
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

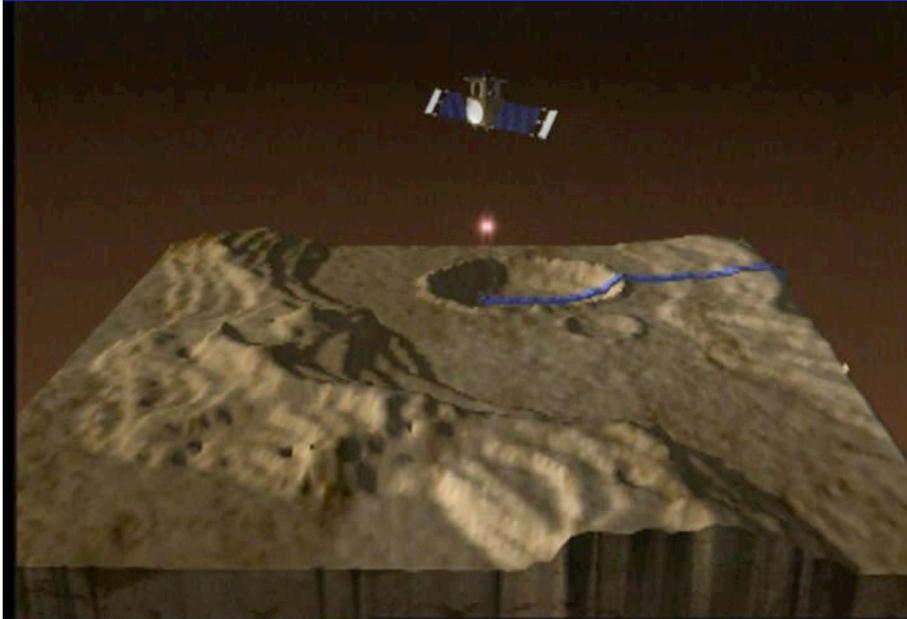
Mesures de gravité: principe et évolution



- ◆ 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



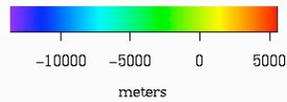
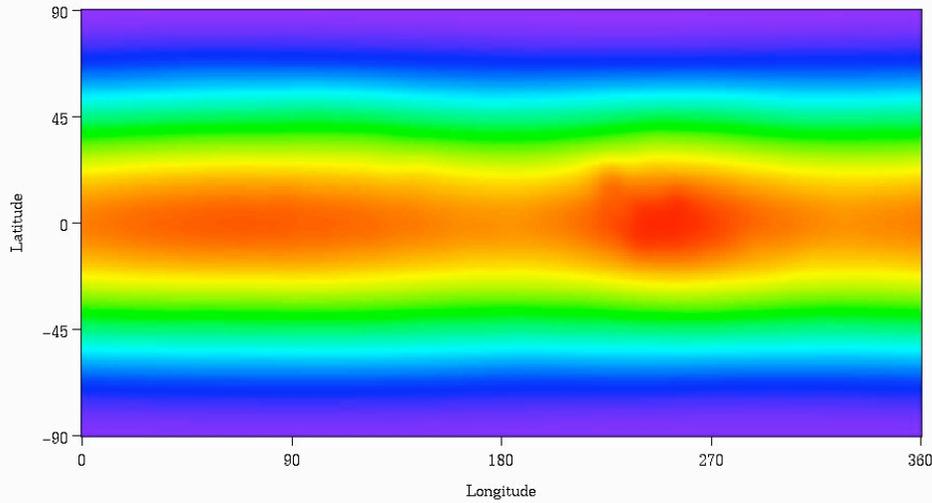
- ◆ Première mesure radar depuis la Terre (Goldstone, Aricebo, etc) 200 m de précision
- ◆ Mesure d'occultation radio des sondes Mariner 9 et Viking
 - Structure de grande échelle $s < 8$

◆ MGS: expérience MOLA (Zuber et al.)

