

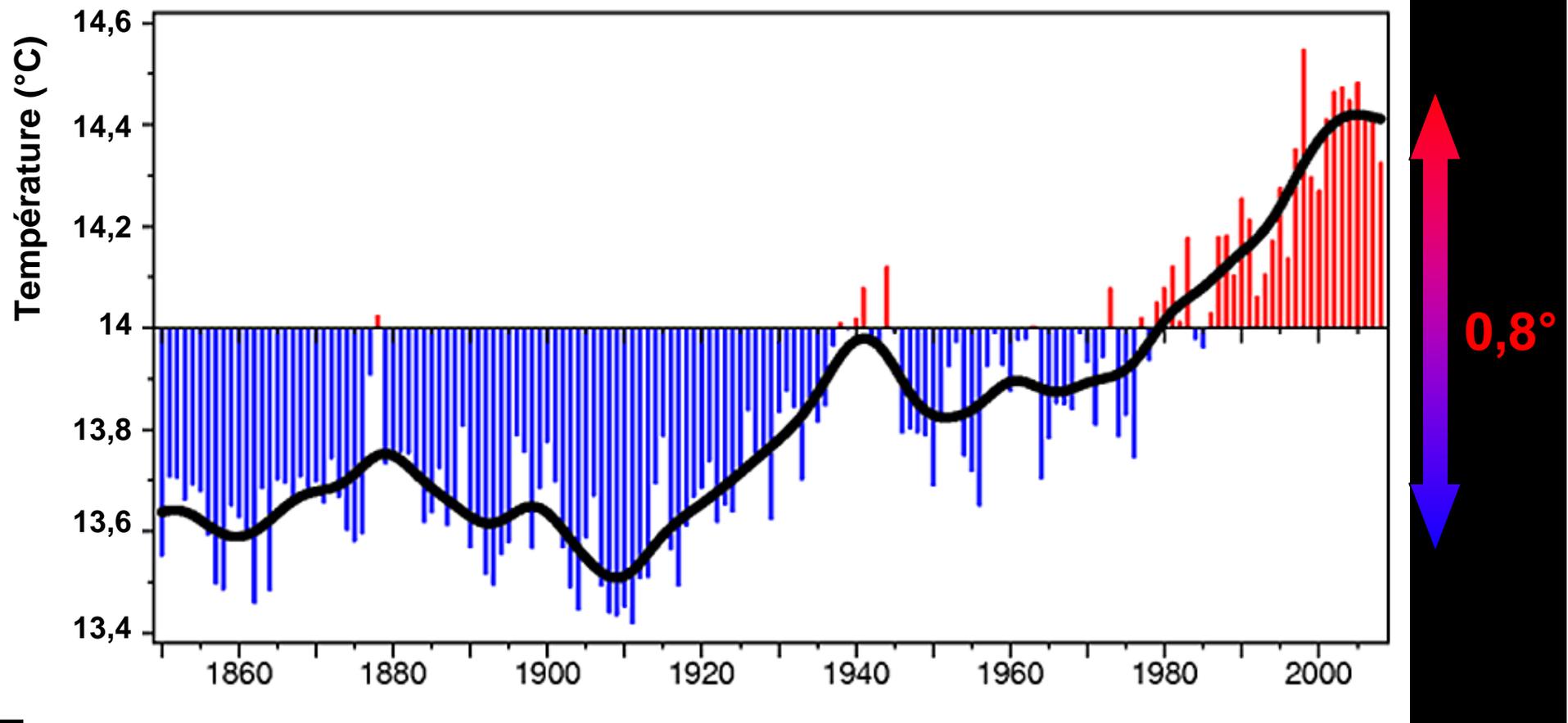
L'effet de serre et le cycle du carbone, deux clés indispensables pour comprendre les variations climatiques.



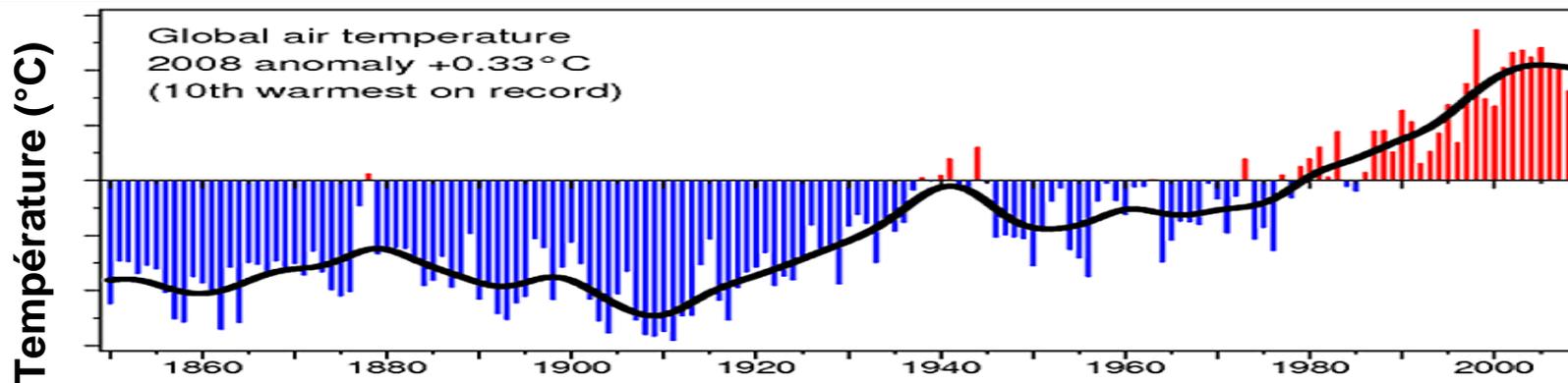
Pierre Thomas, ENS Lyon

Fleurance, août 2011

Les variations historiques (post 1860) du climat : la courbe qui fait peur !



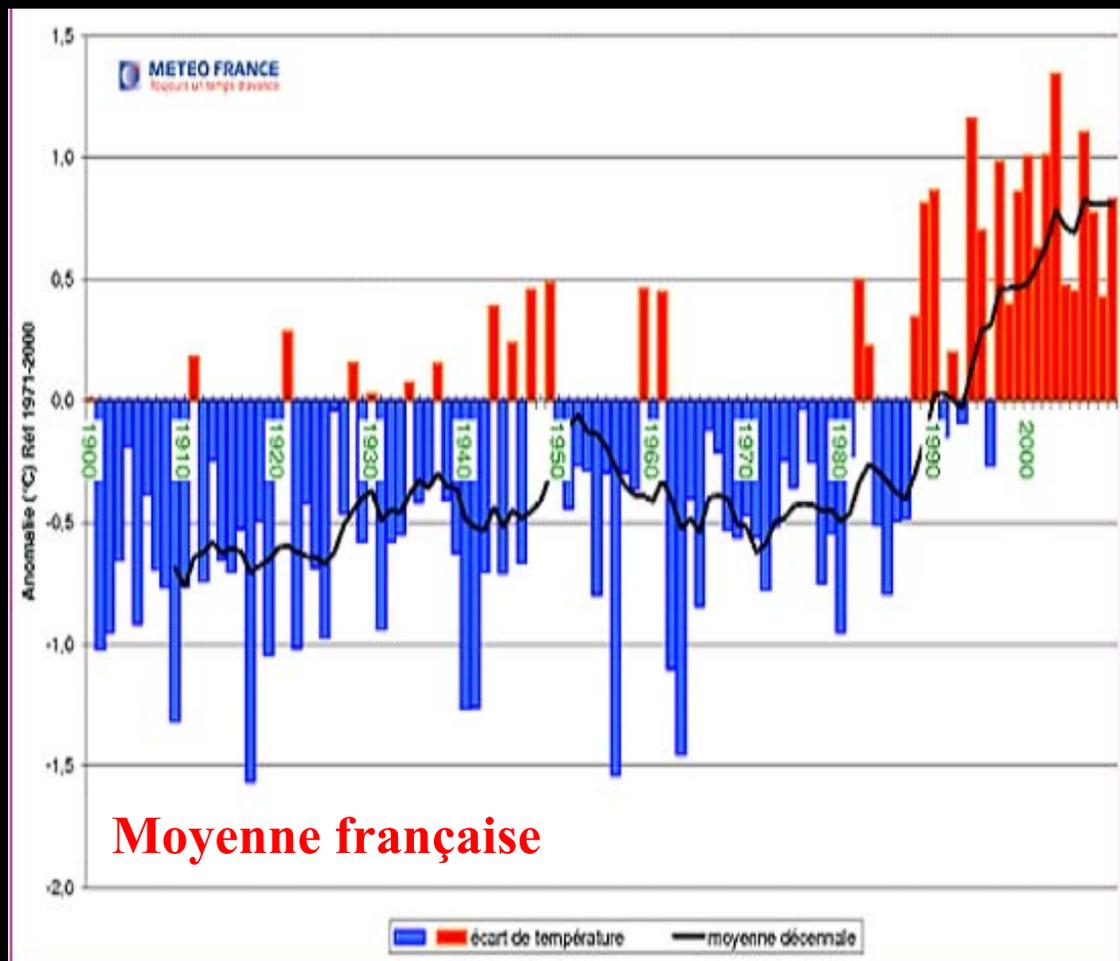
Variation de la température moyenne mondiale. On peut bien le faire qu'à partir de 1860. Avant il y avait trop peu de sites possédant une station météorologique.



0,8°

Moyenne mondiale

Comparaison avec la moyenne française. L'augmentation est le double de la moyenne mondiale



1,6°

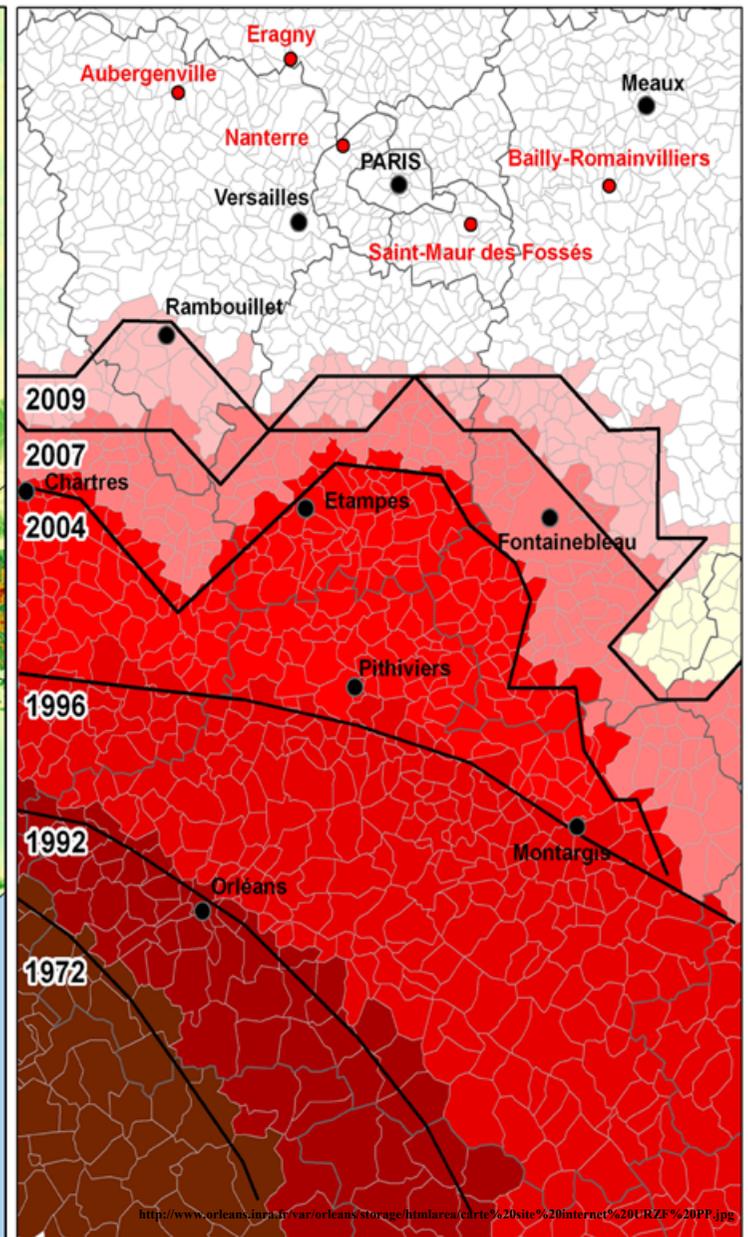
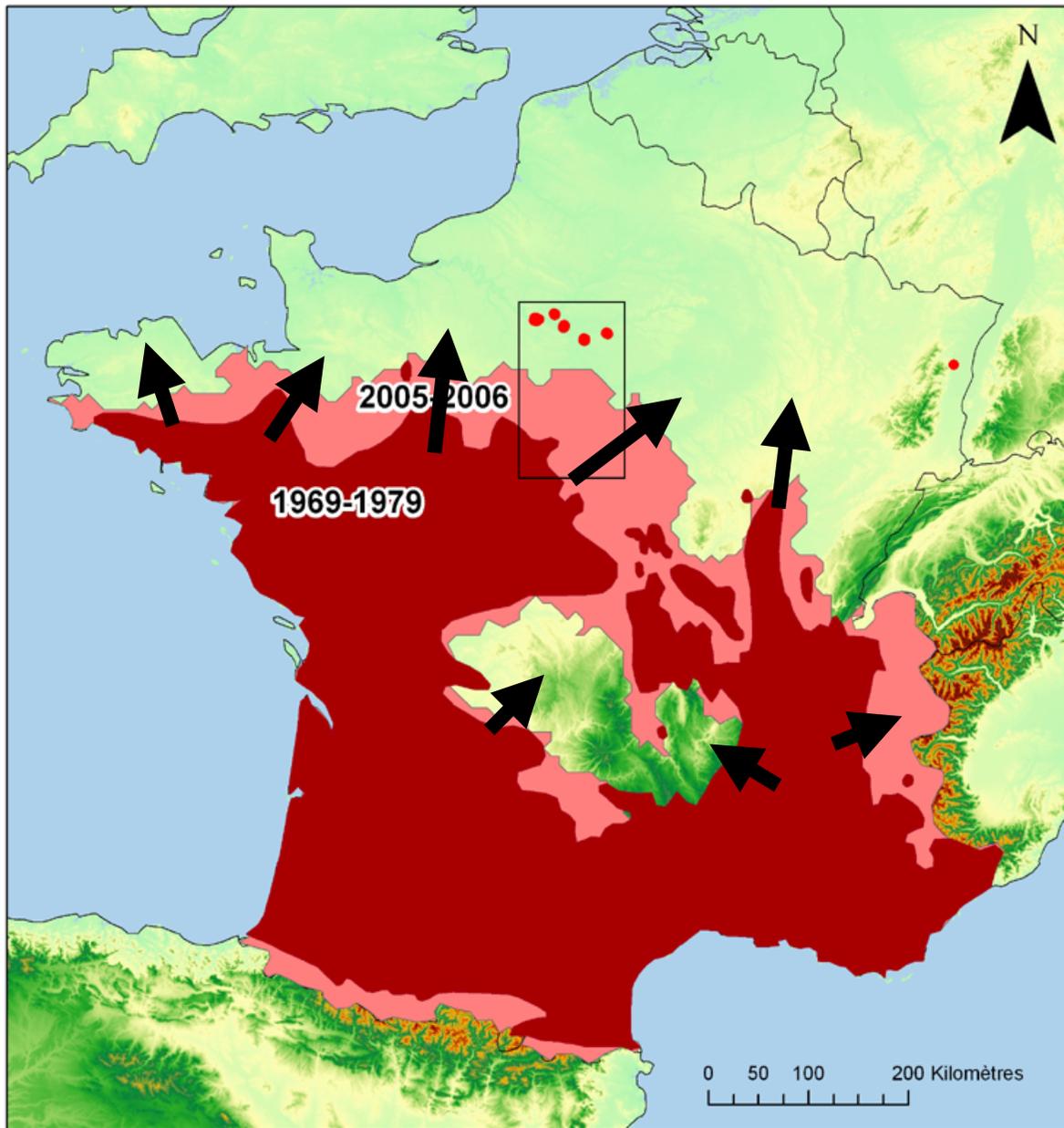
Moyenne française



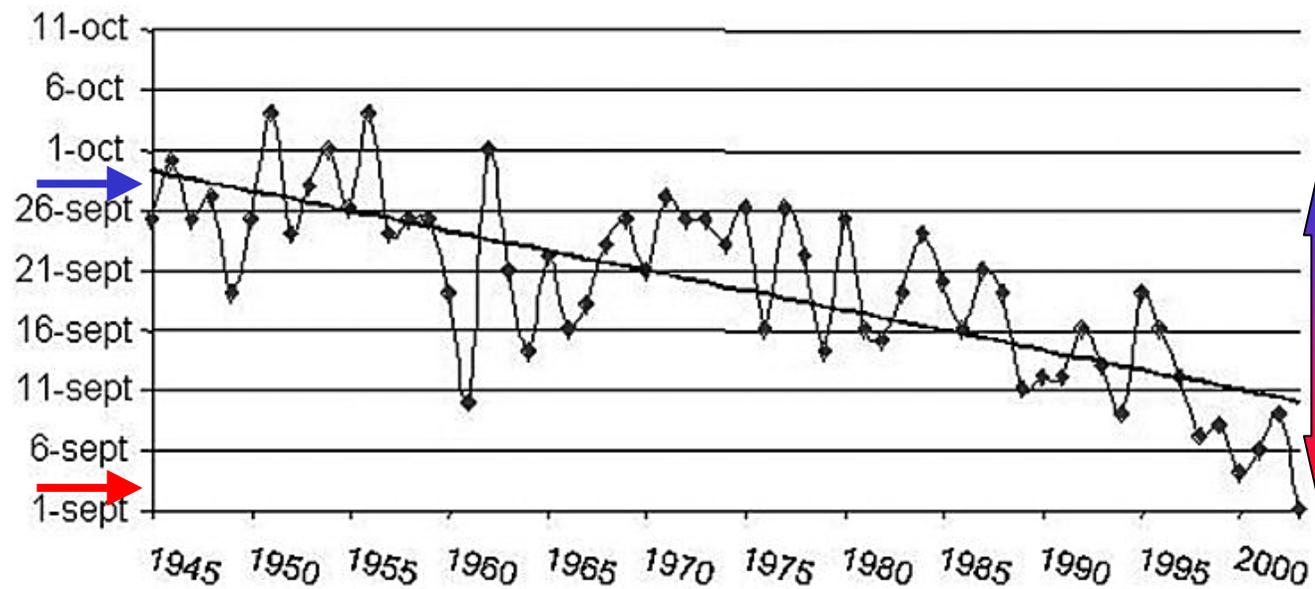
Les chenilles processionnaires



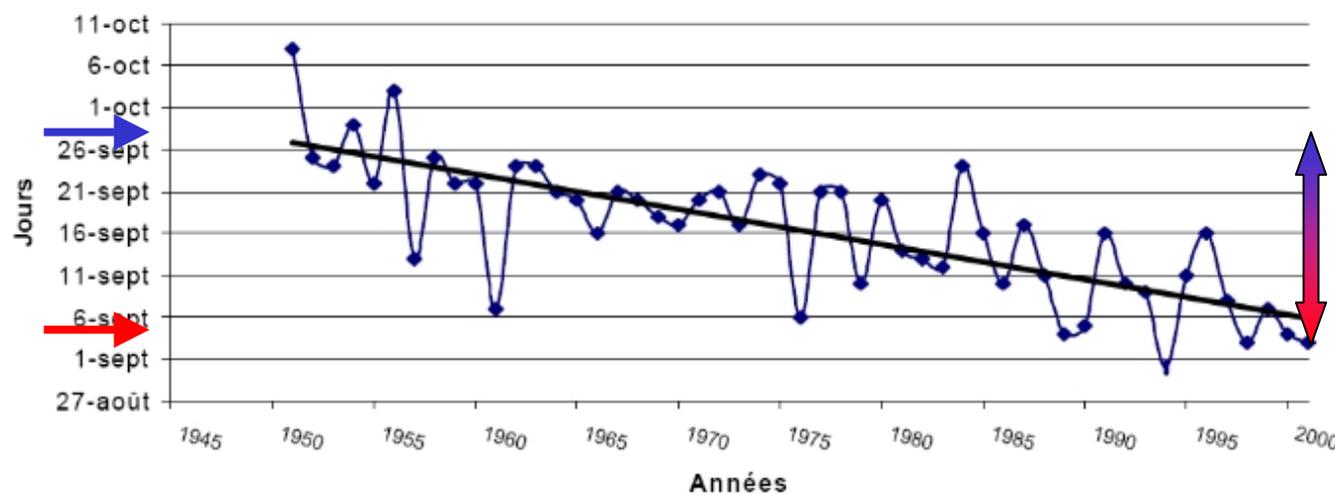
**Ca ne se voit pas
qu'avec des courbes
de température.
Les espèces du sud
migrent vers le nord.**



Cartes de cette migration vers le nord et vers les montagnes



**Date du début
des vendanges
à Chateauneuf
du Pape**



**Date du début
des vendanges
dans la région
de Tavel**

**Ca se voit avec la dates des récoltes et des vendanges,
3 à 4 semaines d'avance depuis 1945 au sud de la vallée du Rhône**

**Voici le glacier de l'Invernet (Savoie) en 2000,
puis 1960, puis en 1860**



**Voici le glacier de l'Invernet (Savoie) en 2000,
puis 1960, puis en 1860**



**Voici le glacier de l'Invernet (Savoie) en 2000,
puis 1960, puis en 1860**





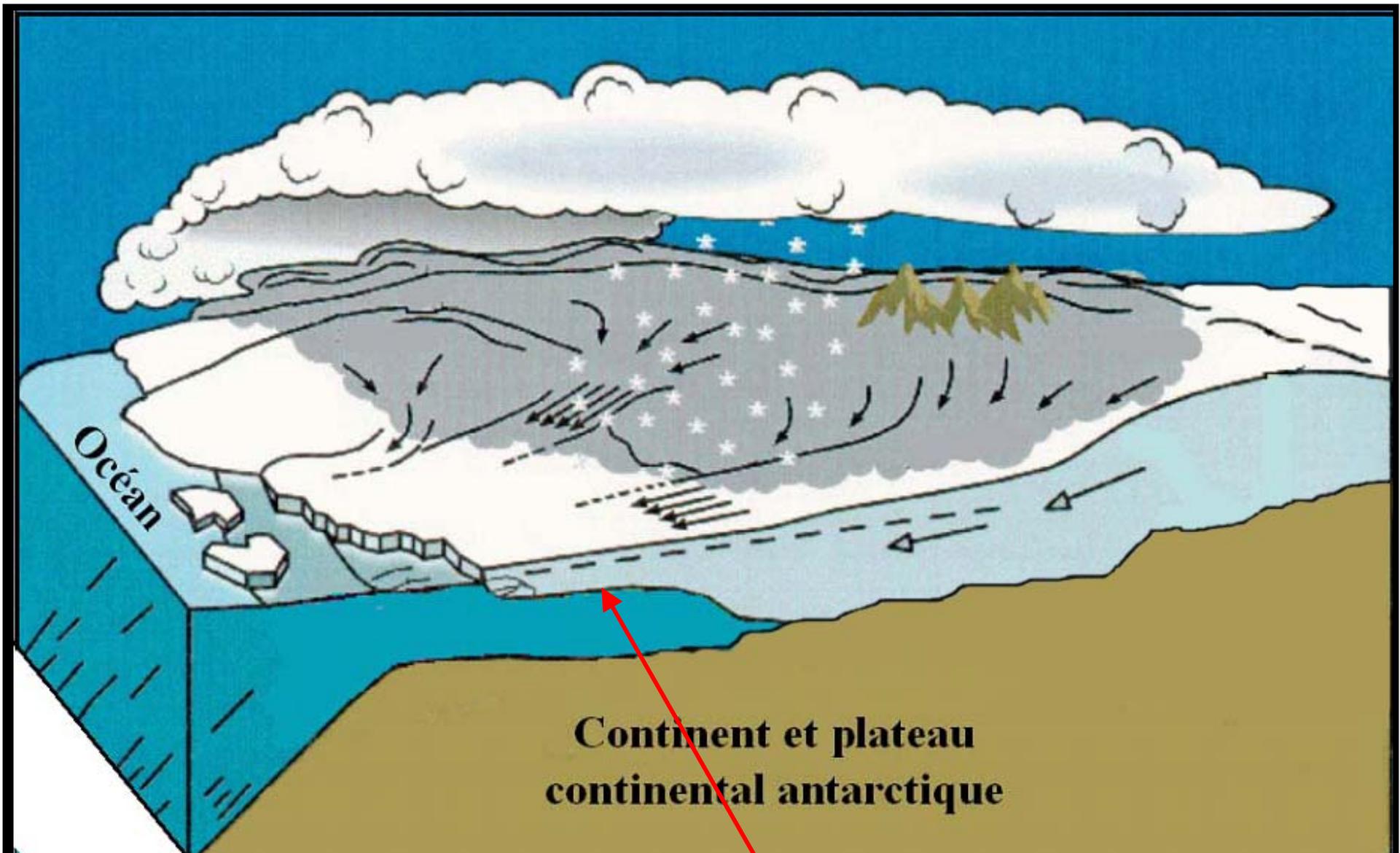
1109 m
Dates des images satellite : 6 juil. 2003 - 5 mars 2006
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
Image © 2010 DigitalGlobe
© 2010 Cnes/Spot Image
Image © 2010 IGN-France
45°53'25.31" N 6°51'16.50" E élév. 1717 m
©2009 Google
Altitude 3.57 km

Image Google Earth du Mont-Blanc et du glacier des Bossons



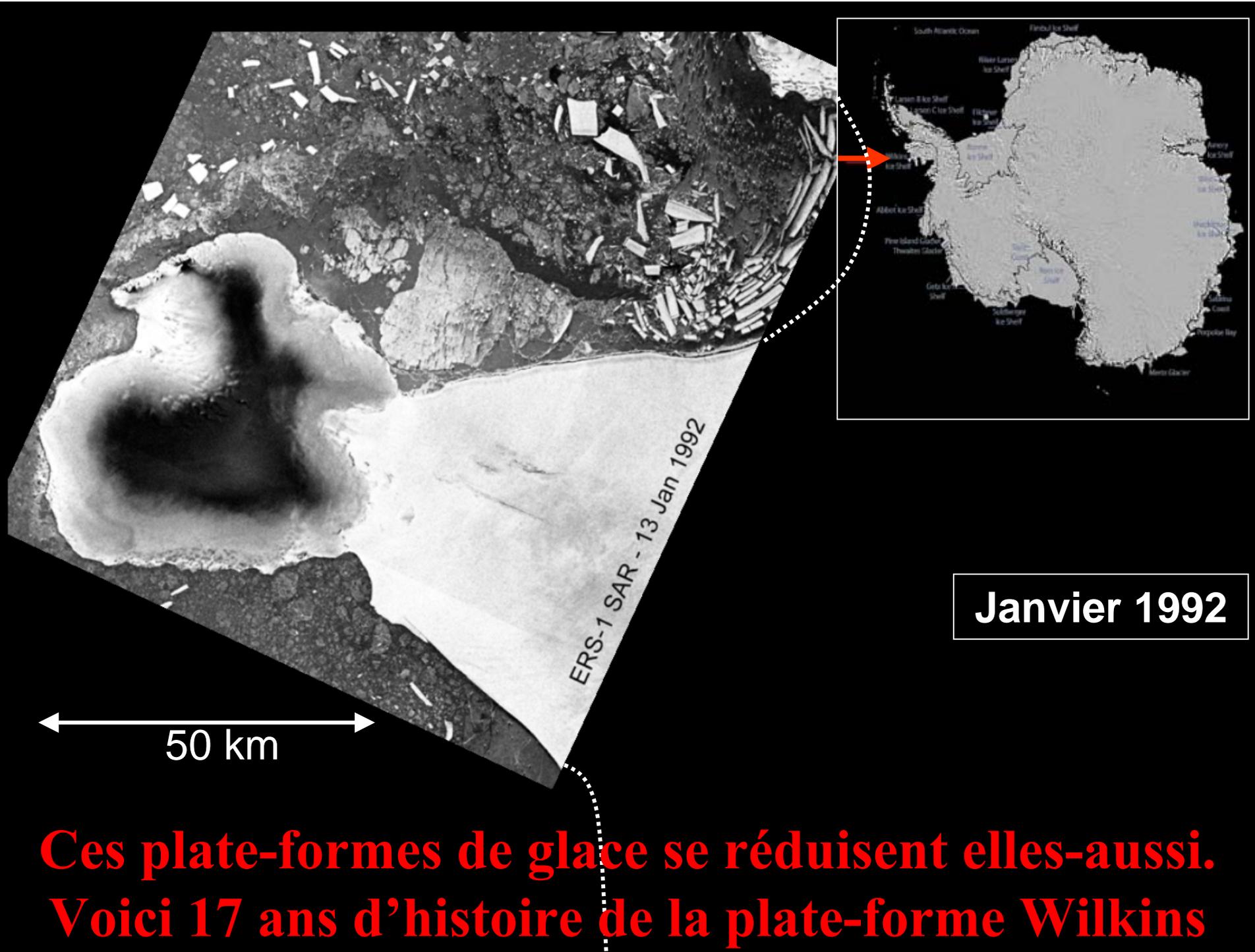
Recul sur 4 ans.

**Voici un
« coloriage »
montrant son
recul entre mai
2003 et octobre
2007.**



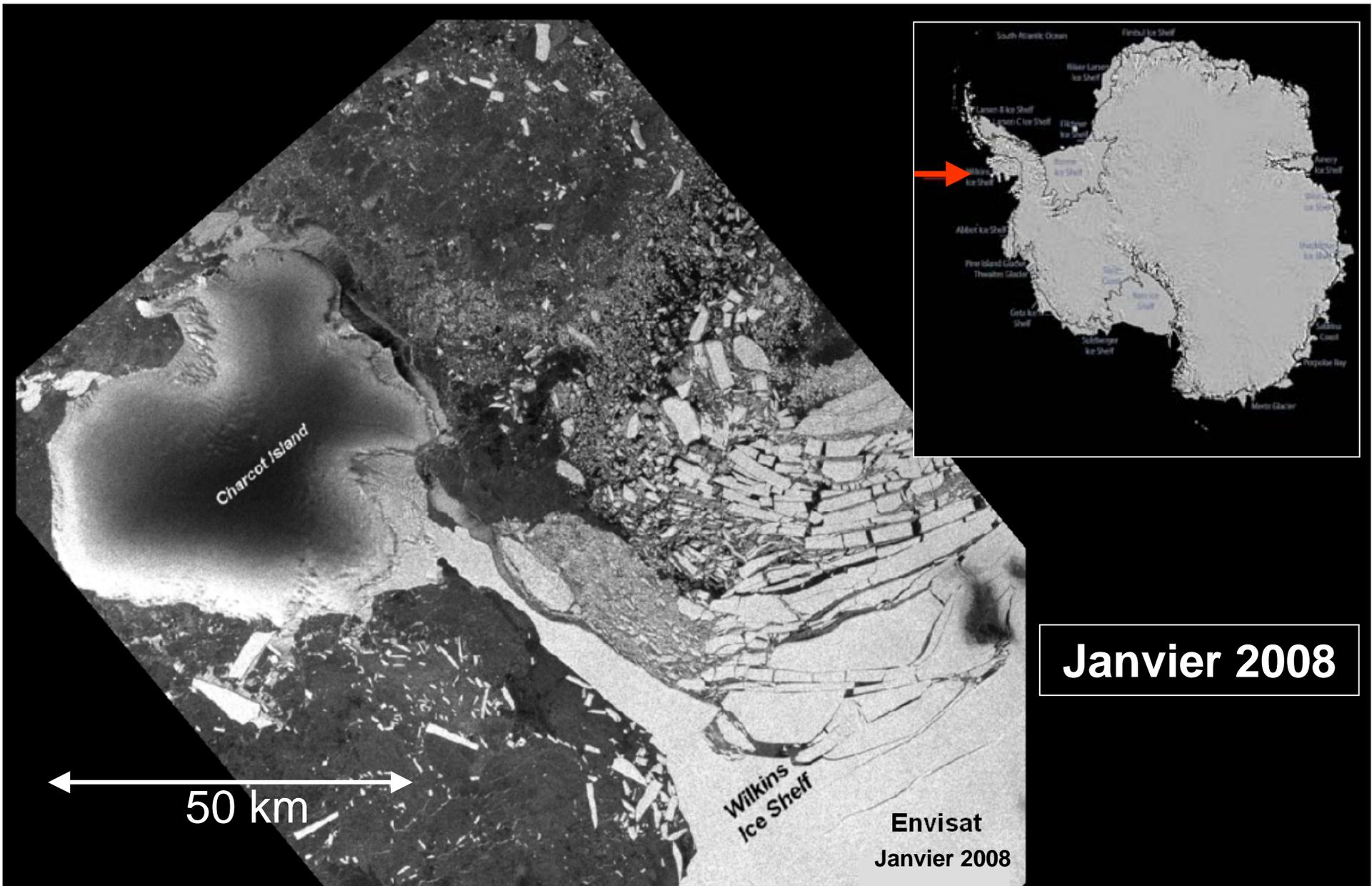
Continent et plateau
continental antarctique

Parfois, un glacier continental « déborde » sur la mer, et forme une **plate-forme de glace** (ice shelf)



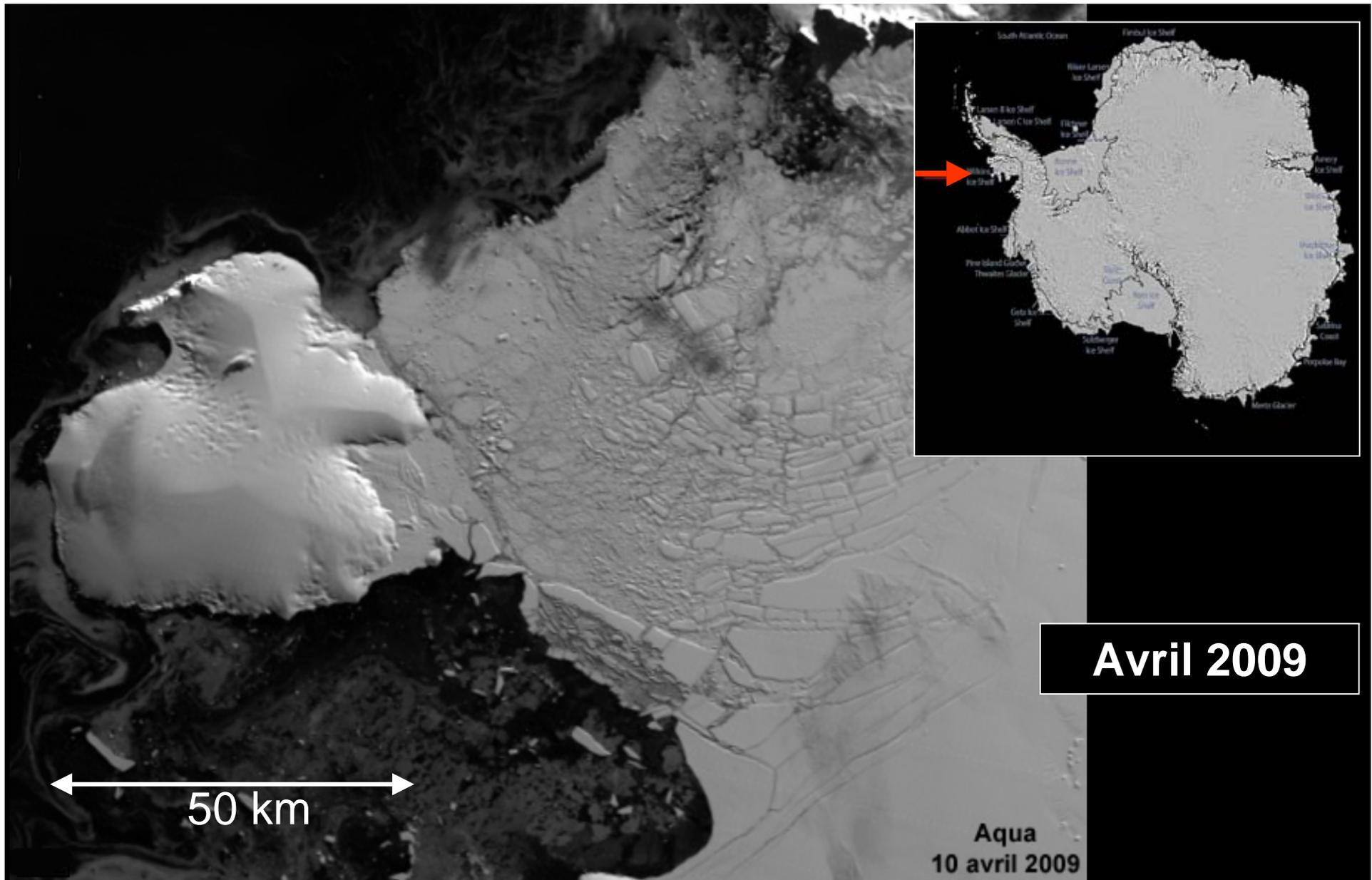
Janvier 1992

**Ces plate-formes de glace se réduisent elles-aussi.
Voici 17 ans d'histoire de la plate-forme Wilkins**



Janvier 2008

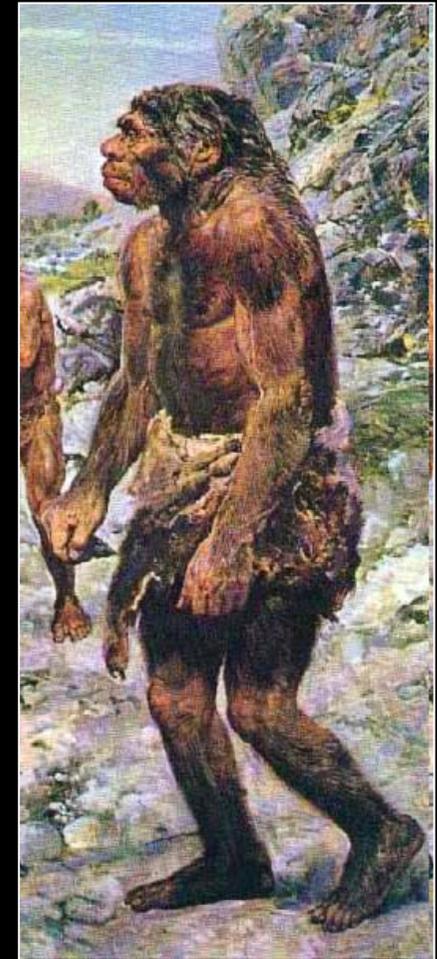
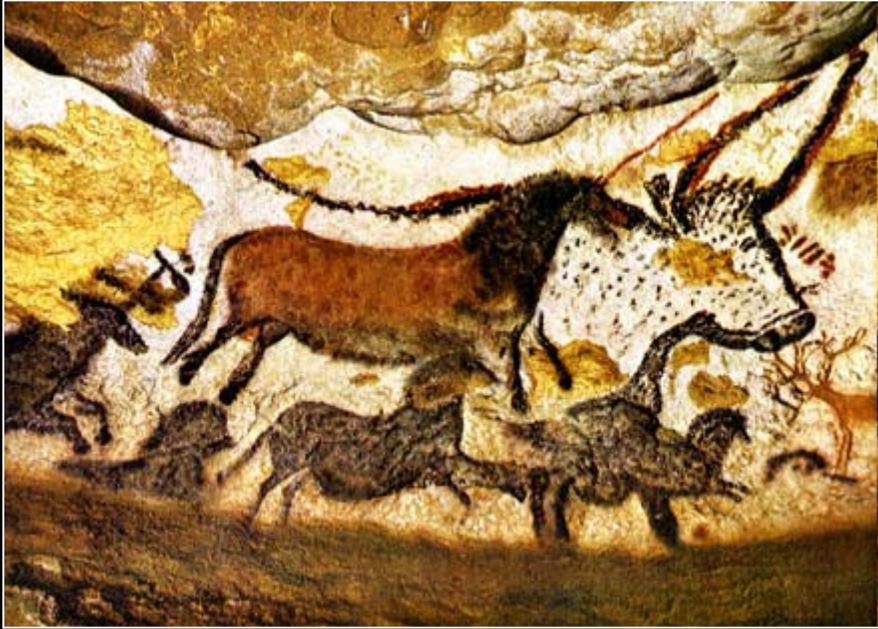
**Ces plate-formes de glace se réduisent elles-aussi.
Ici, 17 ans d'histoire de la plate-forme Wilkins**



Avril 2009

**Ces plate-formes de glace se réduisent elles-aussi.
Ici, 17 ans d'histoire de la plate-forme Wilkins**

Et quel(s) étai(en)t le(s) climat(s) du temps des hommes préhistoriques ?



