

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

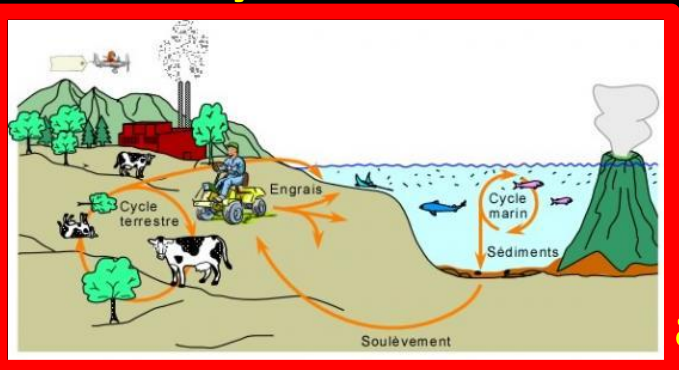


\* 21<sup>ème</sup> Conference of Parties

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



# Cycle du carbone



**CO<sub>2</sub>  
atmosphérique**

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

**Parce que les  
modifications  
du cycle du carbone  
modifient le CO<sub>2</sub>  
atmosphérique, ce  
qui modifie l'effet de  
serre, ce qui modifie le  
climat mondial !**



**Effet de serre**



**Climat mondial**





Cette conférence d'aujourd'hui fait suite à une autre que j'ai donnée il y a un mois (fête de la Sciences), où je disais : « je n'ai pas le temps de développer l'effet de serre (et le cycle du carbone) » et je le regrette. Cette

conf. est en ligne.

<http://tremplin.climatetmeteo.fr/les-variations-climatiques-a-travers-les-temps-geologiques-onepage.xhtml#d0e41>

Météo Tremplin

Accueil

Formation-2014

Réseau

Climat-Biodiversité

Librairie

Se connecter

Search

## Les variations climatiques à travers les temps géologiques

Accéder à l'adresse de la librairie OPDS ->

### La conférence

Cette conférence a été prononcée pour la fête de la science, le 8 octobre 2015, à l'ENS de Lyon.

### Conférence synchronisée

**Les variations climatiques à travers les temps géologiques**  
Pierre Thomas, [Laboratoire de Climatologie de Lyon, Terra, Planétos, Proboscence, FRM de Lyon, CNRS, Université Lyon 1](#) audio vidéo 



**Pour préparer la COP 21 : comprendre les variations climatiques à travers les temps géologiques**

**Préambule**  
Variations du climat depuis 1680  
L'effet de serre  
Echelle de 1000 ans  
Echelle de million d'années  
Echelle de 500 millions d'années  
Causes des variations globales du climat  
Echelle de 4 500 millions d'années  
En conclusion  
Questions

fête de la Science

Copyright : 2015 Pierre Thomas


Cette illustration est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International. 

Figure 1. Conférence synchronisée audio ou vidéo

Ecouter/Voir la conférence avec diapositives synchronisées

#### Partenaires



#### Actualités

Formation Rouen 2015  
07/06/2015

Plus d'actualités...



# Apprenons à nous servir de ces clés en faisant un peu de physique élémentaire (datant de la transition 19<sup>ème</sup> / 20<sup>ème</sup> siècle).

## I - RÉFLEXION / 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 (s'il est transparent)

→ l'autre partie est absorbée

On appelle albédo le rapport énergie réfléchi / énergie incidente

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



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

## II - TEMPÉRATURE ET ÉNERGIE/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 =  $5,67 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

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

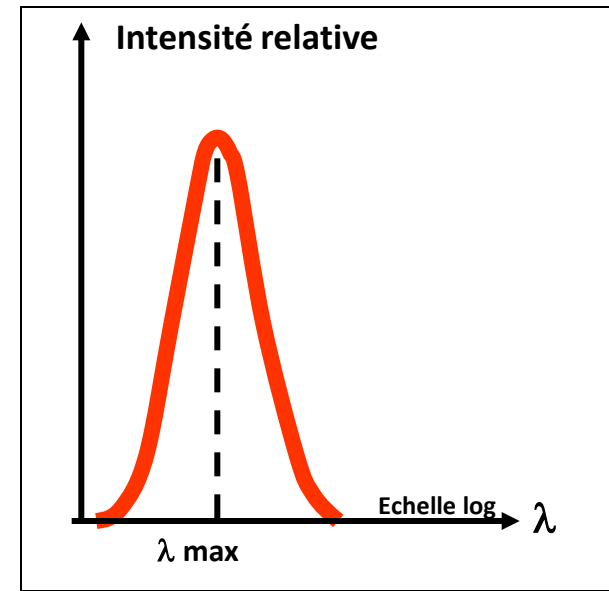


# TEMPÉRATURE ET ÉNERGIE (suite)

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  $\lambda$  (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,  $\lambda_m = 2,9 \cdot 10^{-3} / (273 + 37)$

→ ,  $\lambda_m = 9,32 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 9 \mu$  (dans l'infra-rouge)

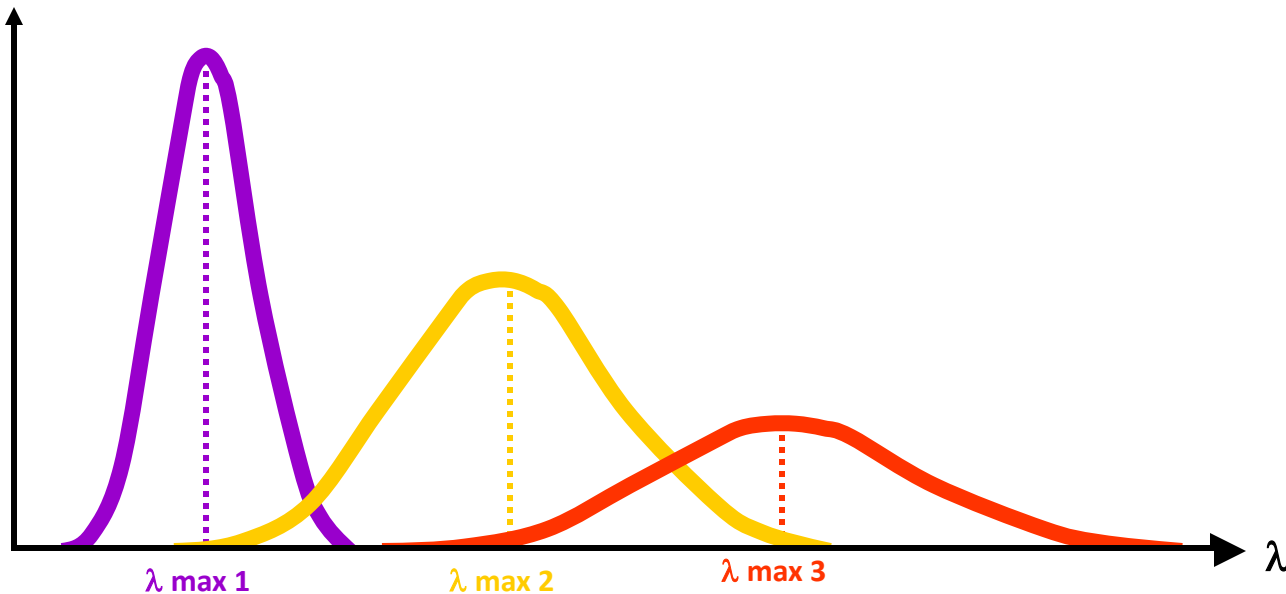
Soleil à 5800 K,  $\lambda_m = 2,9 \cdot 10^{-3} / 5800$

$10^{-6} \text{ m} = 0,5 \mu$  (dans le visible)

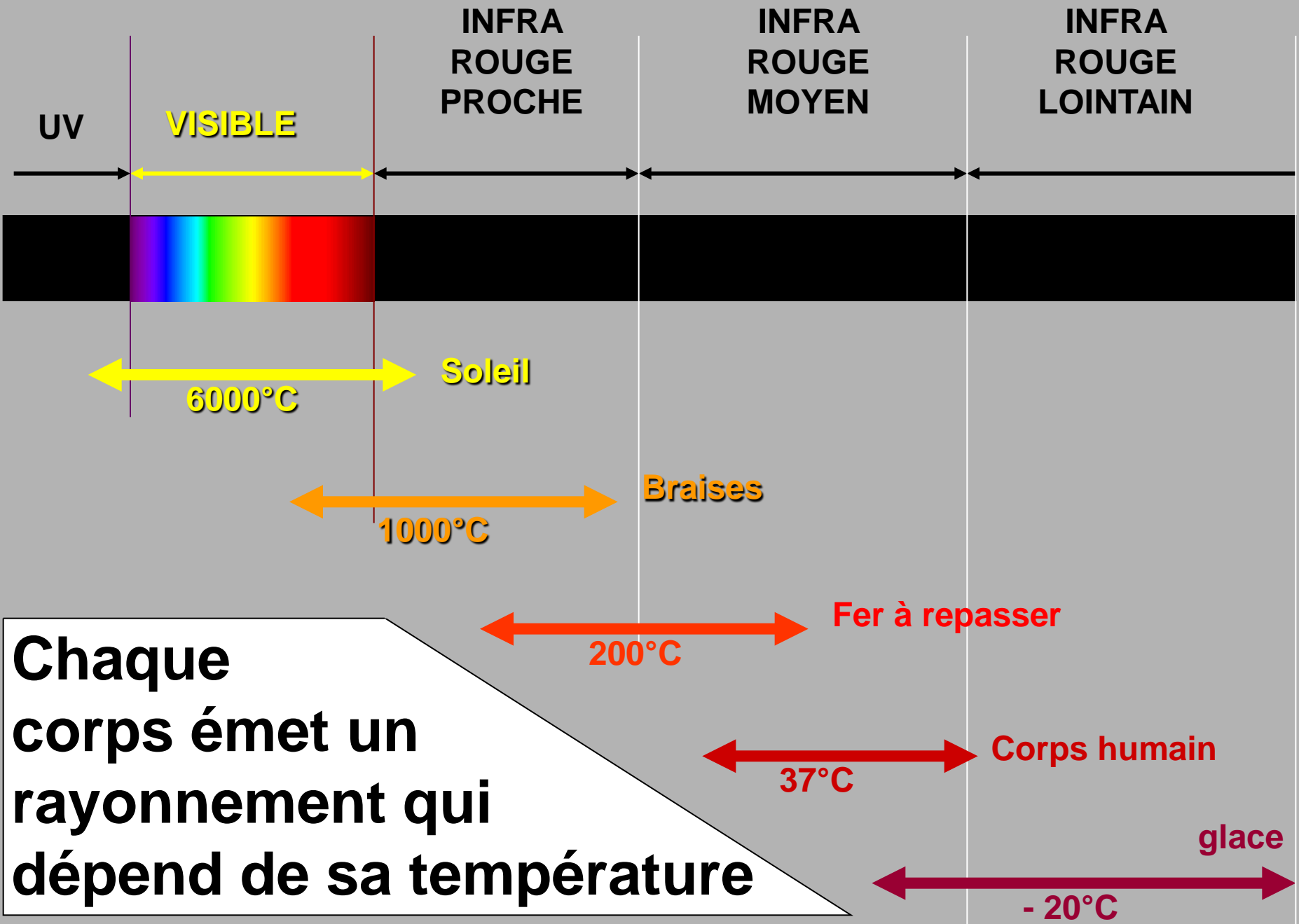


Répartition de  
l'intensité  
émise

Avec  $T_1 > T_2 > T_3$



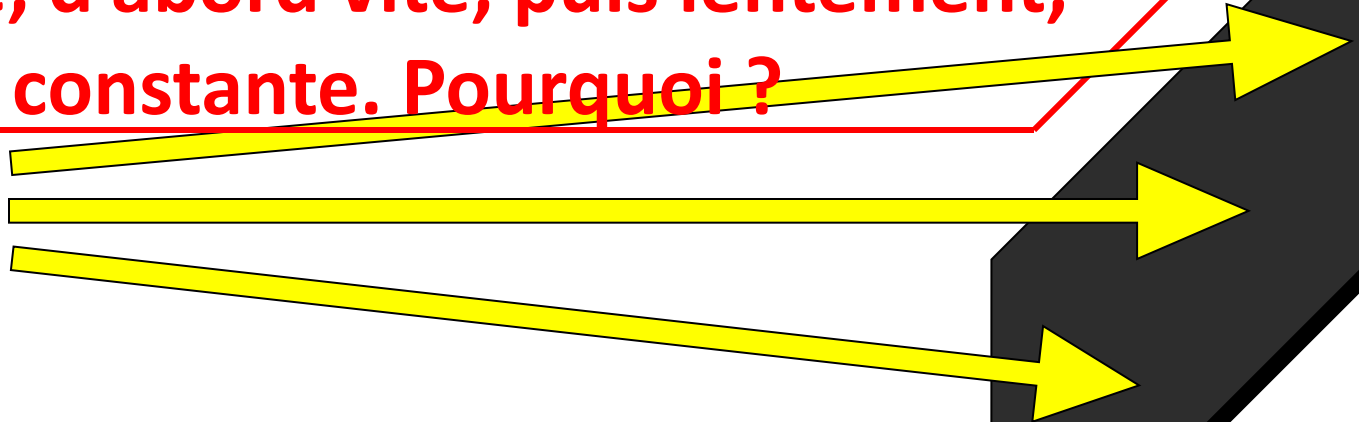
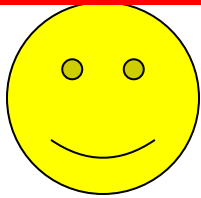
Relation entre T et  $\lambda$  émis



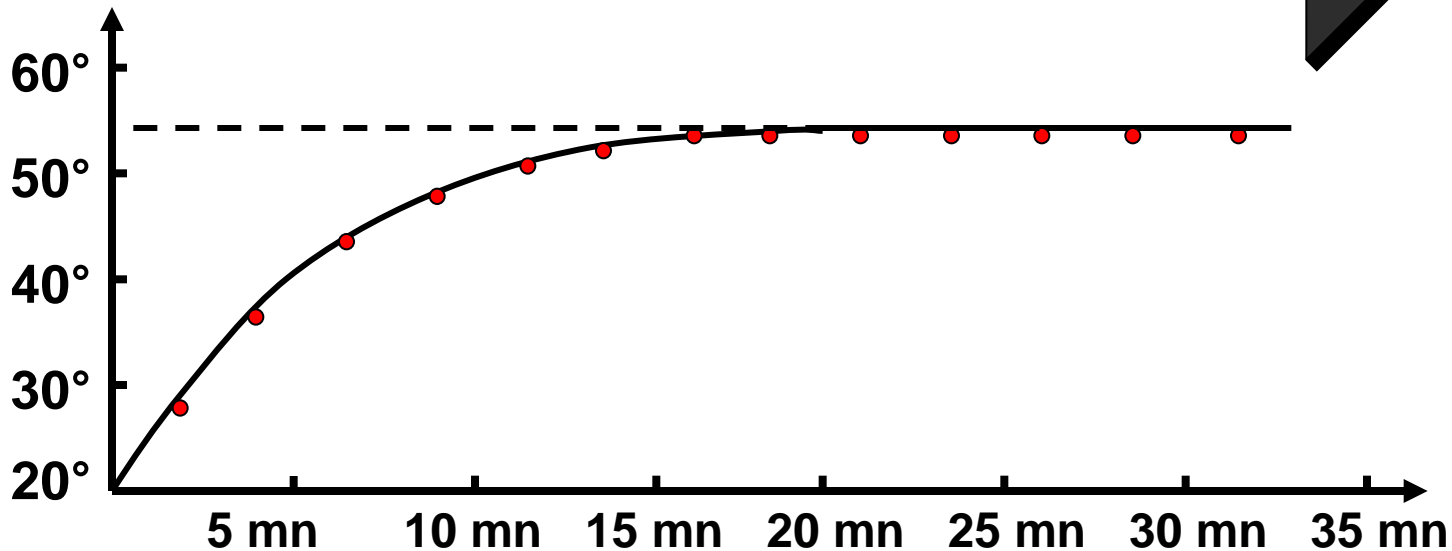
**Chaque corps émet un rayonnement qui dépend de sa température**

### III - NOTION DE TEMPÉRATURE D'ÉQUILIBRE

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



Température de la plaque



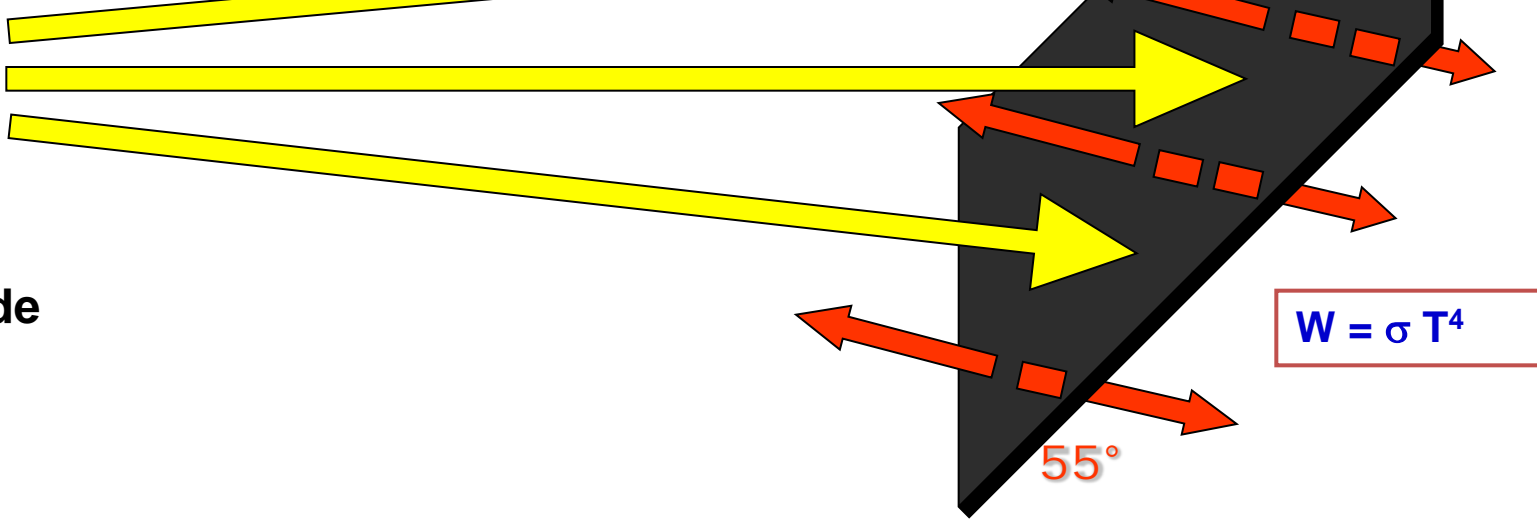
Temps de la mesure



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.

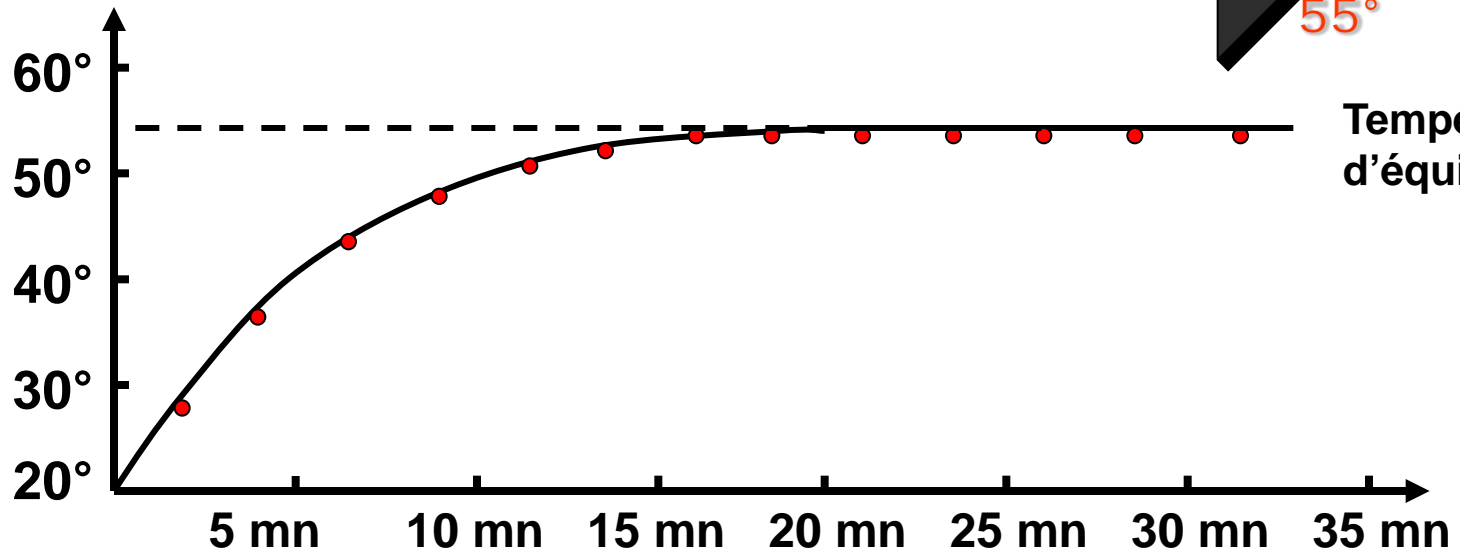


6000°



$$W = \sigma T^4$$

Température de la plaque



Température d'équilibre

Temps de la mesure

# NOTION DE TEMPÉRATURE D'ÉQUILIBRE

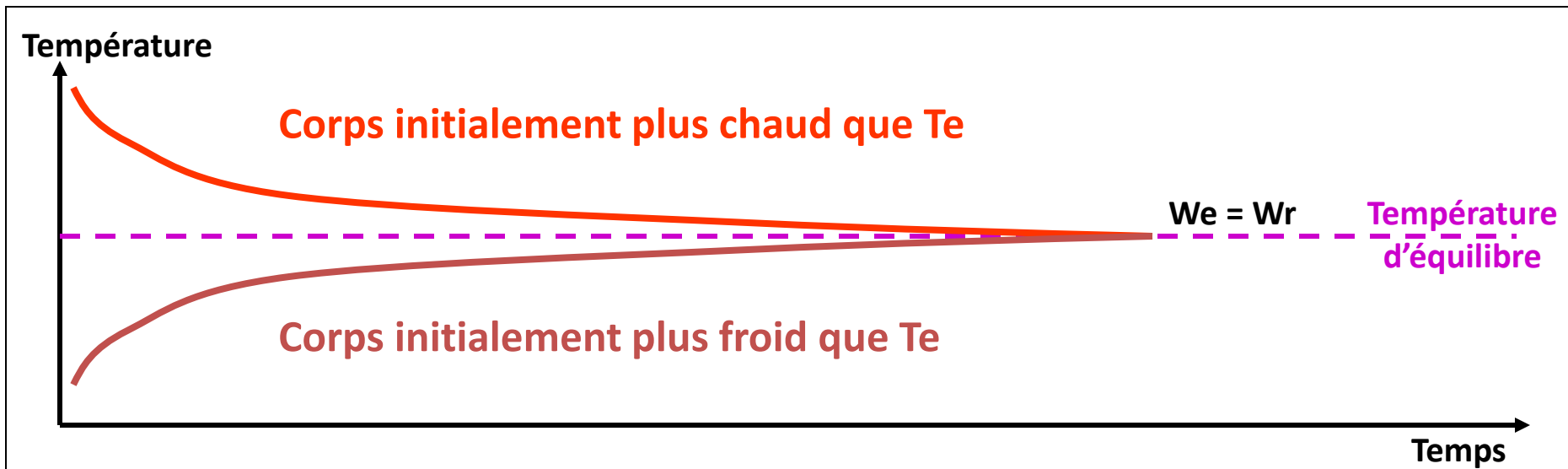
Imaginons un corps totalement absorbant pour toutes les  $\lambda$  (corps appelé « corps noir »), à la température  $T = 0$  K.

Alors  $W \text{ émis} = 0$

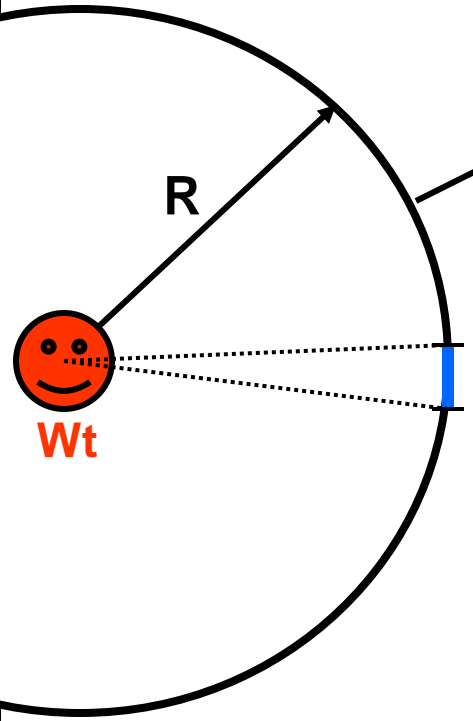
Ce corps reçoit de l'énergie (rayonnement électromagnétique) :  $W \text{ reçu}$  ( $W_r$ ), supposé constant

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 – TEMPÉRATURE EXTERNE D'ÉQUILIBRE DES PLANÈTES



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

Puissance reçue par unité de surface  $W_r$  :

$$W_r = W_t / S = W_t / 4 \Pi R^2$$

L'énergie reçue par unité de temps varie en  $1 / R^2$

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

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

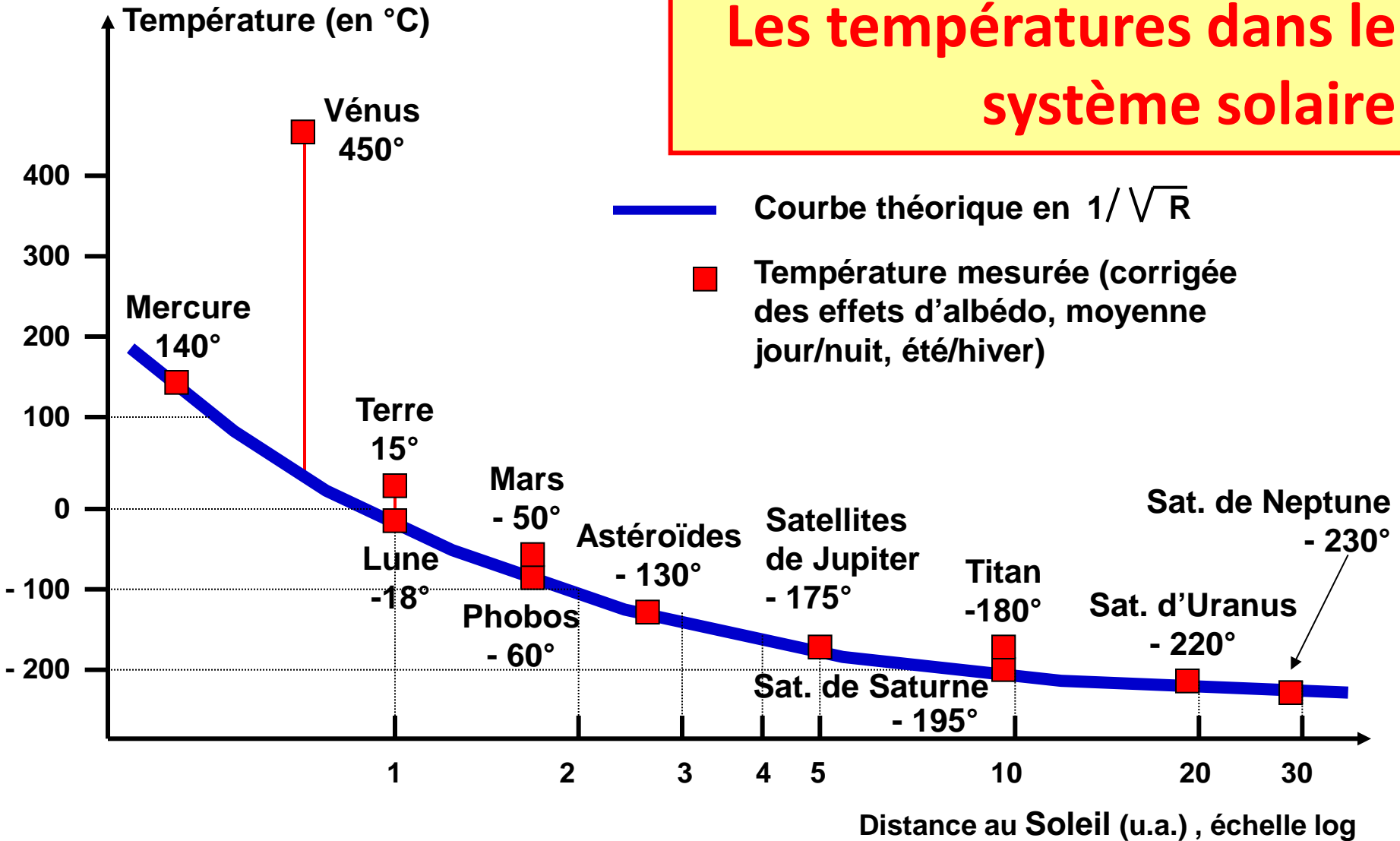
$$1 / R^2 \sim \sigma T^4$$

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

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. 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-rouges et retient la chaleur !**

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

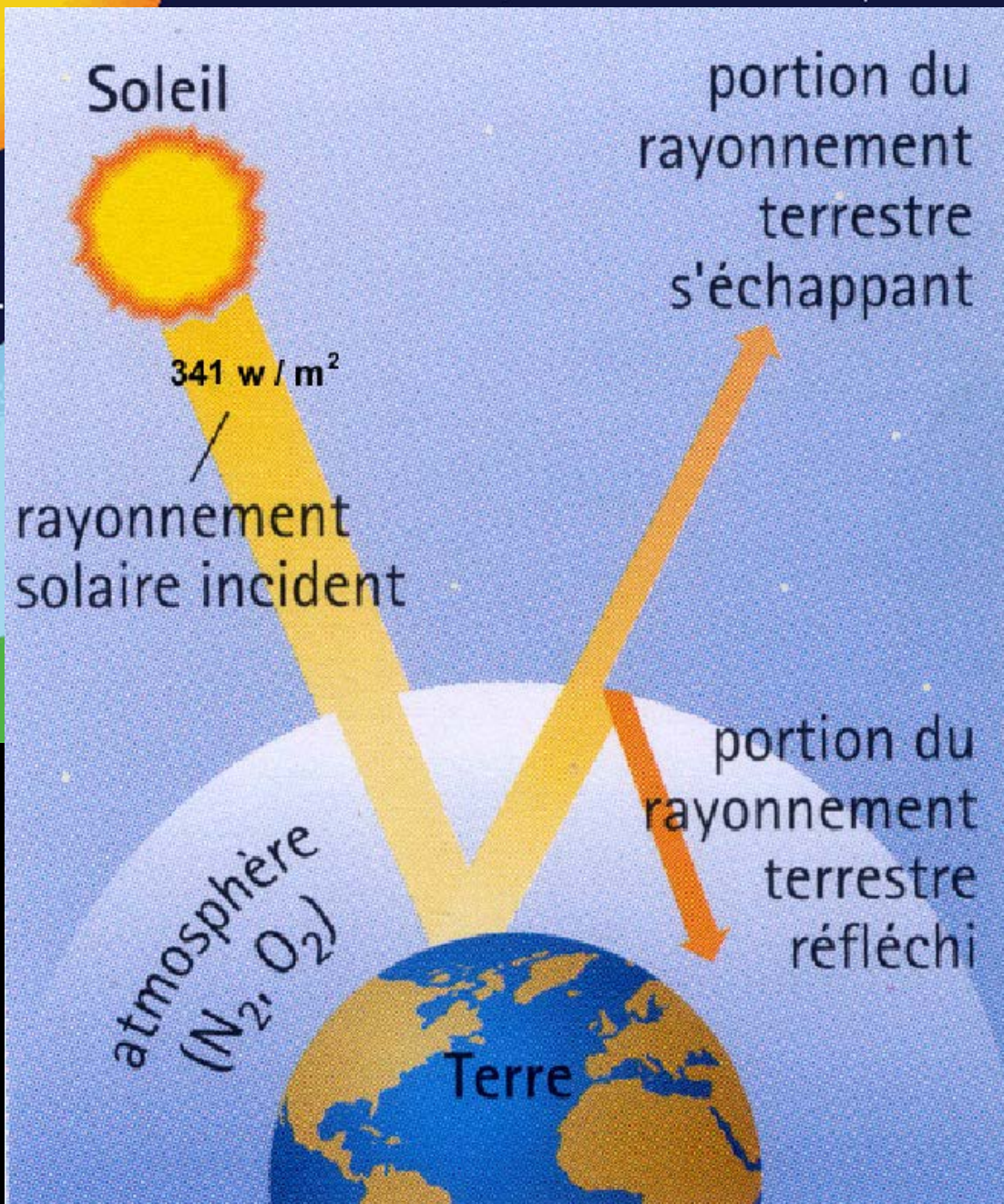




Ce que n'est pas  
l'effet de serre !



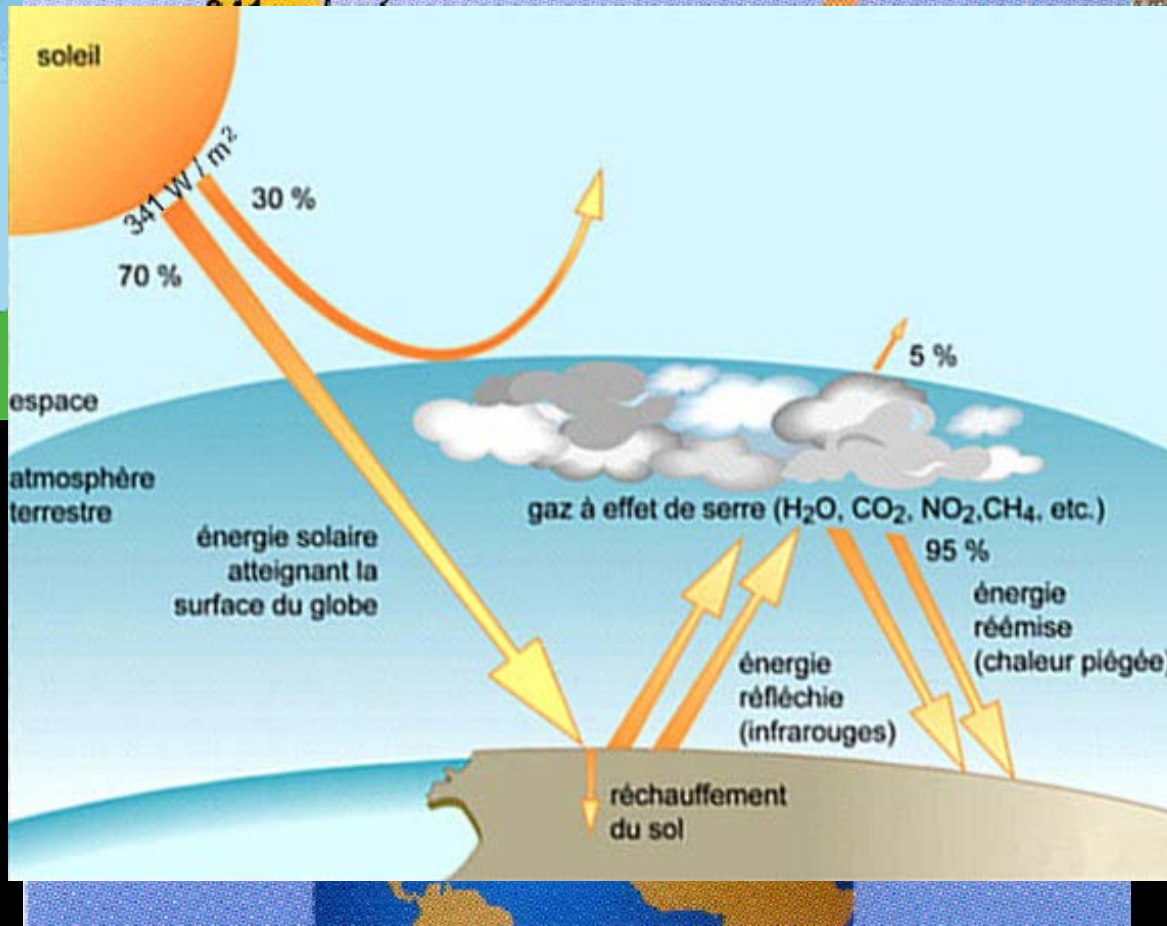
# Ce que n'est pas l'effet de serre !





Soleil

portion du rayonnement terrestre s'échappant

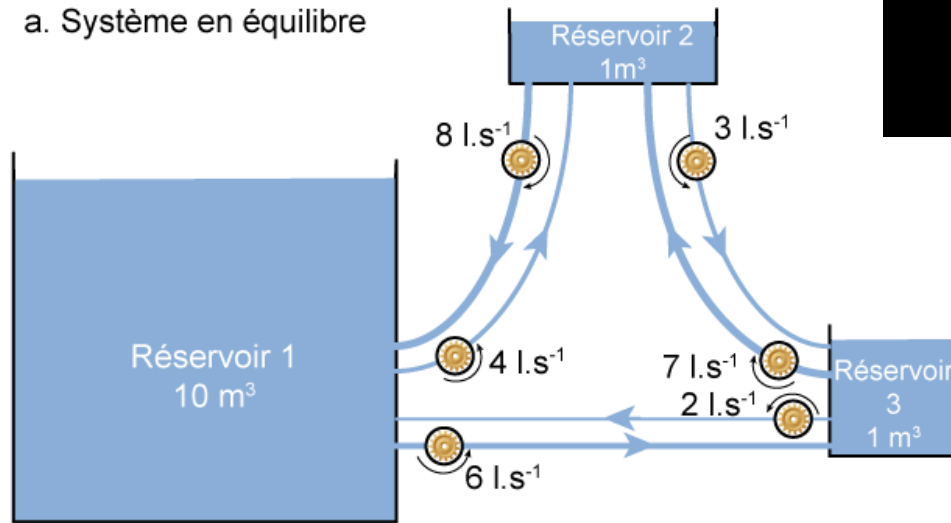


## Ce que n'est pas l'effet de serre !

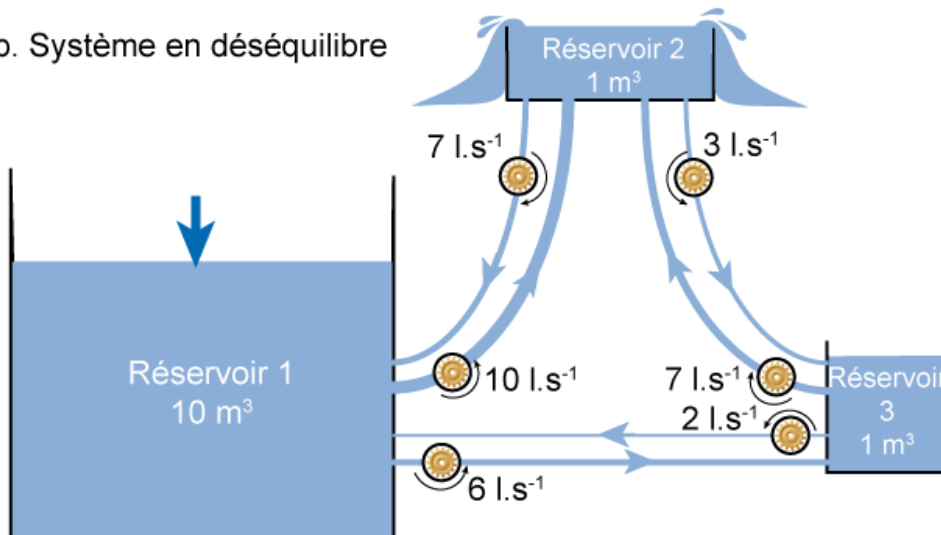
Sur ces schémas comme vous avez déjà du en voir partout, comme les médias vont certainement nous abreuver pendant la COP 21, sur les 341 W / m<sup>2</sup> qui arrivent, il en reste environ la moitié (ici 65%), qui « doit » être absorbée puisqu'elle ne repart pas. Si elle est absorbée, la température doit augmenter. À ce rythme, il faudrait environ 10<sup>10</sup> secondes pour porter tout l'océan à 100°C, soit quelques siècles !

# Notion de cycles, équilibrés ou déséquilibrés.

a. Système en équilibre

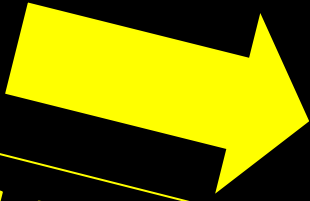


b. Système en déséquilibre



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 (approximatif).  
Et, heureusement, c'est ce qu'on peut mesurer par satellite !

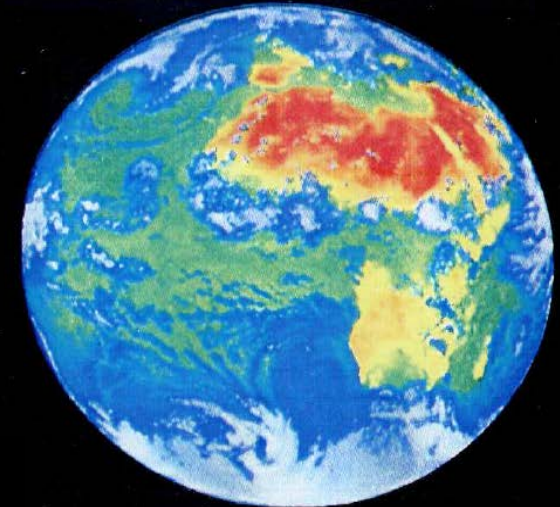


$\approx 341 \text{ W / m}^2$   
moyenne jour-nuit,  
été-hiver, pôles-  
équateur

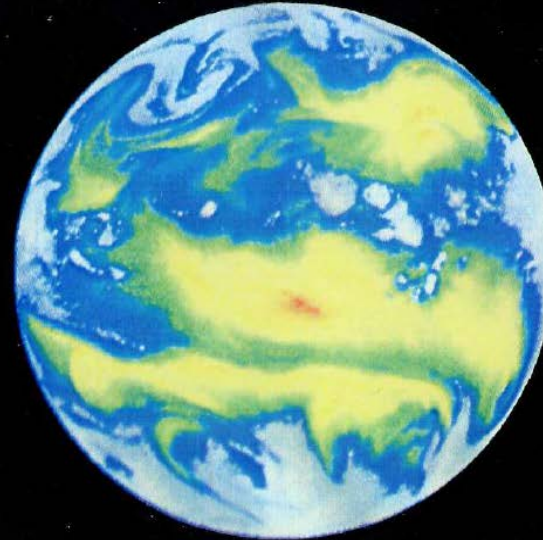
$\approx 341 \text{ W / m}^2$   
total du rayonnement  
réfléchi + infra-rouge ré-  
émis



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 :

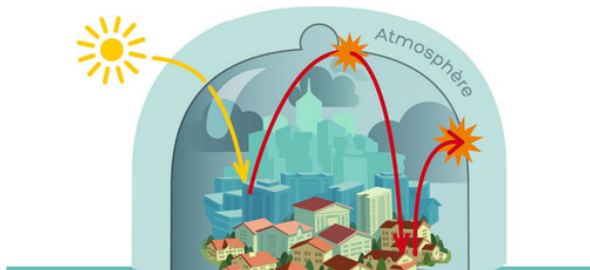
- L'effet de serre
- Les principaux gaz à effet de serre
- Des émissions de gaz à effet de serre en augmentation

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 »

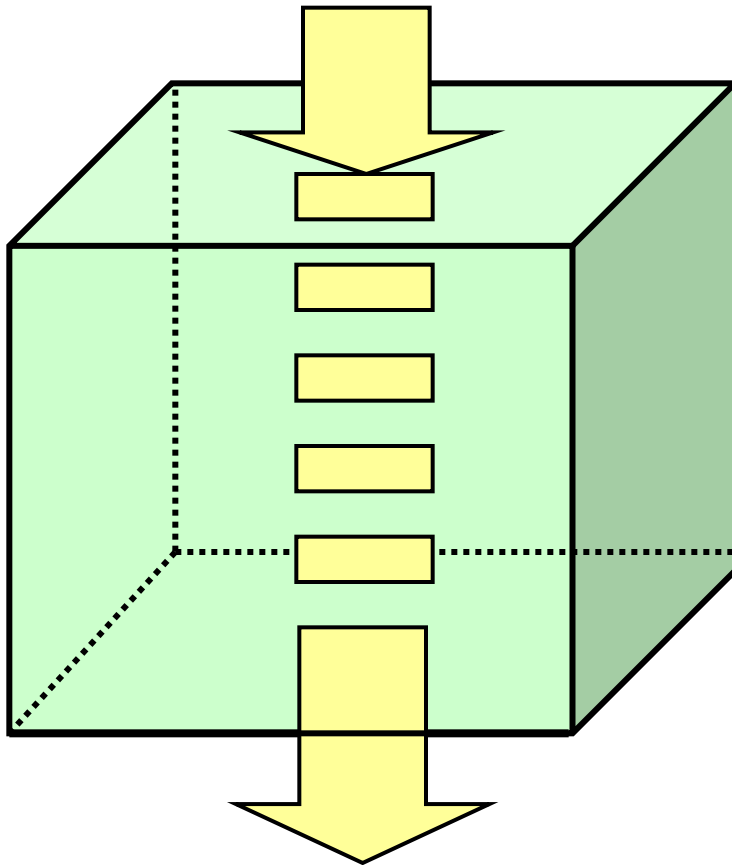
La terre reçoit toute son énergie du soleil. Seule une partie de cette énergie est absorbée par la surface terrestre et l'atmosphère ; le reste étant immédiatement renvoyé vers l'espace. Les gaz à effet de serre contenus dans l'atmosphère ont un rôle important dans la régulation du climat. Ils empêchent 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.



