An aerial photograph of a rugged coastline. The foreground shows dark, jagged rock formations meeting a deep blue ocean. The sun is low on the horizon, creating a bright, hazy glow and casting long shadows across the landscape. A thin blue horizontal line is visible near the top of the image.

**Hydrosphère et atmosphere:
Origine
Point sur l'actualité: L'eau sur Mars**

An aerial photograph of a volcanic crater with a central lake, surrounded by rugged, brownish terrain. The background shows a sunset over a horizon, with a dark blue sky and a thin layer of clouds. The text is overlaid on the left side of the image.

D'où vient l'hydrosphère et l'atmosphère ?

Comment évolue l'hydrosphère et l'atmosphère des planètes telluriques?

-4.56 milliards d'années



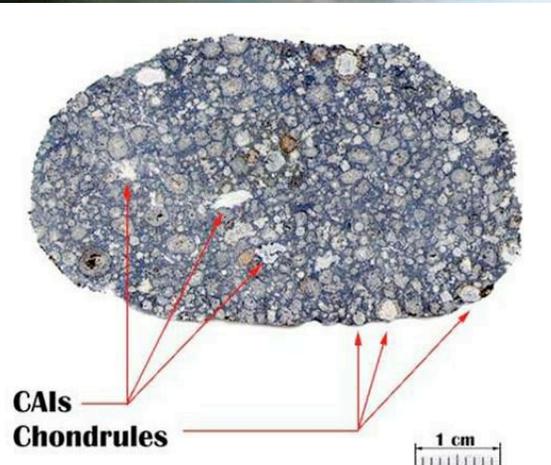
Naissance de Mars



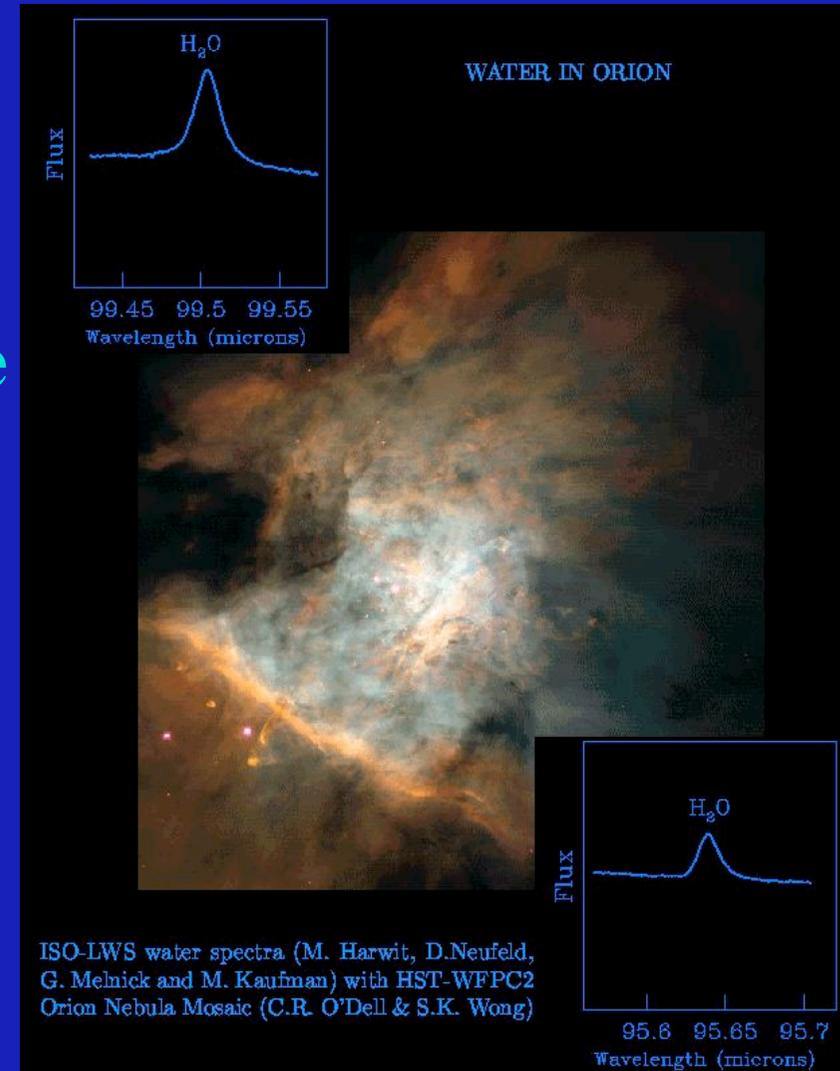
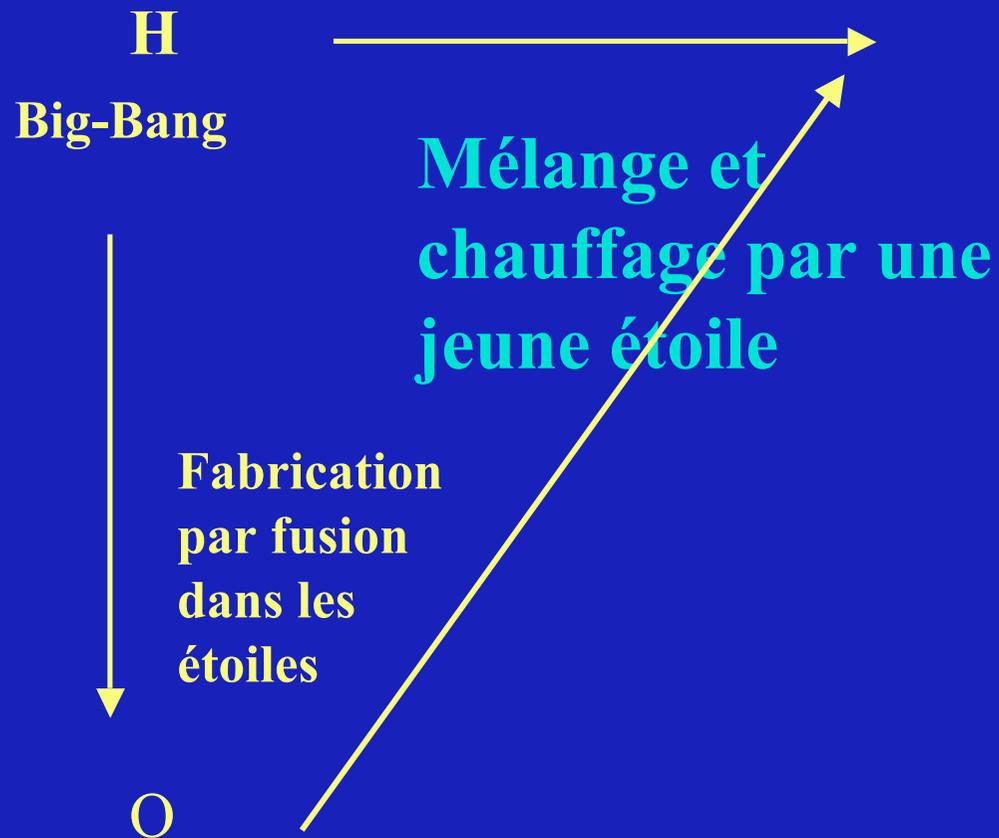
Au début...il y a 4.56 milliards d'années

