



Questions sur
les atmosphères primitives

Franck Selsis
Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux
Franck.selsis@ob.u-bordeaux1.fr

« Dans le cadre d'un cours sur l'évolution, je recherche l'information suivante: l'atmosphère primitive était-elle bleue ou plutôt orange/rose/rouge.

Ici les avis sont partagés et je ne voudrais pas induire en erreur, si cela est déjà connu. Pourriez-vous également citer un (des) article corroborant les faits (Nature).

Je vous en remercie d'avance. »

E-mail du 10/02/2009

L'atmosphère primitive...

... quand ?

- au lendemain de la formation de la Lune ?
- à 4.2 Ga (~âge des zircons les + anciens) ?
- pendant le LHB (39-3.8 Ga) ?
- contemporaine des + anciennes traces de vie (3.8 Ga ? 3.5 Ga ? 3.2 Ga ?...)
- au début de l'oxygénation (~2.4 Ga) ?

l'atmosphère (et l'environnement terrestre) au moment
des origines du vivant

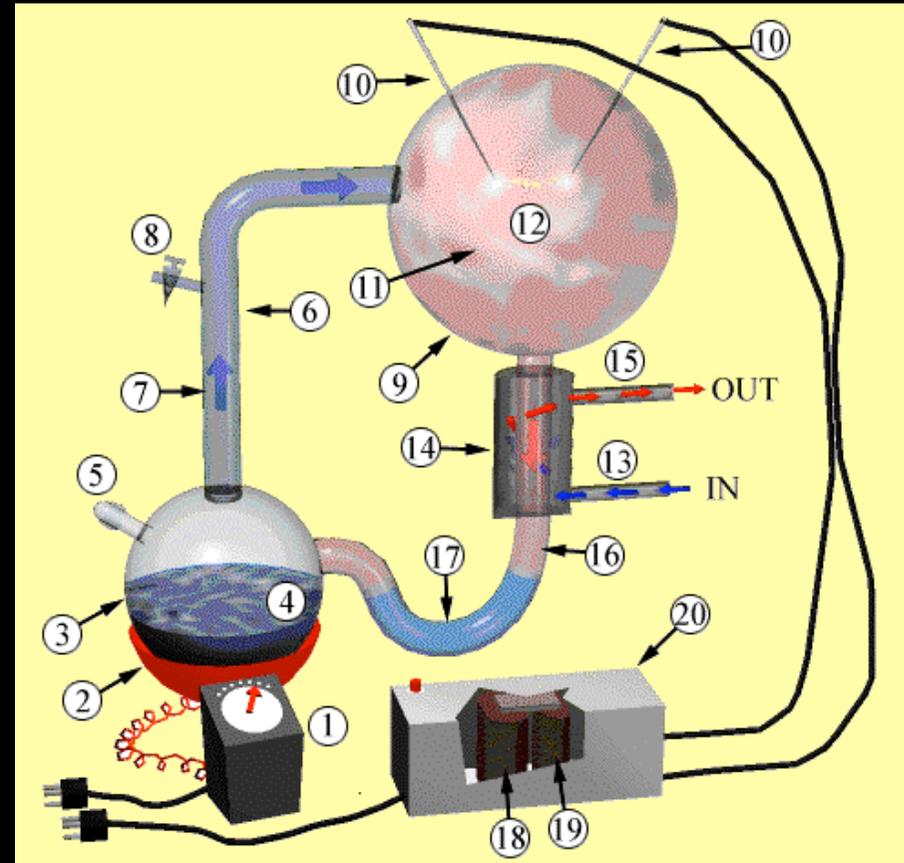
Atmosphère primitive et synthèse prébiotique

L'expérience de Urey-Miller
(1953)

- H_2 , CH_4 , (NH_3 ou N_2)
- eau liquide
- décharges électriques

→ 10-15 % du carbone initial est transformé en matière organique en quelques jours

→ Acides aminés



L'atmosphère prébiotique: quand ?

Fin de l'accrétion
(formation de la Lune)

~4.5 Ga



?



Terre
actuelle



Transition
vers le vivant

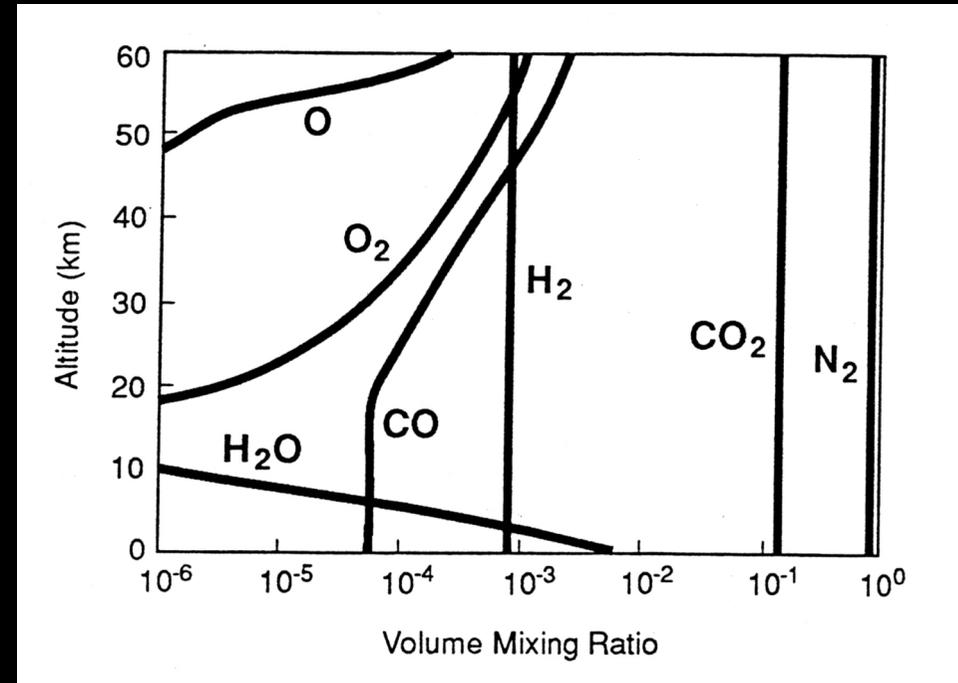
Le modèle « standard »

Walker (1977), Kasting et al (1993)

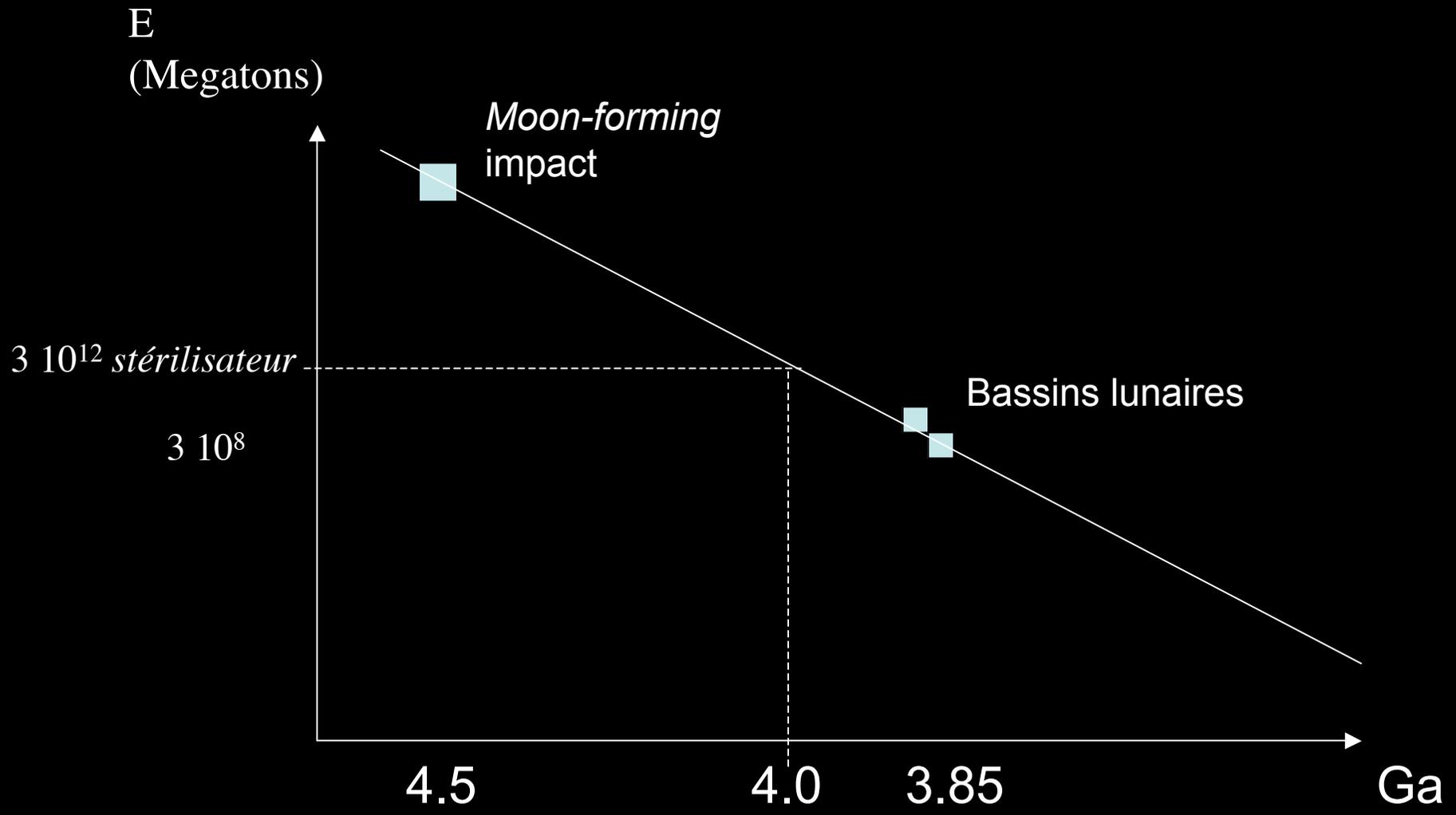
Quand: 3.9 Ga

Argument: Horizon du vivant

Le bombardement de la Terre avant 3.9 Ga vaporisait régulièrement la totalité des océans, portant la surface à des températures > 1000 K, annihilant toute forme de vie et toutes molécules *prébiotiques* ayant pu apparaître avant pendant des périodes d'accalmie.



Hadéen

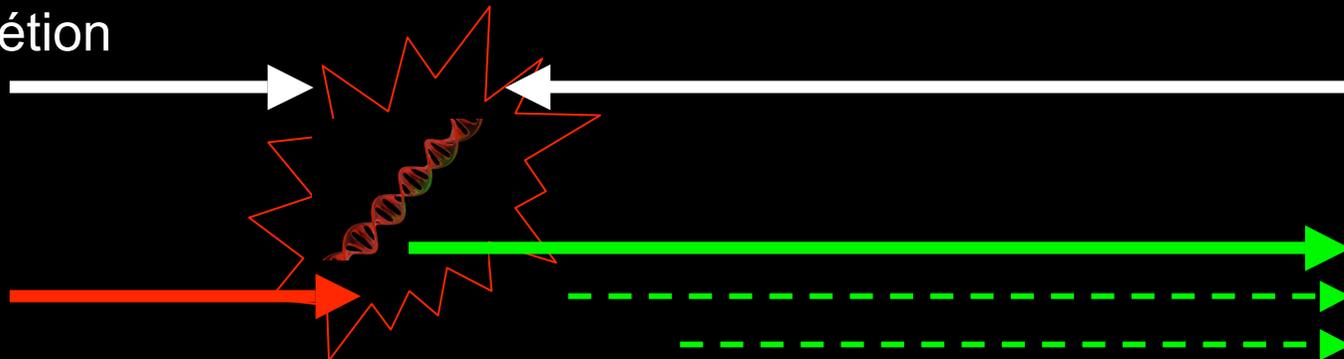


Scenario « standard »

Terre
actuelle



Fin de l'accrétion
~4.4 Ga

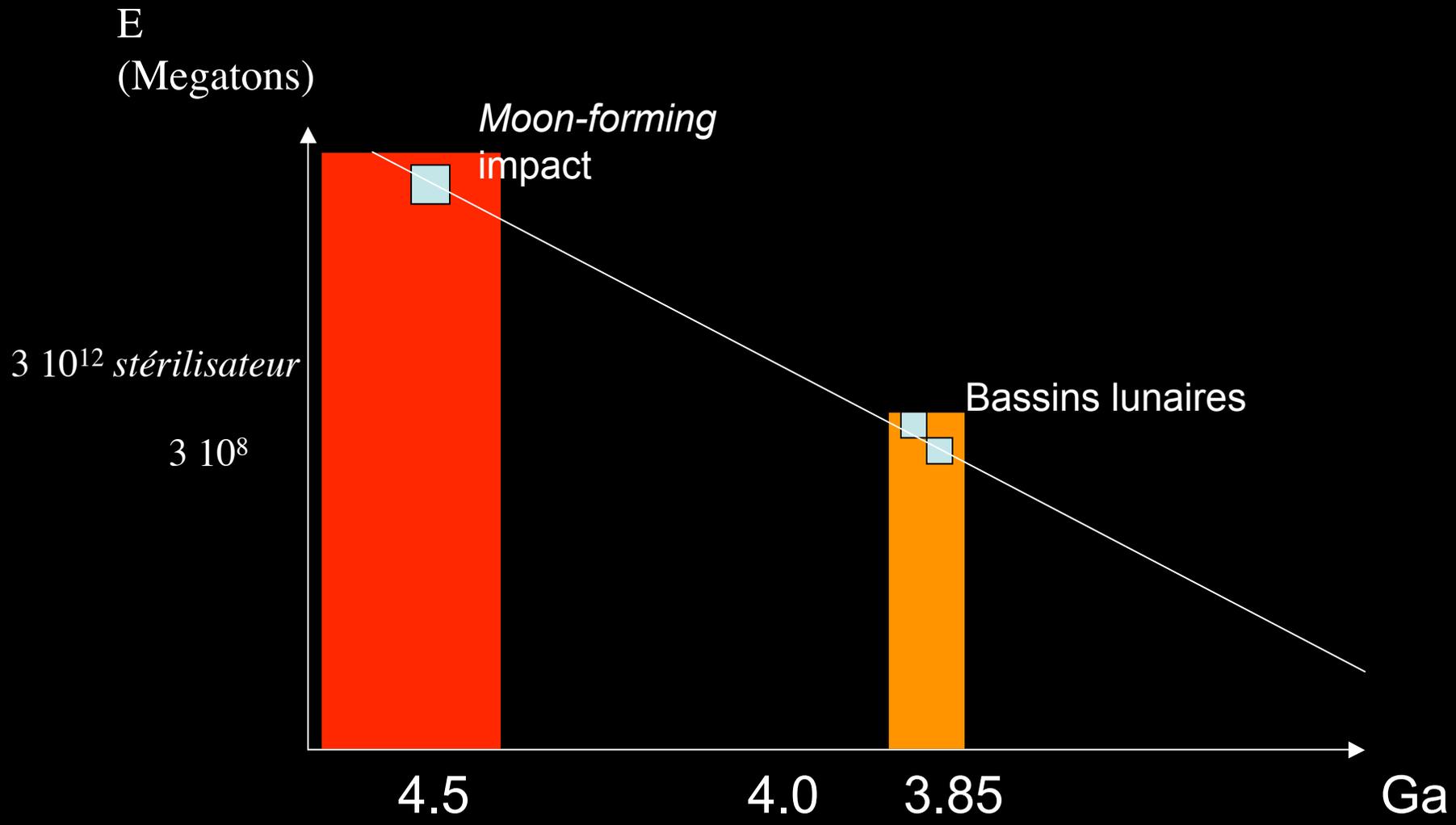


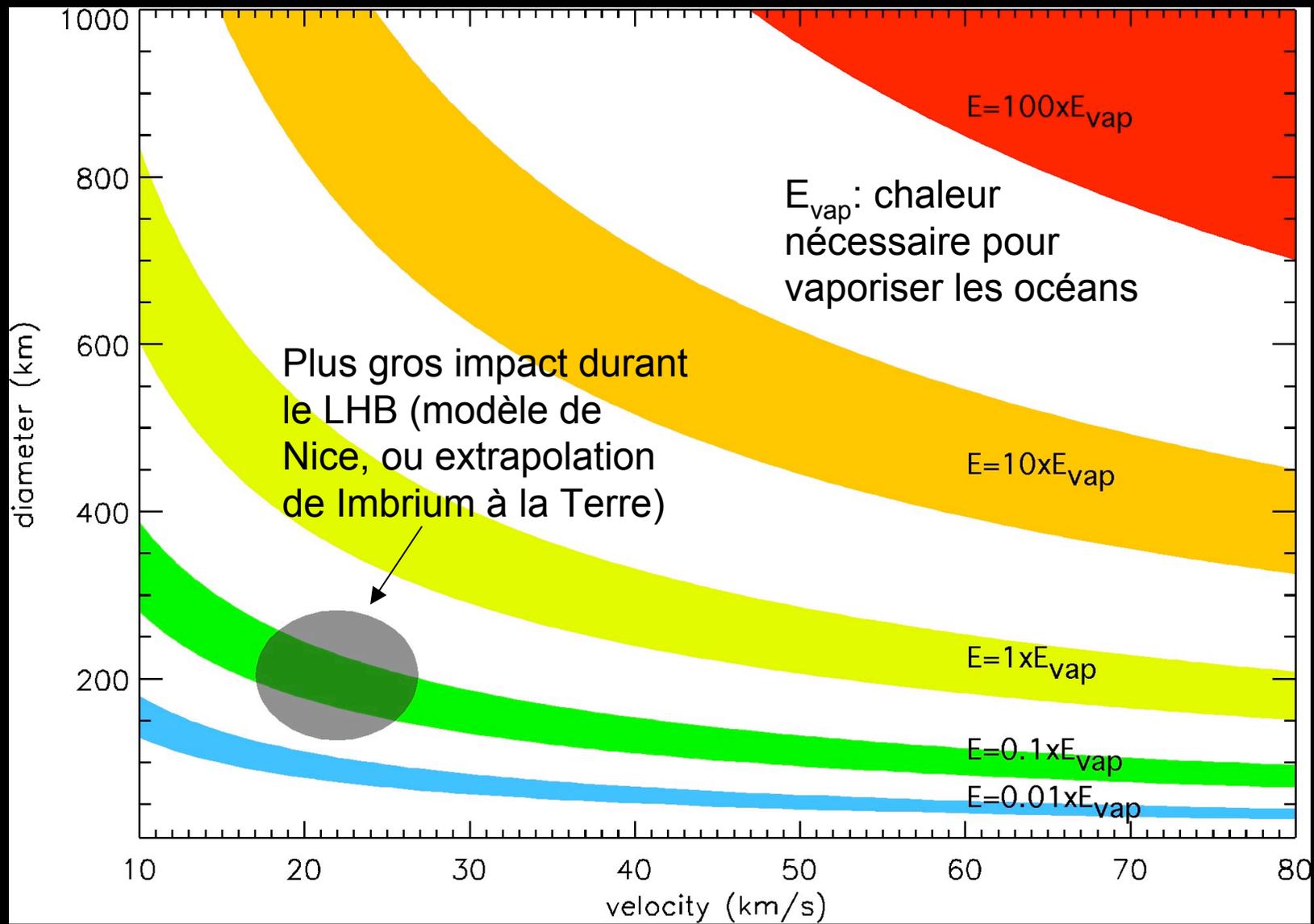
Bombardement
Stérilisateur
Jusqu'à 4.0-3.9 Ga

Traces de vie
Depuis 3.8 Ga (isotopes)

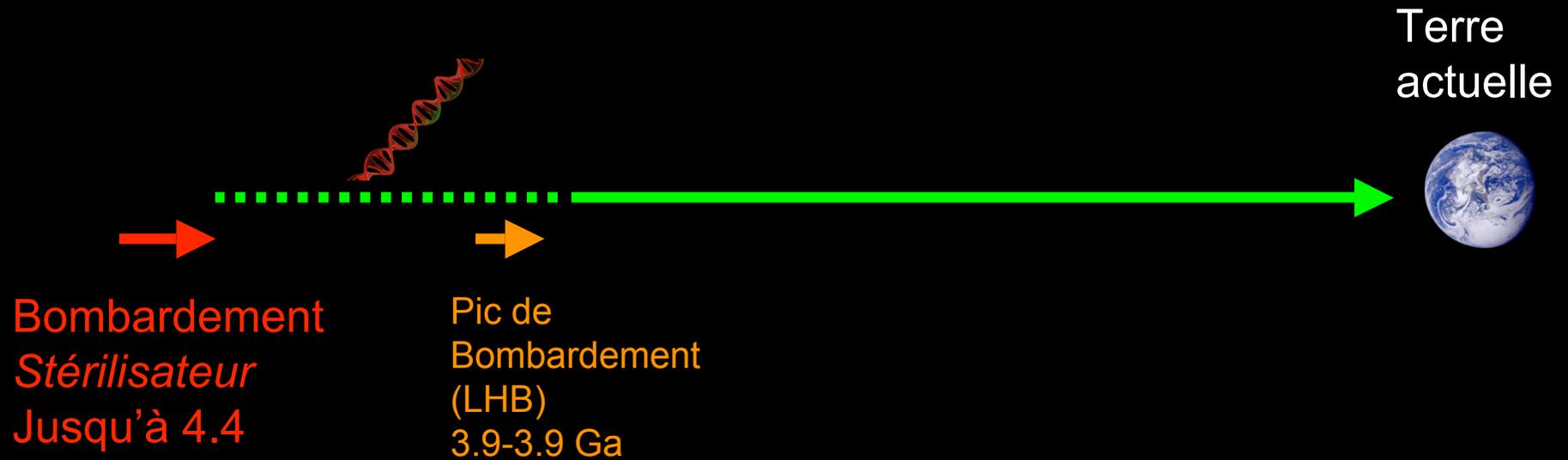
Hadéen

Archéen





Un scénario plus *ouvert*...

