

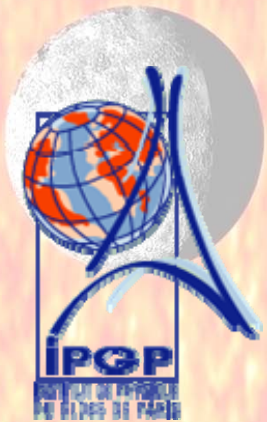


# Habitabilité à long terme des planètes telluriques

Ou l'évolution des conditions de surface

Par Cédric Gillmann

Co-dirigé par Philippe Lognonné (IPGP) et Eric Chassefière (LATMOS).



Ecole Doctorale STEP, IPGP/Paris Diderot.

# Introduction



- Qu'est ce que l'habitabilité ?

L'ensemble des conditions de surface favorables à la vie.

- Sur quoi repose-t-elle ?

Sur l'état de la surface des planètes et en particulier sur :  
l'atmosphère et la température.

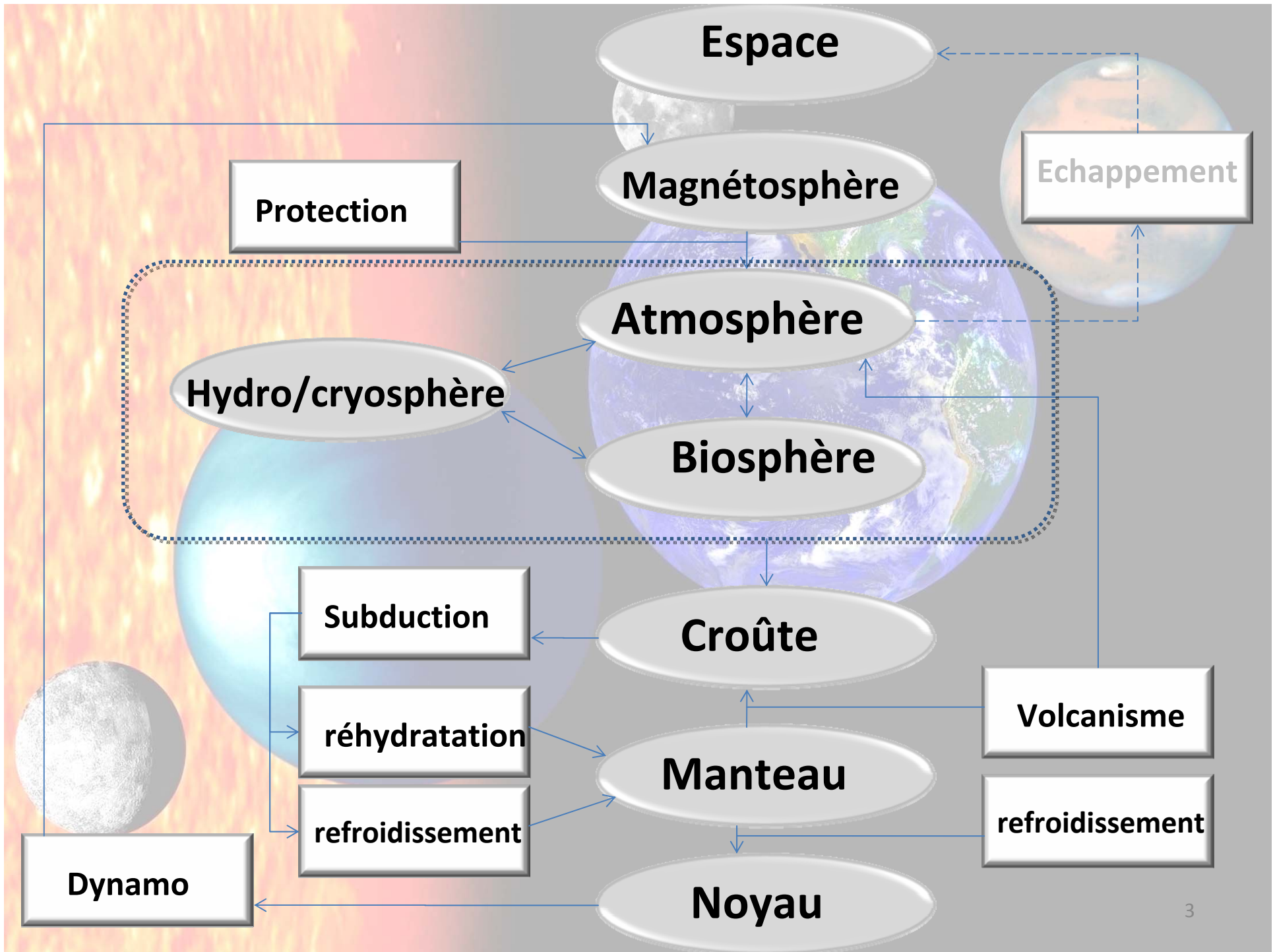
- Qu'est ce qui fait ou défait cette atmosphère ?

Il faut donc identifier les sources et les puits.

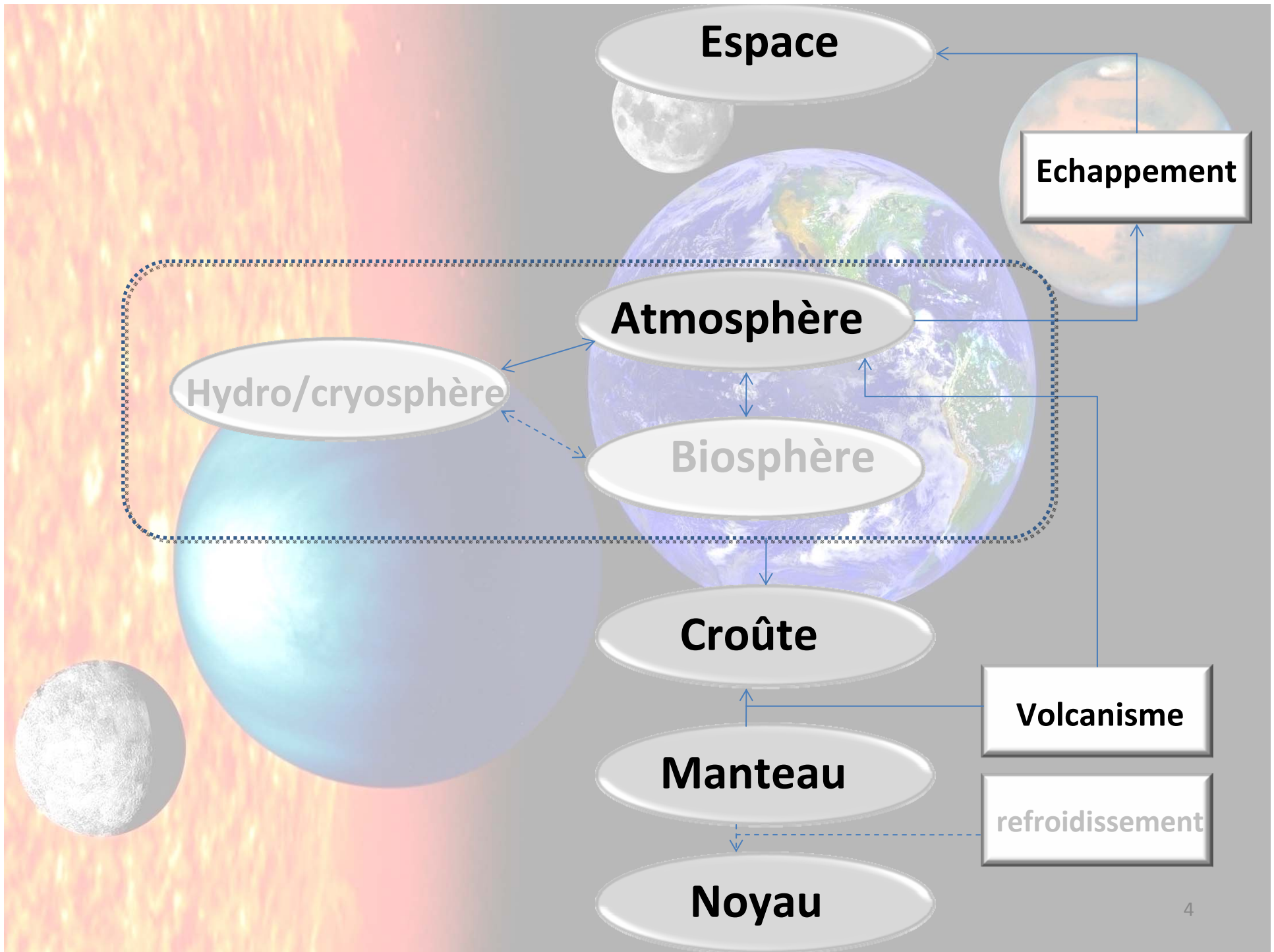
Par exemple sur Terre, 1 bar pour 50 Ma

- Comment est contrôlée la température de surface ?

Par l'effet de serre et donc par H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>.

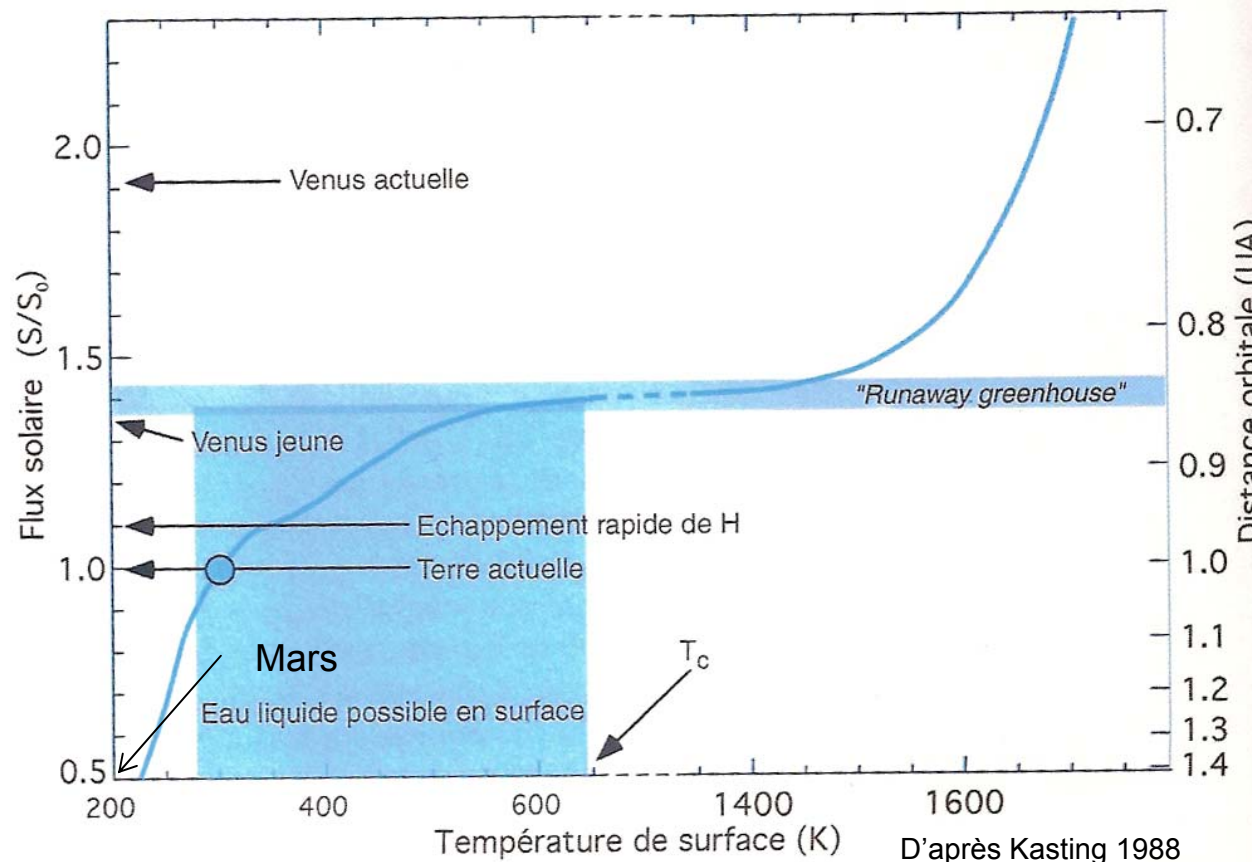






# Introduction

- Nous avons donc trois planètes initialement similaires. Que pouvons nous en dire ?



Sur Vénus : un effet de serre qui s'emballe mène à un enfer chaud.