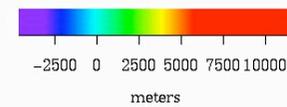
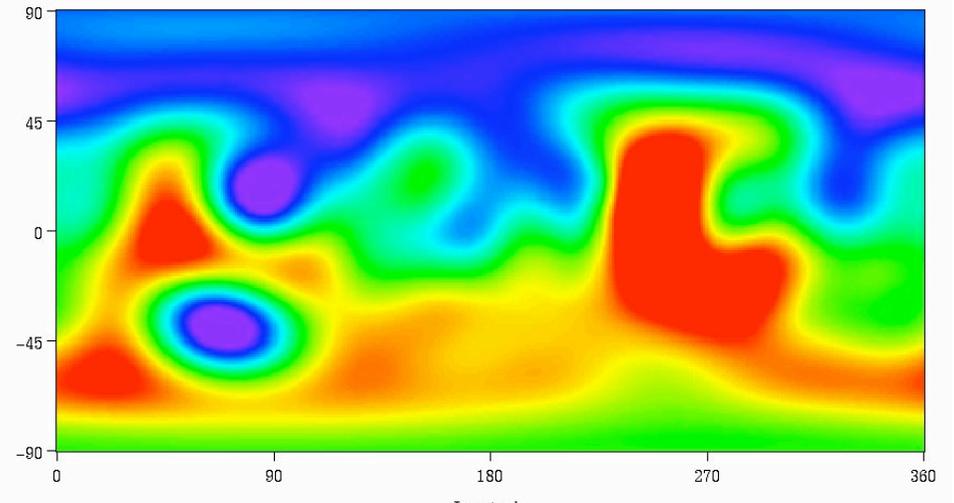
- Résolution latérale (taille du spot): 130-330 m
- Résolution absolue: 10 m
- Résolution relative: 35 cm



Mariner 9...

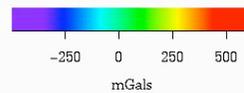
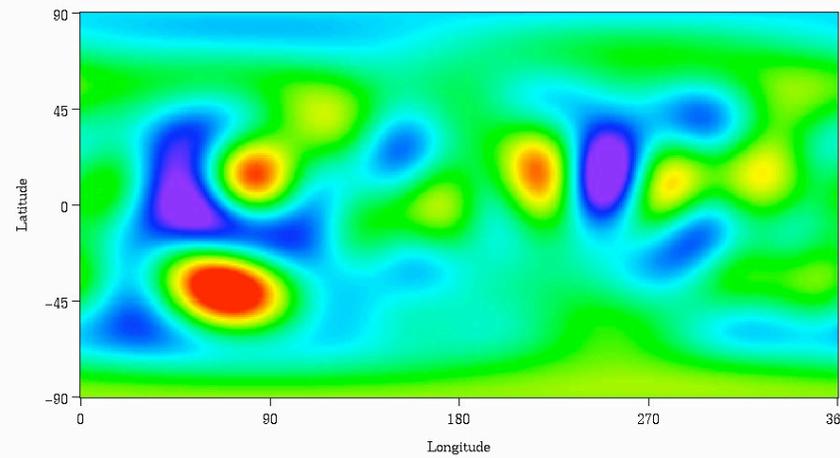