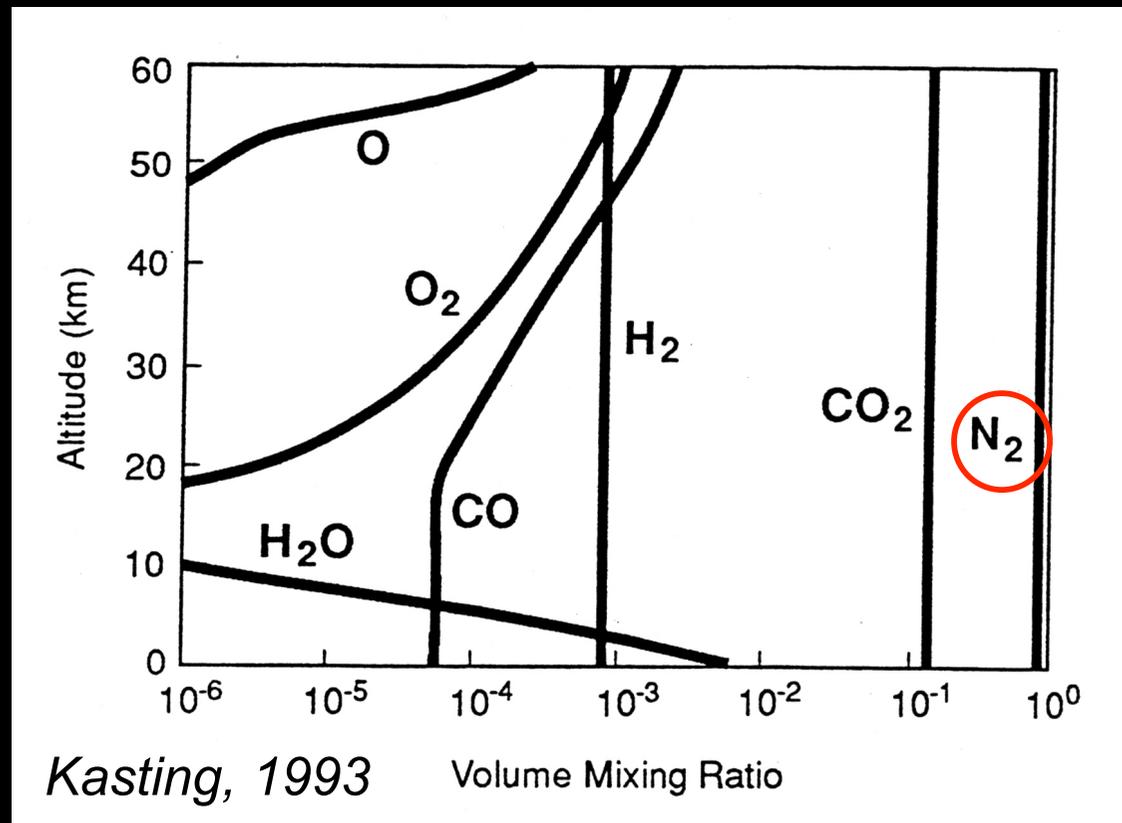


N₂ = actuel

L'azote est dégazé très tôt (< 4.3 Ga) et peu d'échange entre l'atmosphère et l'intérieur (via la fixation biologique de l'azote)

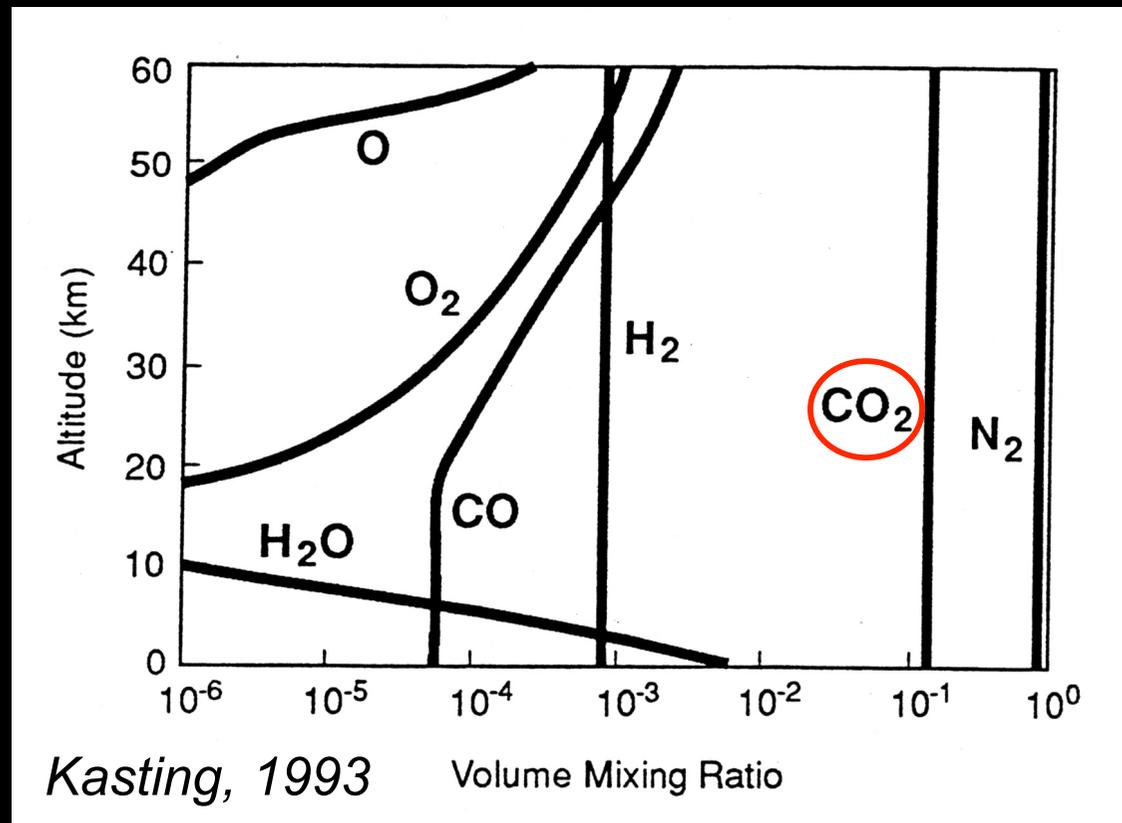
Temps de vie photochimique de NH₃ très court

→ 0.5-1.5 bar de N₂

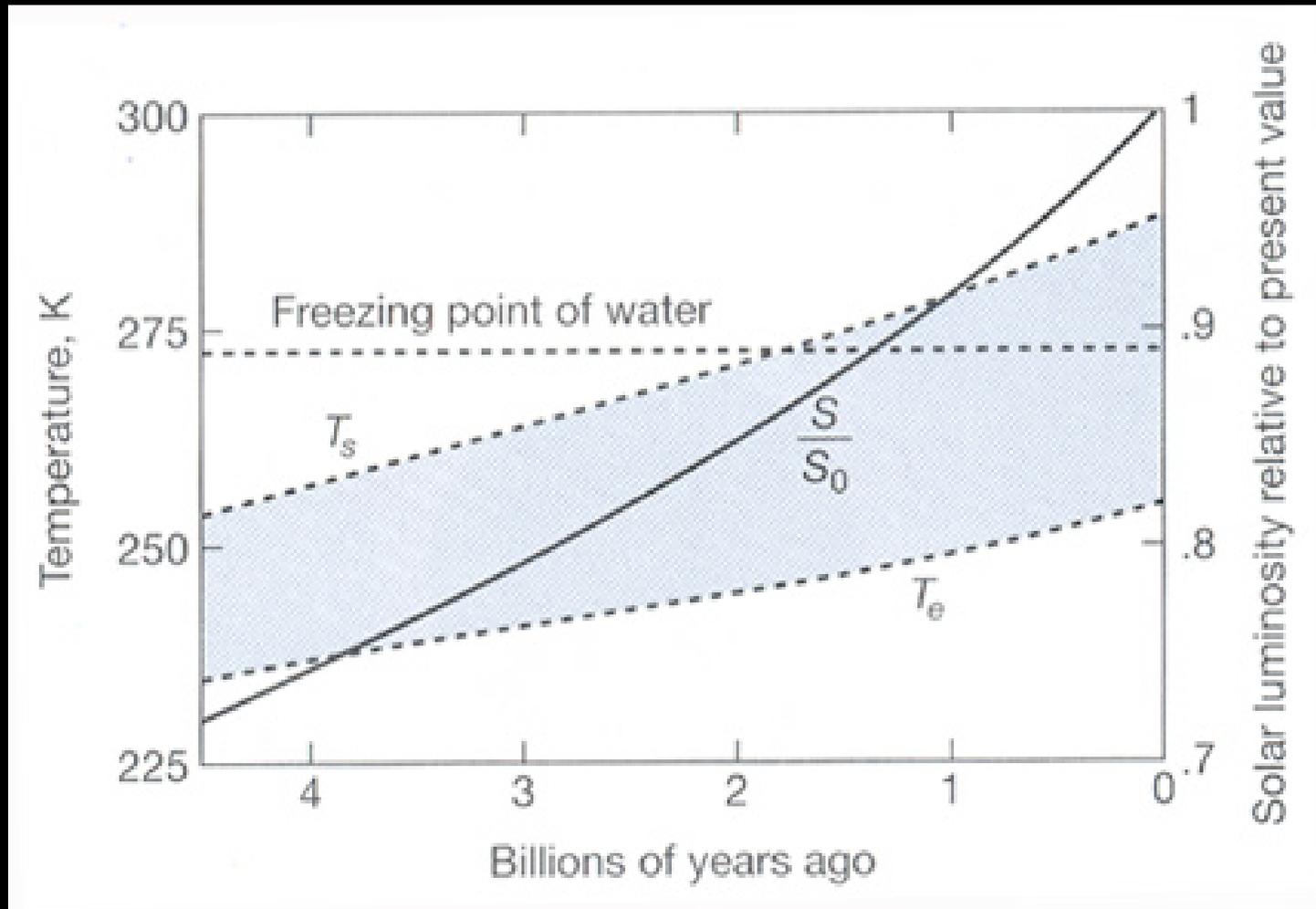


Laves datant de 3.9-3.8 Ga similaires aux laves actuelles.

Contrainte sur la nature du dégazage:
essentiellement H_2O , CO_2 , CO , H_2

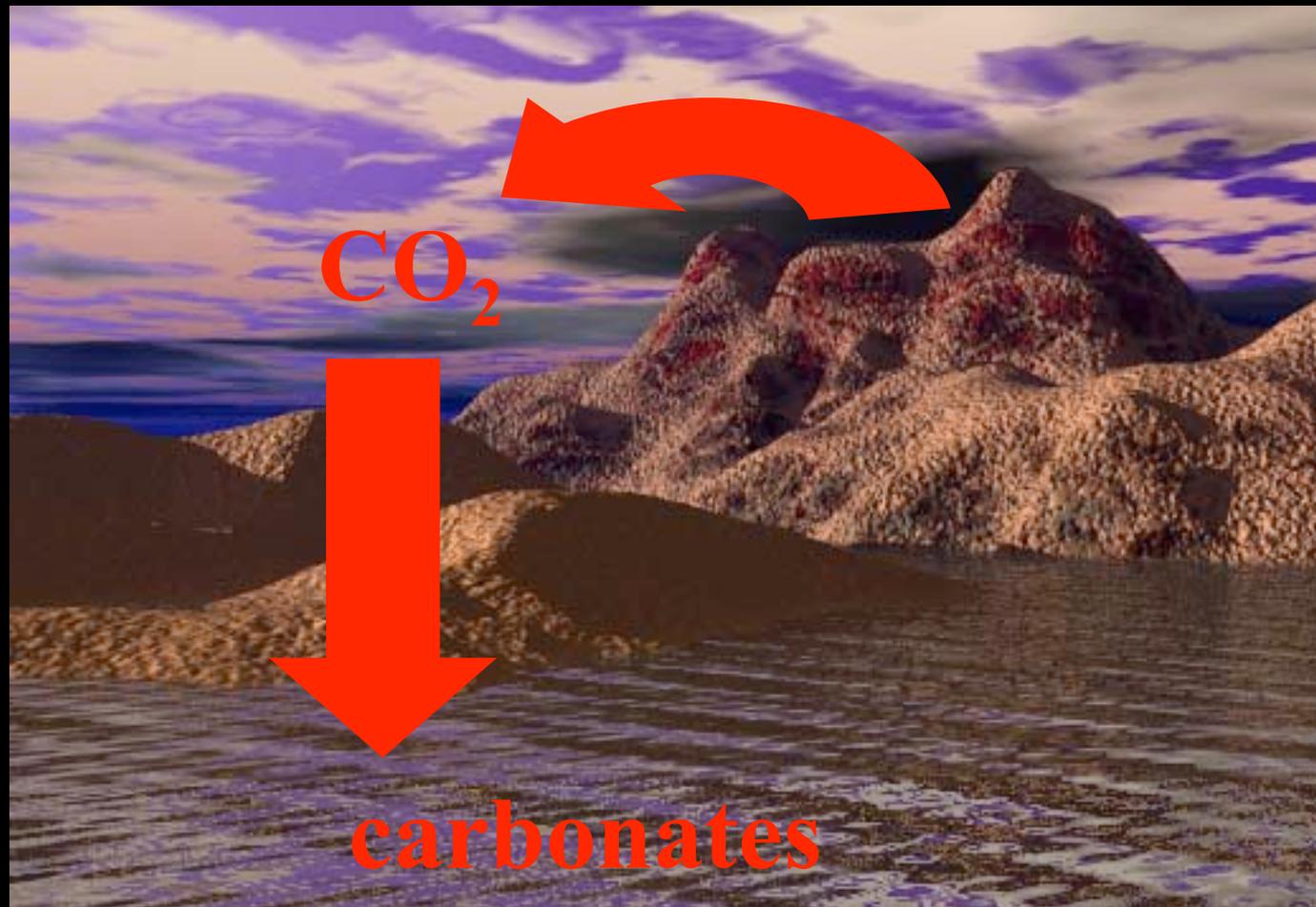


« paradoxe » du Soleil jeune



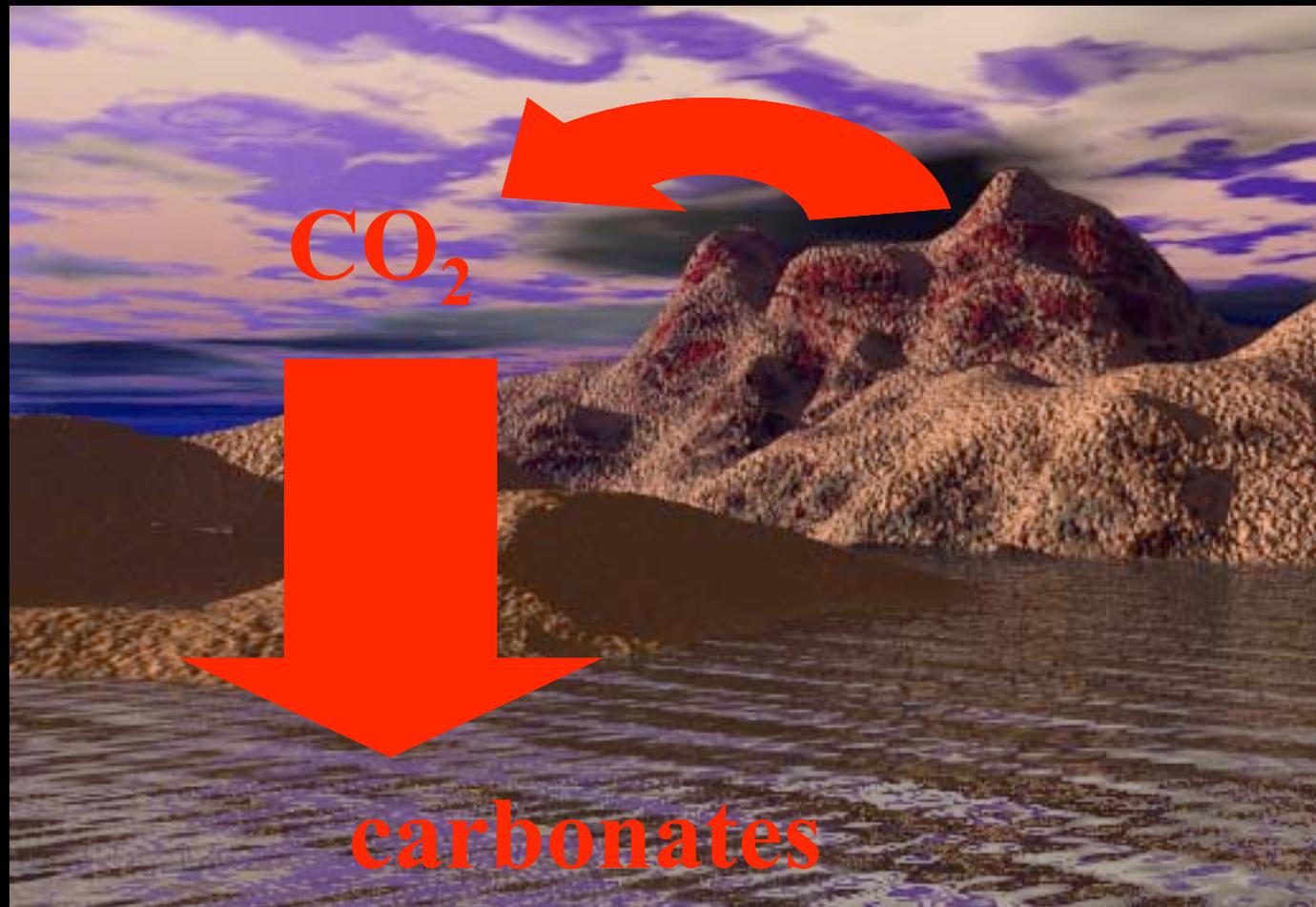
Regulation du climat

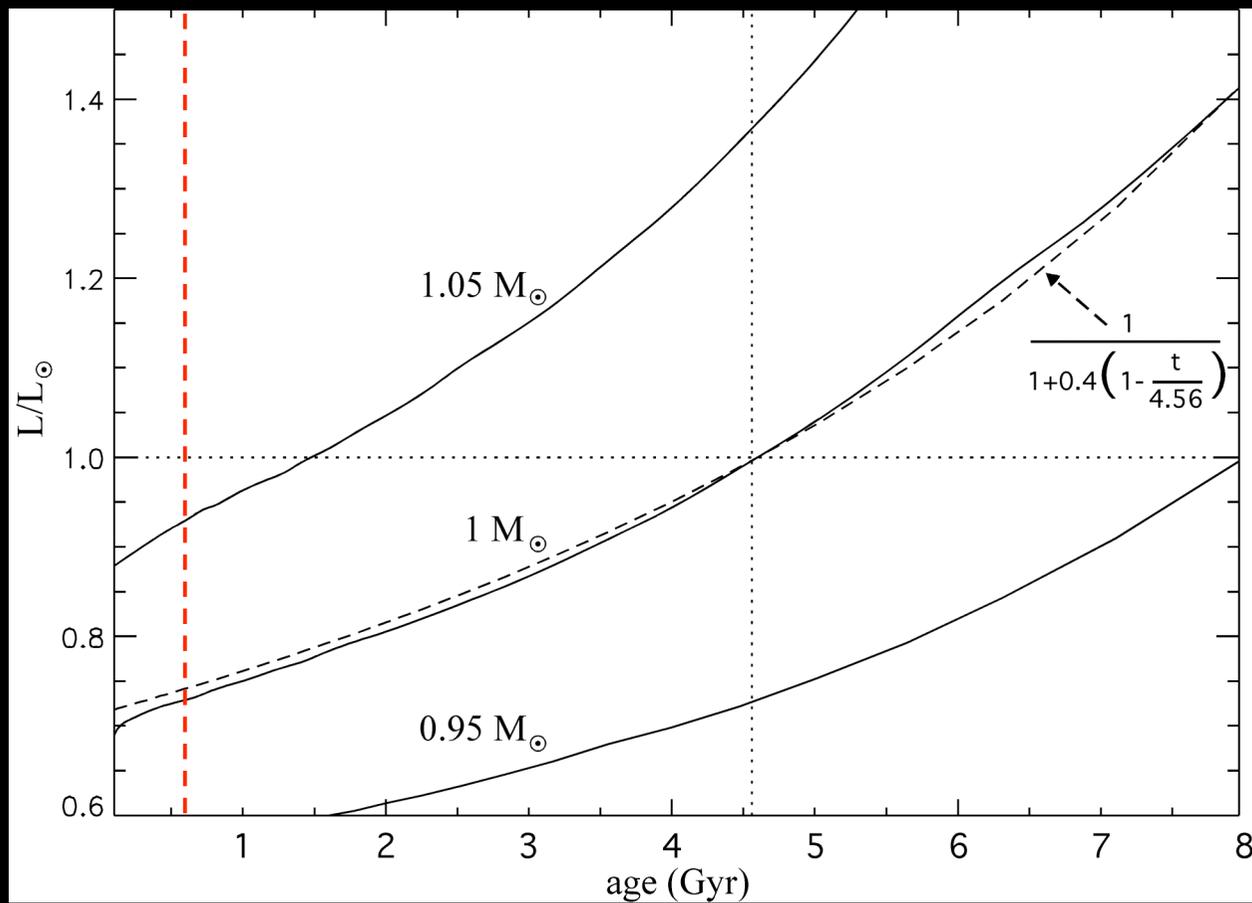
CO₂/carbonates (Walker et al., 1981)