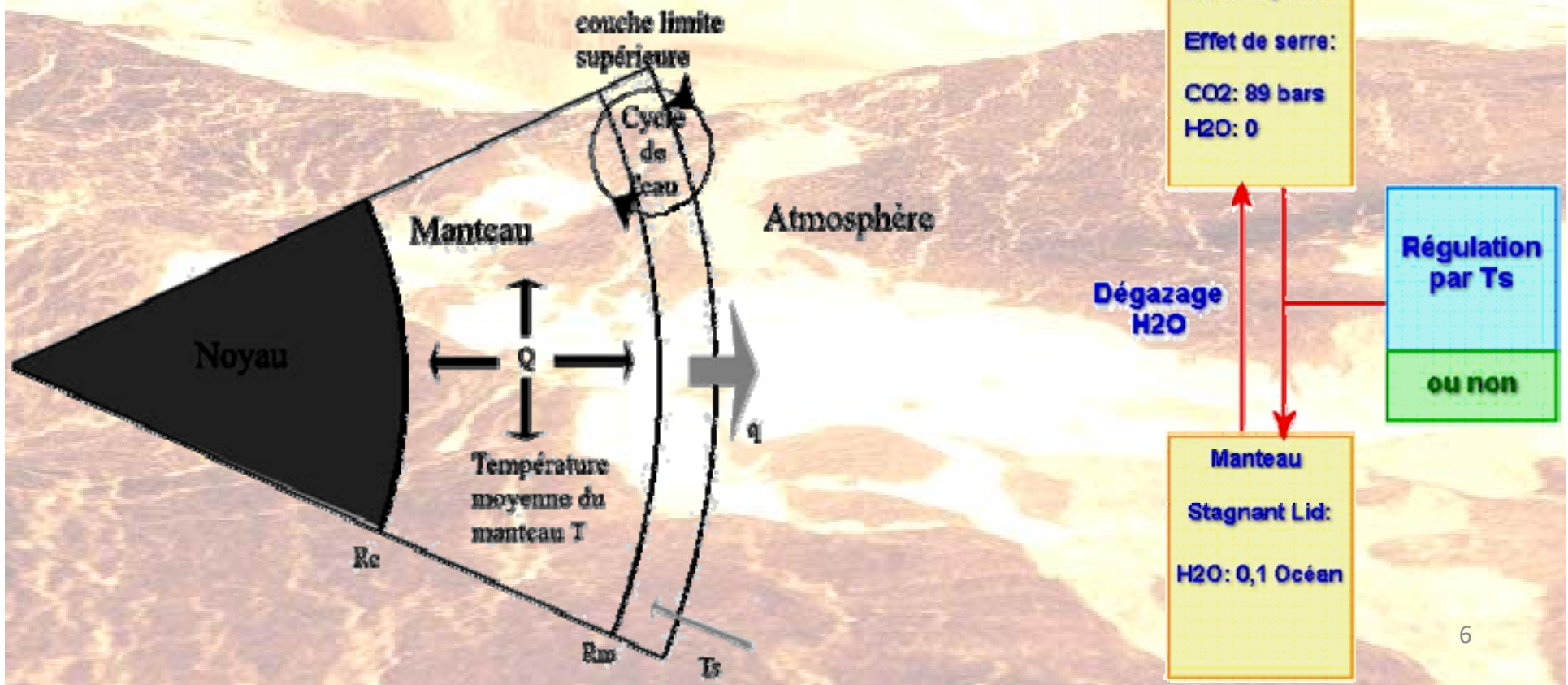
Sur Mars : il ne resterait plus assez d'atmosphère pour un effet de serre suffisant. C'est un désert glacé.

Sur la Terre, une situation intermédiaire providentielle...

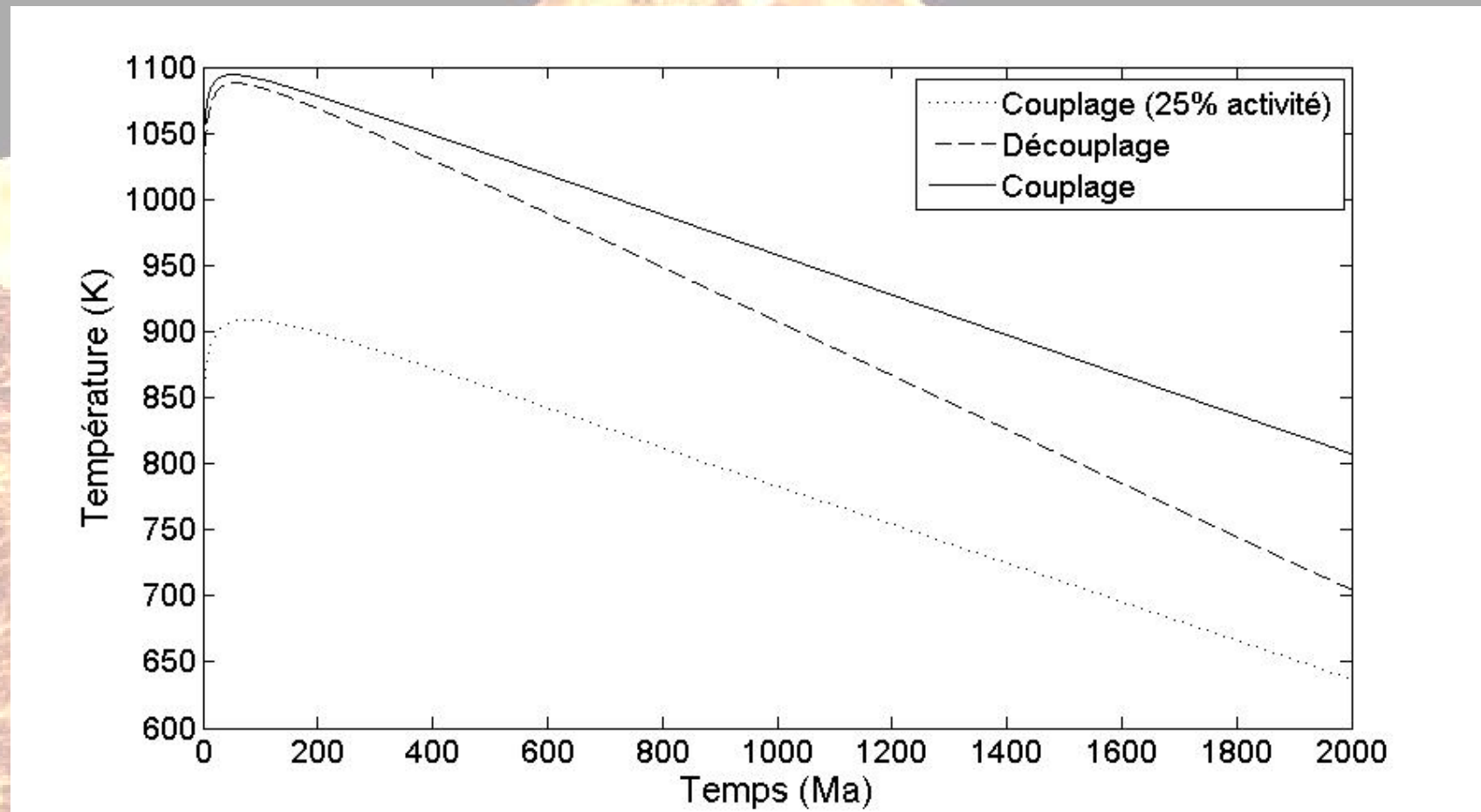
- D'où les questions essentielles :
  - Vénus a-t-elle été habitable avant de devenir un enfer chaud ?
  - Observons nous la « mort » de l'atmosphère martienne ?

# Modèle Paramétré de dynamique interne et couplage atmosphérique

- Code basé sur des lois d'échelle.
- Équation de conservation de l'énergie.
- Production de chaleur radioactive
- On prend aussi en compte le dégazage/réhydratation du manteau.
- Ainsi que la rhéologie et le contenu du manteau en volatils.



# Couplage Dynamique/atmosphère : résultats (Cas de Vénus)



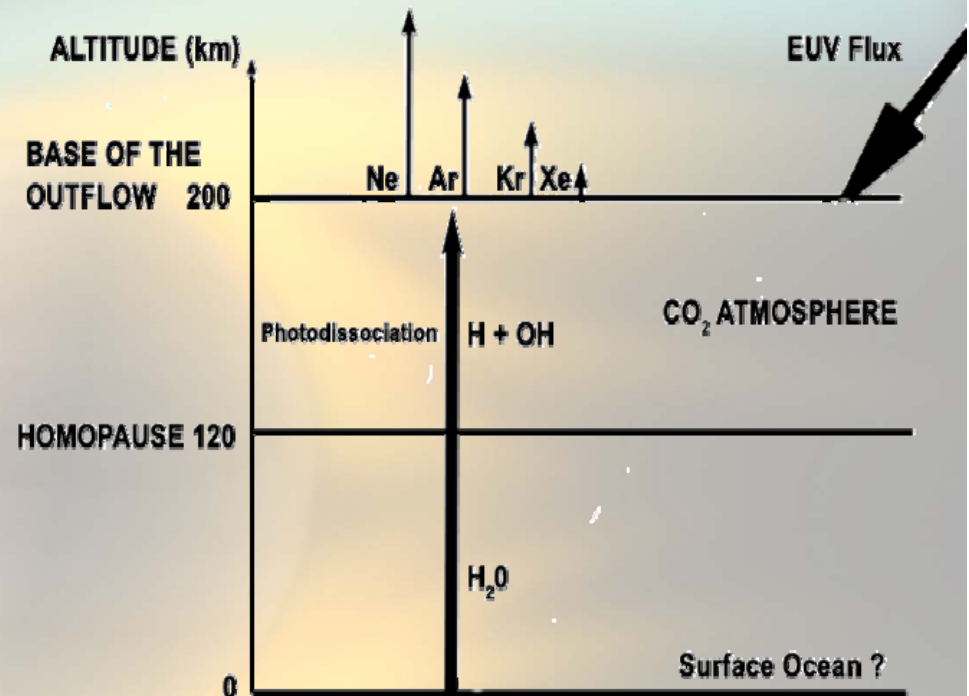
Et la Terre ? Quelle différence ?



# Evolution Précoce de Vénus

L'hydrogène s'échappe facilement. Qu'en est-il de l'oxygène ?

| Element                         | Venus value     | Earth value |
|---------------------------------|-----------------|-------------|
| $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ | 11.2-12.6       | 9.8         |
| $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ | <0.067          | 0.029       |
| $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ | $5.45 \pm 0.1$  | 5.32        |
| $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ | $1.11 \pm 0.02$ | 295.5       |



Théorie adaptée de Hunten et al. et avancée par Chassefière avec échappement conjoint de H et de O.

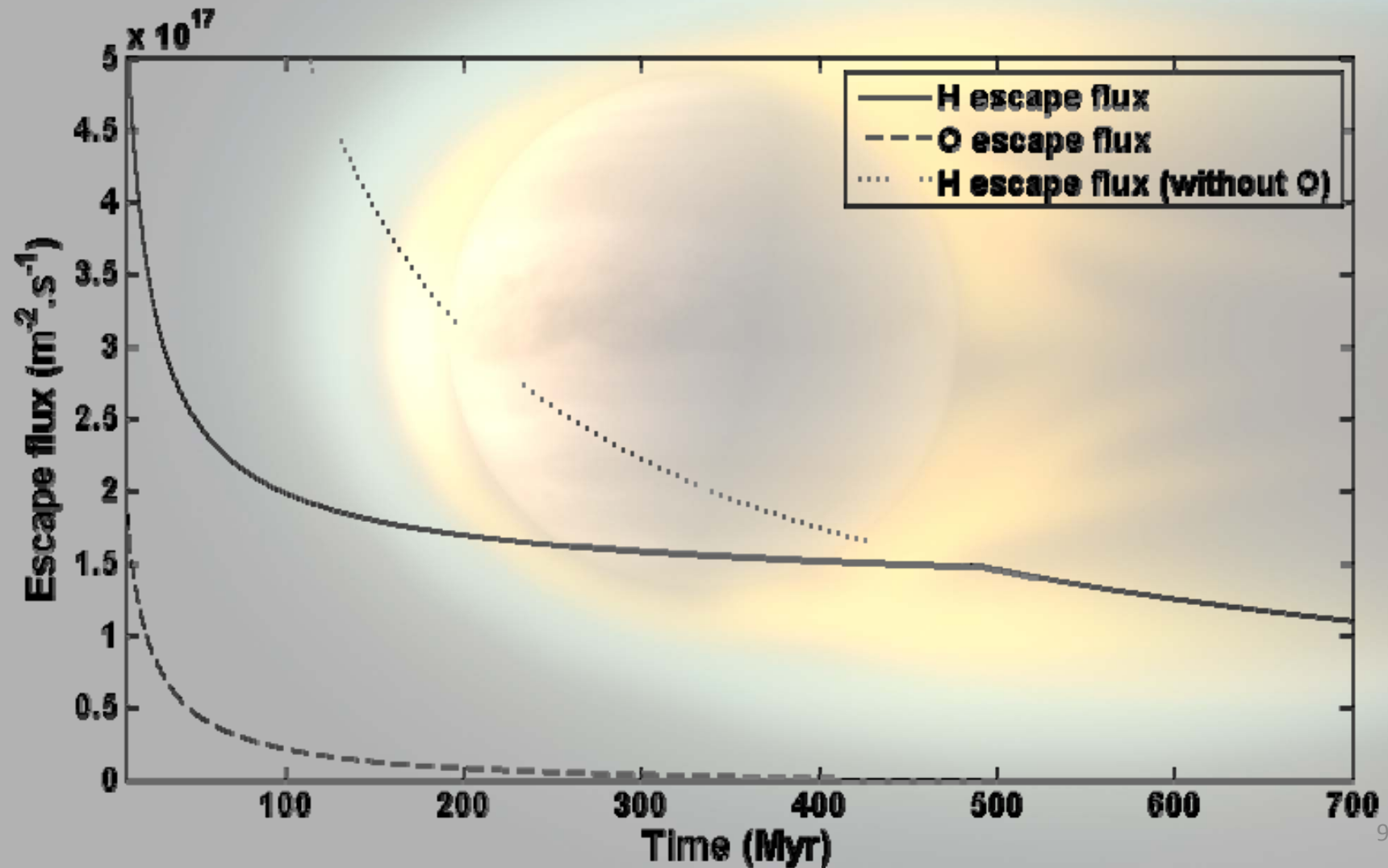
Provoqué par le flux EUV solaire qui décroît avec le temps (Contrairement à la luminosité).

1) Nous confrontons le modèle aux données des rapports isotopiques.

2) Nous observons les pertes de H et O pour élaborer un scénario compatible.

