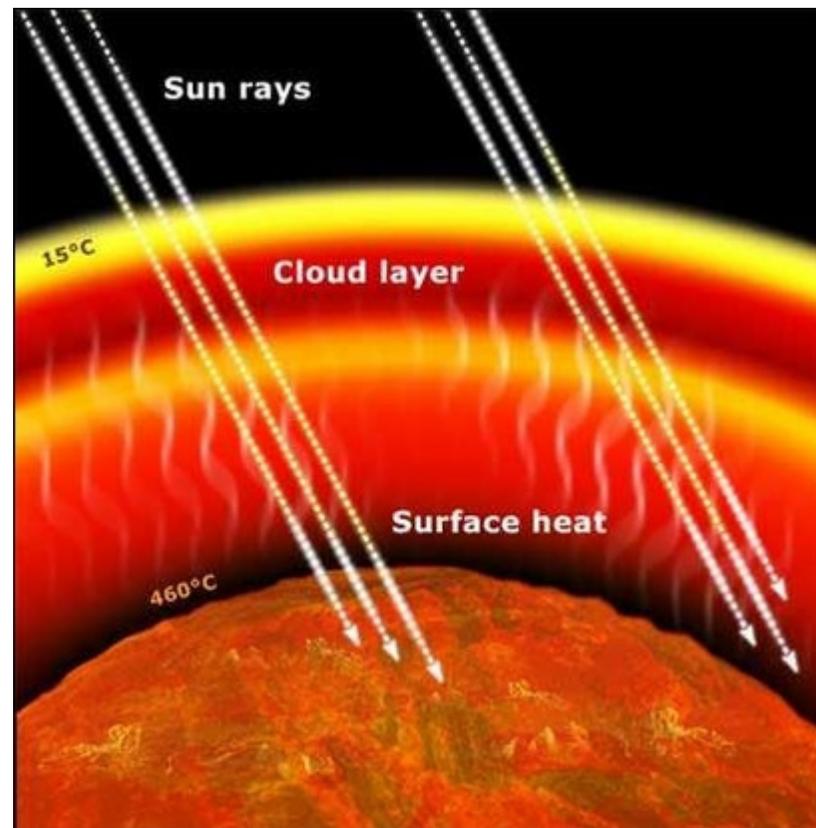
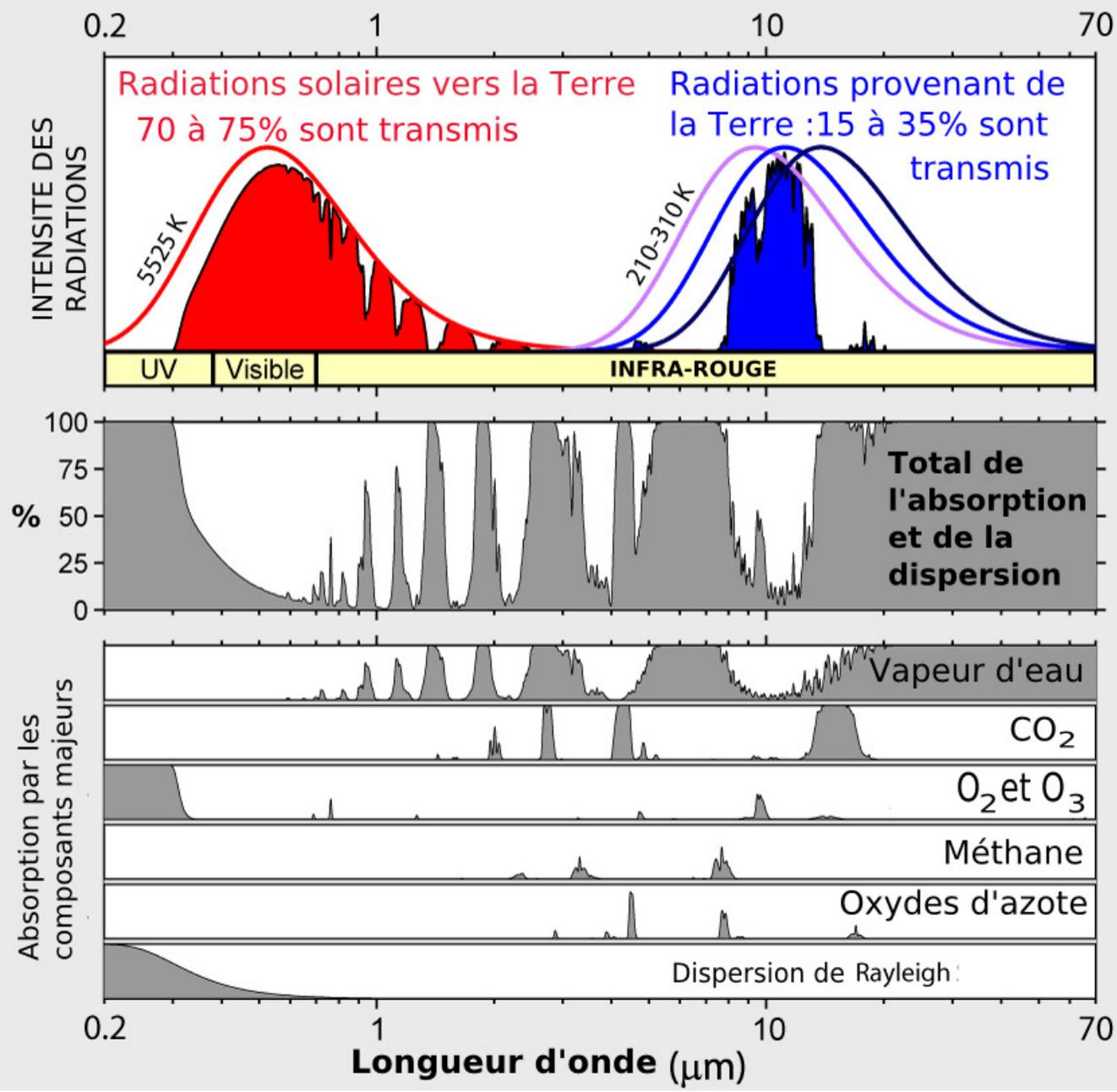


Effet de serre sur Vénus, Mars et la Terre



Rayonnement transmis par l'atmosphère



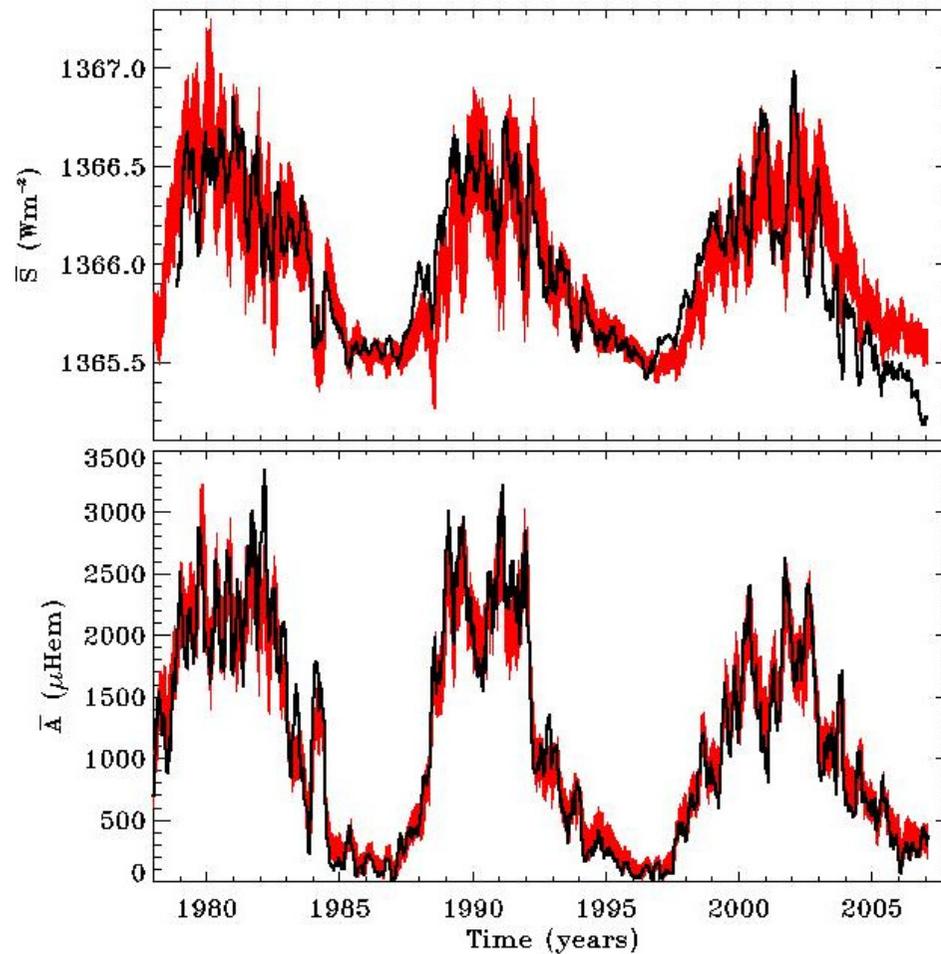
Contributions approximatives à l'effet de serre des principaux gaz :

- vapeur d'eau : 55 %
- dioxyde de carbone : 39 %
- ozone : 2 %
- méthane : 2 %
- oxyde nitreux : 2 %

Constante (irradiance) solaire à la Terre

$$F_S = \sigma T_S^4 = 6.45 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2 \text{ (corps noir à } T_S = 5780 \text{ K)}$$

$$\text{A la Terre : } F_T = F_S (R_S/R_T)^2 = 1367 \text{ W/m}^2$$



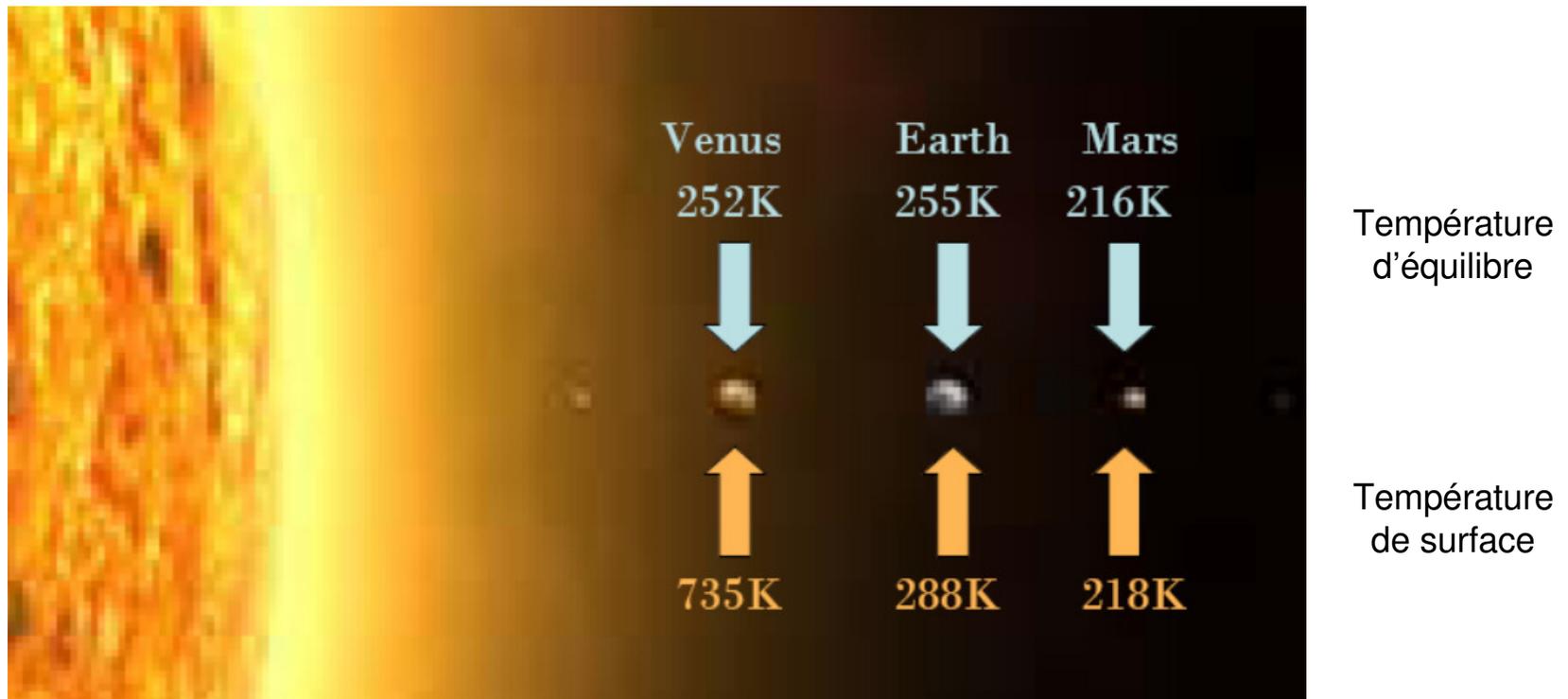
« Total Solar Irradiance »