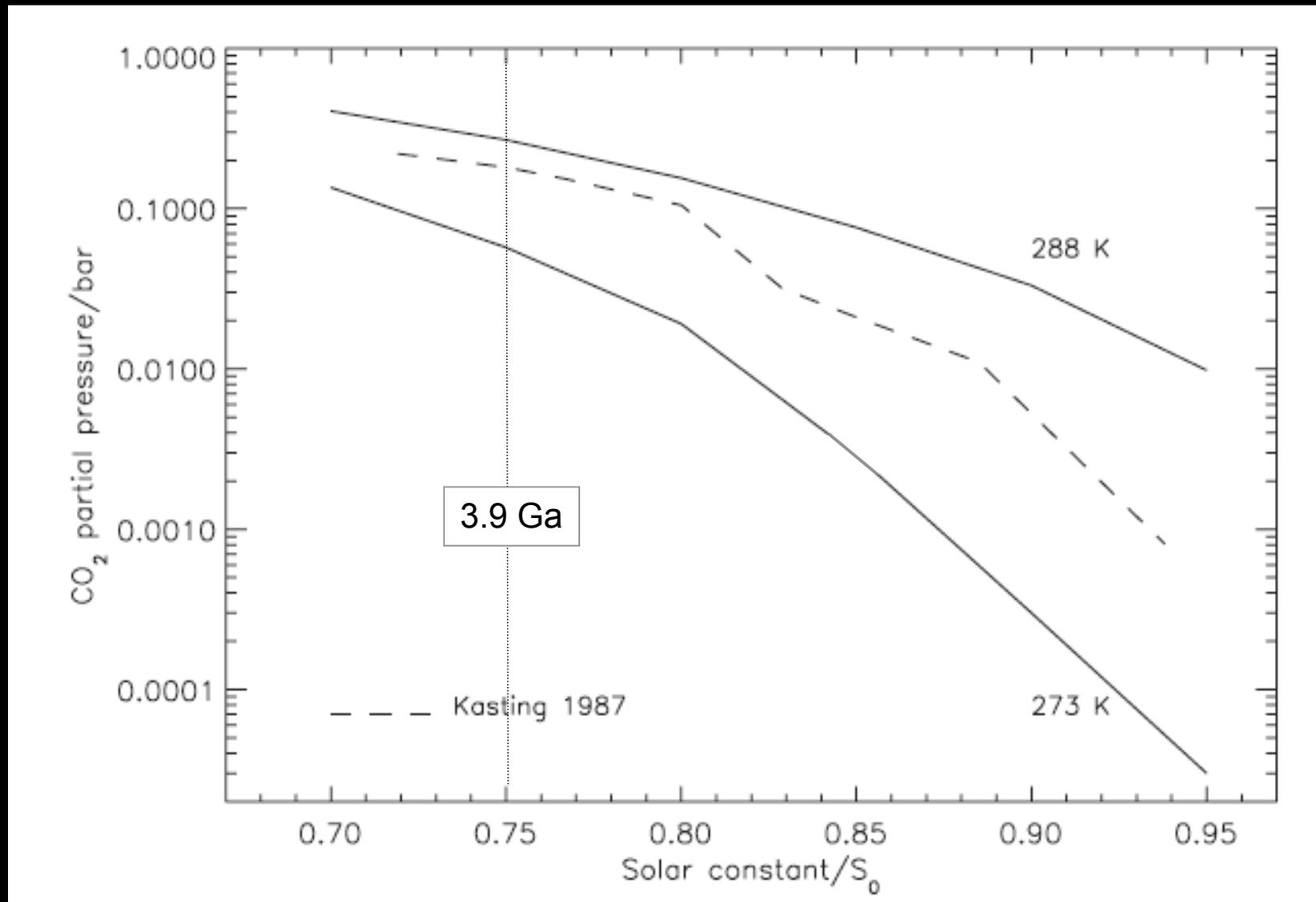
Regulation du climat

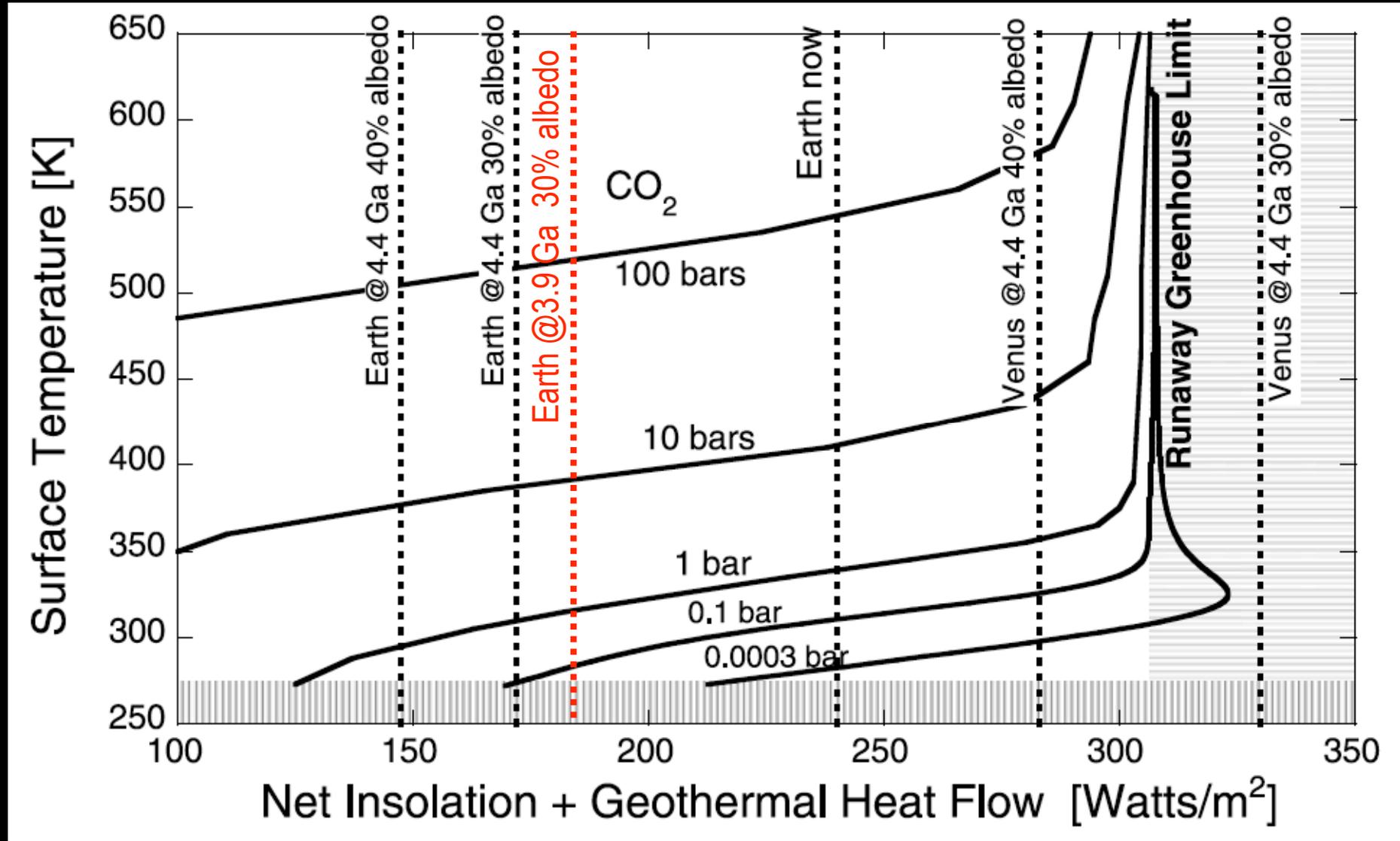
CO₂/carbonates (Walker et al., 1981)





Evolution from Gough 1981, Baraffe et al., 1998

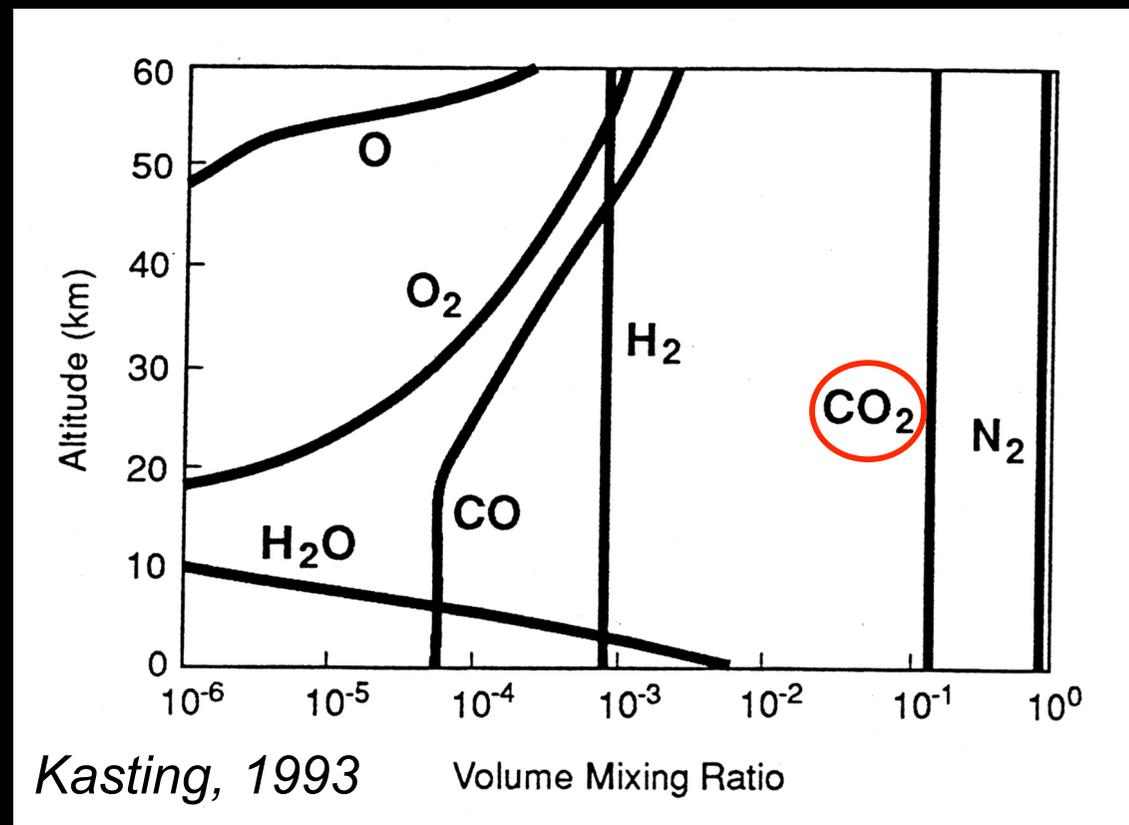




CO₂

On suppose que le niveau de CO₂ dans l'atmosphère est contrôlé par le cycle des carbonates-silicates. Il est alors fonction de la luminosité solaire → environ 100 mbar à 3.9 Ga : + de 600 fois le niveau actuel (confirmé par *Dauphas 2007* à 3.75 Ga ?)

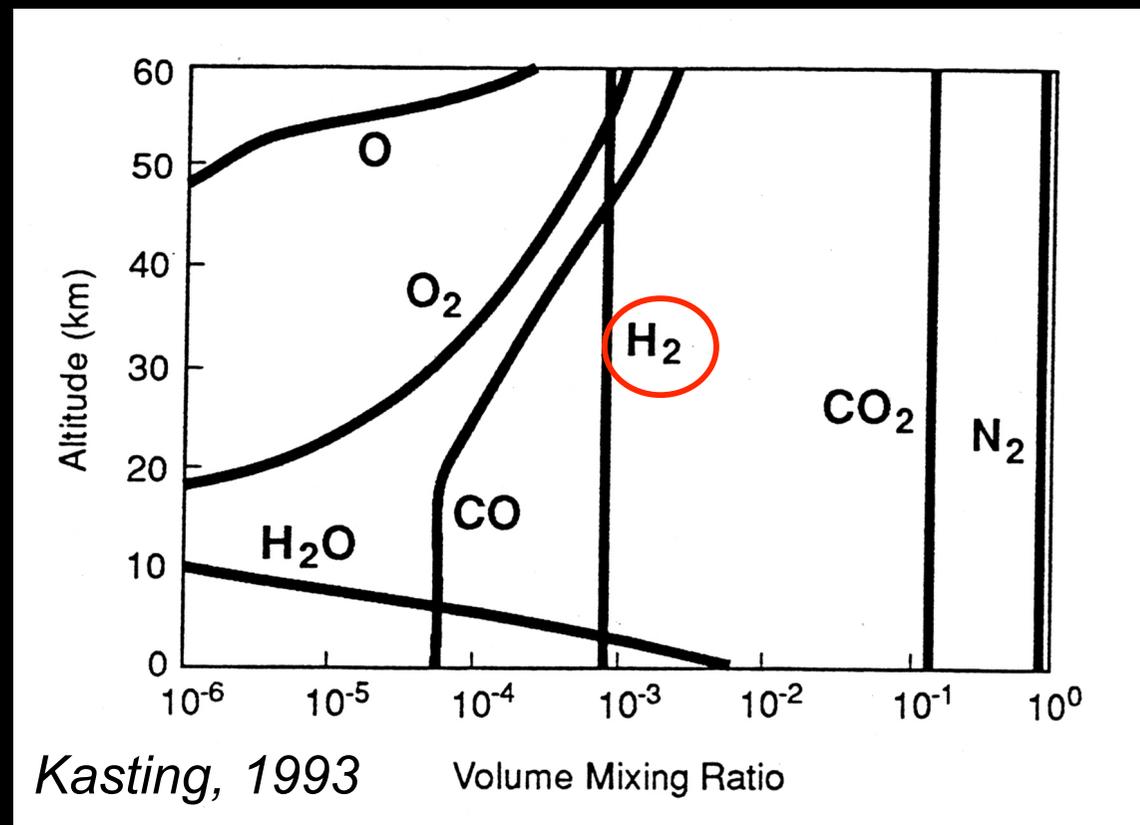
Cette hypothèse n'est valide que 1) en l'absence d'autres gaz à effet de serre (CH₄?)
2) si le cycle des carbonates-silicates fonctionne comme aujourd'hui (voir *Sleep & Zahnle, 2001*).



H₂

Le niveau de H₂ dépend du dégazage d'espèces contenant H et de l'échappement de H vers l'espace.

Si l'échappement n'est limité que par la diffusion, H₂ < 1 mbar pour un dégazage actuel.



Echappement thermique (Jeans, hydrodynamique)

Echappement non-thermique

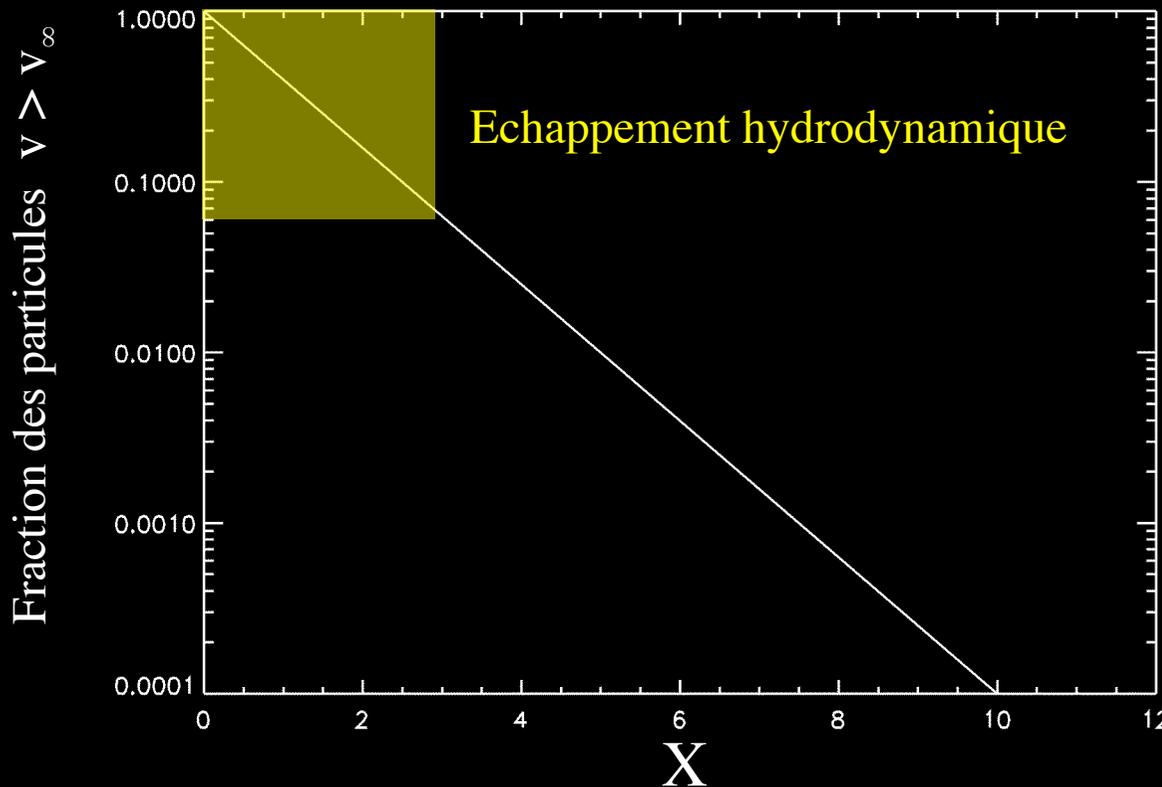
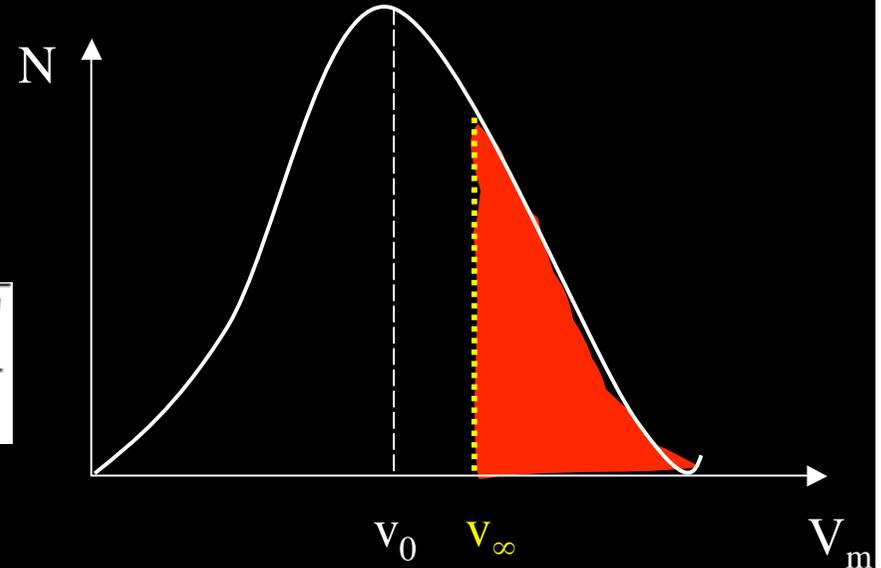
- Impacts
- réactions exothermiques
recombinaison dissociative: $O_2^+ + e^- \rightarrow O + O$
- « Ion pick-up »
- Sputtering
- instabilités MHD
- ...
- Transfert de masse dans les systèmes binaires serrés
(Roche lobe overflow)

Echappement de Jeans

Vitesse de libération: $v_{\infty} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$