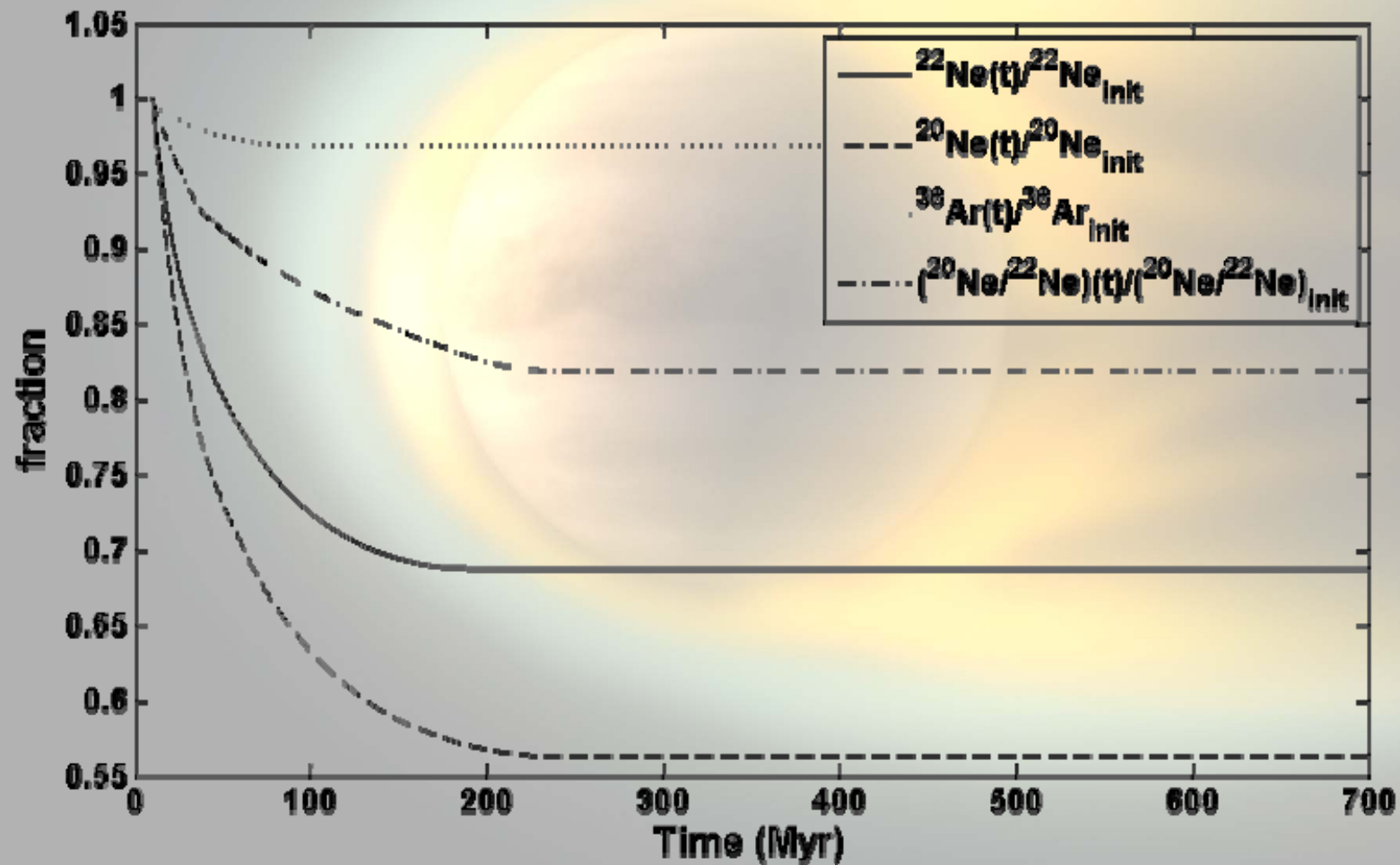


# Flux d'échappement

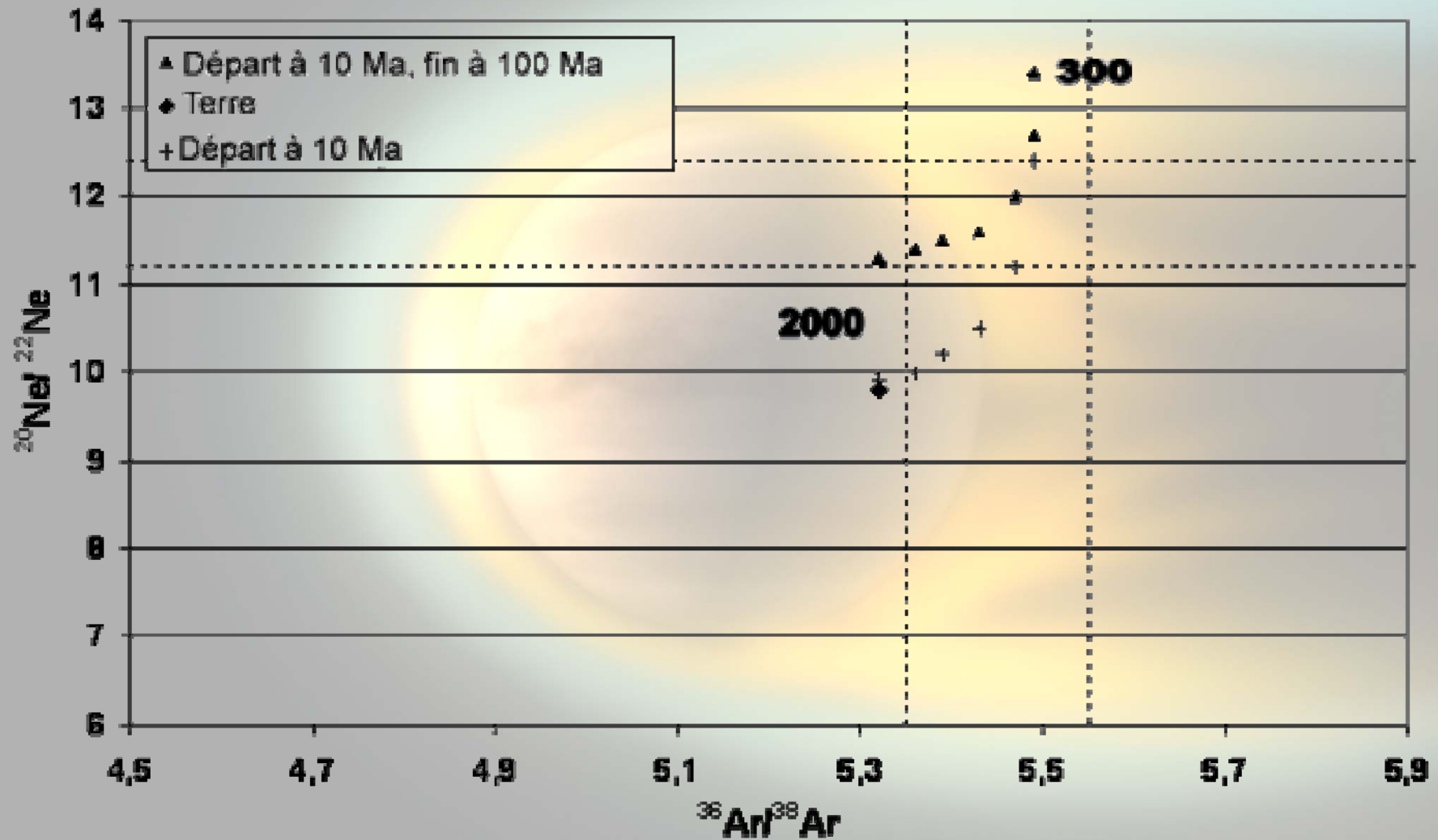


# Conséquences sur les rapports isotopiques

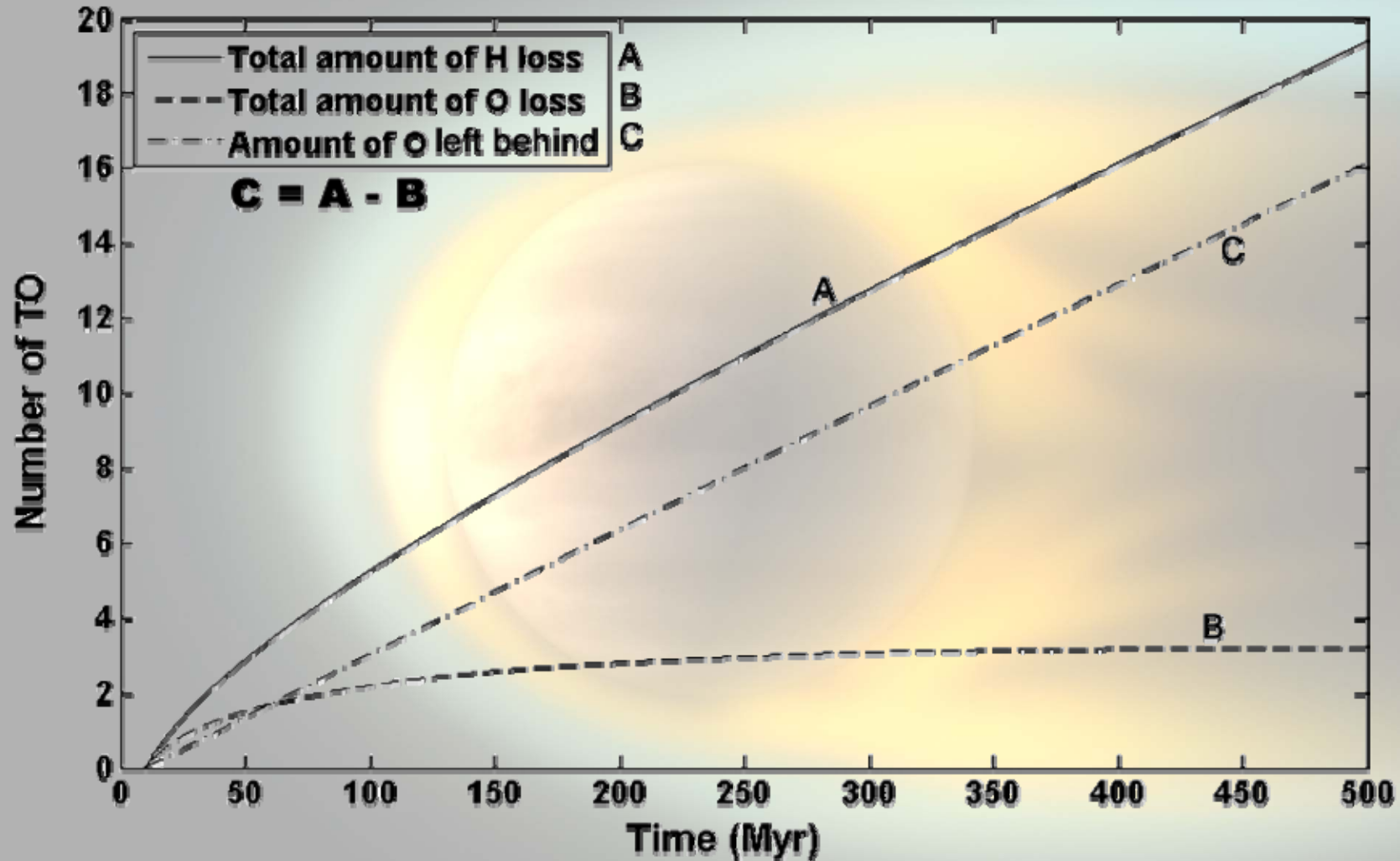
- Xe et Kr ne s'échappent pas de façon significative.



# Rapports isotopiques



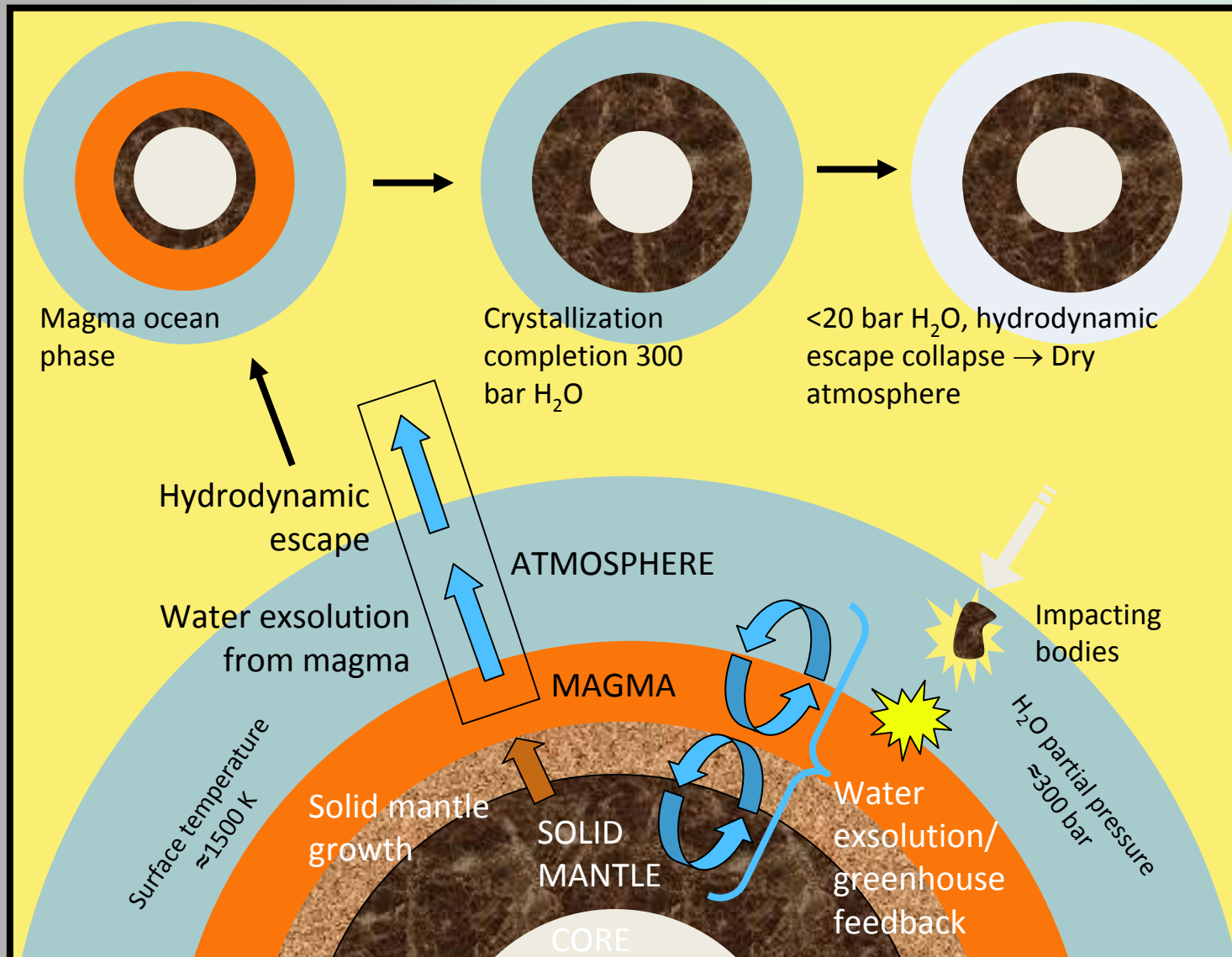
# Pertes atmosphériques



- L'eau est principalement issue de l'accrétion tardive d'embryons planétaires venant du système solaire externe. (Raymond et al., Morbidelli et al.)



