

---

# Evolution thermique des Planètes

# Planètes = machine thermique

---

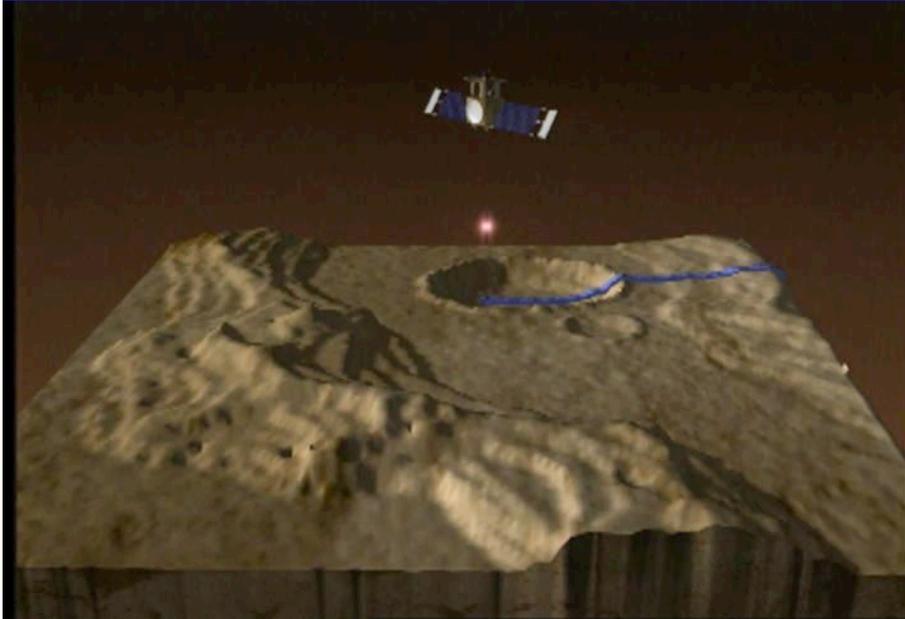
- ◆ Source chaude
  - Chaleur de l'accrétion
  - Radioactivité des éléments
- ◆ Source froide
  - Rayonnement de la surface
- ◆ donc Travail
  - Convection du manteau
    - » Tectonique, volcanisme
  - Convection du noyau
    - » Champ magnétique

# Mesures de gravité: principe et évolution



- ◆ Mariner 9: première mesure grâce à l'effet Doppler (Bande S): par exemple Lorell, 1972, Born, 1974
  - Ellipticité et grande structures  $s < 4$
- ◆ Mariner 9 + Viking (Gapcynski et al., 1977, Christensen et Balmino, 1979, Balmino et al., 1982)
  - Grande structures tectoniques  $s < 16$
- ◆ Mars Global Surveyor: mesure en Bande X ( moins d'effets de plasma) très fine (erreur de vitesse  $< 100 \mu\text{m/s}$ )
  - Structure fines  $s < 60-80$
  - Comparaison avec la Terre: 2/3 de la résolution de la mission GOCE, dont le lancement sera en ... 2004

# Altimétrie: principe et historique



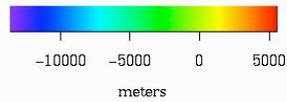
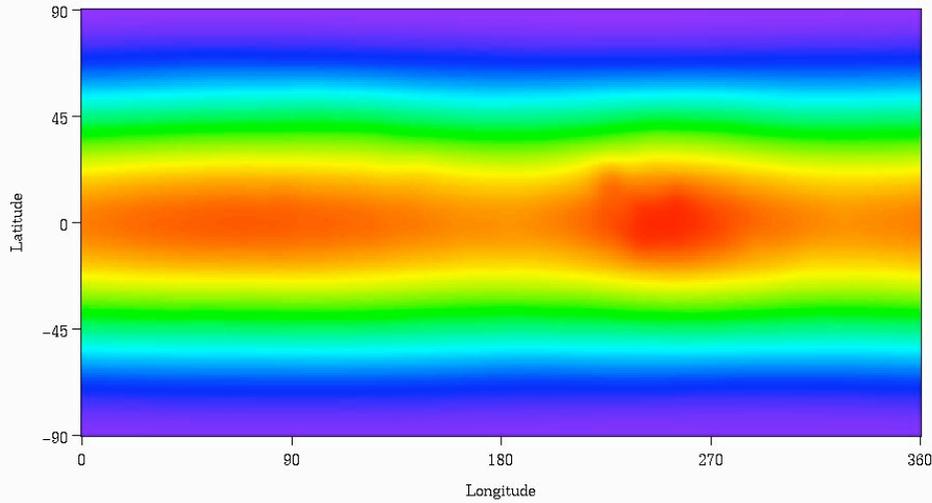
- ◆ Première mesure radar depuis la Terre (Goldstone, Aricebo, etc) 200 m de précision
- ◆ Mesure d'occultation radio des sondes Mariner 9 et Viking
  - Structure de grande échelle  $s < 8$

## ◆ MGS: expérience MOLA ( Zuber et al.)

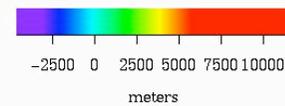
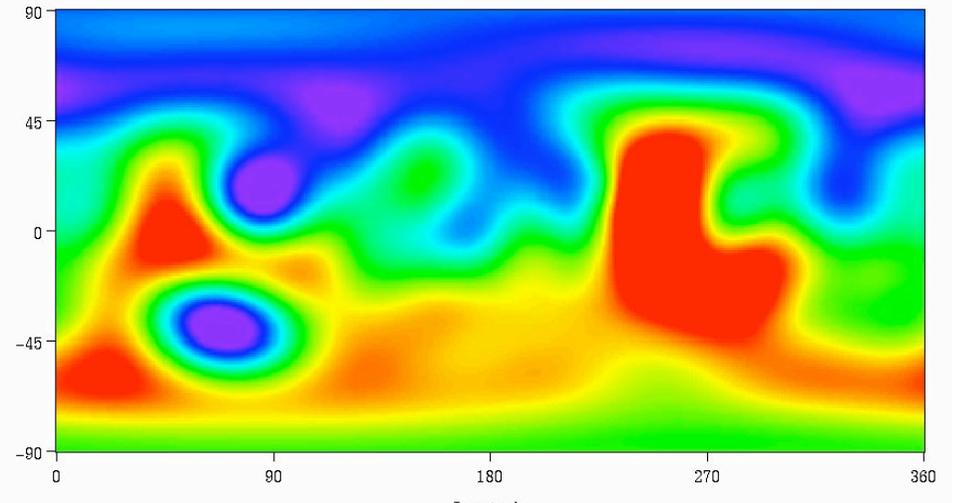
- Résolution latérale (taille du spot): 130-330 m
- Résolution absolue: 10 m
- Résolution relative: 35 cm



# Mariner 9...

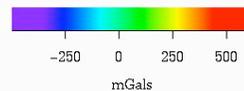
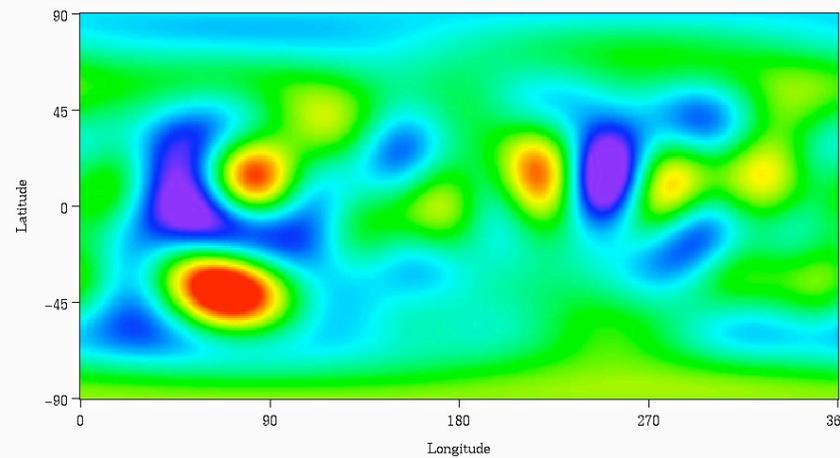


Geoïde



Altimétrie

Anomalie de Bouguer



# En orbite depuis le 11 septembre 1997

**JPL**

## Mars Global Surveyor Project MGS Spacecraft In Mapping Configuration

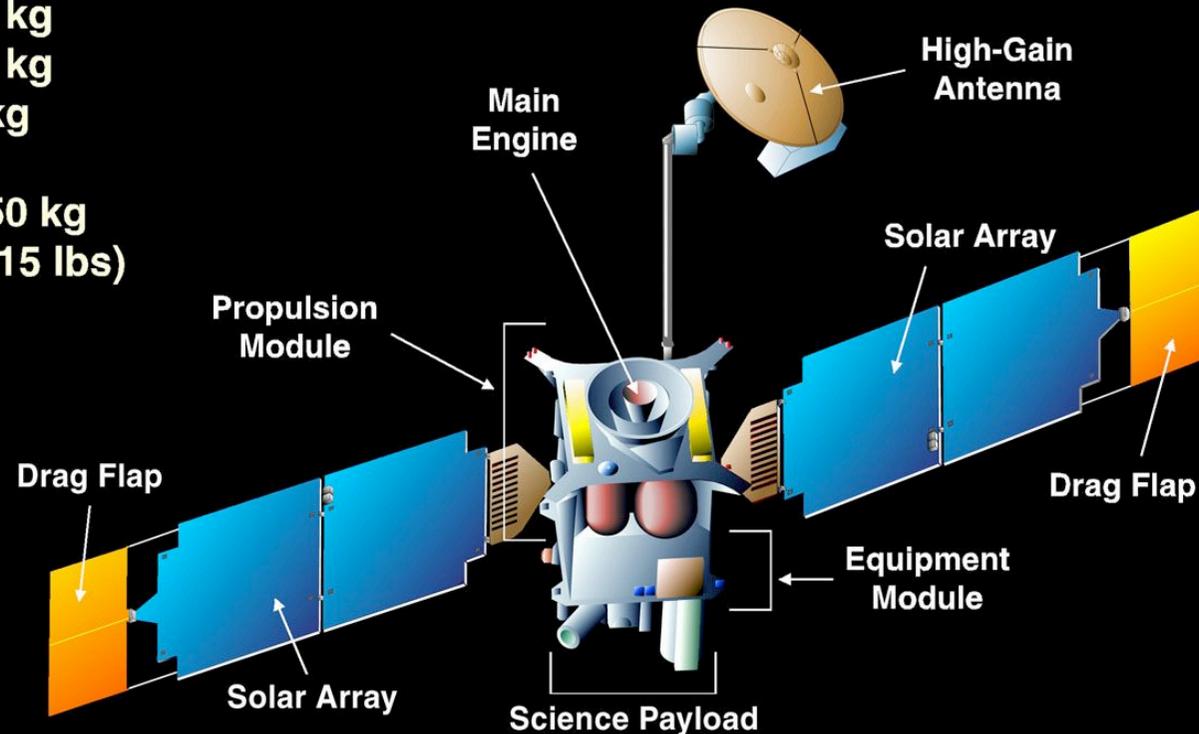


**Structure Mass:** 595 kg  
**Propellant Mass:** 380 kg  
**Payload Mass:** 75 kg

**Total Mass:** 1,050 kg  
(2,315 lbs)

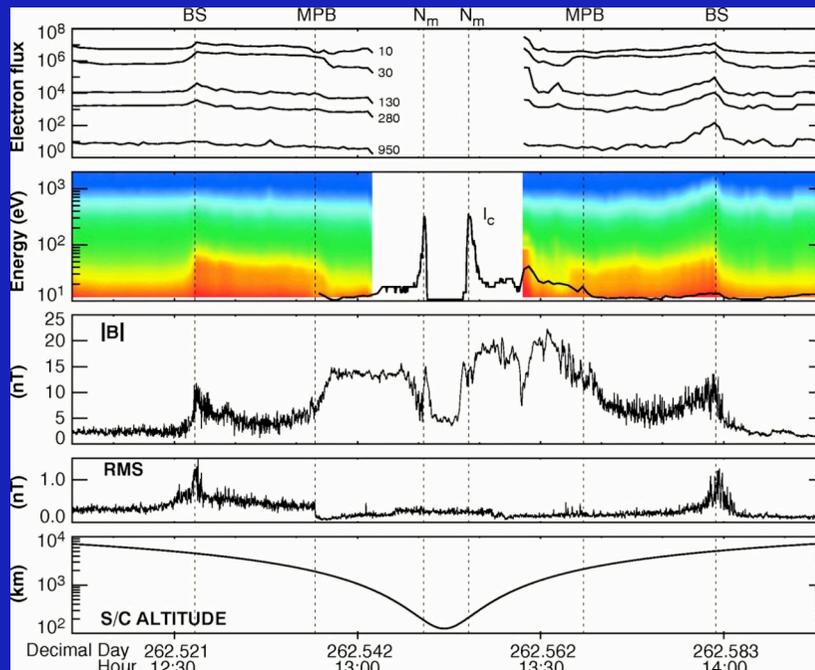
**Science Payload:**

Electron Reflectometer  
Magnetometer  
Mars Orbiter Camera  
Mars Orbiter Laser Altimeter  
Mars Relay Radio System  
Radio Science  
Thermal Emission Spectrometer