Vitesse thermique moyenne: $v_0 = \sqrt{\frac{2kT}{m_i}}$

Paramètre d'échappement: $X_i = \frac{v_{\infty}^2}{v_0^2}$

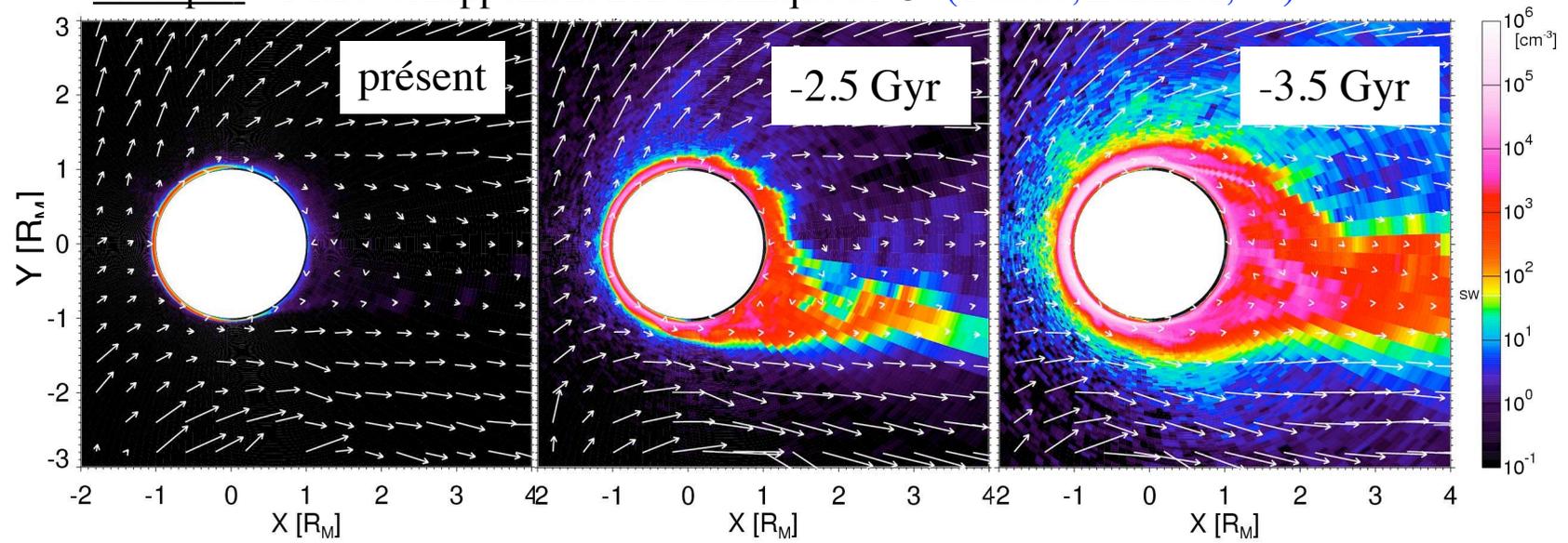


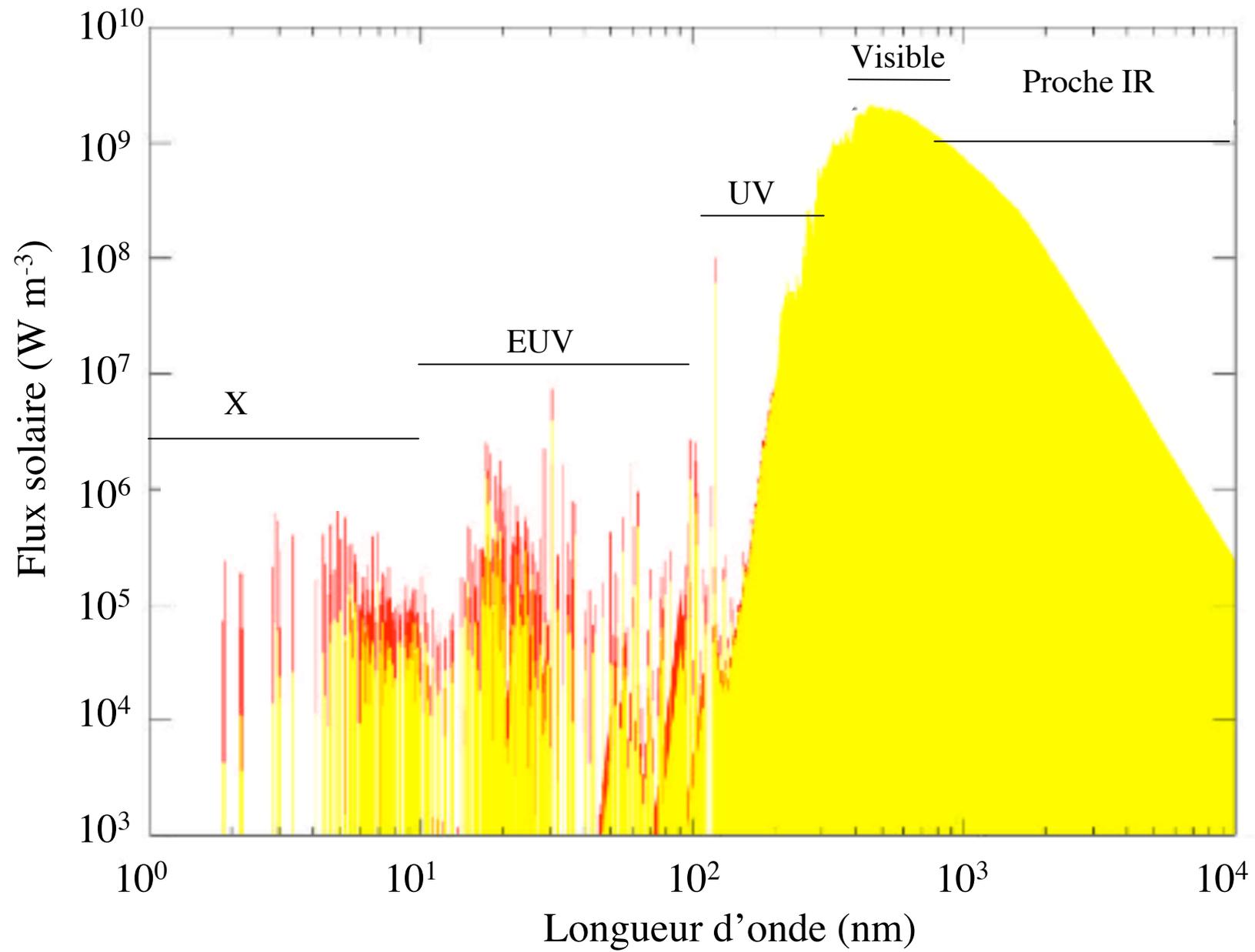
$$T_{c,i} = \frac{GMm_i}{Rk}$$

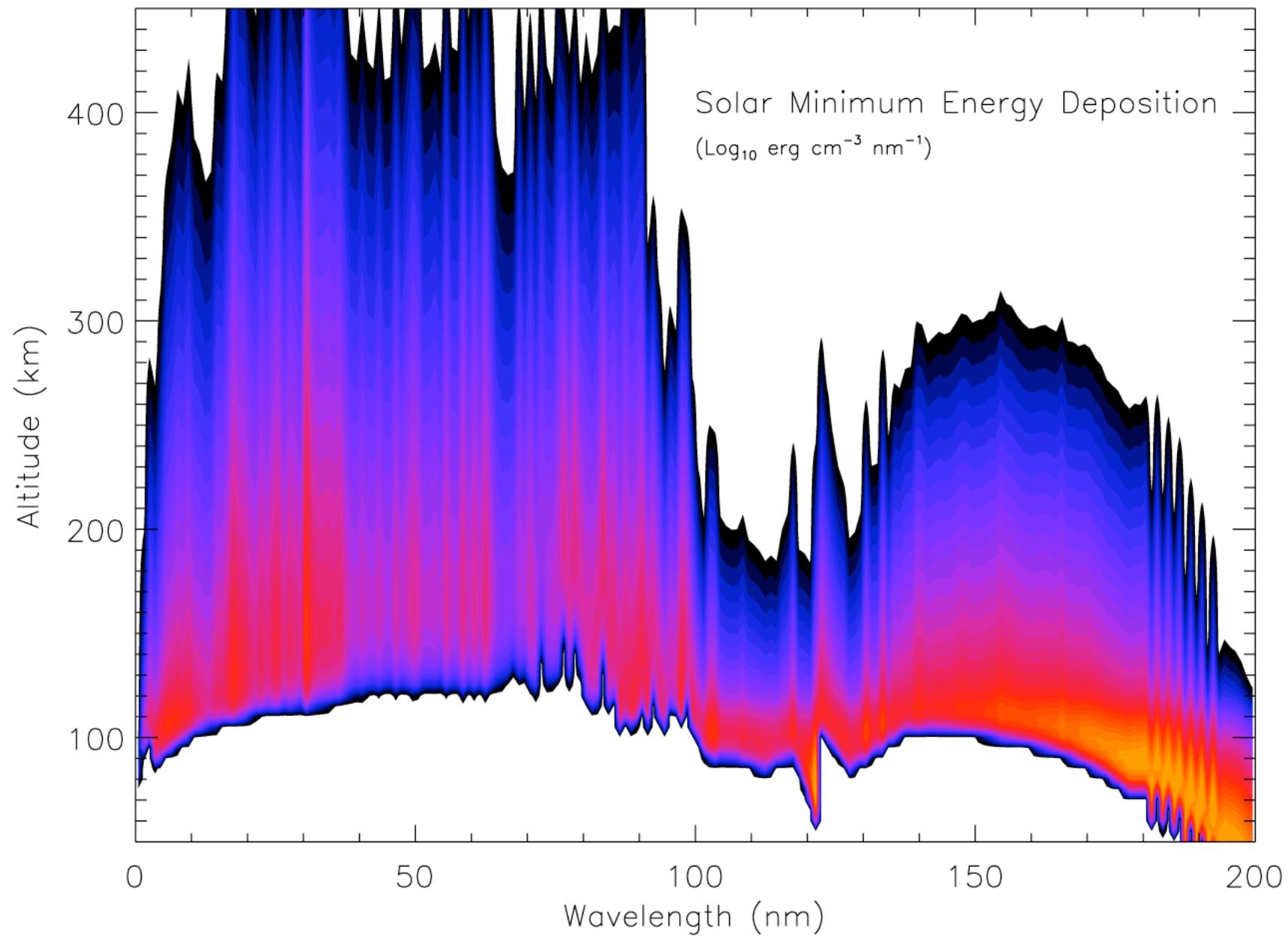
Echappement de Jeans

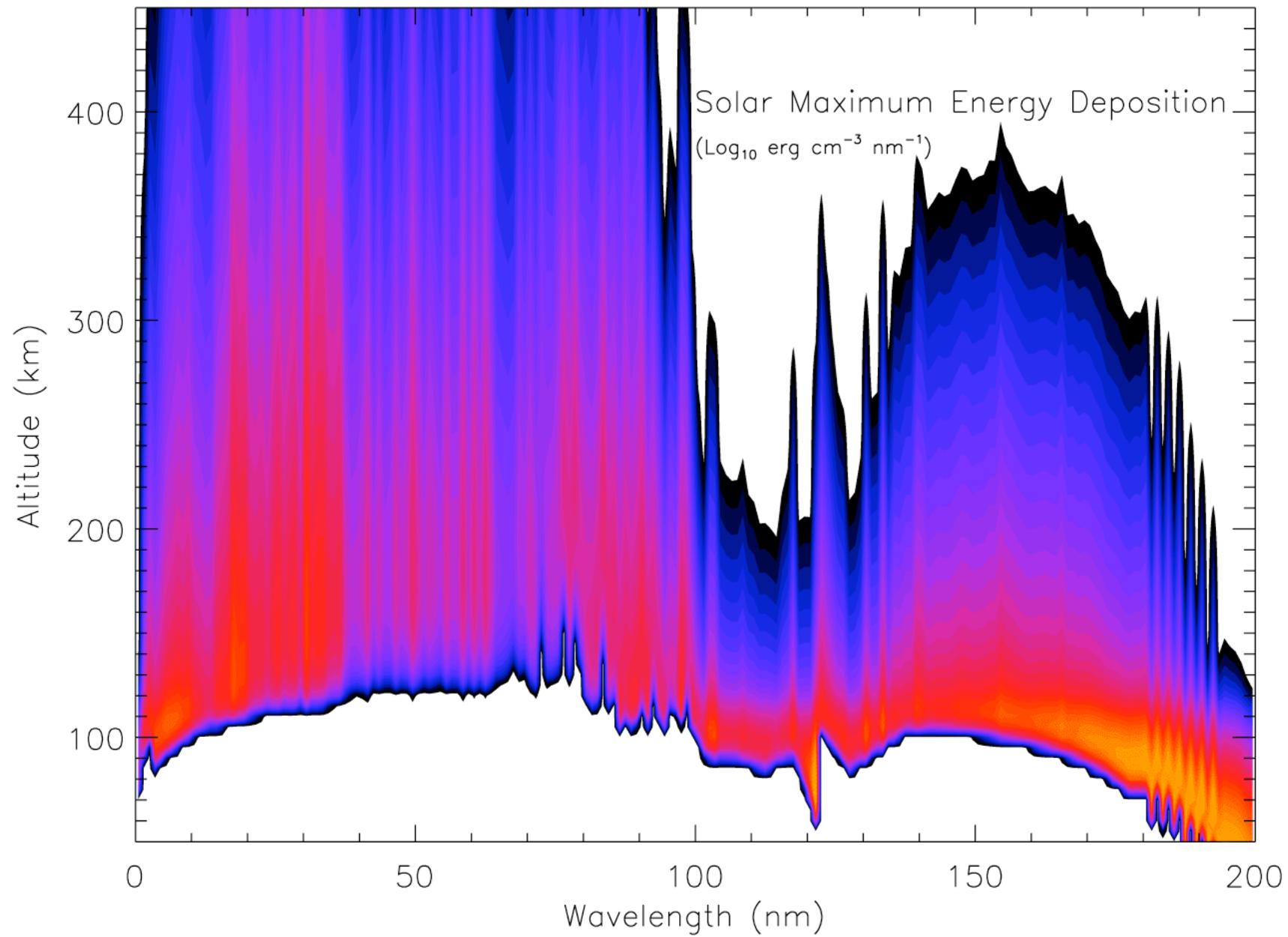
$$\Phi_i = \frac{v_0}{2\sqrt{\pi}} f_i n_{exo} (1 + X_i) e^{-X_i}$$

Exemple: Mars: échappement non thermique de O^+ (Terada, Lammer, ...)









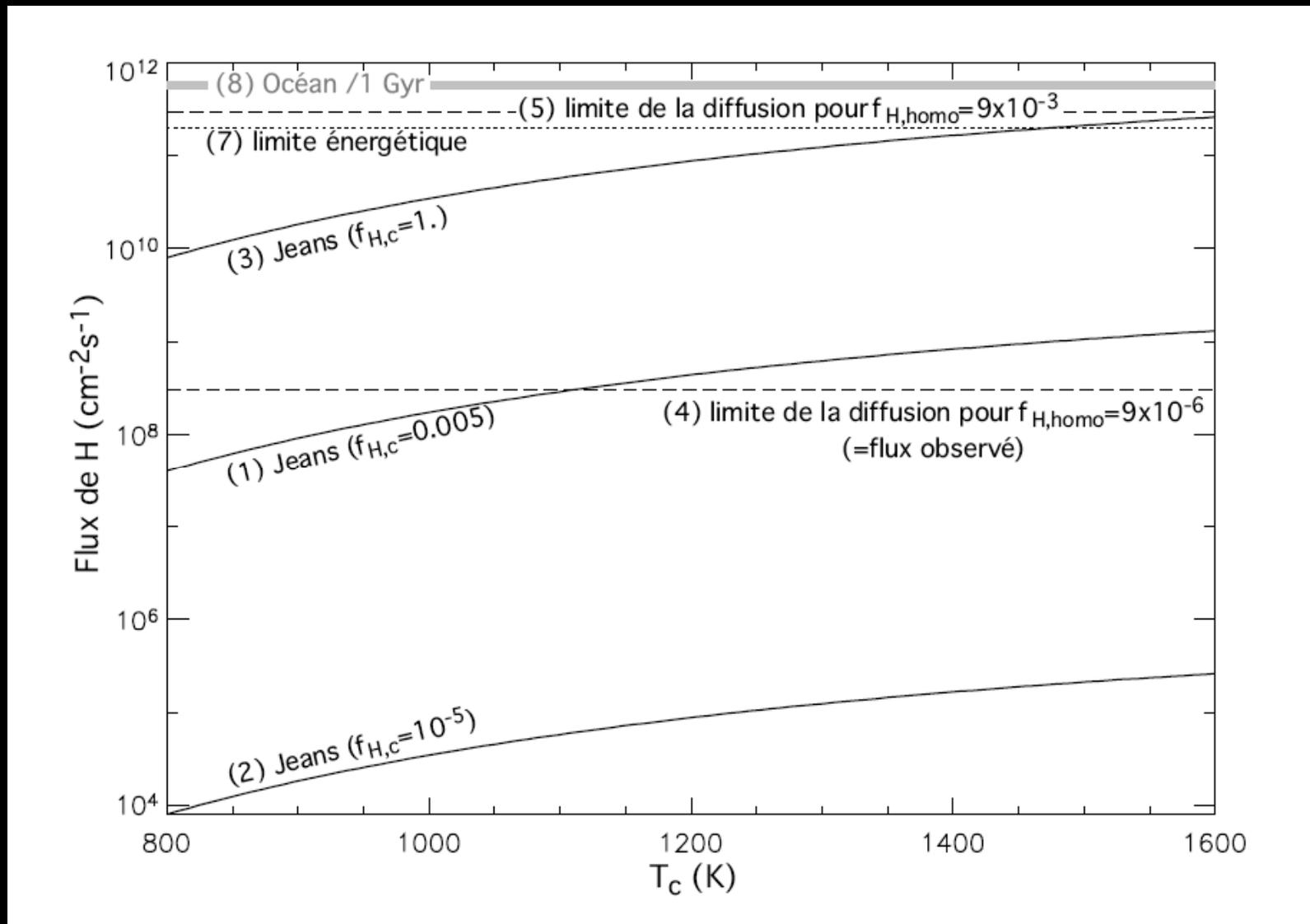
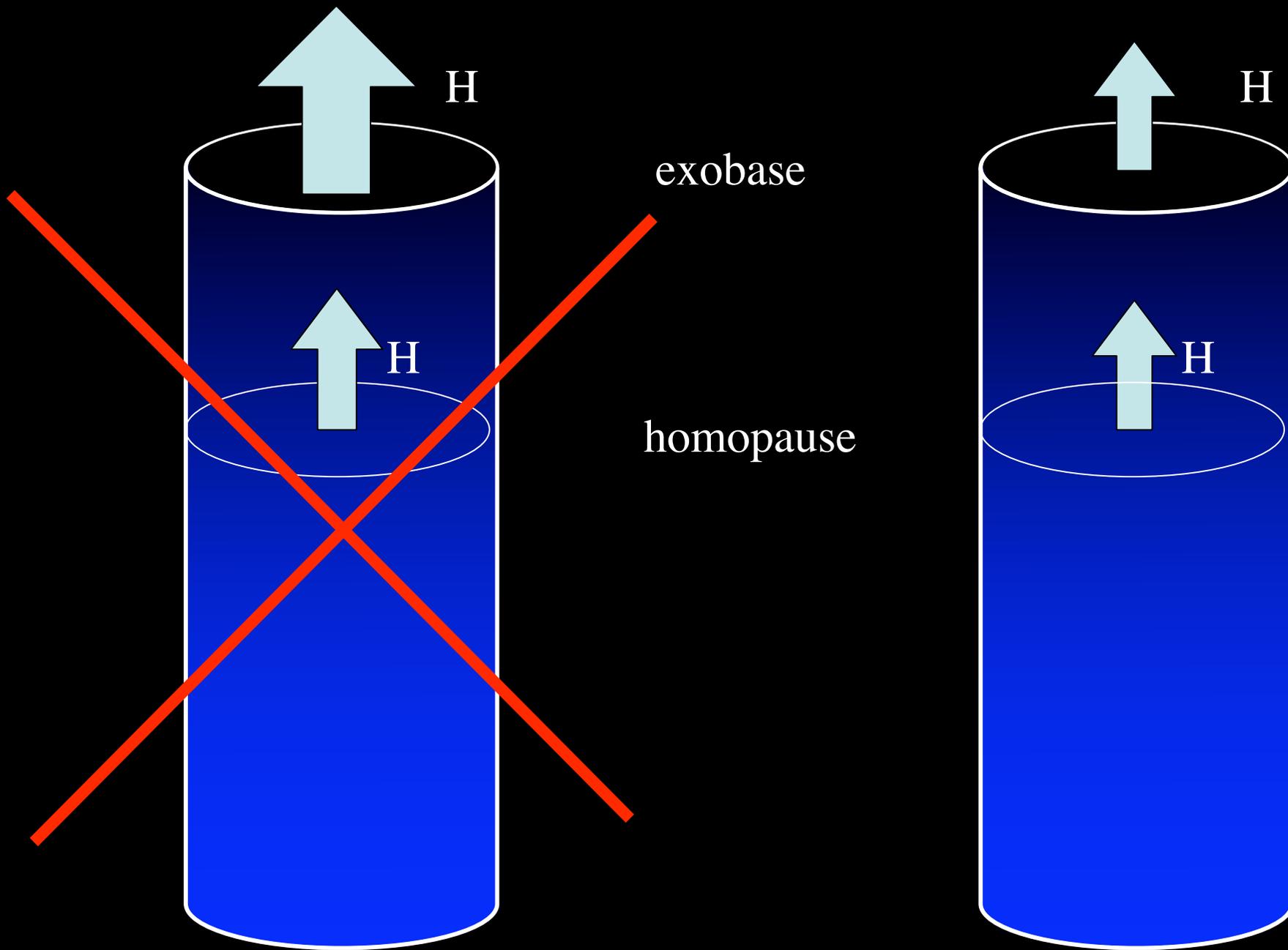


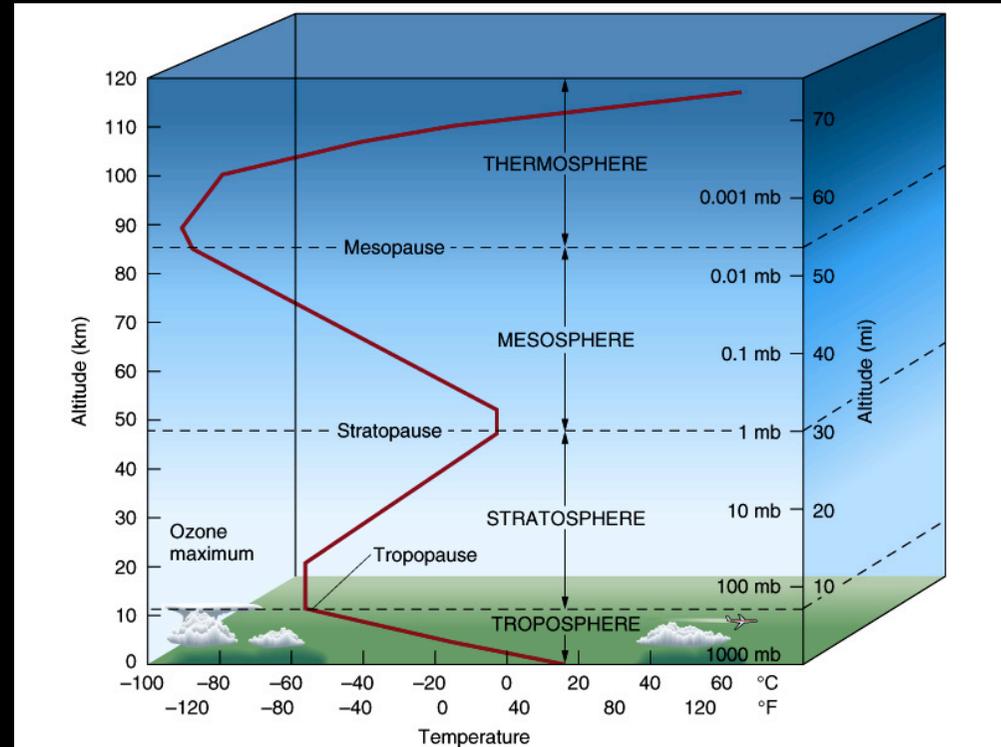
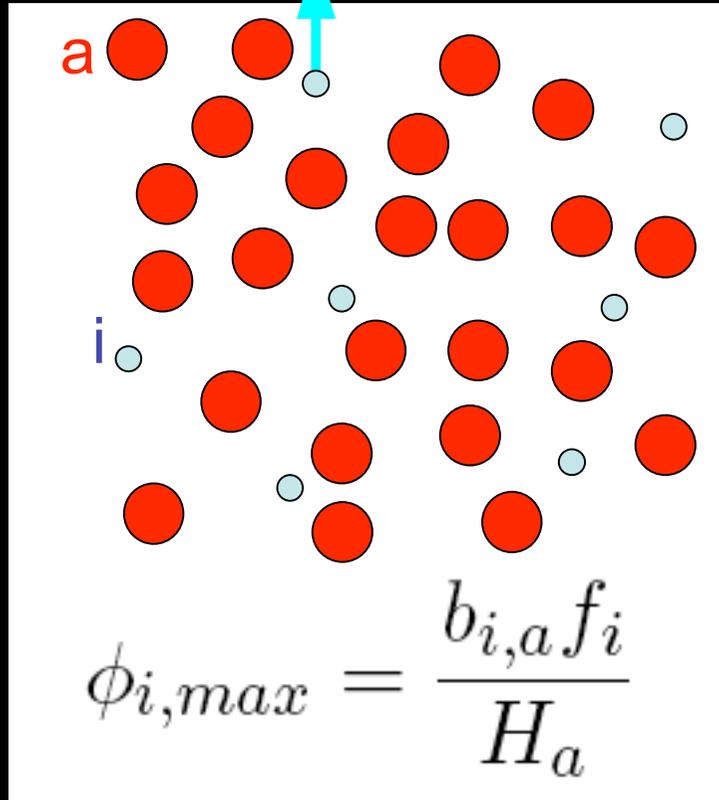
Table 1.: *Caractéristiques des exosphères dans le système solaire. La température critique T_c correspond à un paramètre d'échappement $X = 1.5$ (énergie thermique = énergie gravitationnelle). Si non spécifié, T_c et X sont donnés pour H.*

Planète	T_c (K)	T_e (K)	X
Mercure	724.4	500	2.2
Venus	4307	290	22.3
La Terre	5020	800-1600	9.4-5.0
La Lune	226, 3620 (O)	400	0.8, 13.5 (O)
Mars	1014	240-300	6.3-5.0
Jupiter	145000	700-1000	311-218
Europe	165, 2634 (O)	300	0.8, 13.2 (O)
Saturne	52200	500-800	157-98
Titan	280, 4475 (CH ₄)	180	2.3, 37.3 (CH ₄)
Uranus	18300	800	34
Neptune	22250	700	48
Triton	83, 1329 (CH ₄), 2325 (N ₂)	100	1.2, 19.5 (CH ₄), 34.2 (N ₂)
Pluton	6, 980 (CH ₄), 1700 (N ₂)	100	0.9, 14.6 (CH ₄), 25.6 (N ₂)



Diffusion-limited escape

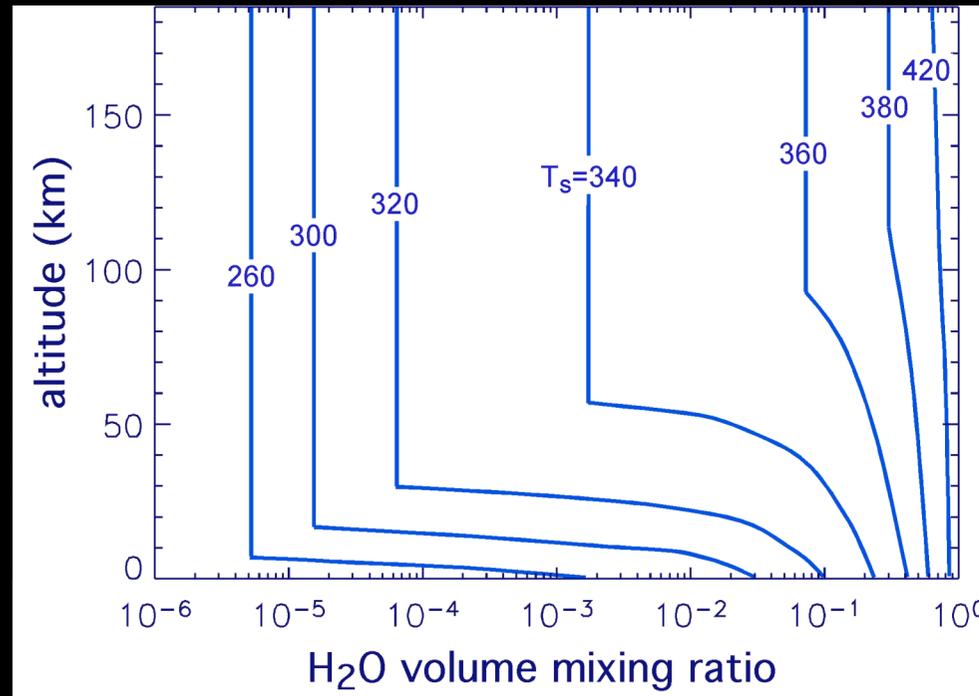
Echappement d'hydrogène (atmosphère actuelle)



Perte d'hydrogène vers l'espace limitée par la diffusion de H, proportionnelle à l'abondance cumulée de H contenue dans toutes les espèces hydrogénées au-dessus de la tropopause $f_H = 2 f(H_2) + 2 f(H_2O) + 4 f(CH_4) + \dots$

$$\Phi_{H,max}(H) = 2.5 \times 10^{13} f_H [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

Echappement d'hydrogène (atmosphère actuelle)

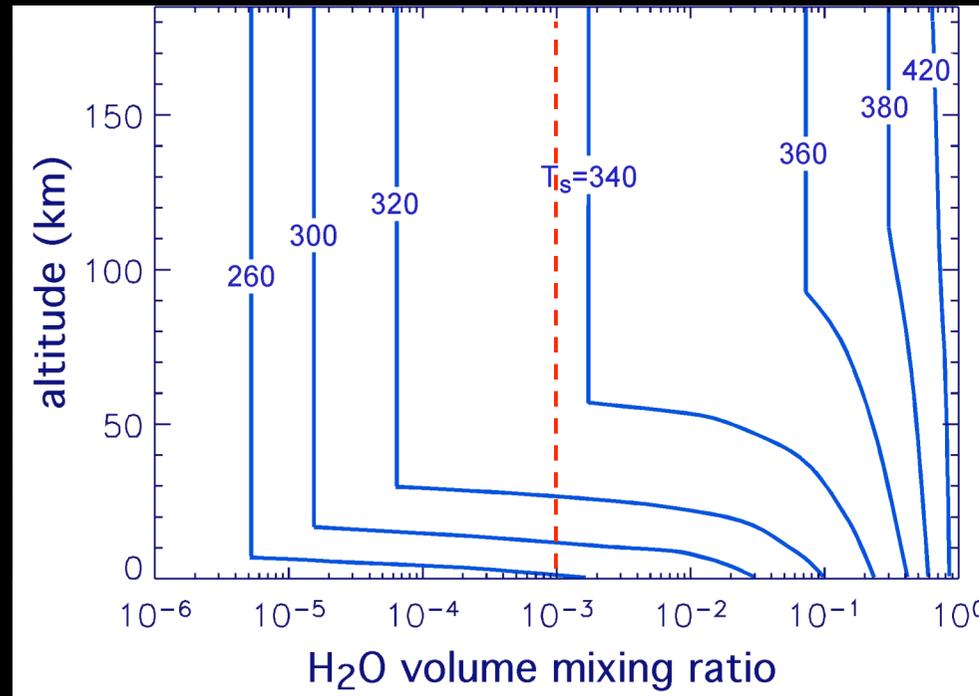


Perte d'hydrogène vers l'espace limitée par la diffusion de H, proportionnelle à l'abondance cumulée de H contenue dans toutes les espèces hydrogénées au-dessus de la tropopause $f_{\text{H}} = 2 f(\text{H}_2) + 2 f(\text{H}_2\text{O}) + 4 f(\text{CH}_4) + \dots$

$$\Phi_{\text{H,max}}(\text{H}) = 2.5 \times 10^{13} f_{\text{H}} = 3 \times 10^8 \text{ [cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]}$$

