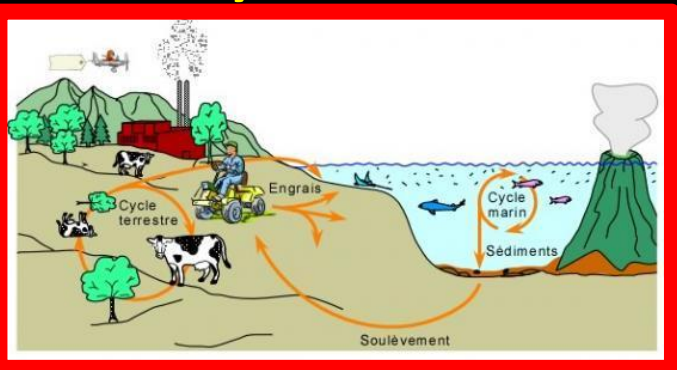


Effet de serre, cycle du carbone ..., deux clés indispensables à maîtriser pour bien comprendre les variations climatiques et ... la COP 21*



* 21^{ème} Conference of Parties

Cycle du carbone



**CO₂
atmosphérique**

**Pourquoi est-ce
important de
maîtriser ces
deux clés ?**

**Parce que le
climat mondial
dépend (entre autres)
de l'effet de serre,
qui dépend du CO₂
atmosphérique, qui
dépend du cycle du
carbone.**



Effet de serre



Climat mondial



Apprenons à nous servir de ces clés en faisant un peu de physique élémentaire (datant de la transition 19^{ème} / 20^{ème} siècle).

I - REFLEXION / ABSORPTION / TRANSMISSION

Un corps reçoit de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique

→ une partie de ce rayonnement est réfléchi (sous la même longueur d'onde) ou traverse le corps (si il est transparent)

→ l'autre partie est absorbée

On appelle albédo le rapport énergie réfléchi / énergie incidente

Exemple d'albédo : neige = 1, noir type suie = 0



Sauf cas particuliers (fluorescence, changement d'état ...), l'énergie absorbée « réchauffe » le corps.

II - TEMPERATURE ET ENERGIE/PUISSANCE

Un corps qui a une température > 0 K émet un rayonnement électromagnétique.

La puissance émise (en W / m^2) est égale à :

$W = \sigma T^4$ (loi de Stephan),

avec $\sigma =$ Constante de Boltzmann = $5,67 W.m^{-2}.K^{-4}$

Plus un corps est chaud, plus il émet d'énergie



TEMPERATURE ET ENERGIE (suite)

Un corps qui a une température > 0 K
un rayonnement électromagnétique.

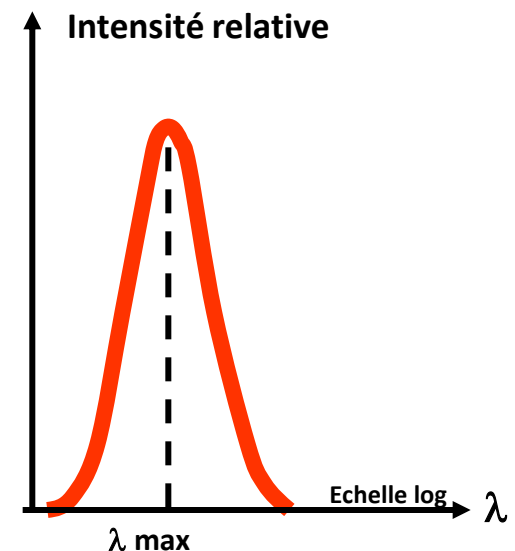


La « qualité » de l'énergie émise, c'est à dire sa longueur d'onde λ (ou sa fréquence) dépend aussi de la température :

$\lambda = \beta/T$ (Loi de Wien),

avec $\beta =$ Constante de Wien $= 2,897 \cdot 10^{-3}$ m.K

Cette longueur d'onde correspond à la longueur d'onde où est émis la plus grande proportion de l'énergie.



Exemples :

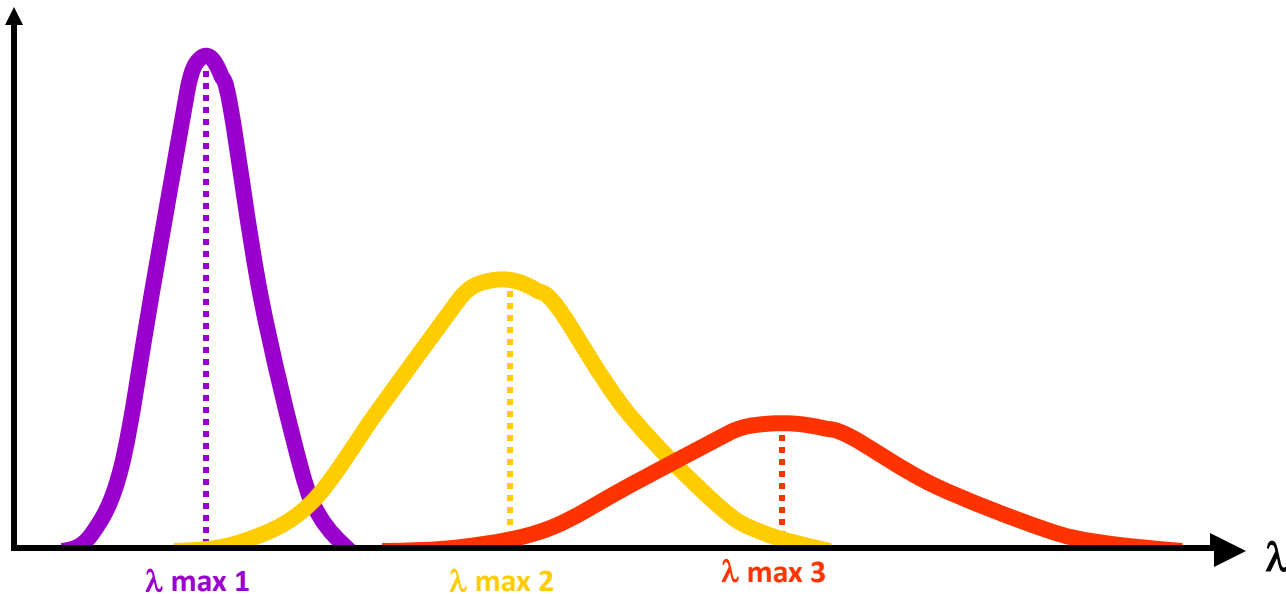
Corps humain à 37°C , $\lambda_m = 2,9 \cdot 10^{-3} / (273 + 37)$
 \rightarrow , $\lambda_m = 9,32 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 9 \mu$ (dans l'Infra-Rouge)

Soleil à 5800 K , $\lambda_m = 2,9 \cdot 10^{-3} / 5800$
 $10^{-6} \text{ m} = 0,5 \mu$ (dans le visible)

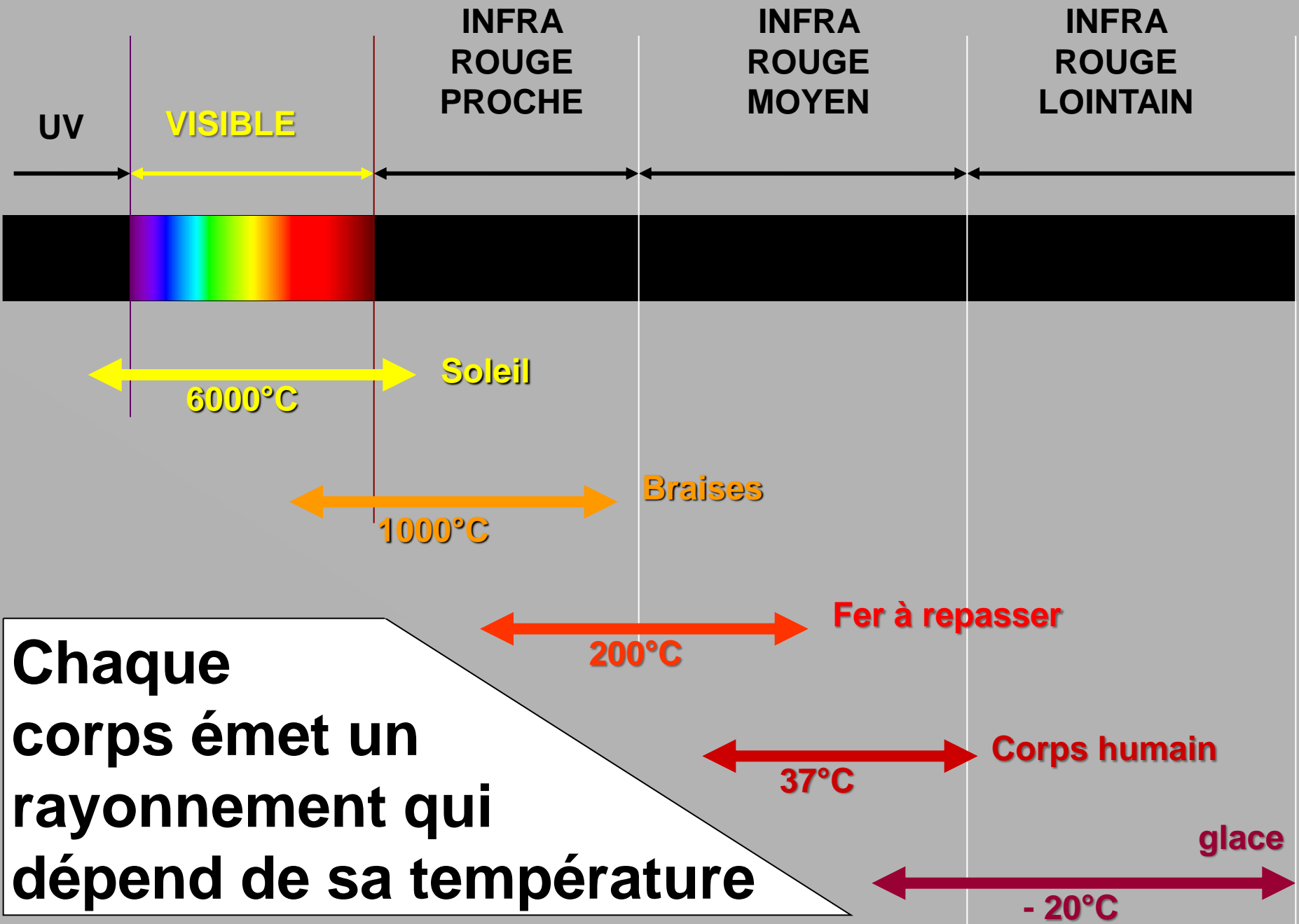


Répartition de
l'intensité
émise

Avec $T_1 > T_2 > T_3$



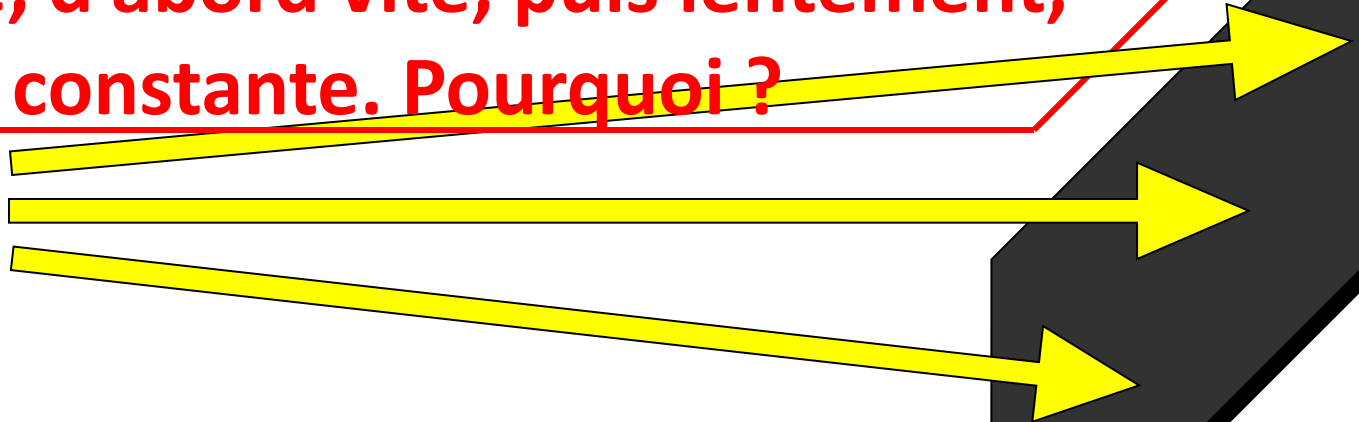
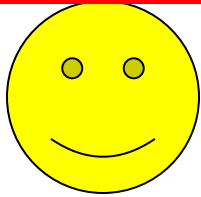
Relation entre T et λ émis



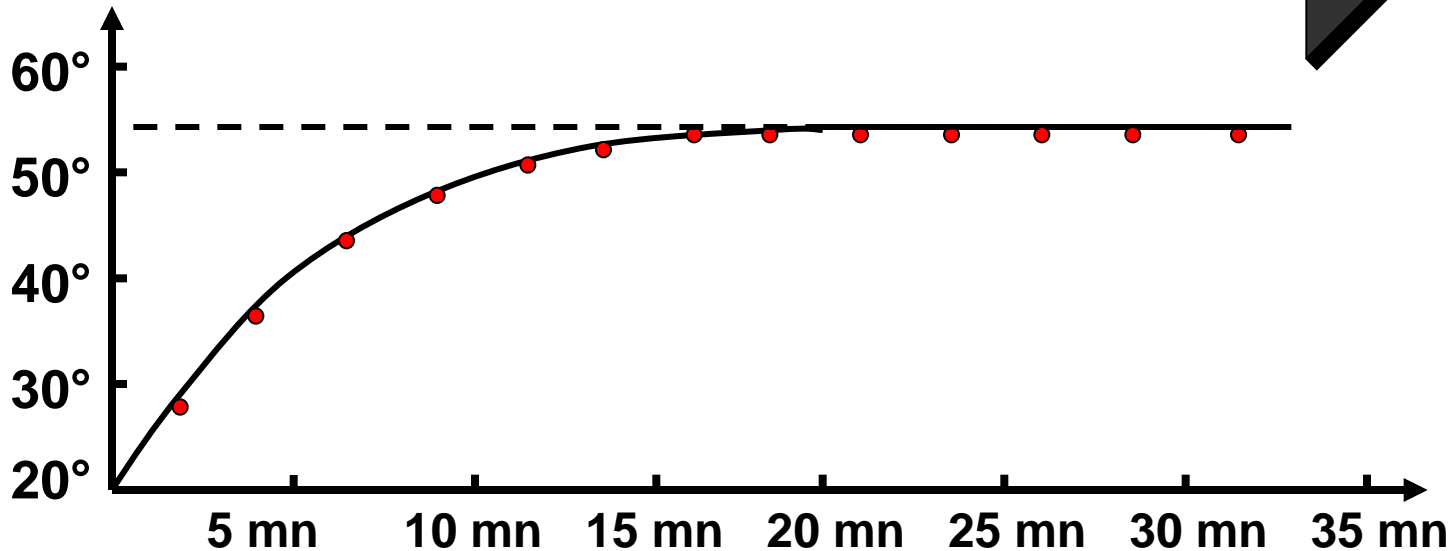
Chaque corps émet un rayonnement qui dépend de sa température

III - NOTION DE TEMPERATURE D'EQUILIBRE

La température d'une plaque noire au soleil augmente, d'abord vite, puis lentement, puis reste constante. Pourquoi ?



Température de la plaque

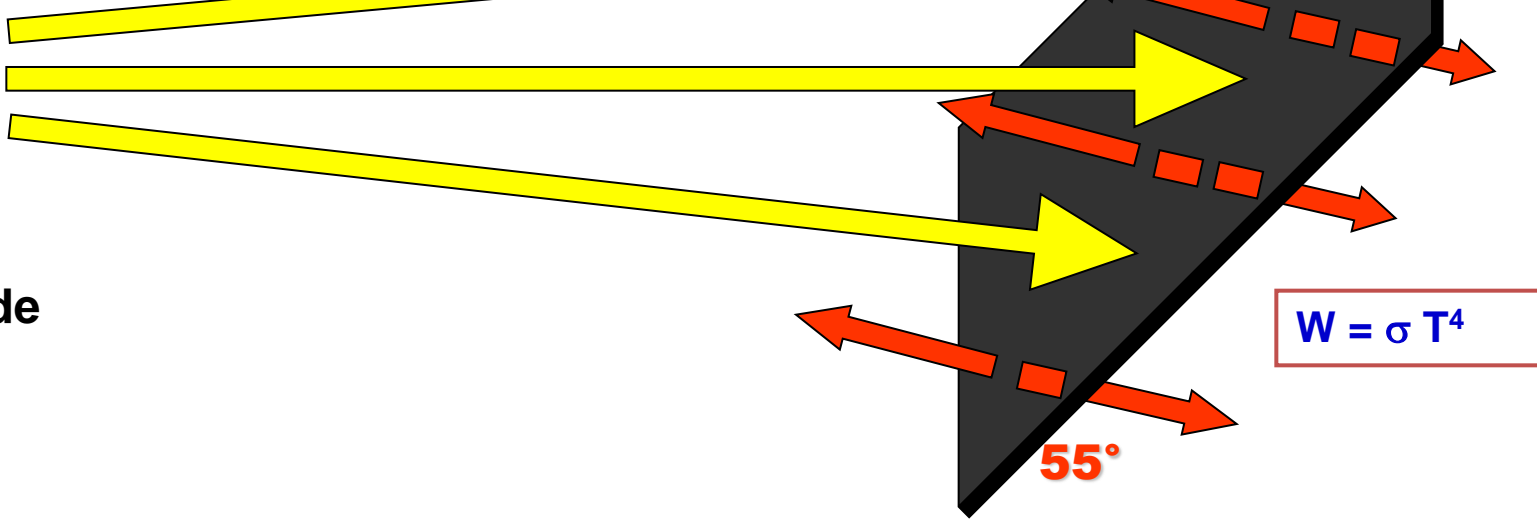


Temps de la mesure

Parce qu'à une certaine température, elle renvoie autant d'énergie qu'elle en reçoit. Mais elle renvoie cette énergie sous forme d'Infra-Rouge, invisible.



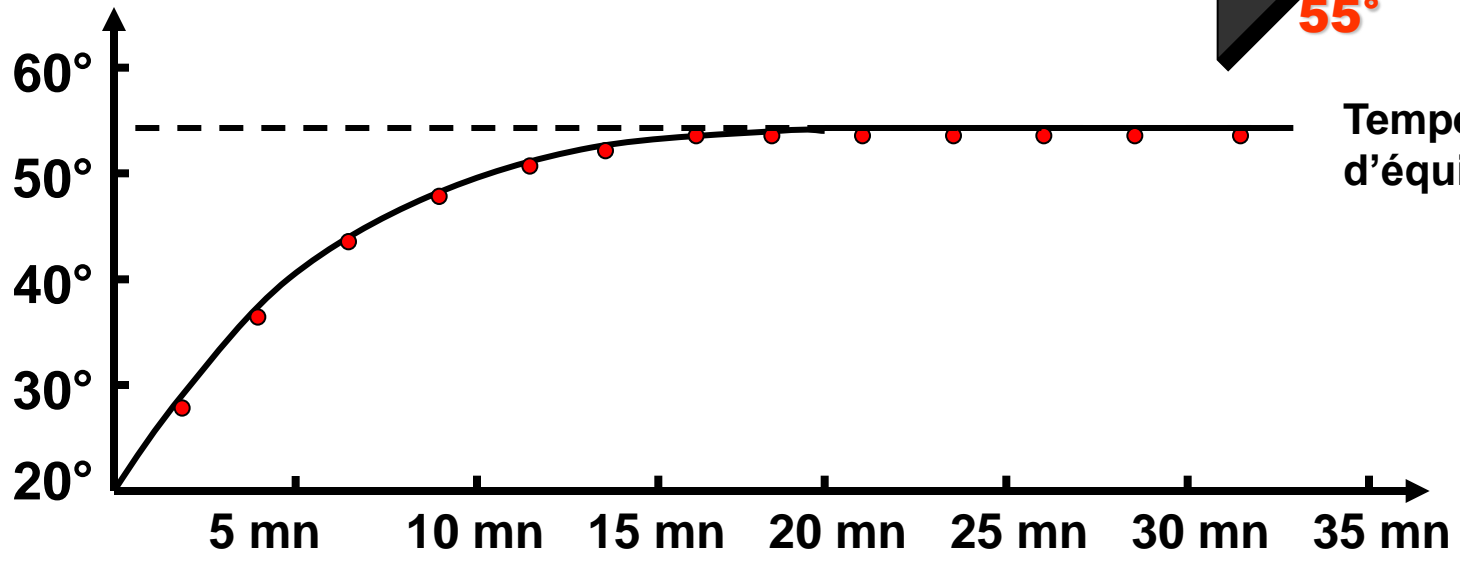
6000°



$$W = \sigma T^4$$

55°

Température de la plaque



Température d'équilibre

Temps de la mesure

NOTION DE TEMPERATURE D'EQUILIBRE

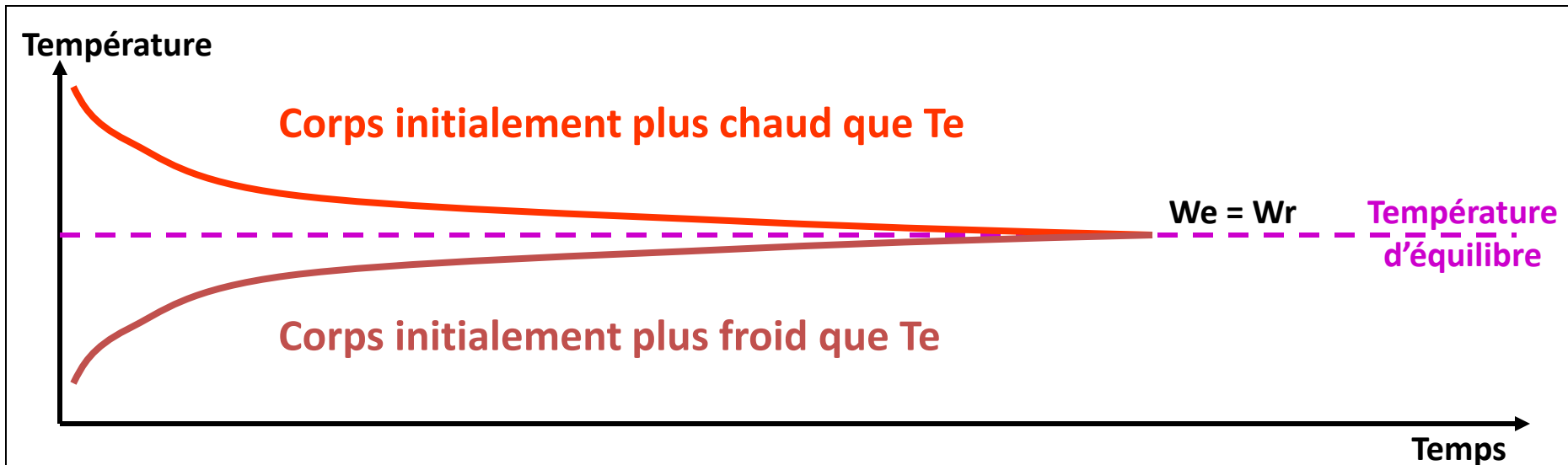
Imaginons un corps totalement absorbant pour toutes les λ (corps appelé « corps noir »), à la température $T = 0$ K.

Alors $W_{\text{émis}} = 0$

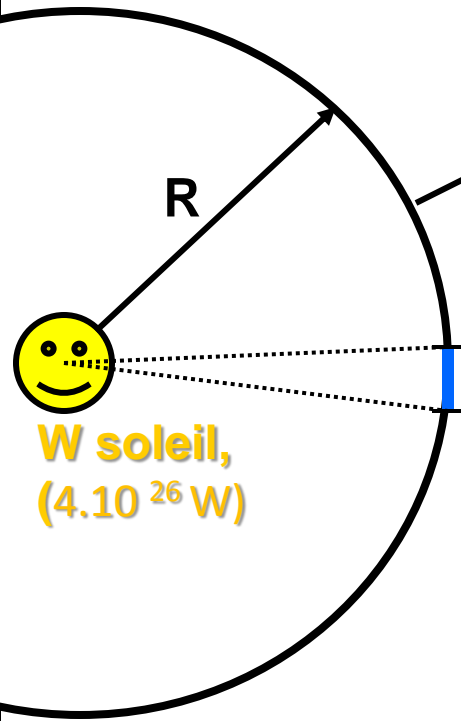
Ce corps reçoit de l'énergie (rayonnement électromagnétique) : $W_{\text{reçu}}$ (W_r), supposé constant

Au début, T faible, $W_{\text{émis}} < W_{\text{reçu}} \rightarrow$ absorption d'énergie $\rightarrow T \nearrow$

Plus $T \nearrow$, plus $W_{\text{émis}} \nearrow$. Quand $W_{\text{émis}} = W_{\text{reçu}}$, T devient stable. C'est la température d'équilibre (qui peut varier dans le temps si W_r varie)



IV – TEMPERATURE EXTERNE D'EQUILIBRE DES PLANETES



Sphère de rayon R centrée sur le soleil, de surface $S = 4 \pi R^2$

Puissance reçue par unité de surface W_r :

$$W_r = W_s / S = W_s / 4 \pi R^2$$

La puissance reçue par unité de surface varie en $1 / R^2$

La température d'équilibre T_e de la surface est telle que :

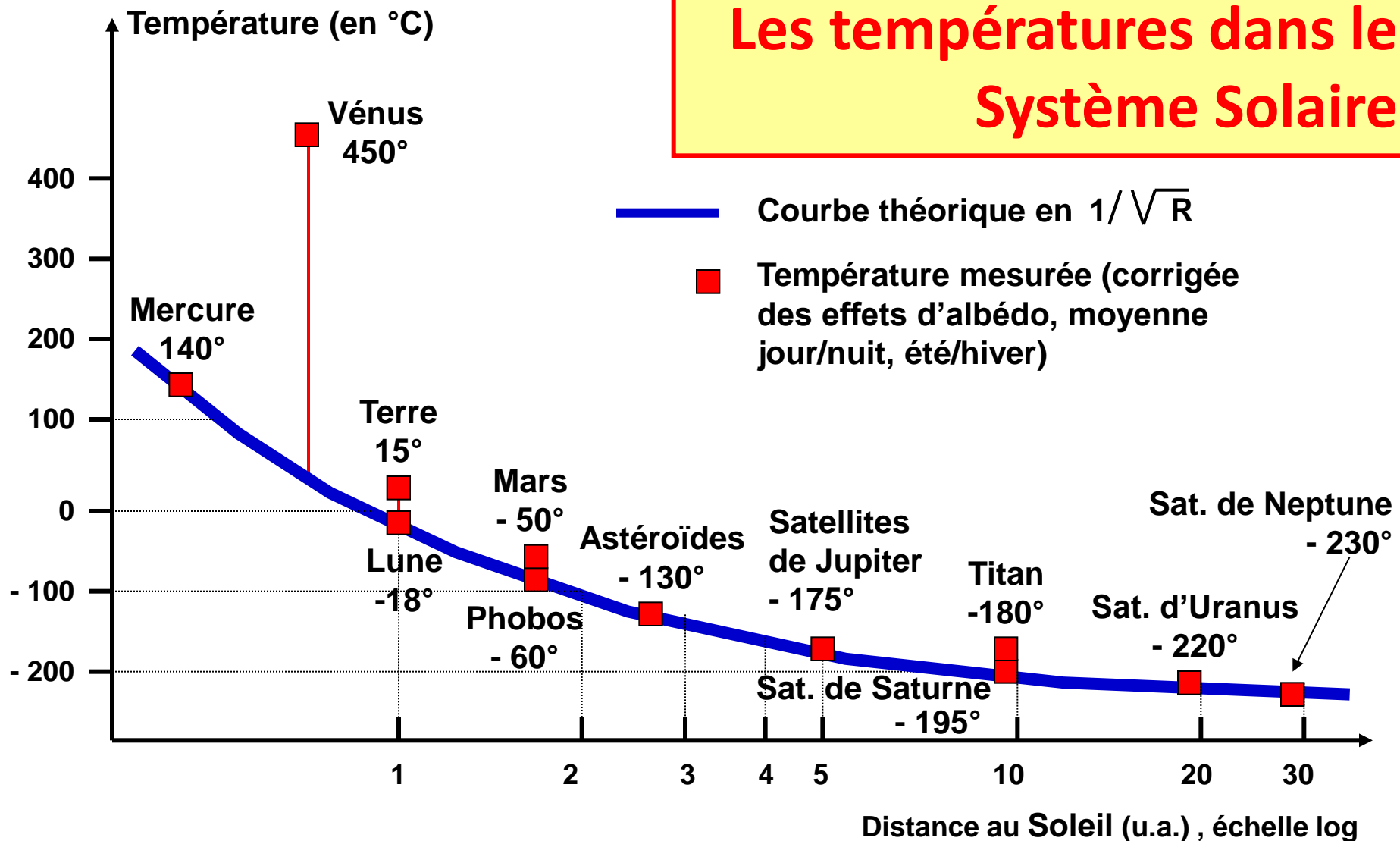
$$W_r = W_{\text{émis}}, \text{ avec } W_e = \sigma T^4$$

$$1 / R^2 \sim \sigma T^4$$

$$T \sim 1 / \sqrt{R} = R^{-1/2}$$

La température d'équilibre d'une planète (si on néglige les effets d'albédo qui peuvent être important) varie comme l'inverse de la racine carrée de la distance au soleil

Les températures dans le Système Solaire



En corrigeant les effets d'albédo (ramenés à un albédo voisin de celui de la Terre), tous les corps, sauf 4, «obéissent» à la loi $T = 1/\sqrt{R}$. Quel est le point commun entre ces 4 corps : ils ont une atmosphère « dense ».

Nous venons de mettre en évidence l'effet de serre !

Première clé : qu'est-ce que l'effet de serre ?

La croyance populaire : l'atmosphère, comme la vitre d'une serre, arrête les Infra-Rouge et retient la chaleur !

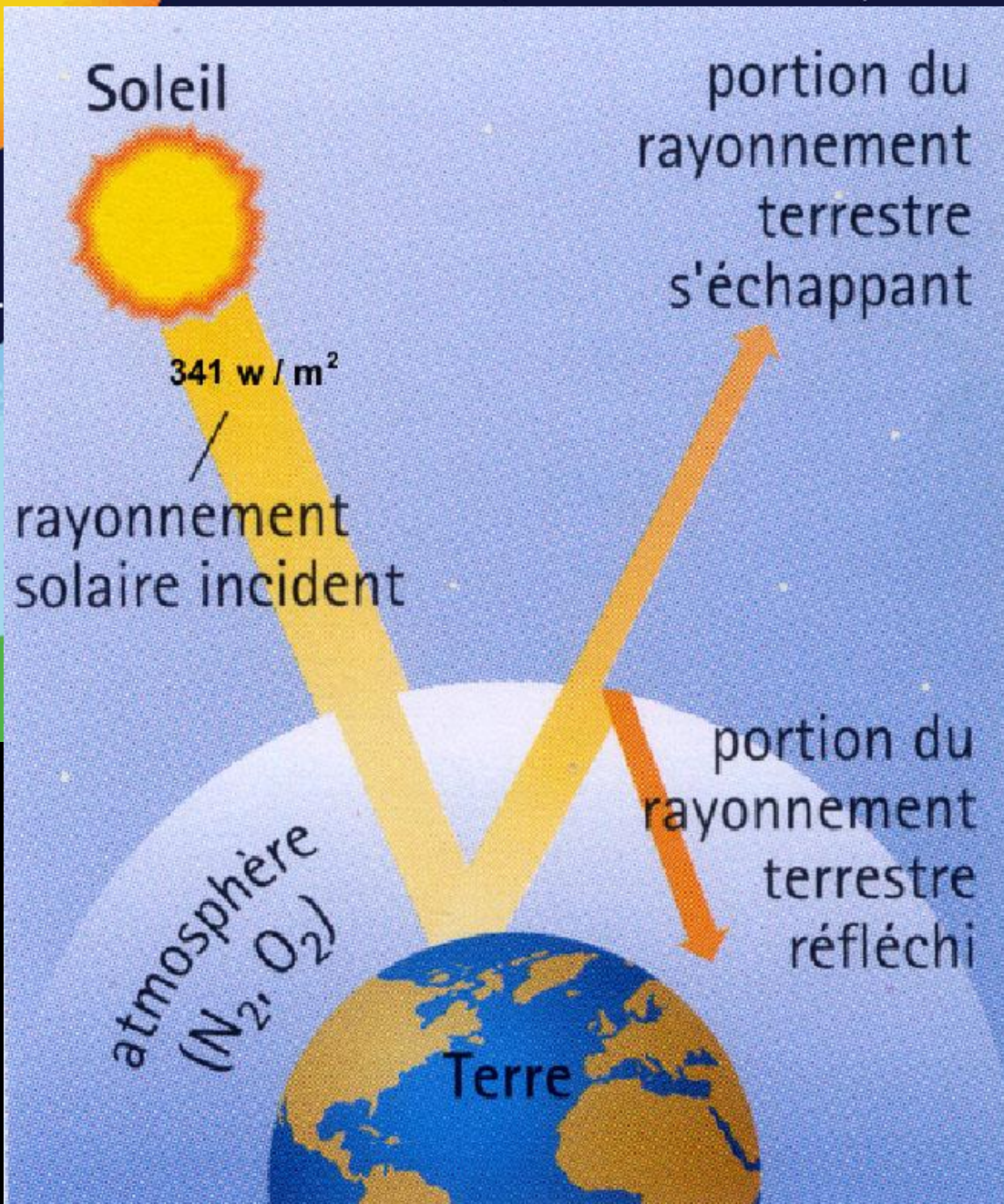
Le paradoxe : la Terre, comme toutes serres, renvoie vers l'extérieur autant d'énergie qu'elle en reçoit du soleil





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

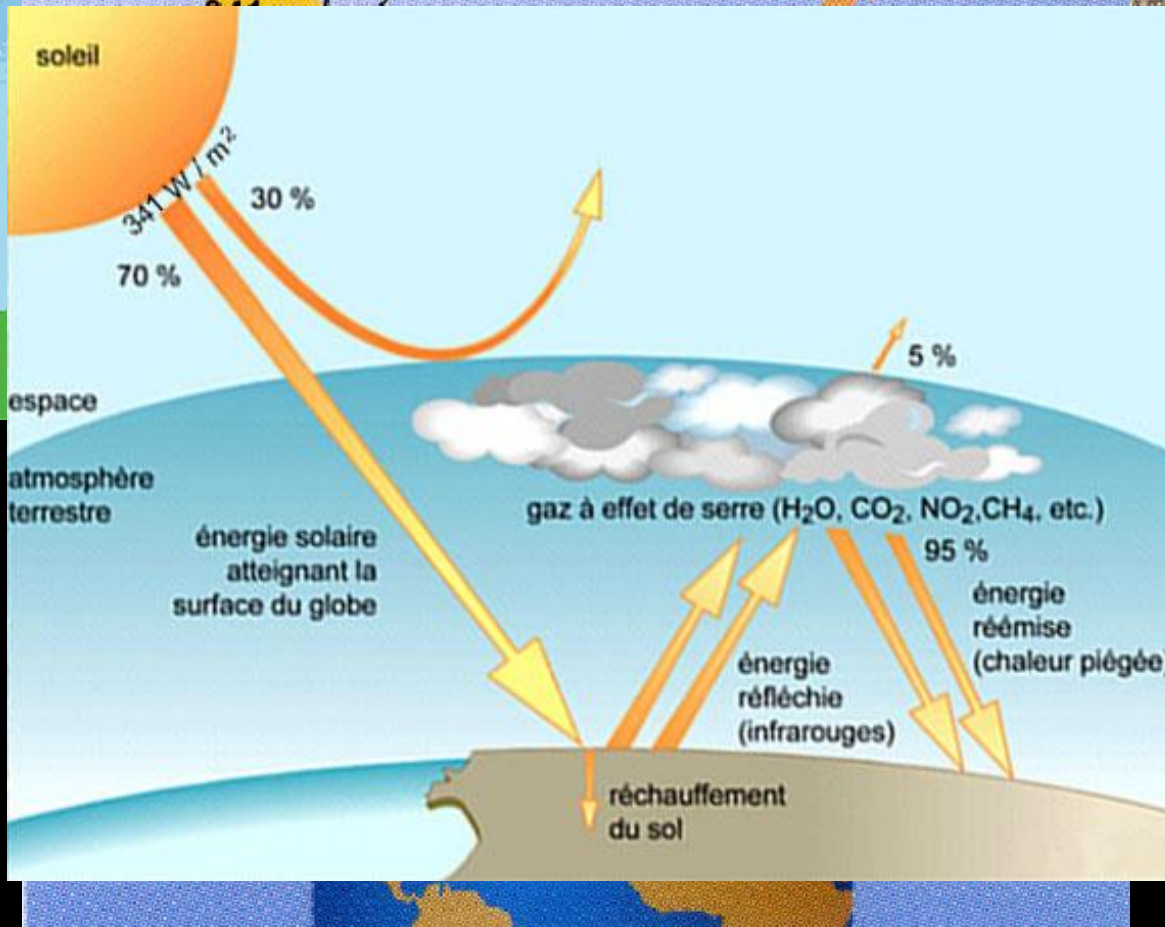
Ce que n'est pas l'effet de serre !



Soleil

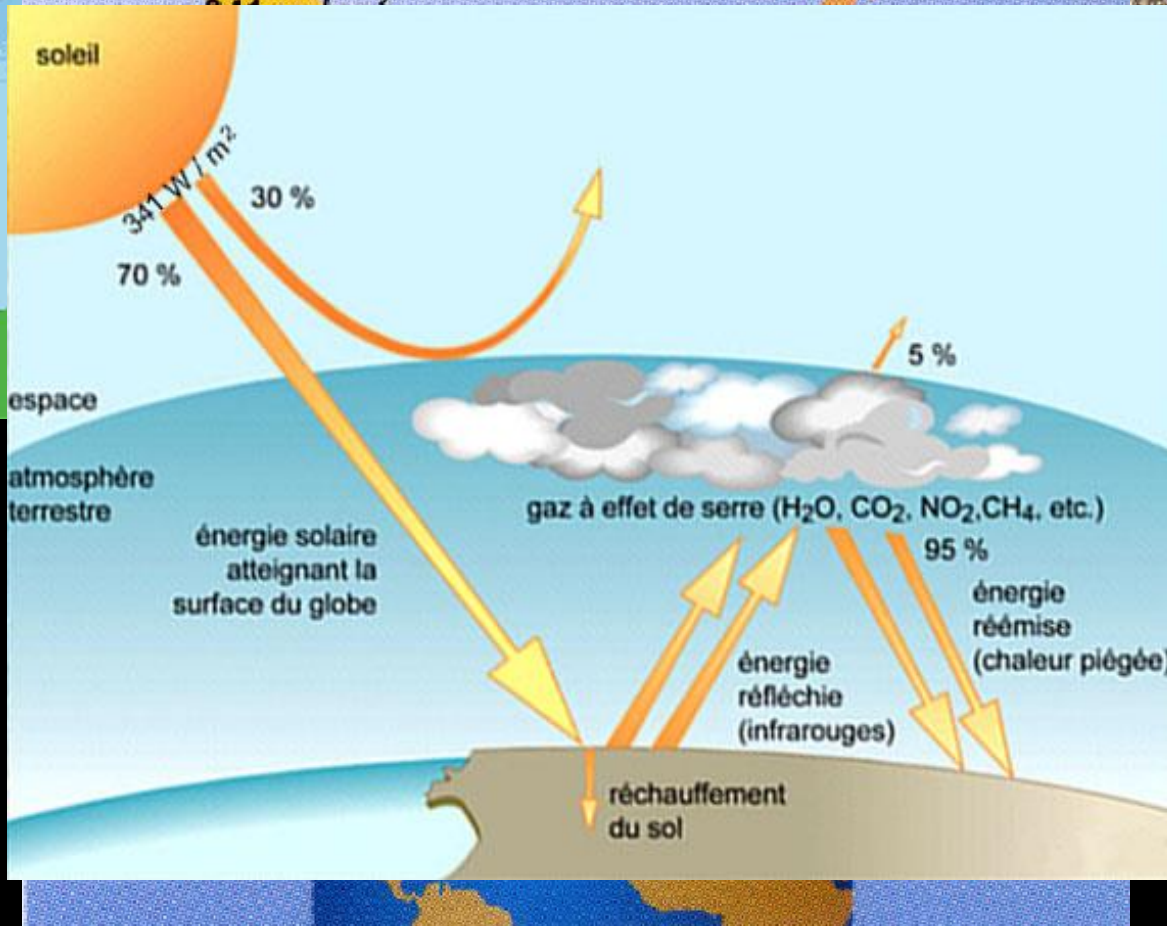
portion du rayonnement terrestre s'échappant

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



Soleil

portion du rayonnement terrestre s'échappant

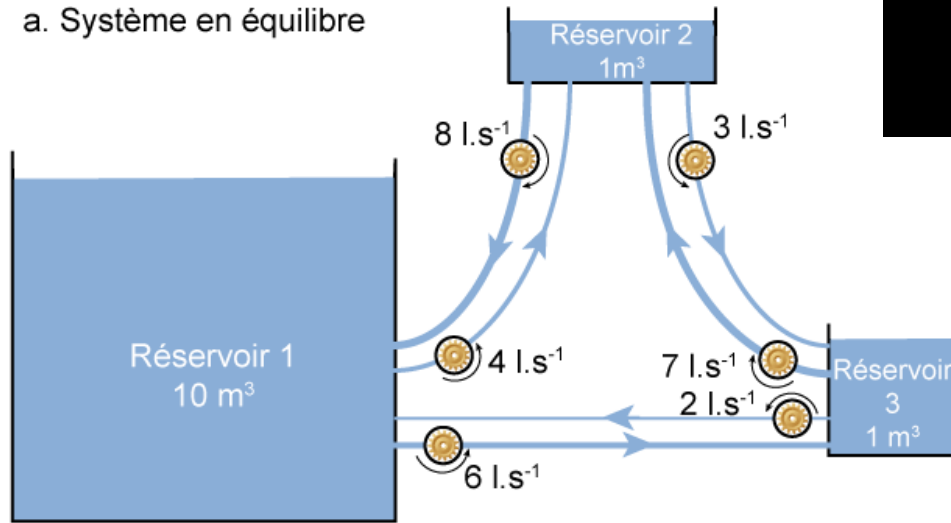


Ce que n'est pas l'effet de serre !

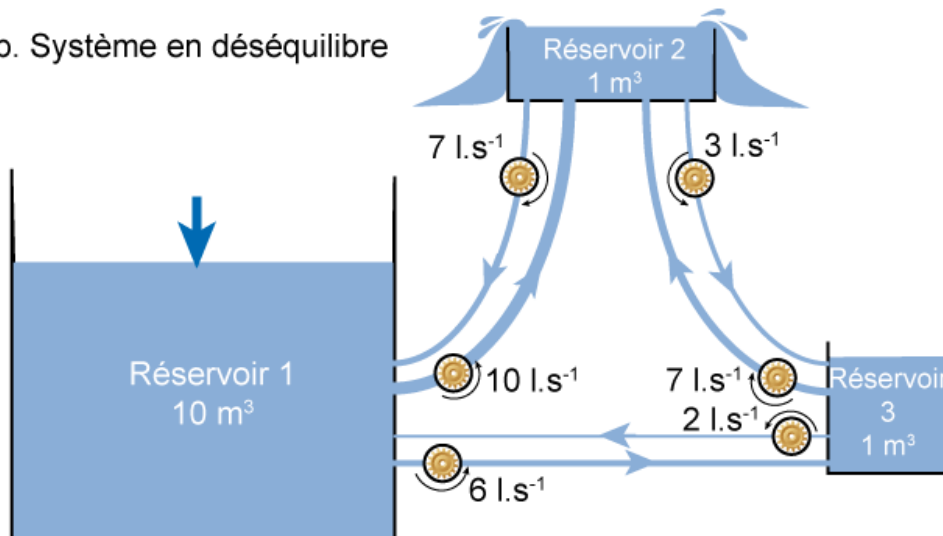
Sur ces schémas comme vous avez déjà du en voir partout, comme les médias nous ont abreuvé pendant la COP 21, sur les 341 W/m² qui arrivent, il en reste environ la moitié, ici 65% = 200 W/m², Watts qui « doivent » être absorbés puisqu'ils ne repartent pas. Si ces Watts sont absorbés, la température doit augmenter. A ce rythme, il faudrait environ 10¹¹ secondes pour porter tout l'océan à l'ébullition (100°C), soit environ 5 000 ans !