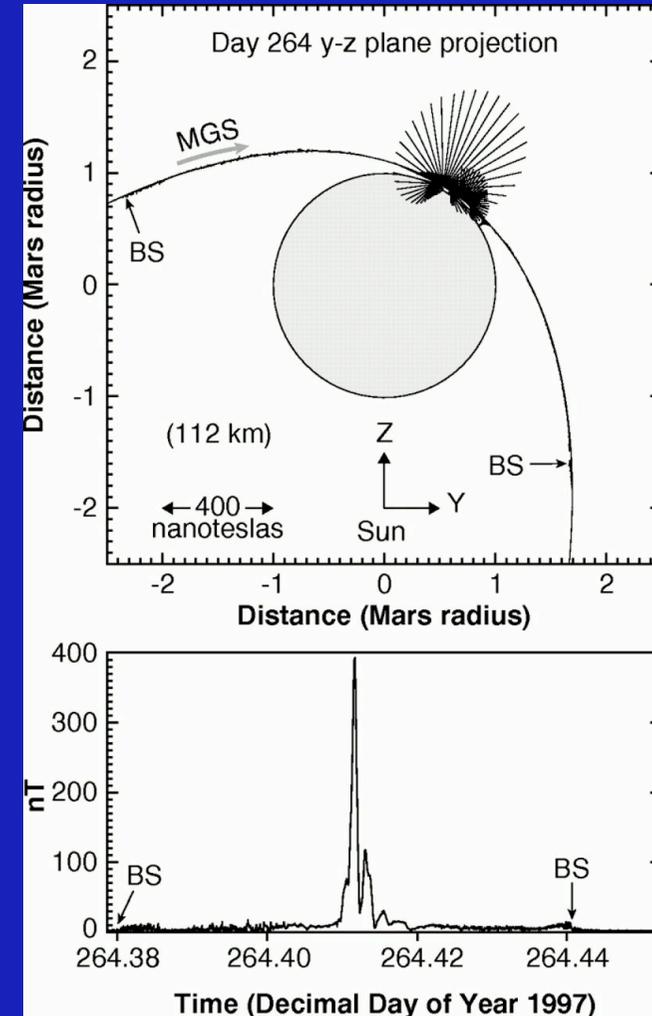


# MGS-Magnétomètre-réfectomètre à électrons

- Avant MGS: incertitude et débat sur le champ magnétique Martien... suite à des mesures de la sonde soviétique Phobos
- Survol à basse altitude de MGS, avec traversée de l'ionosphère et de la haute atmosphère
- confirmation de l'absence de champ interne ( $< 2 \cdot 10^{21}$  gauss  $\text{cm}^3$ )
- Mais découvertes d'anomalies crustales très fortes

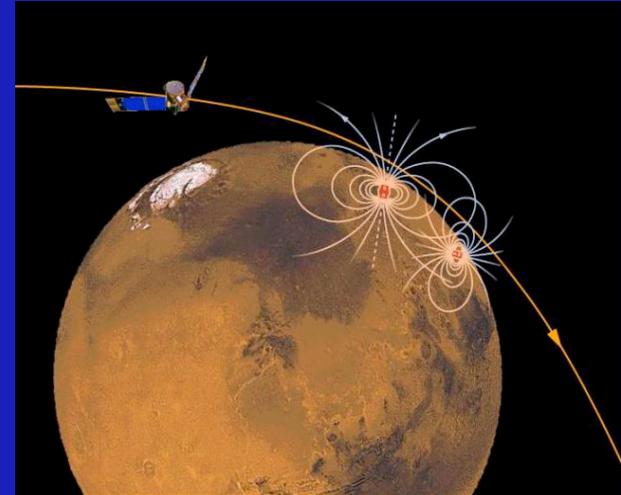
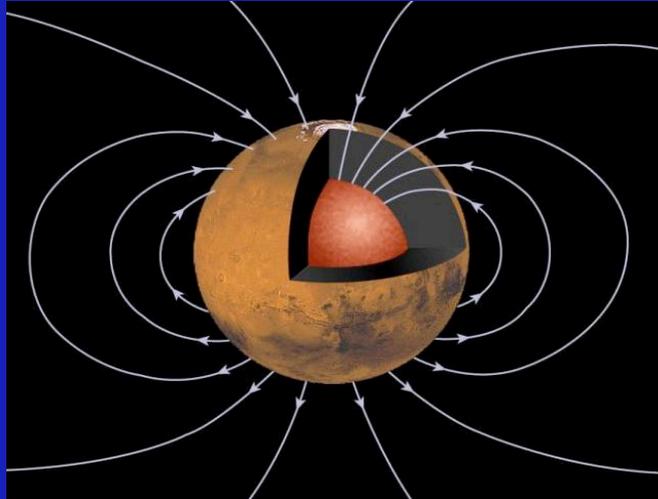


## Mesure avec anomalie



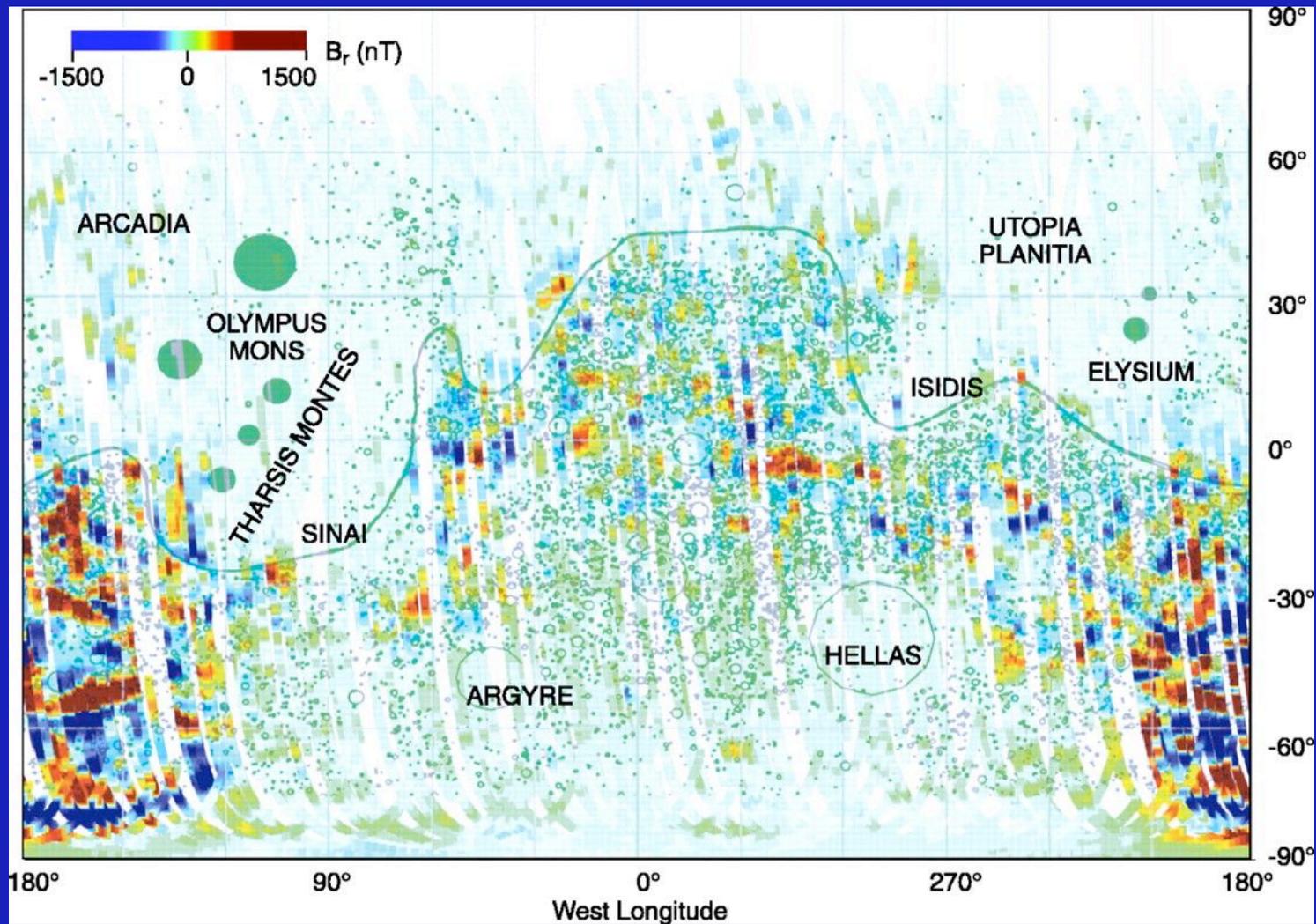
## Mesure sans anomalie

# Interprétation...



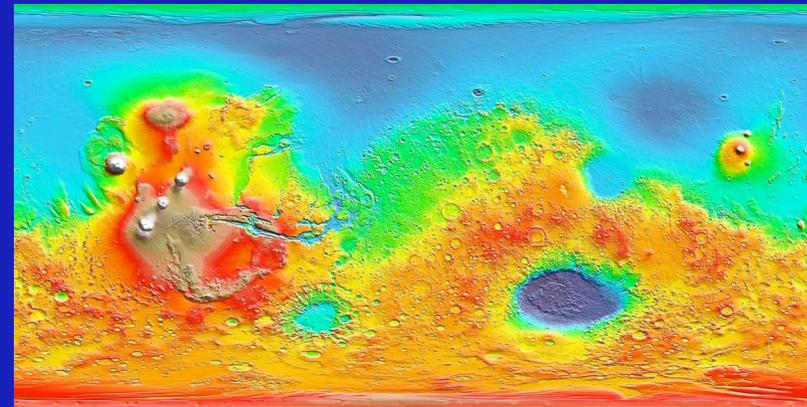
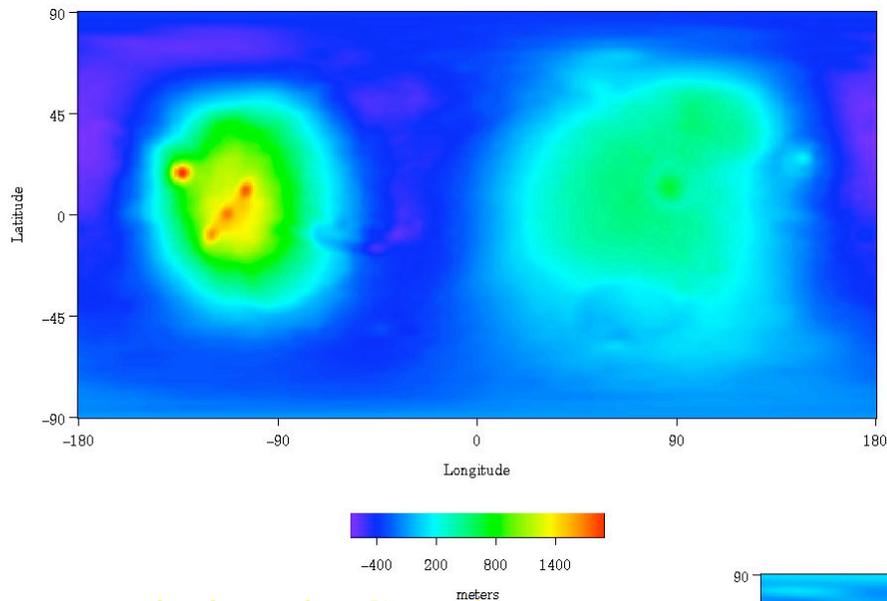
- ◆ Pendant 500 à 1000 millions d 'années.. Dynamo active
- ◆ Lors de la phase d 'activité: acquisition rémanente de magnétisme lors du refroidissement de laves
- ◆ La croûte a gardé cette aimantation, détectée par la sonde

# Anomalie crustale magnétique



- ◆ Dichotomie Nord/Sud et dynamo morte lors de la mise en place de Tharsis ( $4.6 - 3.5 \cdot 10^9$  ans) ?

