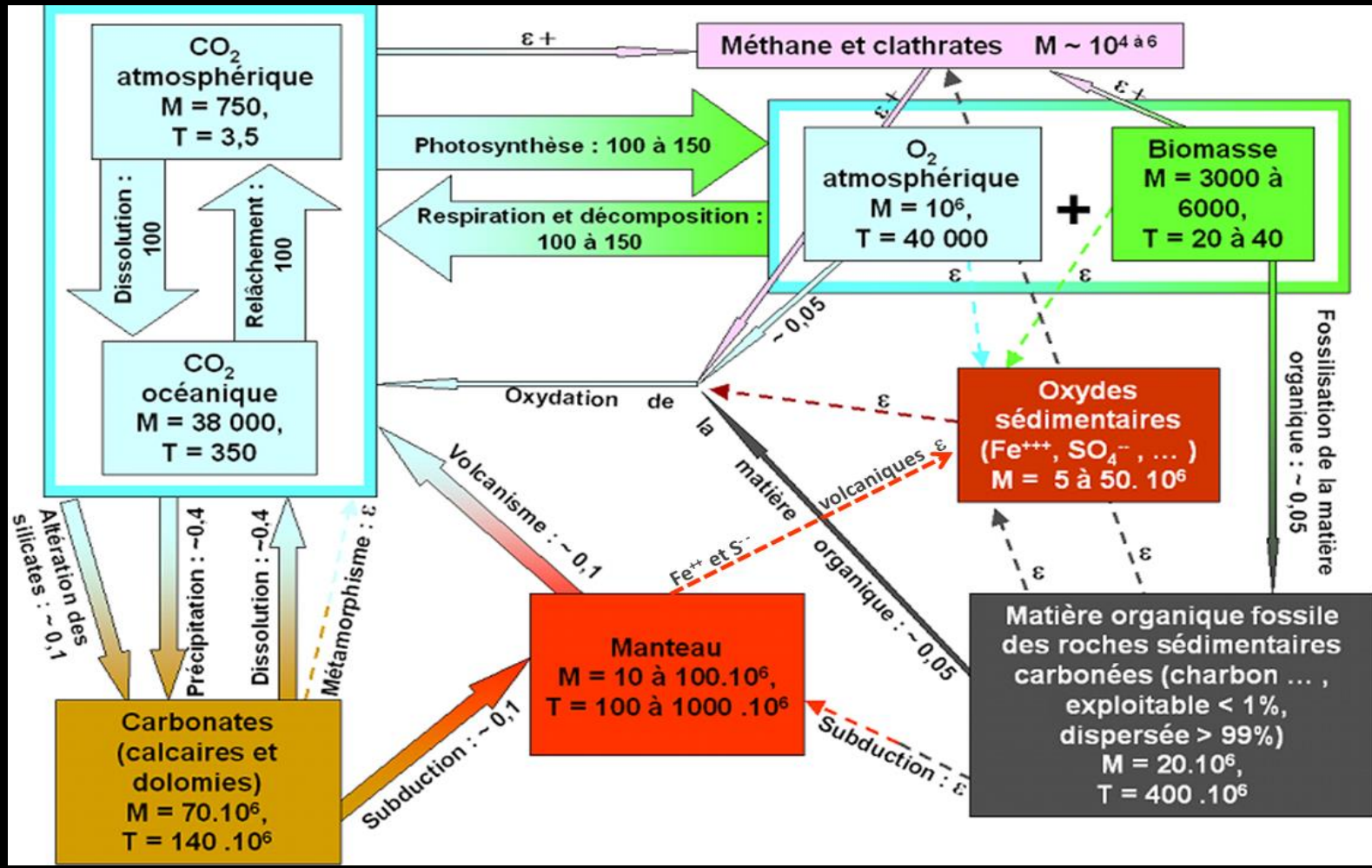
L'altération « pompe » d'autant mieux le CO₂ que la roche est riche en silicates calcique (plagioclases, pyroxènes, amphiboles ...). L'altération d'un basalte « pompe » plus de CO₂ que l'altération d'un granite et autres roches classiques des continents.



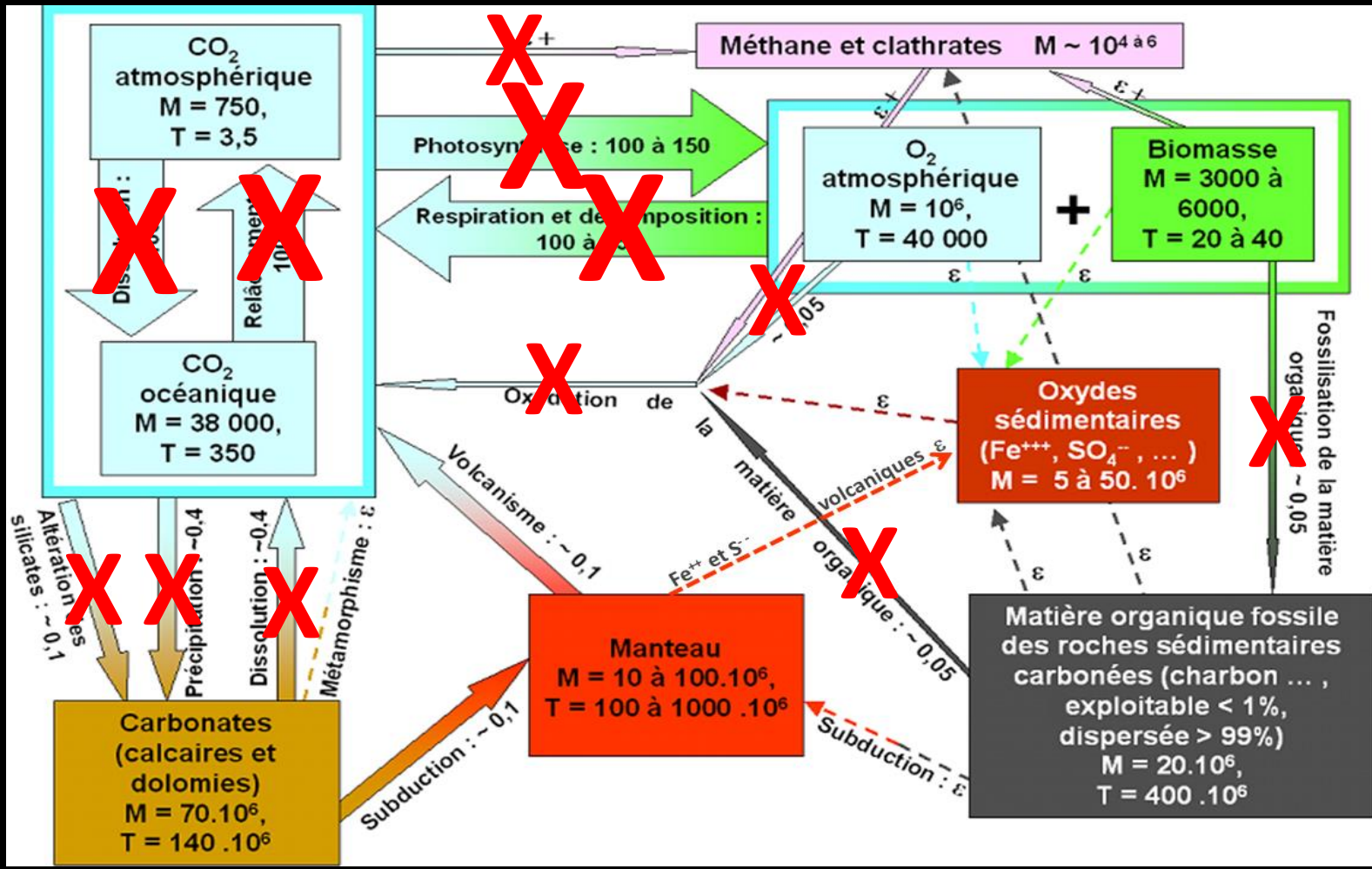


Augmentation de l'altération → augmentation de la pompe à CO_2 , baisse du CO_2 atmosphérique, baisse de l'effet de serre et de la température, et le phénomène s'emballe, car une fois que les glaciations ont dépassé une certaine ampleur, l'effet albédo prend le dessus.

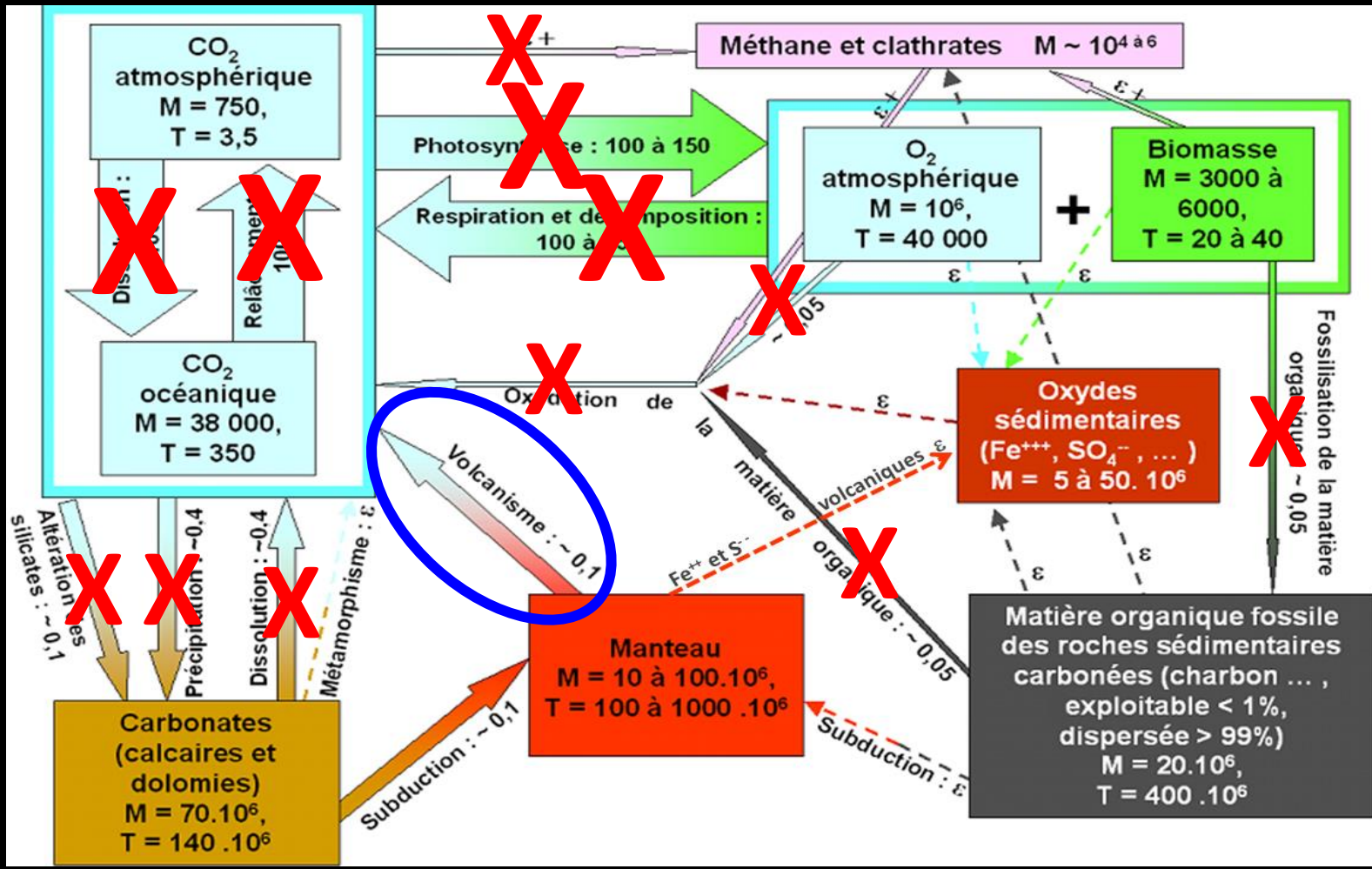
**Comment est-on sorti de cette Terre « boule de neige » ?
 Une terre blanche renvoie vers l'espace toute l'énergie
 reçue du soleil et le froid aurait dû durer éternellement.
 Mais à cette époque, dans le cycle du C, tout était «figés».**



A cette époque, dans le cycle du C, tout était « figés ». Presque toutes les flèches étaient sub-nulles, sauf ...



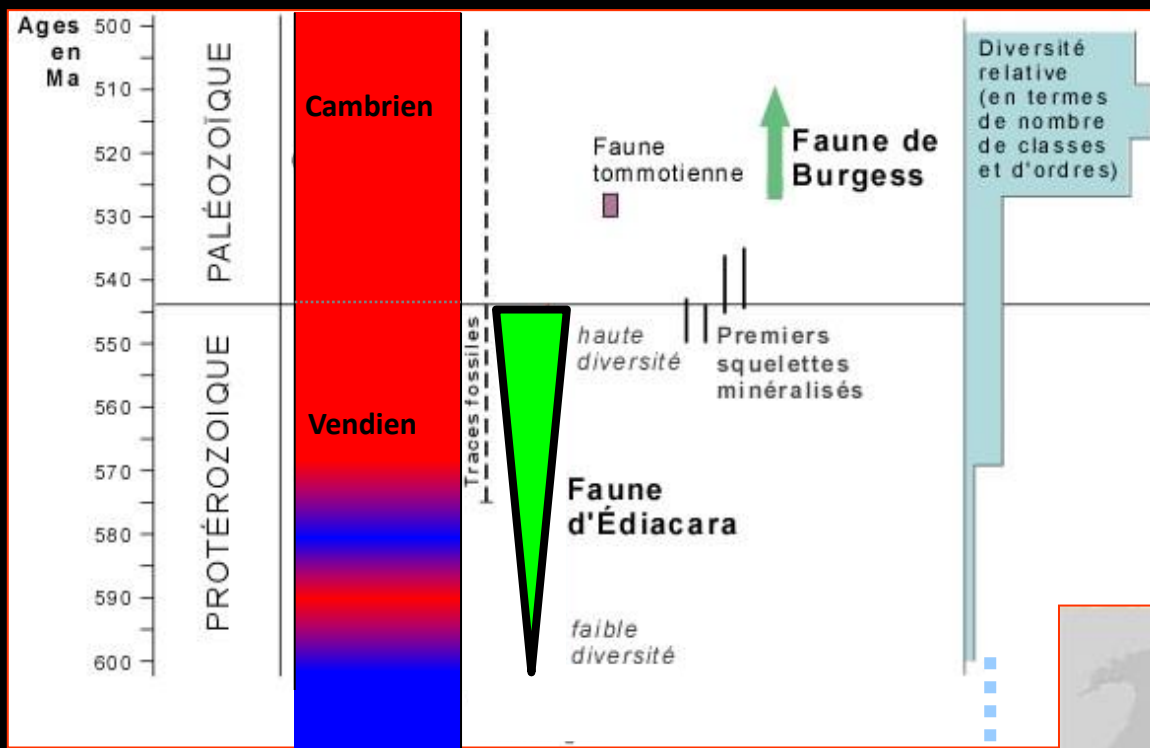
A cette époque, dans le cycle du C, tout était « figés ». Presque toutes les flèches étaient sub-nulles, sauf ... le volcanisme qui nous a fait sortir de cette glaciation grâce à son CO_2 (merci l'effet de serre !).



Or, 600-580 Ma, la fin de ces épisodes, partout dans le monde, c'est l'explosion de la diversité des métazoaires avec la faune dite d'Ediacara (à ne pas confondre avec la

faune de Burgess).

C'est sans doute plus qu'une coïncidence.