Geoïde



Altimétrie

Anomalie de Bouguer



En orbite depuis le 11 septembre 1997

JPL

Mars Global Surveyor Project MGS Spacecraft In Mapping Configuration

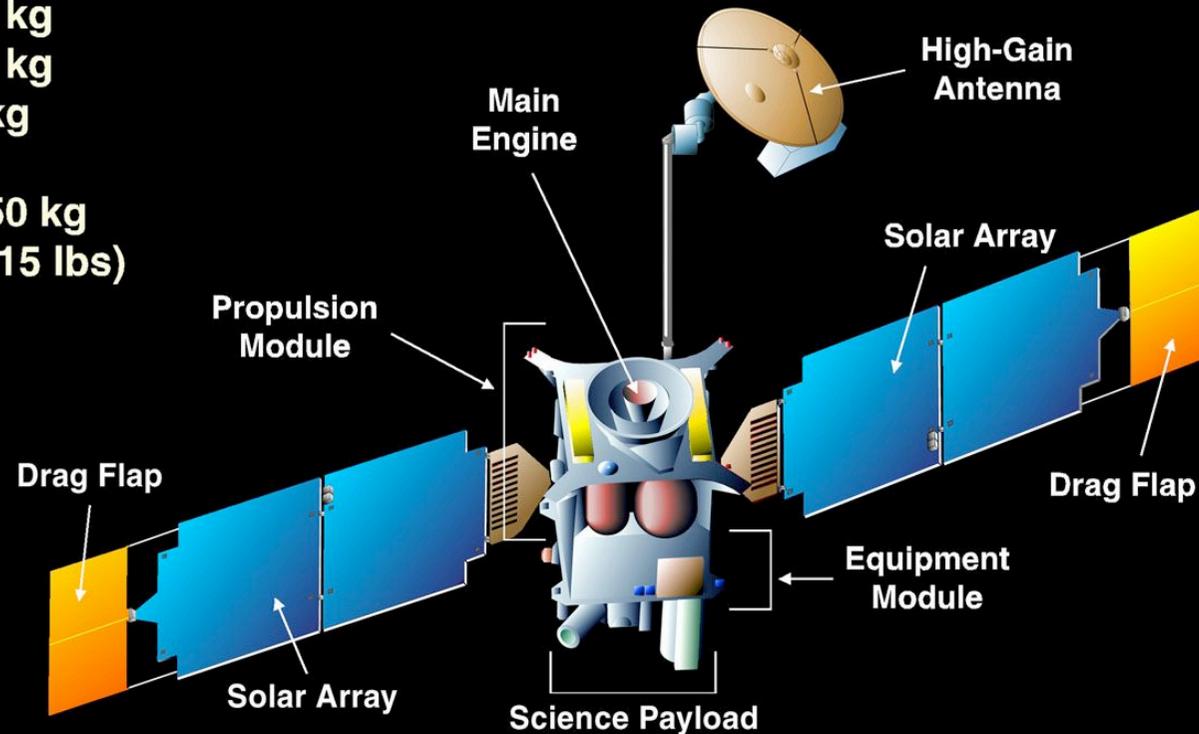


Structure Mass: 595 kg
Propellant Mass: 380 kg
Payload Mass: 75 kg

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

Science Payload:

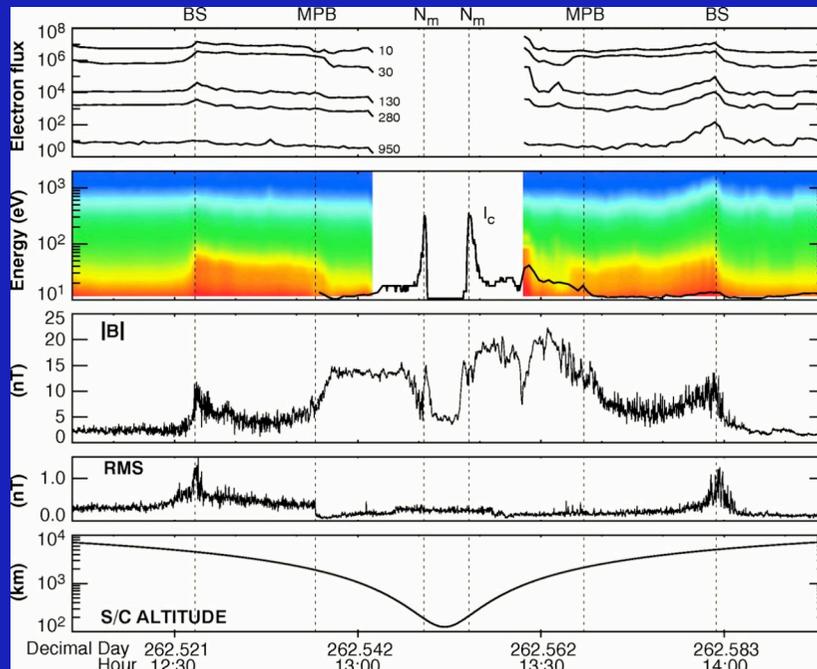
- Electron Reflectometer
- Magnetometer
- Mars Orbiter Camera
- Mars Orbiter Laser Altimeter
- Mars Relay Radio System
- Radio Science
- Thermal Emission Spectrometer