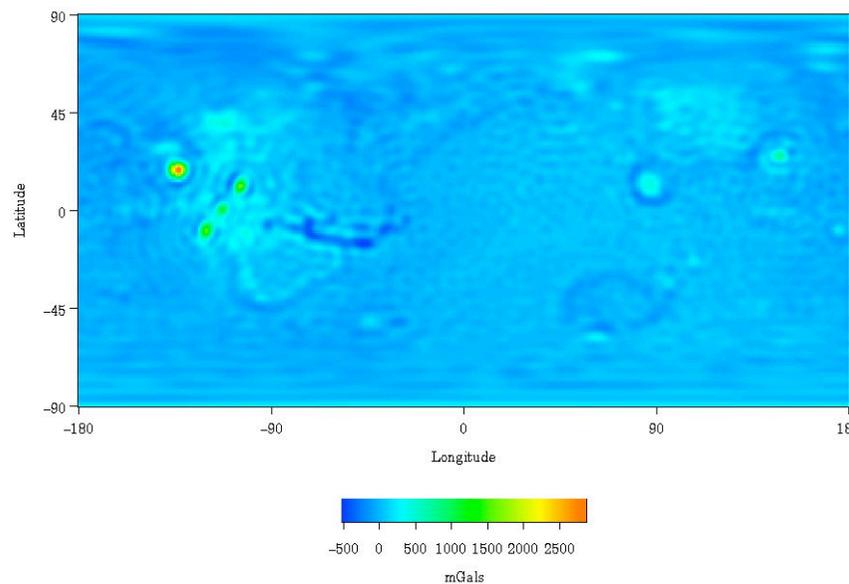
# Mars Global Surveyor



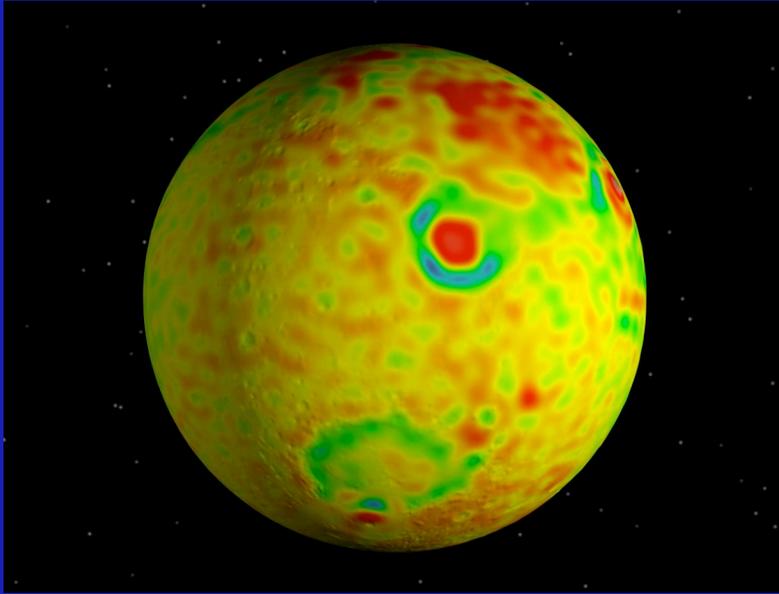
Altimétrie

Variation du Géοide  
par rapport à  
l'ellipsoïde de référence

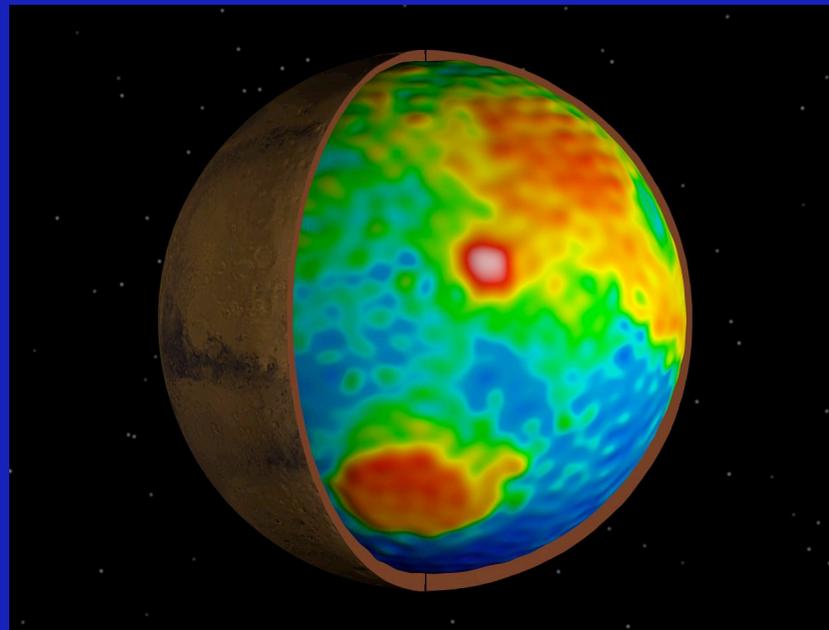
Anomalies de gravité  
du géοide par rapport à  
l'ellipsoïde de référence



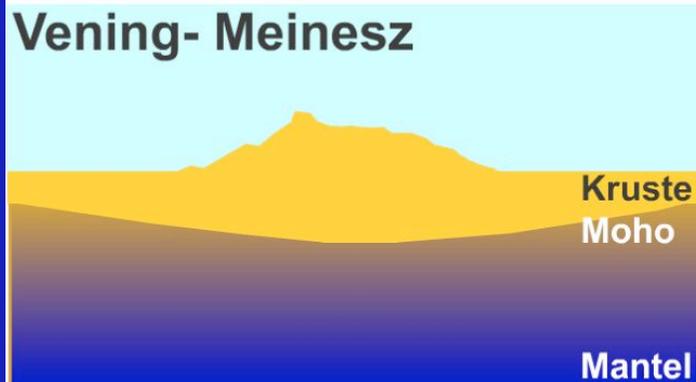
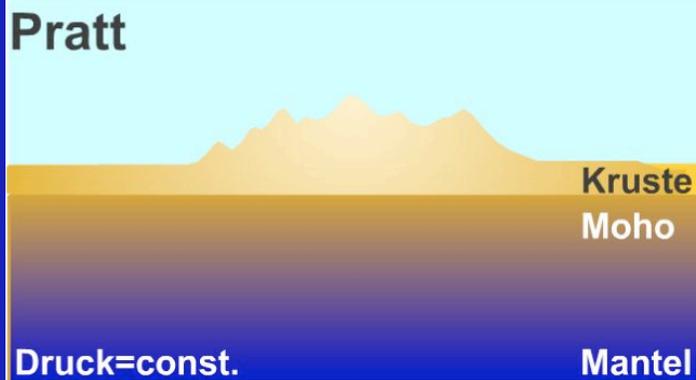
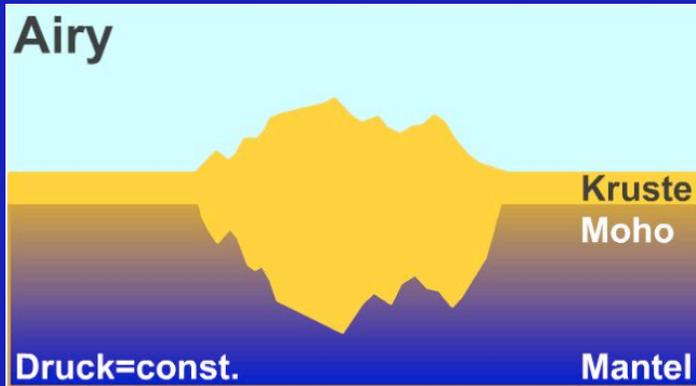
# Premières estimations de l'épaisseur crustale



- ◆ Le début des contraintes sur la structure interne...
- ◆ Estimation de l'épaisseur crustale
- ◆ Hypothèse: totalité du signal gravimétrique liée à la croûte avec compensation d'Airy
  - Pas de point d'ancrage sismique
  - Pas d'hétérogénéités latérales de densité



# Compensation des reliefs (Isostasie)



## Compensation d'Airy

1. La croûte rigide flotte sur le manteau.
2. Topographie de surface implique une racine
3. La pression à une certaine profondeur dans le manteau est constante

$$h \rho_c = (\rho_m - \rho_c) b$$

## Compensation de Pratt

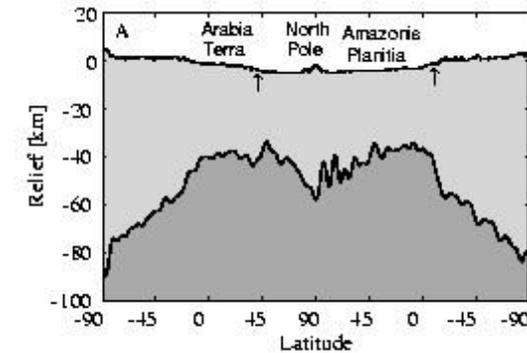
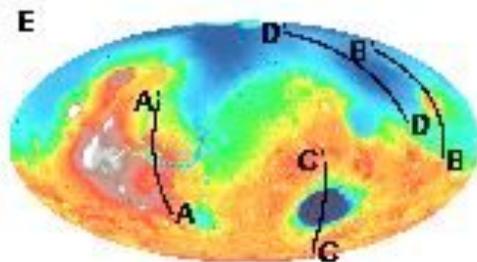
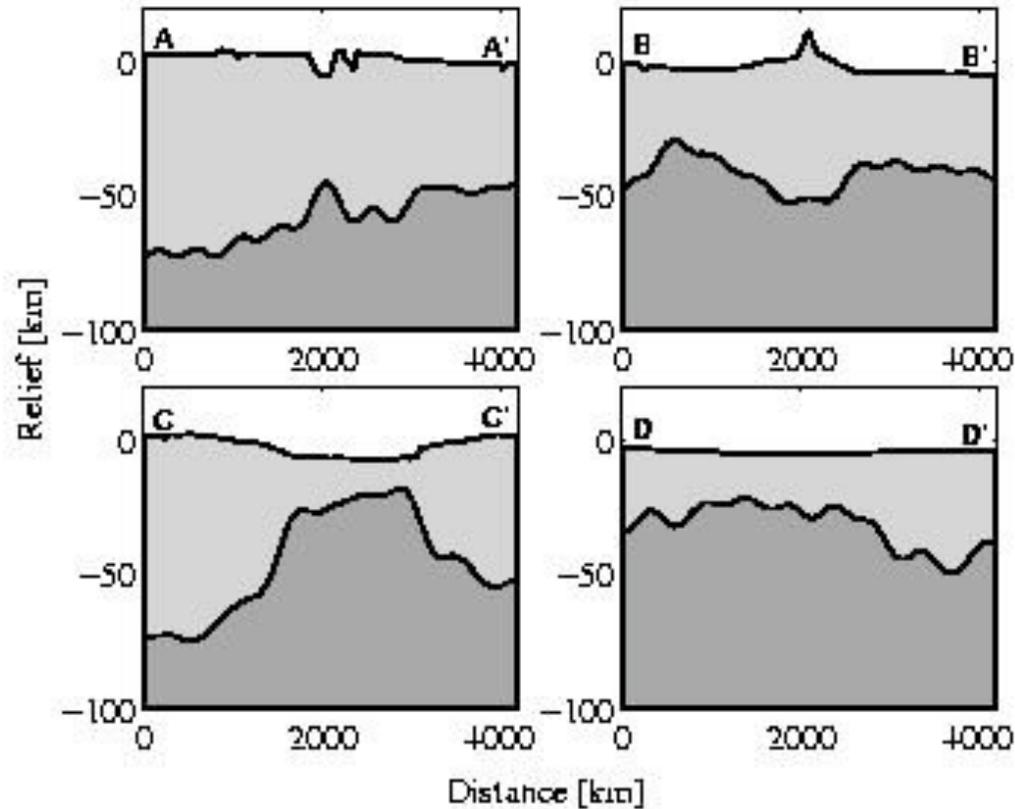
1. La pression à la base de la croûte est constante.
2. Là où les altitudes sont hautes, la densité est faible

$$H_0 \rho_0 = (H_0 + h) \rho$$

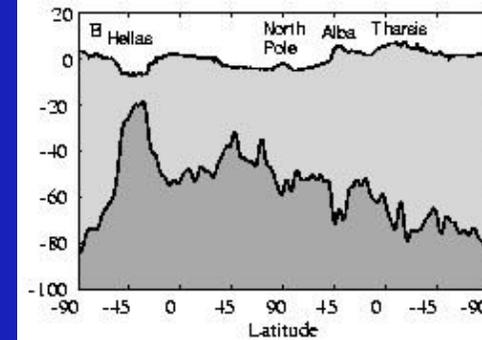
## Flexure

1. Les contraintes élastiques de la croûte supporte une partie de la charge
2. Si l'épaisseur élastique est nulle, la compensation d'Airy s'applique