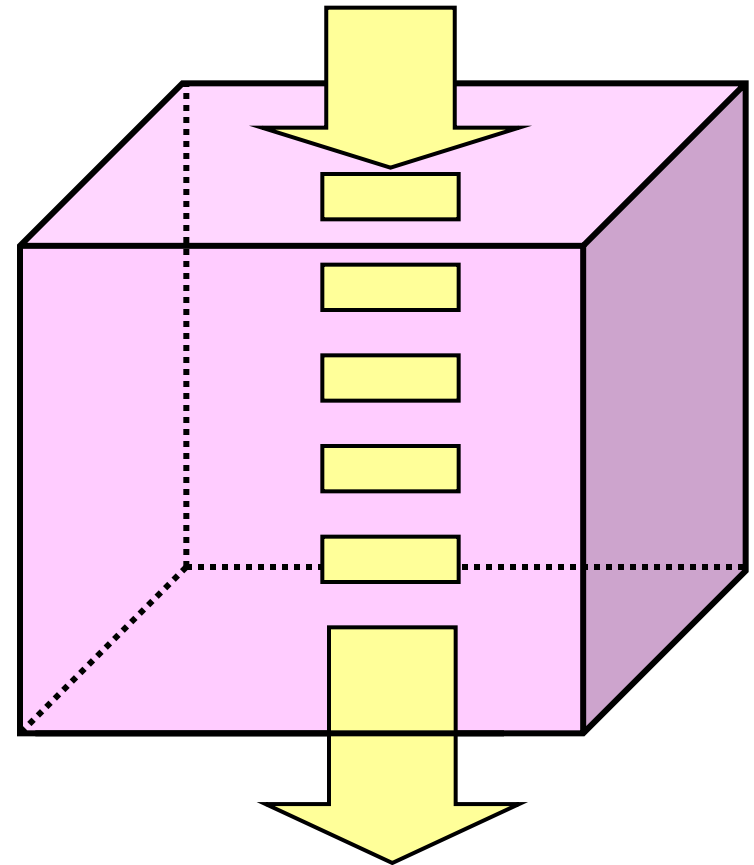
*Carl S. Franklin, R. Dickie (1913)*

**La physique de l'effet de serre est « bien » connue depuis Svante Arrhenius (1859-1927).**

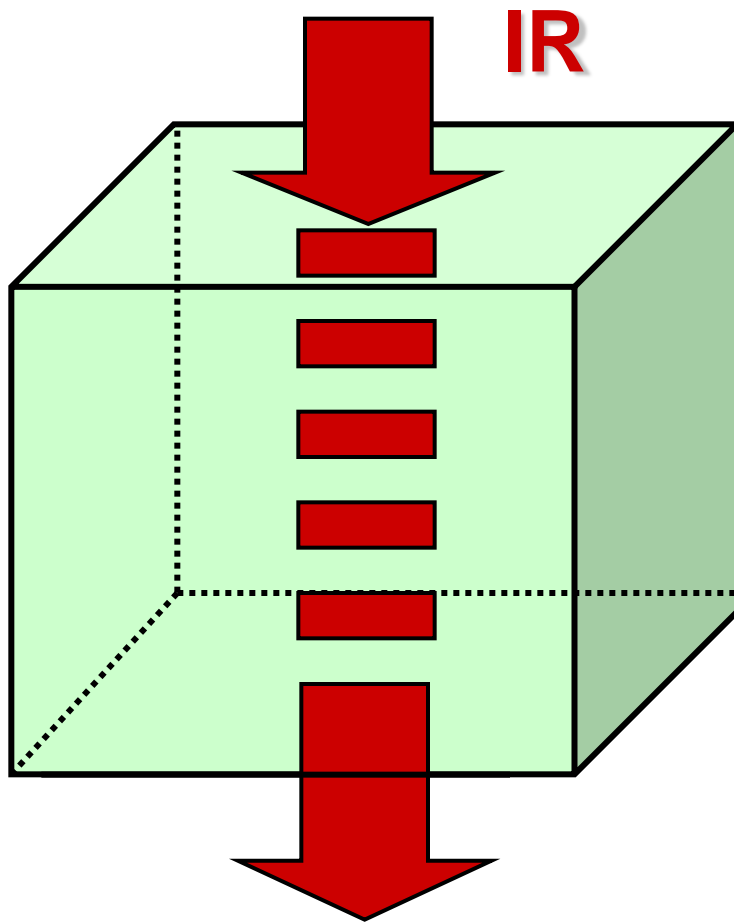




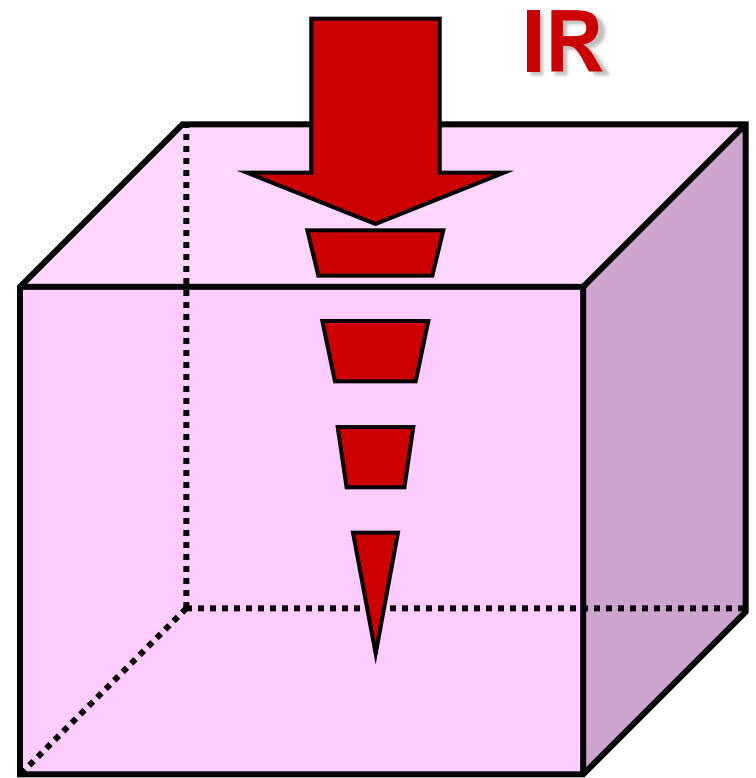
**Le diazote ( $N_2$ ), le dioxygène ( $O_2$ ) sont transparents à la lumière visible.**



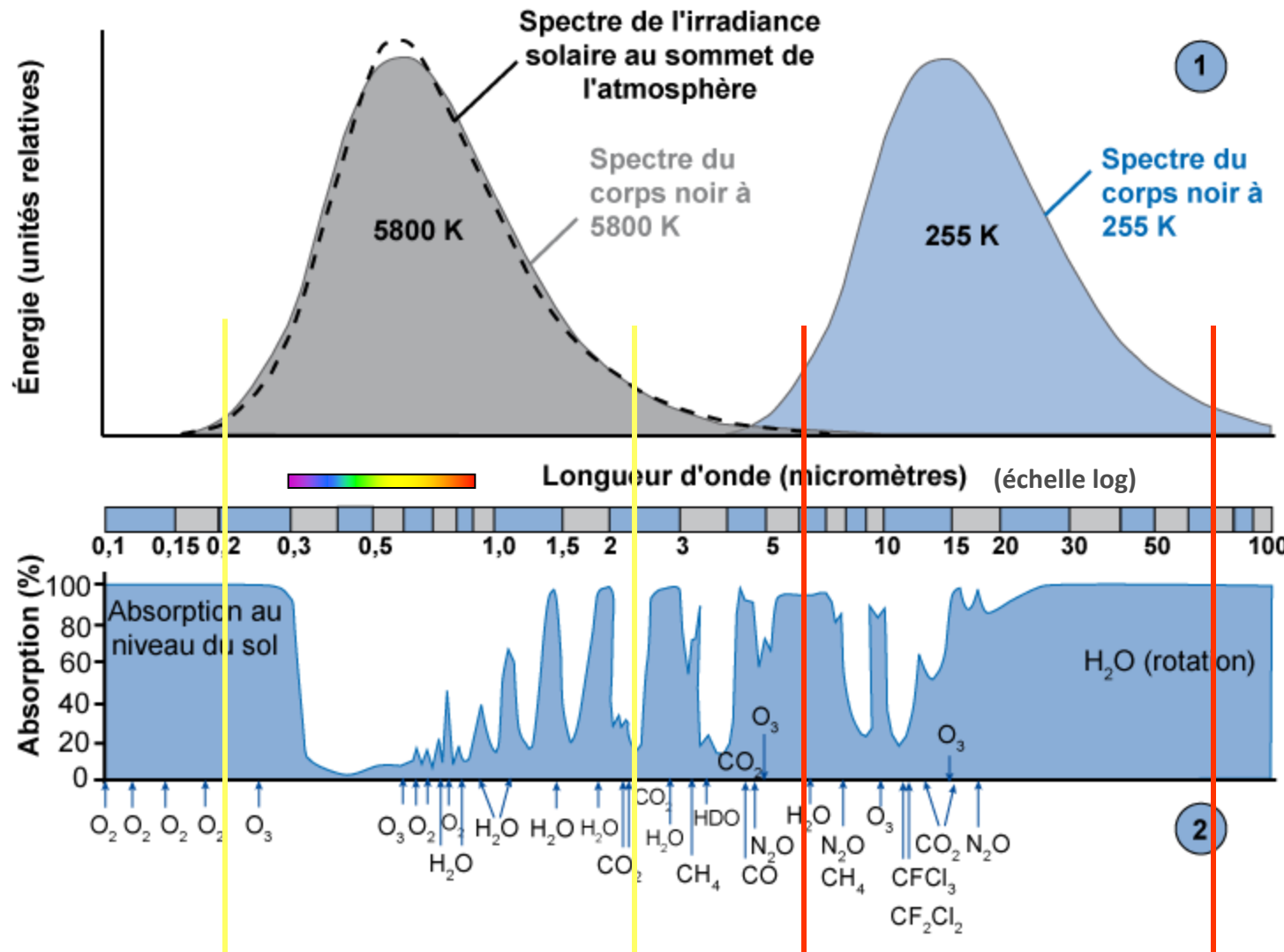
**Le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), la vapeur d'eau ( $H_2O$ ), le méthane ( $CH_4$ ) aussi.**



**Le diazote, le dioxygène sont transparents aux infra-rouges.**



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



Opaque

Transparent

L'atmosphère est principalement transparente à la lumière incidente

L'atmosphère est majoritairement opaque aux infra-rouges ré-émis par la Terre

Pour comprendre l'effet de serre, on va faire une « décomposition intellectuelle », qui n'est qu'un raisonnement explicatif « pour comprendre », et pas une représentation de vrais « va et vient » de photons comme on va en voir. Attention !





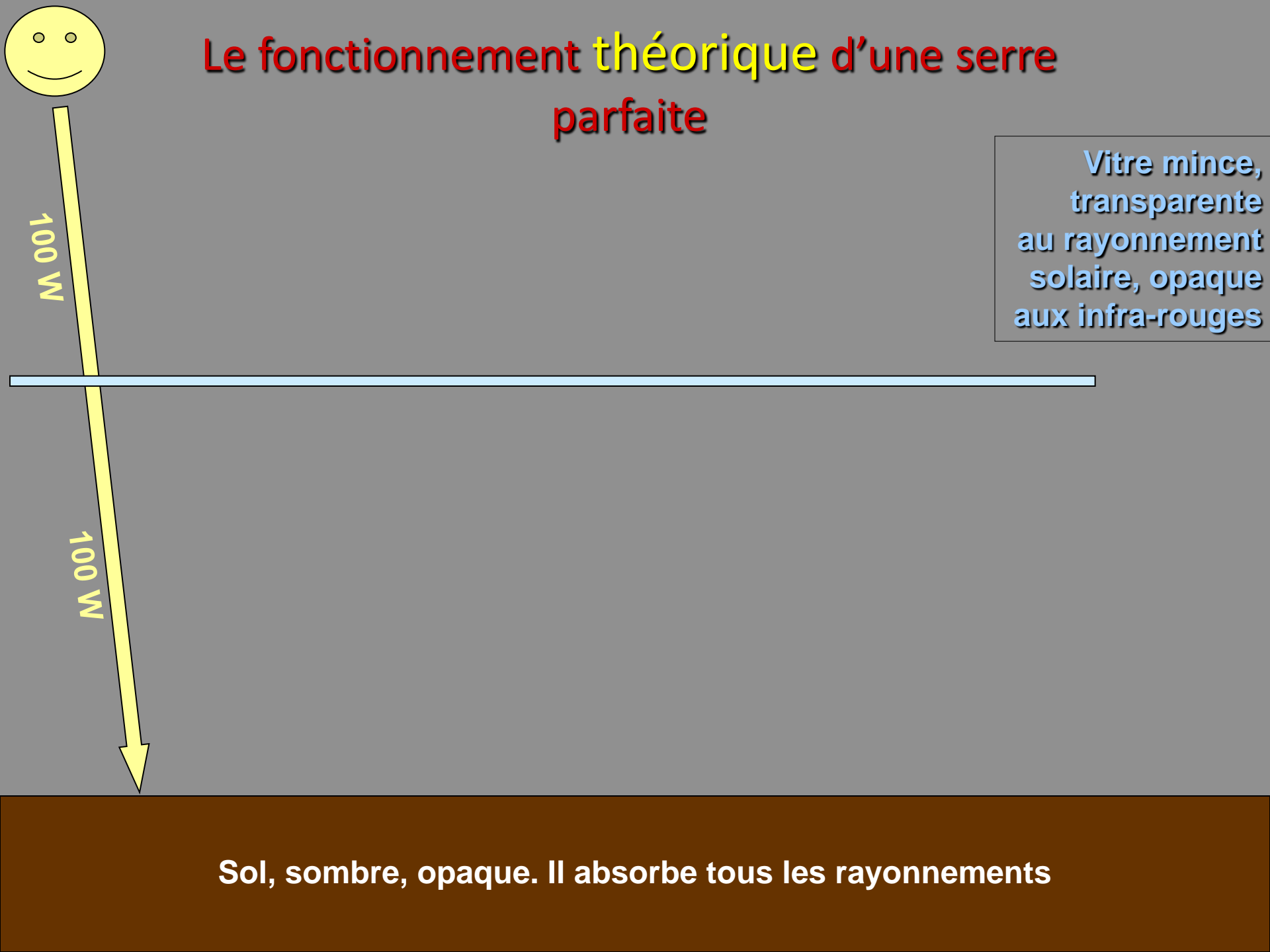
# Le fonctionnement **théorique** d'une serre parfaite

Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges

---

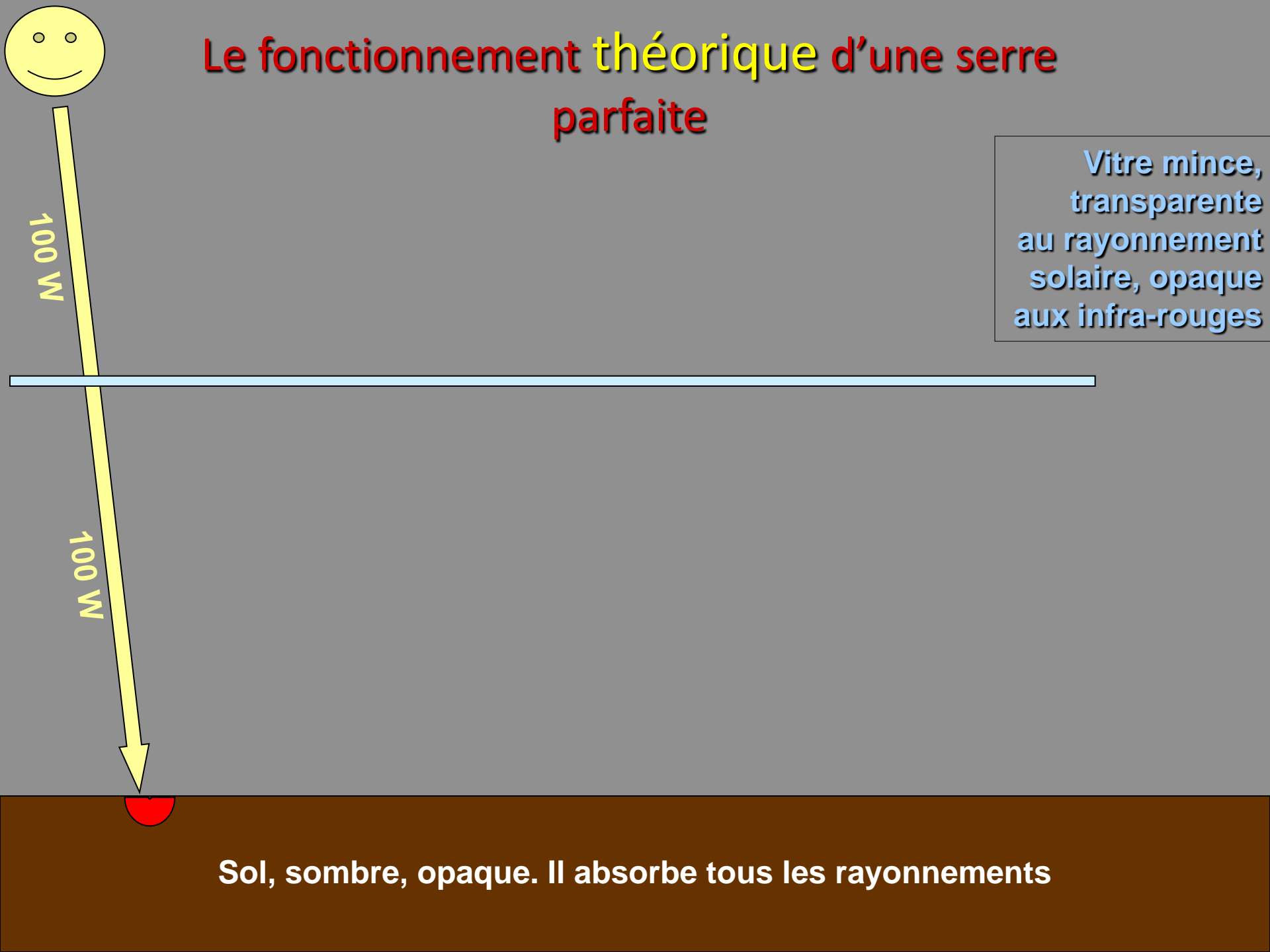
**Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements**

# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite



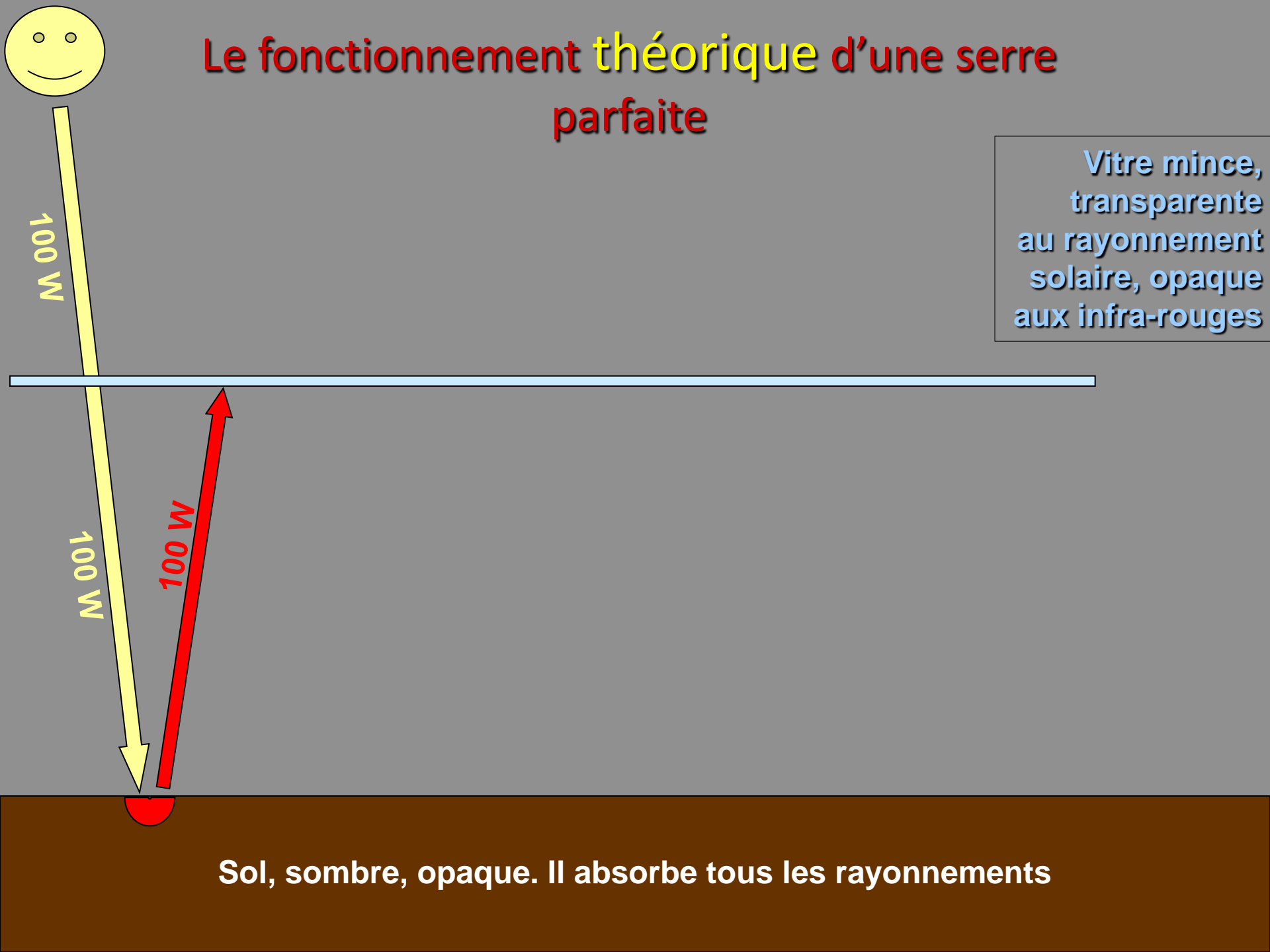


# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite



# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

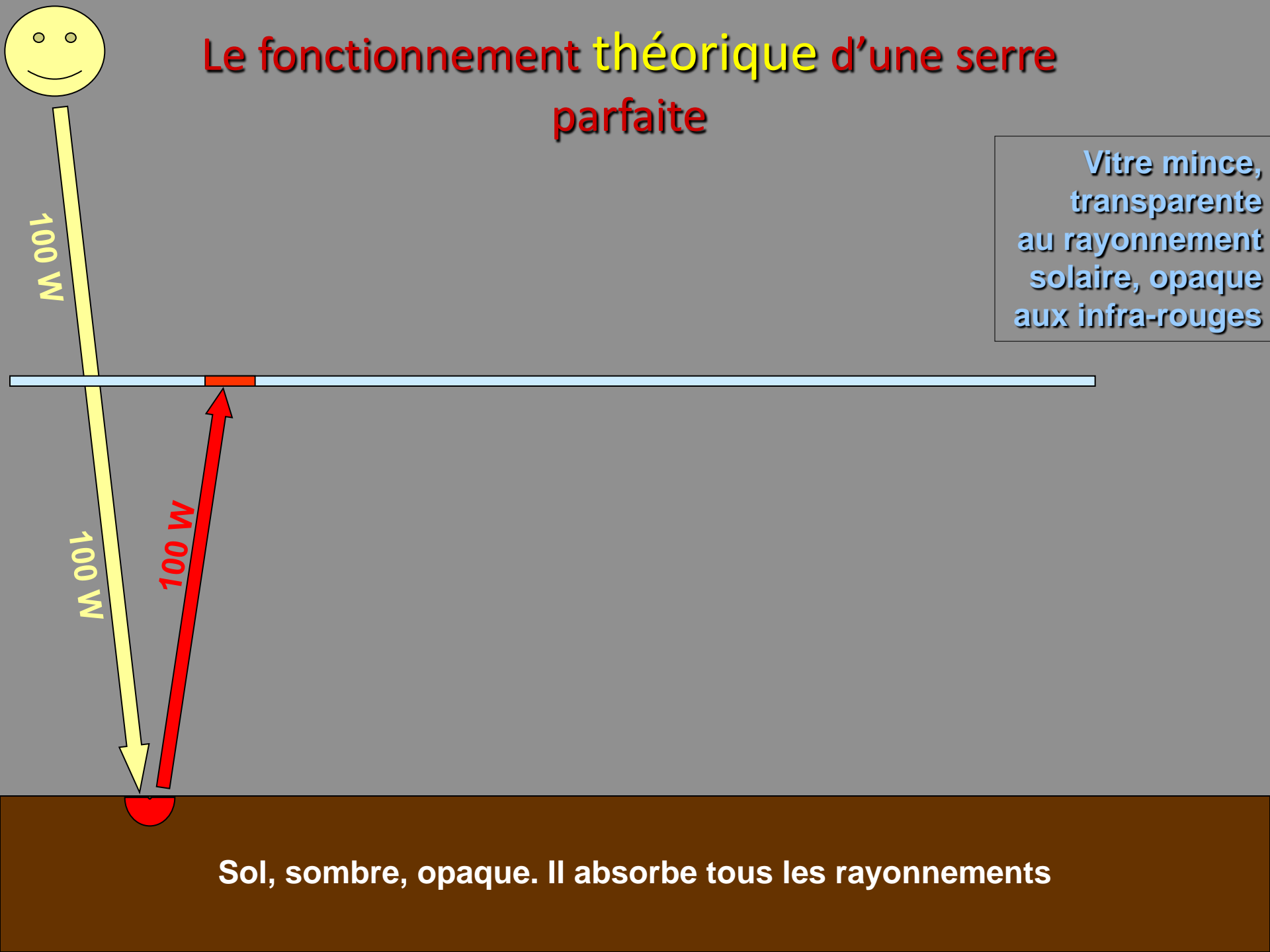
Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges



Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements

# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

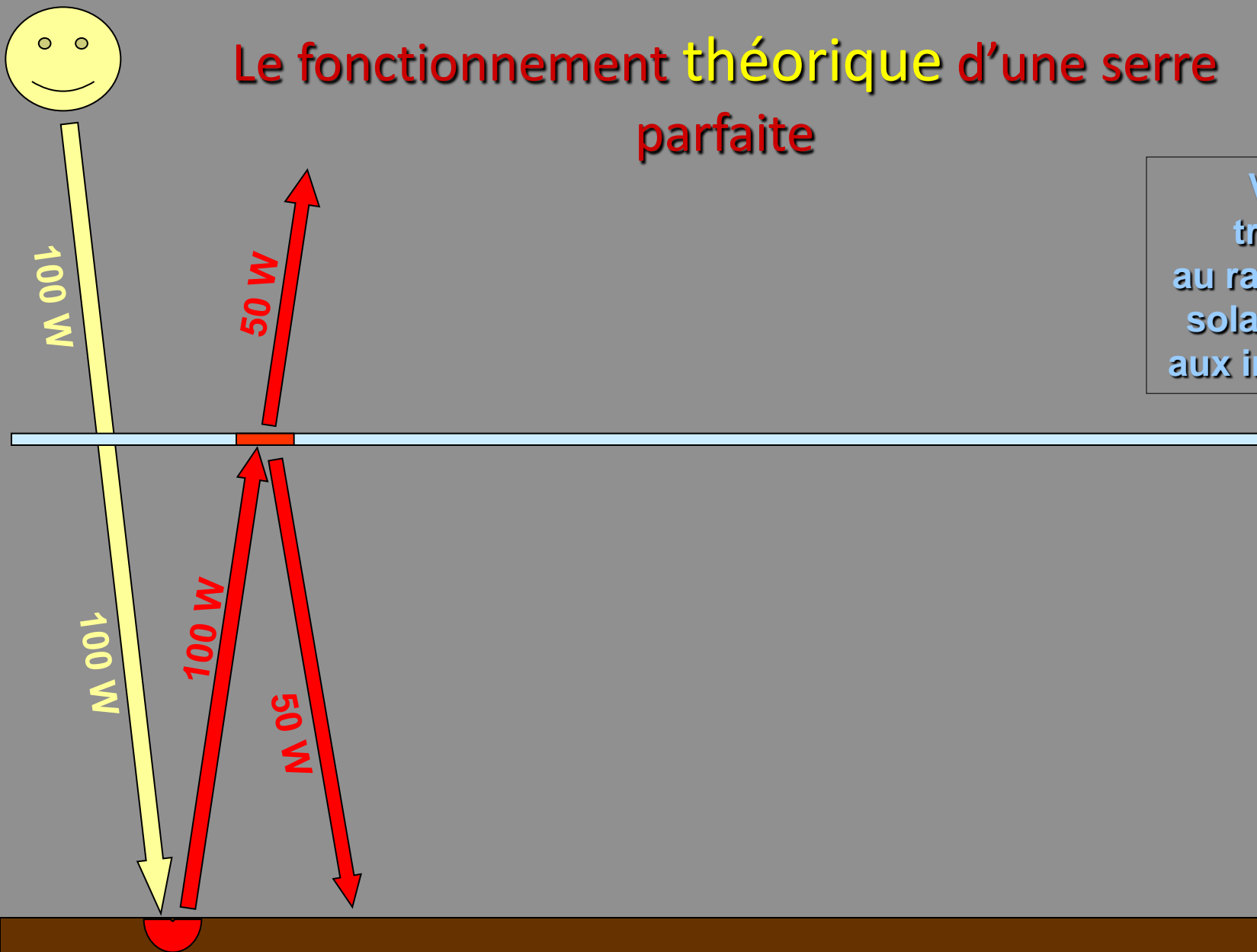
Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges



Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements

# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges

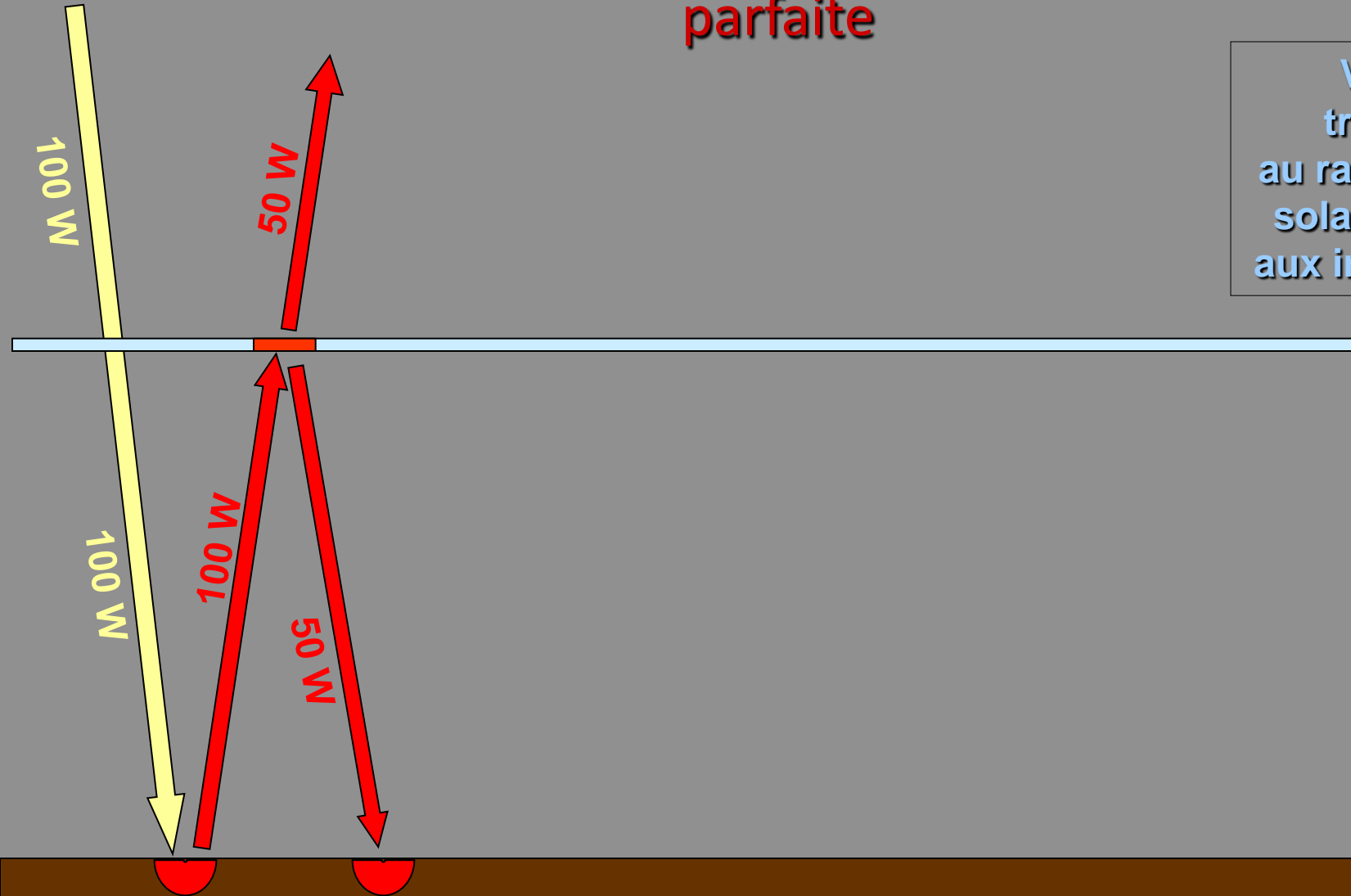


Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges

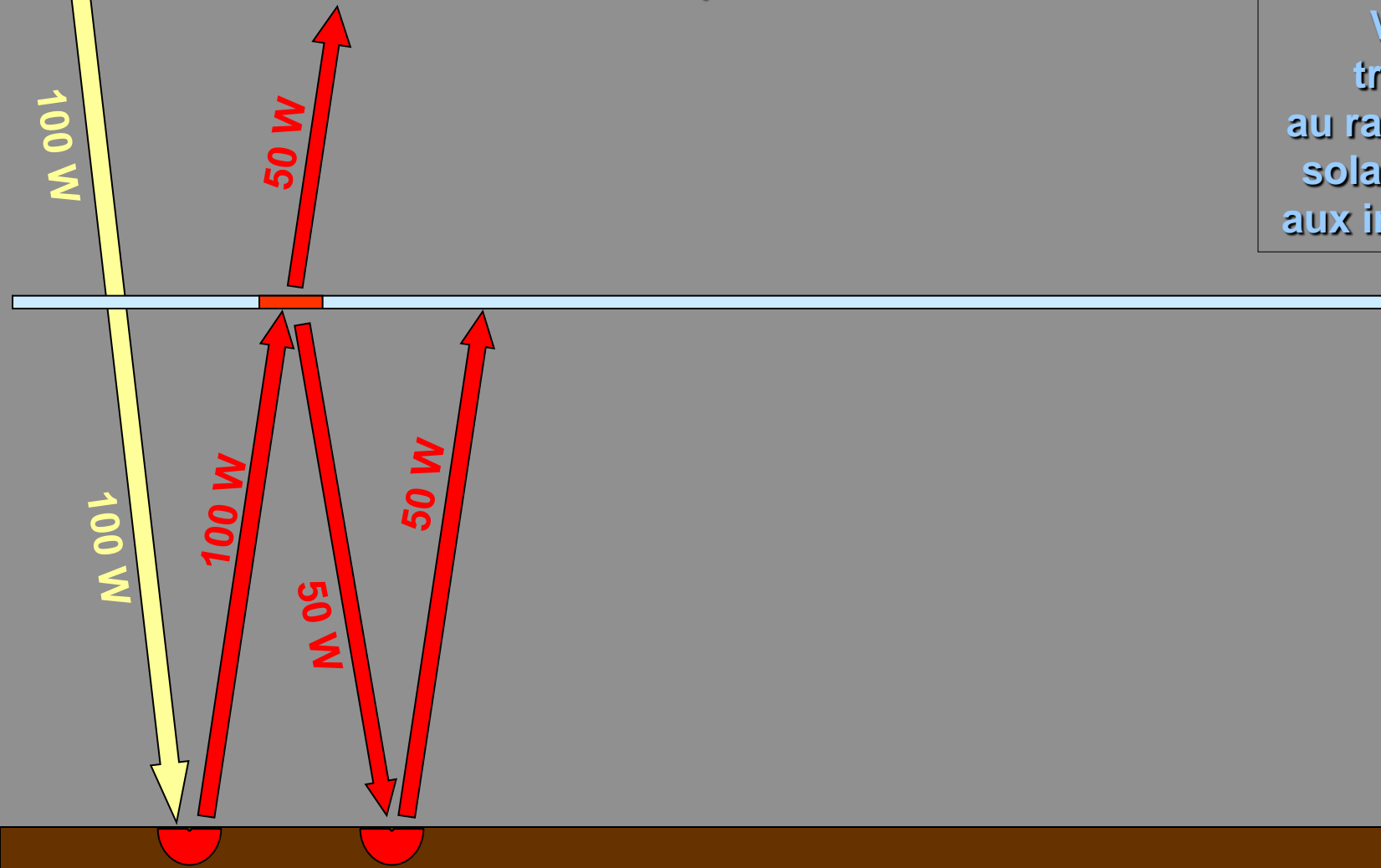


Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges



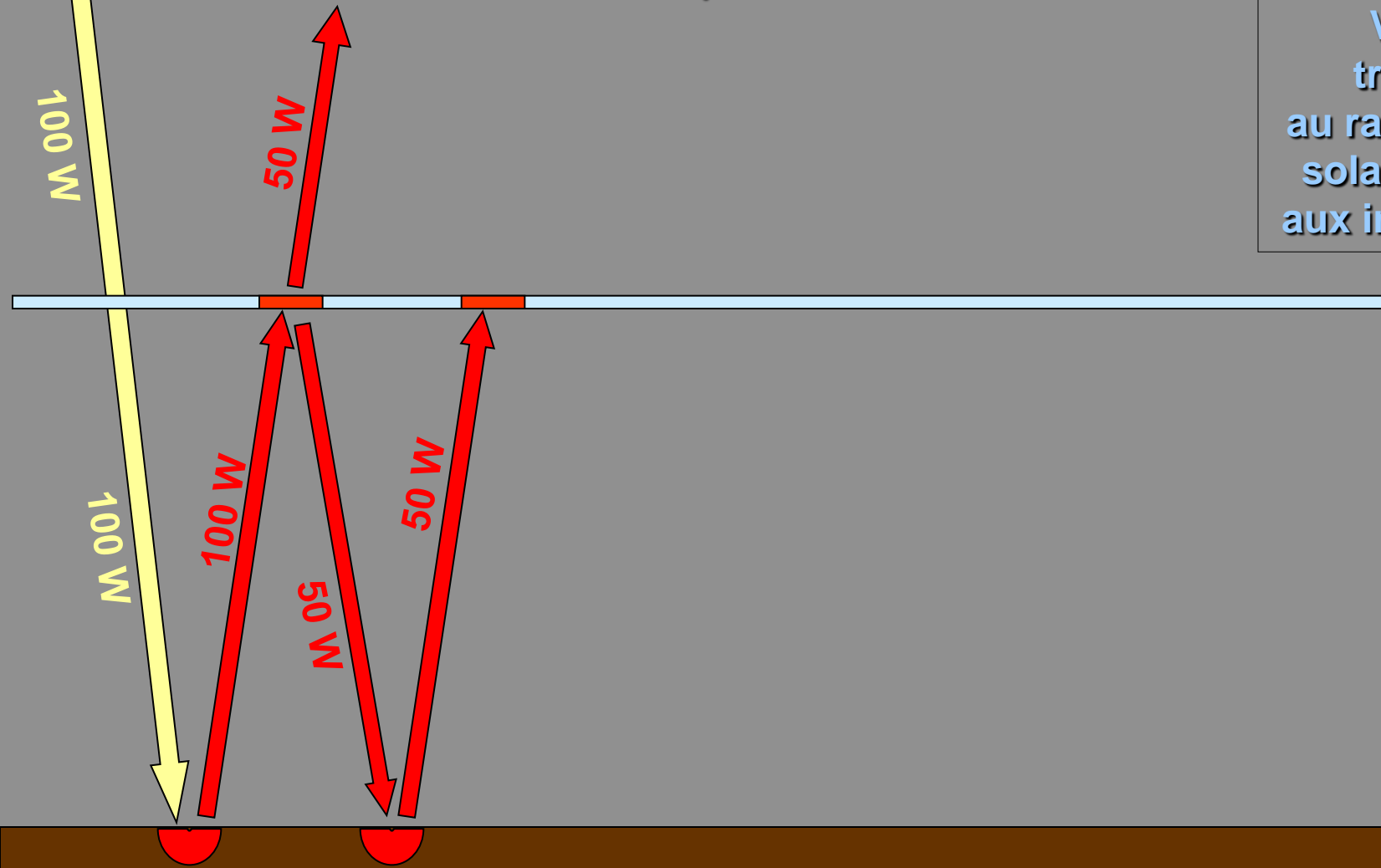
Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements





# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges

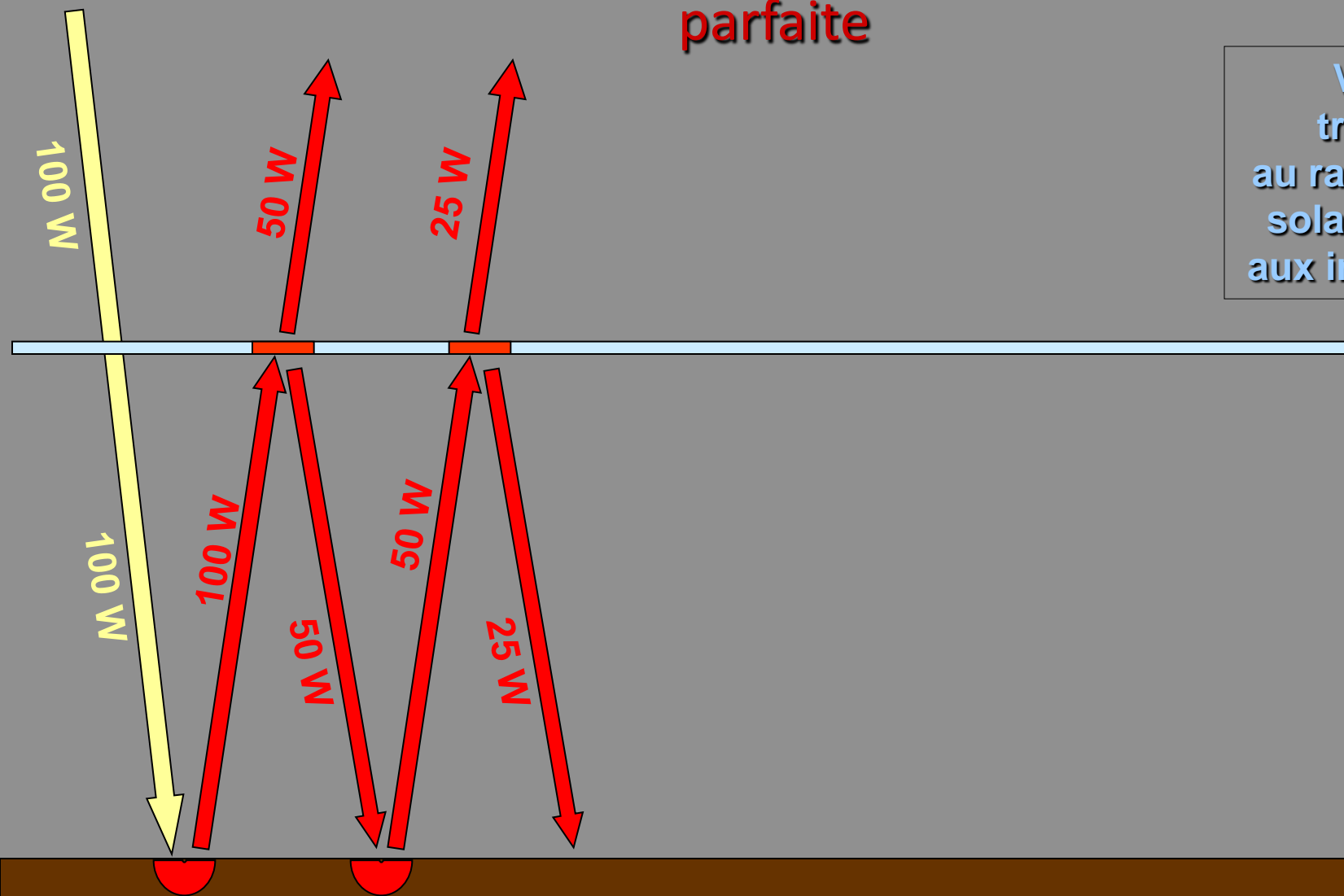


Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges

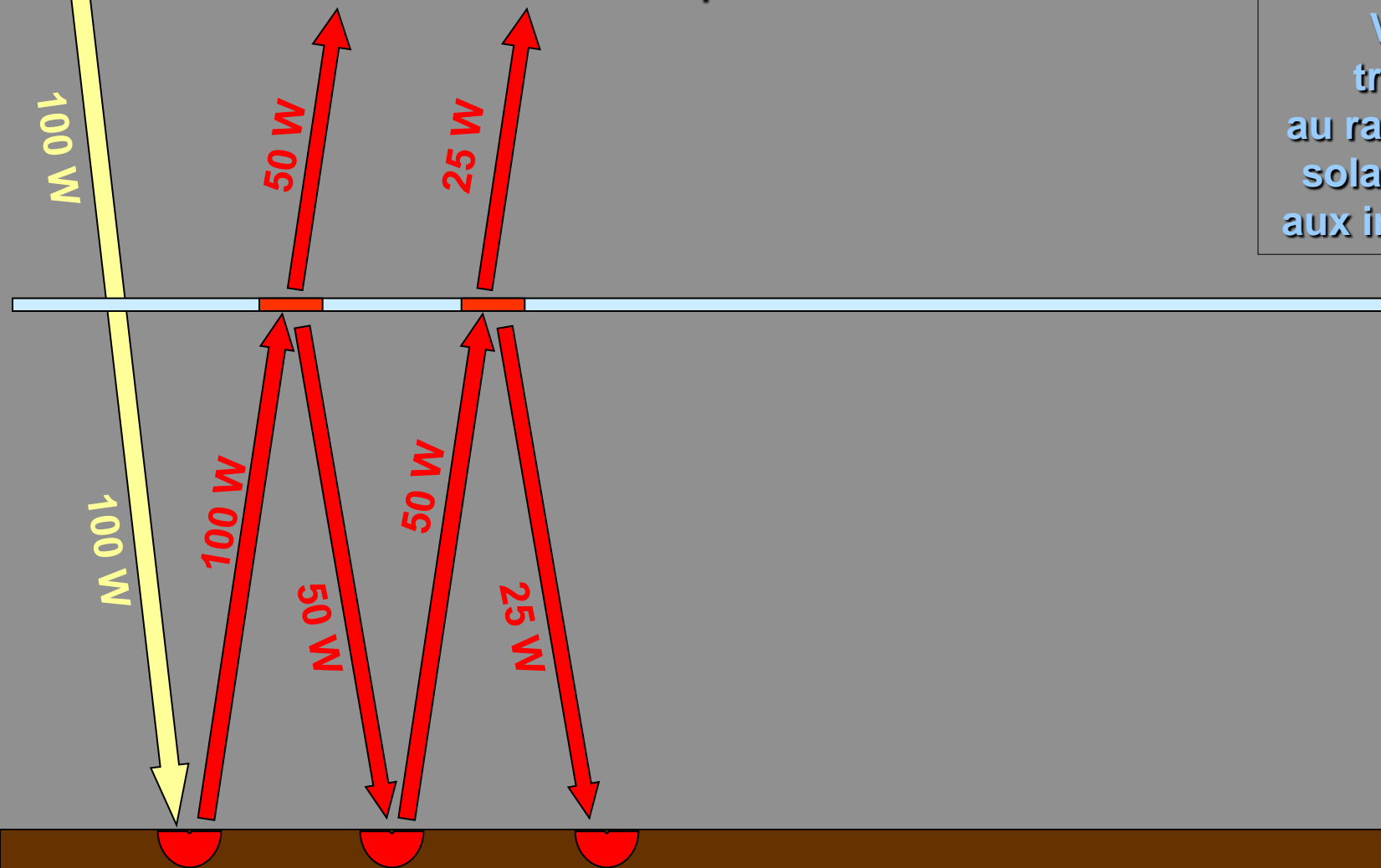


Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges

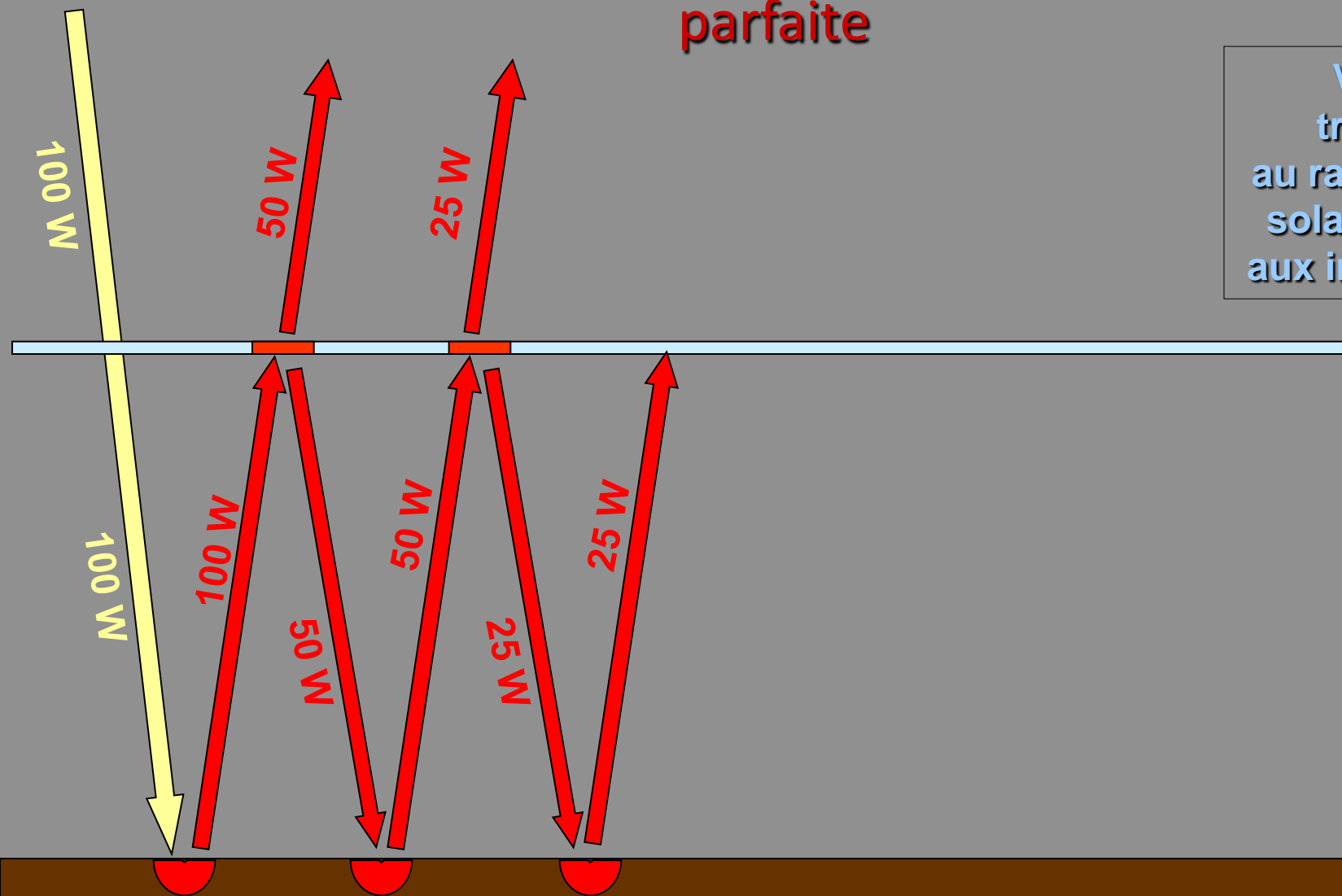


Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges

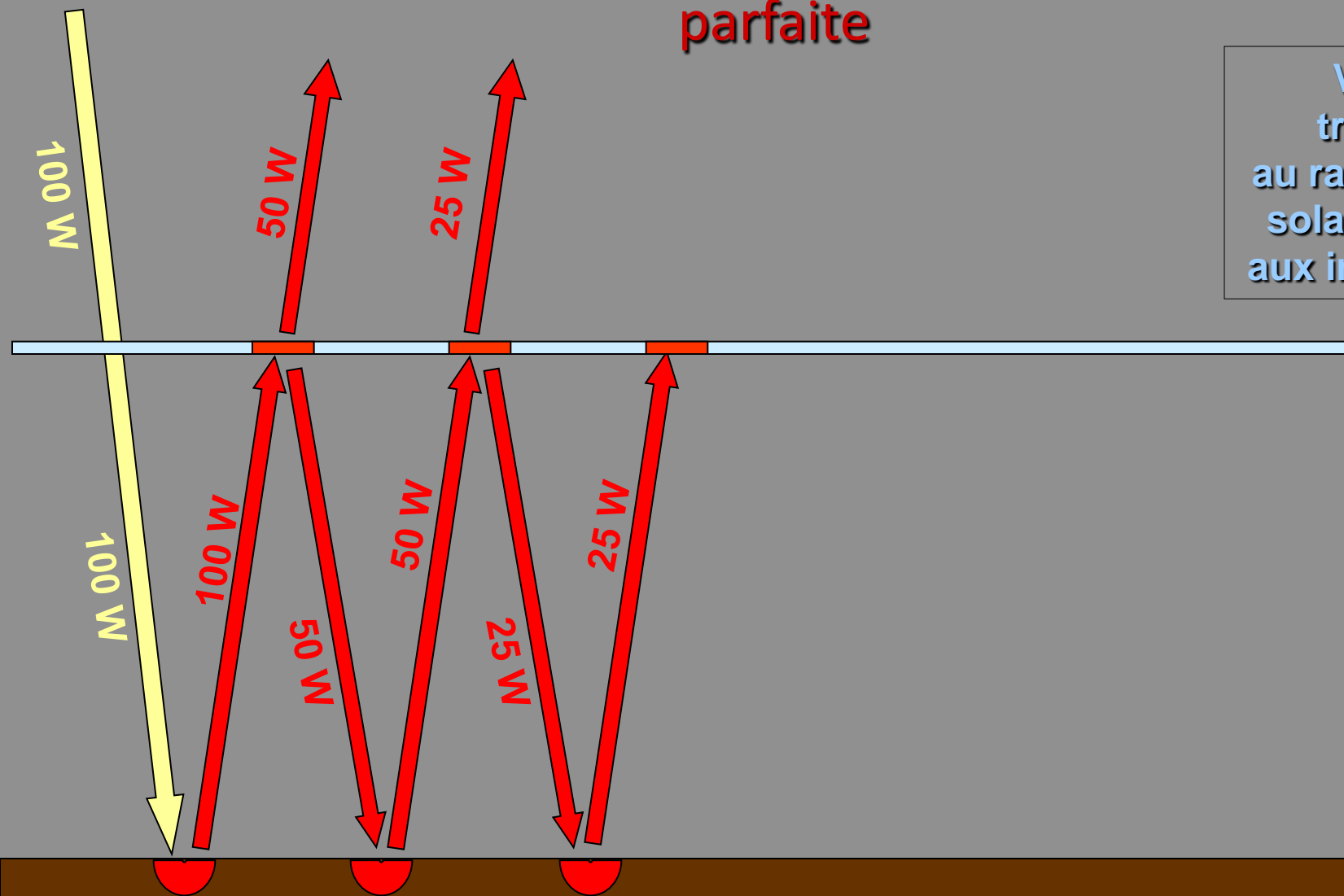


Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges



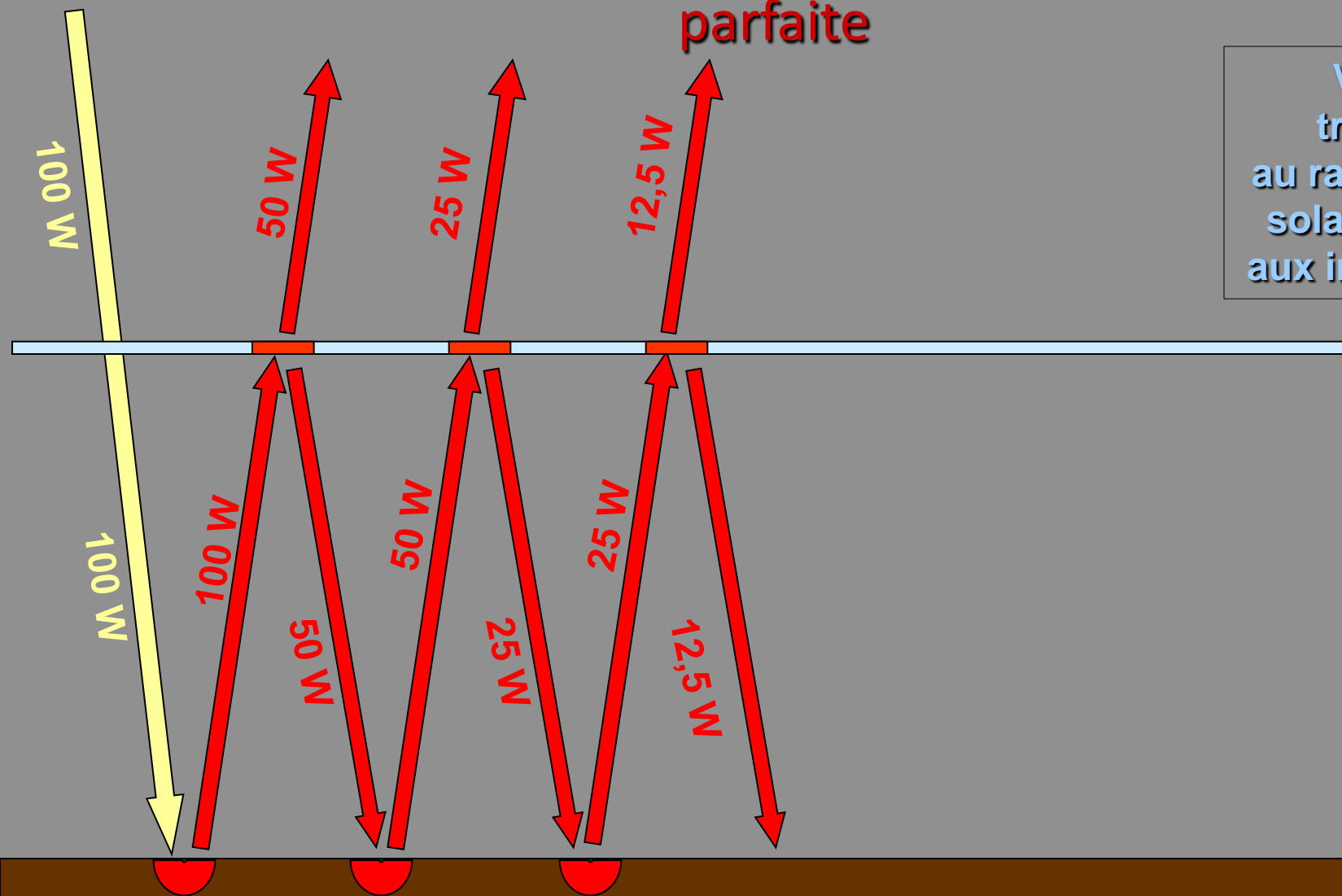
Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements





# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

Vitre mince,  
transparente  
au rayonnement  
solaire, opaque  
aux infra-rouges



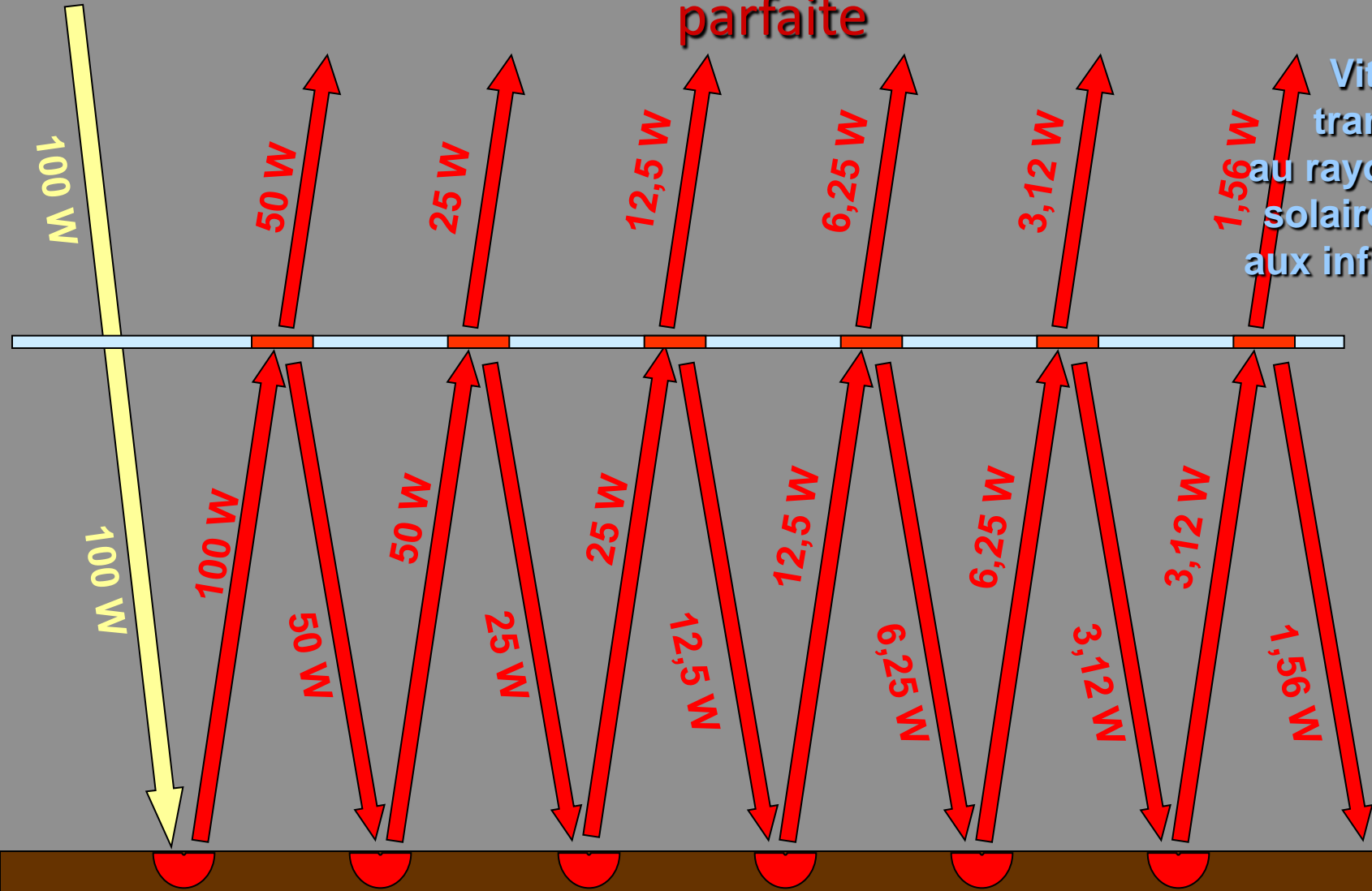
Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



# Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

parfaite

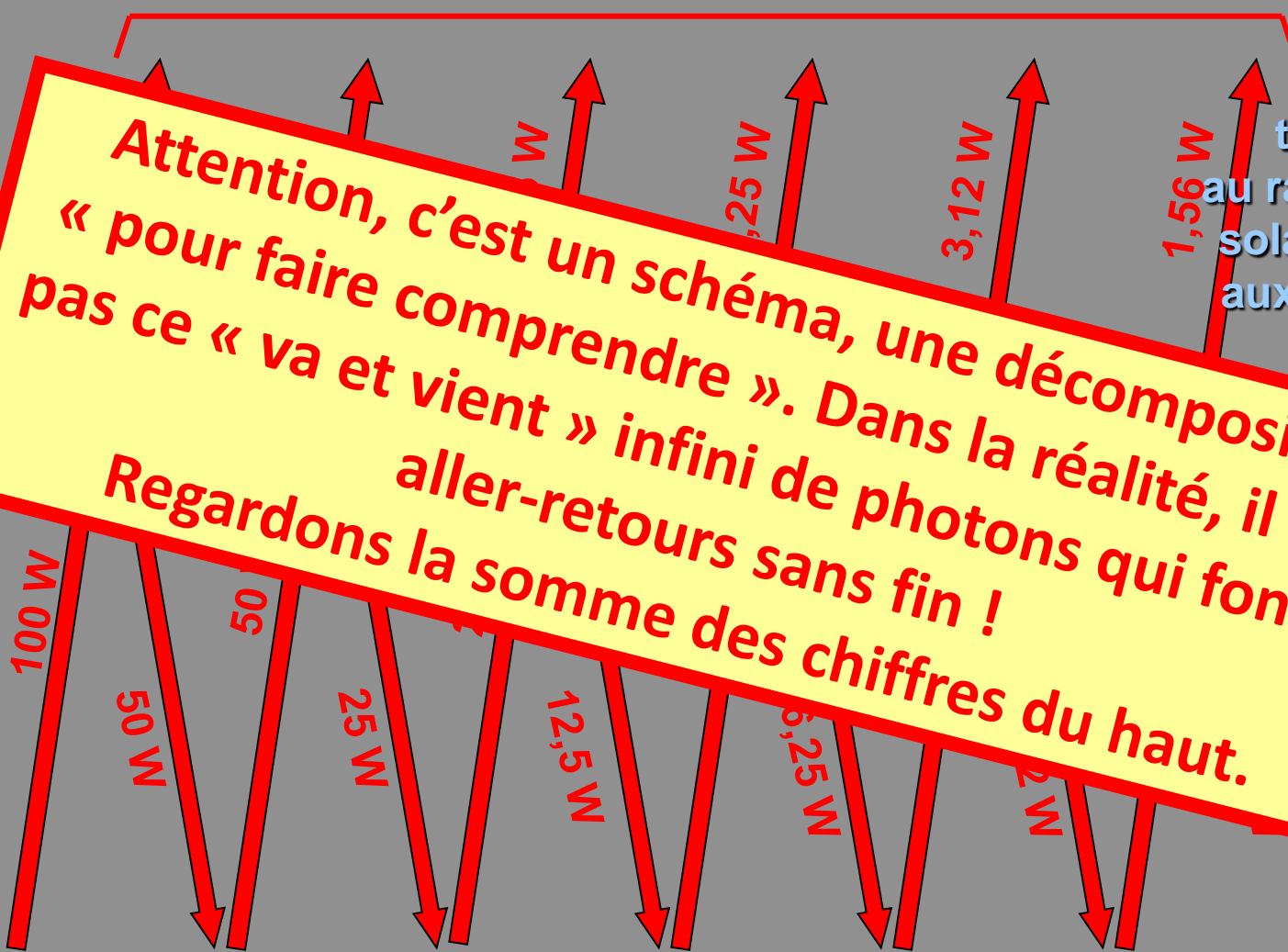
Vitre mince, transparente au rayonnement solaire, opaque aux infra-rouges



Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



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



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

**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.**

**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 vos élèves 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 de travailler avec les profs de math voire d'histoire .

Ah, si les auteurs des programmes, des manuels..., si les instances de l'Éducation nationale 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

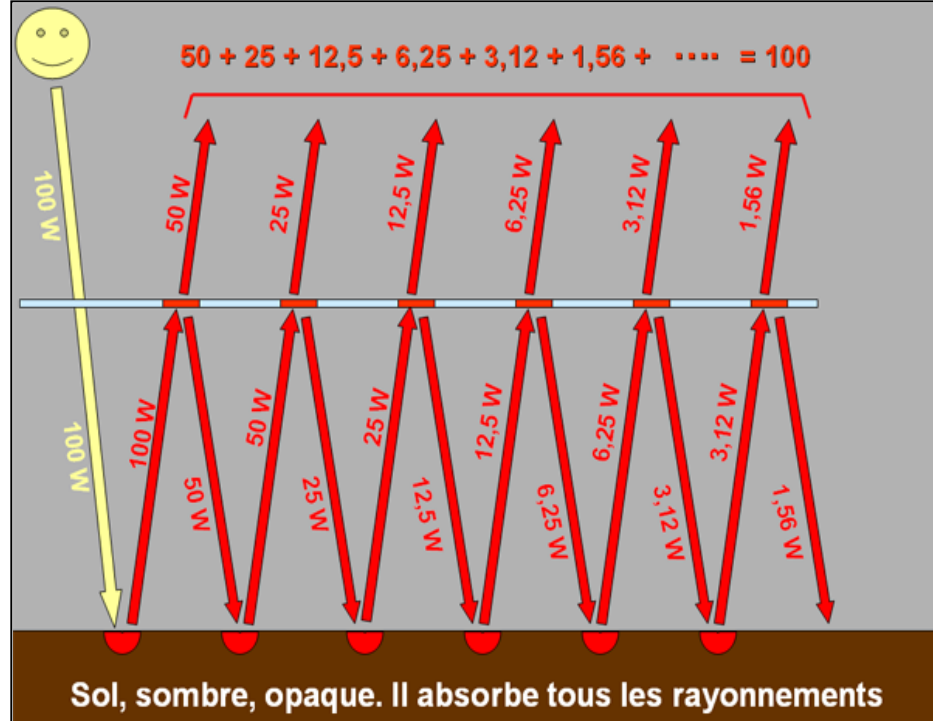
Qu'est ce qui repart du sol : 100+ 50+25+12,5+6,25+ ... = 200 W

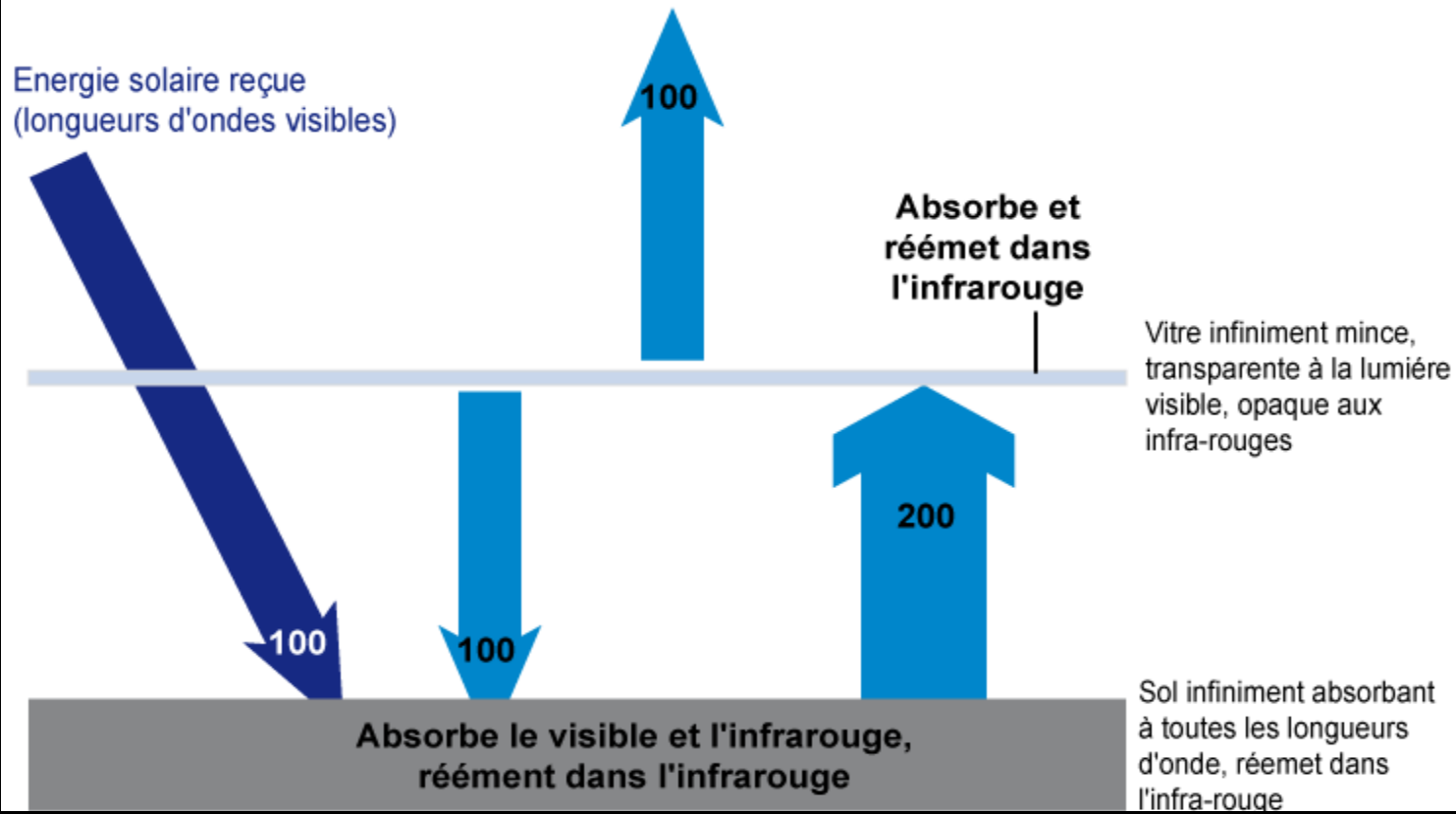
Qu'est ce qui arrive sur la vitre : 100+ 50+25+12,5+6,25+ ... = 200 W

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.

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

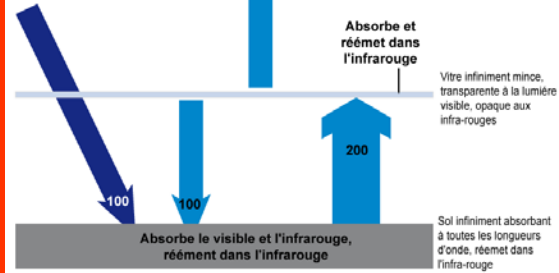




**Avec la même énergie incidente et renvoyée par le système serre + sol, le sol reçoit (et renvoie) 2 fois plus d'énergie avec serre que sans serre. Et comme  $W = \sigma T^4$ , si  $W$  est multiplié par 2,  $T$  l'est par  $\sqrt[4]{2} = 1,19$ . Par exemple, une planète « théoriquement » à 255 K (-18°C)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

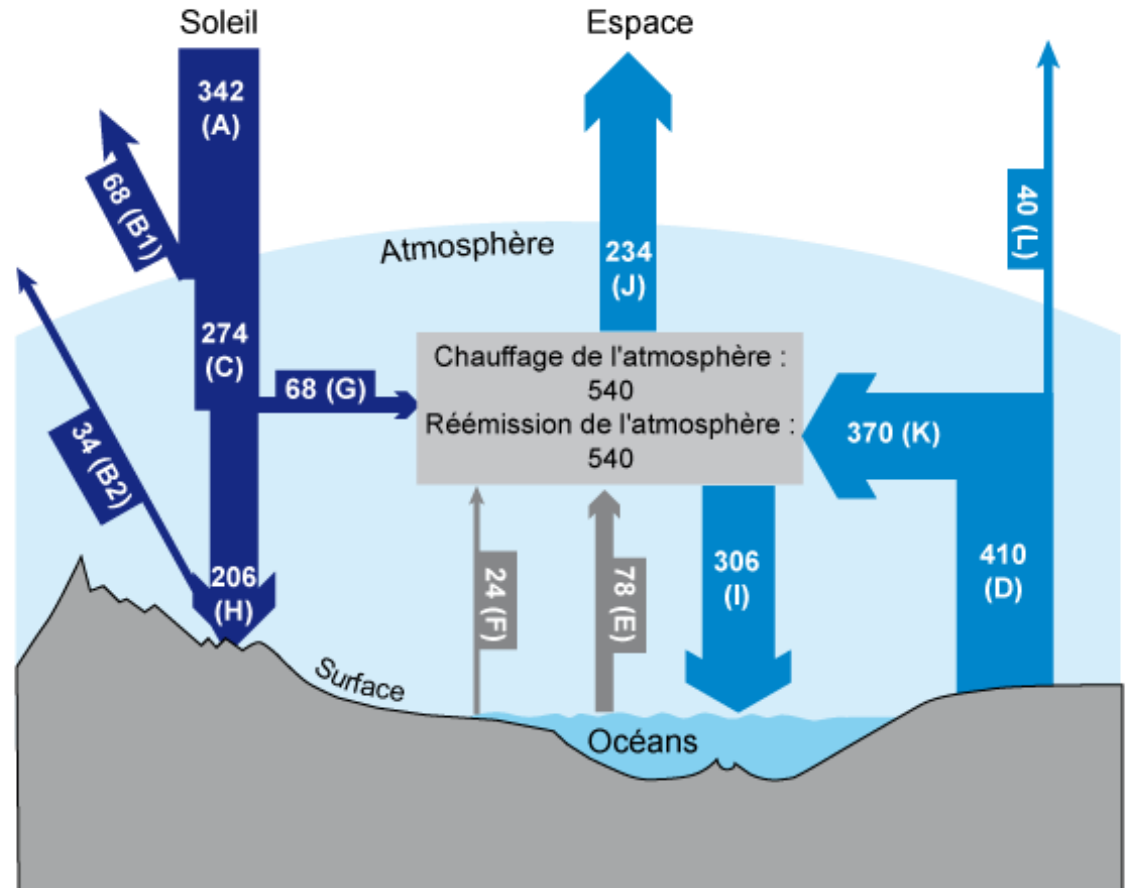


Energie solaire reçue  
(longueurs d'ondes visibles)



## Le modèle

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

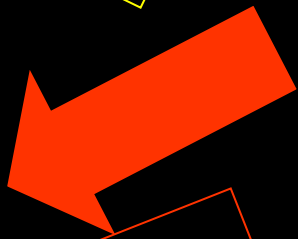


- > Transferts non radiatifs (évaporation - condensation - dynamique de l'air)
- > Rayonnement solaire ( $\lambda$  de 0,2 à 3  $\mu\text{m}$ )
- > Rayonnement d'origine tellurique (IR,  $\lambda$  de 3 à 100  $\mu\text{m}$ )

Unités : Watts.m<sup>-2</sup>



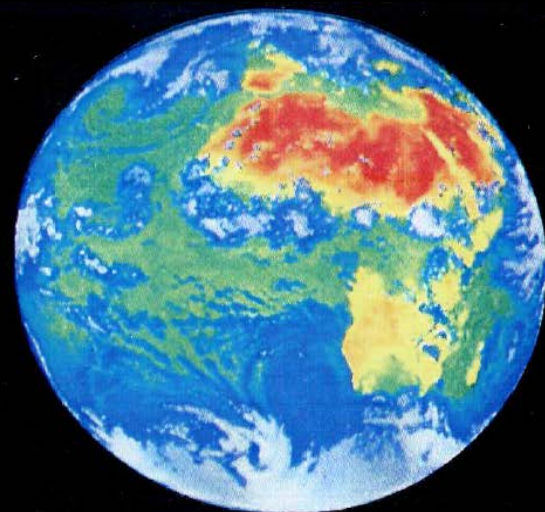
**341 W / m<sup>2</sup>**  
moyenne jour-nuit,  
été hiver,  
pôles-équateur



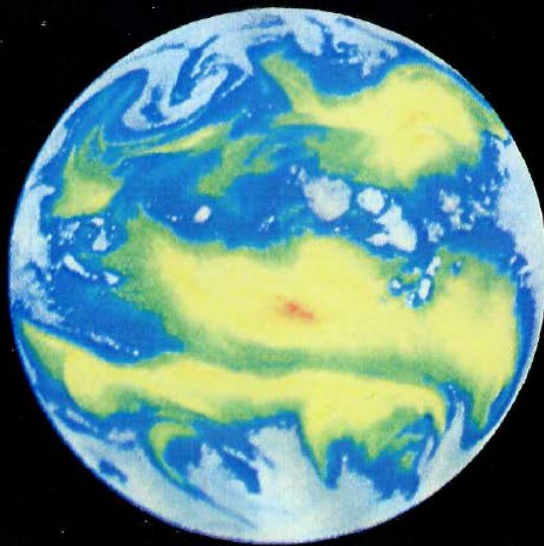
**341 W / m<sup>2</sup>**  
total du visible réfléchi +  
infra-rouge ré-émis



visible (réfléchi)



infra-rouge proche



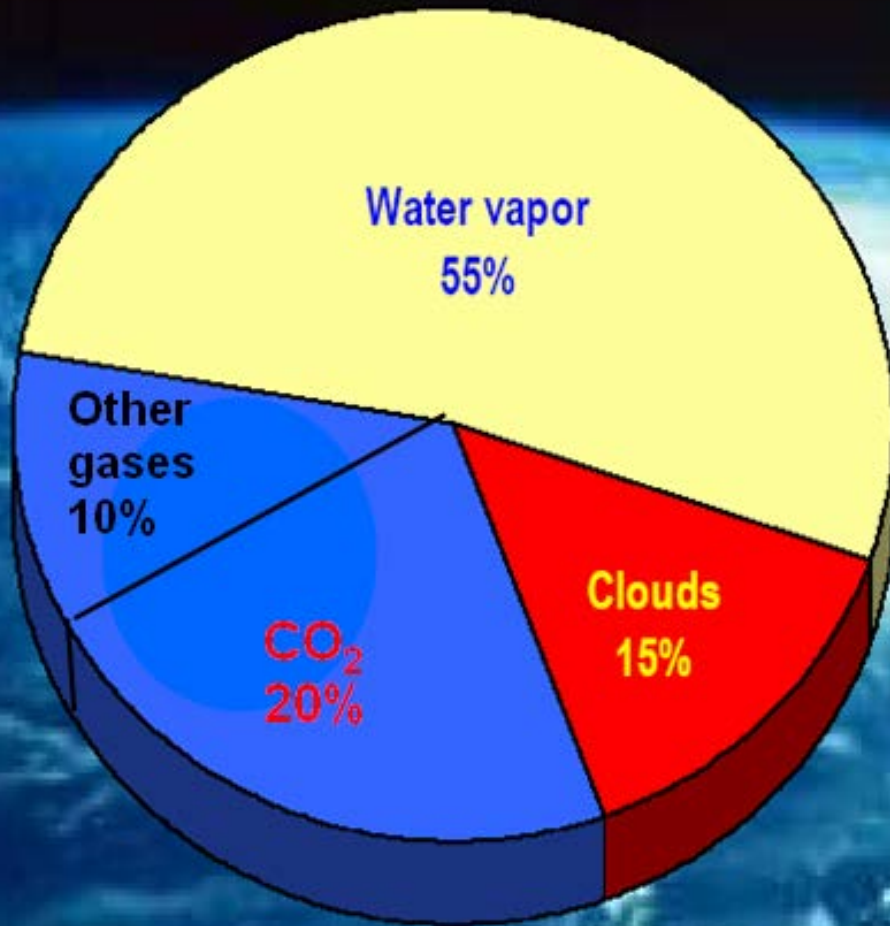
infra-rouge moyen



infra-rouge lointain

# 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 CO<sub>2</sub>, gaz à effet de serre (dits GES). La Terre est une serre naturelle !

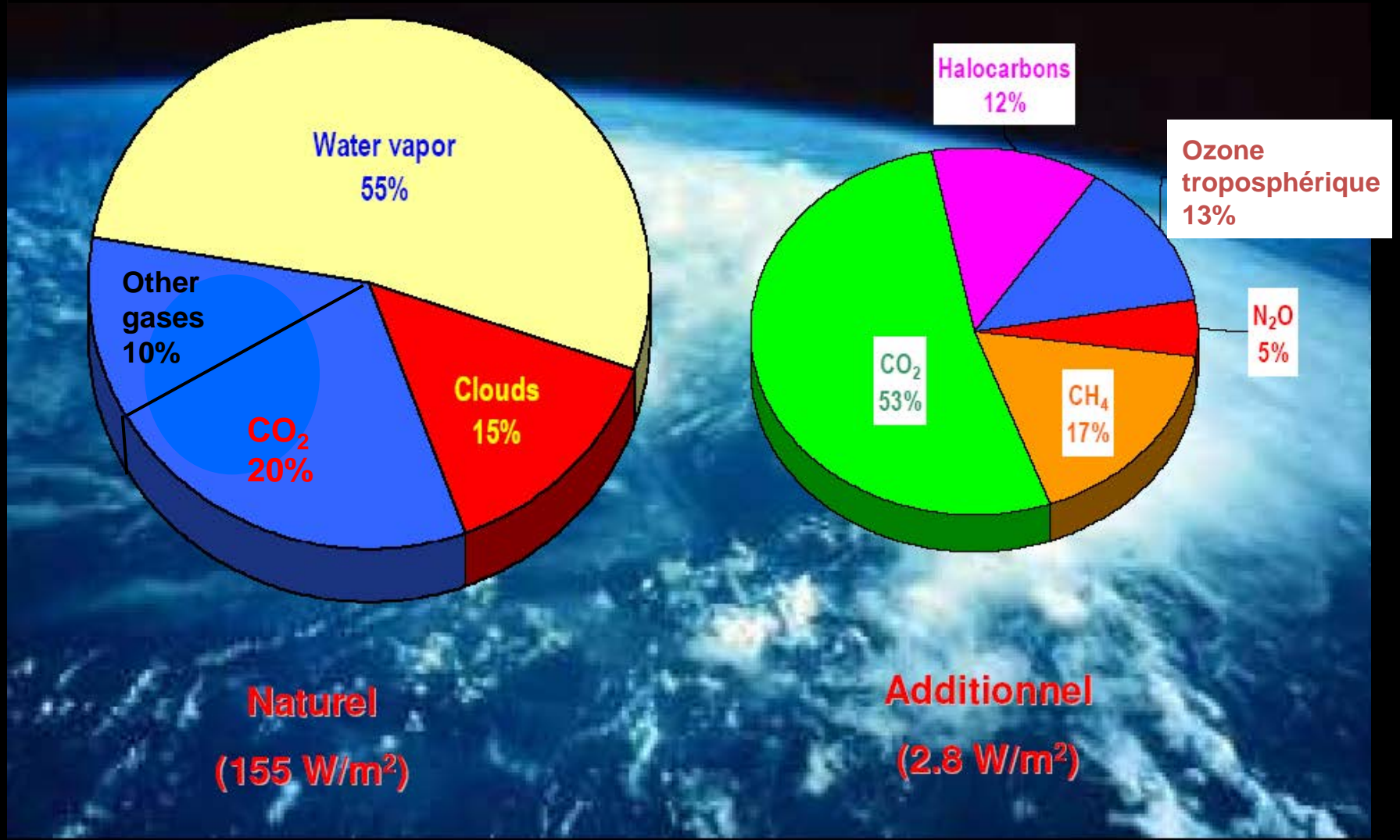




**Cet effet de serre naturel sur Terre rajoute  $155 \text{ W/m}^2$  aux  $341 \text{ W/m}^2$  du rayonnement du Soleil arrivant au sol (la Terre n'est pas une serre « parfaite »). Avec  $341 \text{ W/m}^2$ , la température moyenne serait de  $-18^\circ\text{C}$ . Avec  $341 + 155 = 496 \text{ W/m}^2$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

**(chiffres de l'avant dernier GIEC)**

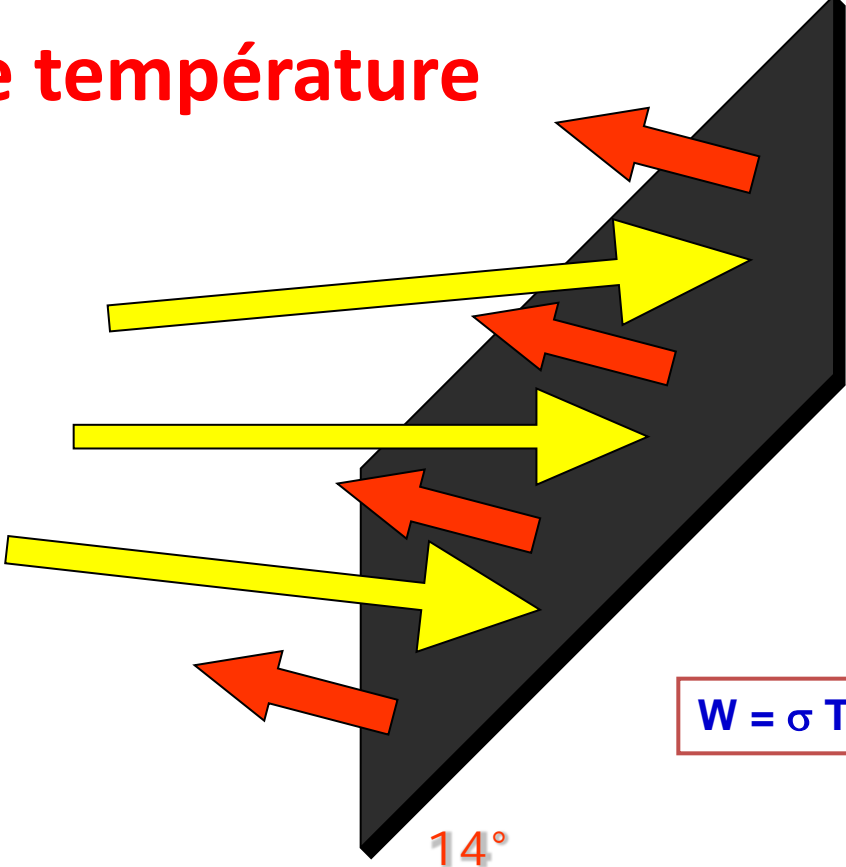




Et actuellement, on augmente l'effet de serre (chiffre de l'avant dernier GIEC).

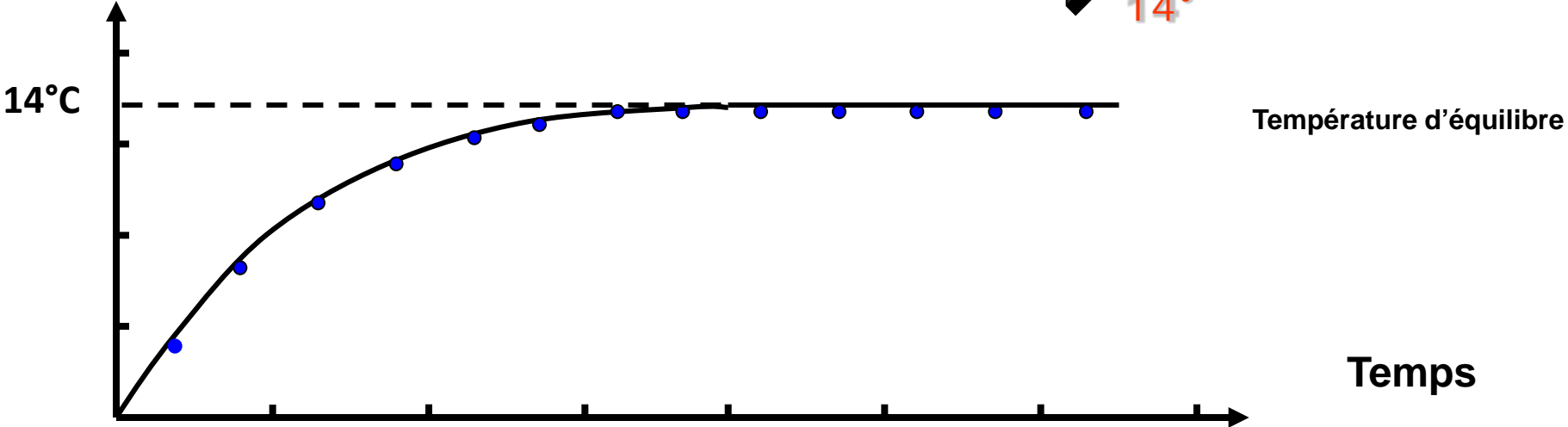
# Rappelez vous la notion de température d'équilibre

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



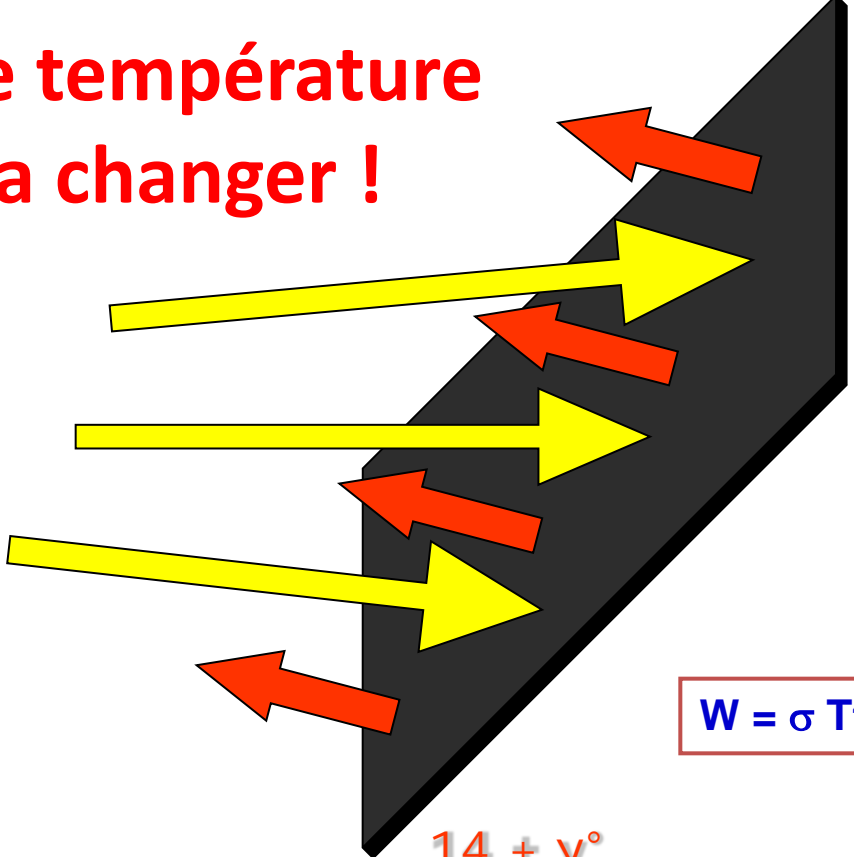
$$W = \sigma T^4$$

Température de la Terre



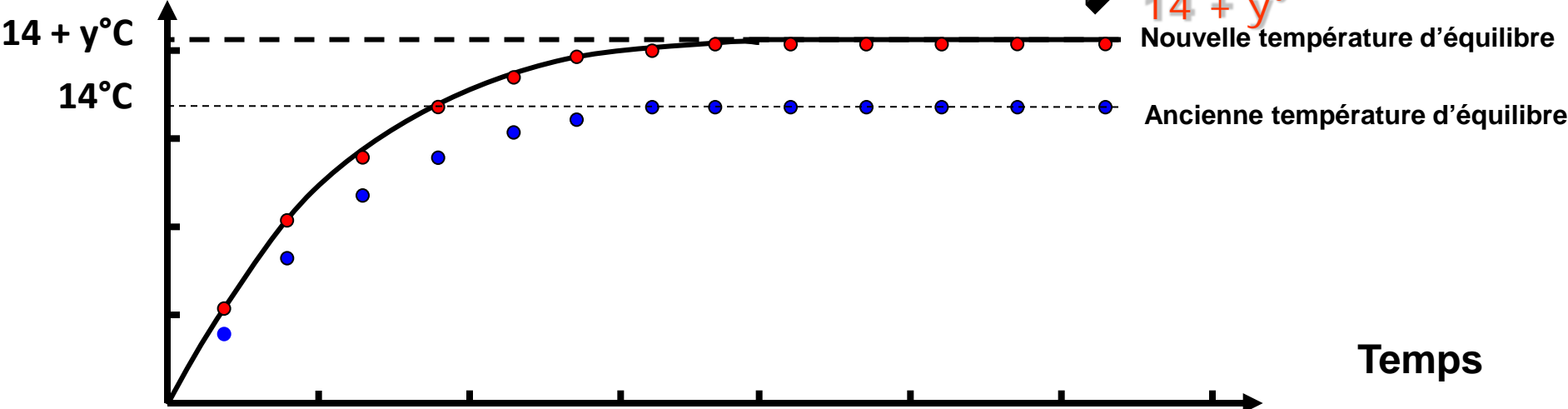
Rappelez vous la notion de température d'équilibre. C'est elle qui va changer !

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



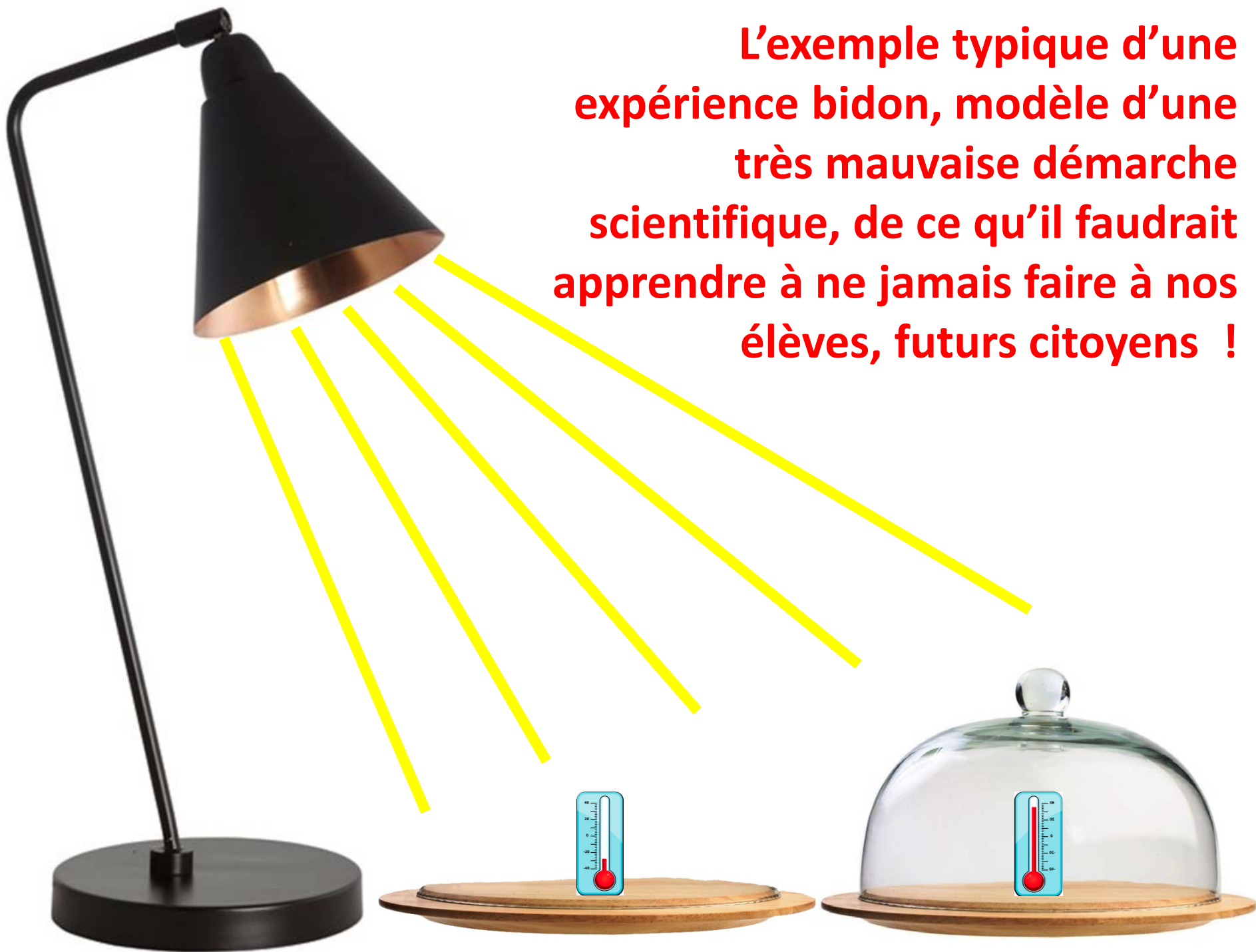
$$W = \sigma T^4$$

Température de la Terre





**L'exemple typique d'une  
expérience bidon, modèle d'une  
très mauvaise démarche  
scientifique, de ce qu'il faudrait  
apprendre à ne jamais faire à nos  
élèves, futurs citoyens !**



# Pourquoi des expériences de ce type ne signifient rien ?

**1 – La chaleur peut « quitter » le plateau soit par rayonnement (ça, ça concerne l'effet de serre) soit par convection (l'ai chaud du plateau monte, et ça ne concerne pas l'effet de serre).**

**Il y a donc 2 causes possibles de haute température sous la cloche : un possible effet de serre, et l'arrêt de la convection (effet couvercle). Or, en science, on essaye de ne faire varier qu'un paramètre à la fois. On pourrait empêcher la convection du plateau sans cloche en faisant l'expérience dans le vide, ou on pourrait estimer l'importance du seul effet couvercle en prenant une cloche transparente aux infra-rouges (cloche en diamant, ou en sel gemme), et on comparerait avec la cloche en verre.**

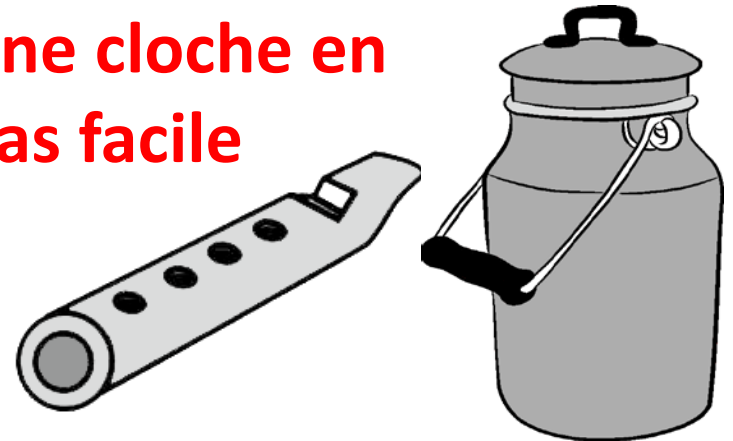
**Pourquoi des expériences de ce type ne signifient rien ?**

**2 – La lampe utilisée, en général une lampe à incandescence, émet la majorité de son énergie dans l'infra-rouge. La cloche de verre (ou de plexiglas) est donc chauffée par l'extérieur, ce qui est l'inverse de la situation de l'effet de serre (et c'est pareil avec une cloche pleine de CO<sub>2</sub>).**

**Pour que l'expérience avec une cloche de verre soit significative, il faudrait que l'expérience soit faite sous vide et avec un éclairage par le Soleil (pas très facile !).**

**Si on ne fait pas l'expérience sous vide, on pourrait faire une expérience au Soleil en comparant une cloche en verre et une cloche en sel gemme (pas facile non plus !).**

**Sinon, vous avez le choix des mots :**



L'EFFET DE SERRE.

Liste des activités

Classe de seconde

Accès partie programme

Objectif cognitif: Mécanisme de l'effet de serre

Objectif méthodologique principal: Utiliser un tableur (Excel)

Durée: 1h30

Organisation de la séance: la moitié du groupe d'élèves travaille sur le document 1 et le classeur n alors que l'autre moitié d'élèves travaille sur le document 2 et le classeur 2

Télécharger le document 1 au format Word

Télécharger le classeur 1 au format Excel

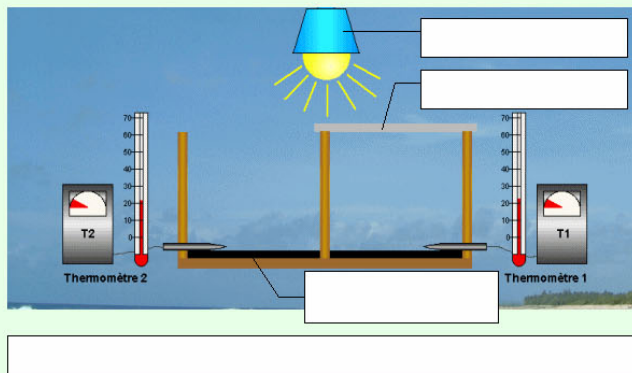
Télécharger le document 2 au format Word

Télécharger le classeur2 au format Excel

Partie 1: Suivre un protocole expérimental et utiliser un tableur graphique pour modéliser et comprendre l'effet de serre.

Consigne n°1:

Compléter les cases du schéma ci-dessous avec les annotations et le titre.



Consigne n°2 :

Mettre en place le matériel.

Mesurer la température dans les deux compartiments avant d'allumer la lampe : elle doit être identique.

Relever les températures toutes les 3 minutes pendant 30 minutes, et compléter le tableau de résultats au fur et à mesure.

Pour afficher le tableau de résultats : cliquer ici.

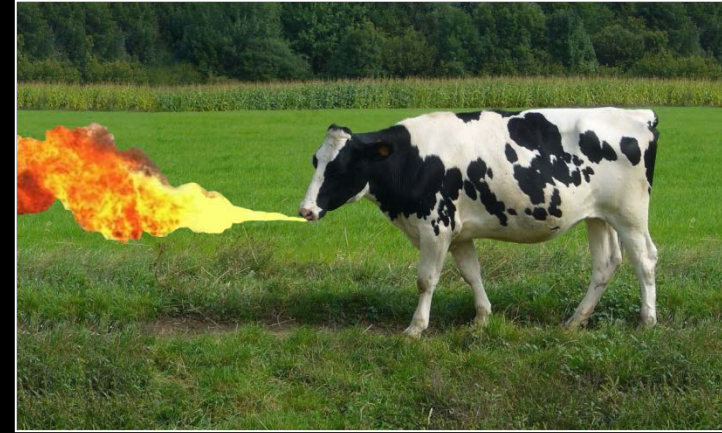
Utiliser le tableur pour construire le graphique que vous collerez ci-dessous.

Pour montrer que je n'invente rien !