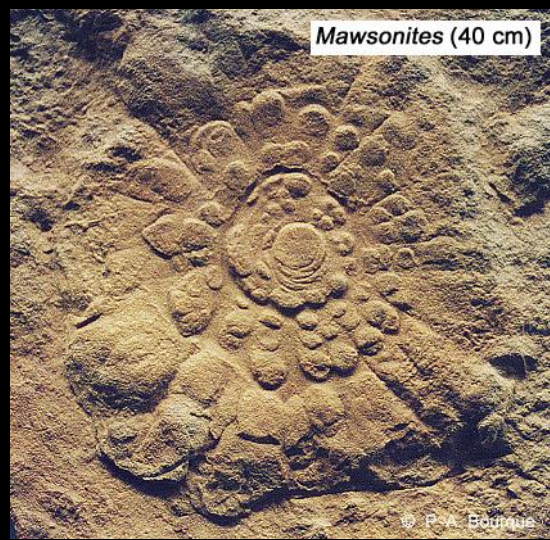
Dickinsonia

1 cm



Spriggina

© P.-A. Bourque



Mawsonites (40 cm)

© P.-A. Bourque



© P.-A. Bourque

Charnia



Helminthopsis



Ediacara

© P.-A. Bourque



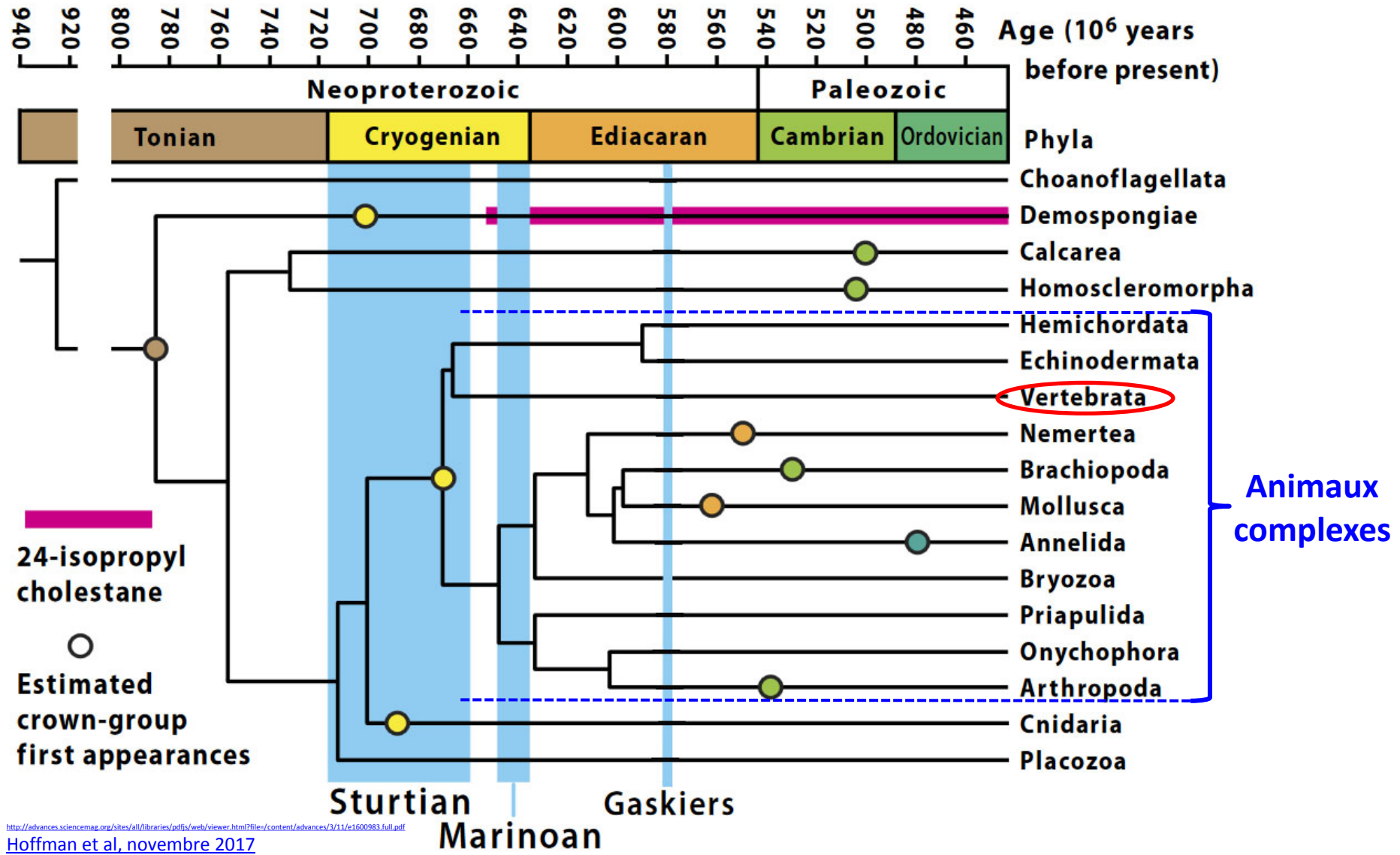
Tribrachidium

© P.-A. Bourque

La faune d'Ediacara, le monde des premiers métazoaires complexes (bien que souvent énigmatiques). Il y a aussi une « explosion » des algues et du phytoplancton.



Les boules de neige ont sans doute détruit un fort pourcentage de la vie de l'époque, majoritairement unicellulaire. Et comme à chaque crise, des survivants déjà présents mais auparavant « inhibés » ont profité du vide laissé par la crise pour se développer. Les métazoaires (dont nous) seraient-ils là sans la Rodinia, sans les crises volcaniques ... ? Merci la géodynamique interne protérozoïque !



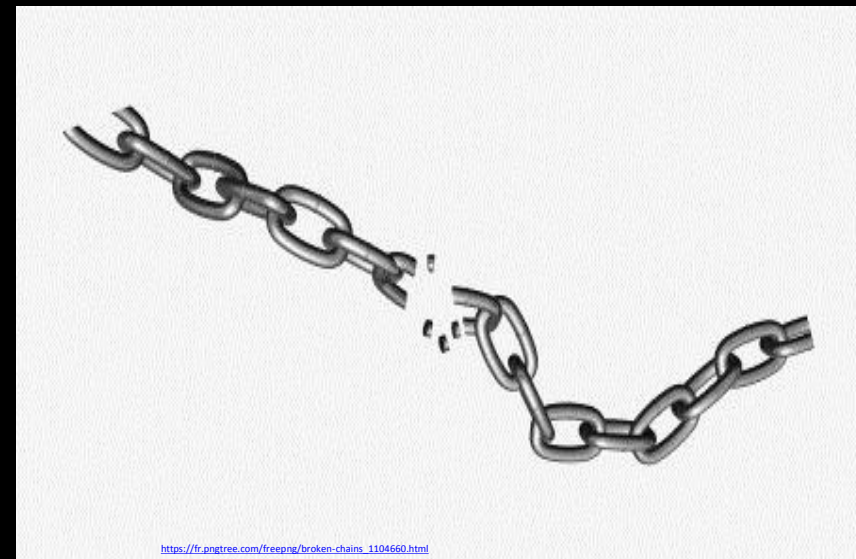
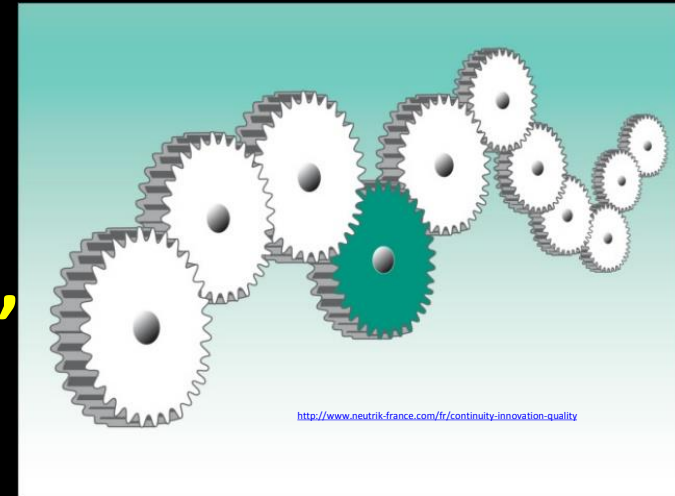
Un arbre phylogénétique un peu plus élaboré !

Nous, animaux complexes, serions bien les « enfants » de la déglaciation sturtienne !

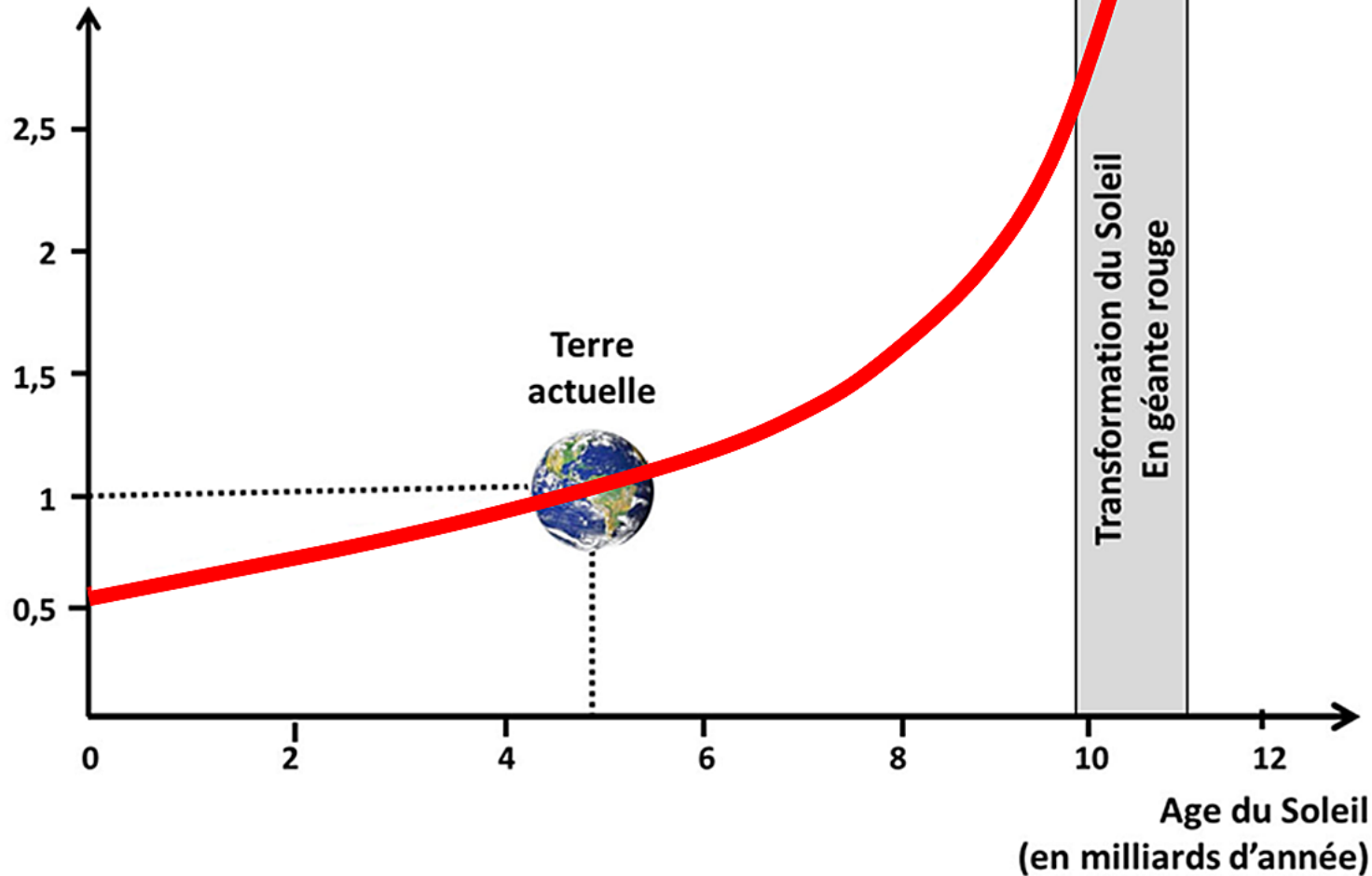
Et avant 700 Ma ?

**Il y a des « choses » qui évoluent « régulièrement »,
comme la puissance du soleil qui
monte, le CO₂ qui baisse ...**

**Il y a des « choses » qui changent
brusquement, à coup de « crises »,
par exemple la géodynamique
interne (volcanisme,
tectonique des plaques ...),
l'oxygène atmosphérique ...**



Puissance rayonnée
par le soleil
(1 = $3,2 \cdot 10^{26}$ W)

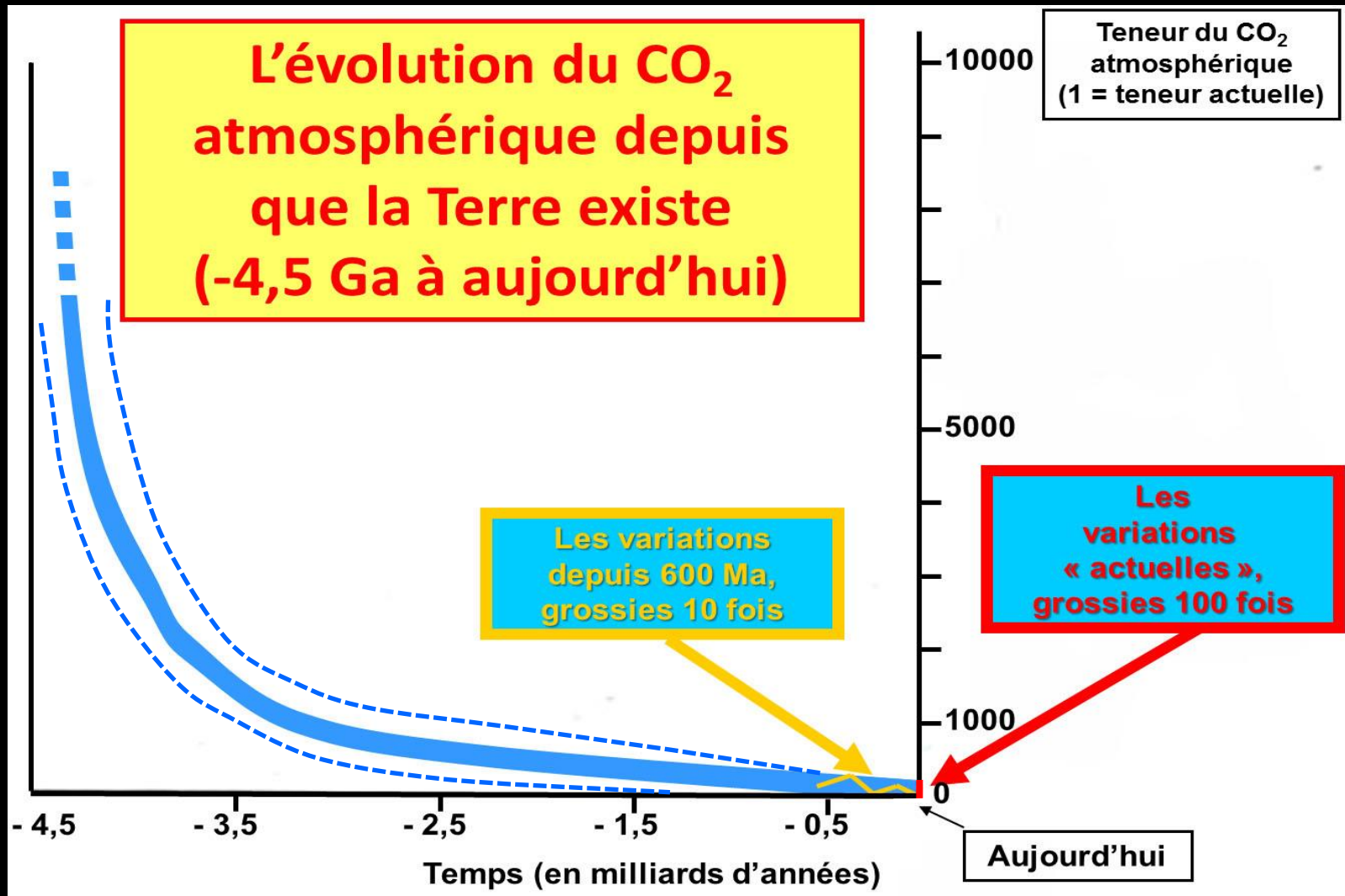


Depuis 4,5 Ga, la puissance du soleil augmente d'environ 10% par milliard d'années. Et les astronomes nous disent que ça va continuer. Mais avant, le soleil était « faiblard ».

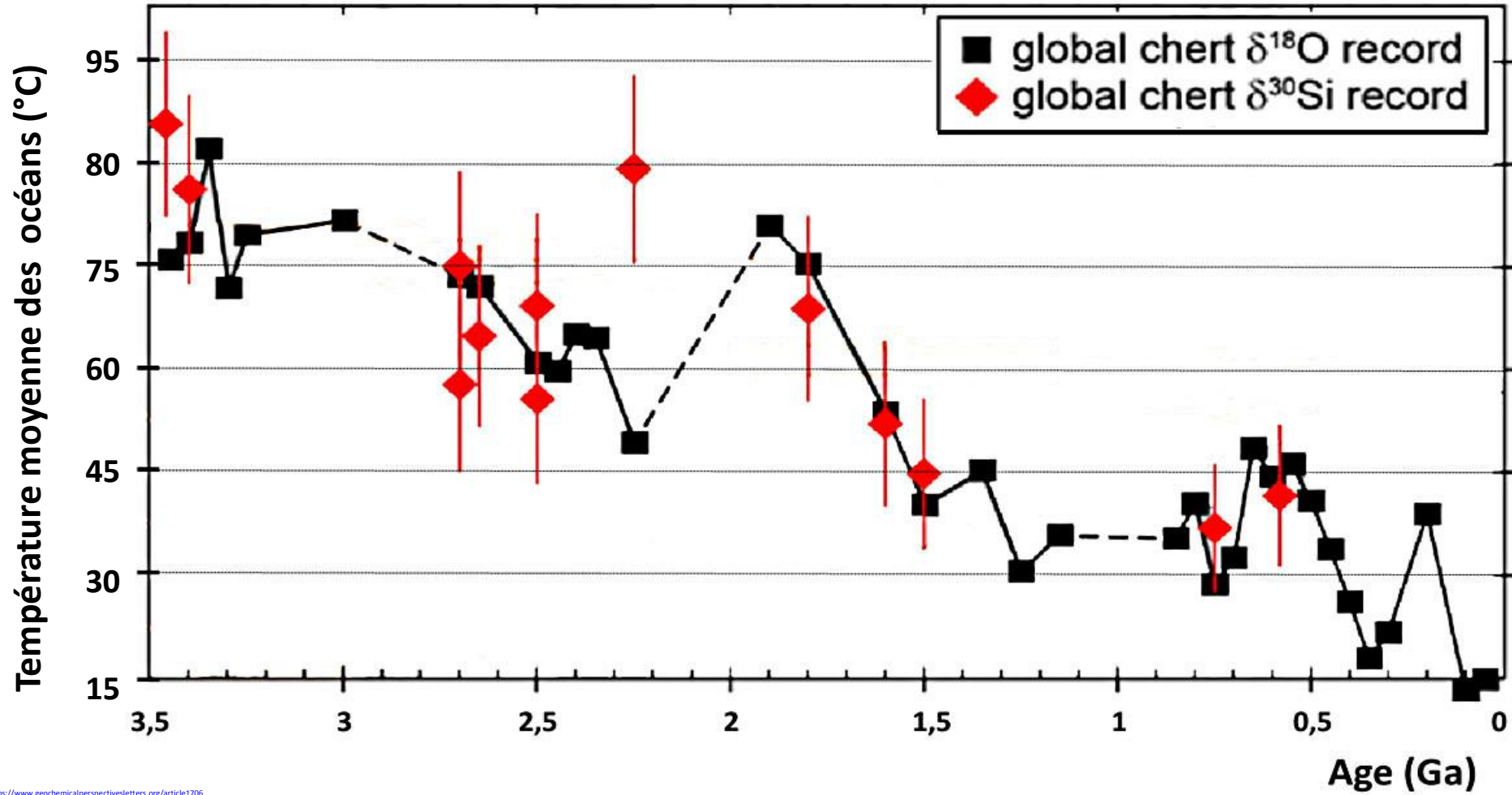


L'étude des roches sédimentaires même très anciennes, en contact soit avec l'atmosphère soit avec l'océan, permet de remonter à divers paramètres de l'époque, comme la température, l'ordre de grandeur du CO_2 atmosphérique ...