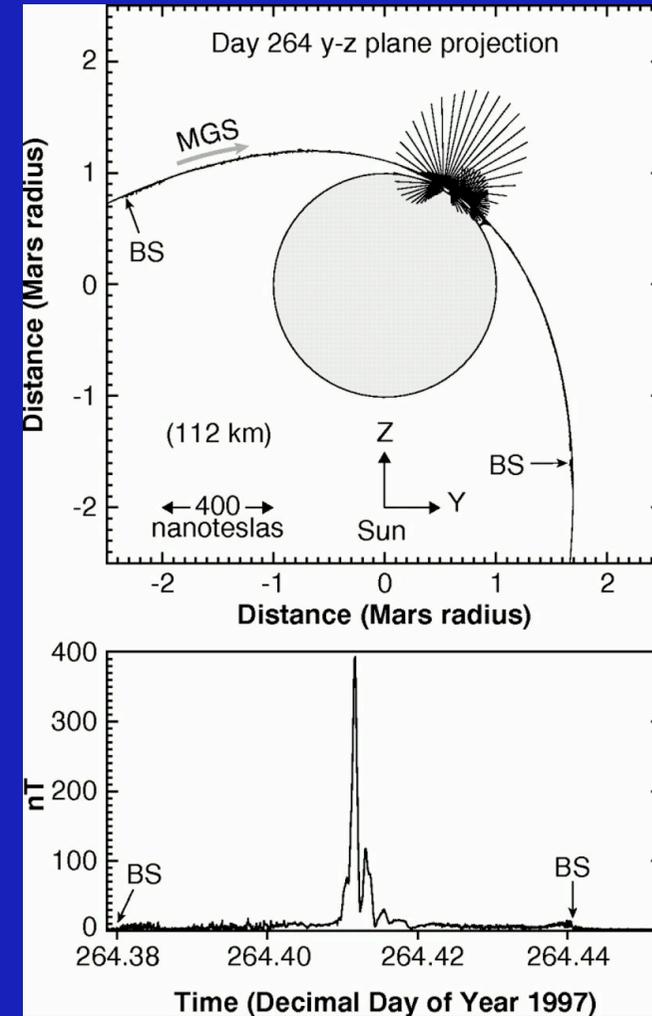
WL JLC DAS
Dec 1995

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 cm^3)
- Mais découvertes d'anomalies crustales très fortes

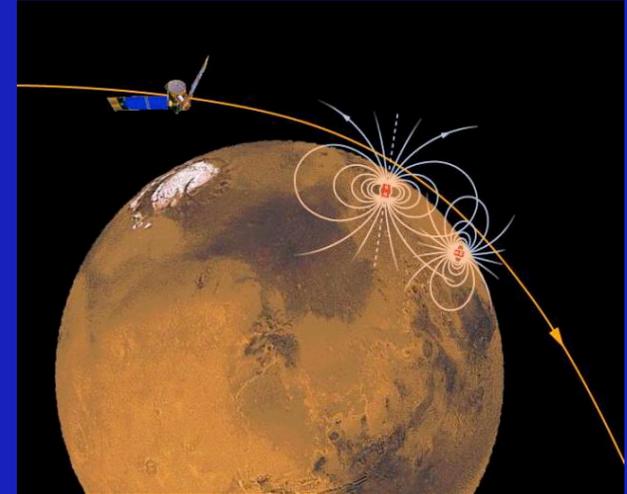
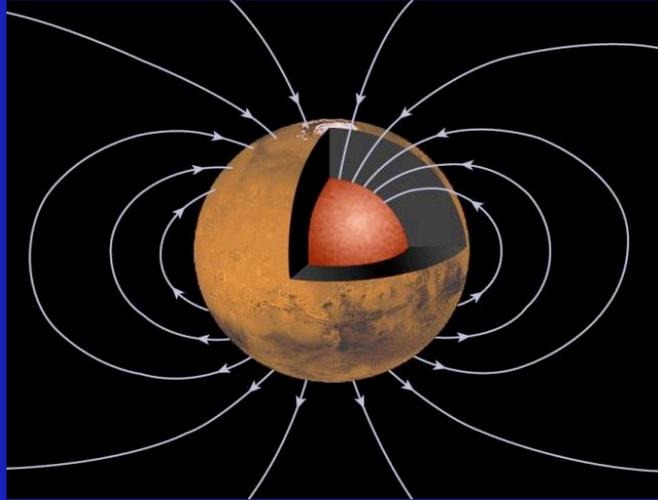