- un jeune soleil entouré de poussières
- des poussières qui se collent les unes aux autres pour faire des objets de quelques kilomètres
- et déjà, beaucoup d'eau

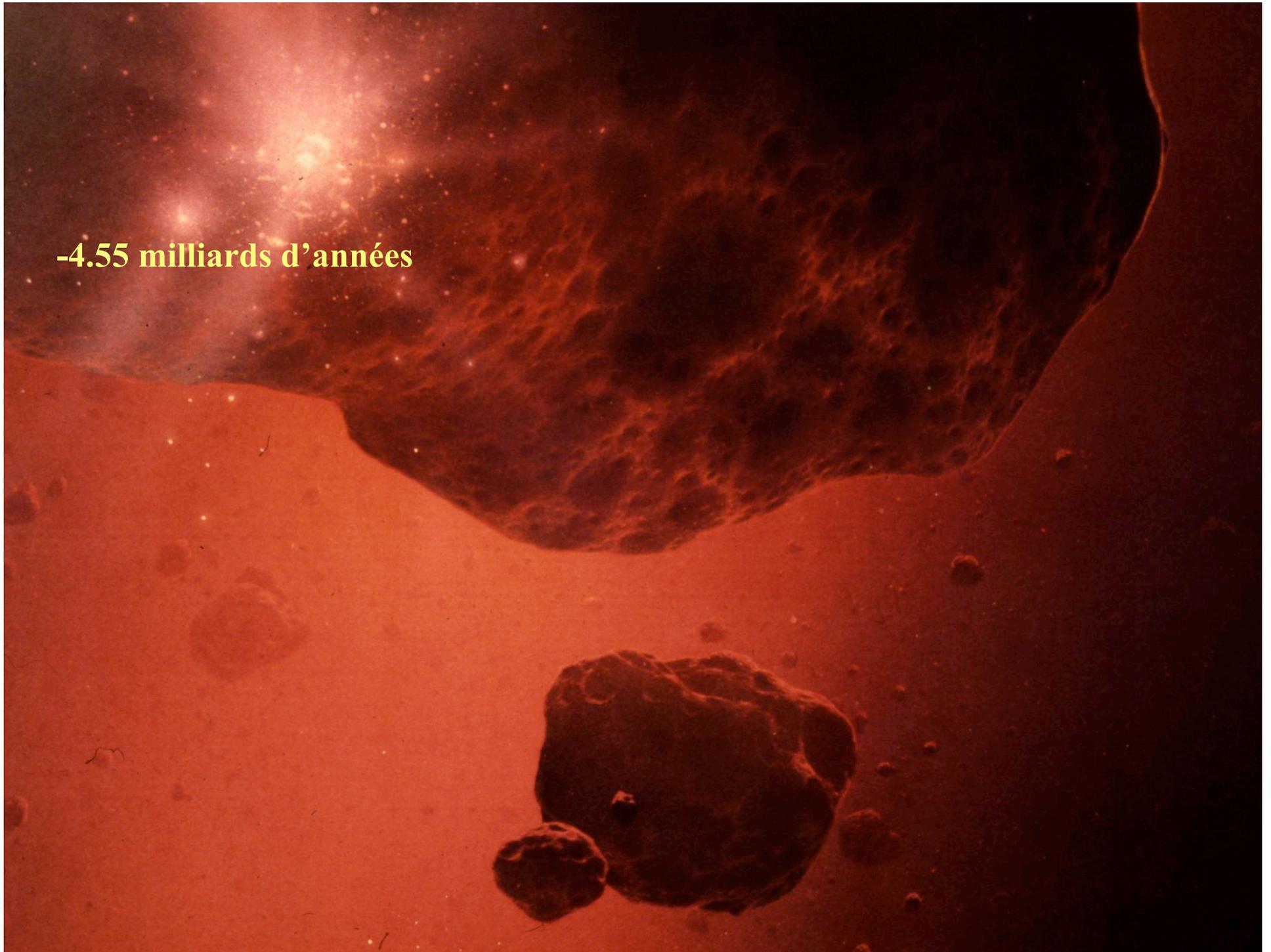
Météorite
Allende
4.56 Milliards
D'années