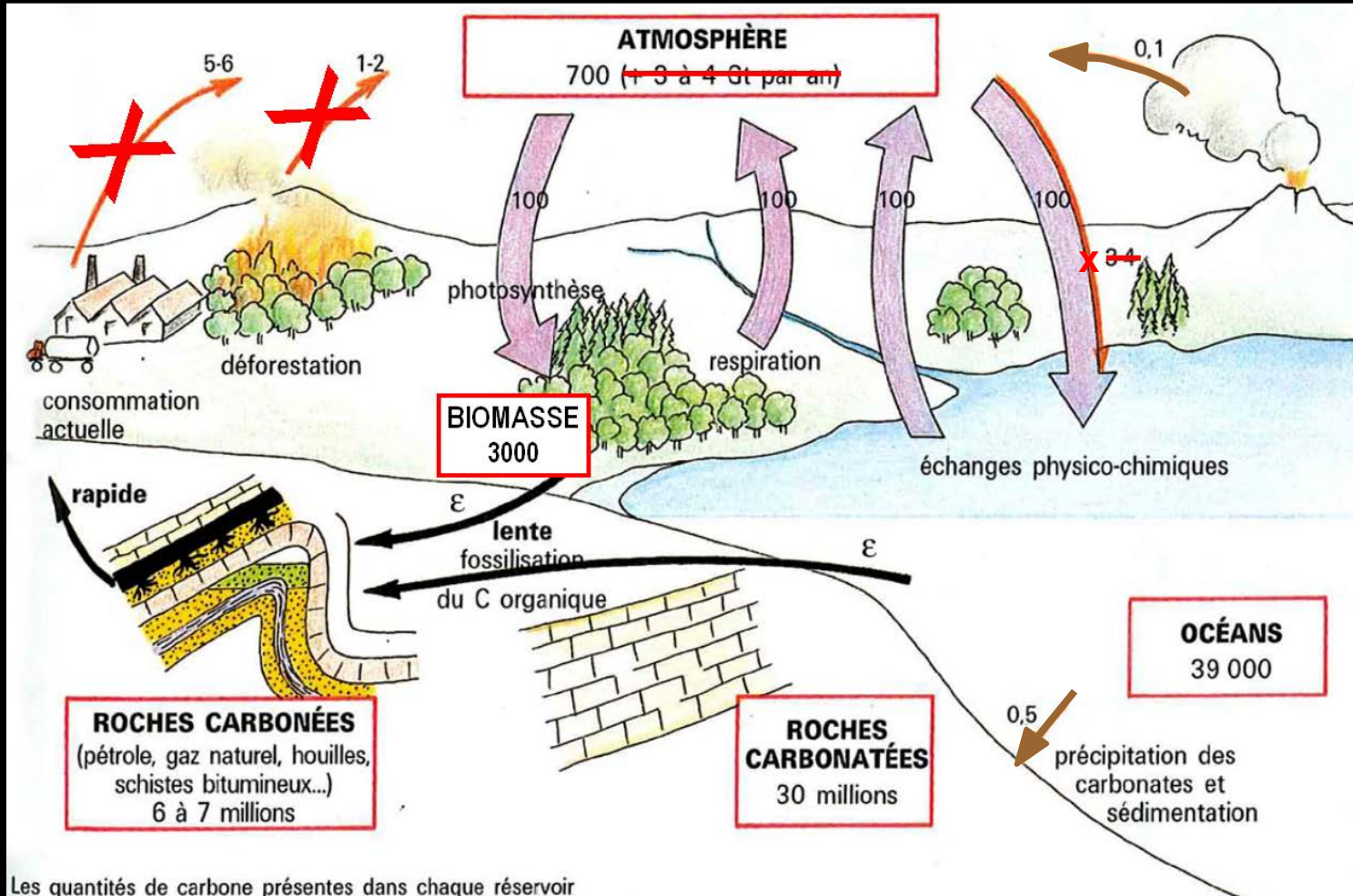
Ce n'est pas anormal que des fonctionnaires du Ministère n'aient pas bien compris l'effet de serre !



# Deuxième clé : bien maîtriser le cycle du carbone.



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



\* Appréciez la clairvoyance des instances dirigeantes de l'EN en général, des auteurs de programmes en particulier !

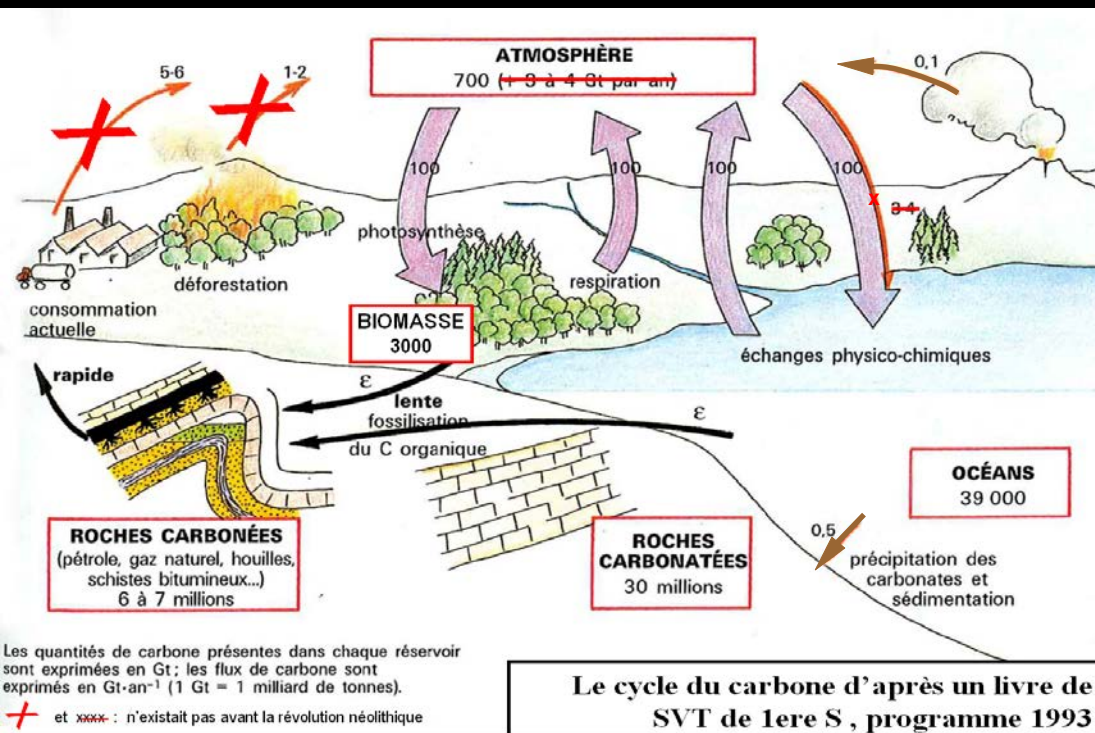
Les quantités de carbone présentes dans chaque réservoir sont exprimées en Gt ; les flux de carbone sont exprimés en Gt-an<sup>-1</sup> (1 Gt = 1 milliard de tonnes).

+ 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 !



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. Ou 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 ?

# Le cycle du

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

Pourquoi est-ce géologiquement et climatiquement inacceptable ?

Un déséquilibre

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 à faire pâlir d'envie tous les économistes et autres gestionnaires) qui durerait un million d'années, ça engendrerait un déséquilibre de 10 000 %. Ça peut arriver, géologiquement, mais si ça arrive, ça se voit !

il

nit  
re et  
dans

traché  
Gt de  
ons de  
ue 37

oins. Où

042 700, c'est à dire  
est ce carbone ?

Les quantités de carbone présentes dans les réservoirs sont exprimées en Gt; les flux de carbone sont exprimés en Gt.an<sup>-1</sup> (1 Gt = 1 milliard de tonnes).

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



# Les réservoirs de carbone et d'O<sub>2</sub>



## Le carbone (en masse d'élément Carbone)

L'atmosphère :  $\approx 850$  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  $\text{HCO}_3^-$ , mais aussi de  $\text{CO}_2$  dissout et de  $\text{CO}_3^{--}$ )

La croûte :  $\approx 70$  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

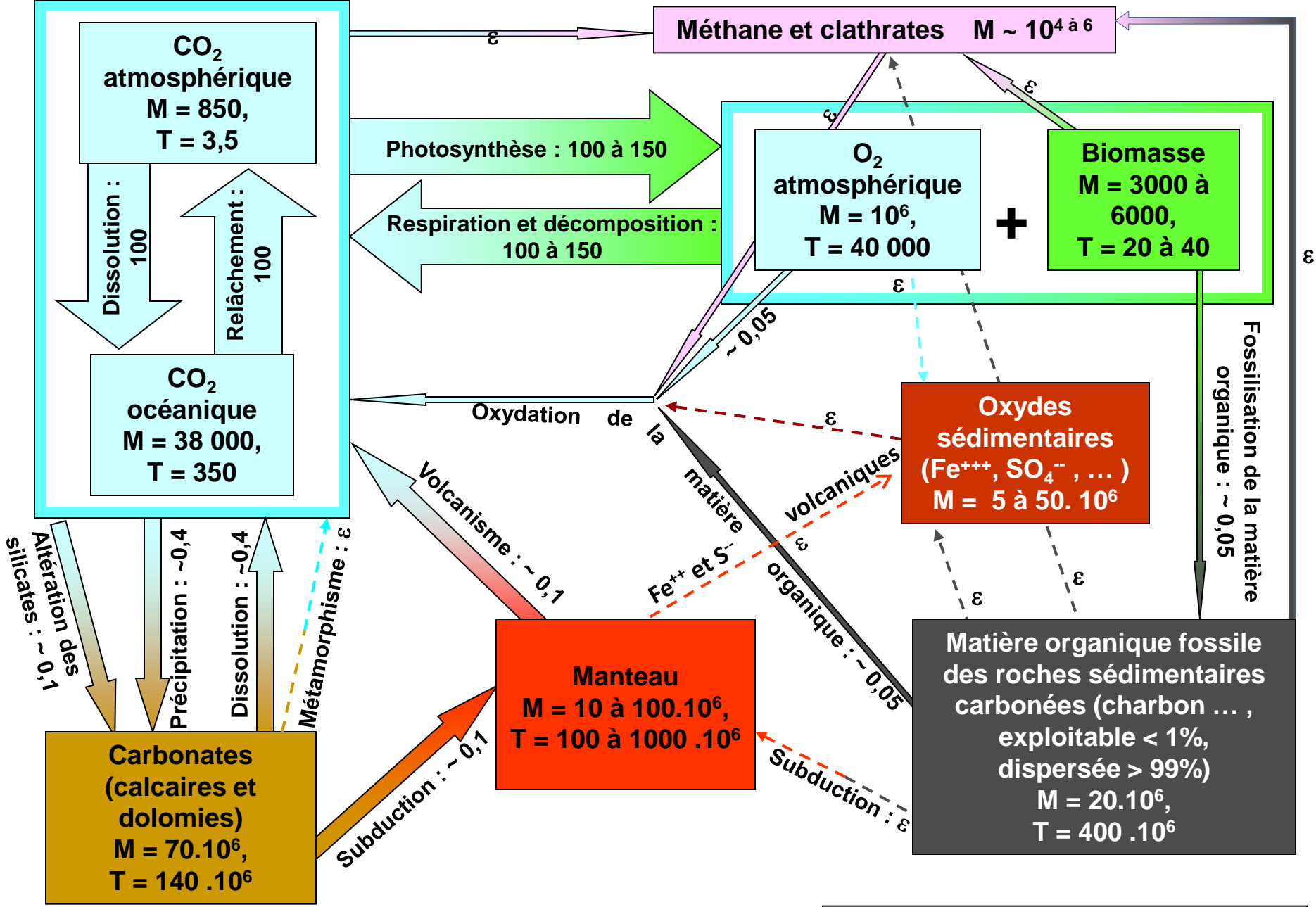
## La molécule de di-oxygène (O<sub>2</sub>)

L'atmosphère :  $\approx 1$  million de Gt

L'océan :  $\approx 1000$  Gt (dissout dans l'eau)

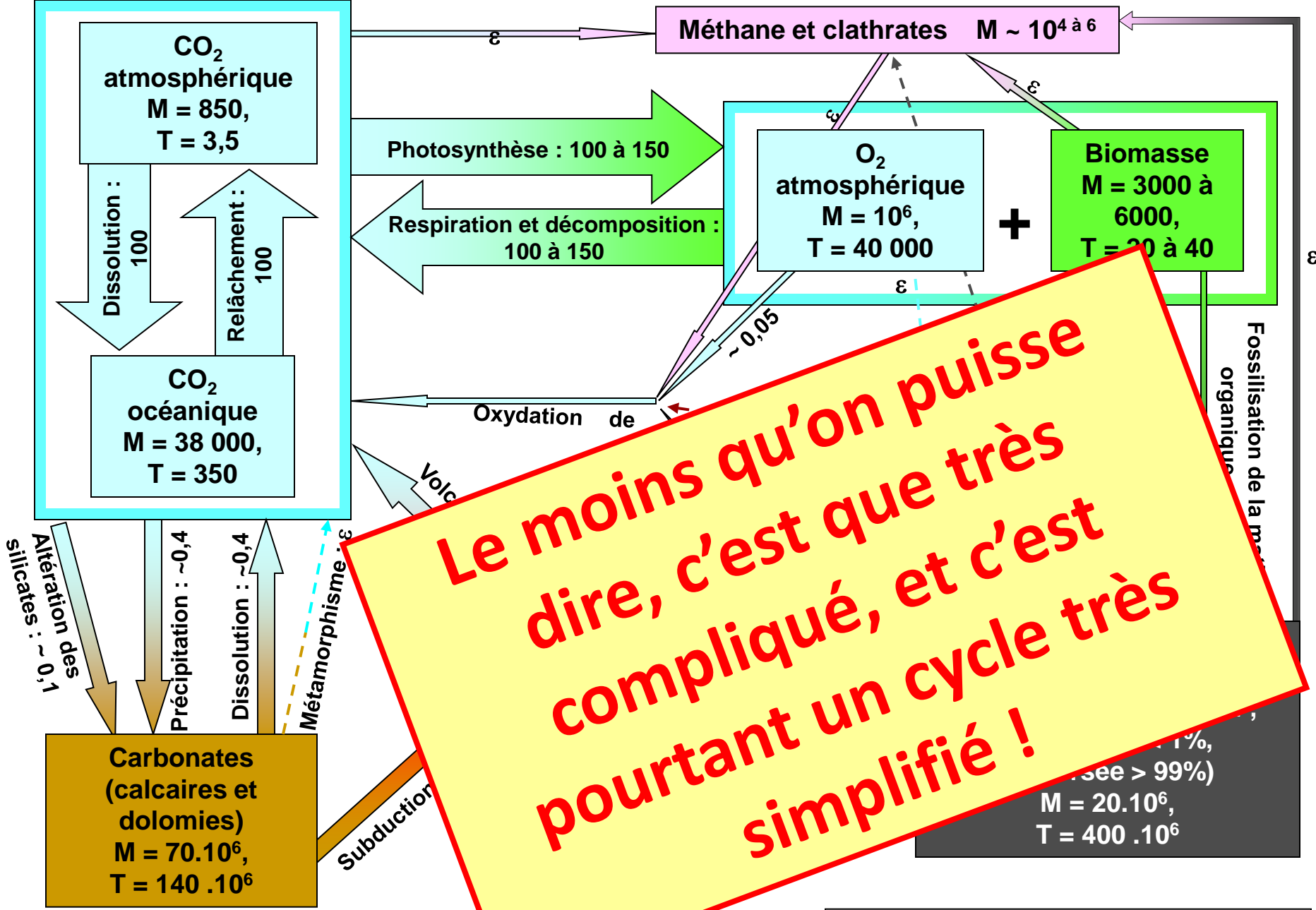
Unité : 1 Giga-tonne (Gt) =  $10^9$  t =  $10^{12}$  kg





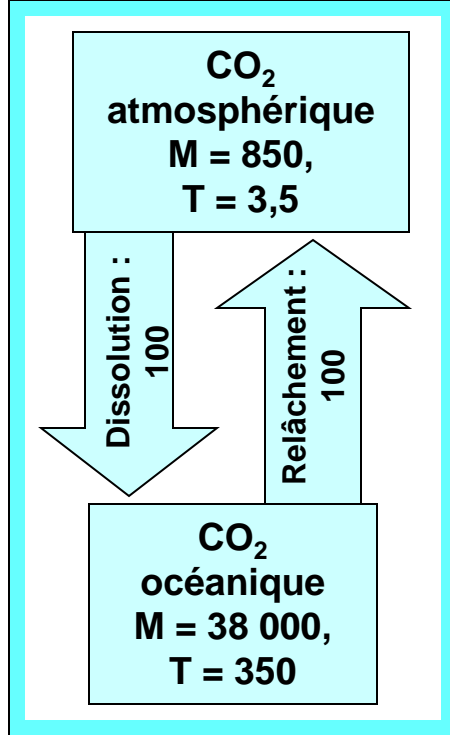
# Le cycle du Carbone/Oxygène

Masse en Gt (10<sup>9</sup> t = 10<sup>12</sup> kg) de C ou d'O  
 Temps de résidence en année  
 Flux : en Gt / an



# Le cycle du Carbone, de l'oxygène

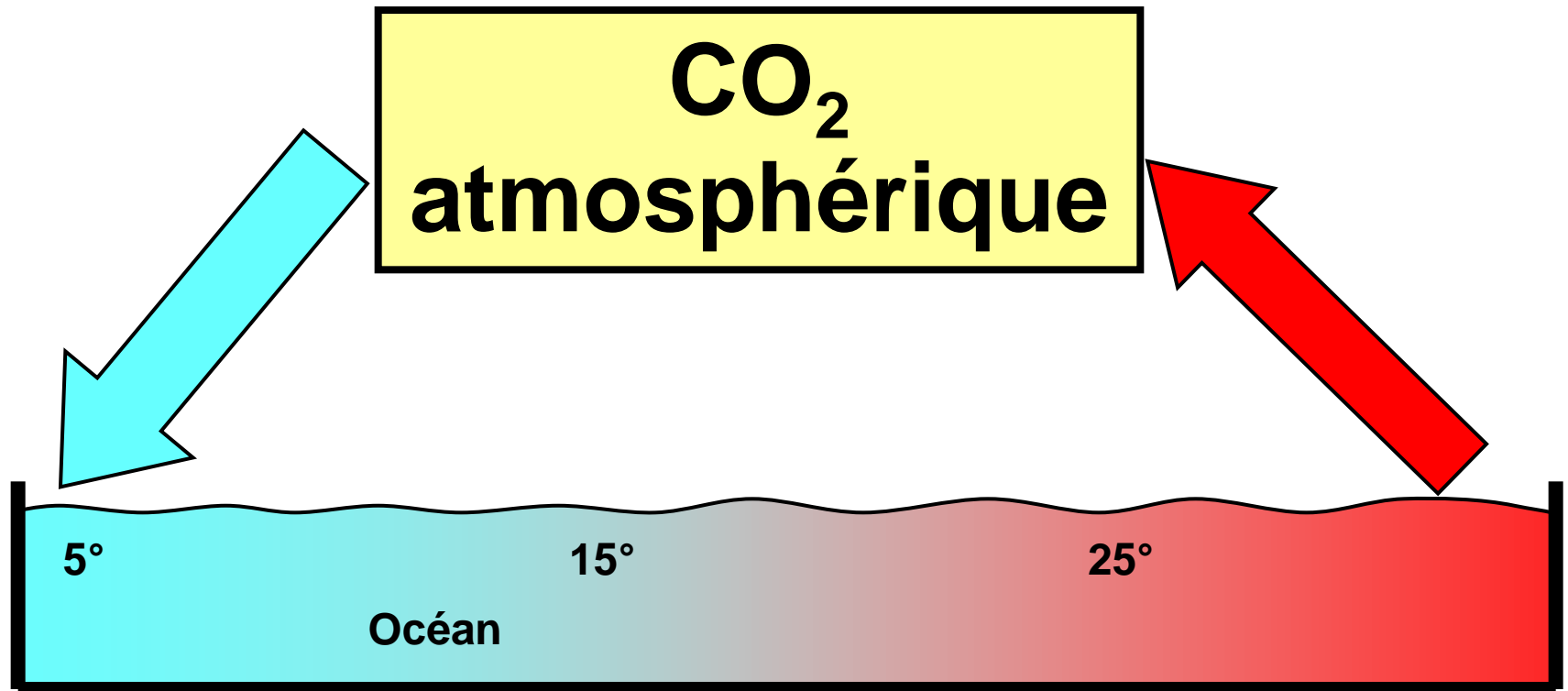
Masse en Gt (10<sup>9</sup> t = 10<sup>12</sup> kg) de C ou d'O  
 Temps de résidence en année  
 Flux : en Gt / an



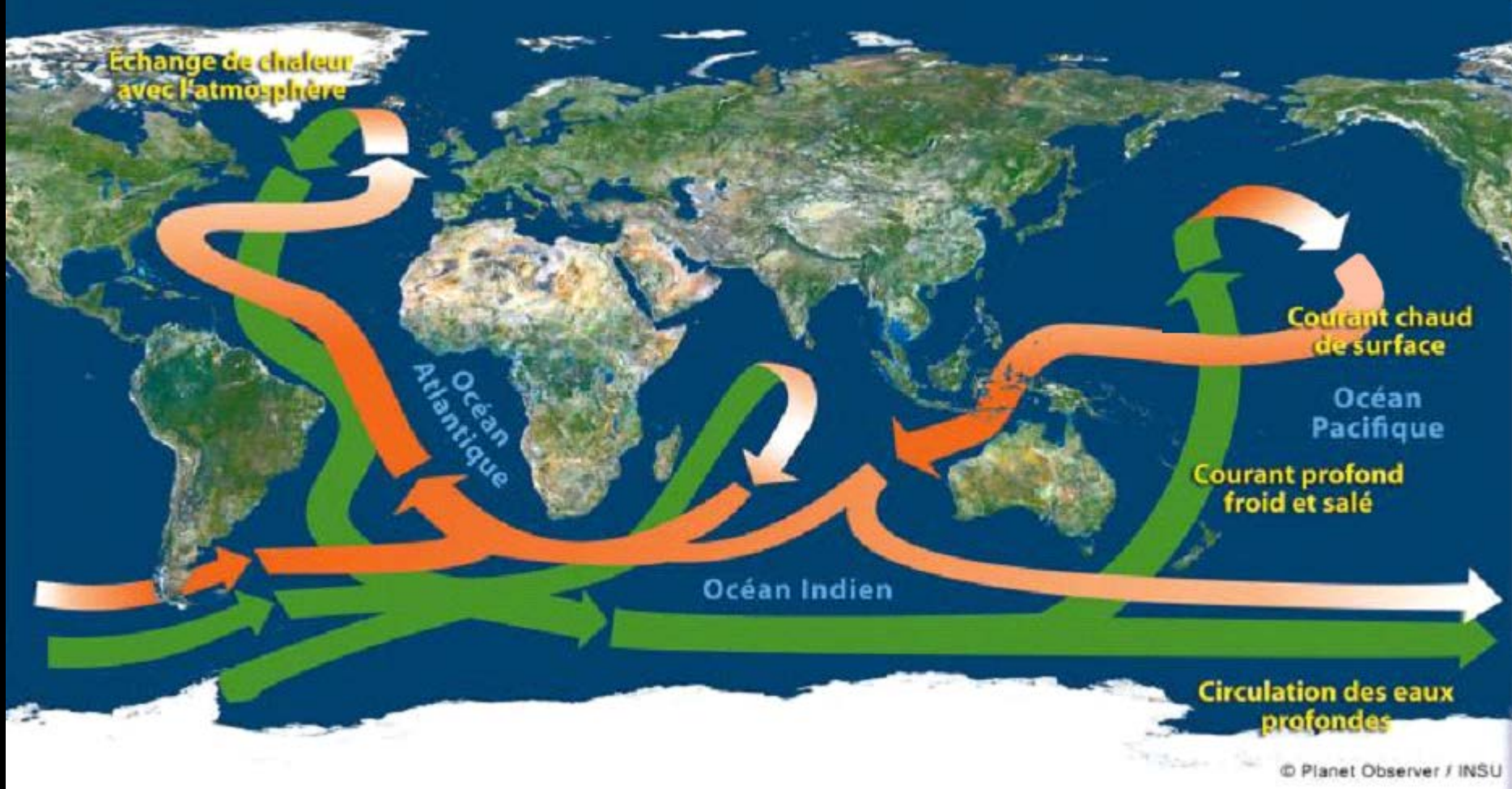
**On va étudier (en les simplifiant encore) les principaux échanges (figurés par des flèches) entre tous ces réservoirs. Il suffit qu'une de ces flèches change pour une raison (naturelle ou anthropique), et le CO<sub>2</sub> atmosphérique, et donc le climat, changent.**

**Tout d'abord, les échanges océan ↔ atmosphère**

**Le CO<sub>2</sub> est beaucoup plus soluble dans l'eau froide que dans l'eau chaude. L'océan absorbe du CO<sub>2</sub> dans les zones polaires, en relâche dans les zones chaudes**





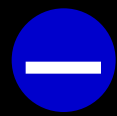
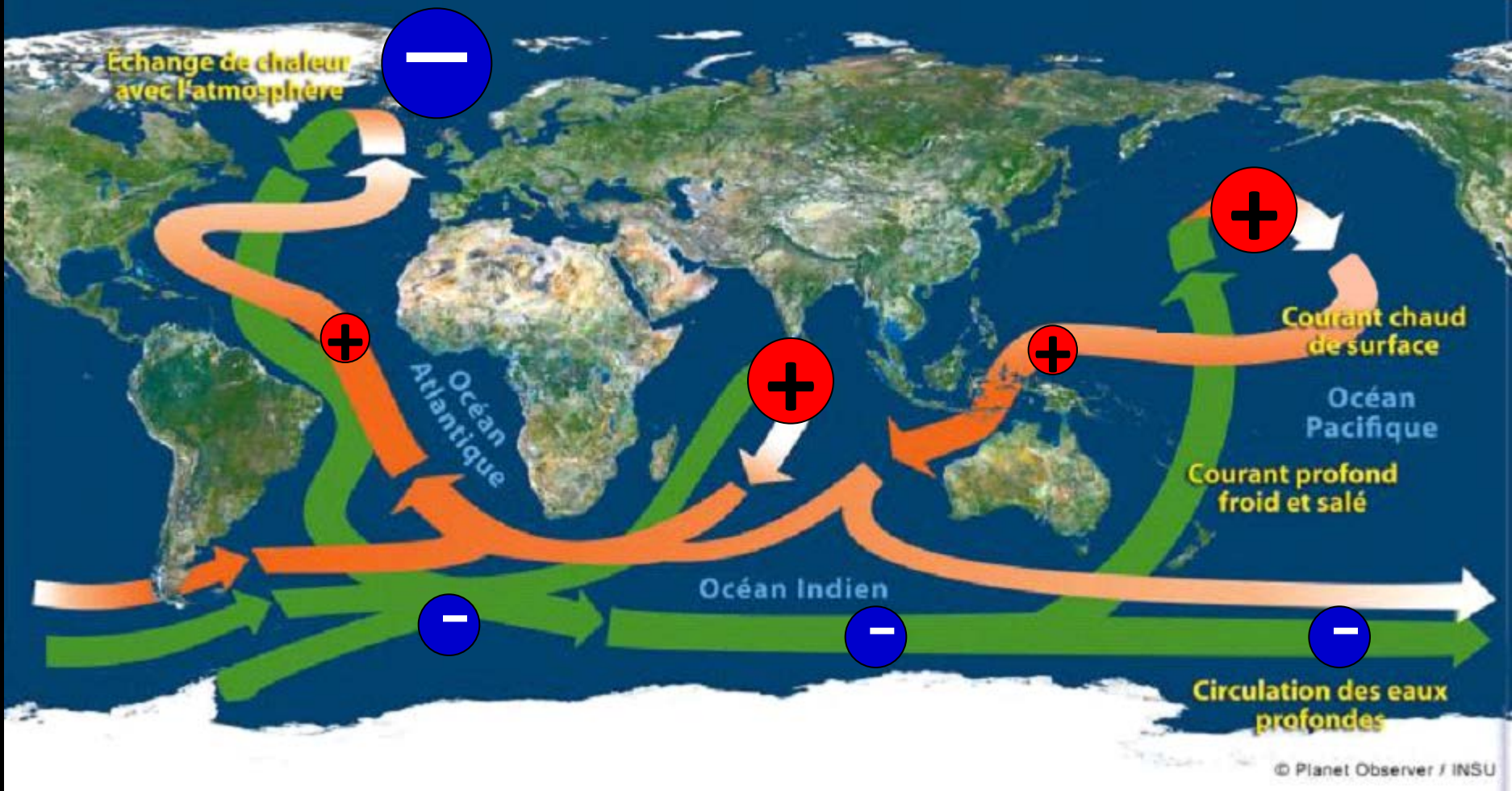


Courant « chaud » de surface

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.**



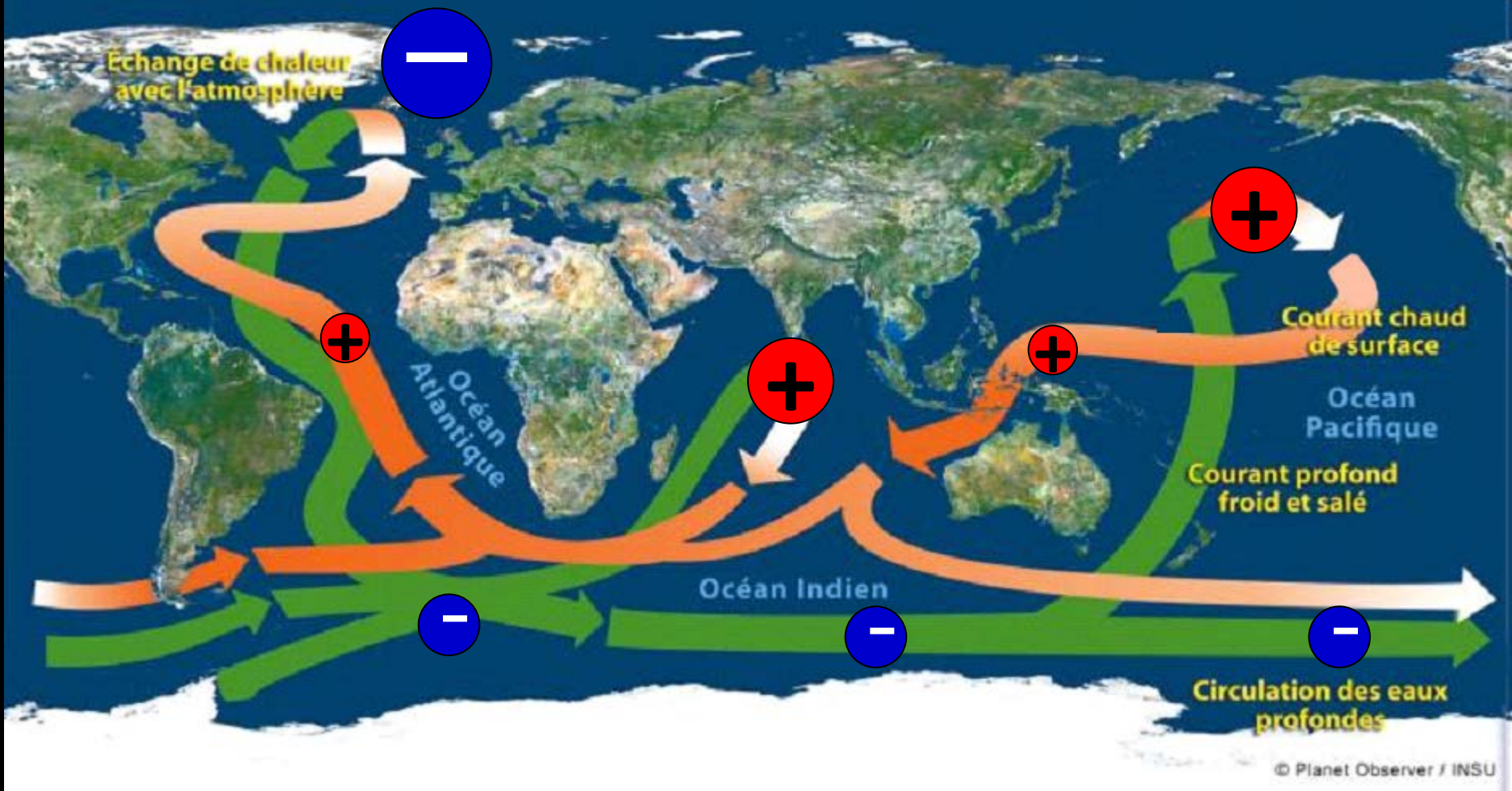


Zone froide, où l'océan absorbe du CO<sub>2</sub> atmosphérique

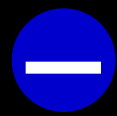


Zone chaude, où l'océan relâche du CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère

**Il y a en permanence dissolution et relargage de CO<sub>2</sub> par l'océan, d'environ 100 Gt / an.**



© Planet Observer / INSU



Zone froide, où l'océan absorbe du CO<sub>2</sub> atmosphérique



Zone chaude, où l'océan relâche du CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère

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

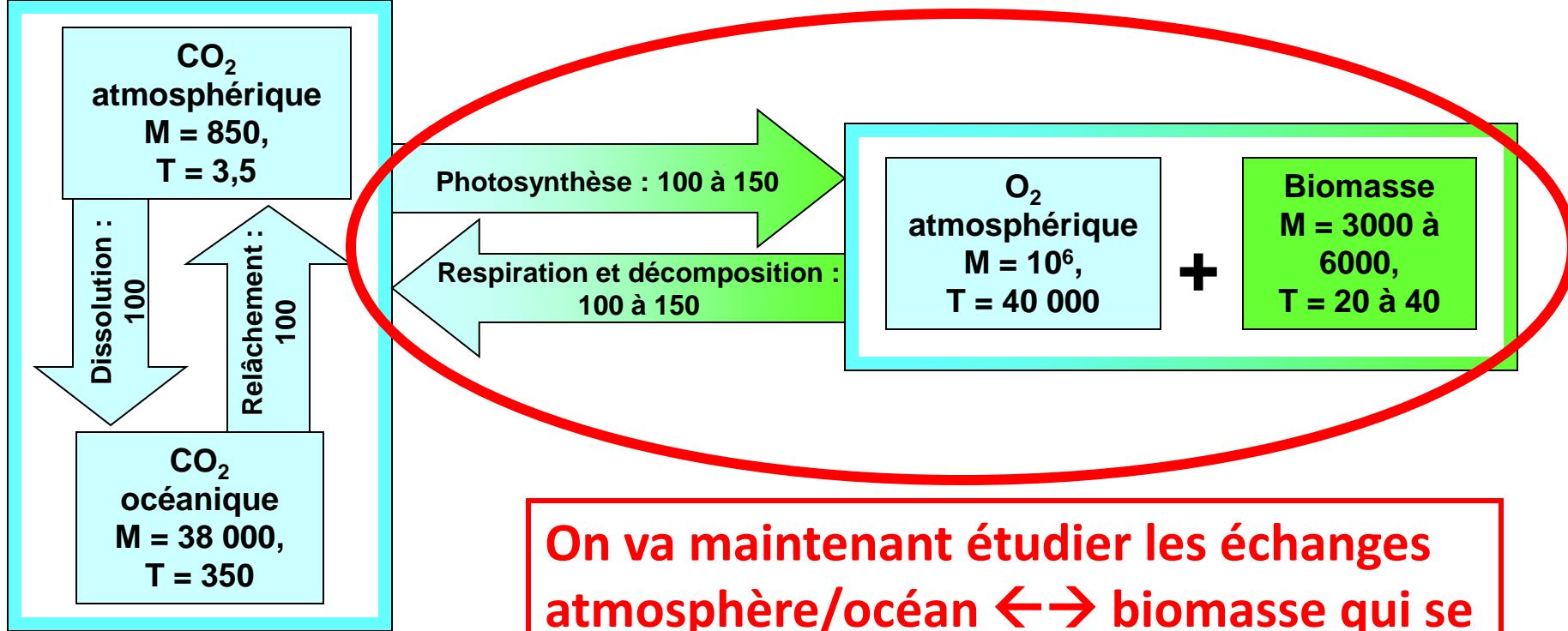


Si, pour une raison  $x$ , la planète se réchauffe un petit peu  $\rightarrow$  l'océan se réchauffe un petit peu  $\rightarrow$  un petit peu de  $\text{CO}_2$  quitte l'océan et va dans l'atmosphère  $\rightarrow$  l'effet de serre augmente  $\rightarrow$  la température de l'air et de la mer augmente  $\rightarrow$  du nouveau  $\text{CO}_2$  quitte l'eau de mer  $\rightarrow$  l'effet de serre augmente encore  $\rightarrow$  la température augmente encore  $\rightarrow$  du  $\text{CO}_2$  quitte encore la mer  $\rightarrow$  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 l'une des causes possibles (et pas la seule) de l'emballement possible et incontrôlable du réchauffement climatique mondial. Les climatologues craignent l'arrivée de tels emballements si l'augmentation actuelle dépasse 2° (l'enjeu de la COP 21).**

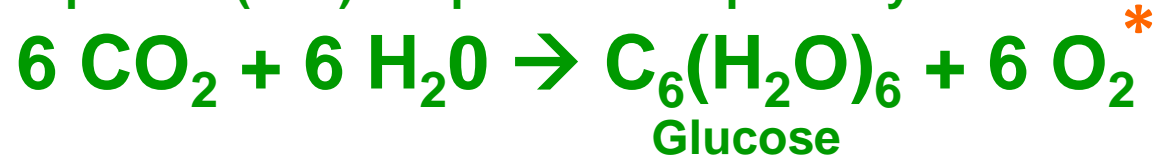




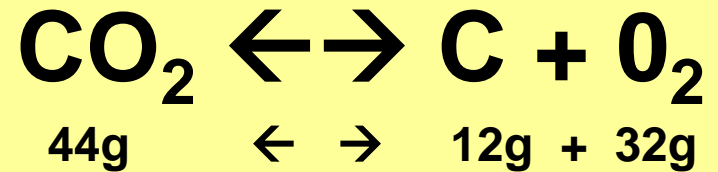
**On va maintenant étudier les échanges atmosphère/océan  $\leftrightarrow$  biomasse qui se font surtout grâce à la photosynthèse et à la respiration, avec comme conséquence « annexe » la production ou la consommation d'O<sub>2</sub> (di-oxygène) que les « vieux » comme moi appellent tout simplement « oxygène ».**

# PHOTOSYNTHÈSE

Équation (très) simplifiée de la photosynthèse :



Encore plus simplifié :

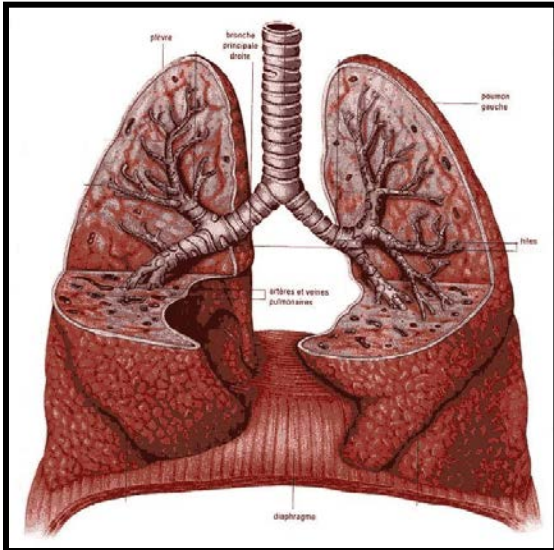


Encore plus simplifié :



Équation simplifiée de la respiration :

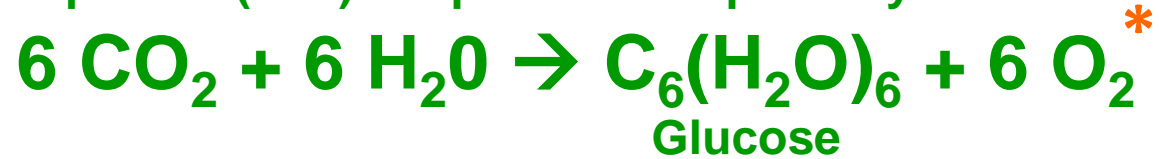
# RESPIRATION



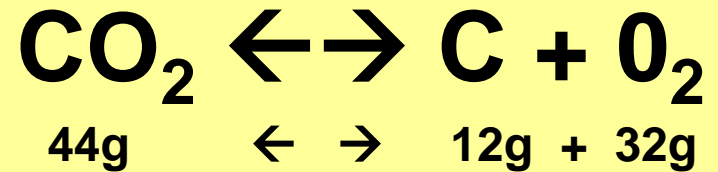


# PHOTOSYNTHÈSE

Équation (très) simplifiée de la photosynthèse :

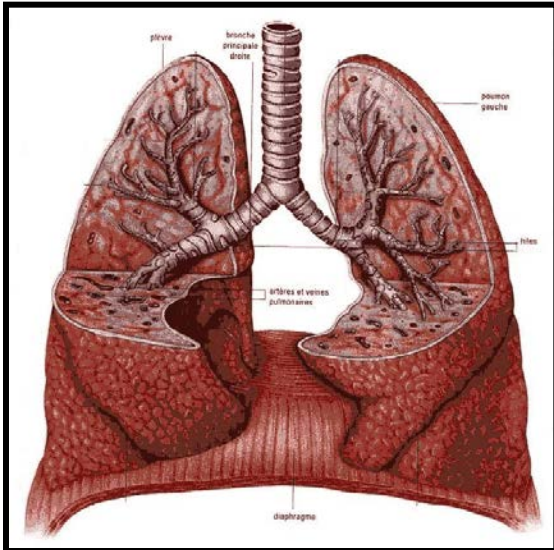


Encore plus simplifié :



Encore plus simplifié :

**O<sub>2</sub> libéré et carbone fixé par la photosynthèse sont dans un rapport massique de 32 / 12**



## LE CARBONE DE JULES CESAR

**I** - Un végétal de 100 kg contient environ 10 kg de carbone. On brûle ce végétal, et tout son carbone passe dans l'atmosphère ou dans l'océan sous forme de dioxyde de carbone.

Calculez la proportion approximative que représente le carbone contenu dans le premier végétal par rapport à celui contenu dans le système atmosphère - océan - biomasse en supposant un mélange parfait ?

On rappelle que le système atmosphère-océan-biomasse contient environ 40 000 GT de carbone.

L'ensemble (océan-atmosphère-biomasse), mélange que nous appellerons "carbone superficiel" contient environ 40000 GT de Carbone, soit  $4 \cdot 10^{16}$  kg.

Un végétal contenant 10 kg de C contient donc une proportion de :

$$10 / 4 \cdot 10^{16} = 2,5 \cdot 10^{-16} \text{ du carbone "superficiel".}$$

**II** - On brûle ce 1er végétal, on attend que son CO<sub>2</sub> se mélange bien. Puis un 2ème végétal pousse, en incorporant aussi 10 kg de C. Calculez la masse de carbone contenu dans le deuxième végétal et ayant appartenu auparavant au premier. Calculer à combien d'atome de Carbone cela correspond-il (on rappelle que N atomes de carbone ont une masse de 12 g, avec N = Nombre d'Avogadro =  $6,02 \cdot 10^{23}$ )

Le premier végétal brûle, et son carbone se mélange au carbone superficiel. Il y est donc présent avec la proportion  $2,5 \cdot 10^{-16}$ .

Notre 2ème végétal, qui contient 10 kg de C, a donc incorporé :  $10 \times 2,5 \cdot 10^{-16} = 25 \cdot 10^{-16}$  kg de C, soit

$$25 \cdot 10^{-13} \text{ g de C ayant appartenu au premier végétal}$$

$6 \cdot 10^{23}$  atomes de C pèsent 12g, 1 g de C en contiendra 12 fois moins, et  $2,5 \cdot 10^{-13}$  en contiendront  $2,5 \cdot 10^{-13}$  fois plus :  $(6 \cdot 10^{23} \times 2,5 \cdot 10^{-13}) / 12 = 1,25 \cdot 10^{10} = 12,5$  milliards.

Un être vivant de 100 kg, contenant 10 kg de C, contient 12,5 milliards d'atomes de carbone ayant appartenu à un autre être vivant de 100 kg ayant vécu avant lui, si ce 1er être a été complètement décomposé.





**III** - Un humain adulte contient aussi environ 10 kg de carbone. On suppose qu'un habitant de l'antiquité, Jules César par exemple, n'a pas été momifié, que son corps s'est complètement décomposé, et que le dioxyde de carbone qui en est issu s'est bien mélangé dans l'océan, l'atmosphère et la biomasse.

Combien un adulte vivant actuellement possède-t-il d'atomes de carbone ayant appartenu à Jules César le jour de sa mort ?

Les êtres humains adultes possèdent environ 10 kg de carbone, comme les végétaux du (I) et (II). Le même raisonnement et les mêmes calculs peuvent alors être faits : un adulte d'aujourd'hui contient donc 12,5 milliards d'atomes de C présents dans un autre adulte au moment de sa mort si celui-ci a été entièrement décomposé (incinération, enterrement et décomposition totale ...) et si son carbone s'est bien mélangé dans l'atmosphère et l'océan. C'est par exemple le cas de Jules César, ou de Charlemagne, ou de votre arrière-arrière-arrière grand père :

**chaque adulte d'aujourd'hui possède 12,5 milliards d'atomes de Carbone ayant appartenu à Jules César**

ou un de ces personnages historiques le jour de leur mort (ce n'est pas le cas du carbone de Ramses 2, qui a été momifié).

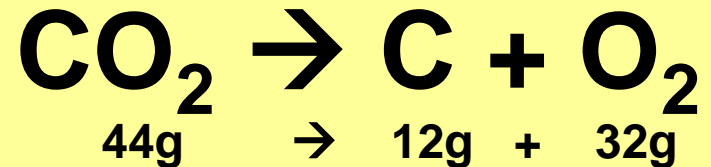
Mais n'oublions pas que ces 12,5 milliards d'atomes ne représentent qu'un dixième de millième de milliardième de gramme !



# Photosynthèse et production d'O<sub>2</sub>



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



À chaque fois que la photosynthèse produit de la matière organique contenant 12 g de Carbone, il se libère 32 g d'O<sub>2</sub>.

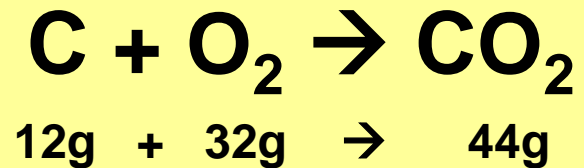
Cet O<sub>2</sub> s'accumule-t-il dans l'atmosphère ?

**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'O<sub>2</sub> libérés lors de sa production.

L'O<sub>2</sub> est également produit et consommé par les écosystèmes à l'équilibre. Le bilan est nul, et **l'O<sub>2</sub> ne s'accumule pas 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 CO<sub>2</sub>, 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 meurt.**

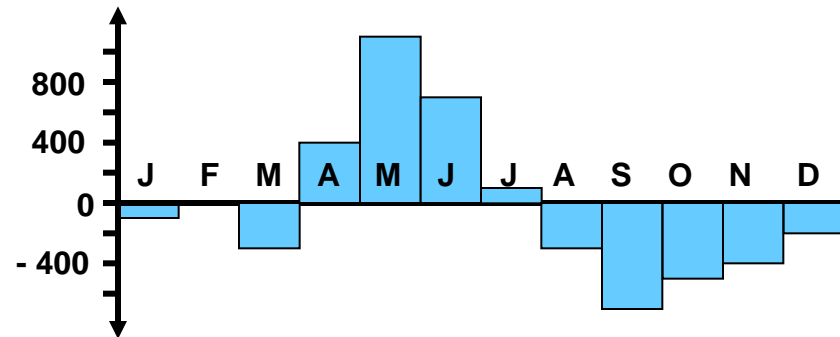
**Insectes, champignons... s'en nourrissent, et en quelques années, il n'en reste rien. Pour ce faire, champignons et insectes ont absorbé 10 tonnes d'oxygène, décomposé les 10 tonnes de bois et libéré de l'eau et 15 tonnes de CO<sub>2</sub>.**

**On est revenu au point de départ !**

Sur plusieurs années, une forêt « à l'équilibre » ne produit ni d'absorbe d'O<sub>2</sub> ou de CO<sub>2</sub>

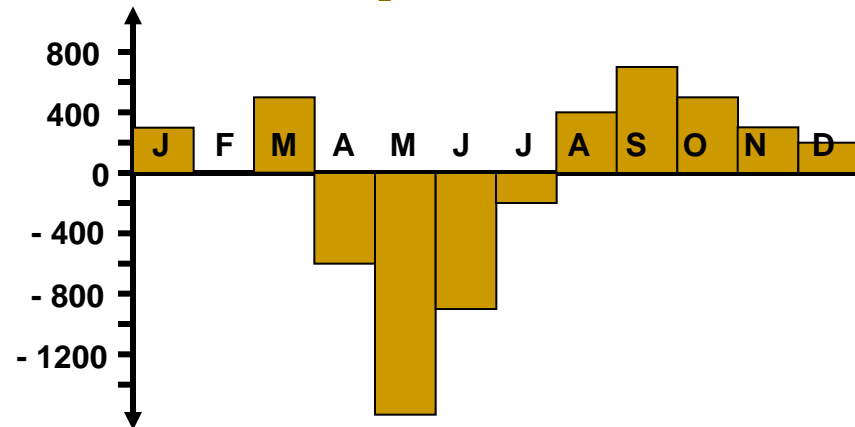


Production d'O<sub>2</sub>



Consommation d'O<sub>2</sub>

Production de CO<sub>2</sub>



Consommation de CO<sub>2</sub>

Production / consommation mensuelles d'O<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub> d'une « vieille » forêt de bouleaux au Québec (en tonne / km<sup>2</sup>).