Fentes de dessiccation et traces de vaguelettes fossiles de - 3,2 Ga (Af. Du Sud)

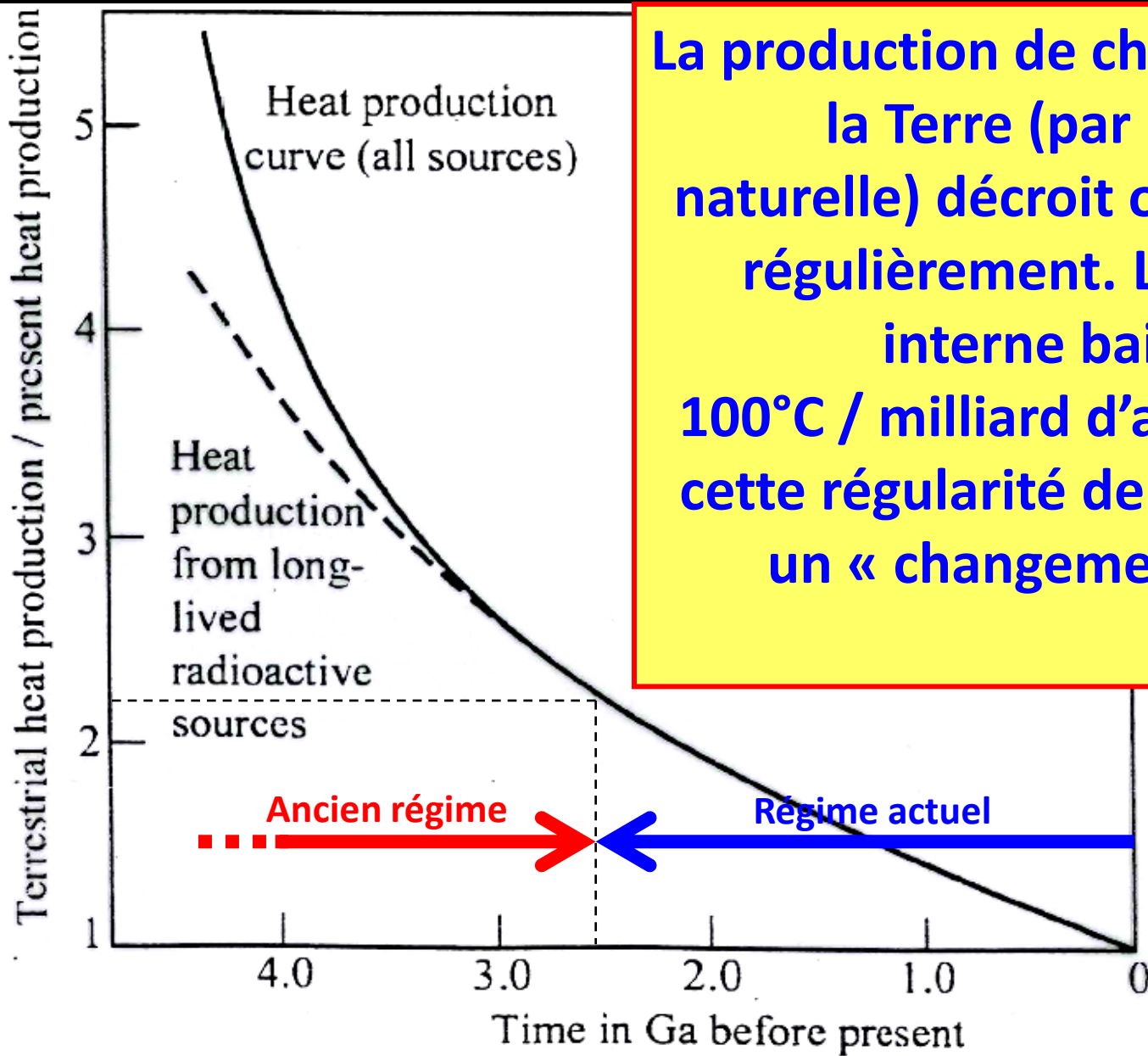


Aux irrégularités (et incertitudes) près, le CO₂ atmosphérique est approximativement divisé par 10 tout les milliards d'années (décroissance exponentielle), parce qu'il y a de plus en plus de CO₂ « piégé » sous forme de calcaires.



Mais le CO_2 baisse plus que le soleil n'augmente. Aux irrégularités (et incertitudes) près, la température moyenne de l'océan baisse (de + 75 à + 15°C). On a perdu une soixantaine de degrés depuis 3,5 Ga. La vie a débuté dans un bouillon de culture chaud !

La production de chaleur interne à la Terre (par la radioactivité naturelle) décroît on ne peut plus régulièrement. La température interne baisse environ de 100°C / milliard d'années. Malgré cette régularité de la baisse, il y a un « changement de régime » vers – 2,5 Ga.



Production actuelle :
46. 10¹² W

**Les roches volcaniques
« avant » et « après » ne
sont pas les mêmes (ici des
TTG). Le type des
déformations non plus.**



**La surface des
continents, et
la tectonique
des plaques
elle-même,
sont
différentes :**

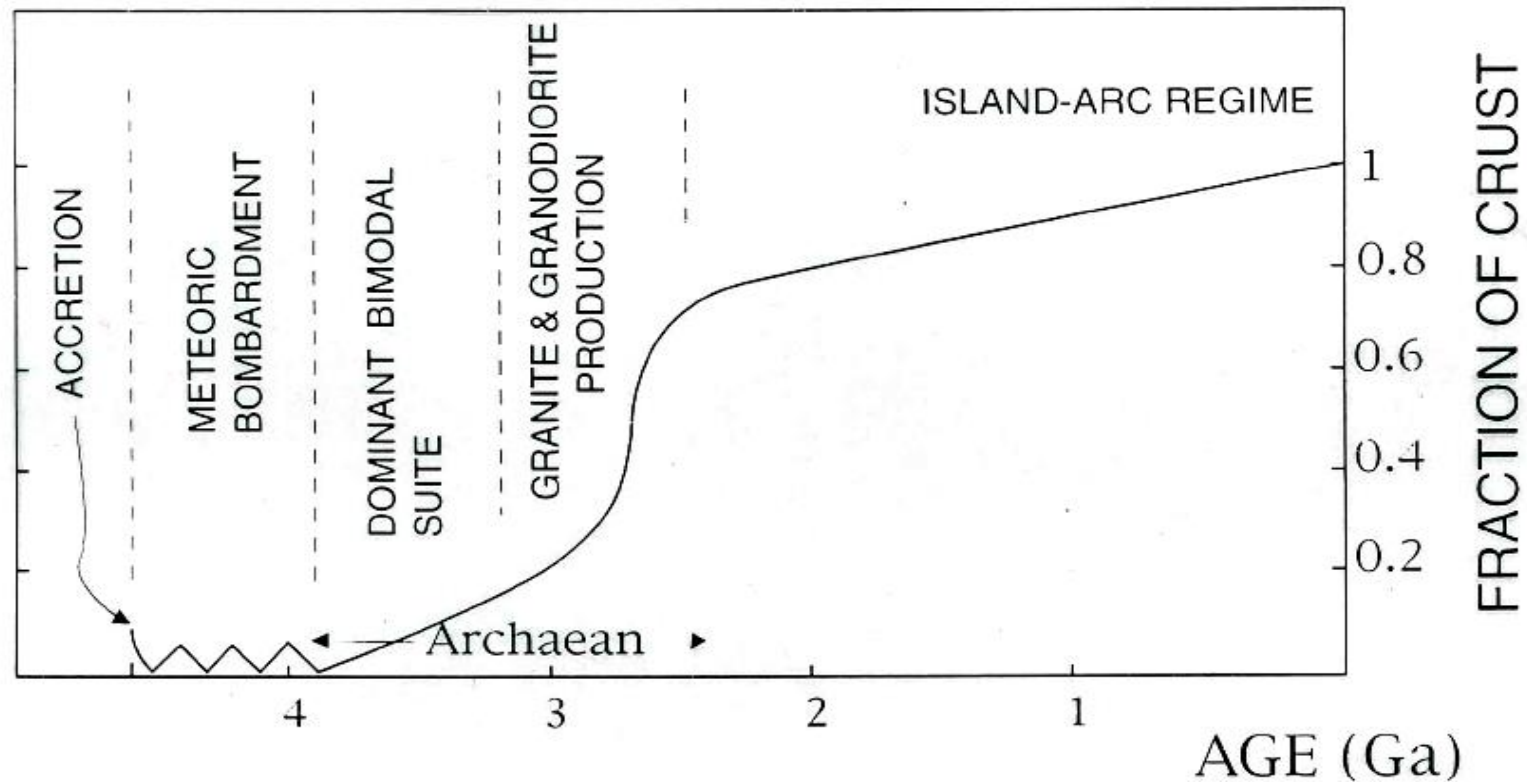
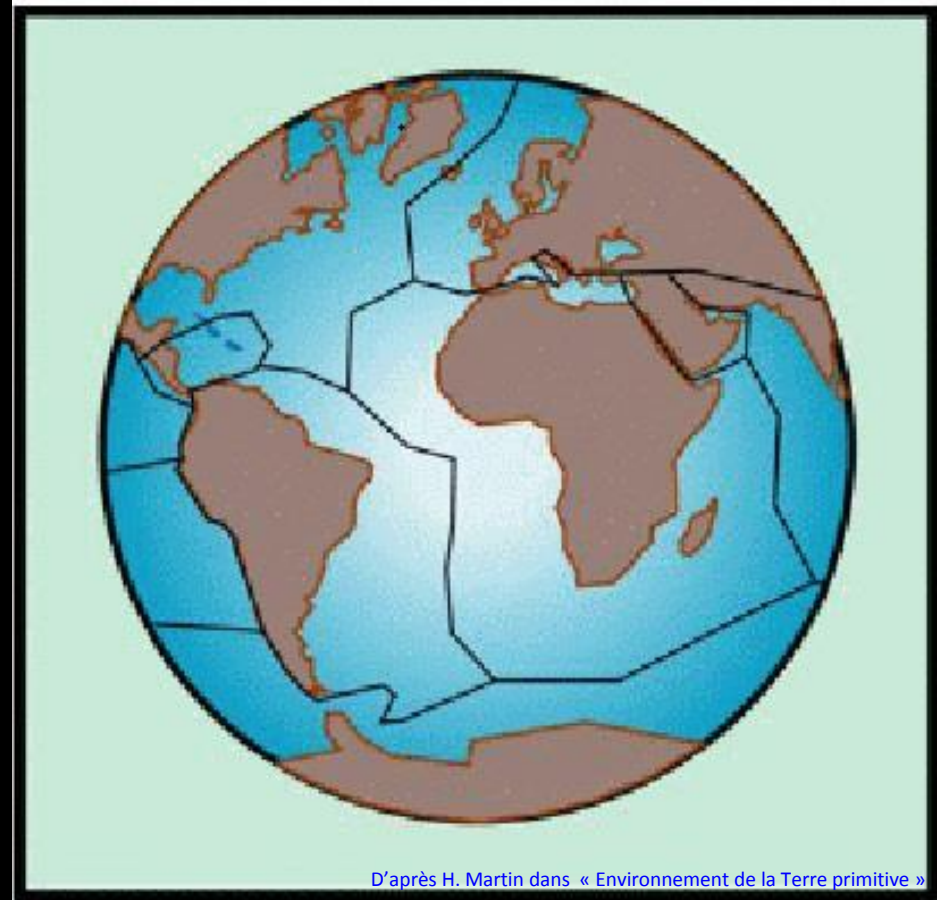


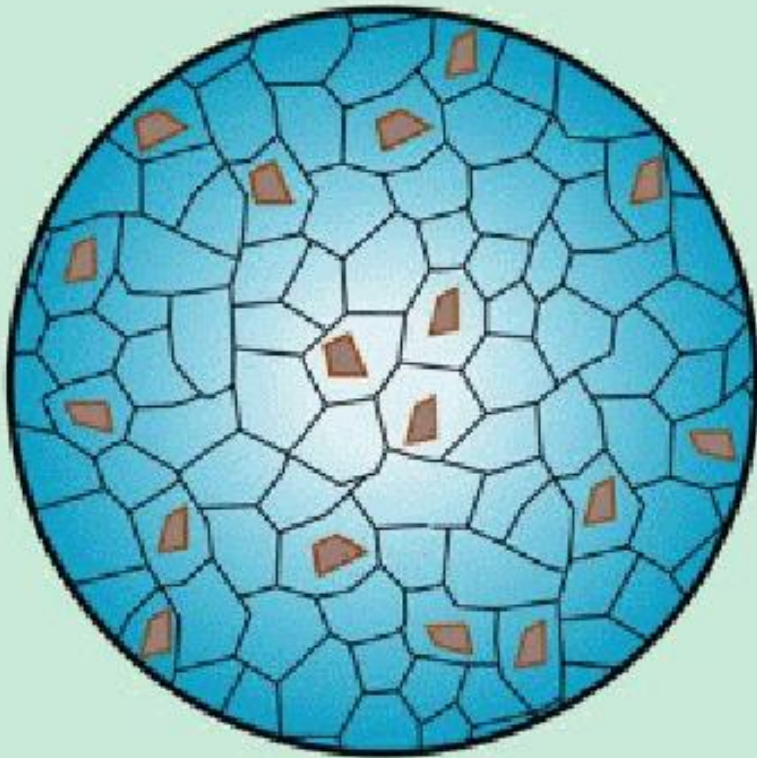
Fig. 1. A generalized model for the growth of the continental crust throughout geologic time based on a selection of crustal growth models. (Reymer & Schubert 1984; Armstrong 1981; Fyfe 1978; Hurley 1968; Hurley & Rand 1969; Veizer *et al.* 1979; Taylor & McLennan 1985).

Les modèles classiques (on discute encore beaucoup) montrent l'évolution du volume (et de la surface) de la croûte continentale au cours du temps, avec production massive de croûte par magmatisme vers - 2,7 / -2,5 Ga.

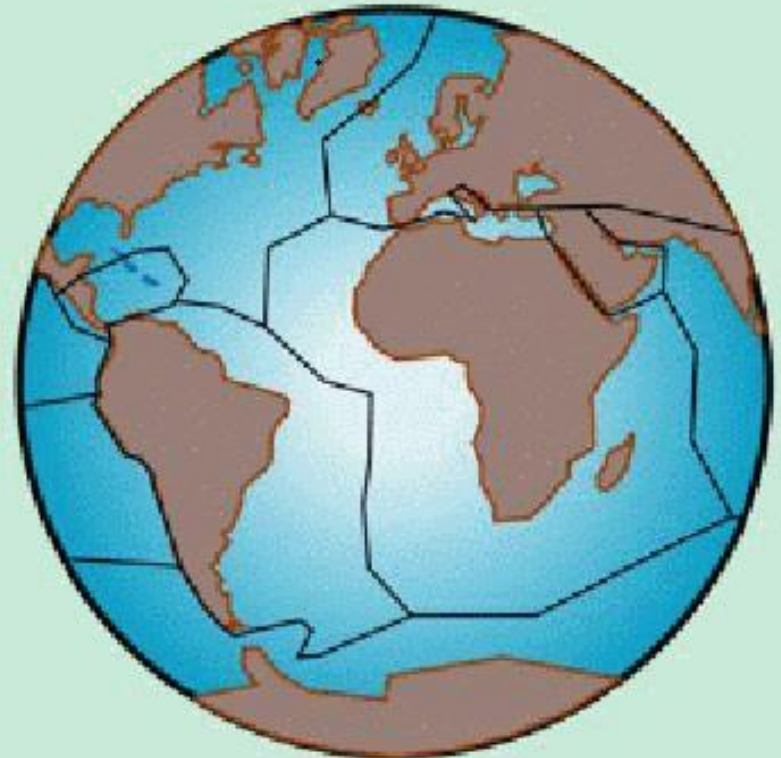


D'après H. Martin dans « Environnement de la Terre primitive »

La Terre aujourd'hui : plaques de grande taille, peu nombreuses, lentes, portant « beaucoup » de continents (3/7 de la surface de la Terre), volcanisme « tranquille » ...