Mesure avec anomalie



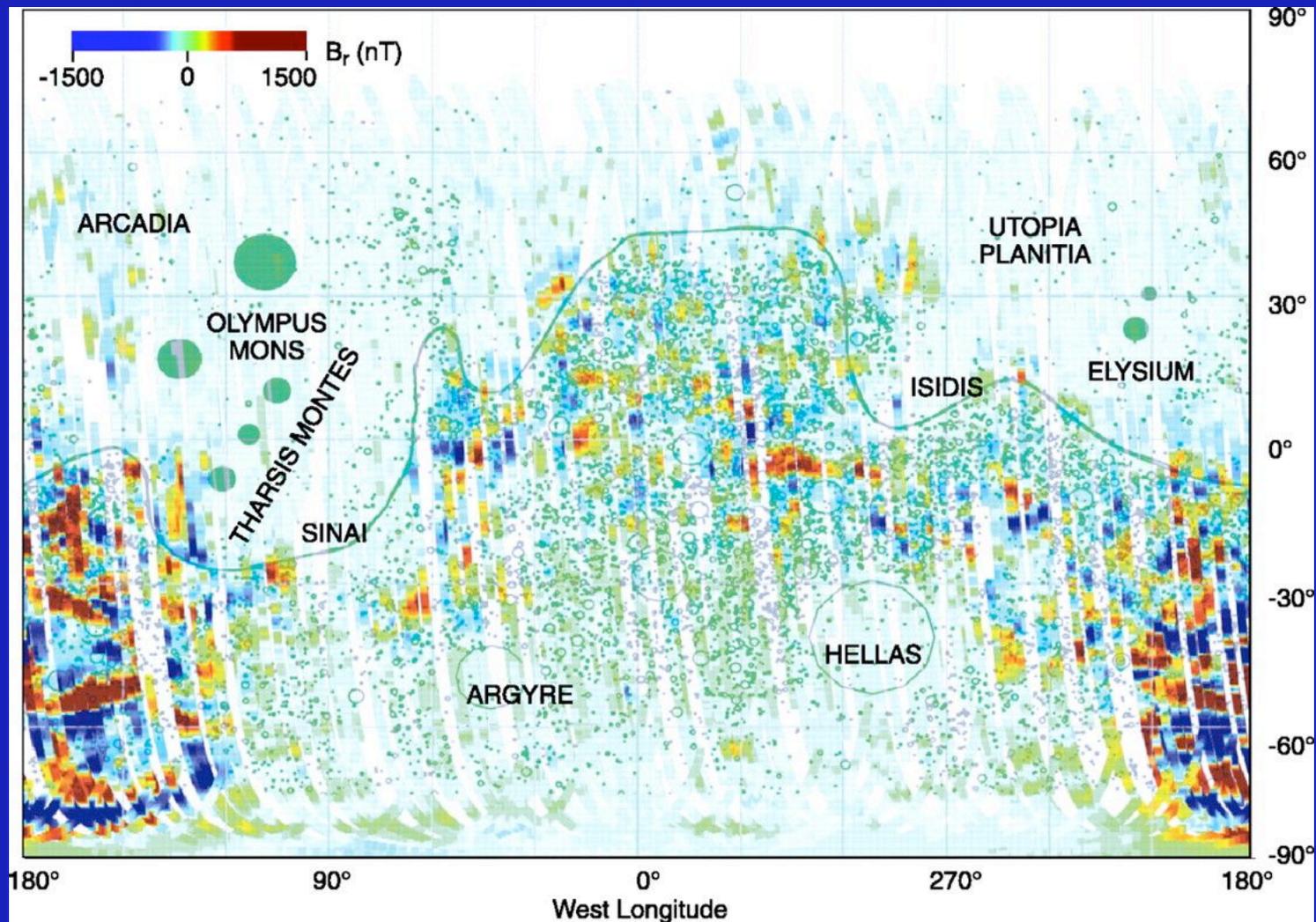
Mesure sans anomalie

Interprétation...