# Dichotomie Nord sud et détails



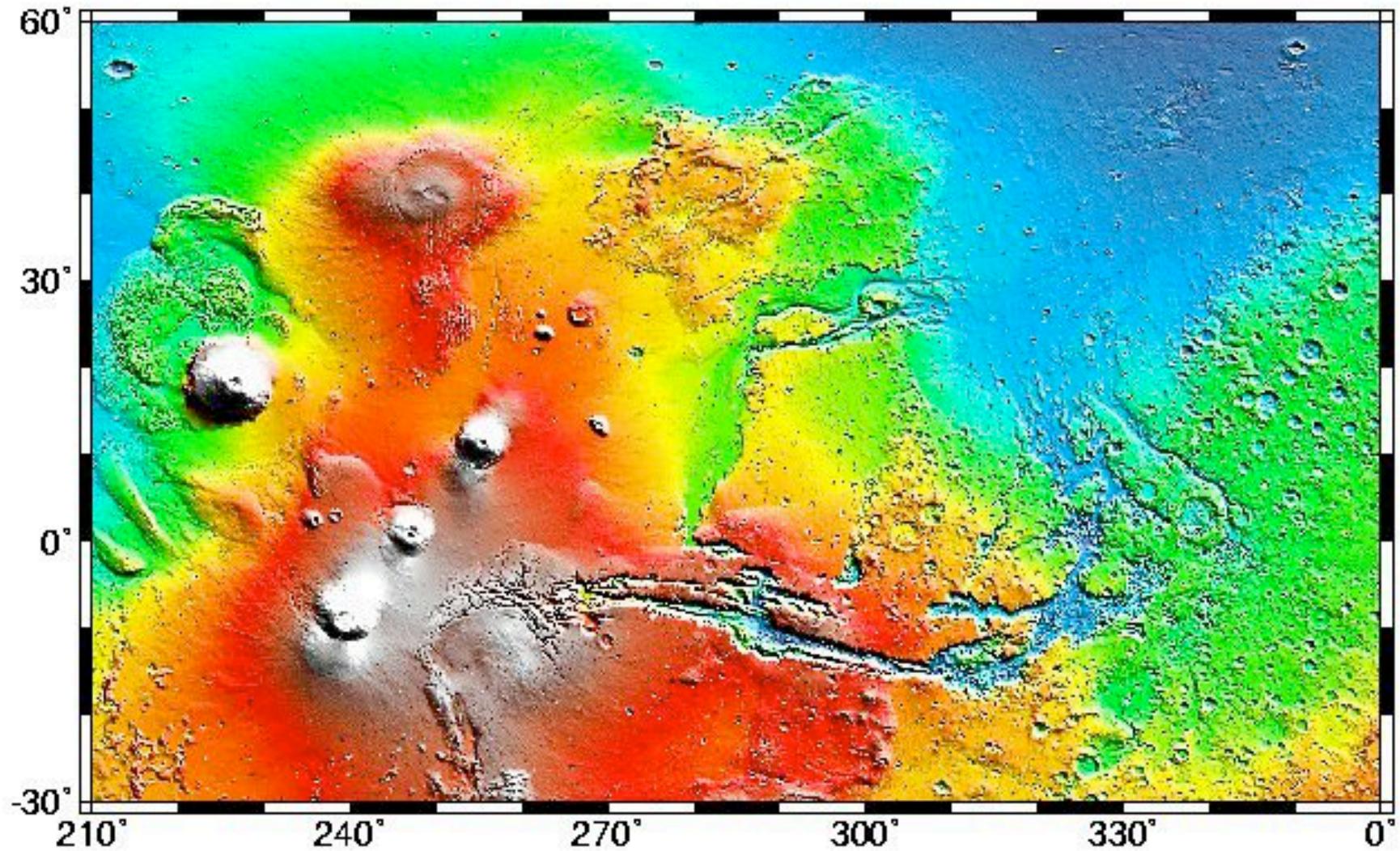
0° à 180°E



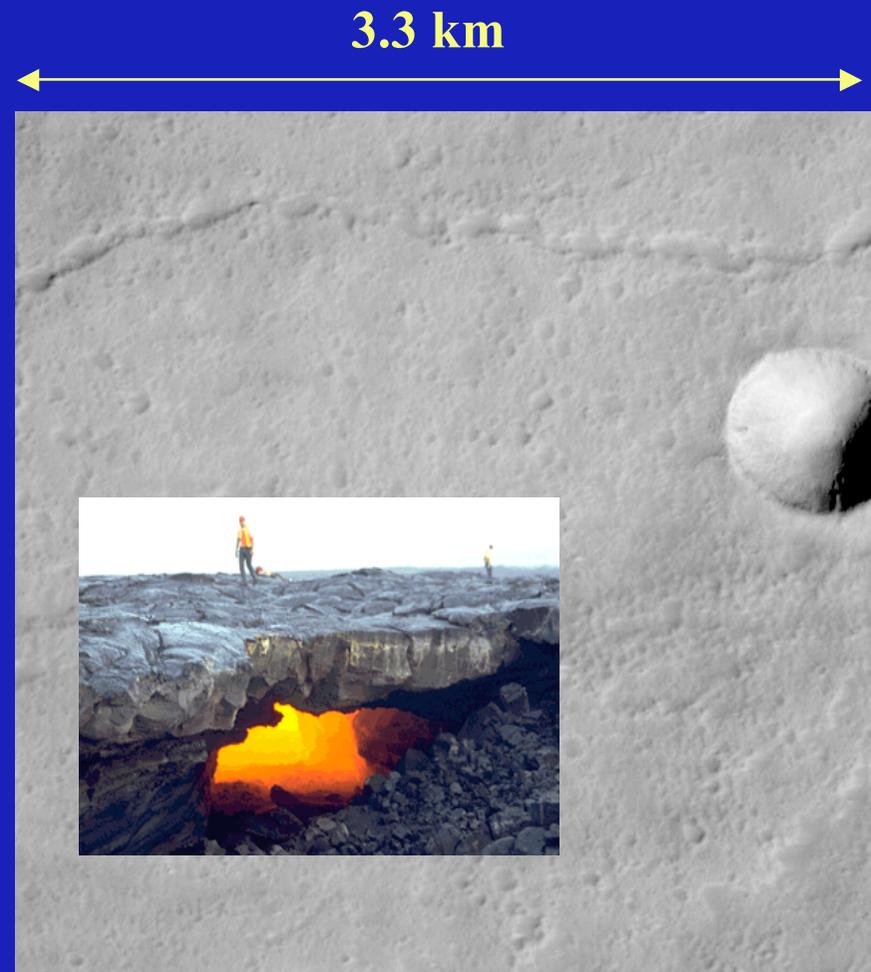
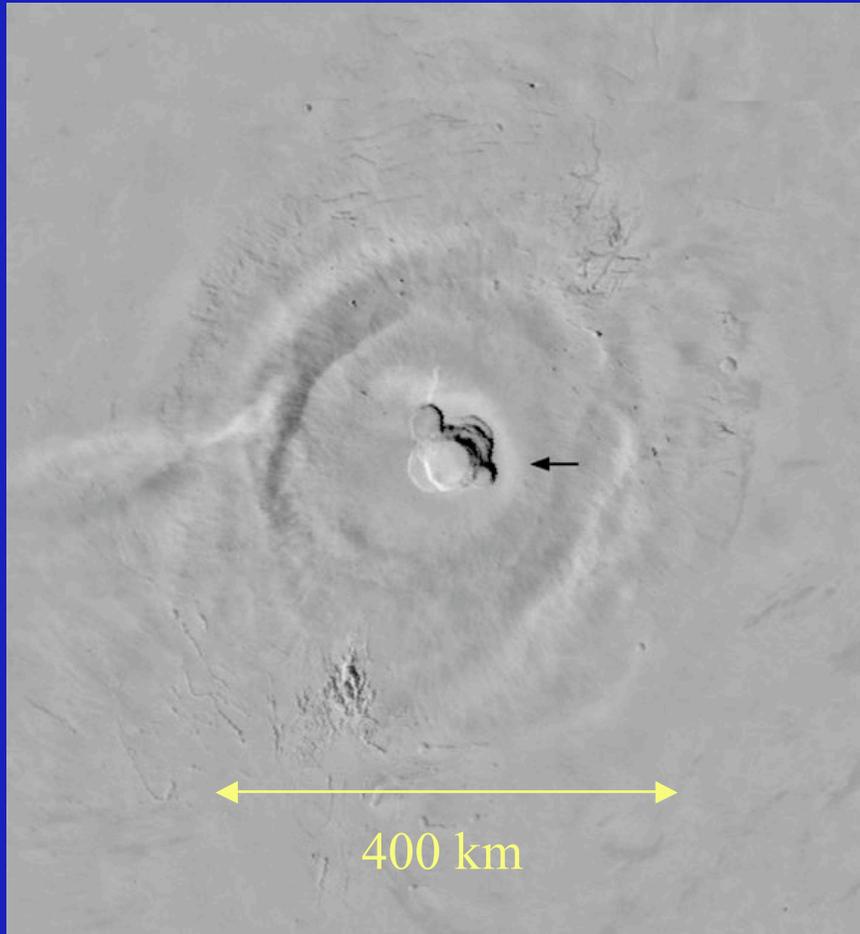
70° à 250°E