# Un scénario pour l'évolution primitive de Vénus



# Un scénario pour l'évolution primitive de Vénus (II)

Accretion of 5 TO of water from embryos

- Hydrodynamic escape of hydrogen (all) and oxygen (most)
- Fractionation of Ne to present value
- Build up of a transient massive O<sub>2</sub> atmosphere (a few 100 bars)
- Loss of O<sub>2</sub> to the magma ocean

**Magma ocean**

10-100 Myr

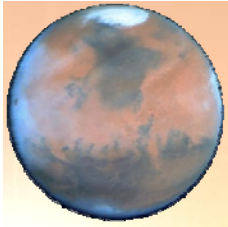
Accretion of 0.1 TO of water from comets

- Hydrodynamic escape of hydrogen (all) and oxygen (few)
- Build up of a ≈15 bar O<sub>2</sub> atmosphere
- Subsequent loss of O<sub>2</sub> to the rock surface by iron oxidation

100-500 Myr

- Non-thermal escape of H<sub>2</sub>O contained in a GEL of a few meters depth
- Fractionation of H to present value
- Continued loss of O<sub>2</sub> to the rock surface by iron oxidation

500 Myr-Now

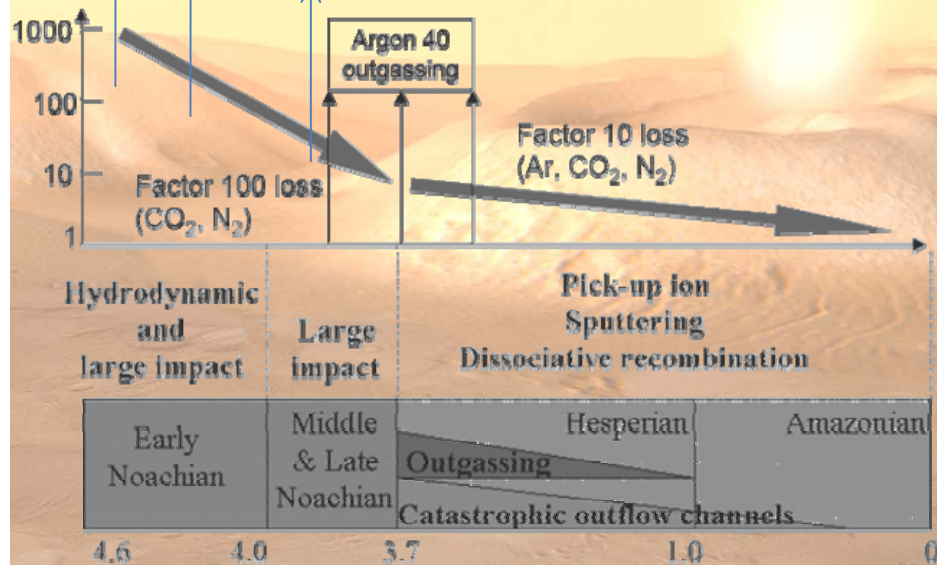
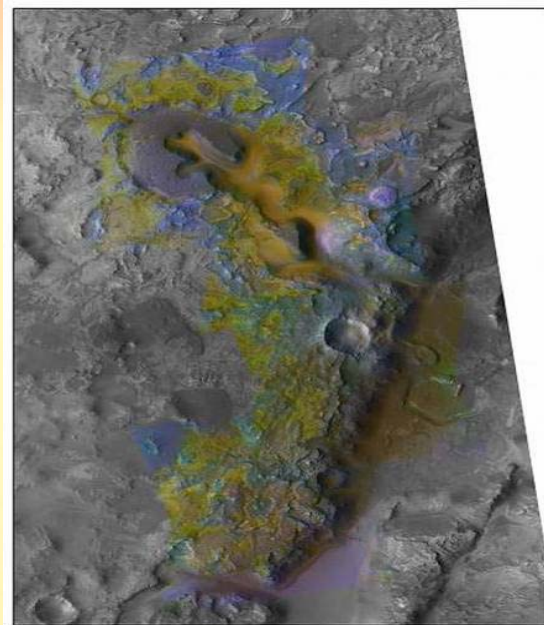


# Evolution de l'atmosphère martienne

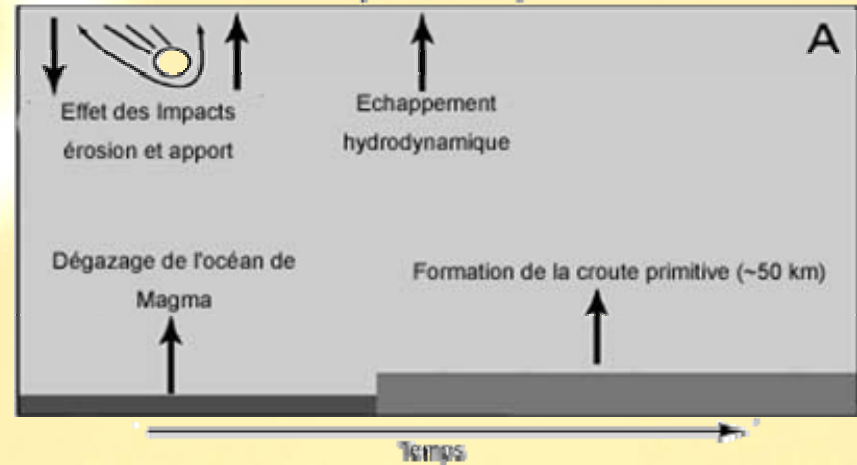
Phyllosilicates :  
eau abondante

Sulfates

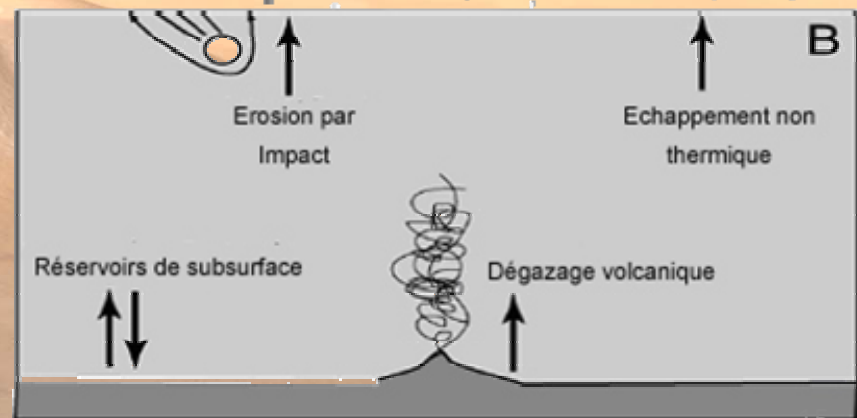
Olivines :  
sèches et peu altérées



## Formation de l'atmosphère martienne primitive (50-100 Ma)



## Flux de $\text{CO}_2$ dans l'atmosphère martienne (tardif)

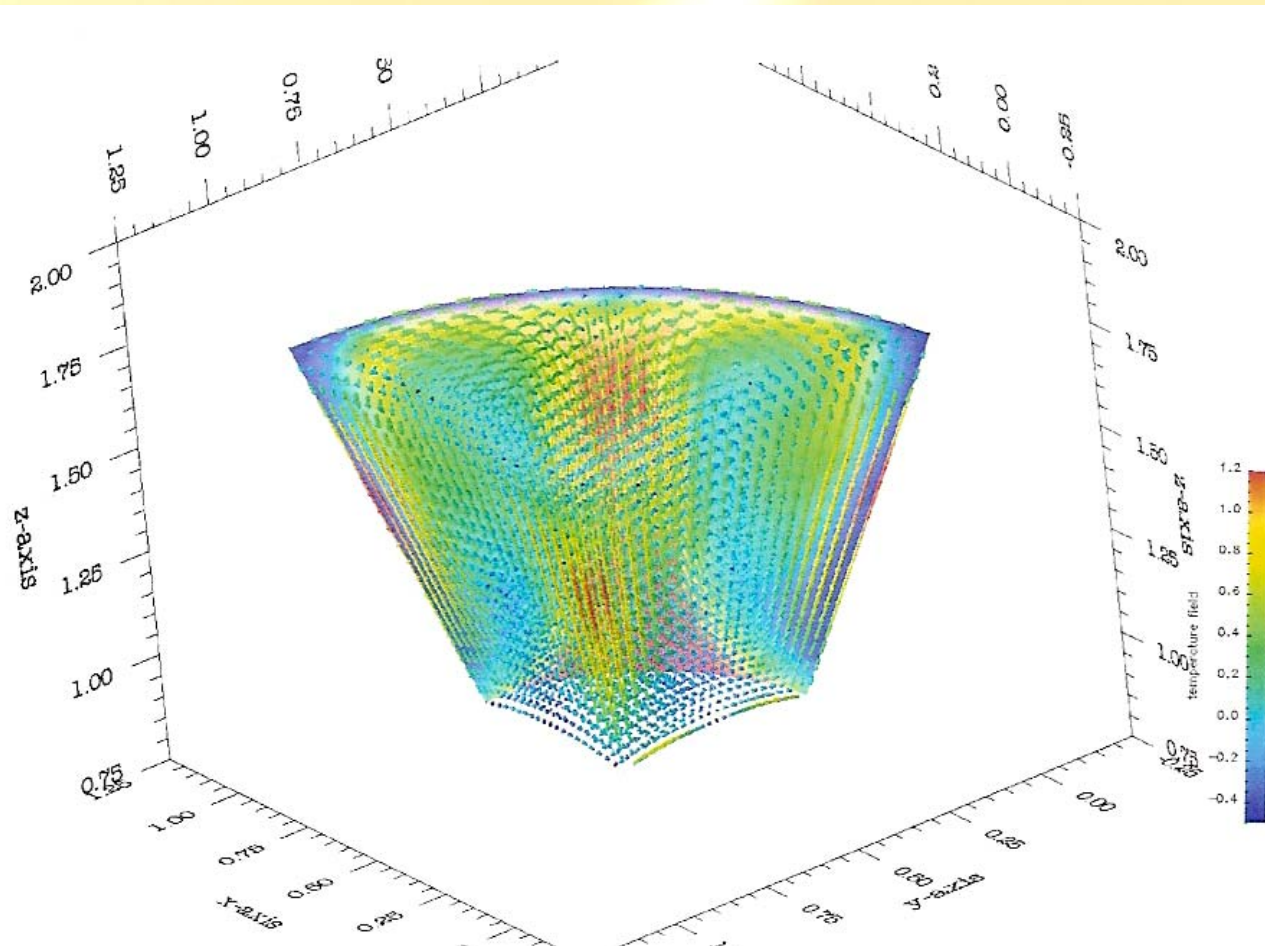


# Modélisation 3D d'un Panache Martien : le cas de Tharsis

Le modèle repose sur l'équation de la chaleur et l'équation de Stokes.

La viscosité varie typiquement de 5 ordres de grandeur sur l'épaisseur du manteau.

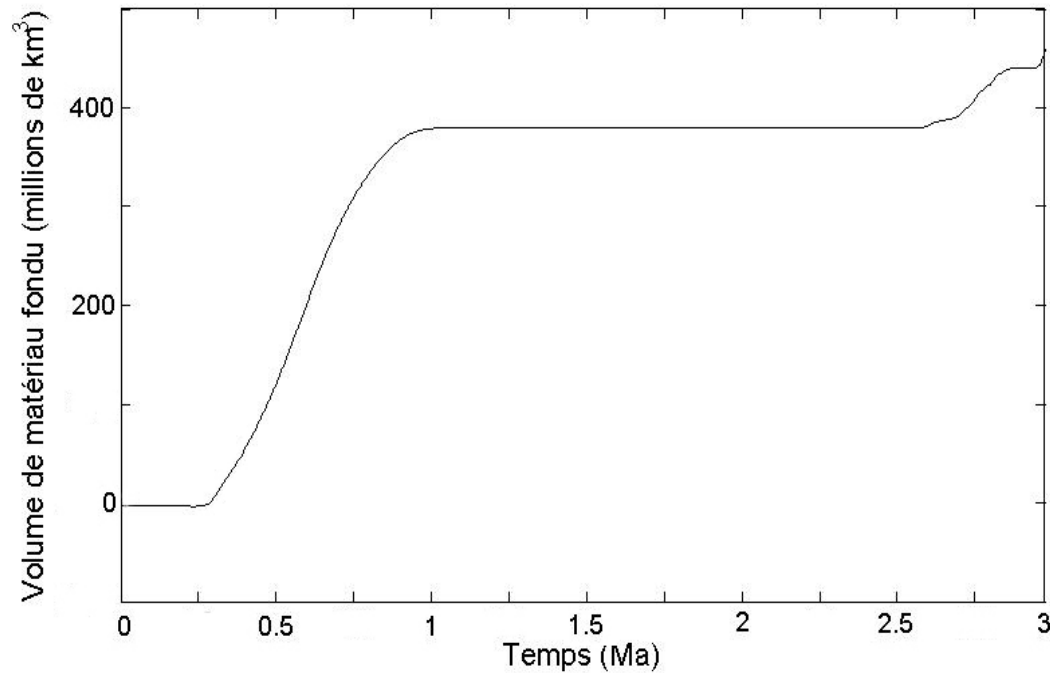
Le chauffage se fait par le bas et l'intérieur.