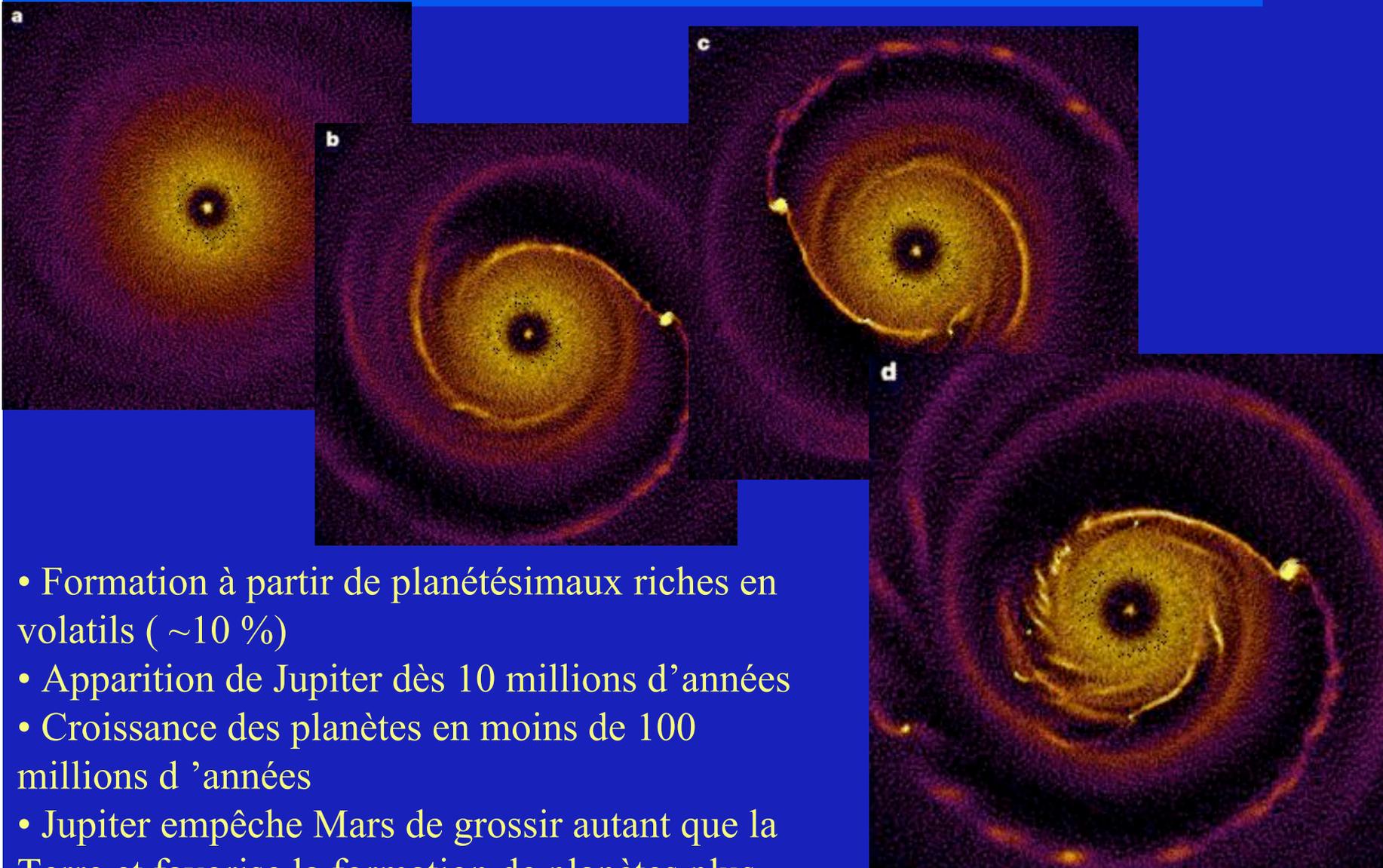
Autour du soleil... une fabrique d'eau



-4.55 milliards d'années



Planétésimaux et Croissance des planètes



- Formation à partir de planétésimaux riches en volatils ($\sim 10\%$)
- Apparition de Jupiter dès 10 millions d'années
- Croissance des planètes en moins de 100 millions d'années
- Jupiter empêche Mars de grossir autant que la Terre et favorise la formation de planètes plus grosses (Terre, Vénus) entre 0.5 et 1 UA

Quelques ordres de grandeur

- ◆ Energie gravitationnelle d'une planète homogène
- ◆ Ordre de grandeur:
 - Mars 8.25 MJ/kg
 - Terre 37.5 MJ/kg
- ◆ En terme de température
 - $C_p = 1.2$ kJ/kg
 - Même pour Mars, correspond à plus de 6000°C d'élévation de température
 - Energie à l'origine de l'océan de magma
 - Perte d'énergie limitée par une atmosphère dense

$$U = \frac{3}{5} G \frac{M^2}{a}$$

$$\frac{U}{M} = \frac{3}{5} G \frac{M}{a}$$

Etat initial des planètes

- ◆ Temps de croissance des planètes $\sim 10^8$ années

$$r(t) = r_0(1 - e^{-t/T})$$
$$\frac{dr}{dt} = \frac{r_0}{T}$$

- Avec $T \sim 2 \cdot 10^7$ années,
 - » $dr/dt = 0.32$ m/an (1280 kg/m²/an pour $\rho = 4000$ kg/m³)
- Pour $gr \sim 60$ MJ/kg, (fin d'accrétion de la Terre), ceci donne un flux de 2500 W/m²
 - » Comparable avec rayonnement de chaleur du Soleil
 - » Ne suffit pas en soi pour faire fondre la surface (rayonnement dans le vide possible)
 - » Importance du bilan de rayonnement lors de l'accrétion et de l'opacité de l'atmosphère primitive