Couverture surfacique
des taches solaires

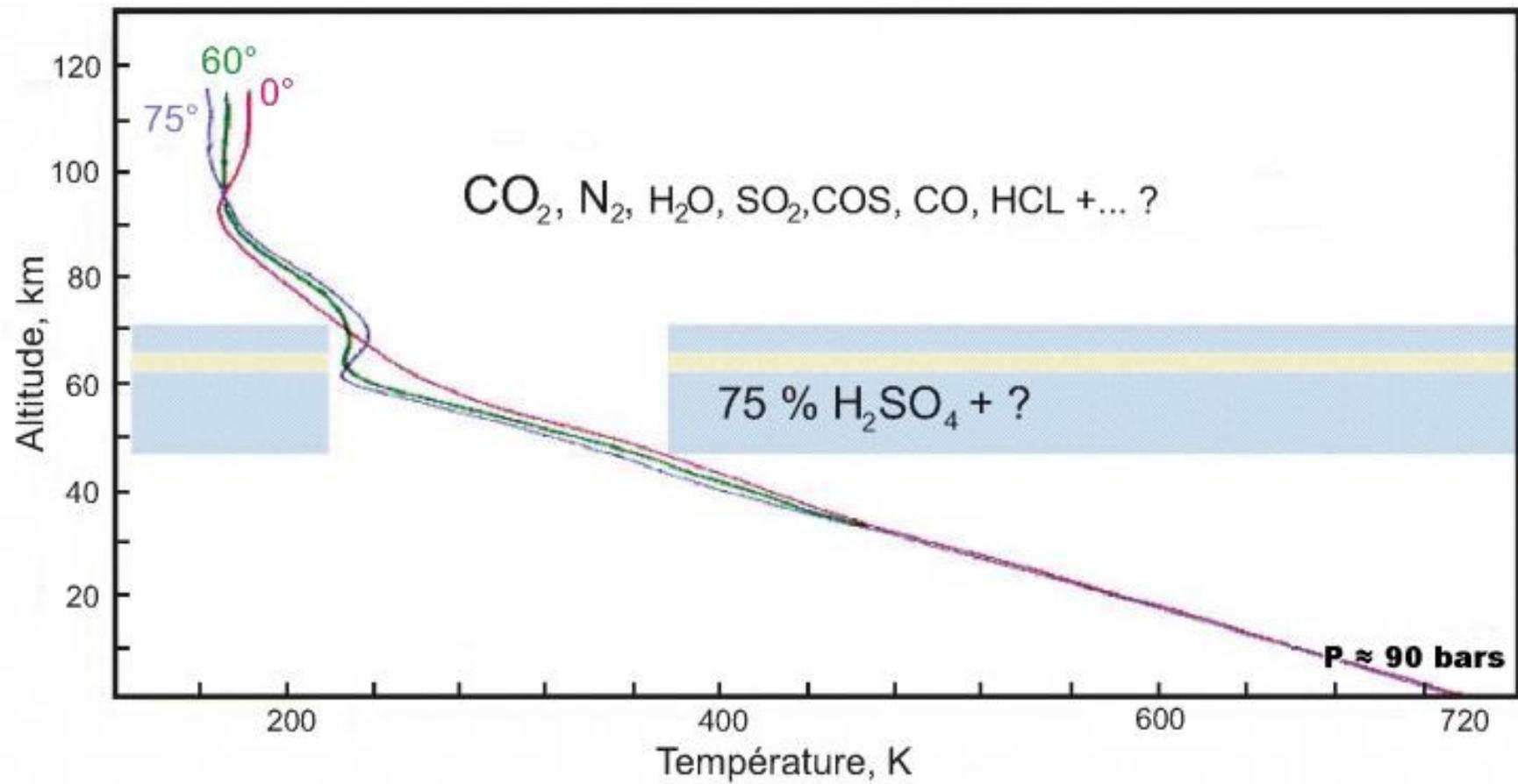
Importance de l'effet de serre

Température d'équilibre (en l'absence d'effet de serre)

$$4\pi R^2 \sigma T_{\text{eq}}^4 = \pi R^2 (1-A) F_{\text{T}} \rightarrow T_{\text{eq}} = 255 \text{ K soit } -18^\circ \text{ C}$$



Profil de température à Vénus



flux absorbé par la Terre = flux émis par la Terre

$$\sigma T_{\text{eq}}^4 = (1 - A_b) / 4 \times S / D^2$$

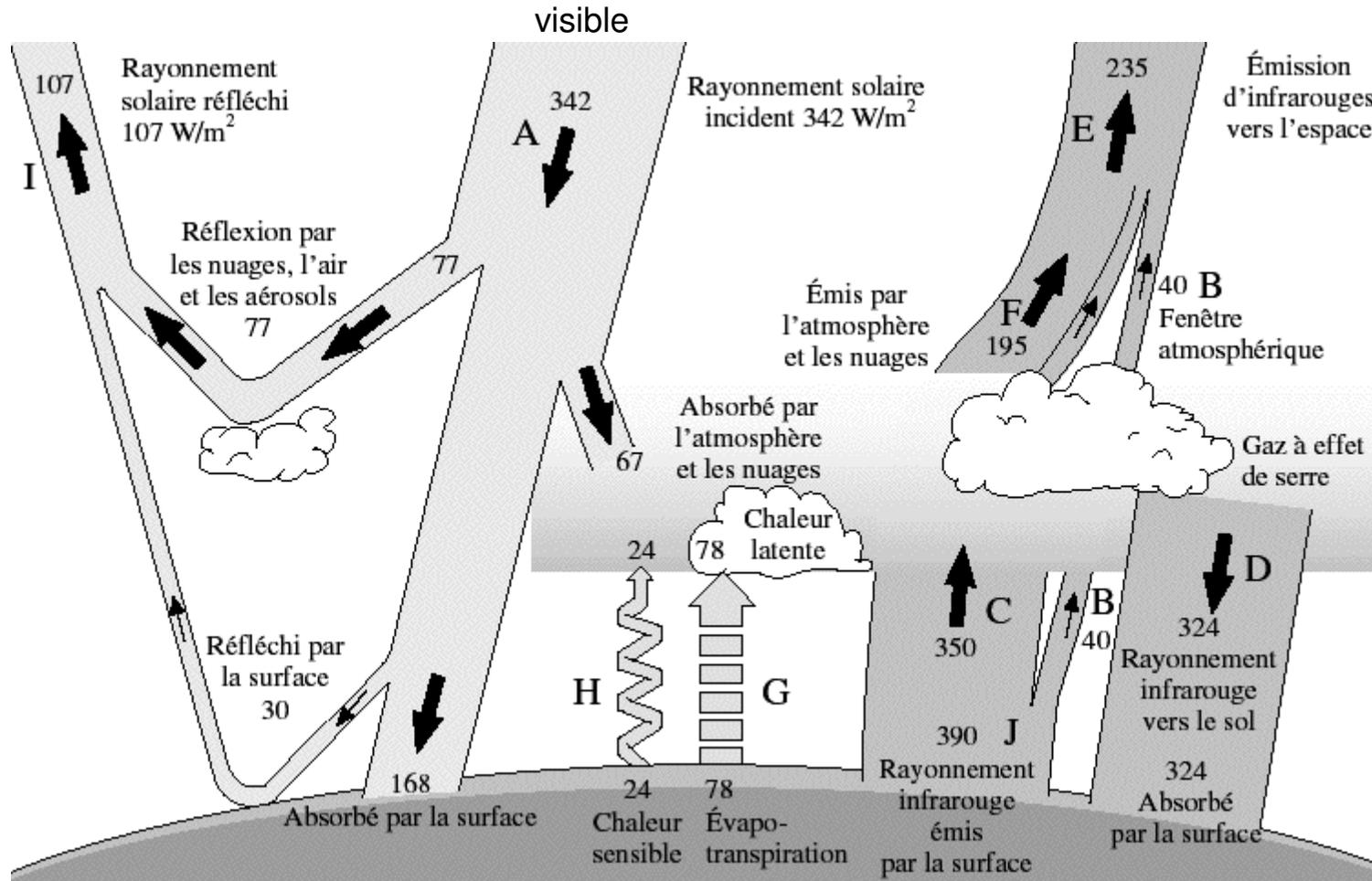
$A_b=0.3$: *l'albédo est le rapport de l'énergie solaire réfléchié par une surface sur l'énergie solaire incidente*

$S=1367 \text{ W/m}^2$ (constante solaire)