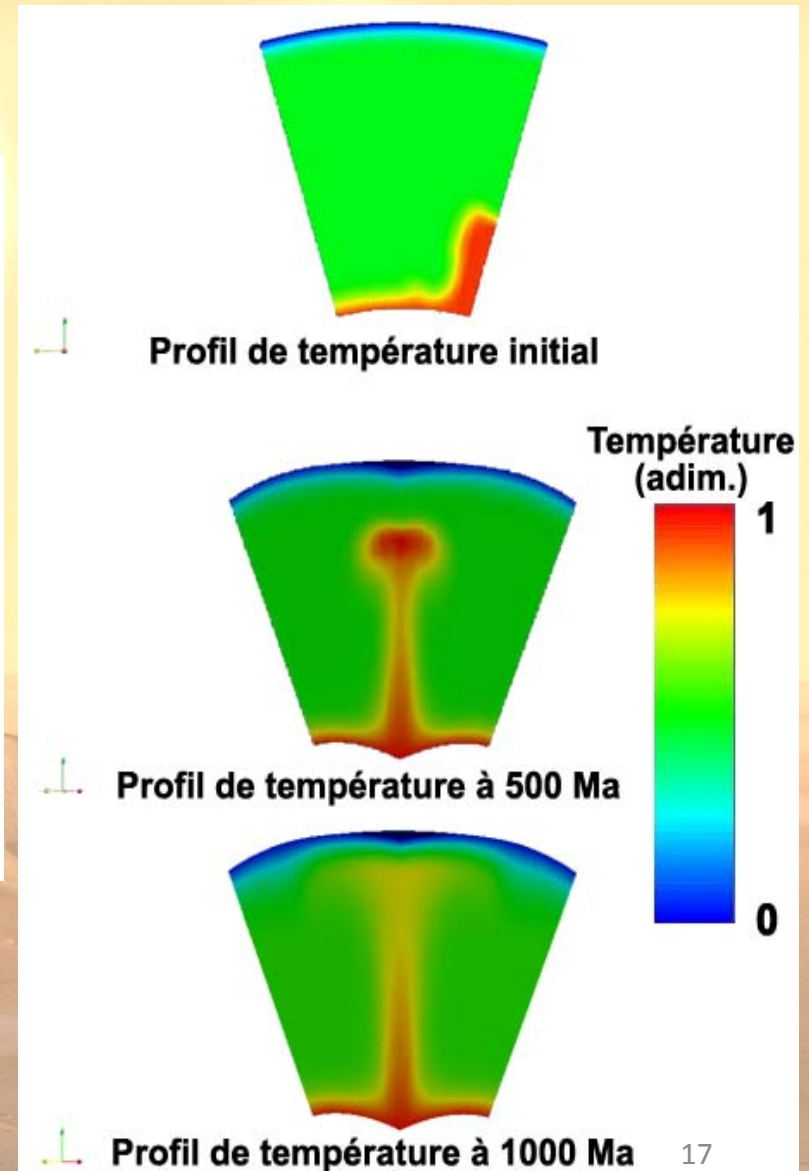


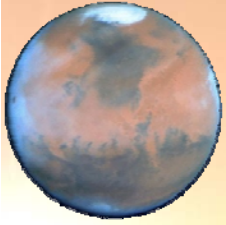
# Evolution et production de laves

Dépend fortement des paramètres employés



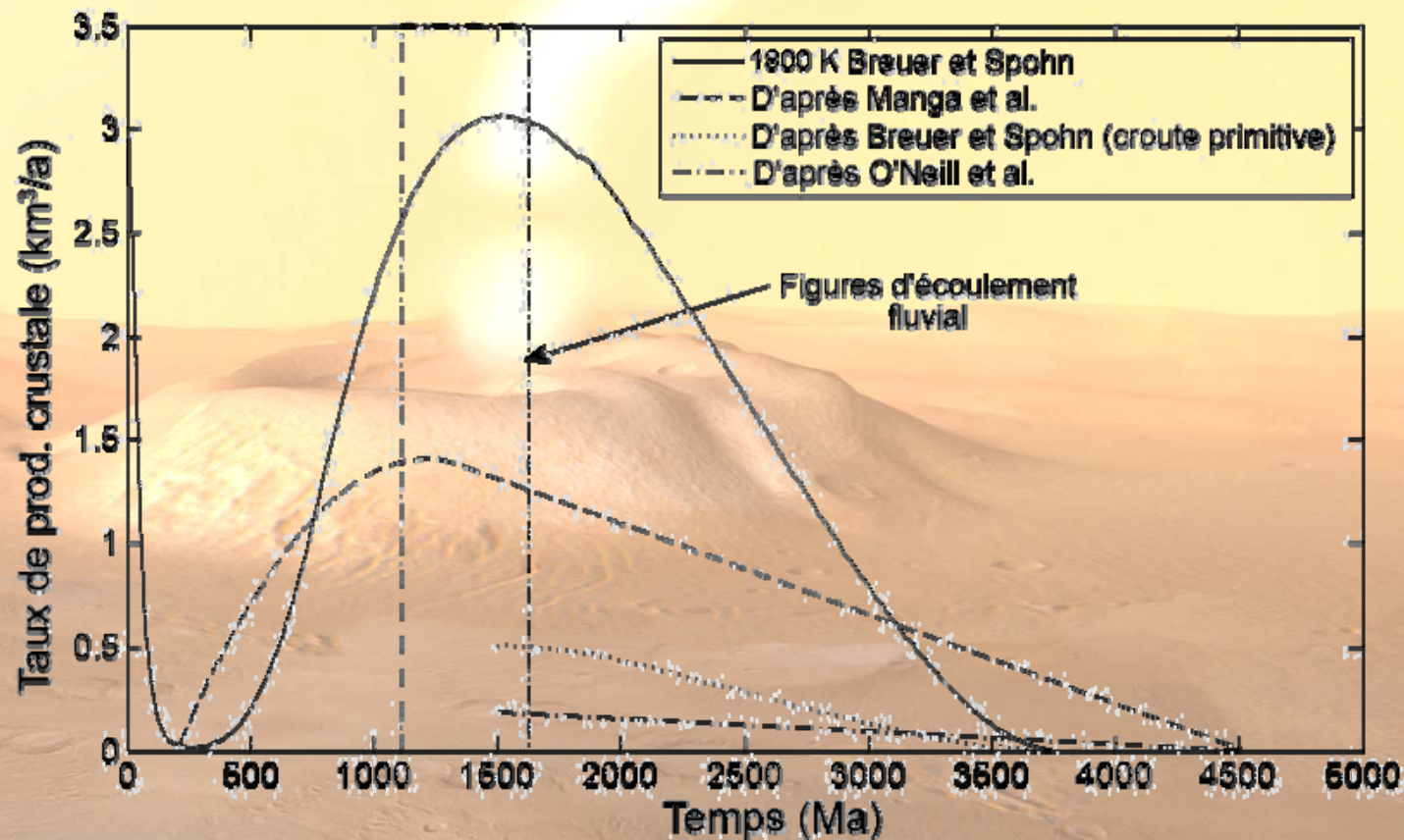
Présente encore de nombreuses lacunes pour représenter de façon précise la situation réelle

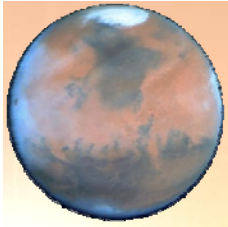




# Profils employés

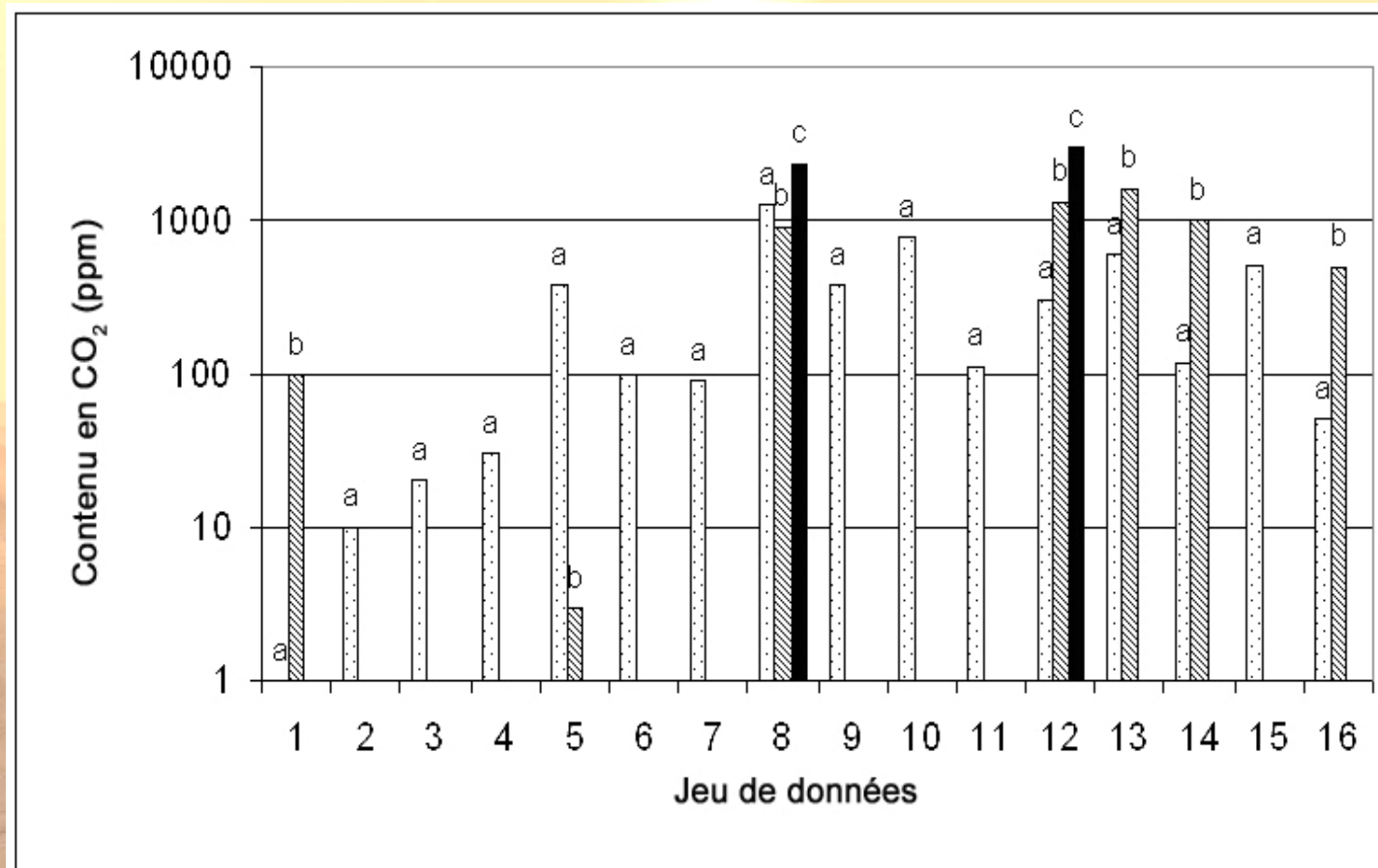
- Les modèles de production de croûte proposent des valeurs très différentes les unes des autres. ( $0.17 \text{ km}^3/\text{an}$  pour l'Hesperien jusqu'à  $10^{-4} \text{ km}^3/\text{an}$  à l'époque actuelle)

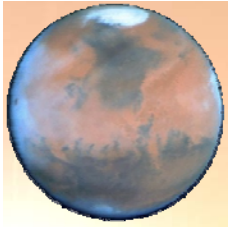




# Composition des laves Mesures et SNCs

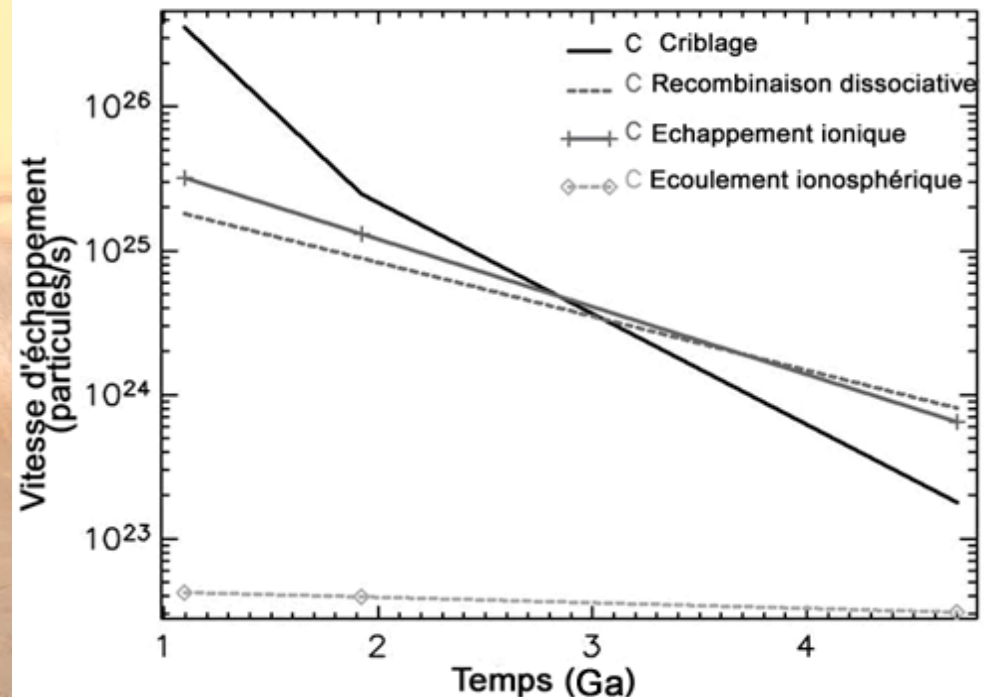
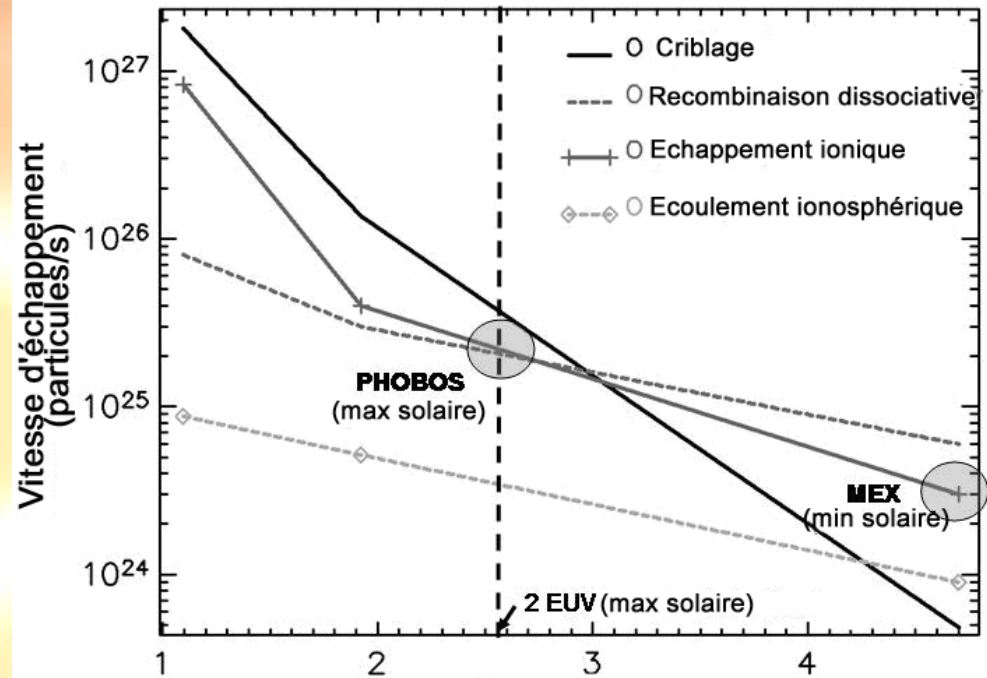
- La composition en CO<sub>2</sub> des laves est difficile à évaluer. (SNCs, valeurs terrestres, partitionnement...)