**Cette idée des forêts et du (phyto)plancton qui font l'oxygène qu'on respire est profondément enracinée dans l'inconscient collectif. Un exemple « du jour » : une « fresque » dans le métro parisien à l'occasion de la COP 21. Analysons deux extraits.**

**« 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

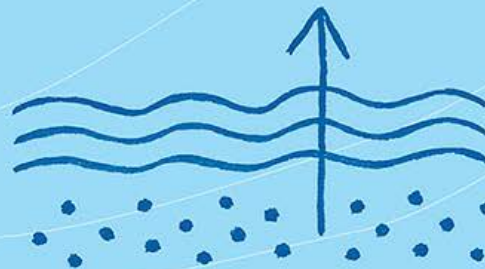


PLUS DE  
**50%**  
DE L'OXYGÈNE

QUE NOUS RESPIRONS EST PRODUIT  
PAR LE PLANCTON

*plancton*

*oxygène*  
50%

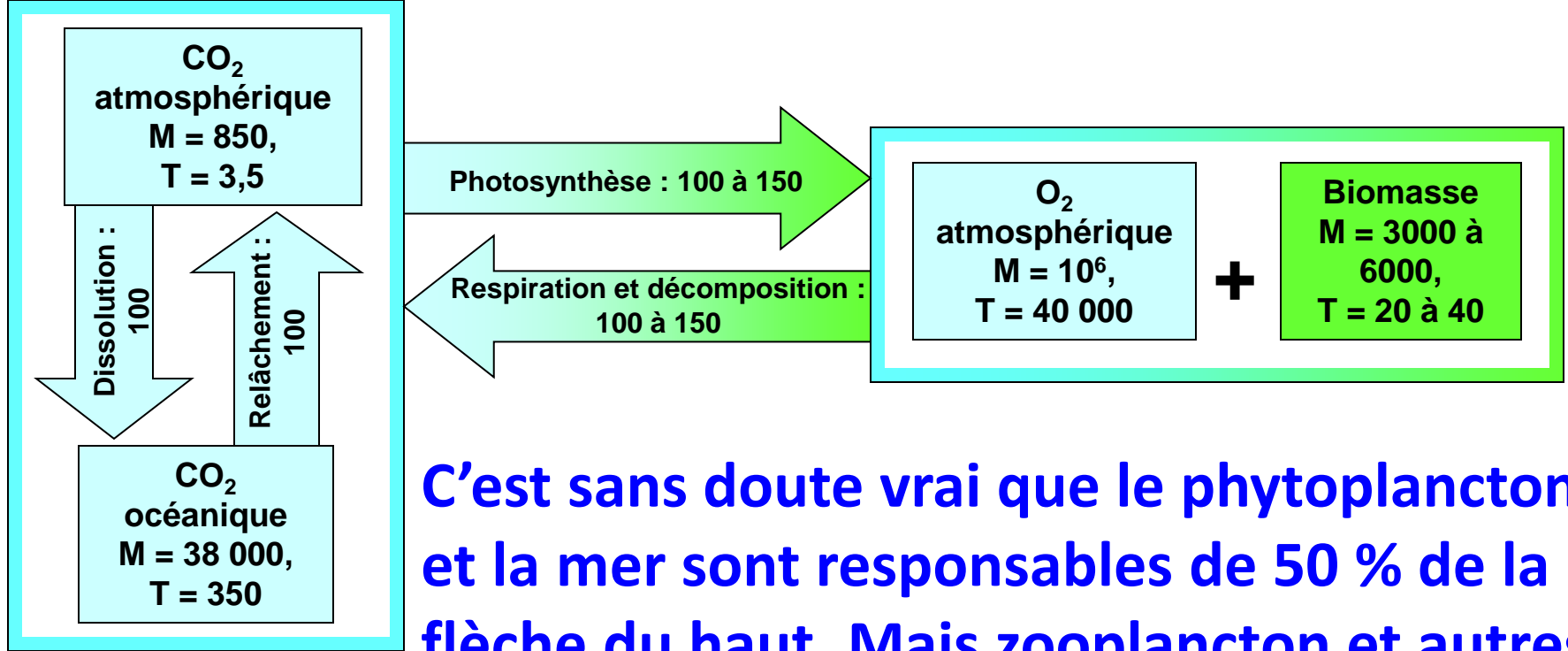




# E JE RESPIRE

## 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'O<sub>2</sub> que « je » respire ? Et cette phrase qui se répète (sans réfléchir), se 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...**



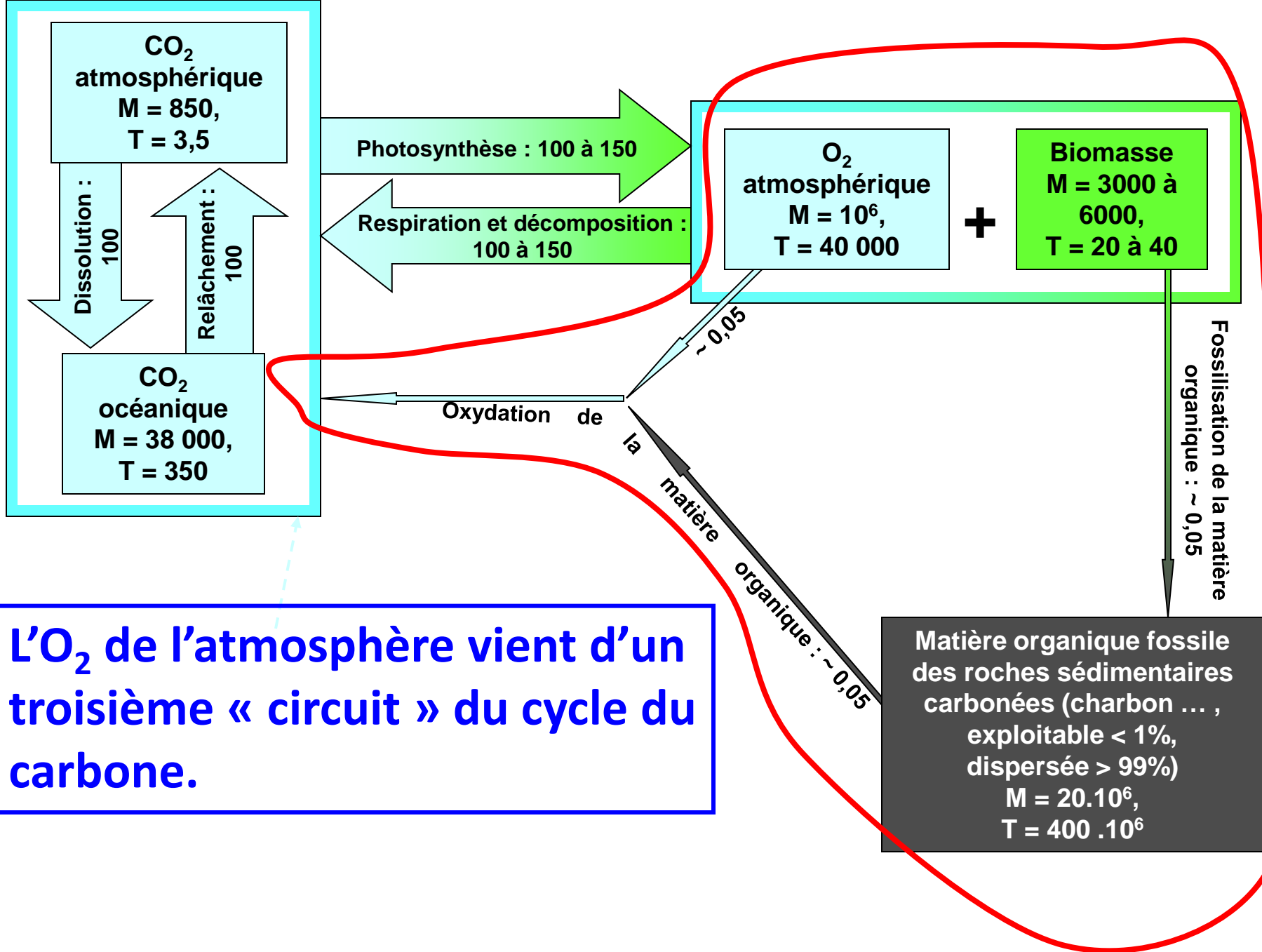
L'O<sub>2</sub> ne devrait donc exister dans l'atmosphère que dans la proportion 32 / 12 par rapport au carbone de la biomasse.

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'O<sub>2</sub>

Or l'atmosphère contient environ  
1 000 000 Gt d'O<sub>2</sub>

**D'où vient ce million de Gt d'O<sub>2</sub>,** qui n'a pas été produit ni par l'Amazonie, ni par le plancton..., qui n'en ont produit que 8 000 Gt ?





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

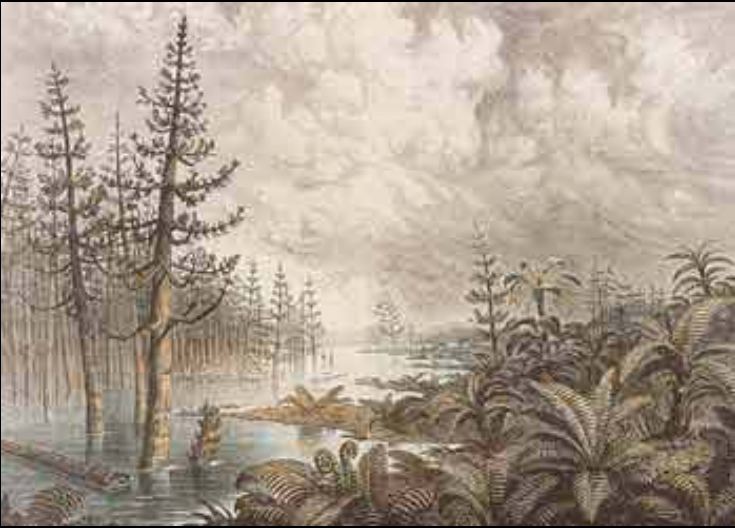






**... du charbon, dans le cas de forêts, du pétrole ou du carbone « dispersé » dans des marnes noires dans le cas du plancton...**

**D'où vient donc l'O<sub>2</sub> de l'atmosphère, celui que nous respirons en ce moment ?**



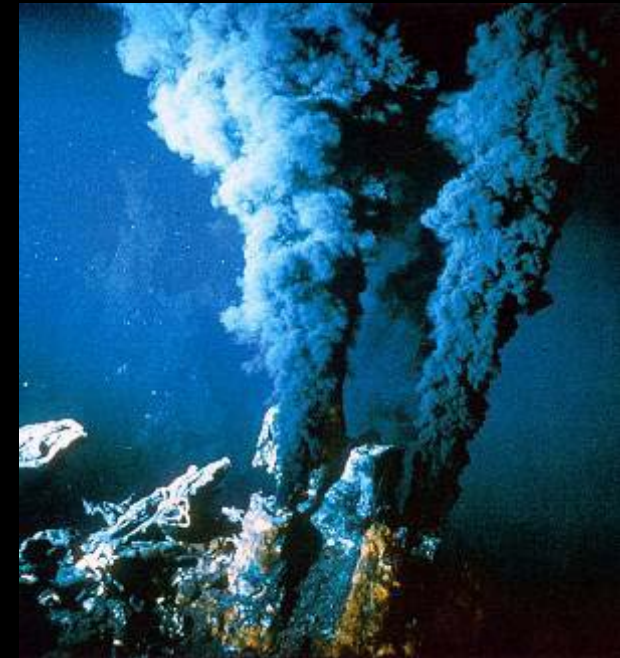
**De la photosynthèse ancienne quand (et seulement quand) celle-ci a été suivie d'une fossilisation et d'une sédimentation de matière organique.**

**À chaque fois que des processus géologiques entraînent la fossilisation de 12 g de carbone organique, les 32 g d'O<sub>2</sub> (sous-produit 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'O<sub>2</sub> qui s'accumulent dans l'atmosphère.**



**Mais comme il se fossilise en permanence de la matière organique, l'O<sub>2</sub> atmosphérique devrait augmenter, ce qu'il ne fait pas. C'est que l'O<sub>2</sub> est consommé par l'érosion/altération/oxydation des roches réduites, comme les « marnes noires », appelées « black shales » en anglais, par l'hydrothermalisme,**

...







Les 10 à 20 millions de Gt de carbone réduit des roches sédimentaires ont comme contrepartie stœchiométrique  $10 \text{ à } 20 \cdot 10^6 \times 32/12 = 26 \text{ à } 52 \cdot 10^6$  Gt d'O<sub>2</sub> (arrondissons à 40 millions de Gt d'O<sub>2</sub>), 40 millions de Gt d'O<sub>2</sub> 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 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (gypse), de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (BIF ou cuirasse latéritique) ...



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



O<sub>2</sub> atmosphérique

+



Sulfates

+



Oxydes ferriques

=



Matière organique des sédiments

+

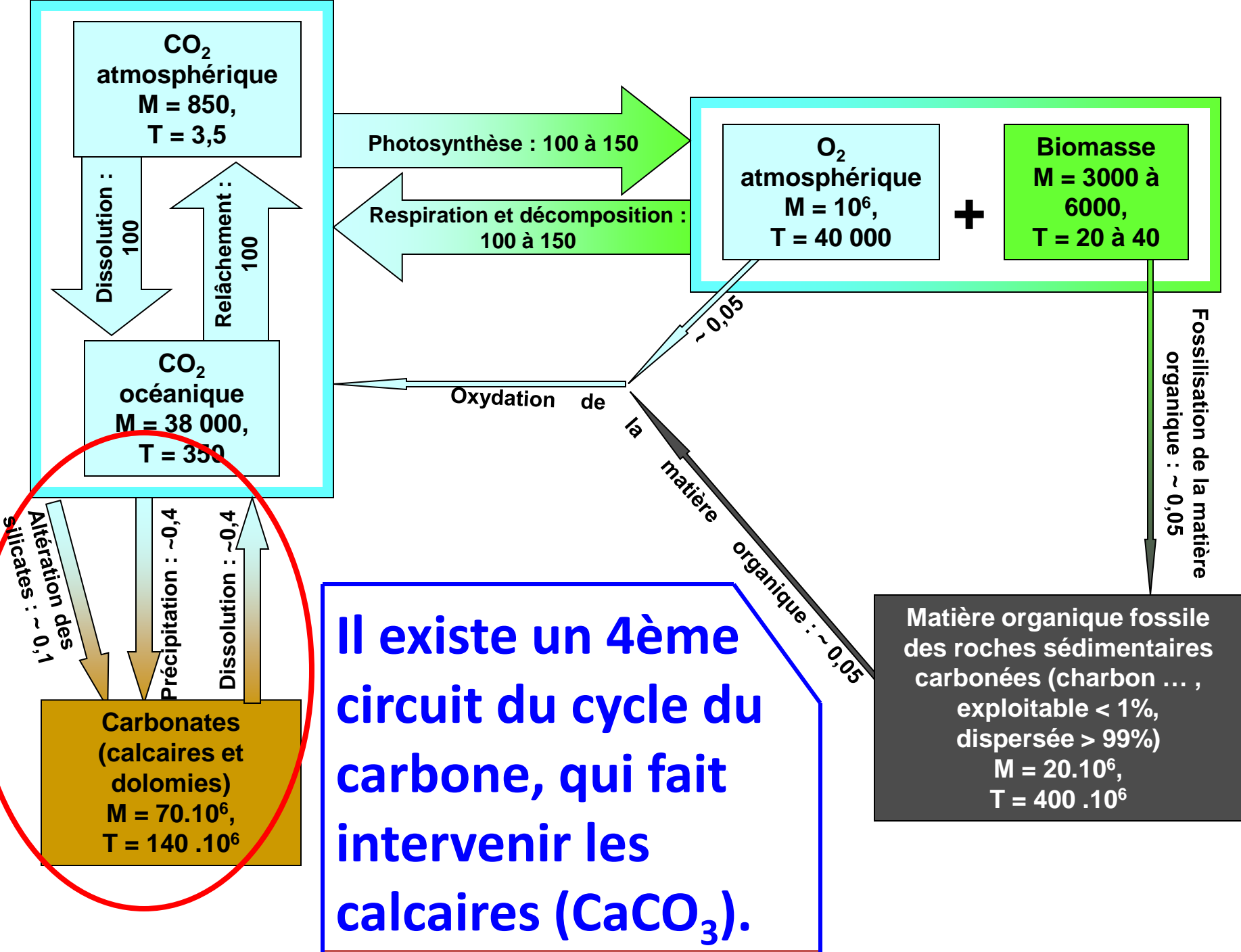


Charbon

+



Hydrocarbures







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

Précipitation

Calcaire



La « fabrication » du  
calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) qui, entre  
parenthèse, dégage du  $\text{CO}_2$







**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  $\text{CO}_2$  (ce qui absorbe du  $\text{CO}_2$ )





ophie : Pierre Thomas



Précipitation

Dissolution



Equilibre totalement réversible, réglé par la vie ( $\Phi$ ), le Ph, la Température. Fonctionnement en circuit fermé. A long terme,  $\text{CO}_2$  reste constant

Sur le long terme, ces réactions s'équilibrent, et le bilan est nul si on est à  $\text{Ca}^{2+}$  constant. Mais ...



Une autre réaction, ou plutôt une suite de réactions, se passent dans et sous le sol, là où la roche est altérée 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  $\text{CO}_2$



silicate calcique

Photographie : Pierre Thoma

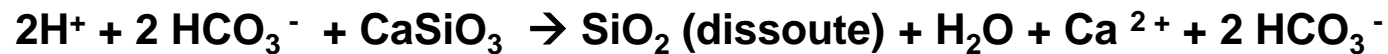


# Altération des silicates calciques et « consommation » de CO<sub>2</sub>

Première étape : dissolution du CO<sub>2</sub>



Deuxième étape : altération des silicates calciques (exemple CaSiO<sub>3</sub>)



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



La wollastonite (CaSiO<sub>3</sub>), le plus simple des silicates calciques, assez rare

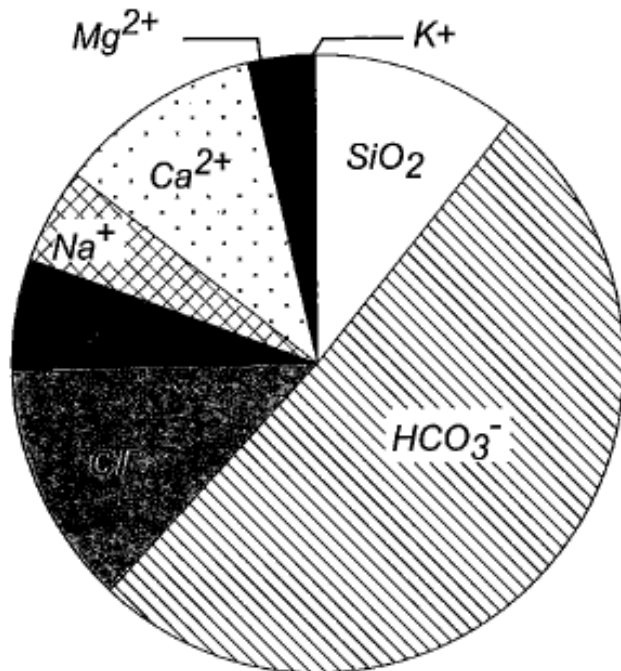
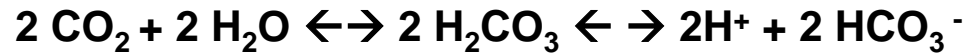


Figure 3.4. Du carbone dans une rivière drainant des roches dépourvues de carbone : les eaux guadeloupéennes

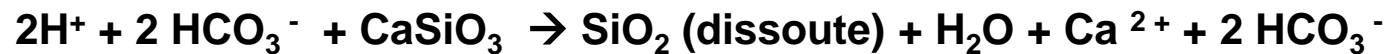
La rivière draine une zone volcanique andésitique dépourvue de calcaire. Le camembert montre que les deux substances dissoutes les plus abondantes sont la silice (sous la forme d'acide silicique) et les ions bicarbonates. Puisque la teneur en carbone des andésites reste très négligeable, celle de la rivière en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> implique qu'un processus particulier enrichit l'eau en bicarbonates. Ce processus n'est pas la dissolution passive de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub>

Première étape : dissolution du CO<sub>2</sub>

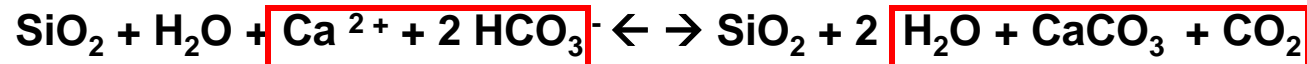


Deuxième étape : altération des silicates calciques (exemple CaSiO<sub>3</sub>)



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 (CaSiO<sub>3</sub>),  
le plus simple des silicates  
calciques, assez rare





Et ça « pompe » d'autant mieux le CO<sub>2</sub> que la roche est riche en silicates calcique (plagioclases, pyroxènes, amphiboles...). L'altération d'un basalte « pompe » plus de CO<sub>2</sub> que l'altération d'un granite, la seule roche que, pourtant, sait altérer l'Éducation nationale.

Oh, du basalte qui s'altère en boules. Mais alors, il n'y a pas que le granite qui s'altère en boule, et toutes les boules de basalte ne sont pas des pillows !





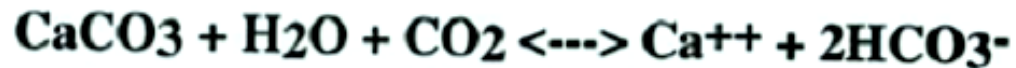
Et ça « pompe » d'autant mieux le CO<sub>2</sub> que la roche est riche en silicates calcique (plagioclases, pyroxènes, amphiboles...). L'altération d'un basalte « pompe » plus de CO<sub>2</sub> que l'altération d'un granite, la seule roche que, pourtant, sait altérer l'Éducation nationale.

Oh, du basalte qui s'altère en boules. Mais alors, il n'y a pas que le granite qui s'altère en boule, et toutes les boules de basalte ne sont pas des pillows !





**Grande différence avec la réaction classique de précipitation des carbonates : la réaction (2) :**



**est réversible dans les conditions de surface, et à l'échelle de la Terre et sur une longue période, elle "tourne en rond", précipitant ici et dissolvant là, ce qui ne change rien.**

**La réaction d'altération (1)**



**est, elle, irréversible dans les conditions de surface. La masse de CO<sub>2</sub> absorbée l'est définitivement, bien que le CaCO<sub>3</sub> nouvellement formé puisse rentrer dans le cycle (2) qui ne change rien.**

**Depuis des générations, les programmes de l'Education Nationale altèrent du granite, en particulier ses plagioclases. En plus des boules et autres chaos granitiques, vous libérez des ions calcium, et faisiez baisser (sans le savoir) le CO<sub>2</sub> atmosphérique.**

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

+

CO<sub>2</sub>

+

Beaucoup  
d'eau

*Dans les sols*

Argile

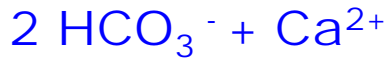
+

Calcaire

*Dans la mer*

**Cette suite de réactions chimiques très complexes  
« fabrique » de l'argile et du calcaire  
et « consomme » irréversiblement  
du CO<sub>2</sub> (≈ 0,1 Gt / an)**

## Les réactions impliquant les carbonates en surface



Précipitation

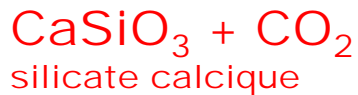
Dissolution

Équilibre totalement réversible, réglé par la vie ( $\Phi$ ...), le pH, la température. Fonctionnement en circuit fermé. À long terme,  $\text{CO}_2$  reste constant



Altération des  
silicates

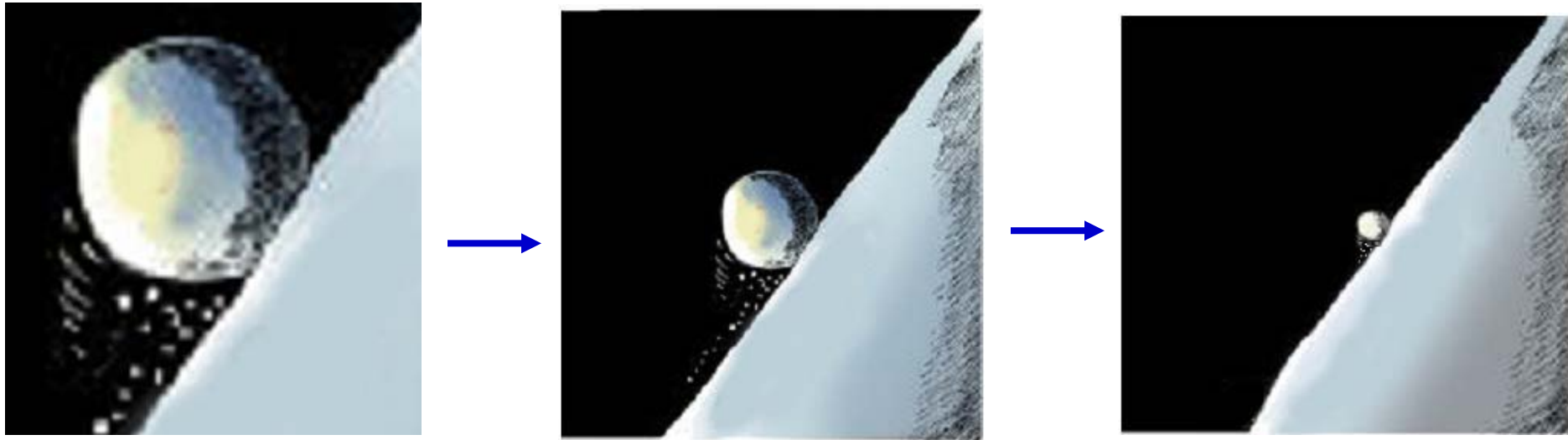
Réaction qui n'a lieu que dans un sel sens (en surface, à basse température). Consomme irréversiblement du  $\text{CO}_2$



**On peut noter que cet effet est un exemple de rétroaction négative. Si la température augmente, cela augmente l'altération des roches, donc la consommation de CO<sub>2</sub>, ce qui diminue le CO<sub>2</sub> atmosphérique, donc l'effet de serre et peut donc limiter l'augmentation de température.**

**Un anti-effet boule de neige !**

**Mais c'est une rétroaction lente !**







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

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

Questions :

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

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

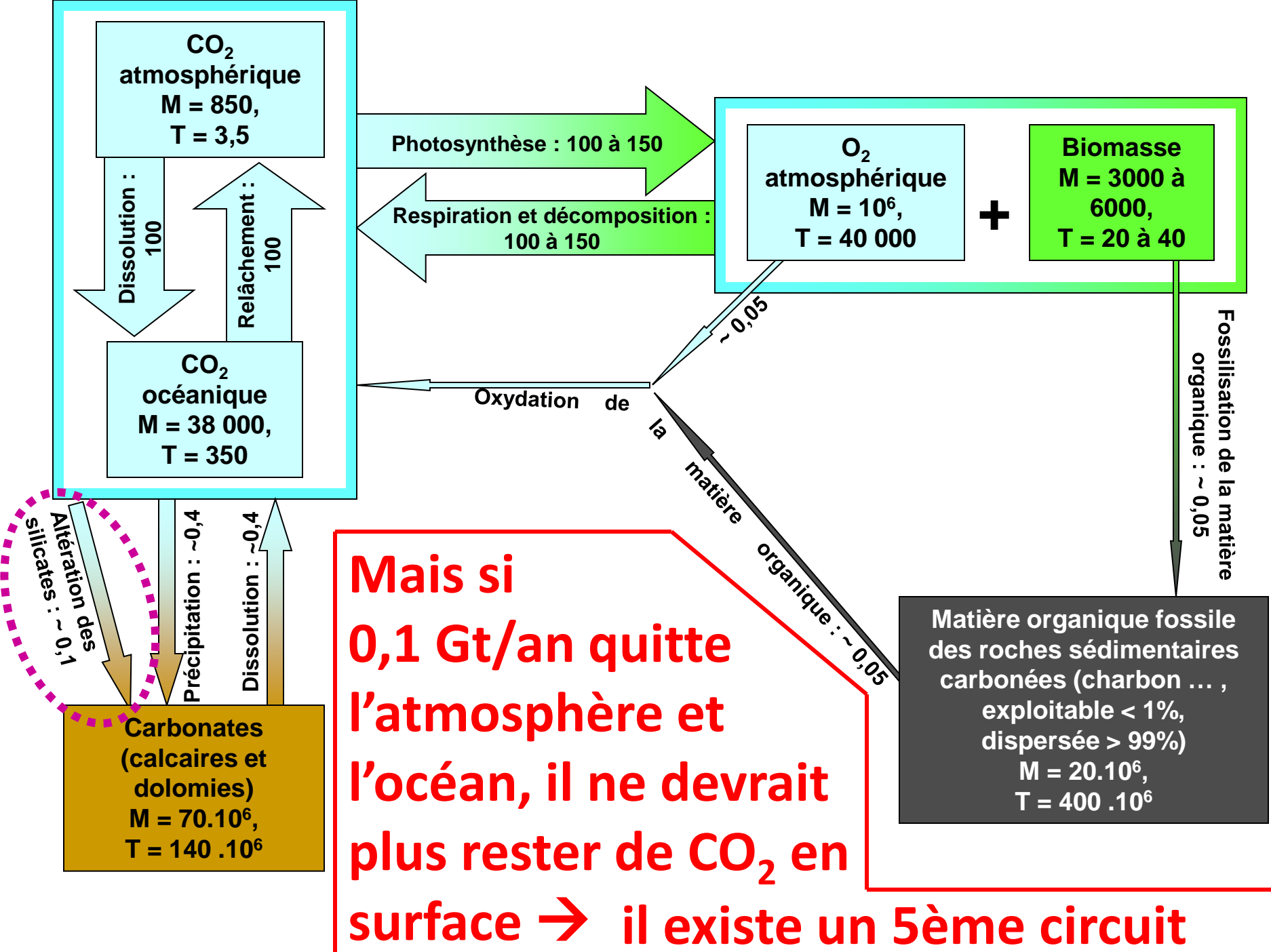
c - Calculer la masse de roches altérées et érodées en Himalaya depuis 20 M.A., et la masse de silicate calcique altéré ?  
(REPONSE :  $5,4.10^{18} \text{ KG}$  DE ROCHES ALTEREES, SOIT  $1,62.10^{17} \text{ KG}$  DE SILICATE CALCIQUE ALTERE).

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

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

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

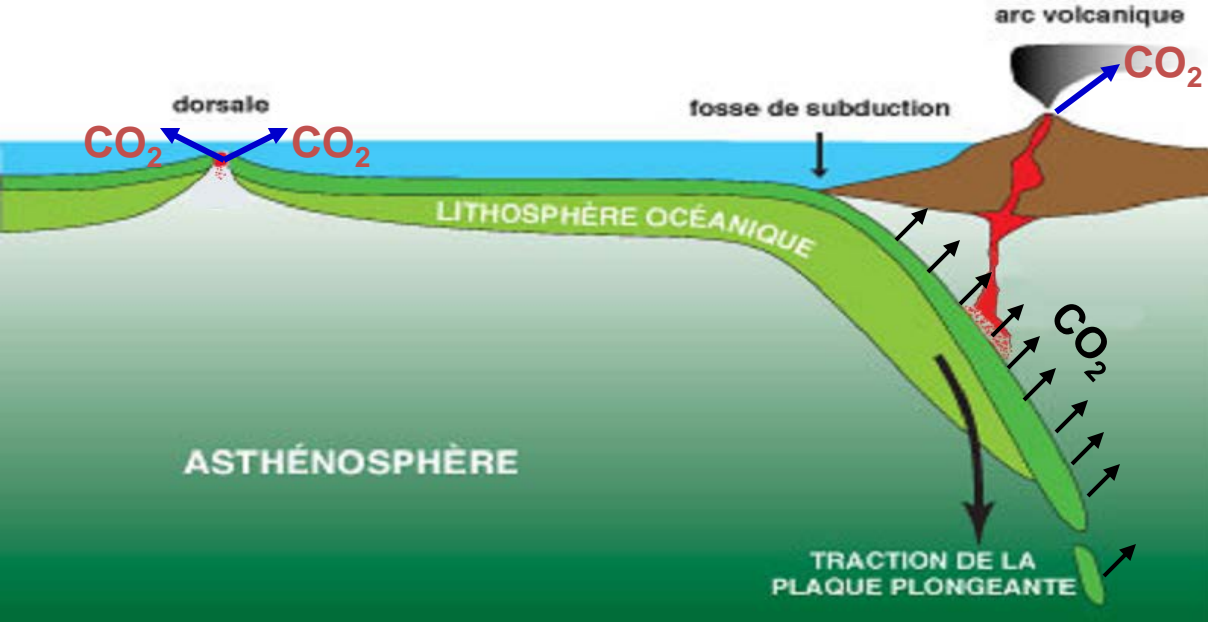
**Attention : des études récentes tendraient à prouver que la réalité n'est pas forcément aussi simple que ce modèle (qui est un transparent vieux de plus de 30 ans et qui en plus était volontairement hyper-simplifié)**





**... le volcanisme !**

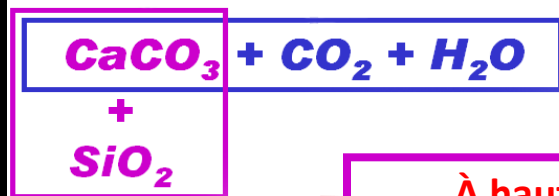




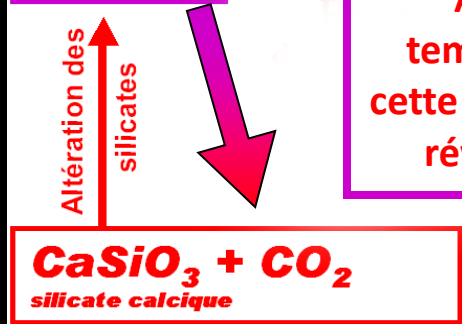
Du calcaire retourne au manteau grâce à la subduction.  
 À haute température, il subit une réaction inverse :  
 calcaire + silice (ou argile)



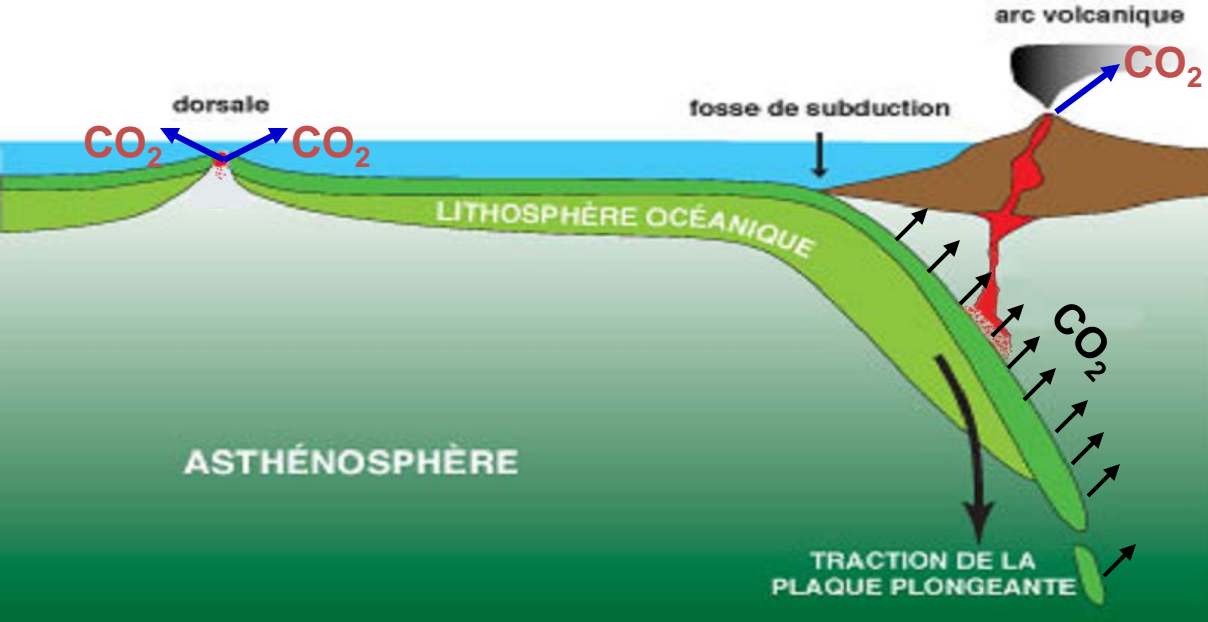
silicates de calcium + eau + CO<sub>2</sub>  
 Ce CO<sub>2</sub> retourne au manteau, et pourra ressortir par les  
 volcans. C'est une réaction (anthropique) de ce genre qui a  
 lieu dans les cimenteries



À haute température, cette réaction est réversible !



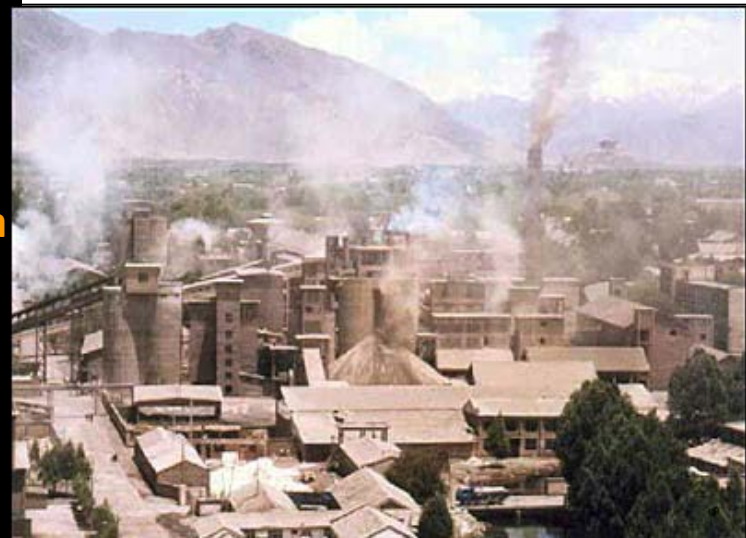


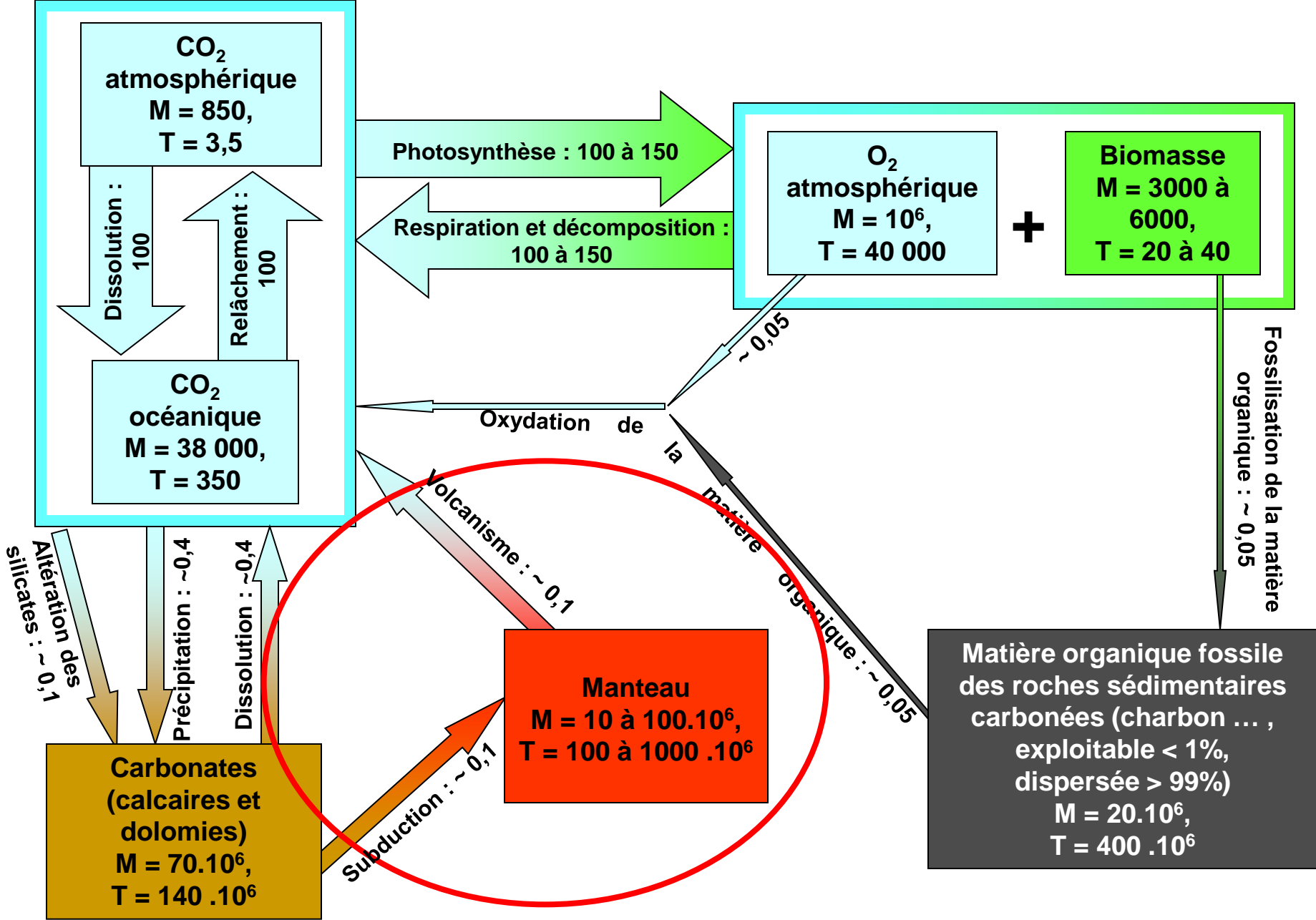


Du calcaire retourne au manteau grâce à la subduction.  
 À haute température, il subit une réaction inverse :  
 calcaire + silice (ou argile)

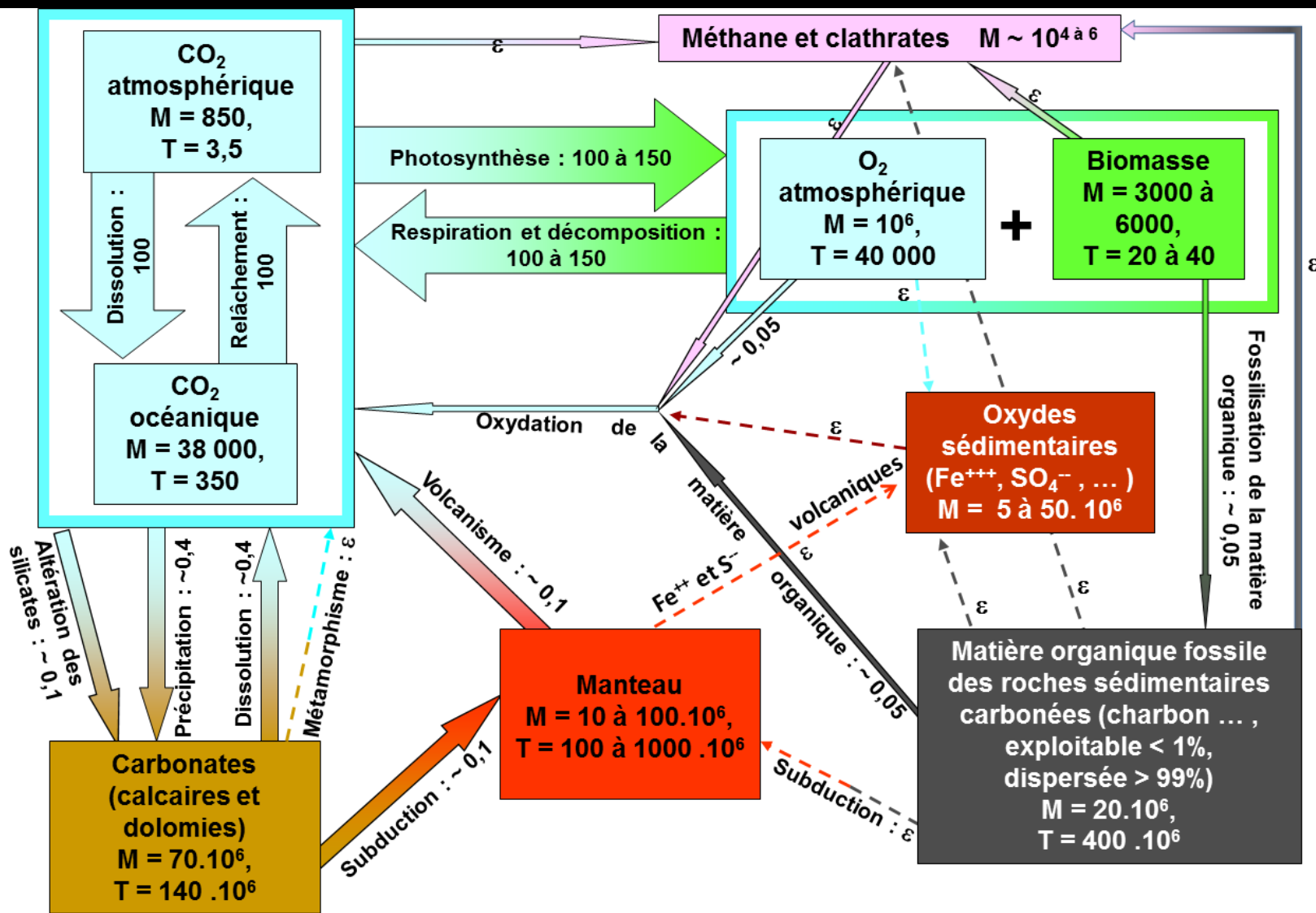


silicates de calcium + eau +  $\text{CO}_2$   
 Ce  $\text{CO}_2$  retourne au manteau, et pourra ressortir par les  
 volcans. C'est une réaction (anthropique) de ce genre qui a  
 lieu dans les cimenteries

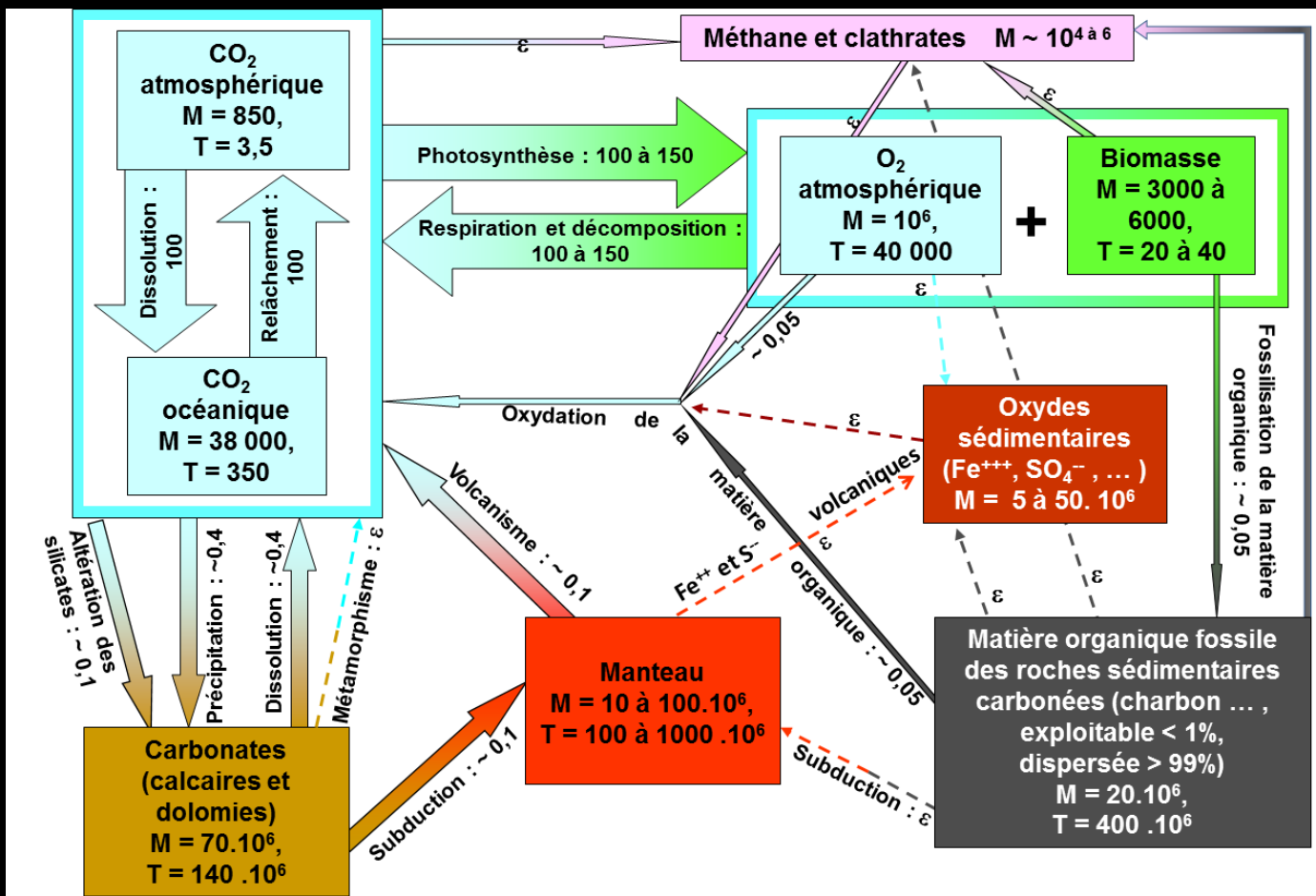




**Voici donc un cycle du carbone hyper-simplifié, le minimum des minimorum que devrait avoir compris toute personne parlant de climat.**



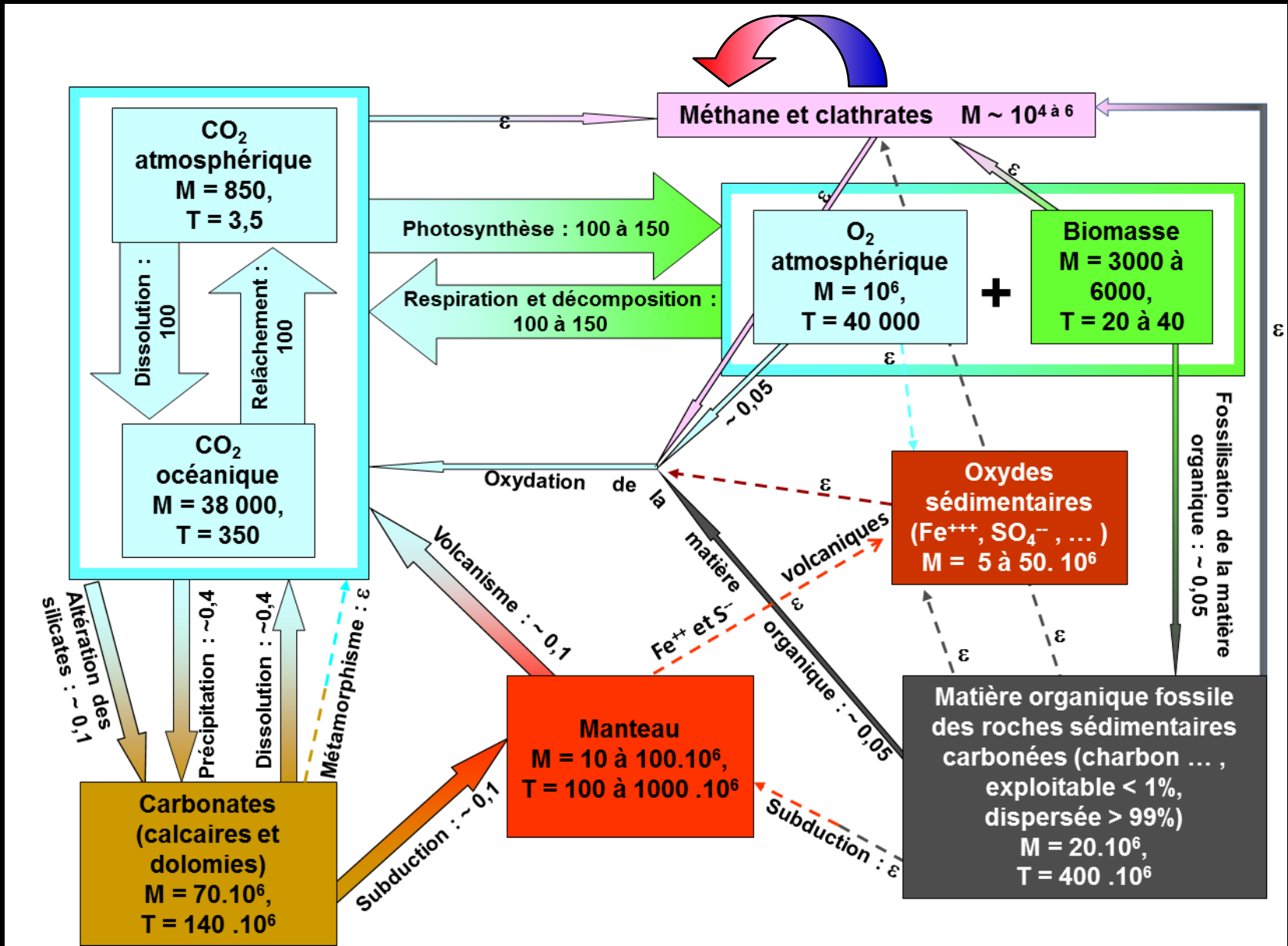
Voici un cycle du carbone un peu moins simplifié, que devrait parfaitement maîtriser toute personne prétendant s'occuper de climat. Un cycle complet tel que celui qu'on imagine en 2015, avec fermentation, chimiolithotrophie, méthane biotique ou abiotique... est « indessinable » !