D : distance au soleil en UA

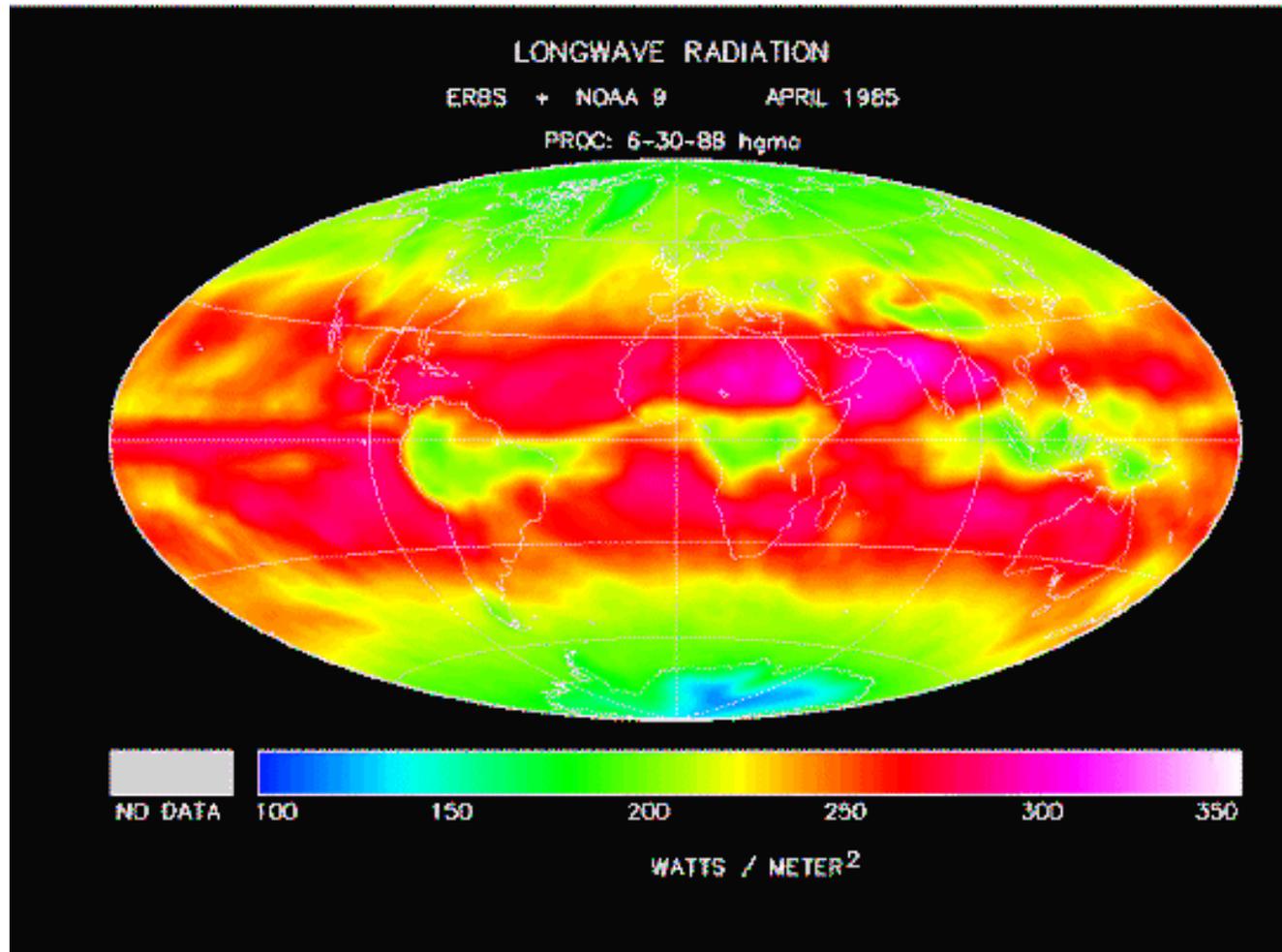
- rayonnement absorbé par la Terre = **$\sim 235 \text{ W/m}^2$**
- rayonnement absorbé par Vénus = $\sim 200 \text{ W/m}^2$ ($D=0.7$, $A_b=0.7$)
- rayonnement absorbé par Mars = $\sim 110 \text{ W/m}^2$ ($D=1.5$, $A_b=0.25$)

Bilan radiatif



$$A - I = E = 235 \text{ W/m}^2 = \sigma T_{eq}^4 \text{ (prise en compte de l'albédo)}$$

$$168 + 324 = 24 + 78 + 390$$



Rayonnement terrestre infra-rouge des nuages, de l'atmosphère, et du sol (NASA's [Earth Radiation Budget Experiment \(ERBE\)](#), avril 1985)

Rappels théoriques

- approximation grise (processus indépendants de la fréquence)
- approximation d'Eddington (atmosphère plan parallèle + dépendance en $\cos \theta$)

$$T_s = T_e (1 + 3/4\tau)^{1/4}$$

τ : profondeur optique totale (niveau du sol)

Expression pour T_s proche de celle obtenue avec notre modèle « simple »

La profondeur optique dépend de la pression de surface (cf expression du TD)

→ pour une planète donnée (en fait pour une température d'équilibre donnée qui dépend de la position de la planète par rapport au Soleil et de l'albédo planétaire) on peut donc tracer **l'évolution de l'atmosphère dans le plan (p, T_s)**

The Runaway Greenhouse and the Accumulation of CO₂ in the Venus Atmosphere

by
S. I. RASOOL
C. DE BERGH
Institute for Space Studies,
Goddard Space Flight Center,
NASA, New York

Nature, 1970

Comparaison de l'effet de serre sur Vénus, Mars et la Terre

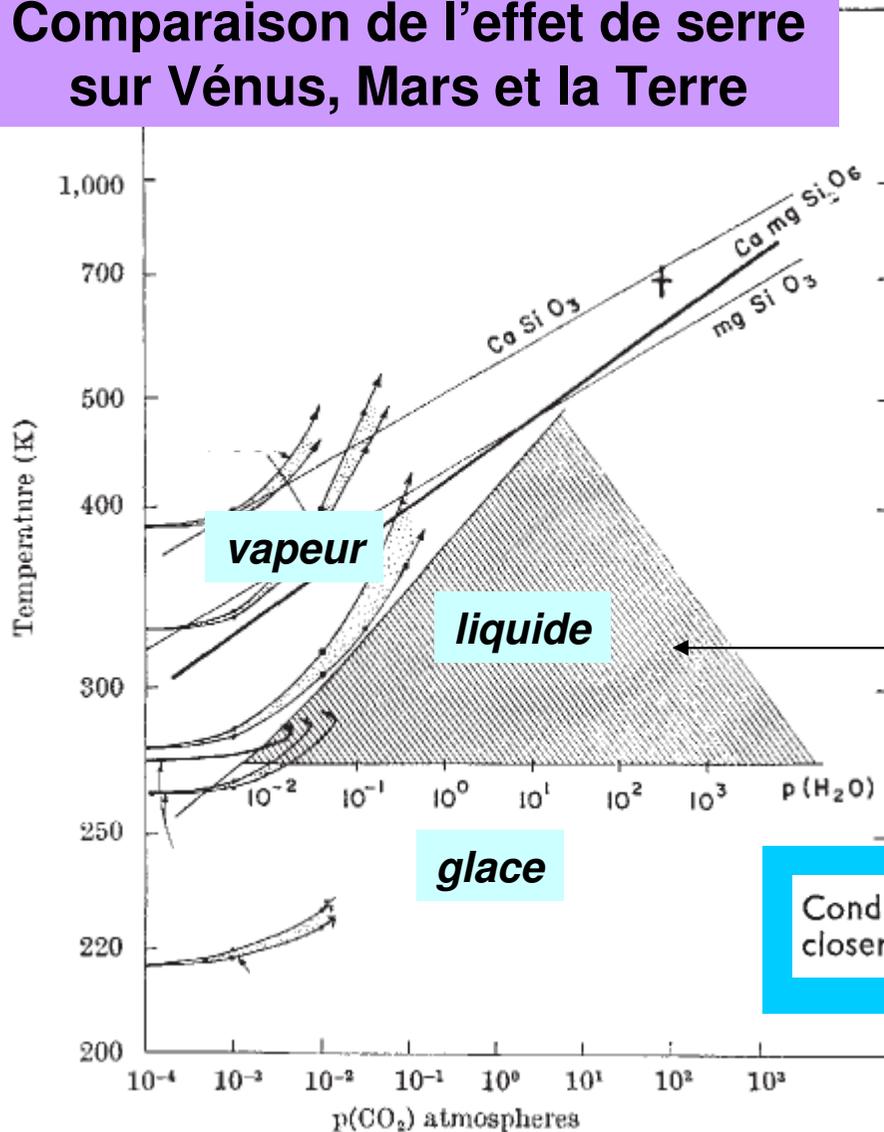


Fig. 1. Plot of increase in surface temperatures on Venus, Earth and Mars by the greenhouse effect of an H₂O-CO₂ atmosphere during the evolution of the three planets. The initial temperatures on these planets equal the effective temperature for a planetary albedo of 7 per cent, and two different rates of rotation in the case of Venus. In the case of the Earth, two values of the planetary albedo have been chosen (7 and 20 per cent). The phase diagram for water is shown and the region in which water can exist as liquid is represented by the hatched area. Also plotted are the equilibrium values for the partial pressures of CO₂ as a function of temperature for three different silicate reactions.

Diagramme de phase de l'eau

Conditions on Earth would be as hostile as on Venus if the Earth were closer to the Sun by only 6-10 million miles.

soit située entre 134 et 140 millions de km

Table 1. SURFACE PARAMETERS AND THE ABUNDANCES OF MAJOR VOLATILES ON VENUS, EARTH AND MARS

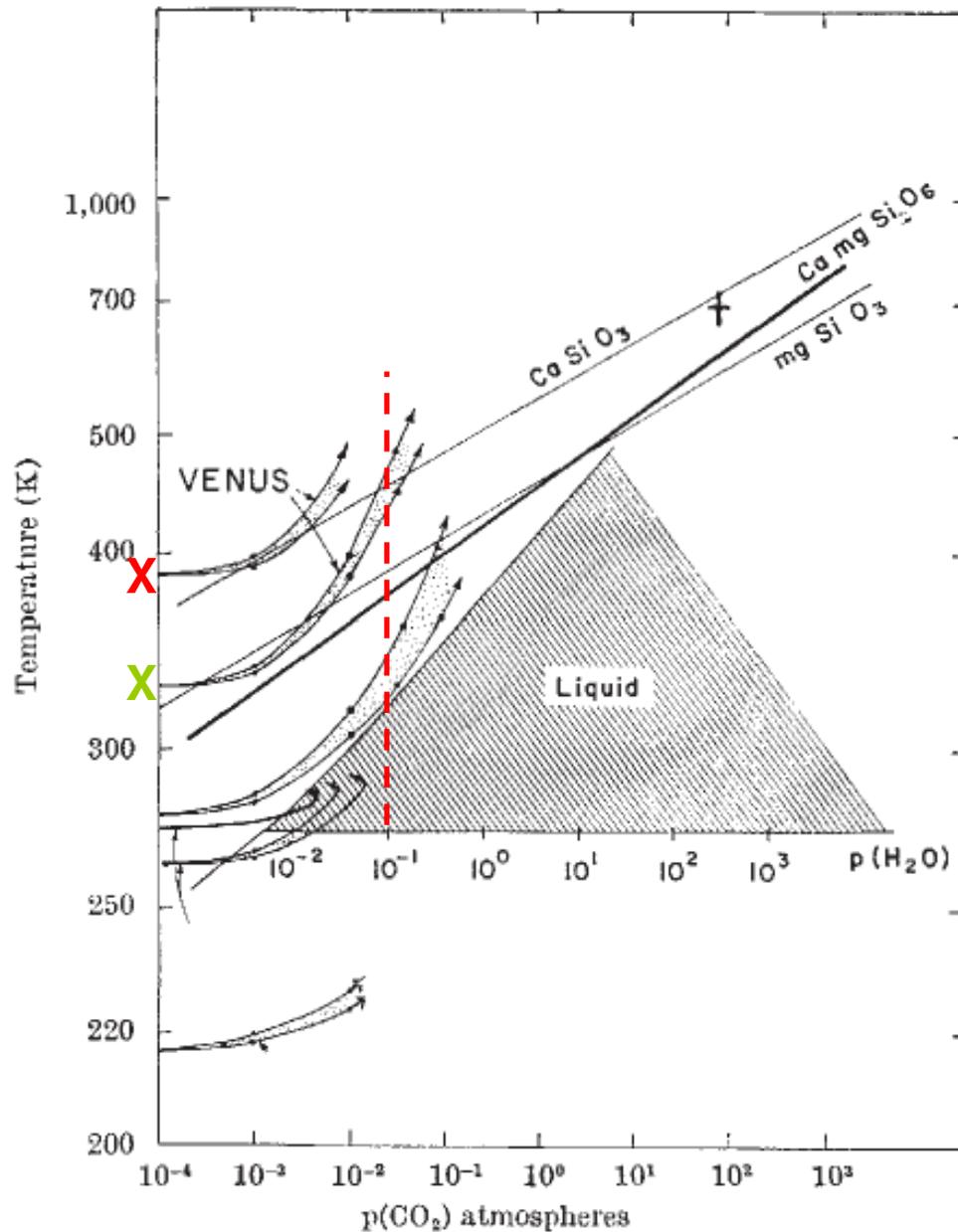
		Venus	Earth	Mars
Temperature		700 K	300 K	230 K
Pressure		75 atm.	1 atm.	0.01 atm.
Composition				
CO ₂	Atm.	70,000 g/cm ²	~ 1 g/cm ²	~ 70 g/cm ²
	Crust	?	70,000	?
N ₂	Atm.	< 3,000	800	< 1
	Crust	?	~ 2,000 ?	?
H ₂ O	Atm.	~ 100	~ 1	~ 0.01
	Oceans	0	300,000	?
O ₂	Atm.	< 10	200	~ 0.01
	Crust	?	8 × 10 ⁶ Total	?