Environ 1 m d'eau / 10⁹ ans perdu dans l'espace

Echappement d'hydrogène (atmosphère actuelle)

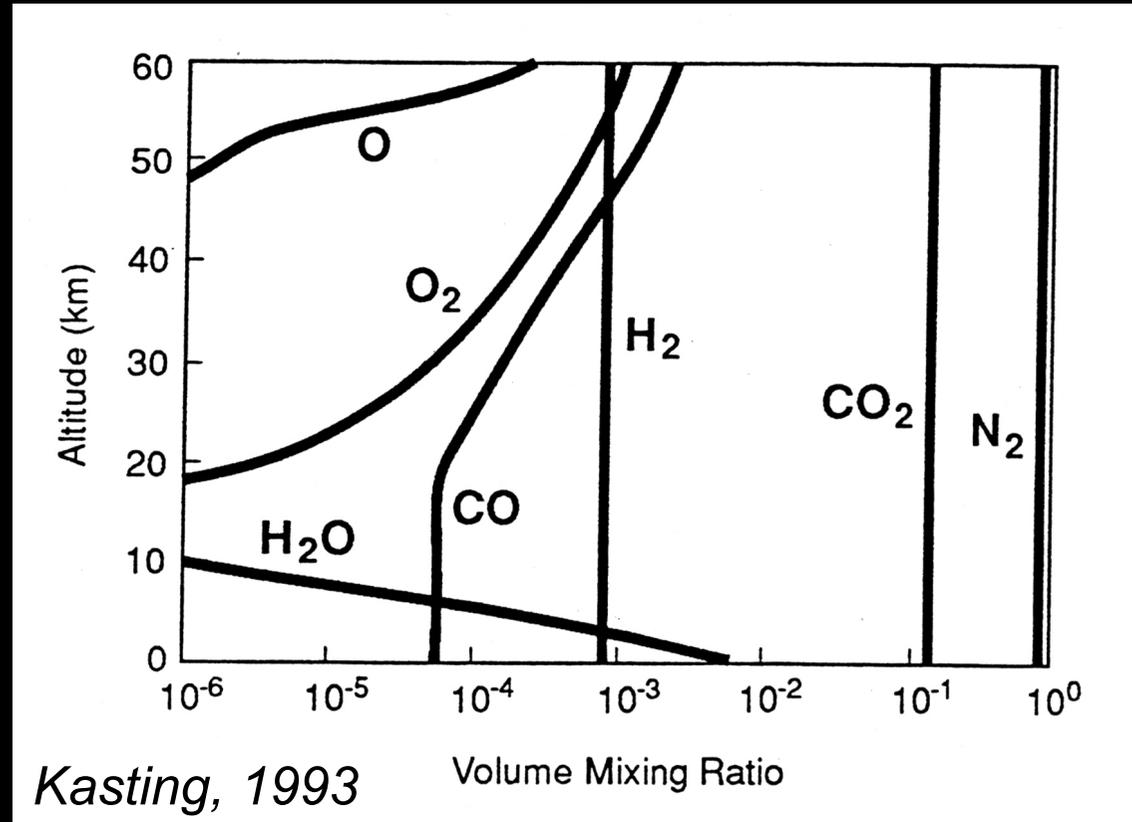


$$\Phi_{\text{H,max}}(\text{H}) = 2.5 \times 10^{13} f_{\text{H}} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

Si $f_{\text{H}} > 10^{-3}$, l'hydrogène de 500 m d'eau est perdue en 0.5 Ga → 50 bars de O₂ résiduels

$$\Phi_{\text{H,max}}(\text{H}) = 2.5 \times 10^{13} f_{\text{H}} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

$$= \Phi_{\text{degasage}}(\text{H})$$

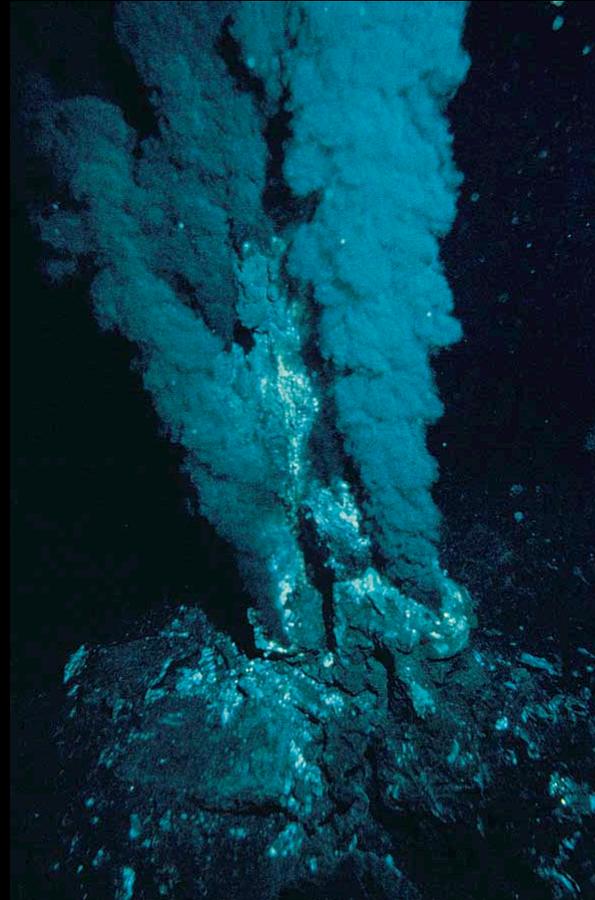


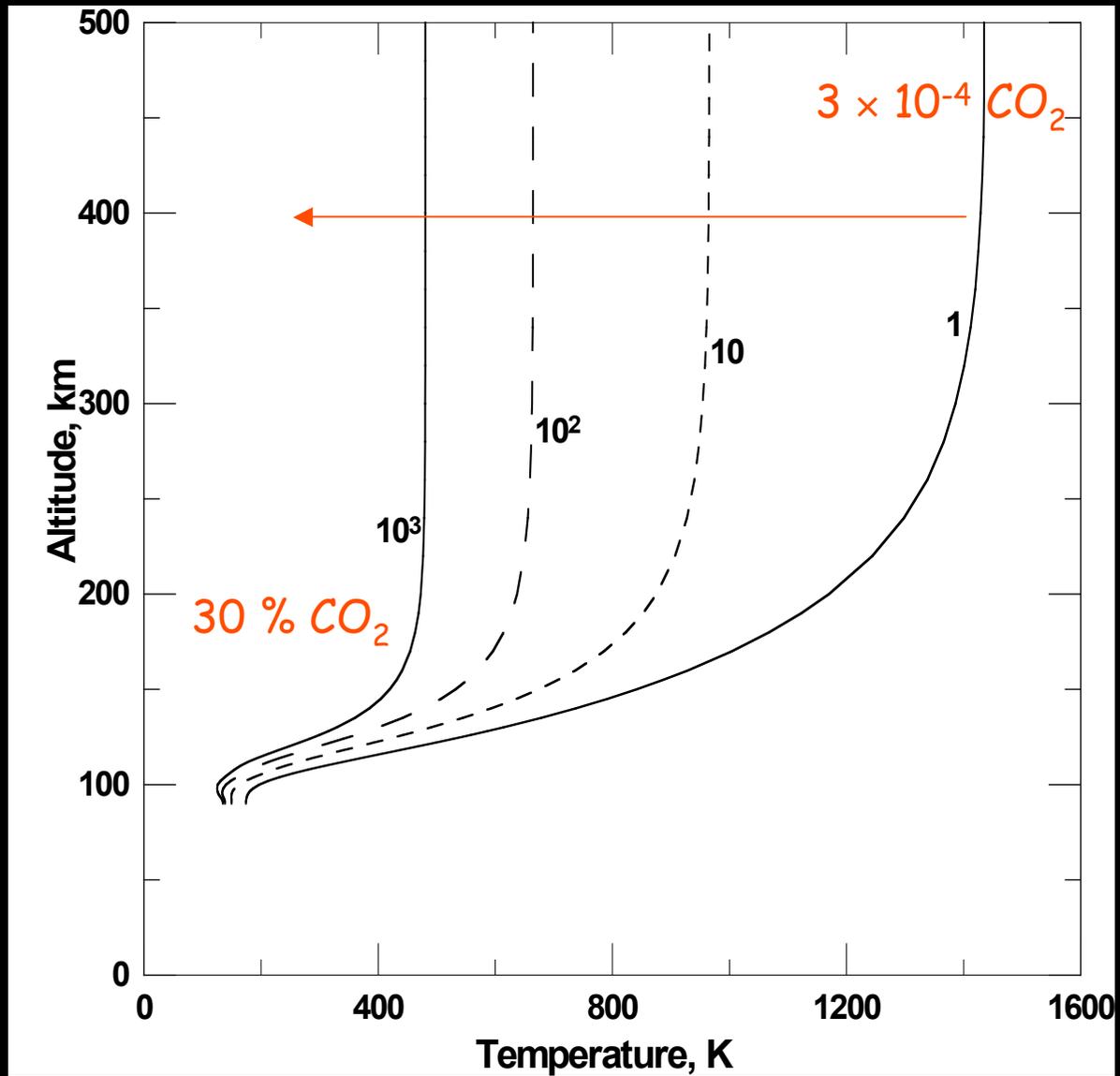
La (photo)chimie dans une atmosphère de N₂-CO₂-H₂O ne donne rien d'intéressant du point de vue prébiotique...
(H₂CO...)

Besoin d'ingrédients extraterrestres...

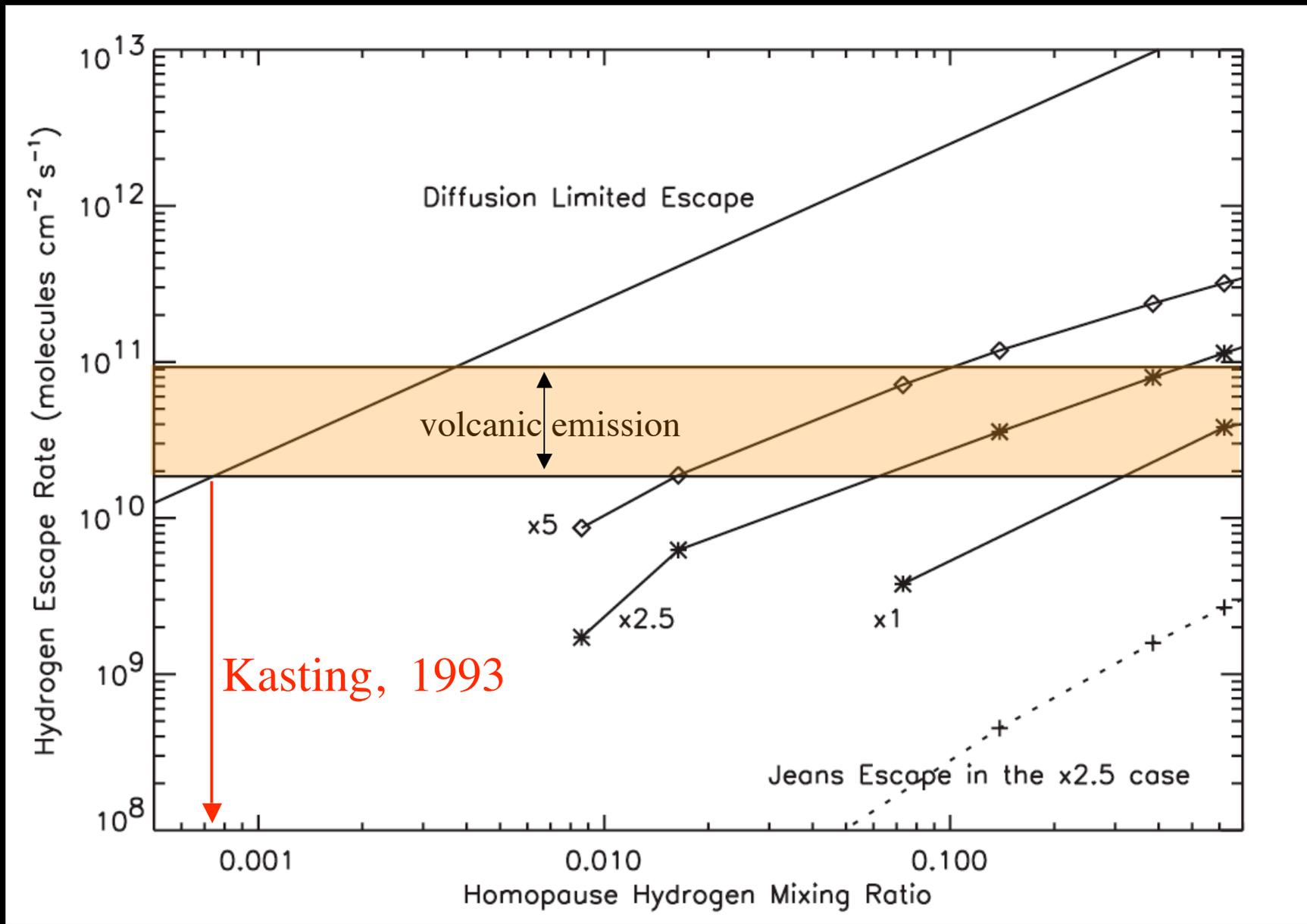


...ou *intraterrestres*...



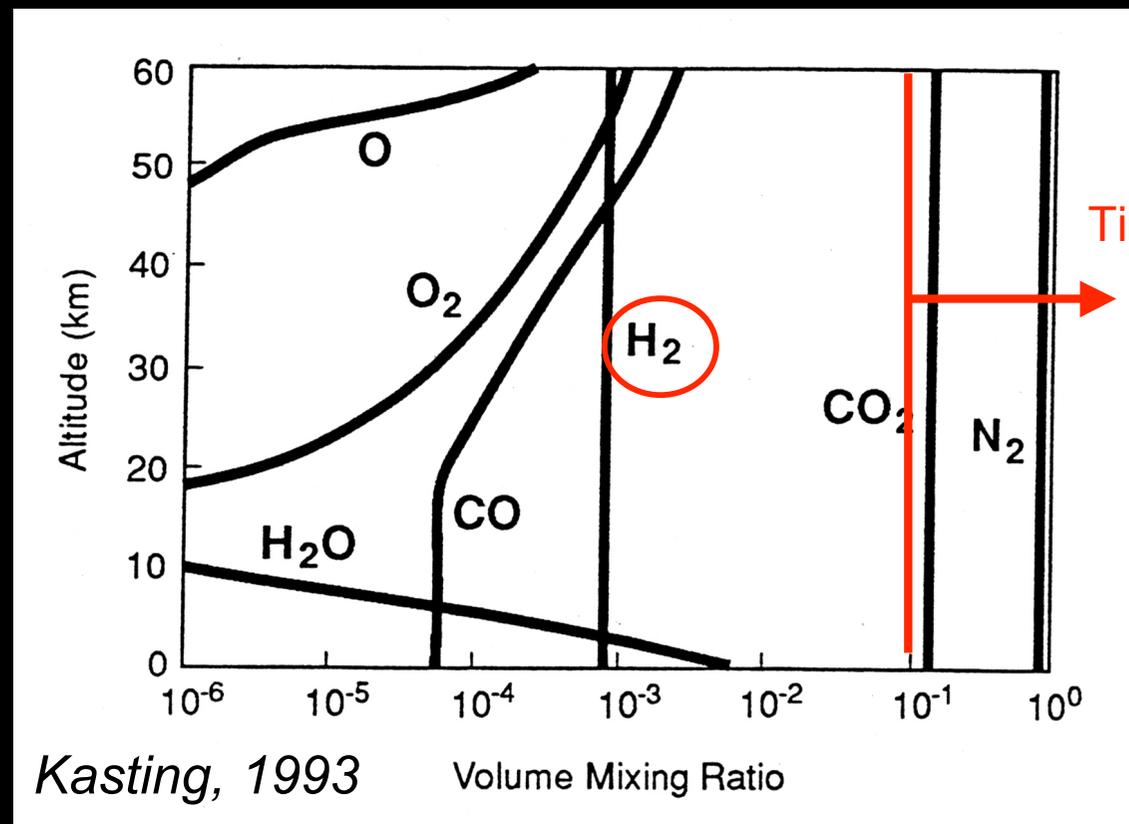


Kulikov et al.



H₂

H₂ < 1 mbar si la diffusion seule limite l'échappement (Kasting, 1993) MAIS dans une atmosphère anoxique dominée par CO₂ et H₂, c'est l'énergie thermique du gaz (la température exosphérique) qui limite l'échappement. En appliquant un modèle d'échappement hydrodynamique à une atmosphère dominée par H₂ atmosphere, Tian et al trouvent un niveau de H₂ > 0.1 bar (> 1bar pour un dégazage plus important).



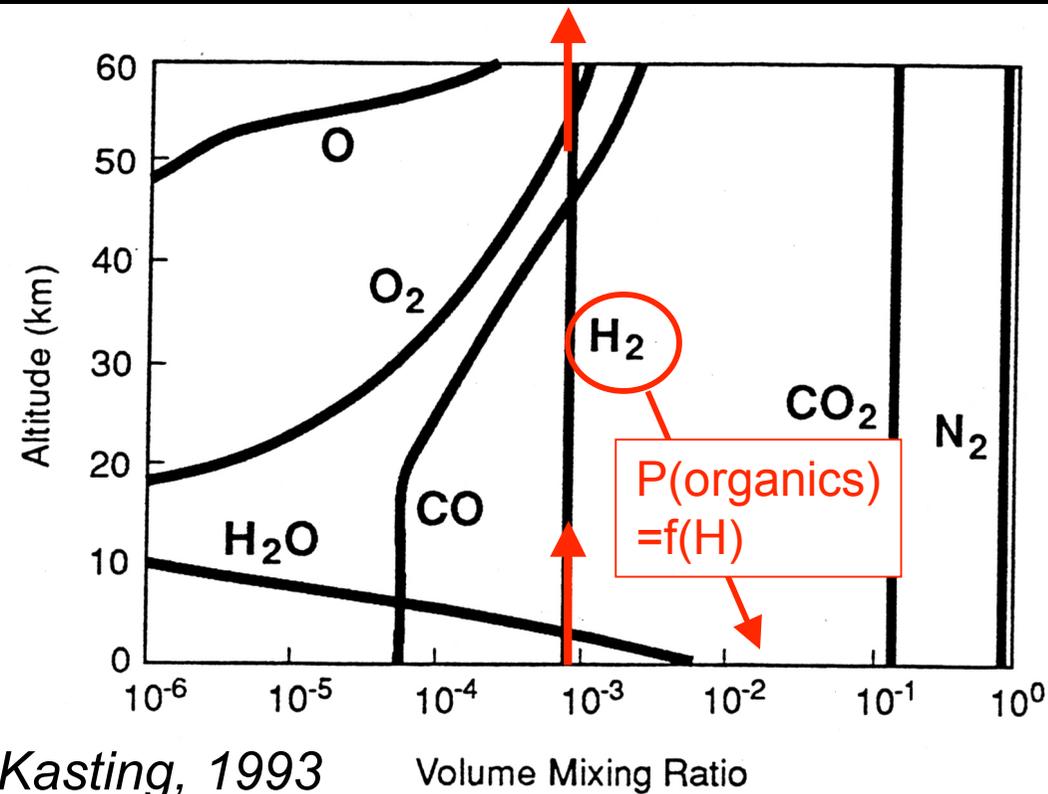
Autre problème (soulevé par Robert Pascal, Montpellier) :

fixer de l'abondance de H par un bilan échap= $f(H)$ =dégazage avant de faire évoluer photochimiquement l'atmosphère, suppose que le photochimie n'affecte pas la quantité de H atmosphérique

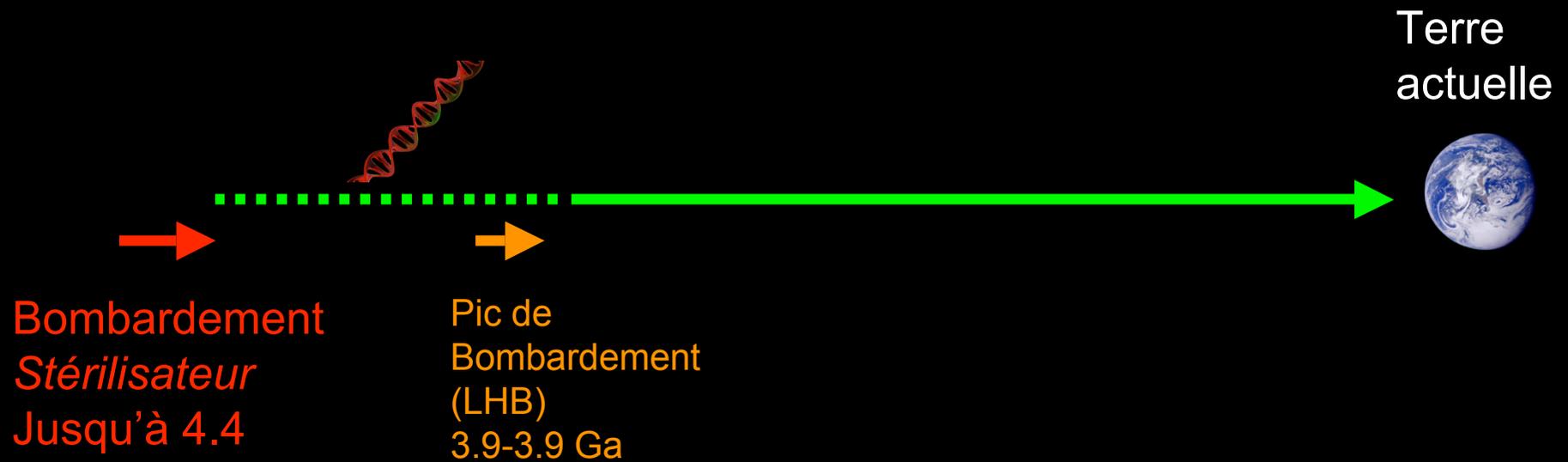
Or la production et la déposition de matière organique peut représenter une perte de H importante.

Peu de H → Pas de production de molécules prébiotique

Production efficace de molécules prébiotiques → état stationnaire avec peu de H



Un scénario plus *ouvert*...



Autorisons-nous à considérer l'éventualité d'une origine très précoce de la vie terrestre (par exemple à 4.4-4.3 Ga)

Qu'est ce que cela change au niveau de la composition de l'atmosphère ?

Autorisons-nous à considérer l'éventualité d'une origine très précoce de la vie terrestre (par exemple à 4.4-4.3 Ga)

Qu'est ce que cela change au niveau de la composition de l'atmosphère ?