Notion de cycles, équilibrés ou déséquilibrés.

a. Système en équilibre

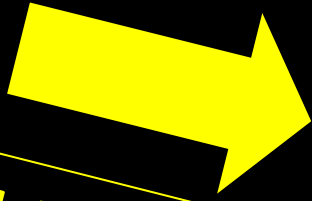


b. Système en déséquilibre



Il peut bien sûr exister des déséquilibres naturels ou anthropiques (comme maintenant), mais ça a des conséquences visibles. Et sur des échelles de temps géologiques, ça ne peut pas durer sans catastrophes.

Intellectuellement, il doit y avoir équilibre sur le long terme.
Et, heureusement, c'est ce qu'on peut mesurer par satellite !

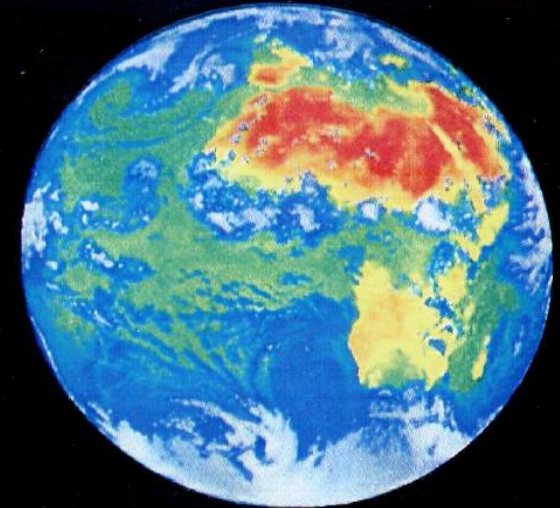


$\approx 341 \text{ W / m}^2$
moyenne jour-nuit,
été-hiver, pôles-
équateur

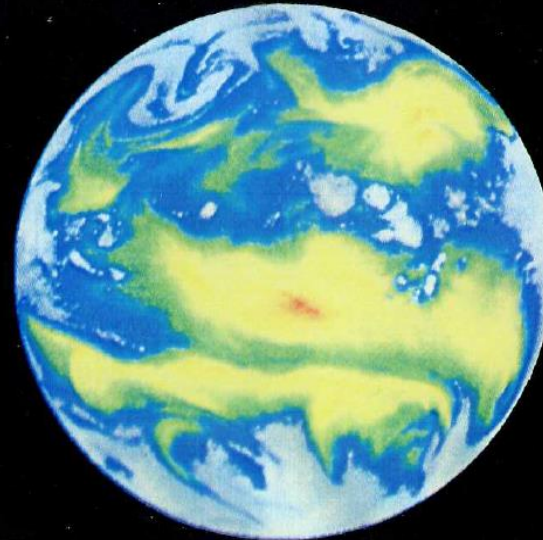
$\approx 341 \text{ W / m}^2$
total du rayonnement
réfléchi + Infra-Rouge
ré-émis



Visible (réfléchi)



Infra-Rouge proche



Infra-Rouge moyen



Infra-Rouge lointain

Exemple de « gens » qui n’y ont rien compris !



ÉNERGIE, AIR ET CLIMAT	EAU ET BIODIVERSITÉ	PRÉVENTION DES RISQUES	DÉVELOPPEMENT DURABLE	TRANSPORTS	BÂTIMENT ET VILLE DURABLES	MER ET LITTORAL
------------------------	---------------------	------------------------	-----------------------	------------	----------------------------	-----------------

Accueil du site > Énergie, Air et Climat > Effet de serre et changement climatique > Comprendre le changement climatique > Pourquoi la terre chauffe ? > **L'effet de serre**

ÉNERGIE, AIR ET CLIMAT

- Actualités
- Publications et chiffres clés
- Économies d'énergie
- Énergies

La transition énergétique pour la croissance verte

Effet de serre et changement climatique

Comprendre le changement climatique

Pourquoi la terre chauffe ?

Effets du réchauffement climatique : des impacts visibles

Limiter la hausse de la température à 2°C

S'adapter au changement climatique

À lire, voir et partager

Emissions de gaz à effet de serre : les constats

Impacts du changement climatique

Actions de la France pour réduire ses émissions

Actions de la France pour s'adapter au changement climatique

Marchés carbone

Actions et négociations à l'international

Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC)

Air et pollution atmosphérique

Véhicules

Conférence Paris Climat 2015

Pourquoi la terre chauffe ?

L'effet de serre est un phénomène naturel qui s'est renforcé depuis l'ère industrielle. Un changement climatique est aujourd'hui en marche. Les experts du GIEC nous informent déjà depuis plusieurs années sur les effets que ce changement climatique pourrait avoir. **Dans notre quotidien aussi, nous pouvons constater les changements. C'est pourquoi il convient de se mobiliser et d'agir.** Tout le monde est concerné : élus, acteurs économiques, citoyens, pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre, mais aussi pour s'adapter aux changements déjà engagés.

25 février 2015 - ÉNERGIE, AIR ET CLIMAT



Sommaire :

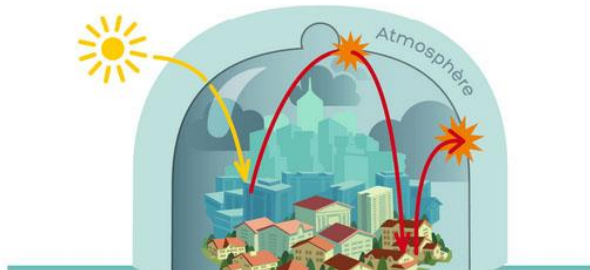
- L'effet de serre
- Les principaux gaz à effet de serre
- Des émissions de gaz à effet de serre en augmentation

Suivant

L'effet de serre

25 février 2015 (mis à jour le 7 avril 2015)

La terre reçoit toute son énergie du soleil. Seule une partie de cette énergie est absorbée par la surface terrestre et l'atmosphère ; le reste étant immédiatement renvoyé vers l'espace. Les gaz à effet de serre contenus dans l'atmosphère ont un rôle important dans la régulation du climat. **Ils empêchent une large part de l'énergie solaire (les rayonnements infrarouges) d'être renvoyée de la Terre vers l'espace. C'est l'effet de serre.**



En savoir plus



Chiffres clés du climat France et Monde édition 2015



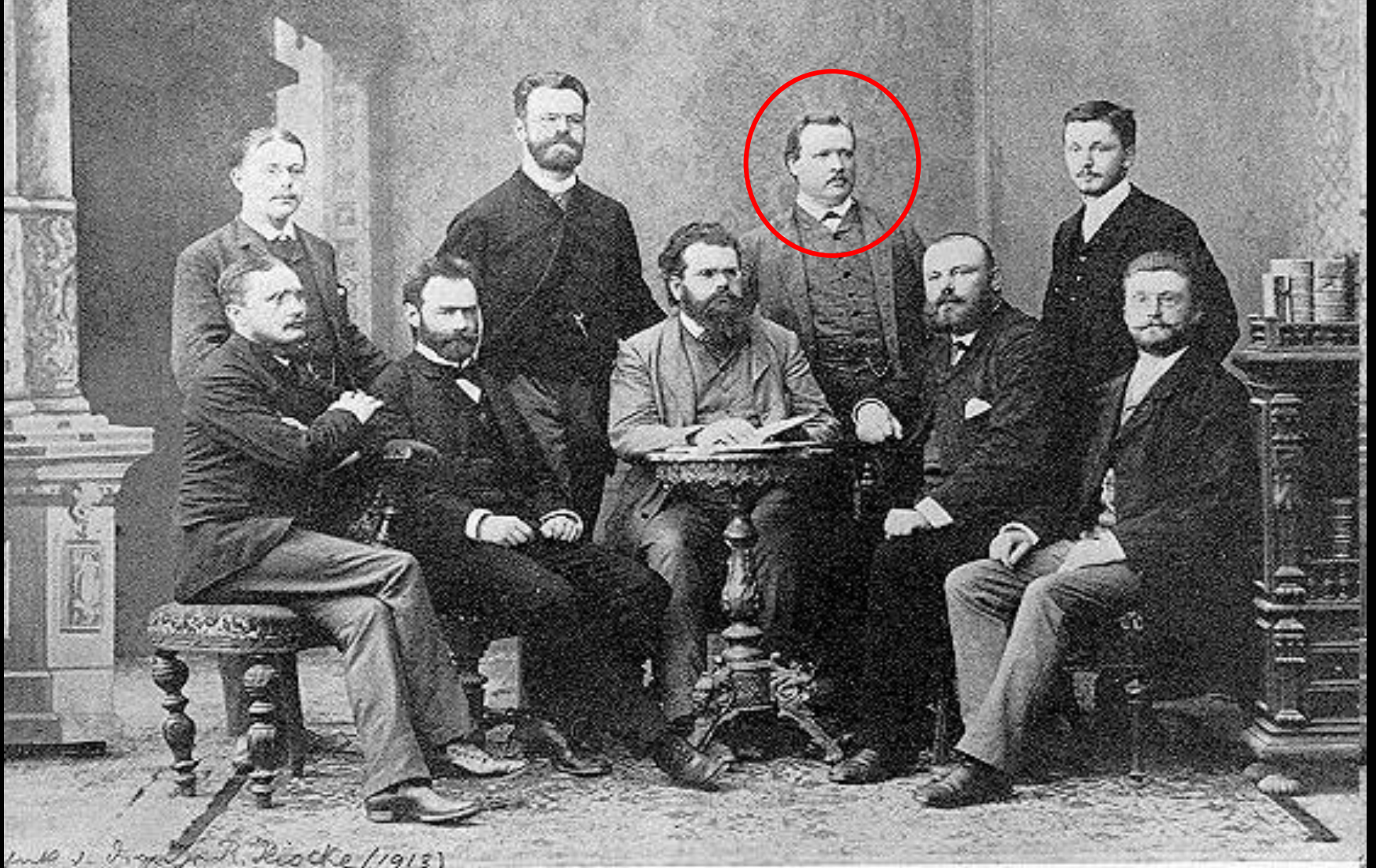
Livret "Mieux comprendre le GIEC"

► [En savoir plus sur les émissions de gaz à effet de serre dans le Monde, en Europe et en France](#)

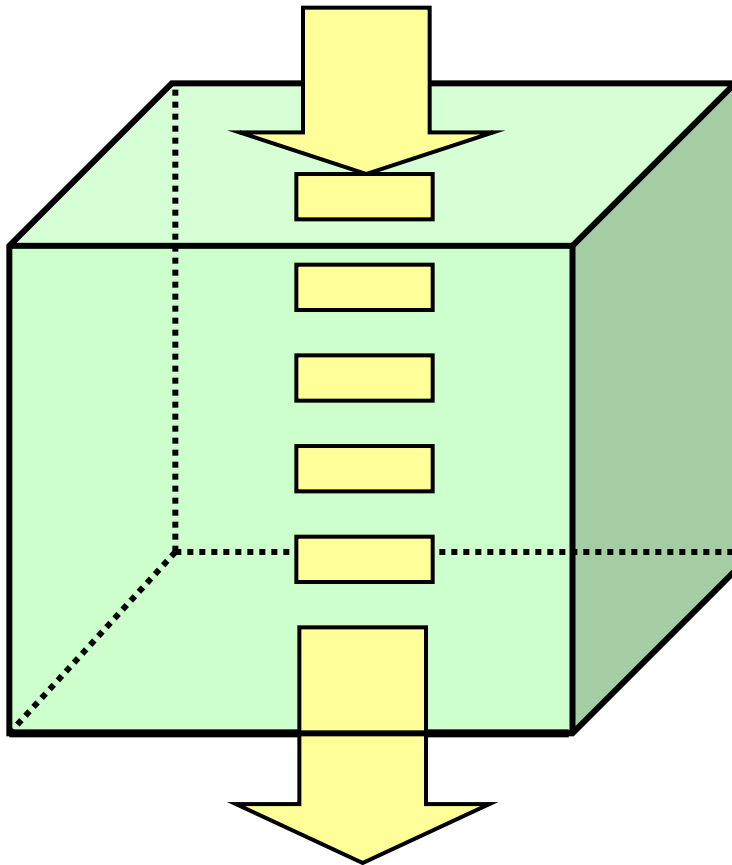
► [Fiche du Panorama énergies-climat 2014 : « Lutte contre le changement climatique »](#)

La terre reçoit toute son énergie du soleil. Seule une partie de cette énergie est absorbée par la surface terrestre et l'atmosphère ; le reste étant immédiatement renvoyé vers l'espace.

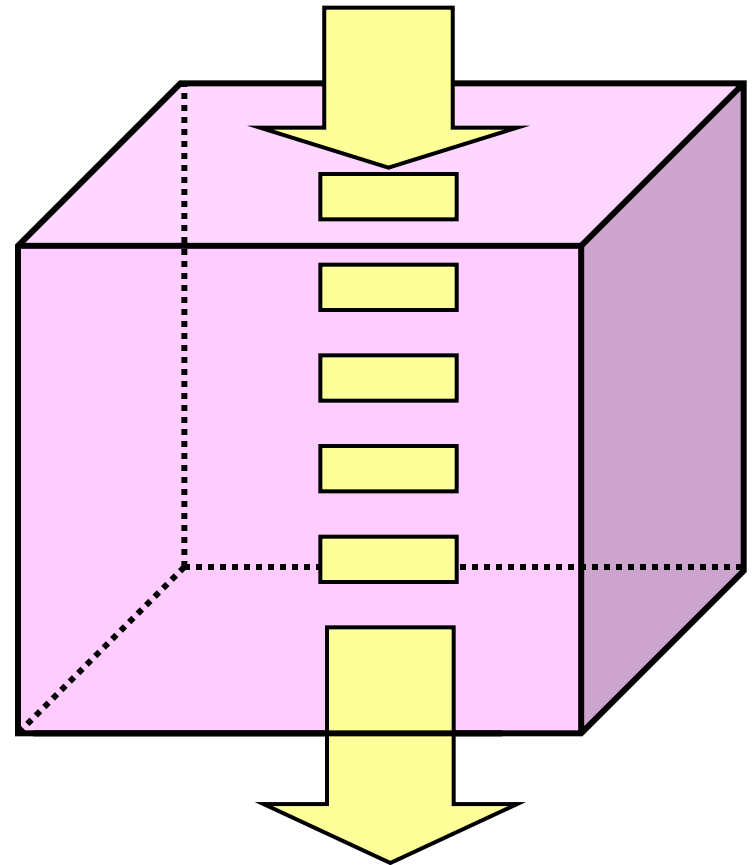
Les gaz à effet de serre contenus dans l'atmosphère ont un rôle important dans la régulation du climat. **Ils empêchent une large part de l'énergie solaire (les rayonnements infrarouges) d'être renvoyée de la Terre vers l'espace. C'est l'effet de serre.**



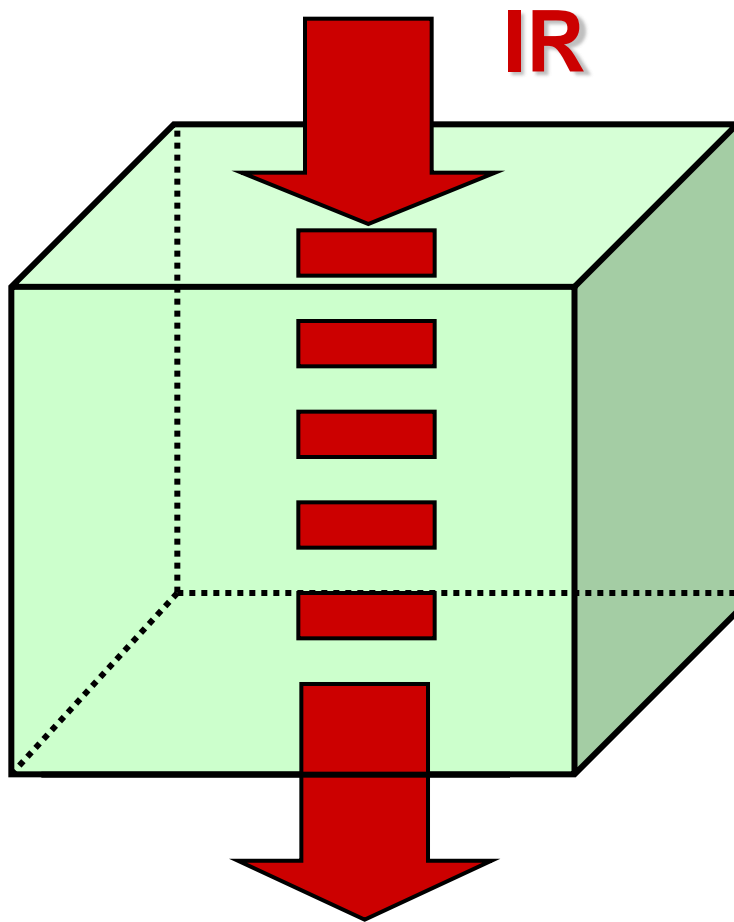
A défaut de l'être par les responsables de la « com » des ministères, la physique de l'effet de serre est « bien » connue depuis Svante Arrhenius (1859-1927).



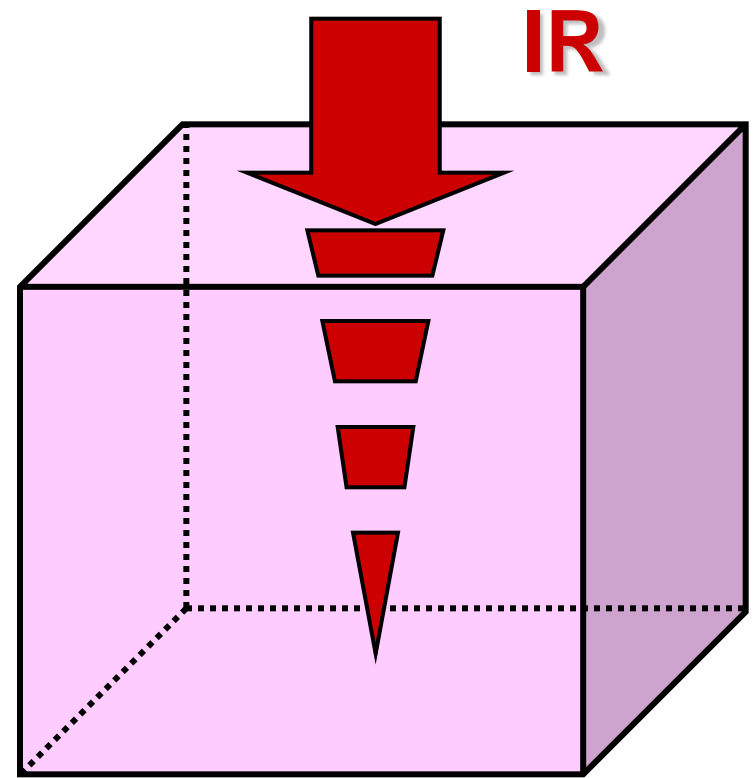
Le diazote (N_2), le dioxygène (O_2) sont transparents à la lumière visible.



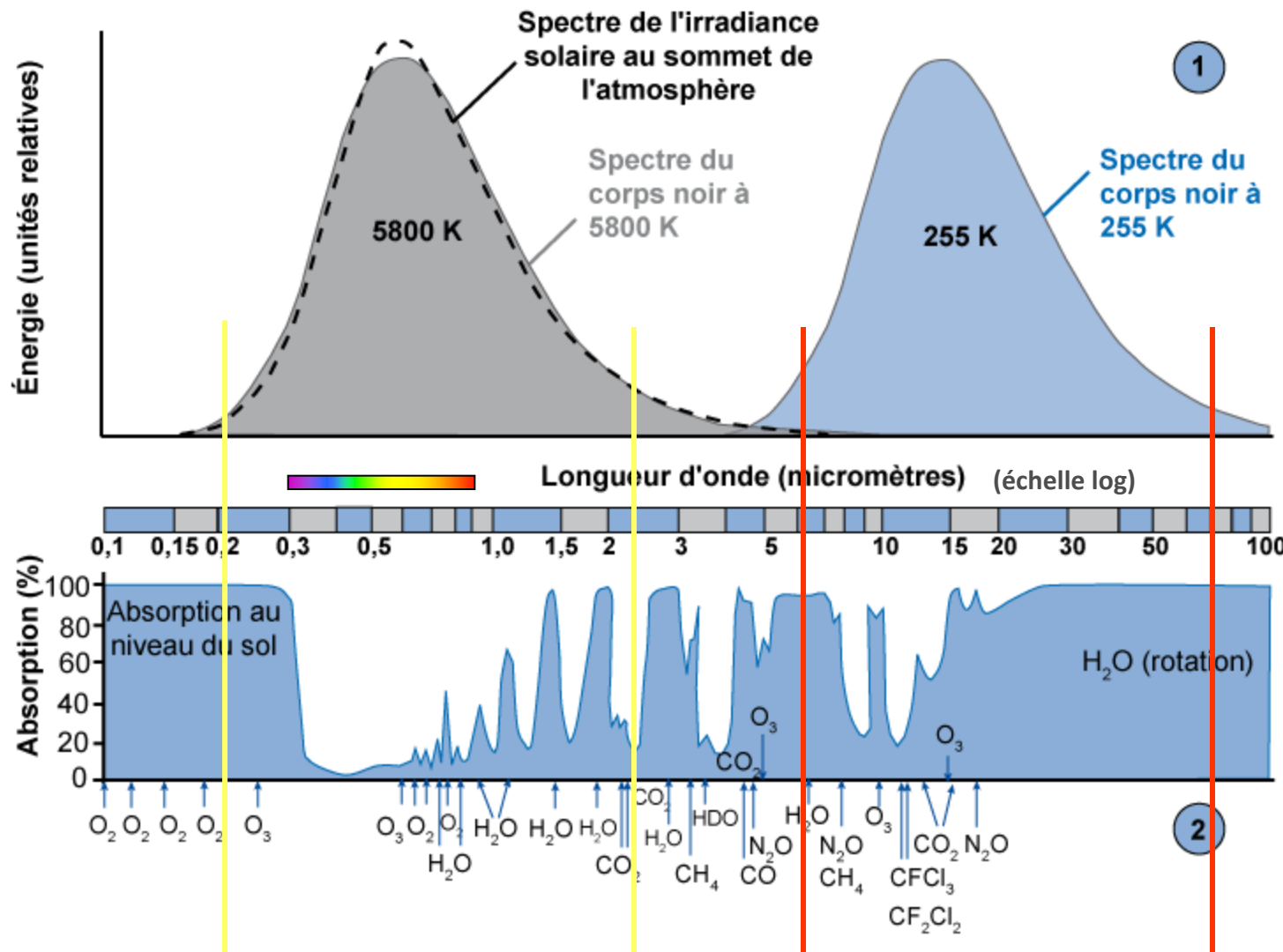
Le dioxyde de carbone (CO_2), la vapeur d'eau (H_2O), le méthane (CH_4) aussi.



Le diazote, le dioxygène sont transparents aux Infra-rouge.



Le dioxyde de carbone, le méthane, la vapeur d'eau ... sont opaques aux Infra-Rouge qu'ils absorbent.



L'atmosphère est principalement transparente à la lumière incidente

L'atmosphère est majoritairement opaque aux Infra-Rouges ré-émis par la Terre



Le fonctionnement **théorique** d'une serre parfaite

Vitre mince,
transparente
au rayonnement
solaire, opaque
aux Infra-rouge

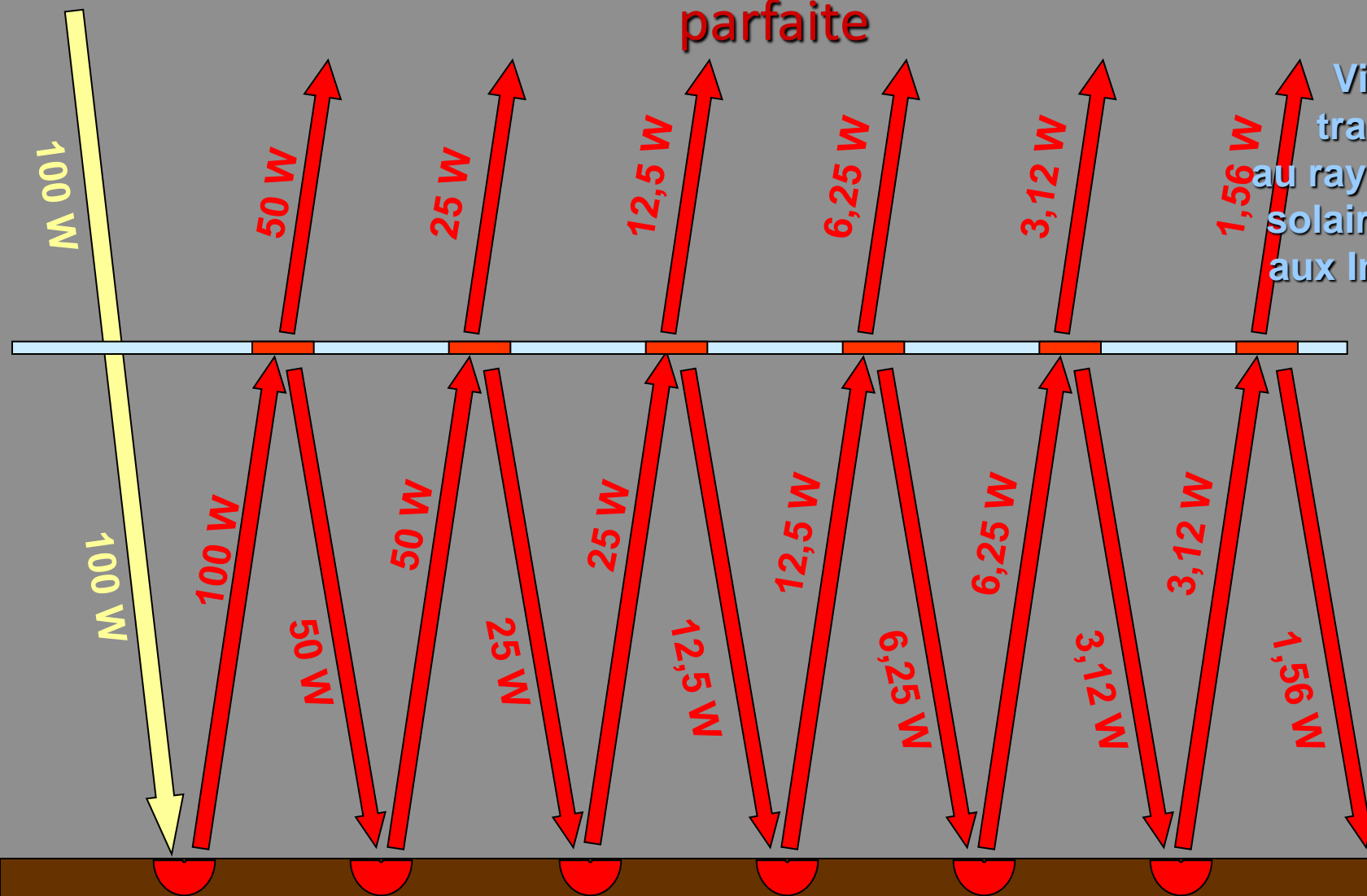
Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

parfaite

Vitre mince, transparente au rayonnement solaire, opaque aux Infra-rouge



Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



$$50 + 25 + 12,5 + 6,25 + 3,12 + 1,56 + \dots = 100$$

Attention, c'est un schéma, une décomposition « pour faire comprendre ». Dans la réalité, il n'y a pas ce « va et vient » infini de photons qui font ces aller-retours sans fin !
Regardons la somme des chiffres du haut.

Vitre mince, transparente au rayonnement solaire, opaque aux Infra-rouge

Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements

Donc, qu'est ce qu'il sort de la serre ?

$$50 + 25 + 12,5 + 6,25 + 3,125 + \dots$$

$$50 + 50/2 + 50/4 + 50/8 + 50/16 + \dots$$

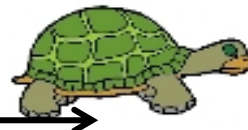
soit $50 (1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16\dots)$

Avec une calculette, faites calculer à des élèves (ou des ministres) que font $1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16\dots$ sans jamais s'arrêter. Ils arriveront assez vite à 1,9, puis à 1,99, puis 1,999 .. mais ne dépasseront jamais 2 !

20 km/h



20 m/h



20 km



Le paradoxe d'*Achille* et de la *tortue*, formulé par Zénon d'Élée, vers l'an - 450 de notre ère.

$$1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16 + \dots$$

$$1/2^0 + 1/2^1 + 1/2^2 + 1/2^3 + 1/2^4 + \dots$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (1/2)^n$$

Pour les forts en math, rappelons que la série :

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

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

$$1/(1 - 1/2) = 2$$

Une belle occasion d'associer sciences de la Terre et de l'atmosphère, mathématiques et même histoire.

Ah, si nos dirigeants, nos journalistes, nos écologistes ... avaient de la culture ...



Qu'est ce qui arrive sur la serre : 100 W

Qu'est ce qui repart de la serre : 50+25+12,5+6,25+ ... = 100 W

Qu'est ce qui arrive au sol : 100+ 50+25+12,5+6,25+ ... = 200 W

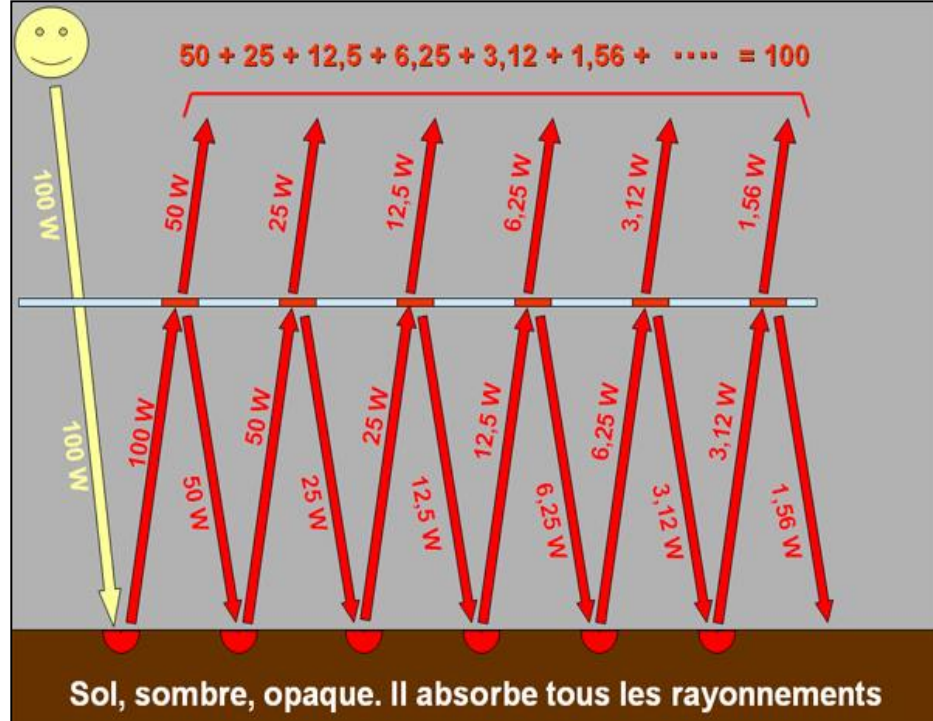
Qu'est ce qui repart du sol : 100+ 50+25+12,5+6,25+ ... = 200 W

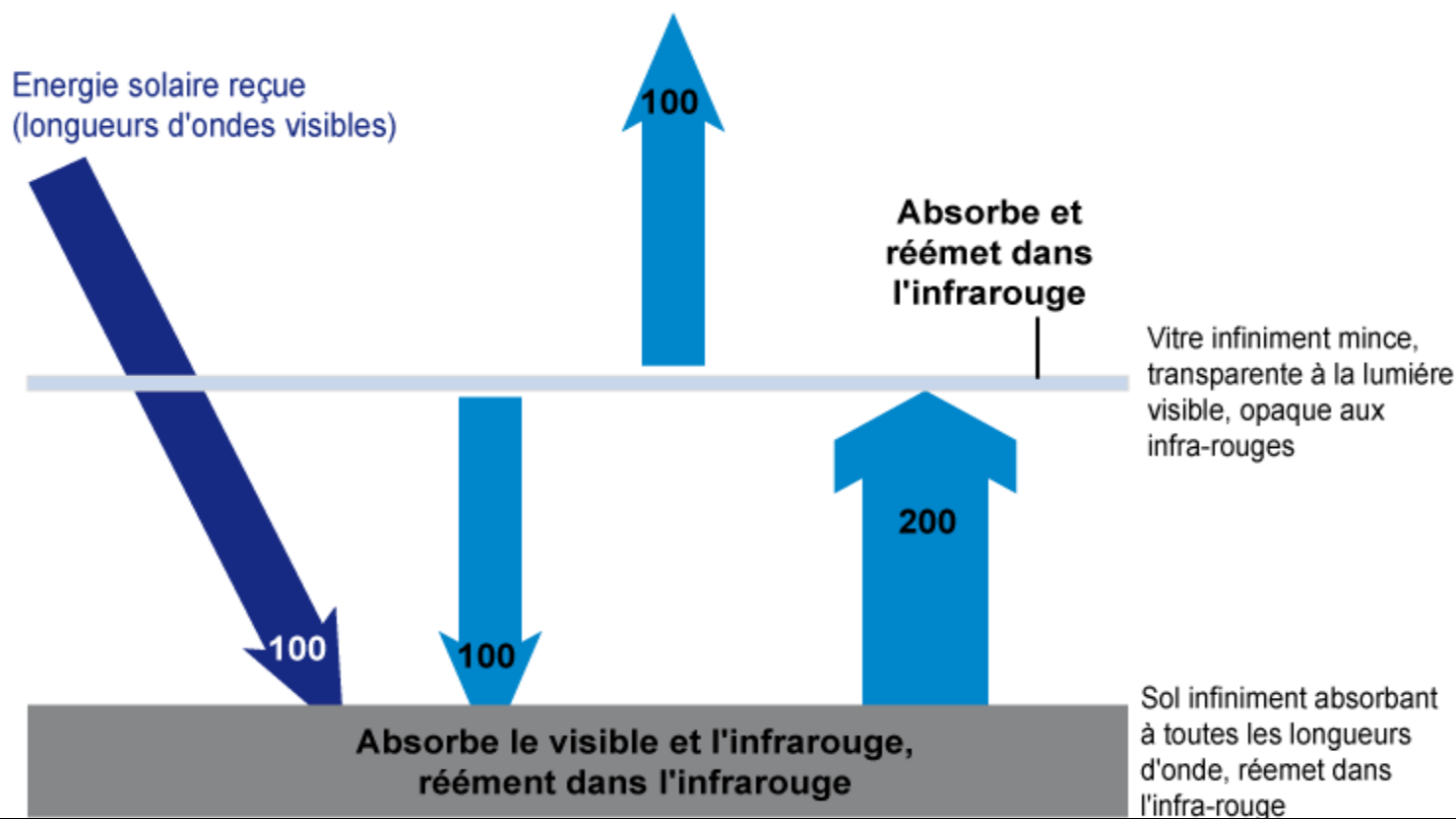
Qu'est ce qui arrive sur la vitre : 100+ 50+25+12,5+6,25+ ... = 200 W

Qu'est ce qui repart de la vitre : 50+50+25+25+12,5+12,5 ... = 200 W

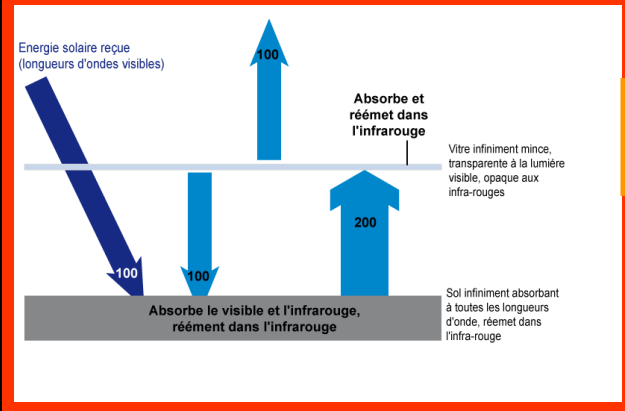
Que ce soit la serre dans son ensemble, le sol, la vitre, tout est en équilibre, tout renvoie autant d'énergie qu'il en reçoit, rien ne « garde » de l'énergie (heureusement !).

Mais sans serre, le sol recevrait (et renverrait) 100 W. Avec une serre, il en reçoit (et en renvoie) le double (200 W) !



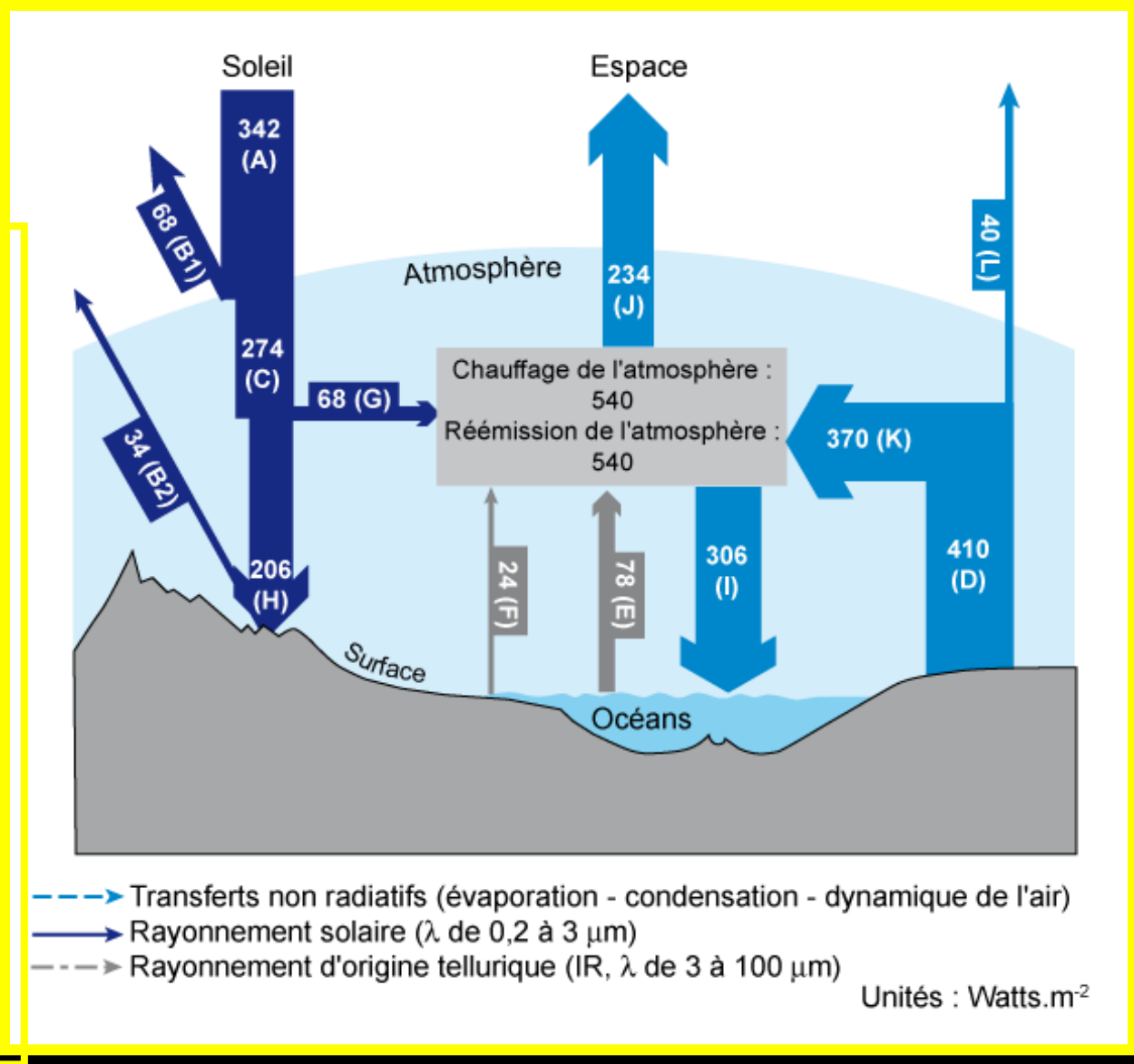


Avec la même énergie incidente et renvoyée par le système serre + sol, le sol reçoit (et renvoie) 2 fois plus d'énergie avec serre que sans serre. Et comme $W = \sigma T^4$, si W est multiplié par 2, T l'est par $\sqrt[4]{2} = 1,19$. Par exemple, une planète « théoriquement » à 255 K (-18°C) passe à $255 \times 1,19 = 303$ K (30°C)



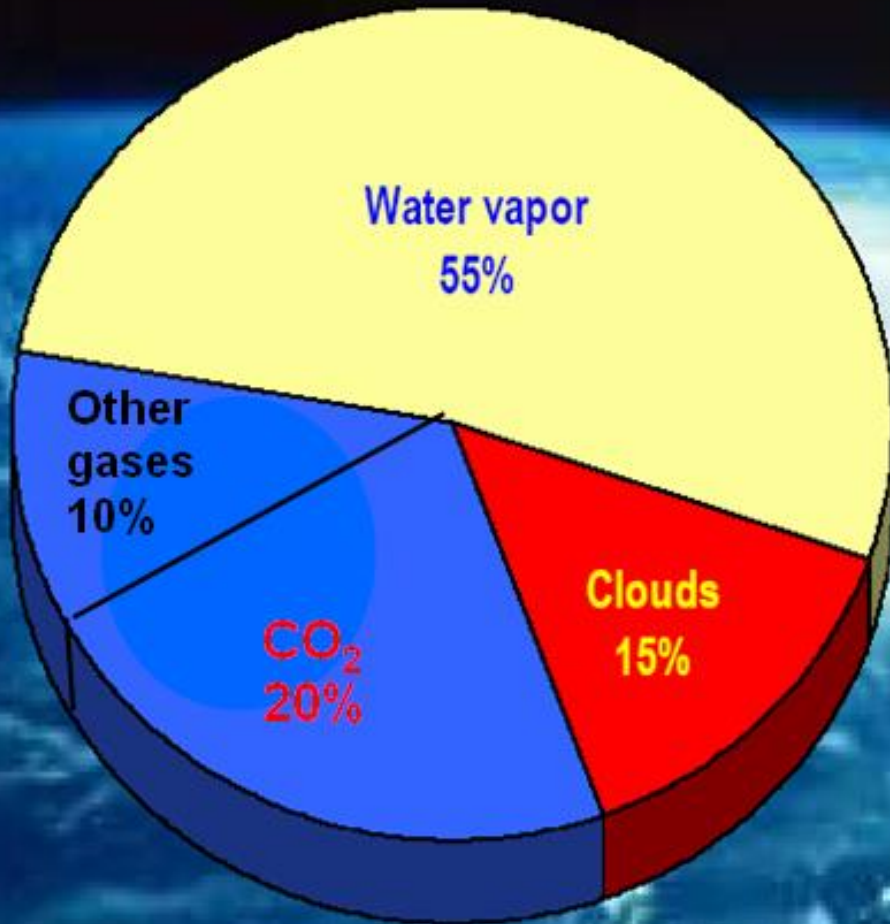
Le modèle

La réalité naturelle, forcément plus complexe que le modèle : T passe de -18°C théorique à $+14^{\circ}\text{C}$ de moyenne réelle (255 à 287 K) soit une multiplication par 1,13



L'effet de serre naturel sur Terre

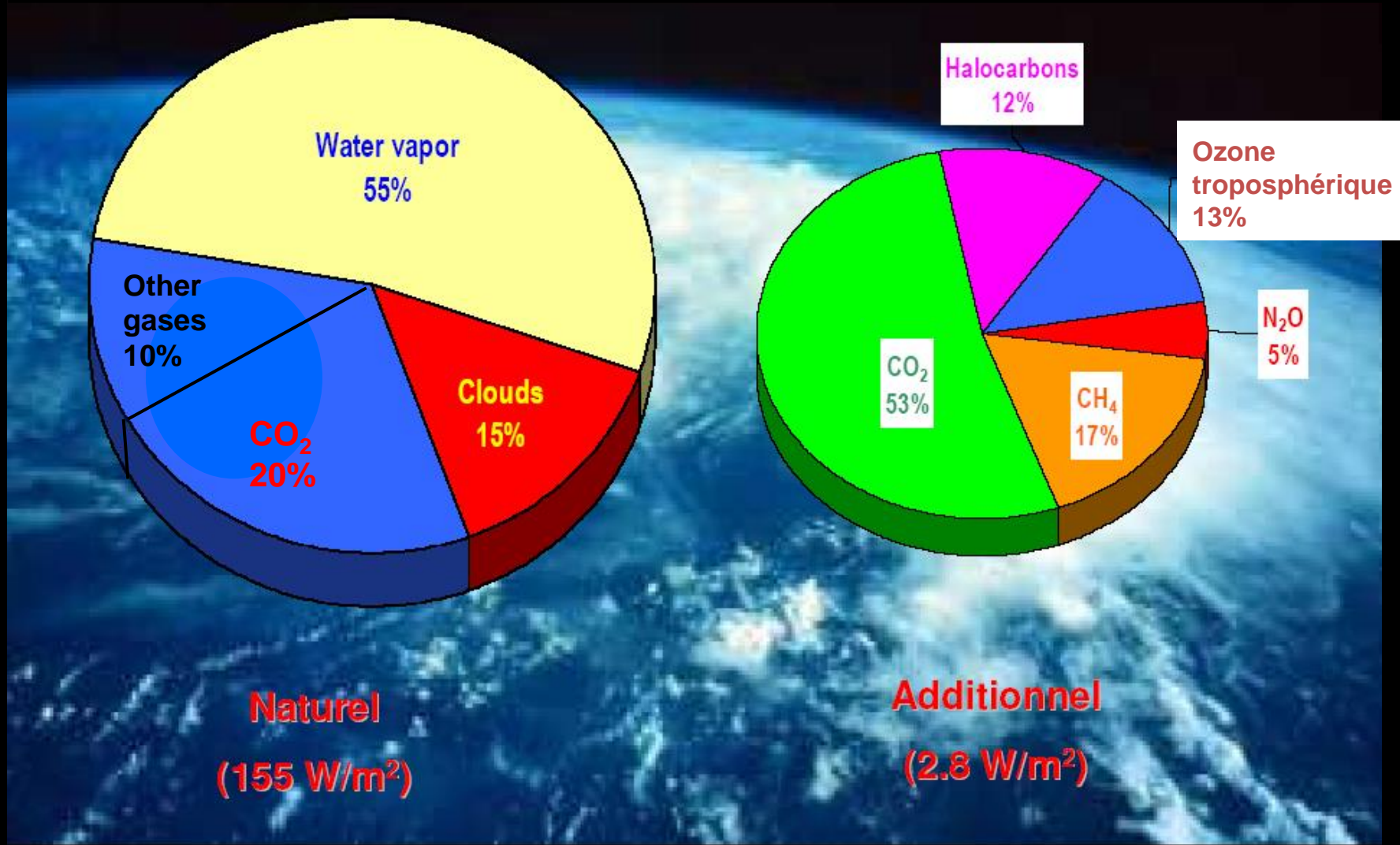
L'atmosphère de la Terre comprend 78% de diazote, 21% de dioxygène, mais 1% d'autres gaz, dont la vapeur d'eau, le méthane et le CO₂, gaz à effet de serre (dits GES). La Terre est une serre naturelle !