**Ce cycle est souvent équilibré, mais il peut arriver des déséquilibres. Si une cause anthropique, biologique ou géologique modifie l'une de ces flèches, ça va finir par entraîner la modification de la teneur de l'atmosphère en GES (CO<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub>), donc une modification du climat mondial.**



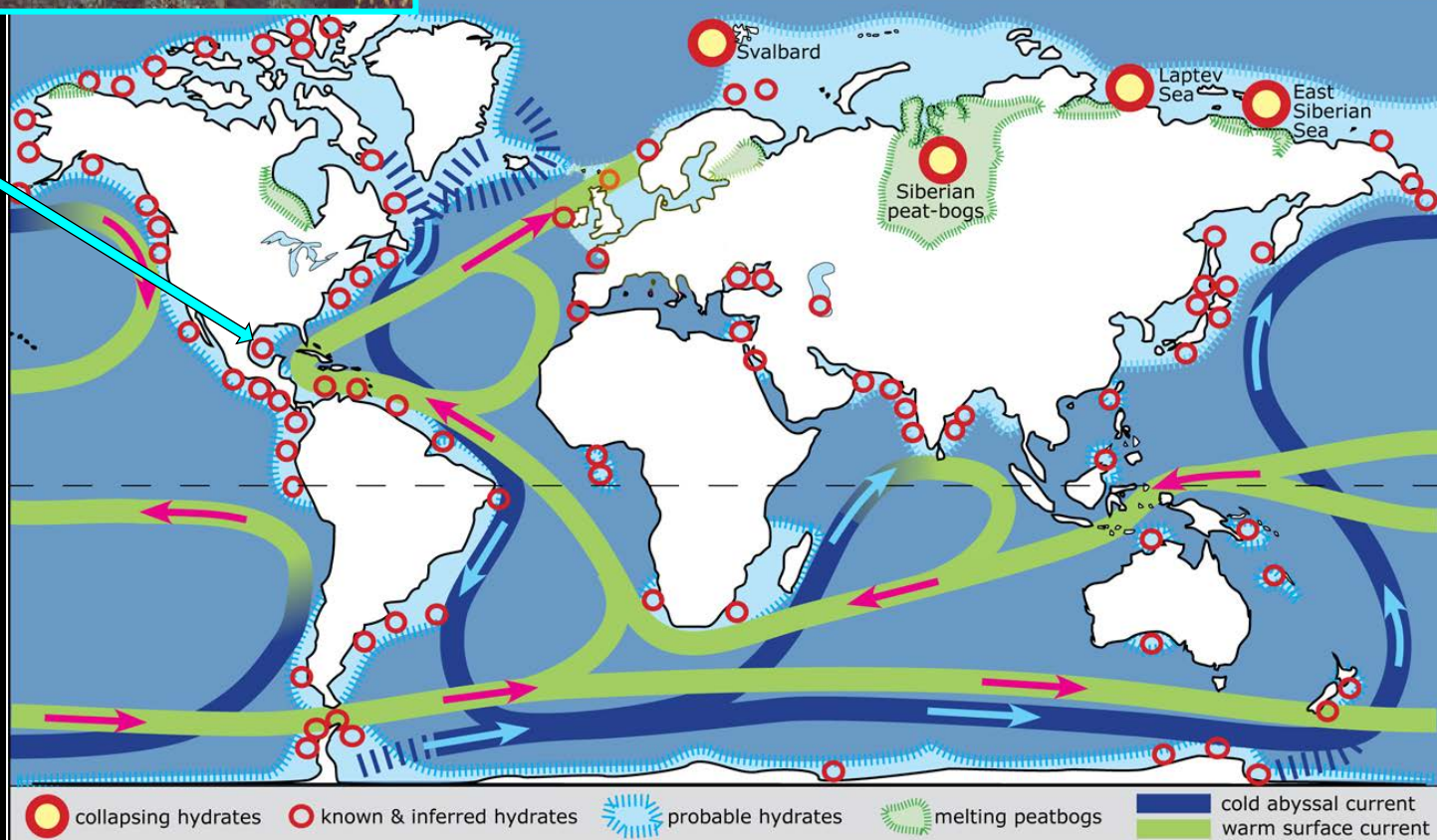
# Et voici un exemple d'emballlement possible : la déstabilisation des clathrates.



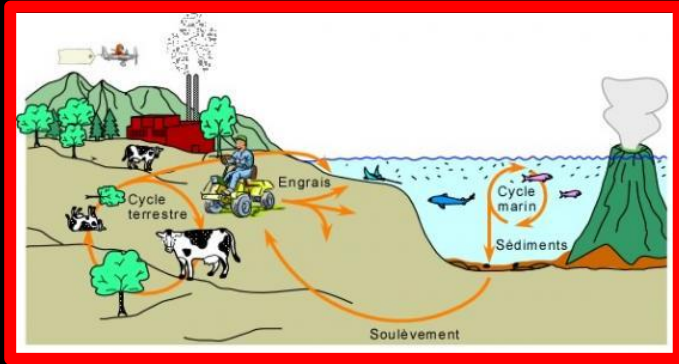
# La carte des clathrates marins et continentaux, dont ceux qui commencent à donner des signes de déstabilisation



« Colline » de clathrates au fond du Golfe du Mexique



# Cycle du carbone



**CO<sub>2</sub>  
atmosphérique**



**Effet de serre**

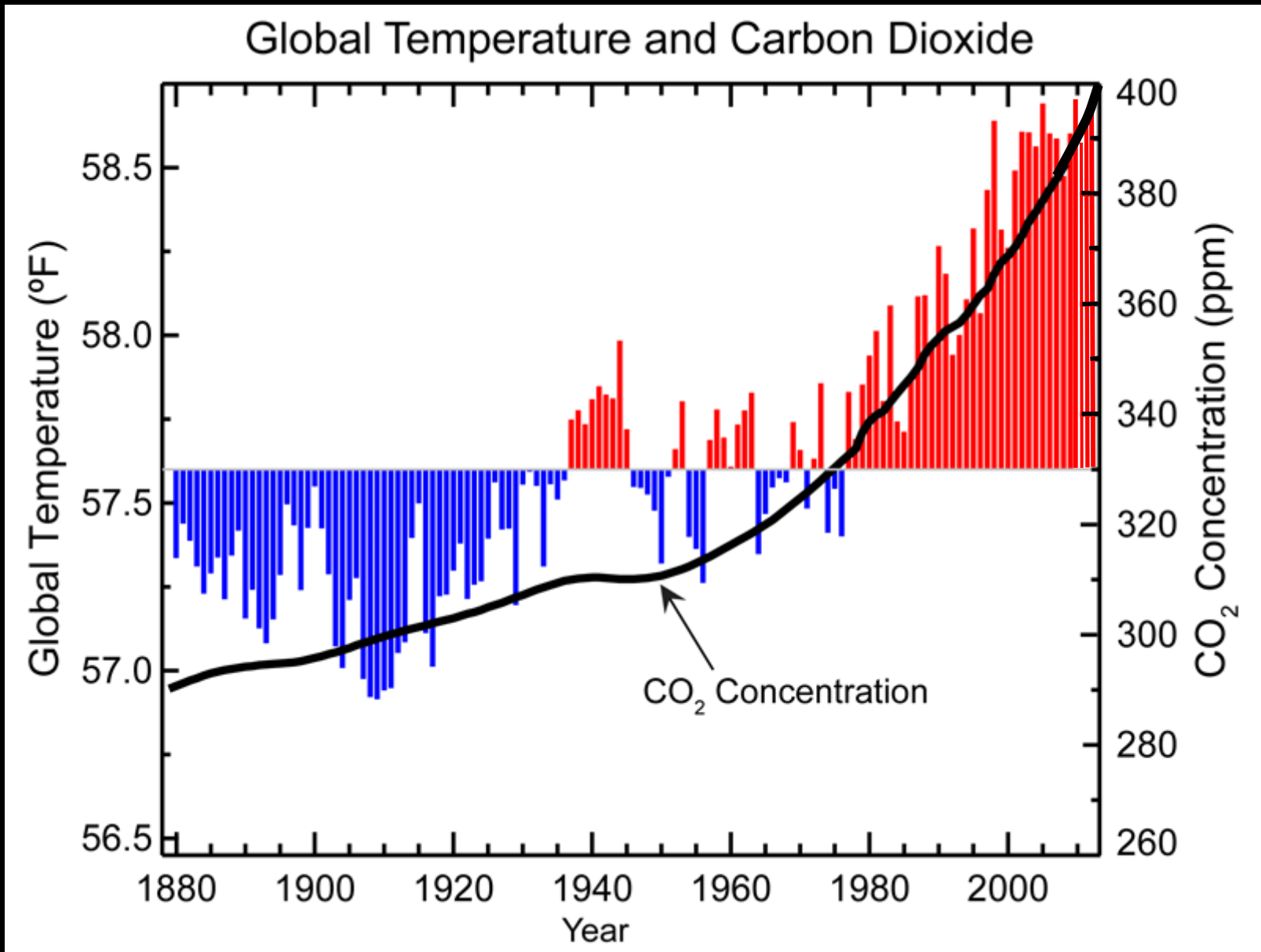


**Climat mondial**

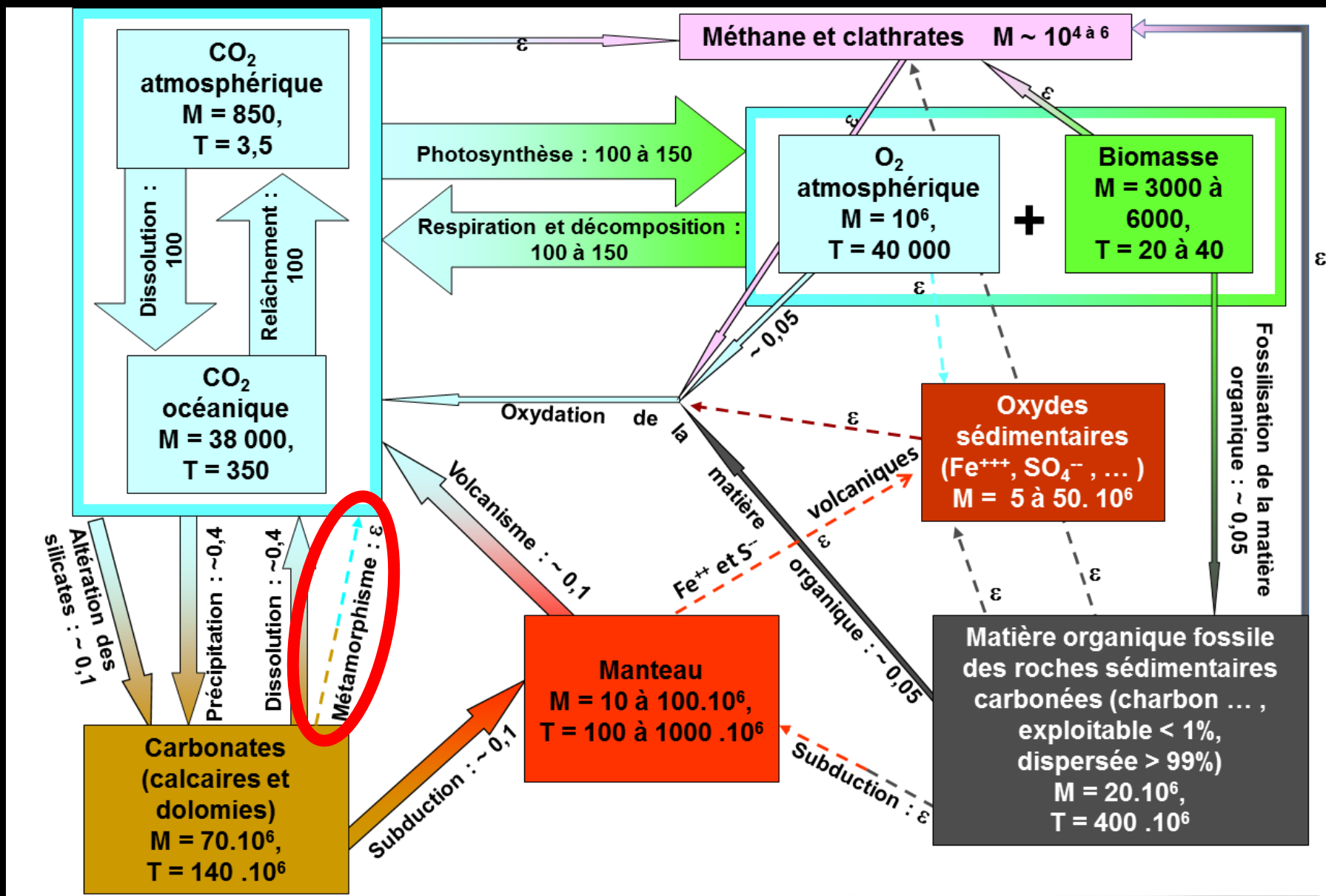


**On va maintenant voir quatre exemples de modifications du cycle du carbone qui se sont traduites par des modifications du climat mondial.**

# 1 - Les variations actuelles du cycle du carbone



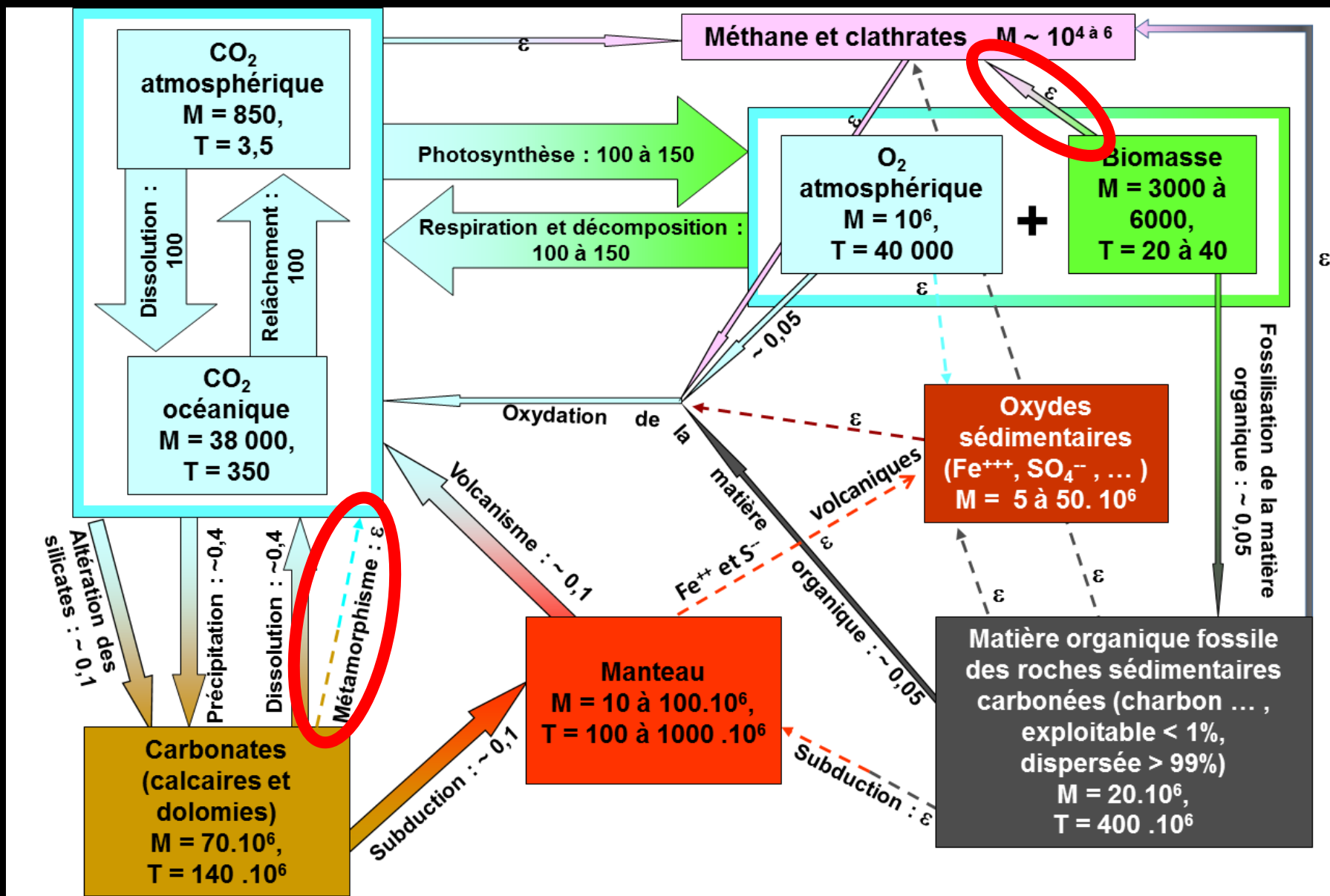




**Quelles sont les 4 principales activités humaines qui modifient le cycle du carbone et relâchent des GES ?**

# 1 : La fabrication (parce que l'utilisation) du ciment qui relâche du CO<sub>2</sub>

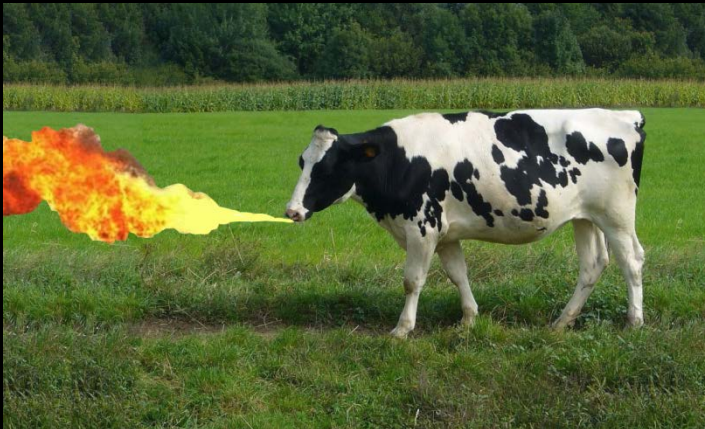




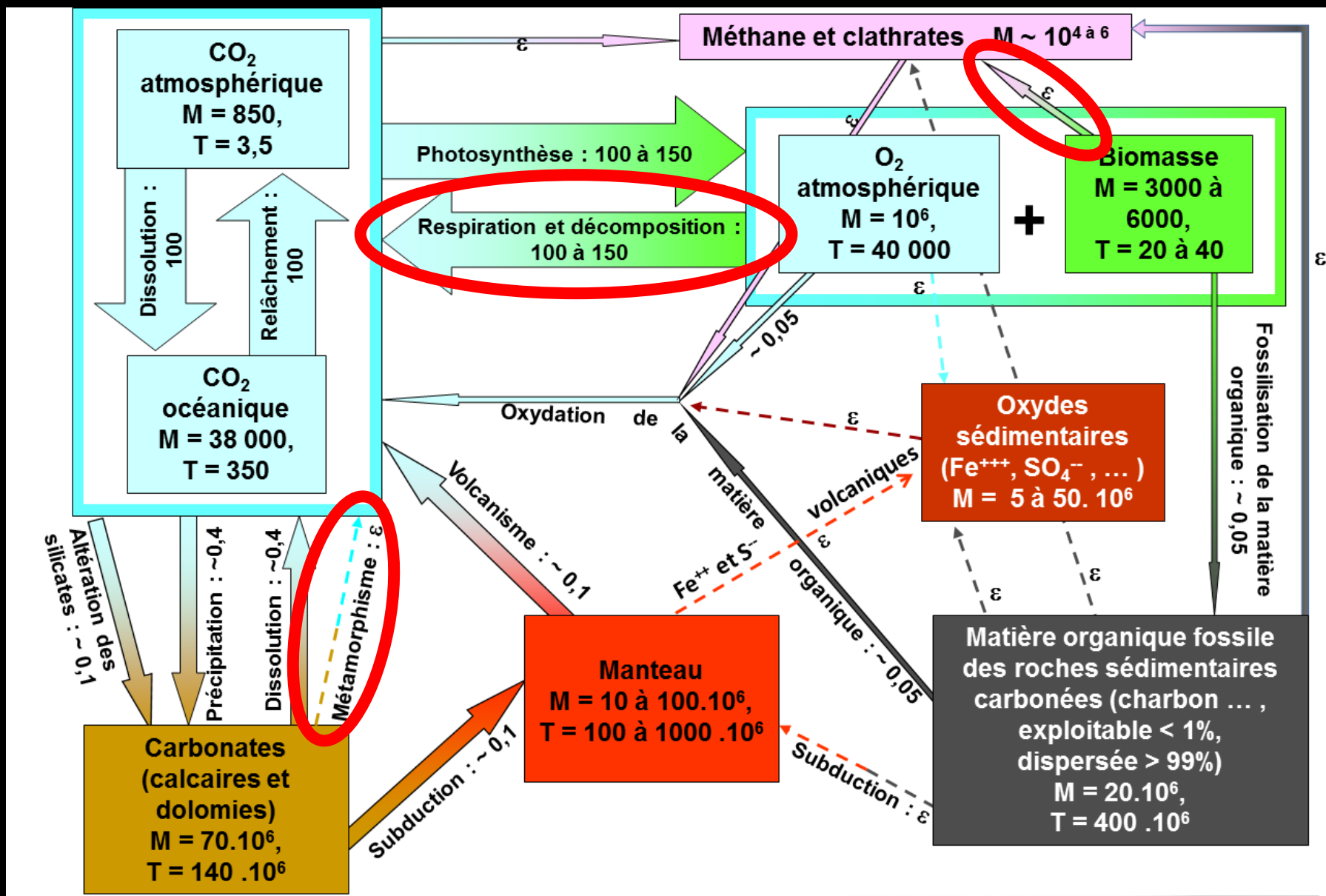
**Quelles sont les 4 principales activités humaines qui modifient le cycle du carbone et relâchent des GES ?**



## 2 : Les ruminants (vaches, moutons, chèvres...) et les rizières qui relâchent du méthane ( $\text{CH}_4$ )







**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.







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

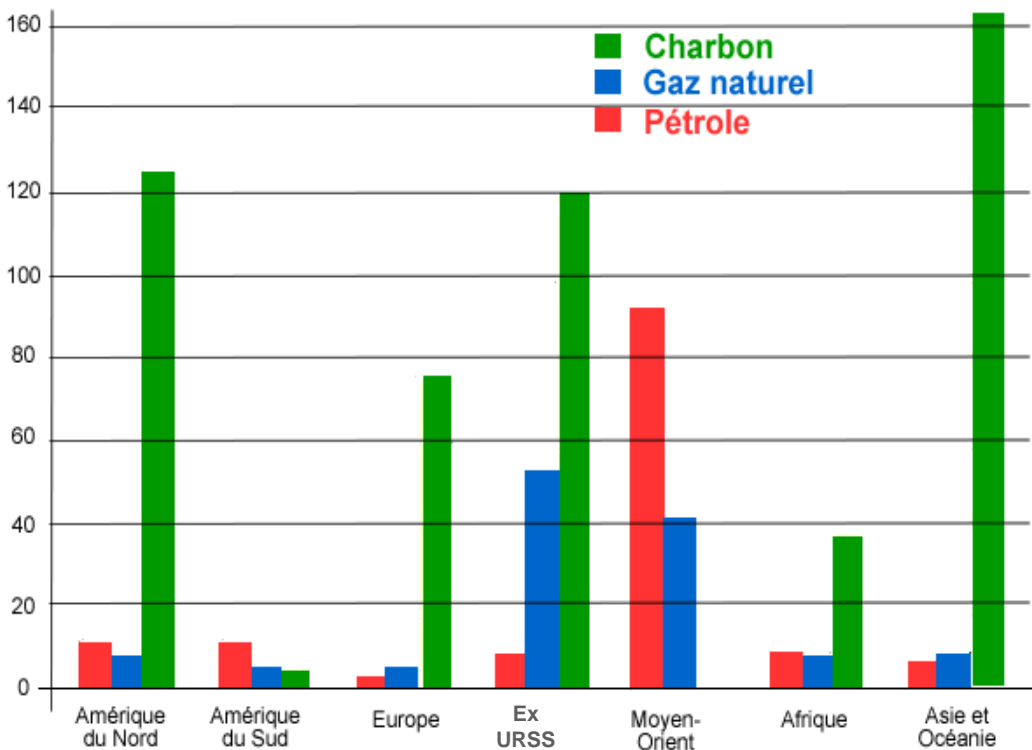


Camion transportant des haricots verts du Kenya





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



**Total : 800 milliards de tonnes de réserves.**

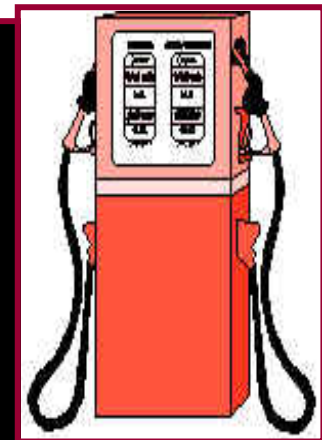
**Soyons « optimistes » : les géologues n'ont trouvé que la moitié des réserves  
→ 1600 Gt**

**On consomme 7 Gt/an.  
Soyons « optimistes », la consommation se stabilise.**

**Cela donne  $1600 / 7 = 230$  ans de réserve**

**Et cette consommation 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

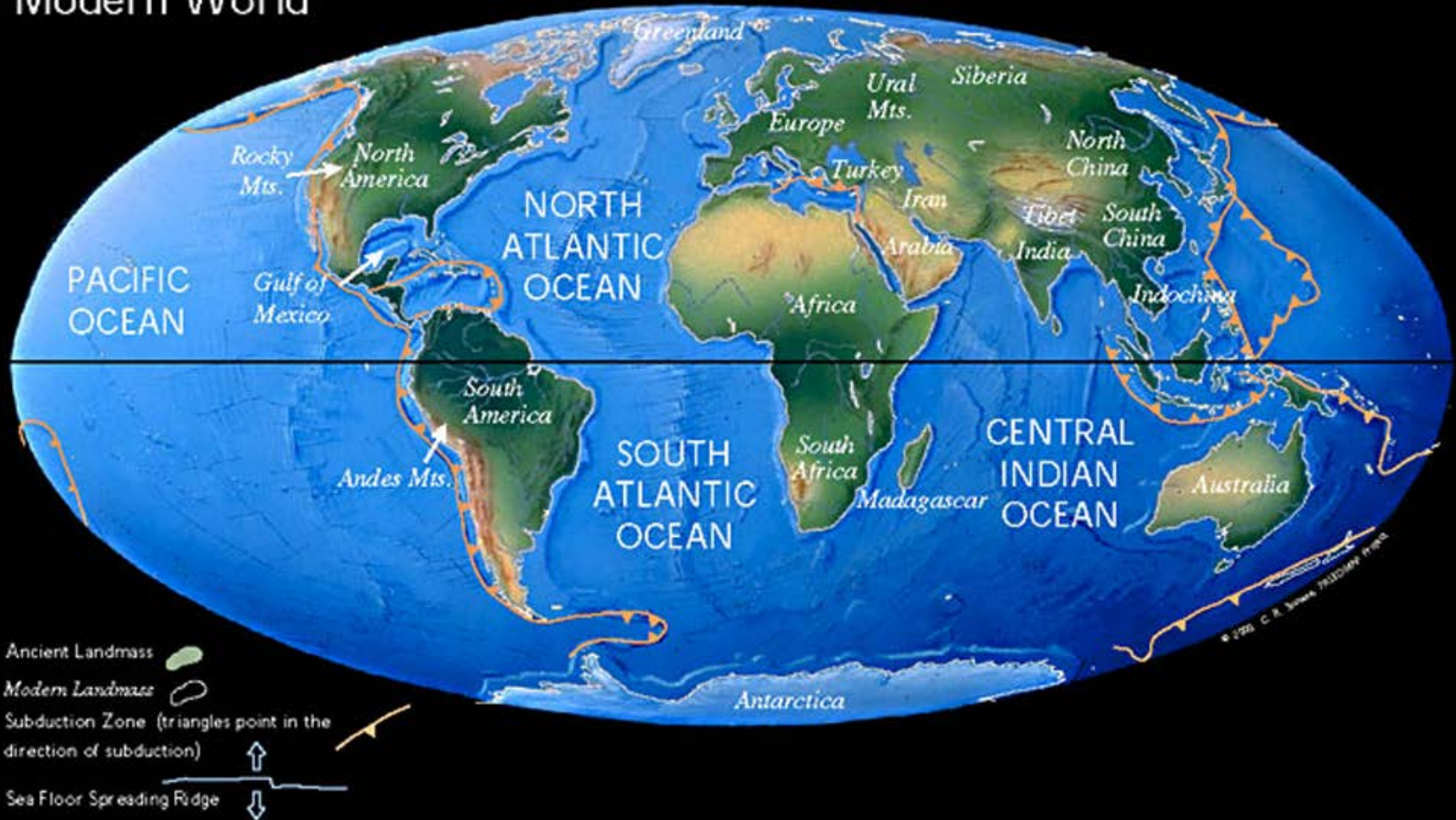


Photographie : Pierre Thomas



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

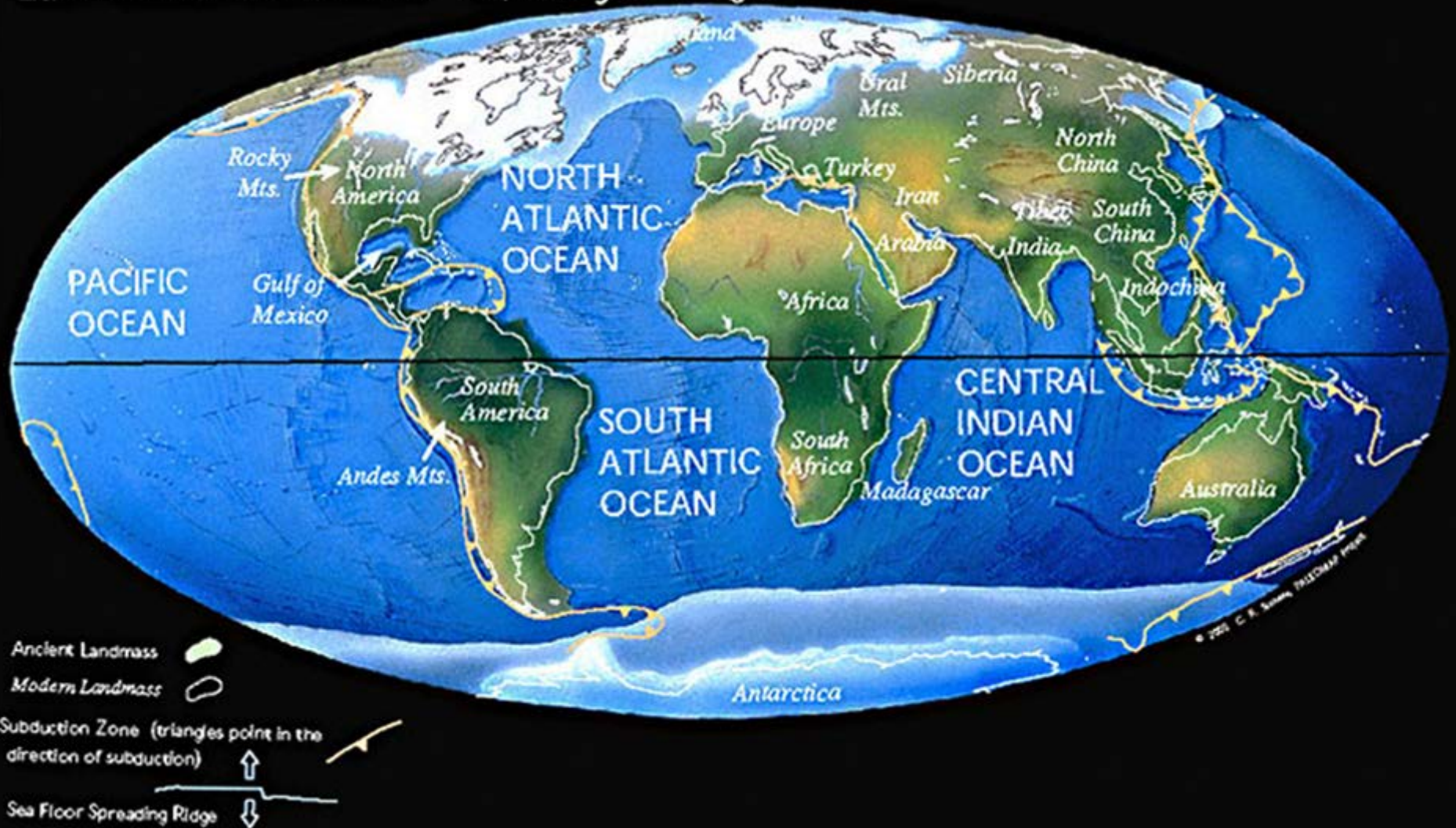
Modern World





# Le monde « il y a 18 000 ans », beaucoup de glaciers et température d'environ 10-12°

Last Glacial Maximum 18,000 years ago



# Climate and Greenhouse Gases during the last 650 Kyr

1700 ppbv

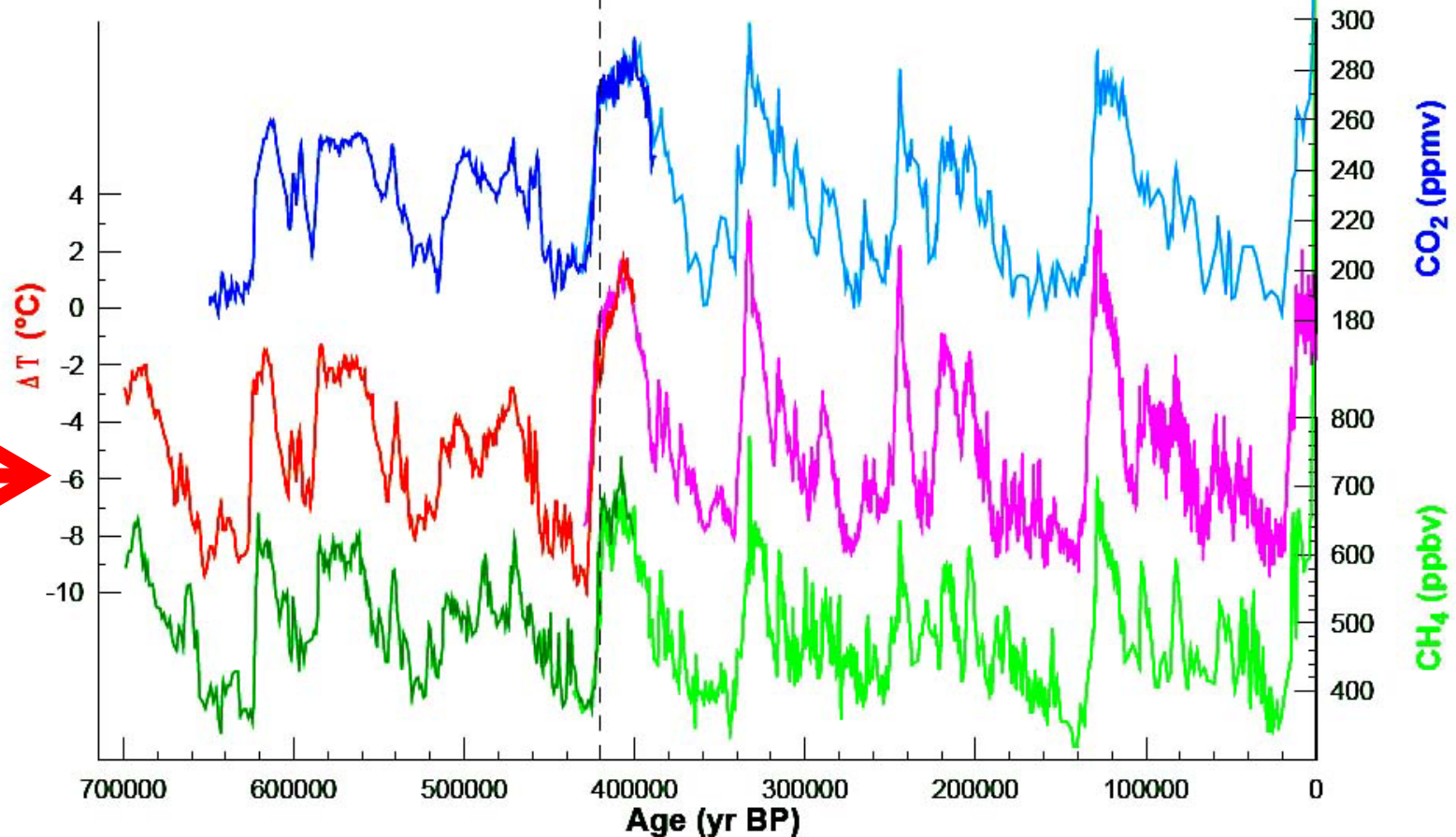
375 ppmv

EPICA Dome C

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

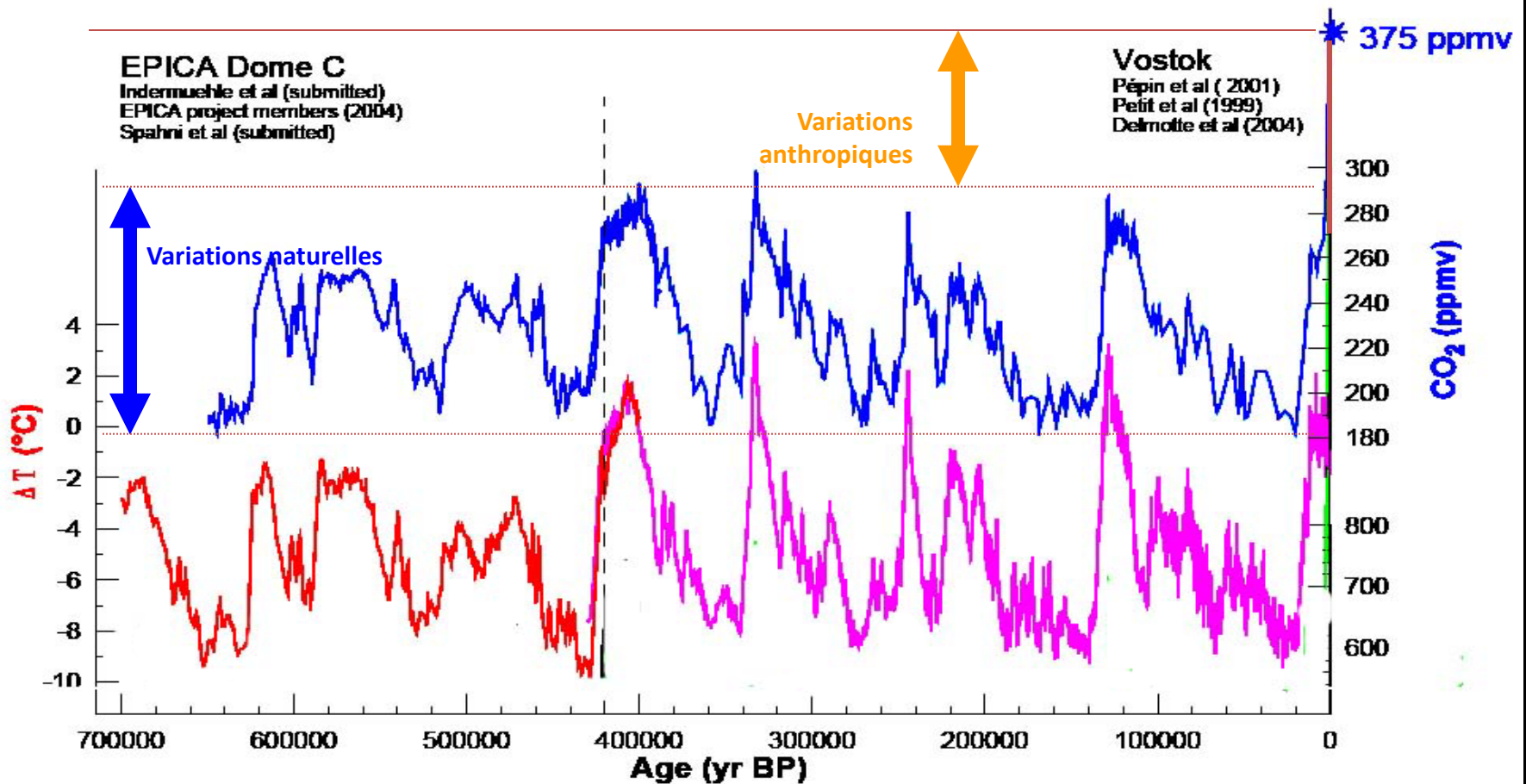
Vostok

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



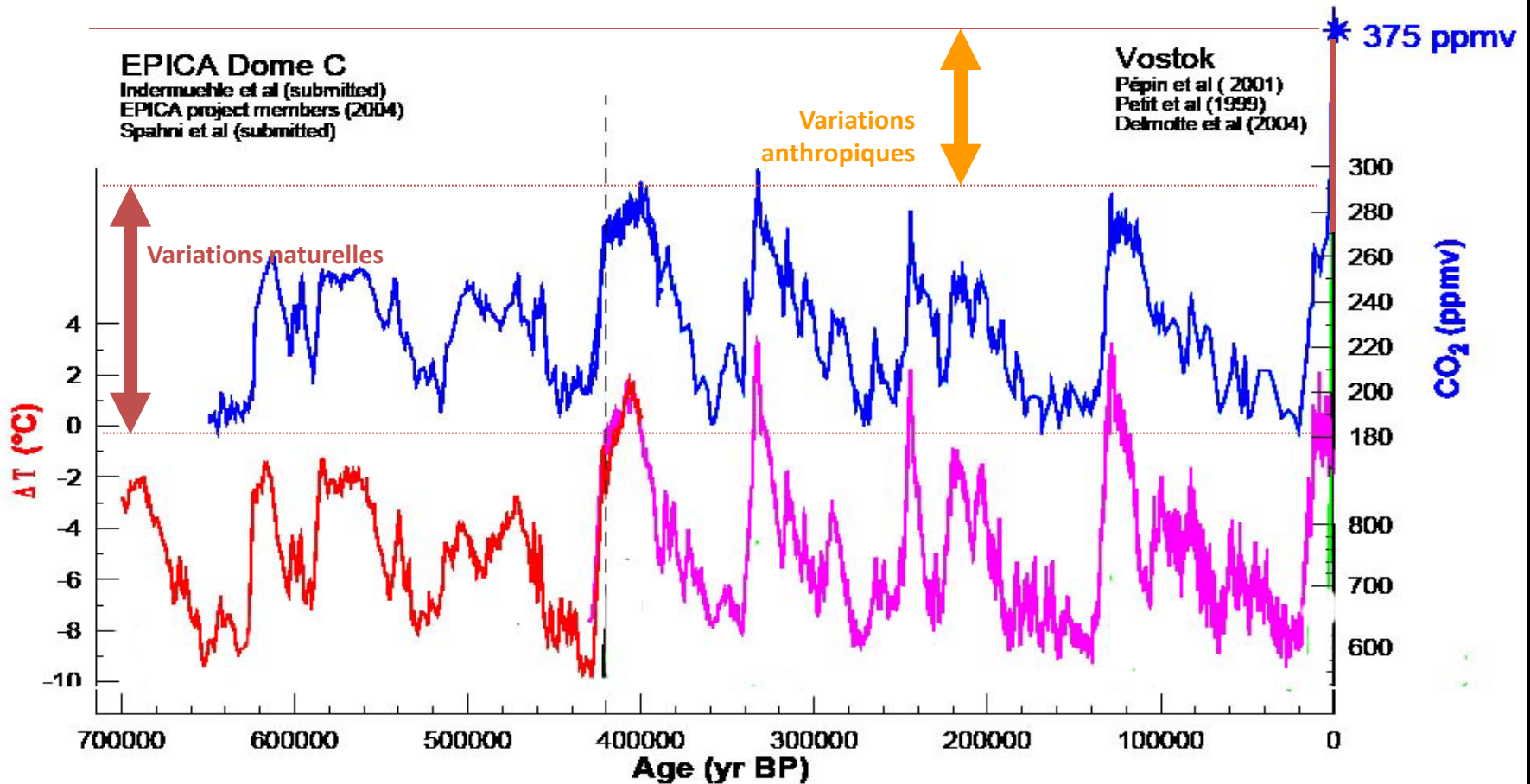
Le  $\text{CO}_2$ , le méthane... varient fortement pendant le Quaternaire, et le climat aussi.





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

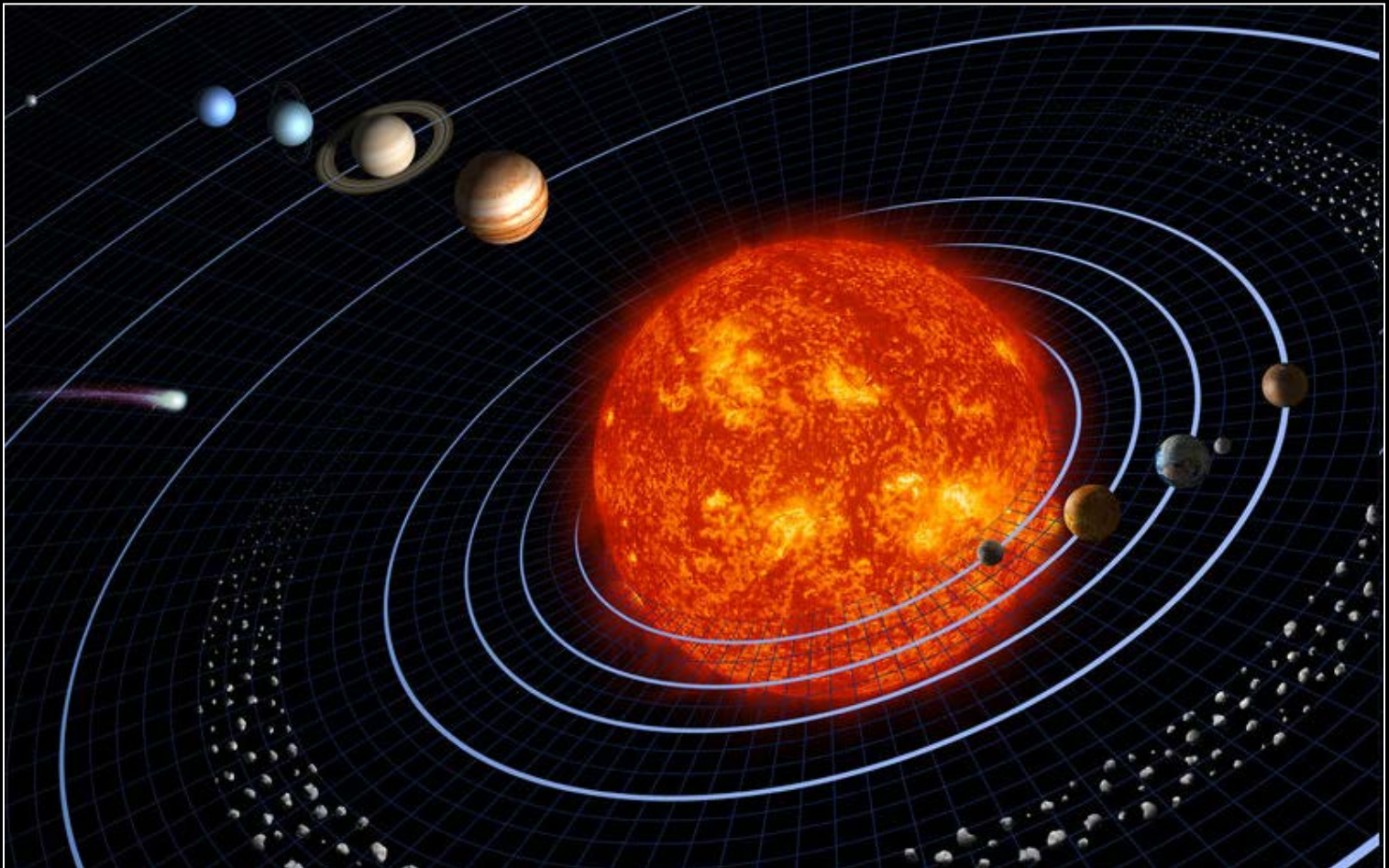




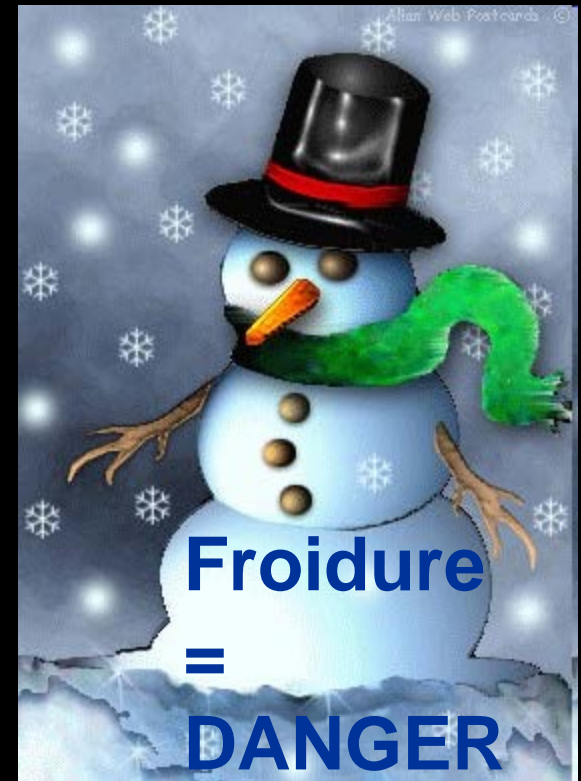
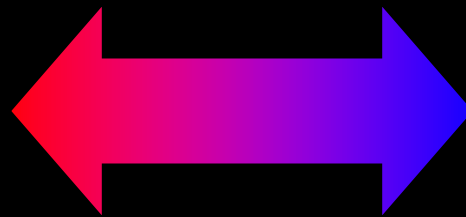
La température antarctique varie de +2 à -10°C par rapport à la température actuelle (-40°C). Le CO<sub>2</sub> varie de 180 à 280 ppmv ; il est aujourd'hui à 400 ppmv. Les variations sont parfaitement corrélées.