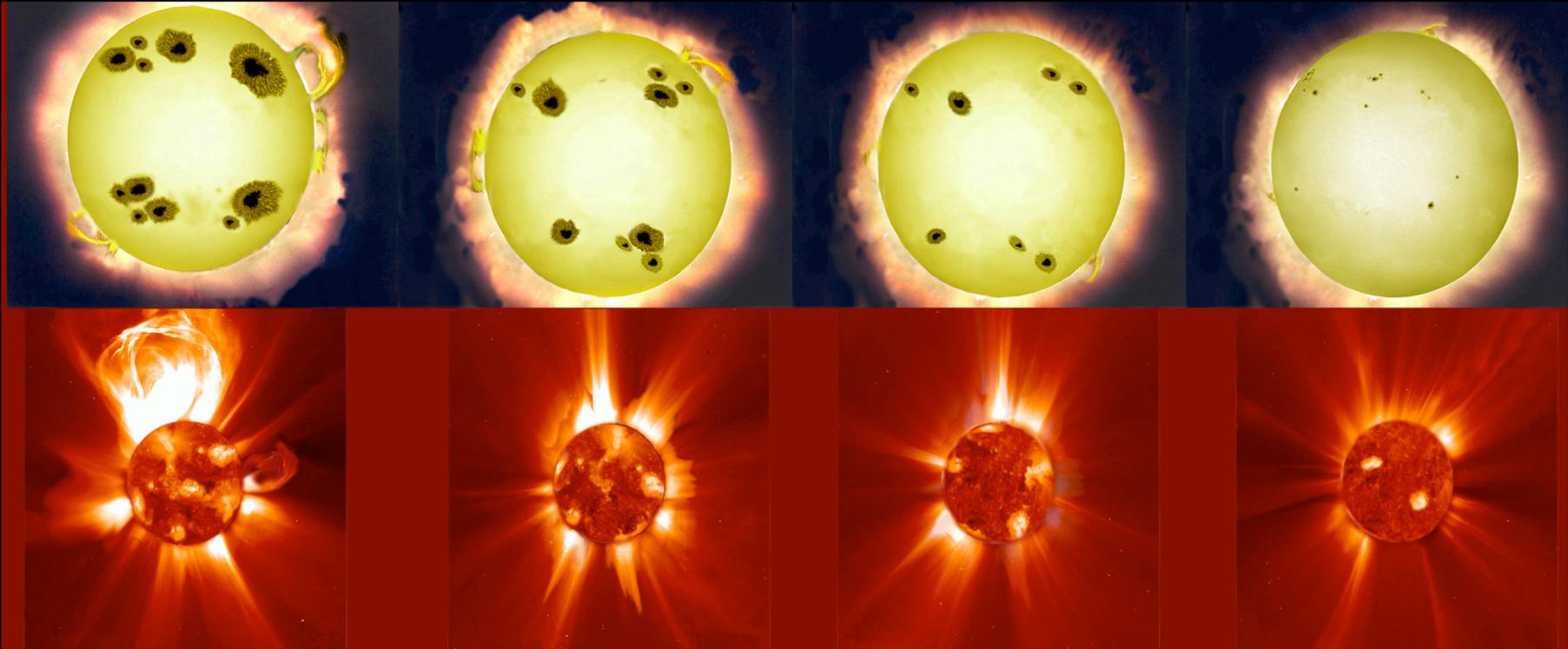
Géologie différente, dégazage plus réducteur:

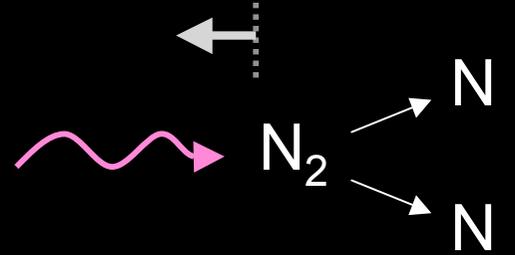
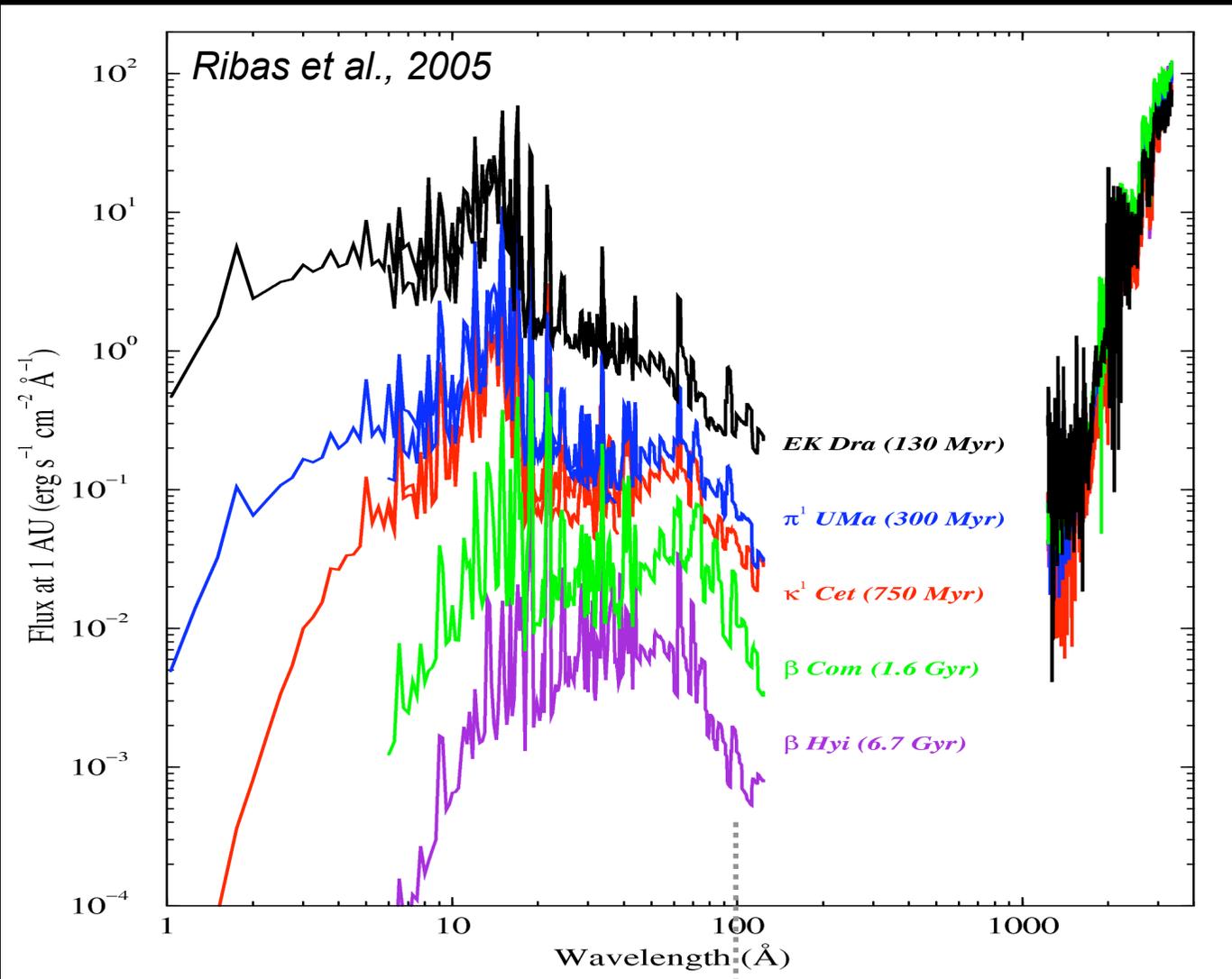
Oxydation de Fe par $H_2O \rightarrow$ libération de $H_2 \rightarrow$ de CH_4 (NH_3)

(serpentinisation) cf. Exposé de F. Albarède

Soleil plus actif:

- échappement plus efficace
- Photochimie différente





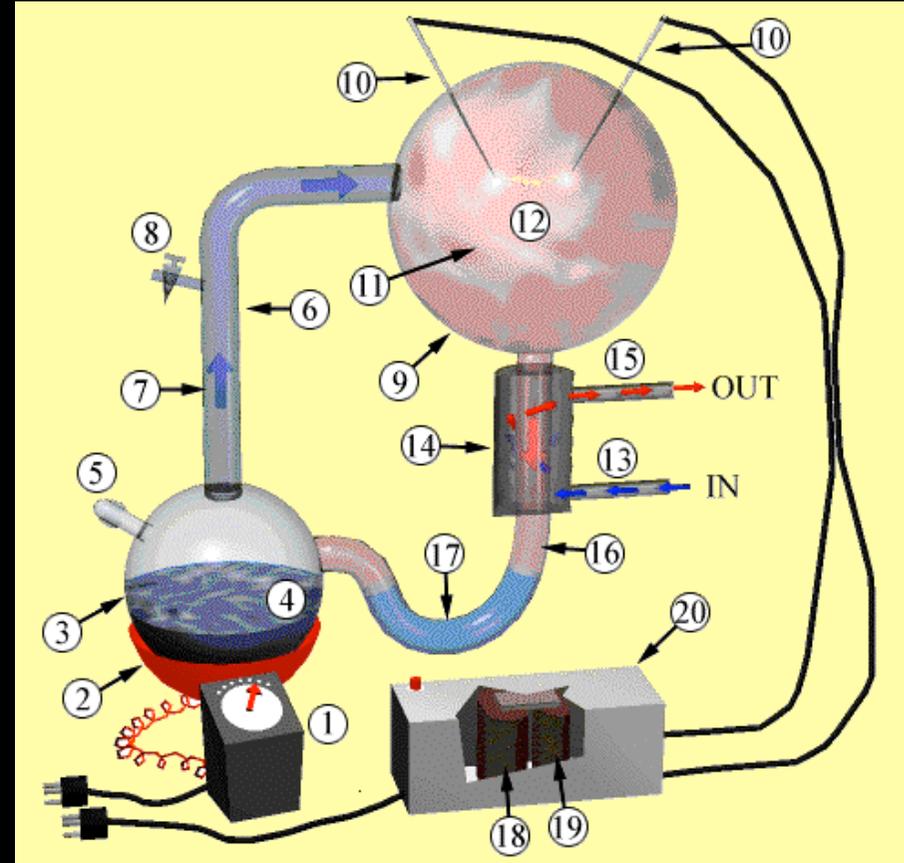
Atmosphère et synthèse prébiotique

L'expérience de Urey-Miller
(1953)

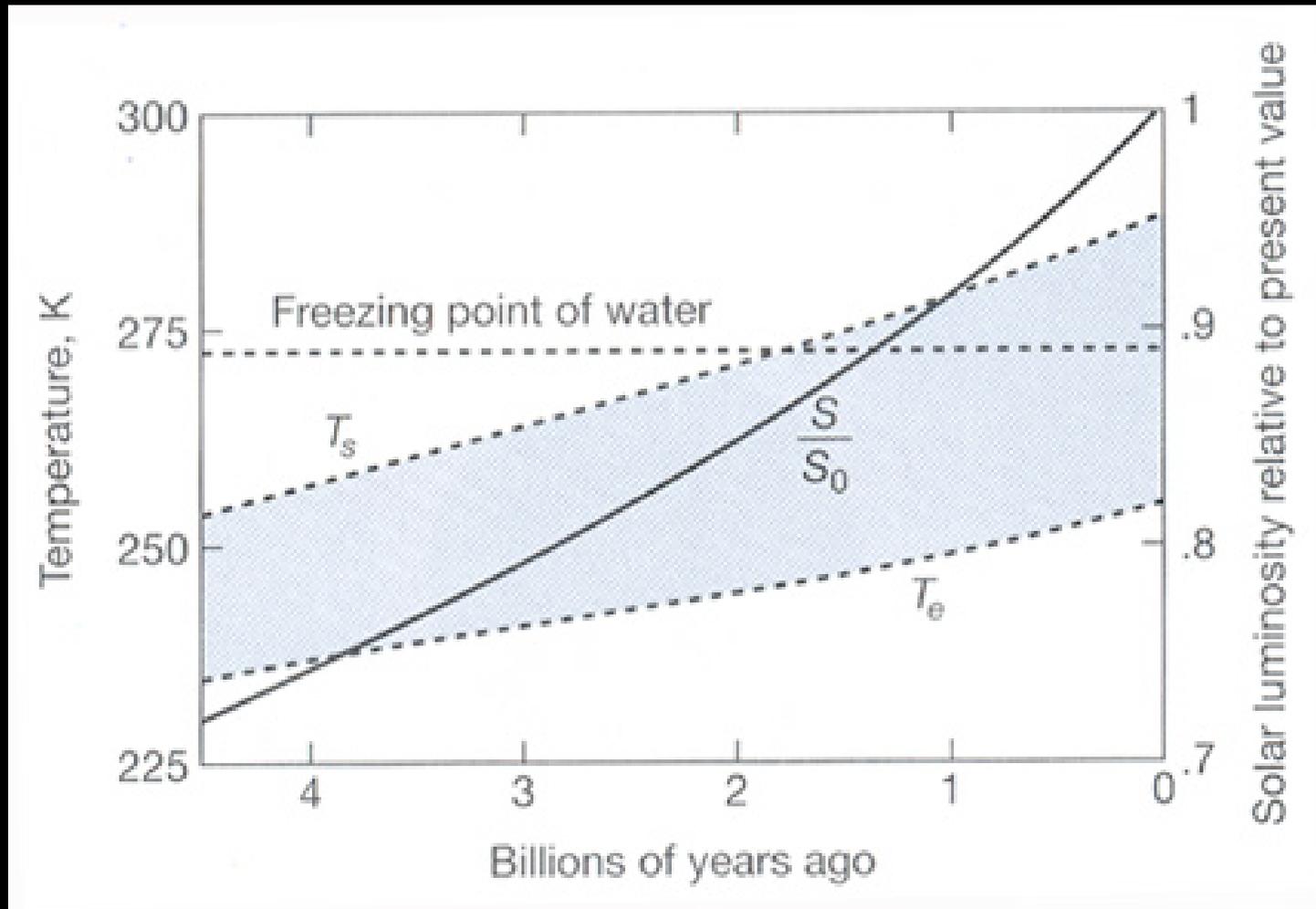
- H_2 , CH_4 , (NH_3 ou N_2)
- eau liquide
- décharges électriques

→ 10-15 % du carbone initial est transformé en matière organique en quelques jours

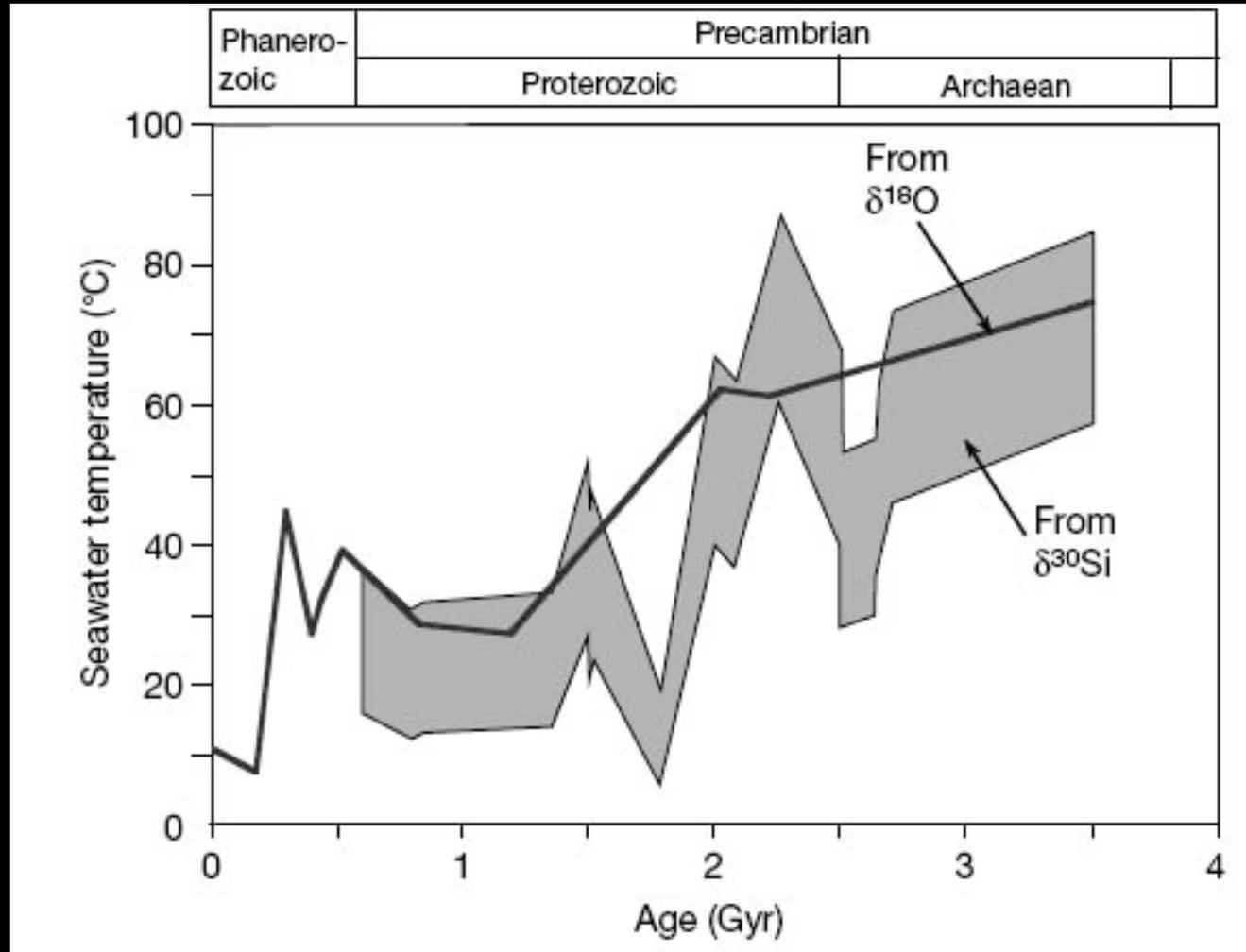
→ Acides aminés



« paradoxe » du Soleil jeune

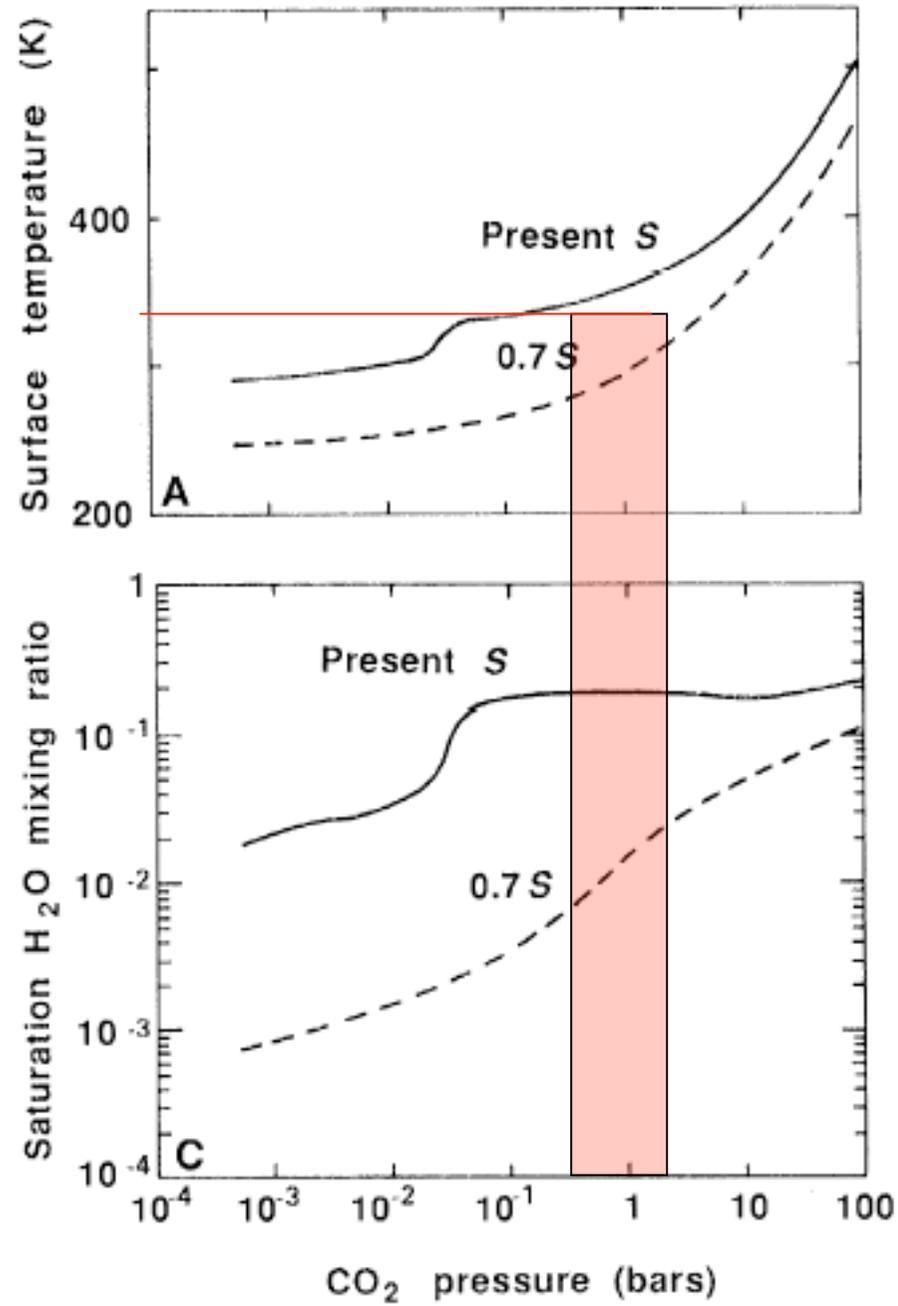


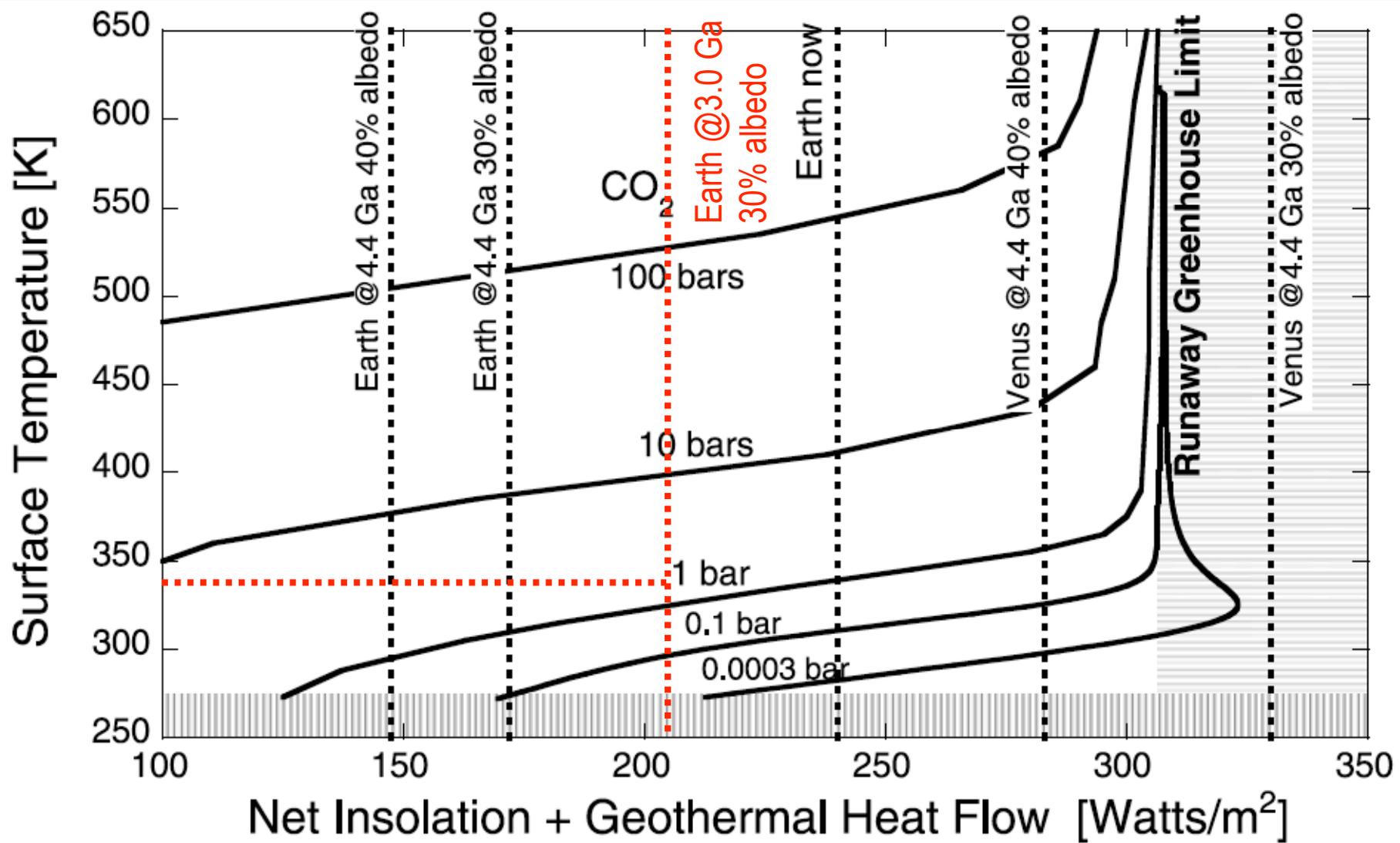
Température des océans : $\delta^{30}\text{Si}$ ($^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$)