Les Alpes, il y a 140 000 ans



Jusqu'où allaient ces glaciers des Alpes ? A Lyon !

Le Gros Cailloux de la Croix Rousse, aujourd'hui



C'est ce qu'on appelle un bloc erratique

La Croix Rousse il y a 140 000 ans



Lyon il y a 140 000 ans





**Aujourd'hui,
-120 000 ans**

New York ● ● **Londres**



**- 20 000 ans,
- 140 000 ans**



**Bloc erratique et surface
striée dans Central Park à
New York**

**Et il n'y a pas que l'Europe qui est
touchée par ces variations
climatiques ; c'est un phénomène
mondial !**



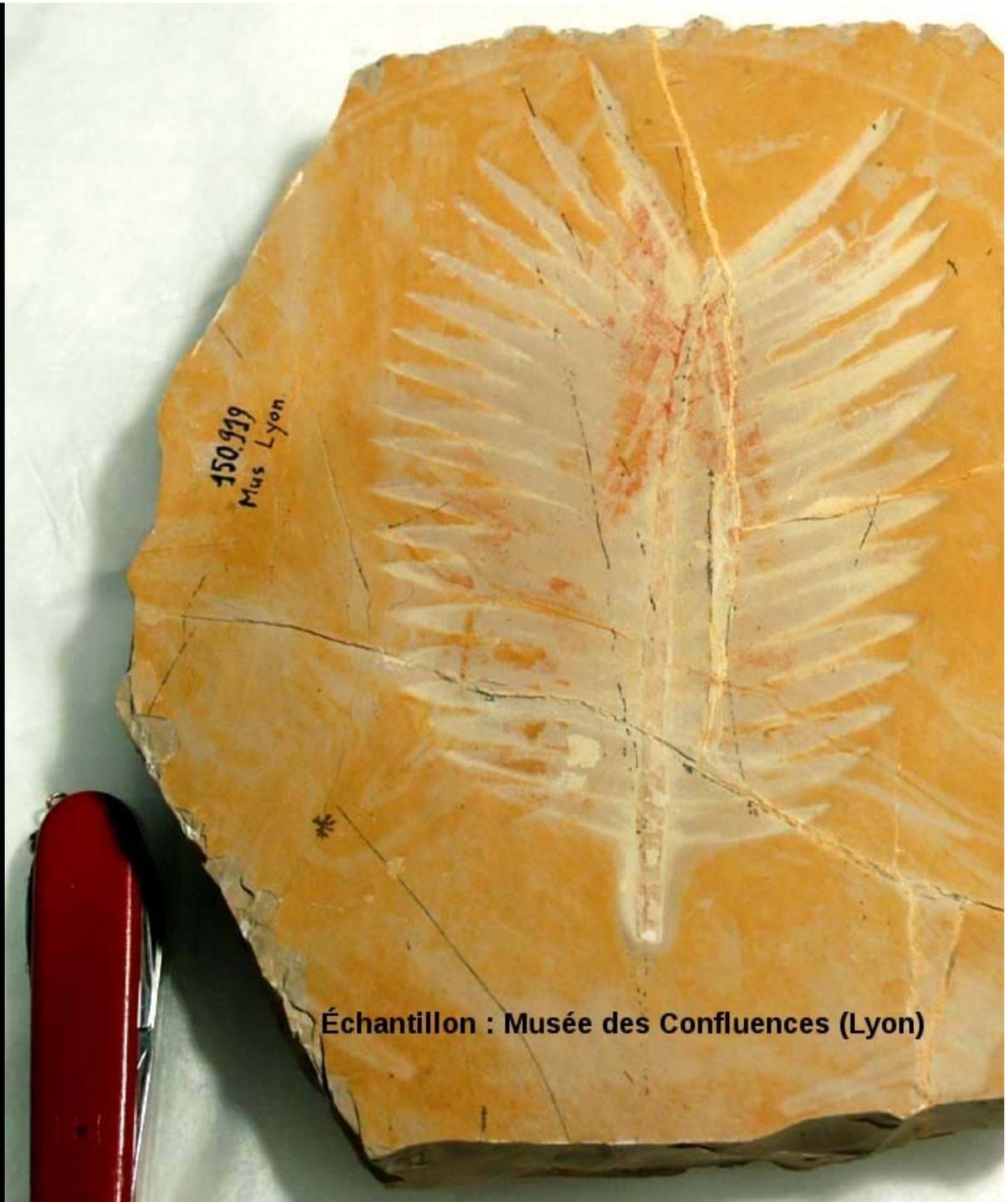
**Et quel était le climat du temps des dinosaures ?
Globalement 10 à 20° de plus que maintenant !**



La région lyonnaise il y a 140 000 000 ans.

A Cerin (région lyonnaise), on trouve des fossiles datant de –140 000 000 ans, attestant d'un climat chaud, type Nouvelle Calédonie.

On y trouve des espèces de cycas,

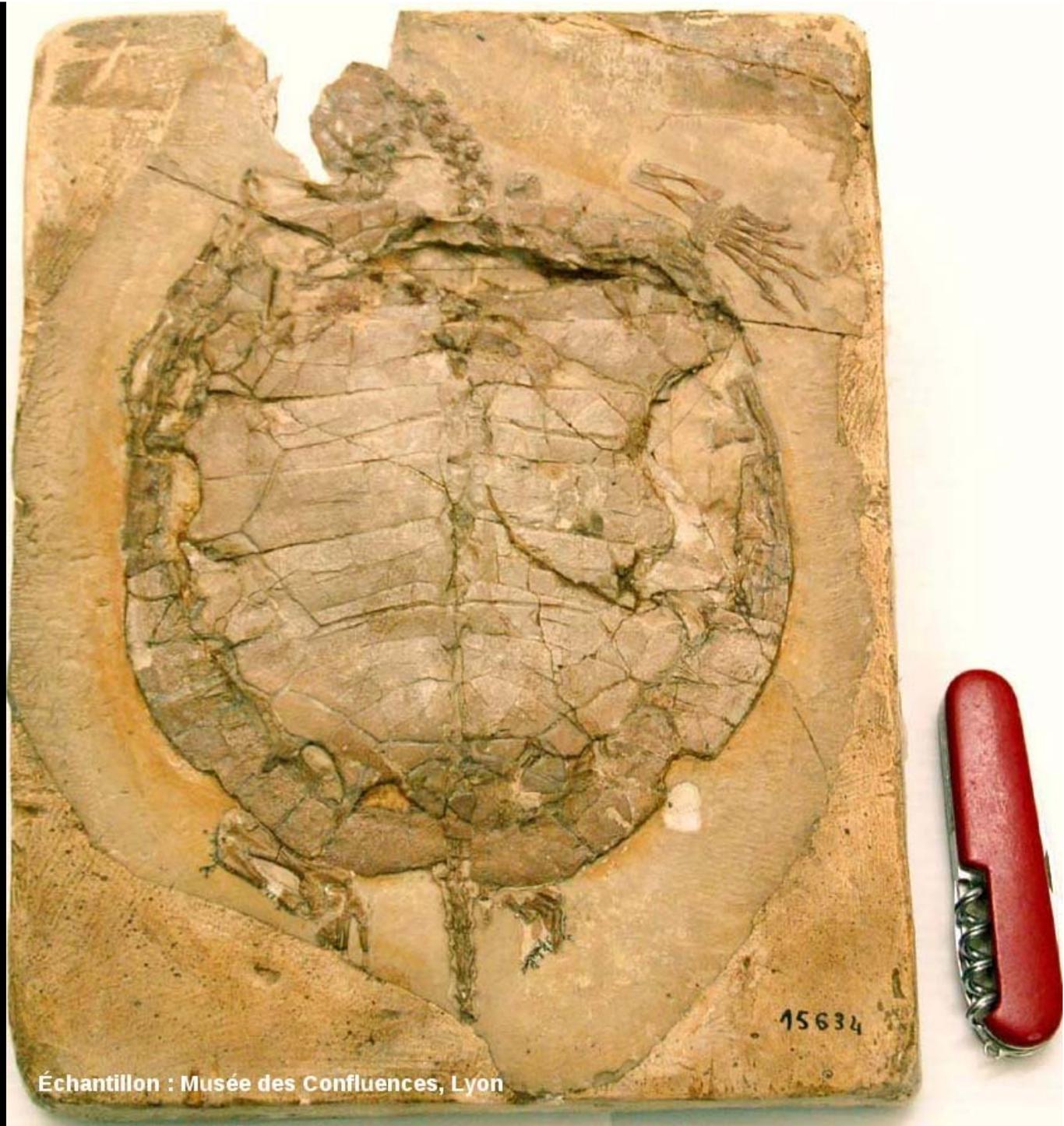


Échantillon : Musée des Confluences (Lyon)



Photographie : Pierre Thomas

... des tortues,



Échantillon : Musée des Confluences, Lyon



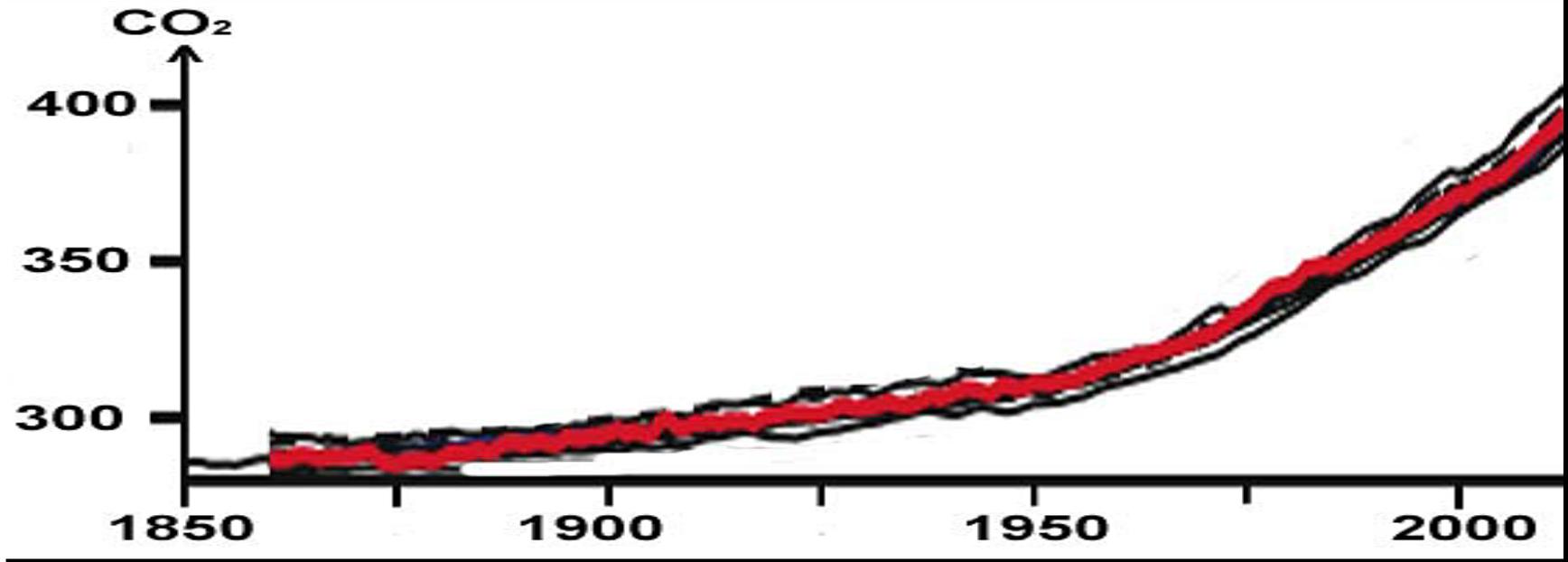
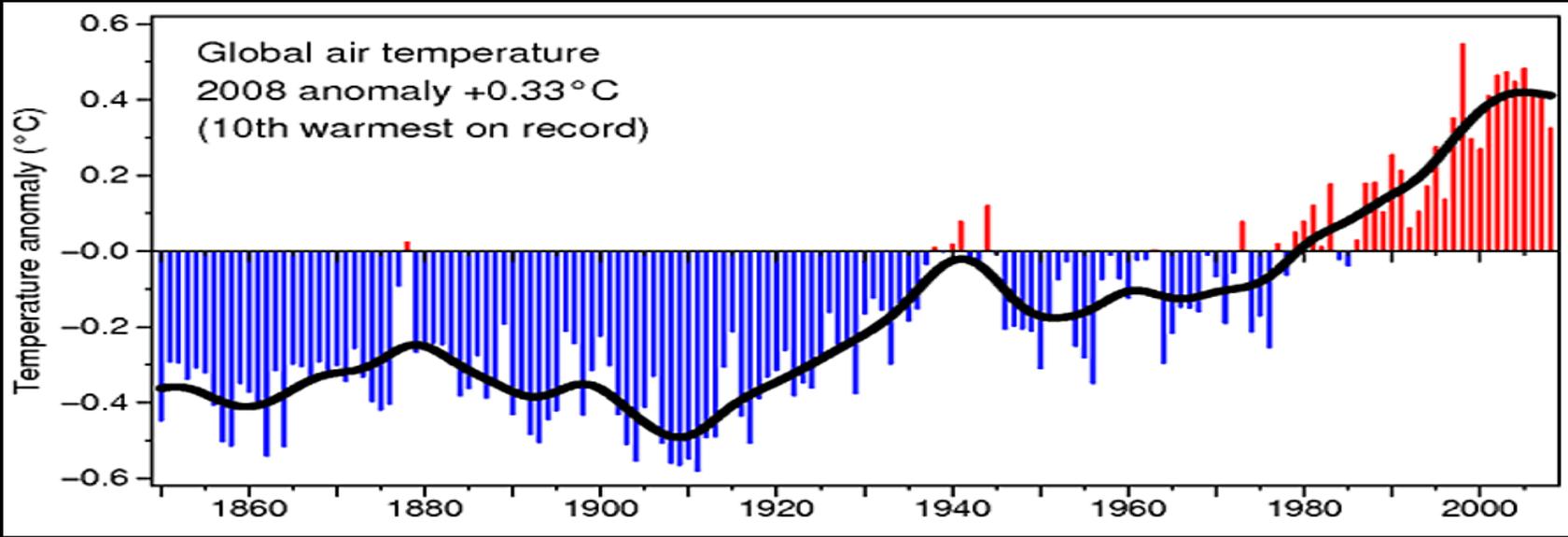
Échantillon : Musée des Confluences, Lyon.

**Des (petits) crocodiles ...
Bref, le climat lyonnais était beaucoup
plus chaud qu'aujourd'hui !**

**Le principal « mis en examen » :
le gaz carbonique (CO₂) qui cause un
effet de serre supplémentaire.**

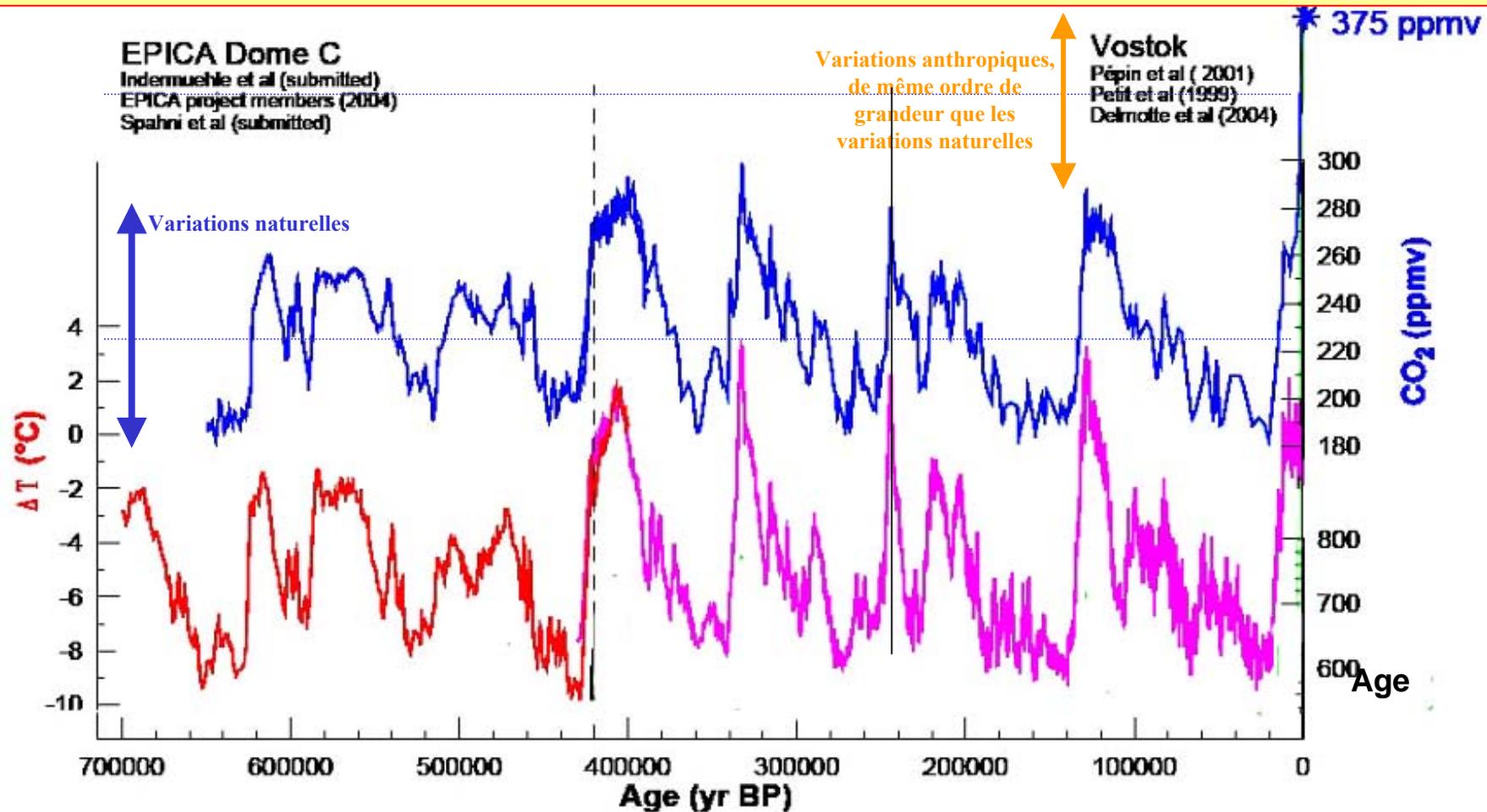


**Quels sont les faits préliminaires qui vont provoquer
cette mise en examen ?**



Evolution comparée Température et CO₂ depuis 160 ans

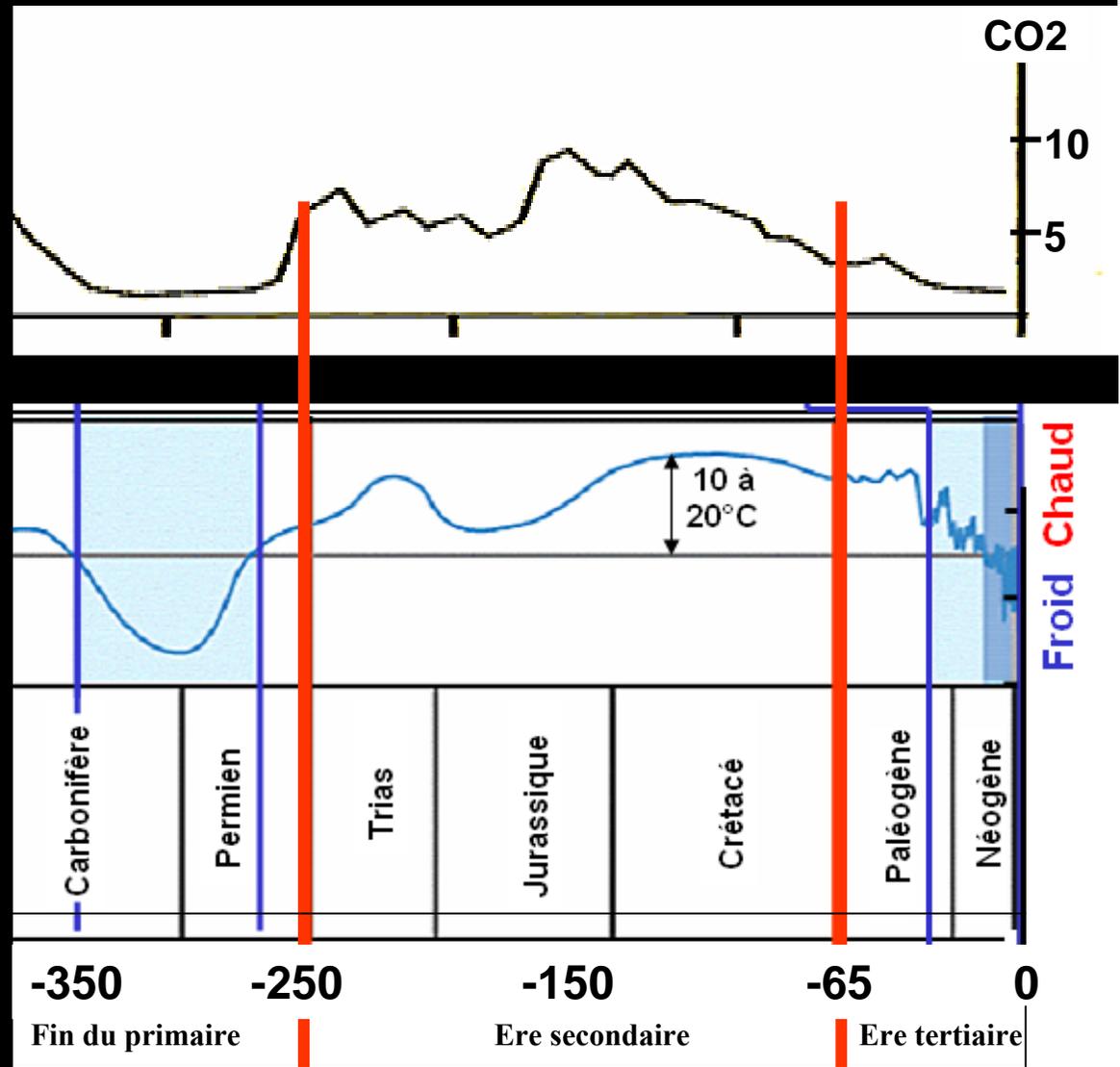
L'argument « massue » : l'évolution comparée température et CO₂ depuis 700 000 ans



La température antarctique varie de +2 à -10°C par rapport à la température actuelle (-40°C). Le CO₂ varie de 200 à 280 ppmv ; il est aujourd'hui à 375 (380). Les variations sont parfaitement corrélées.

Variation du CO₂ atmosphérique depuis 360 Ma : de 1 à 10 fois le taux actuel

Variation de la température moyenne depuis 360 Ma : de -10 à +20° par rapport à la moyenne actuelle.



Une autre donnée moins connue : l'évolution comparée température et CO₂ depuis 360 000 000 ans

D'où deux grandes questions à examiner sérieusement :

(1) Qu'est ce que l'effet de serre ?

(2) Qu'est ce qui fait varier le taux de CO₂ atmosphérique, de façon « artificielle » ou naturelle ?

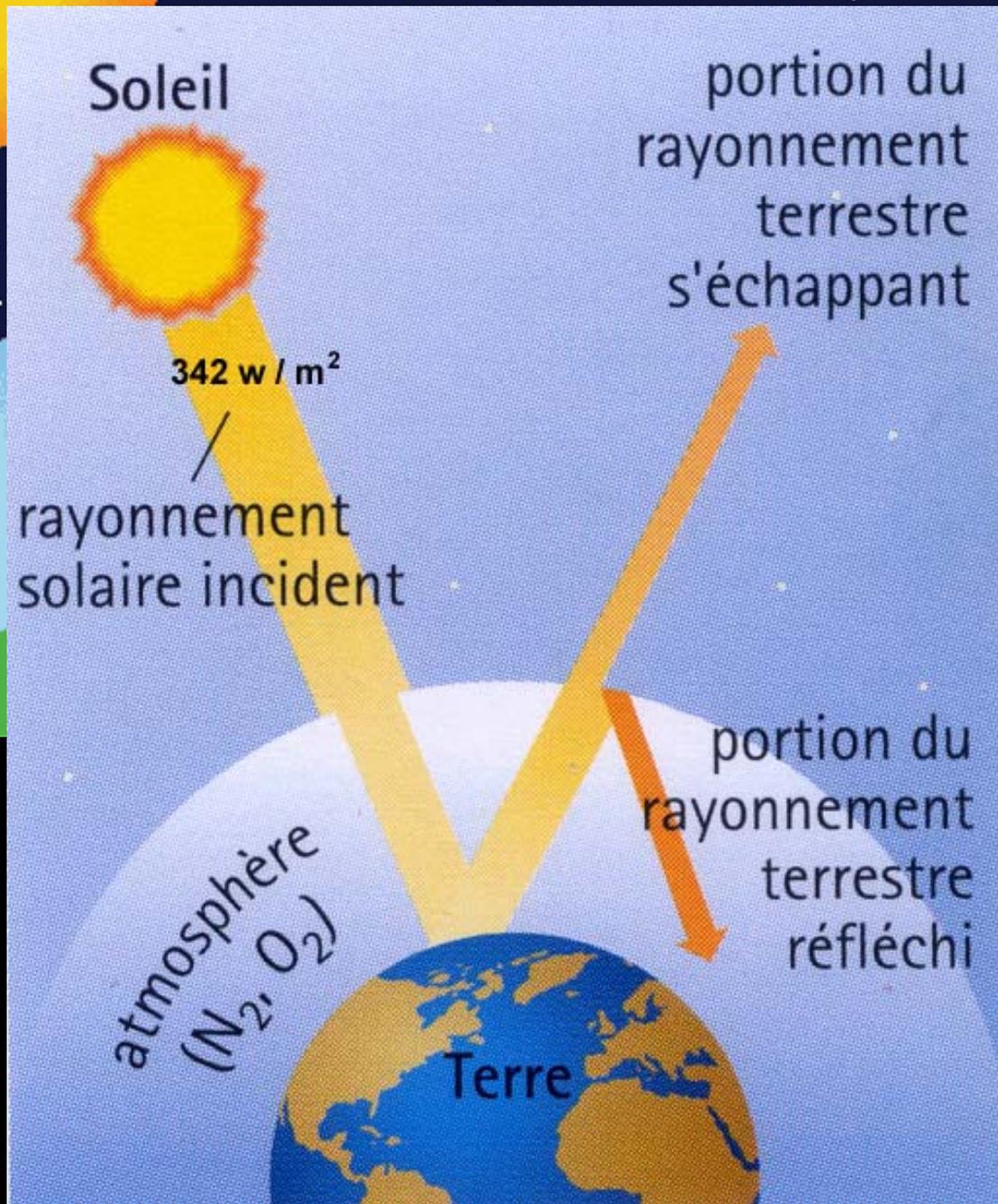


L'un des deux principaux « accusés », c'est l'effet de serre. Qu'est ce que l'effet de serre, phénomène physique bien expliqué il y a plus de 150 ans ?

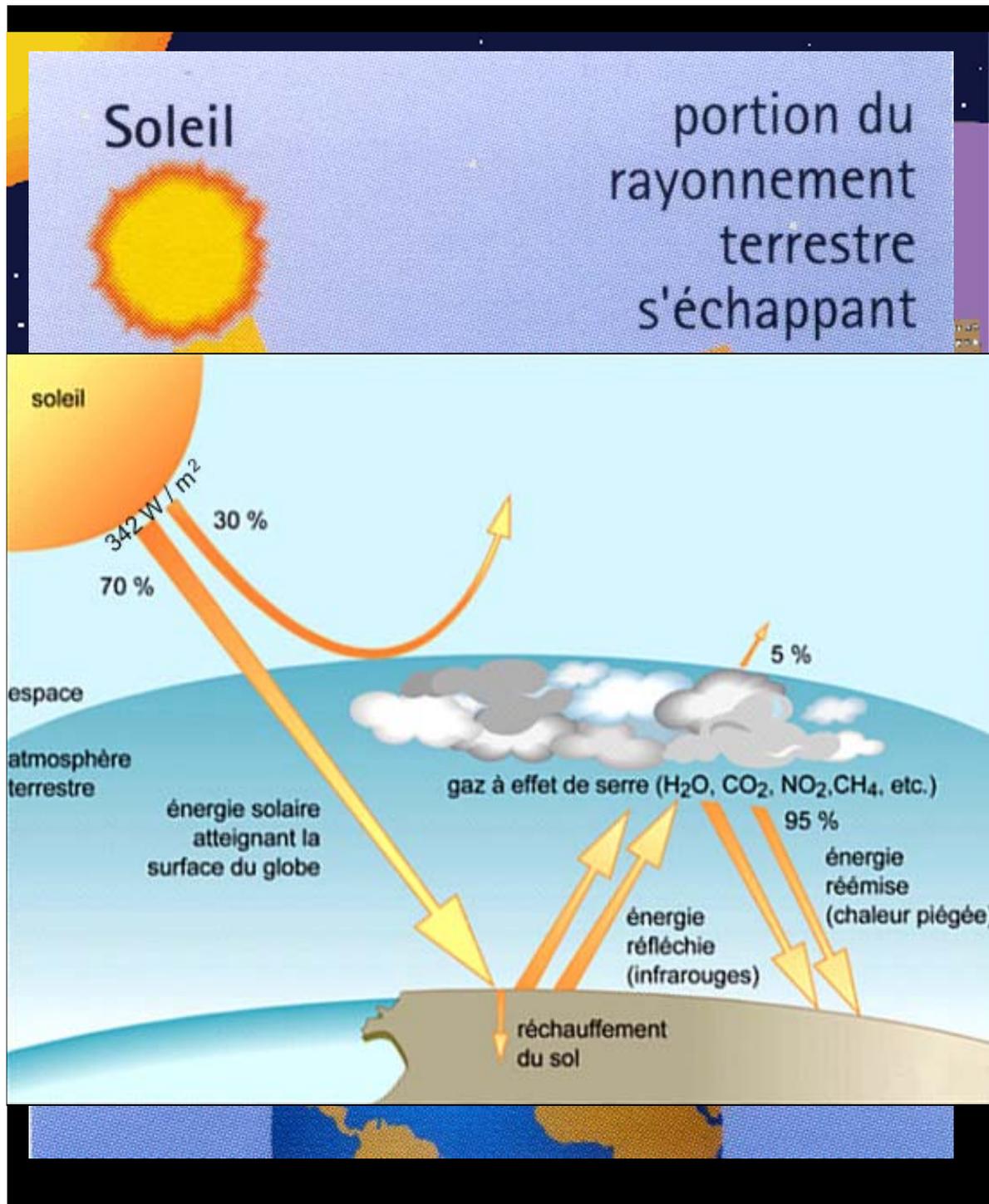


Ce que n'est pas
l'effet de serre !



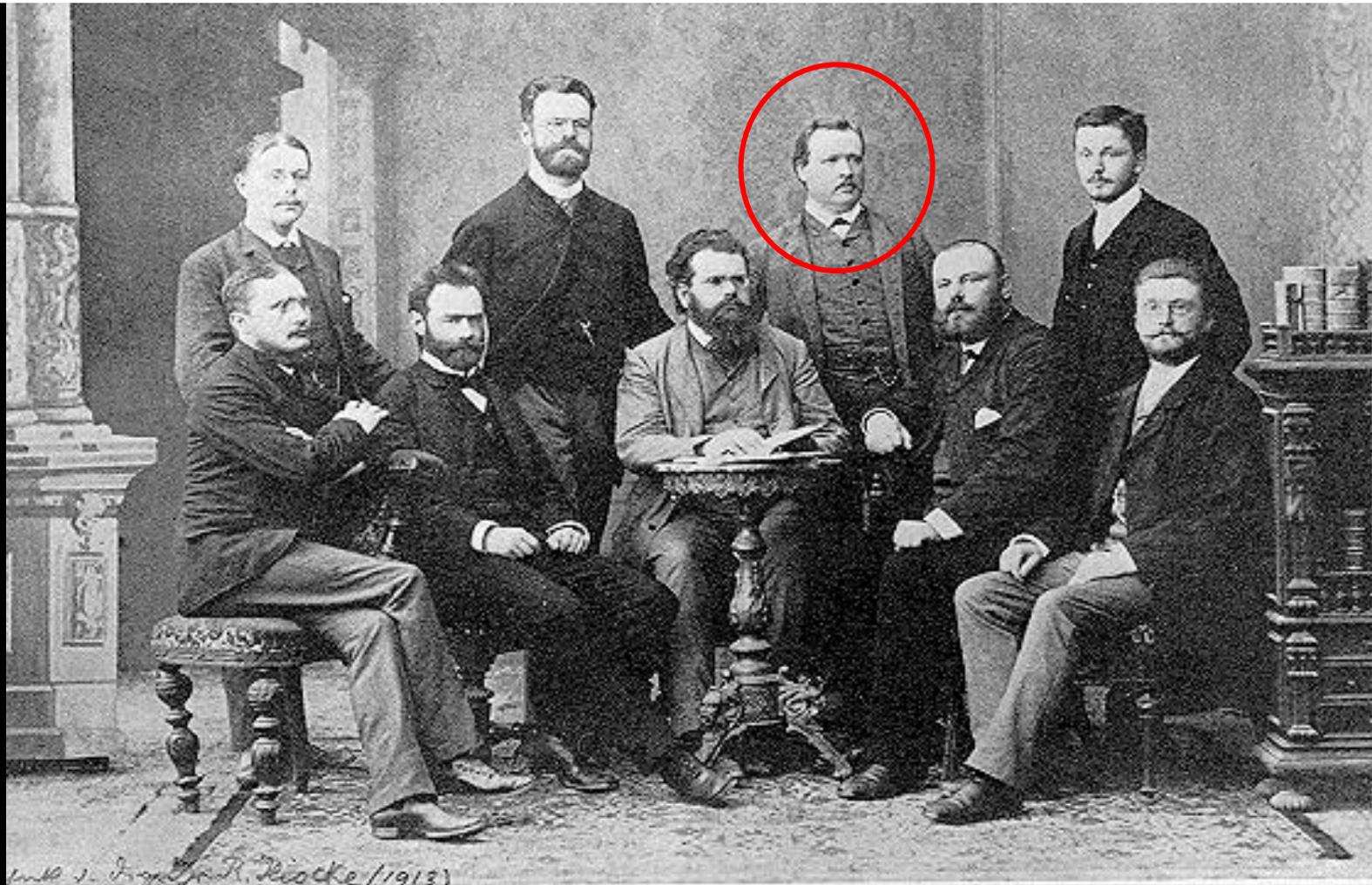


Ce que n'est pas
l'effet de serre !



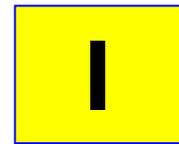
Ce que n'est pas l'effet de serre !

Sur ces schémas comme vous avez déjà du en voir partout, sur les 342 W / m² 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. A ce rythme, il faudrait environ 1010 secondes pour porter tout l'océan à 100°C, soit quelques siècles !