The amount of CO₂ shown for Mars includes ~ 50 g cm⁻² believed to be present as solid CO₂ over the polar caps.

Hypothèses du modèle

1. À un certain moment dans l'histoire des planètes (Mercure, Vénus, la Terre et Mars), ces dernières perdent complètement leur atmosphère primitive
2. Les atmosphères actuelles se sont formées principalement par le dégazage des intérieurs planétaires (volcanisme)
3. Les constituants « dégazants » sont les mêmes sur les 3 planètes : vapeur d'eau, dioxyde de carbone, diazote

Évolution de l'atmosphère de Vénus



Albédo = 7%

$T_e=330\text{K}$ (rotation rapide, **cas 1**)

$T_e=390\text{K}$ (rotation lente, **cas 2**)

À $t=0$ le dégazage commence et la pression de CO_2 est très faible

L'atmosphère se forme et l'effet de serre augmente la température de surface (à albédo constant)

H_2O est sous forme de vapeur et accélère l'effet de serre

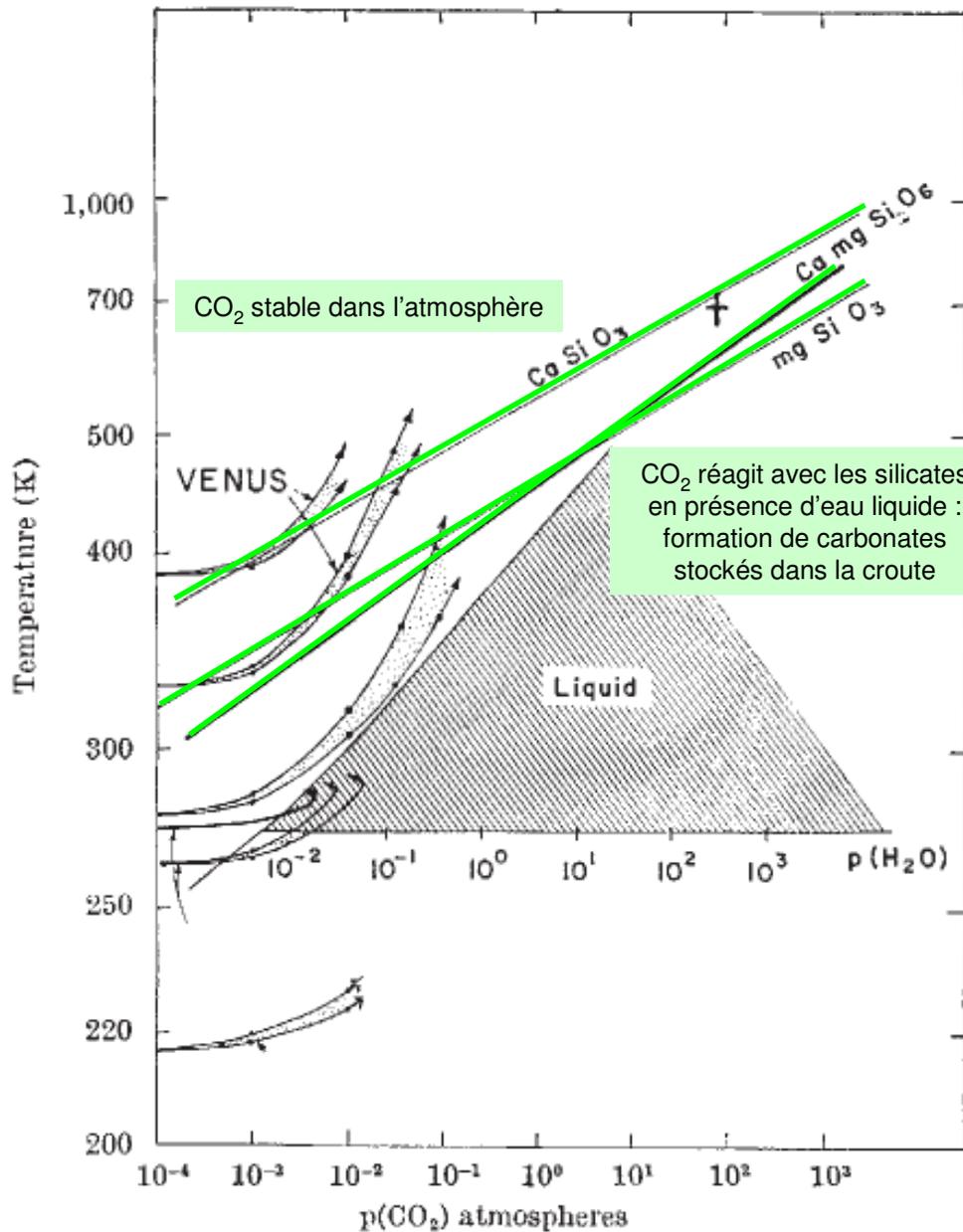
Pour une pression de 0.1 atmosphère, la condensation commence et permet la formation et la sustentation de nuages qui modifient l'albédo

À cette pression la température de surface de Vénus est de 430K (**cas 1**) ou $>500\text{K}$ (**cas 2**)

Ces températures sont au dessus du point d'ébullition à cette pression et donc hors du domaine d'existence de l'eau liquide.

Pas de pluie non plus qui pourrait capter le CO_2 .

Pour un albédo de 30 ou 40% au lieu de 7% l'eau ne condenserait toujours pas à la surface



Ces températures initiales élevées et l'absence d'eau liquide a une implication sur l'accumulation de CO₂

Lorsque le CO₂ dégaze de l'intérieur vers l'atmosphère sa pression partielle est limitée par des réactions chimiques avec la surface, notamment avec les silicates

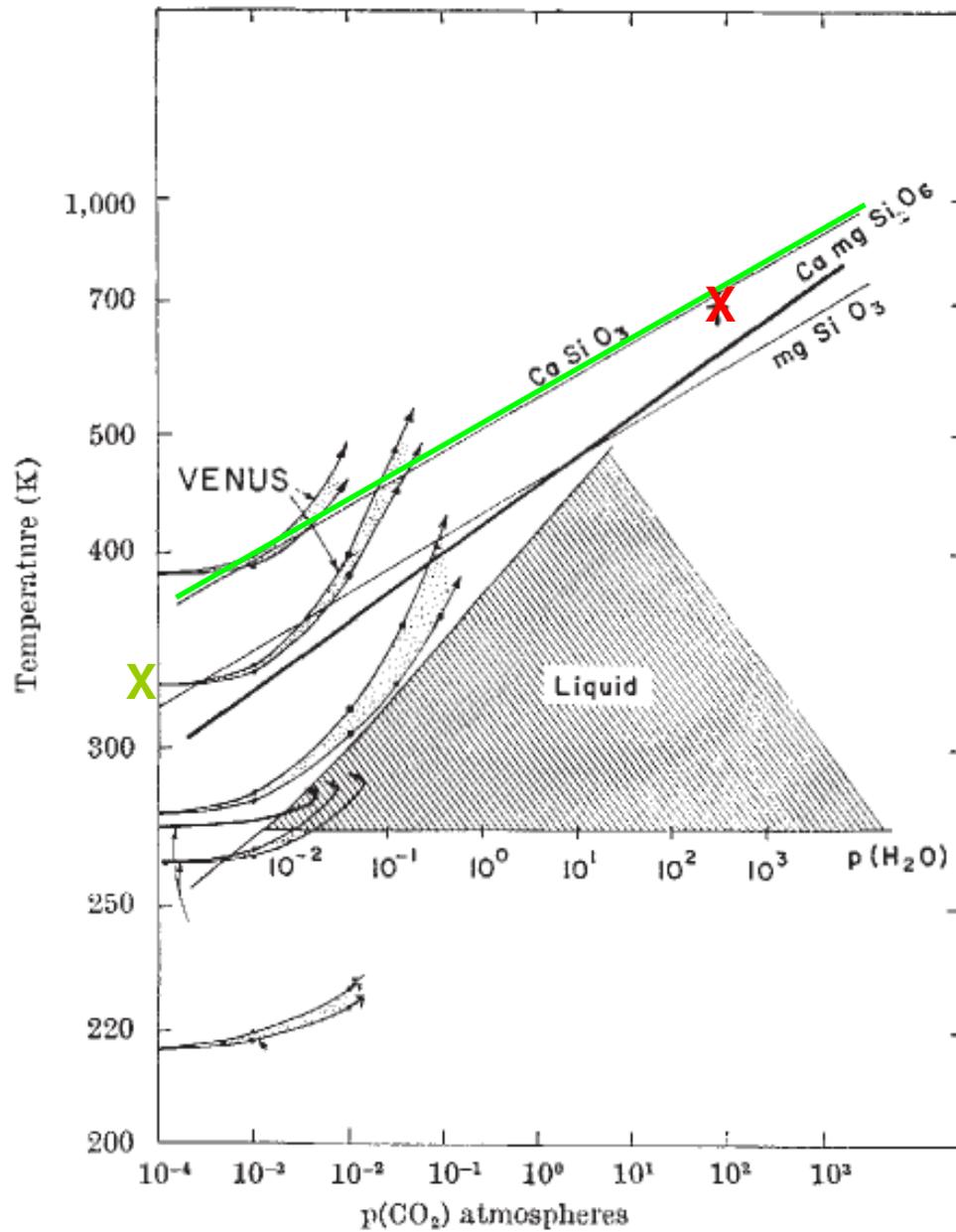
Par ex :



Selon la température, de grande quantité de CO₂ peuvent être stockées en équilibre avec les silicates.

La figure donne les pressions partielles de stabilité de CO₂ en fonction de la température de réaction avec les silicates. Si la pression de CO₂ devient plus grande que la valeur d'équilibre (droites sur la figure) à une température donnée, la situation est instable et le CO₂ est éliminé de l'atmosphère par déposition dans la croûte sous forme de carbonates. *Mais* cette réaction n'est rapide que s'il existe de l'eau liquide sur la surface pour faciliter le contact.