Robert and Chaussidon, 2006, Nature

*Kasting et Ackerman
1986*





Zahnle et al., 2008

Methane and climate

**PRESENT O₂-RICH
ATMOSPHERE**

Abundance : 2×10^{-6}

**minor
greenhouse effect**

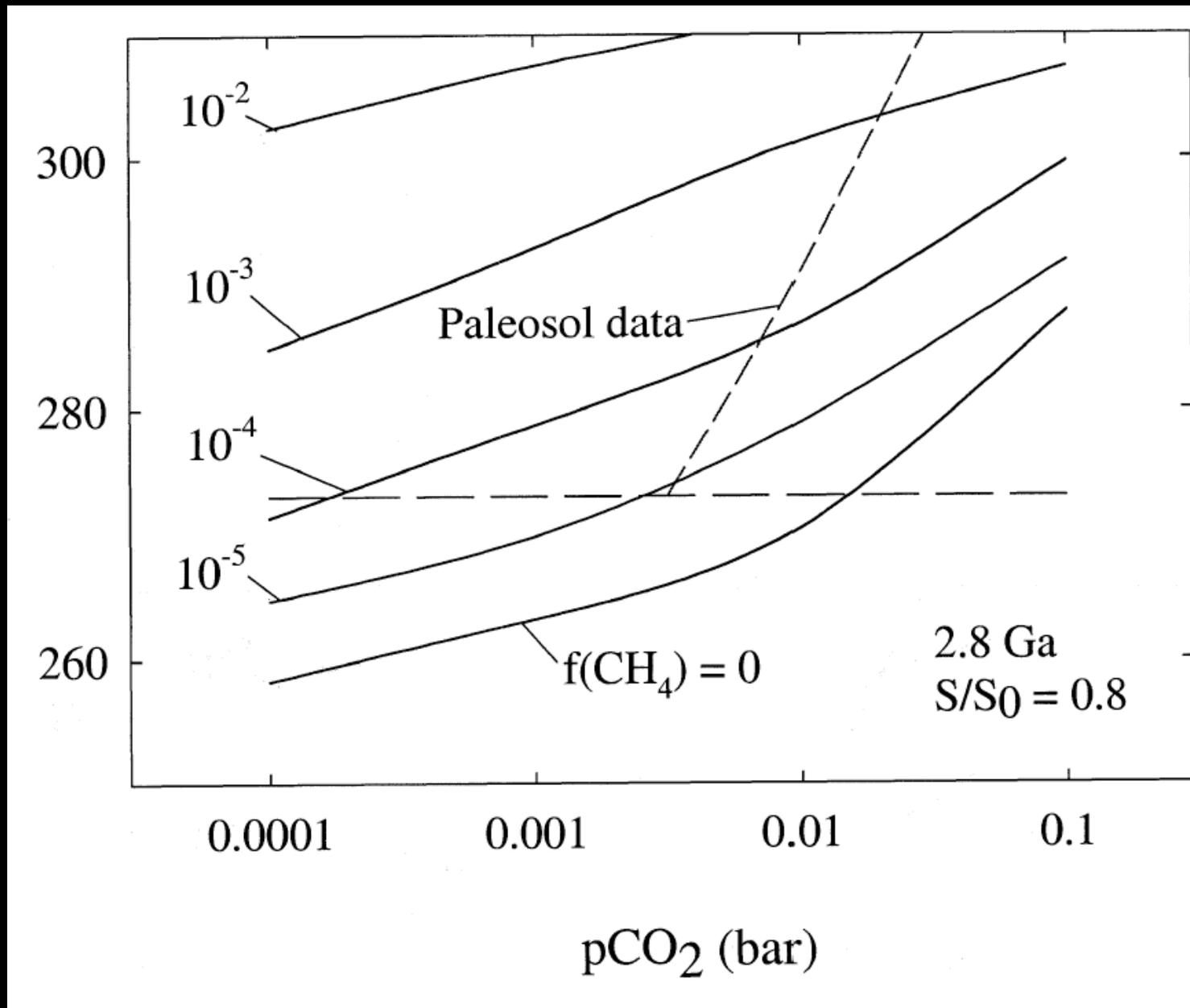
**PRIMITIVE ANOXIC
ATMOSPHERE**

**Abundance : 10^{-4} - 10^{-3}
(Selsis, 2000)**

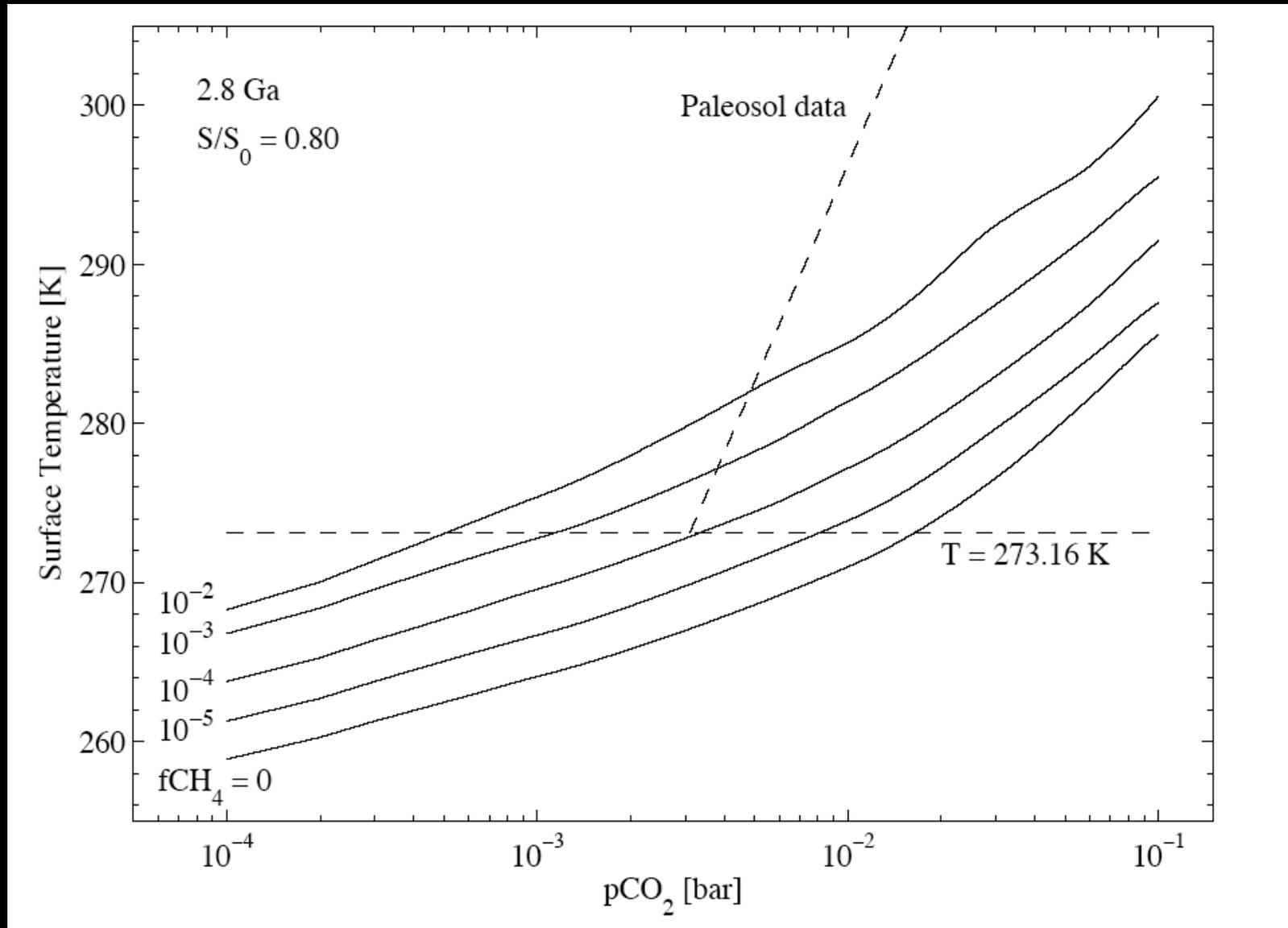
**STRONG
greenhouse effect ?
(Pavlov et al., 2000)**



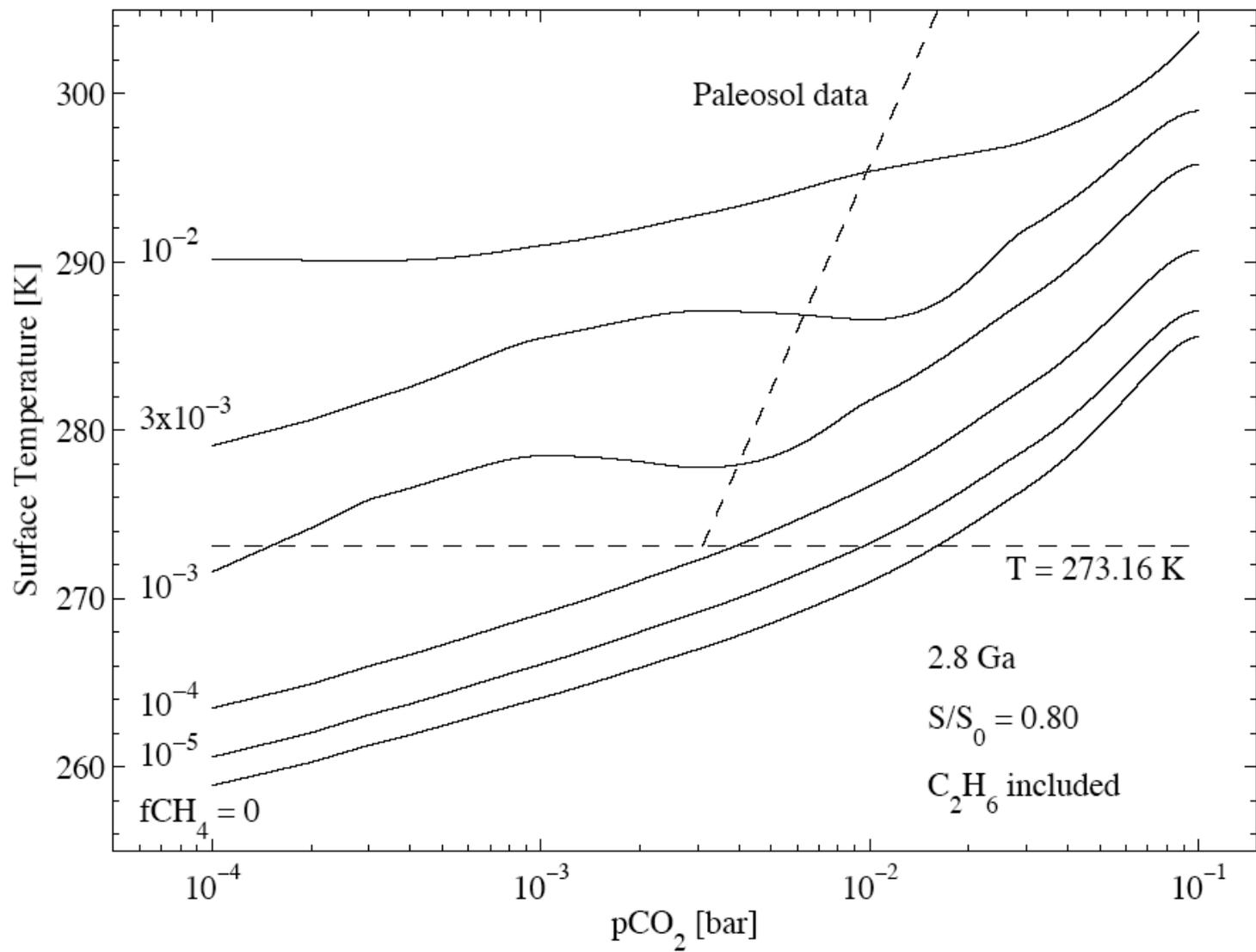
↑ Present-day biogenic flux of methane : 2×10^8 tons/yr ↑



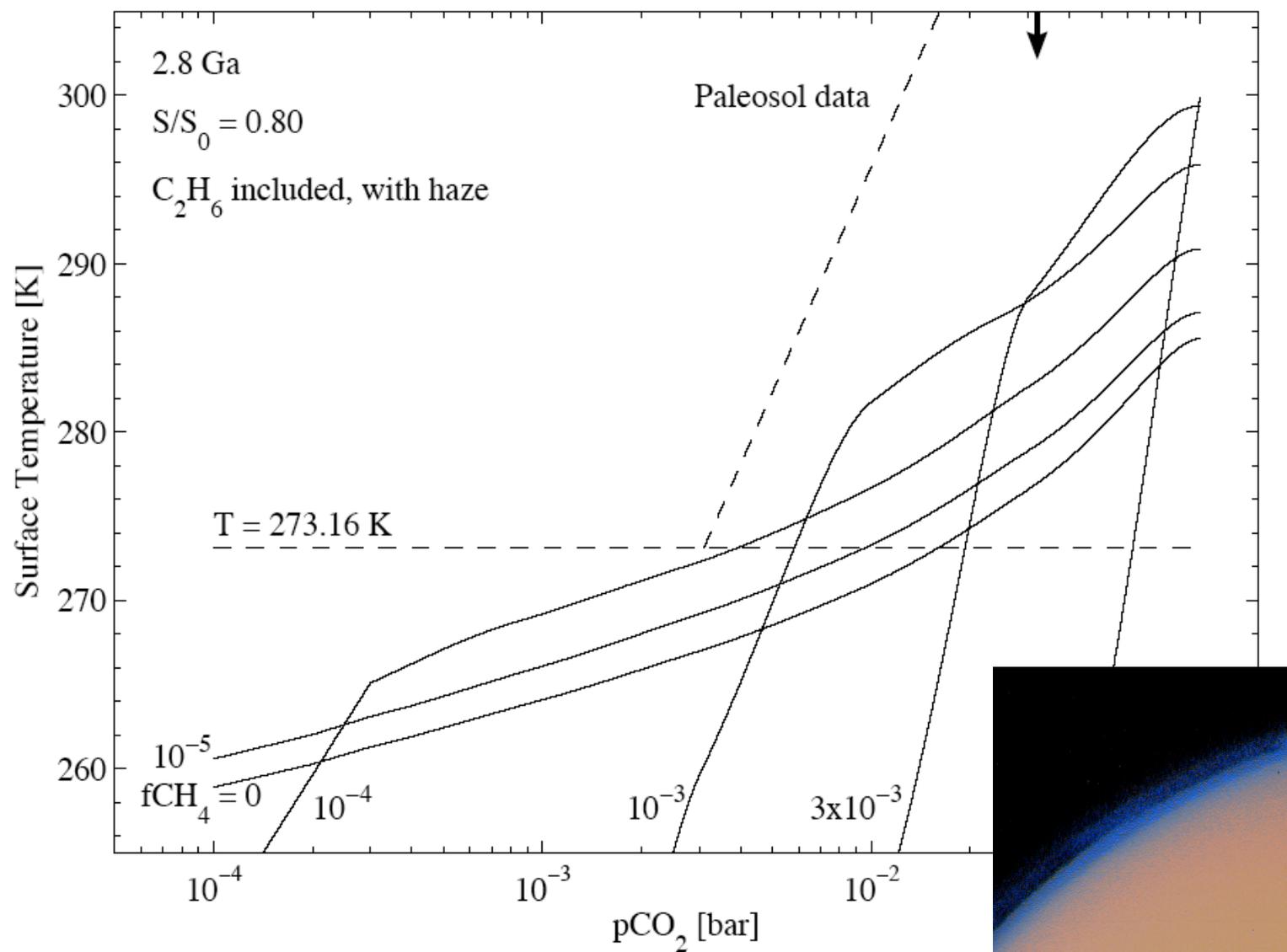
Pavlov et al. (2000)



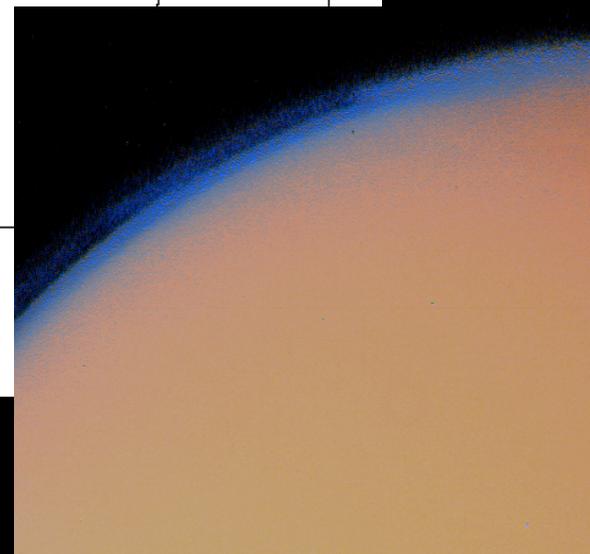
Haqq-Misra et al. (submitted)



Haqq-Misra et al. (submitted)



Haqq-Misra et al. (submitted)

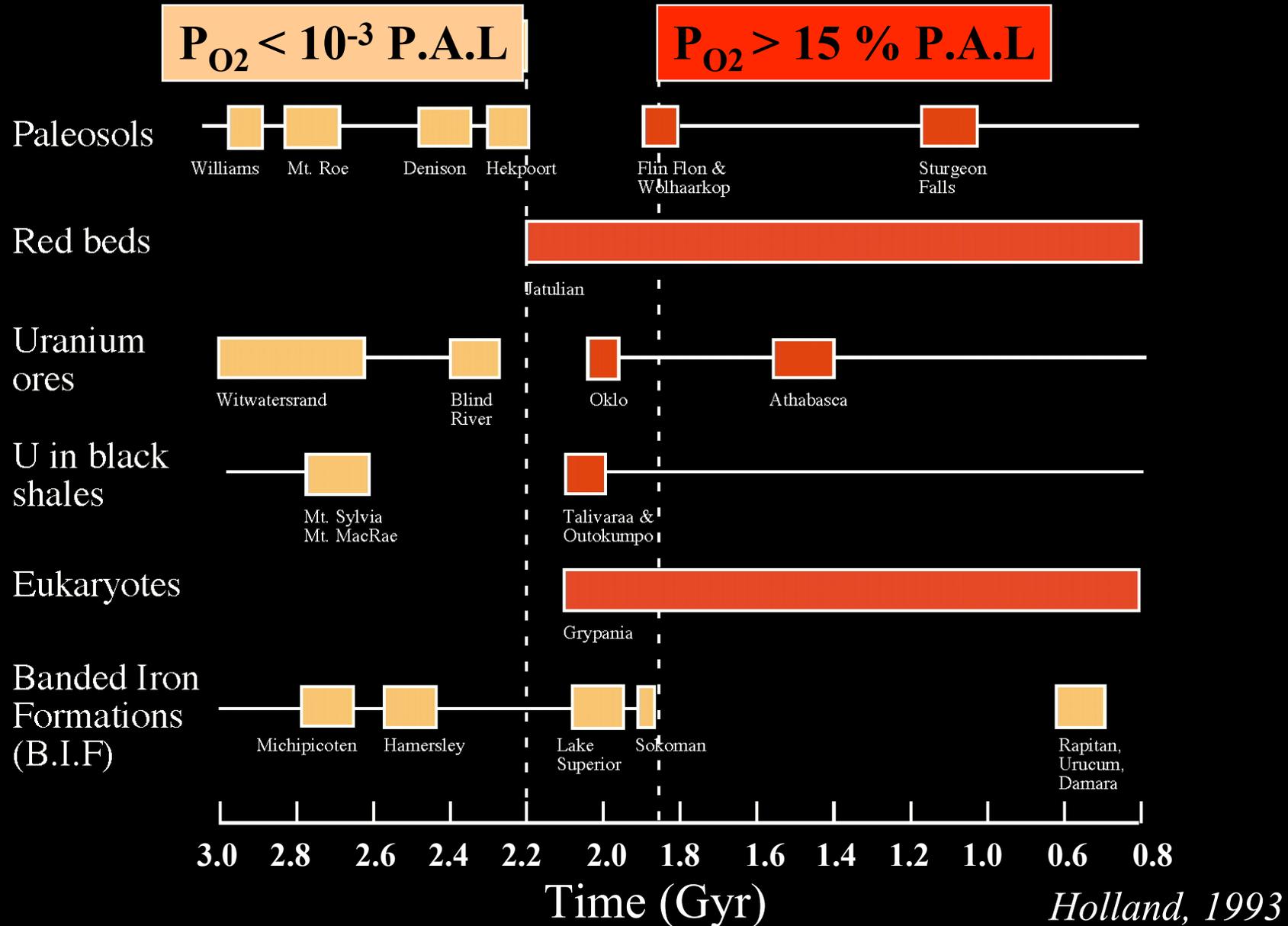


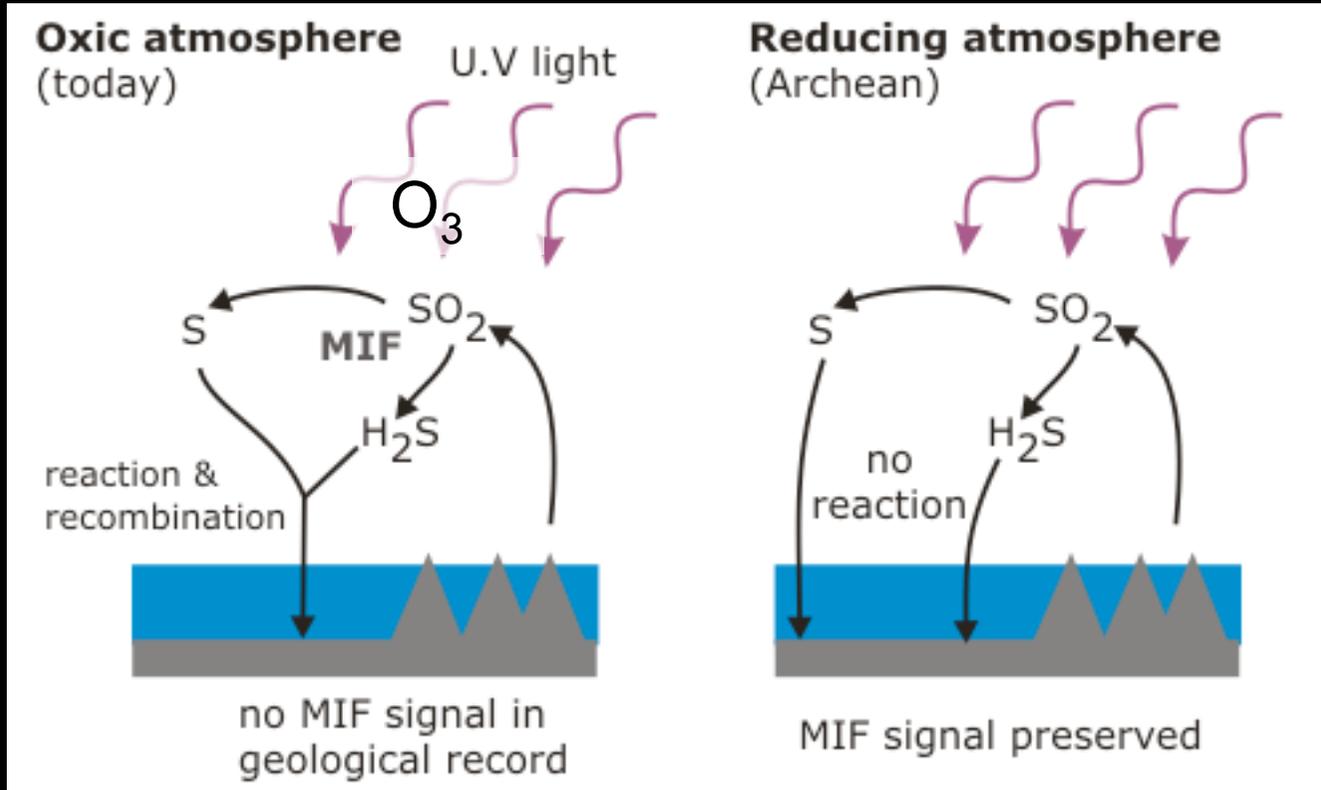
Chauffer l'Archéen avec le CO_2 requiert 1-2 bars

Auquel s'ajoute 0.5 bar de H_2O , et 0.8 bars de N_2

Une contrainte sur la pression de surface serait donc très précieuse !