Cet effet de serre naturel sur Terre rajoute 155 W/m^2 aux 341 W/m^2 du rayonnement du soleil arrivant au sol (la Terre n'est pas une serre « parfaite »). Avec 341 W/m^2 , la température moyenne serait de -18°C . Avec $341 + 155 = 496 \text{ W/m}^2$, la température moyenne est de $+14^\circ\text{C}$, soit 32° de plus. Merci l'effet de serre naturel !

(chiffres de l'avant dernier GIEC)

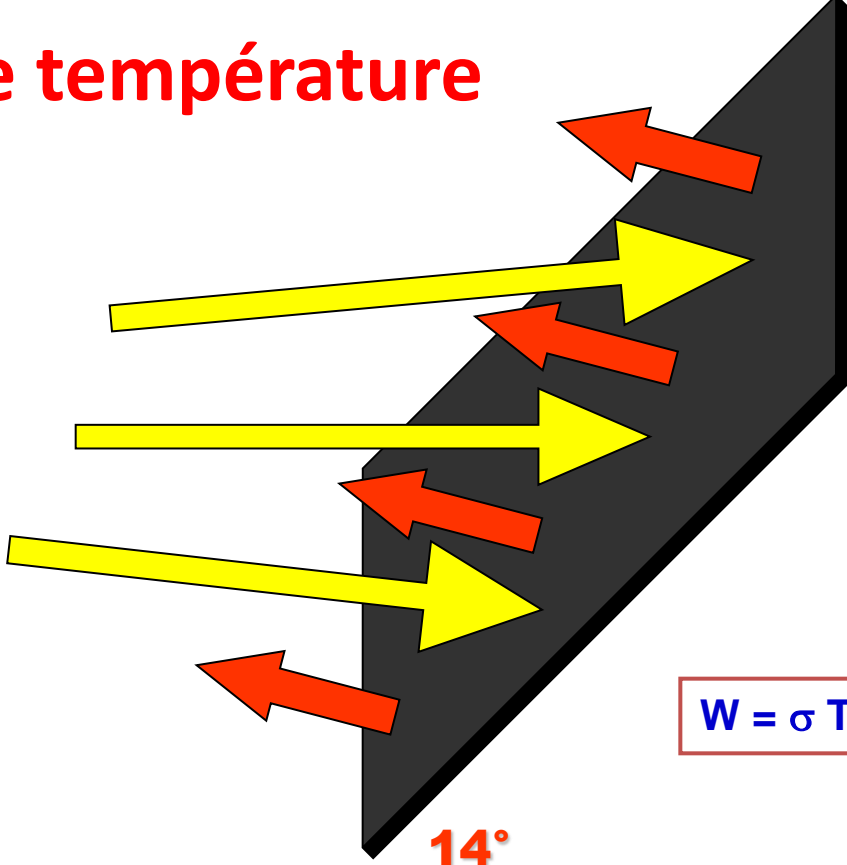




Et actuellement, on augmente l'effet de serre (chiffre de l'avant dernier GIEC).

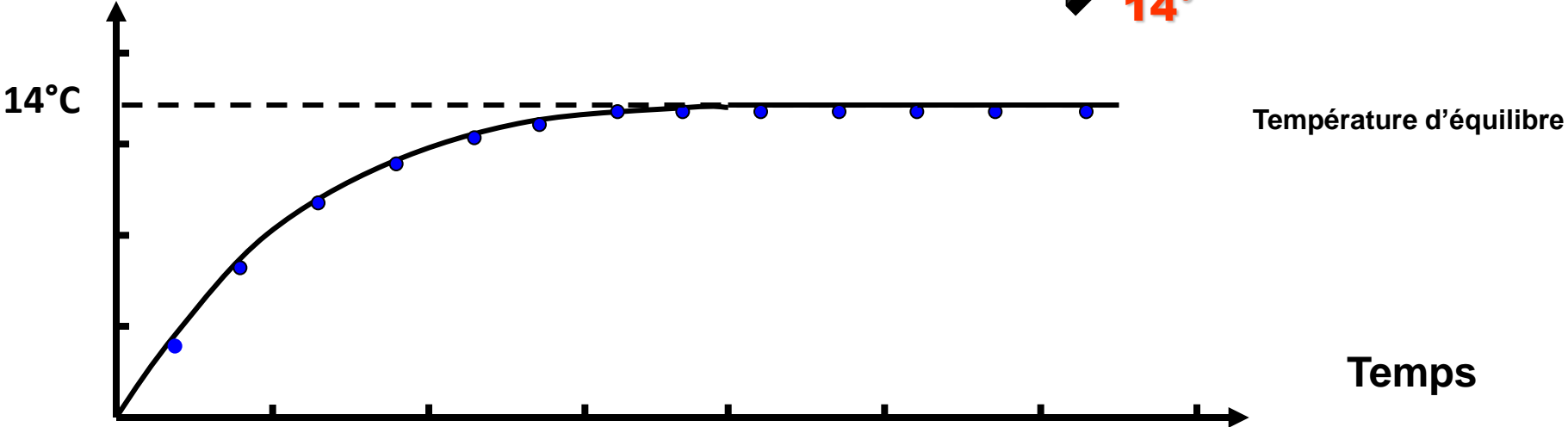
Rappelez vous la notion de température d'équilibre

$$341 + 155 = 496 \text{ W/m}^2$$



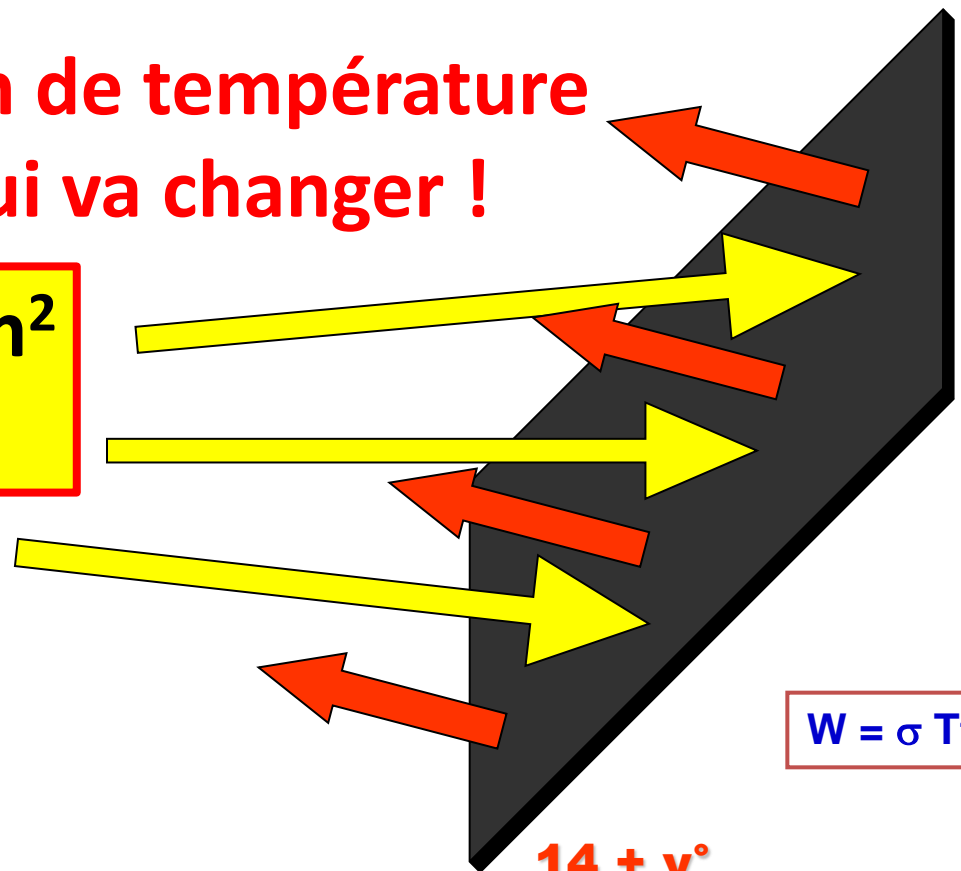
$$W = \sigma T^4$$

Température de la Terre



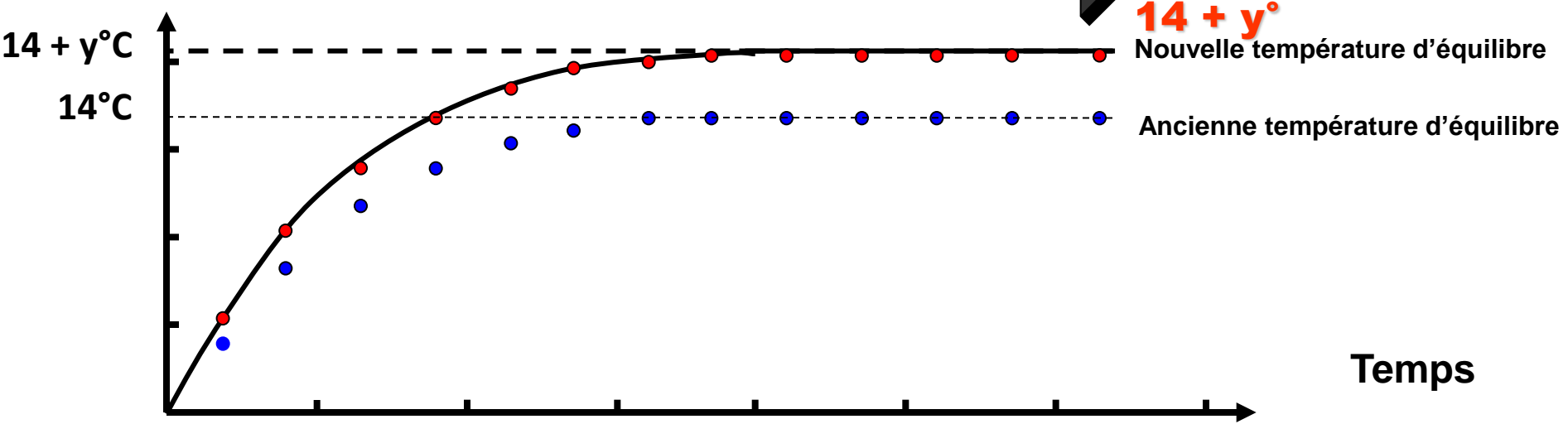
Rappelez vous la notion de température d'équilibre. C'est elle qui va changer !

$$341 + 155 + X \text{ W/m}^2 = 50X \text{ W/m}^2$$

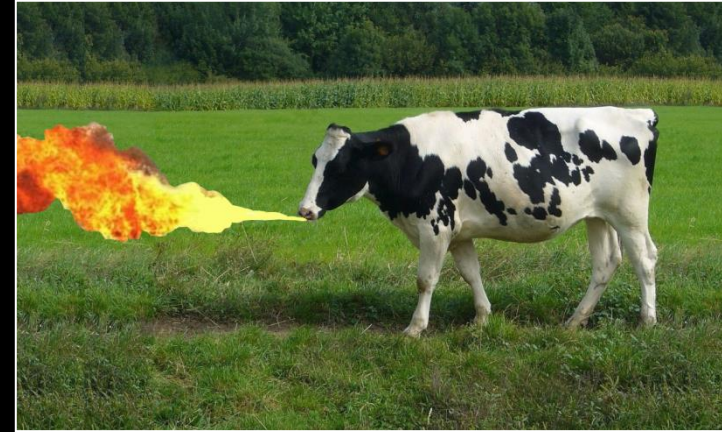


$$W = \sigma T^4$$

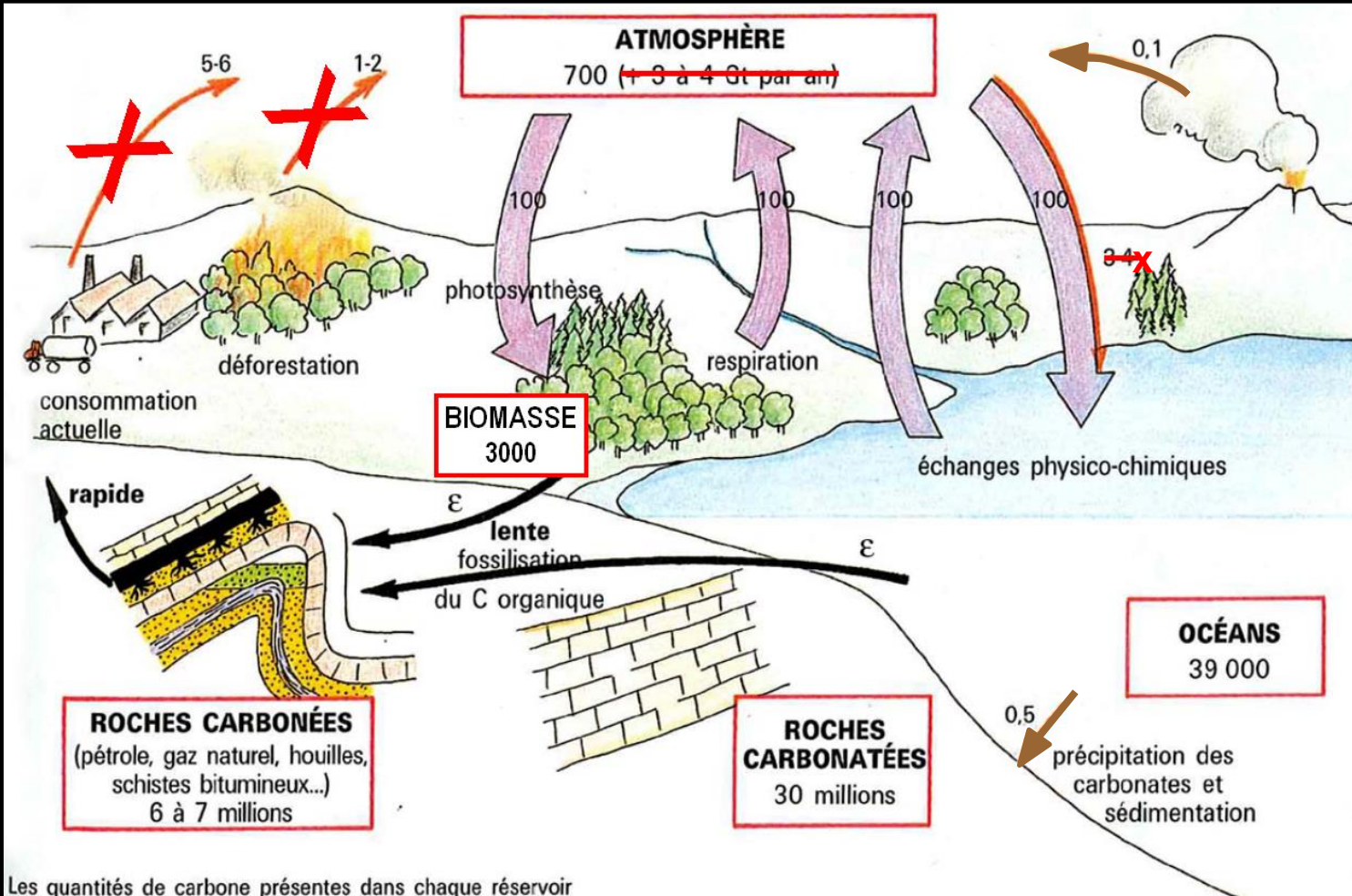
Température de la Terre



Deuxième clé : bien maîtriser le cycle du carbone.



Voici le cycle du carbone raconté aux « enfants » (livre SVT, 1ere S, programme en vigueur l'année des accords de Kyoto, 1997), quasi supprimé en 2000 * !



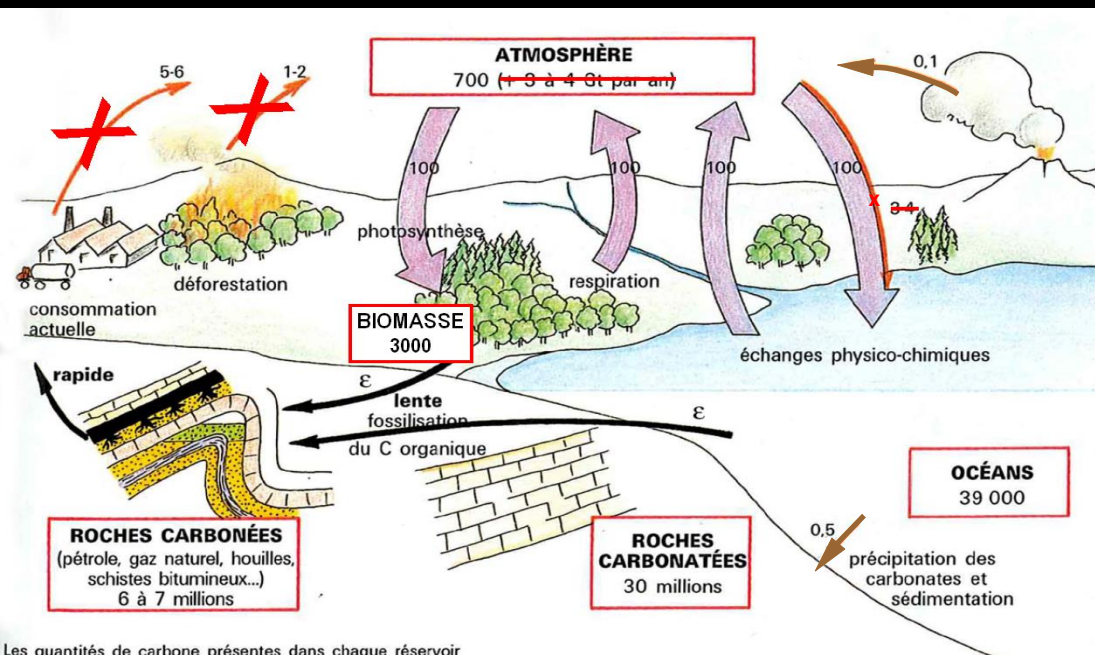
* Appréciez la clairvoyance des instances dirigeantes de l'Education Nationale, des auteurs de programmes en particuliers !

Les quantités de carbone présentes dans chaque réservoir sont exprimées en Gt; les flux de carbone sont exprimés en Gt·an⁻¹ (1 Gt = 1 milliard de tonnes).

+ et ~~xxx~~ : n'existait pas avant la révolution néolithique

Le cycle du carbone d'après un livre de SVT de 1ere S, programme 1993

Le cycle du carbone, ou plutôt ce que n'est pas le cycle du carbone !



Les quantités de carbone présentes dans chaque réservoir sont exprimées en Gt; les flux de carbone sont exprimés en Gt-an⁻¹ (1 Gt = 1 milliard de tonnes).

+ et ~~xxxx~~: n'existait pas avant la révolution néolithique

Le cycle du carbone d'après un livre de SVT de 1ere S, programme 1993

Ce schéma est l'exemple d'une vision de « mauvais écologiste » du cycle du carbone.

Pourquoi est-ce géologiquement et intellectuellement inacceptable ?

C'est un cycle totalement déséquilibré à l'échelle géologique, et même historique.

Qu'est ce qui rentre dans le réservoir superficiel (atmosphère + océan + biomasse) : 0,1 (le volcanisme).

Qu'est ce qui sort de ce réservoir superficiel : 0,5 (calcaire) → bilan net : il en sort 0,4 Gt/an.

En $700 / 0,4 = 1750$ ans, il n'y aurait plus de carbone dans l'atmosphère et en 100 000 ans plus de carbone dans l'océan et la biomasse.

Depuis 4,5 Ga, les volcans ont craché $4,5 \cdot 10^9 \times 0,1 = 450\,000\,000$ de Gt de carbone. Où sont ces 450 millions de Gt ? Le schéma n'en montre que 37 042 700, c'est à dire 12 fois moins. Où est ce carbone ?

On se place avant la révolution industrielle

Ce schéma est l'exemple d'une vision de « mauvais écologiste » du cycle du carbone.

est-ce géologiquement et stable ?

le du

ca
ce
c

cons
actu

sont exprimés en Gt-an⁻¹ (1 Gt = 10⁹ tonnes)
+ et xxx : n'existaient pas avant la révolution industrielle

il
ait
re et
dans
ranché
st de
ons de
ue 37
oins. Où

est ce carbone ?

Il ne faut pas oublier que dans la nature, qui a le temps pour elle, un déséquilibre si léger soit-il, a des conséquences « énormes ».
Un déséquilibre de 0,01% (chiffre a faire pâlir d'envie tous les économistes et autres gestionnaires) qui durerait un million d'années, ça engendrerait un déséquilibre de 10 000 %, soit une multiplication par 100 en cas de déséquilibre positif. Ça peut arriver, géologiquement, mais si ça arrive, ça se voit !

Les réservoirs de carbone et d'O₂



Le carbone (en masse d'élément Carbone)

L'atmosphère : ≈ 850 Gt

La biosphère : 3000 à 6000 Gt, dont la majorité dans les sols, les sédiments et les végétaux

L'océan : $\approx 38\,000$ Gt (surtout sous forme de HCO_3^- , mais aussi de CO_2 dissout et de CO_3^{--})

La croûte : ≈ 70 millions de Gt (3/4 à 4/5 de carbonates type calcaire, et 1/4 à 1/5 de roches carbonées type charbon, pétrole, kérogène ...)

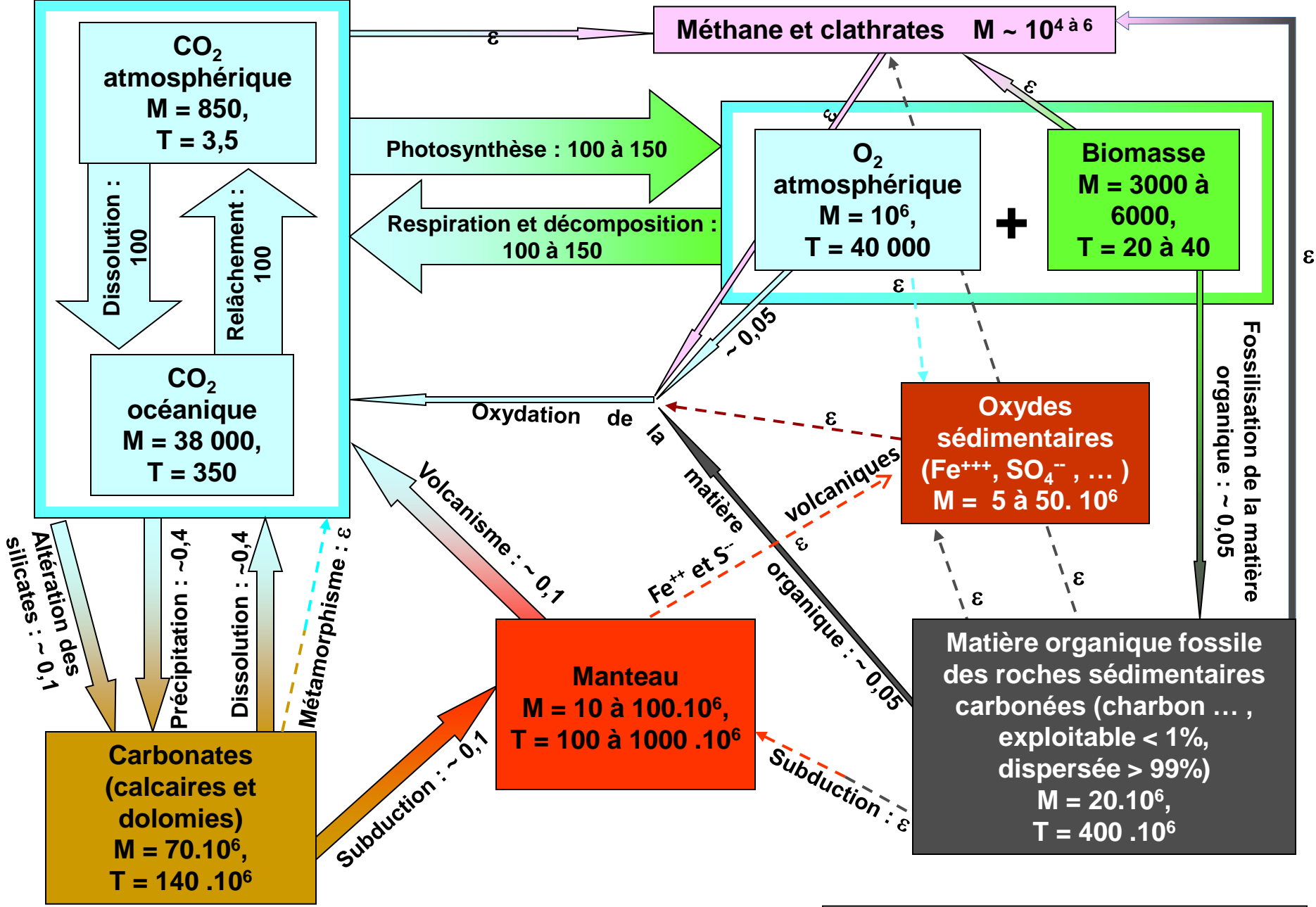
Le manteau : de 10 à 100 millions de Gt

La molécule de di-oxygène (O₂)

L'atmosphère : ≈ 1 million de Gt

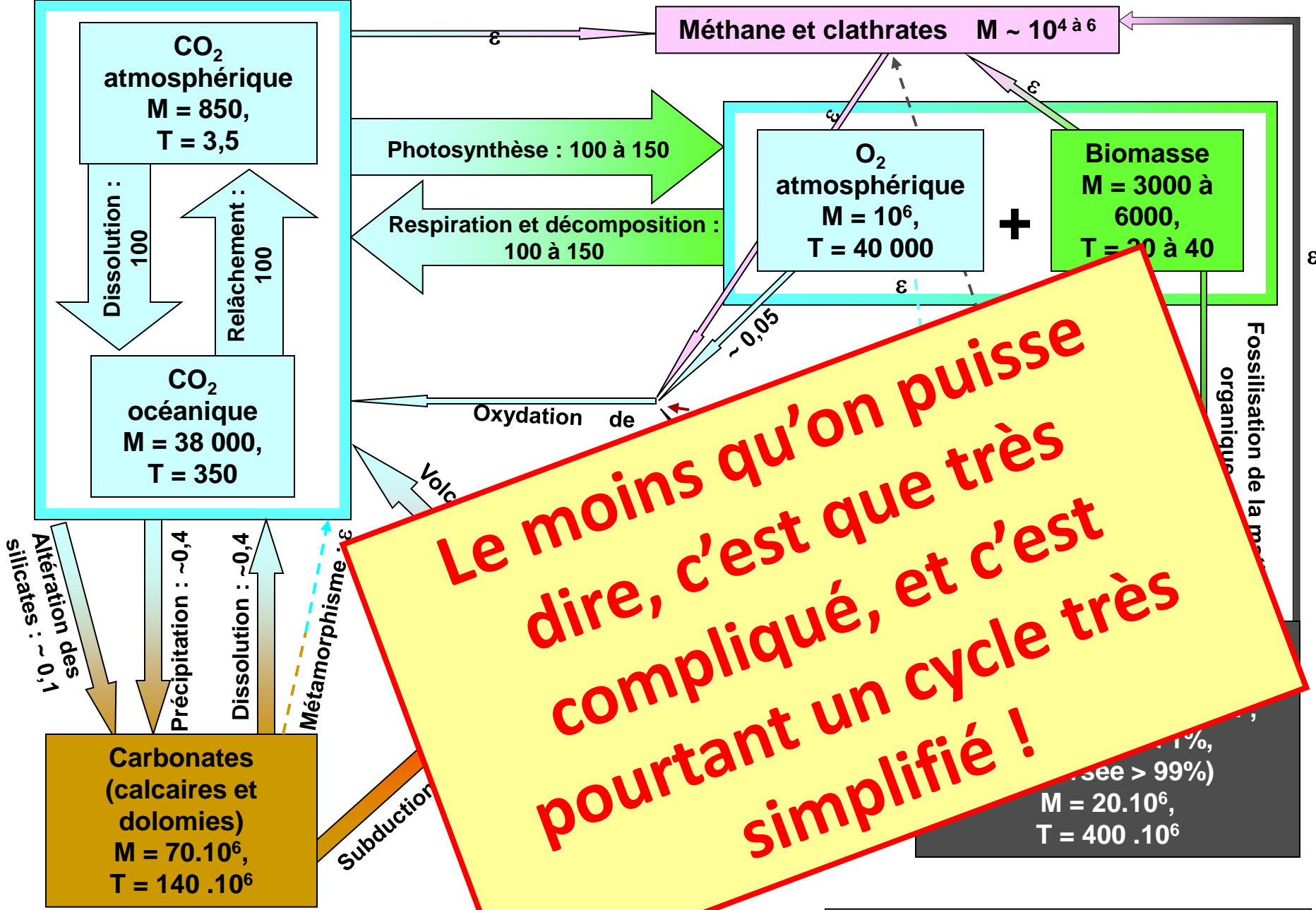
L'océan : ≈ 1000 Gt (dissout dans l'eau)

Unité : 1 Giga-tonne (Gt) = 10^9 t = 10^{12} kg



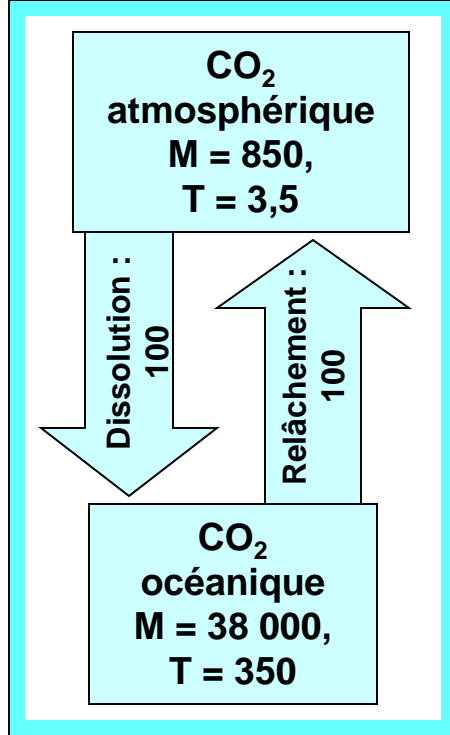
Le cycle du Carbone/Oxygène

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



Le cycle du Carbone, de l'Oxygène

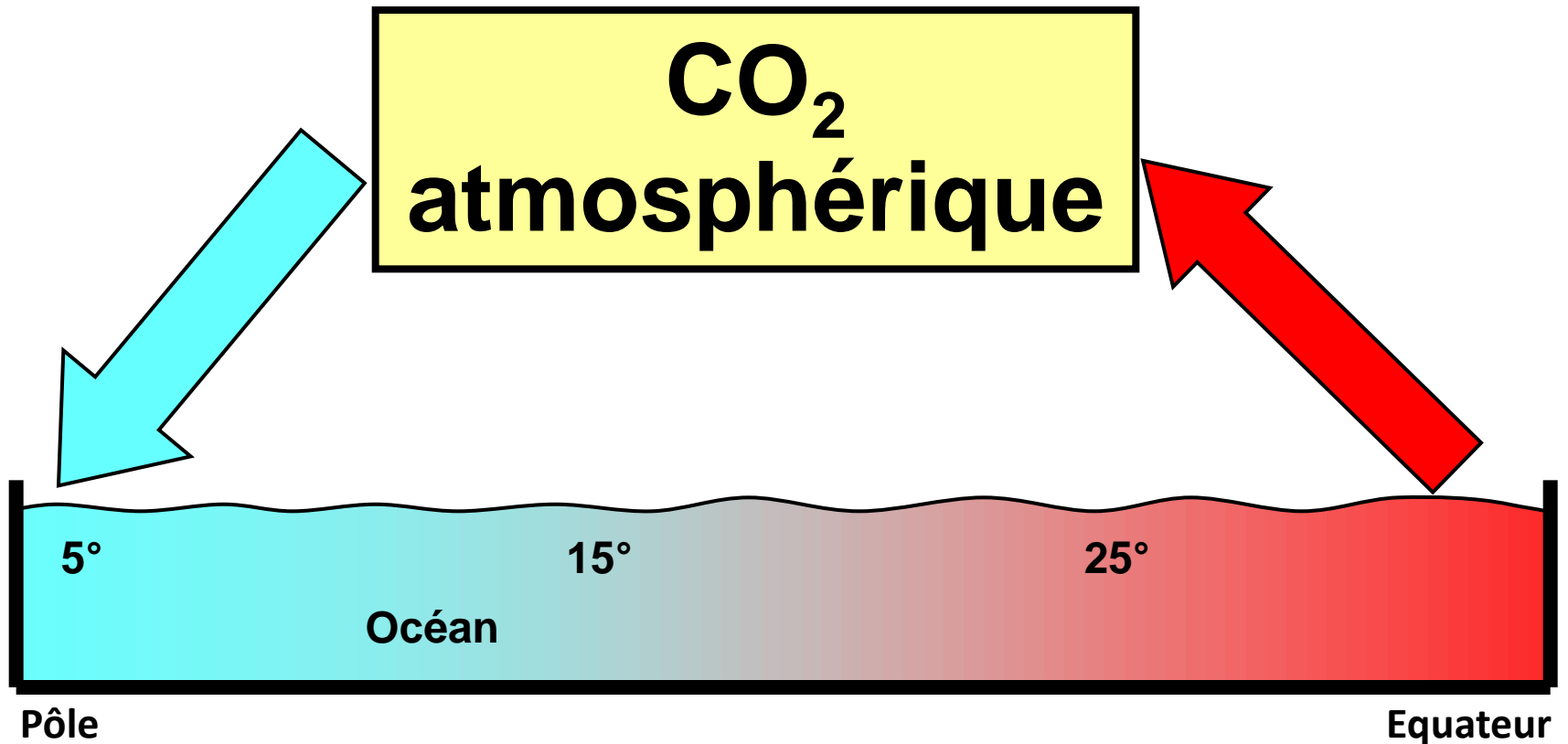
Masse en Gt (10⁹ t = 10¹² kg) de C ou d'O
 Temps de résidence en année
 Flux : en Gt / an

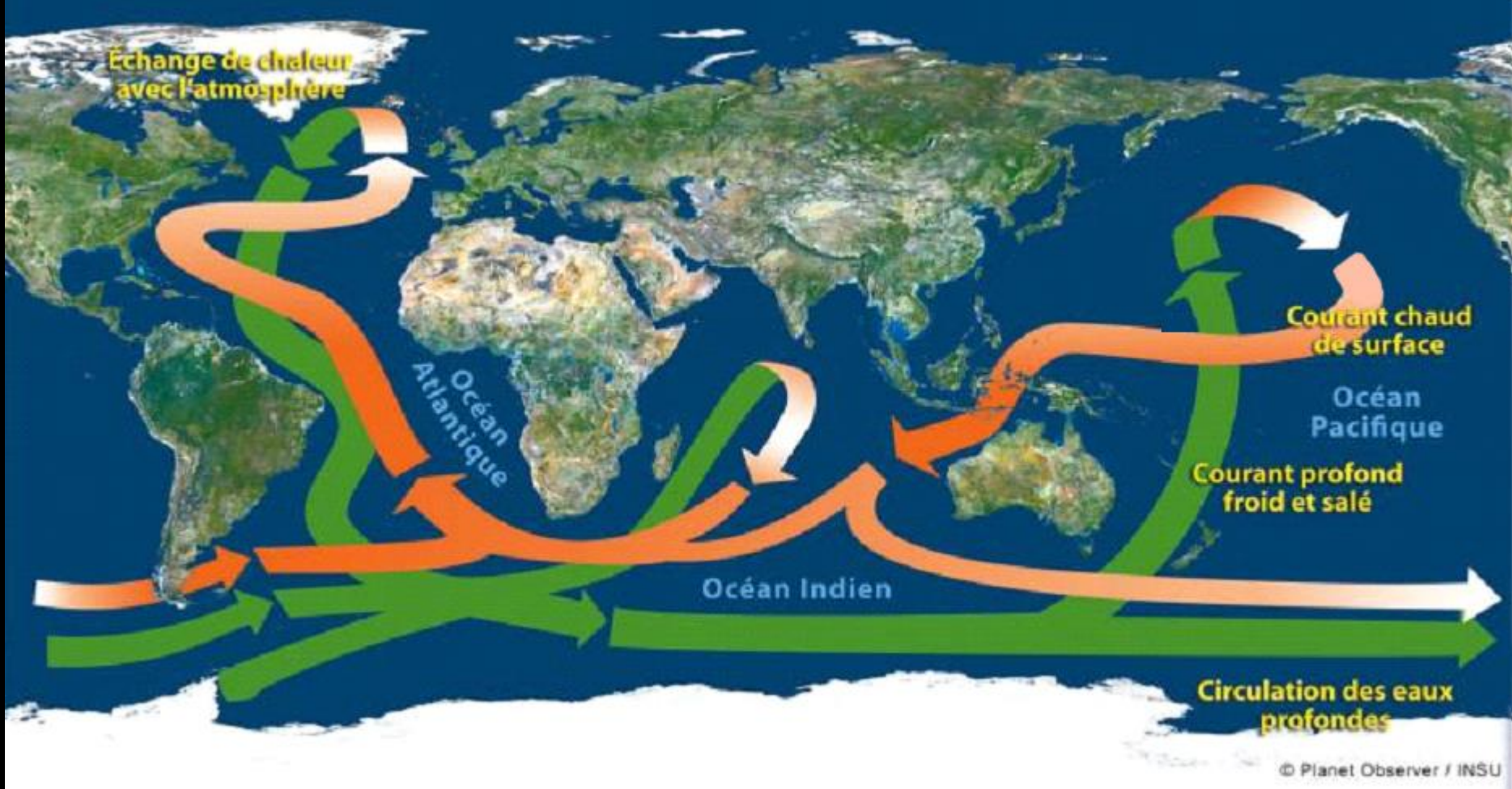


On va étudier (en les simplifiant encore) les principaux échanges (figurés par des flèches) entre tous ces réservoirs. Il suffit qu'une de ces flèches change pour une raison (naturelle ou anthropique), et le CO₂ (ou le CH₄) atmosphérique, et donc le climat, changent.