Zuber et al., 2000

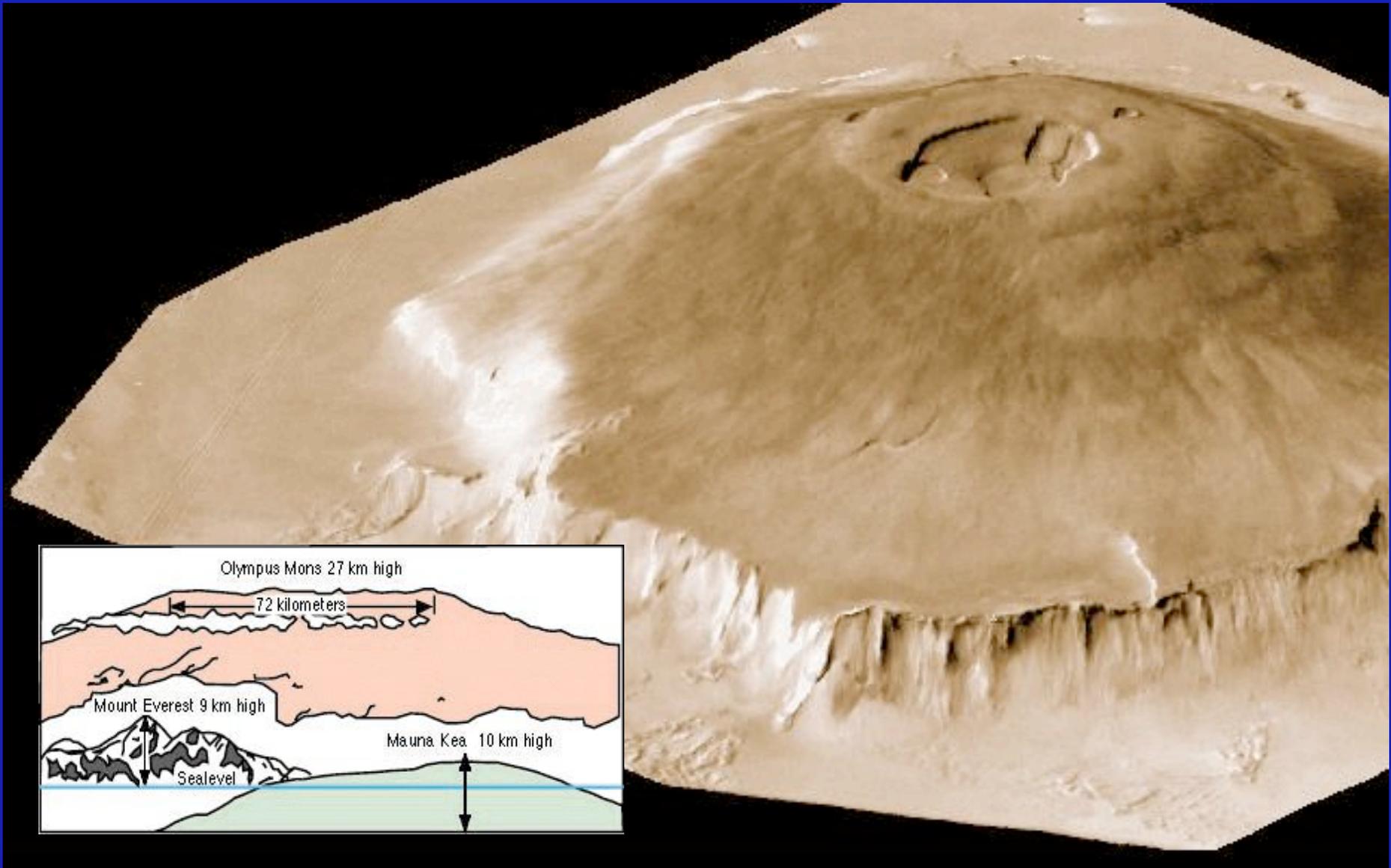
# Tharsis et les volcans géants

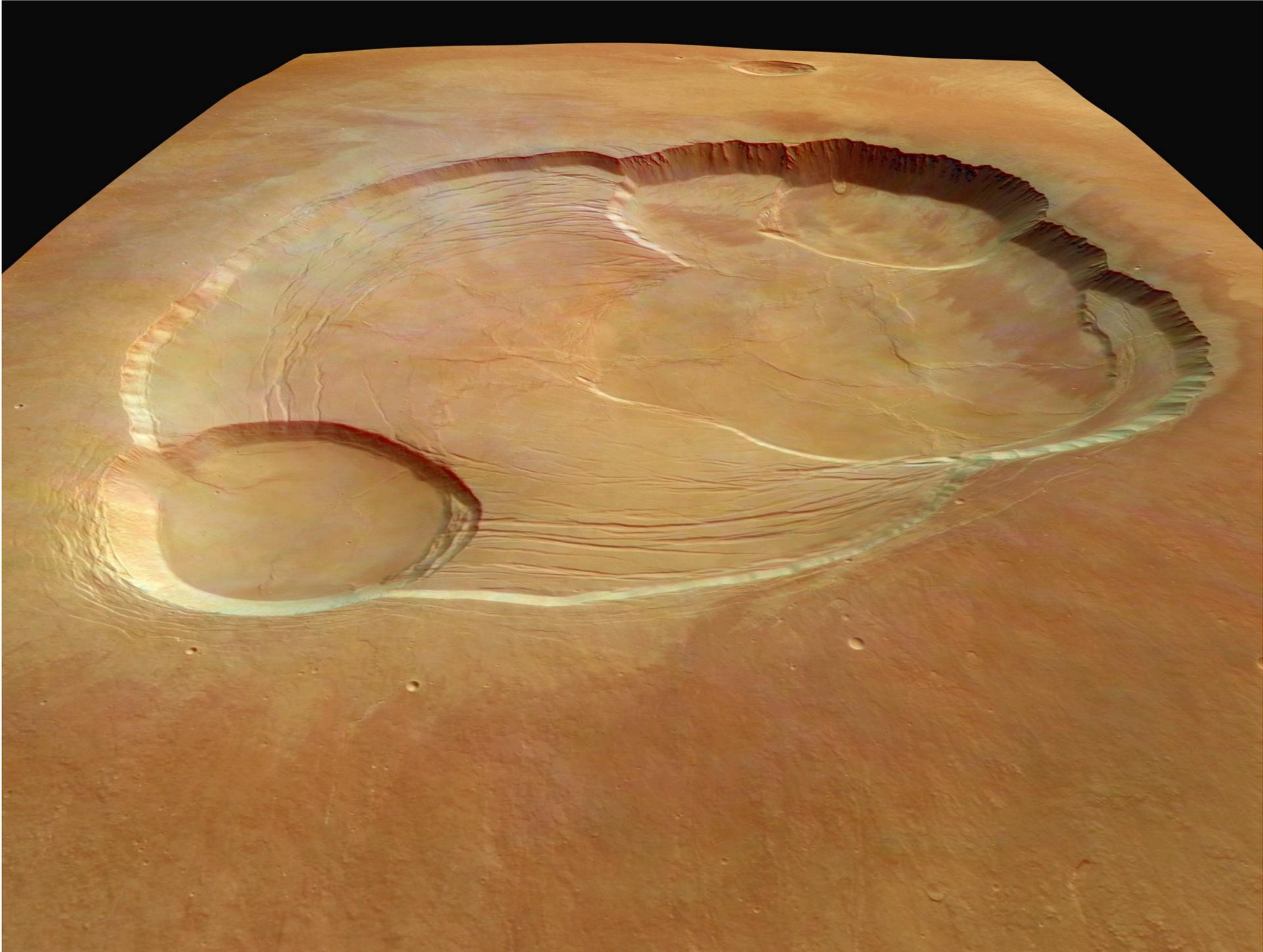


# Ascraeus Mons

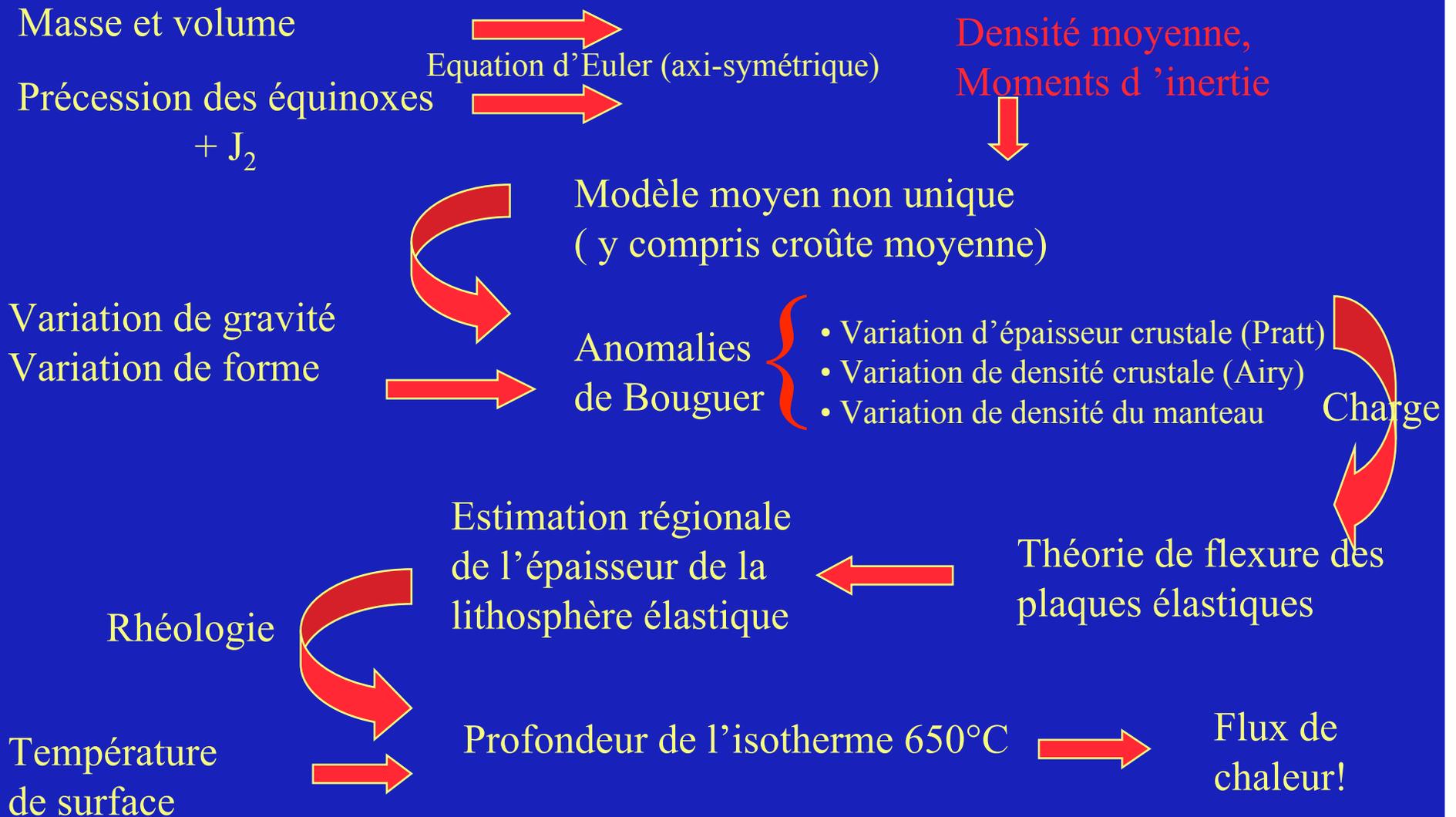


# Le plus grand volcan du système solaire





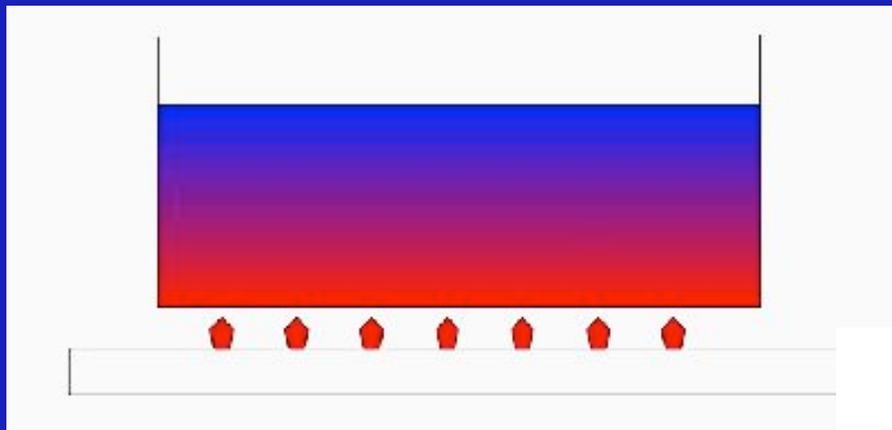
# Données gravimétriques et géodésiques: hypothèses et démarches



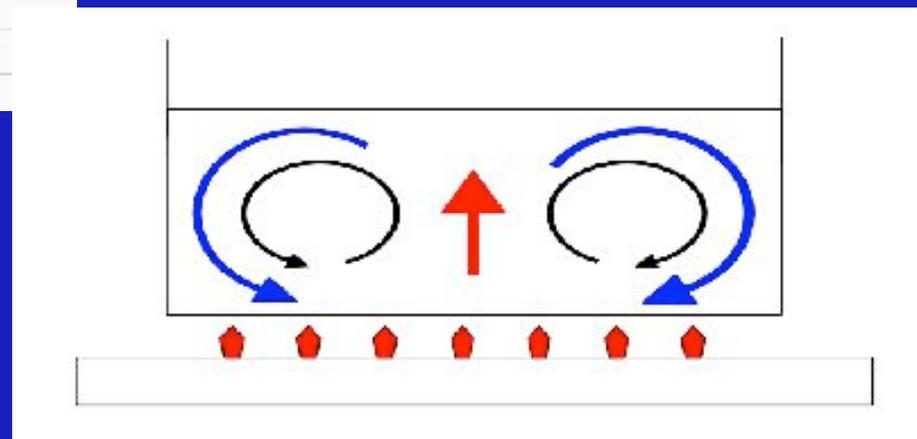
# Convection et volcanisme: Mars

Mars doit évacuer la chaleur accumulée par tous les chocs de météorites lors de sa formation

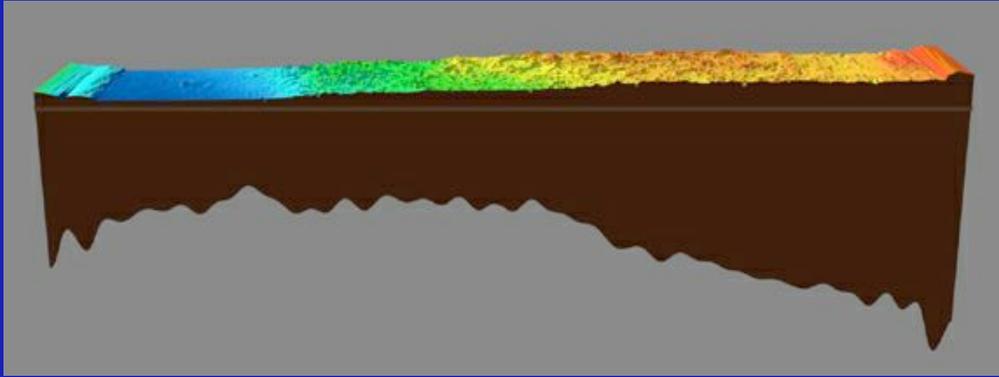
- En tombant au centre, le noyau augmente la chaleur libérée
- Chauffage par le bas.... Refroidissement par le haut



Dans une casserole...

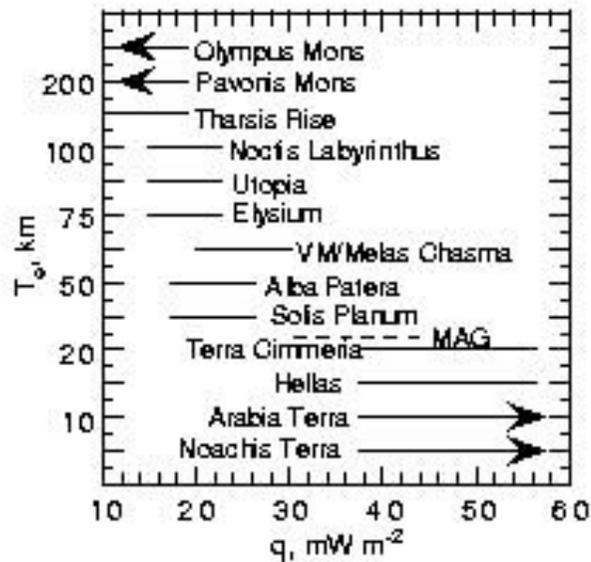
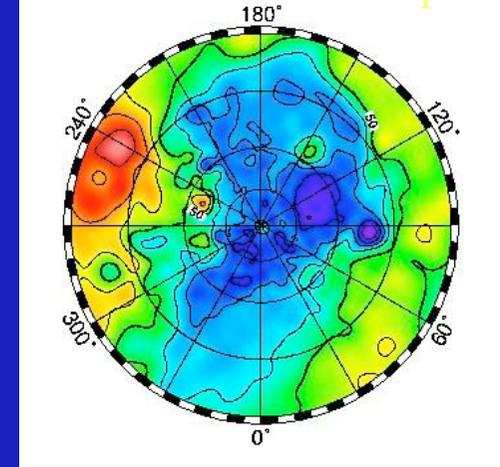