Mais les variations de température commencent quelques siècles avant celles de CO<sub>2</sub>

**Ces variations régulières ont le même rythme que des variations « astronomiques » (distance Terre - Soleil, inclinaison de la Terre...). 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 CO<sub>2</sub> dans tout ça ?





On a déjà vu l'effet  
« boule de neige » du  $\text{CO}_2$   
océanique. Cette  
modification des flux  
 $\text{CO}_2$  océanique  $\leftrightarrow$   $\text{CO}_2$   
atmosphérique amplifie  
le très faible effet  
astronomique

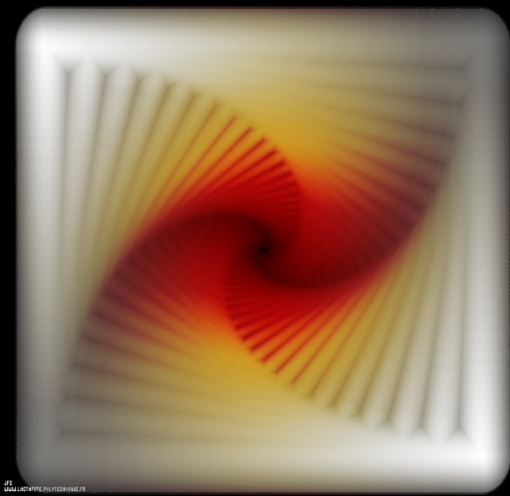




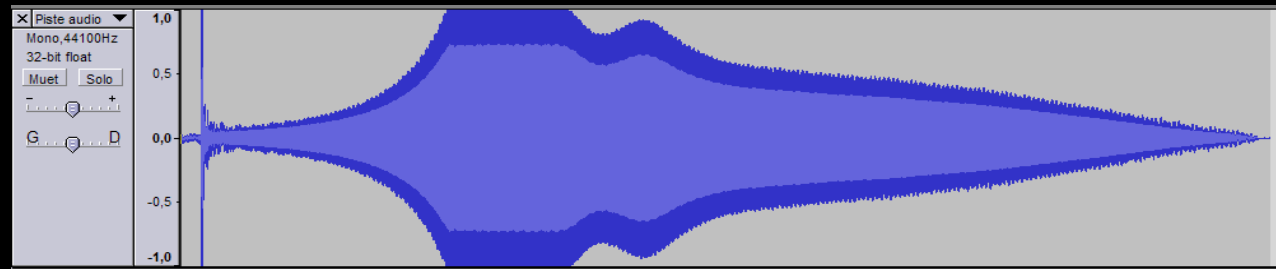
**Il y a d'autres rétroactions positives, ou des modifications du cycle du carbone amplifient les variations initiales. Par exemple l'action de la température sur la décomposition des sols, sur la production de méthane (fermentation et/ou déstabilisation des clathrates), sur la stratification des eaux 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 CO<sub>2</sub> 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 ».



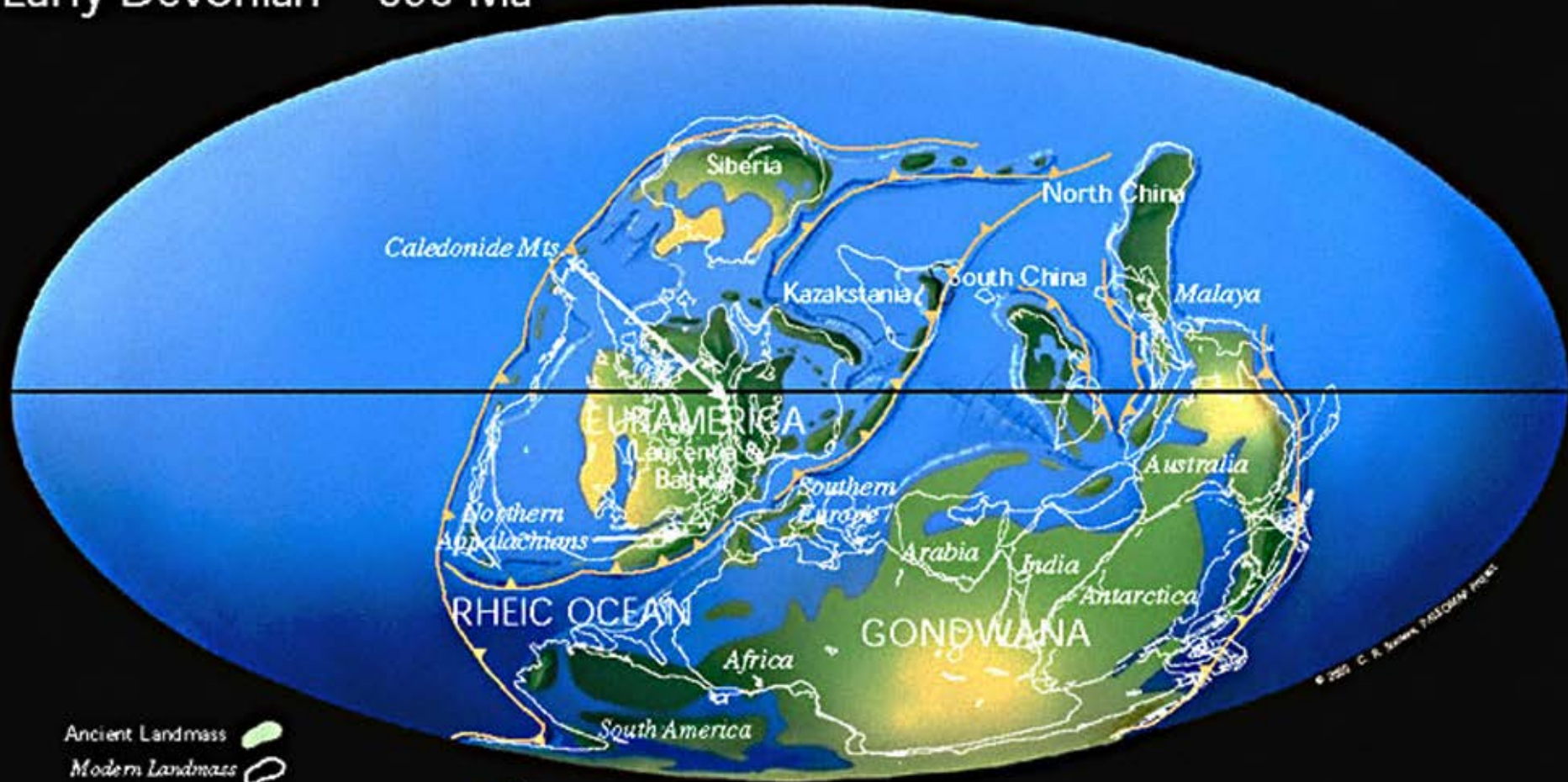
Que risque d'être un possible effet de Larsen en climatologie ? Personne ne le sait, mais évitons de jouer les apprentis sorciers !




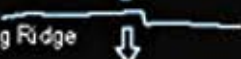


# 3 - Les variations post 400 Ma du cycle du carbone

**CHAUD**

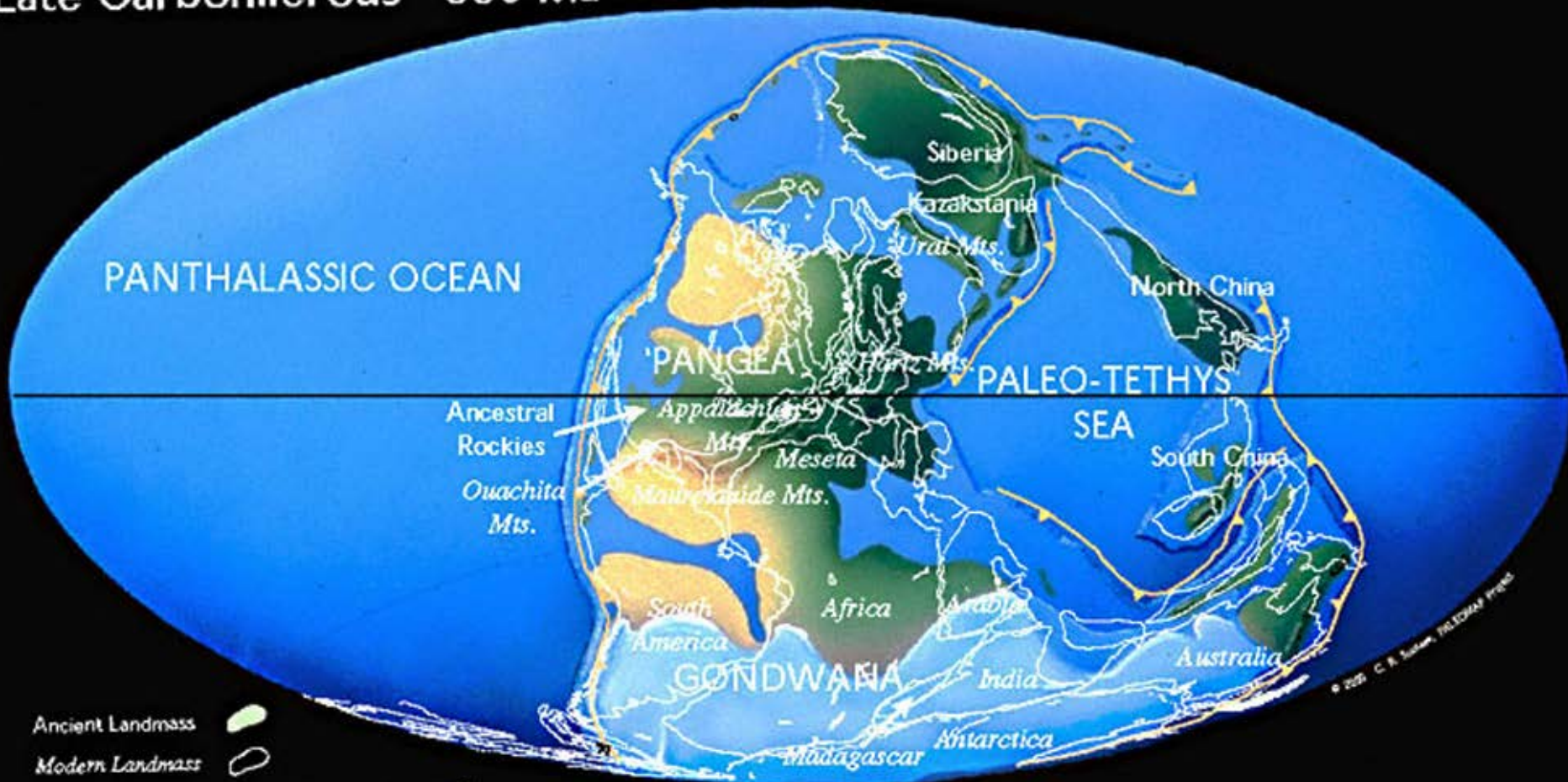
Early Devonian 390 Ma







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

© 2005 C. R. Scotese, TIGERMAP PROJECT

Late Carboniferous 306 Ma

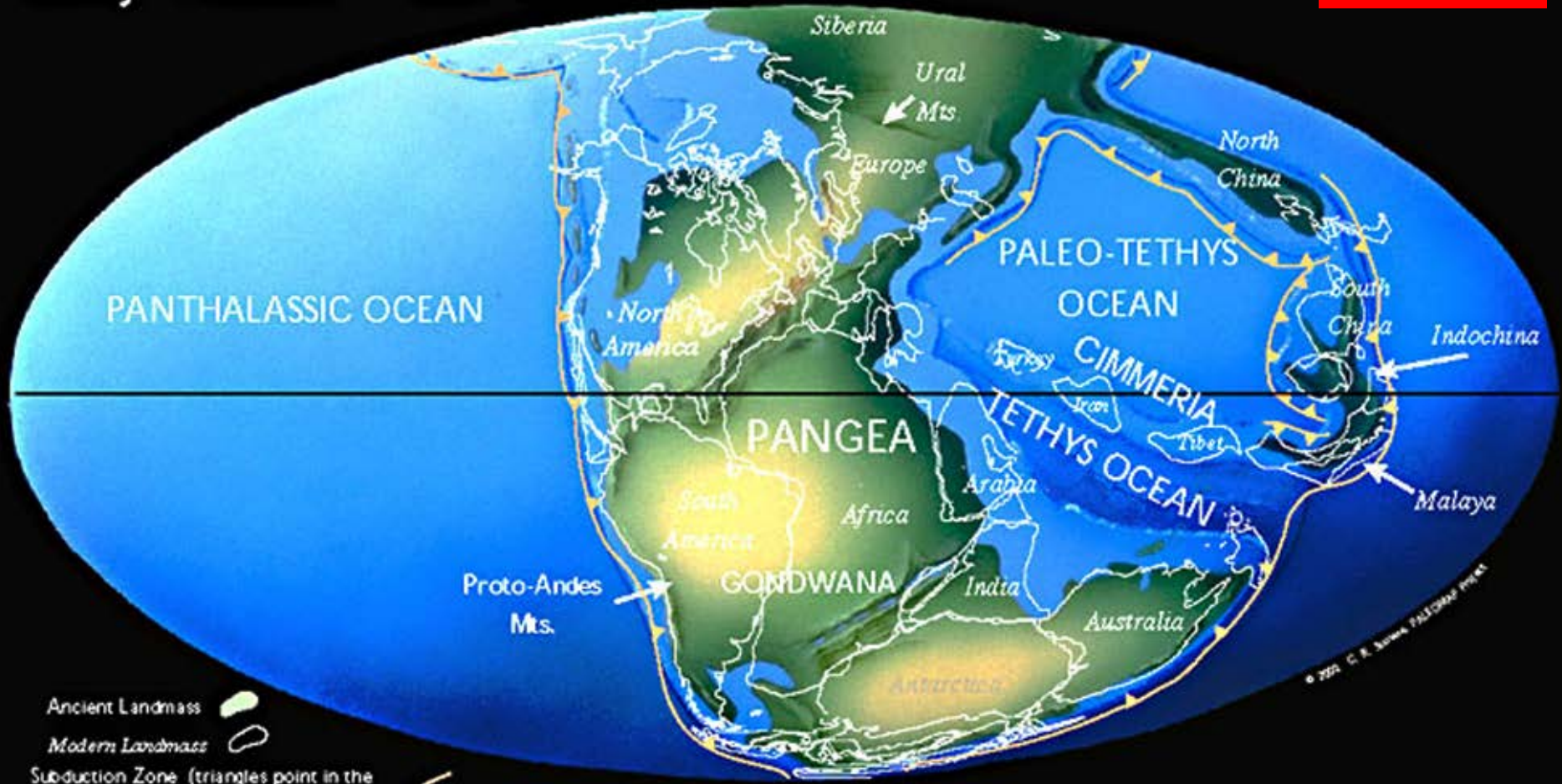






- Ancient Landmass 
- Modern Landmass 
- Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction) 
- Sea Floor Spreading Ridge 



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**

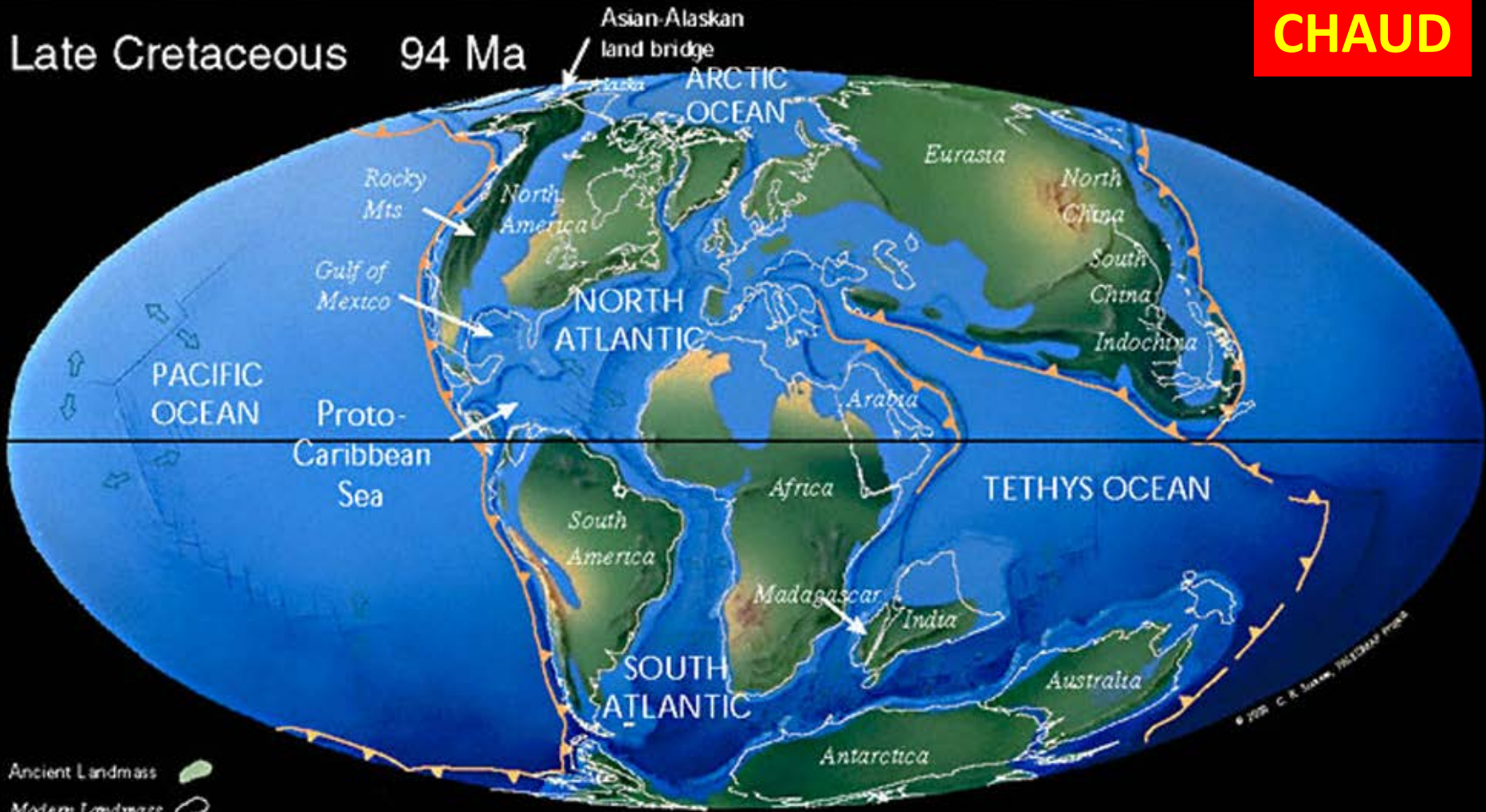





- Ancient Landmass 
- Modern Landmass 
- Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction) 
- Sea Floor Spreading Ridge 

© 2002 C. R. Scotese, 10012002.PSW

**CHAUD**

Late Cretaceous 94 Ma



Ancient Landmass   
Modern Landmass   
Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction) 

© 2005 C. R. Scotese, THE CRETACEOUS WORLD




**CHAUD**

Middle Eocene 50.2 Ma



Ancient Landmass   
Modern Landmass 

Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction) 

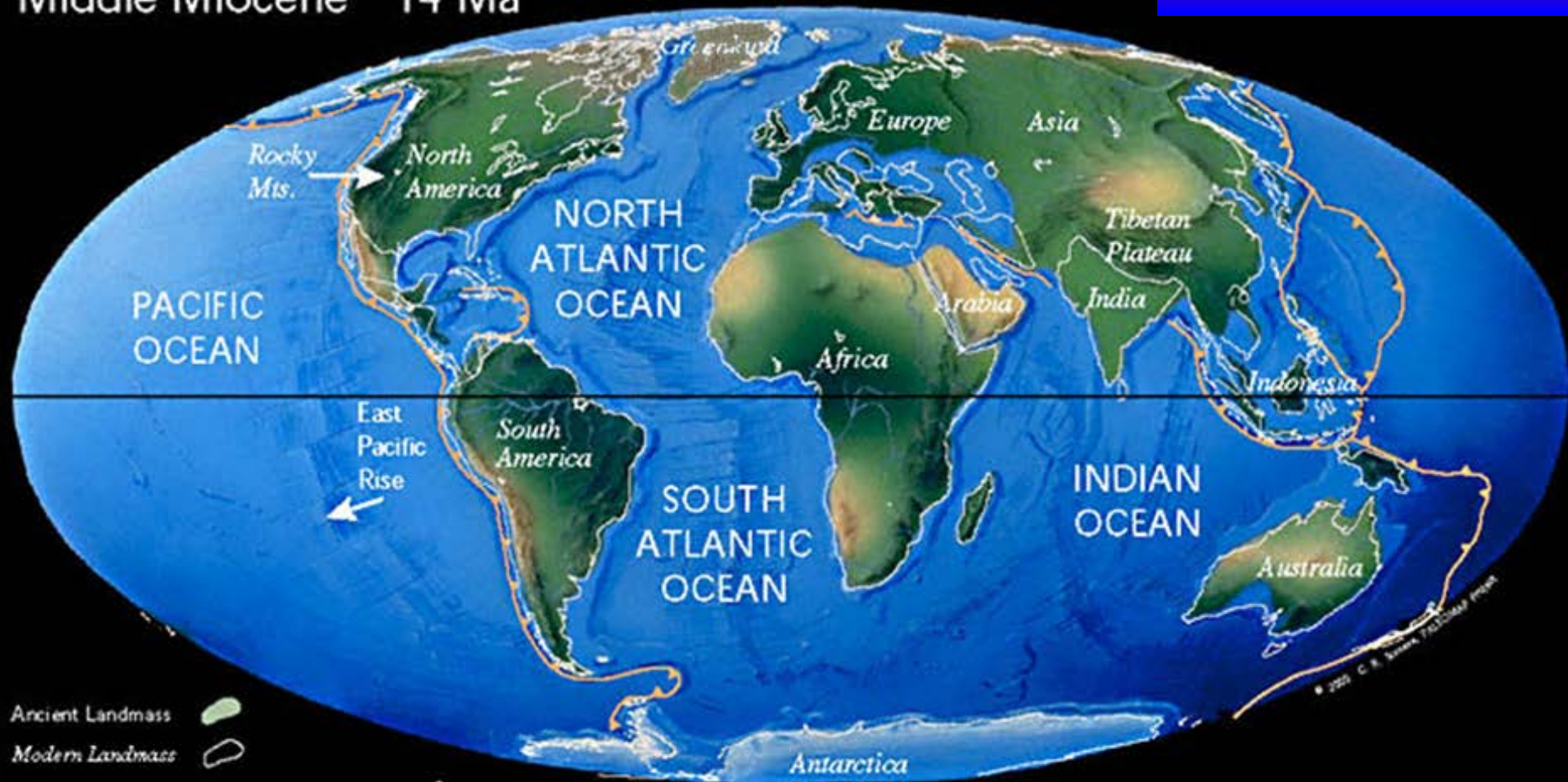
Sea Floor Spreading Ridge 

© 1995 C. R. Scotese, 1993/2000/05/06



Ça commence  
à refroidir

Middle Miocene 14 Ma



Ancient Landmass



Modern Landmass



Subduction Zone (triangles point in the direction of subduction)



Sea Floor Spreading Ridge

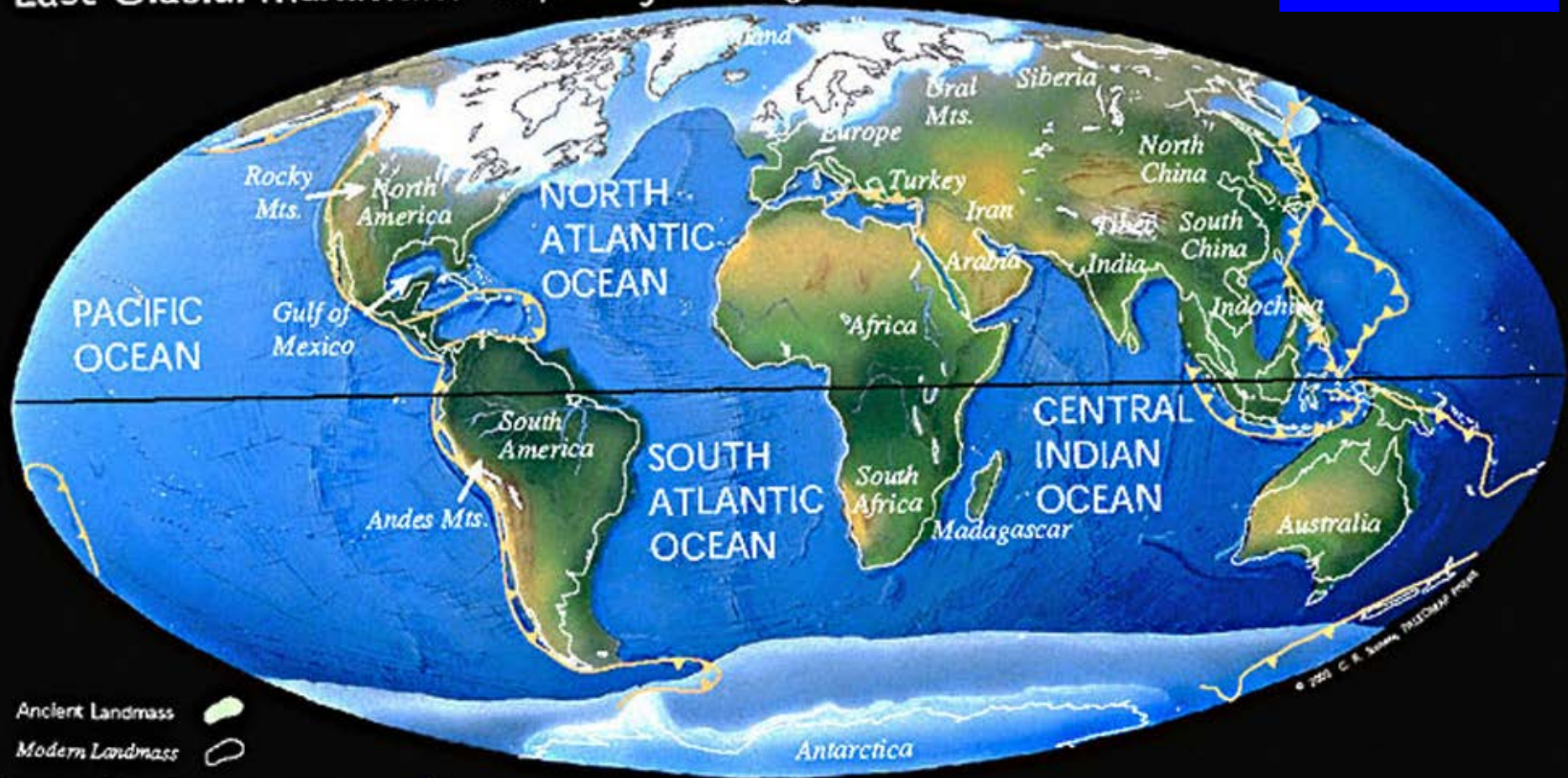


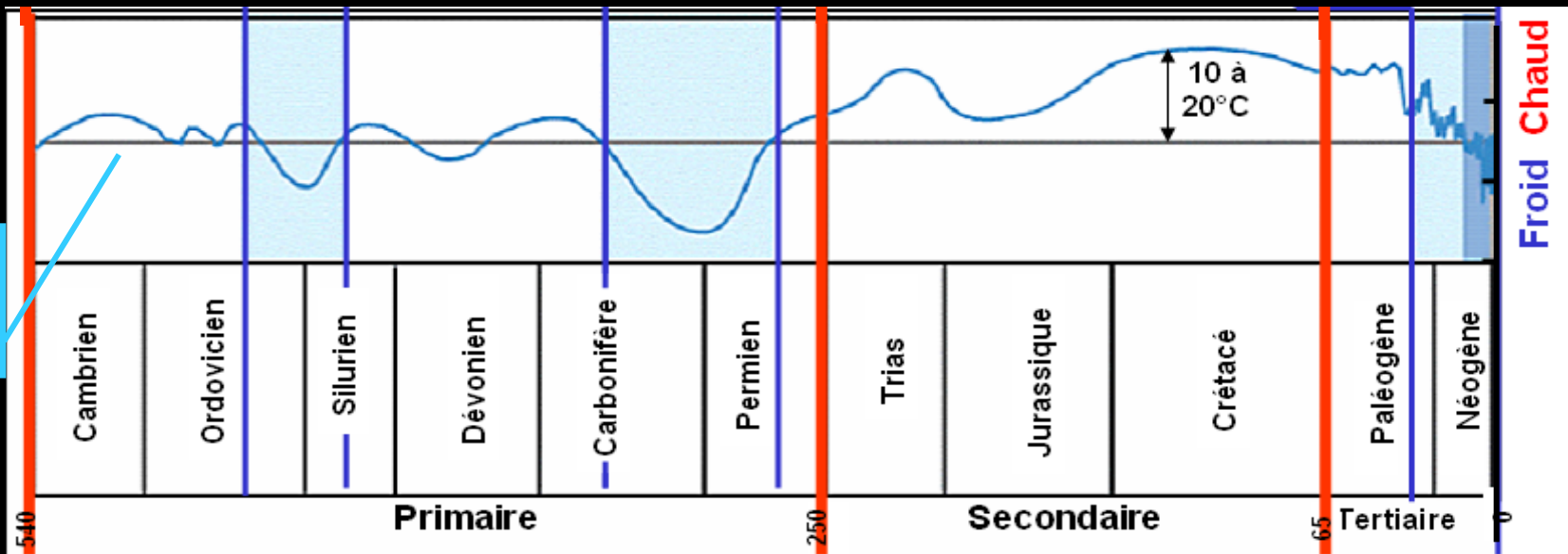
© 2002 C. B. Moore, TULLOCH Press



± FROID

Last Glacial Maximum 18,000 years ago



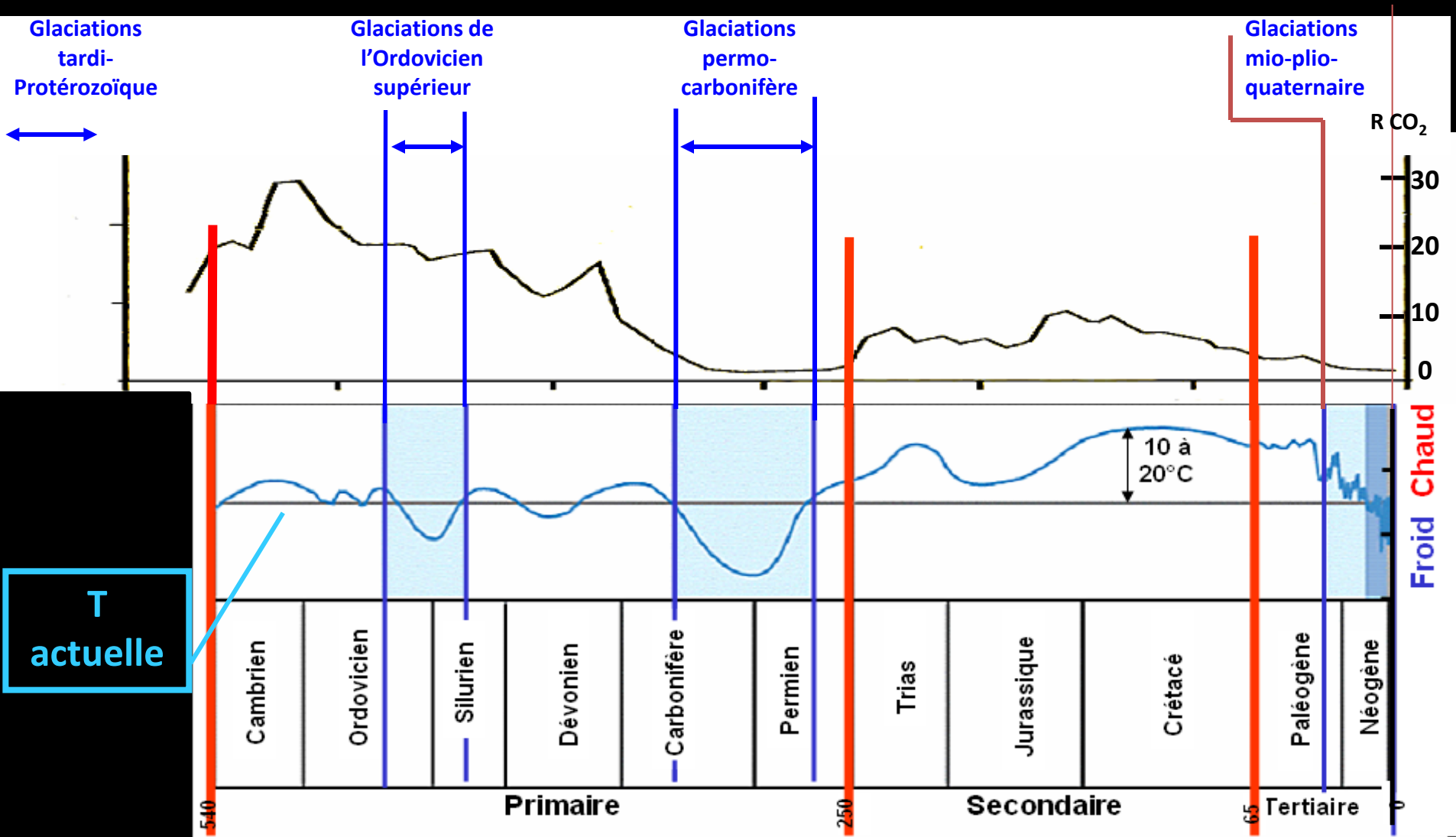


$T_{\text{actuelle}}$

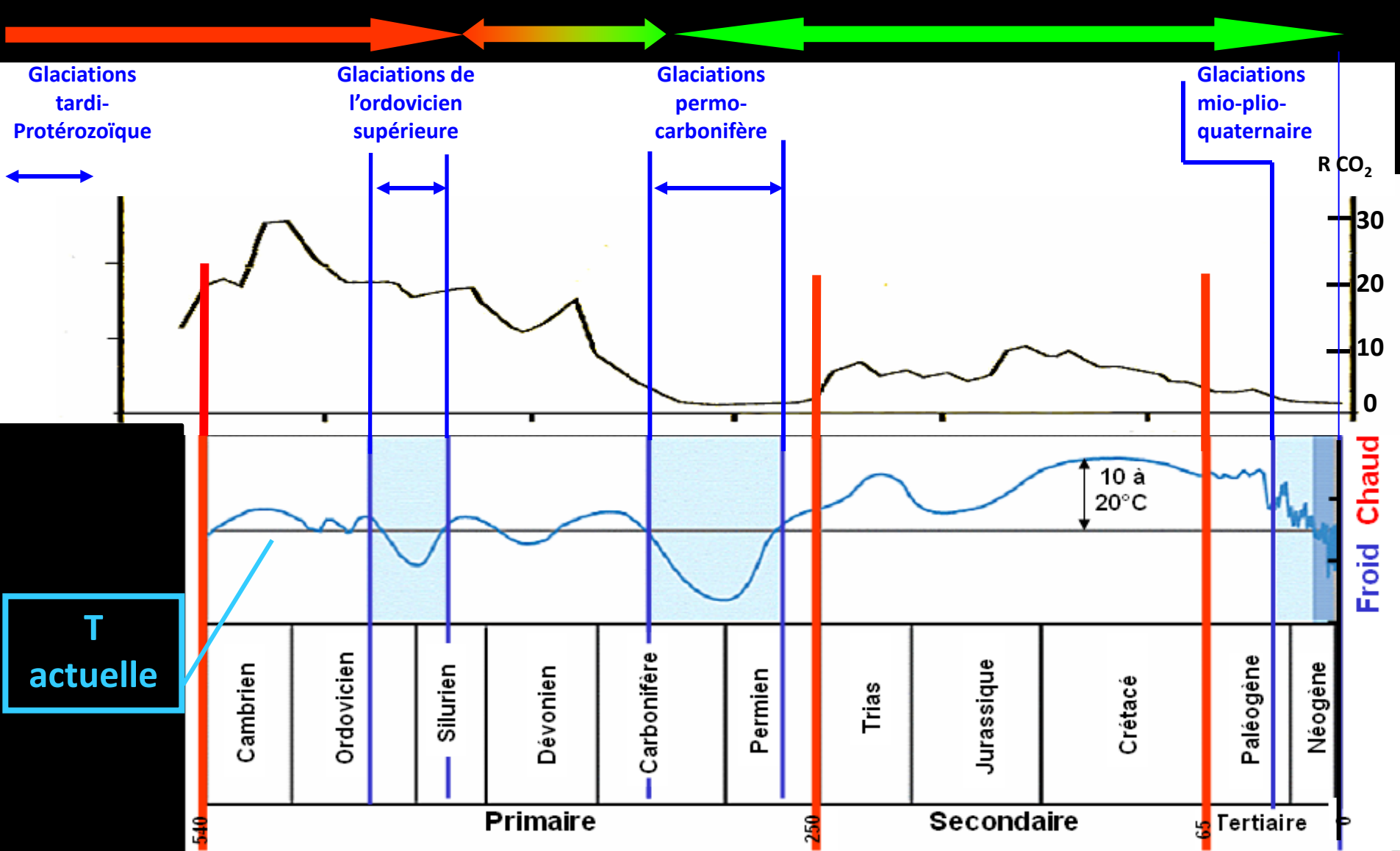
Froid Chaud

On sait reconstituer les températures moyennes mondiales,





**On sait reconstituer les températures moyennes mondiales, et aussi le CO<sub>2</sub> atmosphérique.**



**On sait reconstituer les températures moyennes mondiales, et aussi le CO<sub>2</sub> atmosphérique.**

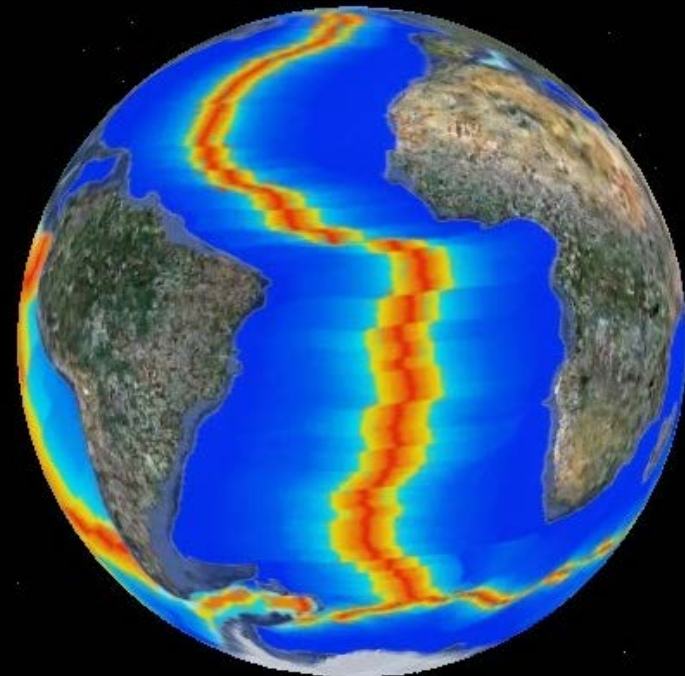
**Et depuis 400 Ma, il y a un approximatif parallélisme !**

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

**1 - Baisse T et CO<sub>2</sub> cénozoïque : baisse de l'activité des dorsales et altération de la chaîne alpino-himalayenne**

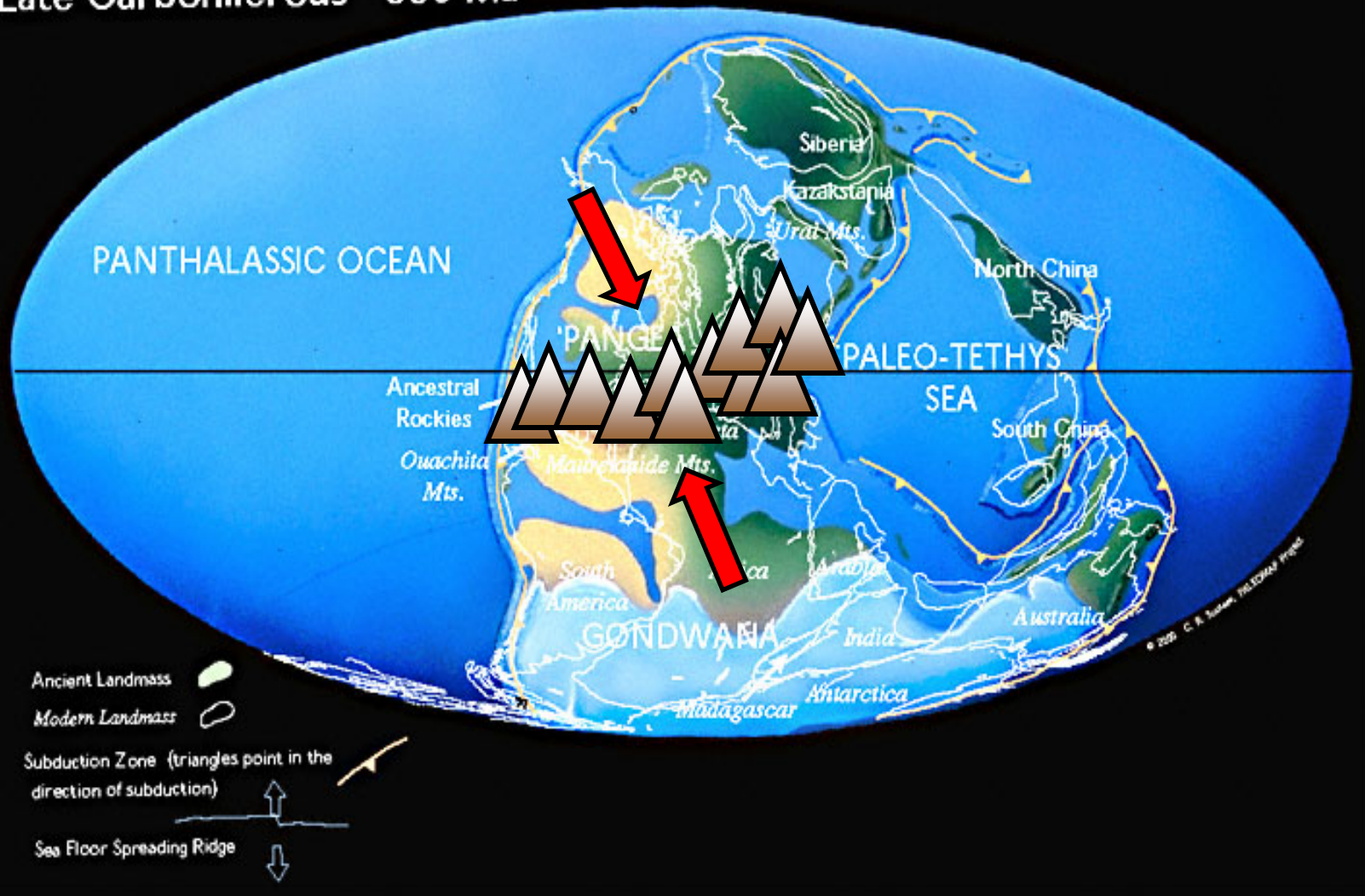


**2 - Maximum au milieu du Mésozoïque : forte activité des dorsales**





Late Carboniferous 306 Ma

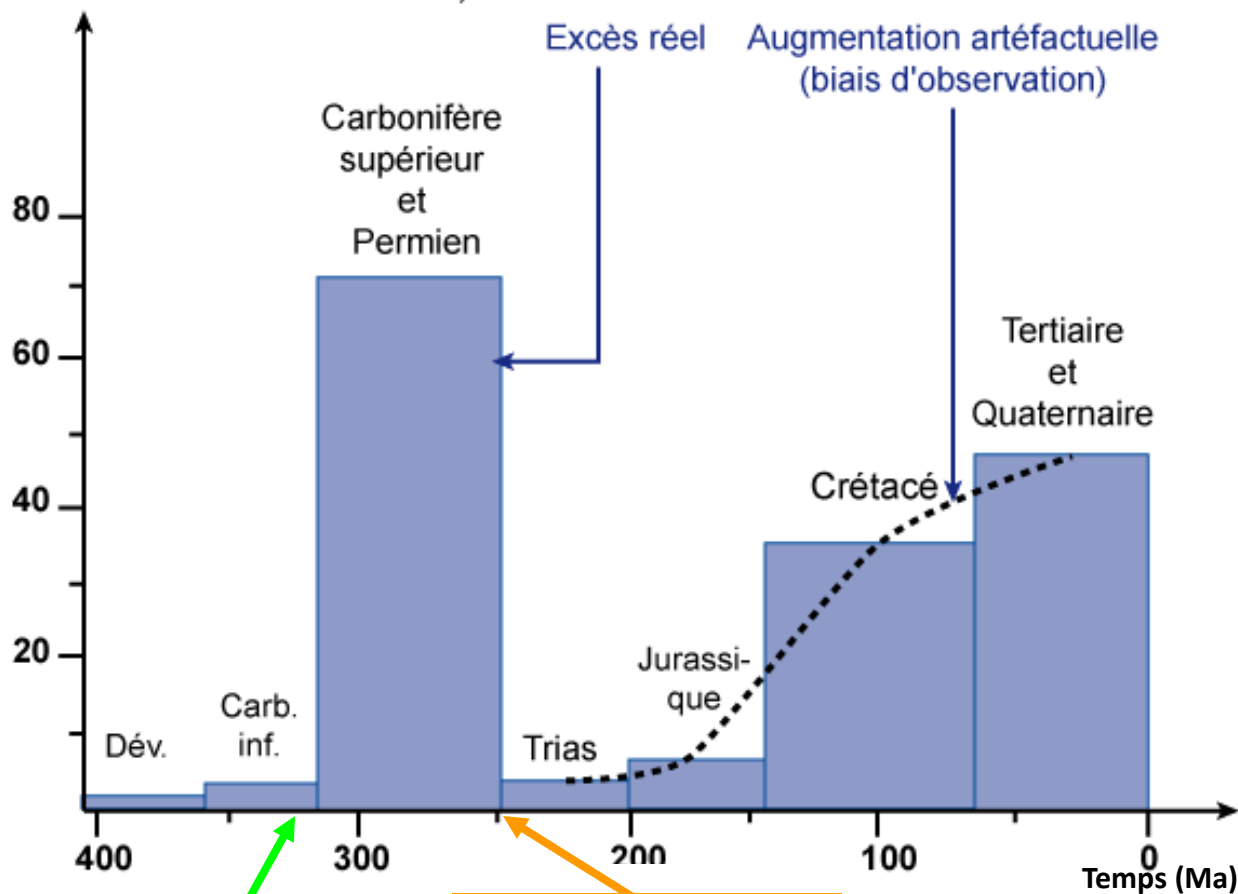


**3 - Pour la baisse du CO<sub>2</sub> et le coup de froid du Carbonifère, deux causes non incompatibles : l'altération de la chaîne hercynienne et ...**

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



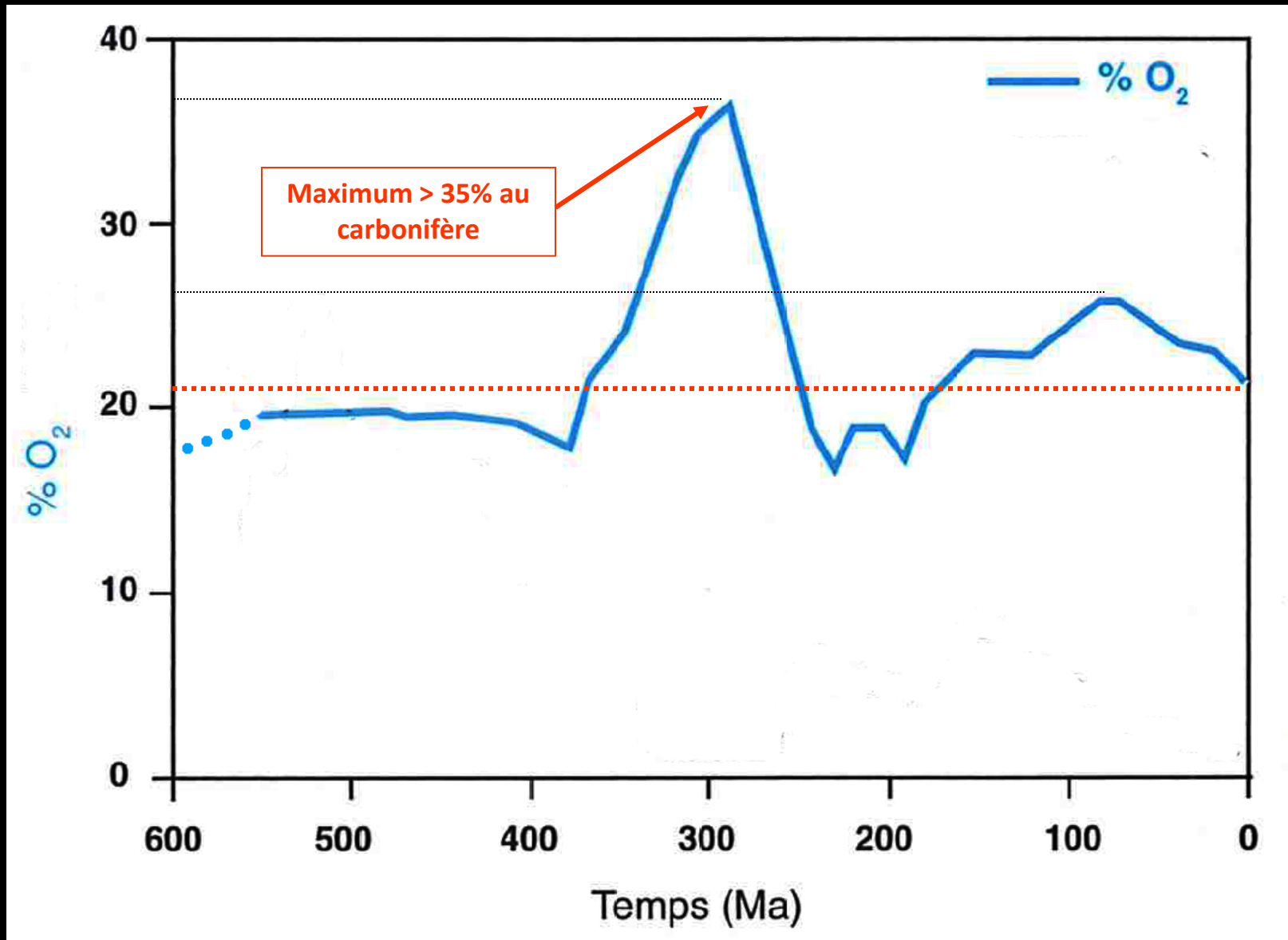
Réserves de charbon exploitable  
(milliards de tonnes / millions d'années)



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'O<sub>2</sub>, qu'on sait déterminer.