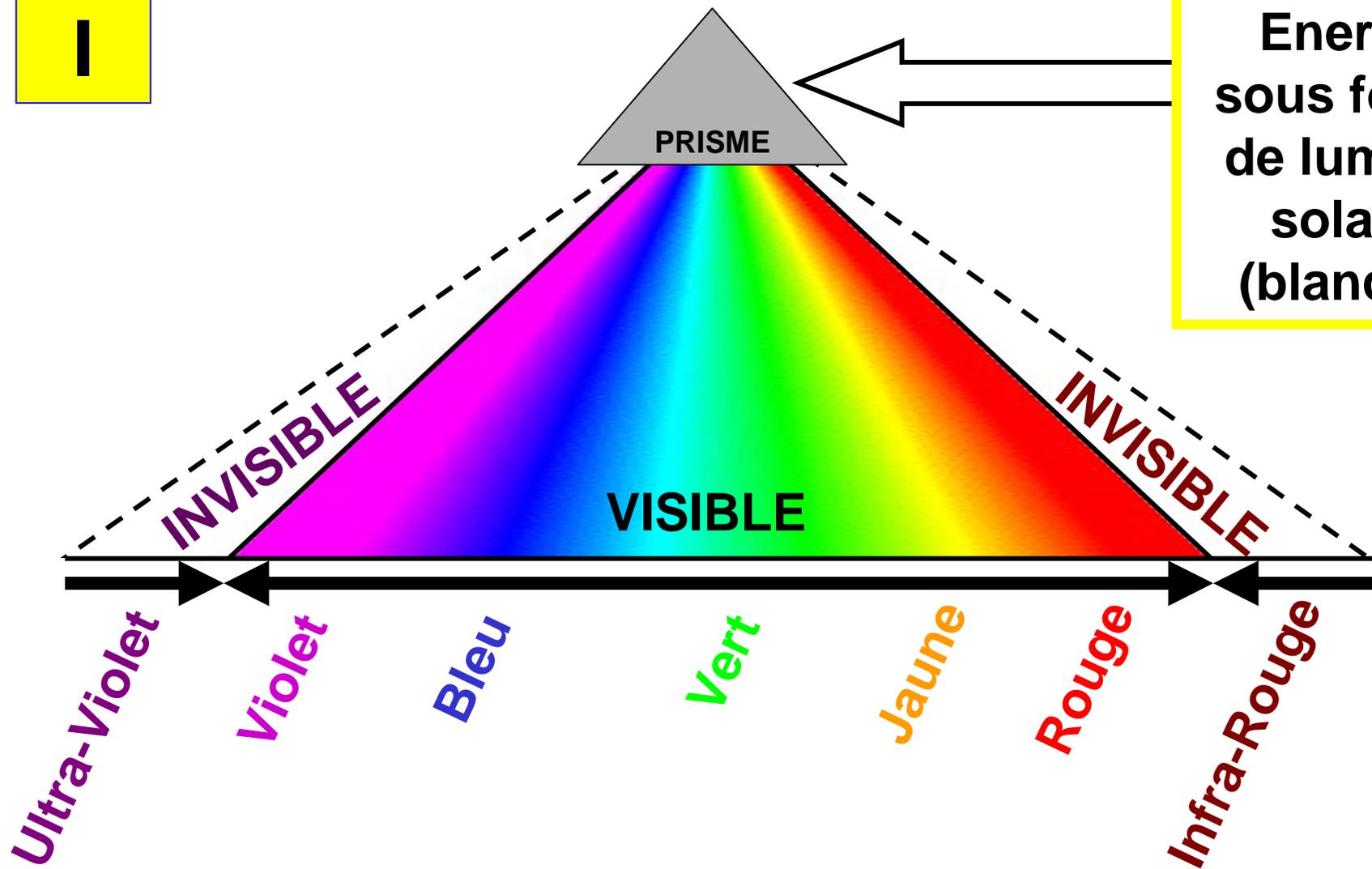


La physique de l'effet de serre est « bien » connue depuis Svante Arrhenius (1859-1927).

Pour « comprendre » l'effet de serre sur Terre, il faut avoir compris 8 points (numérotées I à VIII).



Energie
sous forme
de lumière
solaire
(blanche)



La lumière du Soleil comprend des rayonnements que l'œil humain perçoit (lumière visible) et d'autres que l'œil ne « voit » pas (Infra-Rouge et Ultra-Violet)

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

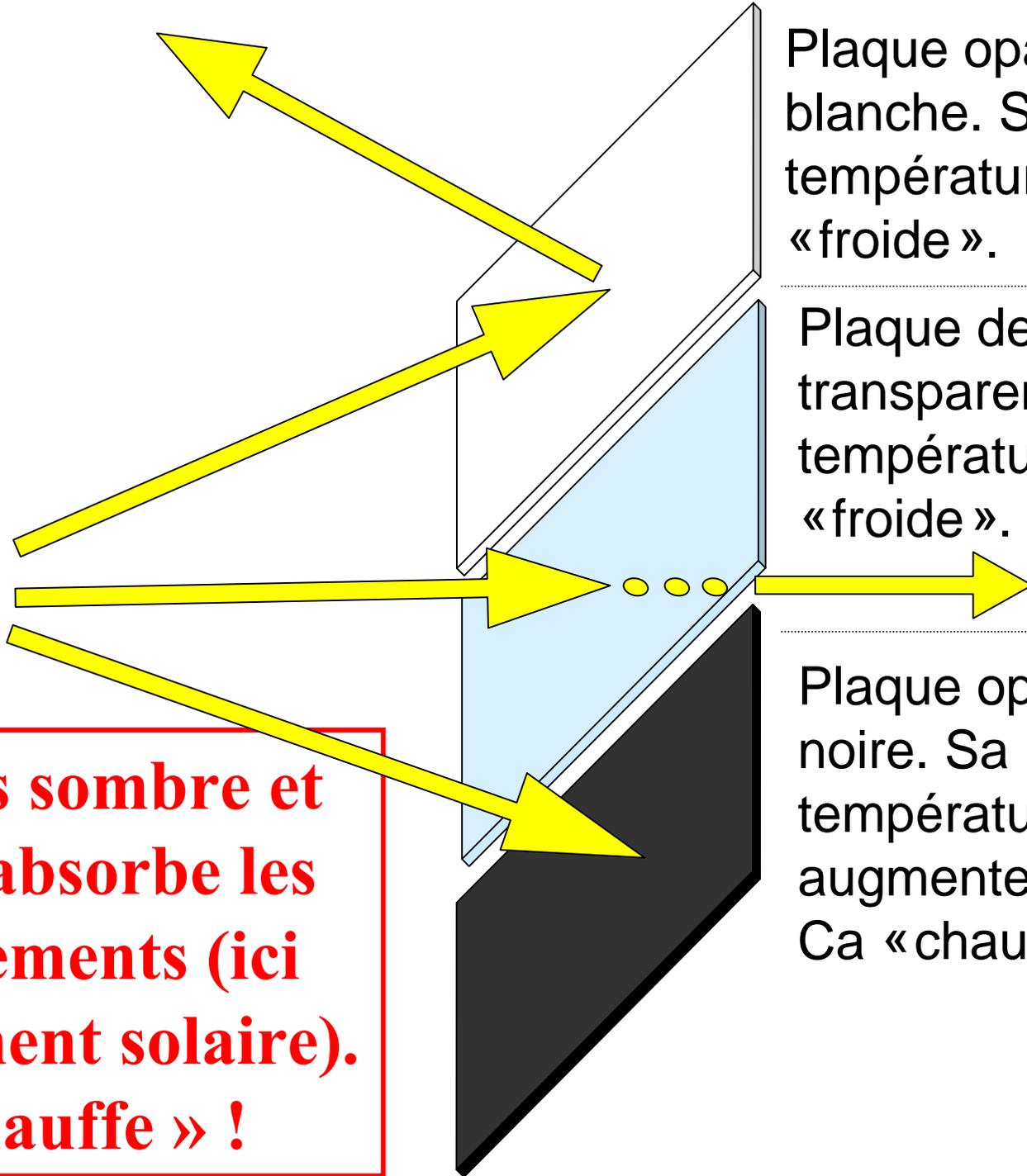
Exemple d'albédo : neige = 1, noir suie = 0



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



Un corps sombre et opaque absorbe les rayonnements (ici rayonnement solaire). Il « chauffe » !

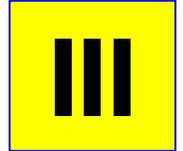


Plaque opaque et blanche. Sa température reste « froide ».

Plaque de verre, transparente. Sa température reste « froide ».

Plaque opaque et noire. Sa température augmente. Ça « chauffe ».

TEMPERATURE ET ENERGIE



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

**La quantité d'énergie 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

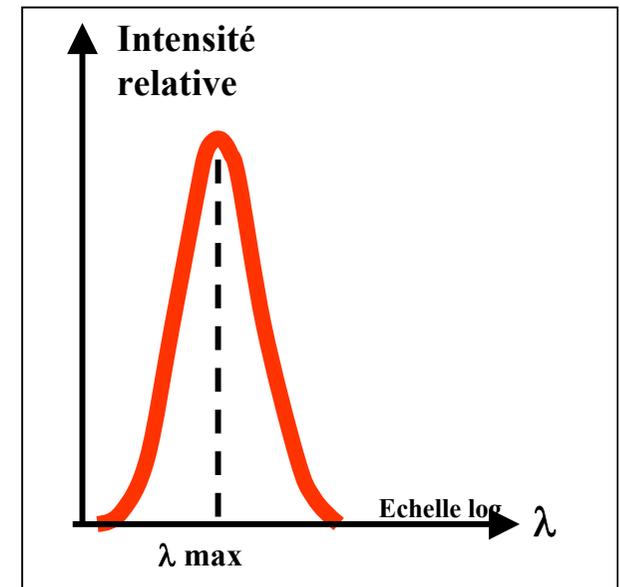
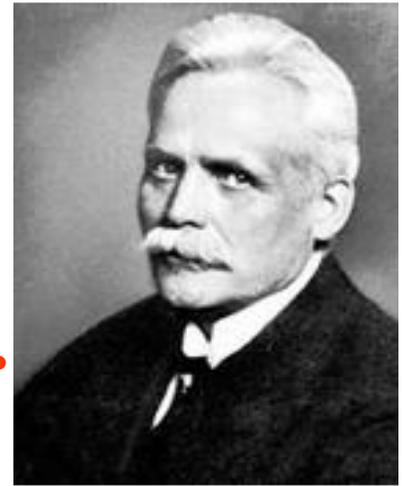


TEMPERATURE ET ENERGIE (suite)

Un corps qui a une température $> 0 \text{ K}$ émet 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 $\beta = \text{Constante de Wien} = 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$

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



Exemples :

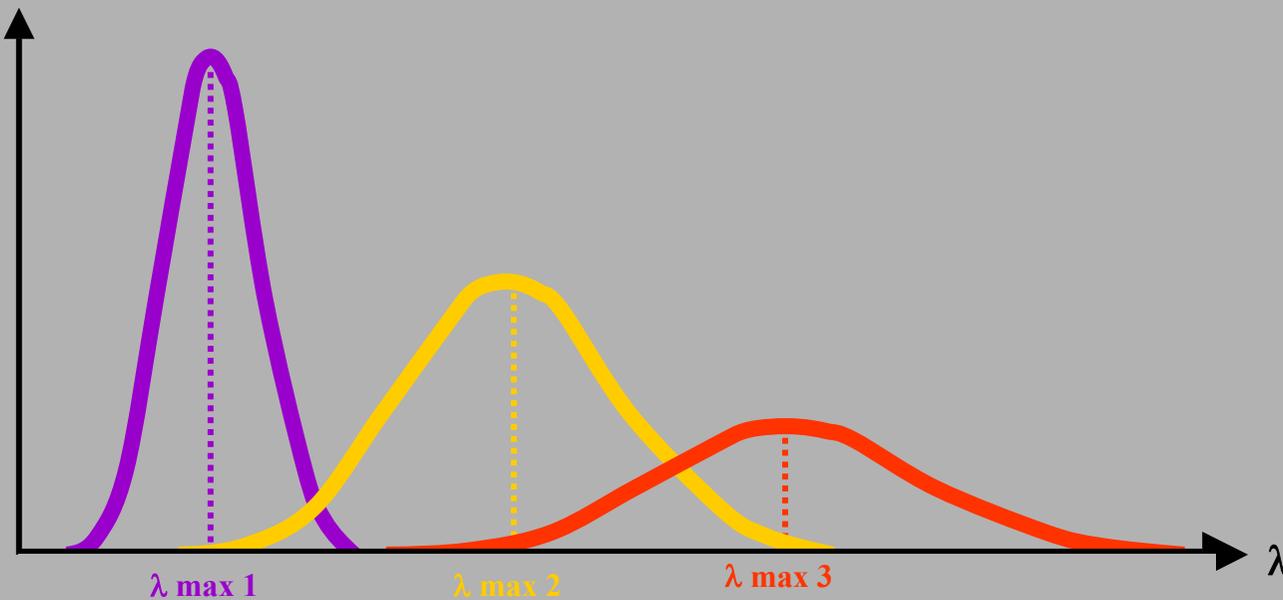
Corps humain à 37°C , $\lambda_m = 2,9 \cdot 10^{-3} / 273 + 37$
 $\rightarrow \lambda_m = 9,32 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 9\mu$ (dans l'Infra-Rouge)

Soleil à $\sim 6000 \text{ K}$, $\lambda_m = 2,9 \cdot 10^{-3} / 6000$
 $\rightarrow \sim 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 0,5\mu$ (dans le visible)

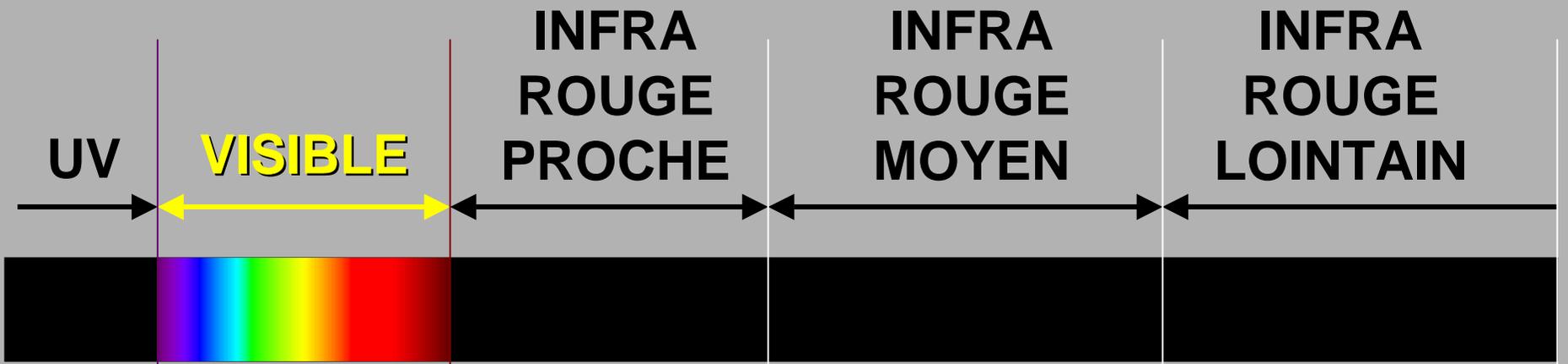


Répartition de
l'intensité
émise

Avec $T_1 > T_2 > T_3$



Relation entre T et λ émis



← 6000°C →
Soleil

← 1000°C →
Braises

← 200°C →
Fer à repasser

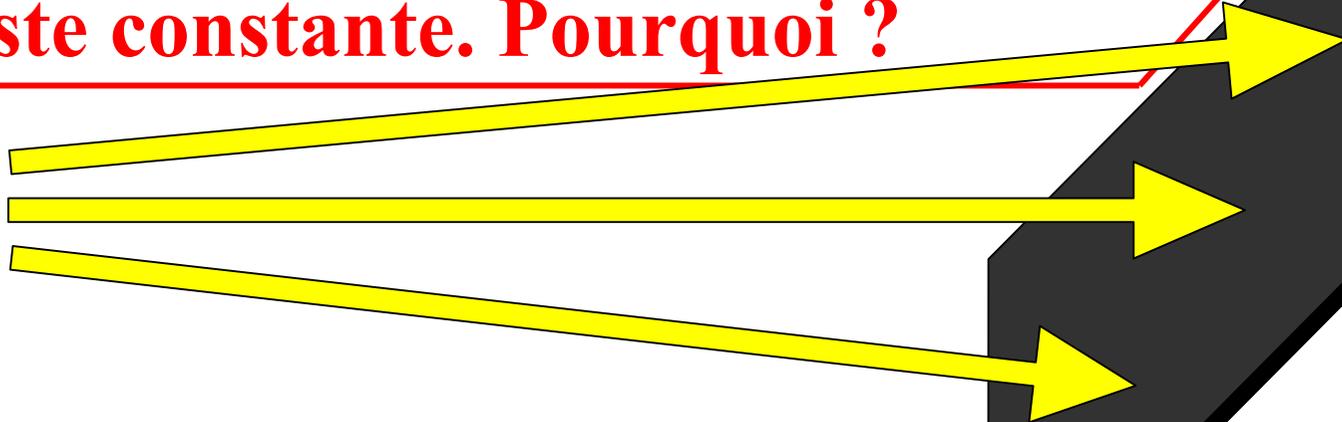
← 37°C →
Corps humain

← -20°C →
glace

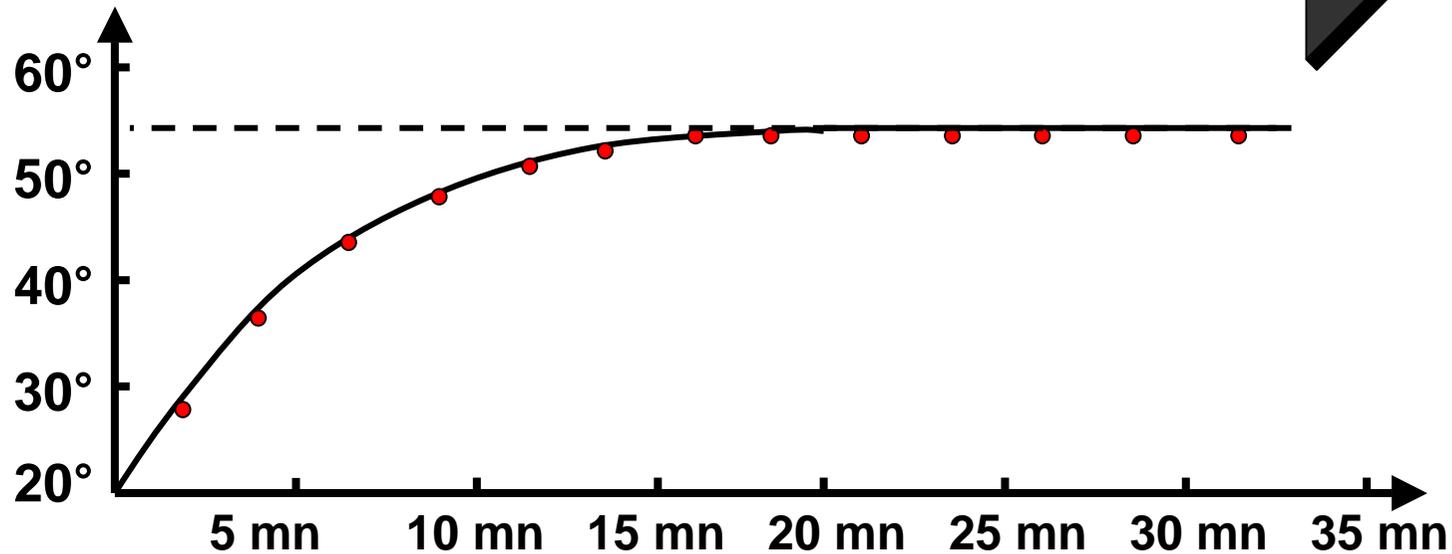
Chaque corps émet un rayonnement qui dépend de sa température

IV

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



Température de la plaque



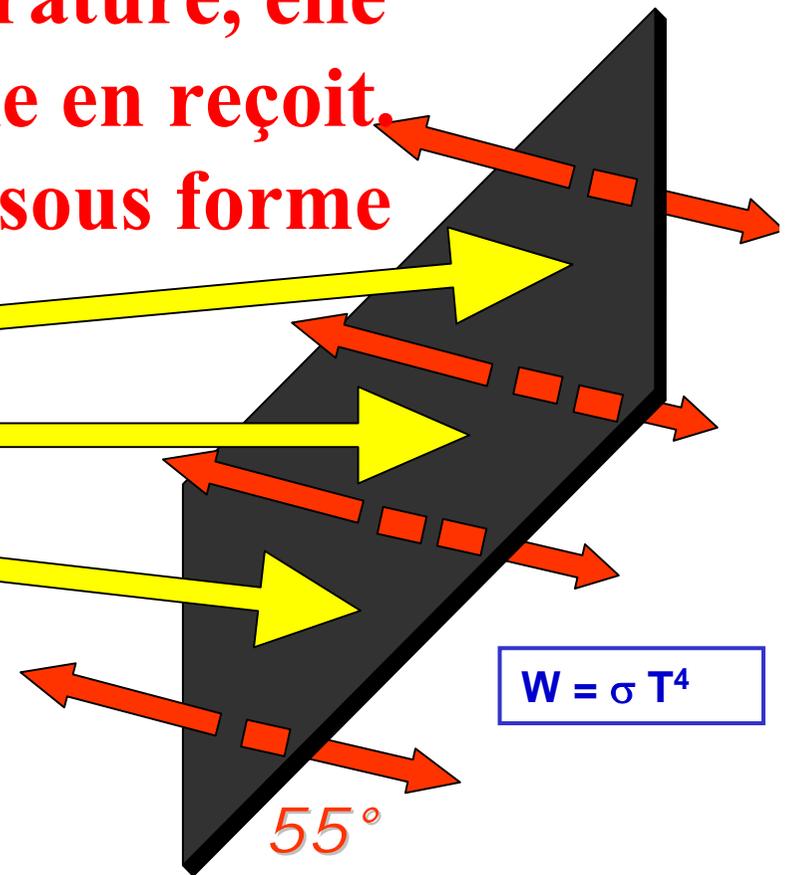
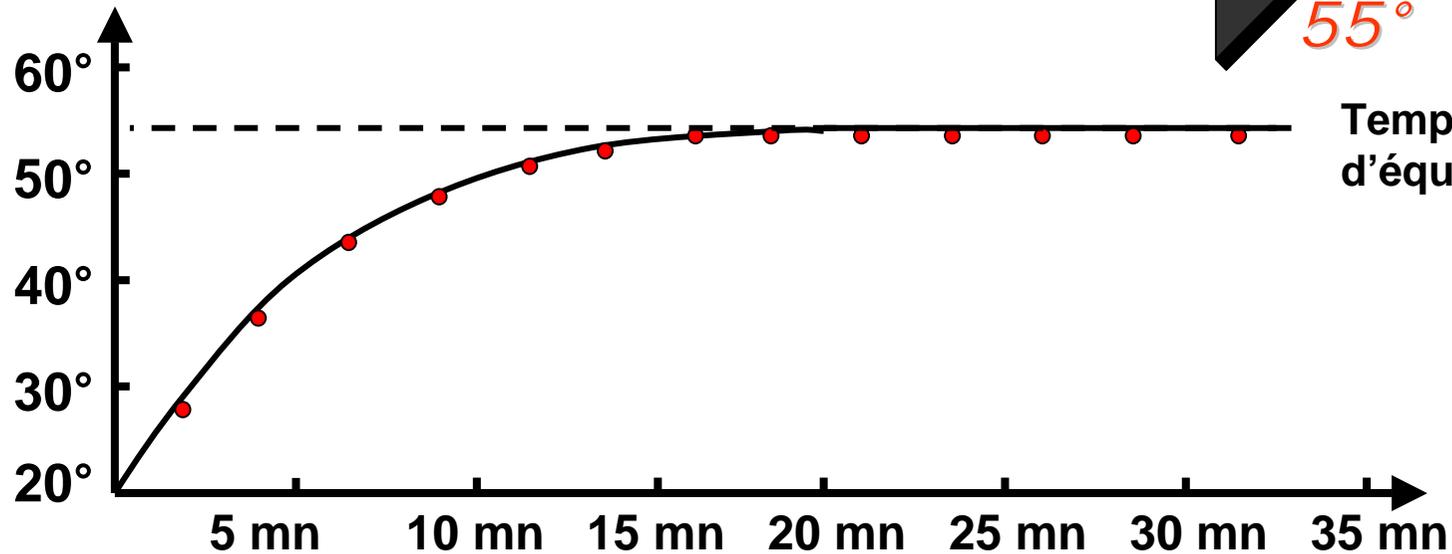
Temps de la mesure

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°

Température de la plaque

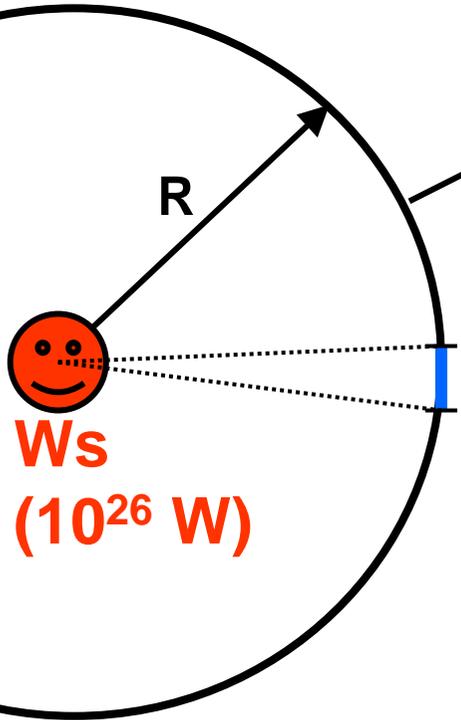


$$W = \sigma T^4$$

55°

Température d'équilibre

Temps de la mesure



Sphère de rayon R centrée sur le soleil, de surface

$$S = 4 \pi R^2$$

Energie reçue par unité de surface W_r :

$$W_r = W_s / S = W_s / 4 \pi R^2 \quad (1368 \text{ w m}^2 \text{ au niveau de l'orbite terrestre})$$

L'énergie reçue varie en $1 / R^2$

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

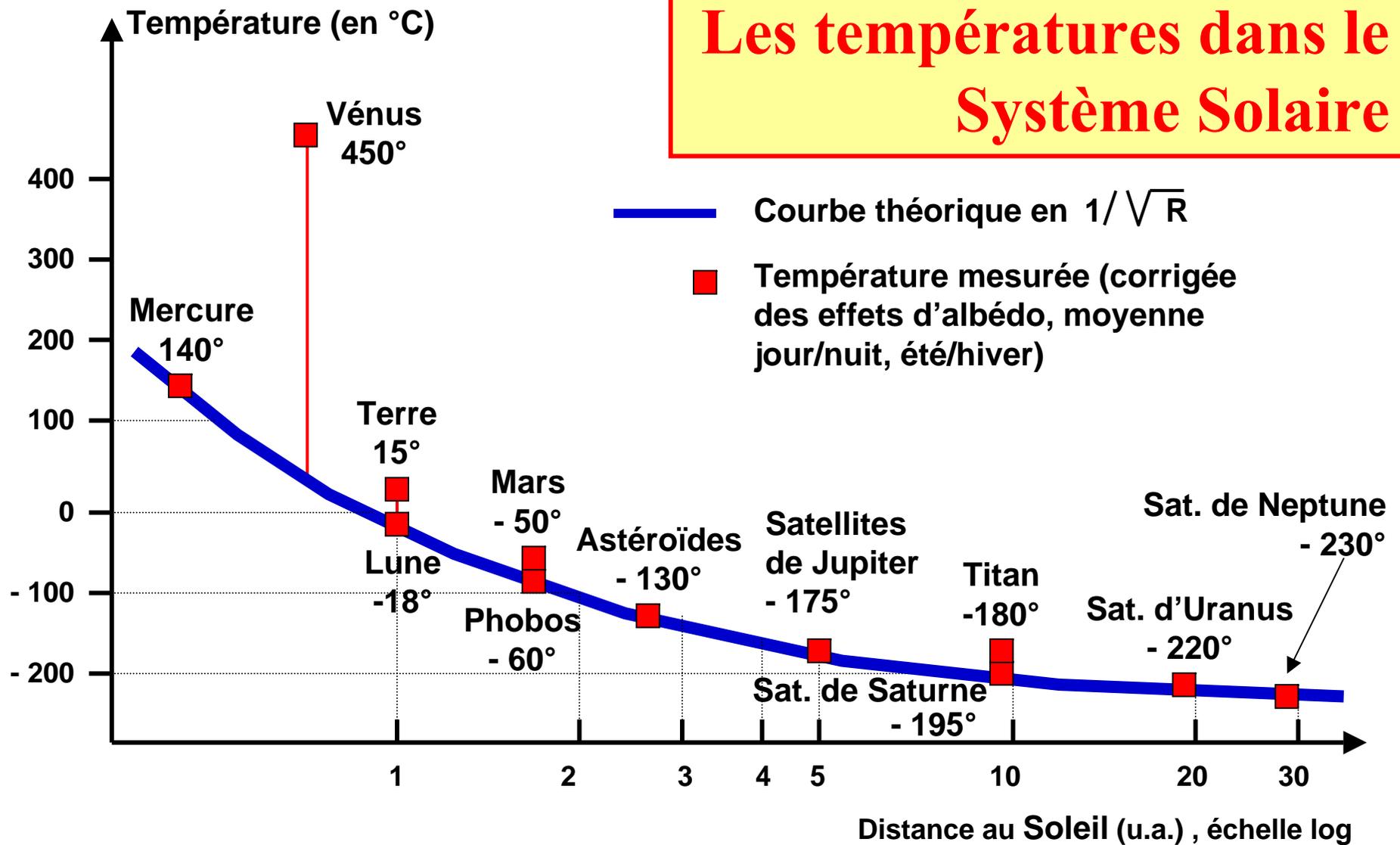
$$W_r = W_{\text{émis}}, \text{ avec } W_e = \sigma T^4$$

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

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

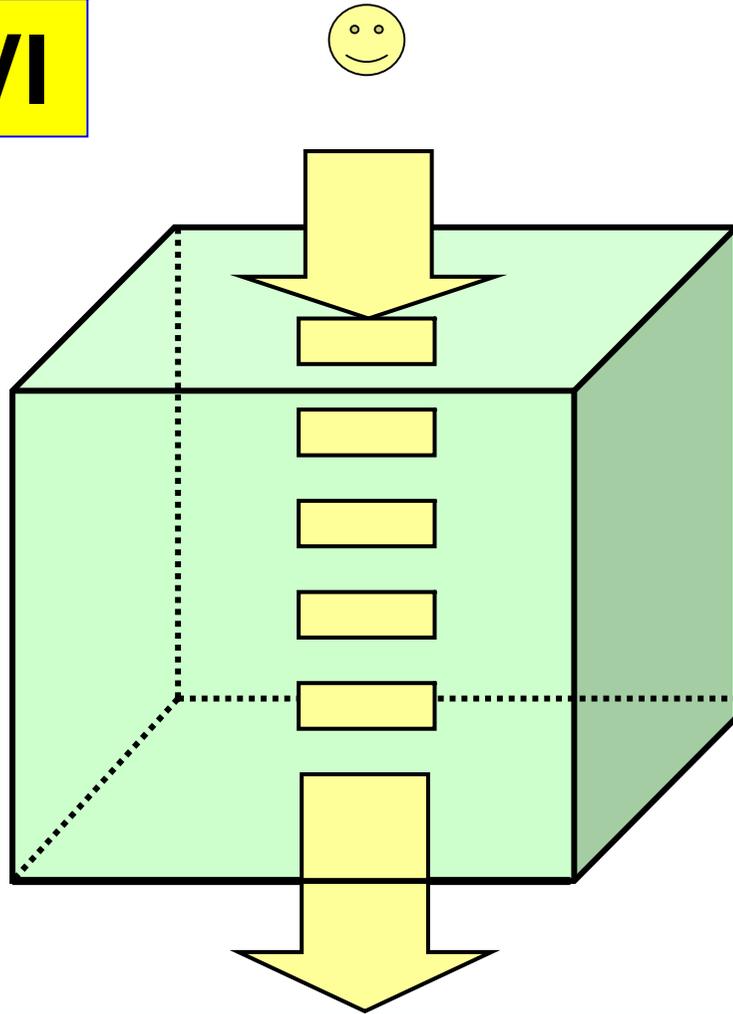
La température d'équilibre d'une planète (on néglige les effets d'albédo) varie comme l'inverse de la racine carrée du rayon orbital (la distance au soleil)

Les températures dans le Système Solaire

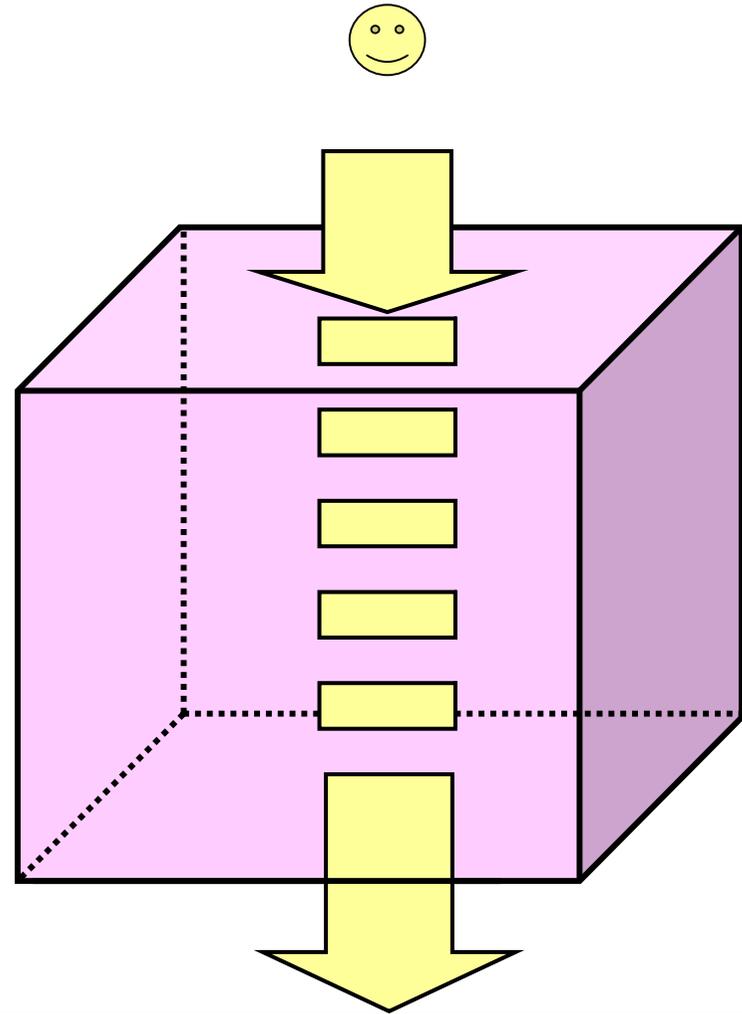


En corrigeant les effets d'albédo, tous les corps, sauf 4, «obéissent» à la loi $T = 1/\sqrt{R}$. Quel est le point commun entre ces 4 corps : ils ont une atmosphère. Nous venons de mettre en évidence l'effet de serre !

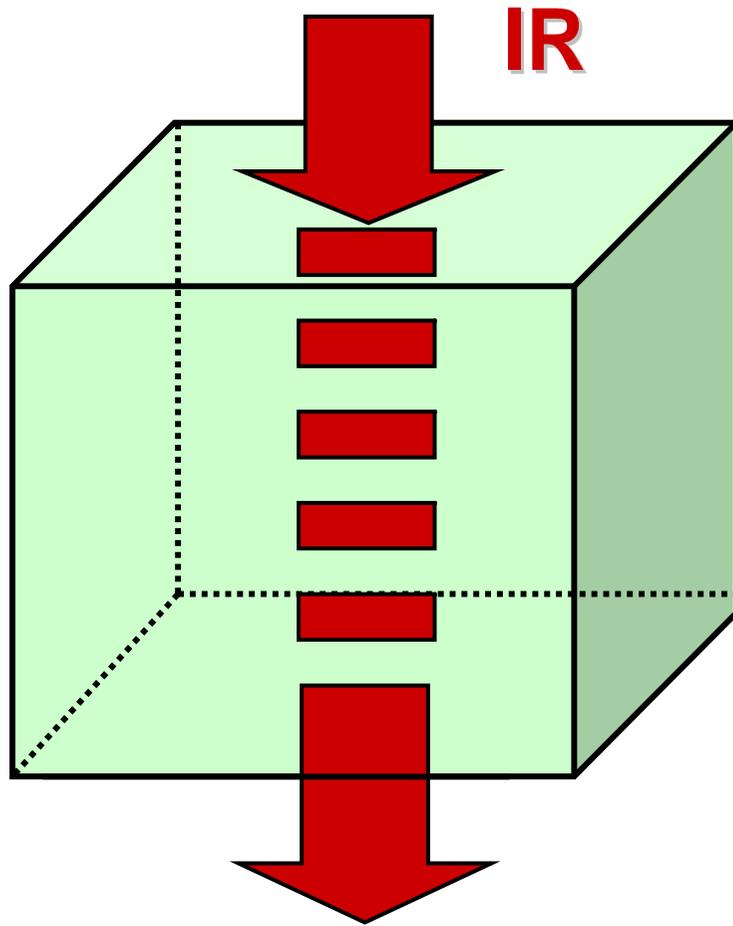
VI



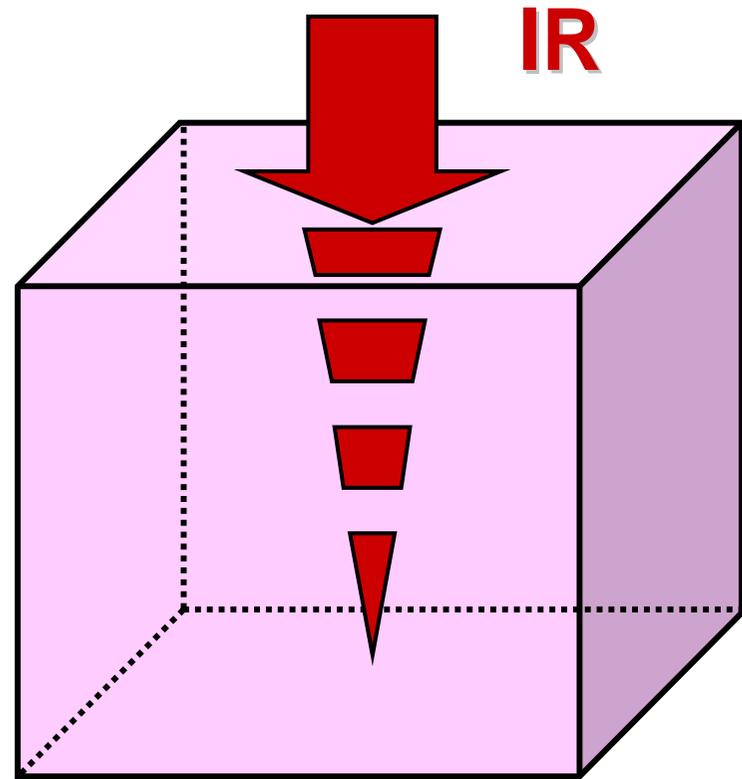
Le diazote (N_2), le dioxygène (O_2) sont transparents à la lumière visible.