# Une convection asymétrique ?



Coupe nord-sud

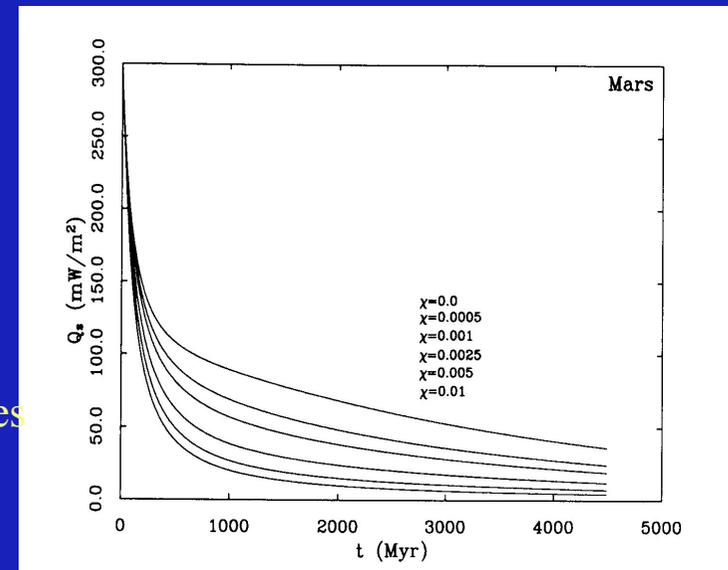
Epaisseur crustale vue du pôle Nord



Estimations locales

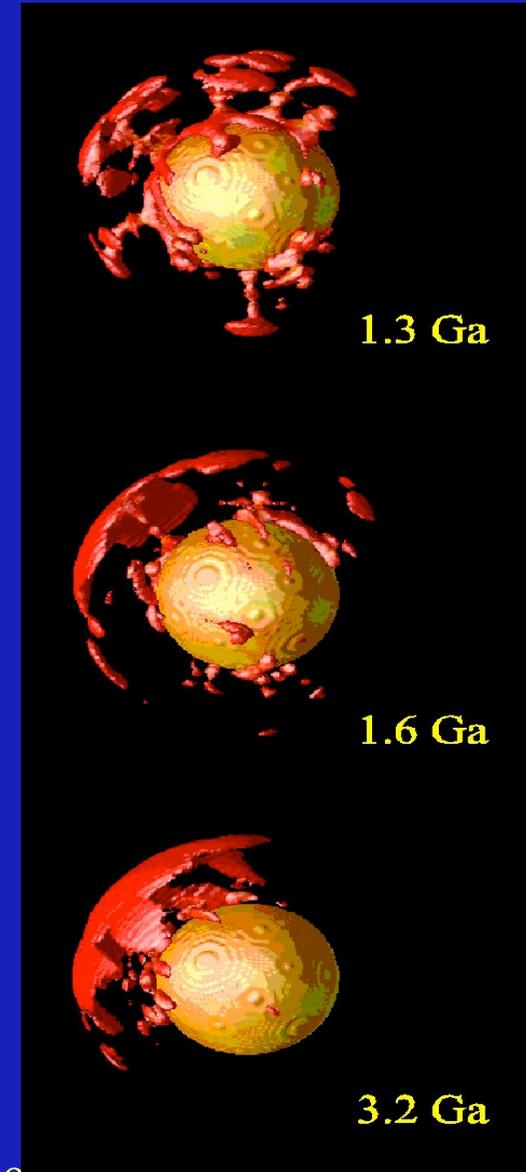
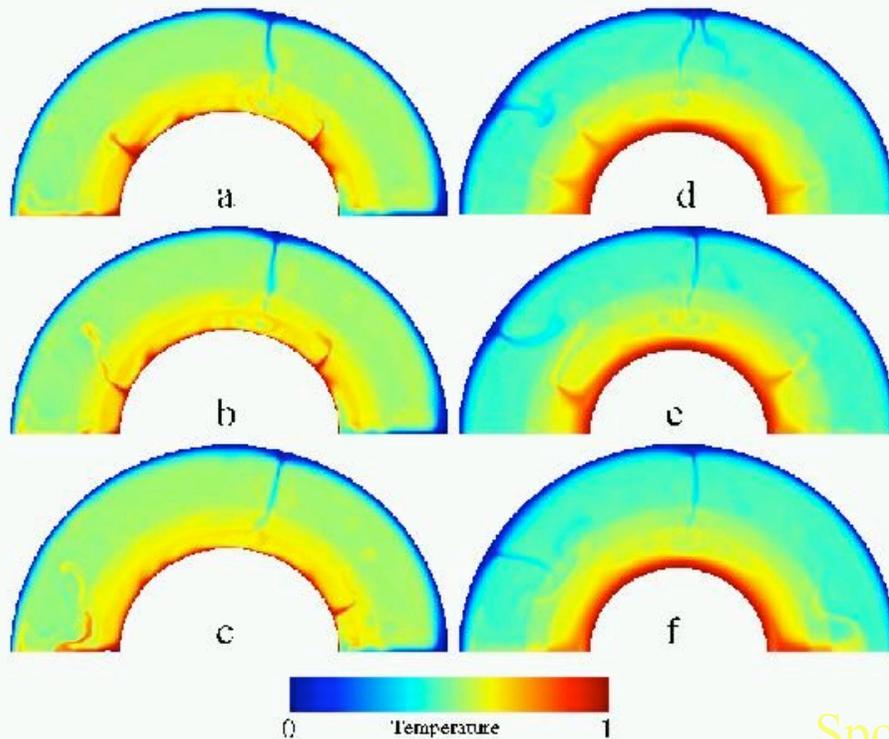


Estimations globales



# Température et discontinuités...

- ◆ Discontinuités exothermiques  $\alpha$ -Olivine/ $\beta$ -spinelle,  $\beta$ -spinelle/ $\gamma$ -spinelle, éventuellement discontinuité endothermique  $\gamma$ -spinelle-pérovskite
- ◆ Impact important de l'existence de  $\gamma$ -spinelle-pérovskite sur dynamique du manteau et température... mais disparition possible lors du refroidissement...



Spohn, Breuer et al., 1997

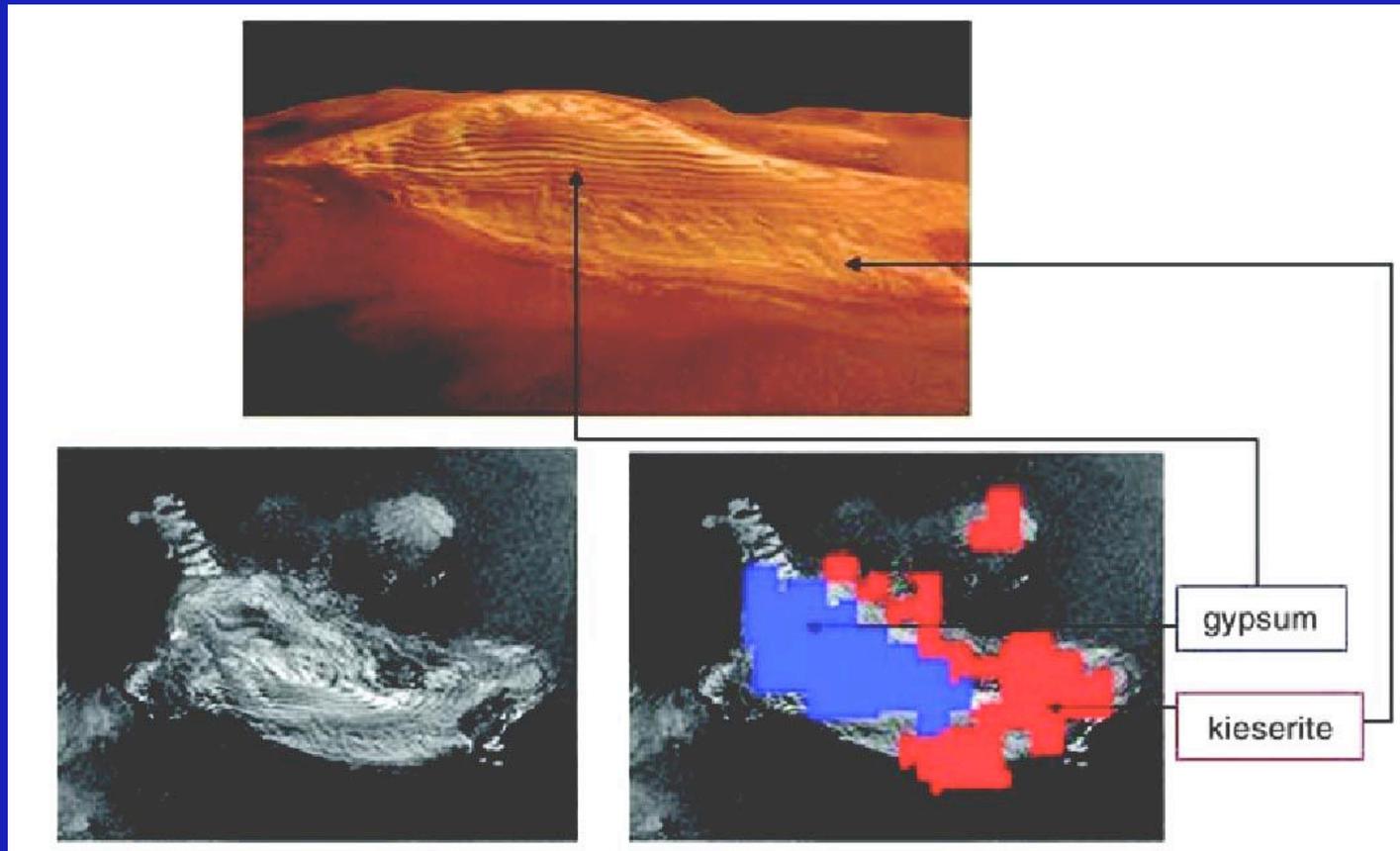
# Le dégazage de l'atmosphère.. et de l'eau



- ◆ **300 millions de kilomètre cube (10 000 fois le volcan de Hawaï et 20 millions de fois le Laki)**
- ◆ **A l'échelle globale:**
  - **une pression atmosphérique en CO<sub>2</sub> moitié plus grande que celle de la Terre (1.5 bar)**
  - **assez d'eau pour recouvrir Mars de 120 m d'eau**
- ◆ **Tharsis fut peut être à l'origine de la période humide et chaude de Mars**
- ◆ **Une chance unique pour l'apparition de vie il y a 4 milliards d'années sur Mars ?**

# Mais aussi beaucoup de $\text{SO}_2$

- ◆ Des gisements massifs de Gypse ( sulfates de calcium) et de kiesérite ( sulfates de magnésium)
- ◆ Pas de carbonates ( disparaissent dans l'eau acide)





**Roches tapissées  
de sulfate  
observées de  
près par le  
robot NASA  
Opportunité  
(février 2004)**

---

Des anciens terrains parfois  
recouverts par des terrains plus  
jeunes

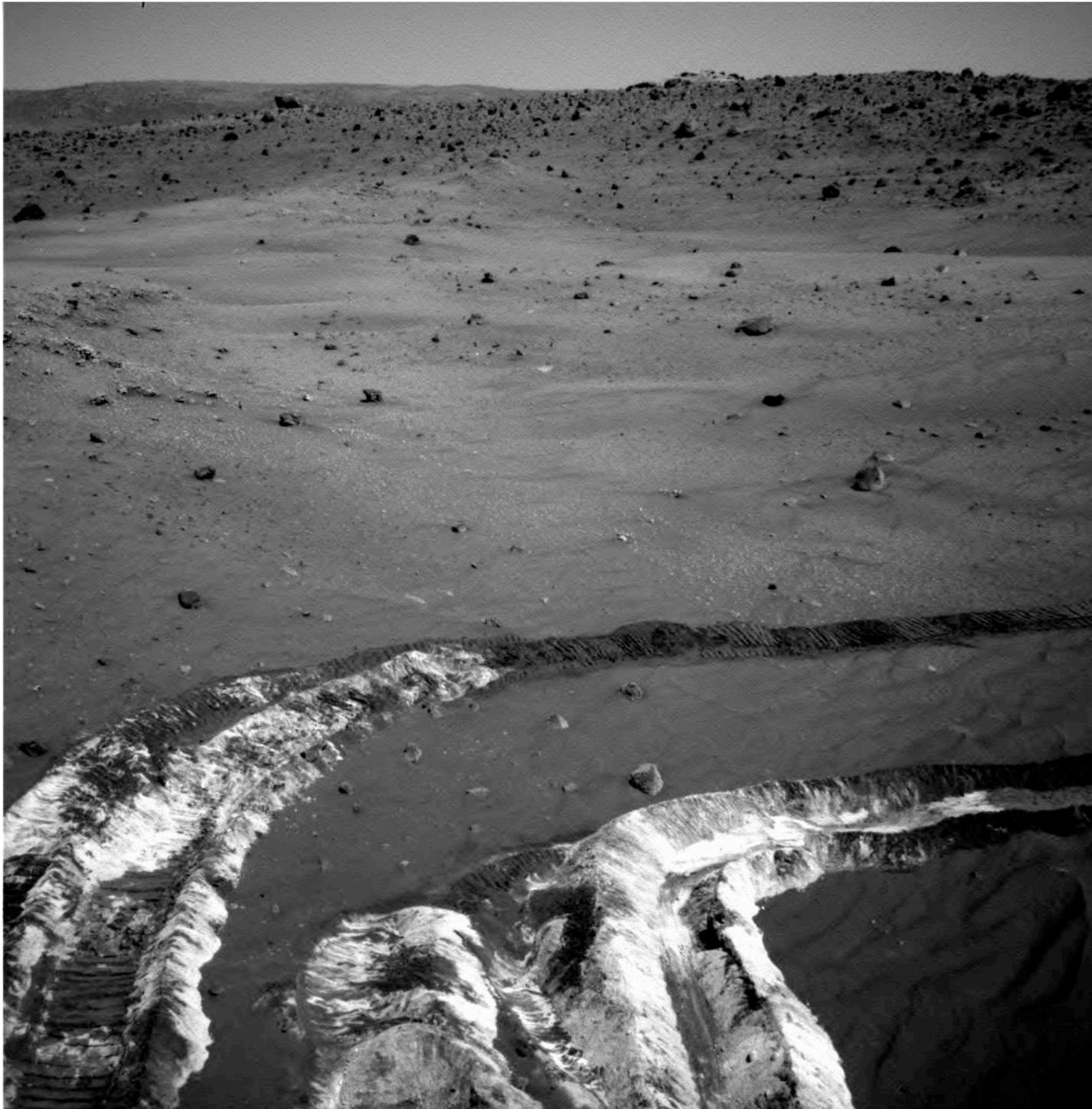
## ColumbiaHill -Gusev

---





Et toujours.. des dépôts massifs de sulfates  
(Spirit, 23 Mars2006)



des dépôts  
massifs de  
sulfates  
(Spirit, 23  
Mars2006)