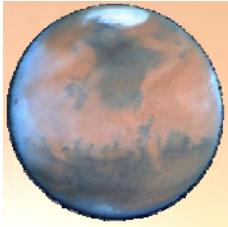


# Echappement atmosphérique

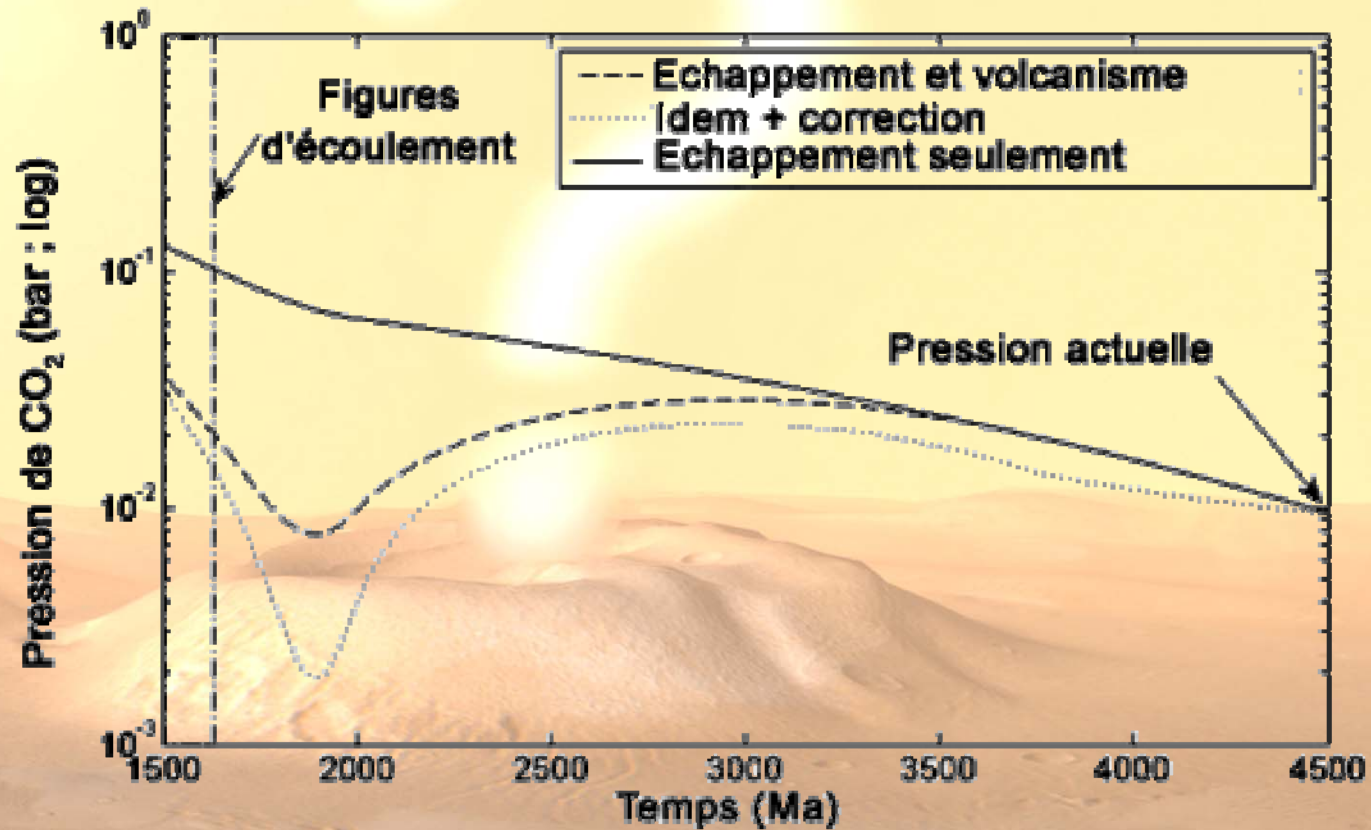
- L'échappement thermique (tel que l'échappement hydrodynamique) n'est pas pris en compte ici.
- Nous négligeons l'échappement par impact.
- Les processus non-thermiques sont le criblage, la recombinaison dissociative, l'échappement ionique et l'écoulement ionosphérique.
- Ces mécanismes dépendent du flux solaire EUV qui décroît avec le temps.

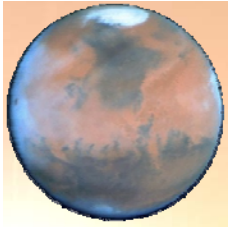




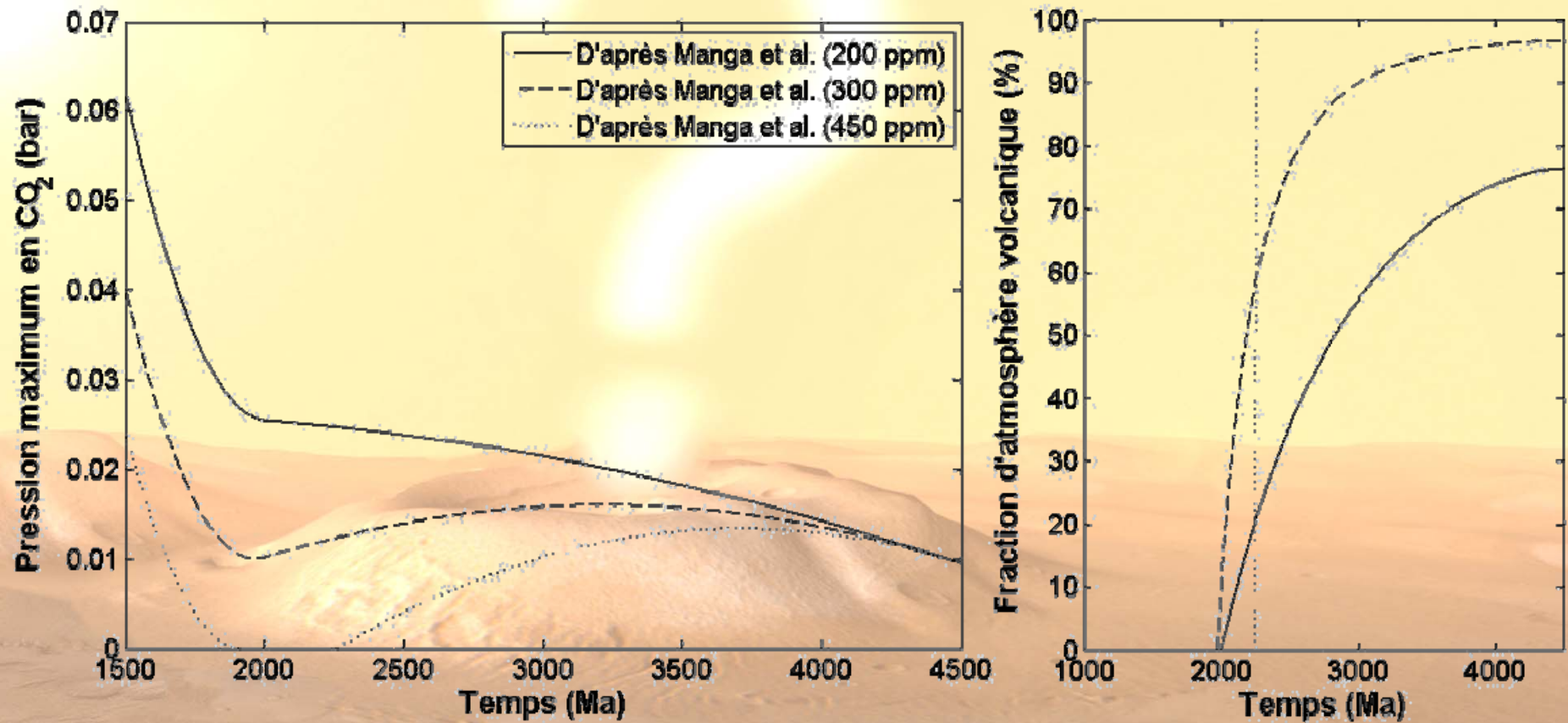


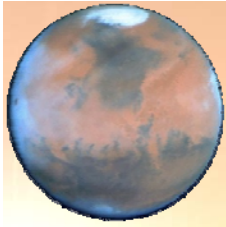
# Résultats : modèle d'activité intense



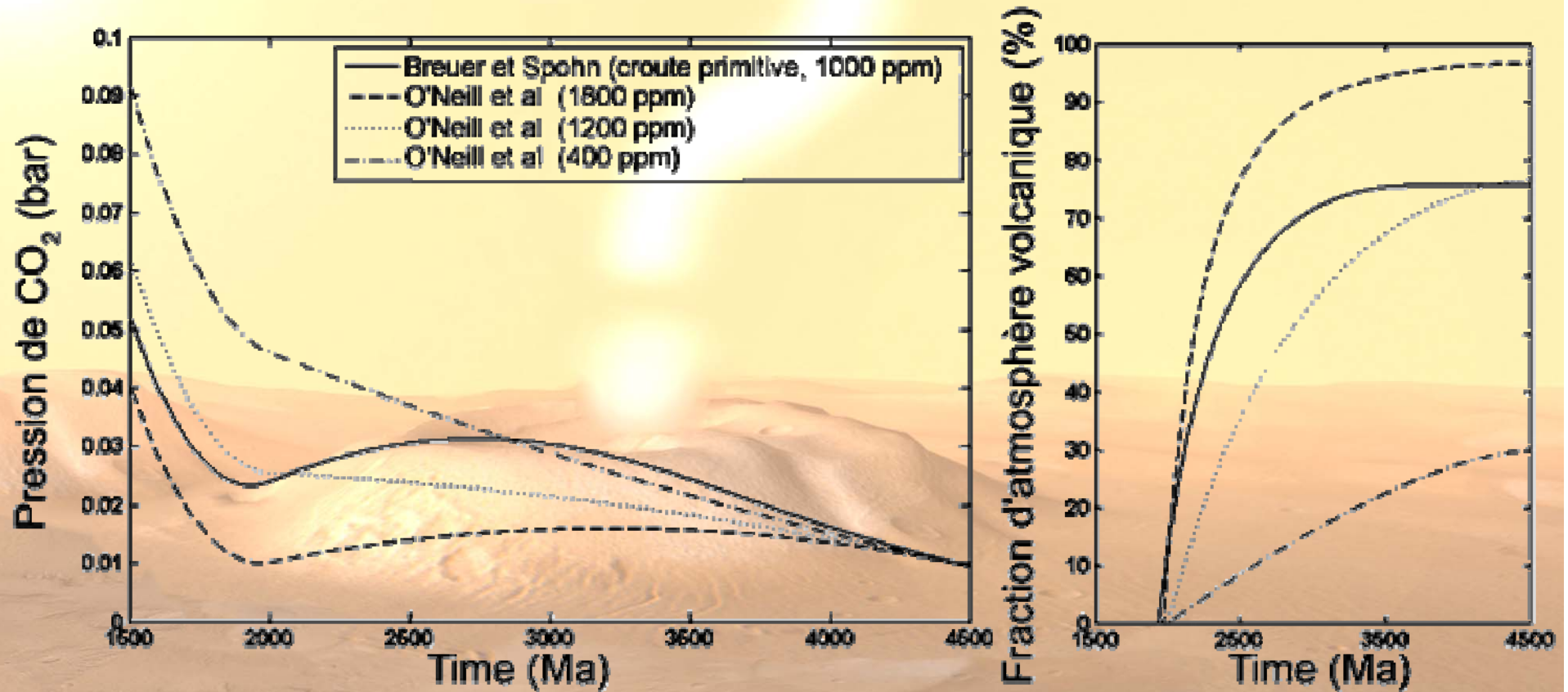


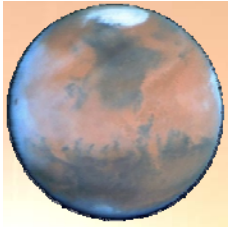
# Résultats : Modèle intermédiaire.