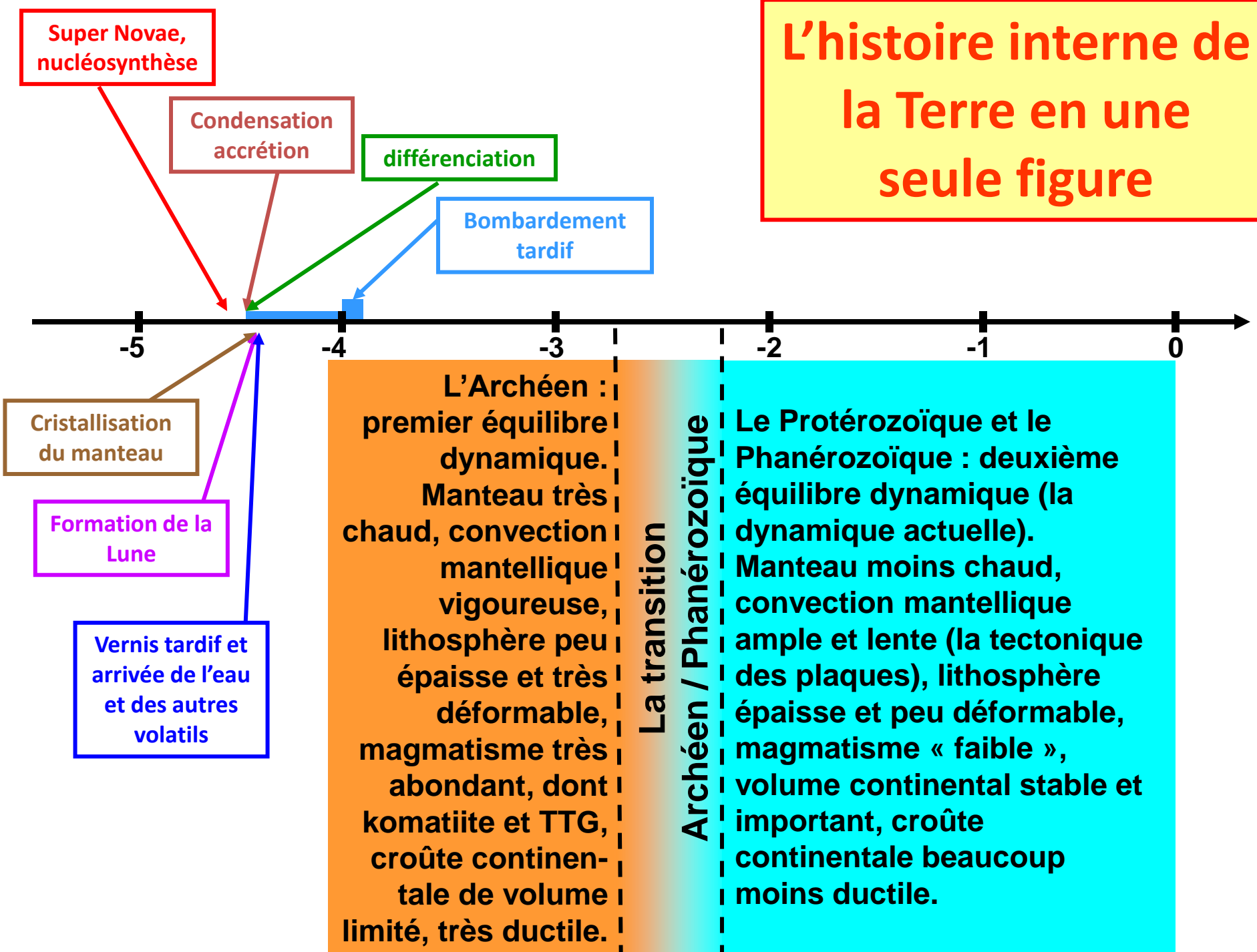
La Terre avant -2,5 Ga : petites et nombreuses « plaquettes », beaucoup plus rapides, portant que des petits continents (< 1/7), volcanisme exubérant et particulier ...



D'après H. Martin dans « Environnement de la Terre primitive »

La Terre aujourd'hui : plaques de grande taille, peu nombreuses, lentes, portant « beaucoup » de continents (3/7 de la surface de la Terre), volcanisme « tranquille » ...

L'histoire interne de la Terre en une seule figure





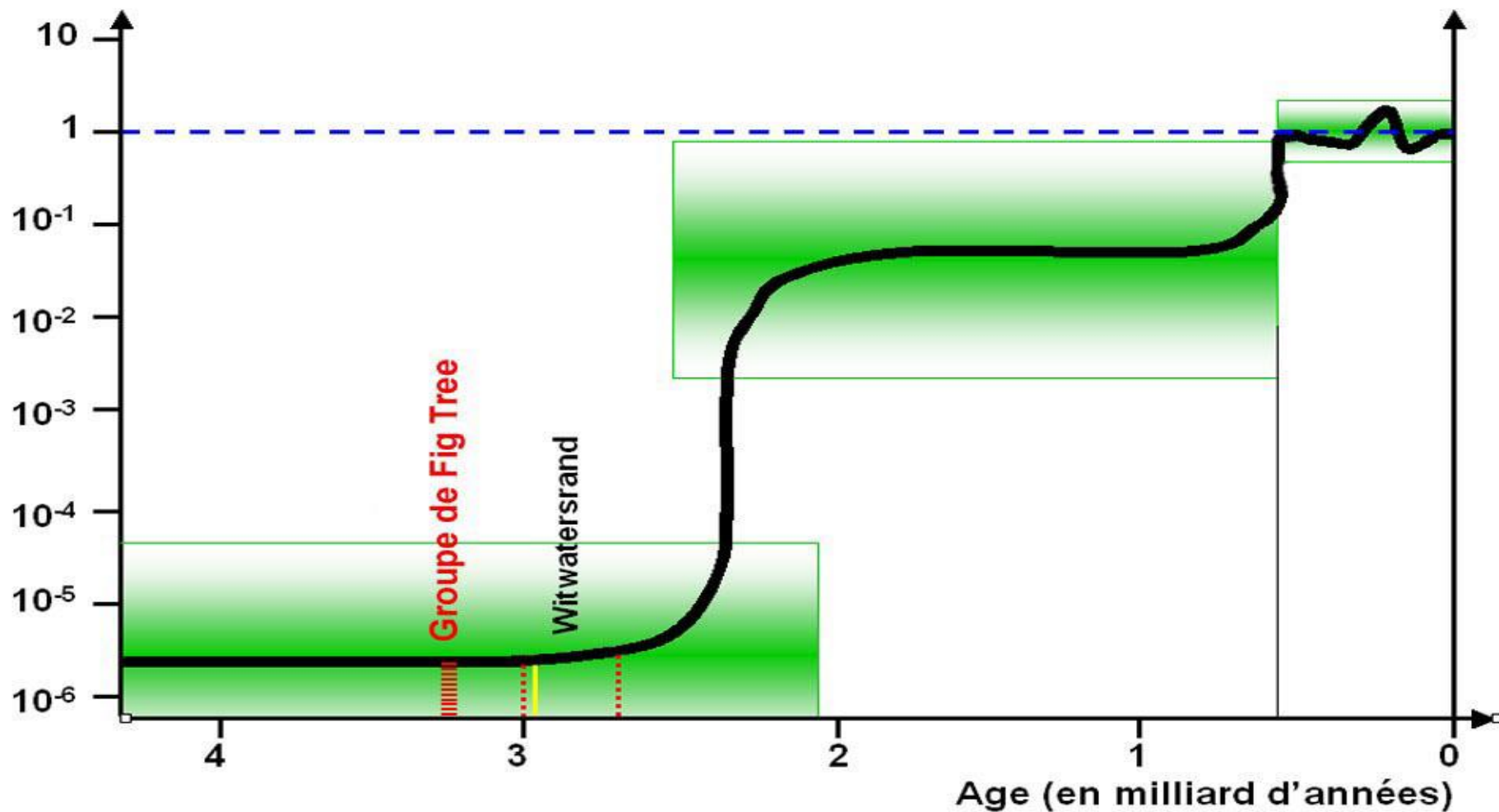
Photographie : Pierre Thomas



Photographie : Pierre Thomas

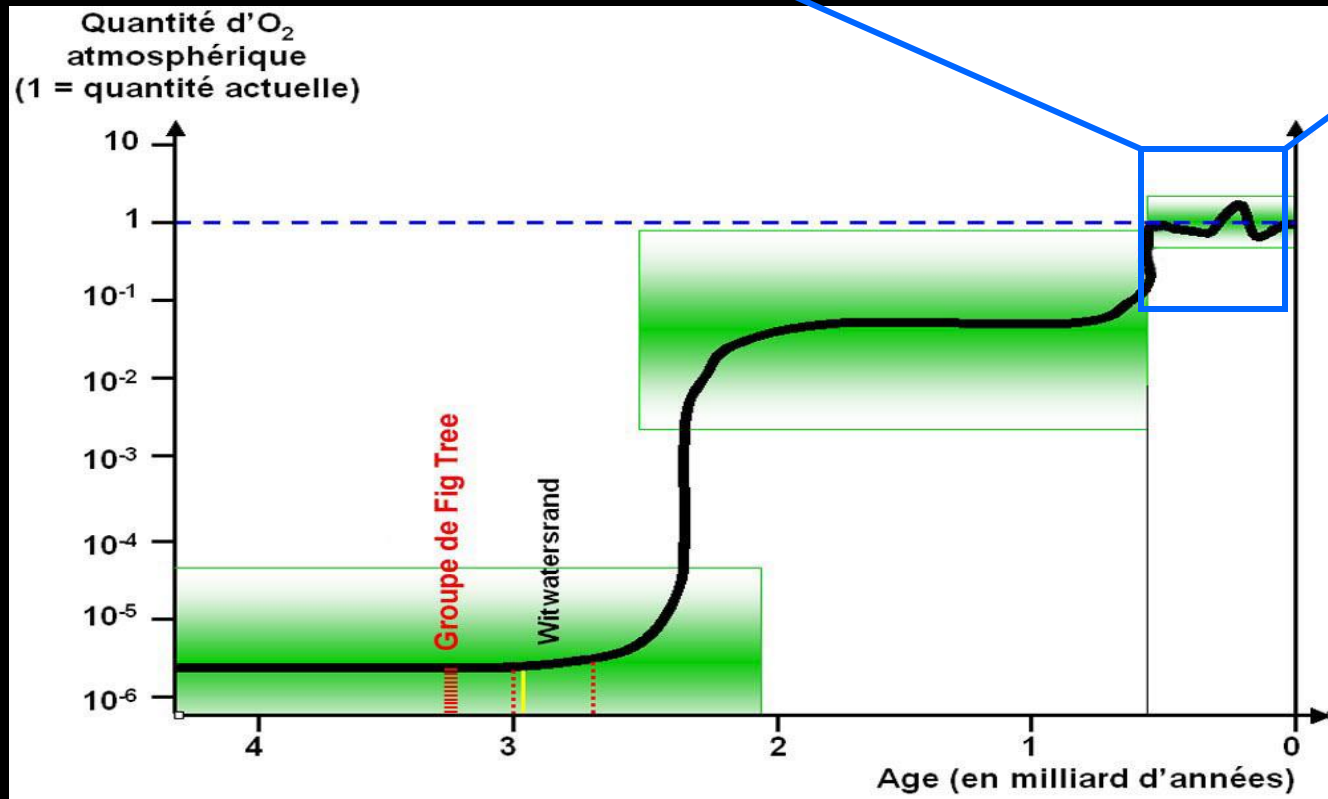
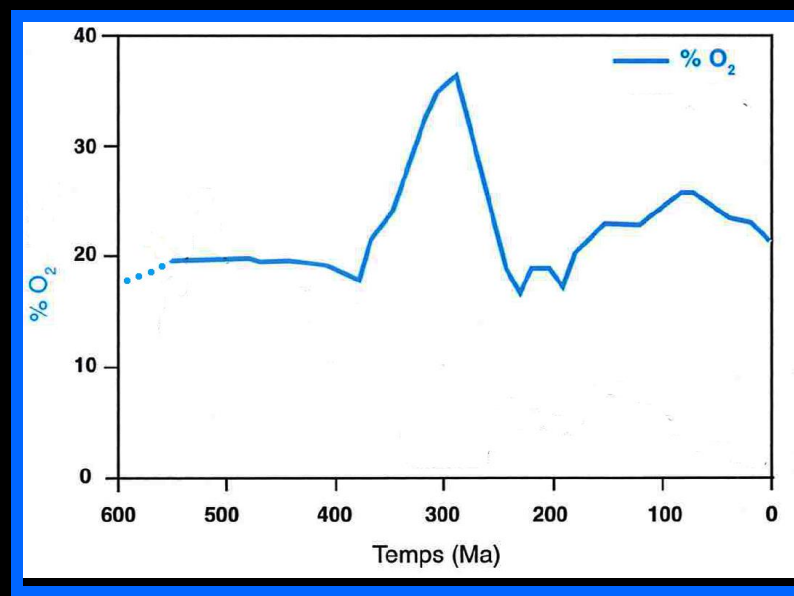
On peut retrouver la teneur de l'atmosphère en di-oxygène en étudiant certaines roches riches en oxydes (comme ici) ou en sulfures de fer.

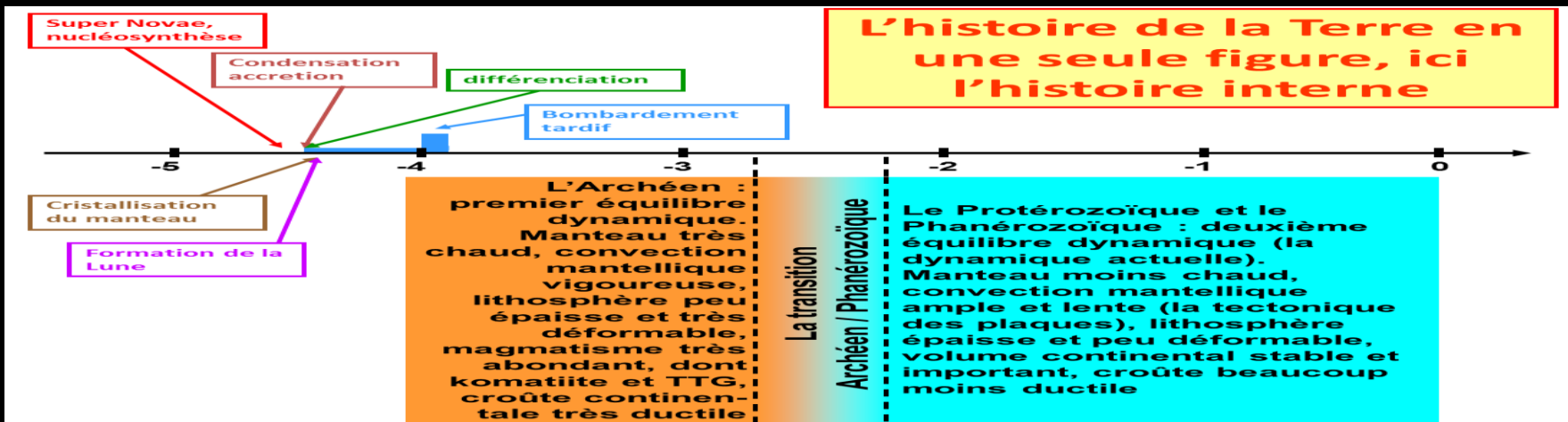
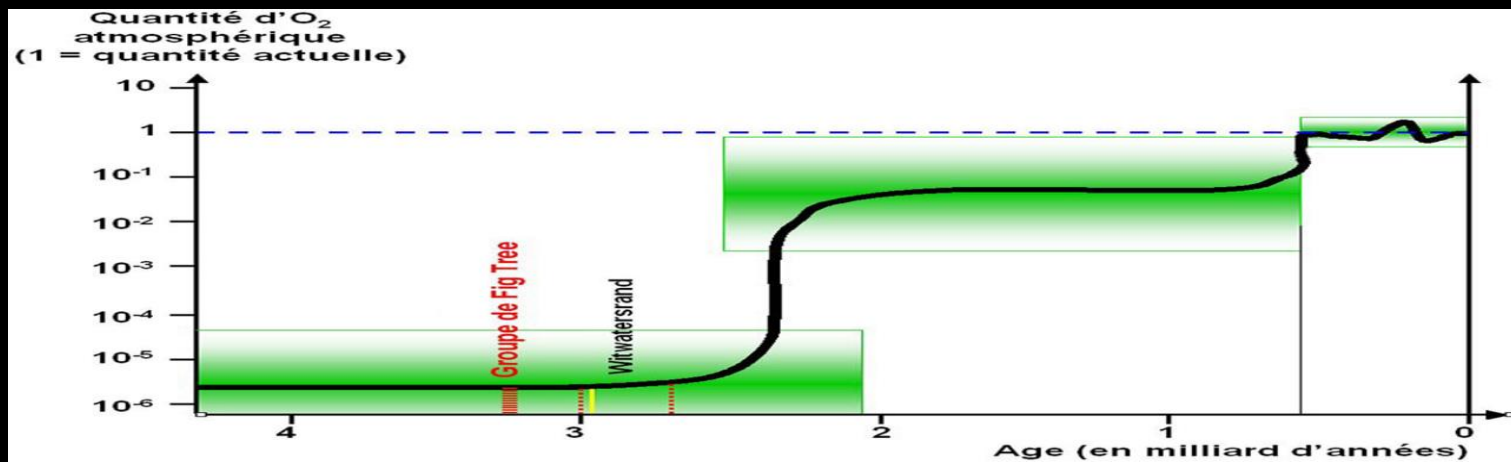
Quantité d'O₂
atmosphérique
(1 = quantité actuelle)