Tout d'abord, les échanges océan \leftrightarrow atmosphère

Le CO_2 est beaucoup plus soluble dans l'eau froide que dans l'eau chaude. L'océan absorbe du CO_2 dans les zones polaires, en relâche dans les zones chaudes

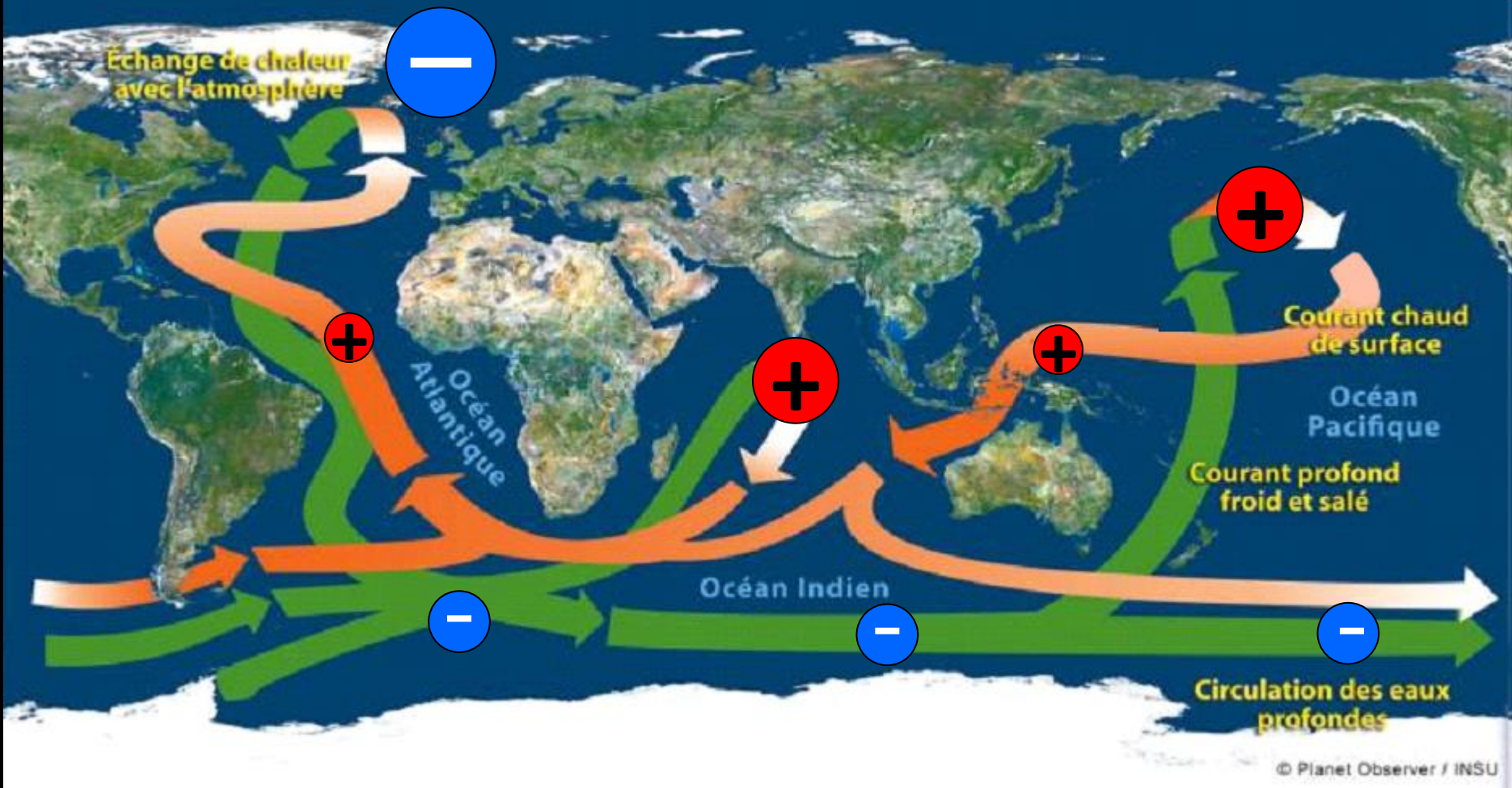




Courant « chaud » de surface

Courant « froid » en profondeur

L'océan est affecté de courants, superficiels et profonds, qui forment un vaste tapis roulant. Une « boucle » dure environ 1500 ans.

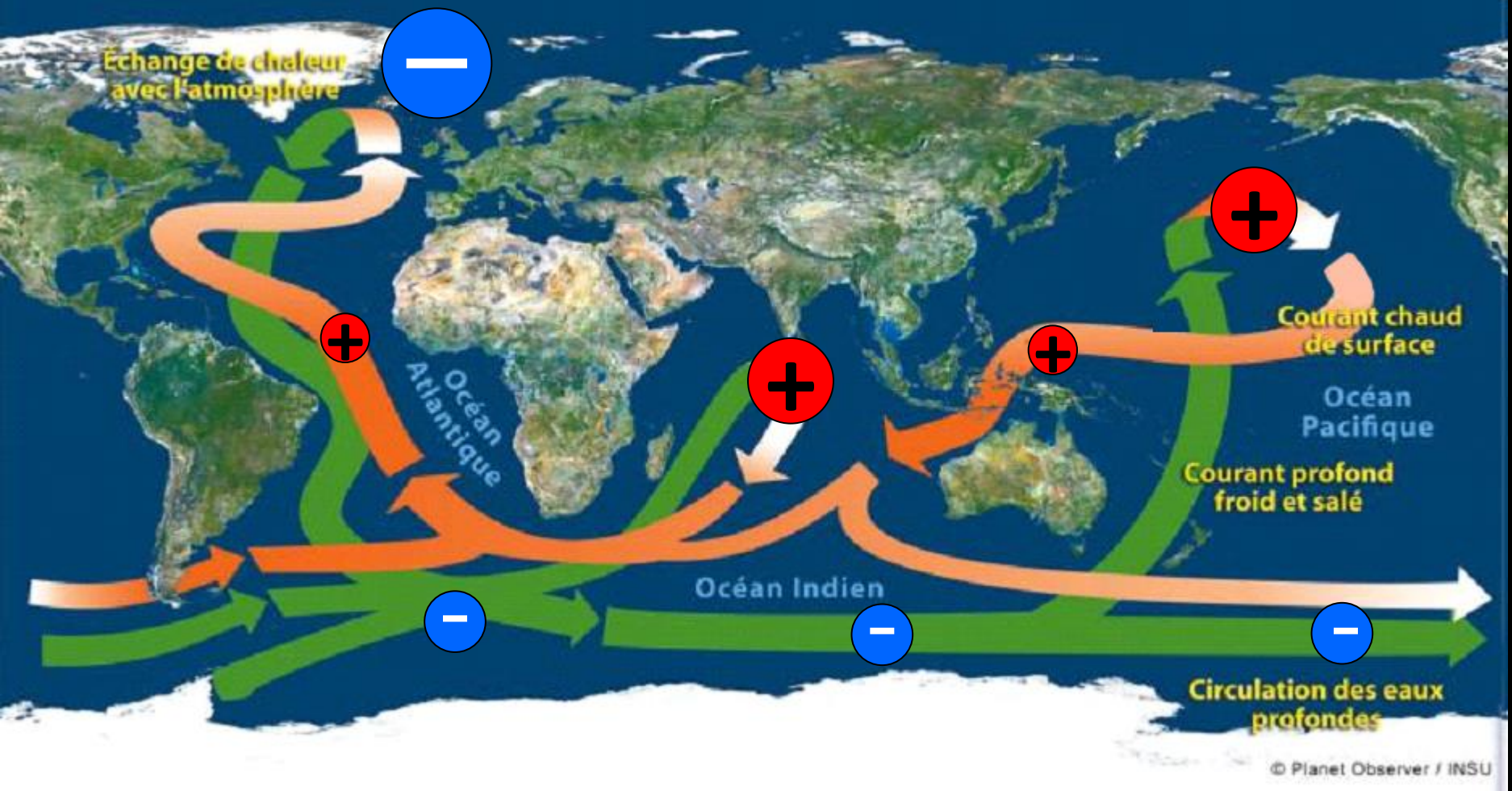


Zone froide, où l'océan absorbe du CO₂ atmosphérique



Zone chaude, où l'océan relâche du CO₂ vers l'atmosphère

Il y a en permanence dissolution et relâchement de CO₂ par l'océan, d'environ 100 Gt / an.



Zone froide, où l'océan absorbe du CO₂ atmosphérique



Zone chaude, où l'océan relâche du CO₂ vers l'atmosphère

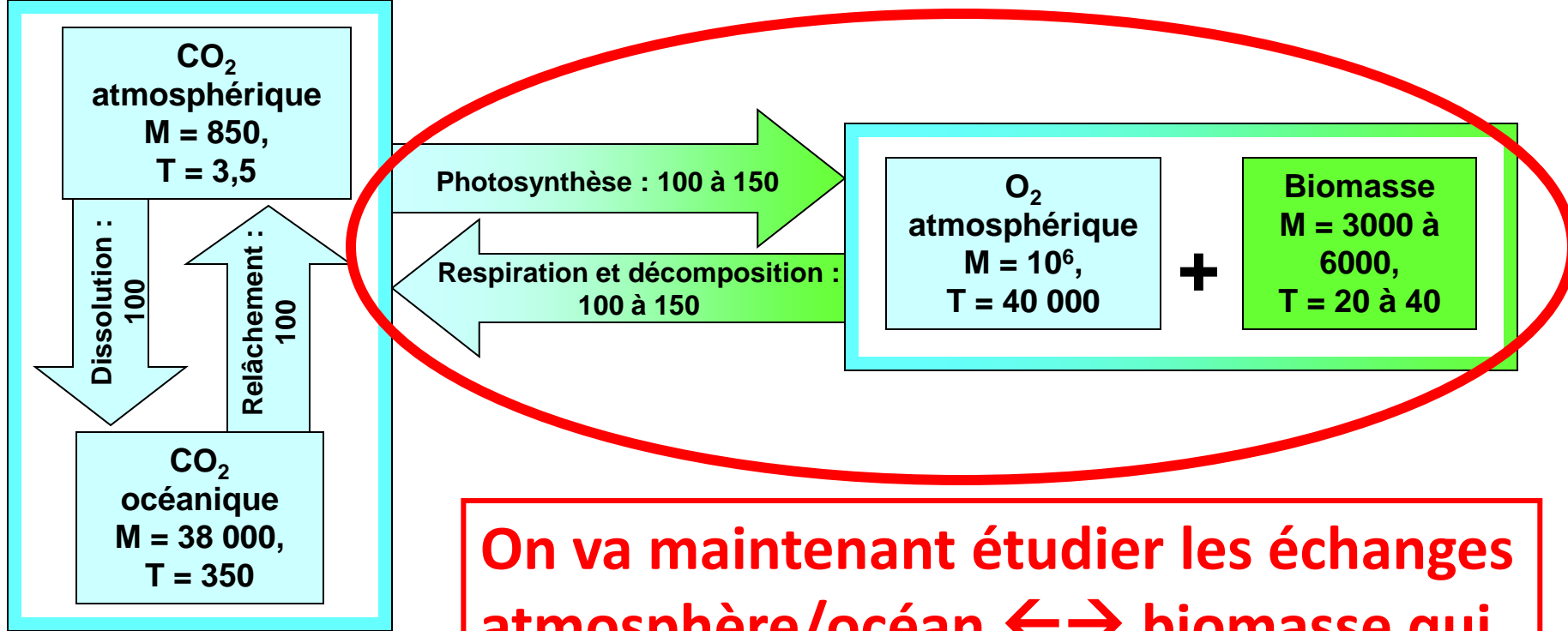
Et c'est un cadeau empoisonné qu'on lègue à nos petits enfants, comme les déchets nucléaires. Imaginez si Clovis ...

Si, pour une raison x, la planète se réchauffe un petit peu → l'océan se réchauffe un petit peu → un petit peu de CO₂ quitte l'océan et va dans l'atmosphère → l'effet de serre augmente → la température de l'air et de la mer augmente → du nouveau CO₂ quitte l'eau de mer → l'effet de serre augmente encore → la température augmente encore → du CO₂ quitte encore la mer → l'effet de serre augmente de plus en plus ... Même chose en cas de refroidissement.



Cet effet « boule de neige » est une des causes de l'inquiétude des gens « lucides ». C'est une des causes possibles (et pas la seule) de l'emballement possible et incontrôlable du réchauffement anthropique du climat mondial. Les climatologues craignent l'arrivée de tels emballements si l'augmentation actuelle dépasse 2° (l'enjeu de la COP 21).

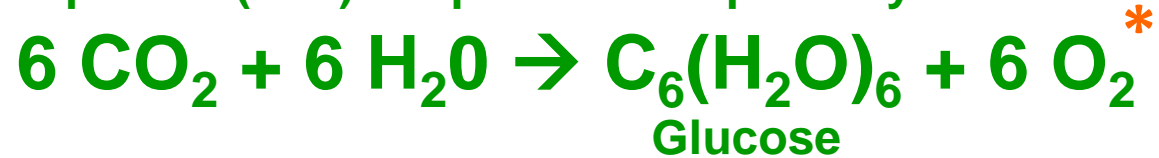




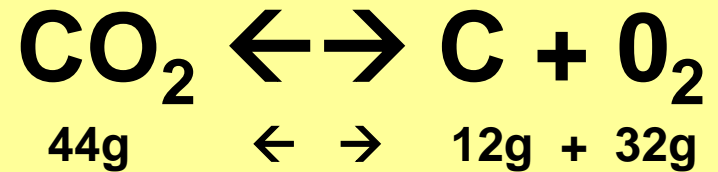
On va maintenant étudier les échanges atmosphère/océan \leftrightarrow biomasse qui se font surtout grâce à la photosynthèse et à la respiration, avec comme conséquence « annexe » la production ou la consommation d'O₂ (di-oxygène) que les « vieux » comme moi appellent tout simplement « oxygène ».

PHOTOSYNTHESE

Equation (très) simplifiée de la photosynthèse :



Encore plus simplifié :

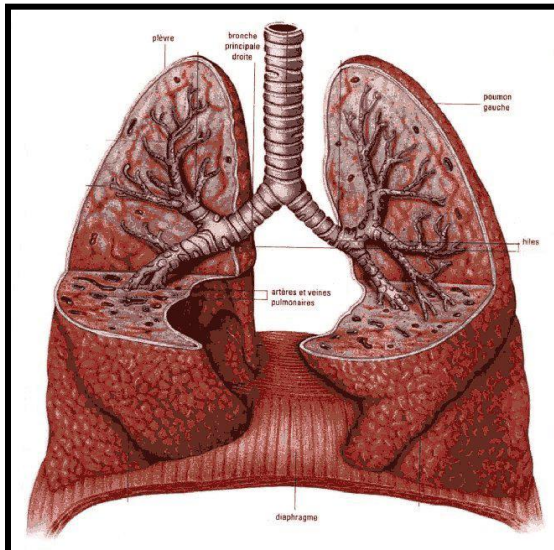


Encore plus simplifié :



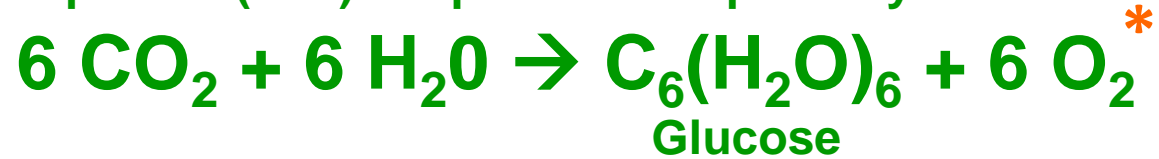
Equation simplifiée de la respiration :

RESPIRATION

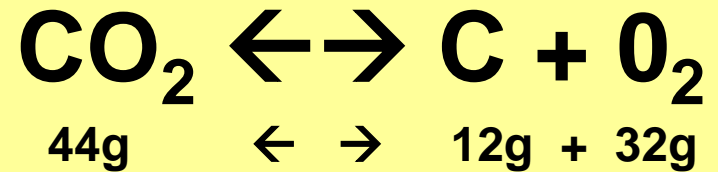


PHOTOSYNTHESE

Equation (très) simplifiée de la photosynthèse :



Encore plus simplifié :

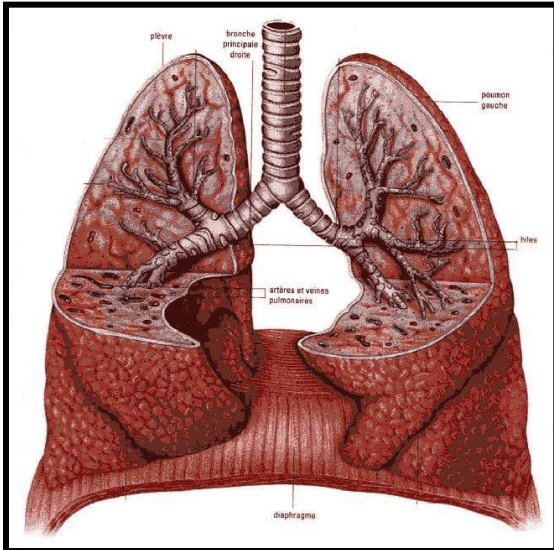


Encore plus simplifié :



Equation

**O₂ libéré et carbone fixé
par la photosynthèse sont
dans un rapport massique
de 32 / 12**



Le carbone mobile superficiel
(atmosphère, biomasse, océan)
représente $4 \cdot 10^{16}$ kg de C. Un
homme contient 10

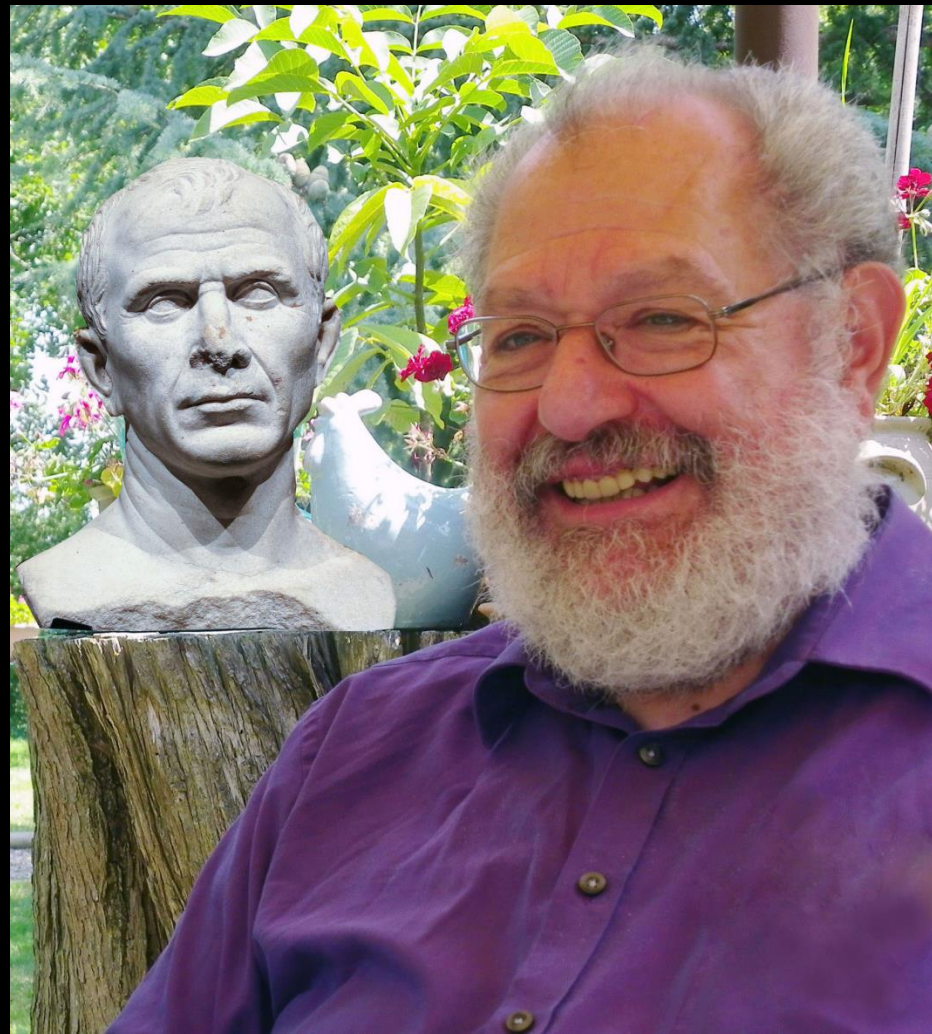


**Une parenthèse pour montrer
que ces processus
photosynthèse – respiration font
« tourner » toujours les mêmes
atomes de carbone**

mélange au
10 kg se sont bien mélangés
ont fait partie du corps de Jules César.
vient du CO_2 via les vaches que j'ai mangées qui ont mangé
de l'herbe qui avait fait la photosynthèse, $2,5 \cdot 10^{-16}$ de mon
carbone ont fait partie du corps de Jules César.

Le carbone mobile superficiel (atmosphère, biomasse, océan) représente $4 \cdot 10^{16}$ kg de C. Un homme « normal » contient 10 kg de C. Chaque homme représente donc $10 / 4 \cdot 10^{16}$ ($= 2,5 \cdot 10^{-16}$) du C superficiel. Jules César, par exemple, ou n'importe qui d'autre, contenait $2,5 \cdot 10^{-16}$ du C superficiel. César a été brûlé après sa mort le jour des ides de mars de -44, d'autres ont été enterrés et ont pourris, et leur C est devenu CO_2 qui s'est mélangé au C superficiel. 2000 ans plus tard, on suppose que ce CO_2 s'est très bien mélangé. $2,5 \cdot 10^{-16}$ du C du CO_2 de cette pièce ont fait partie du corps de Jules César. Comme le C de mon corps vient du CO_2 via les vaches que j'ai mangées qui avaient mangé de l'herbe qui avait fait la photosynthèse, $2,5 \cdot 10^{-16}$ de mon carbone ont fait partie du corps de Jules César.

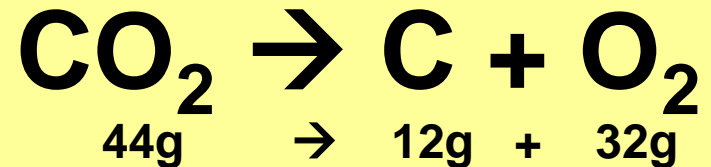




Je possède 12 kg de C (je suis gros). Or, 12 g de C contiennent $6 \cdot 10^{23}$ atomes de C (le fameux nombre d'Avogadro). Je contiens donc $6 \cdot 10^{26}$ atomes de C, avec une proportion de $2,5 \cdot 10^{-16}$ d'atomes de Jules César. Je possède donc $6 \cdot 10^{26} \times 2,5 \cdot 10^{-16} = 15 \cdot 10^{10}$ atomes de C de Jules César. Je possède 150 milliards d'atomes de carbone ayant fait partie du corps de Jules César le jour des ides de mars 44. Et environ 10 fois plus si on intègre le C ayant été Jules César tout au long de sa vie).

Photosynthèse et production d'O₂

La réaction hyper-simplifiée de la photosynthèse peut s'écrire :



A chaque fois que la photosynthèse produit de la matière organique contenant 12 g de Carbone, il se libère 32 g d'O₂.

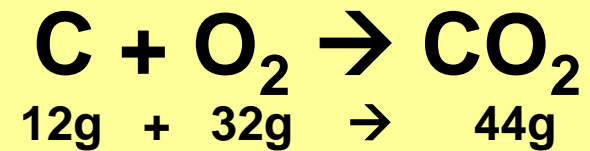
Cet O₂ s'accumule-t-il dans l'atmosphère ?

NON !





Non, car à chaque fois que de la matière organique contenant 12 g de Carbone est minéralisée (« consommée » puis respirée), la réaction



réabsorbe les 32 g d'O₂ libérés lors de sa production.

L'O₂ est également produit et consommé par les écosystèmes à l'équilibre. Le bilan est nul, et **l'O₂ ne pas s'accumuler dans l'atmosphère.**

Voici un gland. Disons qu'il ne pèse pas grand-chose. On le plante.





Des dizaines d'années plus tard, ce gland est devenu un chêne presque centenaire. Disons qu'il pèse 10 tonnes de bois (sec). Grâce à l'énergie solaire, il a absorbé environ 15 tonnes de CO₂, de l'eau et a donc produit ces 10 tonnes de bois et environ 10 tonnes d'oxygène.

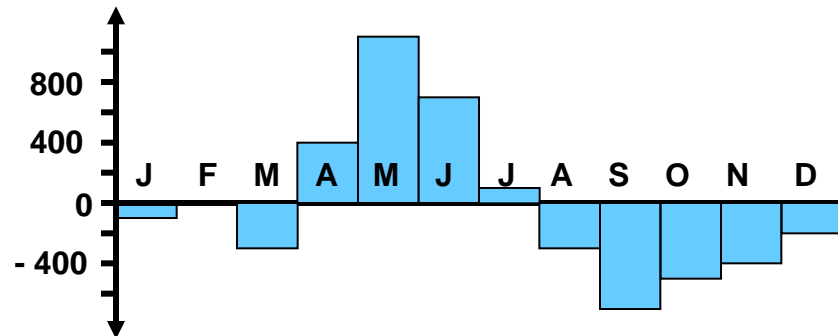


Au bout d'un certain temps, ce chêne va mourir. Insectes, champignons ... s'en nourriront, et en quelques années, il n'en restera rien. Pour ce faire, champignons et insectes auront absorbé 10 tonnes d'oxygène, décomposé les 10 tonnes de bois et libéré de l'eau et 15 tonnes de CO₂. On sera revenu au point de départ !

Sur plusieurs années, une forêt « à l'équilibre » ne produit ni d'absorbe d'O₂ ou de CO₂

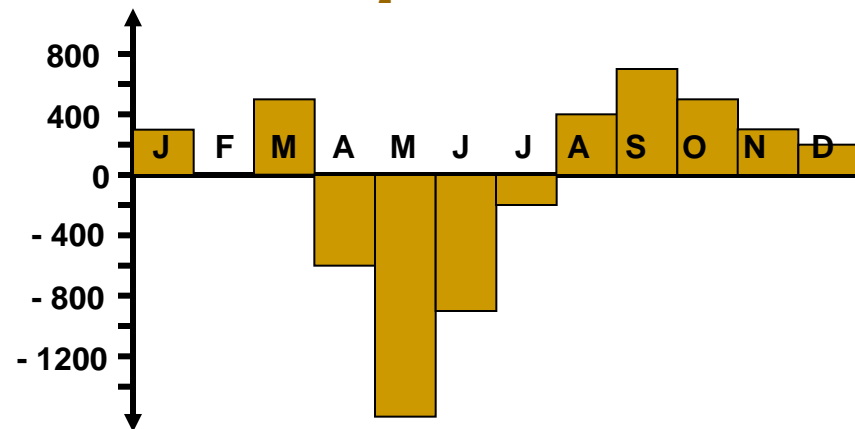


Production d'O₂



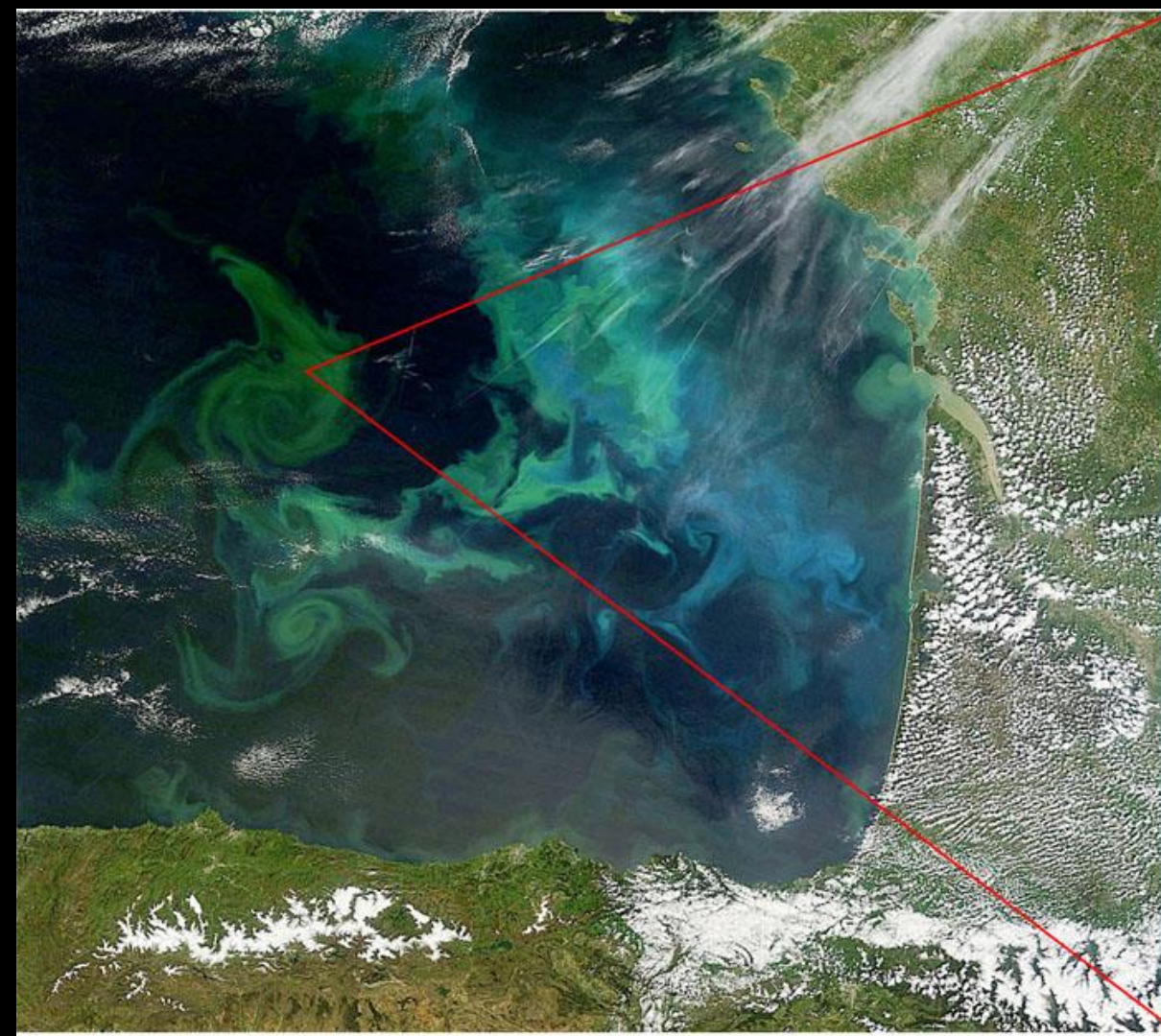
Consommation d'O₂

Production de CO₂



Consommation de CO₂

Production / consommation mensuelles d'O₂ et de CO₂ d'une « vieille » forêt de bouleaux au Québec (en tonne / km²).



Ce qui est vrai pour les forêts l'est évidemment aussi pour tous les autres écosystèmes à l'équilibre, plancton des océans compris



L'O₂ ne devrait donc exister dans l'atmosphère que dans la proportion 32 / 12 par rapport au carbone de la biomasse.

La biomasse totale (sol + forêt + animaux + plancton + bactéries + ...) contient environ 3000 Gt de carbone.

L'atmosphère ne devrait contenir que :
 $3000 \times 32/12 = 8\,000$ Gt d'O₂

Or l'atmosphère contient environ
1 000 000 Gt d'O₂

D'où vient ce million de Gt d'O₂, qui n'ont pas été produits ni par l'Amazonie, ni par le plancton ..., qui n'en ont produit que 8 000 Gt ?.

Cette idée des forêts et du (phyto)plancton qui font l'oxygène qu'on respire est profondément enracinée dans l'inconscient collectif. Un exemple « de l'année » :

**une
« fresque »
dans le
métro
parisien à
l'occasion
de la
COP 21.
Analysons
deux
extraits.**

Paris, 10 novembre 2015 (CNRS)
L'océan et le climat s'invitent à la station
de métro Montparnasse-Bienvenue à Paris

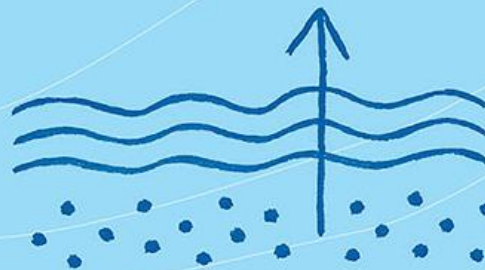


PLUS DE
50%
DE L'OXYGÈNE

QUE NOUS RESPIRONS EST PRODUIT
PAR LE PLANCTON

plancton

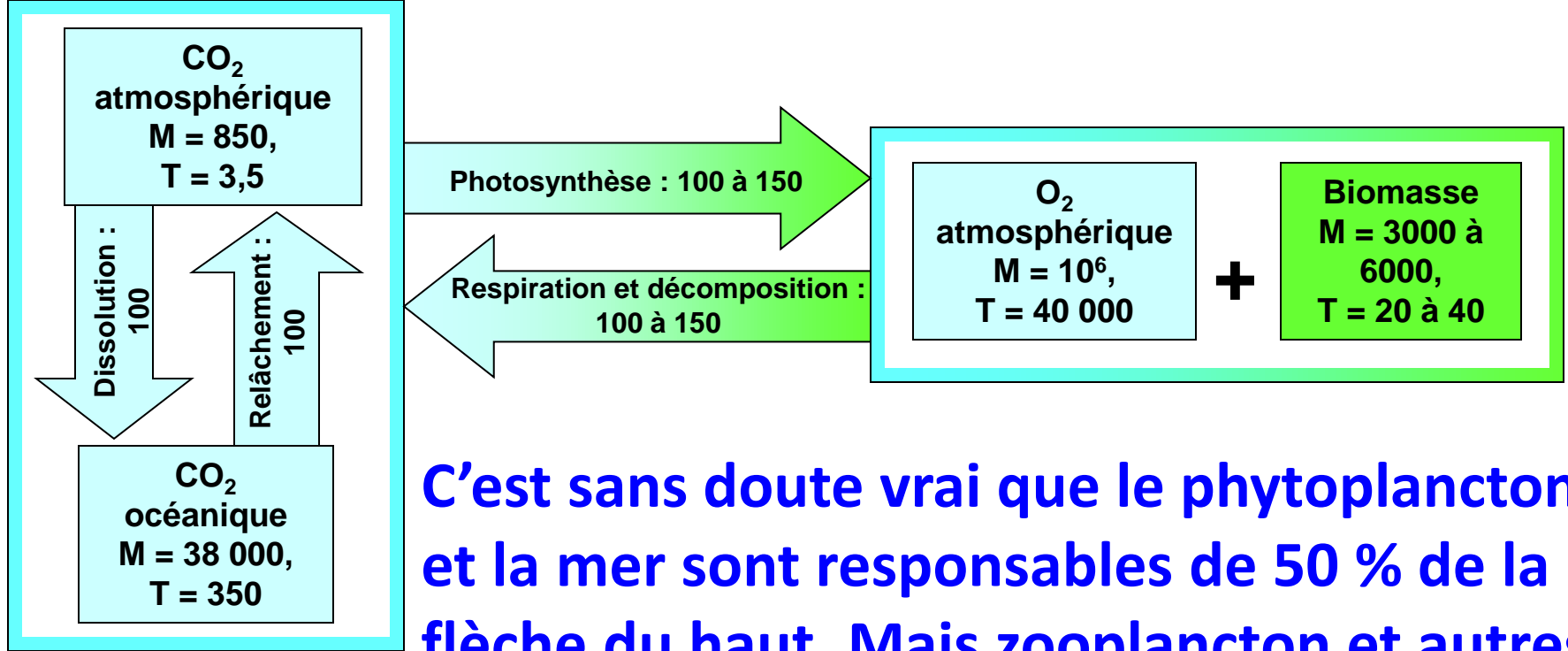
oxygène
50%



E JE RESPIRE

TANT QU'IL Y AURA DU PLANCTON

Le plancton, ce monde microscopique qui peuple l'océan, a permis l'apparition de notre atmosphère il y a des milliards d'années. Cette forêt invisible est le deuxième poumon de notre planète.

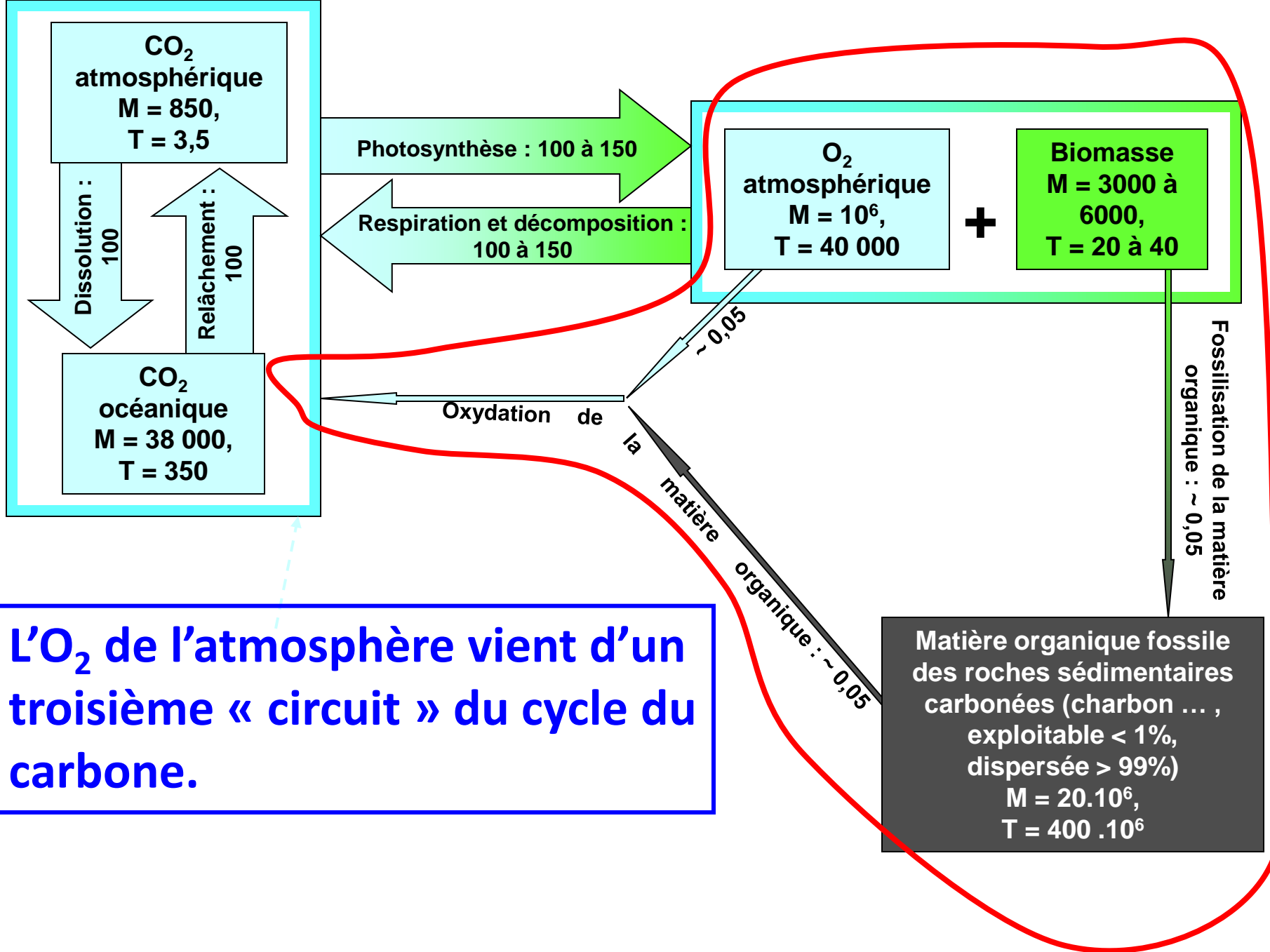


C'est sans doute vrai que le phytoplancton et la mer sont responsables de 50 % de la flèche du haut. Mais zooplancton et autres

formes de vie marine sont sans doute responsables de 50% de la flèche du bas. Alors, d'où vient l'O₂ que « je » respire ? Et cette phrase que chacun répète (sans réfléchir), répète ...

Cette forêt invisible est le deuxième poumon de notre planète.

Le jour où vous aurez vu un poumon produire de l'oxygène, vous me le direz. Je ne suis pas biologiste, mais ...



L'O₂ de l'atmosphère vient d'un troisième « circuit » du cycle du carbone.

Matière organique fossile des roches sédimentaires carbonées (charbon ... , exploitable < 1%, dispersée > 99%)
M = 20 · 10⁶,
T = 400 · 10⁶

**Il y a des organismes
qui échappent à la
« pourriture » après
leur mort et qui
deviennent ...**





... du charbon, dans le cas de forêts, ...



**... du charbon, dans le cas de forêts, du pétrole ou du carbone
« dispersé » dans des marnes noires dans le cas du plancton ...**

D'où vient donc l'O₂ de l'atmosphère, celui que nous respirons en ce moment ?



De la photosynthèse ancienne quand (et seulement quand) celle-ci a été suivie d'une fossilisation et d'une sédimentation de matière organique.

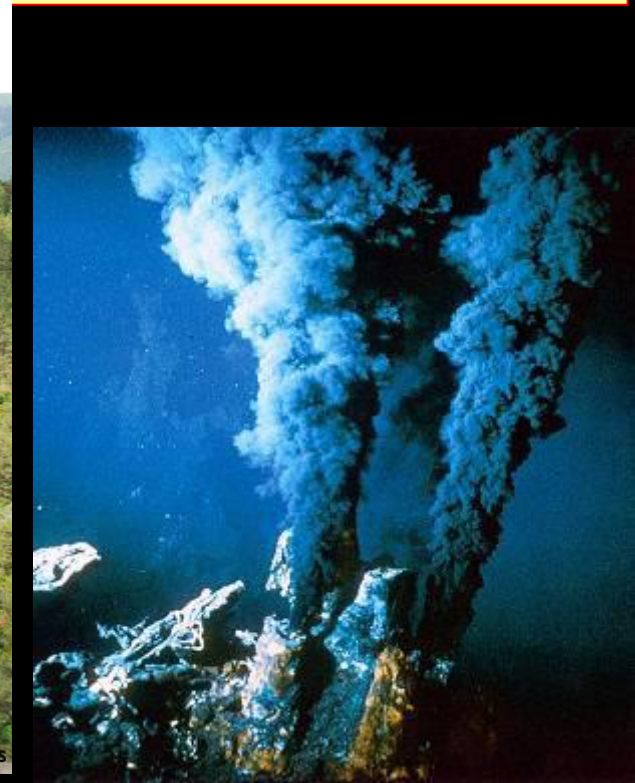
A chaque fois que des processus géologiques entraînent la fossilisation de 12 g de carbone organique, les 32 g d'O₂ (sous-produits de la photosynthèse qui a produit ces 12 g de C) ne sont pas consommés par respiration et décomposition. Ce sont ces 32 g d'O₂ qui s'accumulent dans l'atmosphère.

Mais comme il se fossilise en permanence de la matière organique, l'O₂ atmosphérique devrait augmenter, ce qu'il ne fait pas. C'est que l'O₂ est consommé par l'érosion/altération/oxydation des roches réduites, comme les « marnes noires », appelées « black shales » en anglais, par l'hydrothermalisme,

...



Photographie : Pierre Thomas





Les 10 à 20 millions de GT de carbone réduit des roches sédimentaires ont comme contrepartie stoechiométrique $10 \text{ à } 20 \cdot 10^6 \times 32/12 = 26 \text{ à } 52 \cdot 10^6$ GT d'O₂ (arrondissant à 40 millions de GT d'O₂), 40 millions de GT d'O₂ qui devraient se trouver dans l'atmosphère. Or, il n'y en a en fait qu'1 million de GT. Où est le reste ? Le reste (« environ » 39 millions de GT) a oxydé du soufre, du fer, ... et se retrouve maintenant sous forme de SO₄²⁻ (gypse), de Fe₂O₃ (BIF ou cuirasse latéritique) ...