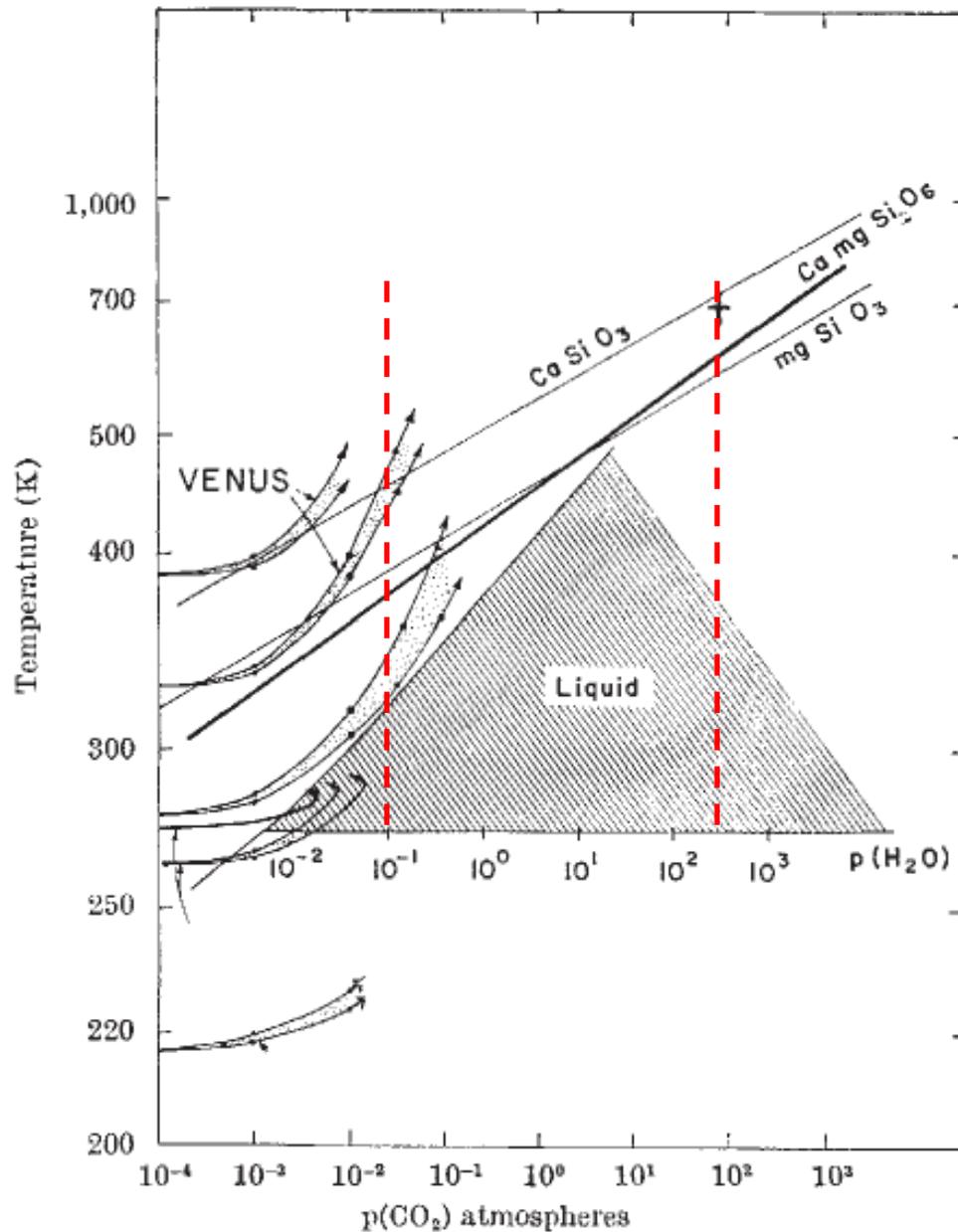
A Vénus la température est toujours suffisante pour que la pression de CO₂ ne dépasse pas la pression d'équilibre



Sauf dans le cas de la réaction avec CaSiO_3 pour le cas 1.

Dans ce cas l'absence d'eau liquide a empêché la réaction et le CO_2 s'est accumulé dans l'atmosphère, augmentant toujours l'effet de serre pour finalement arriver à la température d'équilibre actuelle avec CaSiO_3 , 700K, et une pression de 75 bar.

On suppose ici que l'albédo a augmenté suffisamment pour limiter la tendance croissante donnée par les flèches sur la figure.



Mais selon ce modèle l'atmosphère de Vénus devrait alors contenir de l'eau à 300 bars, alors qu'on en observe que 0.1 actuellement.

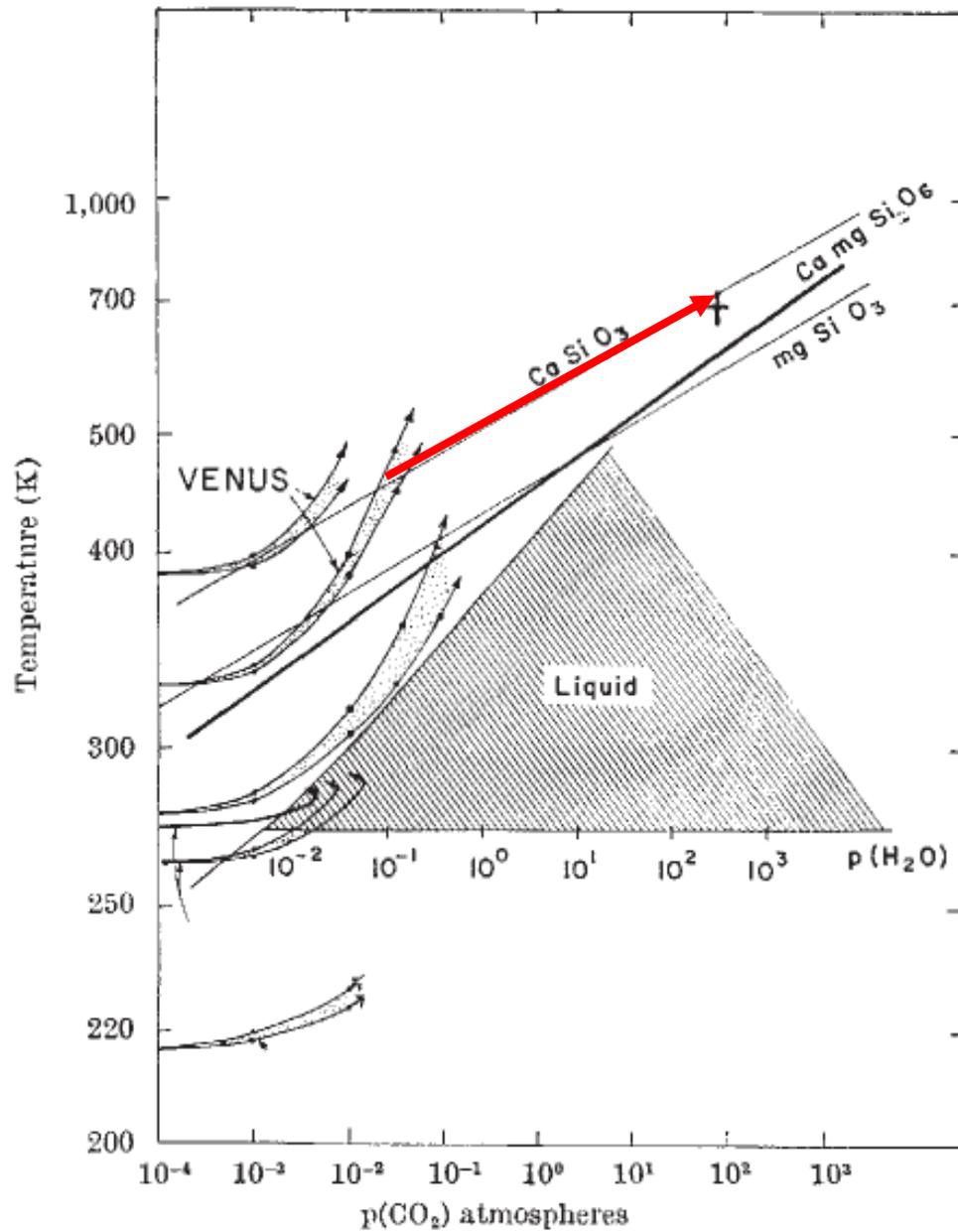
En fait la vapeur d'eau a été photo-dissociée par les UV solaires en hydrogène et oxygène.

L'oxygène, lourd, a été consommé par différents processus d'oxydation à la surface.

L'hydrogène, léger dans une atmosphère chaude, s'est échappé. En effet si l'eau vapeur existait majoritairement la température exosphérique, prise en compte dans les calculs d'échappement, serait >3000K et l'échappement de H rapide.

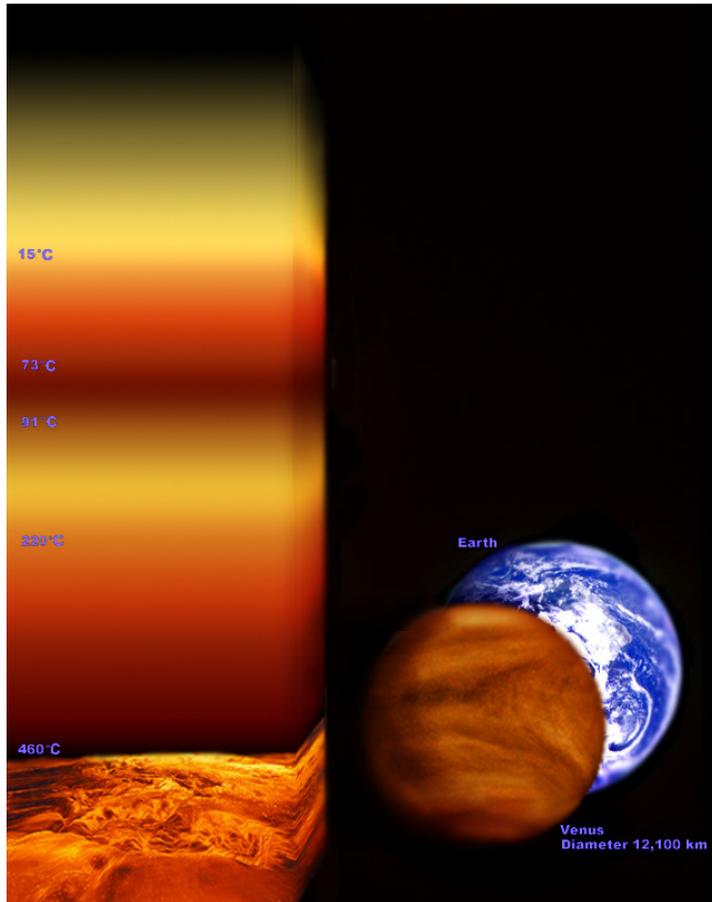
Si la valeur actuelle de pression d'eau correspond à une valeur d'équilibre entre le dégazage et l'échappement de H vers l'espace, c'est que l'échappement a commencé pour une pression de 0.1 bar.

A cette pression la température est déjà >430K et le CO₂ dans l'atmosphère est en équilibre avec les silicates.