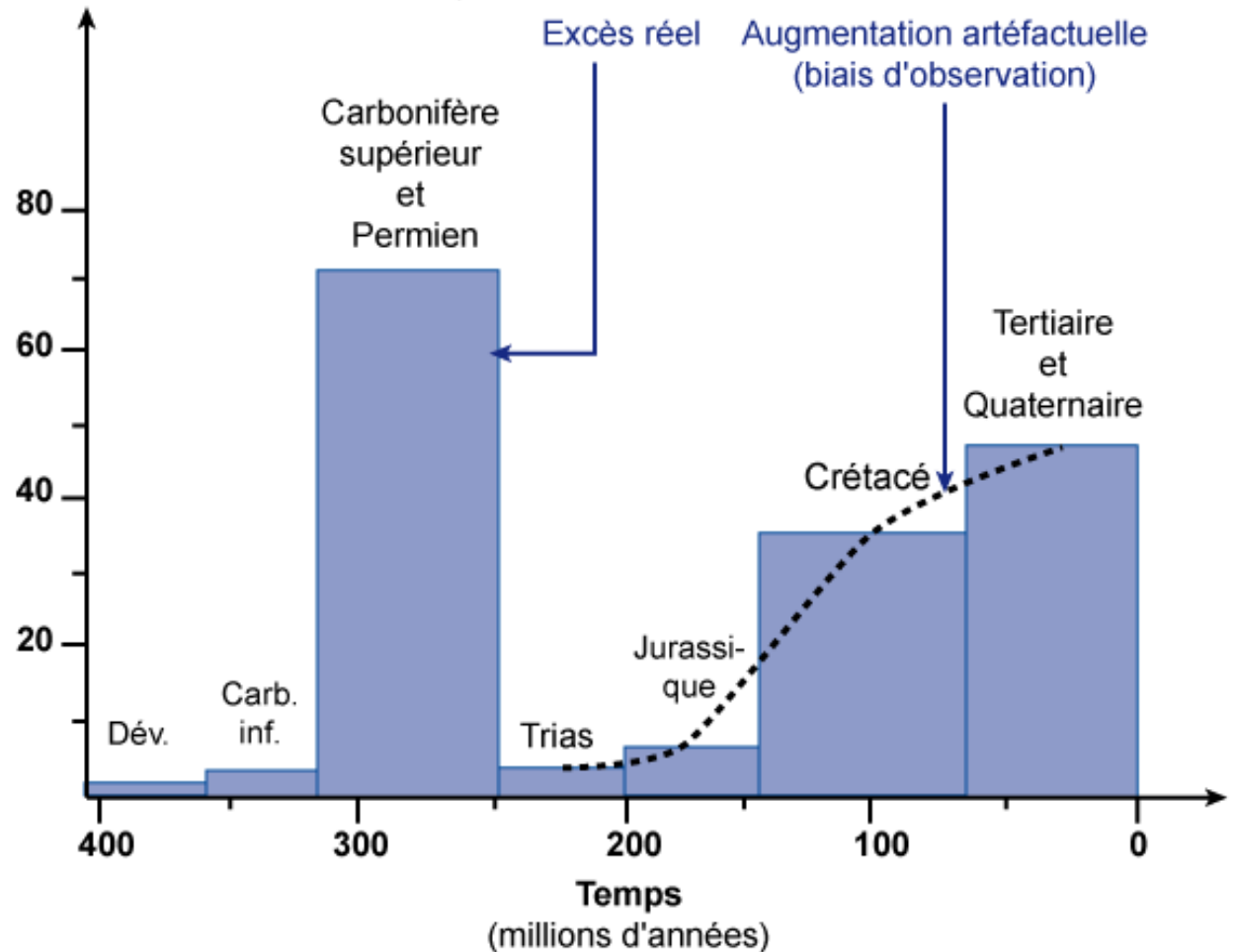




# Une explication évidente du maximum carbonifère



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





La Meganeura de Commentry (03)

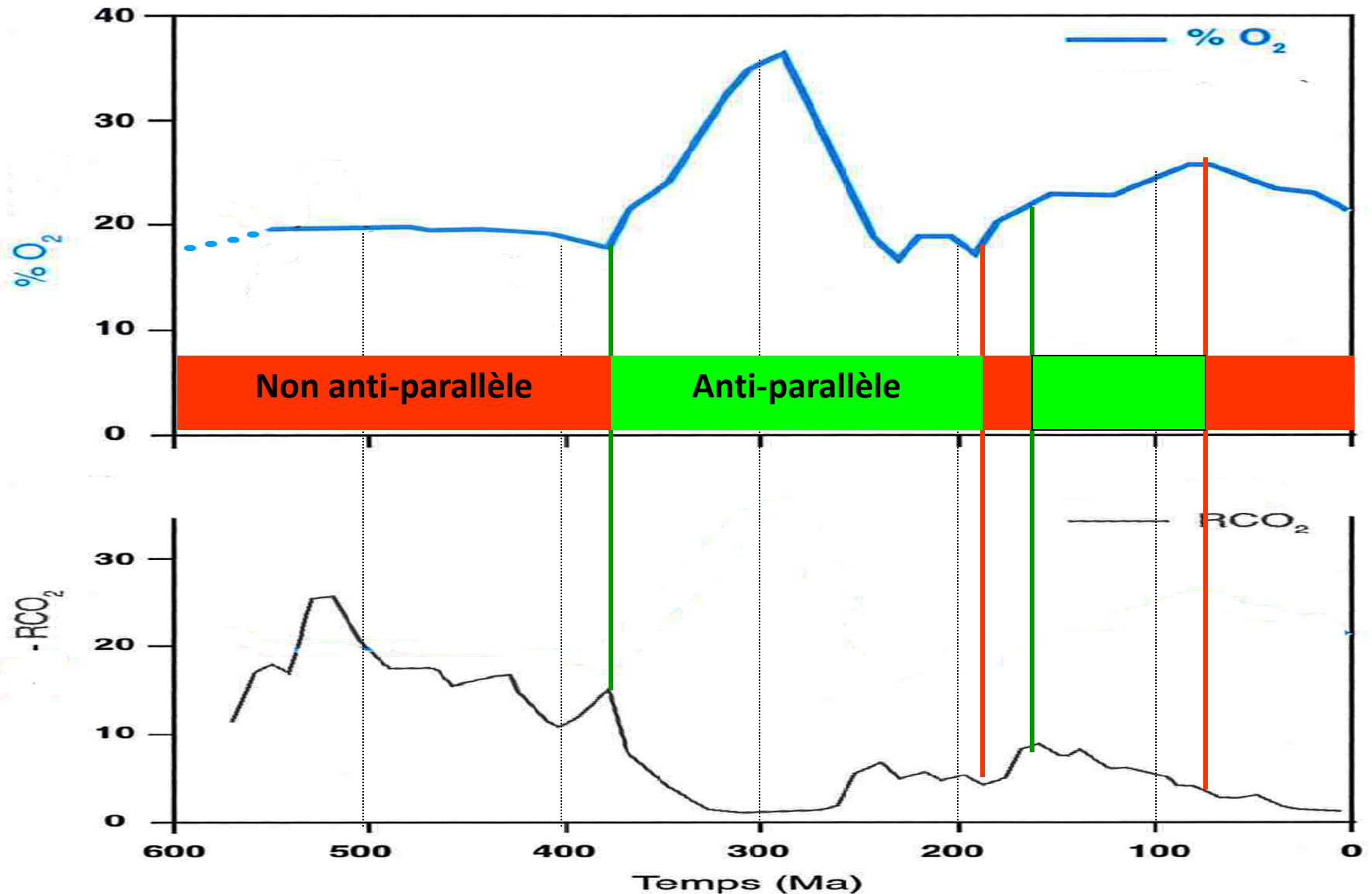
**On aurait pu s'en douter depuis 150 ans si les disciplines scientifiques n'étaient pas si cloisonnées**



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







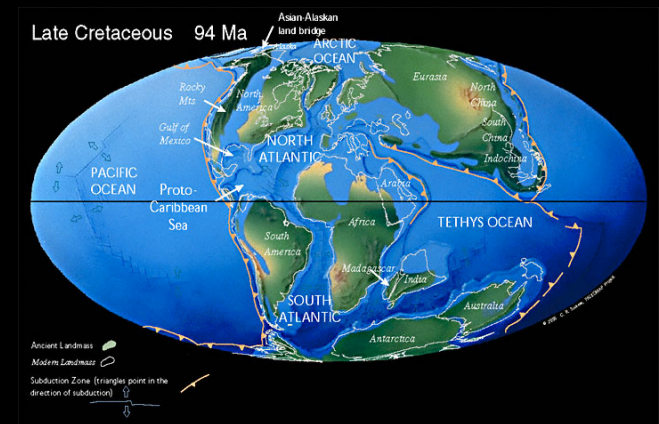
Évolution comparée O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>. Parfois, c'est antiparallèle. Le couple photosynthèse-fossilisation de la matière organique « compte ». Souvent ce n'est pas antiparallèle. D'autres facteurs font varier le CO<sub>2</sub>

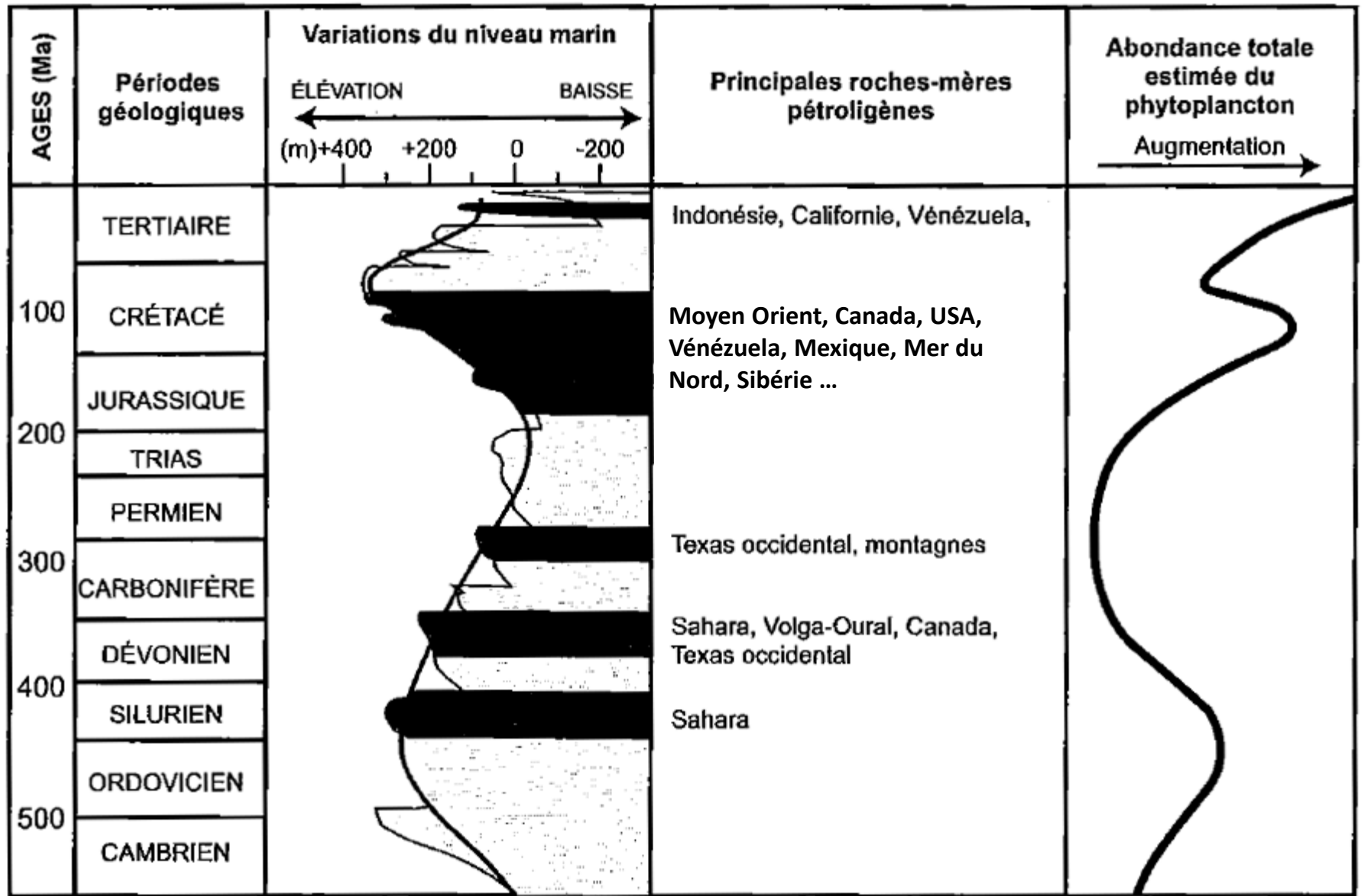
Pourquoi un maximum d'O<sub>2</sub> au Carbonifère, c'est à dire un maximum de fossilisation de matière organique ?

Piège tectonique du charbon ?

Difficulté de la dégradation de la lignine ?

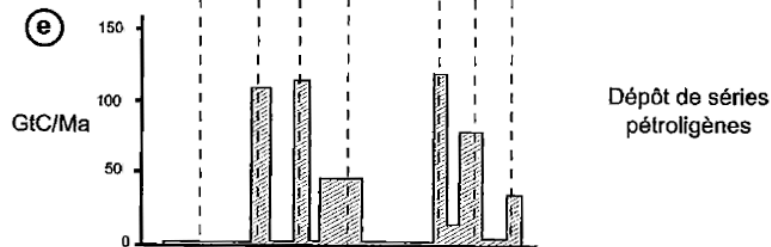
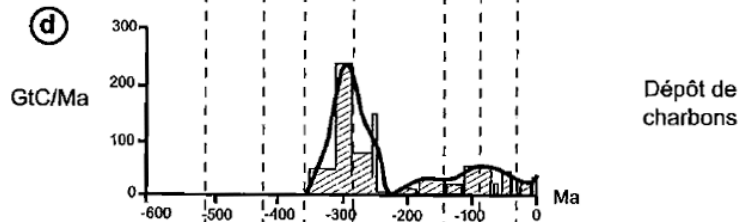
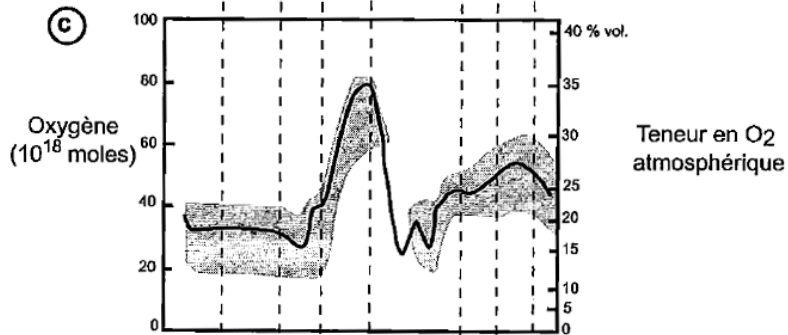
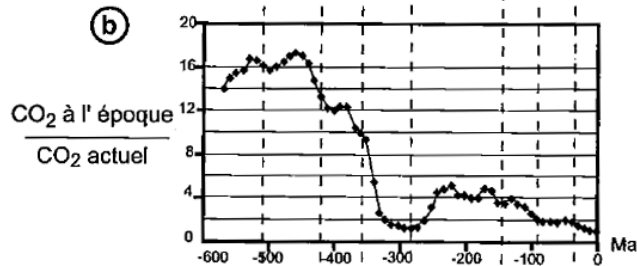
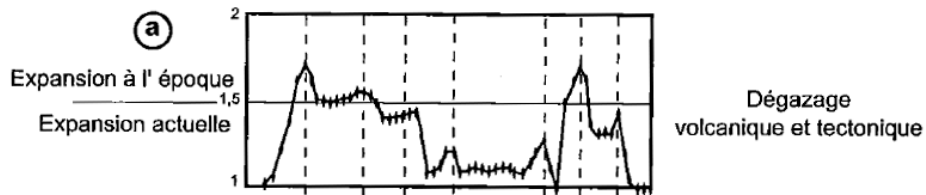
Et pourquoi O<sub>2</sub> augmente au Jurassique et Crétacé inférieur ? Haut niveau de la mer et hautes températures qui favorisent l'existence de plateformes peu profondes mal oxygénées, donc « pétrologène » ?





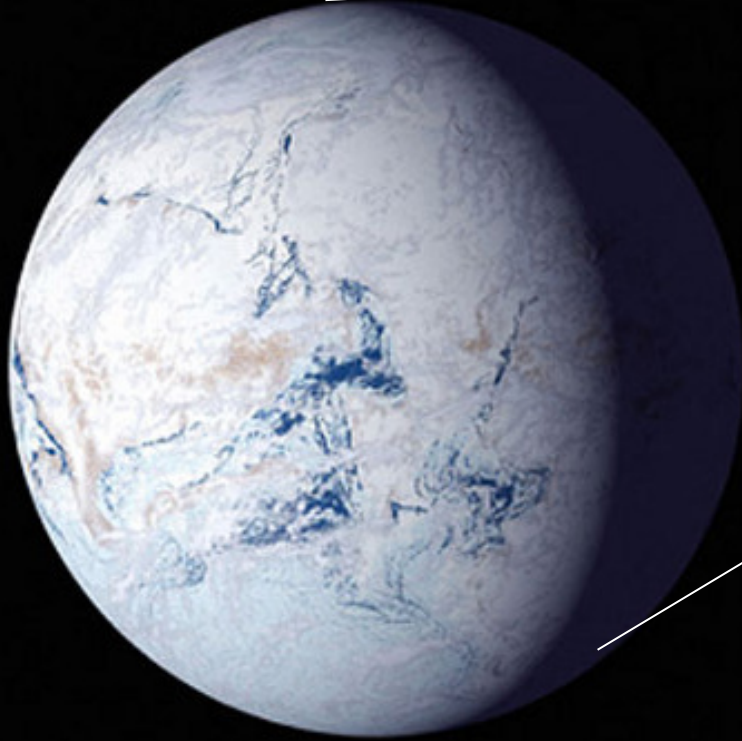
**Le genre d'études en cours !**



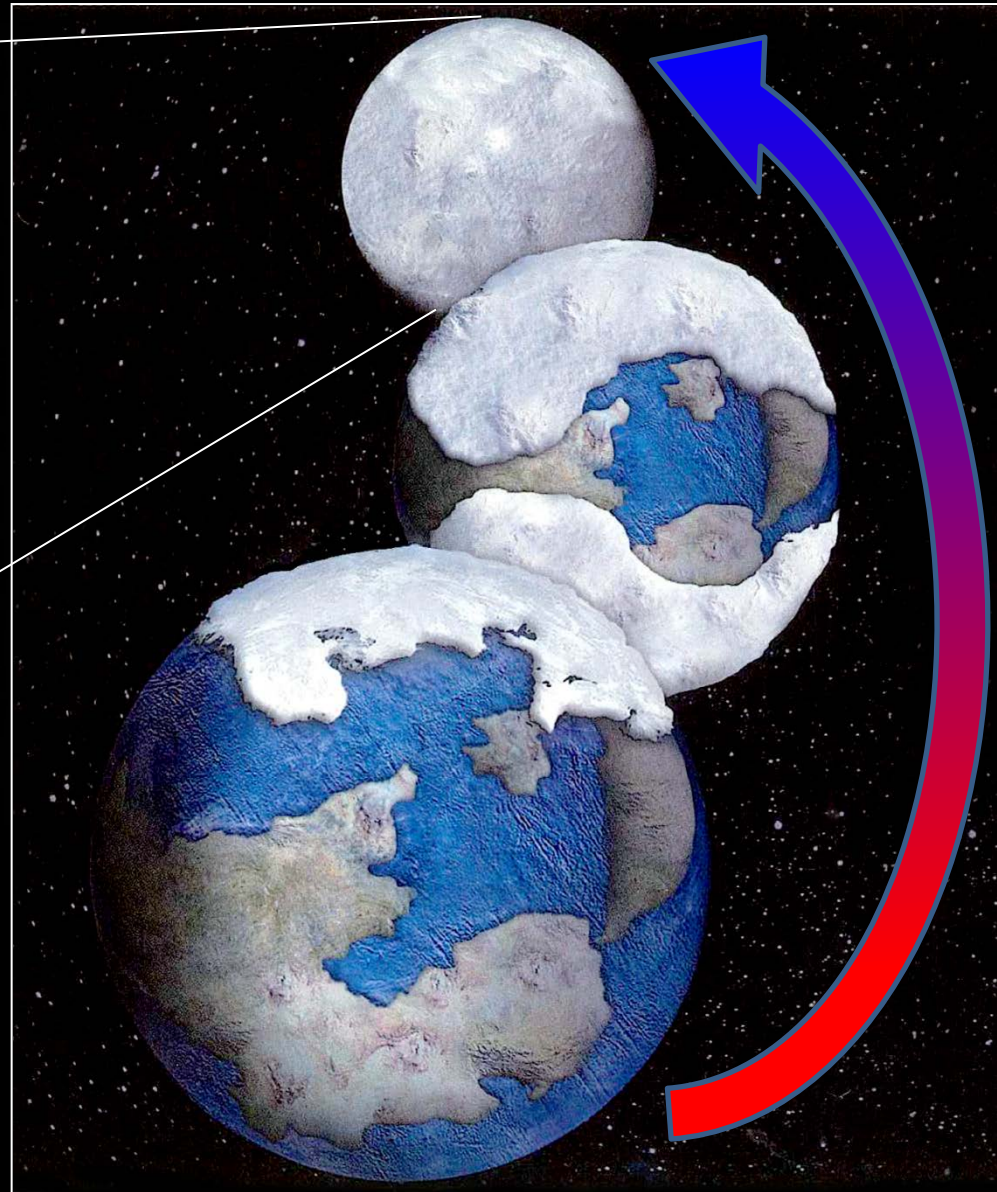


**Une tentative de  
synthèse globale, avec le  
danger du serpent qui se  
mord la queue : par  
exemple les données du  
(d) et (e) ont servi à  
élaborer le (b) et (c).  
Quelles valeur donner  
aux corrélations ? Et puis  
il manque l'altération  
continentale.**

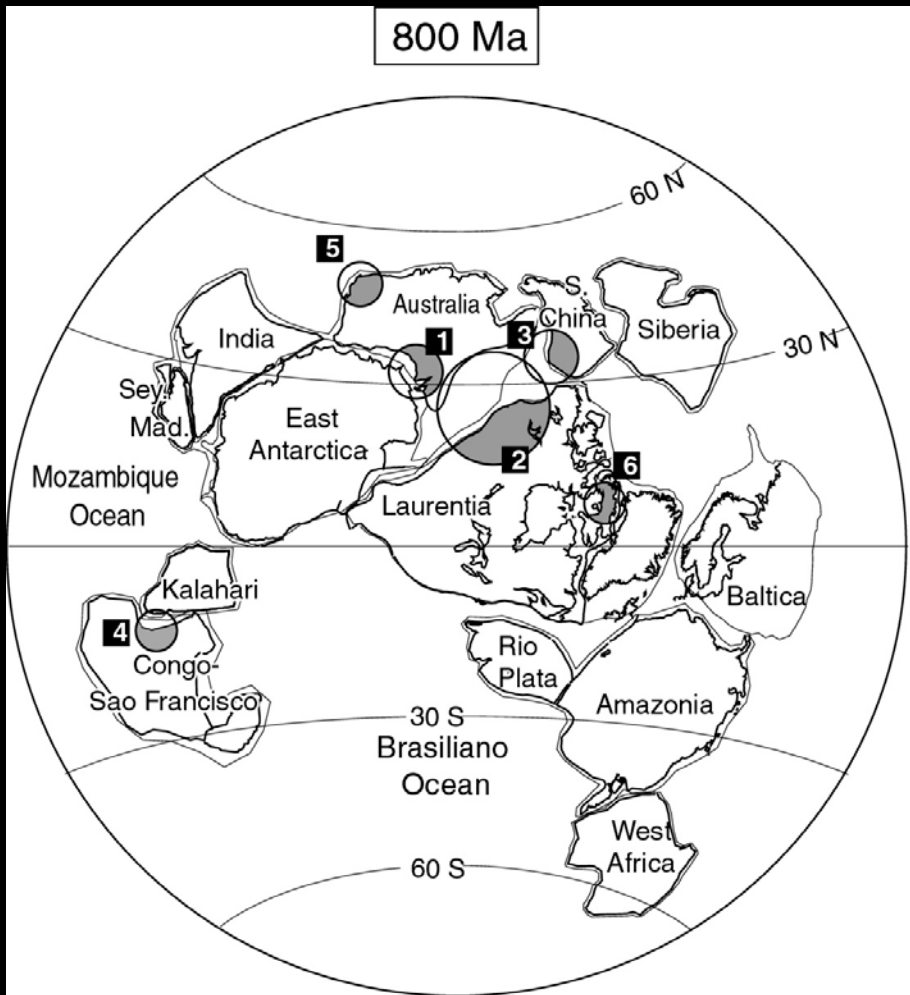
## 4 - Les variations tardi-protérozoïques du cycle du carbone



Pour avoir des détails sur les données ayant permis d de proposer ce modèle de « Terre, boule de neige », voir le dernier bulletin de l'APBG (n° 3-2015)



# Une proposition de modèle explicatif pour expliquer cet emballement



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

2 - Réchauffement de la lithosphère sous-jacente

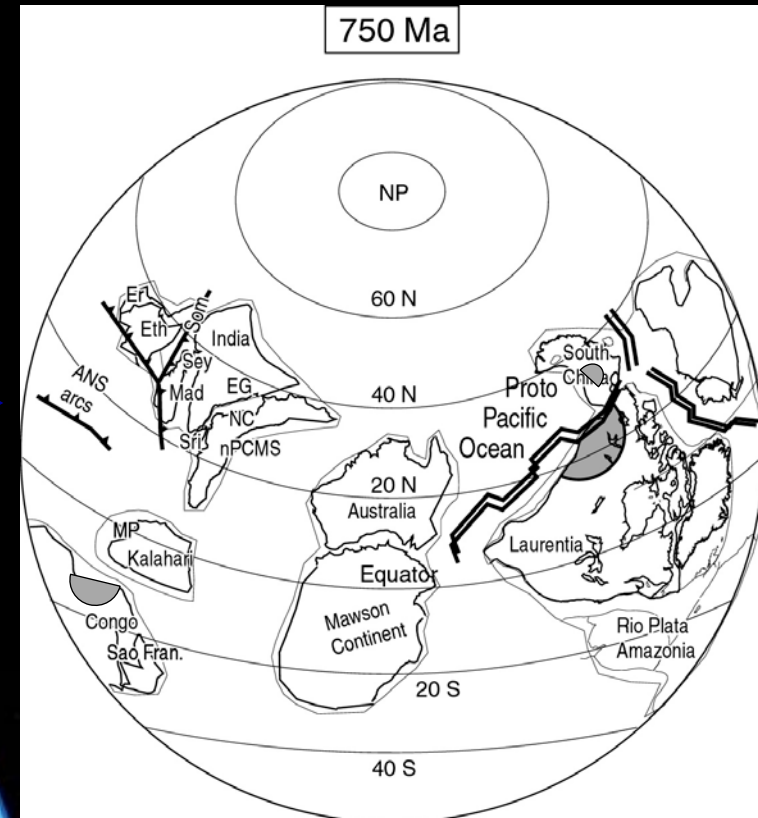
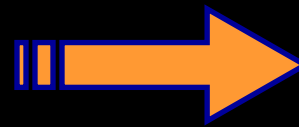
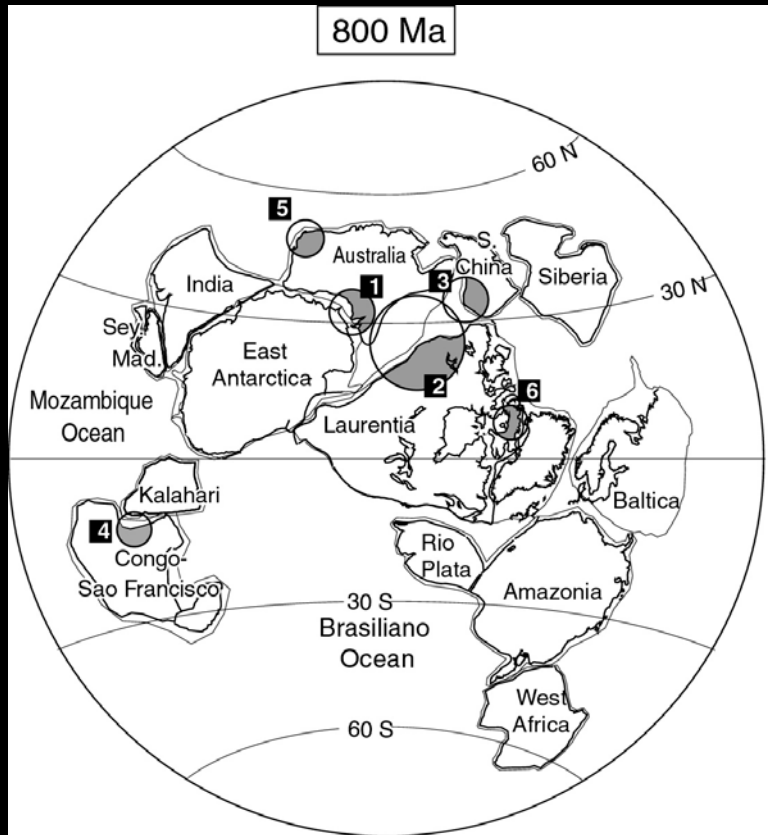
3 - Émissions de basaltes type « LIP » (giga-traps) 830-780 Ma

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

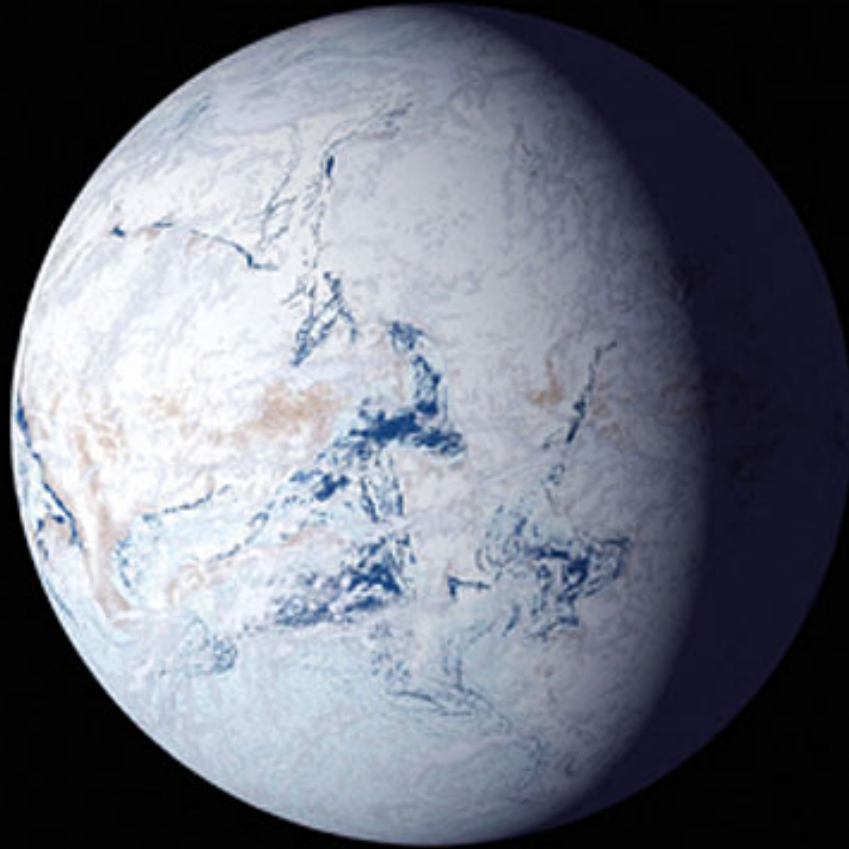




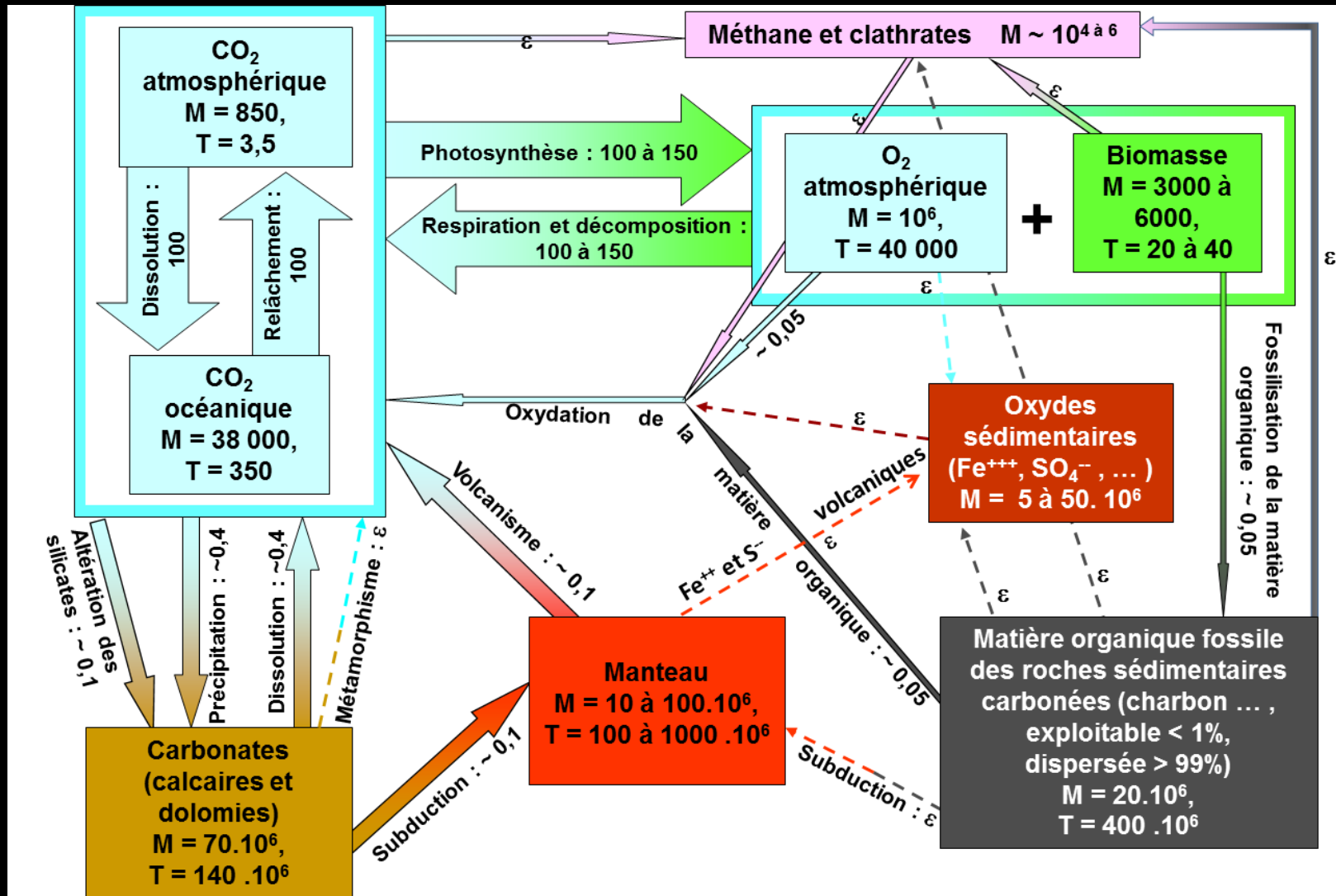
**4 - Dislocation du supercontinent ... Intensification du runoff.  
Augmentation de l'altération → augmentation de la pompe à CO<sub>2</sub>,  
baisse du CO<sub>2</sub> atmosphérique, baisse de l'effet de serre, et le  
phénomène s'emballe, car une fois que les glaciations ont dépassé une  
certaine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



**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.**



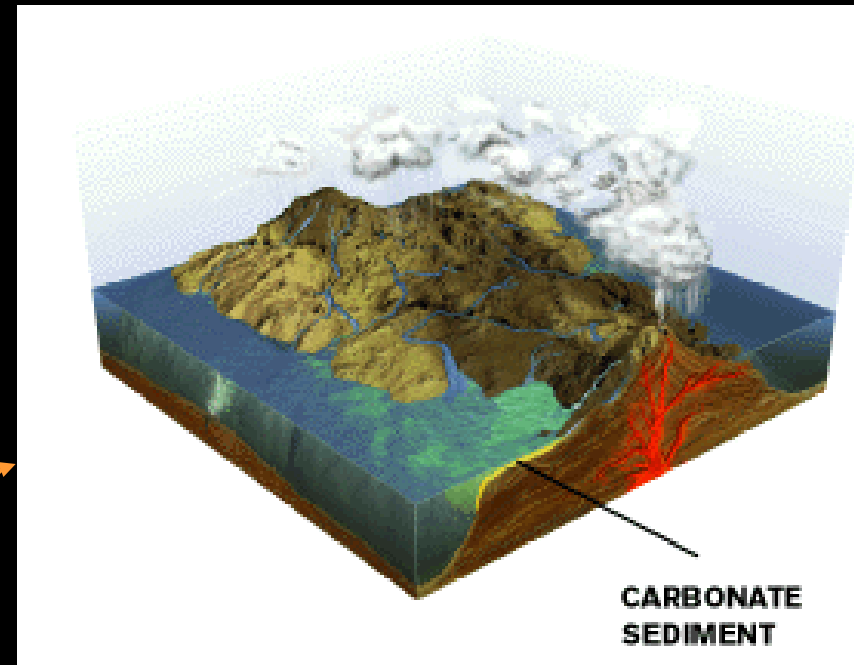
À cette époque, dans le cycle du C, tout était « figés ». Presque toutes les flèches étaient sub-nulles, sauf...



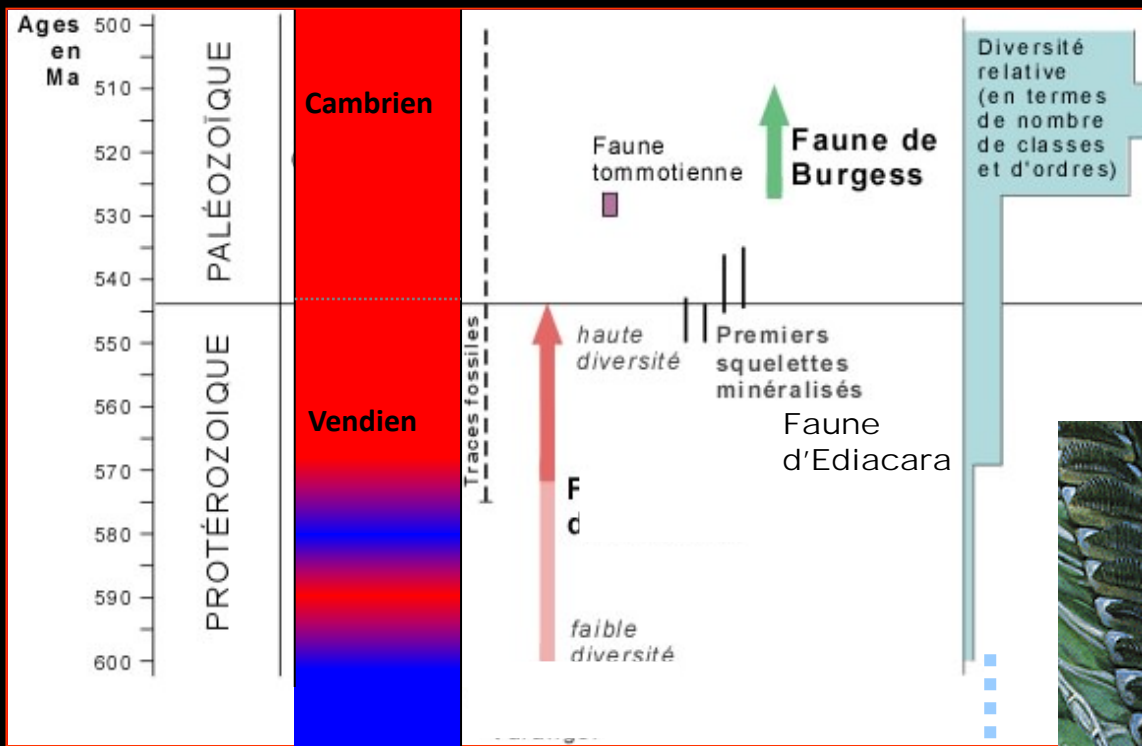




Le CO<sub>2</sub> est monté ; l'effet de serre a augmenté, la température a augmenté, la déglaciation a commencé, des eaux riches en CO<sub>2</sub> ont altérés les continents, qui ont libéré du Ca, qui a précipité sous forme de carbonates, les fameux « cap carbonates », qui recouvrent systématiquement les formations glaciaires. Le retour à « la norme » a été chaotique.



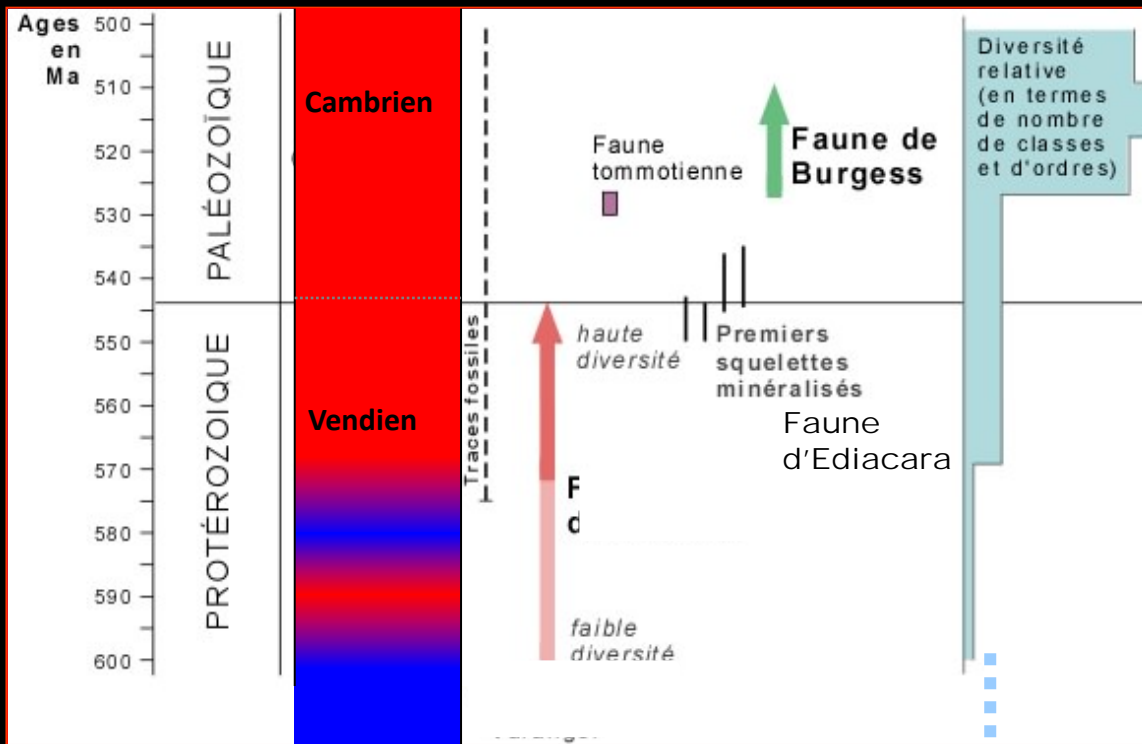
Or, 580 Ma, la fin de ces épisodes, partout dans le monde, c'est l'explosion de la diversité des métazoaires avec la faune dite d'Ediacara (à ne pas confondre avec la faune de Burgess).





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 !



Et quand je pense que le cycle du carbone n'est plus vraiment au programme !

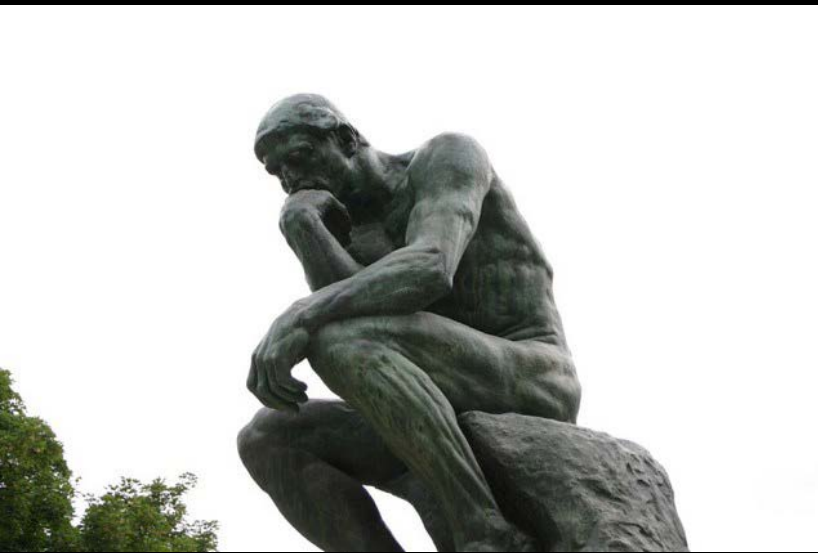


# En guise de conclusion sur ces réflexions sur l'effet de serre et le cycle du carbone

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

(ou commentaire sur la relativité du temps)

À l'échelle de 100 ans, le CO<sub>2</sub> a augmenté de 35% et la température moyenne de 0,8°C. Les perspectives indiquent un doublement du CO<sub>2</sub> et une augmentation de la température de 2 à 6°C d'ici la fin du siècle. C'est gravissime à cette échelle de temps !



À 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 CO<sub>2</sub> et la température s'arrêteront d'augmenter par la force des choses (sauf si ...). CO<sub>2</sub> 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**



À l'échelle des derniers millions d'années. La hausse précédente, anthropique et gravissime à l'échelle du siècle ou du millénaire, s'inscrit dans des variations naturelles et périodiques de la température et du CO<sub>2</sub> qui durent depuis quelques millions d'années. Ces variations naturelles sont dues aux interactions entre orbite de la Terre, calottes glaciaires, CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> à relâcher, sauf si ... L'astronomie nous dit que la prochaine glaciation aura sans doute lieu dans 64 000 ans

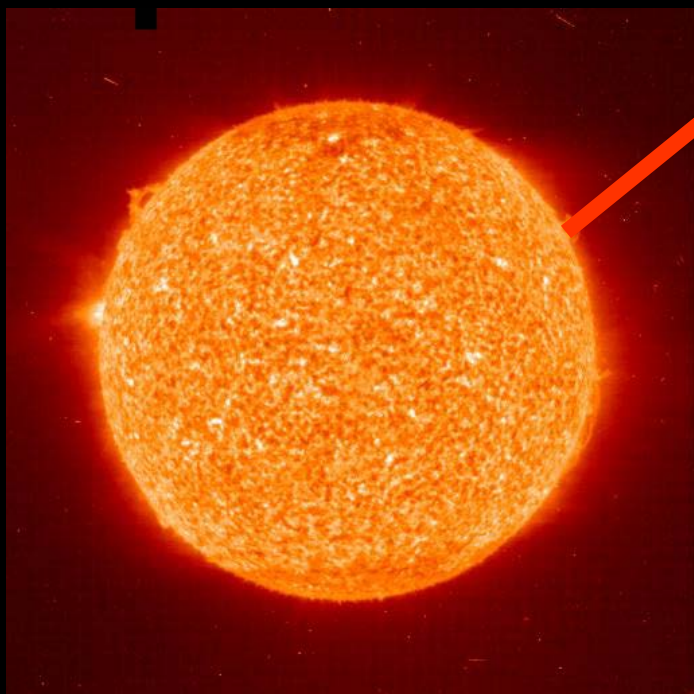




À l'échelle de plusieurs centaines de millions d'années. Depuis 80 000 000 d'années, la tendance globale est à la baisse de  $\text{CO}_2$  et de la température, malgré toutes les oscillations déjà vues. Pendant ces 80 000 000 d'années, le  $\text{CO}_2$  a été divisé par 10 et la température moyenne a baissé de 10 à 20°C. Entre -300 000 000 et -80 000 000 au contraire, la tendance était à la hausse du  $\text{CO}_2$  (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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ ), c'est-à-dire pour encore pas mal de millions d'années. Quand l'Himalaya sera aplani, le  $\text{CO}_2$  remontra, et la température aussi, à moins que d'autres montagnes se forment en pays intertropical humide.



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

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

- (1) Le  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  a « presque » été compensée par la hausse du Soleil. À 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).



## À l'échelle du futur lointain.

La puissance rayonnée par le Soleil a augmenté de 50% depuis 4,5 Ga, et ça va continuer. Le CO<sub>2</sub> baisse, baisse inexorablement (il en est à 0,04% !). Les deux phénomènes ne se compensent pas tout à fait, et la baisse du CO<sub>2</sub> semble l'emporter, avec baisse globale de la température depuis 4 Ga. Deux futurs (très lointains) sont envisageables :

- (1) Cela continue comme ça ; la Terre se refroidira légèrement, mais surtout le CO<sub>2</sub> va venir à manquer (c'est le facteur limitant de la photosynthèse)  
→ « on » mourra » de faim, en pays froid.
- (2) La baisse du CO<sub>2</sub> s'arrête, alors l'augmentation du Soleil l'emportera, 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, 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



## À l'échelle du futur lointain.

La puissance rayonnée par le Soleil a augmenté de 50% depuis 4,5 Ga, et ça va continuer. Le CO<sub>2</sub> baisse, baisse inexorablement (il en est à 0,04% !). Les deux phénomènes ne se compensent pas tout à fait, et la baisse du CO<sub>2</sub> semble l'emporter, avec baisse globale de température depuis 4 Ga. Deux futurs (très lointains)

**Voilà, c'est fini pour cette année.  
Merci de votre attention !  
Avez-vous des questions ?**

Les :  
... la Terre se refroidira  
... venir à manquer (c'est

(2) La...  
Soleil l'emporte...  
océanique ».  
→ « on mourra » de chaud. C'est...  
probable \*

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



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