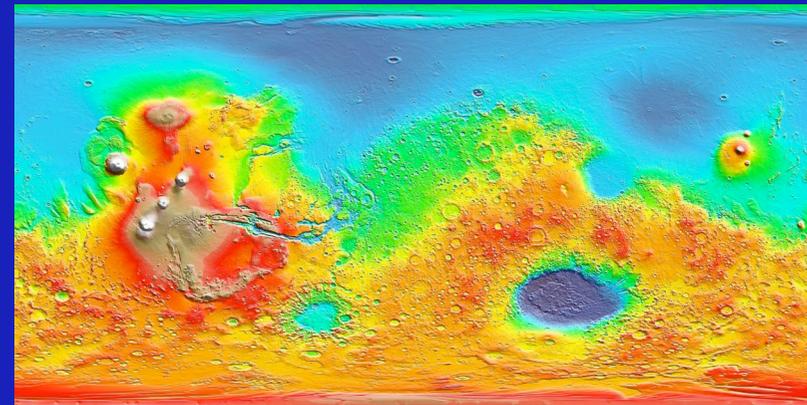
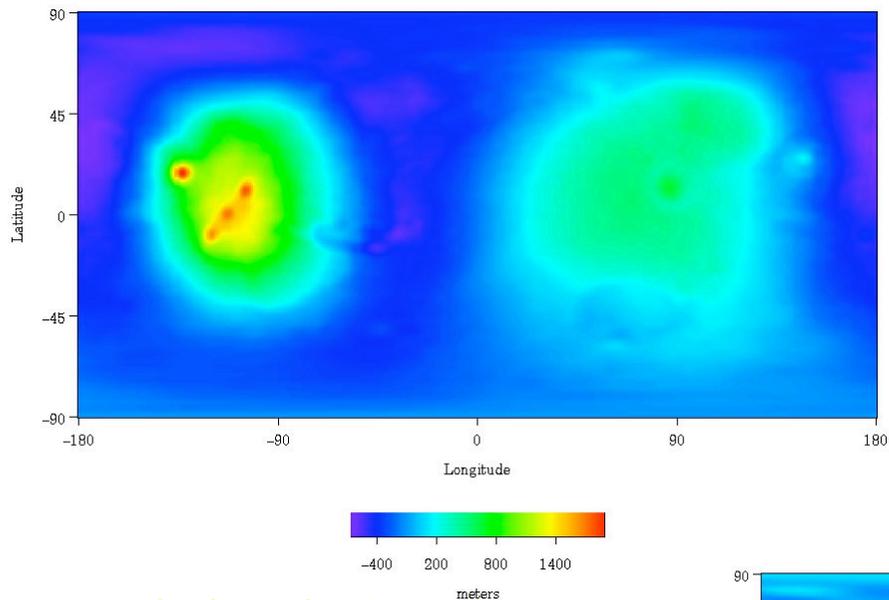
- ◆ Pendant 500 à 1000 millions d 'années.. Dynamo active
- ◆ Lors de la phase d 'activité: acquisition rémanente de magnétisme lors du refroidissement de laves
- ◆ La croûte a gardé cette aimantation, détectée par la sonde

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) ?