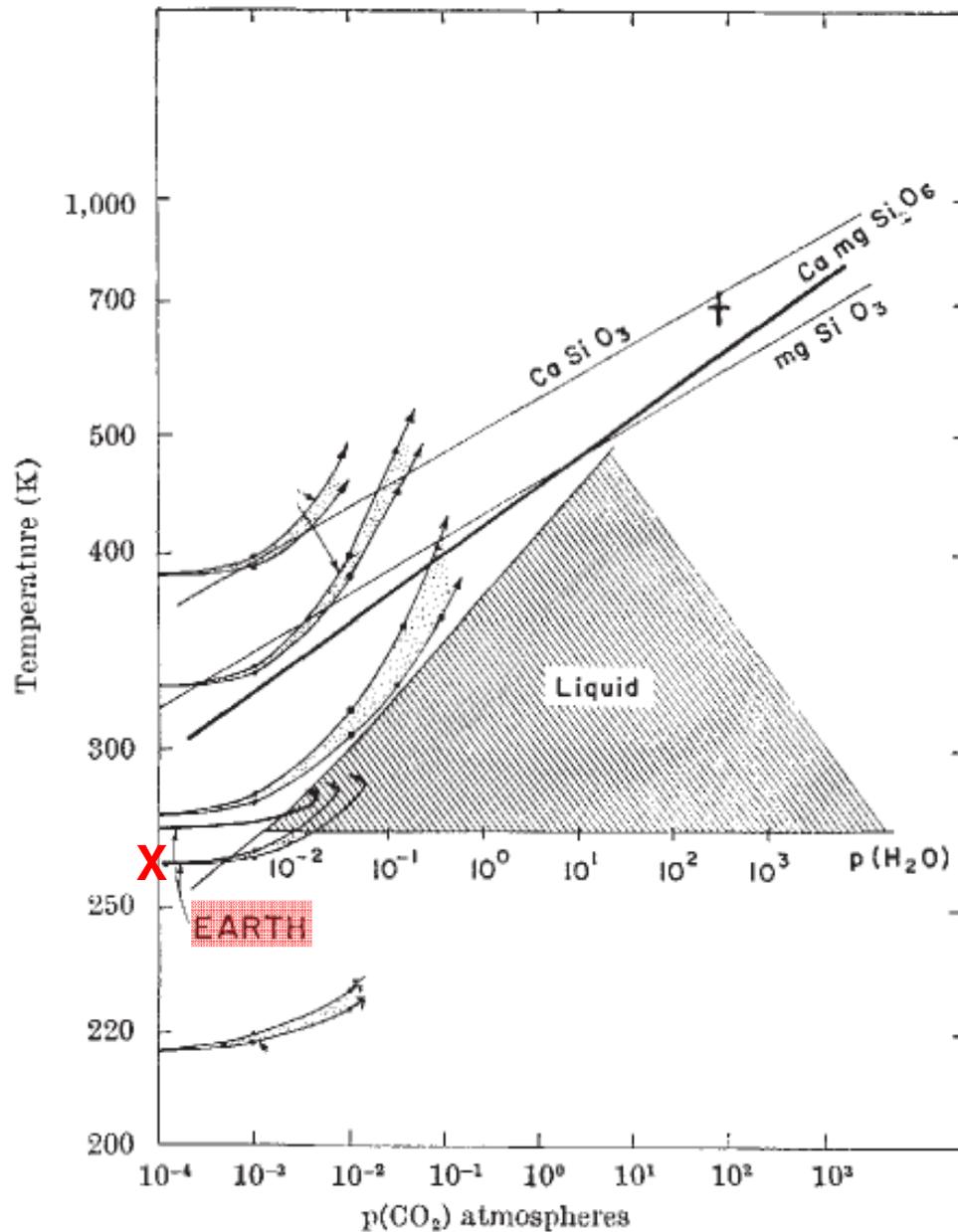


Si la pression de vapeur n'a jamais dépassé cette valeur, l'augmentation de la température de surface jusqu'à 700K est principalement due à l'effet de serre par le CO₂ seul.

L'augmentation de température a alors été plus lente qu'indiquée par les flèches, probablement en suivant la courbe d'équilibre pour CaSiO₃.



Évolution de l'atmosphère de la Terre



L'évolution est complètement différente pour la Terre avec une température de surface de 300K, tout le CO_2 dans la croûte et l'eau dans les océans.

La température initiale pour un albédo de 7% est de 275K.

La température de surface commence à augmenter suite à l'accumulation dans l'atmosphère de vapeur d'eau et de CO_2 .

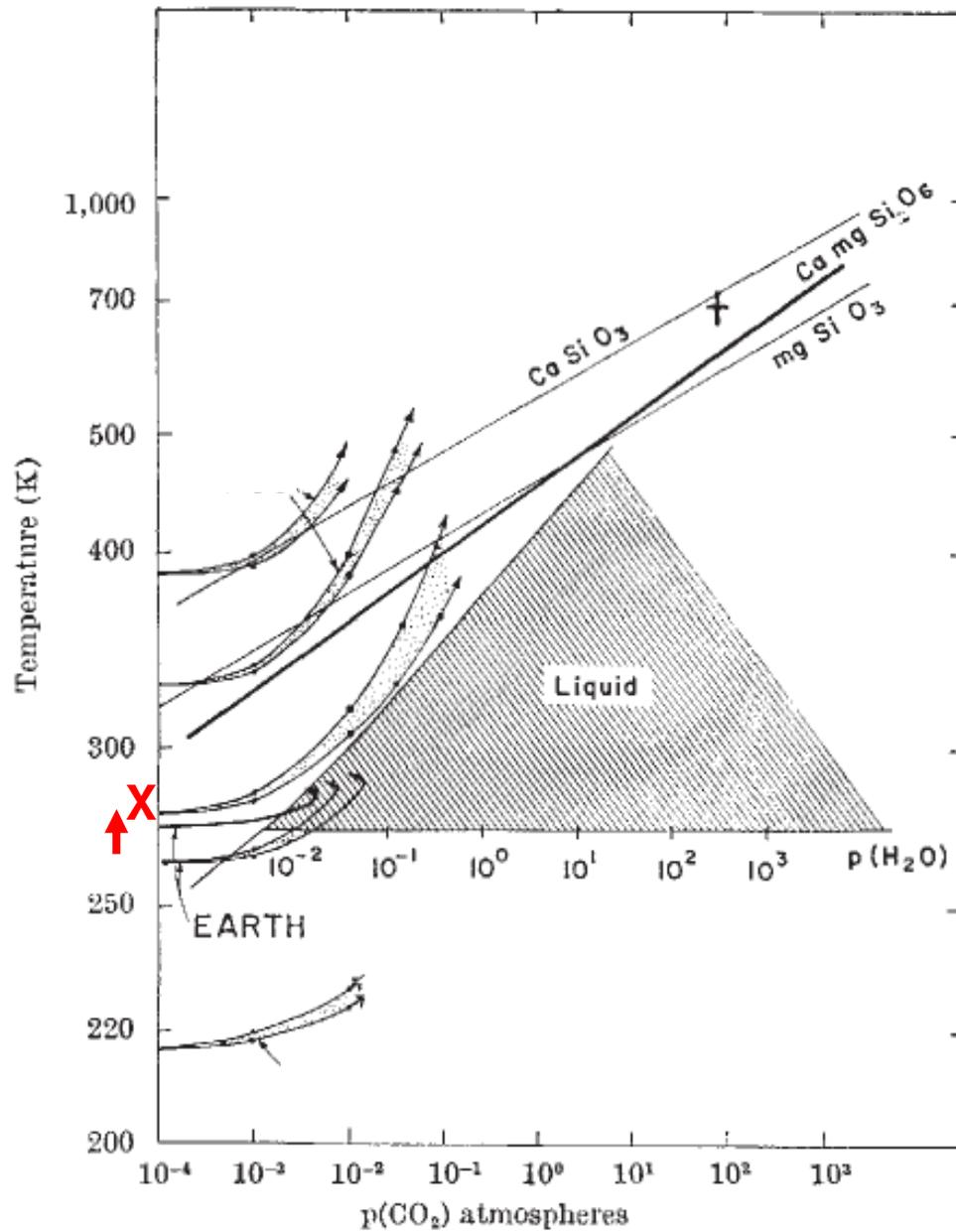
Les conditions de température et de pression finissent par permettre la condensation d'eau sur la surface.

La vapeur d'eau dans l'atmosphère reste en faible quantité et l'augmentation de la température de surface est contrôlée par le CO_2 uniquement.

La pression est cependant supérieure à la pression d'équilibre avec les silicates, et la présence d'eau favorise les réactions de formation de carbonates (l'érosion facilite le renouvellement de silicates disponibles).

Finalement le CO_2 ne s'accumule pas en quantité supérieure à la valeur de 10^{-4} bar à 300K.

Par contre le diazote, gaz inerte, s'accumule pour constituer l'essentiel de l'atmosphère actuelle

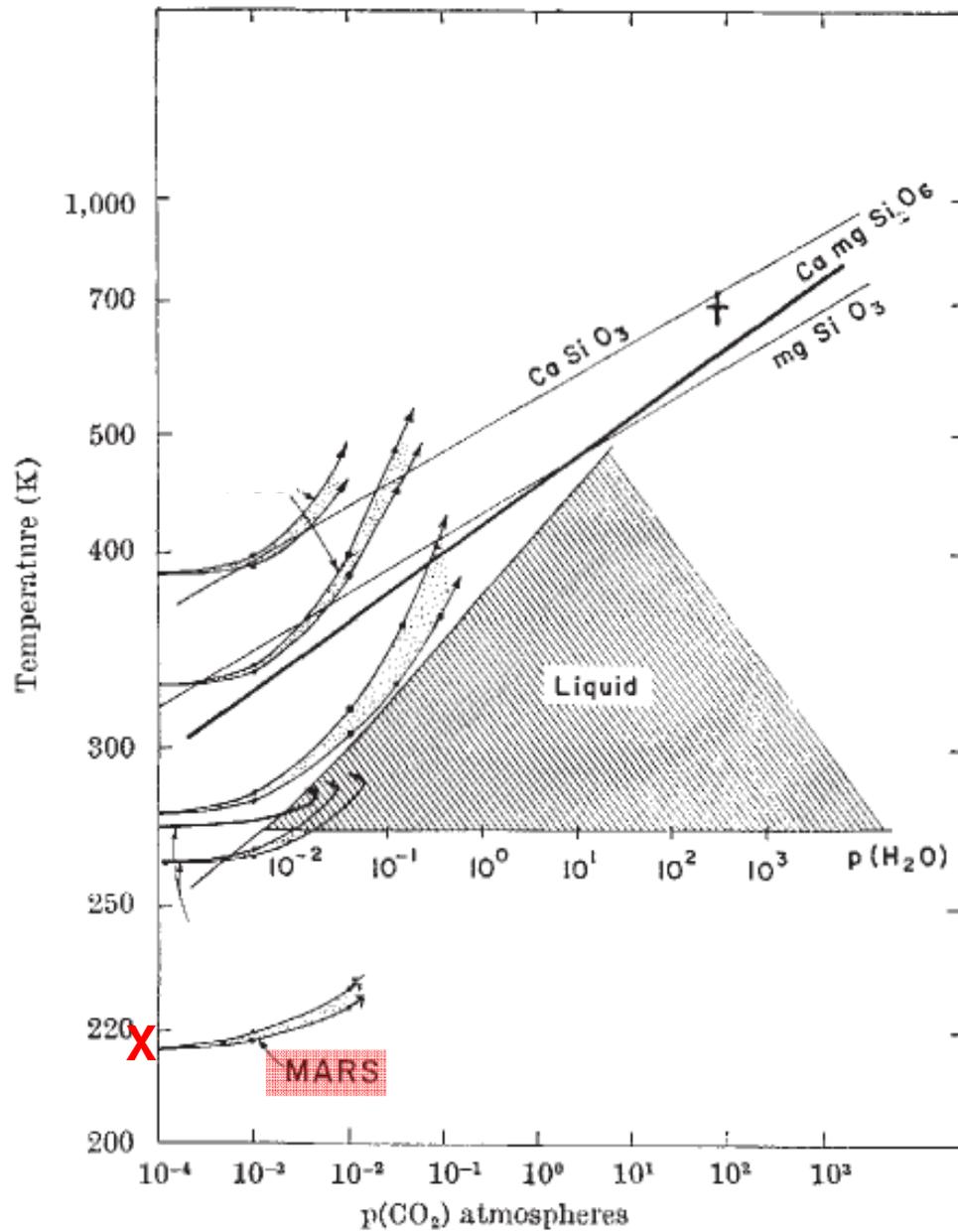


La température initiale de la planète est un paramètre critique dans la détermination de l'évolution atmosphérique

Pour une température initiale de 280K au lieu de 275K, l'atmosphère terrestre n'entre jamais dans le domaine d'existence de l'eau liquide, et présente un effet d'emballement atmosphérique similaire à celui de Vénus.