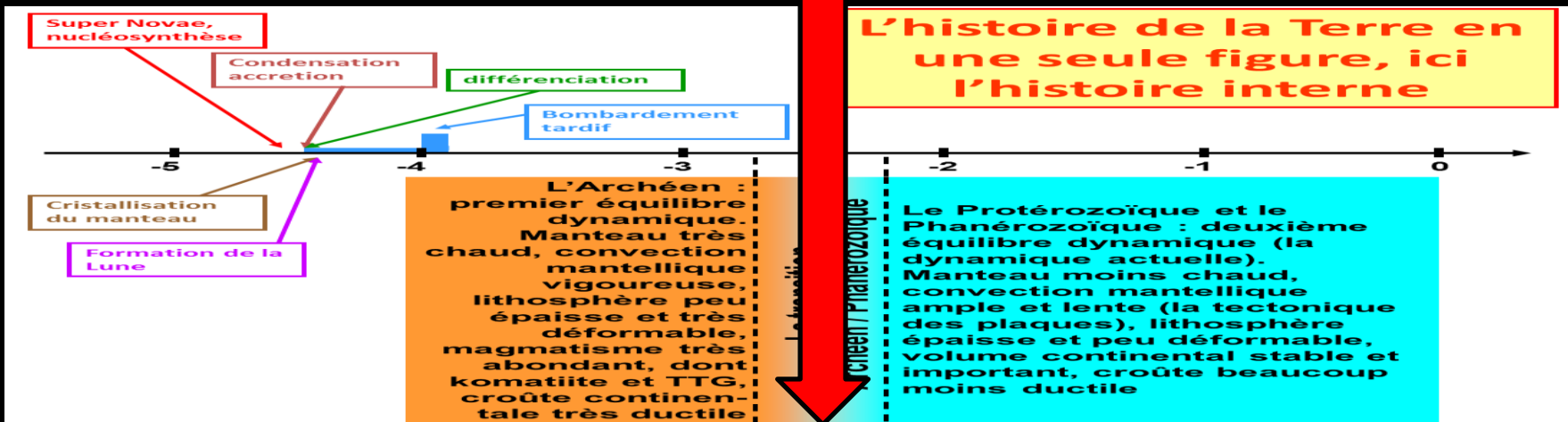
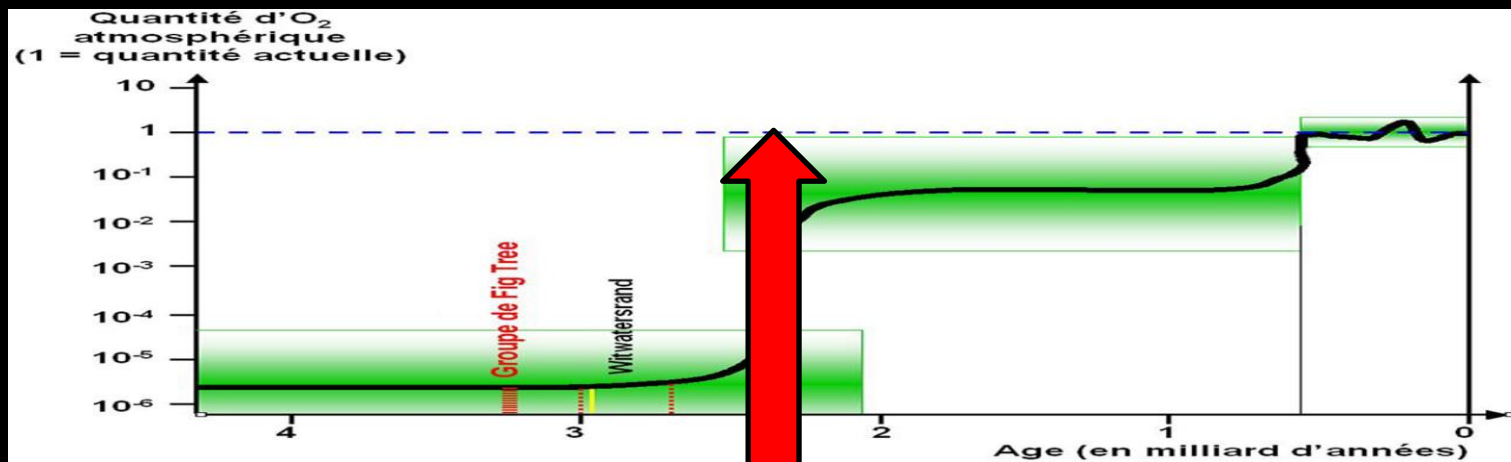
Voilà le résultat de ce genre d'étude (échelle log) : une « explosion » majeure de l'O₂ vers -2,5 Ga et sans doute une autre, moins forte, vers -0,6 Ga.

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

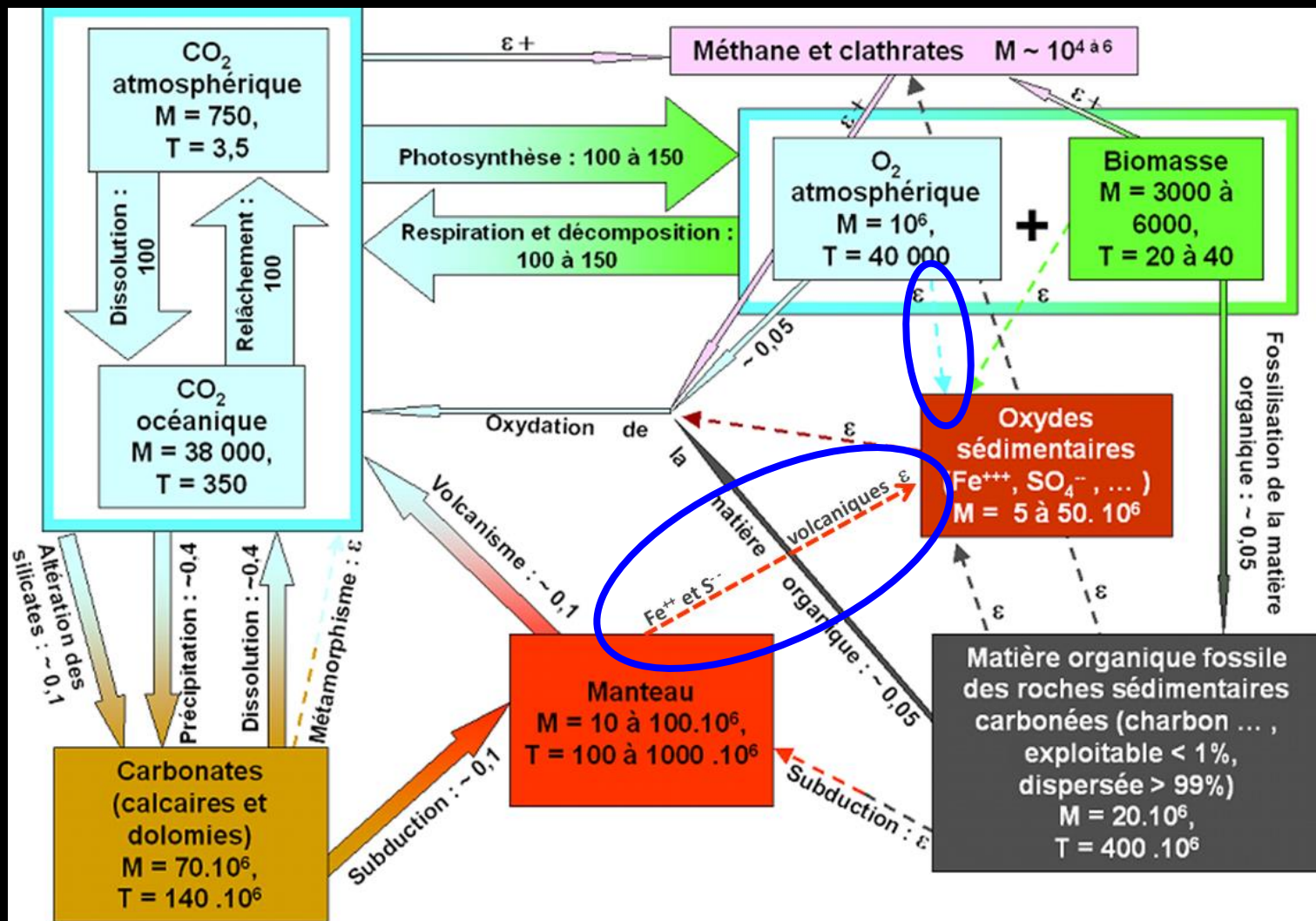




Si on juxtapose les deux figures résumant l'histoire de la dynamique interne (vue il y a quelques mn) et l'histoire de l'O₂ atmosphérique ...



Si on juxtapose les deux figures résumant l'histoire de la dynamique interne (vue il y a quelques mn) et l'histoire de l'O₂ atmosphérique ... on voit que les deux révolutions sont simultanées. Est-ce un simple hasard, ou y a-t-il une vraie corrélation ?



La diminution du volcanisme diminue l'apport de réducteur (Fe⁺⁺ et S⁻), ce qui permet, toutes choses égales par ailleurs, à l'O₂ de s'accumuler. Est-ce la seule cause de l'apparition de l'O₂, une cause majeure, mineure, une simple coïncidence ?

Bourane ZENAIDI KARRAY

**LE MARCHÉ
MONDIAL
DES PHOSPHATES
ET DES ENGRAIS
PHOSPHATES**

2^e édition
actualisée

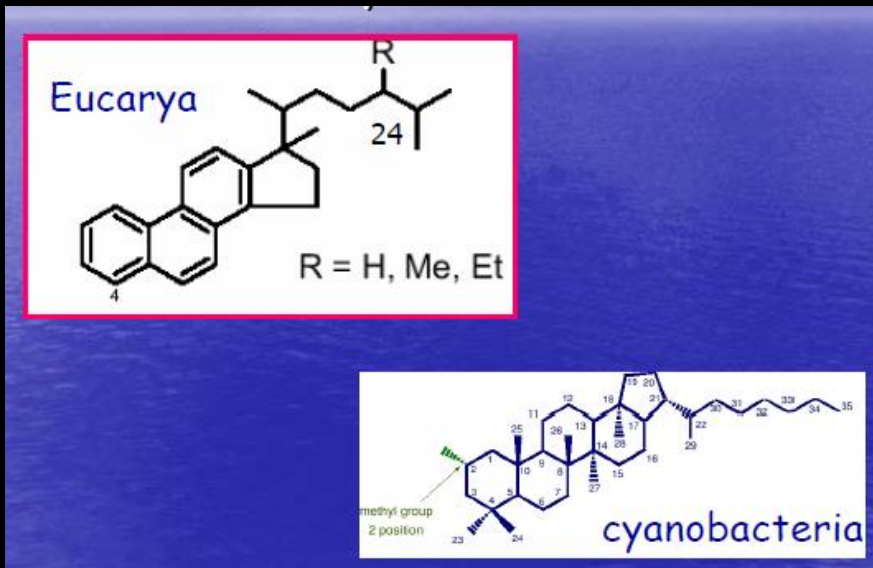
« Bibliothèque des Mémoires Premières »
Collection dirigée par Philippe Chaline

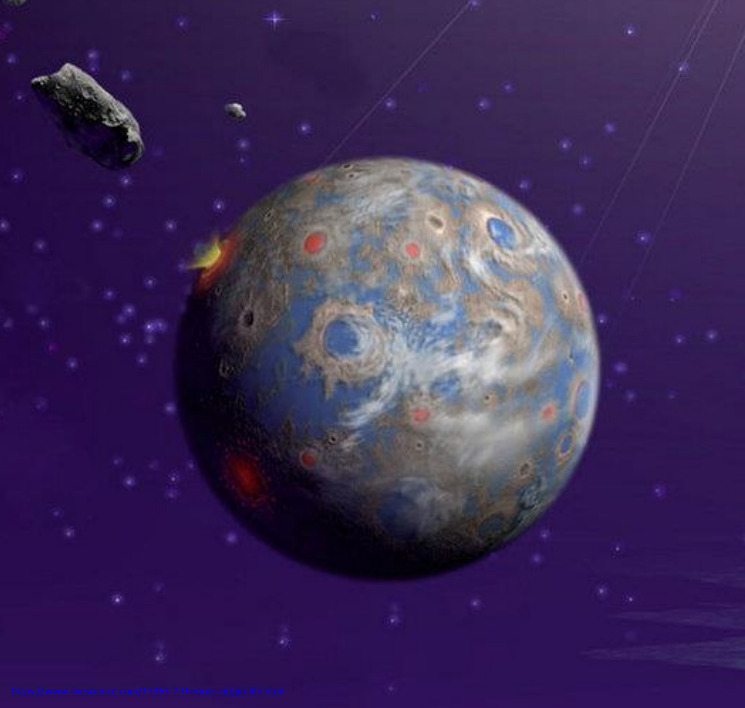


Autre cause possible de cette « explosion » de l'O₂ à la même époque : « l'explosion » de la surface des continents. L'altération des continents libère beaucoup plus de phosphates que l'altération des basaltes ou des péridotites. Or le manque de phosphates dans l'océan est un des facteurs limitant de la vie photosynthétique marine.

Accroissement continental → accroissement des phosphates marins → accroissement de la photosynthèse → accroissement de la biomasse → accroissement de la biomasse « fossilisée » → accroissement de l'O₂ atmosphérique.

Et encore une coïncidence : les plus vieilles traces indirectes de l'apparition des eucaryotes (les cellules à noyau), les stéranes, issus de la dégradation de composés membranaires exclusives des eucaryotes) datent de -2,7 Ga, le début de cette «période révolutionnaire». Je laisse à votre sagacité personnelle le soin de conclure sur « coïncidence or not coïncidence », « hasard ou nécessité » ?





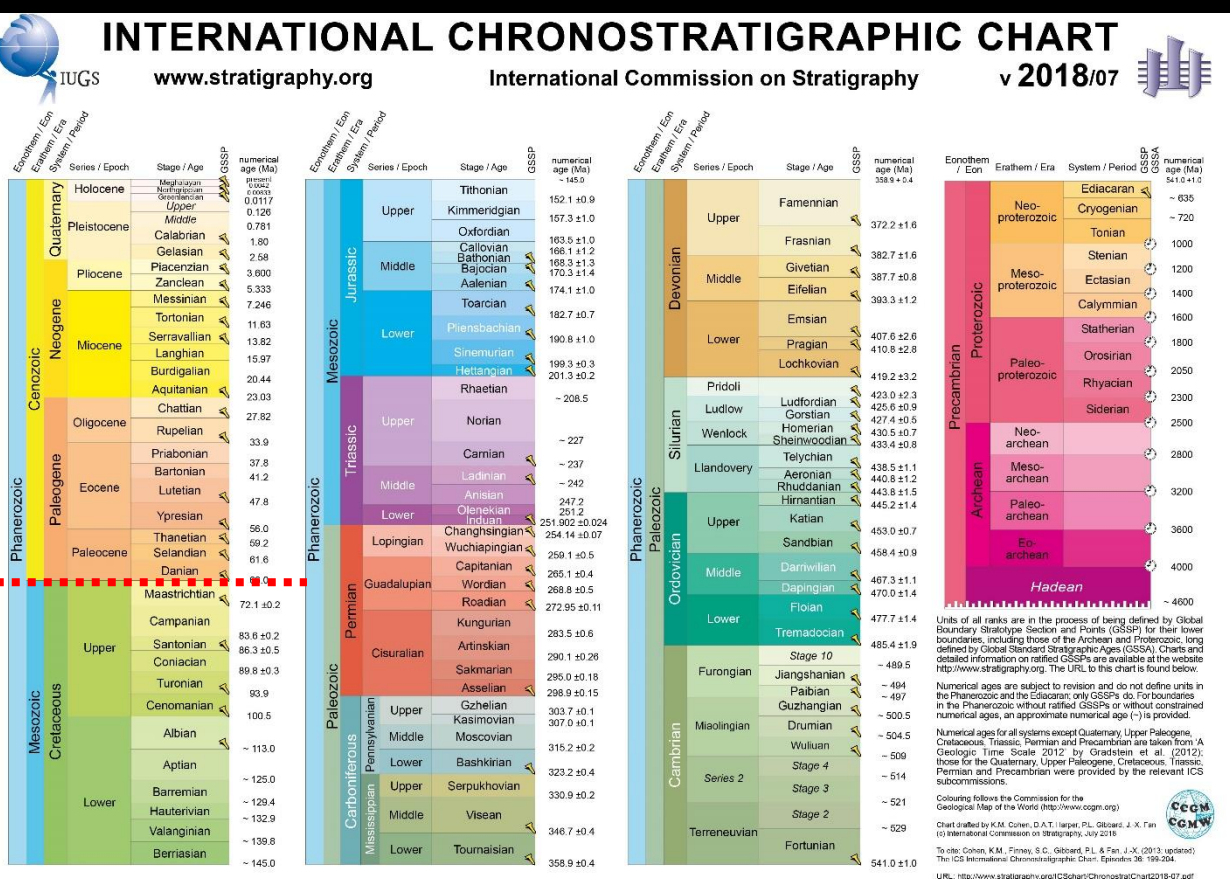
Il nous resterait maintenant à étudier les 500 premiers millions d'années de la Terre, avant les plus vieilles roches trouvées à ce jour. Ce sera pour une autre fois.

Et puis il nous reste à parler de l'avenir, exercice plus périlleux que de parler du passé !



D'abord, l'avenir immédiat : l'Anthropocène.
L'humanité va-t-elle tellement marquer la planète
que des géologues d'un futur très lointain créeront
un « Anthropocène », comme nous avons créé un
Eocène, Miocène, Pléistocène ...

On change d'époque
géologique quand il
arrive des
événements
importants qui
laissent des traces
géologiques très
répandues (extinction,
variations
climatiques ...).



Units of all ranks are in the process of being defined by Global Boundary Stratotype Section and Points (GSSP) for their lower boundaries, including those of the Archean and Proterozoic, long defined by Global Standard Stratigraphic Ages (GSSAs). Charts and detailed information on ratified GSSPs or without constrained numerical ages, an approximate numerical age (~) is provided.

Numerical ages for all systems except Quaternary, Upper Paleogene, Cretaceous, Triassic, Permian and Precambrian are taken from 'A Geological Time Scale 2012' by Gradstein et al. (2012); those for the Quaternary, Upper Paleogene, Cretaceous, Triassic, Permian and Precambrian were provided by the relevant ICS sub-commissions.

Colouring follows the Commission for the Geological Map of the World (http://www.cgmw.org)

Chart drafted by K.M. Cohen, D.A.T. Harper, P.L. Gibbard, J.X. Fan (c) International Commission on Stratigraphy, July 2018

To cite: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2018) updated: The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 40, 189-204.

URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSChart/ChronostratChart2018-07.pdf>

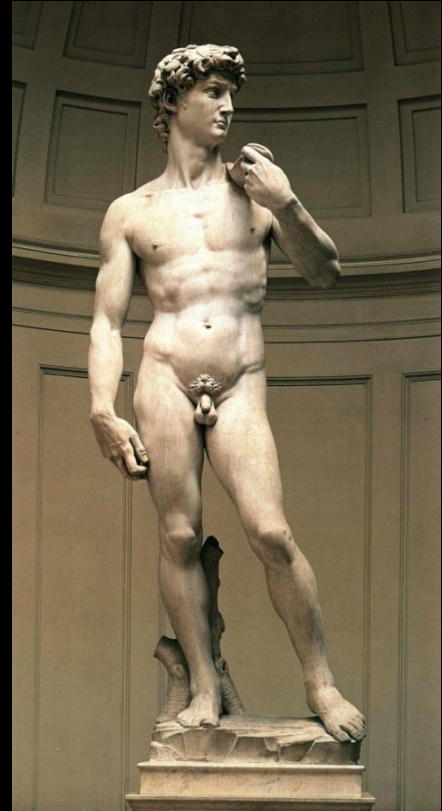
La 1^{ère} époque en « cène » commence il y a 66 Ma. Qu'est-ce qu'un géologue non humain verrait de notre passage sur Terre dans 66 Ma. Je dis non humain, car la durée de vie moyenne d'une espèce de mammifère est d'environ 1 Ma. Alors, dans 66 Ma, si on a des descendants, on aura « statistiquement » changé 66 fois d'espèce, ou alors on aura disparu sans descendant.