**-4.50 milliards d'années:
Fin de l'accrétion et océan de Magma**



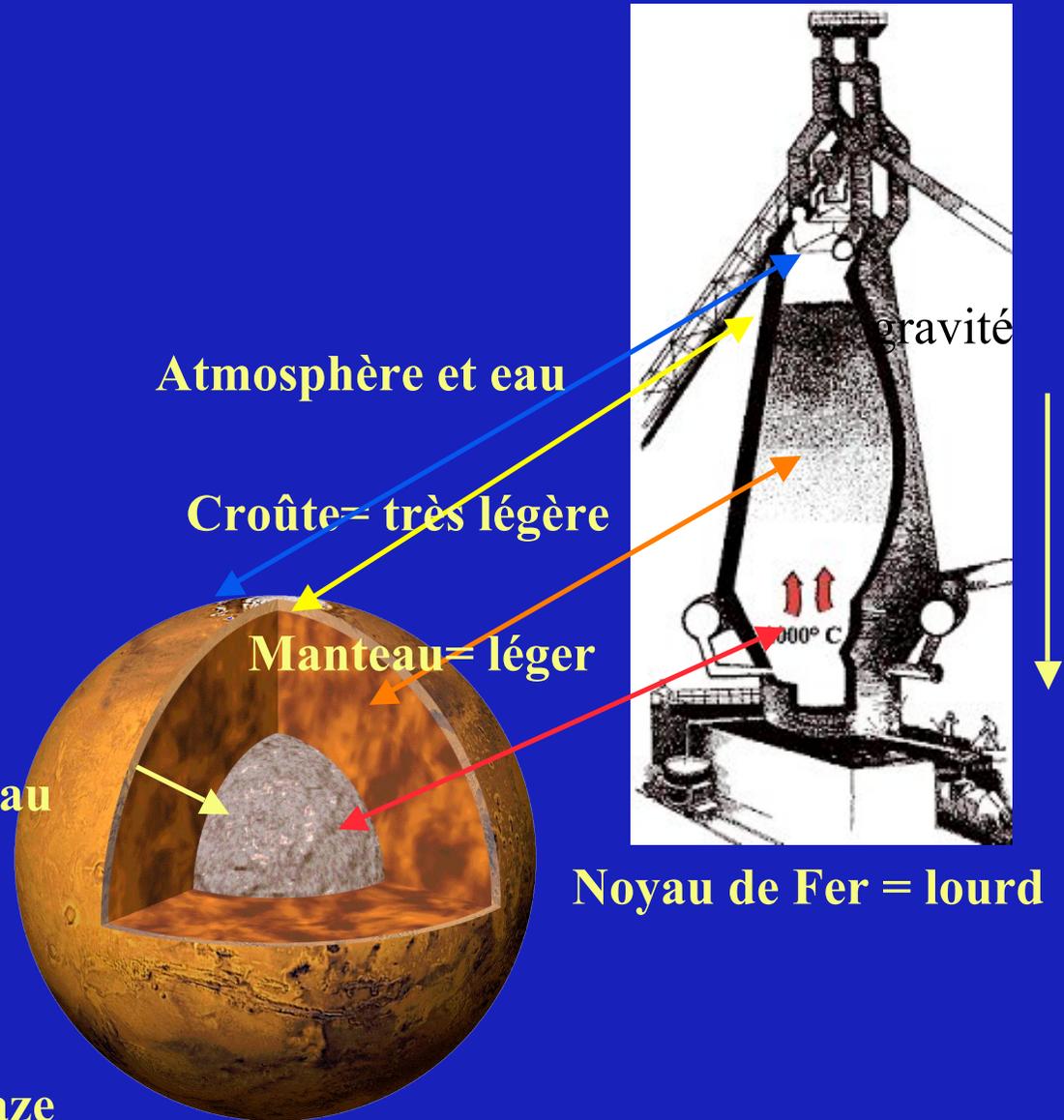
Formation de l'atmosphère



Météorites= mélange de fer, de Carbone, d'eau et de roches

Impacts violents = chaleur = Température d'un haut fourneau

Formation de la croûte qui remonte, du noyau qui tombe. Entre les deux le manteau. Au dessus une atmosphère qui dégaze



Bilan des volatils de la Terre

Inventaire

Atmosphere: $1 \text{ Bar} = 10^4 \text{ kg/m}^2$

Masse totale atmosphere: $5.1 \cdot 10^{18} \text{ kg}$

Autres volatils ($\cdot 10^{17} \text{ kg}$) H_2O CO_2

Atmosphere/hydrosphere 14 600 1.6

Roches sédimentaires 2 100 2724

(estimation minimum sans le manteau...)

Total 16 700 2726

Masse en volatils = $19.5 \cdot 10^{20} \text{ kg}$ ($>380 \text{ Bar}$)

Rapport $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ = 18.1

Echappement : 2-3 kg/s

Avec l'échappement actuel >

Durée de vie: $\approx 50 \text{ By}$



Bilan des volatils de Mars

Inventaire dans l'atmosphère

Atmosphere CO_2)	0.007 Bar (mainly
Masse	$1.0 \cdot 10^{16}$ kg

Phobos-2, ASPERA1 observations:

Pertes, O^+ , O_2^+ , CO_2^+ ... ≈ 1 kg/s

Echappement actuel =>
Disparition en ≈ 200 My



Bilan CO₂

◆ Terre

- Peu de CO₂ dans l'atmosphère (<0.1 %), essentiellement du CO₂ stocké dans les carbonates
- Croûte $\sim 6 \cdot 10^{21}$ moles, manteau ?
- Océans + atmosphère + matières organiques $\sim 3.4 \cdot 10^{18}$ moles

◆ Vénus

- Atmosphère dense de CO₂ (à 95,5 %), densité au sol de 65 kg/m³ et pression de 92 bar
- Atmosphère $\sim 10^{22}$ moles

◆ Mars

- Atmosphère peu dense de CO₂ (à 95,32%) $\sim 4,8 \cdot 10^{17}$ moles
- Calottes polaires mélange de CO₂ et d'eau $2-3 \cdot 10^{17}$ moles
- Masse cumulée ~ 104 moindre que la Terre ou Venus pour une masse planétaire 10x moindre
 - CO₂ perdu dans l'espace ou stocké dans le sol?