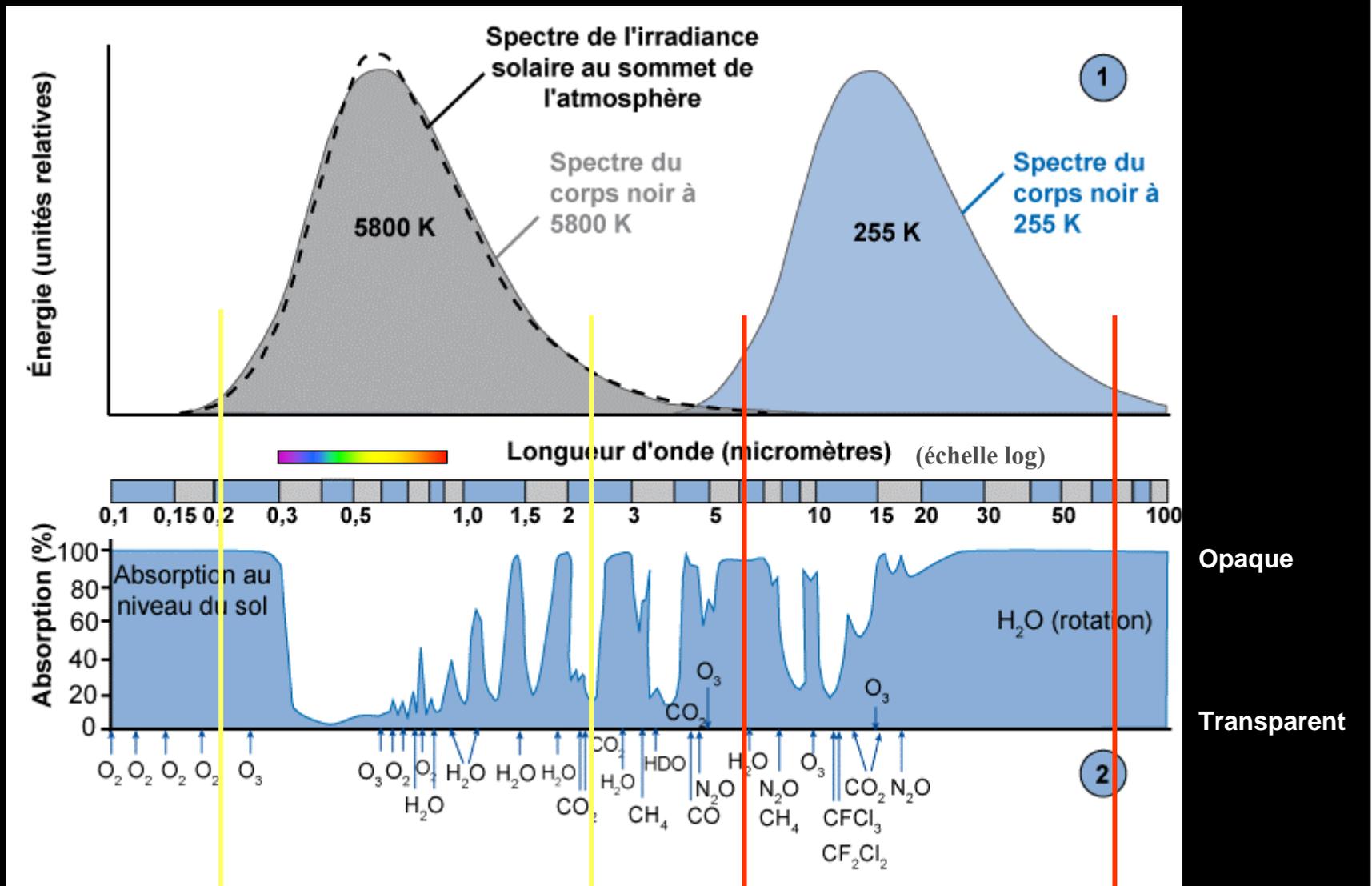
Le dioxyde de carbone (CO_2), la vapeur d'eau (H_2O), le méthane (CH_4) aussi.



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



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



Opaque

Transparent

L'atmosphère est principalement transparente à la lumière incidente

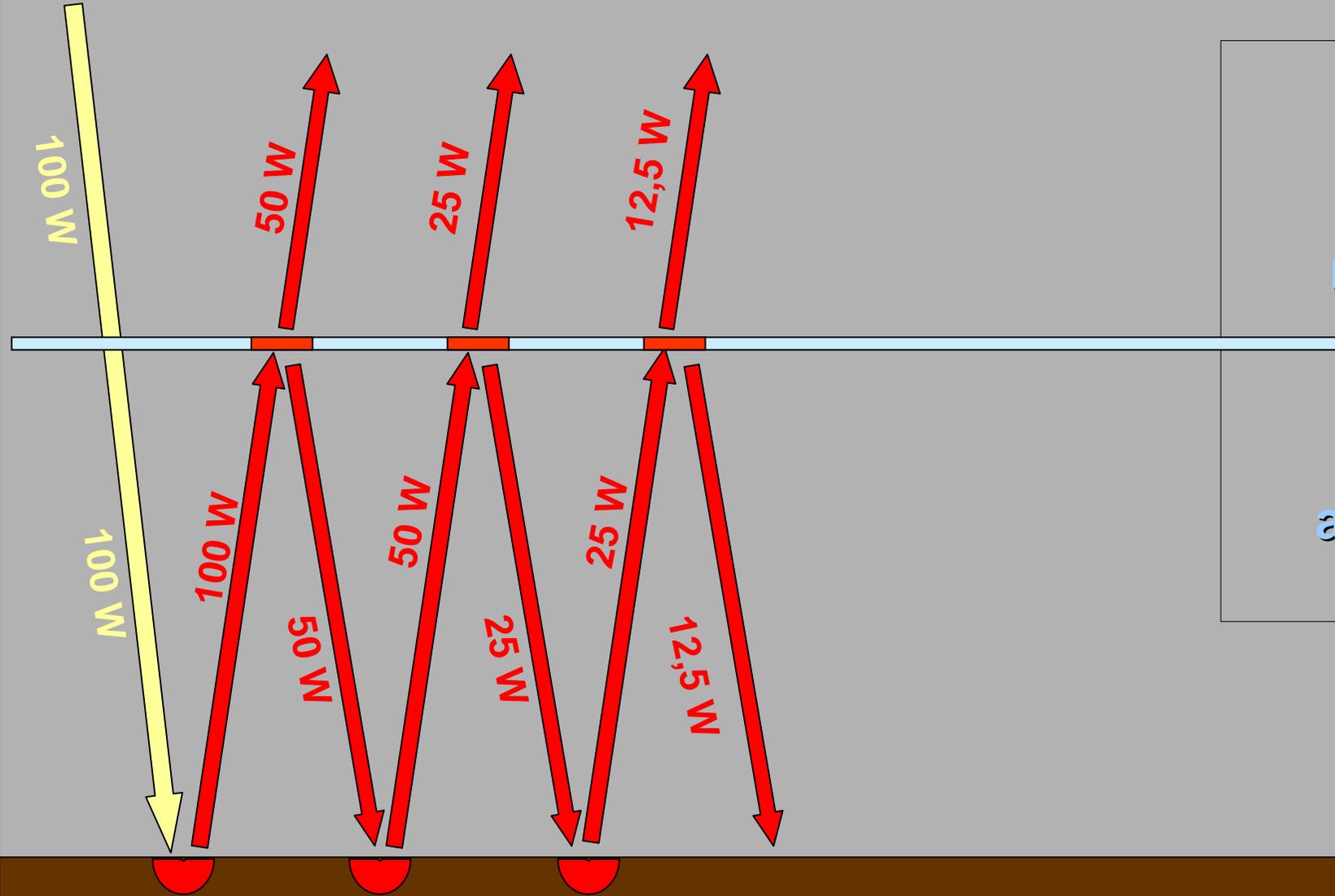
L'atmosphère est majoritairement opaque aux Infra-Rouges ré-émis par la Terre



Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

VII

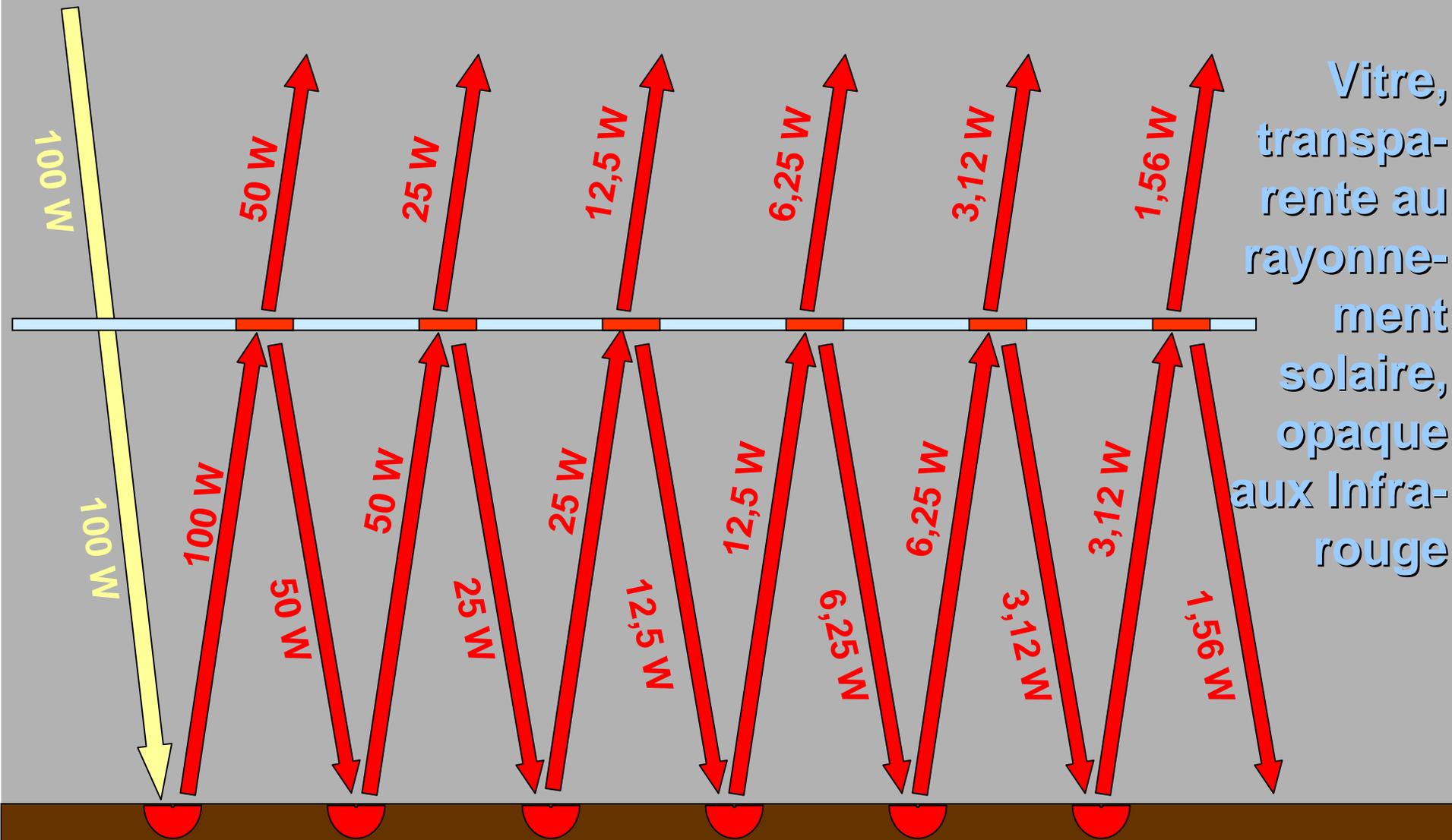
Vitre,
transpa-
rente au
rayonne-
ment
solaire,
opaque
aux Infra-
rouge



Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements



Le fonctionnement théorique d'une serre parfaite

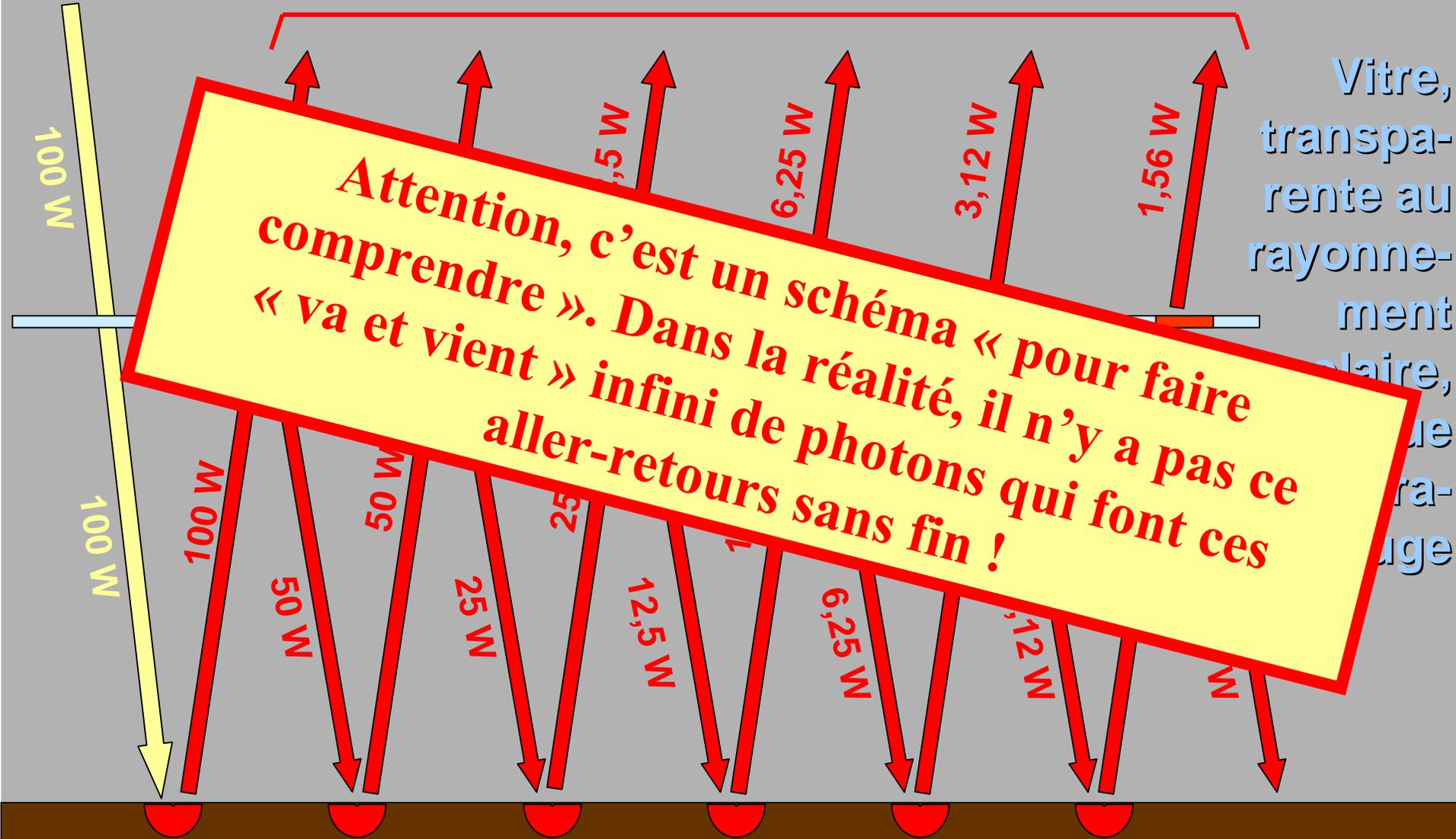


Vitre,
transpa-
rente au
rayonne-
ment
solaire,
opaque
aux Infra-
rouge

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 « 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 !

Vitre, transparente au rayonnement visible, le rayonnement infrarouge

Sol, sombre, opaque. Il absorbe tous les rayonnements

Pour les forts en math, rappelons que la série :
 $\sum_{n=0}^{\infty} x^n$ (avec $x < 1$) tend vers $1/(1-x)$.

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



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

Qu'est ce qui repart de la serre : $50+25+12,5+6,25+ \dots = 100 \text{ W}$

Qu'est ce qui arrive au sol : $100+ 50+25+12,5+6,25+ \dots = 200 \text{ W}$

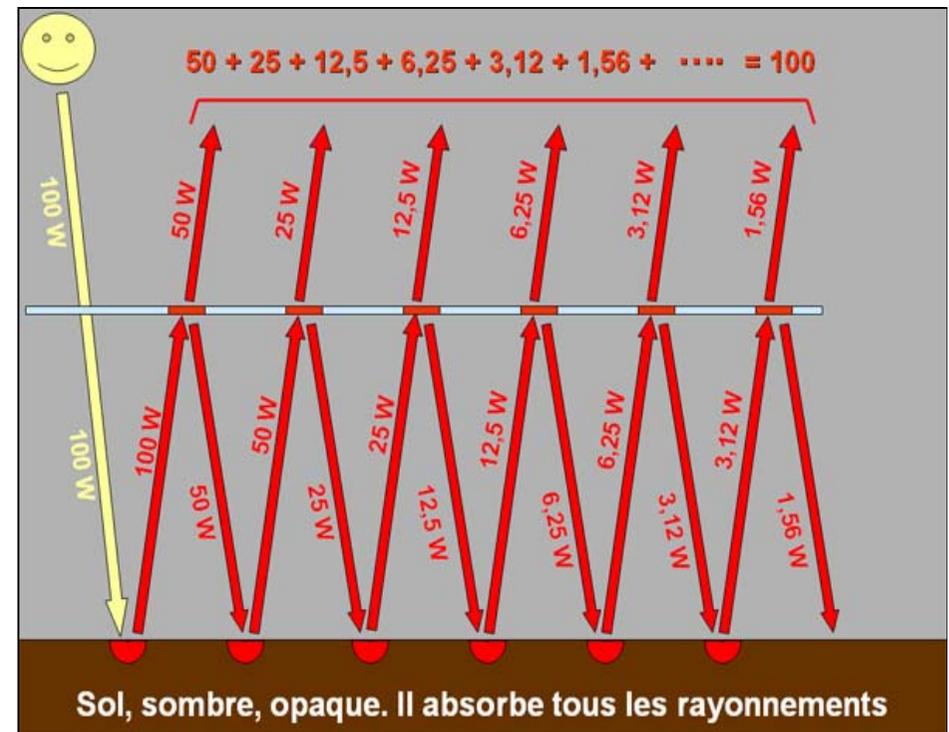
Qu'est ce qui repart du sol : $100+ 50+25+12,5+6,25+ \dots = 200 \text{ W}$

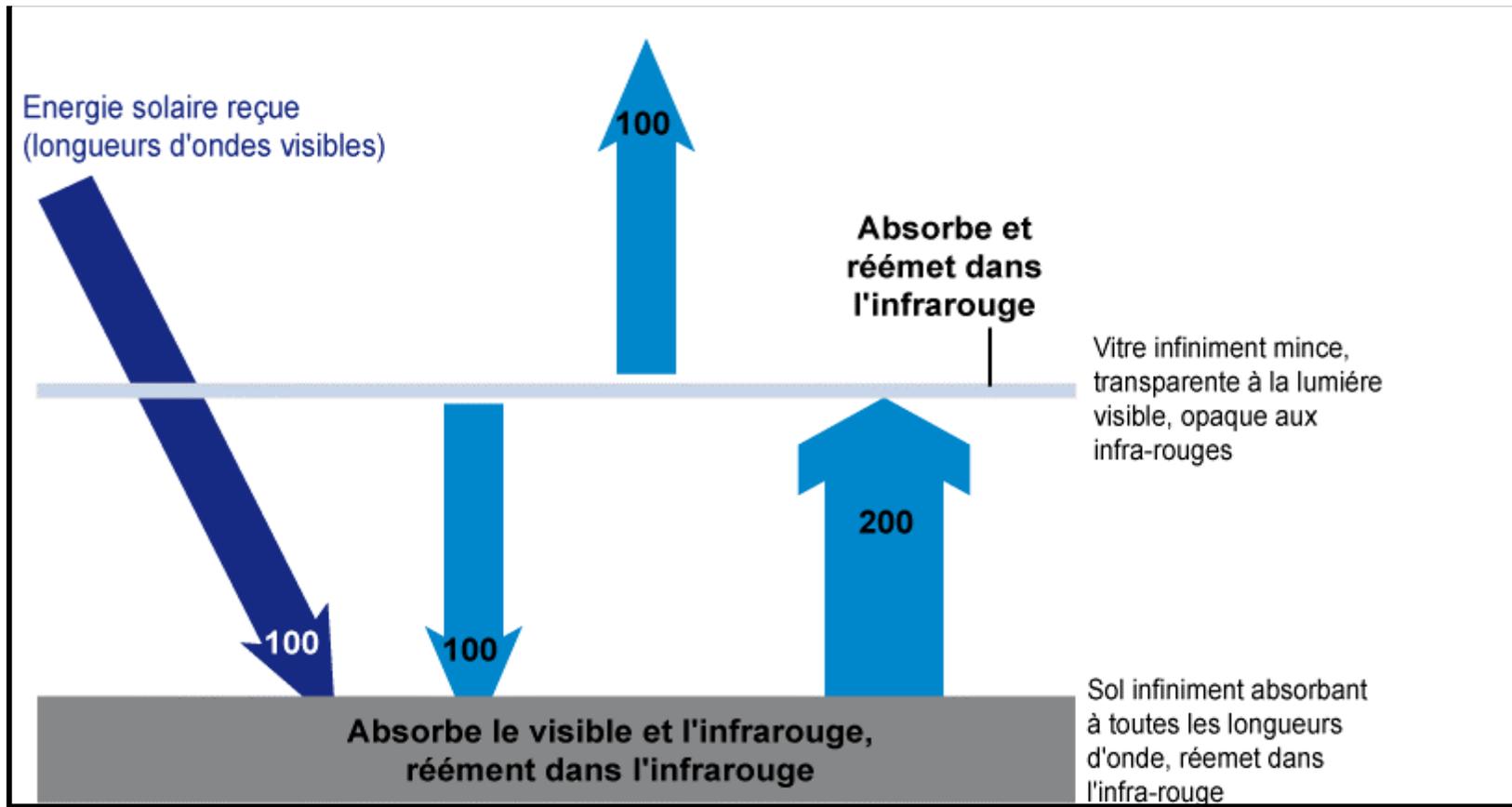
Qu'est ce qui arrive sur la vitre : $100+ 50+25+12,5+6,25+ \dots = 200 \text{ W}$

Qu'est ce qui repart de la vitre : $50+50+25+25+12,5+12,5 \dots = 200 \text{ W}$

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.

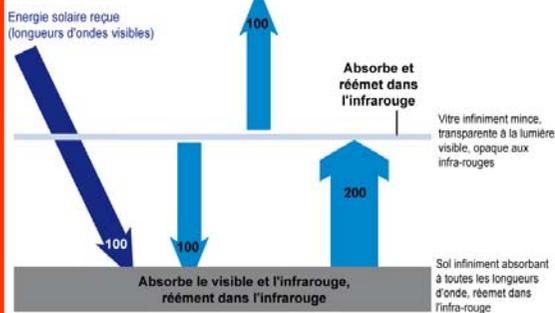
Mais sans serre, le sol recevrait (et renverrait) 100 W. Avec une serre, il en reçoit (et en renvoie) le double (200 W) !



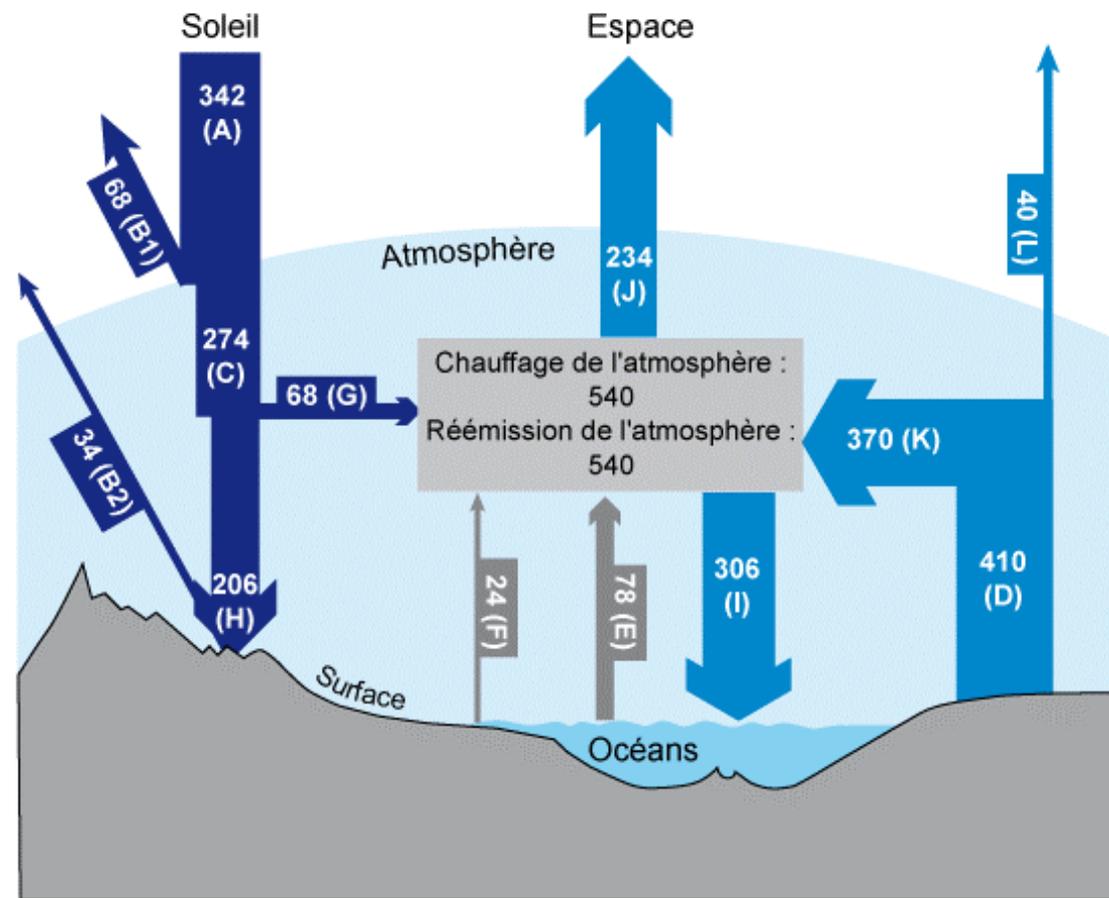


Avec la même énergie incidente et renvoyée par le système serre + sol, le sol reçoit (et renvoie) 2 fois plus d'énergie avec serre que sans serre. Et comme $E = \sigma T^4$, si E est multiplié par 2, T l'est par $\sqrt[4]{2} = 1,19$. Par exemple, une planète « théoriquement » à 255 K (-18°C) passe à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

Le modèle

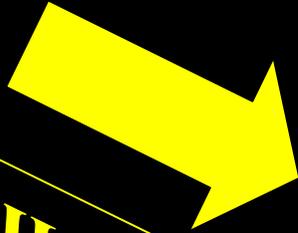
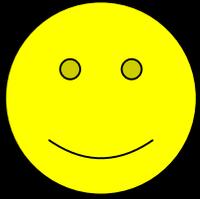


La réalité naturelle :
T passe de -18°C
théorique à $+15^{\circ}\text{C}$ de
moyenne réelle (255 à
288 K) soit une
multiplication par
1,13



- > Transferts non radiatifs (évaporation - condensation - dynamique de l'air)
- > Rayonnement solaire (λ de 0,2 à 3 μm)
- > Rayonnement d'origine tellurique (IR, λ de 3 à 100 μm)

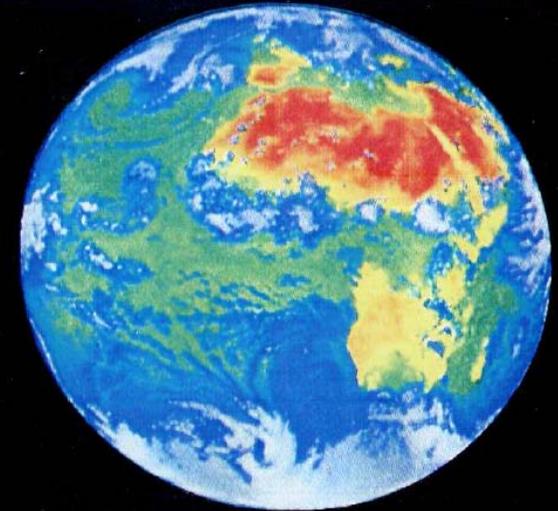
Unités : Watts.m⁻²



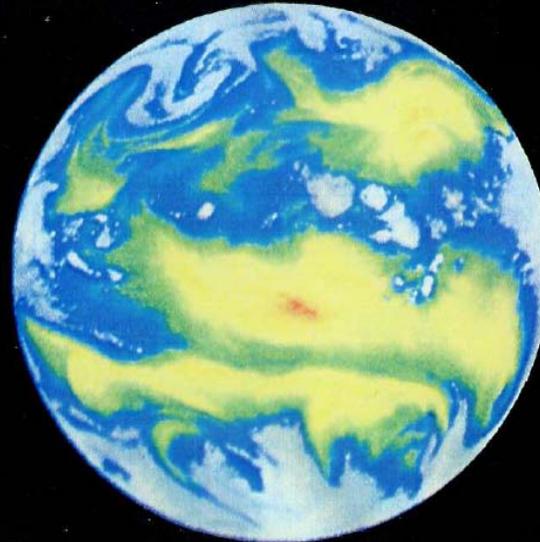
342 W / m²
moyenne jour-nuit,
été hivers



Visible (réfléchi)



Infra-Rouge proche



Infra-Rouge moyen



Infra-Rouge lointain

342 W / m²
total du visible réfléchi
+ Infra-Rouge ré-émis



Cet effet de serre naturel sur Terre rajoute 155 W/m^2 aux 342 W/m^2 du rayonnement du soleil arrivant au sol (la Terre n'est pas une serre « parfaite »). Avec 342 W/m^2 , la température moyenne serait de -18°C . Avec $342 + 155 = 497 \text{ W/m}^2$, la température moyenne est de $+14^\circ\text{C}$, soit 32° de plus. Merci l'effet de serre naturel !

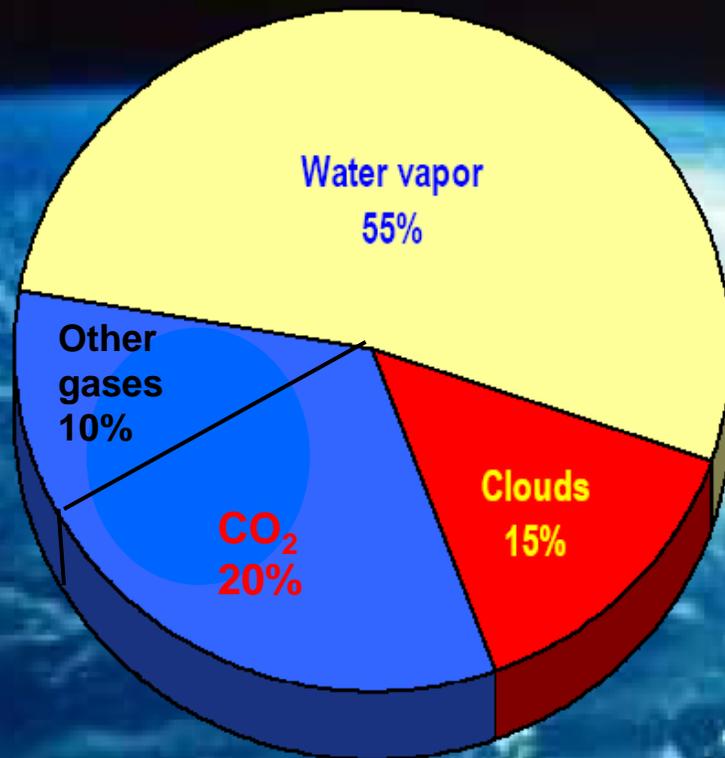


L'augmentation « humaine » de cet effet de serre naturel

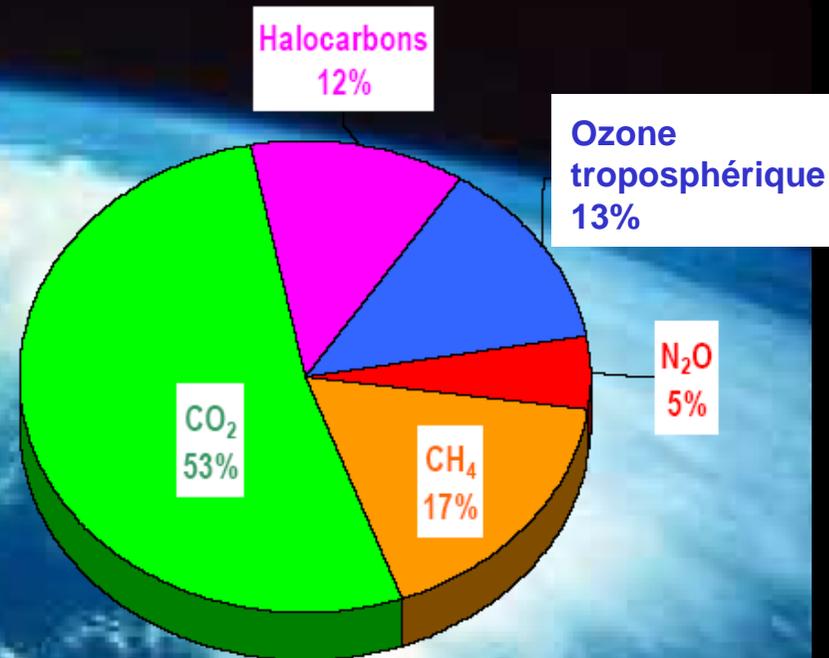
Cinq gaz rejetés par les activités humaines augmentent l'effet de serre naturel de $2,8 \text{ W/m}^2$.

Depuis 150 ans, aux 497 W/m^2 « ordinaires », les activités humaines rajoutent $2,8 \text{ W/m}^2$.





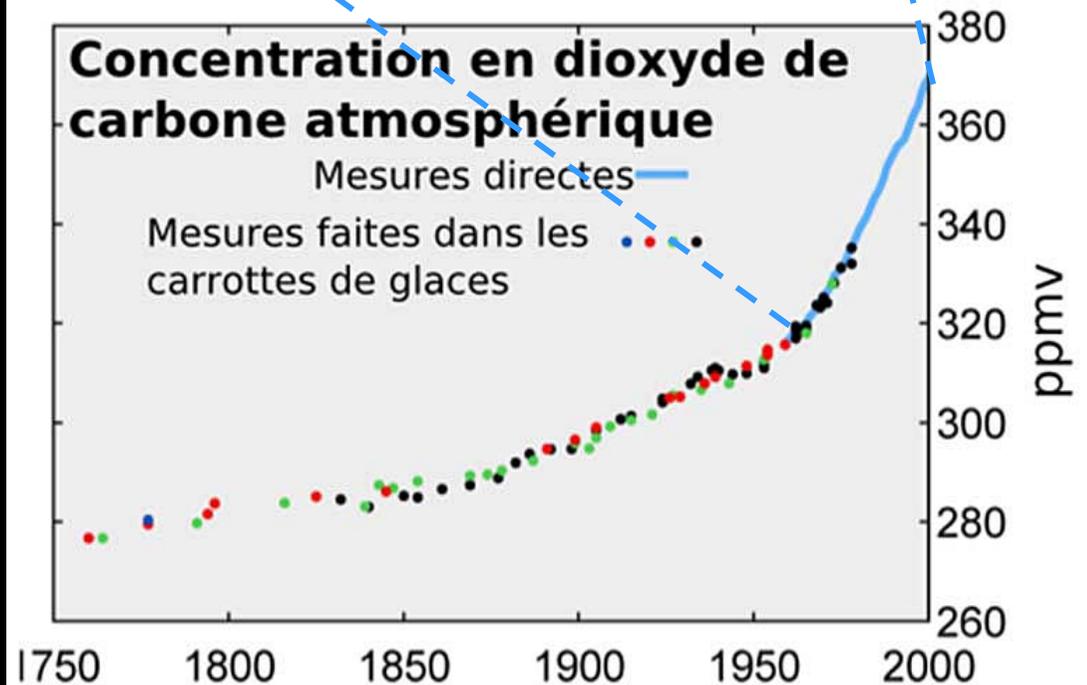
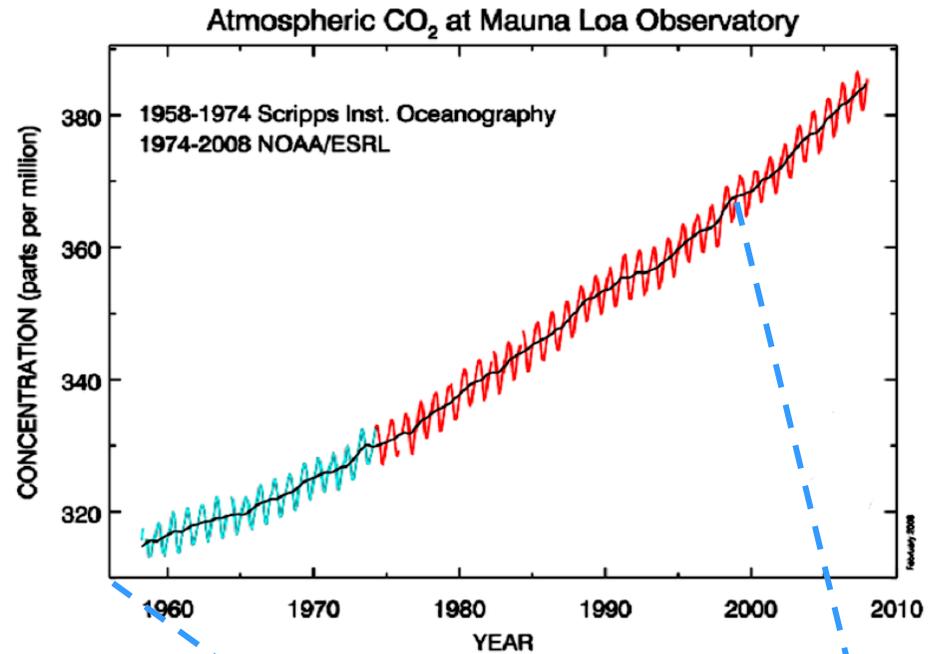
Naturel
(155 W/m²)



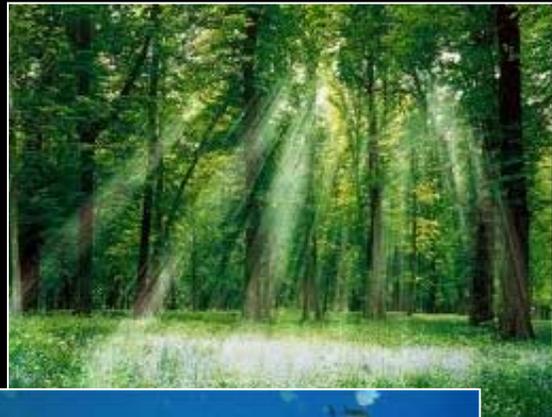
Additionnel
(2.8 W/m²)

Les gaz à effet de serre, naturel et additionnel.