Un des plus vieux fossile de primate

descendant.

60 millions
d'années plus tard



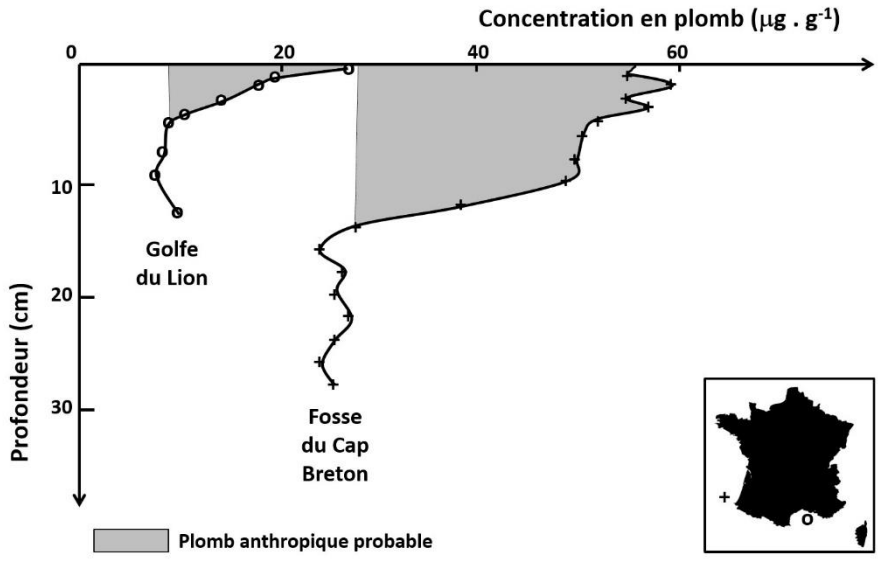
Une des ≈ 300 espèces actuelles de primate



Nos bâtiments ? Sauf dans les rares zones qui s'enfoncent pour des raisons géologiques (Venise, Nouvelle Orléans ...), ils auront été érodés en bien moins que 66 Ma !

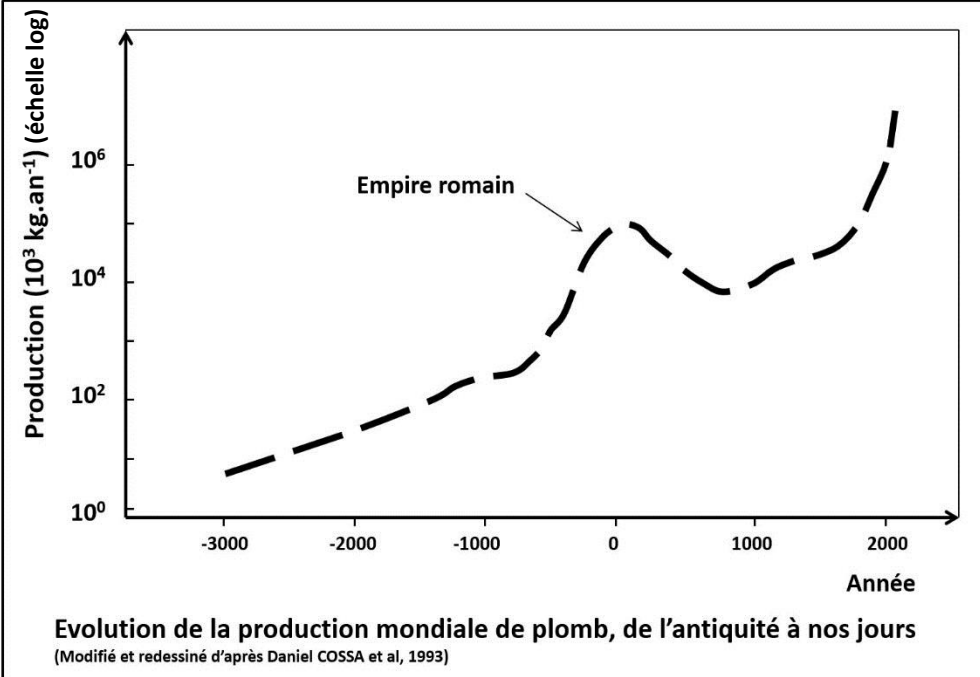


Nos déchets plastiques, métalliques, chimiques ... Certains dureront (et pollueront les écosystèmes pendant) des millénaires, mais pas des dizaines de millions d'années, sauf ... certains déchets « minéraux », comme les verres et céramiques ...



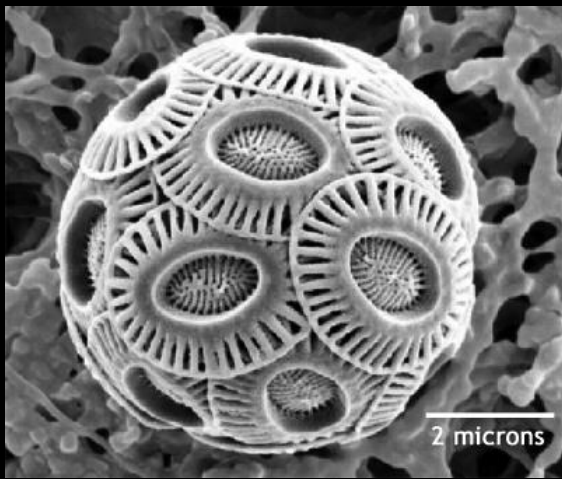
La pollution par les métaux lourds, ça, ça se verra (les déchets radioactifs, eux, ne le seront plus, ou du moins ne seront plus radioactifs dans 66 Ma) !

Il y aura une « couche à plomb » dans tous les sédiments datant de -66 Ma pour nos géologues du futur.



Et en plus d'un fort taux de métaux lourds, les sédiments côtiers reflèteront partout autour du monde la déforestation (depuis l'invention de l'agriculture), la construction des grands barrages ...





Et notre CO₂ ? Pourra-t-on voir, dans 66 Ma, que « notre » réchauffement est plus rapide et plus important que dans le million d'années qui précèdent ? Pourra-t-on voir qu'il est déphasé par rapport aux cycles astronomiques ? Qu'il est

associé à des anomalies de développement des coraux, du « plancton à coquille » ?



Les extinctions ? Les espèces emblématiques (panda, rhinocéros ...) ou d'autres (vers de terre) se fossilisent rarement. Mais on verra sans doute des substitutions de groupes fossiles par d'autres groupes fossiles, par exemple les requins et autres grands prédateurs marins remplacés par les méduses, conséquence de notre sur-pêche.





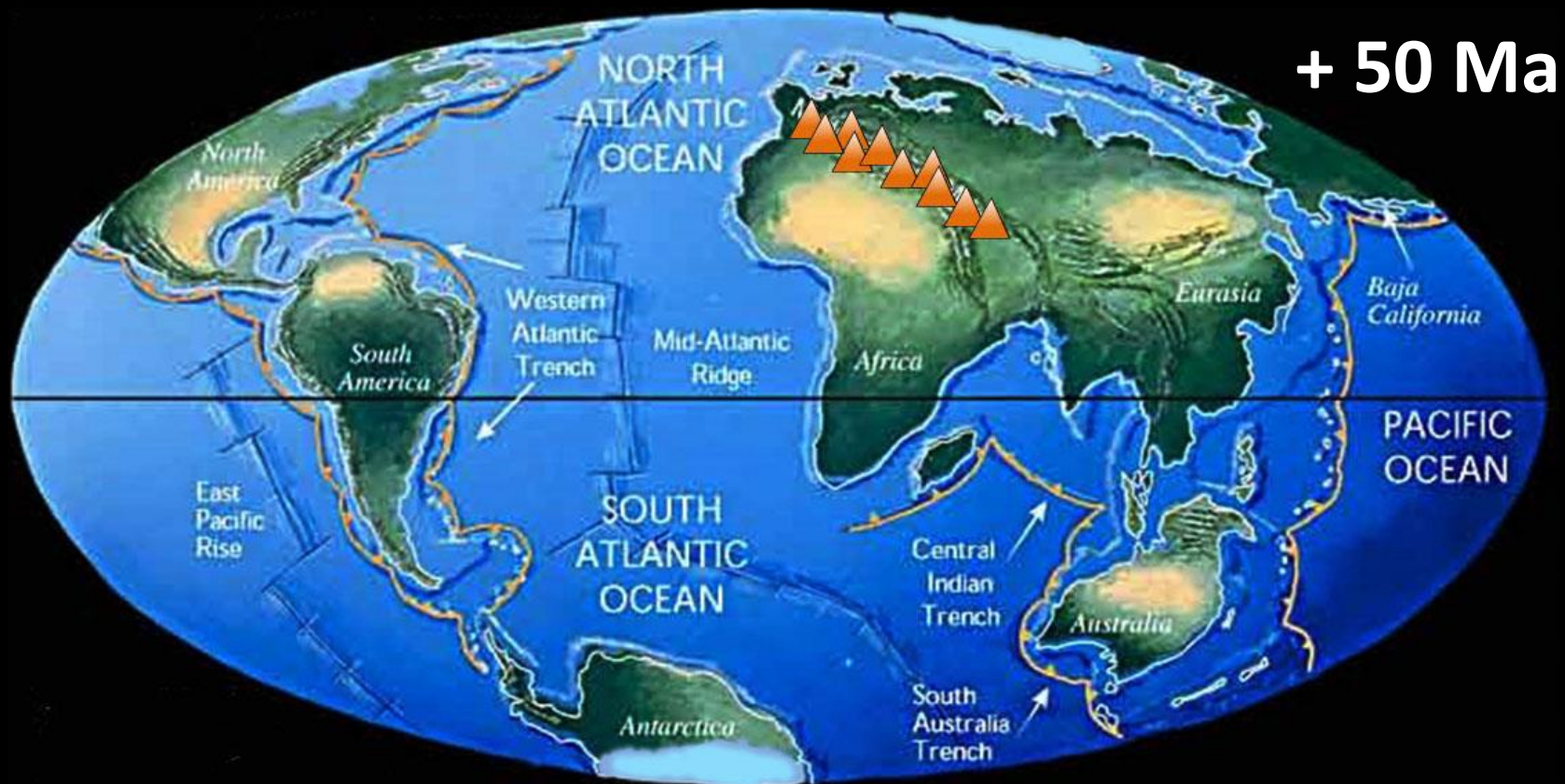
Et il y aura une grande homogénéisation des flores et faunes fossiles, avec des moutons (mammifères placentaires) en Australie, du blé en Amérique et du maïs en Europe ...

Mais ces perturbations seront très brèves (géologiquement parlant) : moins d'1 Ma (durée statistique de l'espèce *Homo sapiens*) et beaucoup moins pour les perturbations dues au CO₂, au plomb .. (dont les réserves ne se chiffrent qu'en siècles). Or une

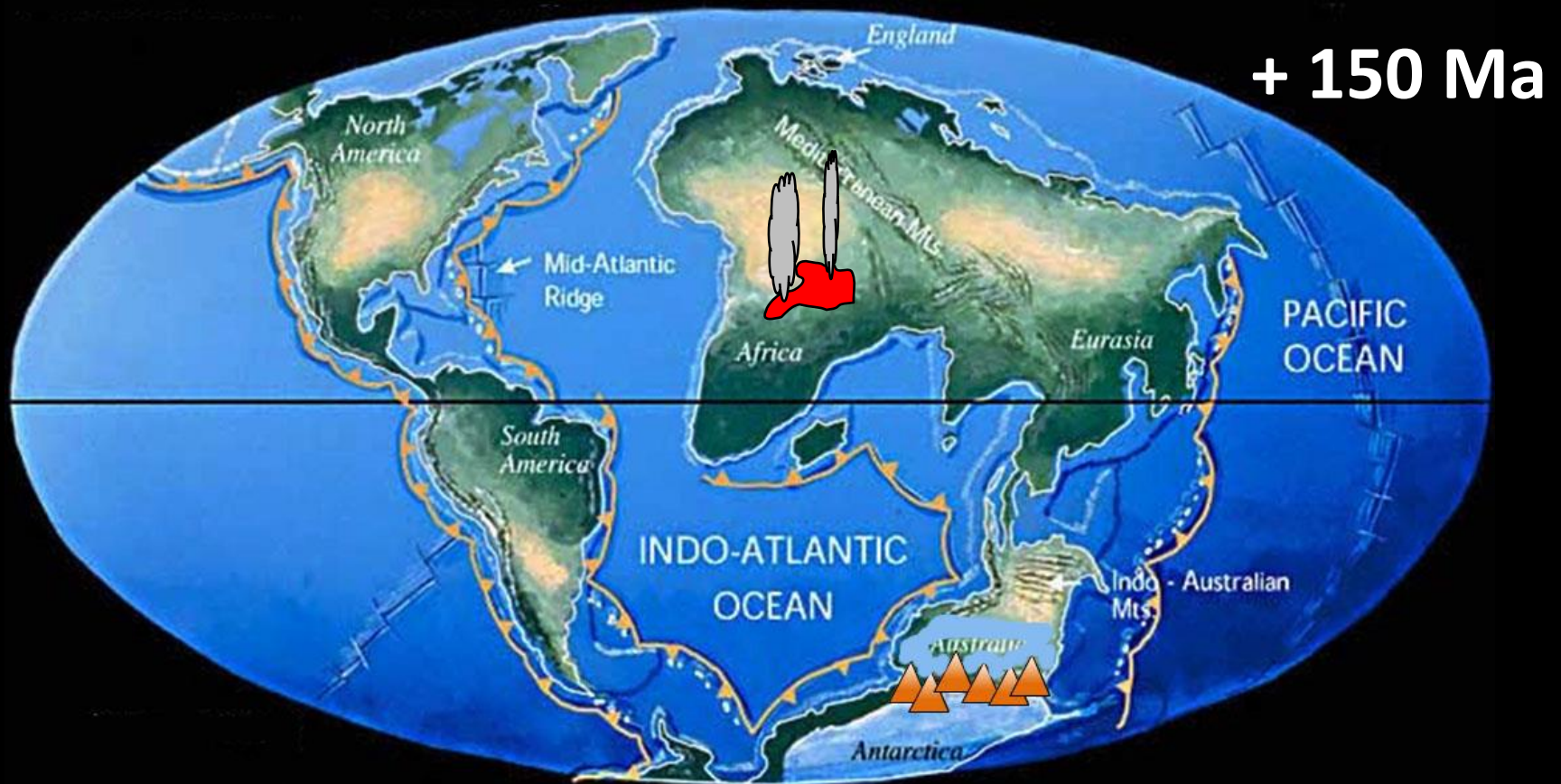
époque géologique dure en moyenne 10 Ma. On ne fera pas de dégâts si longtemps !

Il n'y aura pas d'Anthropocène, mais une « crise anthropique », comme il y a une crise Crétacé-Tertiaire, une crise Permo-Trias ..





Que vont faire les continents dans les 250 Ma qui viennent ? Ils vont continuer à dériver, avec le même genre de déplacement que depuis 2 500 Ma. Dans 50 Ma, l'Atlantique se sera encore élargi, et l'Afrique et l'Europe seront définitivement réunis. Heureusement, il n'y aura plus d'hommes, donc plus d'anti-immigrés.



Puis, dans 150 Ma, on peut raisonnablement prédire que l'Atlantique va commencer à se refermer, ainsi que l'océan entre l'Antarctique et l'Australie. Il y aura eu des éruptions volcaniques géantes (il y en a statistiquement tous les 25 Ma, et la dernière c'était il y a 15 Ma), mais où ? Causeront-elles des extinctions ?