Volatils: premier bilan

- ◆ Les planètes à priori partent avec un stock en volatils très important
- ◆ Le début de l'histoire commence donc avec une perte de volatils très importante

	^{36}Ar (10^{-10} cm ³ /g)	^{84}Kr (10^{-10} cm ³ /g)	H ₂ O (ppm)	C (ppm)	S (ppm)
C1(orgueil)	7800	83	72900	30900	58000
Terre	210	4,3	322	30	238
Mars	1,6	0,055	45		

	Stock initial dans les chondrites C1			
	H ₂ O (km)	CO ₂ (bar)	H ₂ O (km)	CO ₂ (bar)
Terre	853,032303	130175,9586	3,767851873	126,384426
Mars	324,6966	?	0,20043	?

Etat initial des planètes

- ◆ Temps de croissance des planètes $\sim 10^8$ années

$$r(t) = r_0 (1 - e^{-t/T})$$
$$\frac{dr}{dt} = \frac{r_0}{T}$$

- Avec $T \sim 2 \cdot 10^7$ années,
 $dr/dt = 0.32$ m/an (1280 kg/m²/an pour $\rho = 4000$ kg/m³)
- Pour $gr \sim 60$ MJ/kg, (fin d'accrétion de la Terre), ceci donne un flux de 2500 W/m²

Comparable avec rayonnement de chaleur du Soleil

Ne suffit pas en soi pour faire fondre la surface (rayonnement dans le vide possible)

Importance du bilan de rayonnement lors de l'accrétion et de l'opacité de l'atmosphère primitive