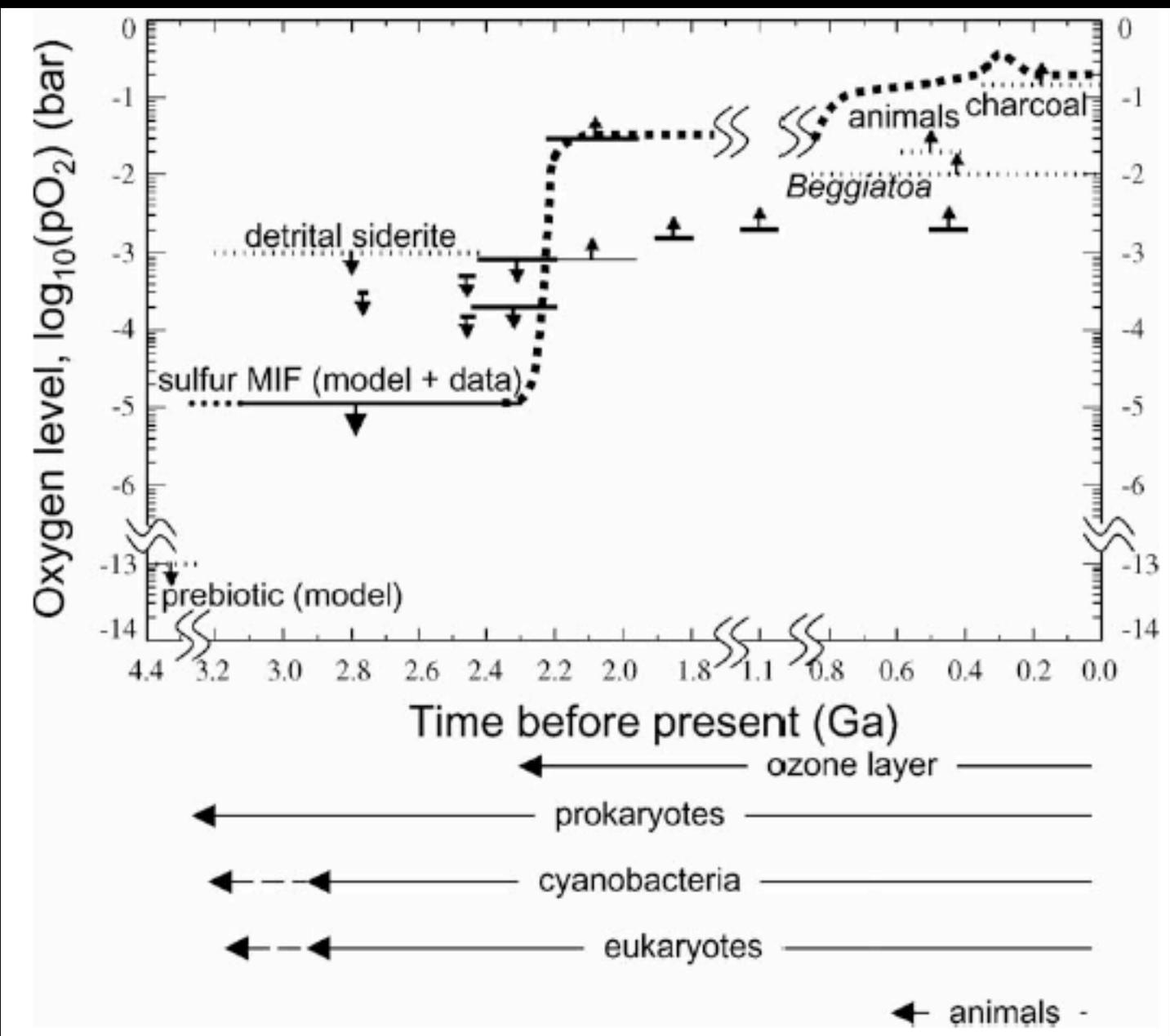
The Rise of the Oxygen



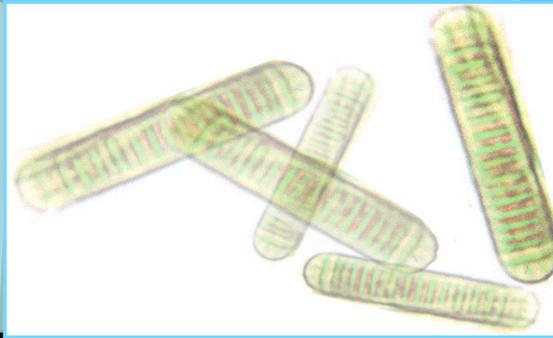
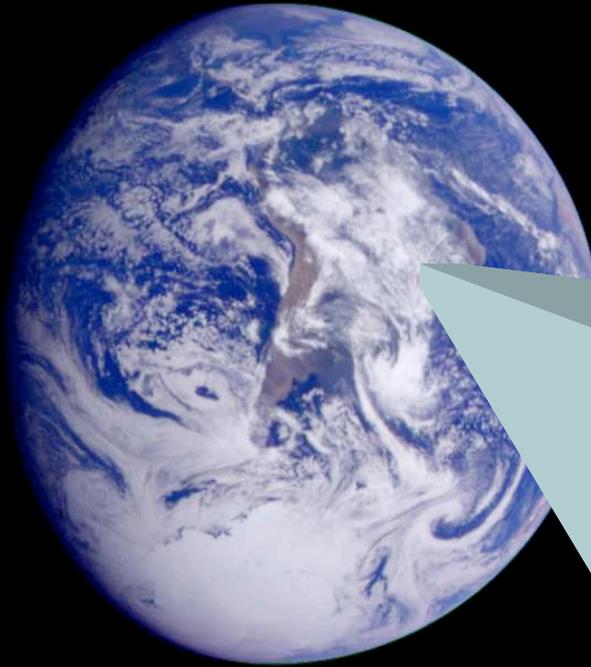


$\Delta^{33}\text{S} = 0$
 $\text{O}_2 > 10^{-5} \text{ PAL}$

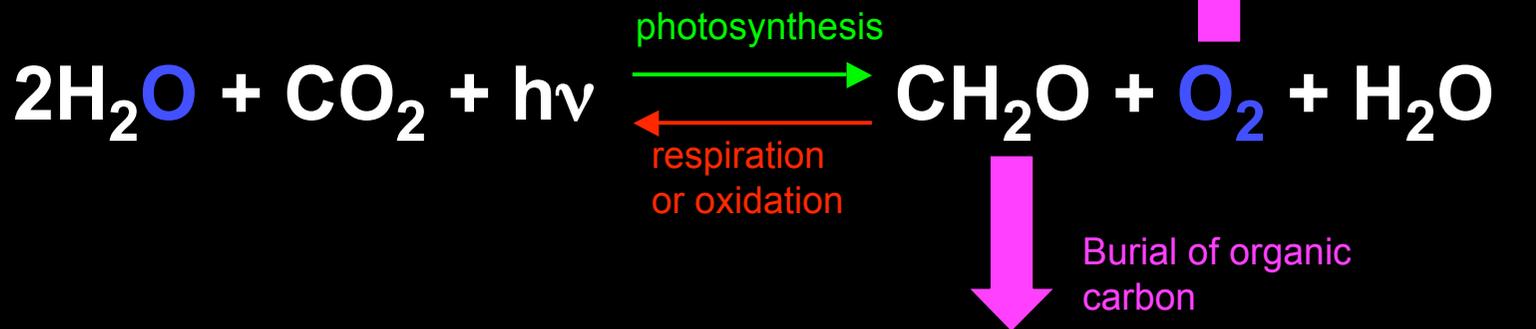
$\Delta^{33}\text{S} \neq 0$
 $\text{O}_2 < 10^{-5} \text{ PAL}$

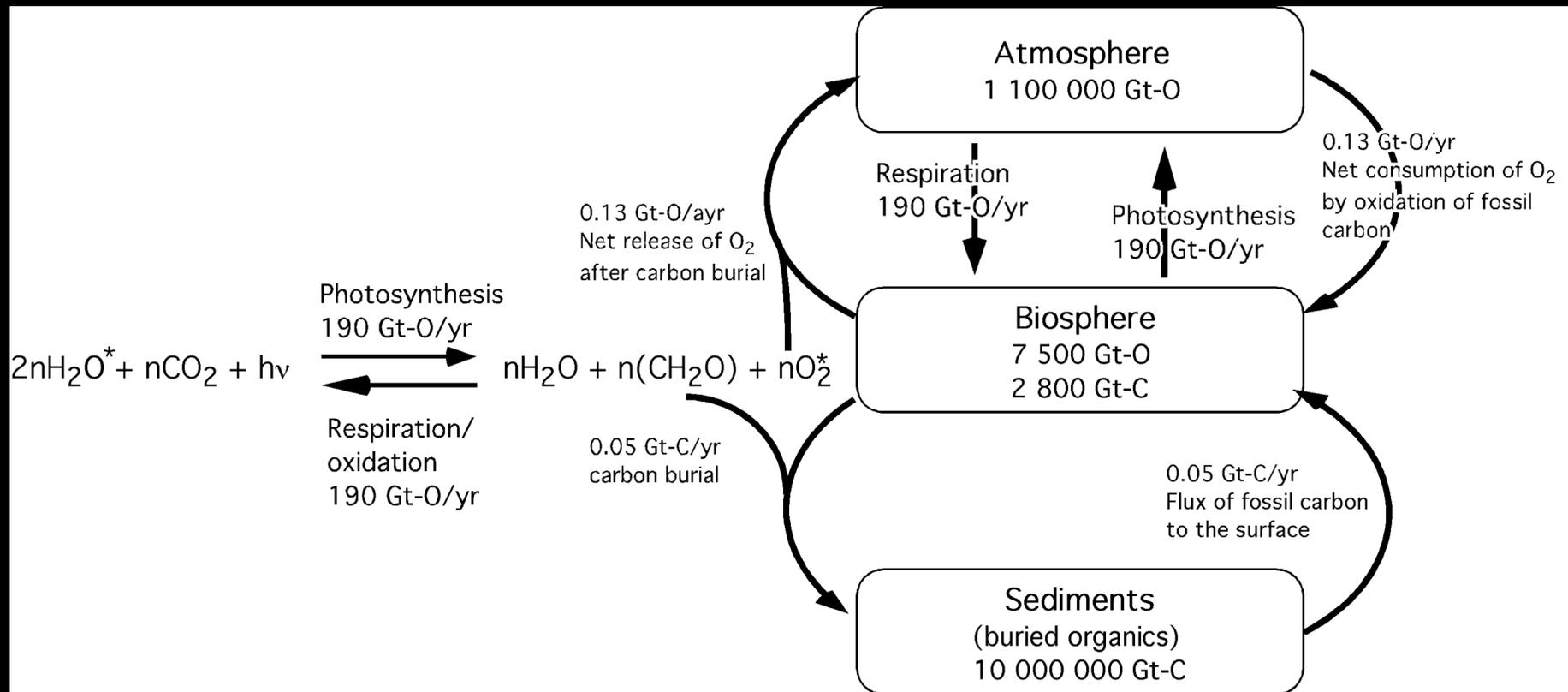


Catling and Claire, 2005



Oxygenic photosynthesis:



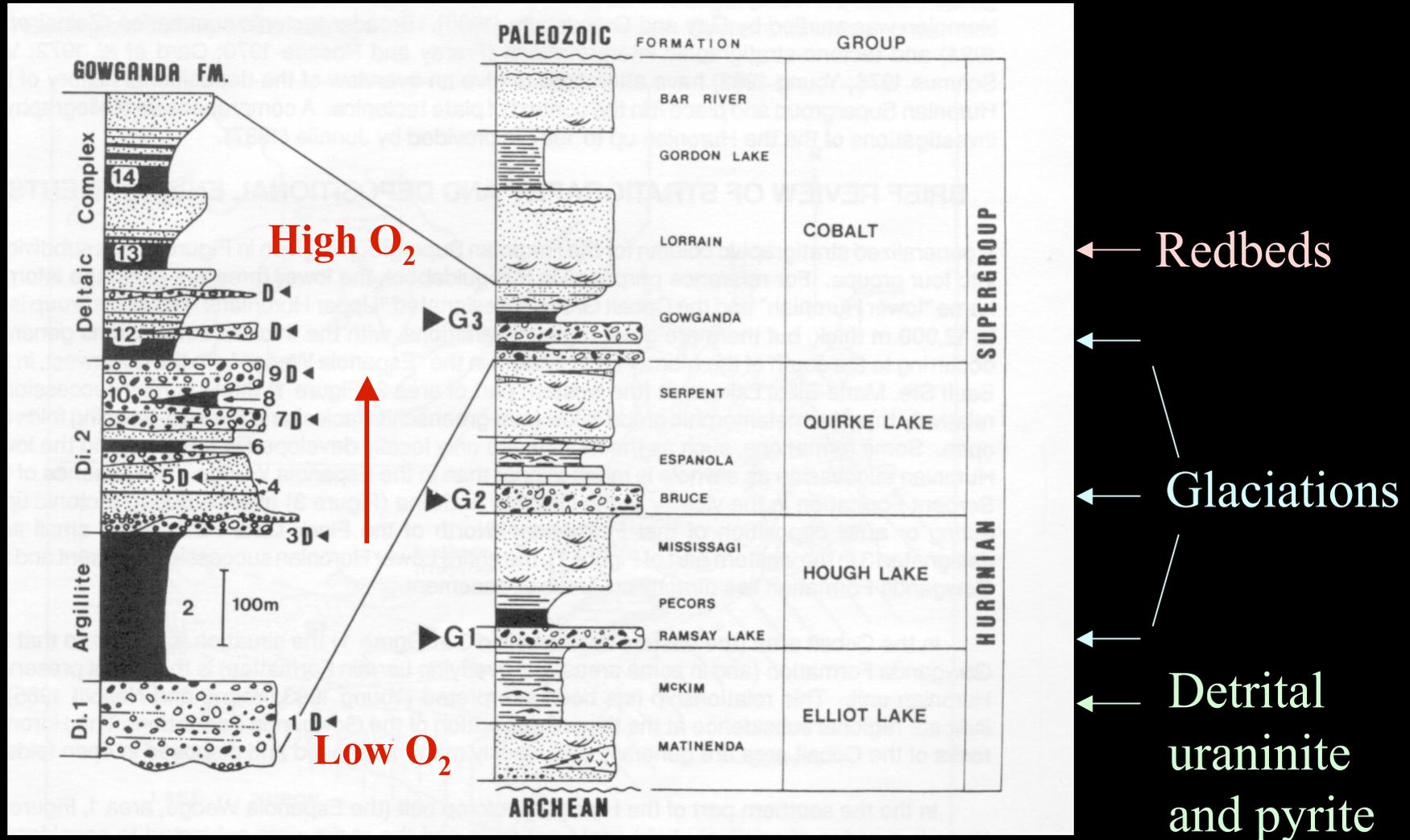


Hypothèse 1: Le taux d'enfouissement du carbone organique est trop faible avant 2.4 Ga
e.g. *Des Marais*

Hypothèse 2: L'oxydation des gaz volcaniques limite l'accumulation de l'oxygène atmosphérique
e.g. *Kump et Barley, Nature, 2007*



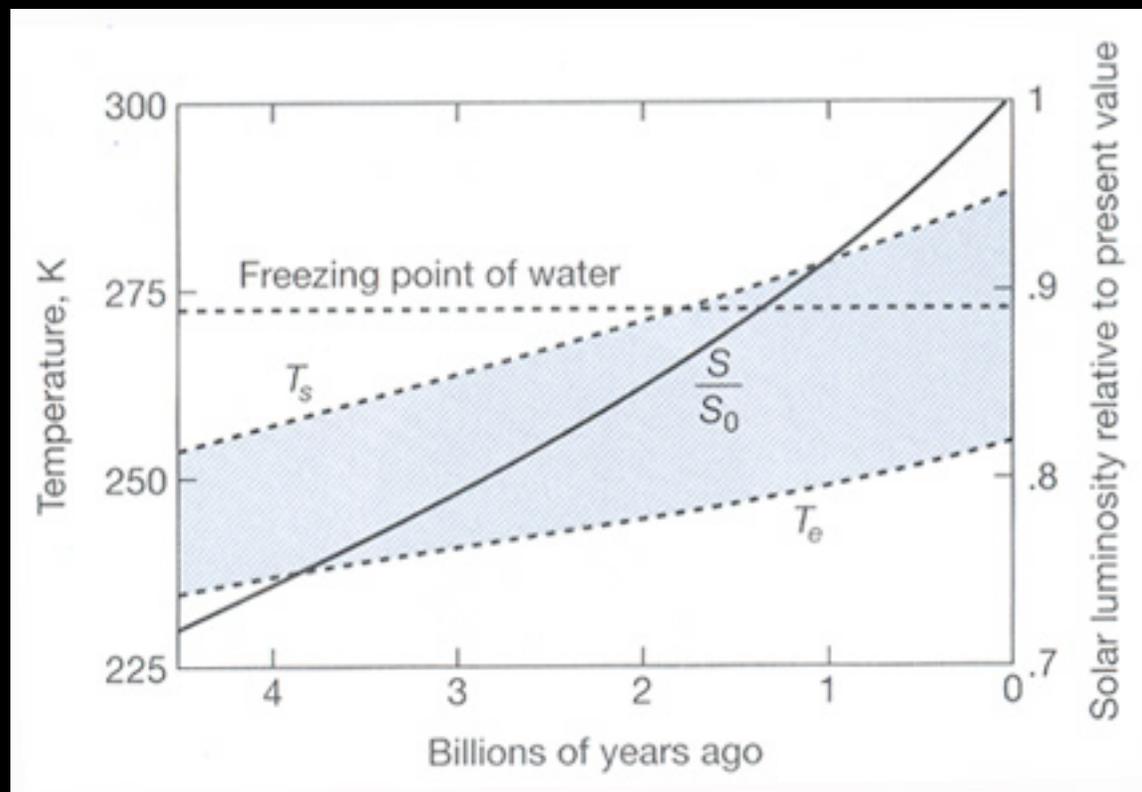
Huronian Supergroup (2.2-2.45 Ga)



S. Roscoe, 1969

Hypothèse 3: Le méthane (gaz à effet de serre) était nécessaire pour compenser la faible luminosité solaire. Toute accumulation de O_2 dans l'atmosphère fait chuter le niveau de méthane et inhibe la production de O_2 .

Selsis, 2000

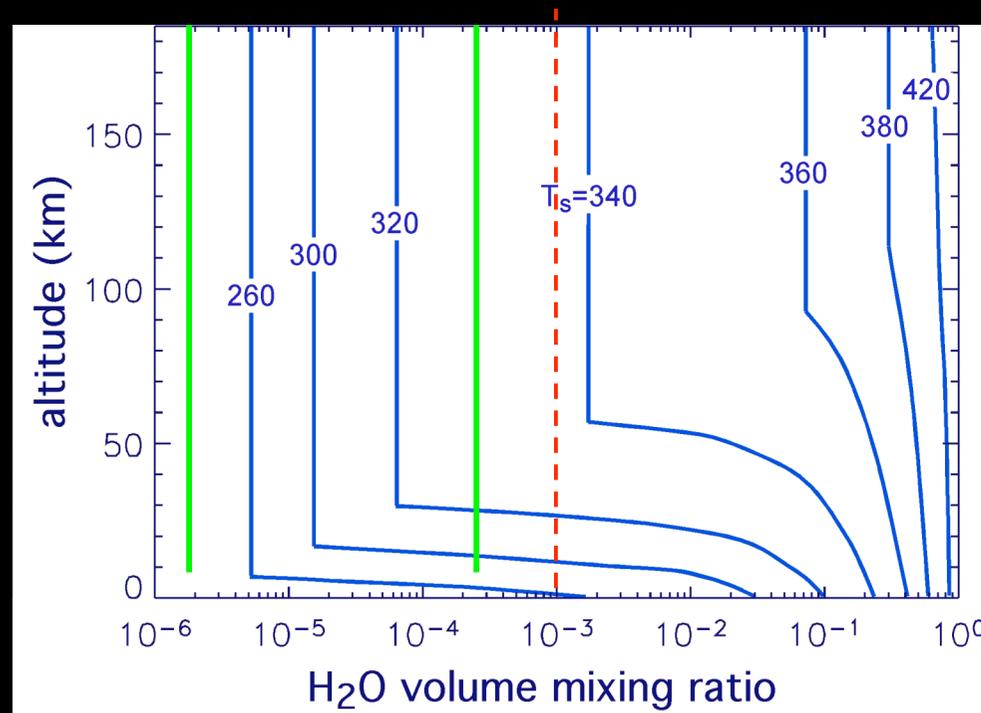


Hypothèse 4: Le méthane atmosphérique est nécessaire pour accélérer l'échappement de l'hydrogène et donc l'oxydation superficielle de la Terre.

Catling, 2002

CH₄ actuel

CH₄ archéen



Si échappement limité par la diffusion...

... pertes très importantes de H dans l'Archéen

... oxydation rapide de l'atmosphère

$$\Phi_{\text{lim}}(\text{H}) = 2.5 \times 10^{13} f_{\text{tot}}(\text{H}) [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

Si $f(\text{H}_2\text{O}) > 10^{-3}$, 500 m d'eau entre -3 Ga et 2.5 Ga → 50 bars de O₂ résiduels