+ 250 Ma



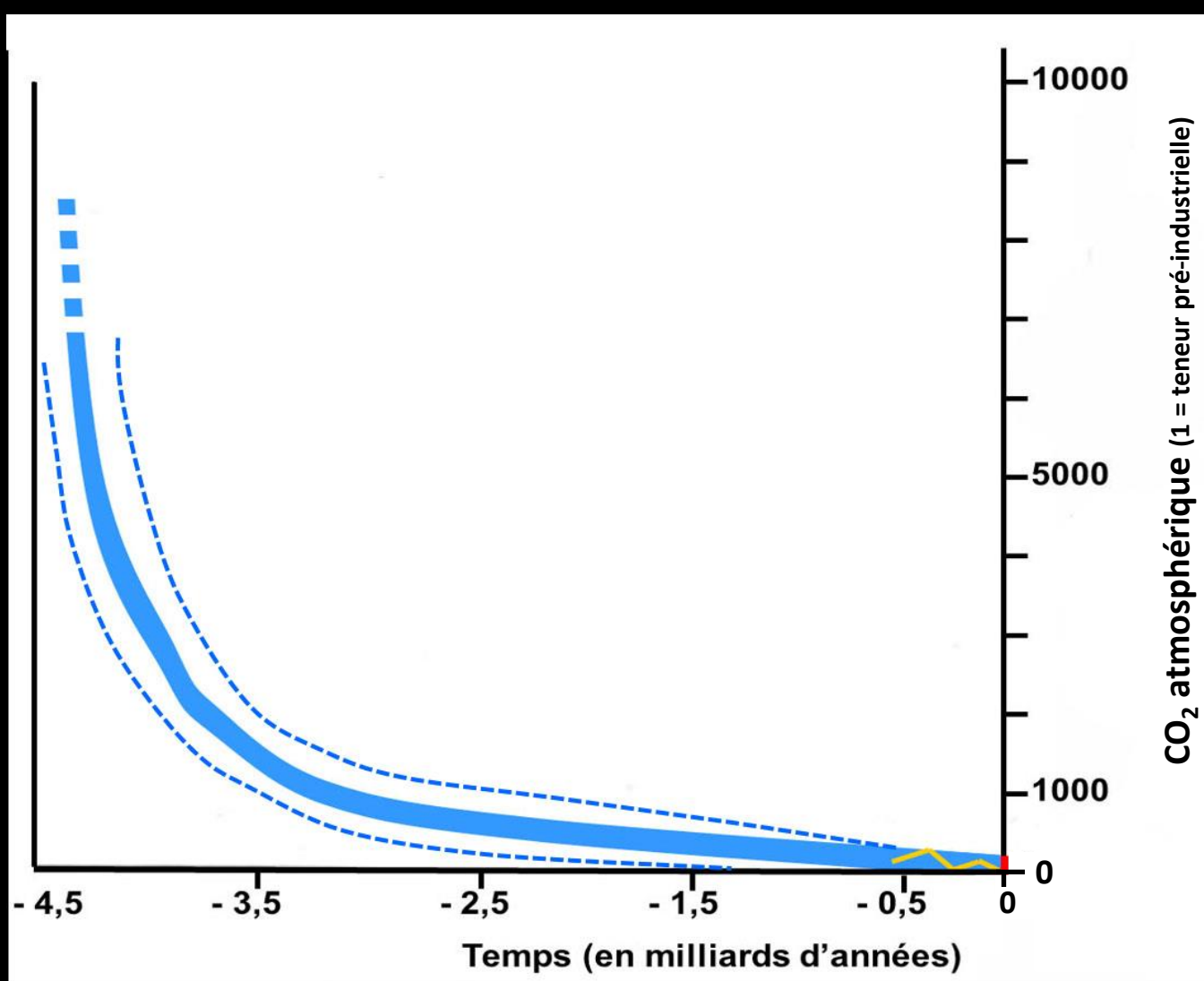
On peut encore proposer que, dans 250 Ma, les Amériques et l'Eurafrique se souderont par fermeture complète de l'Atlantique. Extrapoler plus loin le mouvement des continents serait illusoire. Et avec les milliards d'années, le refroidissement interne va faire baisser le volcanisme, ralentir les mouvements ...

+ 250 Ma



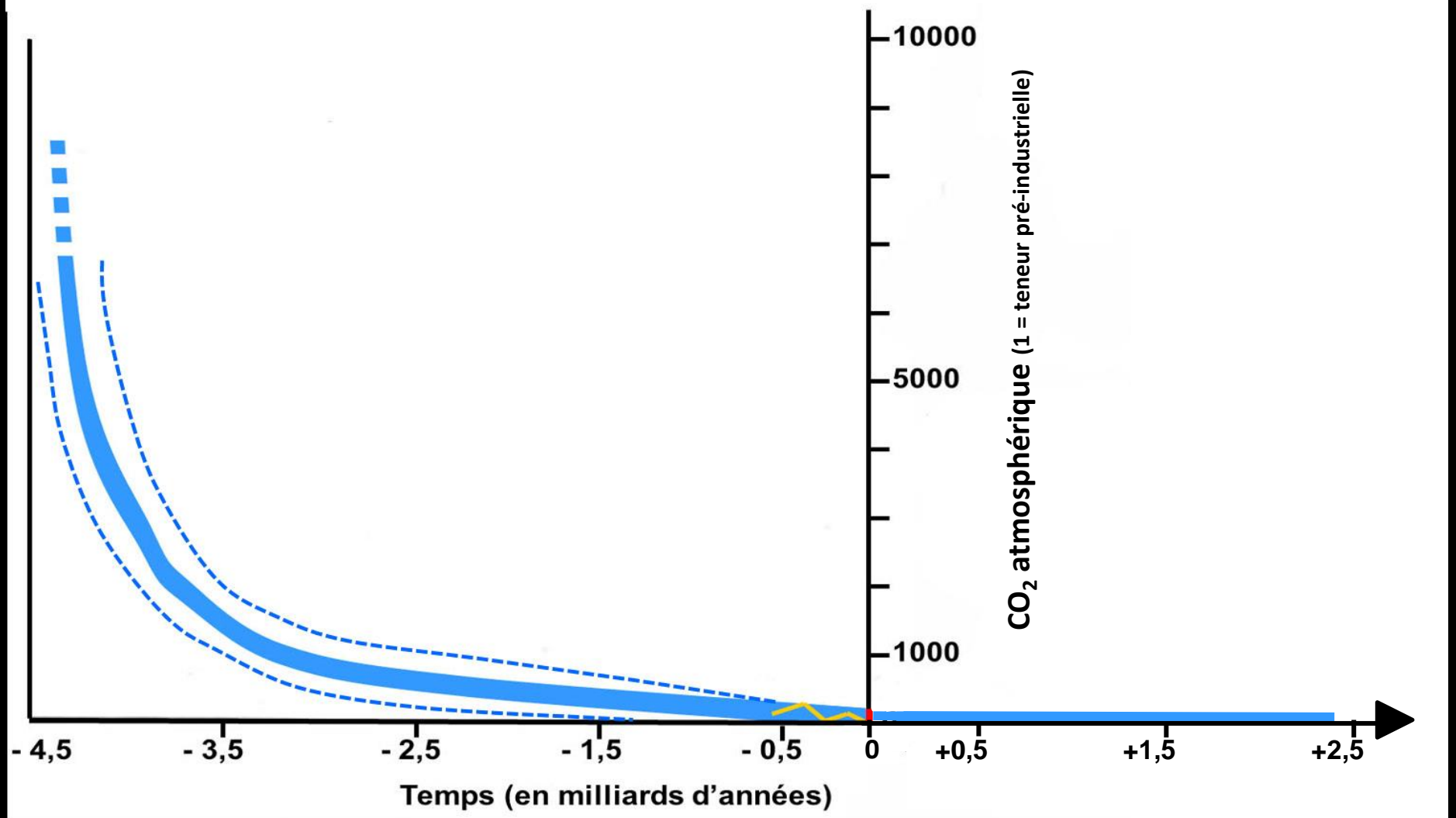
Comme il y a eu 5 grandes extinctions depuis -550 Ma, soit statistiquement une tous les 110 Ma, il y aura eu 2 à 3 nouvelles grandes extinctions de plus (sans compter « la notre »), et la vie de l'époque sera bien modifiée.

Face à ces incertitudes, que peut-on raisonnablement prévoir (au sens prévision économique, pas astrologique) pour l'avenir plus lointain ?

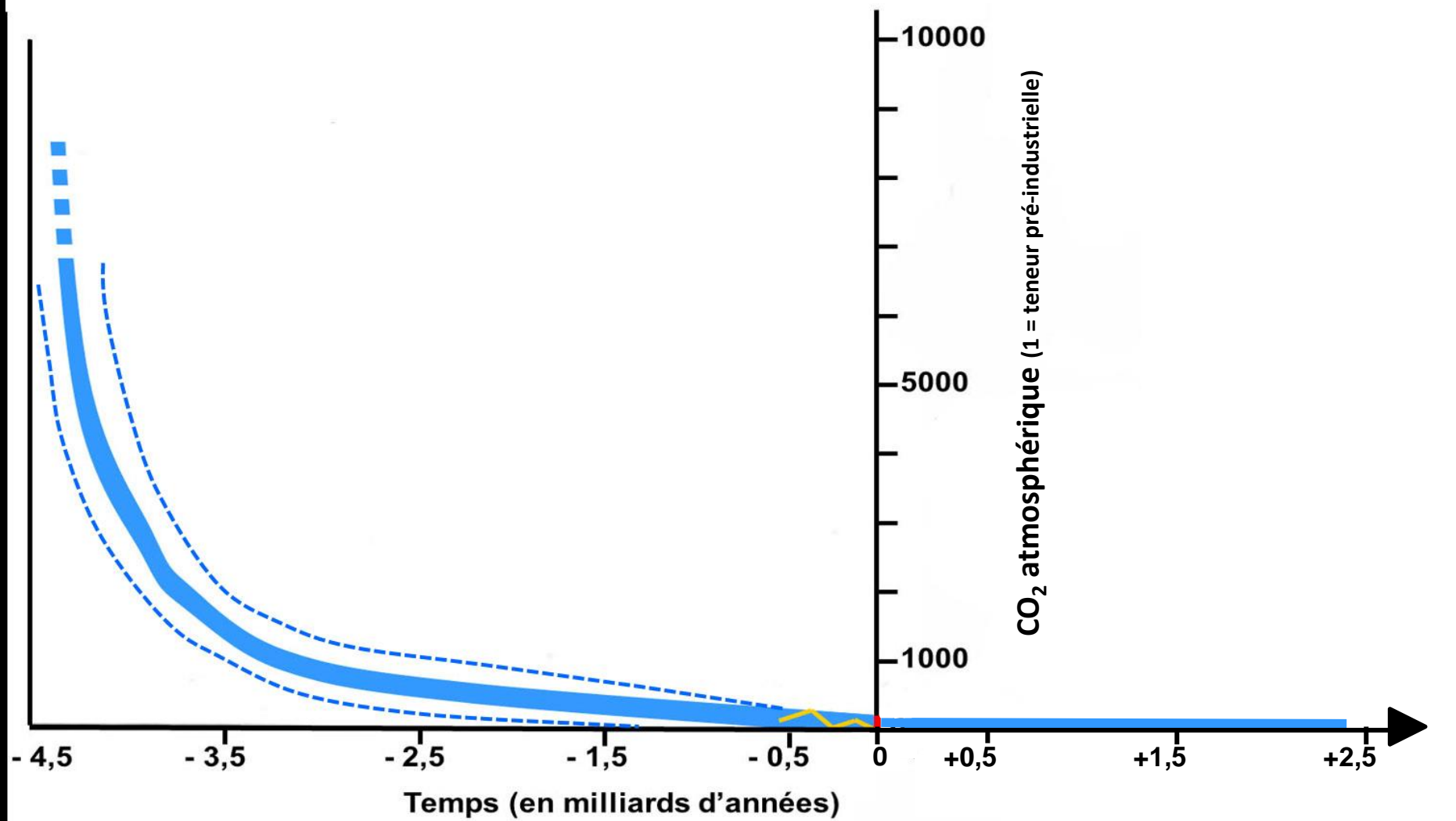


Que peut-on raisonnablement prévoir quant aux climats futurs ?

A priori, le CO₂ devrait continuer à baisser car il se fera de plus en plus de calcaire. Mais ça ne va pas pouvoir baisser beaucoup, car il n'en reste presque plus (0,03 %) !

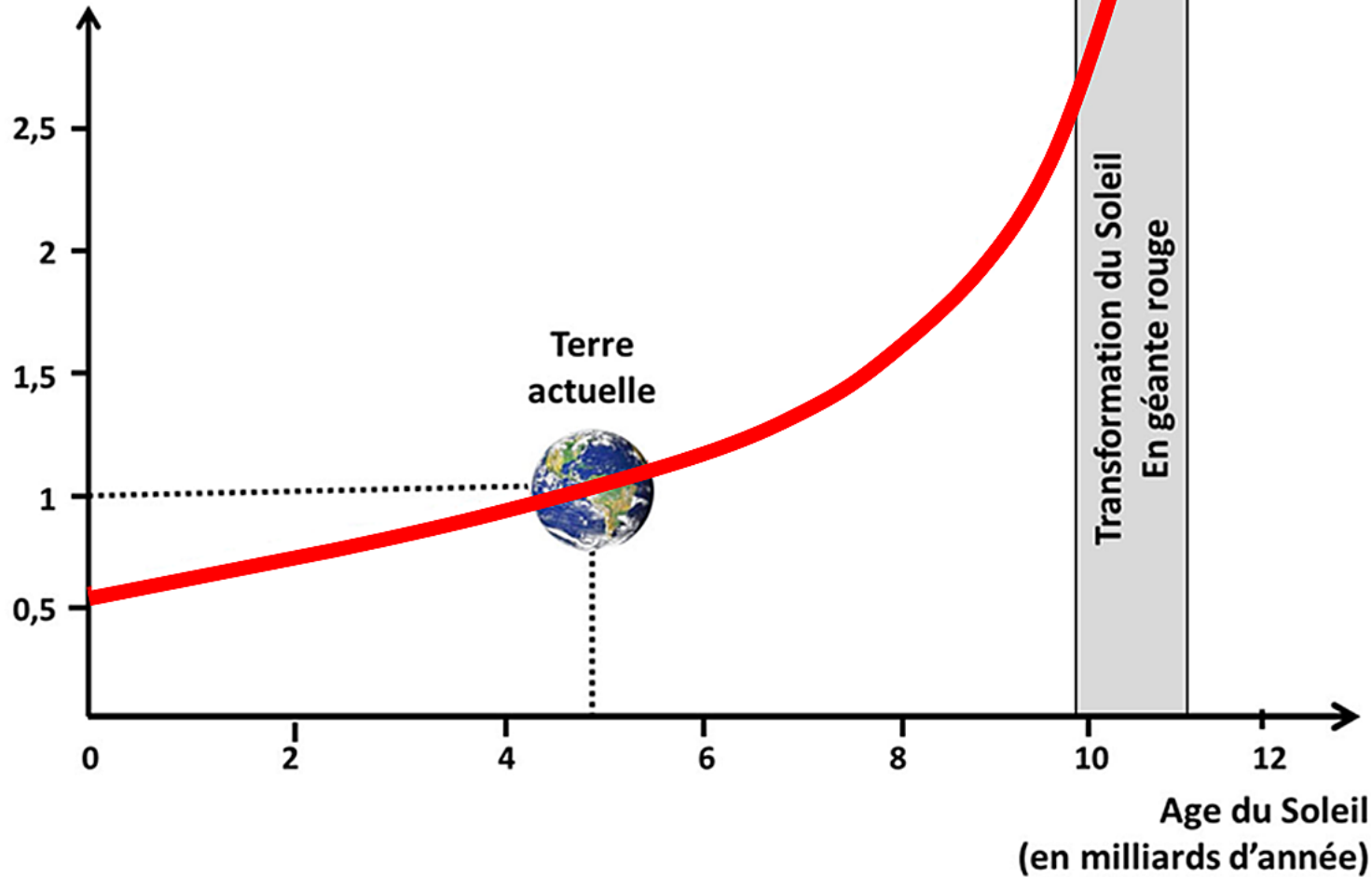


A priori, le CO₂ devrait continuer à baisser car il se fera de plus en plus de calcaire. Mais ça ne va pas pouvoir baisser beaucoup, car il n'en reste presque plus (0,03 %) !



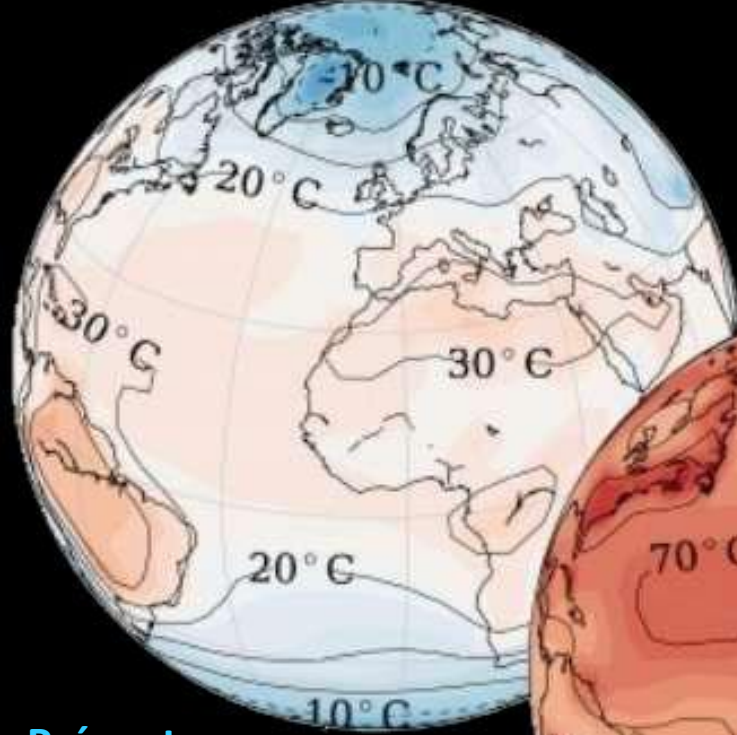
Ce CO₂ très bas va poser des problèmes à tous les êtres photosynthétiques (plantes, algues ...).

Puissance rayonnée
par le soleil
(1 = $3,2 \cdot 10^{26}$ W)

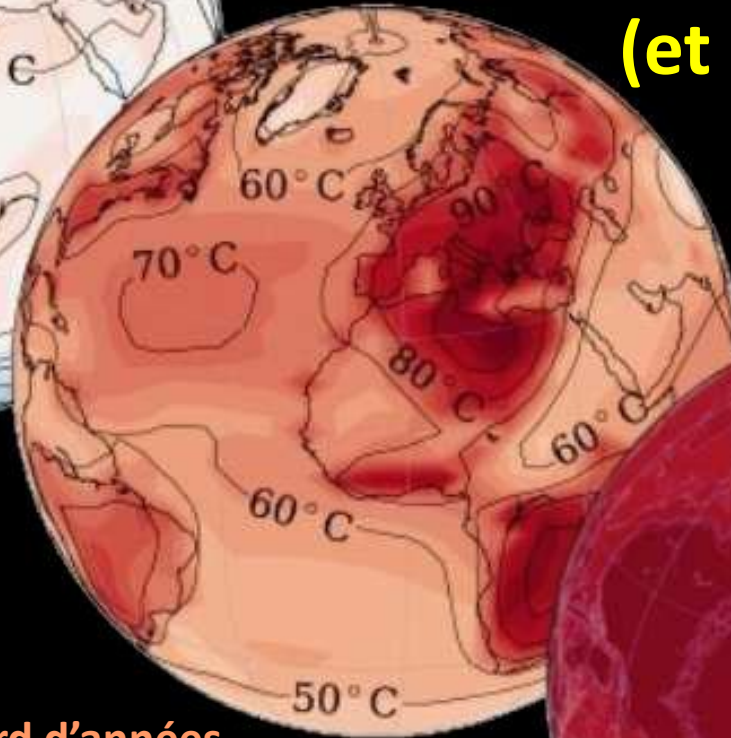


Mais pendant que le CO_2 stagnera dans les faibles valeurs, la puissance rayonnée par le soleil augmentera inexorablement.