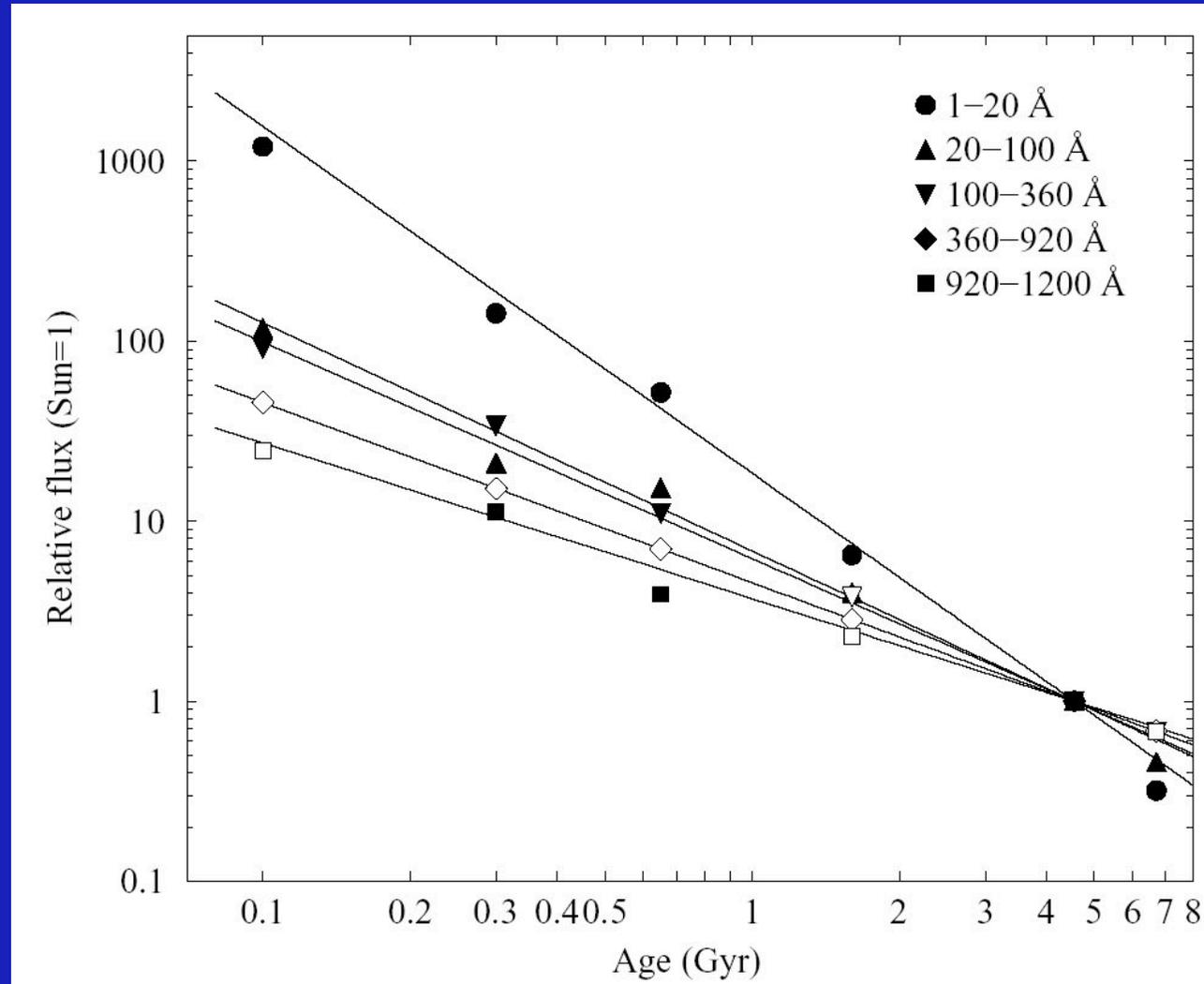
Température de Surface

- ◆ Loi de Stéfán

$$\Phi_s = \varepsilon \sigma T_s^4$$

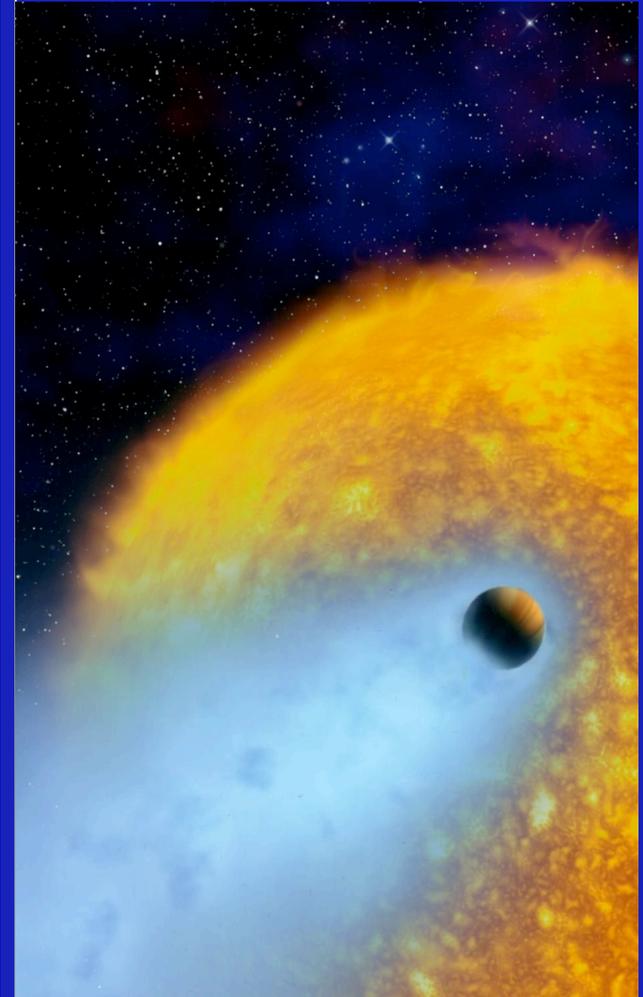
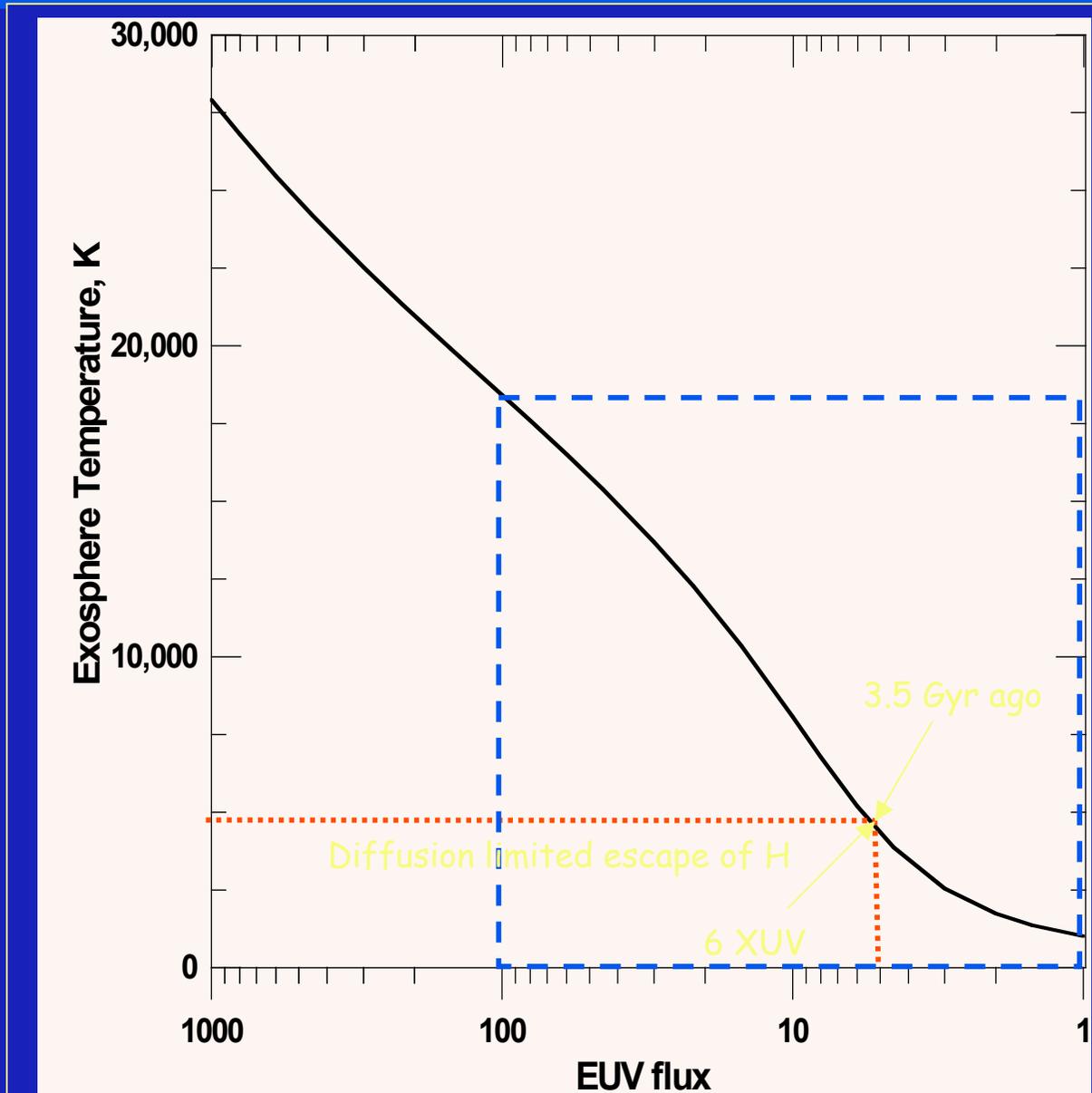
- ◆ où est la puissance rayonnée, T_s la température de surface et $\sigma = 5.57 \cdot 10^{-8}$ SI la constante de Stefan et ε l'émissivité effective.
- ◆ Pour $\varepsilon = 1$, 2500 W/m^2 est obtenu avec $T = 460 \text{ K}$
- ◆ Une émissivité $\ll 1$ est donc nécessaire pour arriver à un océan de magma
- ◆ Emissivité élevée en raison des poussières et gaz à effet de serre (atmosphère très riche en vapeur d'eau)