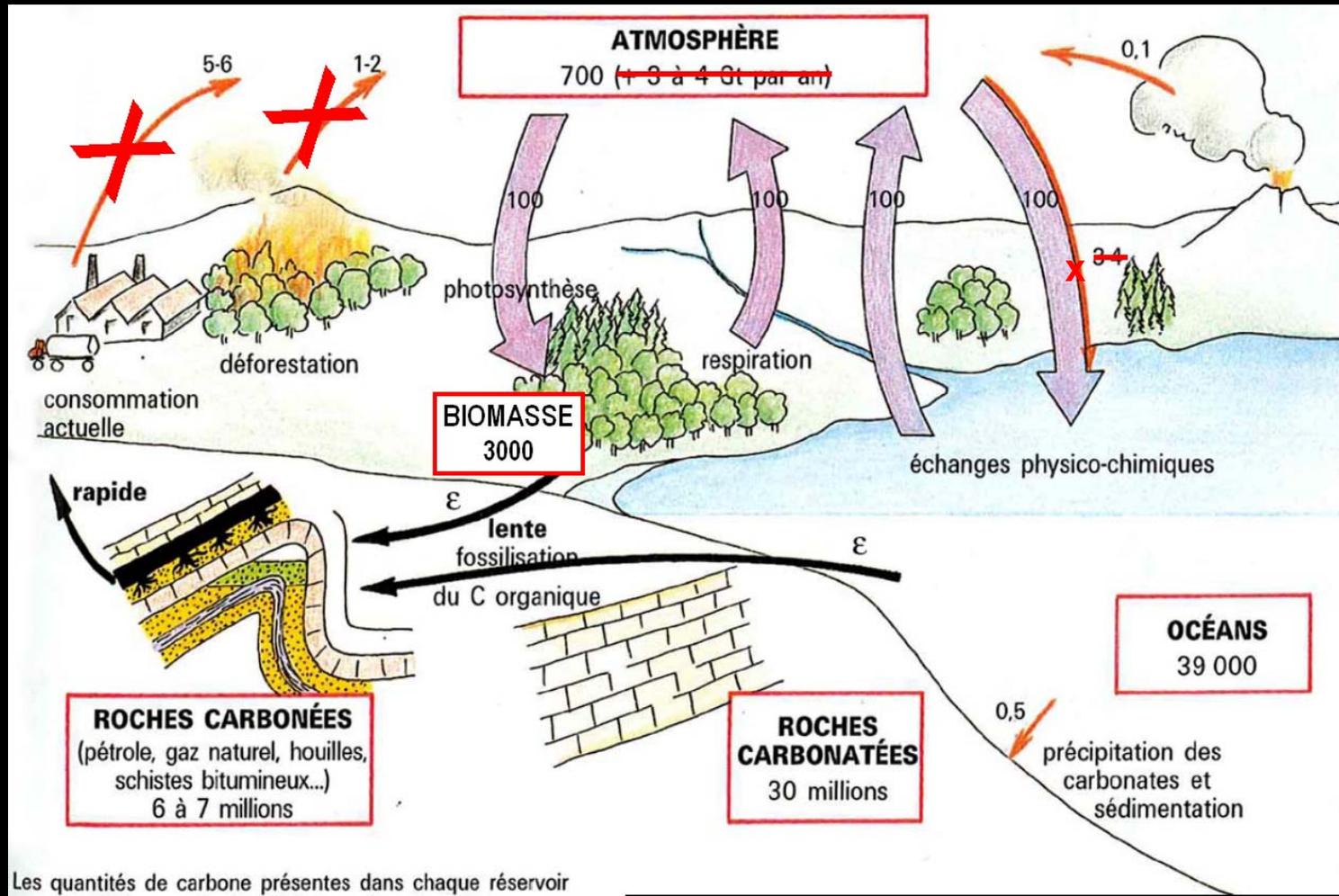
Les variations du CO₂ atmosphérique



Deuxième question : qu'est-ce qui fait varier le CO₂ atmosphérique ? Comprendre le mécanisme des variations naturelles est nécessaire pour comprendre comment l'action de l'Homme s'insère dans (et perturbe) le cycle naturel du carbone.



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

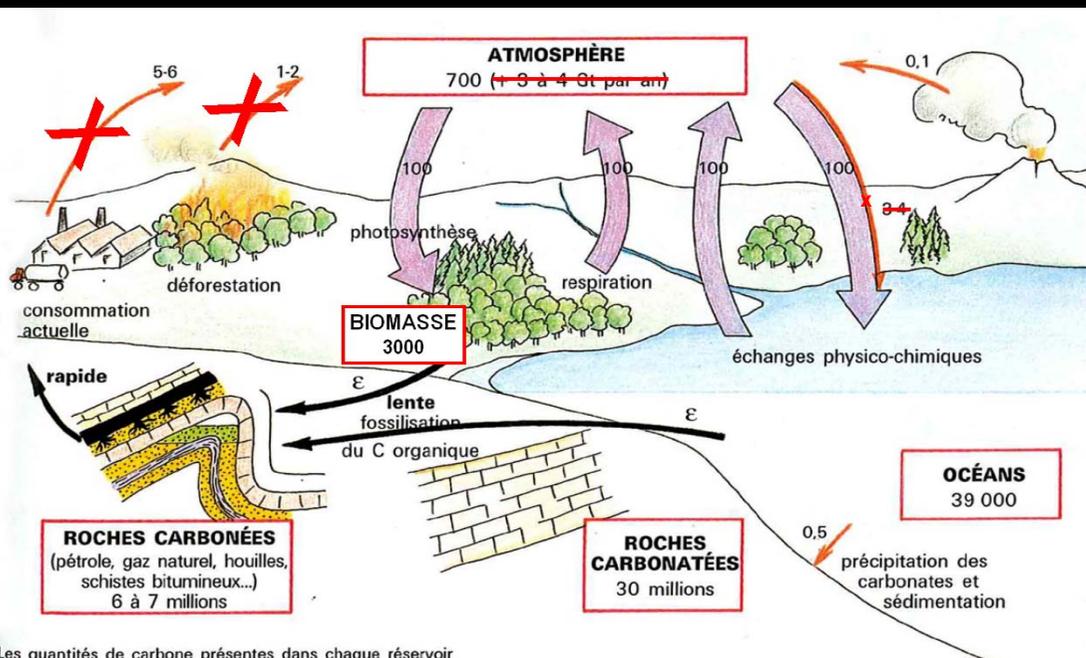


Les quantités de carbone présentes dans chaque réservoir sont exprimées en Gt; les flux de carbone sont exprimés en Gt·an⁻¹ (1 Gt = 1 milliard de tonnes).

+ 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 : 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 économiquement inacceptable ?

déséquilibré

ir

n : il

rait
ere et
dans

craché
Gt de
ons de
que
s moins.

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 pâler d'envie tous les économistes et autres gestionnaires) qui durerait un million d'années, ça engendrerait un déséquilibre de 10 000 %. Si ça arrive, géologiquement, ça se voit !

Les quantités de carbone présentes 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

37 042 700, c'est à
Où est ce carbone ?

Les réservoirs de carbone et d'O₂



Le carbone (en masse d'élément Carbone)

L'atmosphère : 750 Gt

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

L'océan : 38 000 Gt (surtout sous forme de HCO₃⁻, mais aussi de CO₂ dissout et de CO₃⁻)

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 ...)

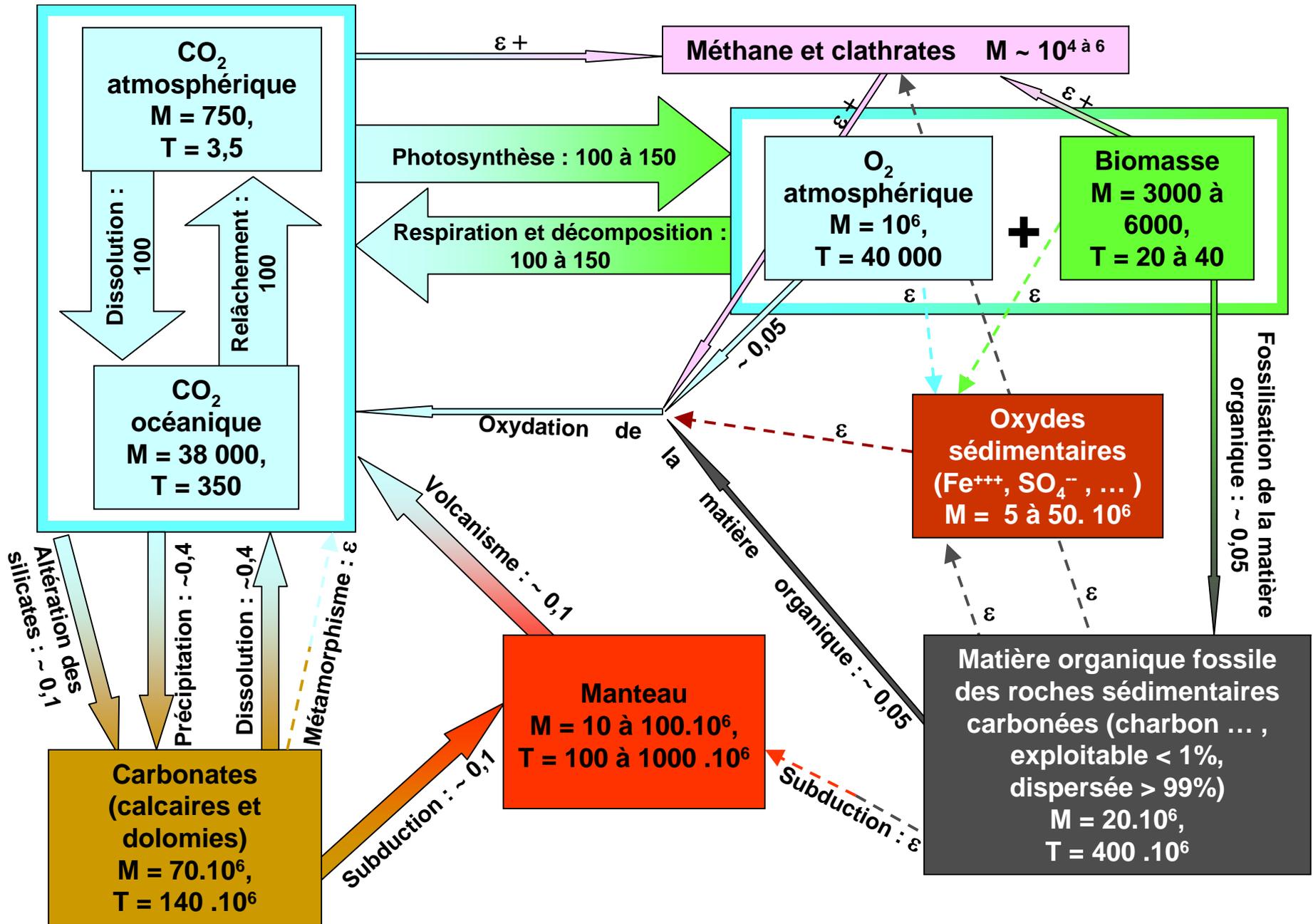
Le manteau : de 10 à 100 millions de Gt

La molécule de di-oxygène (O₂)

L'atmosphère : ~ 1 million de Gt

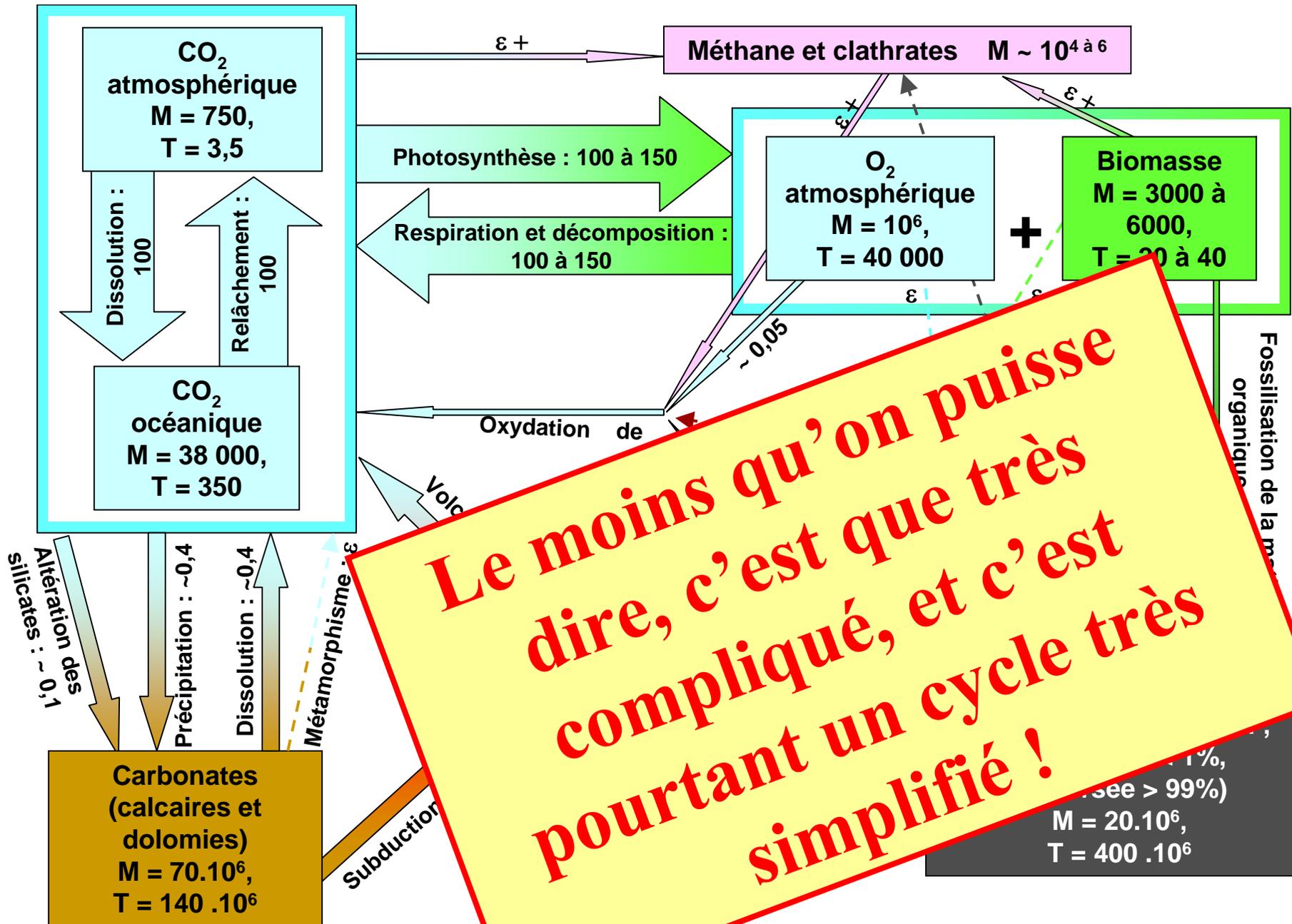
L'océan : ~ 1000 Gt (dissout dans l'eau)

Unité : 1 Giga-tonne (Gt) = 10⁹ t = 10¹² kg



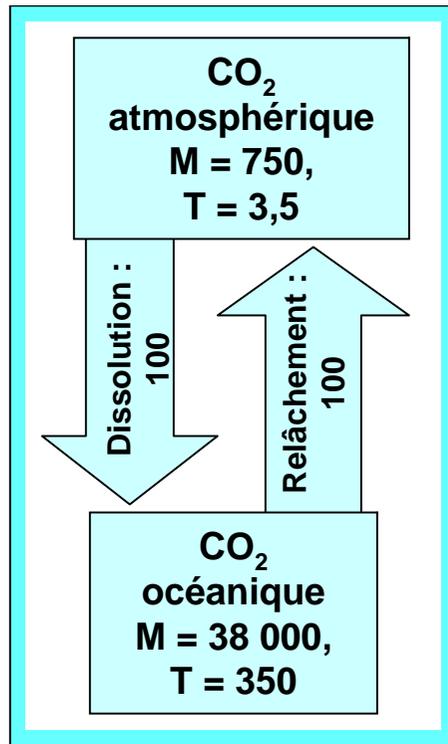
Le cycle du Carbone/Oxygène

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



Le cycle du Carbon et Oxygène

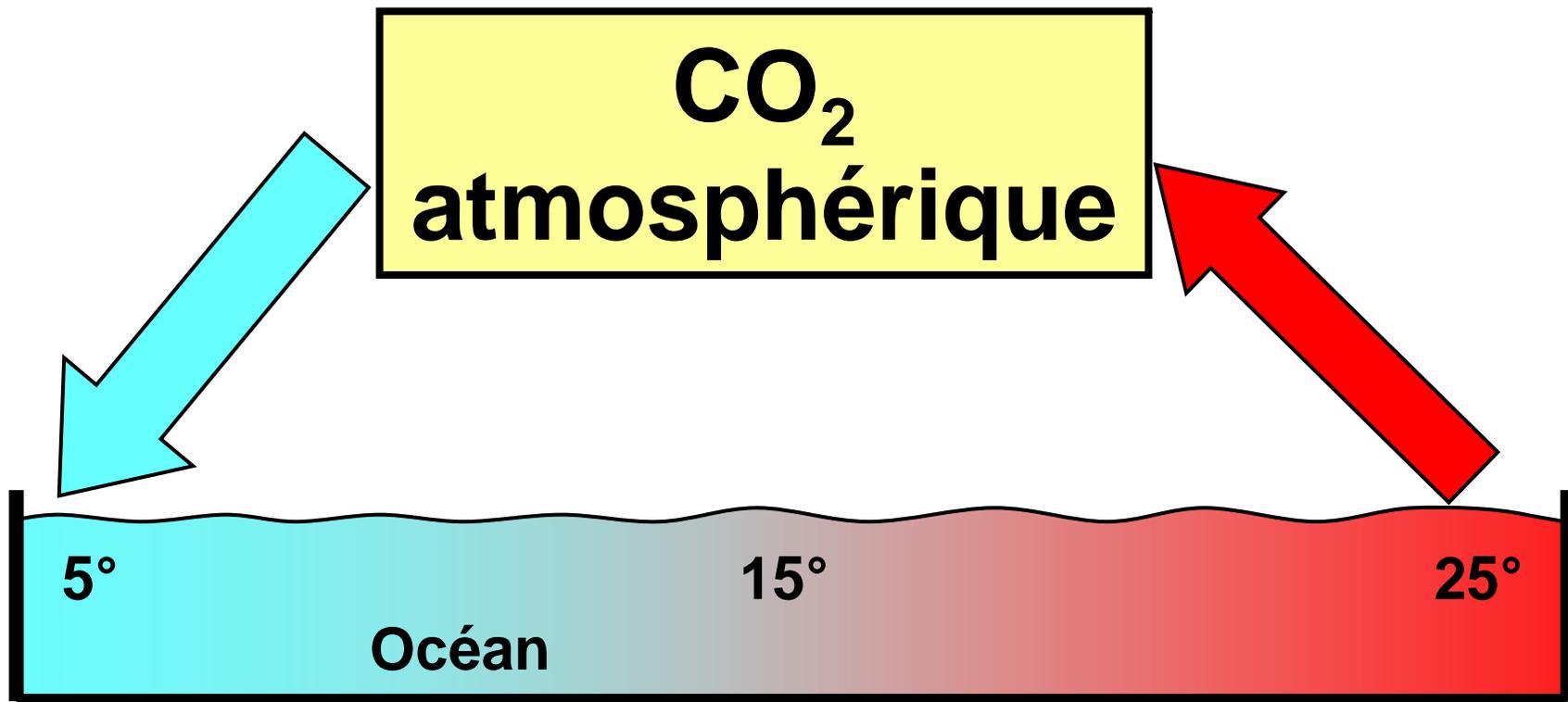
Masse en Gt (10⁹ t = 10¹² kg) de C ou d'O
 Temps de résidence en année
 Flux : en Gt / an

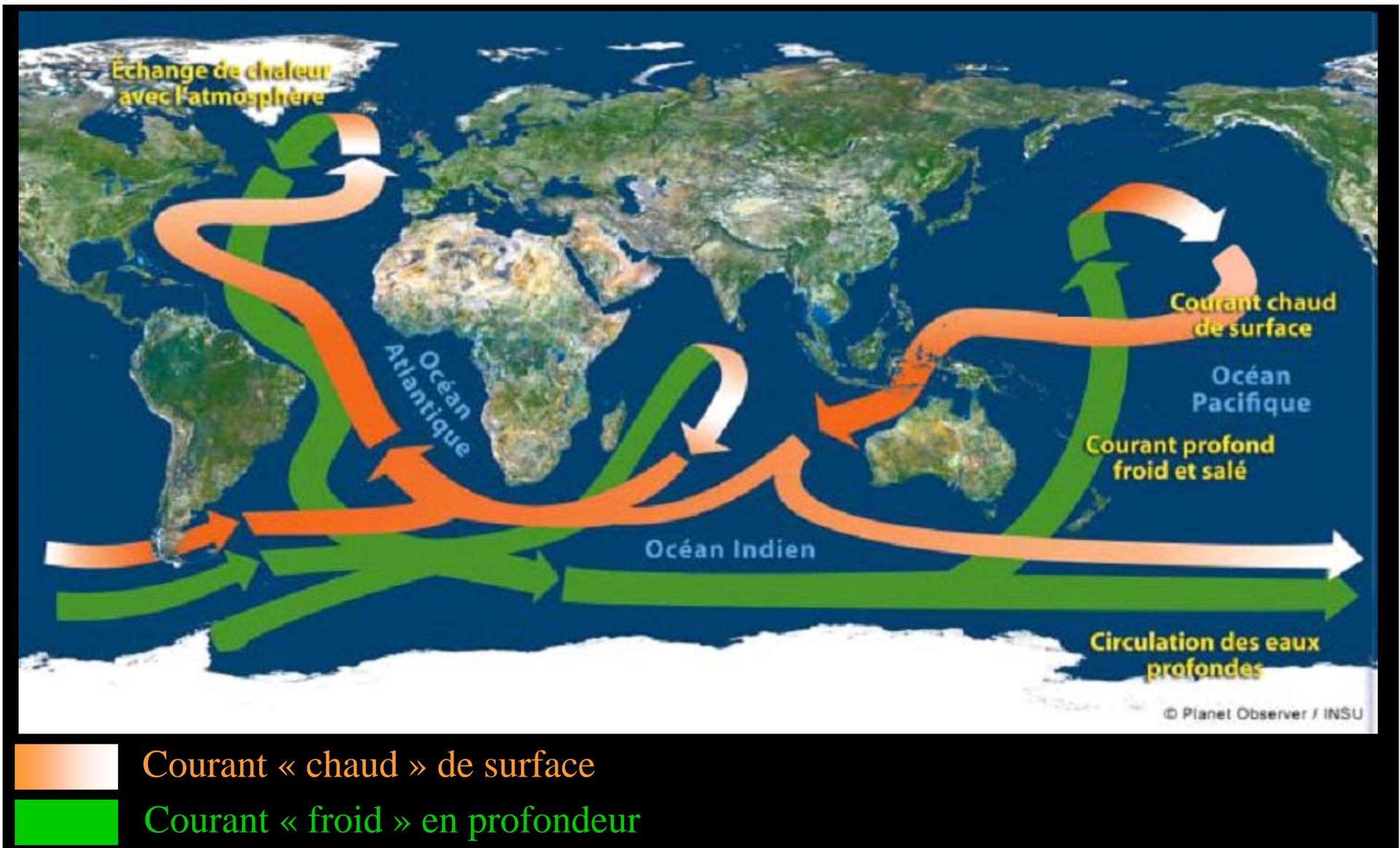


On va étudier (en les simplifiant encore) les principaux échanges (figurés par des flèches) entre tous ces réservoirs. Il suffit qu'une de ces flèches change pour une raison (naturelle ou anthropique), et le CO₂ atmosphérique, et donc le climat, changent.

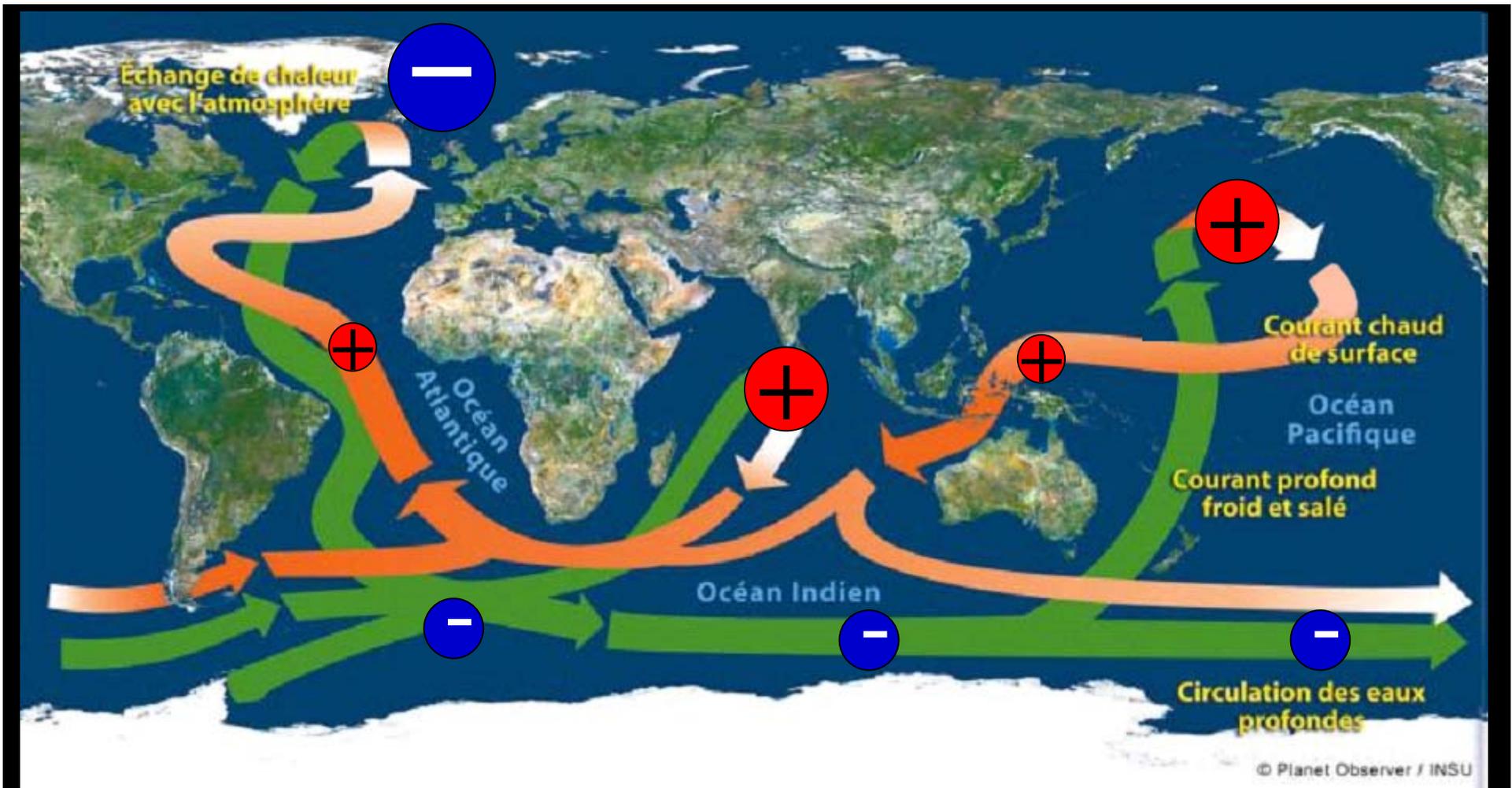
Tout d'abord, les échanges océan ↔ atmosphère

Le CO₂ est beaucoup plus soluble dans l'eau froide que dans l'eau chaude. L'océan absorbe du CO₂ dans les zones polaires, en relâche dans les zones chaudes





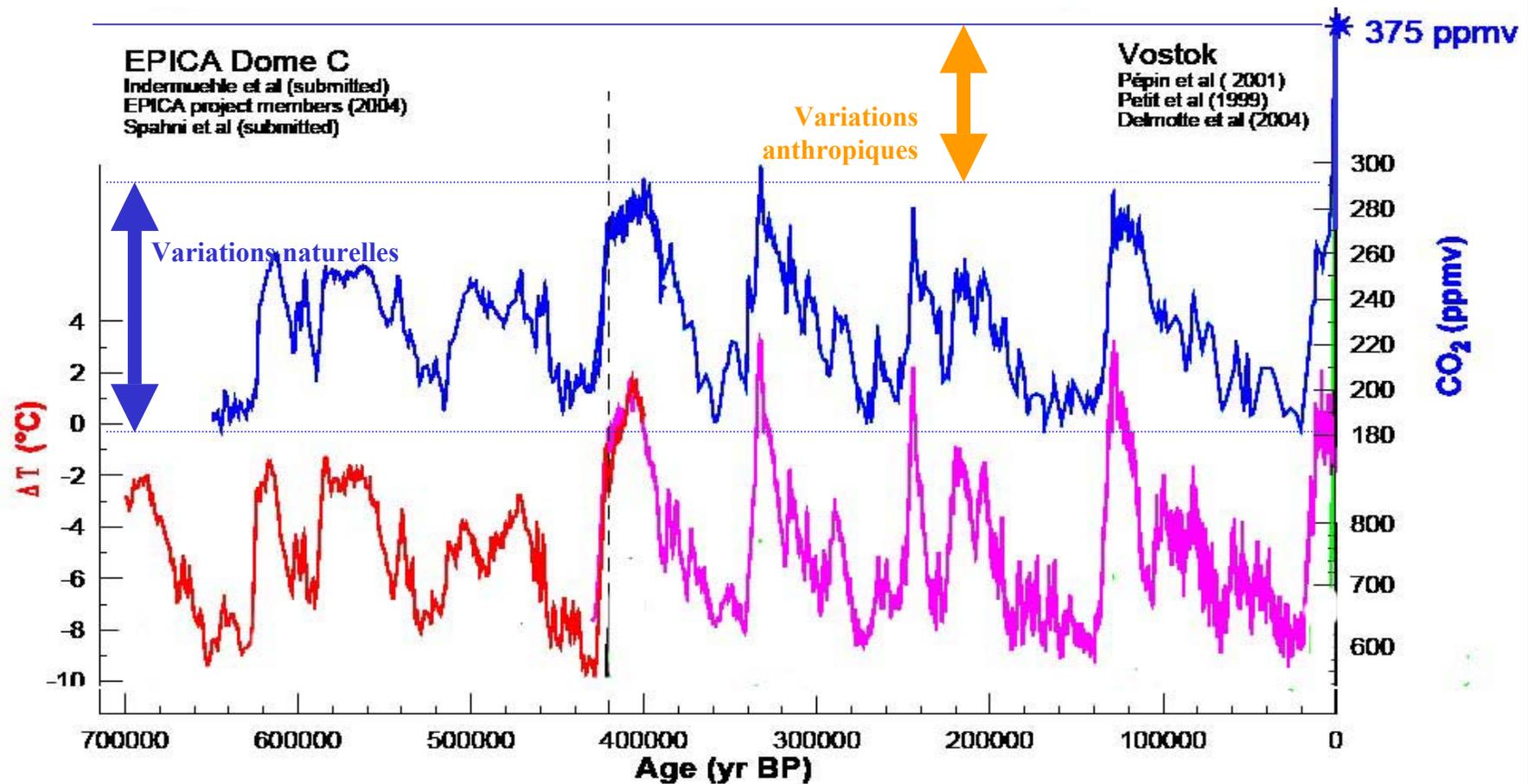
L'océan est affecté de courants, superficiels et profonds, qui forment un vaste tapis roulant. Une « boucle » dure environ 1500 ans.



— Zone froide, où l'océan absorbe du CO_2 atmosphérique

+ Zone chaude, où l'océan relâche du CO_2 vers l'atmosphère

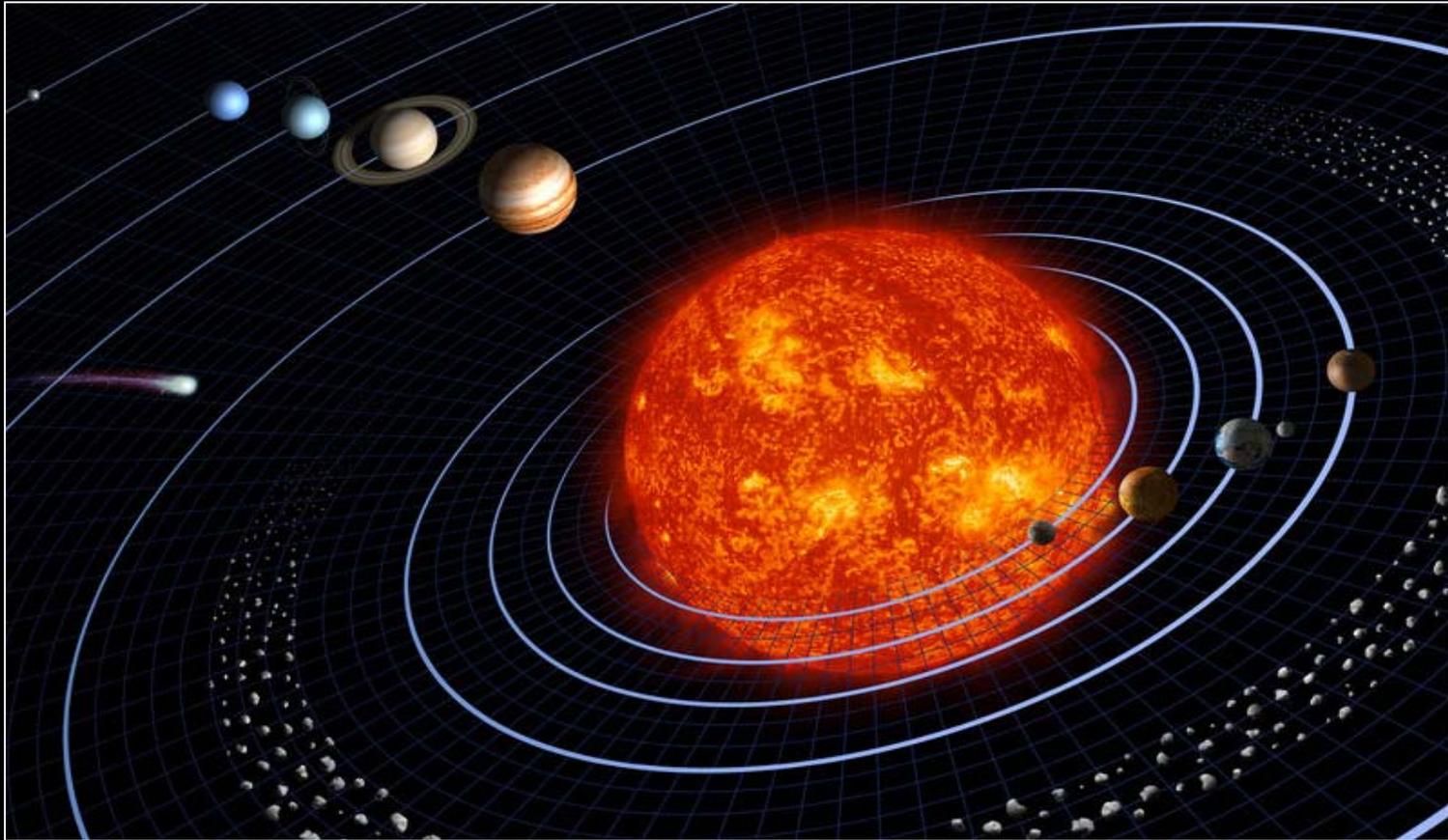
Il y a en permanence dissolution et relâchement de CO_2 par l'océan, d'environ 100 Gt / an.



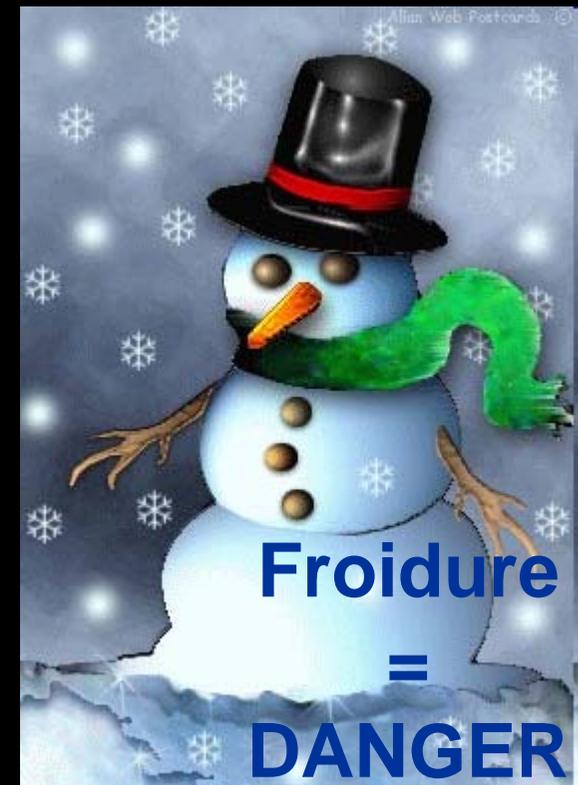
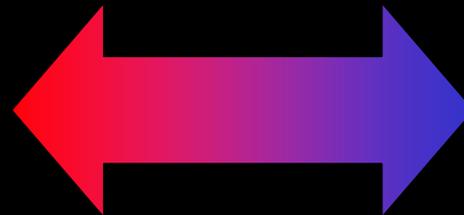
On a vu que la température et le CO₂ varient de façon parfaitement corrélée, avec un rythme très régulier.

Les variations de température commencent quelques siècles avant celles de CO₂

Ces variations régulières ont le même rythme que des variations « astronomiques » (variations de ellipticité de l'orbite terrestre, de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre ...). C'est l'astronomie qui est la « cause première », le déclencheur.



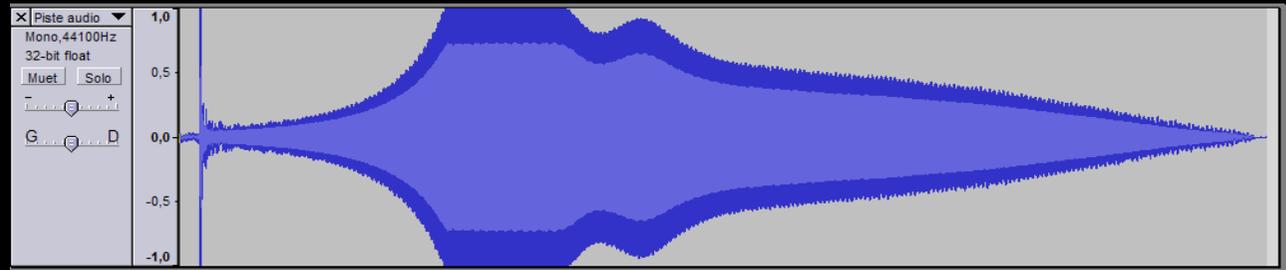
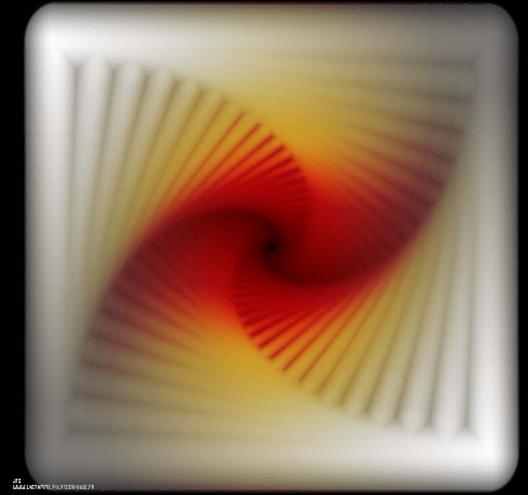
Ces variations « astronomiques » ont le bon rythme, mais sont très, trop, faibles pour expliquer les variations climatiques observées depuis 1 000 000 ans. Pourquoi d'aussi fortes variations de température, et que vient faire le CO₂ dans tout ça ?