# Acidité de l'eau

---

Typiquement 16 Mt H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> /km<sup>3</sup>

Production d'eau ~0.06 km<sup>3</sup>/km<sup>3</sup>

Acidité ~ 2 \* 16 10<sup>9</sup> /0,98 moles km<sup>3</sup>  
~ 0,06 10<sup>12</sup> litres

Ph ~2

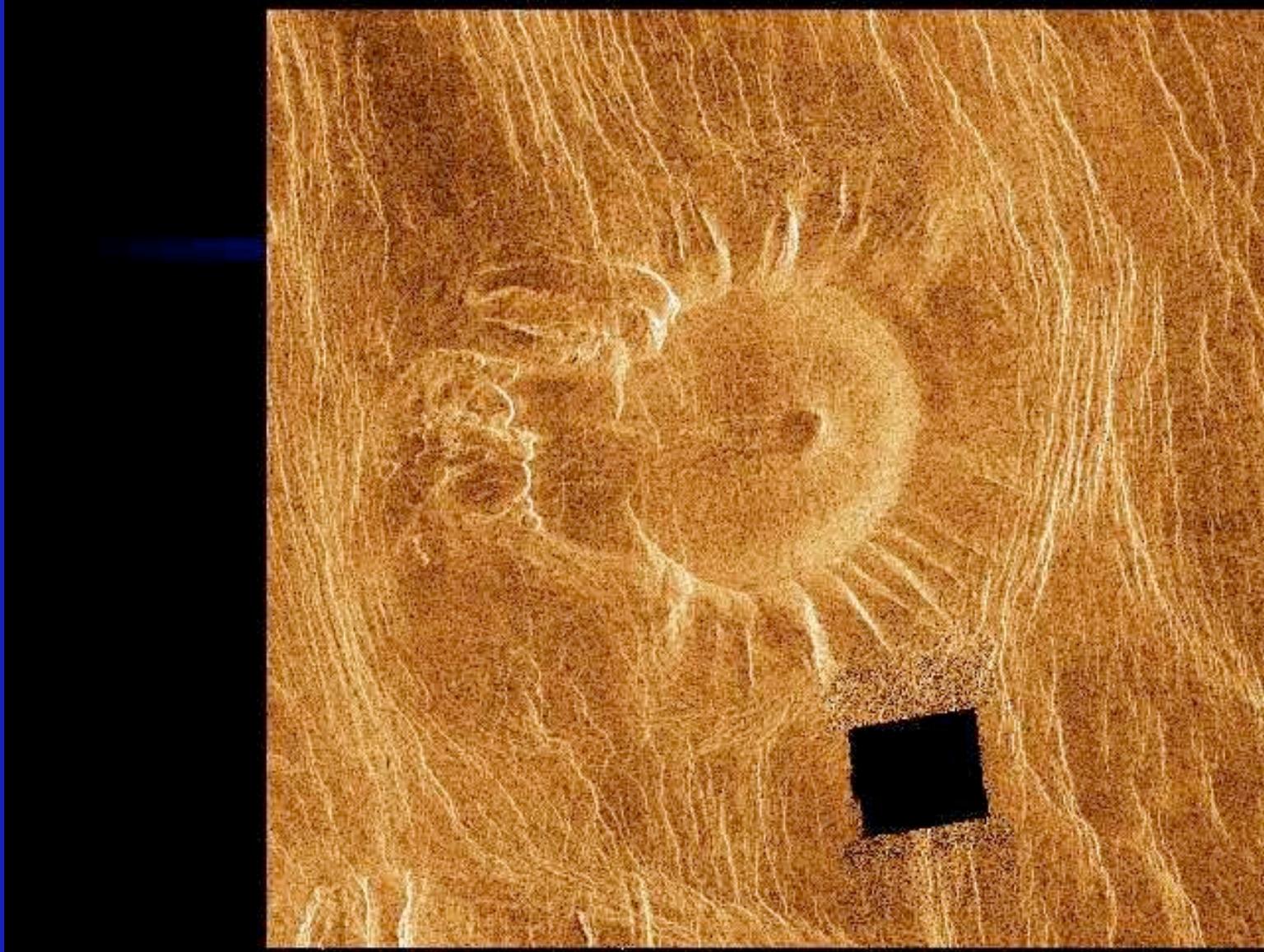
---

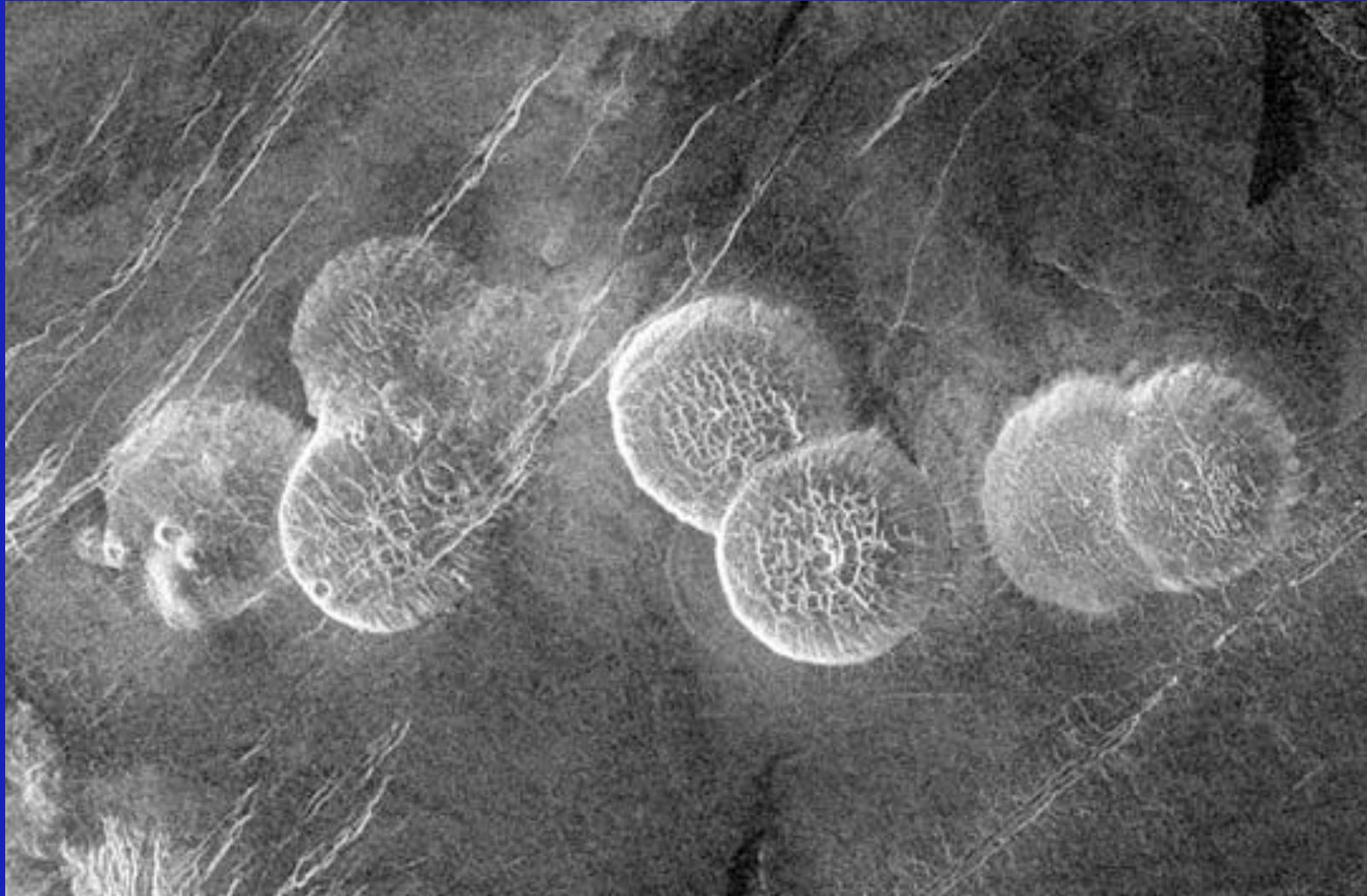
# Evolution thermique de Venus

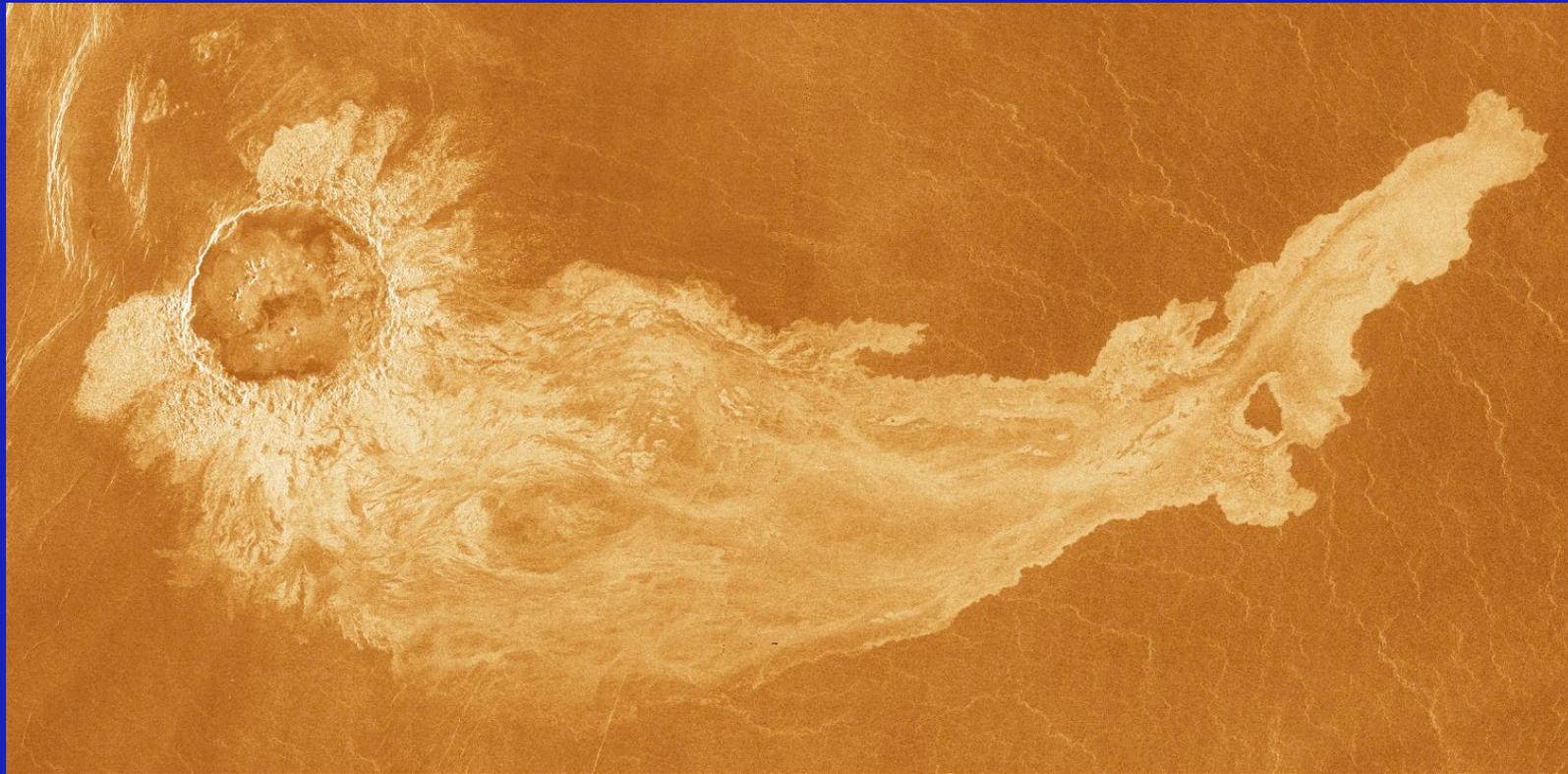
---

## ◆ Age de la surface

- Pas de cratères plus petits que 35 km ( effet de l'atmosphère
- Age moyen de 300-500 millions d'années, conséquence probable d'une activité volcanique très forte, de type trappes







- ◆ Addams Crater
  - $-56.10^{\circ}$  Latitude,  $98.90^{\circ}$  Longitude; 90 kilometres de diamètre, coulées de lave sur 600 km

# Type de convection

---

- ◆ Planète à une plaque

- Deux parties dans le manteau

- » Lithosphère thermique ( transport par conduction de la chaleur, impossible par convection  $T < 1100$  K)