Un soleil primitif beaucoup plus fort dans les premiers 100 Millions d'années

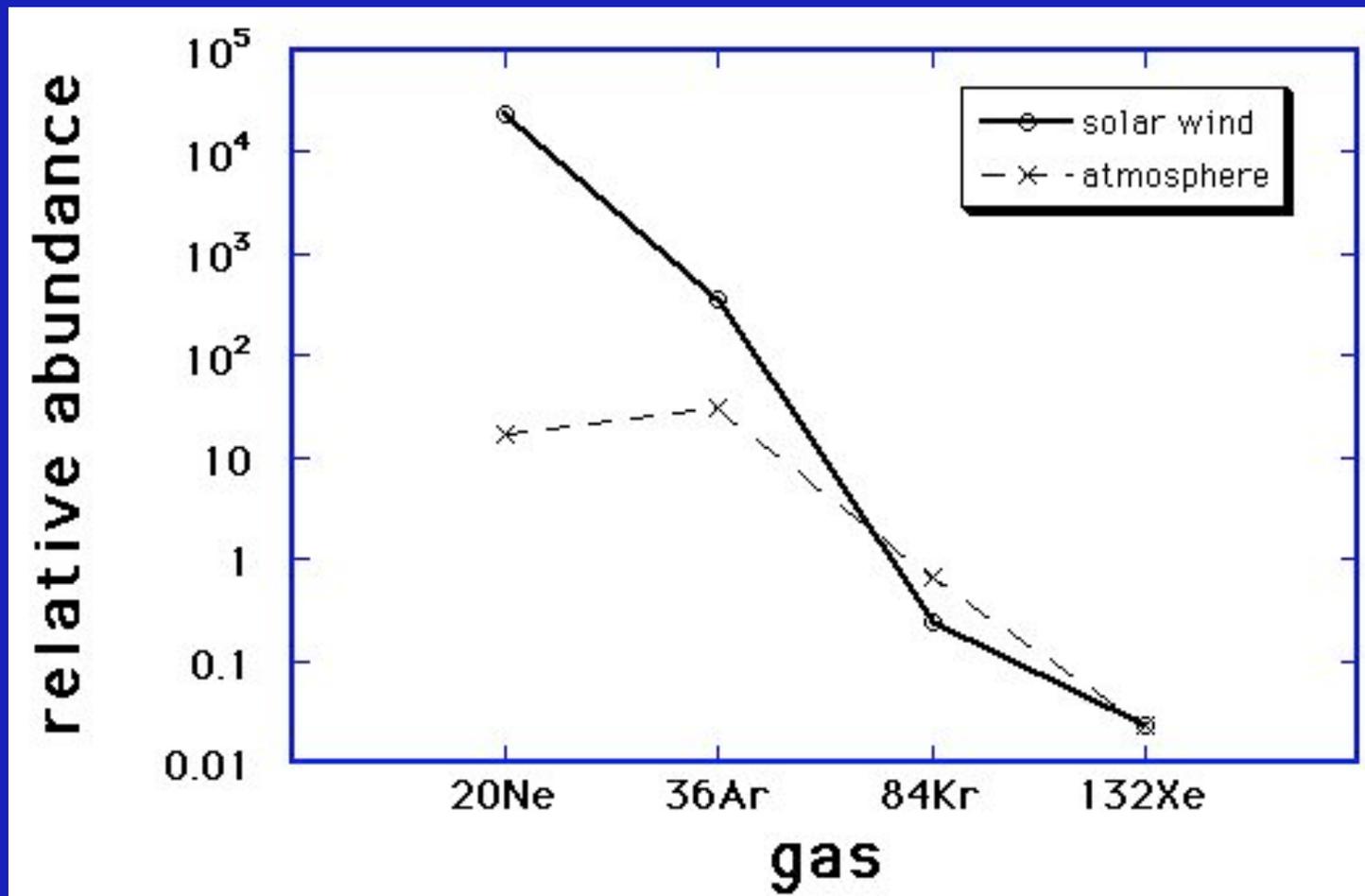


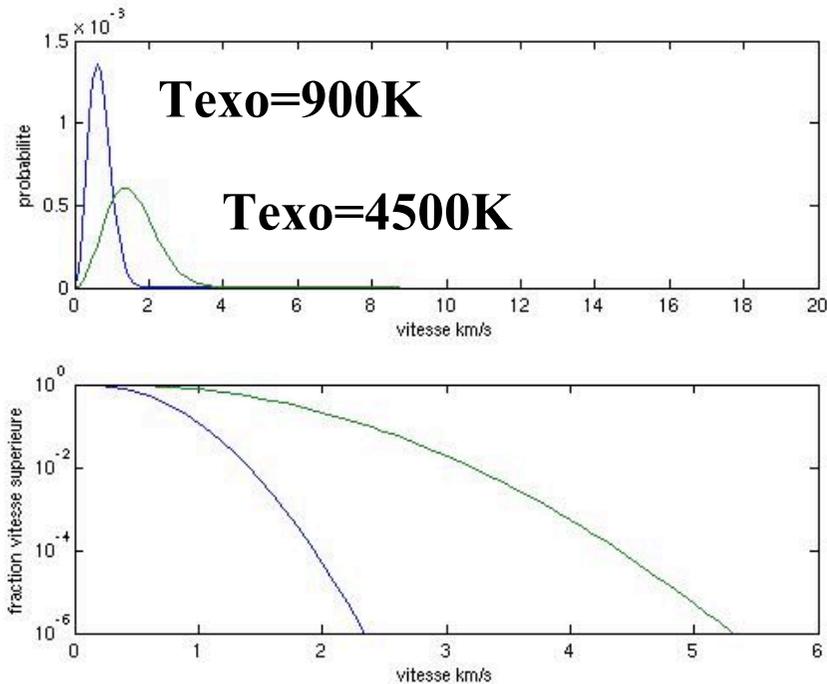
Ribas et al. (2004)

Thermosphère plus chaude...