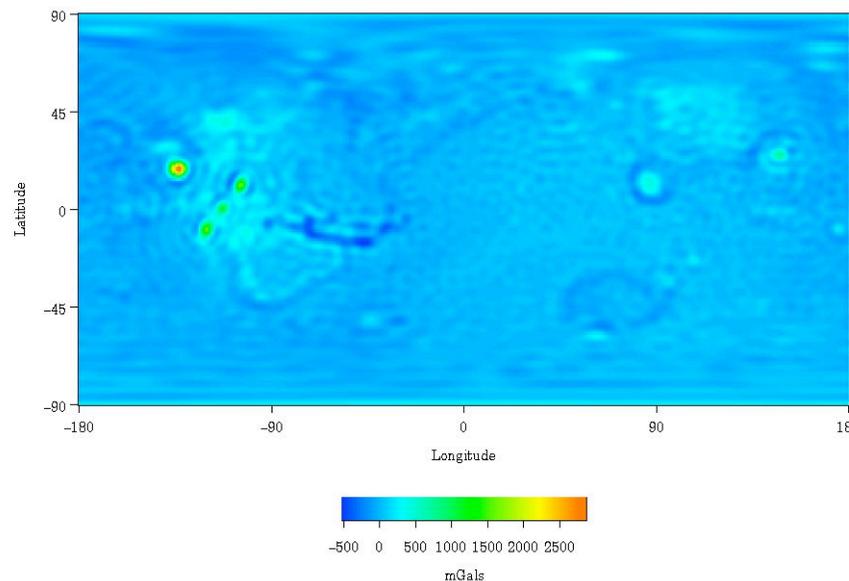
Mars Global Surveyor



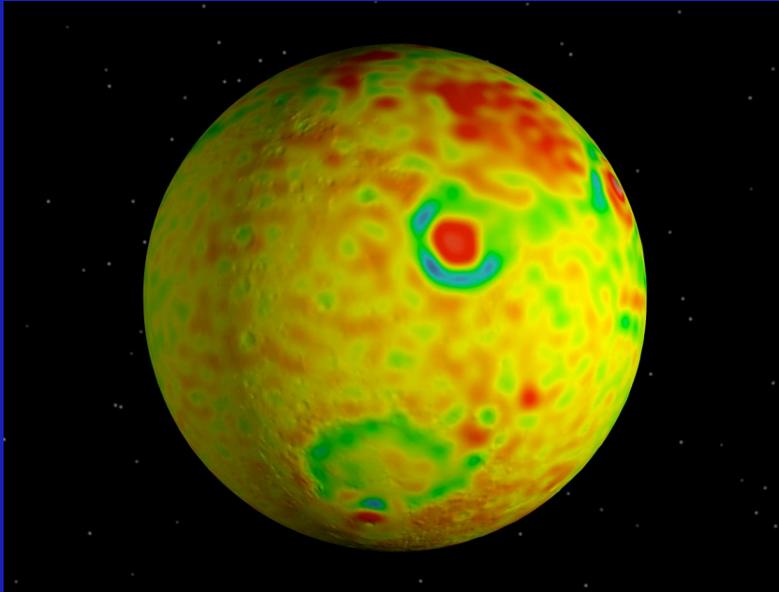
Altimétrie

Variation du Géοide
par rapport à
l'ellipsoïde de référence

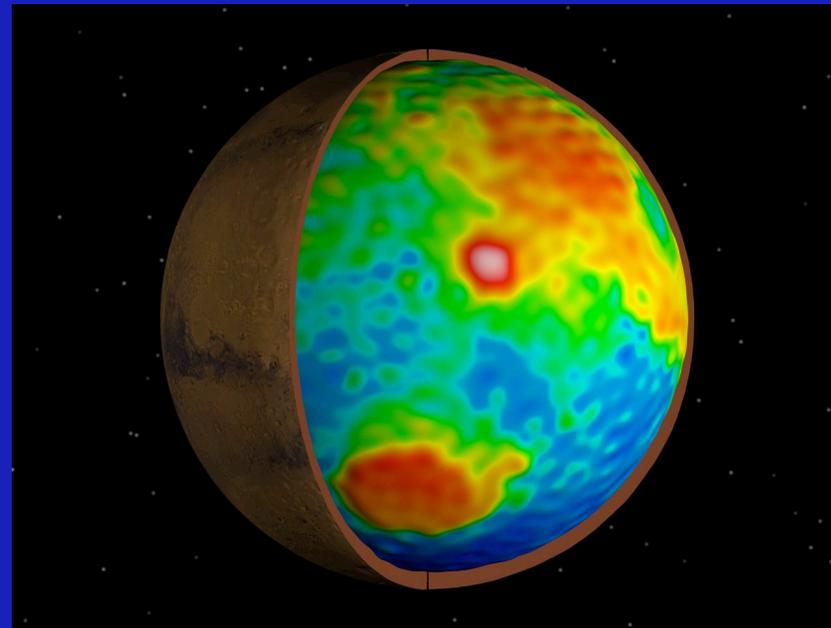
Anomalies de gravité
du géοide par rapport à
l'ellipsoïde de référence



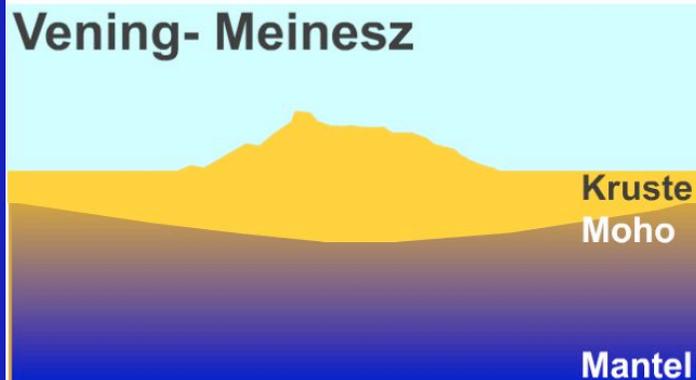
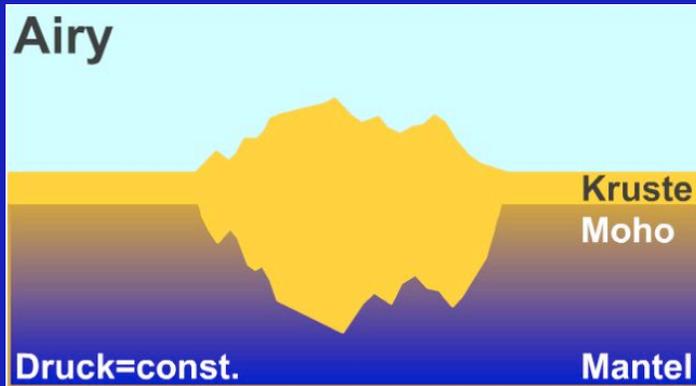
Premières estimations de l'épaisseur crustale