Et pour être sûr qu'on ne s'est pas trop trompé, il faudrait vérifier que (aux corrections stoechiométriques près) :



O₂ atmosphérique

+



Sulfates

+



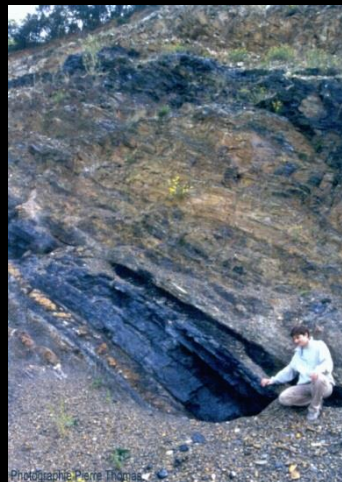
Oxydes ferriques

=



Matière organique des sédiments

+

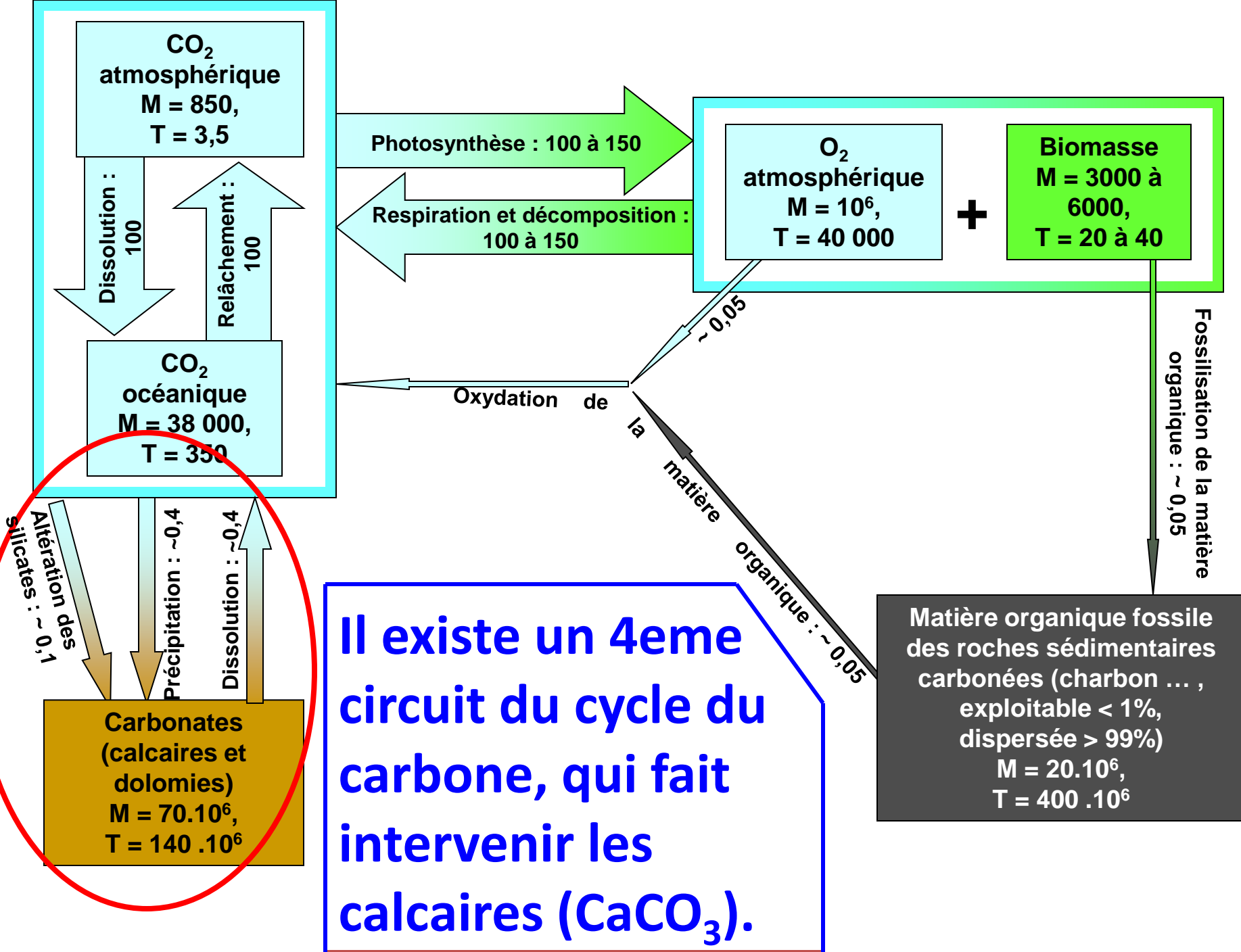


Charbon

+



Hydrocarbures





(dissout dans les eaux
de mer, de lac ...)

Précipitation

Calcaire



La « fabrication » du
calcaire (CaCO_3) qui, entre
parenthèse, dégage du CO_2



Photographie : Pierre Thomas



Photographie : Pierre Thomas



Et du calcaire, il s'en est fait beaucoup au cours des temps géologiques, et il continue à s'en faire !





Dissolution



Mais le calcaire est soluble dans les eaux chargées de CO_2 (ce qui absorbe du CO_2)



Photographie : Pierre Thomas



Photographie : Pierre Thomas



Photo : Pierre Thomas



Précipitation

Dissolution



Equilibre totalement réversible, réglé par la vie (Φ), le Ph, la Température. Fonctionnement en circuit fermé. A long terme, CO_2 reste constant

Sur le long terme, ces réactions s'équilibrent, et le bilan est nul si on est à Ca^{++} constant. Mais ...

Une autre réaction, ou plutôt une suite de réactions, se passent dans et sous le sol, là où les roches sont altérées par les eaux de pluies et du sol, puis dans la mer, là où arrivent ces eaux et les produits de dégradations des roches



+



↑
Altération des
silicates

Réaction qui n'a lieu que dans un sel sens (en surface, à basse température).
Consomme irréversiblement du CO_2

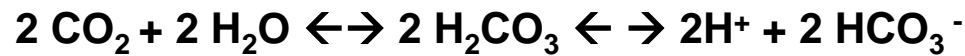


silicate calcique

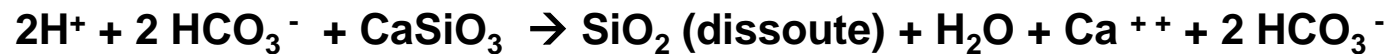
Photographie : Pierre Thomas

Altération des silicates calciques et « consommation » de CO₂

Première étape : dissolution du CO₂



Deuxième étape : altération des silicates calciques (exemple CaSiO₃)



Troisième étape : transport des ions vers la mer (ou un lac)



La wollastonite (CaSiO₃),
le plus simple des silicates
calciques, assez rare

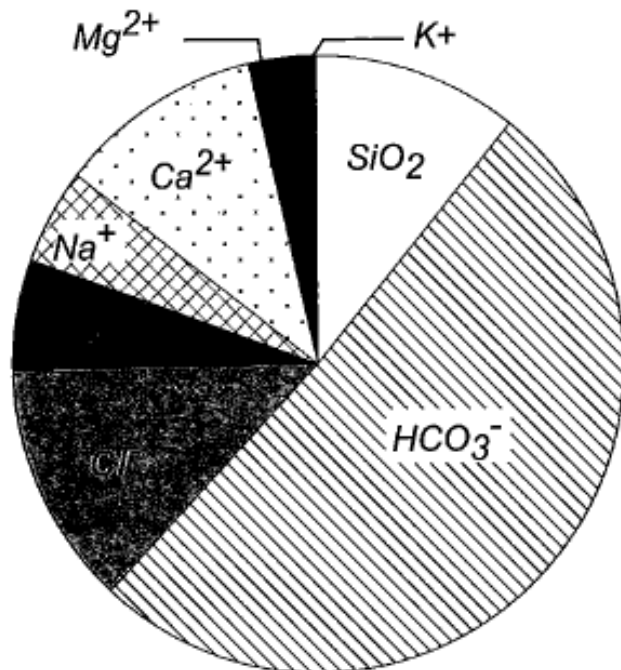


Figure 3.4. Du carbone dans une rivière drainant des roches dépourvues de carbone : les eaux guadeloupéennes

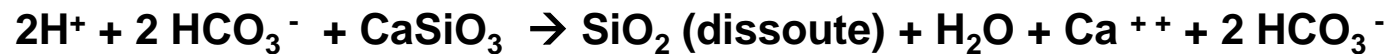
La rivière draine une zone volcanique andésitique dépourvue de calcaire. Le camembert montre que les deux substances dissoutes les plus abondantes sont la silice (sous la forme d'acide silicique) et les ions bicarbonates. Puisque la teneur en carbone des andésites reste très négligeable, celle de la rivière en HCO₃⁻ implique qu'un processus particulier enrichit l'eau en bicarbonates. Ce processus n'est pas la dissolution passive de CO₂ dans l'eau de la rivière (selon la loi de Henry, il y en aurait beaucoup moins), mais l'altération chimique des basaltes qui agit, grâce aux réactions chimiques vues précédemment, comme une véritable pompe à CO₂. De même, les andésites ne contiennent que des traces de chlore, d'azote et de soufre et les ions chlorure, nitrates ou sulfates, ne se retrouvent dans la rivière que lorsque les pluies lavent l'atmosphère des fines particules qui s'y trouvent (embruns marins ou aérosols d'origine biologique).

Altération des silicates calciques et « consommation » de CO₂

Première étape : dissolution du CO₂

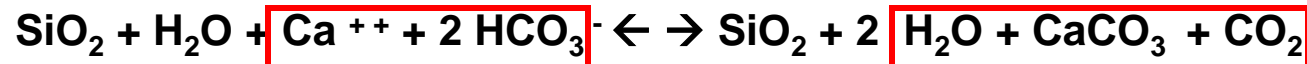


Deuxième étape : altération des silicates calciques (exemple CaSiO₃)



Troisième étape : transport des ions vers la mer (ou un lac)

Quatrième étape : sédimentation en mer



Somme de tout ça :



En simplifiant, on a le bilan suivant :



Bilan avec un plagioclase calcique (plus courant que la wollastonite) :



La wollastonite (CaSiO₃),
le plus simple des silicates
calciques, assez rare



Et ça « pompe » d'autant mieux le CO₂ que la roche est riche en silicates calcique (plagioclases, pyroxènes, amphiboles ...). L'altération d'un basalte « pompe » beaucoup plus de CO₂ que l'altération d'un granite.



Grande différence avec la classique réaction de précipitation-dissolution des carbonates. La réaction



est réversible dans les conditions de surface.

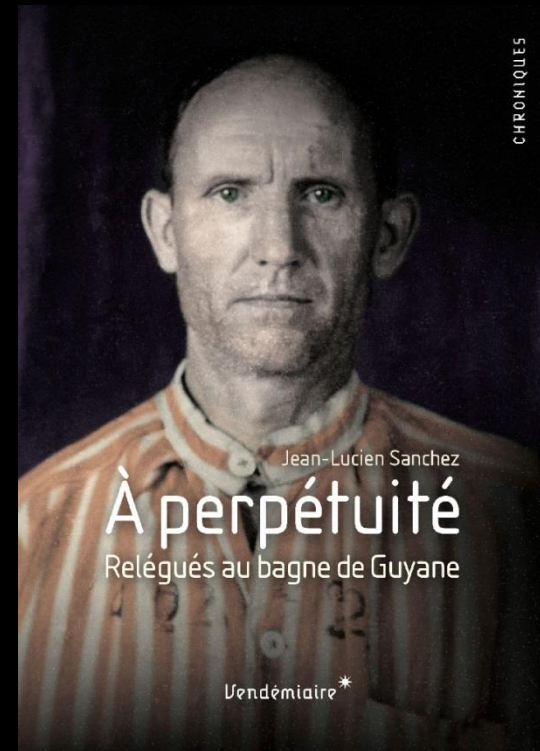
A l'échelle de la Terre et sur une longue période, elle « tourne en rond », précipitant ici et dissolvant là, ce qui ne change rien à la quantité de CO_2 atmosphérique.

La réaction d'altération des silicates calciques



est, elle, irréversible dans les conditions de surface.

Le CO_2 qui est absorbé l'est définitivement, (bien que le CaCO_3 puisse rentrer dans le cycle (1), qui ne change rien !).



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

+

CO₂

+

Beaucoup
d'eau

Dans les sols

Argile

+

Calcaire

Dans la mer

**Cette suite de réactions chimiques très complexes
« fabriquent » de l'argile et du calcaire
et « consomment » irréversiblement
du CO₂ (≈ 0,1 Gt / an)**

Les réactions impliquant les carbonates en surface



Précipitation

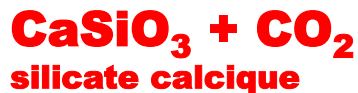
Dissolution

Equilibre totalement réversible, réglé par la vie ($\Phi...$), le Ph, la température. Fonctionnement en circuit fermé. A long terme, CO_2 reste constant



Altération des
silicates

Réaction qui n'a lieu que dans un sel sens (en surface, à basse température). Consomme irréversiblement du CO_2



Un exemple de calculs simples que l'on peut faire :

Depuis 20 Ma, l'Himalaya subit une surrection, une altération et une érosion.

On peut estimer le volume érodé de $2000 \times 100 \times 10 = 2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$.

La géologie suggère que ces millions de km^3 de roches devait contenir environ 10^{17} kg de silicates calciques, dont l'altération a du consommer environ $6 \cdot 10^{16} \text{ kg}$ de CO_2 quand on équilibre les équations chimiques.

Cela correspond à environ la moitié du CO_2 océanique et atmosphérique actuel.

La formation de l'Himalaya, avec ces hypothèses simplissimes a absorbé l'équivalent de la moitié du CO_2 superficiel actuel.

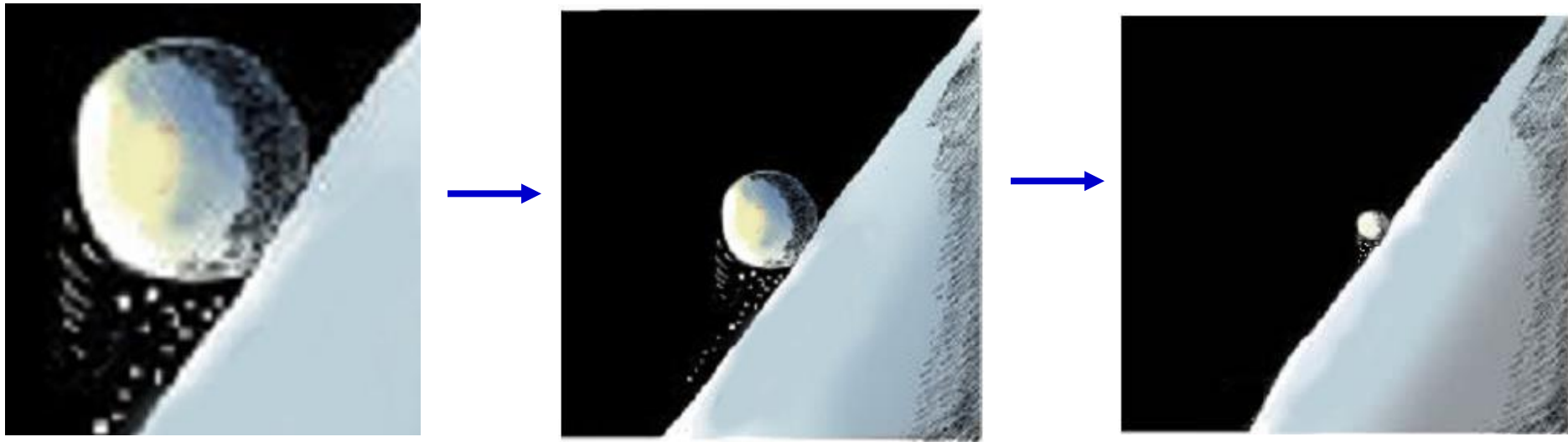
Un prodigieux agent de refroidissement du climat !

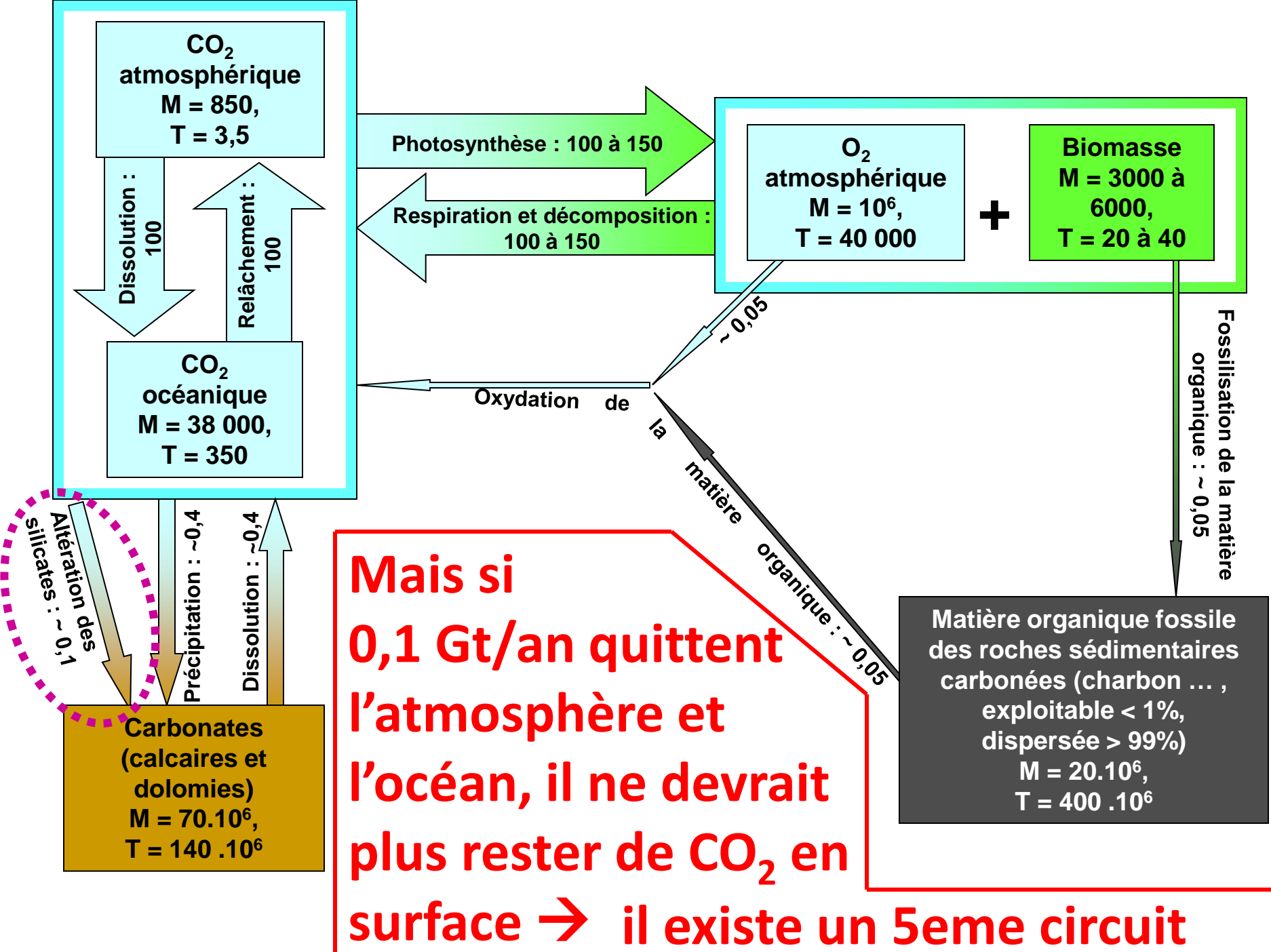


On peut noter que cet effet est un exemple de rétroaction négative. Si la température diminue pour une raison x, cela diminue l'altération des roches, donc la consommation de CO₂, ce qui augmente le CO₂ atmosphérique, donc l'effet de serre et peut donc limiter la diminution de température (et inversement en cas d'augmentation).

Un anti-effet boule de neige !

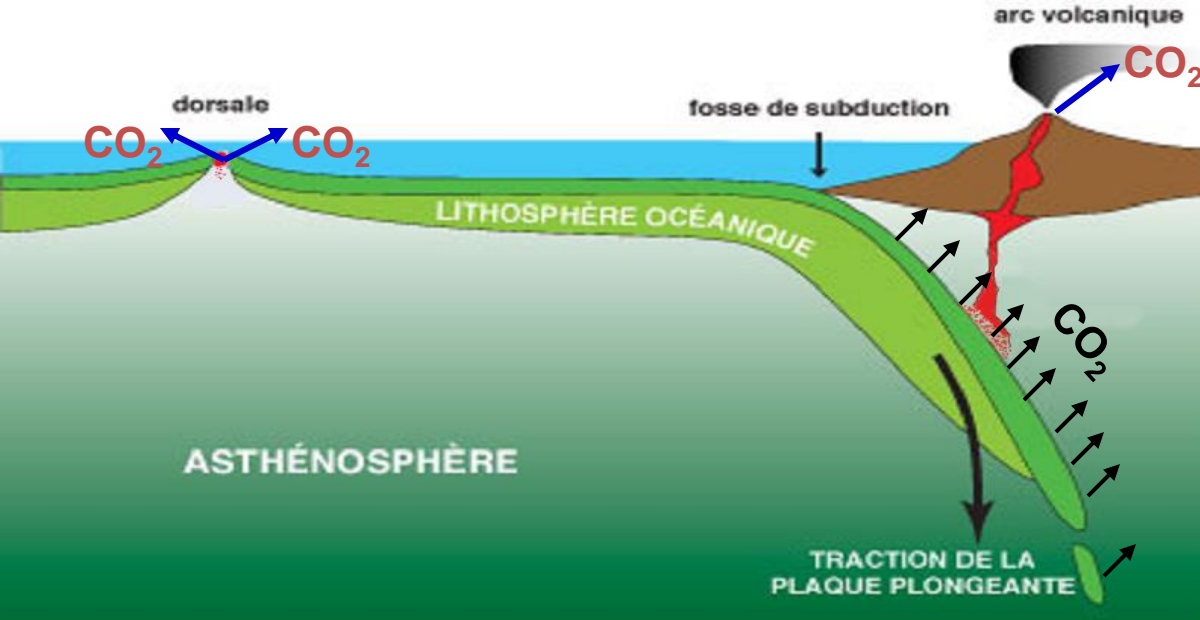
Mais c'est une rétroaction lente !







... le volcanisme !



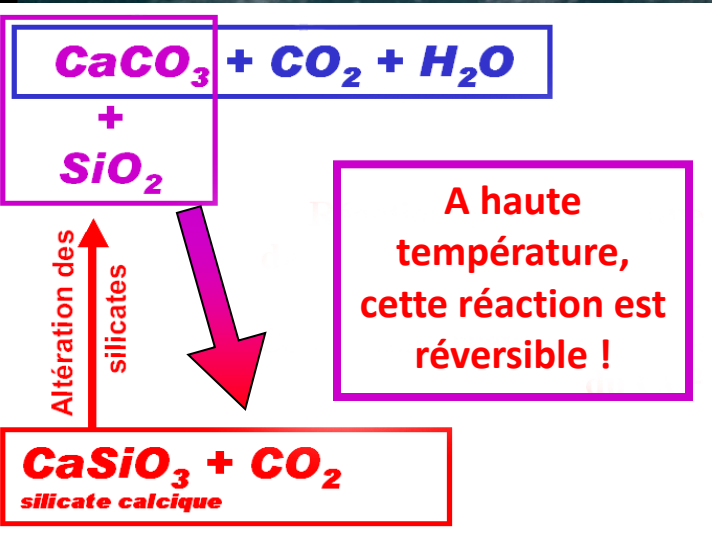
Du calcaire retourne au manteau grâce, entre autres, à la subduction. A haute température, il subit une réaction inverse :

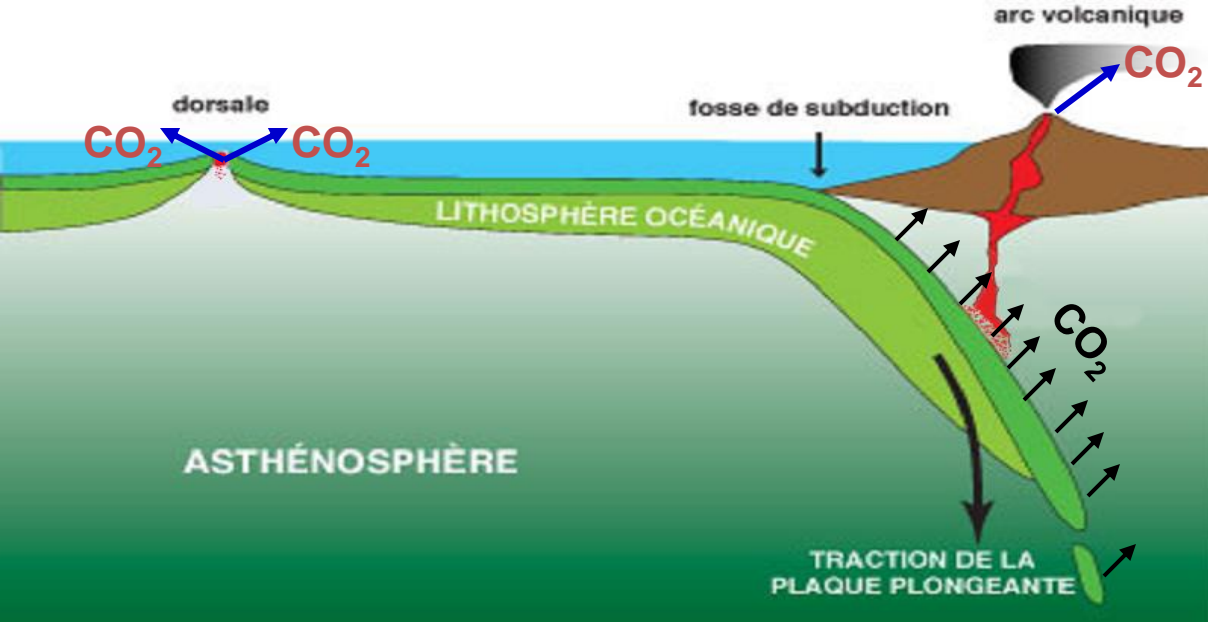
calcaire + silice (ou argile)

↓

silicates de calcium + eau + CO₂

Ce CO₂ retourne au manteau, et pourra ressorti par les volcans. C'est une réaction (anthropique) de ce genre qui a lieu dans les cimenteries





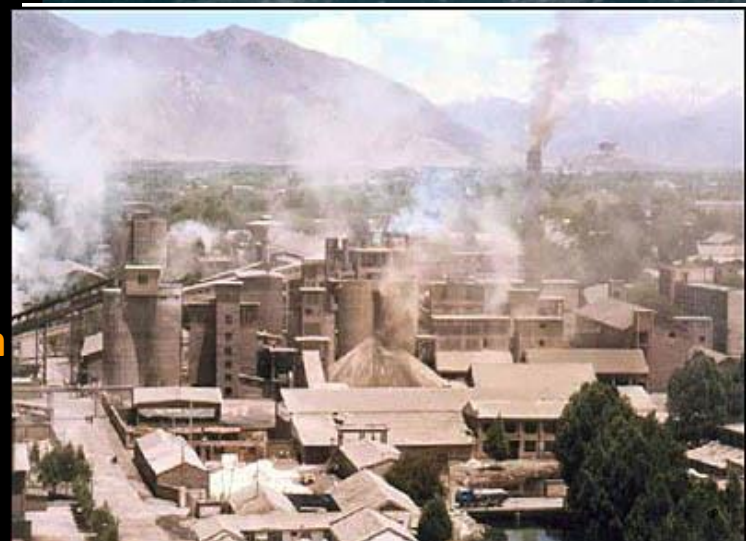
Du calcaire retourne au manteau grâce, entre autres, à la subduction. A haute température, il subit une réaction inverse :

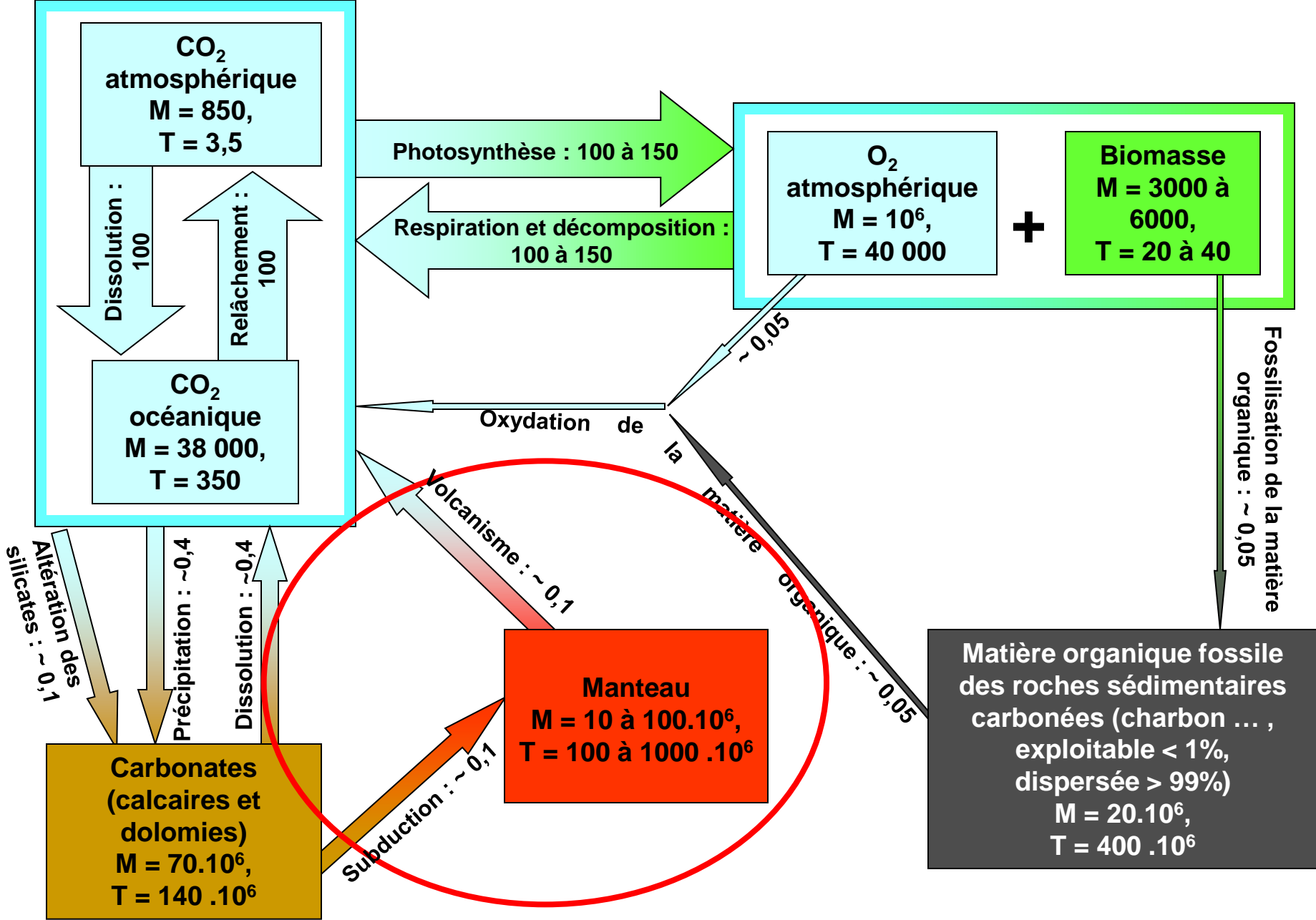
calcaire + silice (ou argile)



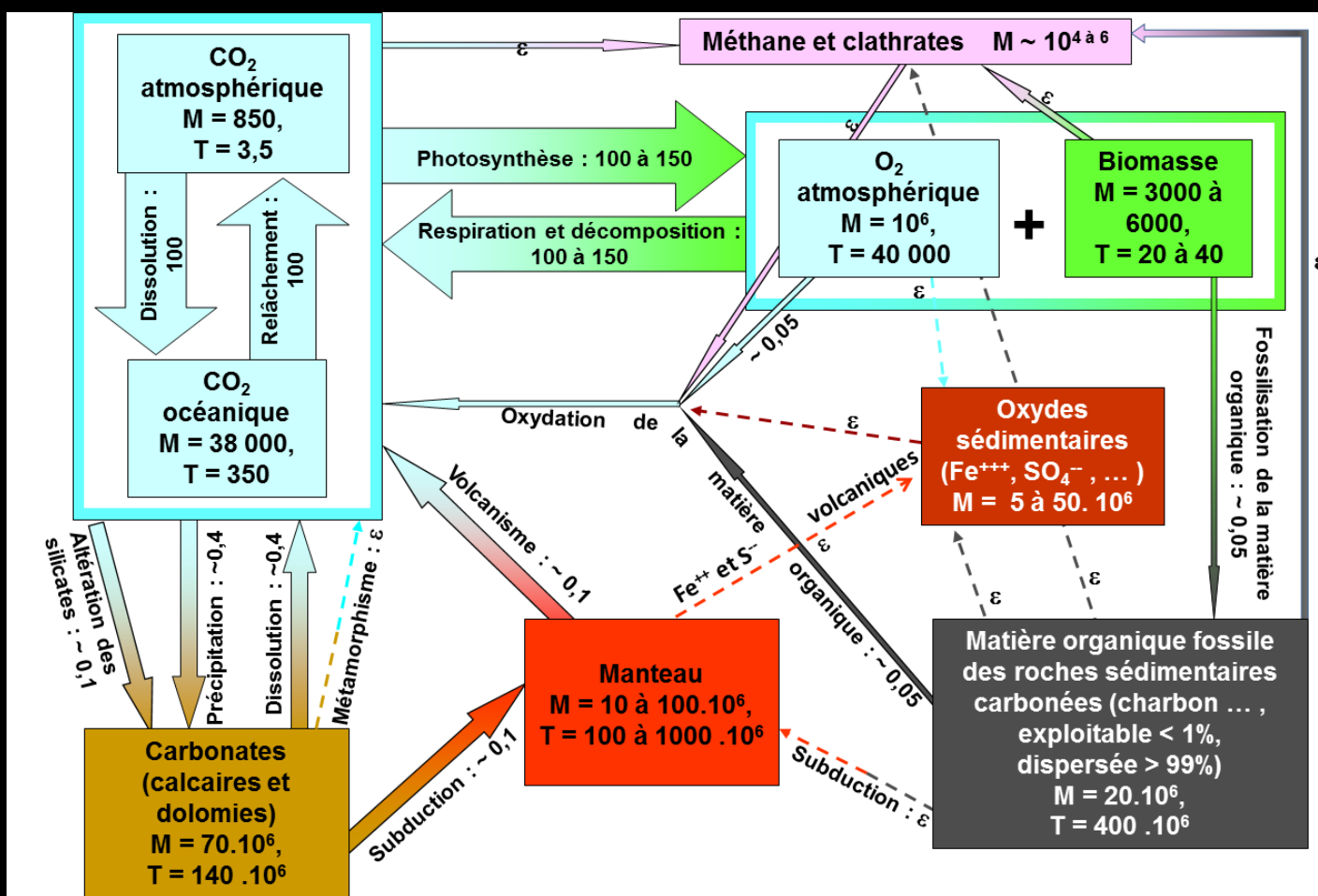
silicates de calcium + eau + CO_2

Ce CO_2 retourne au manteau, et pourra ressorti par les volcans. C'est une réaction (anthropique) de ce genre qui a lieu dans les cimenteries



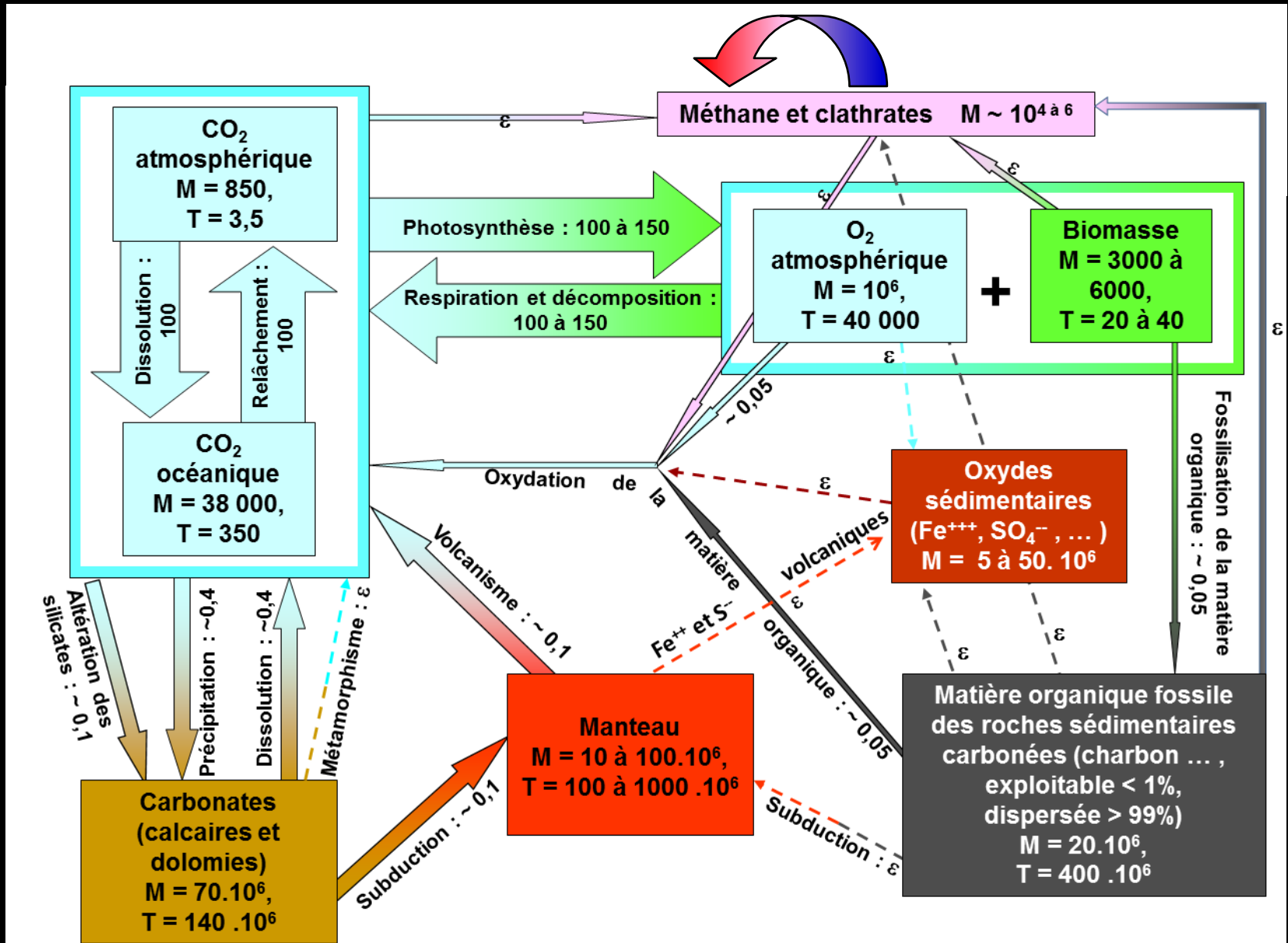


Voici donc un cycle du carbone hyper-simplifié, le minimum des minimorum que devrait avoir compris toute personne parlant de climat.



Ce cycle est souvent équilibré, mais il peut arriver des déséquilibres temporaires. Si une cause anthropique, biologique ou géologique modifie une de ces flèches, ça va finir par entrainer la modification de la teneur de l'atmosphère en GES (CO₂ ou CH₄), donc une modification du climat mondial.

Et voici un exemple d'emballlement possible : la déstabilisation des clathrates.