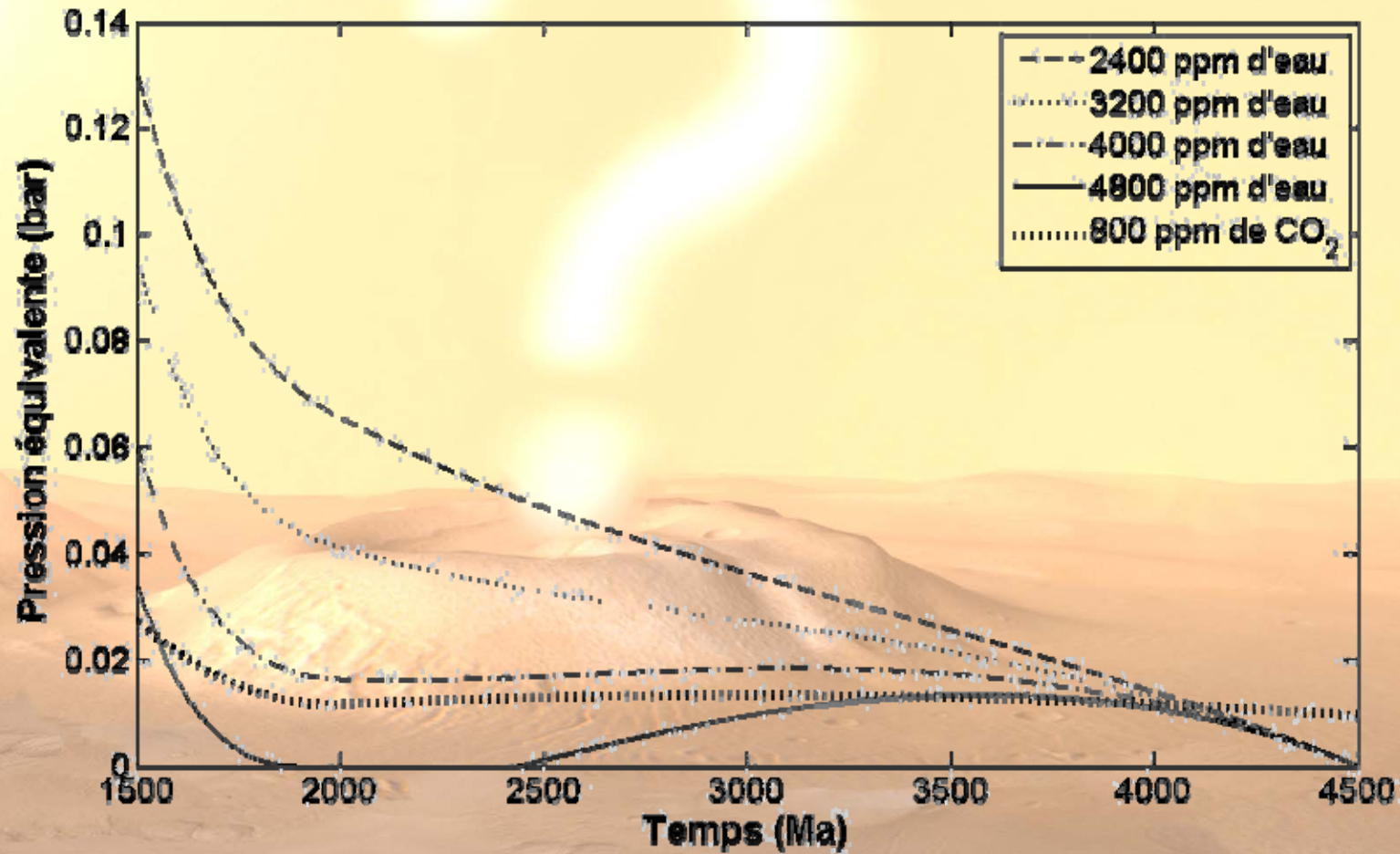


# Résultats : Modèles d'activité faible.

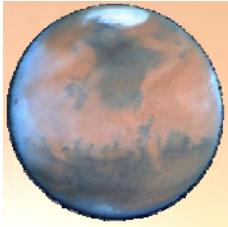




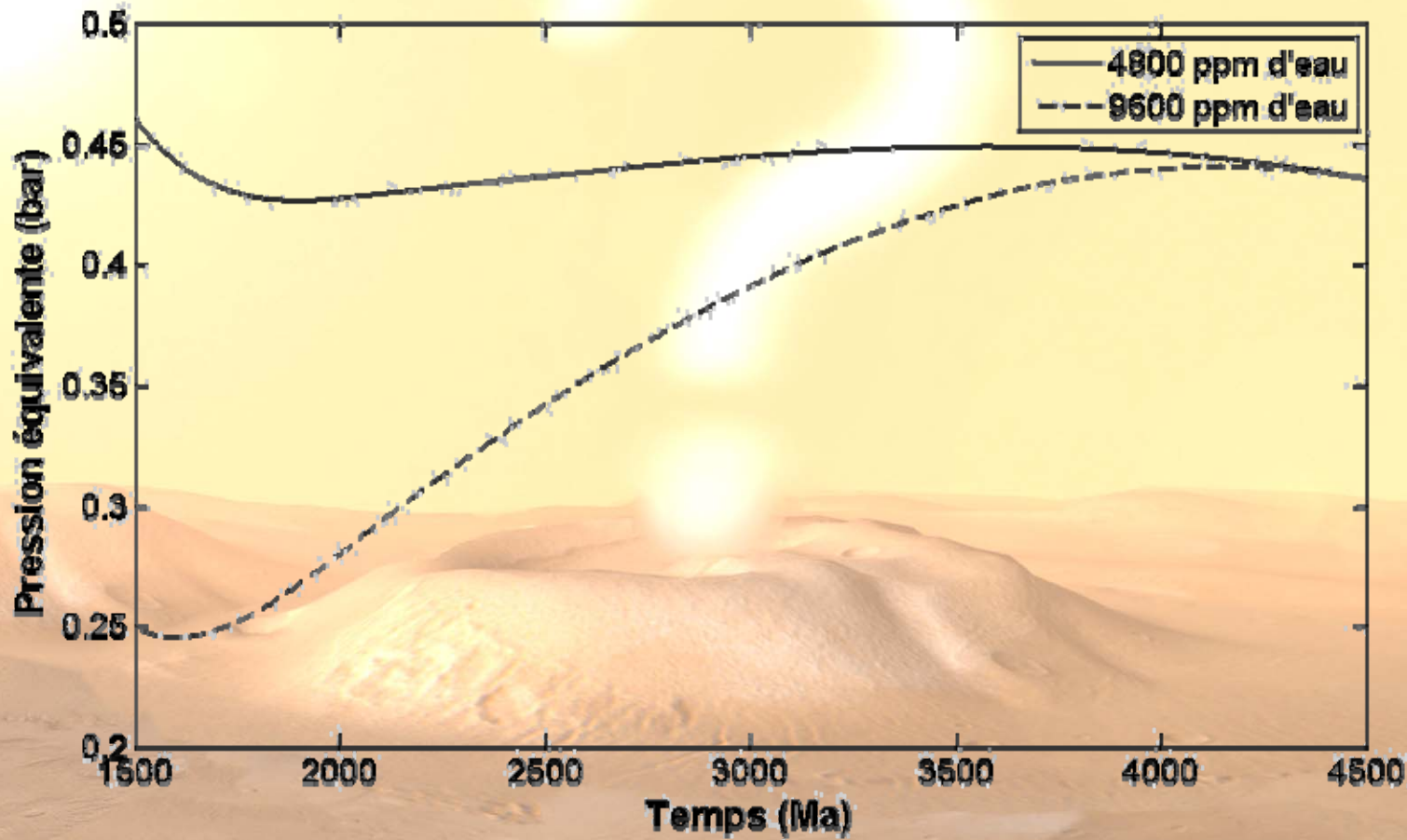
# Le cas de l'eau : étude simple.



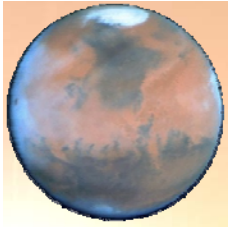




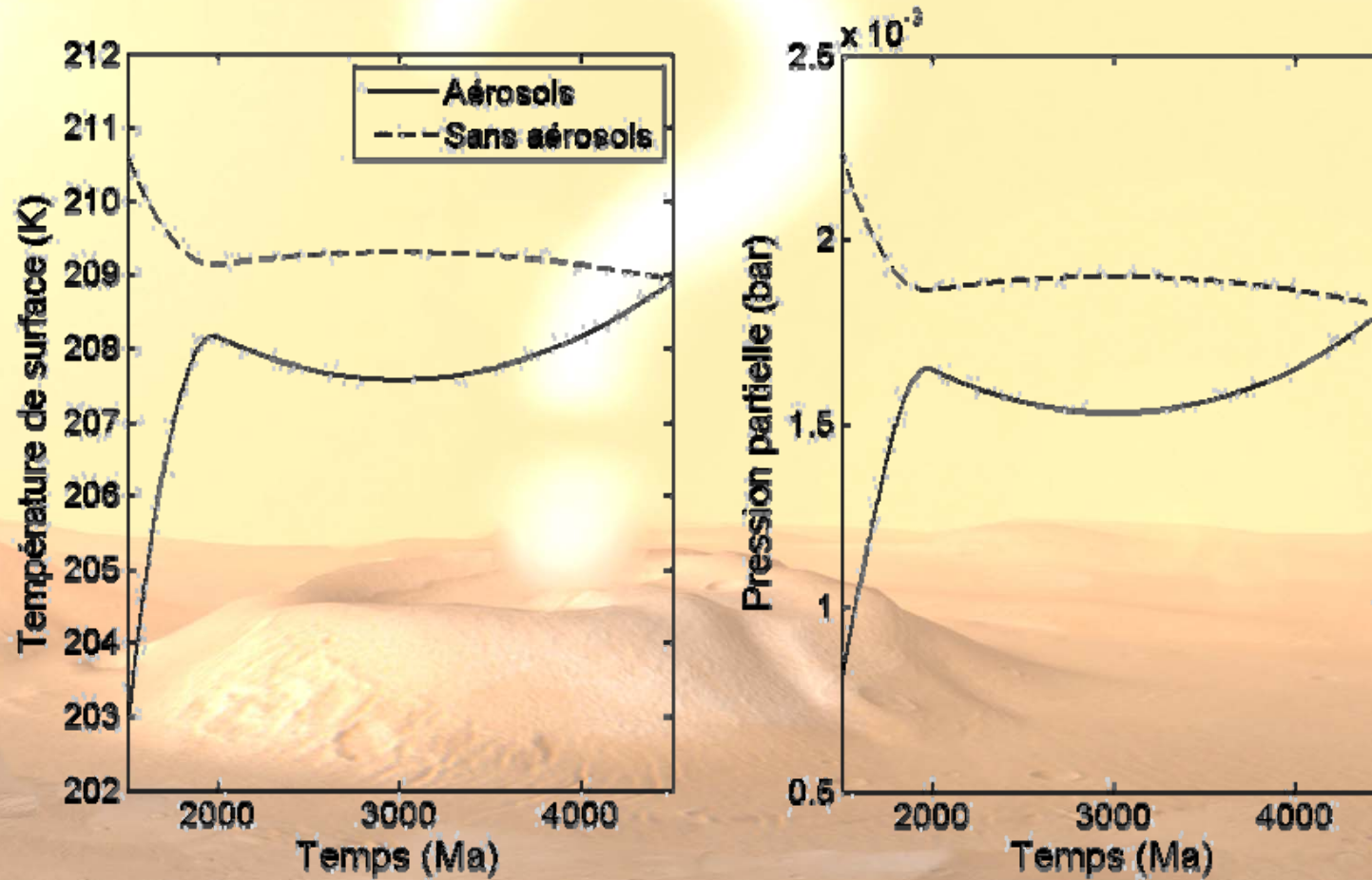
# Le cas de l'eau : effet des calottes.