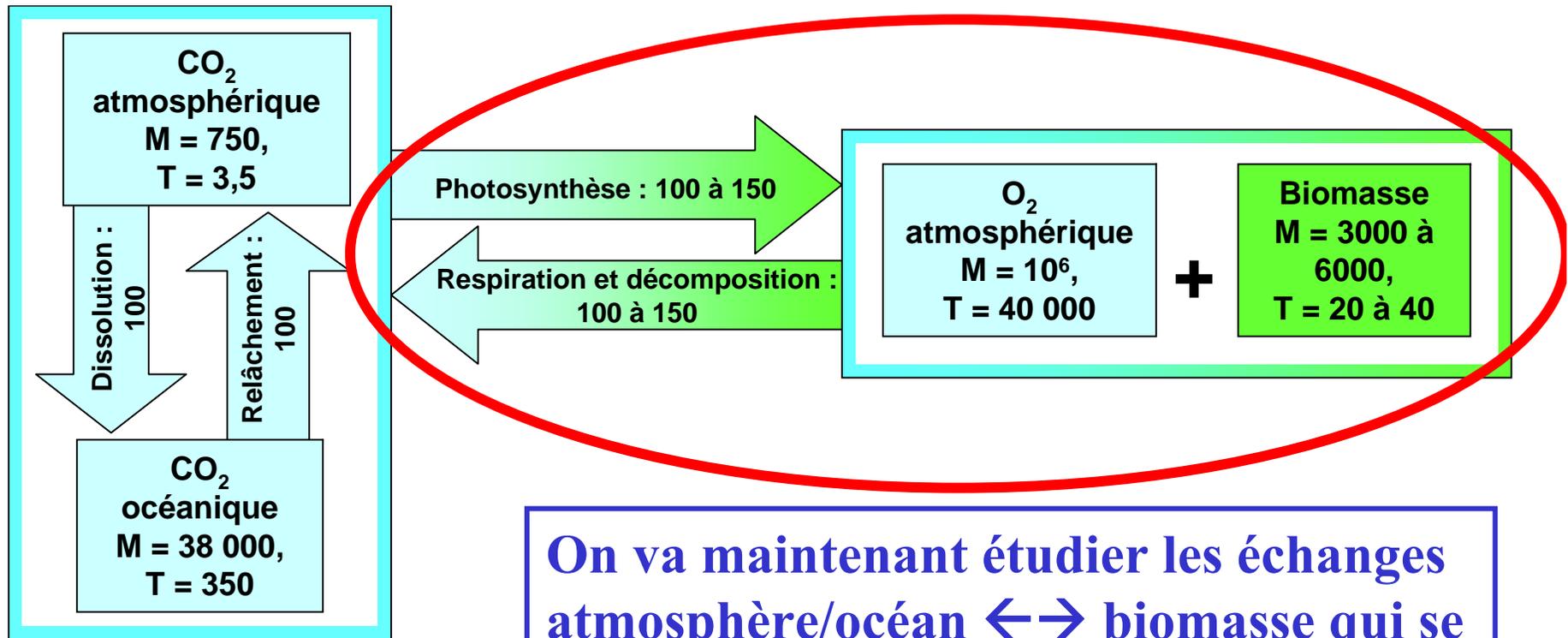
Pour une raison astronomique, la planète se réchauffe un petit peu → l'océan se réchauffe un petit peu → un petit peu de CO₂ quitte l'océan et va dans l'atmosphère → l'effet de serre augmente → la température de l'air et de la mer augmente → du nouveau CO₂ quitte l'eau de mer → l'effet de serre augmente 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.



Depuis quelques millions d'années, l'Astronomie fournissait le signal, et le 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 !

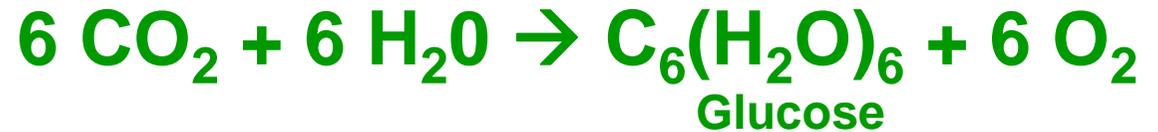


On va maintenant étudier les échanges atmosphère/océan \leftrightarrow biomasse qui se font grâce à la photosynthèse et à la respiration, avec comme conséquence « annexe » la production ou la consommation d'O₂ (di-oxygène) que les « vieux » comme moi appellent tout simplement « oxygène ».

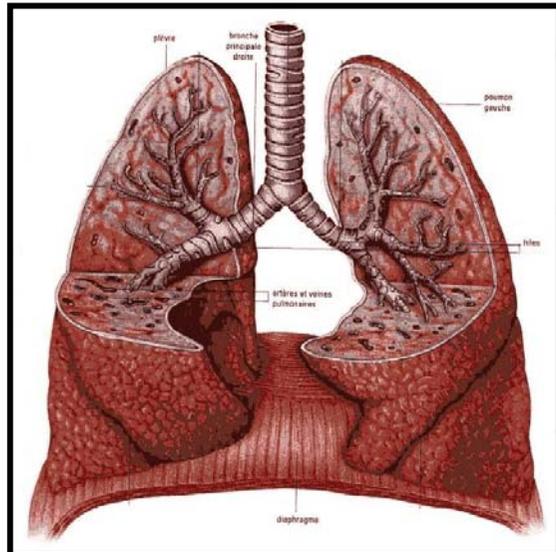
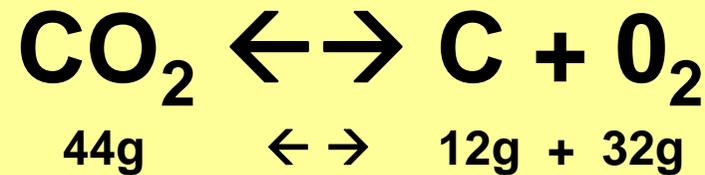
PHOTOSYNTHESE



Equation (très) simplifiée de la photosynthèse :



Encore plus simplifié :



Encore plus simplifié :



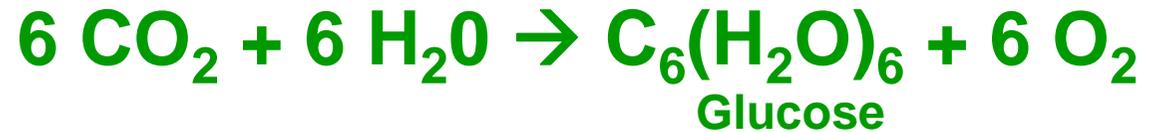
Equation simplifiée de la respiration :

RESPIRATION

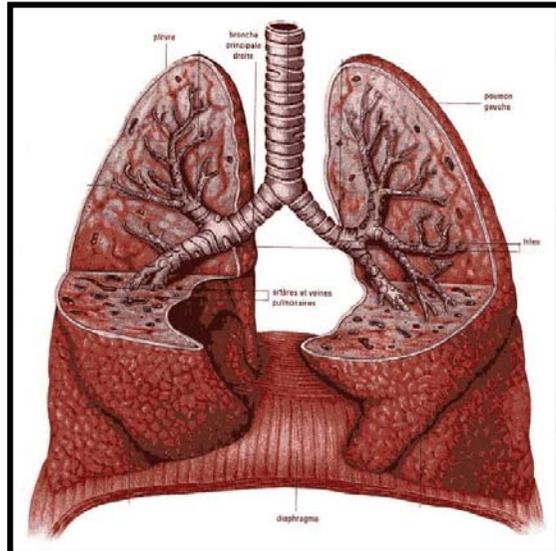
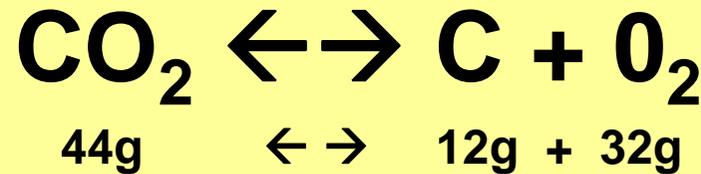
PHOTOSYNTHESE



Equation (très) simplifiée de la photosynthèse :



Encore plus simplifié :



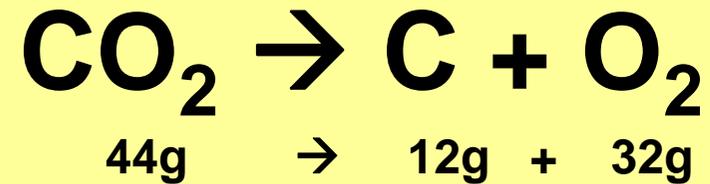
Encore plus simplifié :
O₂ libéré et Carbone fixé par la photosynthèse sont dans un rapport de 32 / 12

Equation

RESPIRATION

Photosynthèse et production d'O₂

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



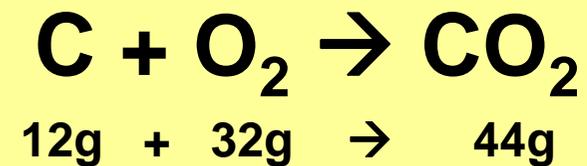
A chaque fois que la photosynthèse produit de la matière organique contenant 12 g de Carbone, il se libère 32 g d'O₂. Cet O₂ s'accumule-t-il dans l'atmosphère ?

NON !





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



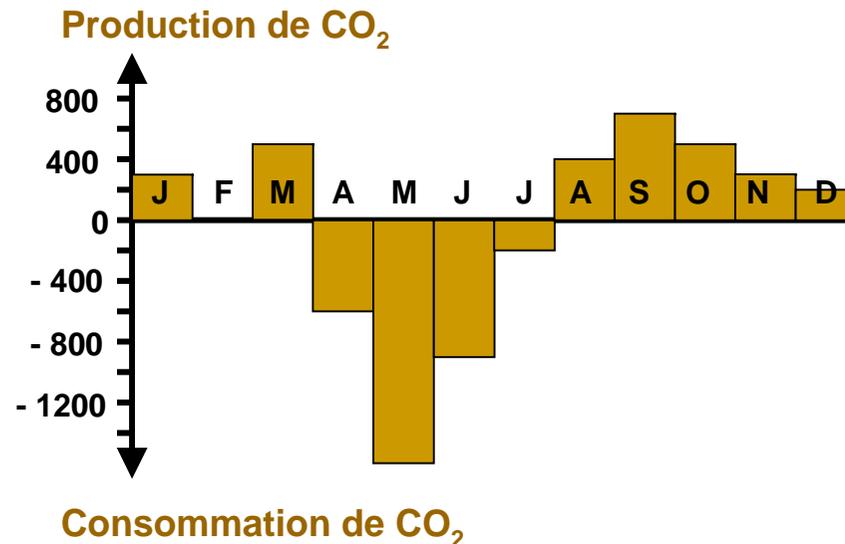
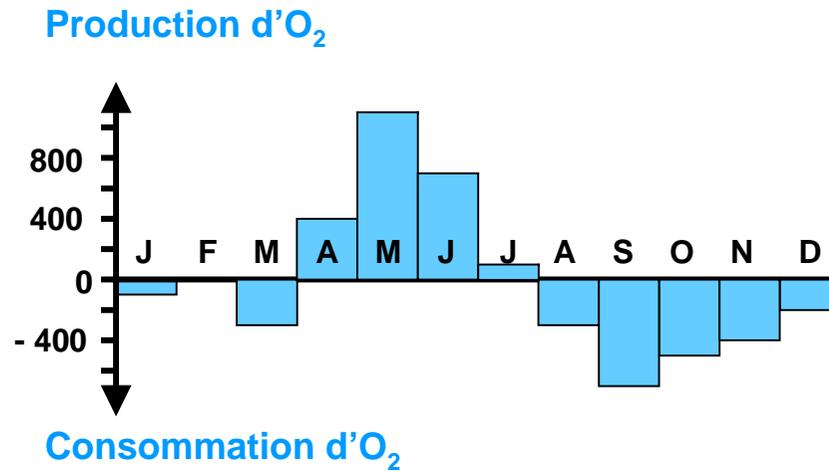
réabsorbe les 32 g d'O₂ libérés lors de sa production.

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**

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



Vieux transparent dont je ne retrouve plus la source



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



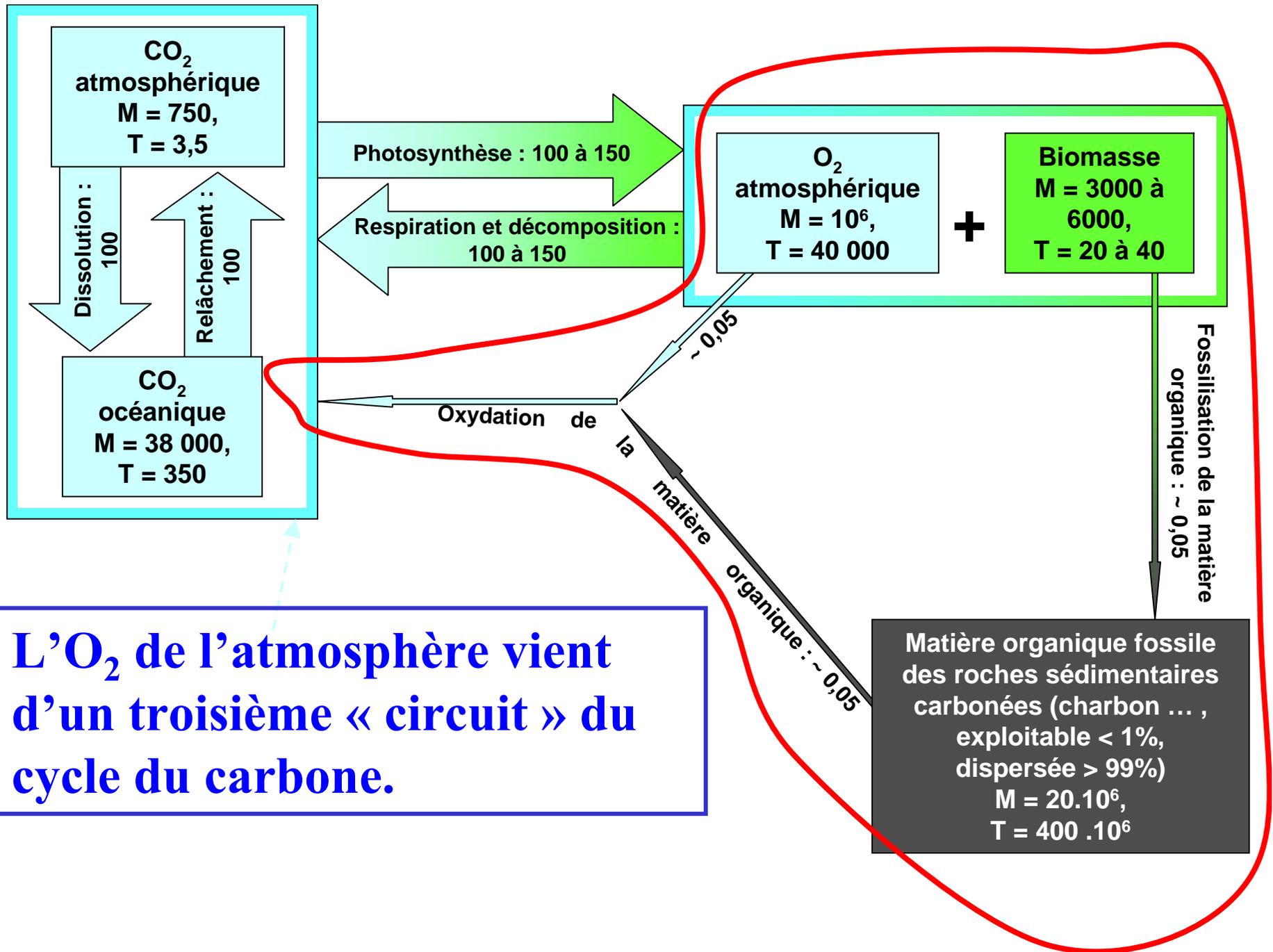
L'O₂ ne devrait donc exister dans l'atmosphère que dans la proportion 32 / 12 par rapport au Carbone de la biomasse.

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 l'océan ..., qui n'en ont produit que 8 000 Gt ?.



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 pétrole dans le cas de plancton, du carbone « dispersé » pour les marnes noires ...



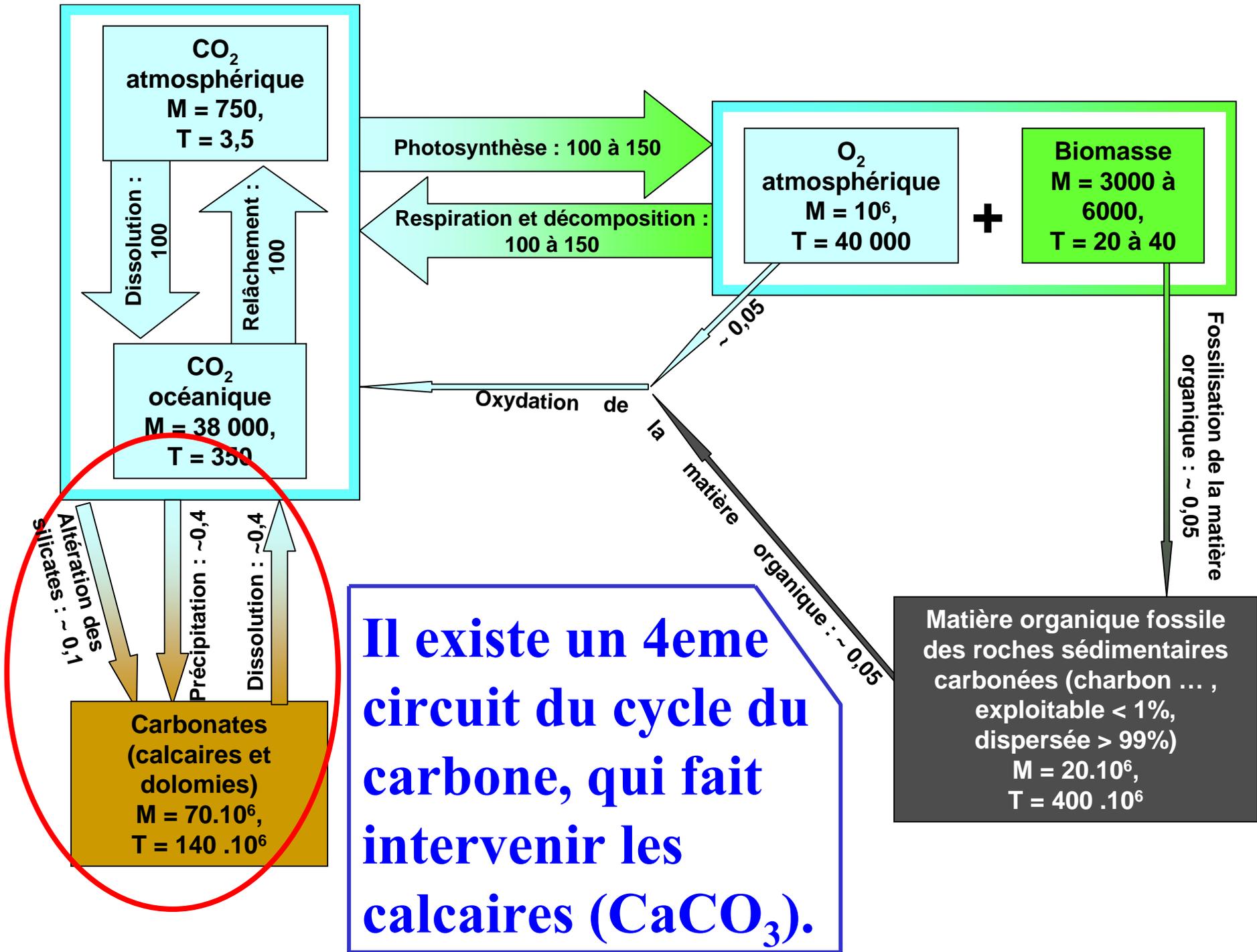
D'où vient donc l'O₂ de l'atmosphère, celui que nous respirons en ce moment ?

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.







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

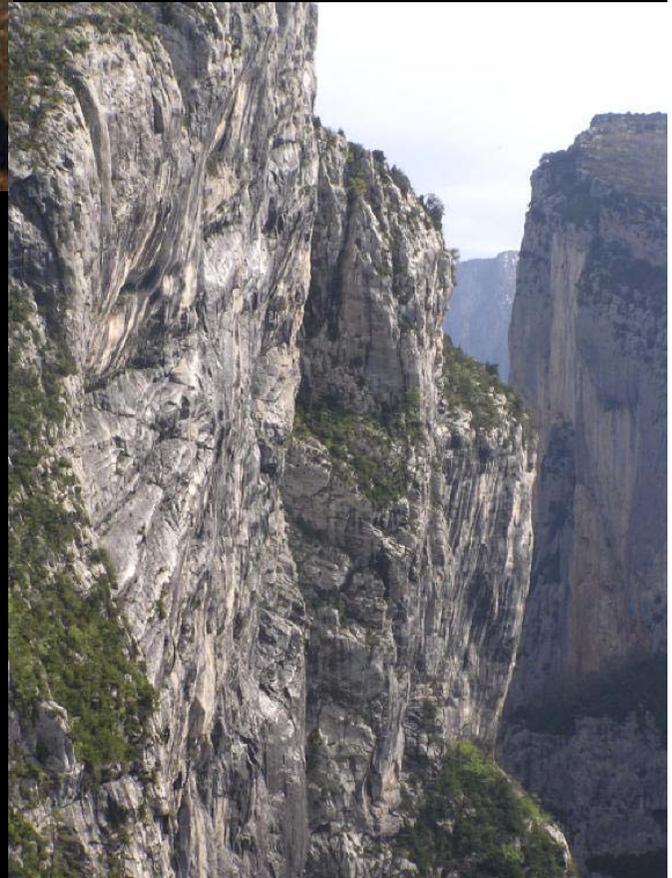
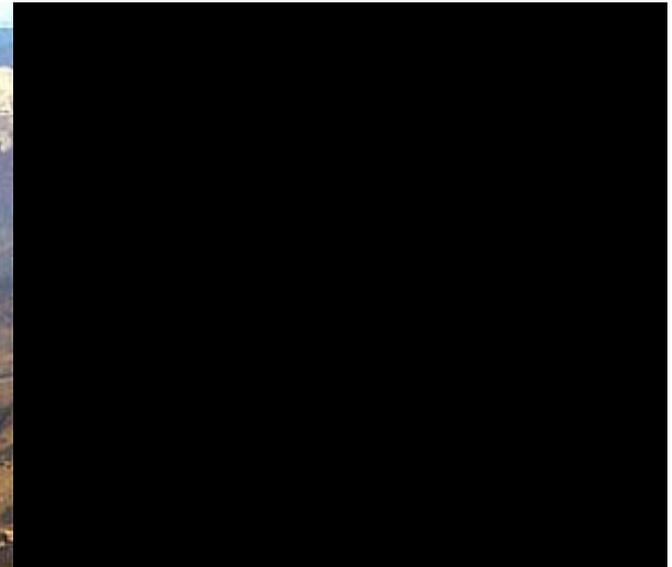
Précipitation

Calcaire



La « fabrication » du
calcaire (CaCO_3)





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





ophie - Pierre Thomas



Précipitation

Dissolution



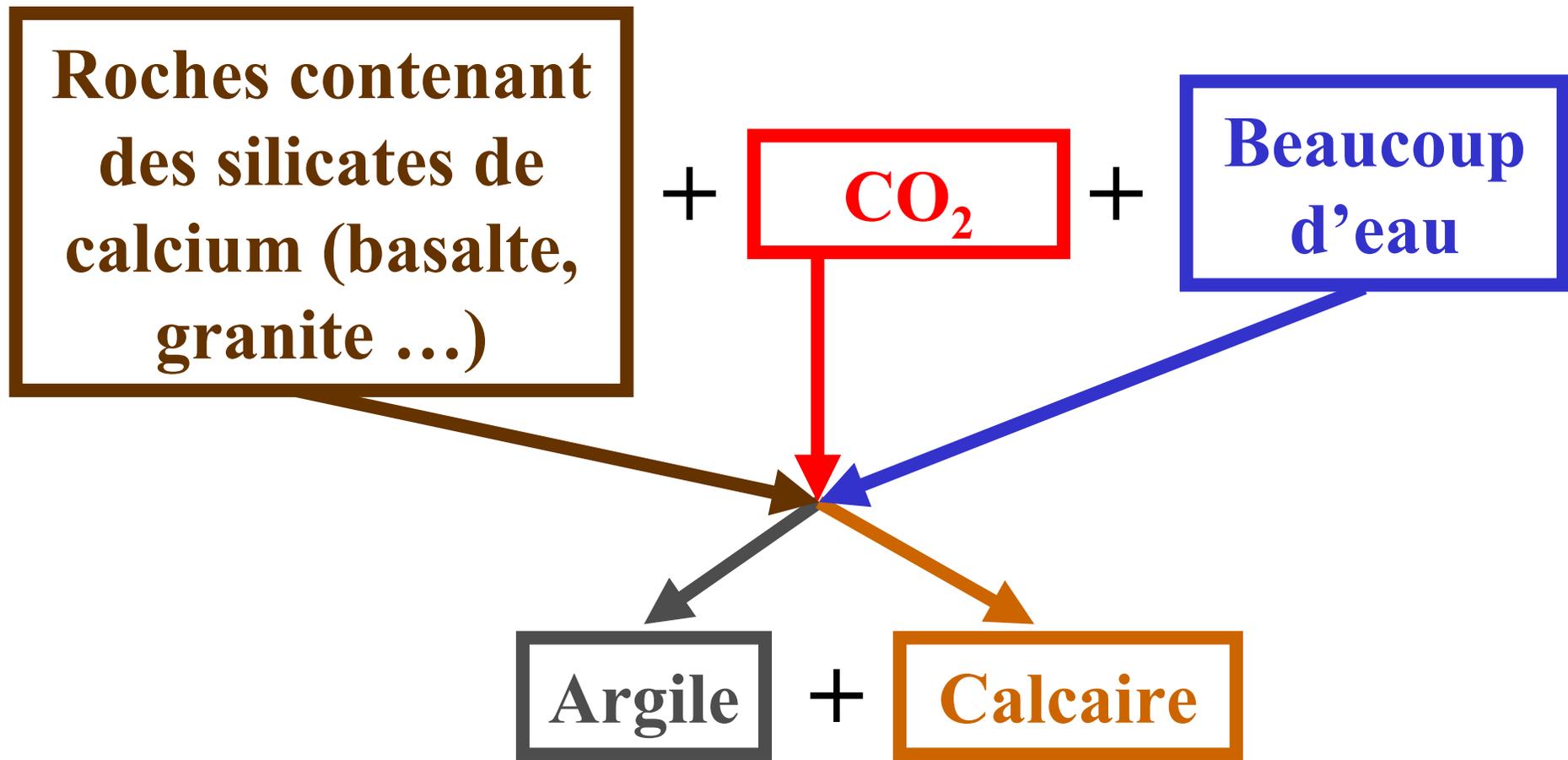
Equilibre totalement réversible, réglé par la vie (Φ), le Ph, la Température. Fonctionnement en circuit fermé. A long terme, CO_2 reste constant

Sur le long terme, ces réactions s'équilibrent, et le bilan est nul. 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



Photographie : Pierre Thomas

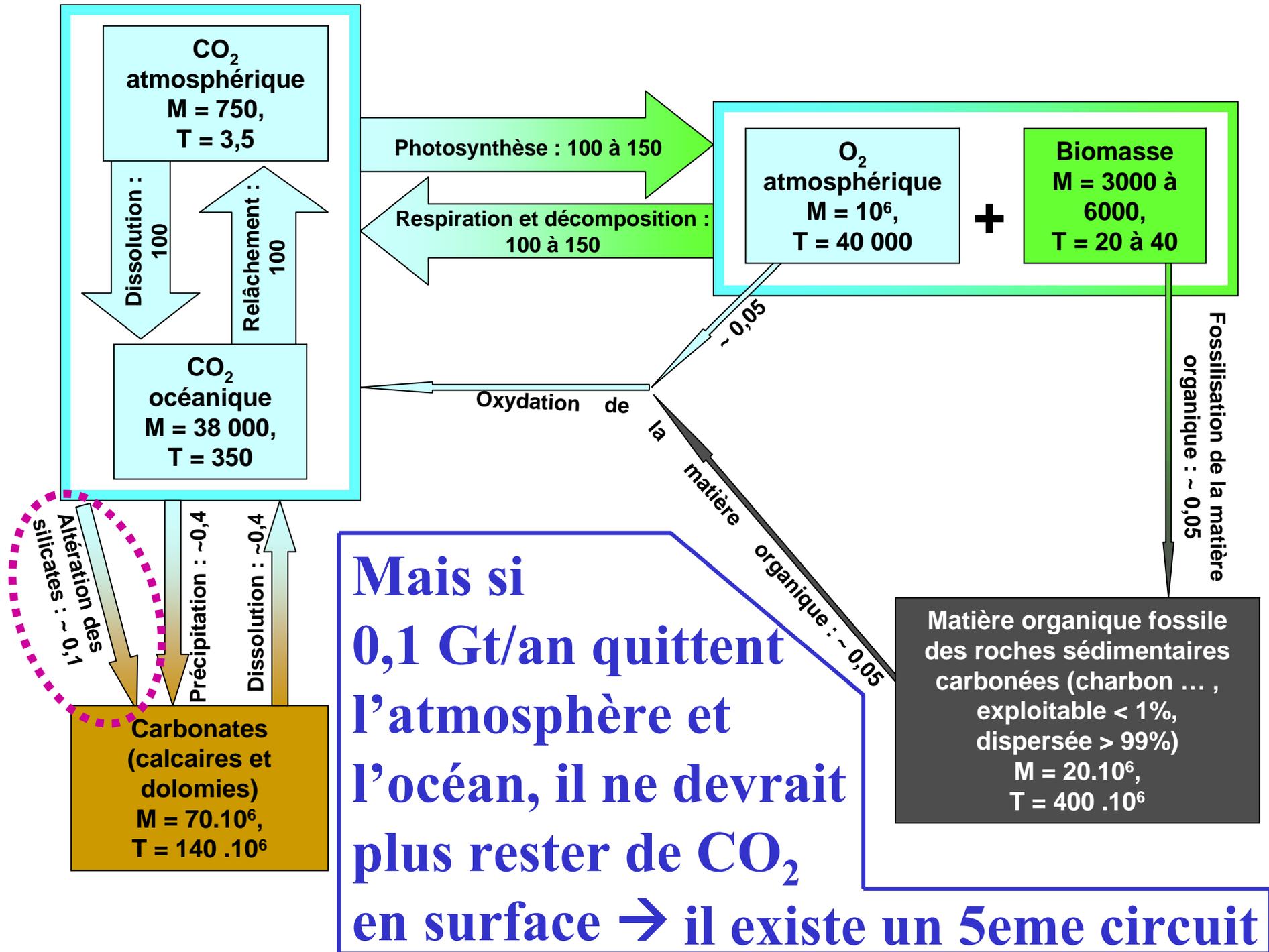


Cette suite de réactions chimiques très complexes « fabriquent » de l'argile et du calcaire et « consomme » irréversiblement du CO₂ (~ 0,1 Gt / an)

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 CO₂, ce qui diminue le CO₂ atmosphérique, donc l'effet de serre et peut donc limiter l'augmentation de température.

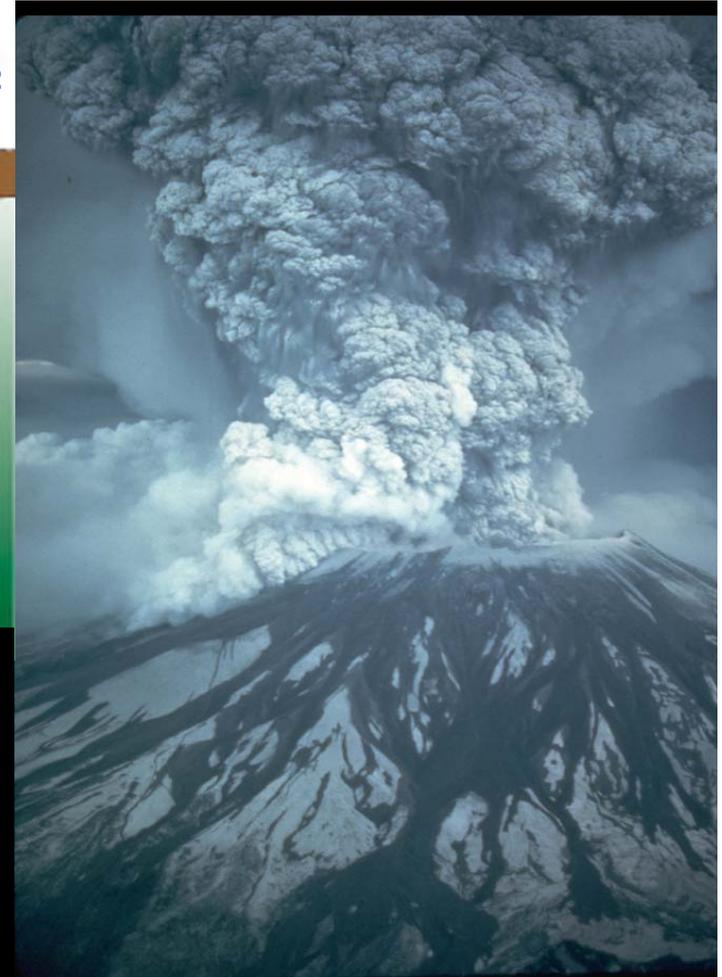
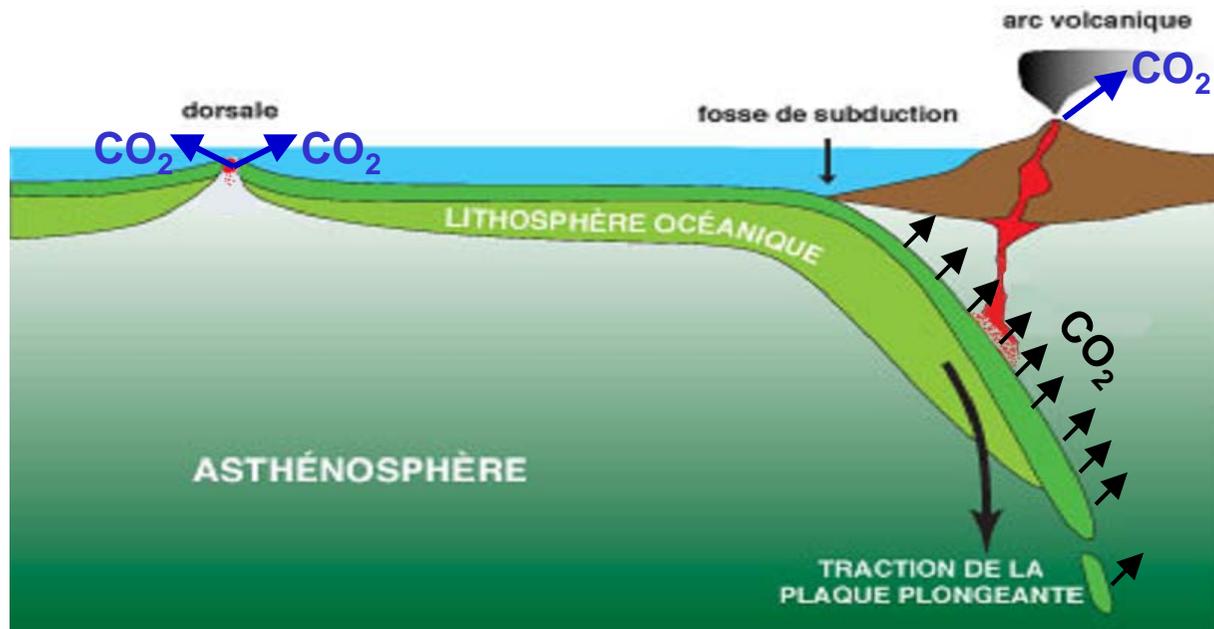
Un anti-effet boule de neige !







... le volcanisme !



Du calcaire retourne au manteau grâce à la subduction.