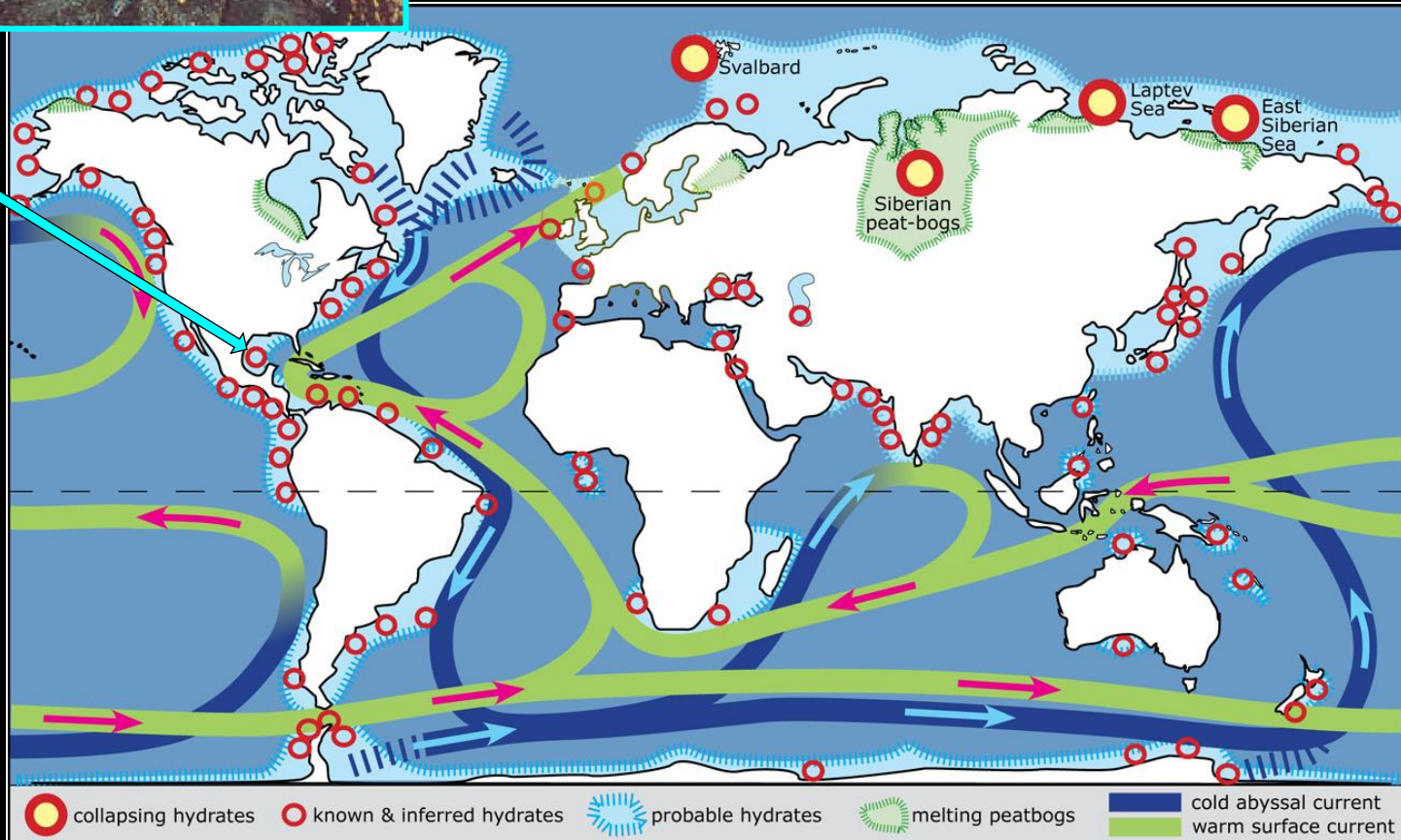


La carte des clathrates* marins et continentaux, dont ceux qui commencent à donner des signes de déstabilisation

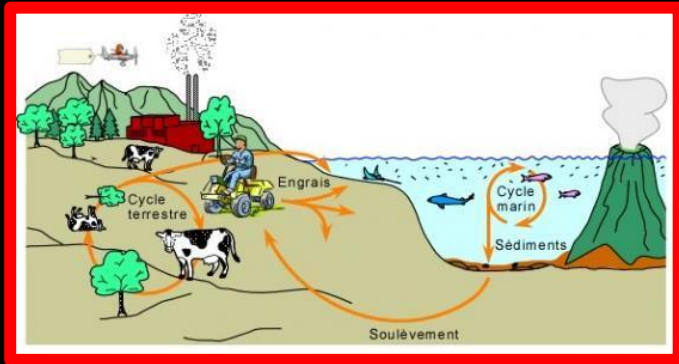


« Colline » de clathrates* au fond du Golfe du Mexique

* Clathrates : composé solide (glace) constitué de méthane et d'eau, stable à haute pression et/ou basse température



Cycle du carbone



**CO₂
atmosphérique**



Effet de serre

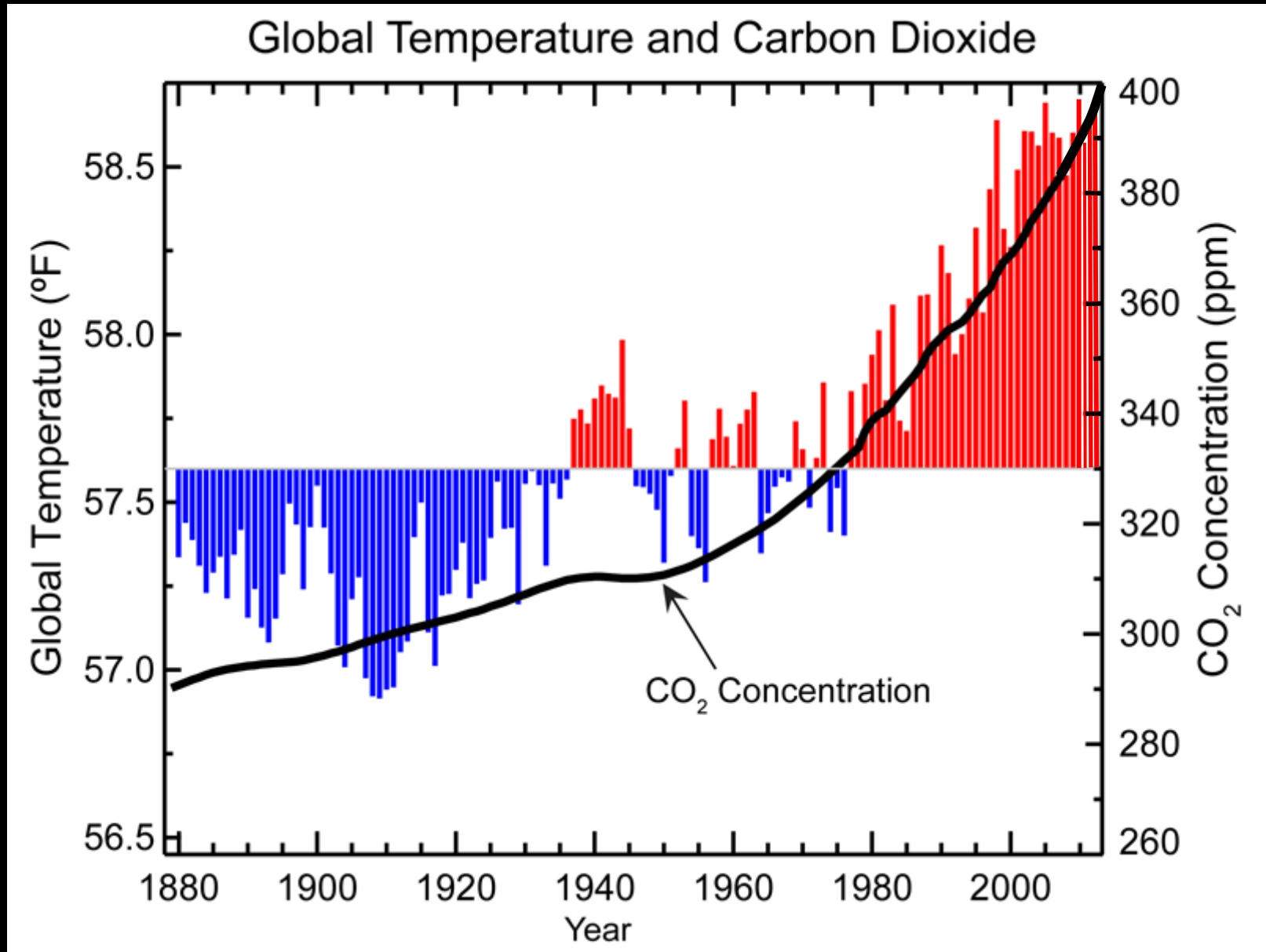


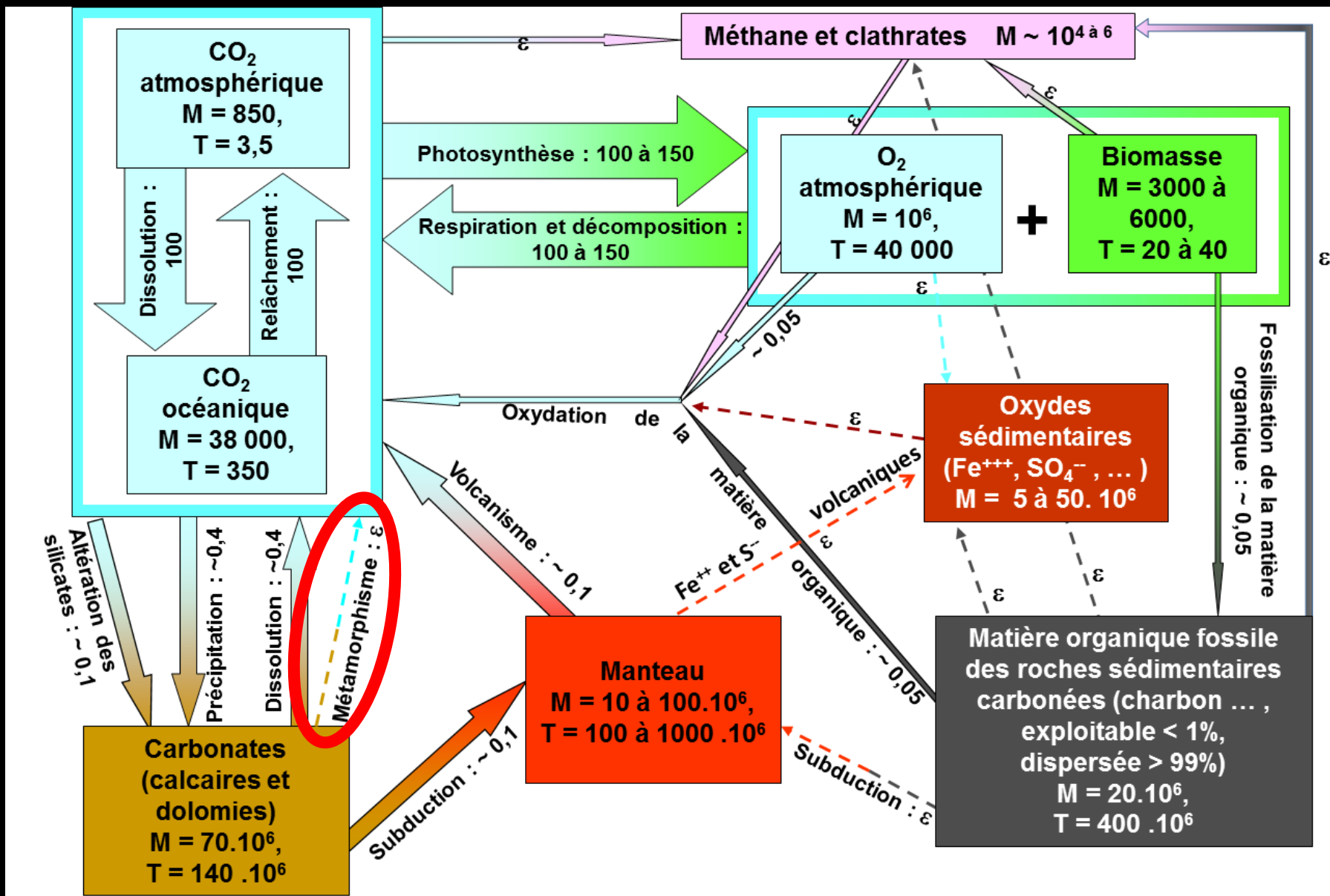
Climat mondial



On va maintenant voir quatre exemples de modifications du cycle du carbone qui se traduisent ou se sont traduites par des modifications du climat mondial.

1 - Les variations actuelles du cycle du carbone

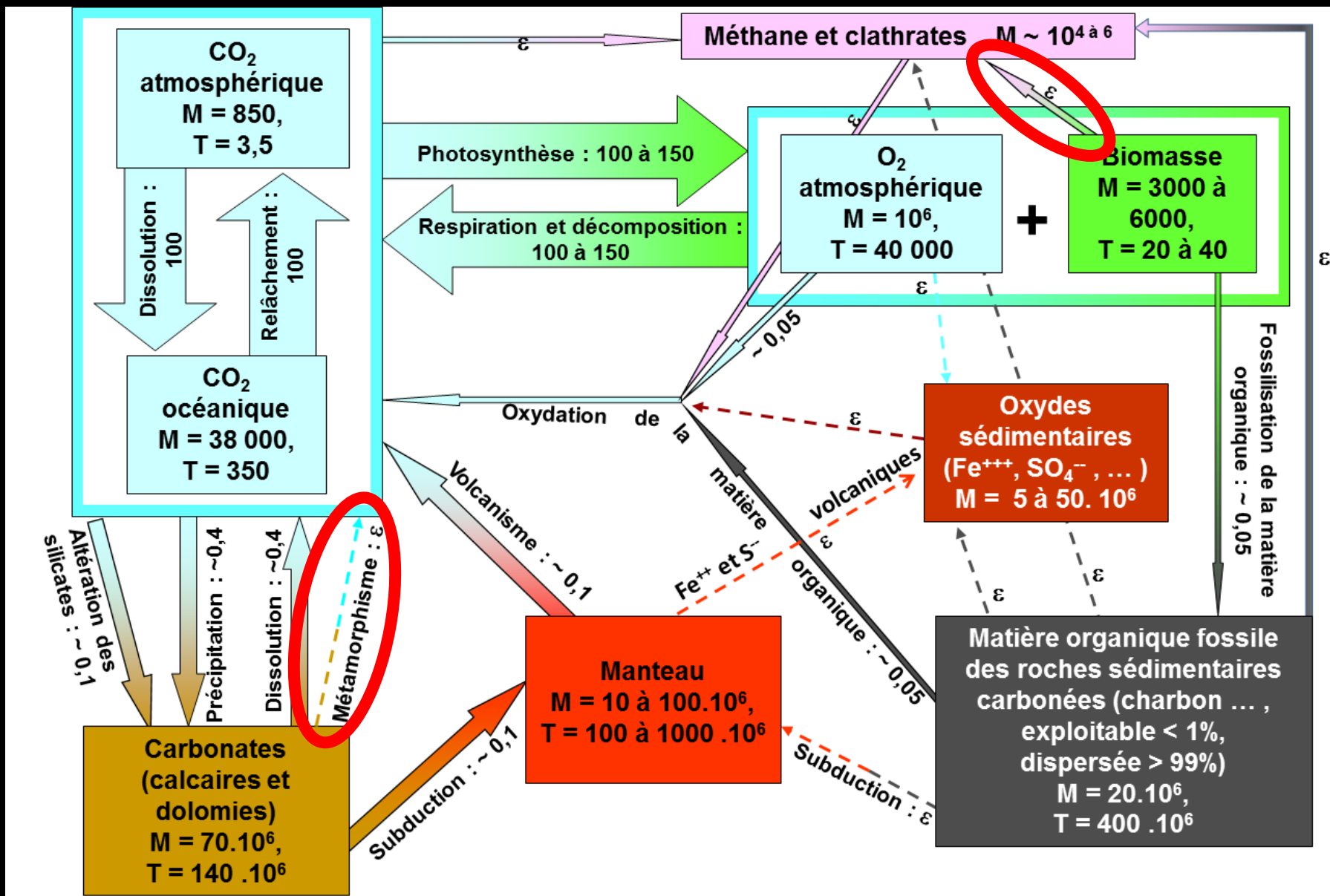




Quelles sont les 4 principales activités humaines qui modifient le cycle du carbone et relâchent des GES ?

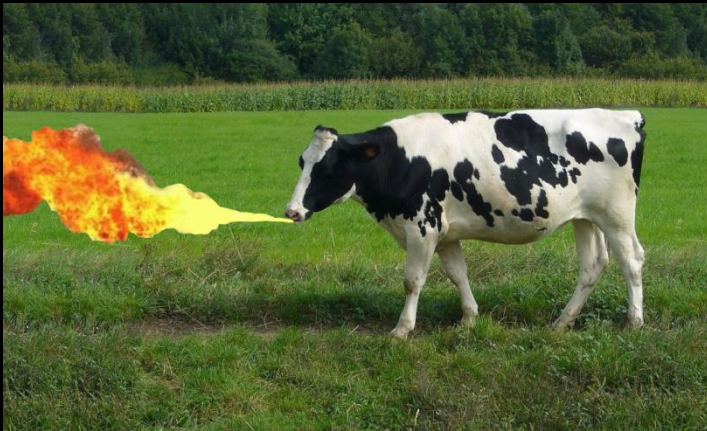
1 : La fabrication (parce que l'utilisation) du ciment qui relâche du CO₂

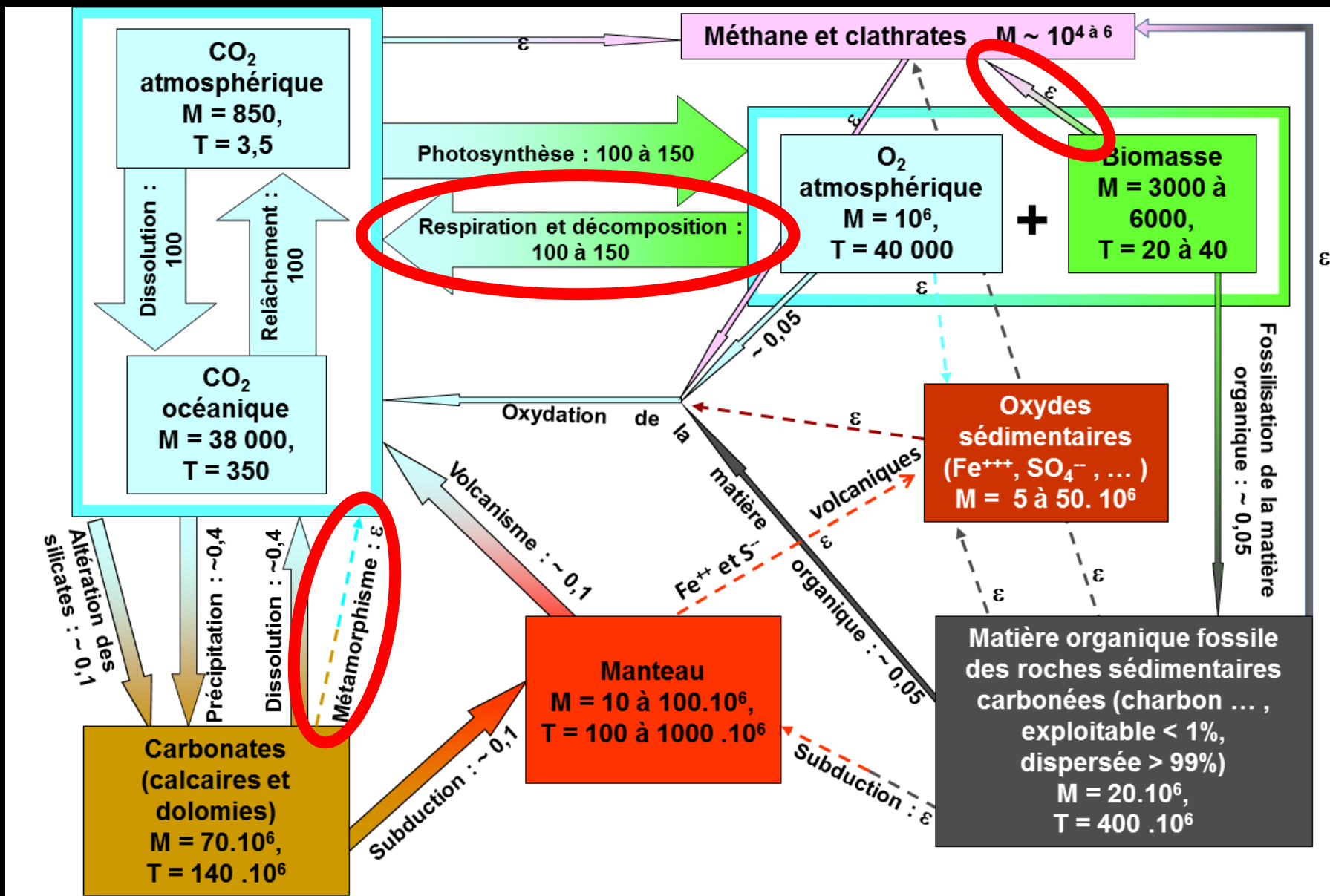




Quelles sont les 4 principales activités humaines qui modifient le cycle du carbone et relâchent des GES ?

2 : Les ruminants (vaches, moutons, chèvres ...) et les rizières qui relâchent du méthane (CH_4)





Quelles sont les 4 principales activités humaines qui modifient le cycle du carbone et relâchent des GES ?

3 : La déforestation sans replantation, les labours profonds, l'utilisation des nitrates, « nos » pratiques agricoles ... qui détruisent la matière organique, en particulier celles des sols.



La politique agricole commune (PAC)
Une politique en mutation

(3^{ème} édition)

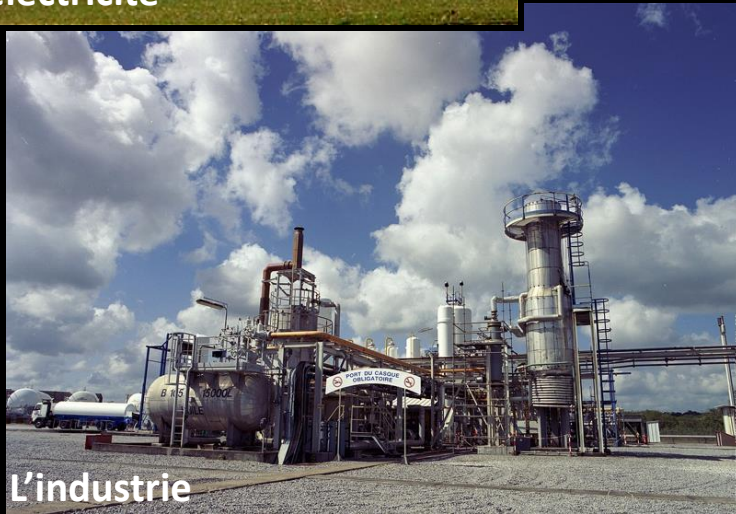
Jacques LOYAT

Yves PETIT

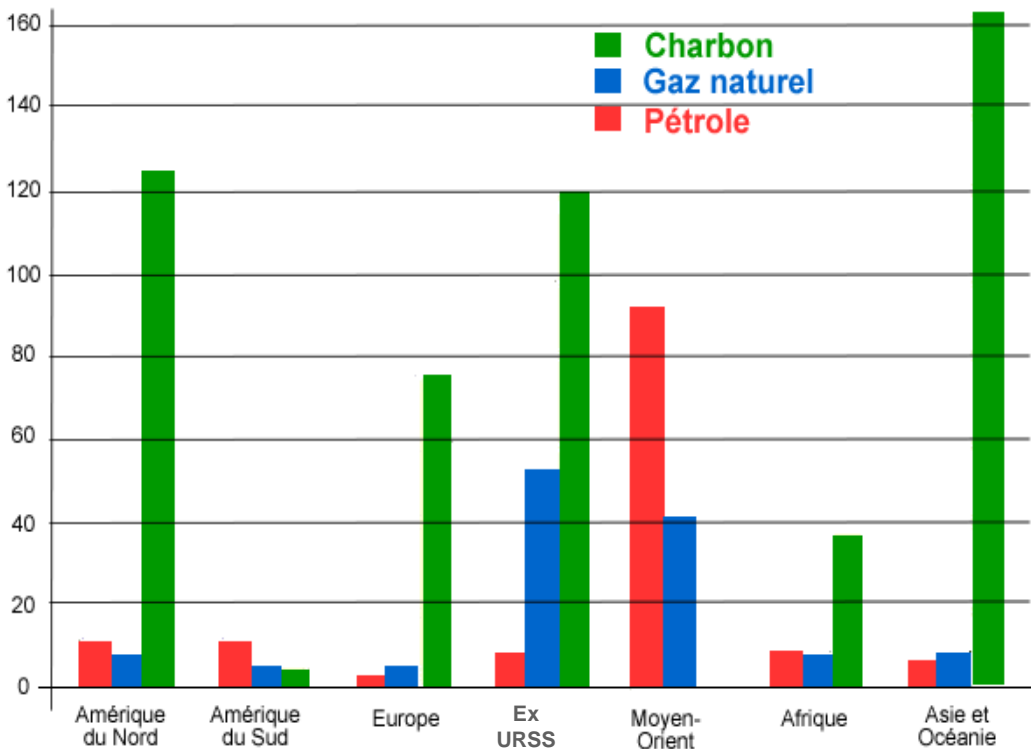
4 : l'utilisation des combustibles fossiles pour ...



Camion transportant des haricots verts du Kenya



Réserves planétaires de combustibles en milliards de tonnes équivalent pétrole (tep)



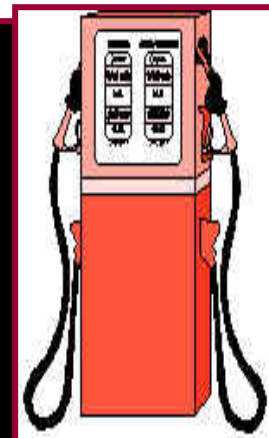
Total : 800 milliards de tonnes de réserves.

**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

**Et cette consommation de combustibles fossiles va pouvoir durer combien de temps ?
Deux à trois siècles au rythme actuel, avec 4 à x° de plus (et c'est grave dès +2°).**

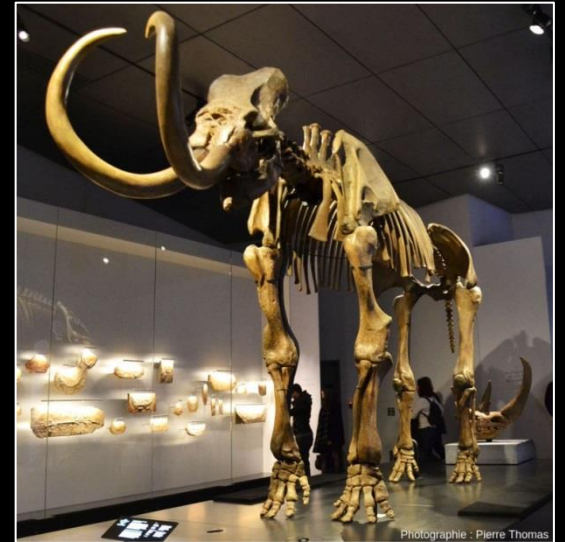


Une analogie du dilemme de la COP 21 :

- Tout manger tant que le magasin de chocolat n'est pas vide. Mais on va tomber très malade avant !
- S'arrêter de se goinfrer avant d'être malade. Mais quel dommage de laisser trainer de si bons chocolats dans le magasin !



2 - Les variations quaternaires du cycle du carbone



Une mise en évidence de ces variations climatiques : le Gros Cailloux de la Croix Rousse, aujourd'hui.



La Croix Rouse il y a 140 000 ans



Lyon il y a 140 000 ans, où arrivaient les glaciers des Alpes.



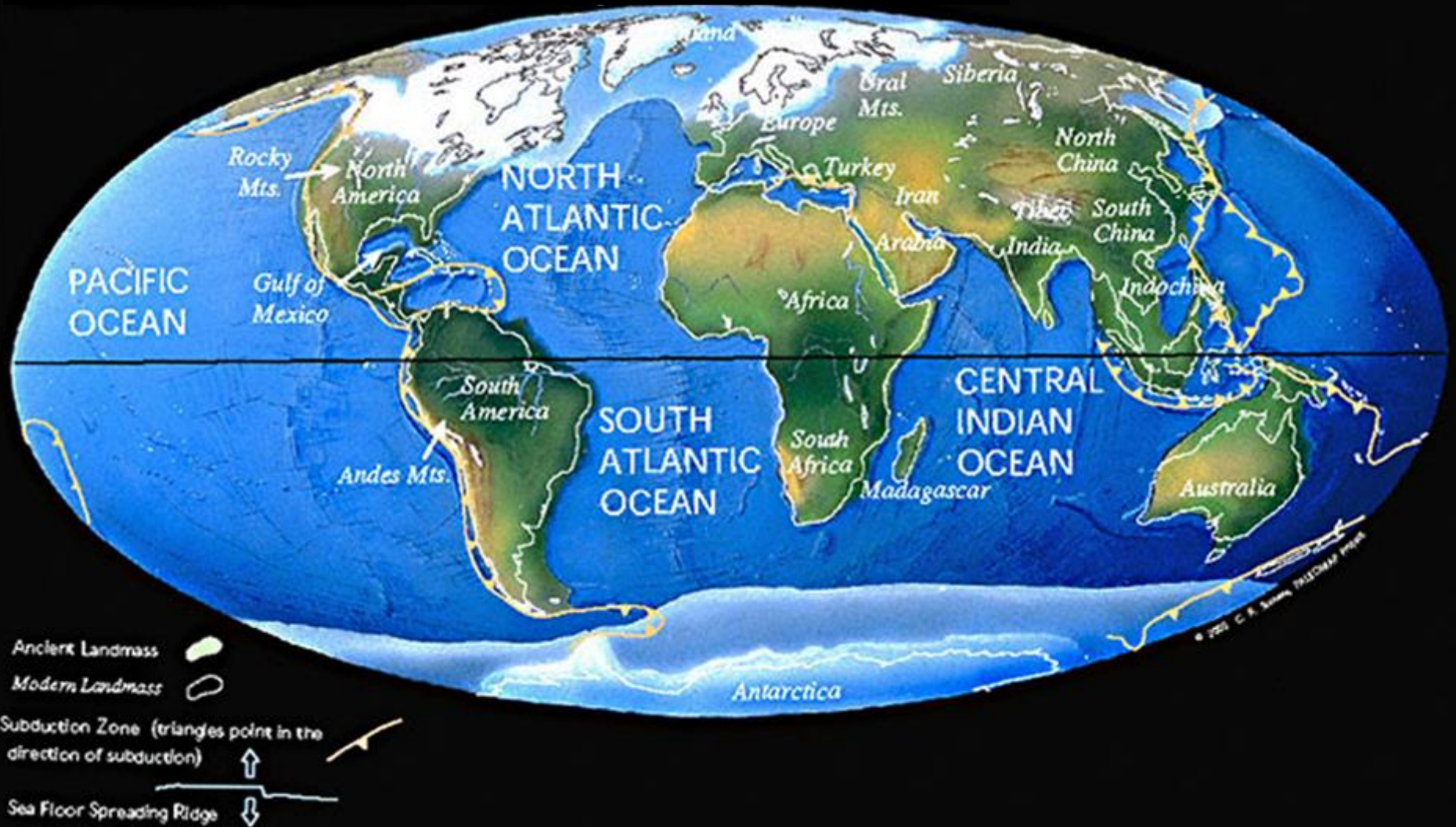
Le monde « actuel », peu de glaciers et température d'environ 14°

Modern World



Le monde d'il y a 18 000 et 140 000 ans : beaucoup de glaciers et température mondiale d'environ 10/12°

The two Last Glacial Maxima (18 000 and 140 000 years ago)

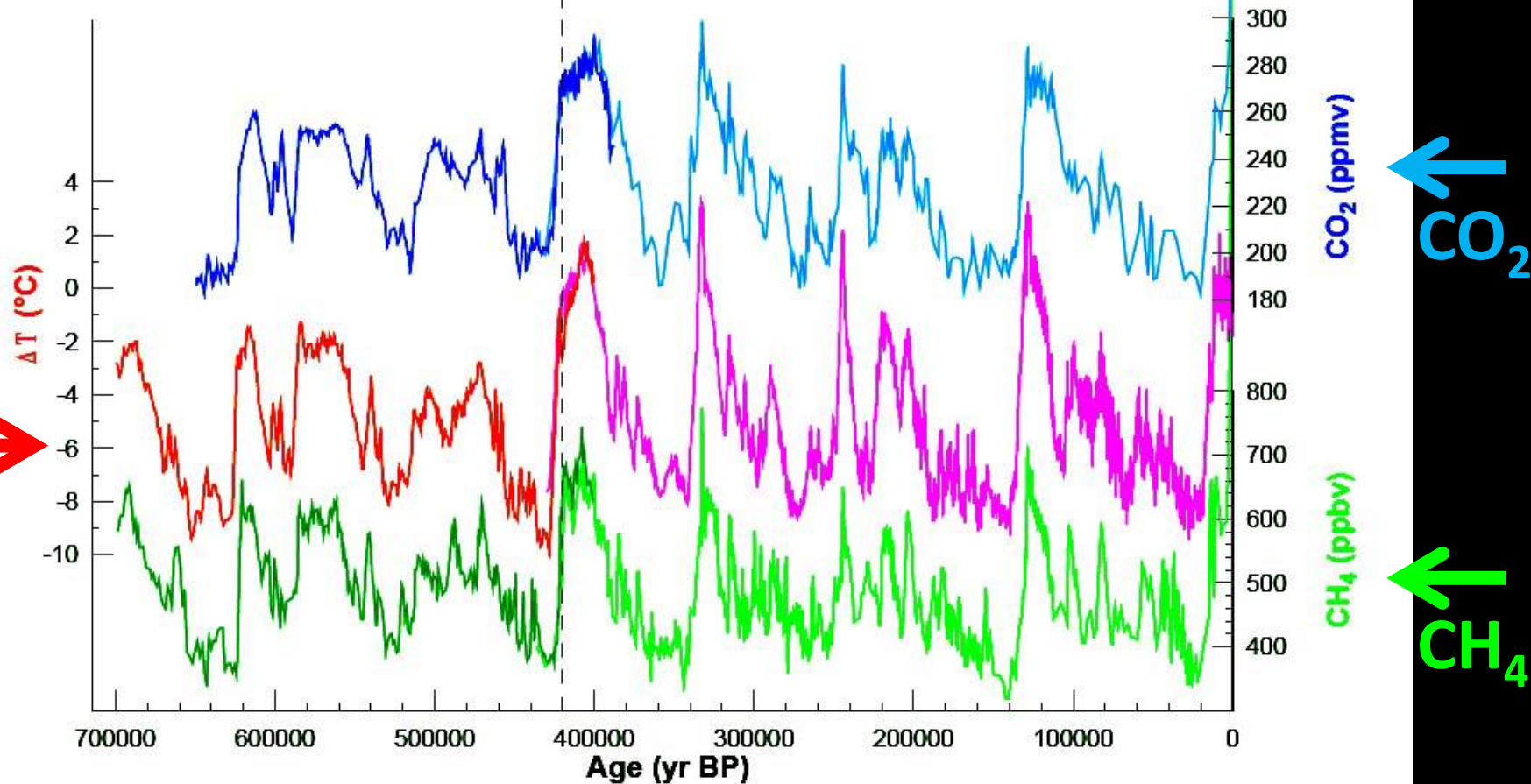


Climate and Greenhouse Gases during the last 650 Kyr

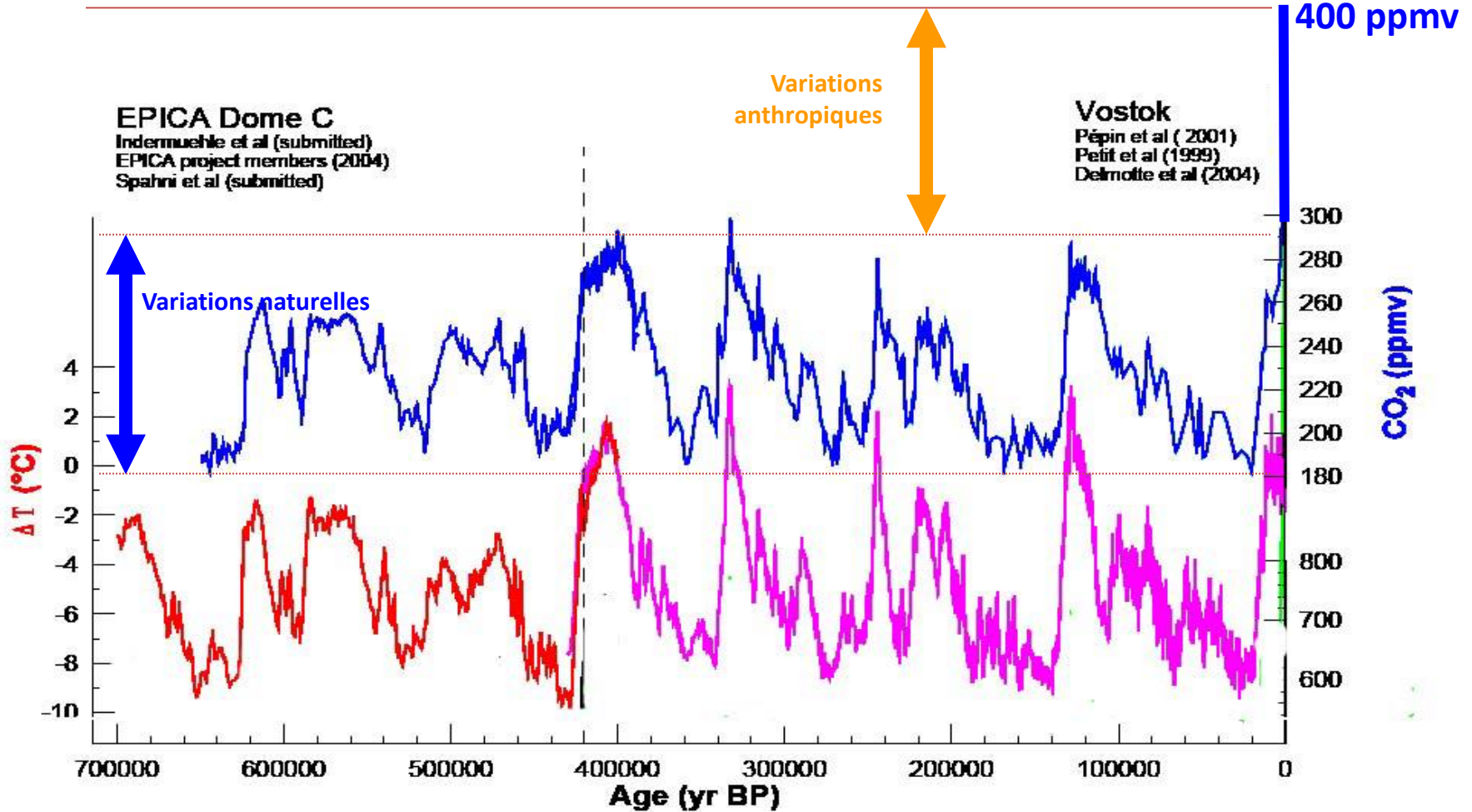
1700 ppbv

EPICA Dome C
Indermuehle et al (submitted)
EPICA project members (2004)
Spahni et al (submitted)

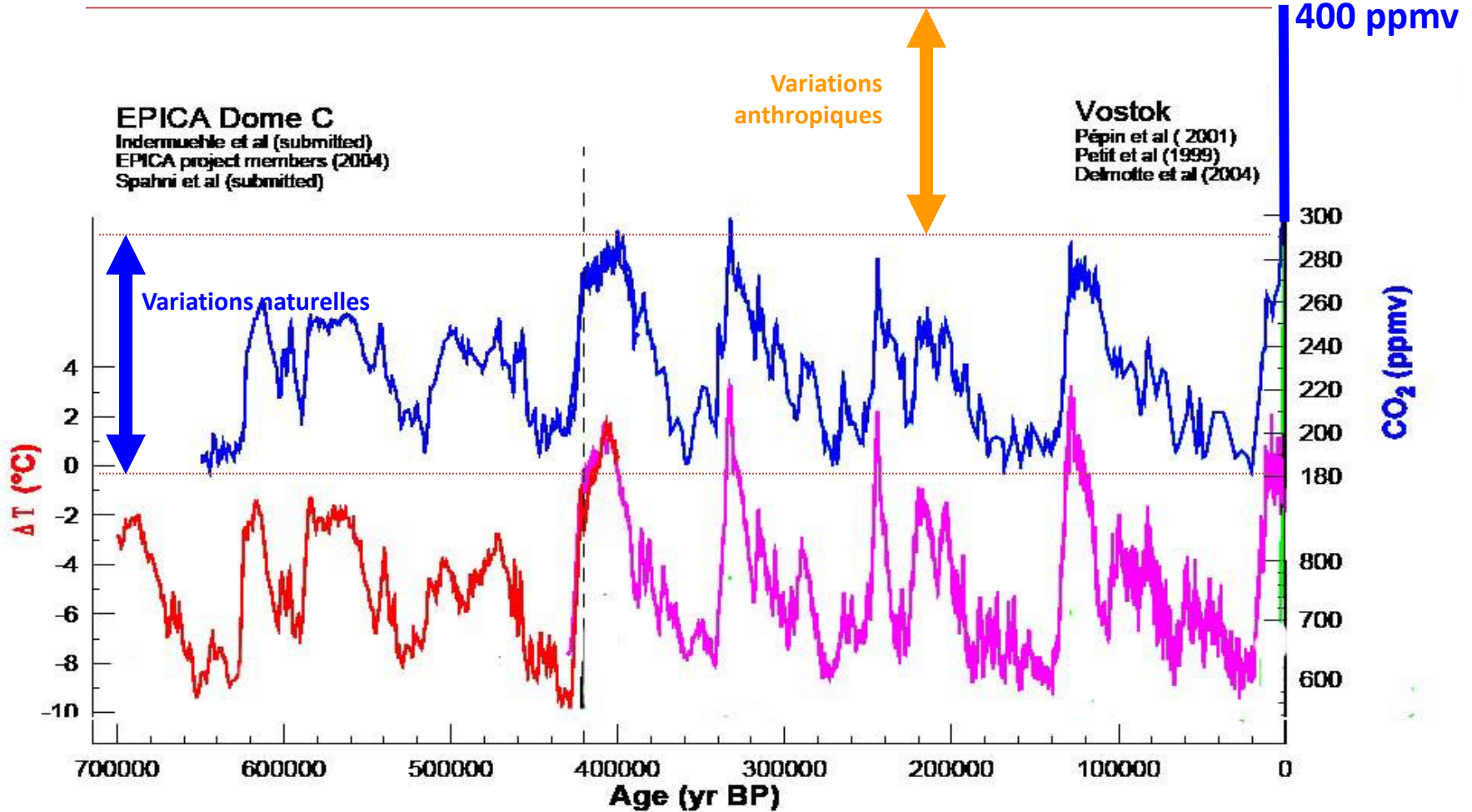
Vostok
Pépin et al (2001)
Petit et al (1999)
Delmotte et al (2004)



Le CO₂, le méthane ... varient fortement pendant le quaternaire, et le climat aussi.



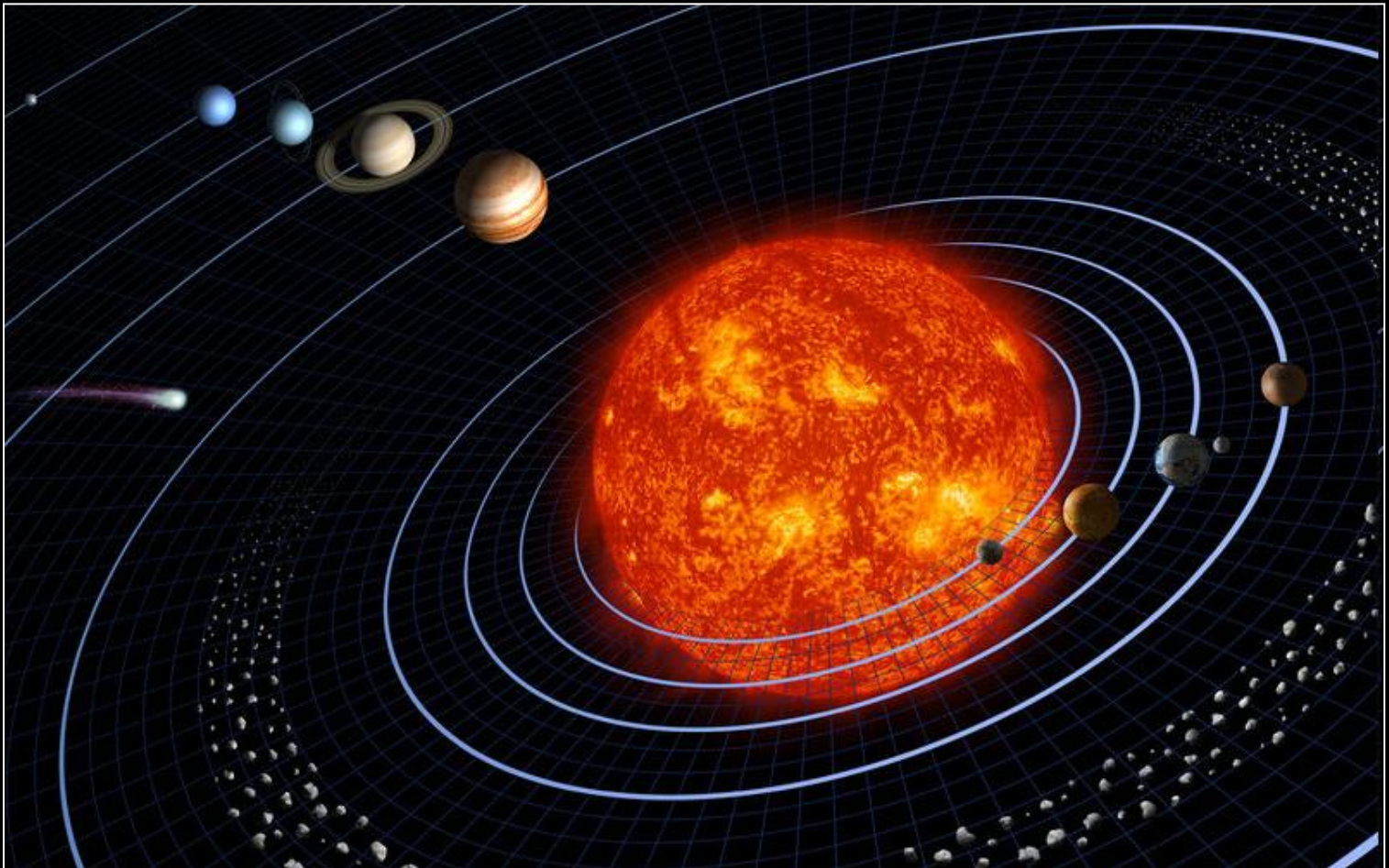
La température antarctique varie de +2 à -10°C par rapport à la température actuelle (-40°C). Le CO₂ varie de 180 à 280 ppmv ; il est aujourd'hui à 400 ppmv. Les variations sont parfaitement corrélées.



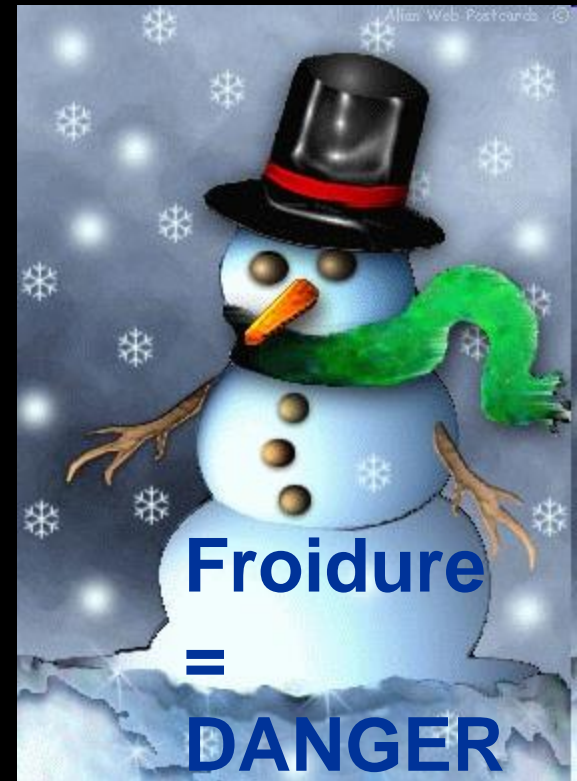
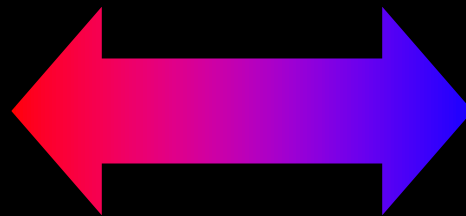
La température antarctique varie de +2 à -10°C par rapport à la température actuelle (-40°C). Le CO₂ varie de 180 à 280 ppmv ; il est aujourd'hui à 400 ppmv. Les variations sont parfaitement corrélées.