Cela aurait pu se passer si la Terre s'était trouvée 6 à 10 millions de km plus près du Soleil

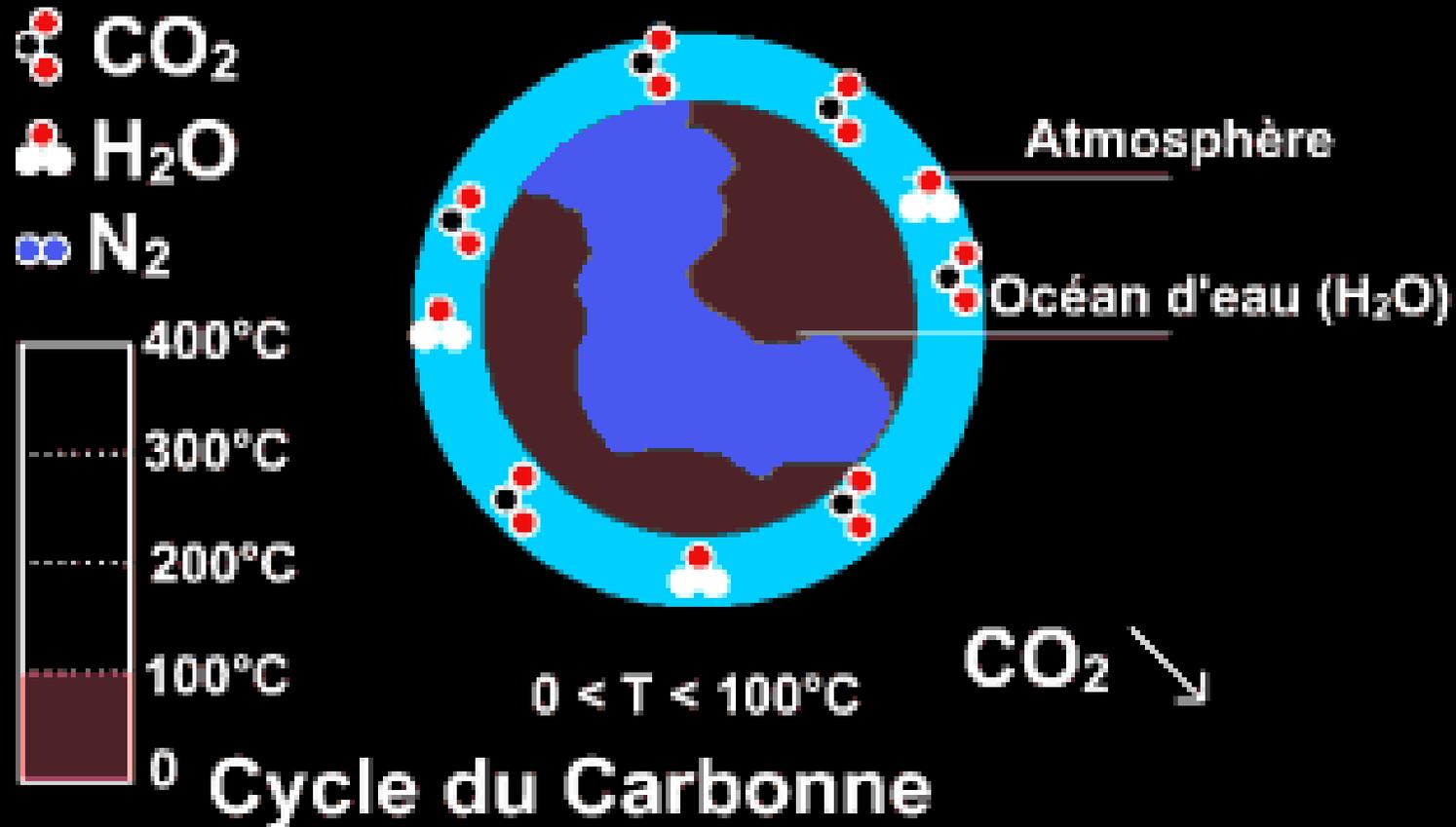
Évolution de l'atmosphère de Mars



Pour une planète plus éloignée, comme Mars, l'emballage de l'effet de serre est peu probable.

Si la température initiale est < 273K, l'eau est glacée et seul le CO₂ peut participer à l'effet de serre.

Emballlement de l'effet de serre sur Vénus



Bilan énergétique de l'effet de serre

énergie retenue par l'effet de serre

énergie atteignant la surface

1. Vénus : 99.9 %
2. Titan : 90 %
3. Terre : 60 %
4. Mars : 30 %

Analytic Solutions for the Antigreenhouse Effect: Titan and the Early Earth

Christopher P. McKay

Space Science Division, NASA Ames Research Center, Moffett Field, California 94035
Email: cmckay@mail.arc.nasa.gov

and

Ralph D. Lorenz and Jonathan I. Lunine

Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721

Received April 27, 1998; revised September 14, 1998

Equation (1) can be generalized to include this antigreenhouse effect. As described in the Appendix, we obtain a simple expression for the temperature in the atmosphere and at the surface. In the antigreenhouse limit the surface temperature is given by

$$\sigma T_s^4 = (F_g + (1 - \gamma)F_s) \left(1 + \frac{3}{4} \tau^* \right) + \frac{\gamma F_s}{2}, \quad (2)$$

where F_g is a geothermal heat term added for generality, $F_s = (1 - A)F_0/4$, where F_0 is the solar constant at Titan's heliocentric distance, A is the albedo, and γ is the factor expressing the strength of the antigreenhouse effect. Physically γ is the fraction of sunlight, not reflected to space, that is blocked by the antigreenhouse layer; the sunlight reaching the lower atmosphere is therefore $(1 - \gamma)(1 - A)F_0/4$.

Sur Titan : présence d'une brume photochimique (composés organiques)

- bloque une partie du flux solaire (40% de F_s absorbé dans la stratosphère),
- laisse passer le flux thermique IR

→ effet de serre avec $\Delta T = +21$ K

→ $T_s = 103$ K

Mais

→ *anti effet de serre* avec $\Delta T = -9$ K

→ $T_s = 94$ K

Équivalent de « l'hiver nucléaire » ou de l'état de l'atmosphère qui a suivi l'impact météoritique qui aurait fait disparaître les dinosaures.

Anti-effet de serre sur Titan

$$F_0/4 = 3.5 \text{ W/m}^2$$
$$T_e = 82 \text{ K}$$

0.3 = réflexion vers l'espace

0.4 = absorption dans la stratosphère

0.3 = atteint la basse atmosphère

$$\rightarrow \gamma = 4/7$$

$$\text{Pour } \gamma = 1, T_s = T_e / 2^{1/4}$$

En conclusion, l'anti-effet de serre réduit l'effet de serre de moitié sur Titan. La même proportion sur Terre conduirait à $T_s = 0 \text{ C}$.

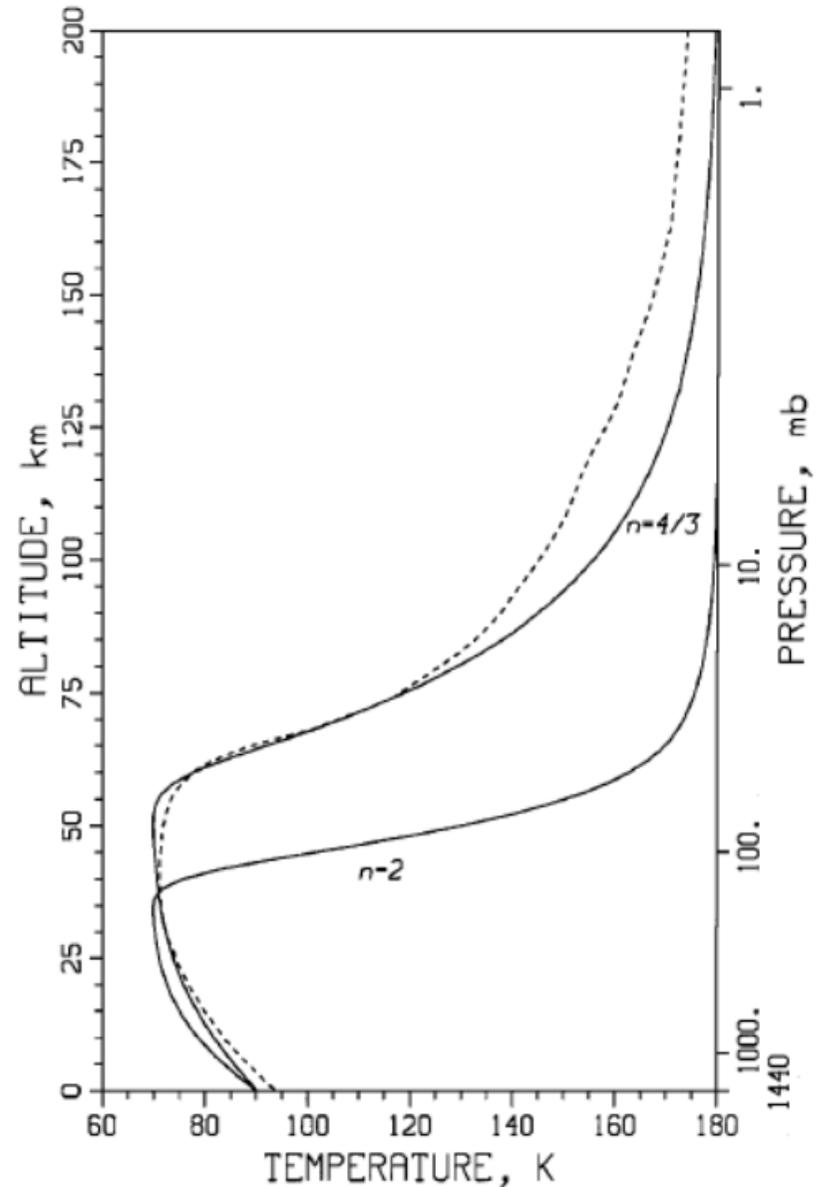
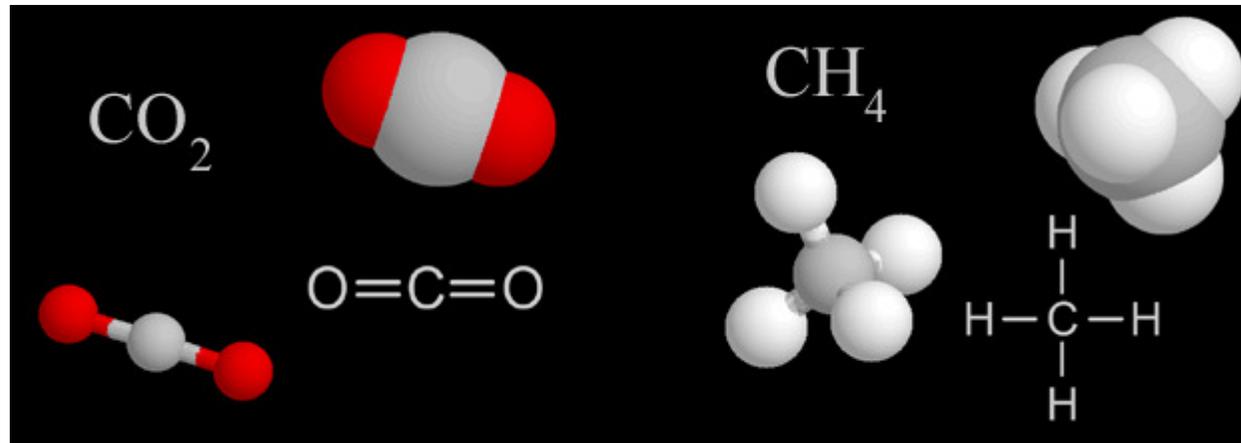