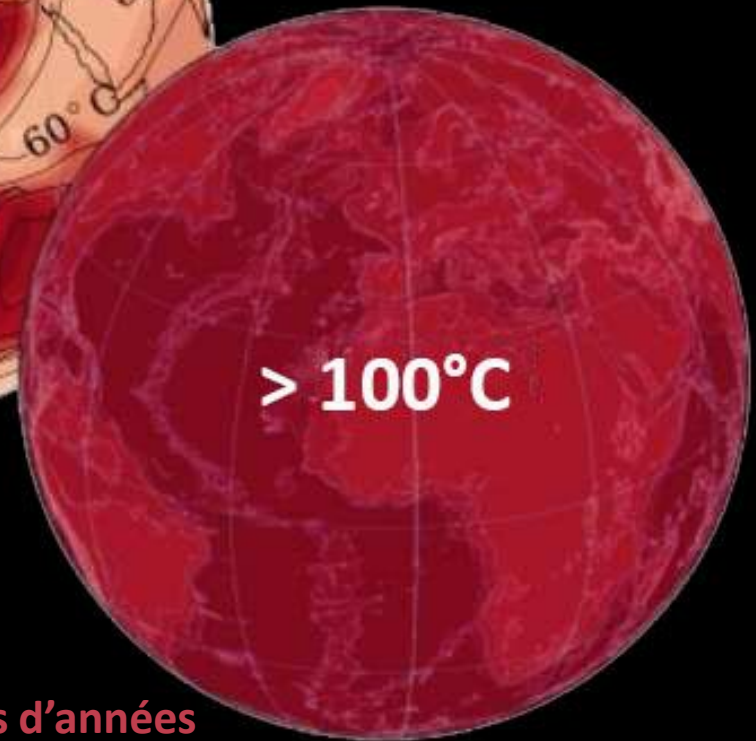
**On peut simuler ce que deviendra
la température de la Terre en
faisant varier l'énergie incidente
(et en gardant la même
géographie).
C'est « terrifiant » !**



**Présent,
flux solaire = 341 W/m²**



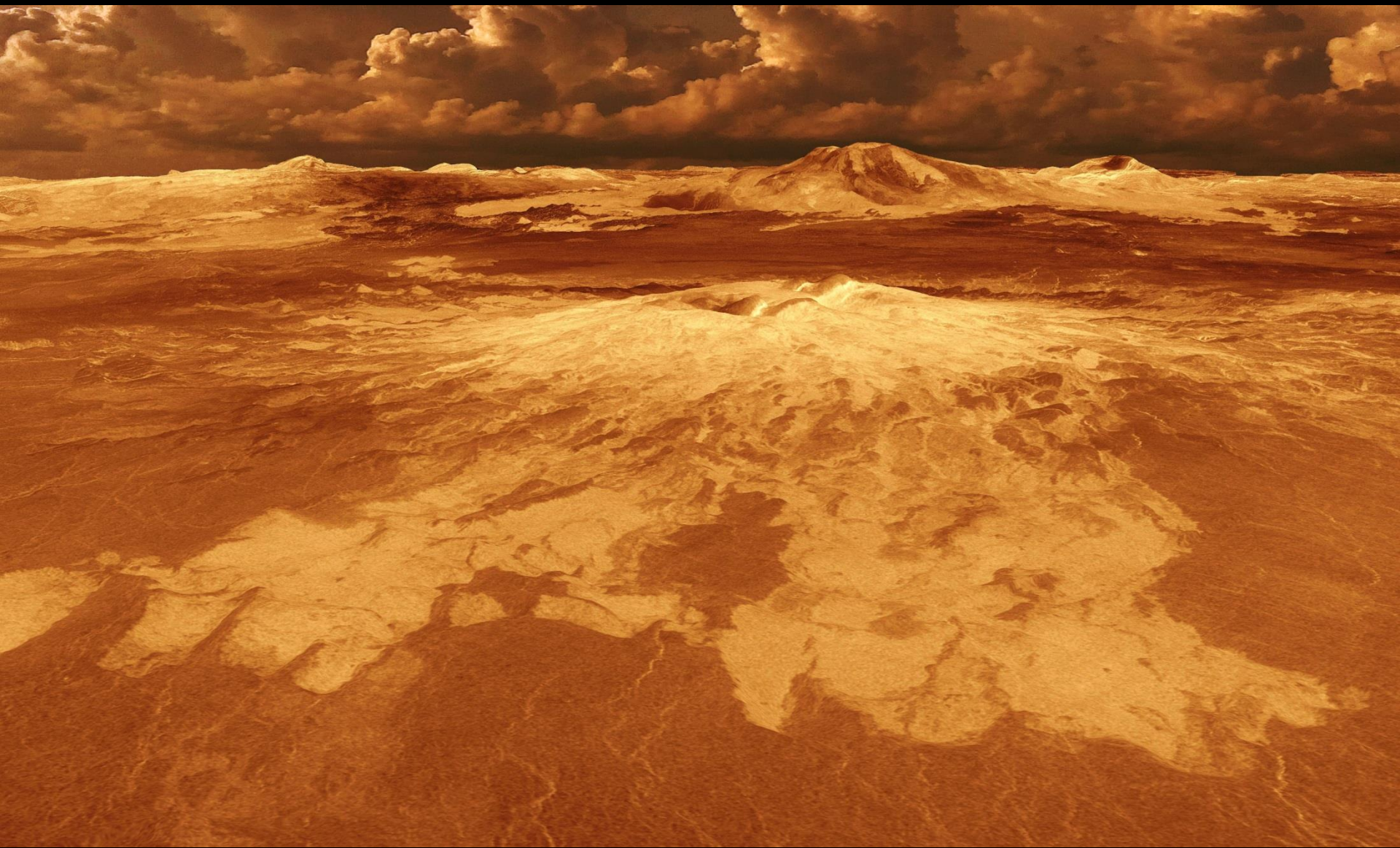
**Dans 1 milliard d'années
flux solaire ≈ 375 W/m²⁶**



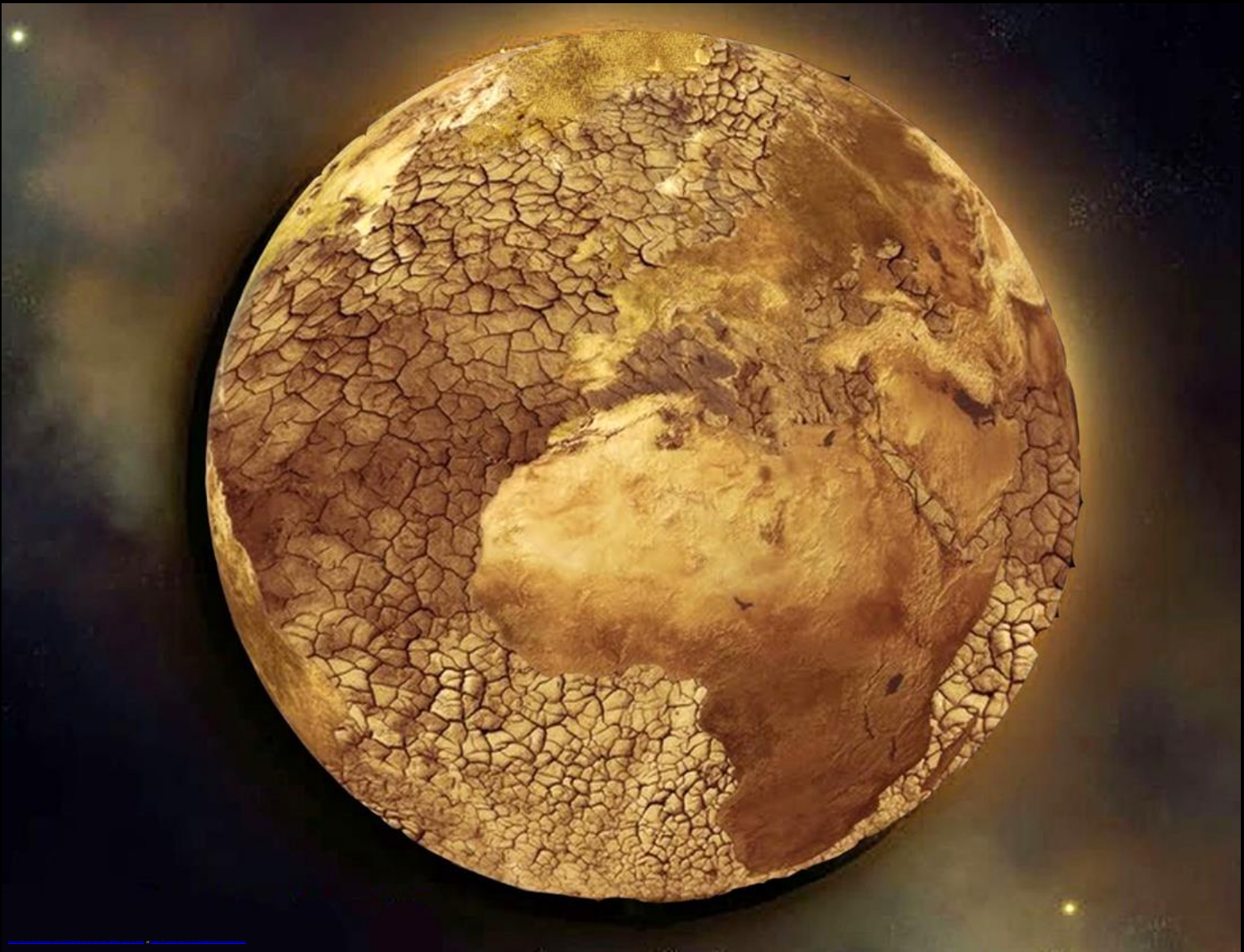
**Dans 2 milliards d'années
flux solaire ≈ 410 W/m²**



A partir de là, les océans vont se mettre à bouillir, l'atmosphère se chargera en vapeur d'eau, puissant gaz à effet de serre, et la Terre va devenir comme Vénus aujourd'hui. Ce sera la fin de la vie (sauf révolution biologique) !



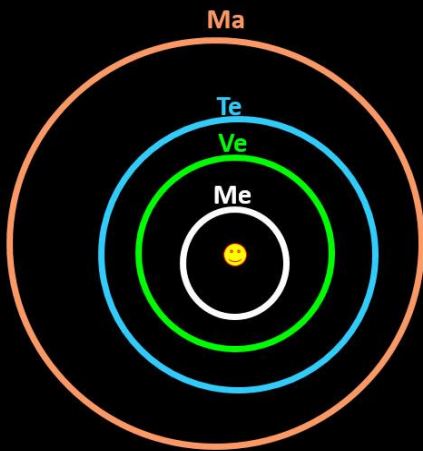
Est-ce Vénus vue par la sonde Magellan en 1992 ou la Terre dans 2 milliards d'années ?



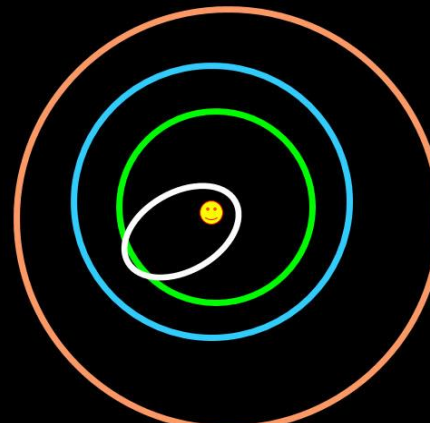
Ce à quoi ressemblerait la Terre si le Soleil rayonnait 20% de plus, ce qui sera le cas dans 2 Ga.

Exemple d'une simulation

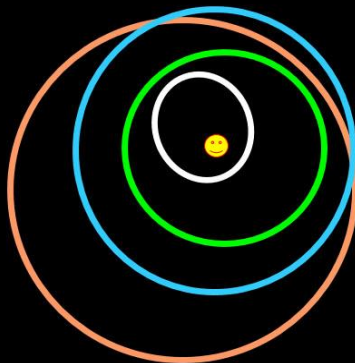
<http://www.insu.cnrs.fr/ama03/mercure-mars-venus-la-terre-le-choix-des-planetes-0>



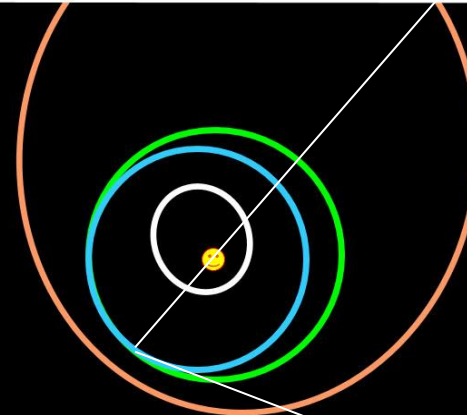
Etat actuel du système solaire interne



Simulation dans 3 300 Ma



Simulation dans 3 330 Ma



Simulation dans 3 350 Ma



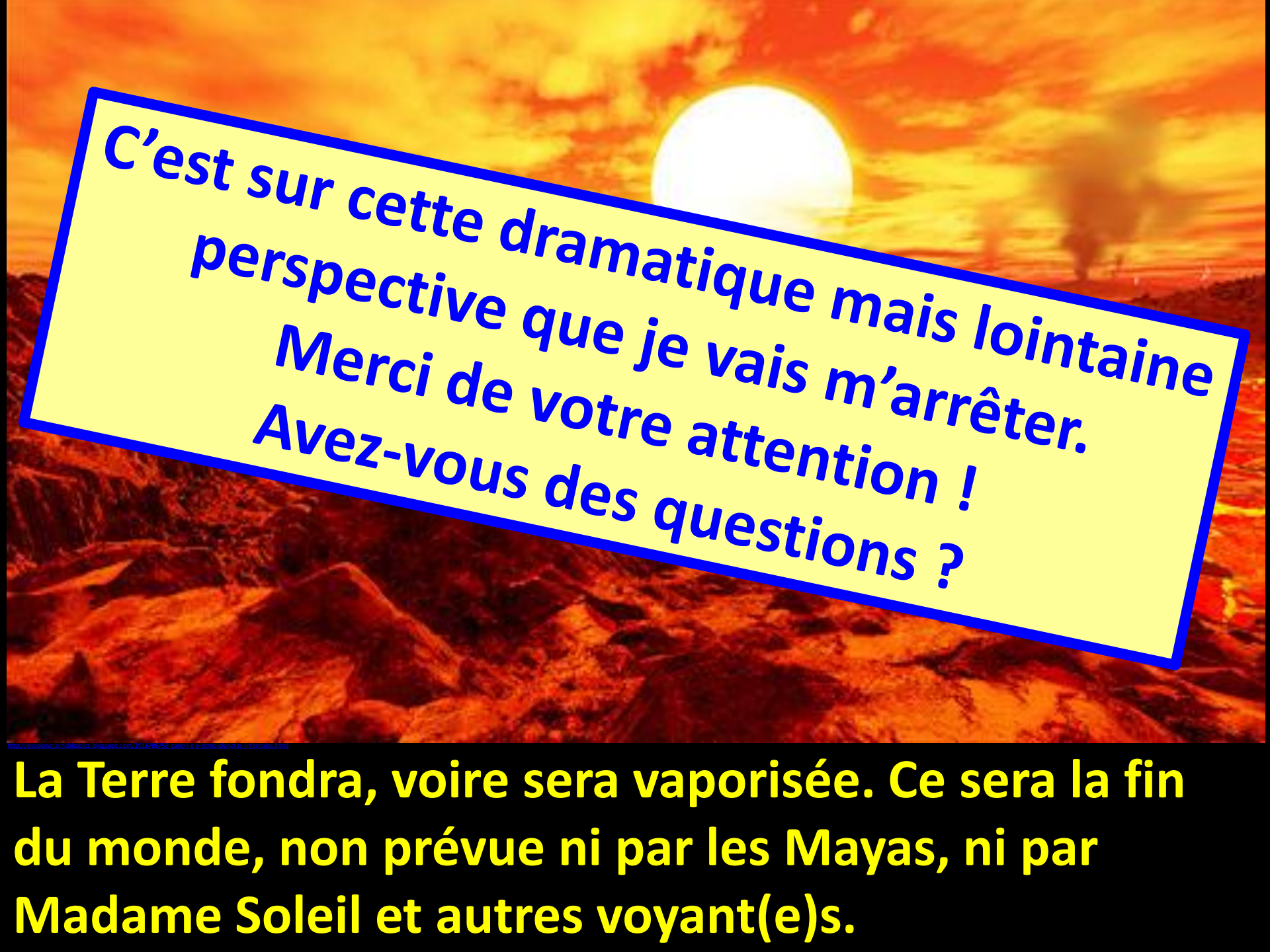
Et il y a pire ! Sur le très long terme, les orbites du système solaire interne sont chaotiques et les simulations montrent des probabilités non nulles de collision Terre / Mars et surtout Terre / Vénus. Ca risque de faire très mal !

Et si le hasard fait qu'on échappe à ces collisions, dans 4 à 5 Ga, le soleil deviendra géante rouge.





La Terre fondra, voire sera vaporisée. Ce sera la fin du monde, non prévue ni par les Mayas, ni par Madame Soleil et autres voyant(e)s.



**C'est sur cette dramatique mais lointaine
perspective que je vais m'arrêter.
Merci de votre attention !
Avez-vous des questions ?**

**La Terre fondra, voire sera vaporisée. Ce sera la fin
du monde, non prévue ni par les Mayas, ni par
Madame Soleil et autres voyant(e)s.**