Mais les variations de température commencent quelques siècles avant celles de CO₂

Ces variations régulières ont le même rythme que des variations « astronomiques » (distance Terre /soleil, inclinaison du soleil ...). C'est l'astronomie qui est la « cause première », le déclencheur.



Ces variations « astronomiques » ont le bon rythme, mais sont très, trop, faibles. Pourquoi d'aussi fortes variations de température avec d'aussi faible variations astronomiques, et que vient faire le CO₂ dans tout ça ?



On a déjà vu l'effet
« boule de neige » du CO_2
océanique. Cette
modification des flux
 CO_2 océanique \leftrightarrow CO_2
atmosphérique amplifie
le très faible effet
astronomique



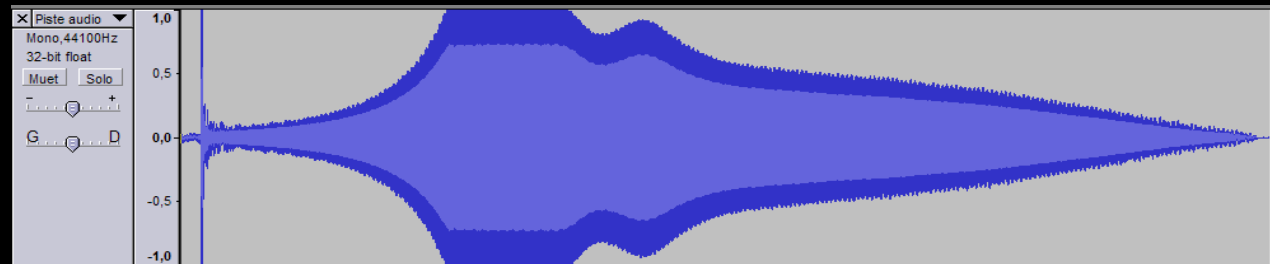
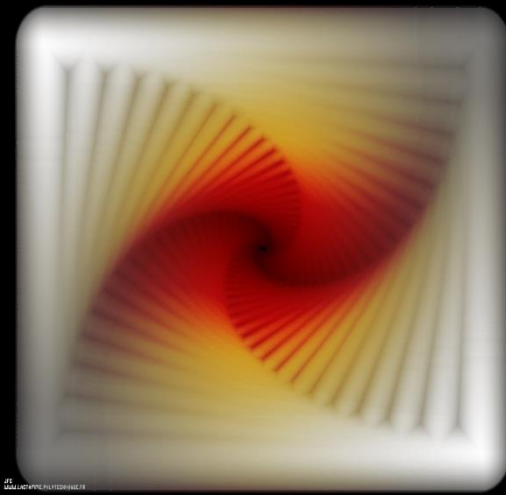


Il y a d'autres rétroactions positives, ou des modifications du cycle du carbone amplifient les variations initiales. Par exemple l'action de la température sur la décomposition des sols, sur la production de méthane (fermentation et/ou déstabilisation des clathrates), sur la stratification des eaux de mers donc sur la productivité océanique ... cela fait plein d'amplificateurs « carbonés » en cours d'étude et difficiles à modéliser.

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

Depuis quelques millions d'années, l'Astronomie fournissait le signal, et CO₂ jouait le rôle d'amplificateur.

Depuis 150 ans, le signal ne varie pas (ou peu) mais l'Homme augmente considérablement l'amplificateur. Pourvu que ça ne s'emballe pas ! Quand ça s'emballe avec un amplificateur « audio », on obtient un effet dit « de Larsen ».

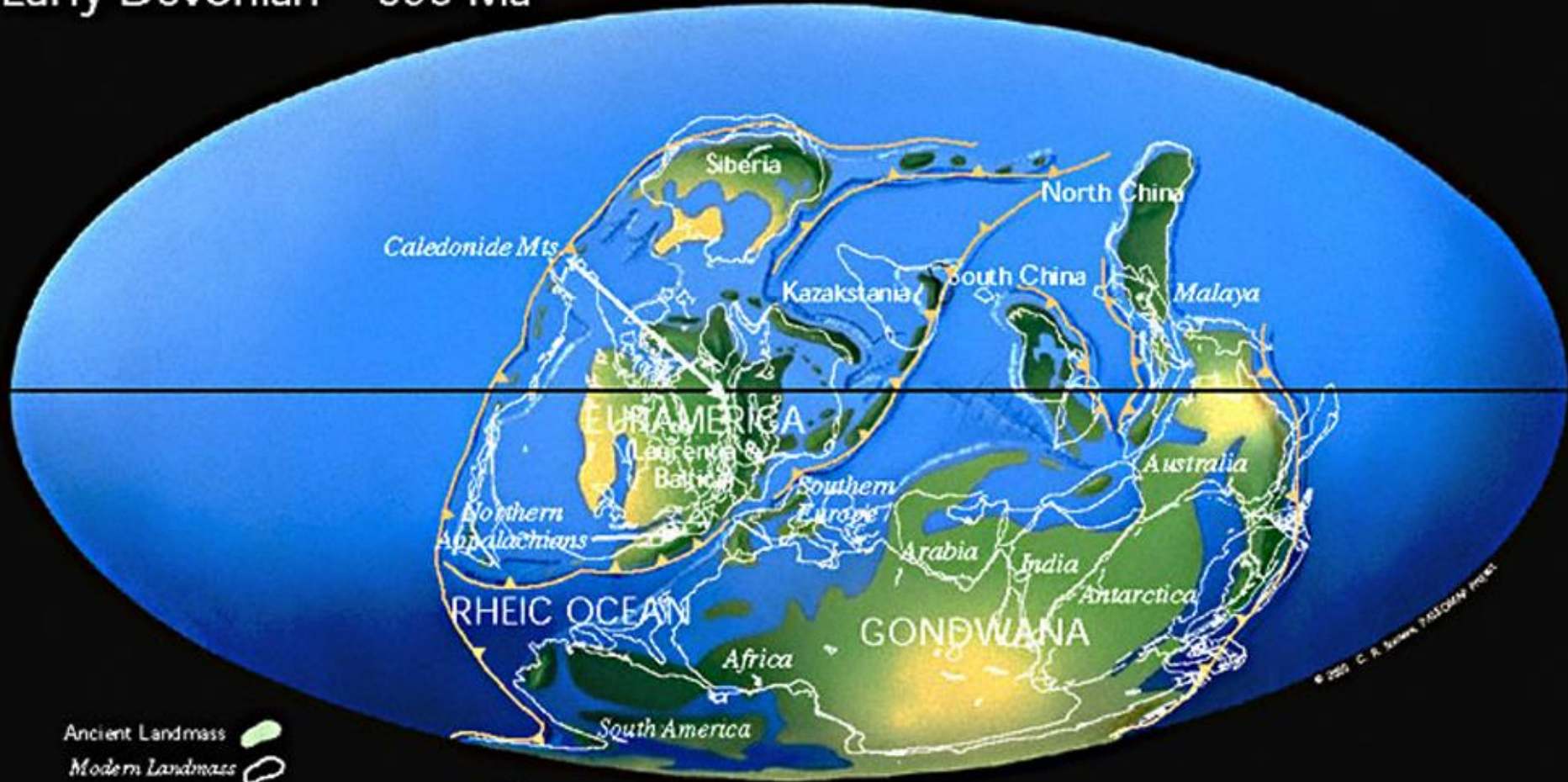


Que risque d'être un possible effet de Larsen en climatologie ? Personne ne le sait, mais évitons de jouer les apprentis sorciers !

3 - Les variations post 400 Ma du cycle du carbone

CHAUD

Early Devonian 390 Ma

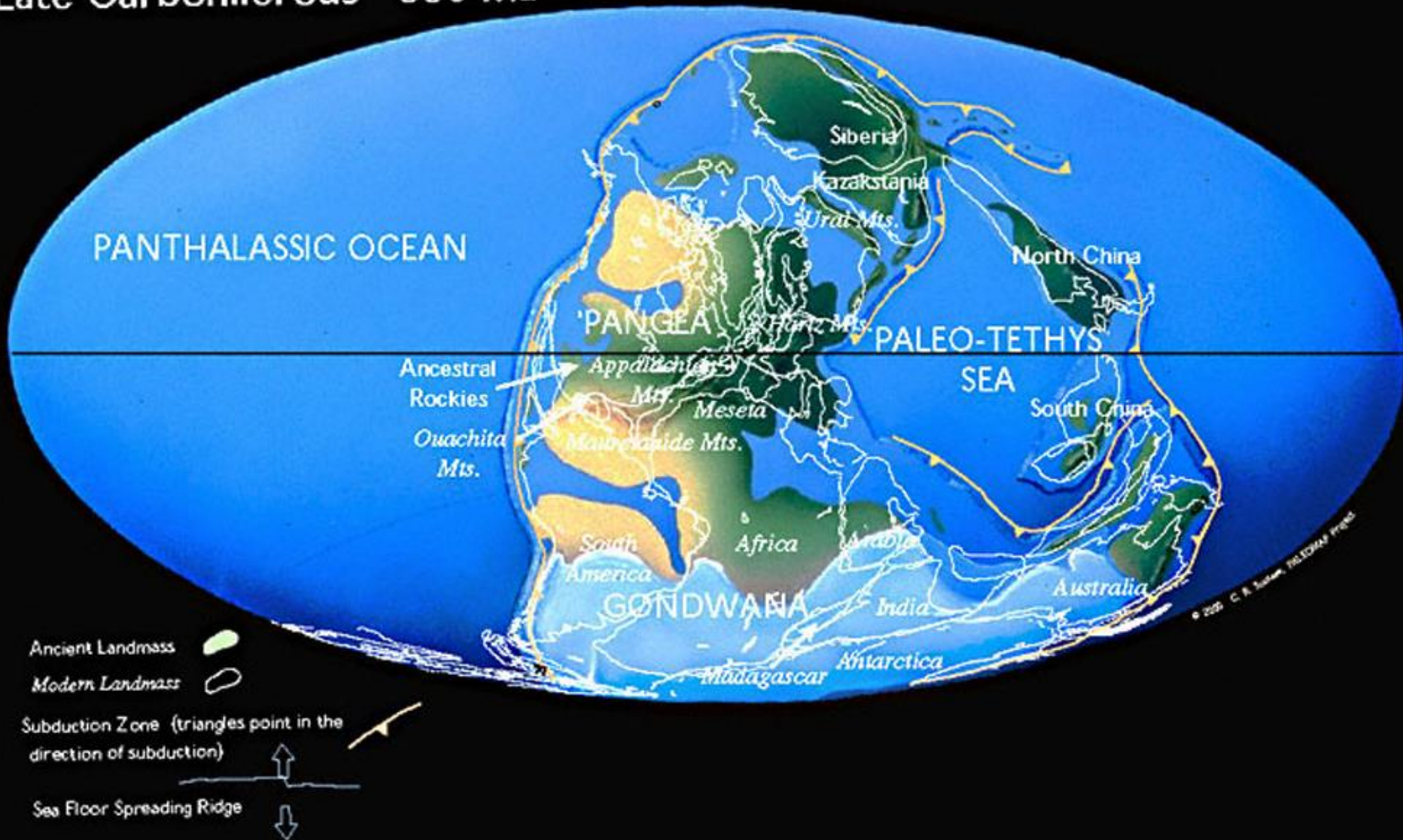


- Ancient Landmass
- Modern Landmass
- Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction)
- Sea Floor Spreading Ridge

© 2005 C. R. Scotese, TIGERCOMB PROJECT

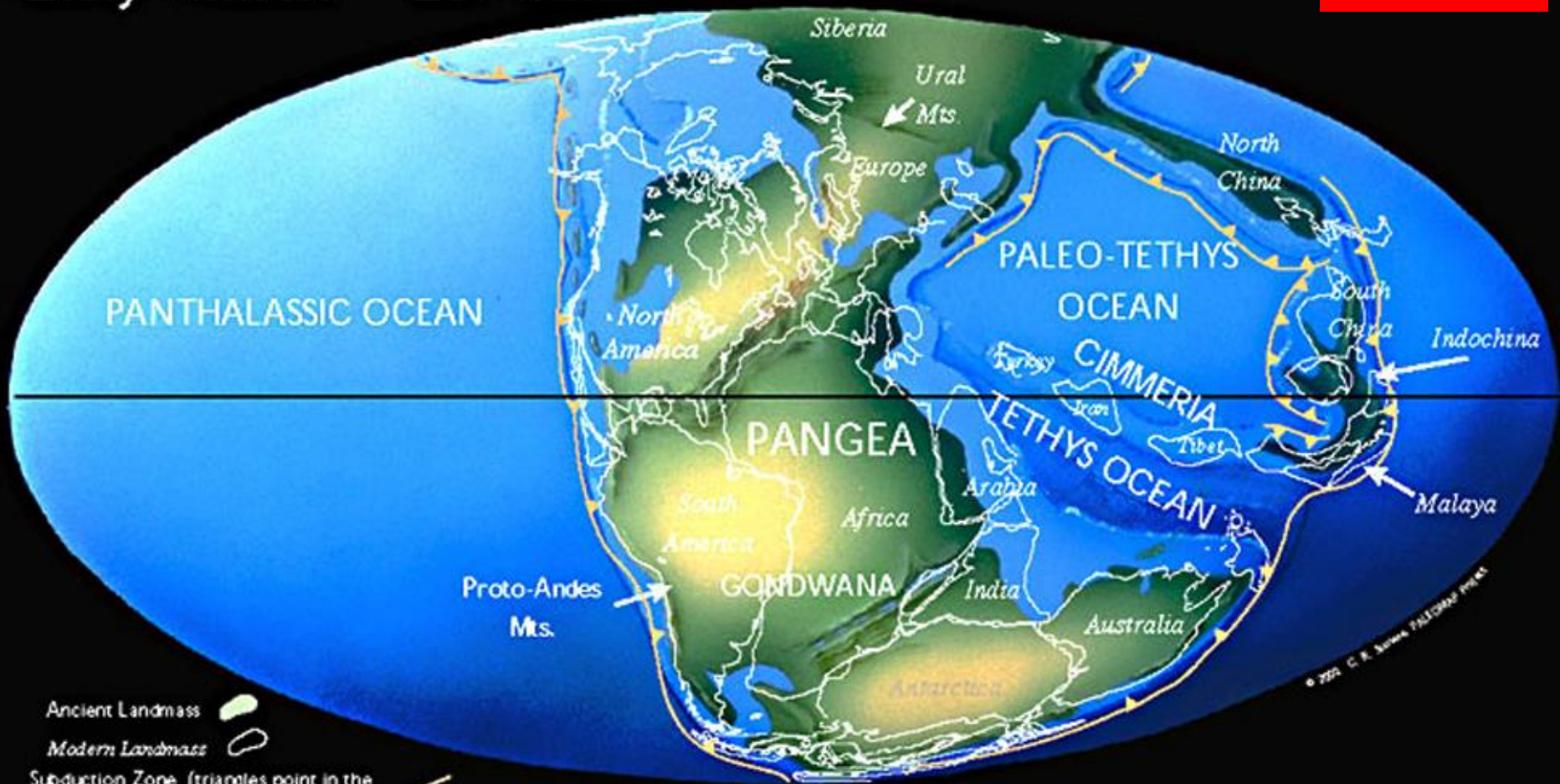
FROID

Late Carboniferous 306 Ma



Early Triassic 237 Ma

CHAUD



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

© 2001 C. R. Scotese, PALEOMAP PROJECT

Late Jurassic 152 Ma

CHAUD

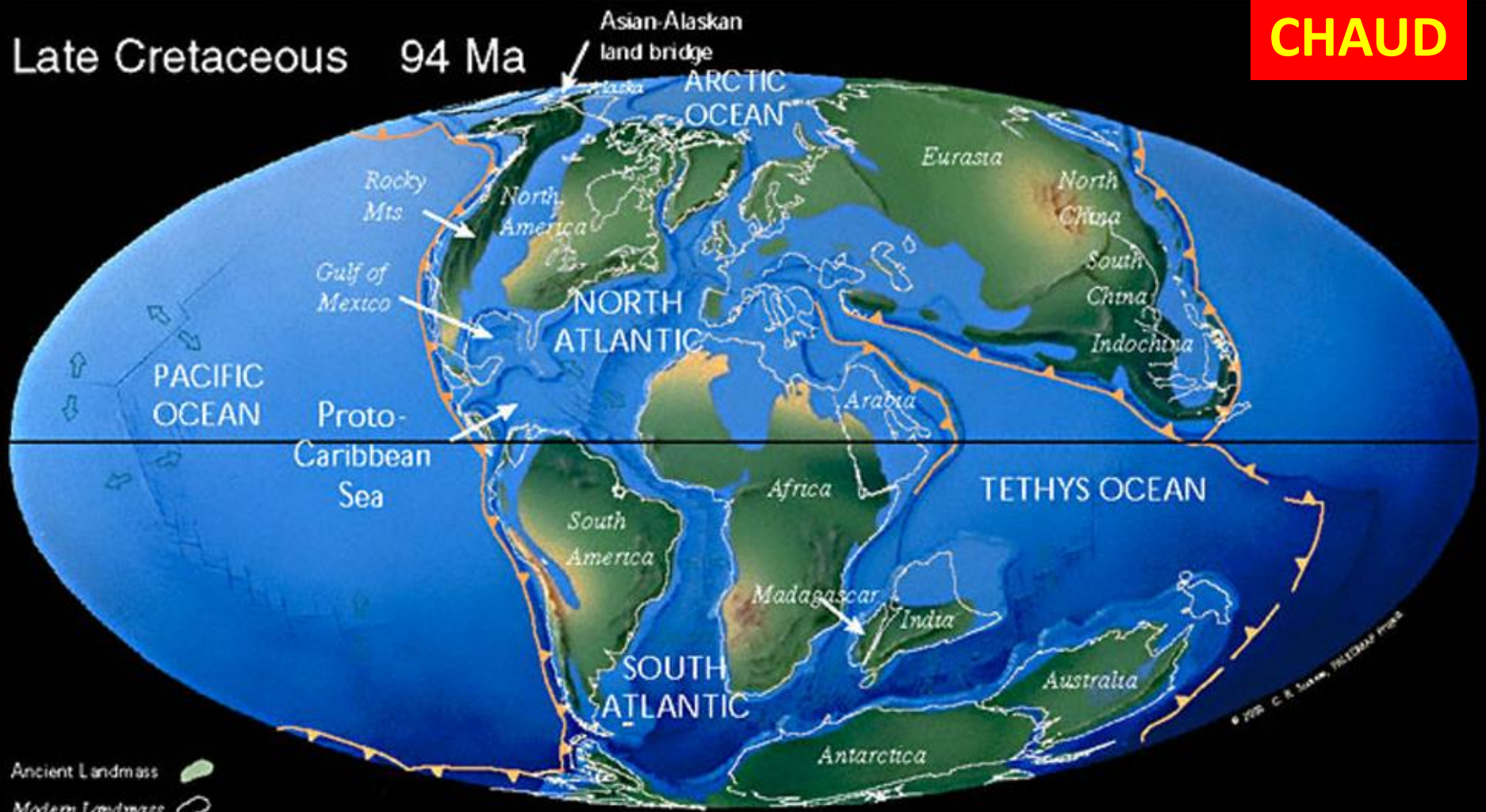



- Ancient Landmass
- Modern Landmass
- Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction)
- Sea Floor Spreading Ridge


© 2000 C. R. Scotese, GSA/DAPAR Project


Late Cretaceous 94 Ma


CHAUD



Ancient Landmass 

Modern Landmass 

Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction) 



© 2005 C. R. Scotese, THE CRETACEOUS PERIOD

CHAUD

Middle Eocene 50.2 Ma







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

© 1995 C. R. Scotese, 1993/2004/05/06/07/08/09/10/11/12/13/14/15/16/17/18/19/20/21/22/23/24/25/26/27/28/29/30/31/32/33/34/35/36/37/38/39/40/41/42/43/44/45/46/47/48/49/50/51/52/53/54/55/56/57/58/59/60/61/62/63/64/65/66/67/68/69/70/71/72/73/74/75/76/77/78/79/80/81/82/83/84/85/86/87/88/89/90/91/92/93/94/95/96/97/98/99/100

Ca commence
à refroidir

Middle Miocene 14 Ma



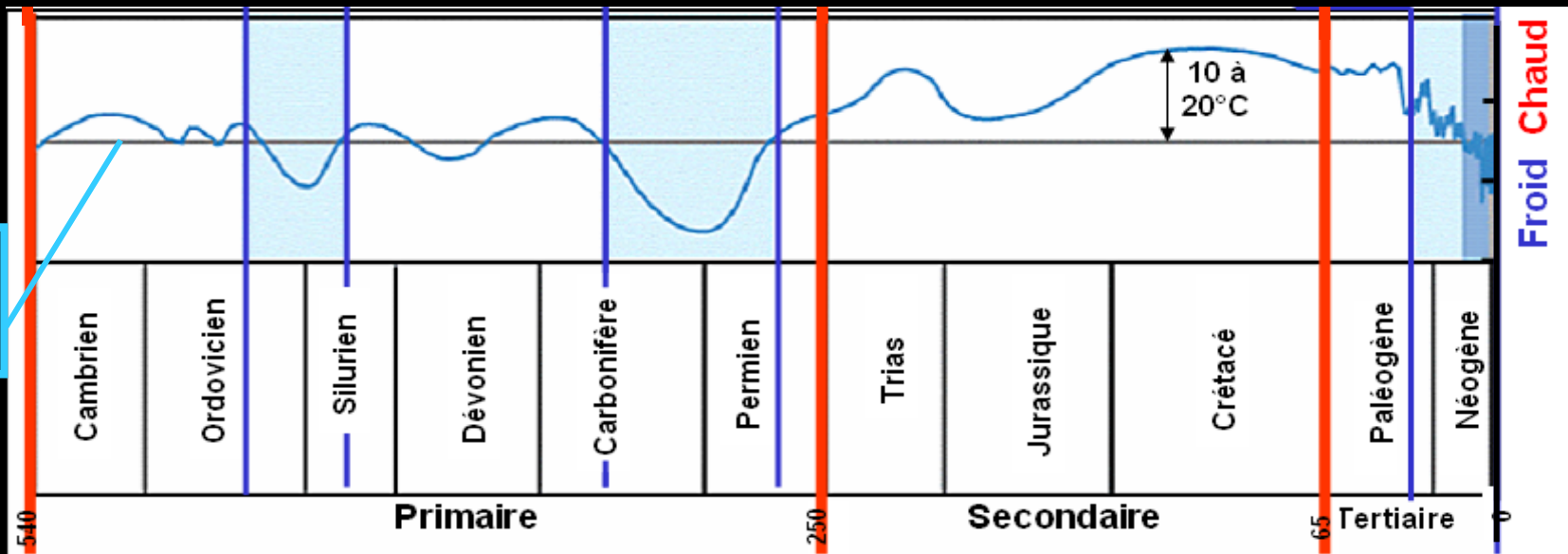
- Ancient Landmass 
- Modern Landmass 
- Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction) 
- Sea Floor Spreading Ridge 

© 2002 C. E. Keen, Tectonic Plates

± FROID

Last Glacial Maximum 18,000 years ago

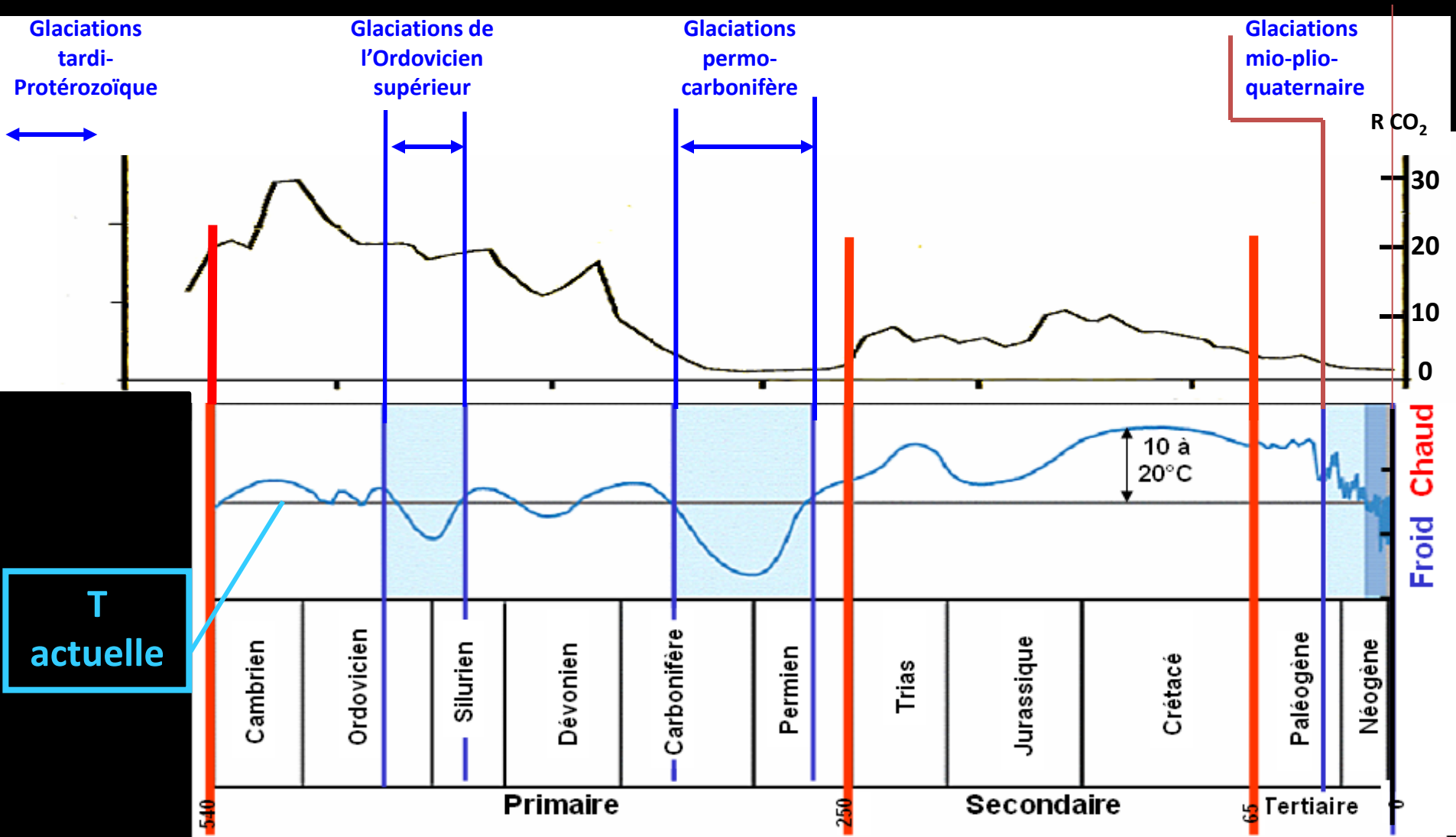




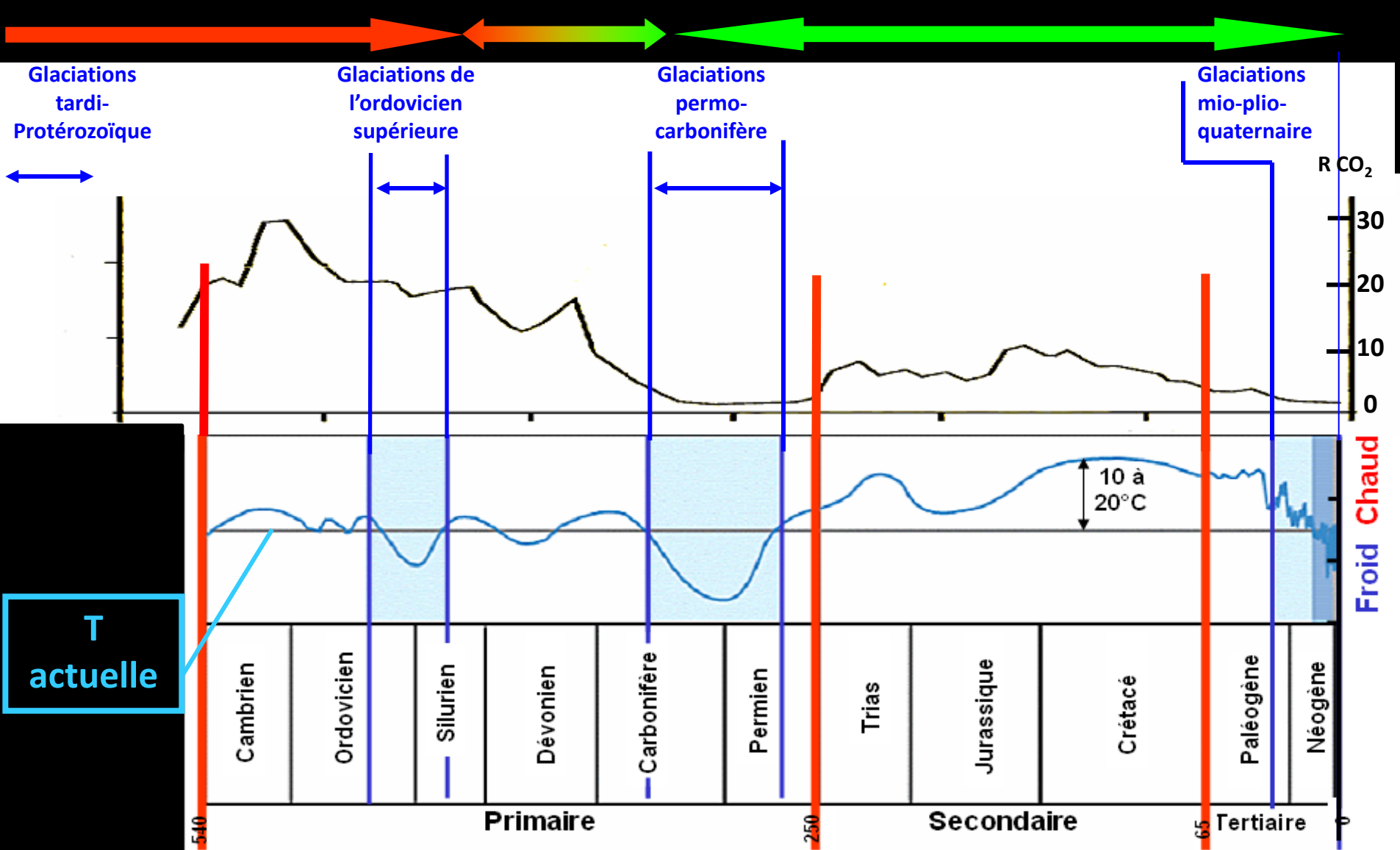
T
actuelle

Froid Chaud

On sait reconstituer les températures moyennes mondiales,



On sait reconstituer les températures moyennes mondiales, et aussi le CO₂ atmosphérique.



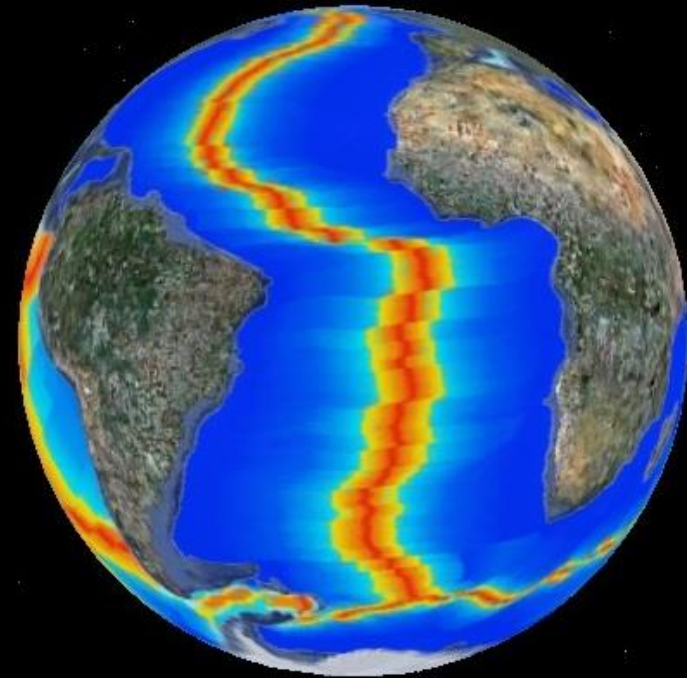
On sait reconstituer les températures moyennes mondiales, et aussi le CO₂ atmosphérique. Et depuis 400 Ma, il y a un approximatif parallélisme !

On peut alors proposer des explications (au moins partielles) pour ces amples variations.

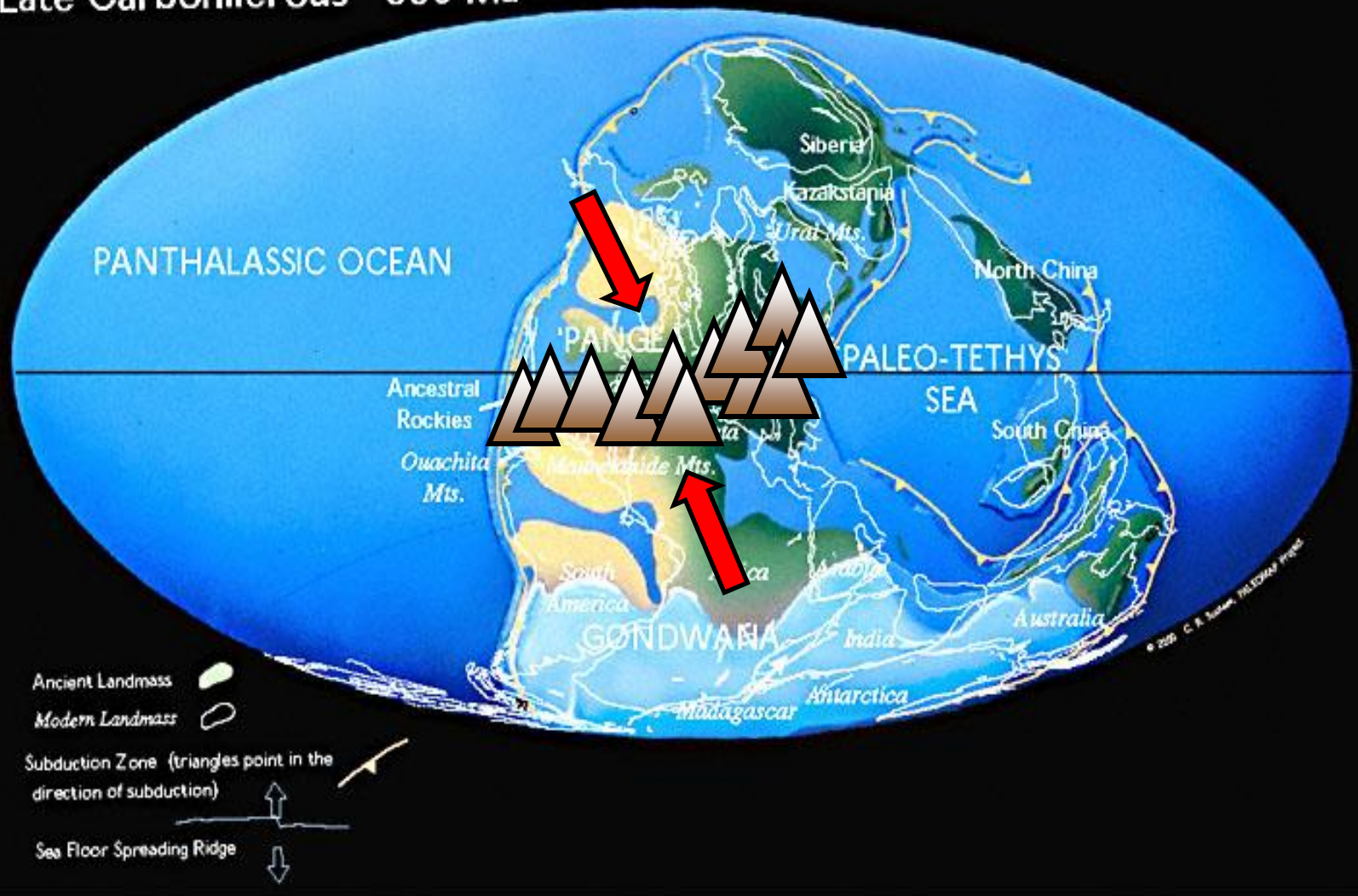
1 - Baisse T et CO₂ depuis 80 Ma : baisse de l'activité des dorsales et altération de la chaîne alpino-himalayenne



2 - Maximum de T vers 120 Ma : forte activité des dorsales, mais peu de montagnes (peu d'érosion-altération).



Late Carboniferous 306 Ma

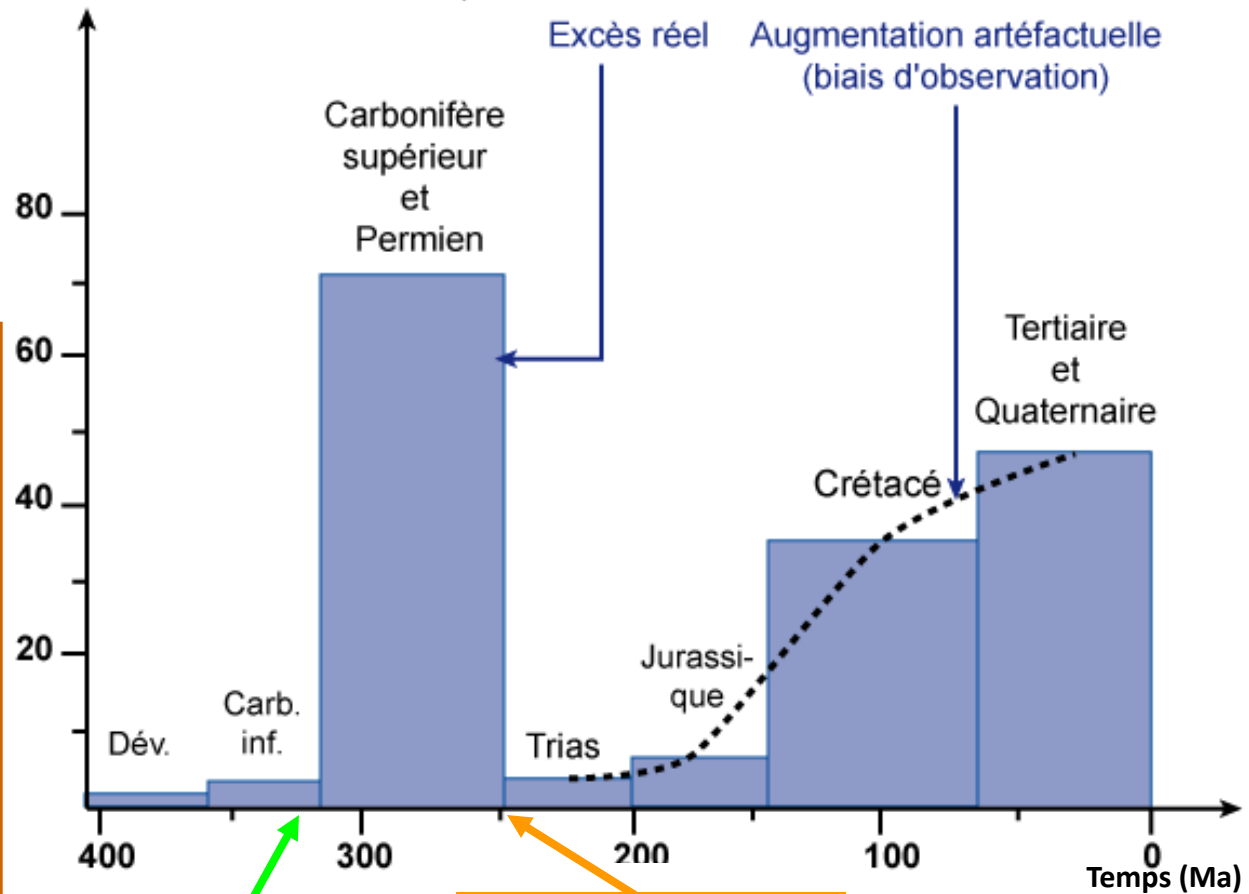


3 - Pour la baisse du CO₂ et le coup de froid du Carbonifère (300 Ma), deux causes non incompatibles : l'altération de la chaine hercynienne et ...

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



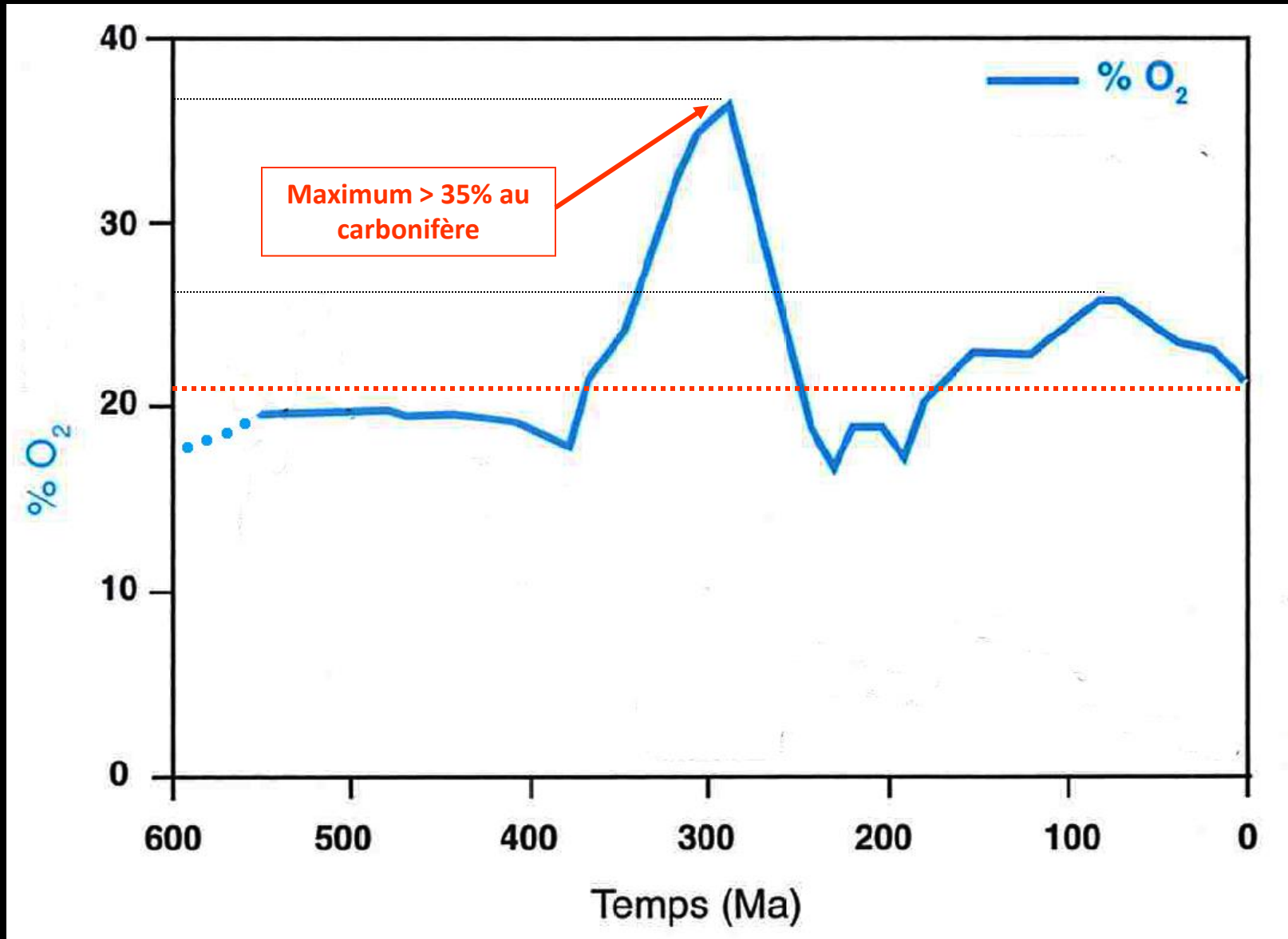
Réserves de charbon exploitable
(milliards de tonnes / millions d'années)



Extension du couvert végétal ligneux

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

Et des modifications du cycle du carbone peuvent aussi entraîner des variations de l'O₂, qu'on sait déterminer.