FIG. 1. Vertical profile determined from the analytical antigreenhouse (Eq. (7)) for opacity-pressure power laws of $n = 2$ and $n = 4/3$; $\tau^* = 3$, $\gamma = 4/7$, $k = 160$. The results for $n = 4/3$ compare favorably with the present atmosphere determined by Lellouch *et al.* (1989) from Voyager 1 radio-occultation and other data (dashed line).

Que sont les gaz à effet de serre ?

Les gaz constitués de molécules à au moins 2 atomes différents, donc essentiellement les molécules à 3 atomes ou plus

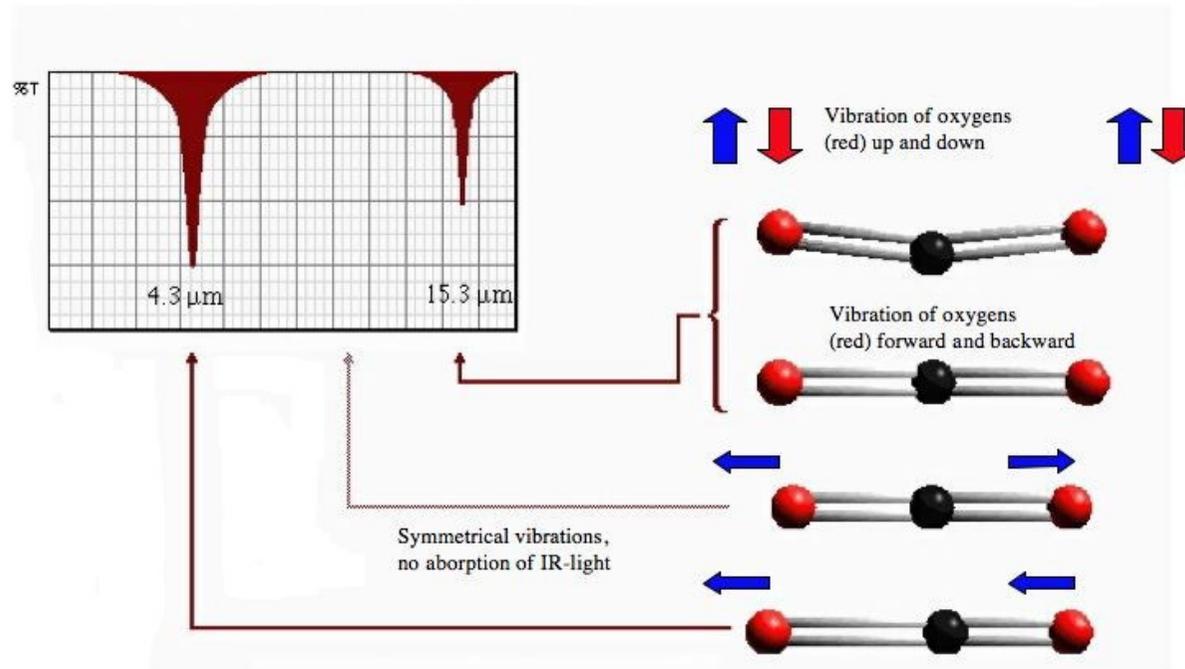
Ex: H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3 , N_2O , CFC...



Définition des gaz à effet de serre

Les molécules dont le dipole électrique peut changer suite à une conversion d'état vibrationnel déclenchée par l'absorption d'un photon dans la gamme infra-rouge

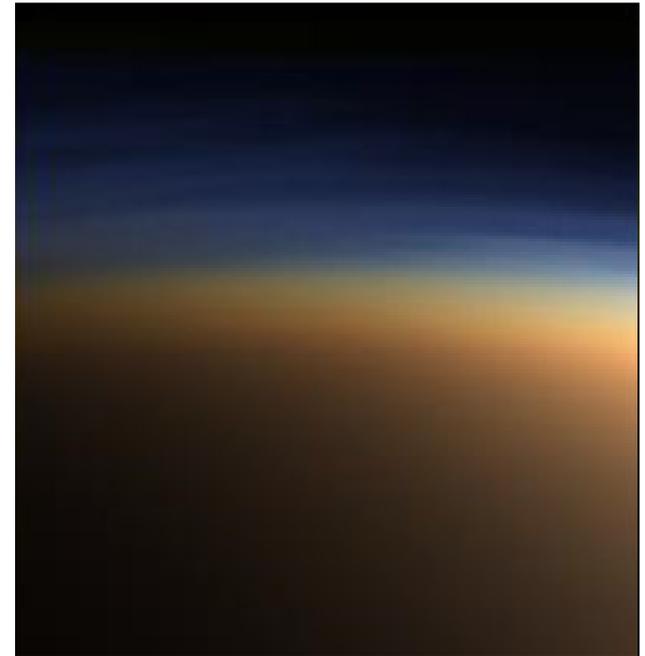
Vibrations in carbon dioxide CO₂



Les configurations asymétriques induisent un moment net non nul, c.a.d un déplacement du centre de charge. Ceci est impossible pour N₂ et O₂, par exemple, dont les oscillations sont purement symétriques (ces molécules n'ont donc pas de dipole).

Une particularité sur Titan

L'effet de serre est dû à N_2 , (CH_4) , H_2 et non CO_2 !



Ceci vient de la haute densité de l'atmosphère qui implique un taux de collisions élevé. Ces collisions "di-symétrisent" les molécules qui acquièrent ainsi un dipole induit et peuvent alors absorber dans l'infra-rouge.

Une raie d'absorption peut être la même, ou très proche, pour différentes molécules. Il est donc difficile de déterminer précisément l'importance relative de chaque molécules à l'effet de serre global.

Gaz à effet de serre (Terre)

Vapeur d'eau

Goutelettes de nuages

Dioxyde de carbone

Méthane

Ozone

Contribution à l'effet %

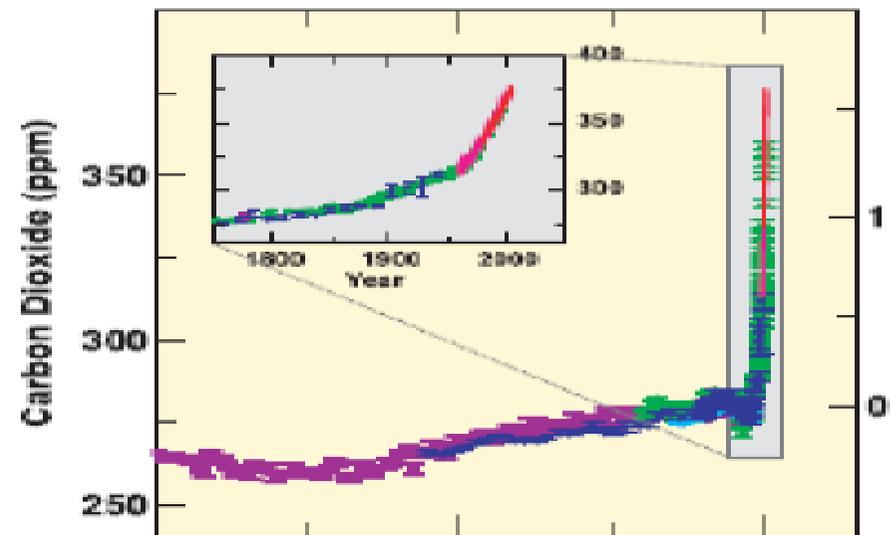
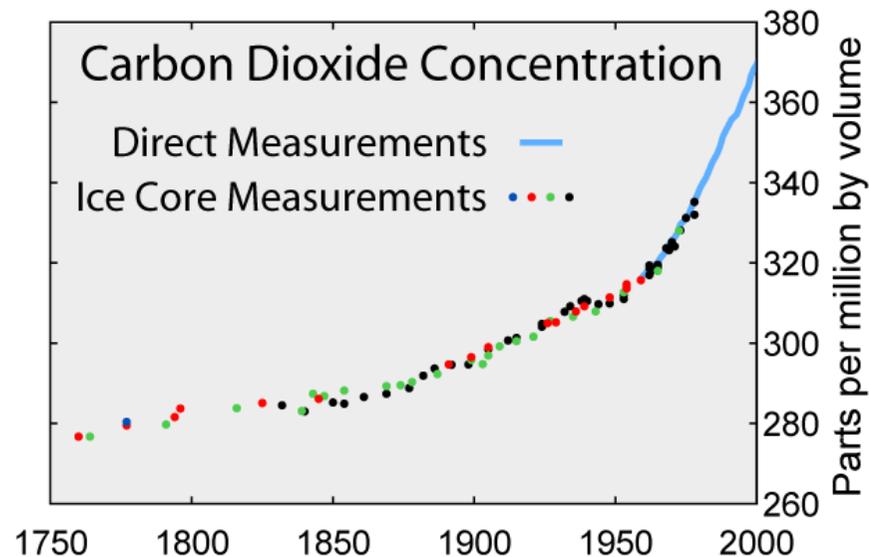
36% à 66%

66% à 85%

9% à 26%

4% à 9%

3% à 7%



Role de la vapeur d'eau

Effet de serre dû aux autres gaz : ~11K (sur les 33K de l'effet global)

- est régulée par des phénomènes de circulation et la température
- différent de l'action de CO₂ (régulation par « sources et pertes »)
- n'a pas une action de forçage dans le réchauffement climatique
- « positive feedback » (si T augmente, la présence de vapeur d'eau aussi)
- pas de contrôle possible par l'homme

En bref :

L'influence de la vapeur d'eau dans les 33 K de l'effet de serre est directement liée à la présence des autres gaz, en priorité CO₂