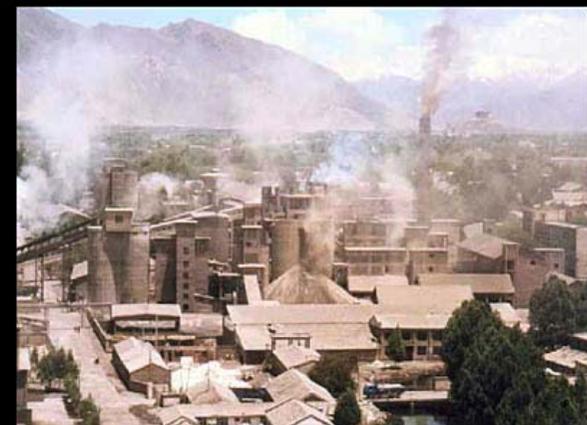
A haute température, il subit une réaction inverse : calcaire + argile

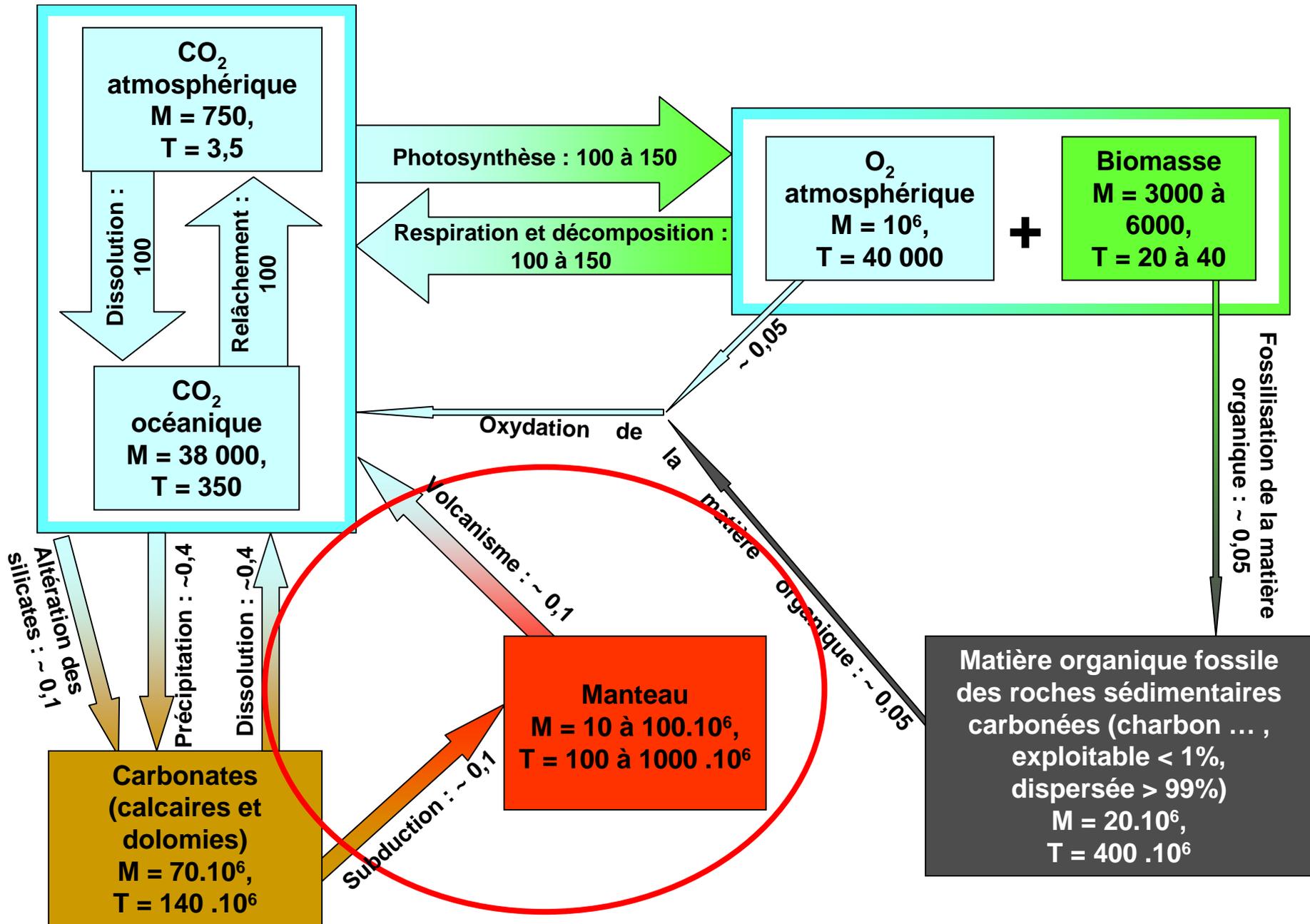


silicates de calcium + eau + CO₂

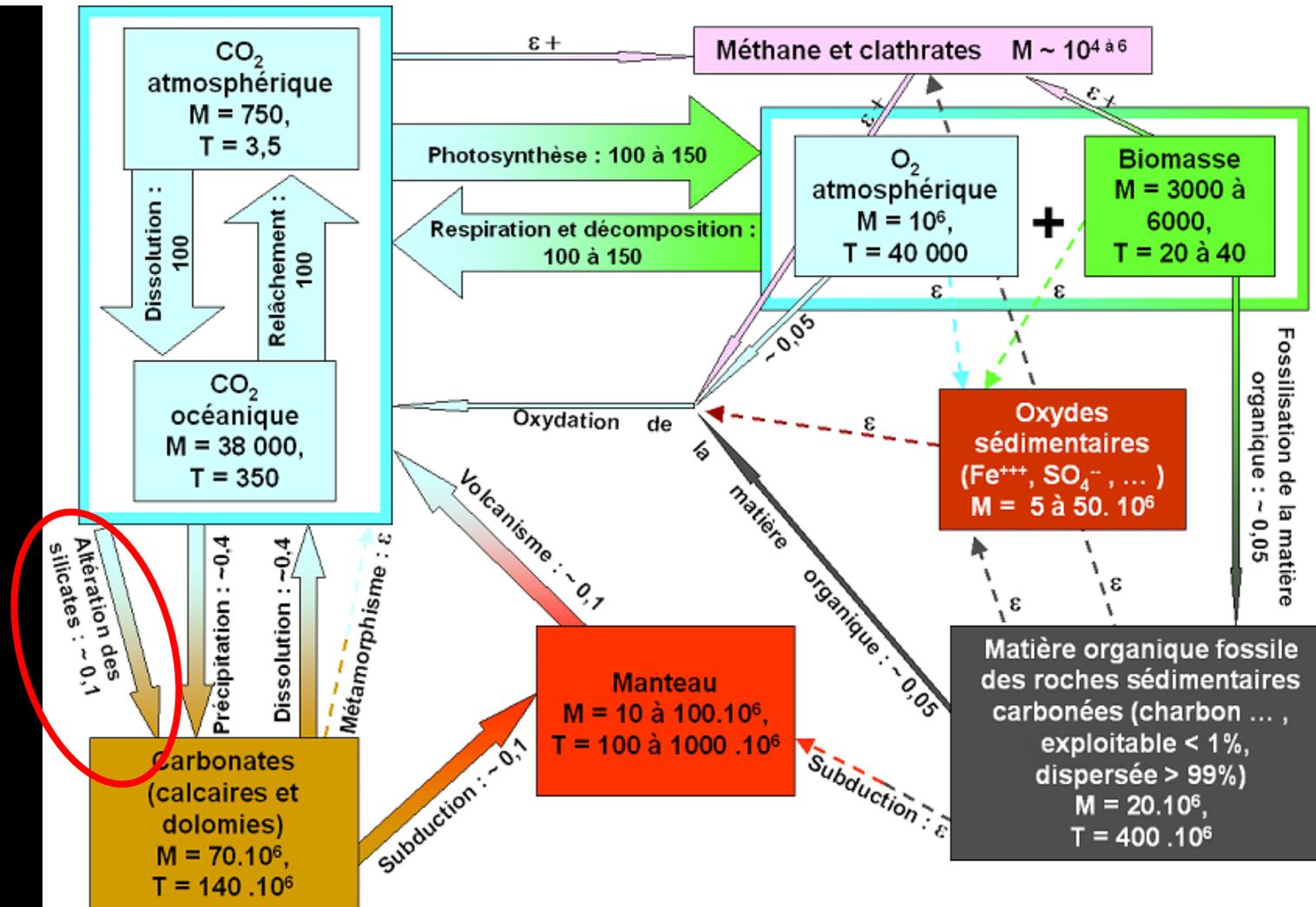
Ce CO₂ retourne au manteau, et pourra ressorti par les volcans.

C'est une réaction (anthropique) de ce genre qui a lieu dans les cimenteries

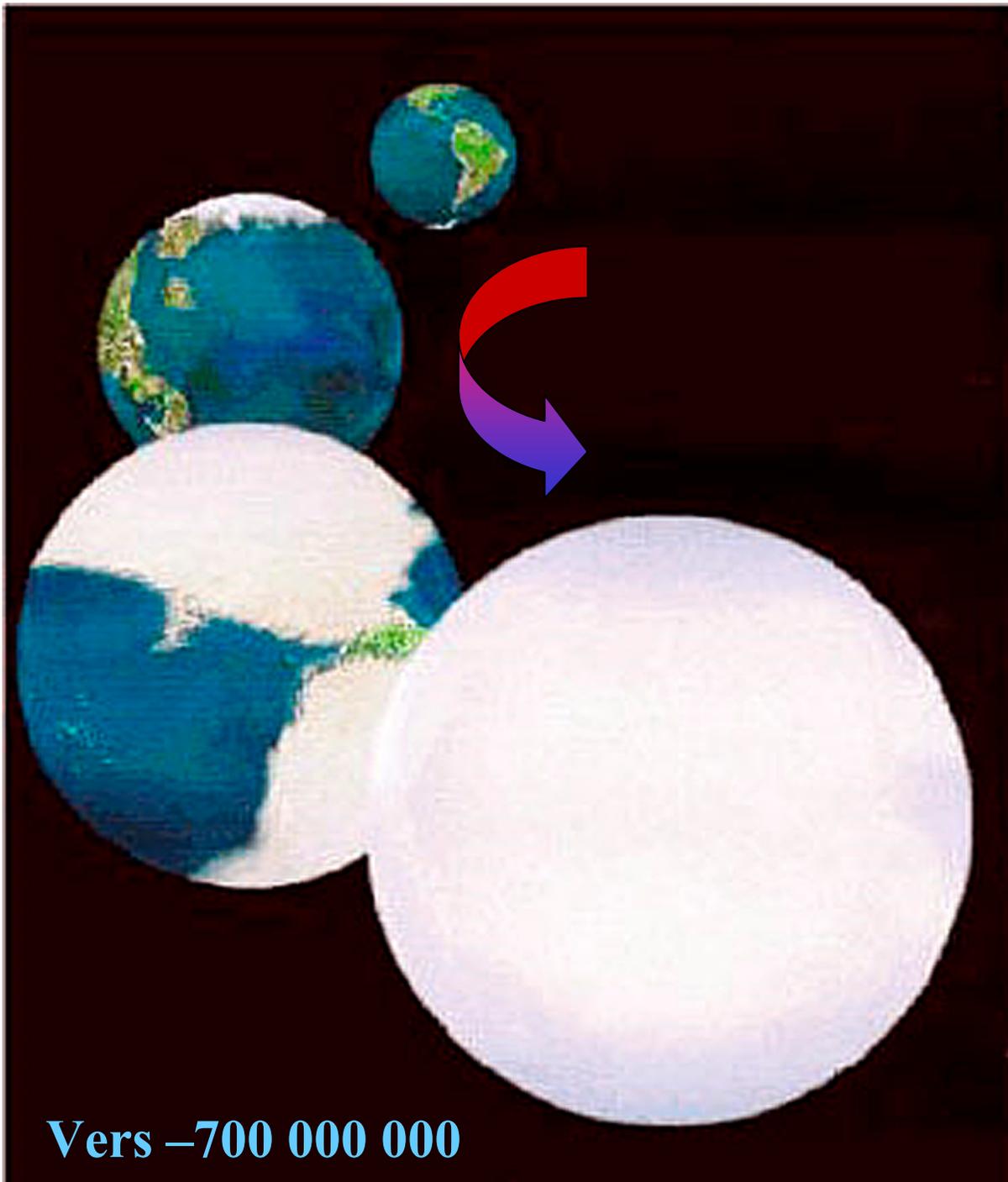




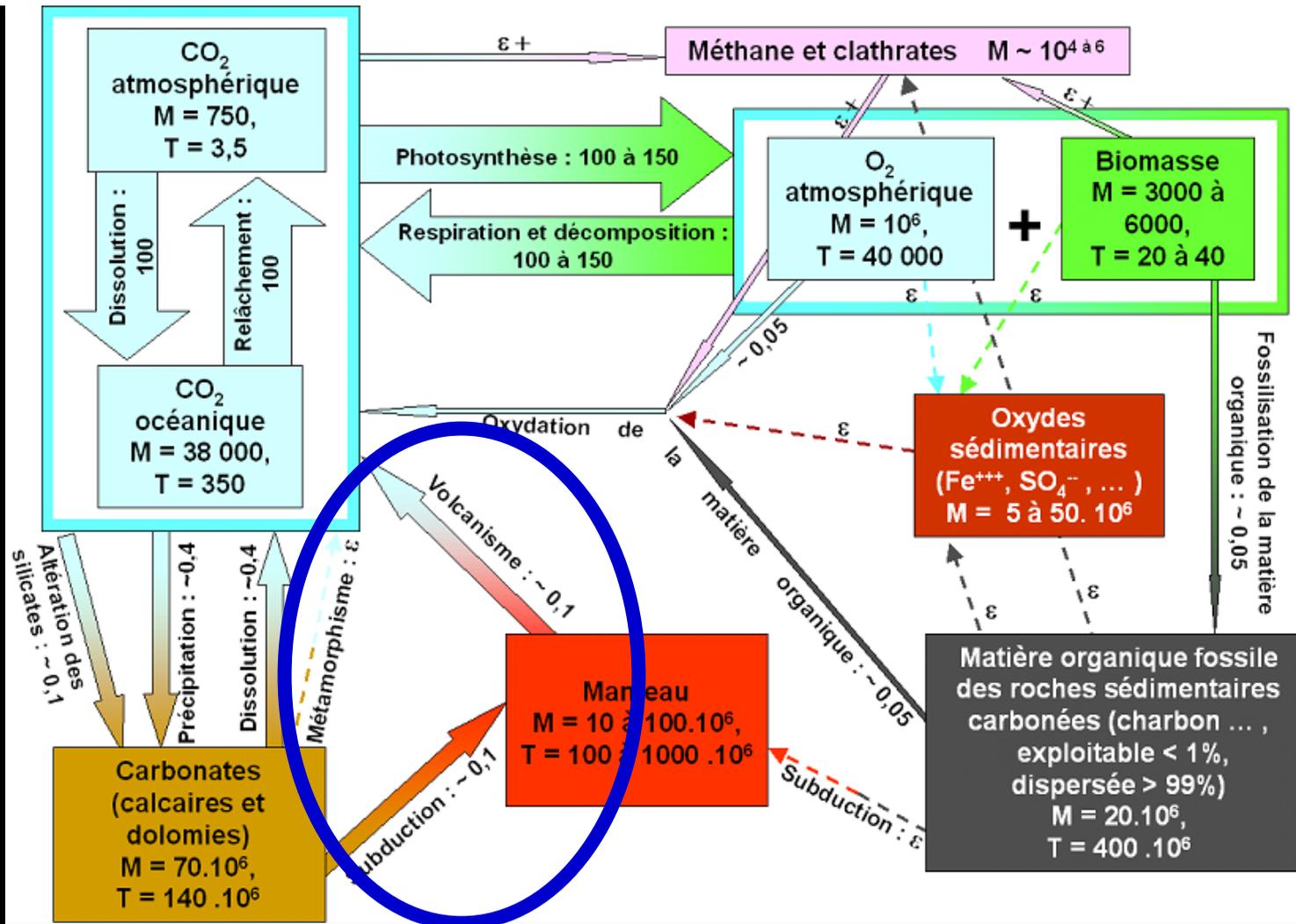
Voici donc un cycle du carbone hyper-simplifié, le minimum des minimorum que devrait avoir compris toute personne parlant de climat.



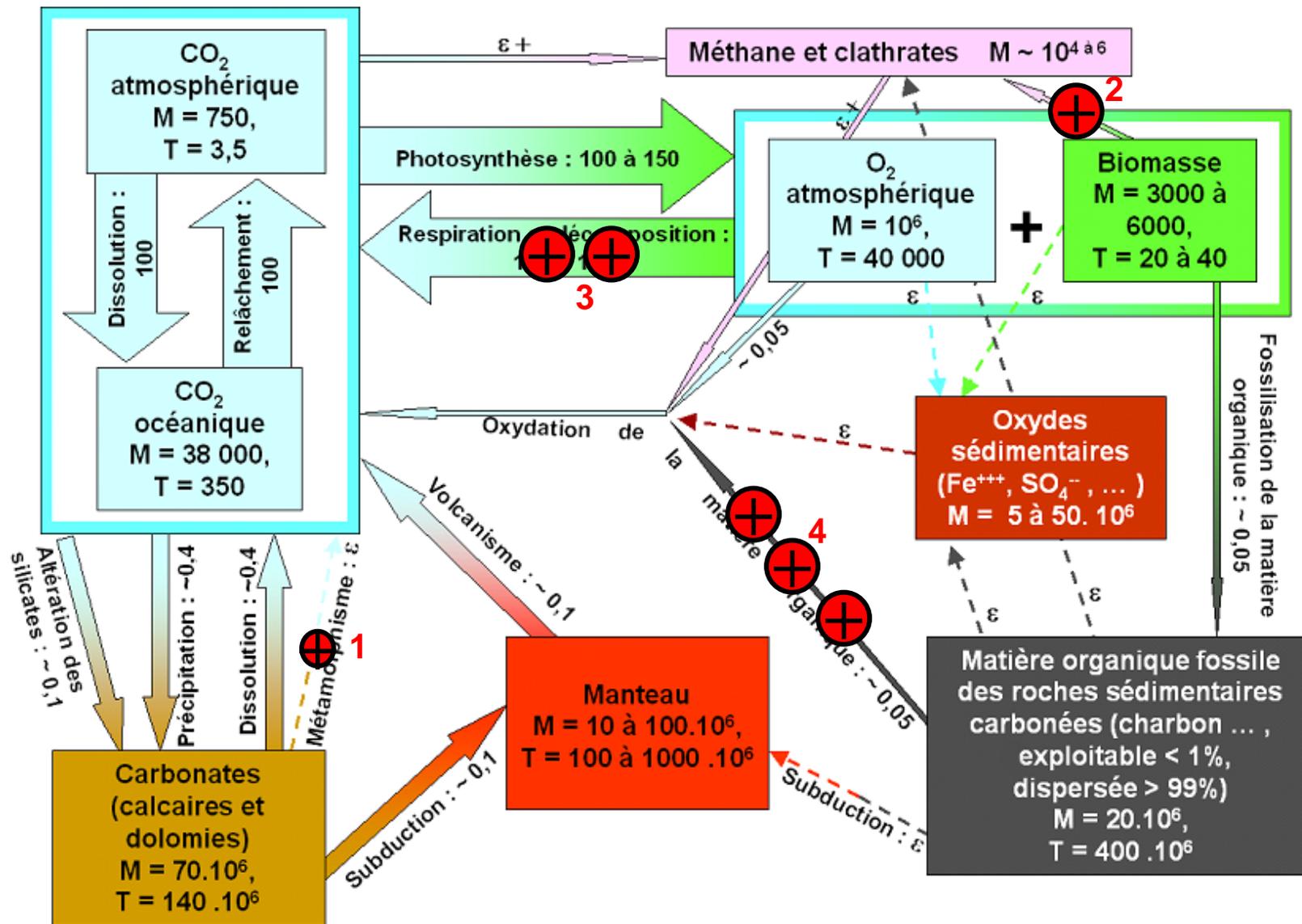
La perturbation d'une seule de ces flèches entraîne la variation du CO₂ (ou du CH₄) atmosphérique, donc entraîne une variation climatique. Par exemple, il y a environ 700 000 000 d'années, l'augmentation très importante (pour des raisons géologiques) de l'altération des silicates a entraîné ...



**... un colossal
refroidissement
qui s'est emballé
(effet albédo) et
qui a abouti à une
Terre
complètement
gelée : la Terre
boule de neige
(snowball Earth)**



Quand la Terre était entièrement gelée, toutes les flèches étaient réduites à trois fois rien, sauf ... subduction et volcanisme . Du CO₂ a continué à être relâché vers l'atmosphère, s'y est accumulé car il n'y en avait quasiment plus d'absorption de CO₂, et sa teneur est suffisamment montée pour entraîner le « dégel ».



Et l'humanité, par ses activités, perturbe directement toutes les flèches signalées par un ⊕. On va regarder rapidement, par ordre d'importance croissante, ce que sont les 4 principales perturbations directement anthropiques.

1 : La fabrication (et donc l'utilisation) du ciment qui relâche du CO₂



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



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



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



L'électricité



Camion transportant des haricots verts du Kenya

Les transports



L'industrie



L'habitat

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



L'é



Camion transportant des haricots verts du Kenya

C'est tout cela qui fait que le CO_2 est passé de 280 à 380 ppmv en 150 ans (+ 30%), et que le méthane est passé de 0,6 à 1,8 ppmv (+ 300%) pendant la même période.

Ces deux augmentations ont renforcé l'effet de serre, et sont les principales raisons de l'augmentation de $0,8^\circ$ de la température moyenne de la Terre.



L'industrie



L'habitat



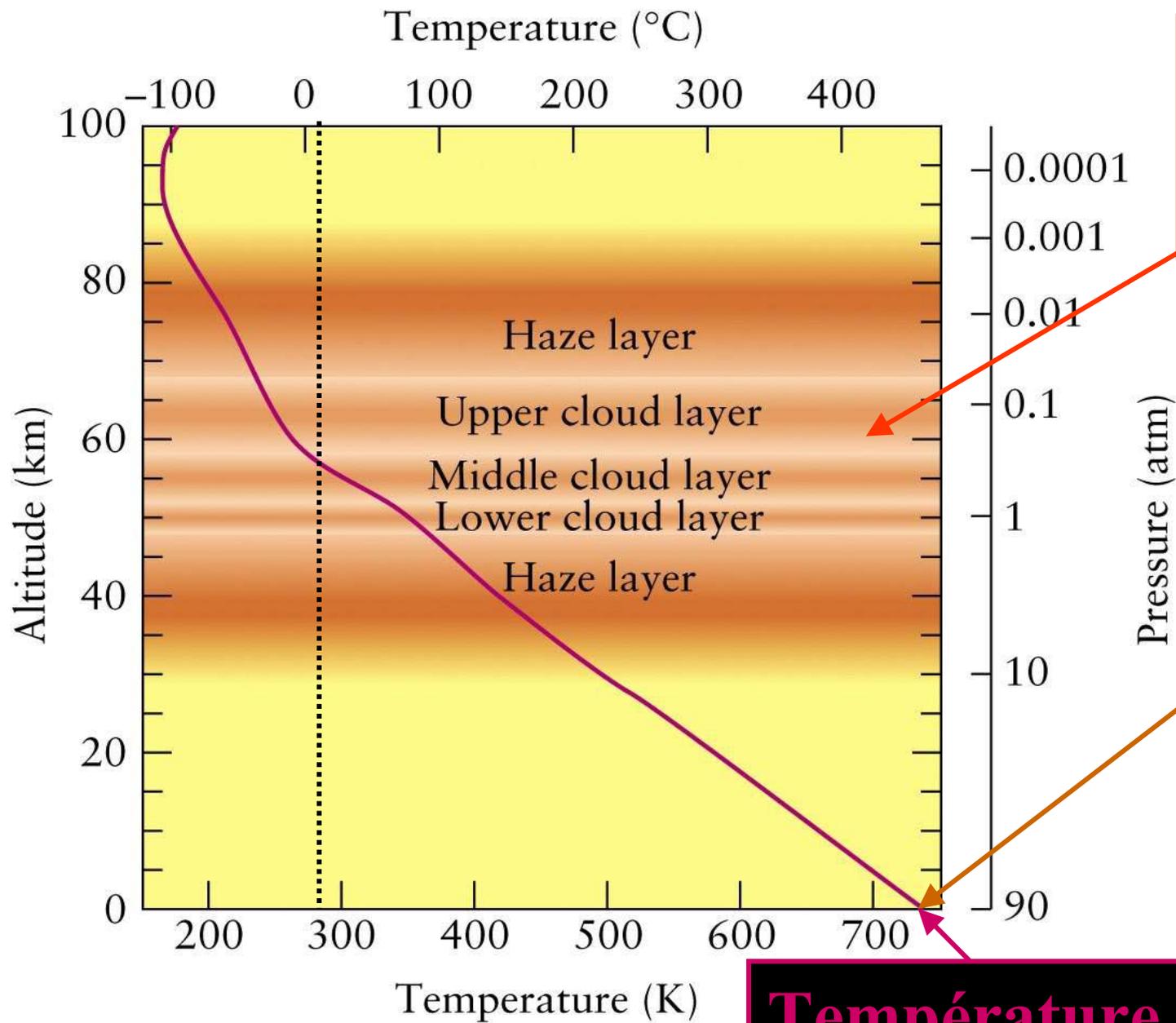
Voilà, c'est fini avec cette 106^{ème} diapositive. Mon but était de vous donner deux clés pour pouvoir rentrer dans la « physique » de l'effet de serre et dans la « géologie » du cycle du Carbone. J'espère que vous êtes maintenant mieux « armés » pour comprendre, critiquer, discuter ... ce que vous entendrez à propos des variations climatiques

Merci de votre attention.

Mais si il reste du temps ...



**Vénus possède
une
atmosphère
dense, avec en
son sein une
couche de
nuages qui
recouvrent
entièrement la
planète.**



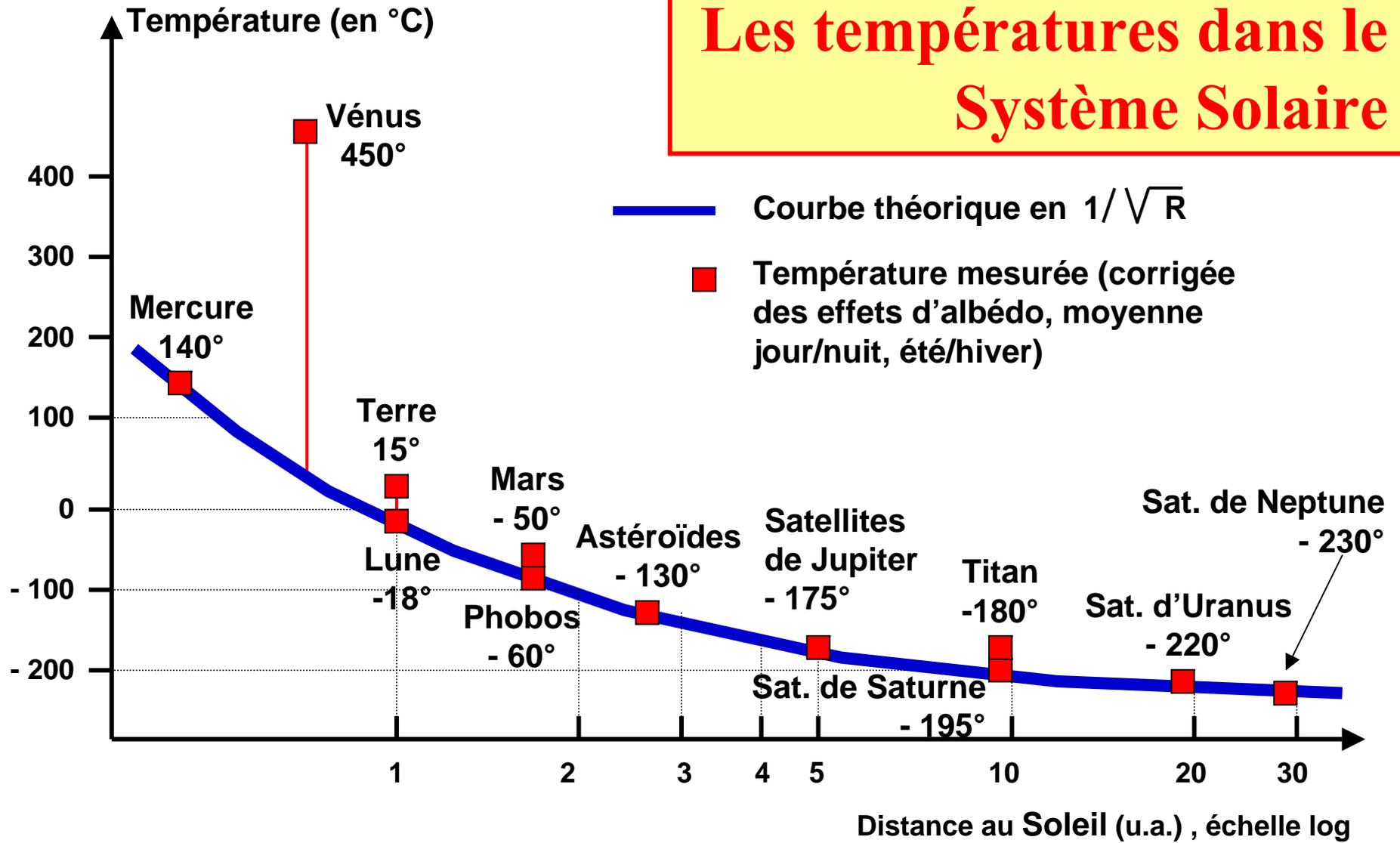
**Nuages
d'acide
sulfurique**

**Pression de
90 atm.
=
90 000 hPa
(Terre =
1013 hPa)**

**Température au sol de
450°C (725 K)**

Un effet de serre « formidable »

Les températures dans le Système Solaire



En corrigeant les effets d'albédo, 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 !

CO₂ : 96.5%

N₂ : 3.5%

SO₂ : 0.015%

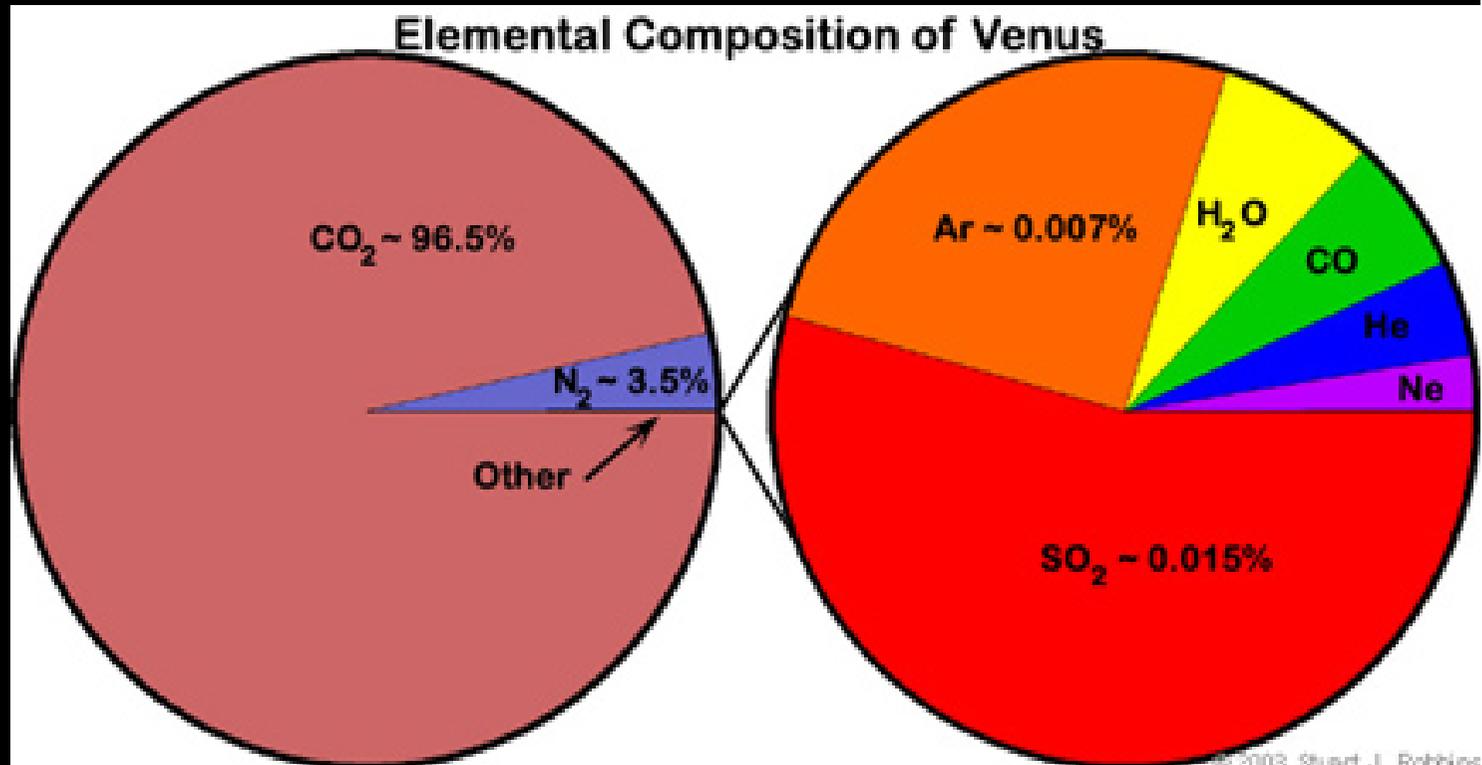
Ar : 0.007%

H₂O : 0.002%

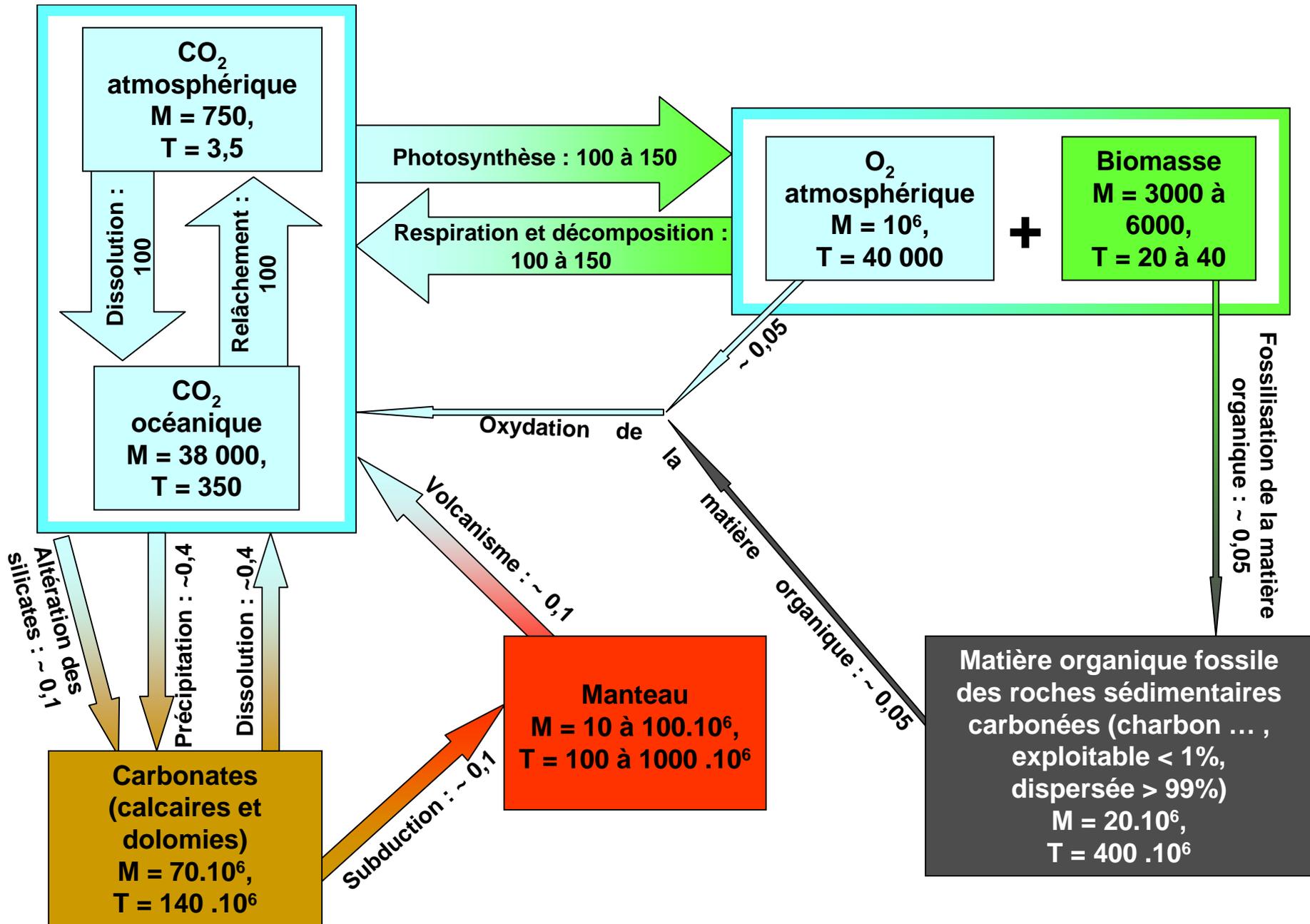
CO : 0.0017%

He : 0.0012%

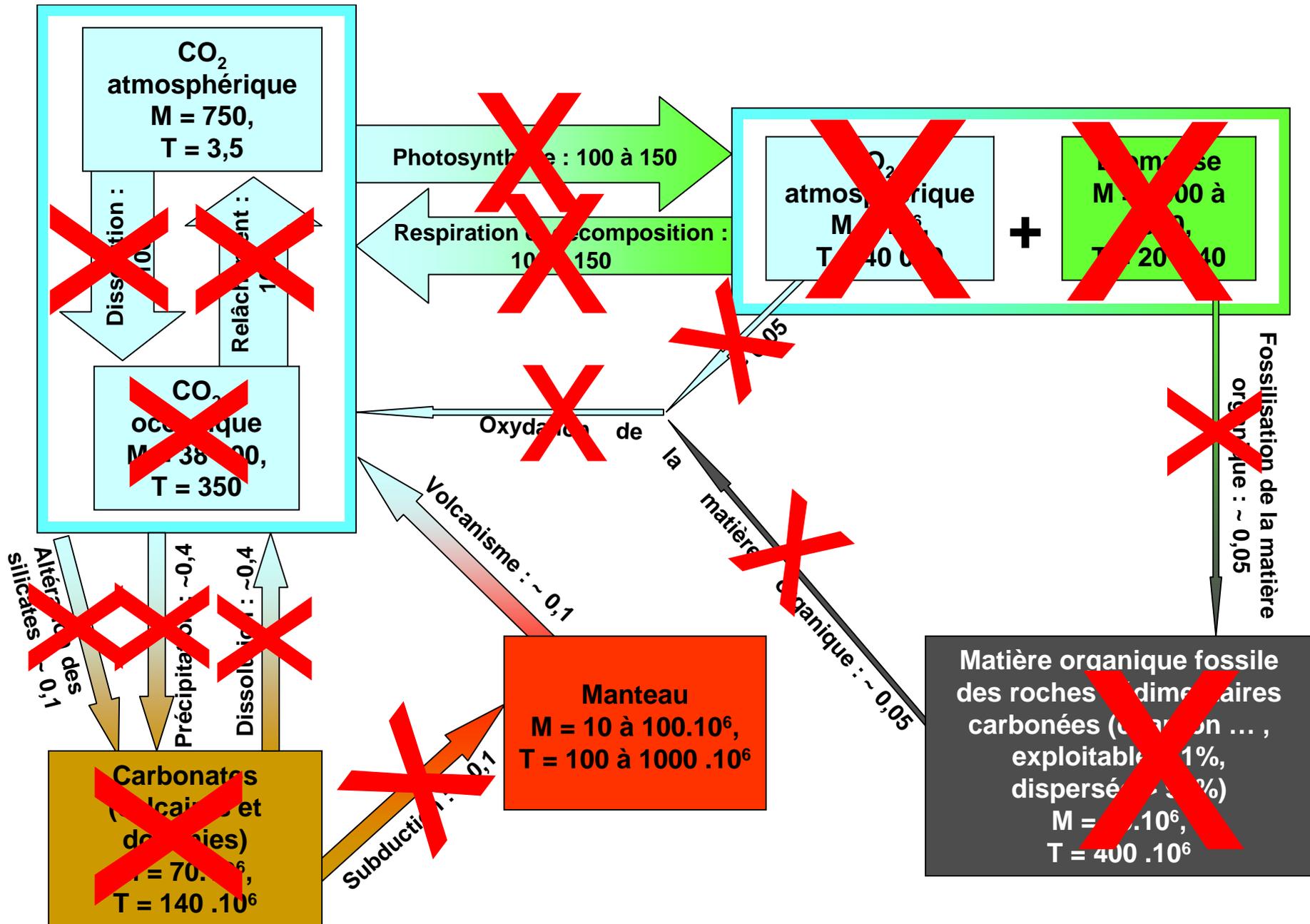
Ne : 0.0007%



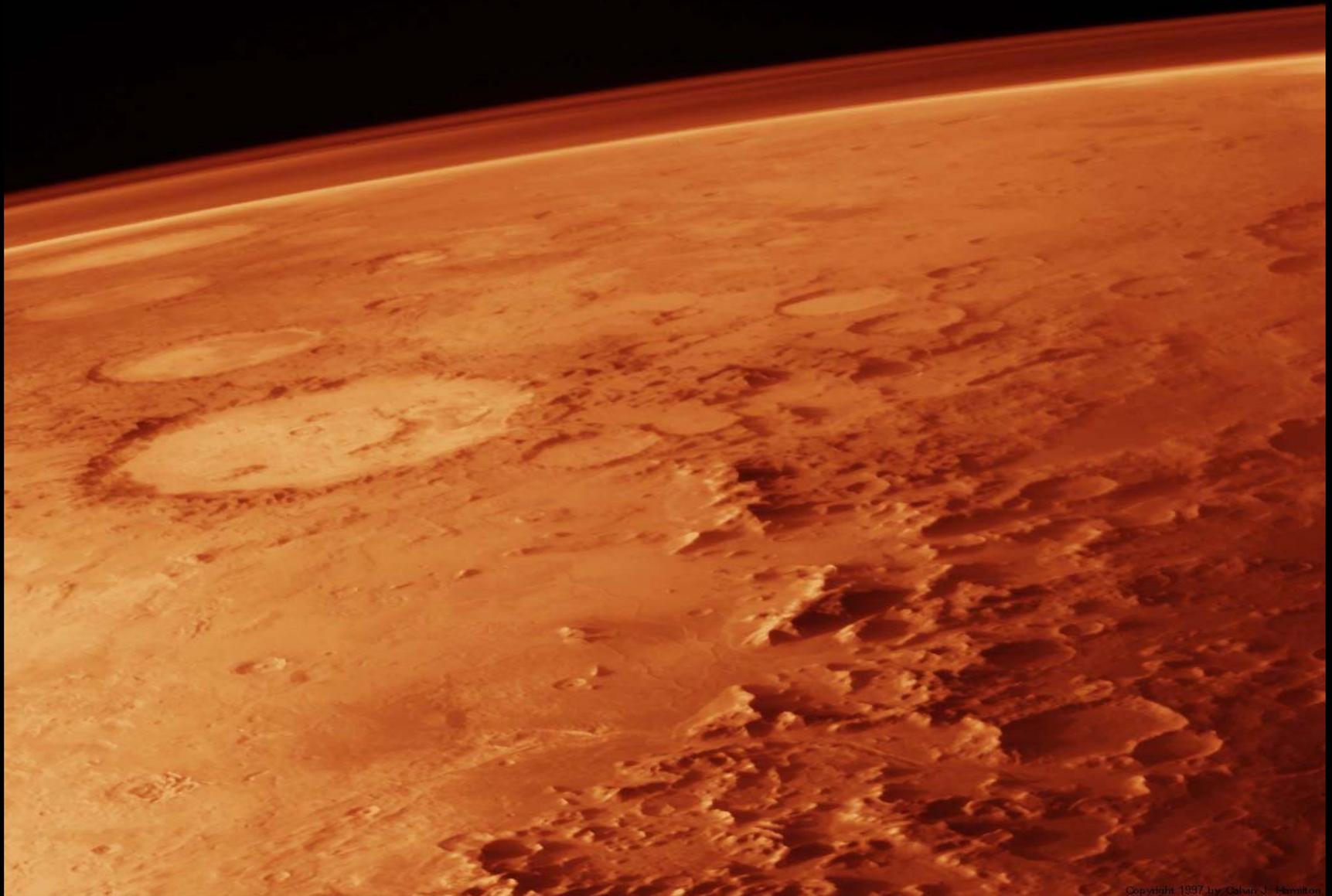
Sur Vénus, il y a 200 000 fois plus de CO₂ gazeux que sur Terre. Si tout ce gaz carbonique était « liquéfié » et recouvrirait Vénus d'une couche uniforme, cela ferait un « océan carbonique » d'environ 900 m de profondeur.