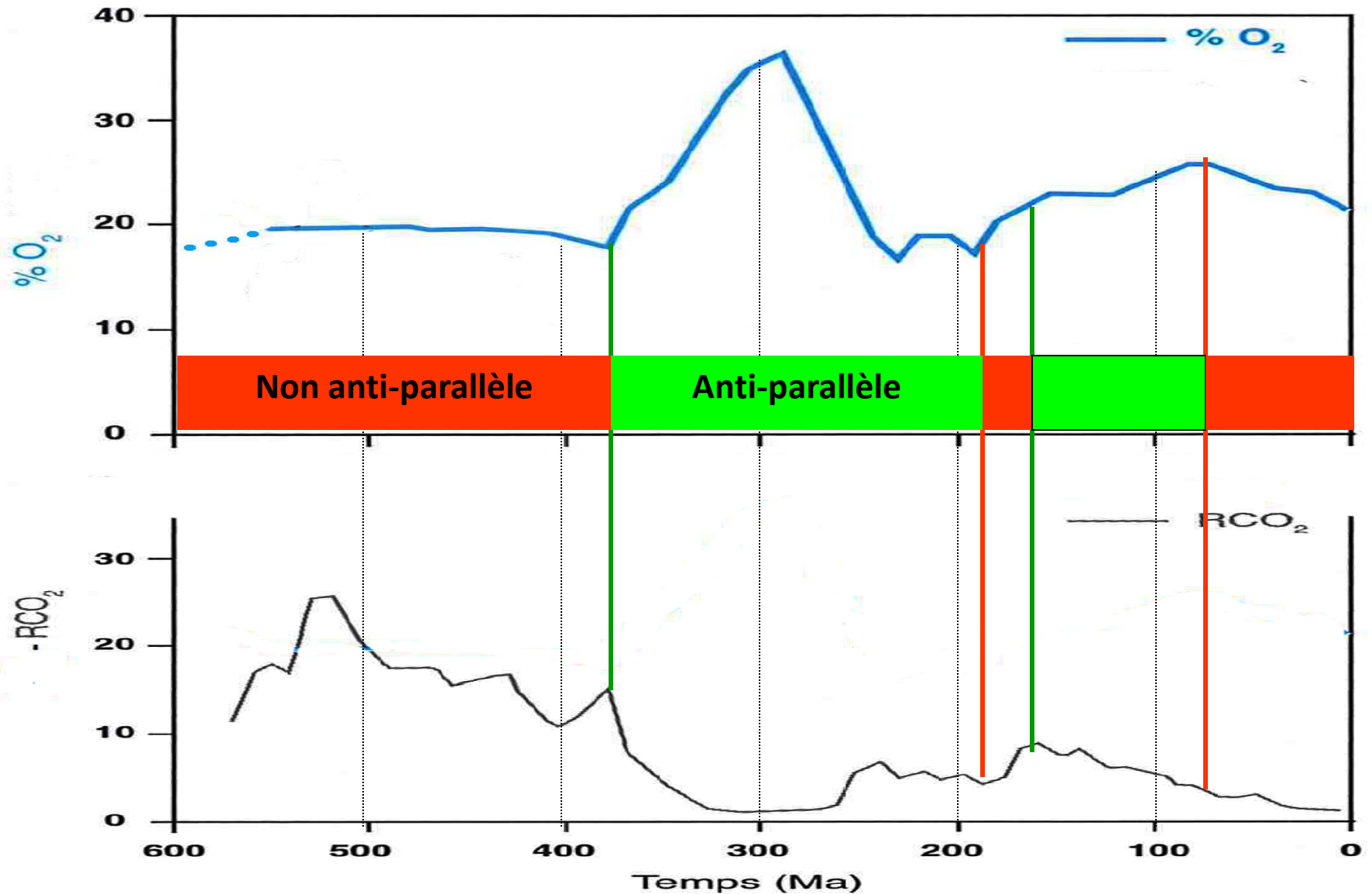


La Meganeura de Commentry (03)

On aurait pu s'en douter depuis 150 ans si les disciplines scientifiques n'étaient pas si cloisonnées

**On aurait pu
s'en douter
depuis 150 ans
si les
disciplines
scientifiques
n'étaient pas si
cloisonnées**





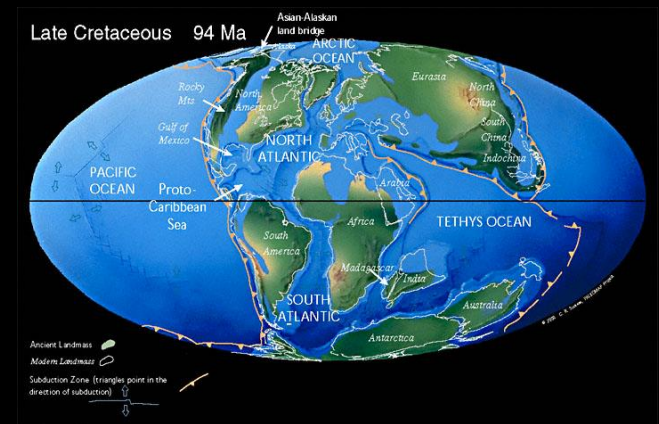
Evolution comparée O₂ / CO₂. Parfois, c'est antiparallèle. Le couple photosynthèse-fossilisation de la matière organique « compte ». Souvent ce n'est pas antiparallèle. D'autres facteurs font varier le CO₂

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

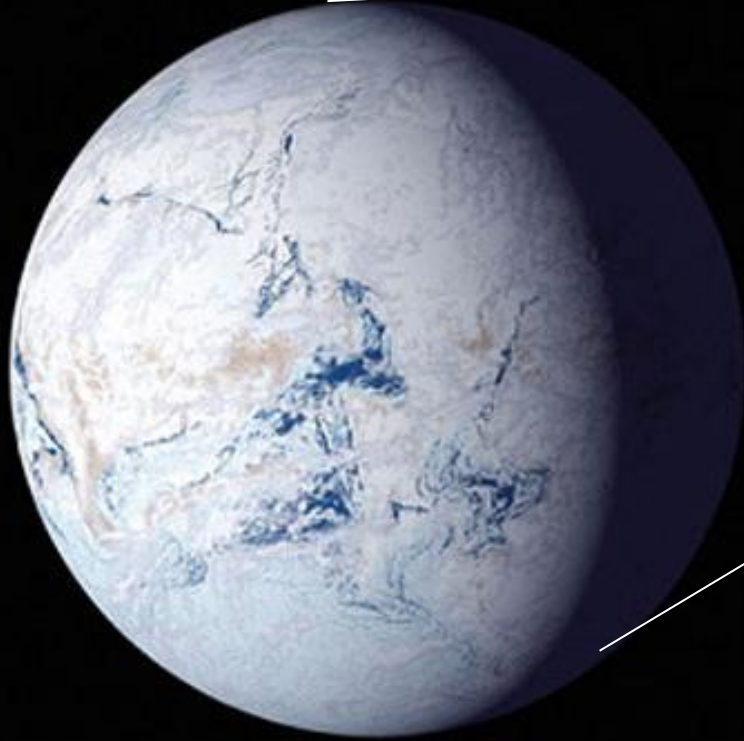
Piège tectonique du charbon ?

Difficulté de la dégradation de la lignine ?

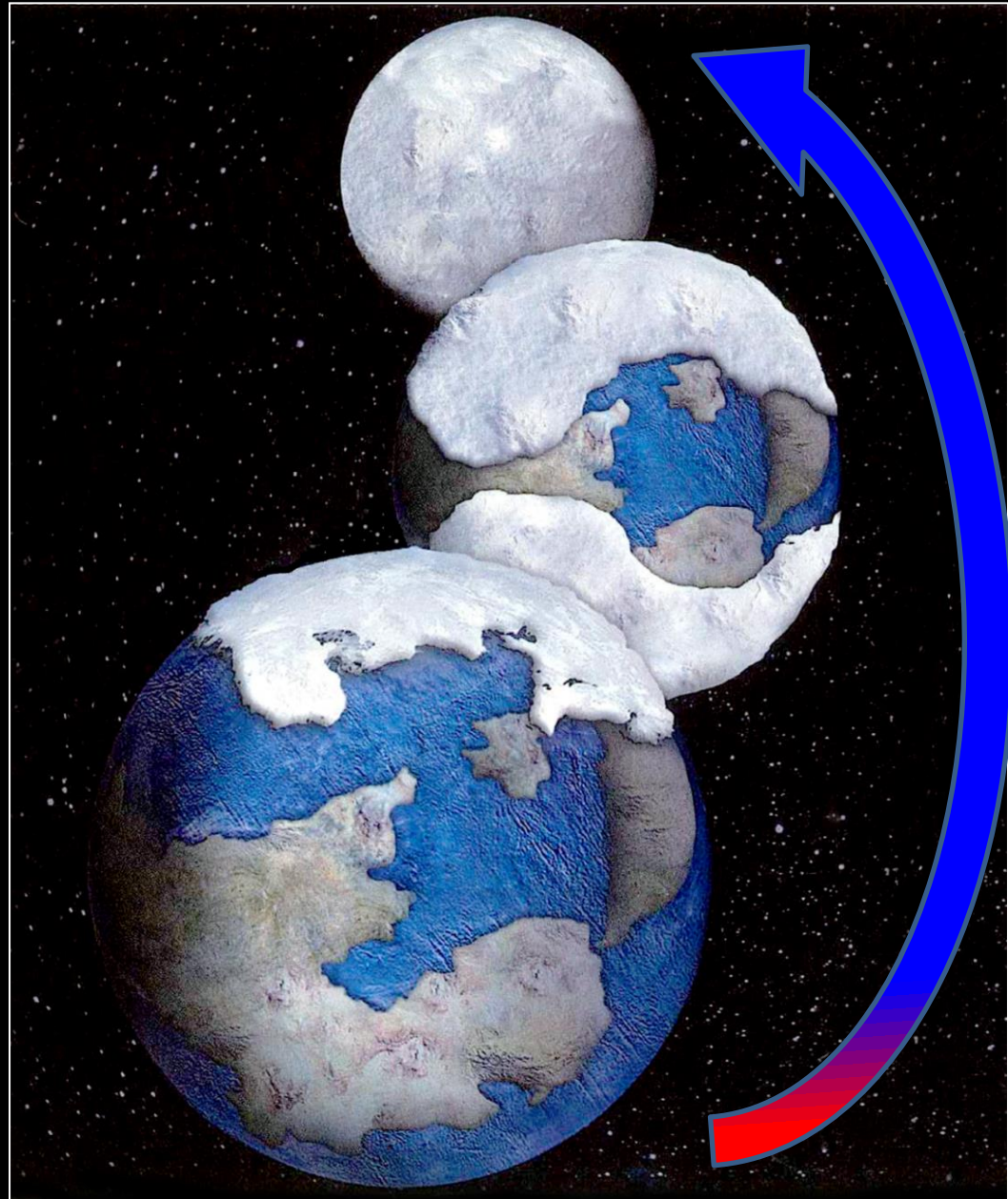
Et pourquoi O₂ augmente au Jurassique et Crétacé inférieur ? Haut niveau de la mer et hautes températures qui favorisent l'existence de plateformes peu profondes mal oxygénées, donc « pétrologène » ?



4 - Les variations tardi-protérozoïques du cycle du carbone (de - 800 à - 550 Ma)



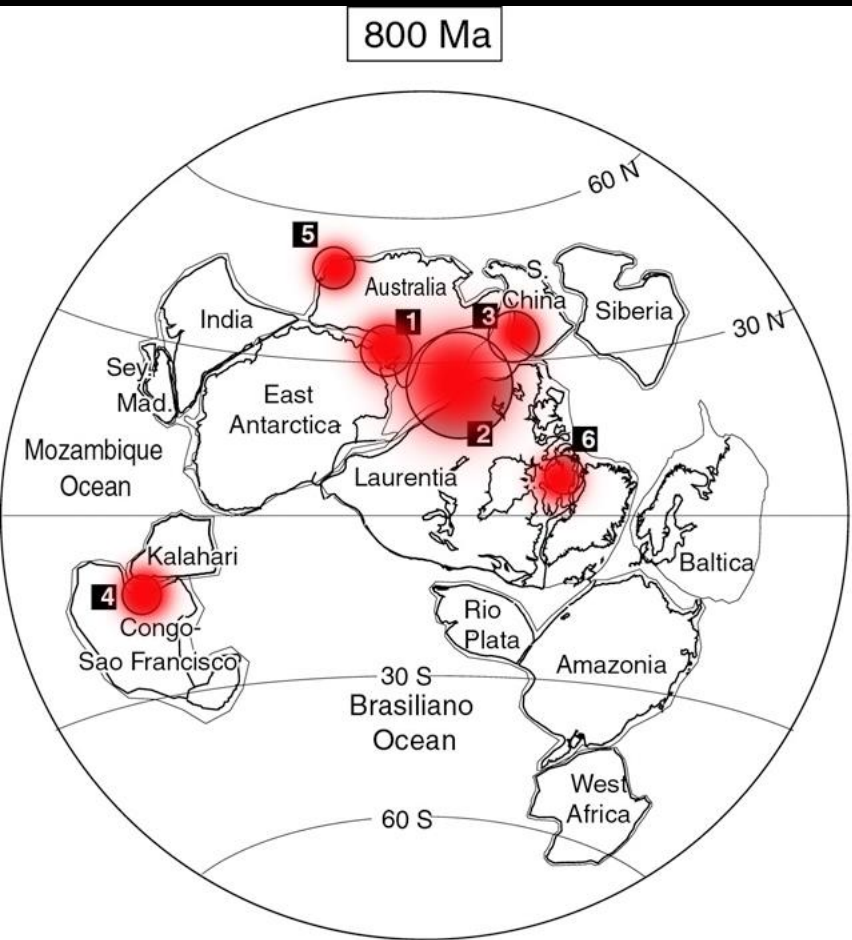
Des données géologiques solides et variées montrent que (presque) tous les continents étaient recouverts de calottes et (presque) tous les océans de banquise : les 3 épisodes « boules de neige » (snowball earth), vers 750, 600 et 580 MA

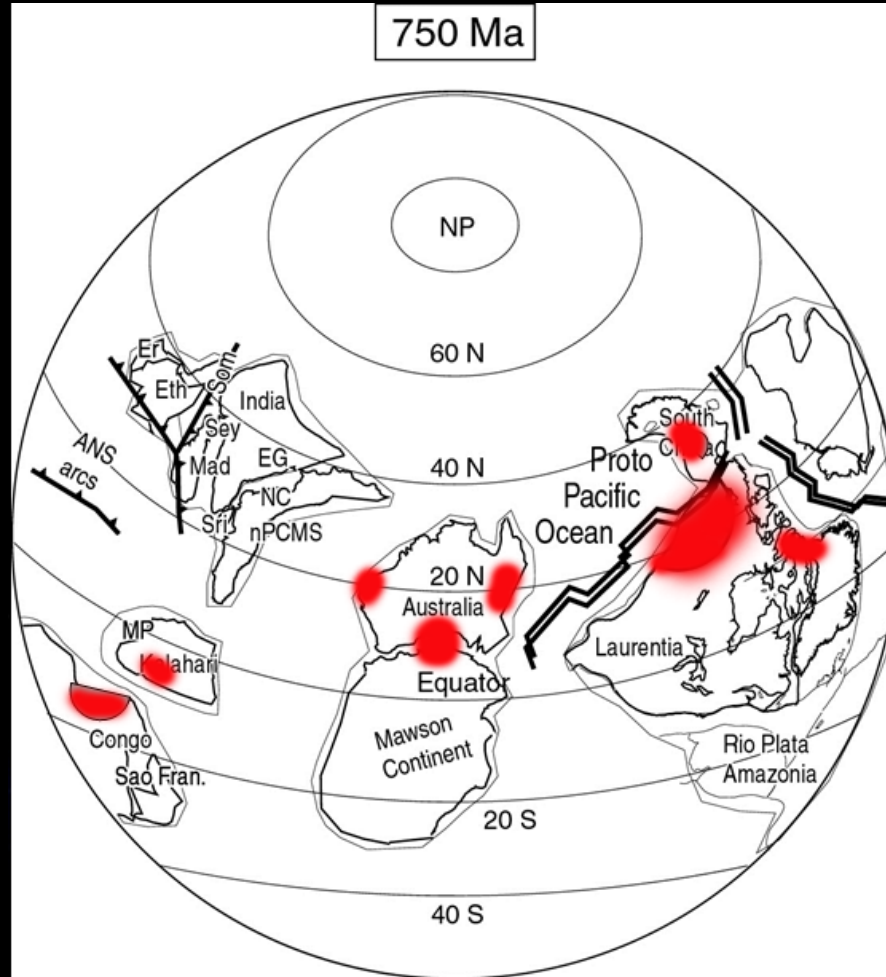


Une proposition de modèle explicatif

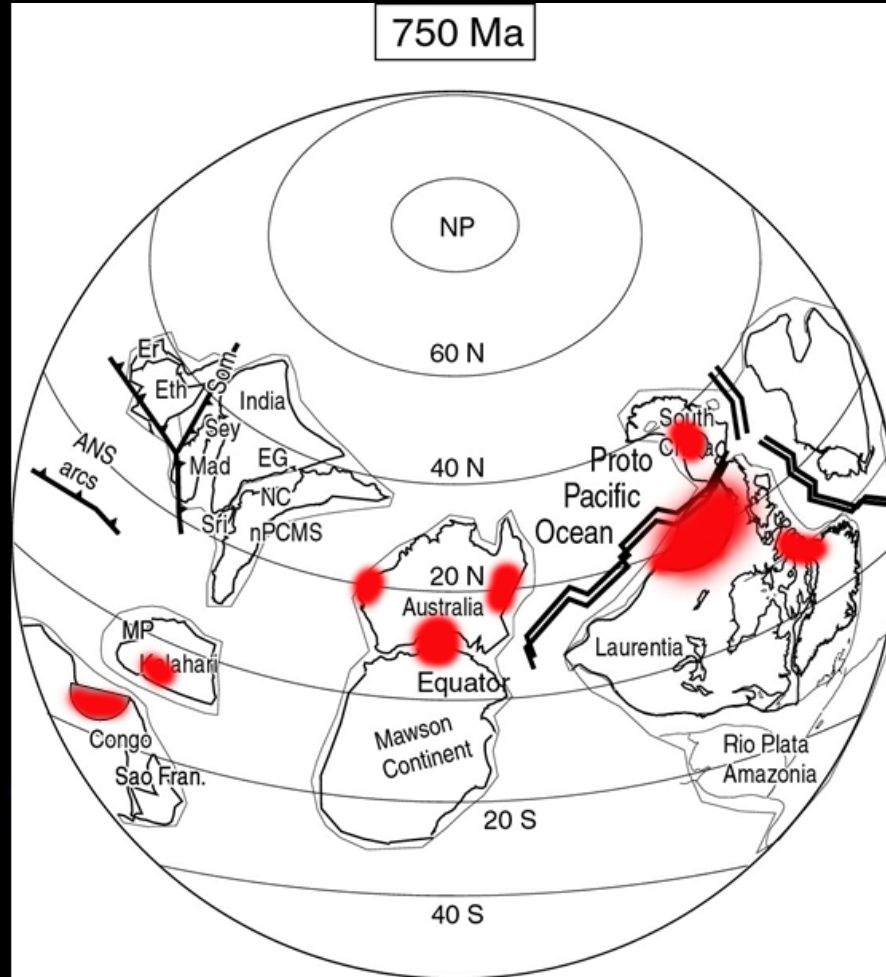
Il y a 800 Ma, les continents étaient tous regroupés en un continent unique, la Rodinia (comme il y a 250 Ma). La vie, marine surtout, un peu continentale, était constituée quasi-exclusivement d'unicellulaires.

Des gigas trapps se mettent en place, surtout au centre du continent, là où le climat était très sec. Ça a dû faire une méga-crise de biodiversité chez les unicellulaires, mais bien peu documentée paléontologiquement parlant.

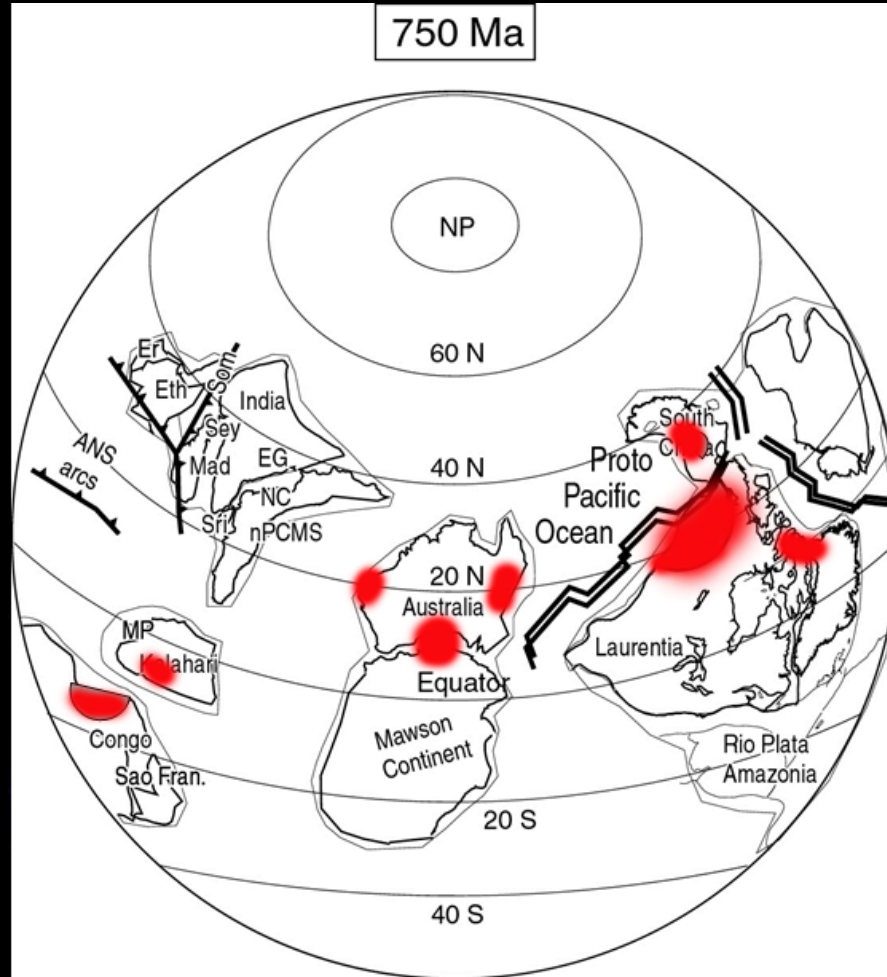




Vers -750 Ma, cette Rodinia se disloque. Les vastes affleurements de basalte se retrouvent « près » de la mer, en climat plus humide. Ils sont la proie de l'altération. Or l'altération des basaltes libère beaucoup de calcium qui fixe le CO_2 pour faire du calcaire.

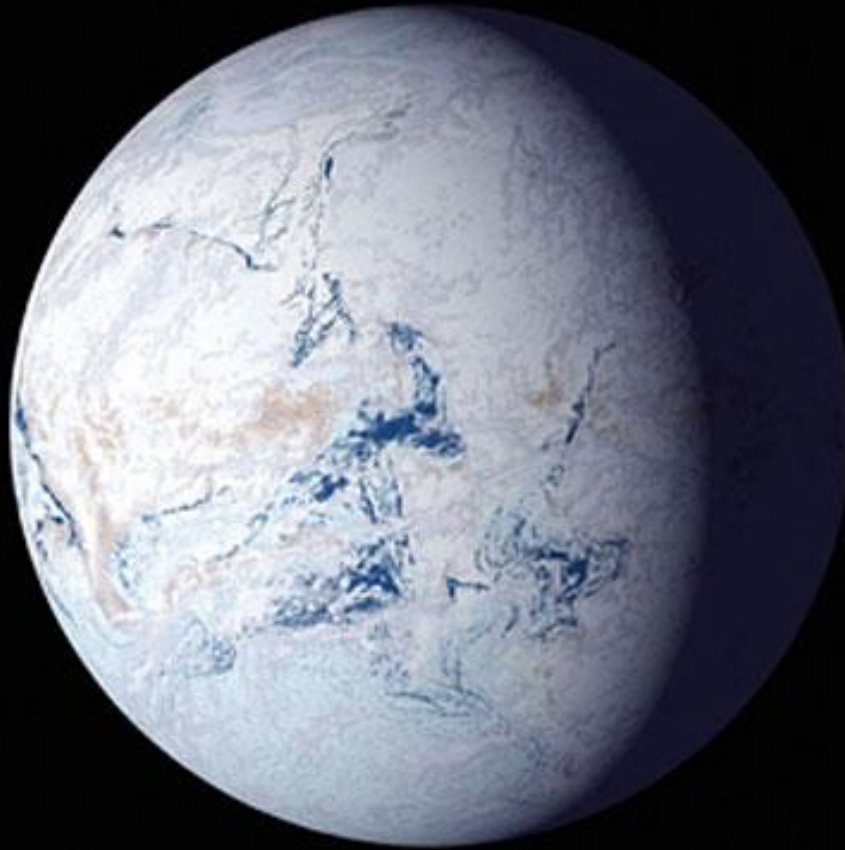


Augmentation de l'altération → augmentation de la pompe à CO₂, baisse du CO₂ atmosphérique, baisse de l'effet de serre et de la température, et le phénomène s'emballe, car une fois que les glaciations ont dépassé une certaine ampleur, l'effet albédo prend le dessus.

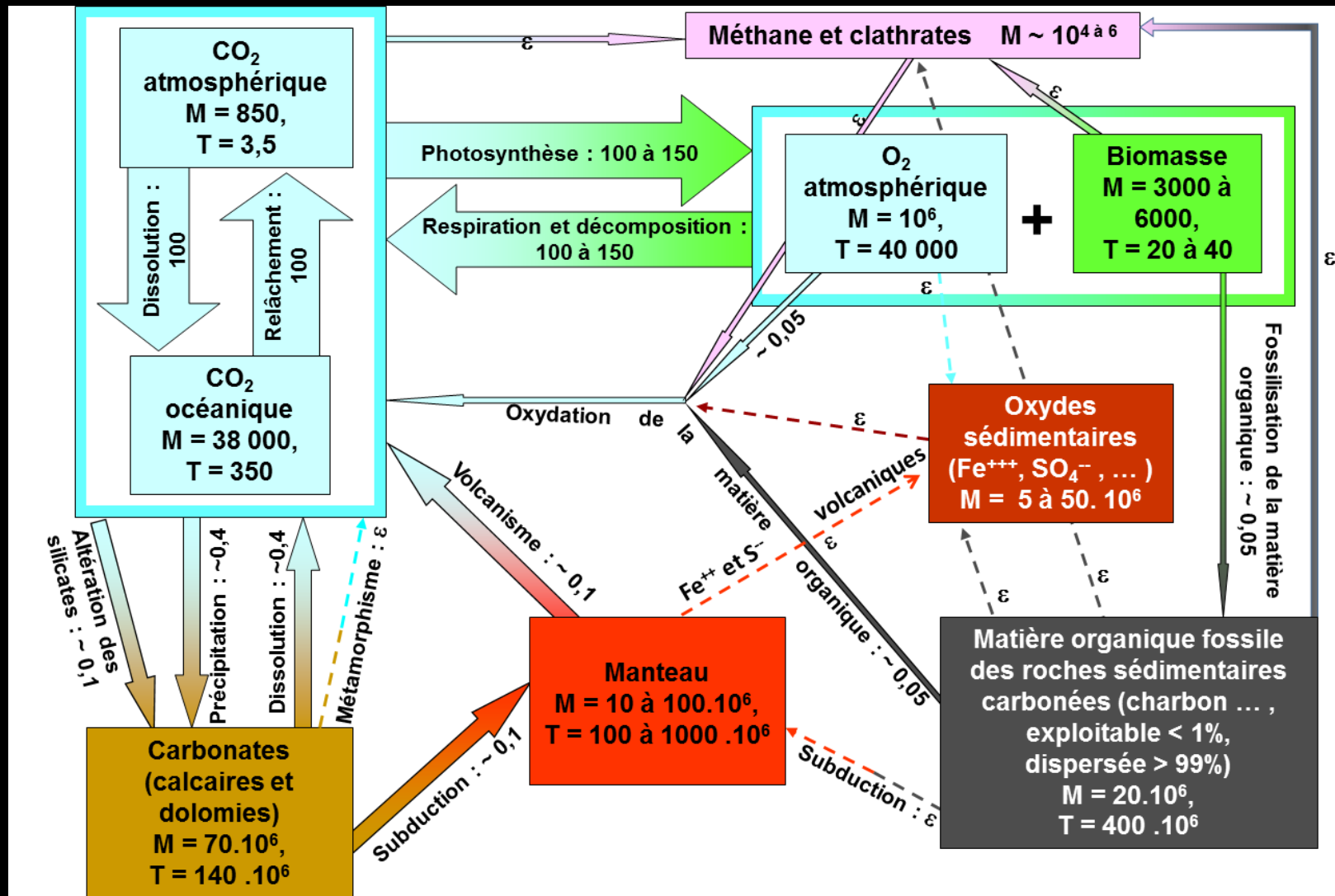


Le volcanisme, cause indirecte de cette mise en glace globale, serait donc une source de mort quasi globale. Une autre crise de la biodiversité (mal documentée), avec sans doute bien peu de survivants !

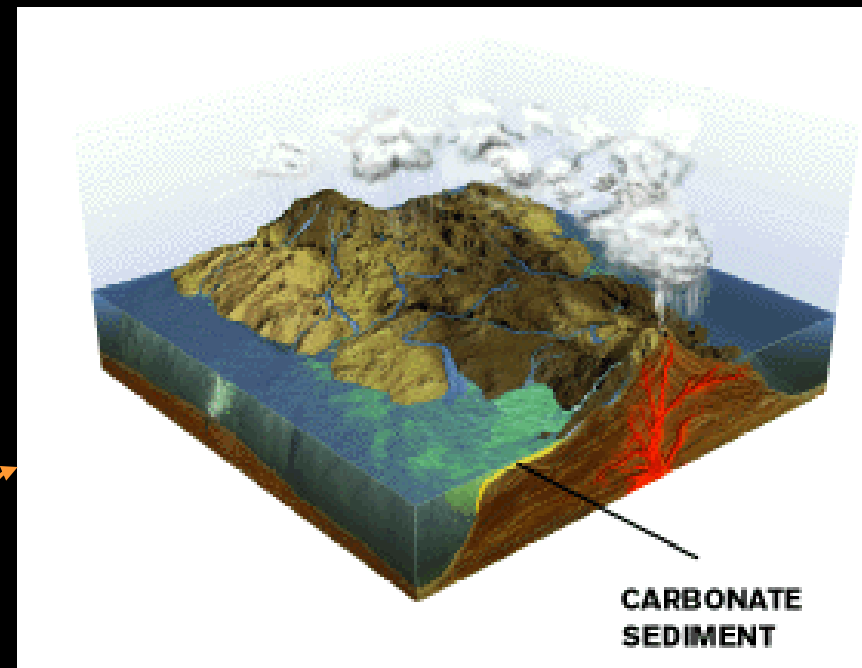
Comment en est-on sorti ? N'importe quel physicien vous démontrera qu'une Terre d'albédo voisin de 1 (Terre blanche) réfléchit quasiment toute l'énergie solaire, et ne peut donc pas se réchauffer.



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

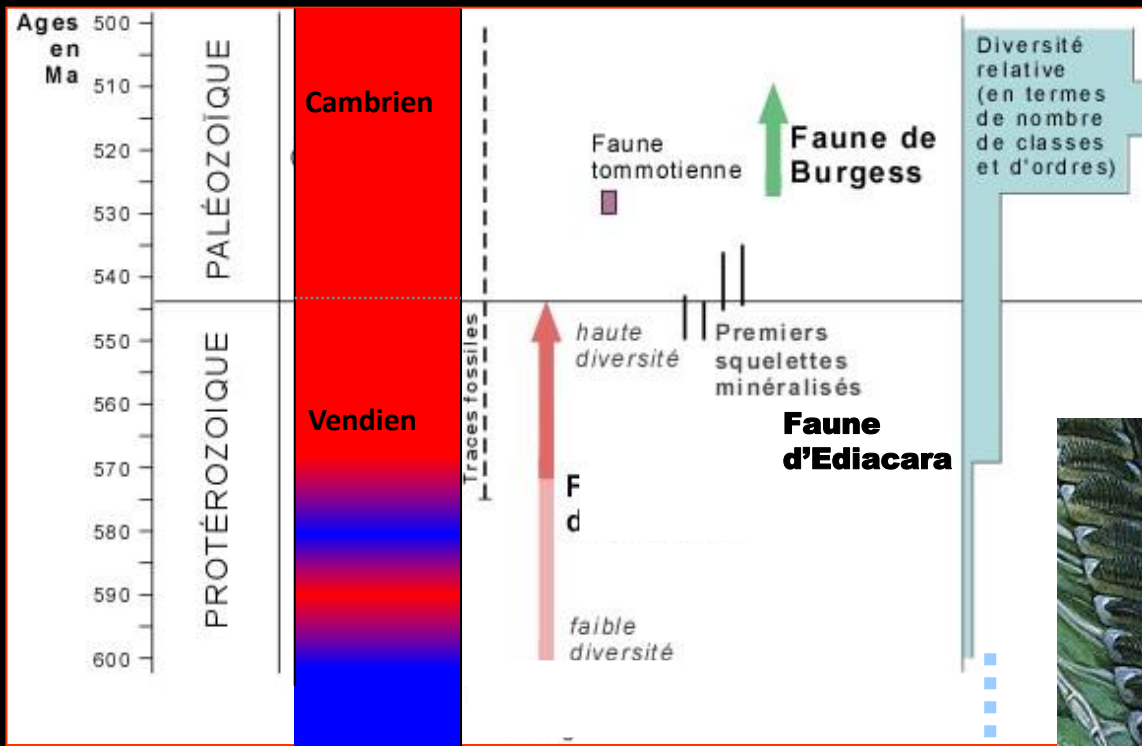


Le CO₂ est monté ; l'effet de serre a augmenté, la température a augmenté, la déglaciation a commencé, des eaux riches en CO₂ ont altérés les continents, qui ont libéré du Ca, qui a précipité sous forme de carbonates, les fameux « cap carbonates », qui recouvrent systématiquement les formations glaciaires. Le retour à « la norme » a été chaotique.



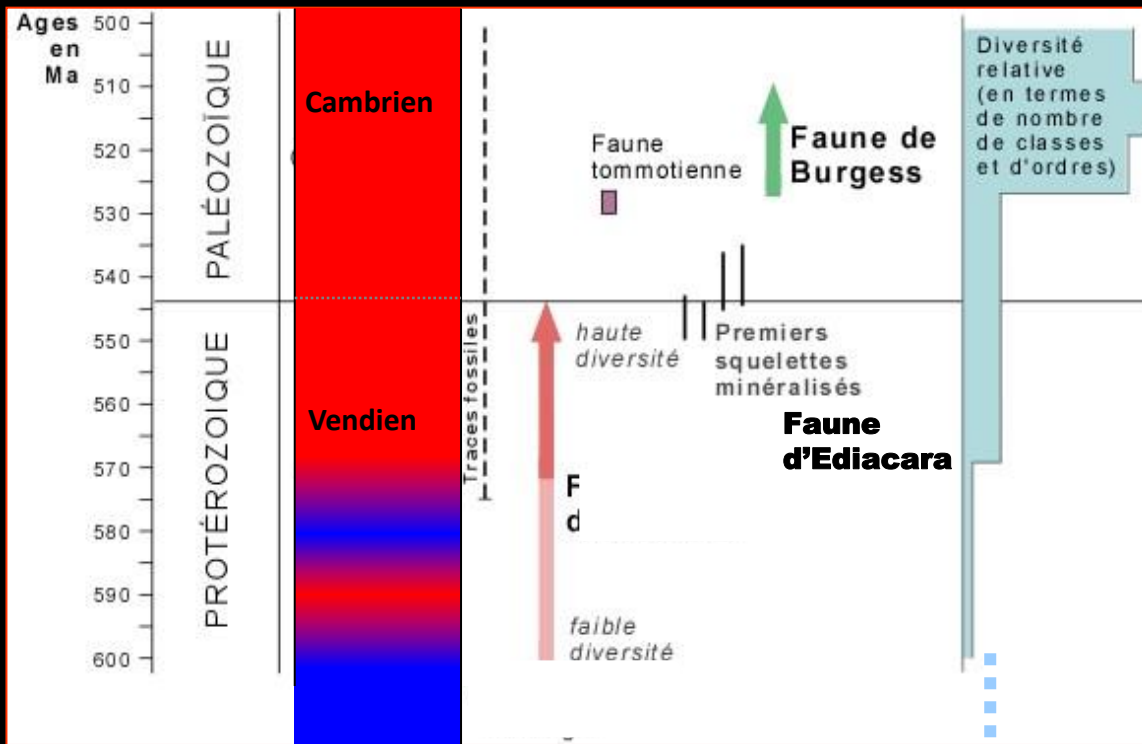
Or, 580 Ma, la fin de ces épisodes, partout dans le monde, c'est l'explosion de la diversité des métazoaires avec la faune dite d'Ediacara (à ne pas confondre avec la faune de Burgess).

confondre avec la faune de Burgess).



Or, 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). Nous sommes tous les fils indirects des emballements du cycle du carbone !



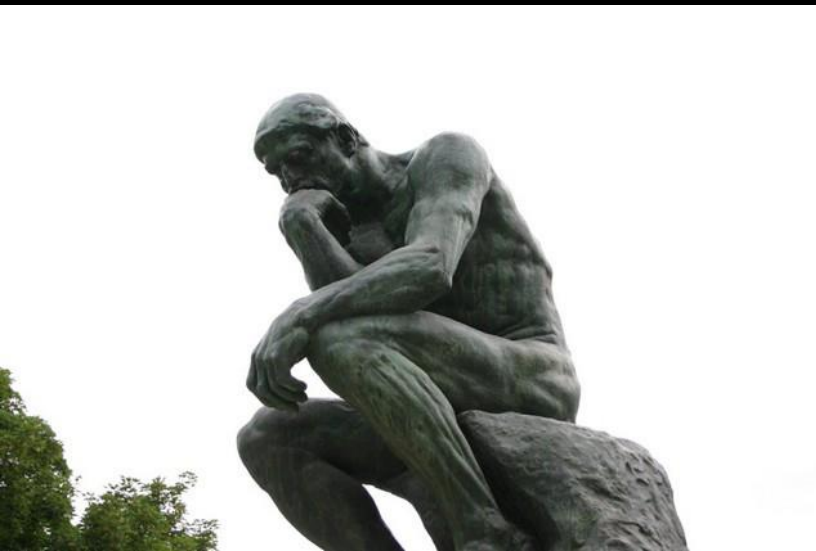
Pourvu qu'un emballement anthropique de ce cycle du carbone ne nous « éteigne » pas !

En guise de conclusion sur ces réflexions sur l'effet de serre et le cycle du carbone

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 !



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 ?

**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 océanique, sols...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, **sauf si ...**

L'astronomie nous dit que la prochaine glaciation aura sans doute lieu dans 64 000 ans



A l'échelle de plusieurs centaines de millions d'années. Depuis 80 000 000 d'années, la tendance globale est à la baisse de CO_2 et de la température, malgré toutes les oscillations déjà vues. Pendant ces 80 000 000 d'années, le CO_2 a été divisé par 10 et la température moyenne a baissé de 10 à 20°C. Entre -300 000 000 et -80 000 000 au contraire, la tendance était à la hausse du CO_2 (x 10) et de la température (+ 10 à 20°C). La planète Terre a très bien résisté à ces variations (mais pas tous ses habitants).

Ces variations de CO_2 et de Température sont dues aux variations d'importances relatives entre volcanisme, formation des montagnes, formation des charbons et calcaires ...

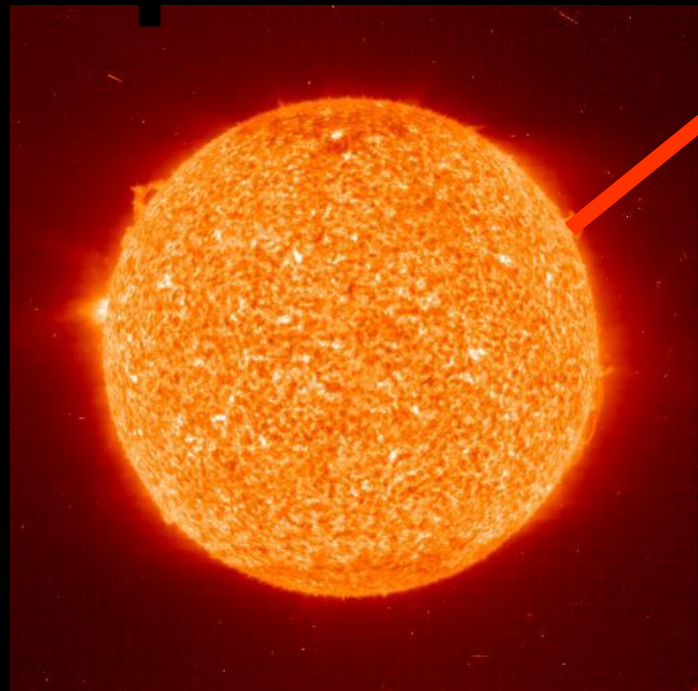
On peut supposer que le froid actuel durera tant que durera l'Himalaya (qui est une gigantesque pompe à CO_2), c'est à dire pour encore pas mal de millions d'années. Quand l'Himalaya sera aplani, le CO_2 remontra, et la température aussi, à moins que d'autres montagnes se forment en pays intertropical humide.



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

- (1) Le CO_2 baisse, baisse ... Il a été divisé par 10 000 à 100 000 depuis l'origine de la Terre. Cette diminution est due à l'accroissement lent et progressif de la quantité de calcaires sur Terre
- (2) pendant la même période, la puissance du soleil a augmenté d'environ 50%

→ La baisse du CO_2 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).





A l'échelle du futur lointain.

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 0,04% !). 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, vite renforcée par « l'effet océanique ».
→ « on mourra » de chaud*. C'est le scénario le plus probable.

Dans les deux cas, se sera la fin de la vie d'ici 1 à 2 milliards d'années , 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

A l'échelle du futur lointain.

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 0,04% !). Les deux phénomènes ne se compensent pas tout à fait, et la température du CO₂ semble l'emporter, avec baisse globale de température depuis 4 Ga. Deux futurs (très lointains)

se refroidira
geler (c'est

soleil.
océanique ».
→ « on mourra » de chao
probable.

Dans les deux cas, se sera la fin de la vie d'ici 1 à 2 milliards d'années, en attendant la fin de la Terre dans 4 à 5 milliards d'années

**Voilà, c'est fini pour ce fil rouge 2016.
Merci de votre attention !
Avez-vous des questions supplémentaires ?
Sinon, peut-être à l'année prochaine !**



* La photosynthèse en C4 et les bactéries hyperthermophiles montrent qu'il ne faut pas désespérer