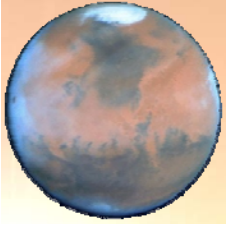


0,45 bar d'eau  
=  
Couche de 12 m

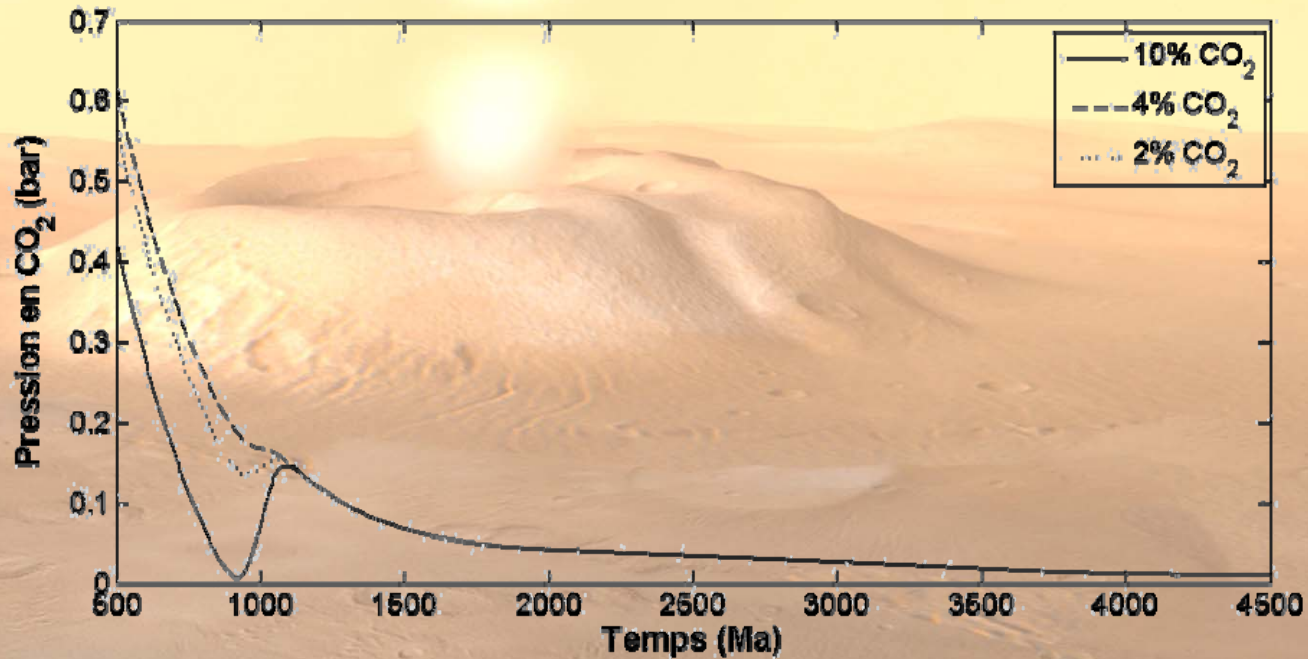
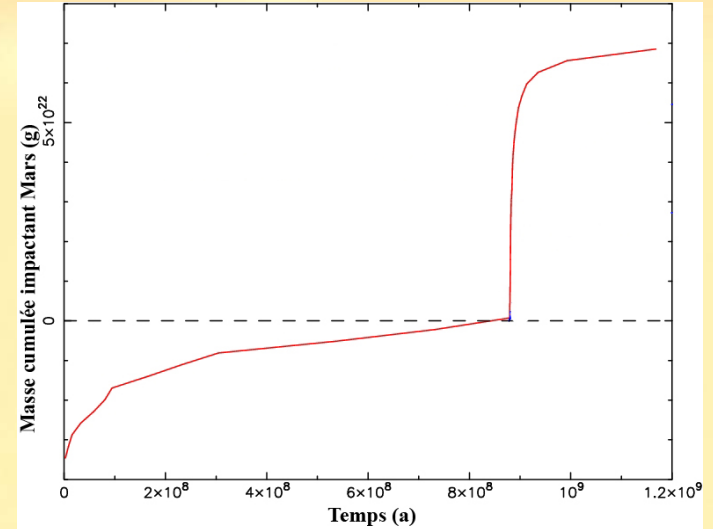
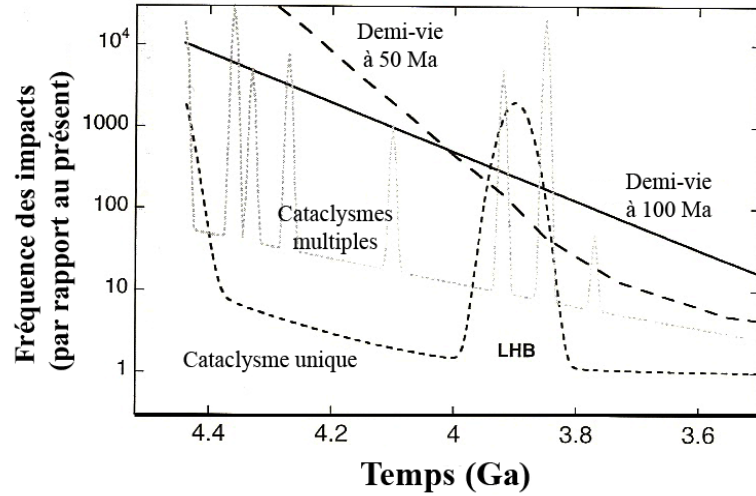


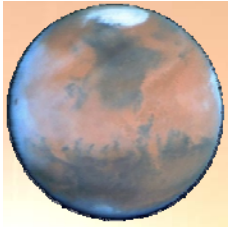
# Le cas de l'eau : Température de surface et pression.



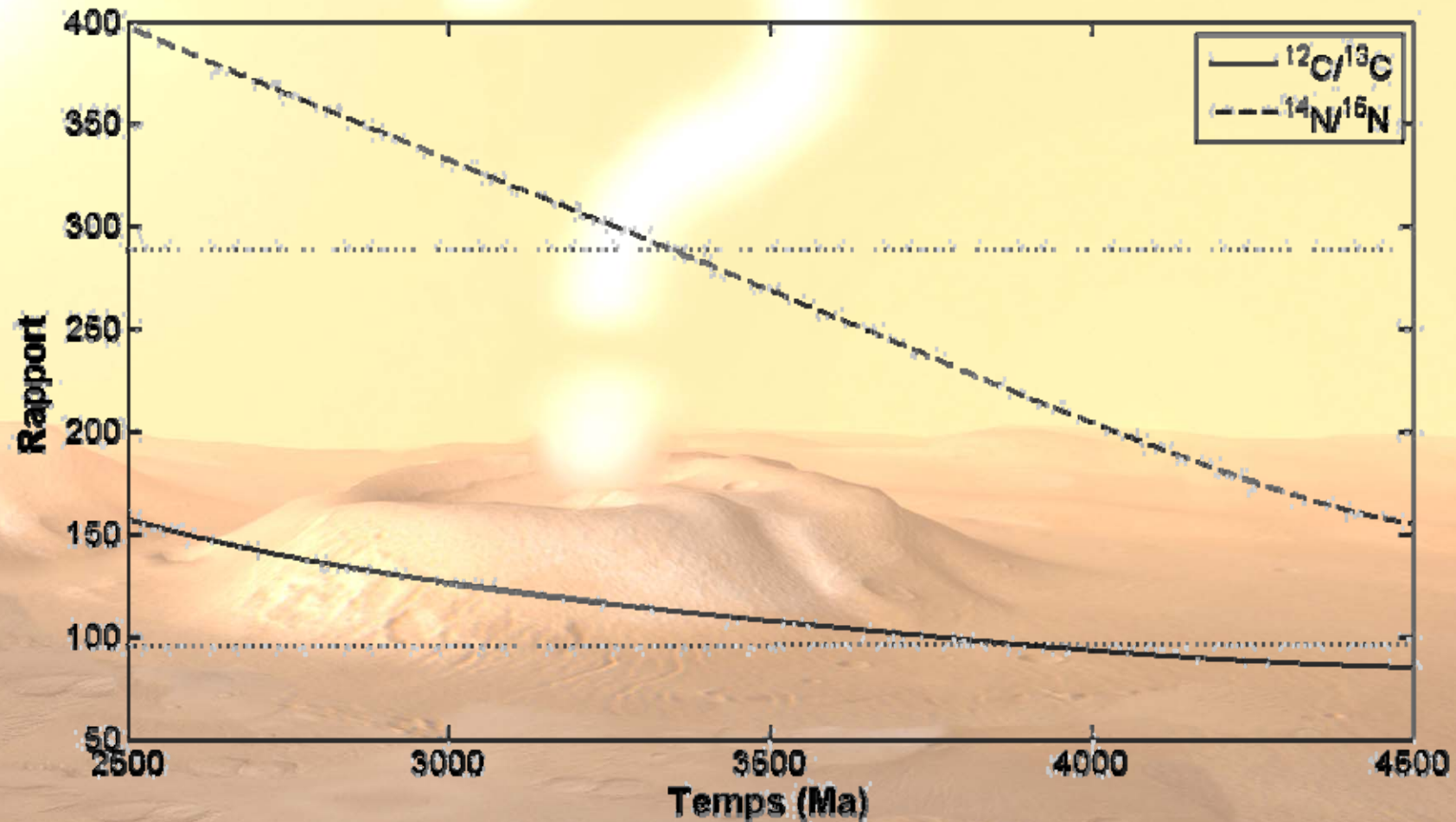


# Et avant ? Le bombardement primitif.

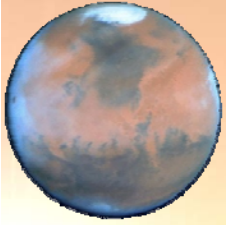




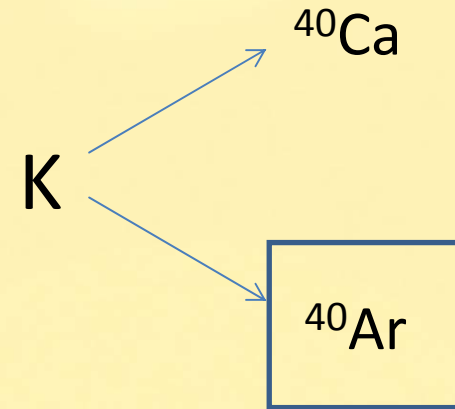
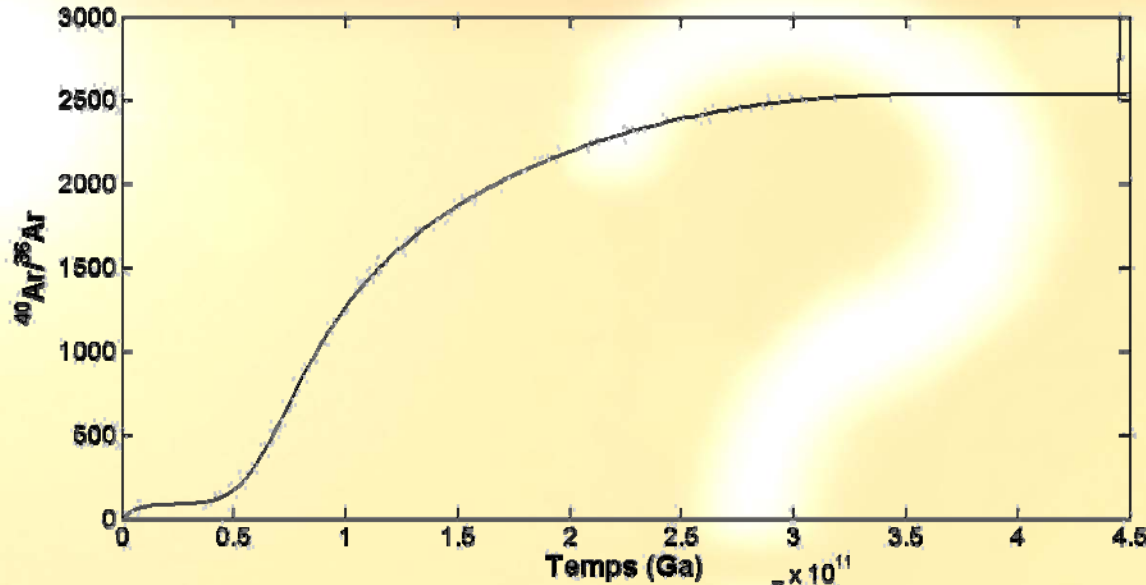
# Effet de l'évolution sur les rapports isotopiques.







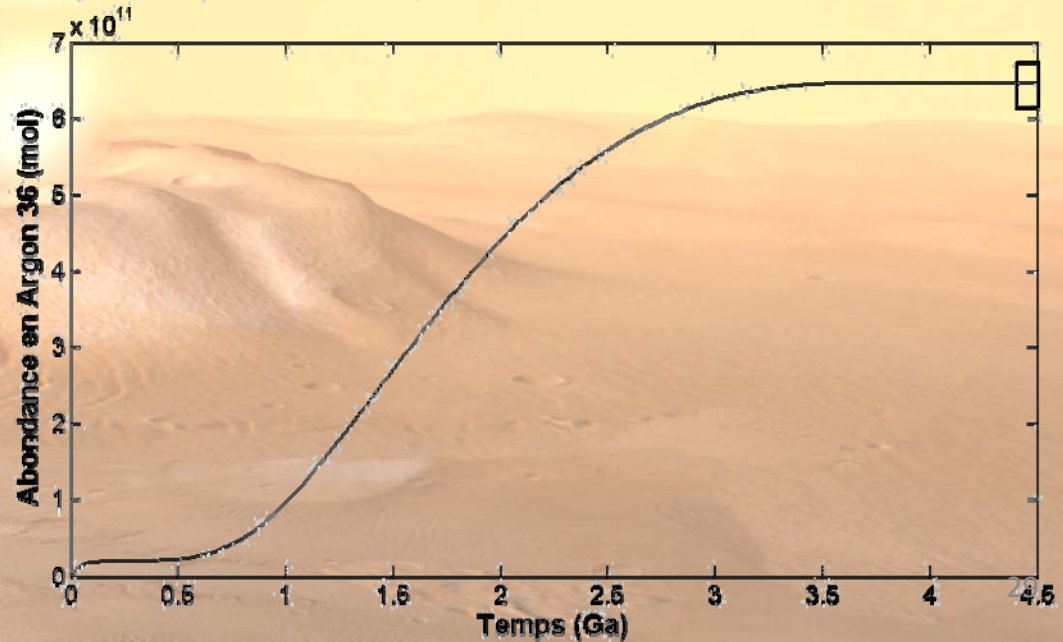
# Le cas de l'argon 40.



Concentration initiale : 300-900 ppm

Abondance init. <sup>36</sup>Ar :  $1,6 \cdot 10^{-10}$  cm<sup>3</sup>/g

Taux de fusion de type basaltique



# Conclusion



- Vénus n'a peut être jamais été habitable et pourrait être totalement sèche.
- L'atmosphère de Mars est sans doute jeune et d'origine volcanique : elle serait presque stable depuis près de 2 milliards d'années.
- On explique aussi comment on passe d'une Mars capable de former des sulfates à une Mars à l'atmosphère sèche.

# Perspectives



- Mars et isotopes :
  - Mesures in situ (concentrations, données isotopiques, sous sol...)
  - Volcanisme récent et méthane
  - Modèle à développer pour distinguer entre les évolutions
  - Climat primitif/cycle du carbone
- Vénus :
  - Missions : mesures gaz rares et des roches de surface (hydratation/oxydation)
- Modèle d'évolutions comparées :
  - couplage océan magma/atmosphère/échappement
- Répondre à la grande question :

Et la Terre dans tout ça?



# Remerciements.

- Mes directeurs de Thèse : P. Lognonné et E. Chassefière.
- Les membres du Jury : C. Sotin, F. Albarède, M. Moreira, A. van den Berg.
- Tous ceux que j'ai rencontrés pendant ma thèse et qui ont contribué par leurs remarques ou leurs conseils à l'améliorer.
- Ma famille qui m'a toujours soutenu.
- Vous tous qui êtes présents aujourd'hui.