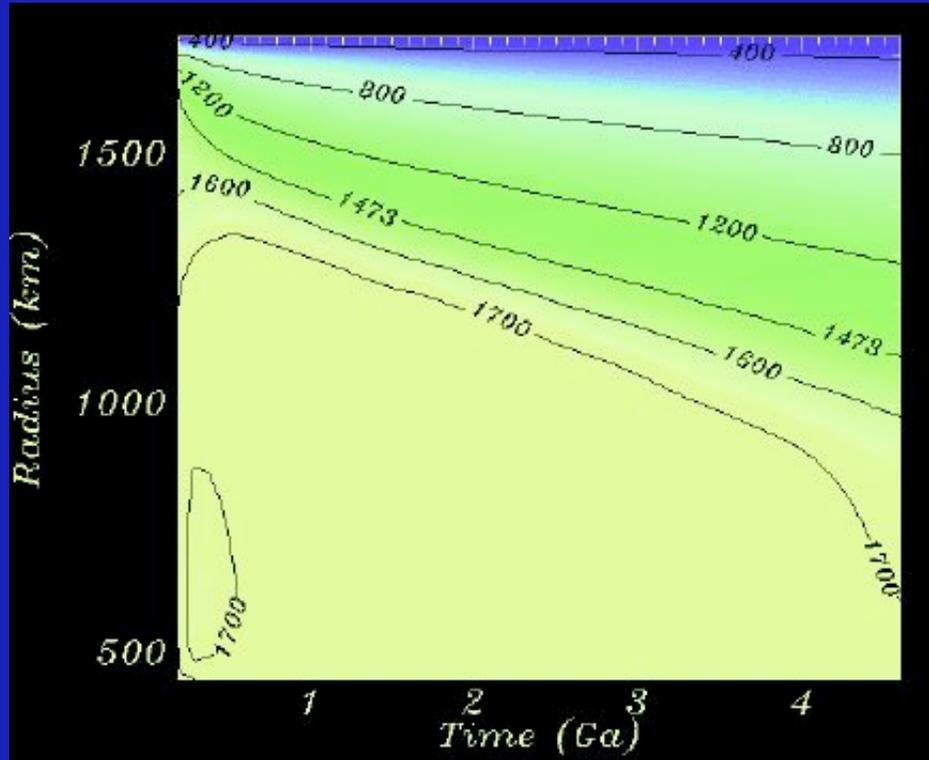
- » Manteau (transport possible par convection)

- ◆ Vigueur de la convection

- Flux de chaleur non accomodé par la conduction

- S'accroît avec le flux de surface ( refroidissement par le haut), avec le flux du noyau (chauffage par le bas) ou la radioactivité (chauffage par l'interieur)

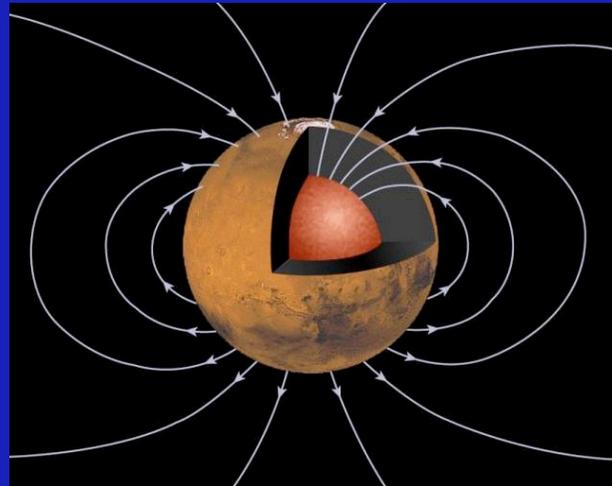
# Refroidissement d'une planète à une plaque



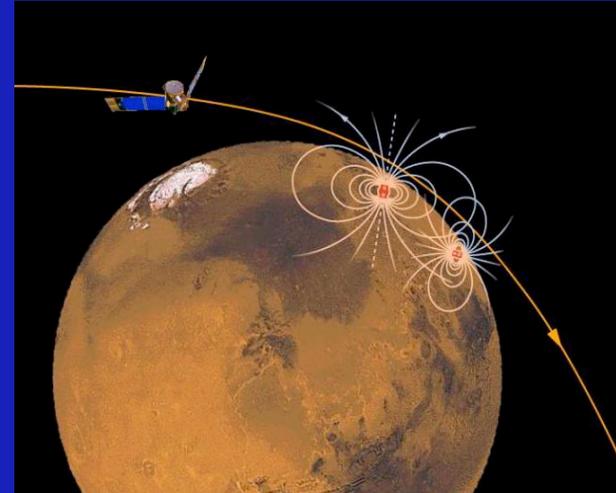
## Refroidissement de la Lune

- plus la planète se refroidit, plus elle s'entoure d'une couverture isolante
- plus la planète a du volcanisme, plus elle appauvrit le manteau en éléments radioactifs
- La convection devient difficile, même dans les parties chaudes (pas assez de flux de chaleur vers le haut), et l'intérieur reste chaud

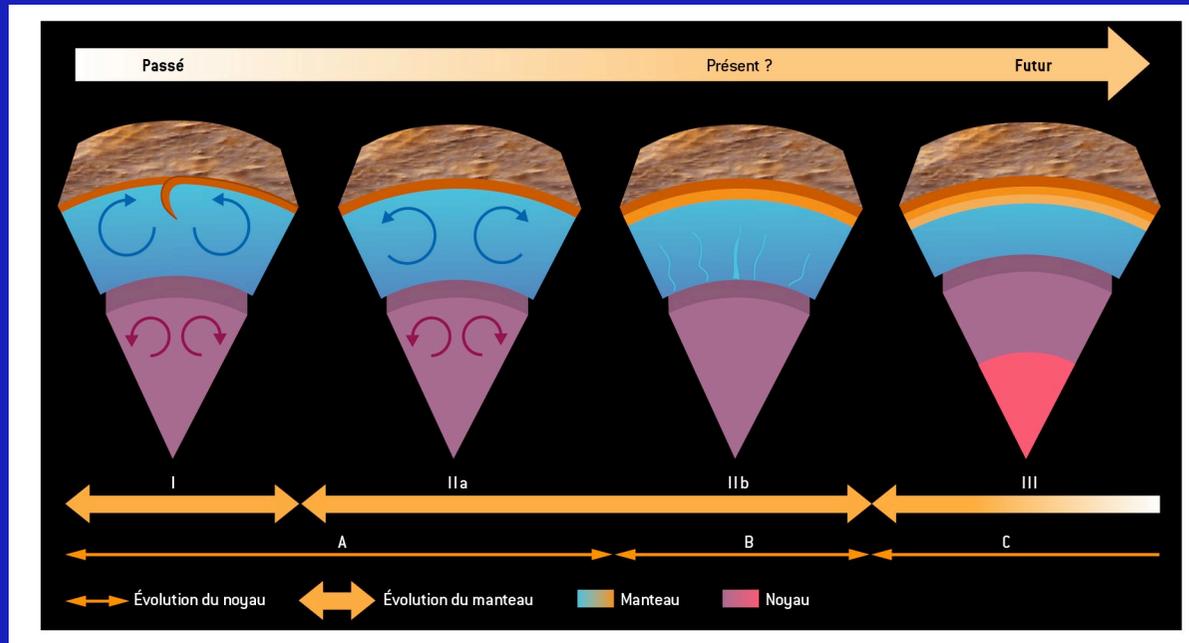
# La planète s'arrête de fonctionner



Arrêt de la  
dynamo



Mars la  
Jeune



Mars  
aujourd'  
hui

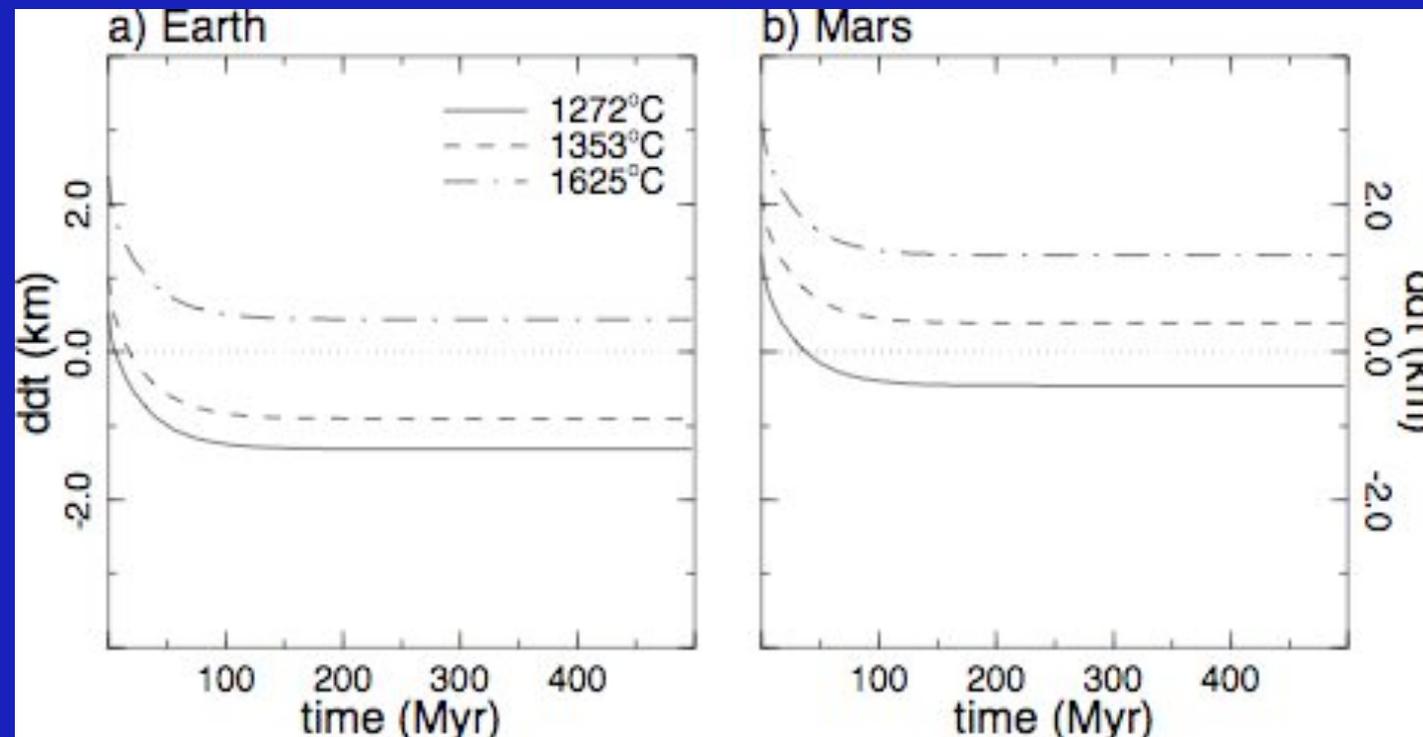
# Subduction et tectonique des plaques

- ◆ Pour plonger, une plaque doit avoir une poussée d'Archimède négative
  - Nombreux paramètres
    - » Température de surface
    - » Température du manteau
    - » Age de la plaque
    - » Gravité (i.e. profondeur des transformations de phases)
- ◆ Paramètre de stabilité

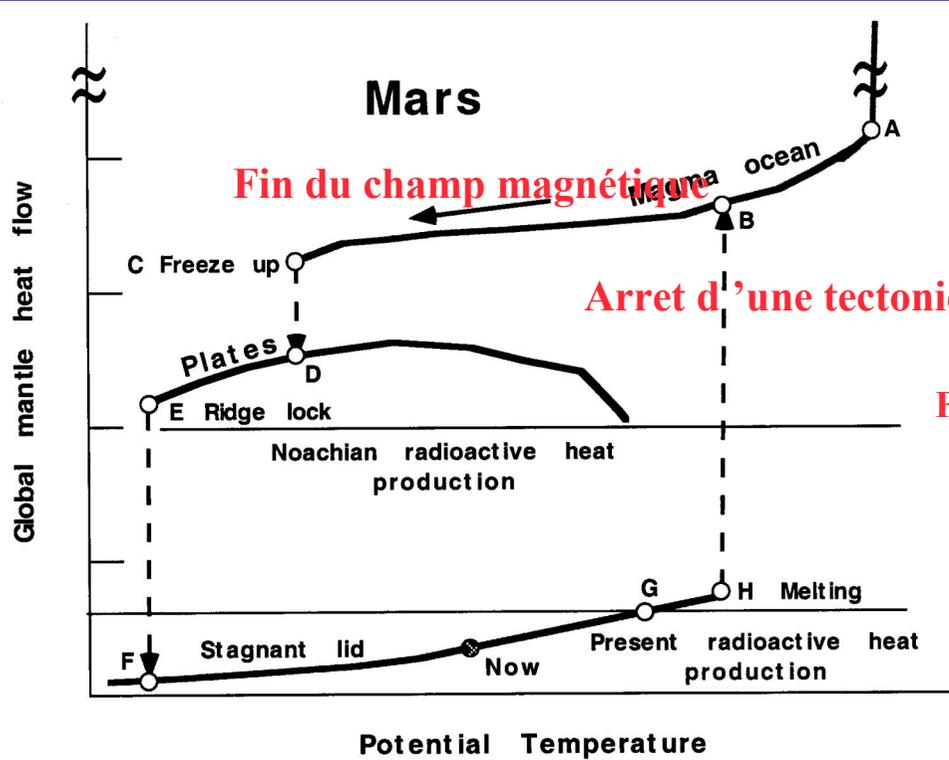
$$S' = 100 \left[ \frac{1}{R_0 - R_L} \int dr \frac{[\rho_{sl} - \rho(r)]}{\rho_{sl}} \right]$$

# Effet de la gravité

- ◆ Faible gravité et température élevées du manteau s'oppose à la subduction



# Mars comparé à la Terre...



Arret d'une tectonique des plaques

Fin de l'époque noachienne (3.8-3.5 Milliards d'années)

Quelle est la température du manteau?