**Je rappelle le cycle du carbone hyper-simplifié pour la Terre.
Pour Vénus, c'est très simple ...**

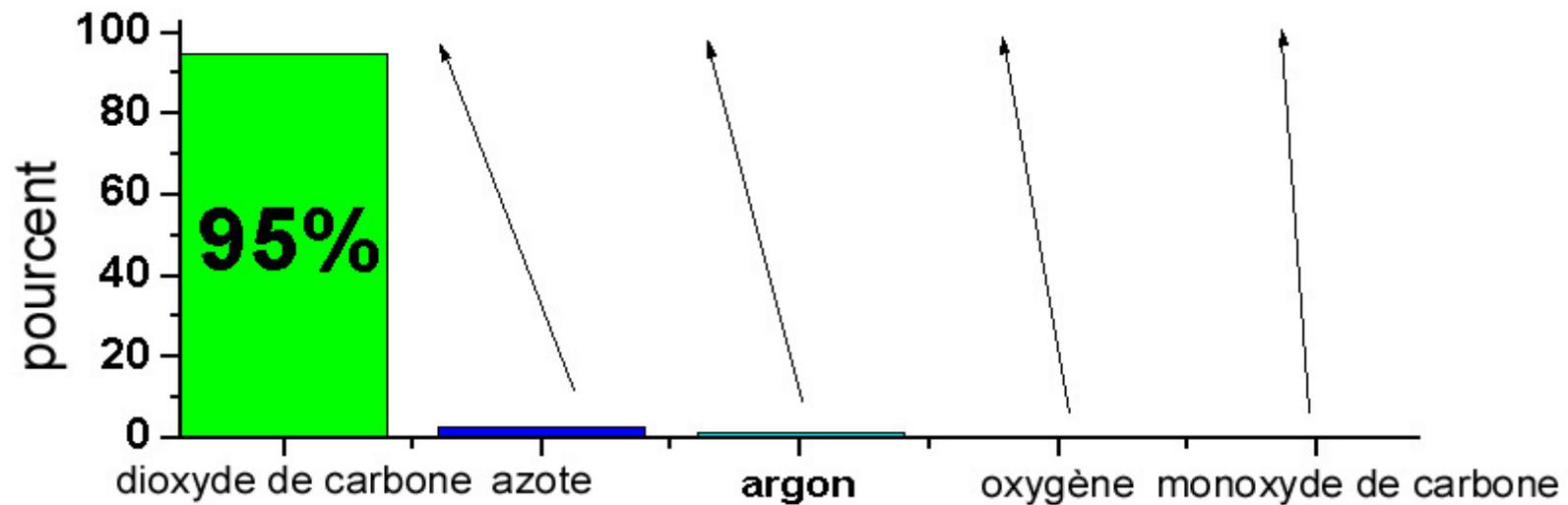
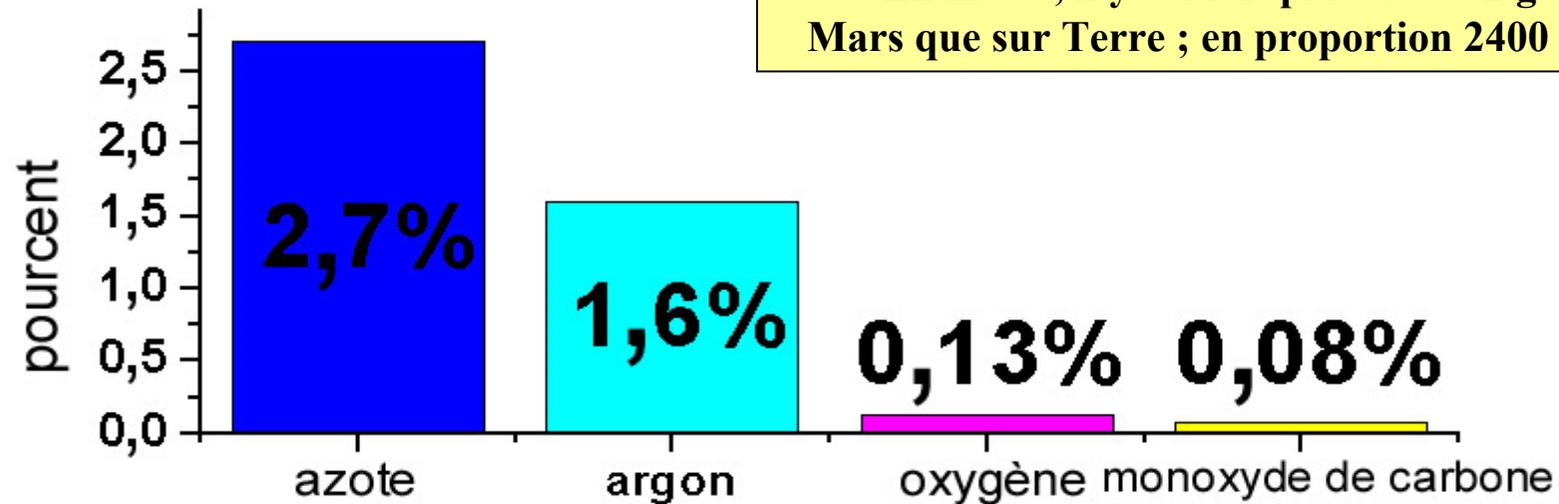


... il n'y a que 2 réservoirs (atmosphère et manteau), avec une flèche à sens unique. Pas étonnant que le CO₂ soit haut !



Sur Mars, une atmosphère très ténue :
 $P = 6 \text{ hPa}$ (Terre = 1013 hPa)

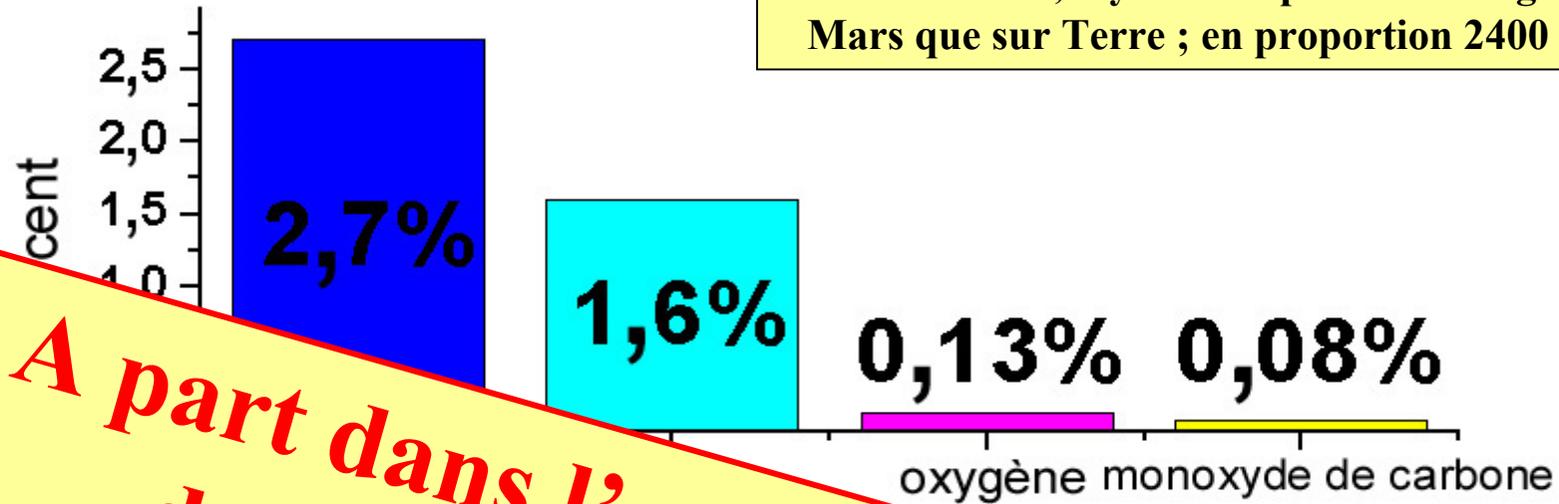
En masse, il y a 4 fois plus de CO₂ gazeux sur Mars que sur Terre ; en proportion 2400 fois plus



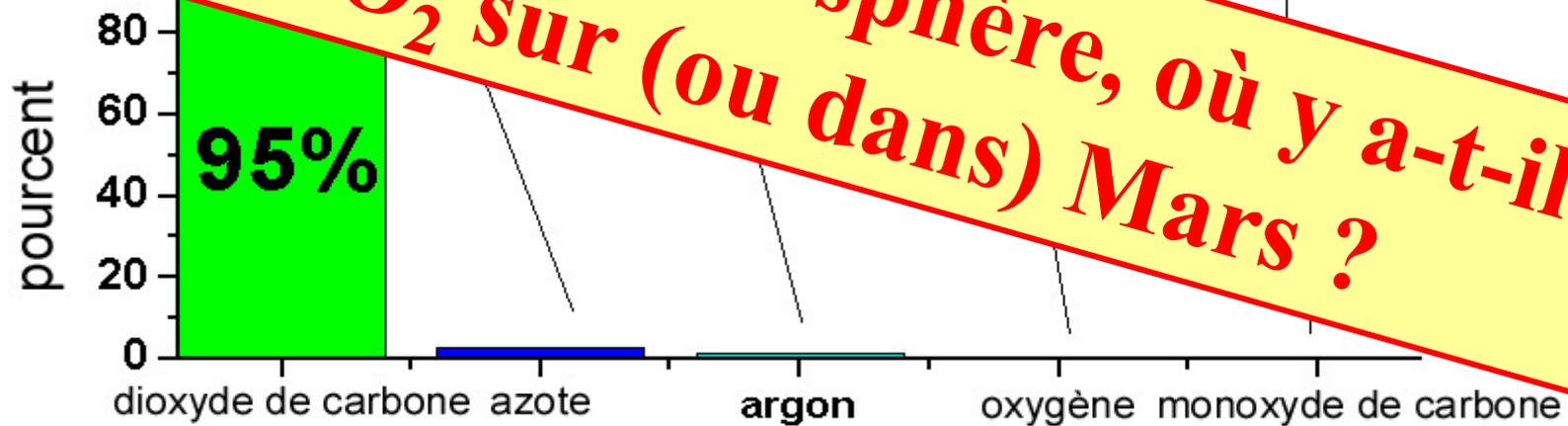
Gaz atmosphériques

**Atmosphère ténue (6 hPa), principalement faite de CO₂.
Il y a donc un faible effet de serre.**

En masse, il y a 4 fois plus de CO₂ gazeux sur Mars que sur Terre ; en proportion 2400 fois plus

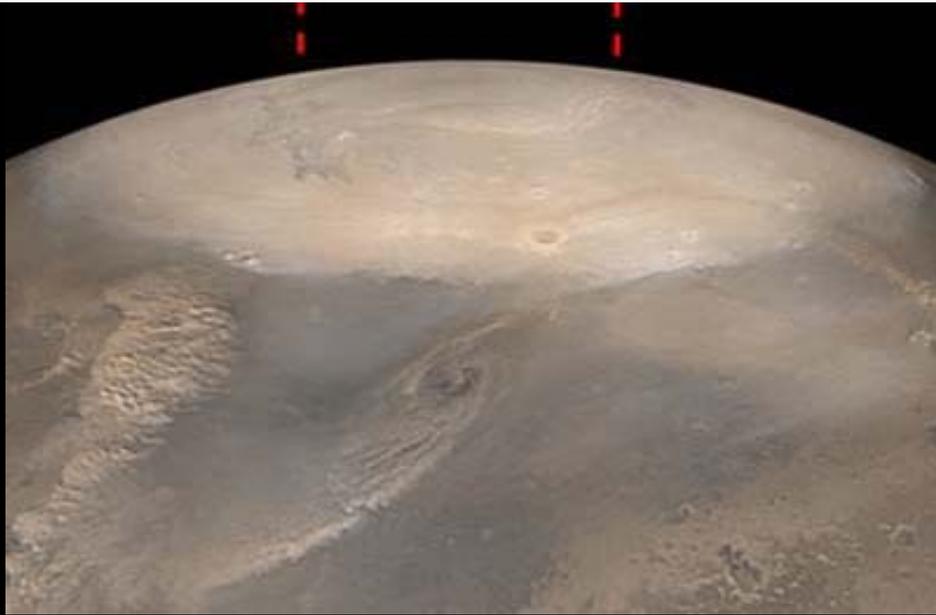


A part dans l'atmosphère, où y a-t-il du CO₂ sur (ou dans) Mars ?



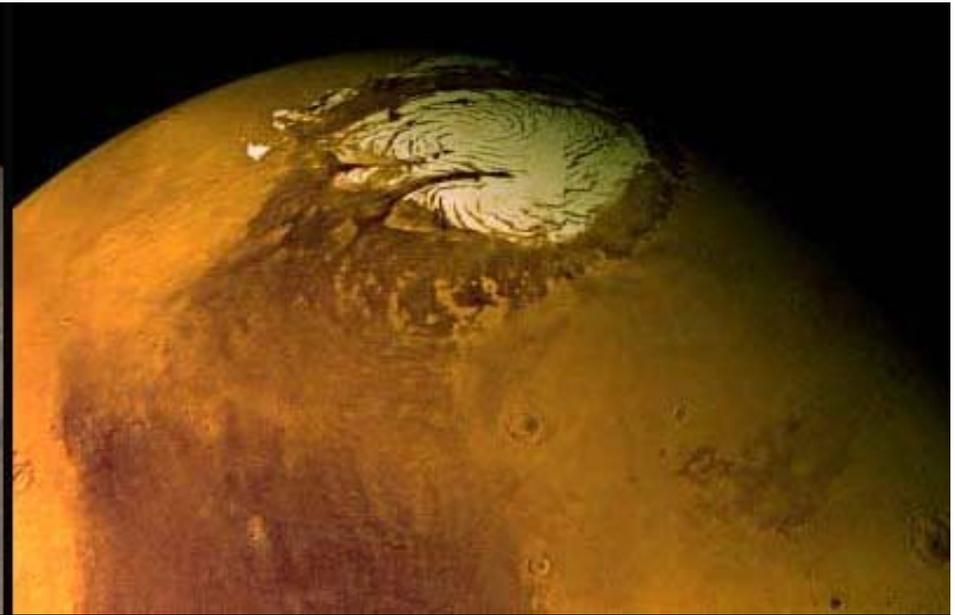
Gaz atmosphériques

**Atmosphère ténue (6 hPa), principalement faite de CO₂.
Il y a donc un faible effet de serre.**



La calotte nord l'hiver

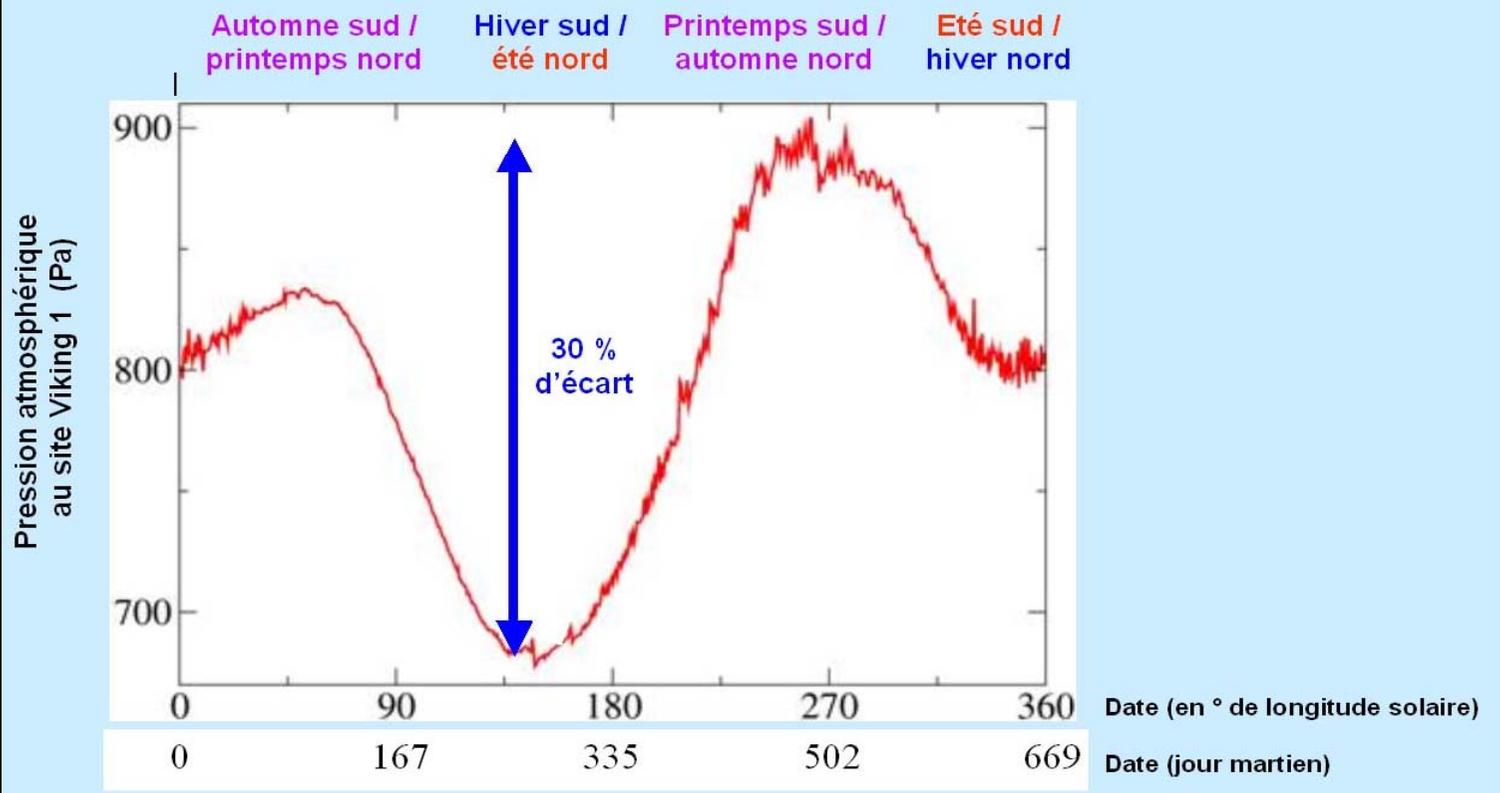
D = 3000 km



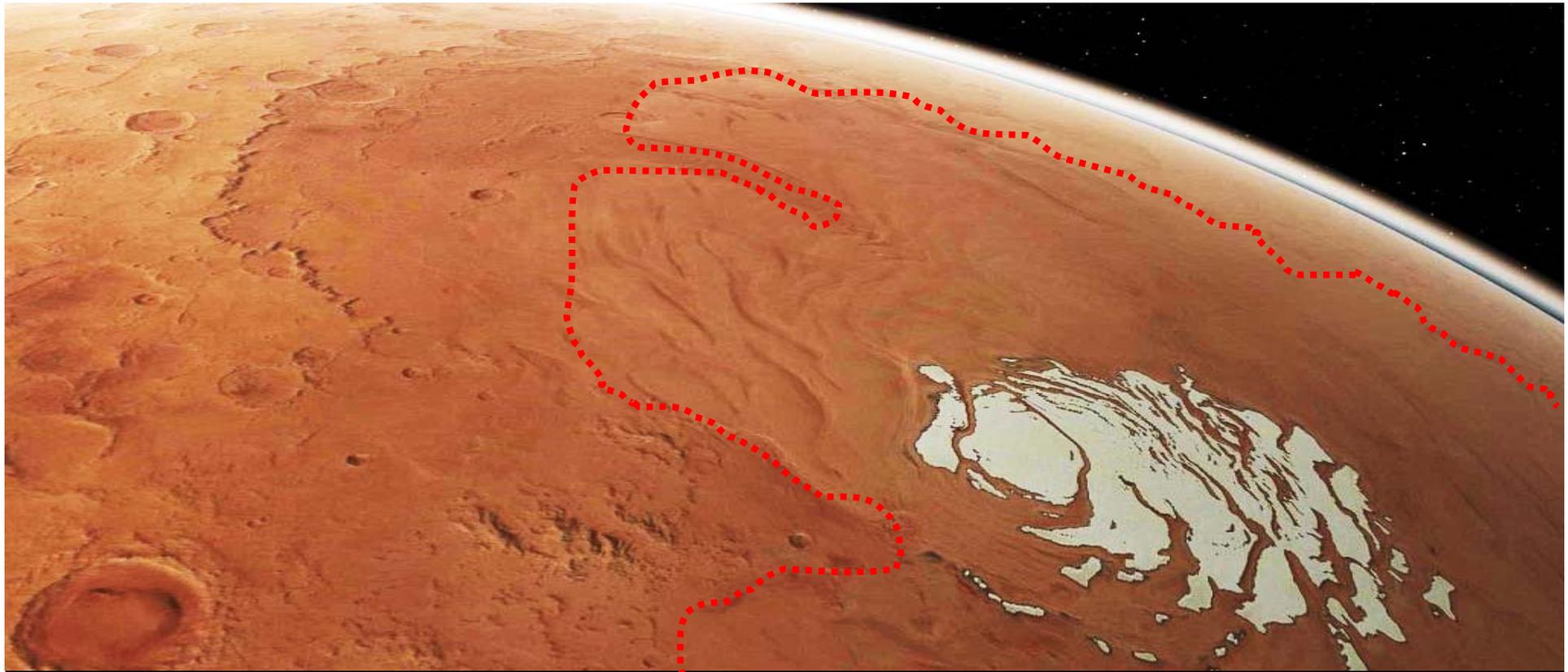
La calotte nord l'été

D = 1000 km

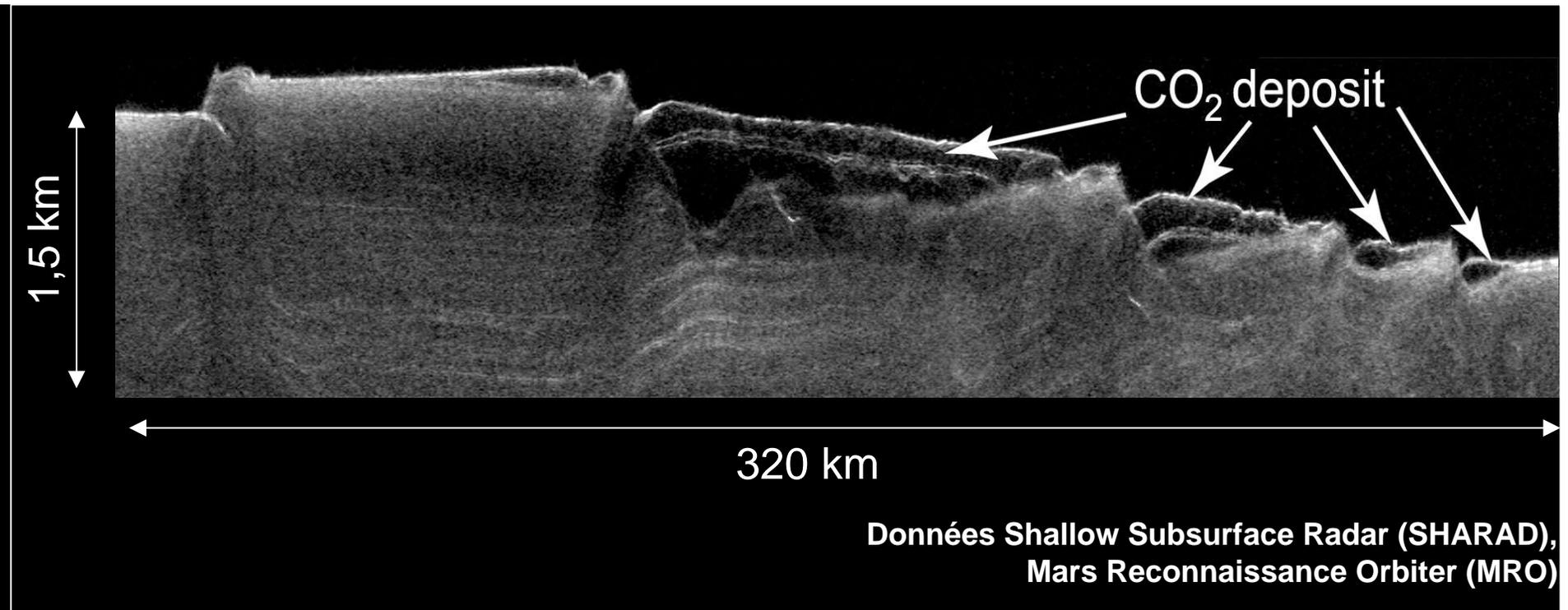
A droite, la calotte résiduelle nord. Elle est constituée de 3000 m de glace d'H₂O relativement pure dans l'hémisphère nord (très sale dans l'hémisphère sud). L'hiver, toute la région polaire se couvre d'environ 1 m de glace de CO₂ : la calotte transitoire. Au printemps, la calotte transitoire se sublime et le CO₂ passe dans l'atmosphère. En automne, du CO₂ atmosphérique se condense et redevient glace. La situation est opposée dans l'hémisphère sud.



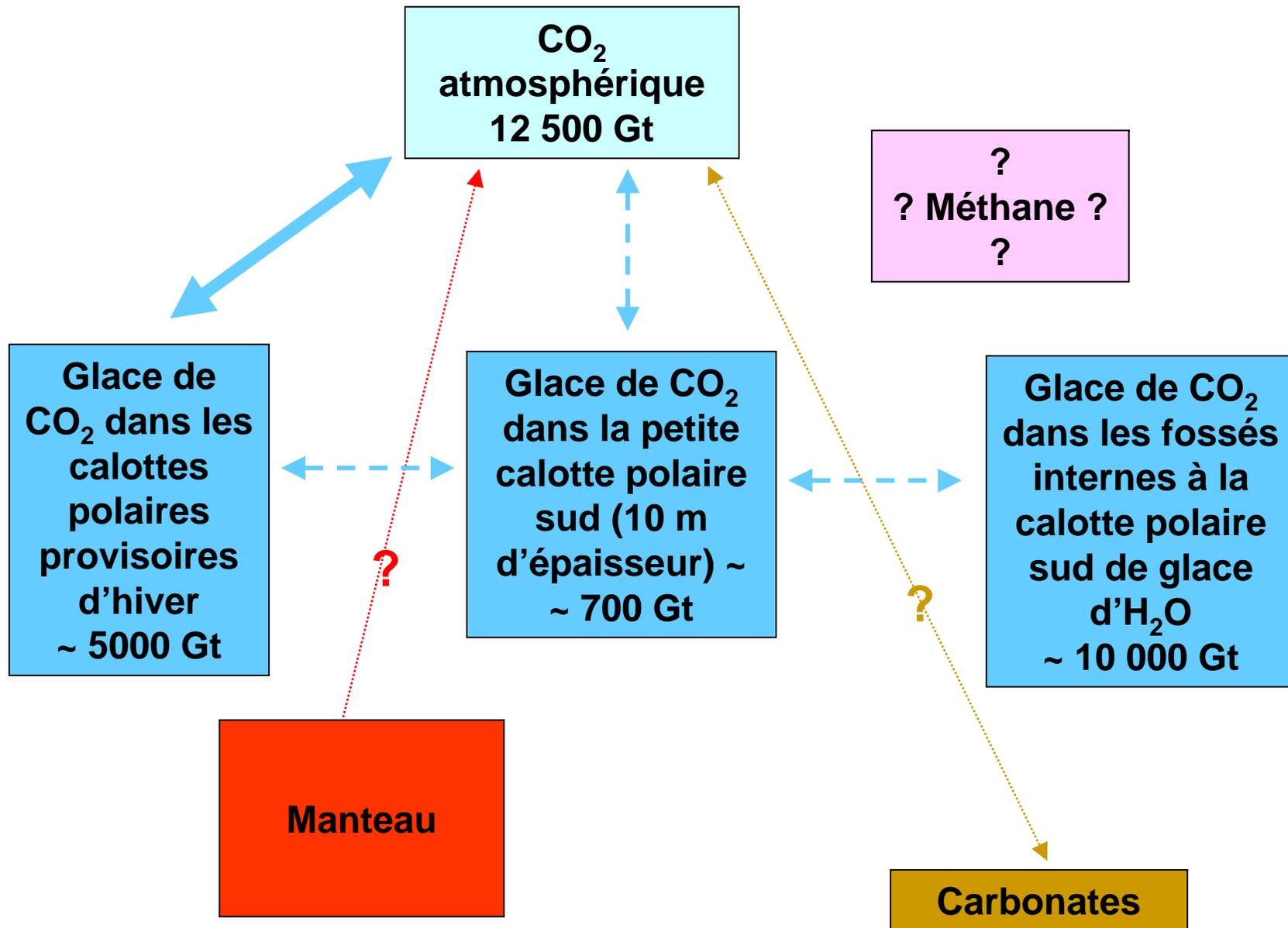
Les températures polaires d'hiver permettent l'existence de glace carbonique, principal constituant de l'atmosphère. Les variations saisonnières de la pression atmosphérique montrent que de 15 à 30% du CO₂ atmosphérique se condensent l'hiver et se subliment au printemps, sauf sur un petit cercle au niveau du pôle sud (la calotte résiduelle sud) où quelques mètres de glace de CO₂ résistent à l'été. En divisant la masse de CO₂ mise en jeu par la surface des calottes transitoires et par la masse volumique de la glace carbonique, on trouve 1m d'épaisseur pour les couches hivernales transitoires de glace carbonique



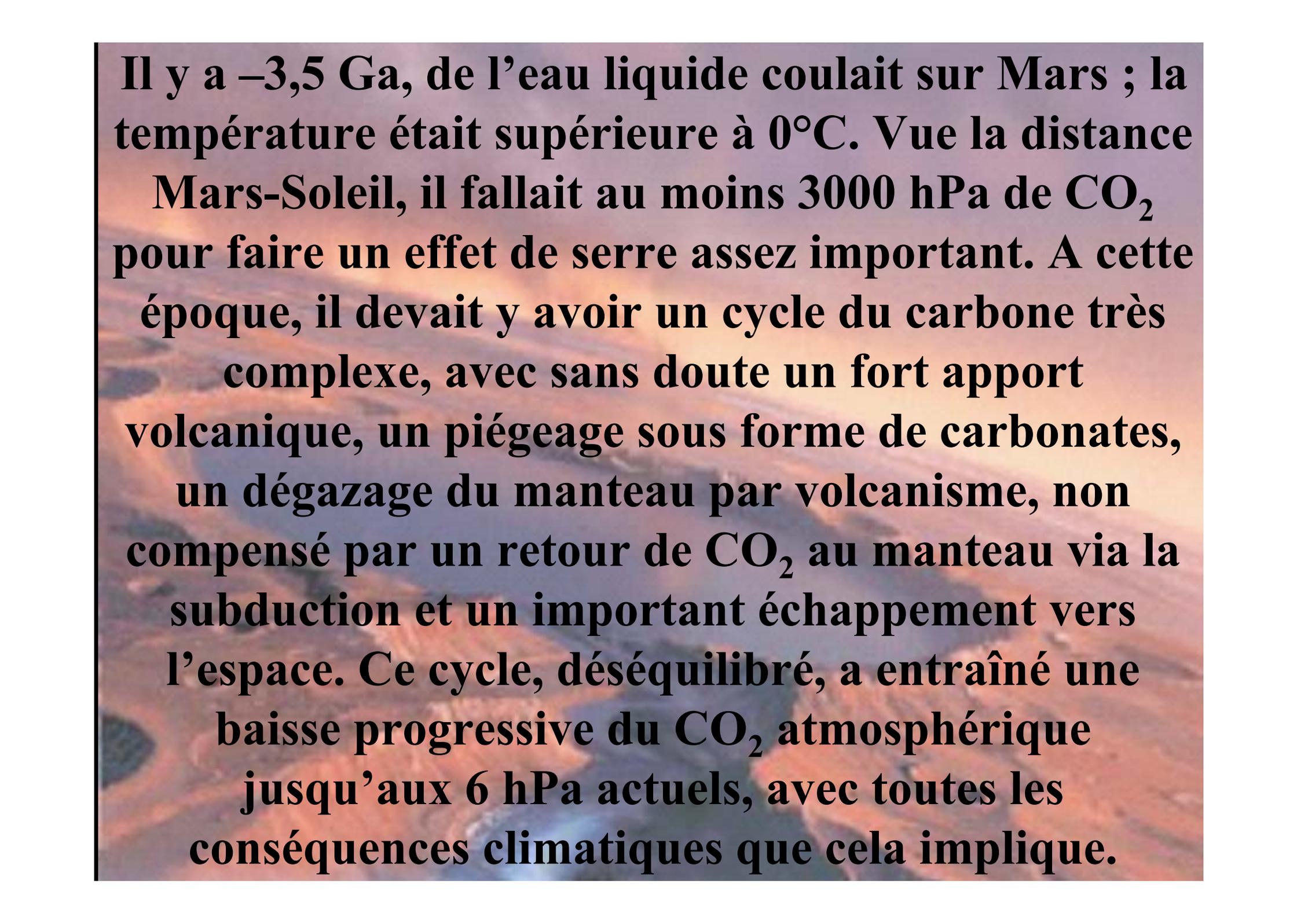
La petite (300 km de diamètre) calotte résiduelle de glace de CO₂ du pôle sud, très blanche. Elle est constituée de ~10 m de glace carbonique. Cette calotte résiduelle de CO₂ est posée sur une calotte permanente de glace d'H₂O, très difficile à voir car constituée de glace très poussiéreuse, contrairement à la calotte permanente nord (limite approximative figurée avec des pointillés rouge).



Dans des dépressions de la calotte permanente sud de glace d'H₂O (gris clair, avec couches visibles), mais sous la mince calotte résiduelle de CO₂ (trop mince pour être visible), le « Shallow Subsurface Radar » de MRO a trouvé des dépôts de glace carbonique (noir) pouvant avoir jusqu'à 600 m d'épaisseur. Ces dépôts ont une masse d'environ 10 000 Gt (même ordre de grandeur que le CO₂ atmosphérique).



Les réservoirs et le cycle actuel du carbone sur Mars



Il y a –3,5 Ga, de l'eau liquide coulait sur Mars ; la température était supérieure à 0°C. Vue la distance Mars-Soleil, il fallait au moins 3000 hPa de CO₂ pour faire un effet de serre assez important. A cette époque, il devait y avoir un cycle du carbone très complexe, avec sans doute un fort apport volcanique, un piégeage sous forme de carbonates, un dégazage du manteau par volcanisme, non compensé par un retour de CO₂ au manteau via la subduction et un important échappement vers l'espace. Ce cycle, déséquilibré, a entraîné une baisse progressive du CO₂ atmosphérique jusqu'aux 6 hPa actuels, avec toutes les conséquences climatiques que cela implique.