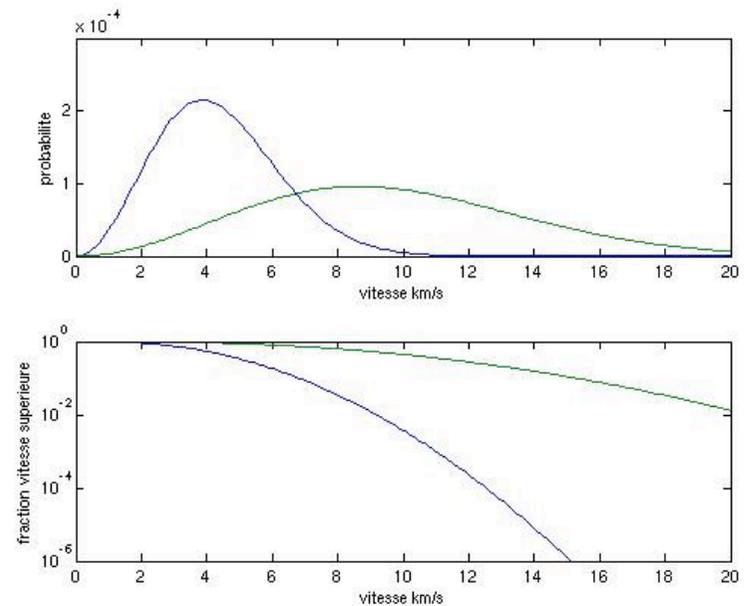
Echappement initial très important





- Echappement massif de l'Hydrogène
- Entraînement des autres gaz (dont les gaz rares dégazé)

Echappement plus important
Exemple de l'Argon { $M \sim 40$ }

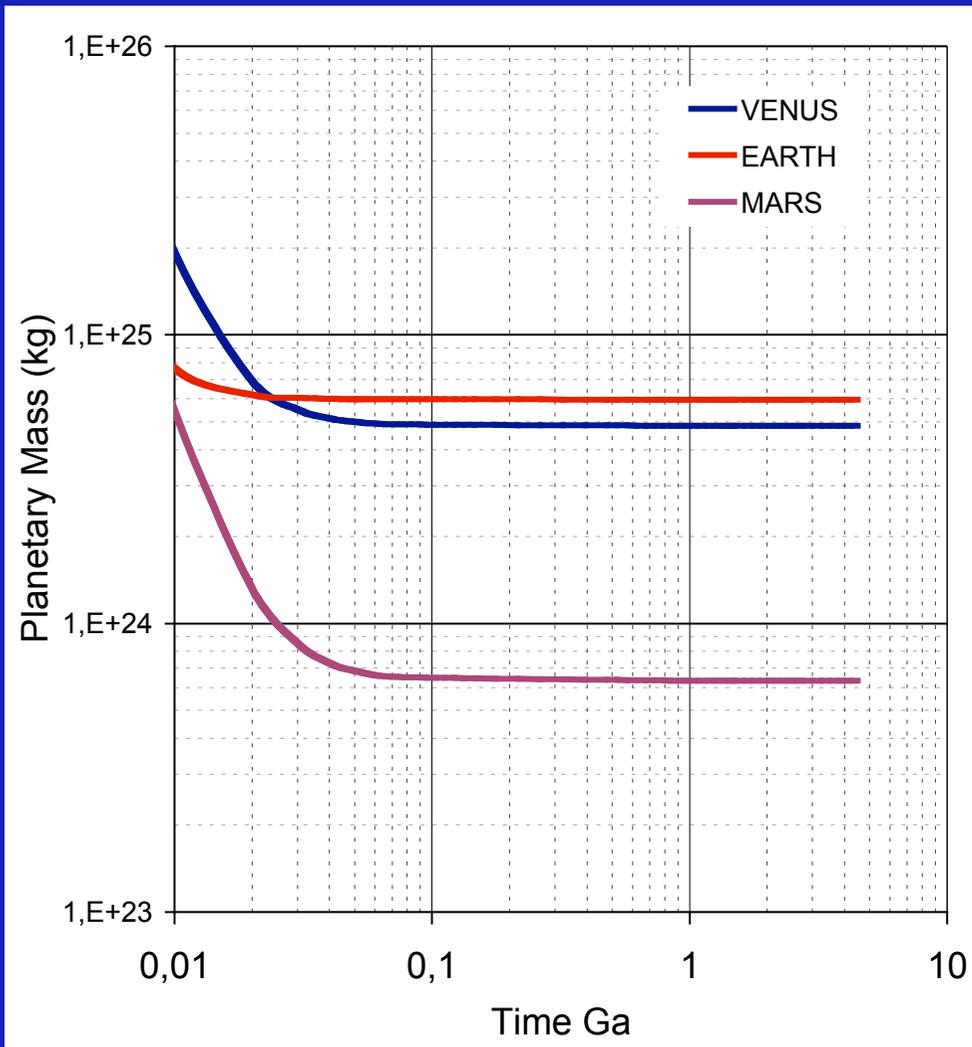


Echappement hydrodynamique

$$\Phi_2 = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{m_c - m_2}{m_c - m_1} \right) \Phi_1$$

$$m_c = m_1 + \frac{NkT}{bg} \Phi_1$$

Echappement de l'atmosphère



Calibrées avec les échappements actuels

Terre (≈ 2 kg/s), Mars (≈ 1 kg/s) et estimation de 3 kg/s pour Venus

• \neq Terre/Venus: effet du champ magnétique

\neq Terre/Mars: effet de la gravité, mais M

Autre perte: érosion par impacts

- ◆ E_v = parametre d'évaporation ~ 20

$$M_e = \frac{\pi R^2 P_0}{g_e} \varepsilon_e$$
$$\varepsilon_e = \frac{v_i^2}{v_e^2 (1 + \varepsilon_v)}$$