- ◆ 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

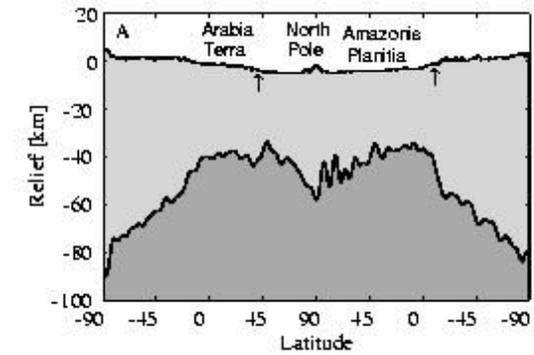
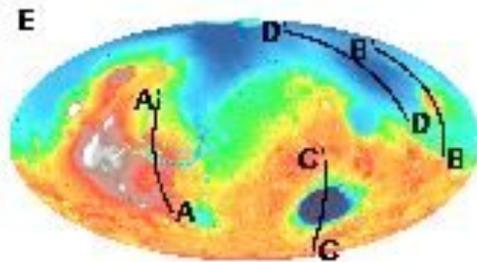
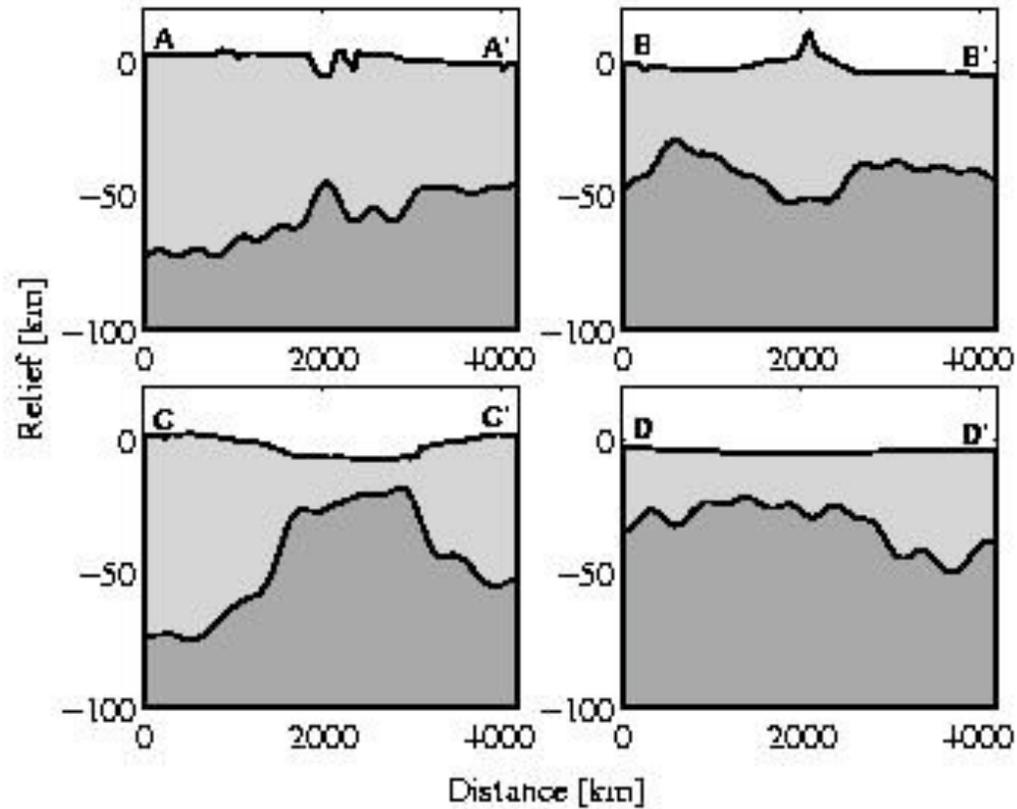
1. La pression à la base de la croûte est constante.
2. Là où les altitudes sont hautes, la densité est faible

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

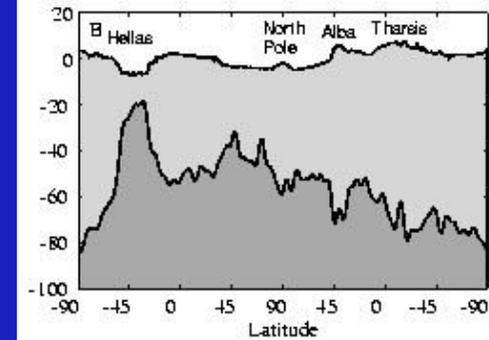
Flexure

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



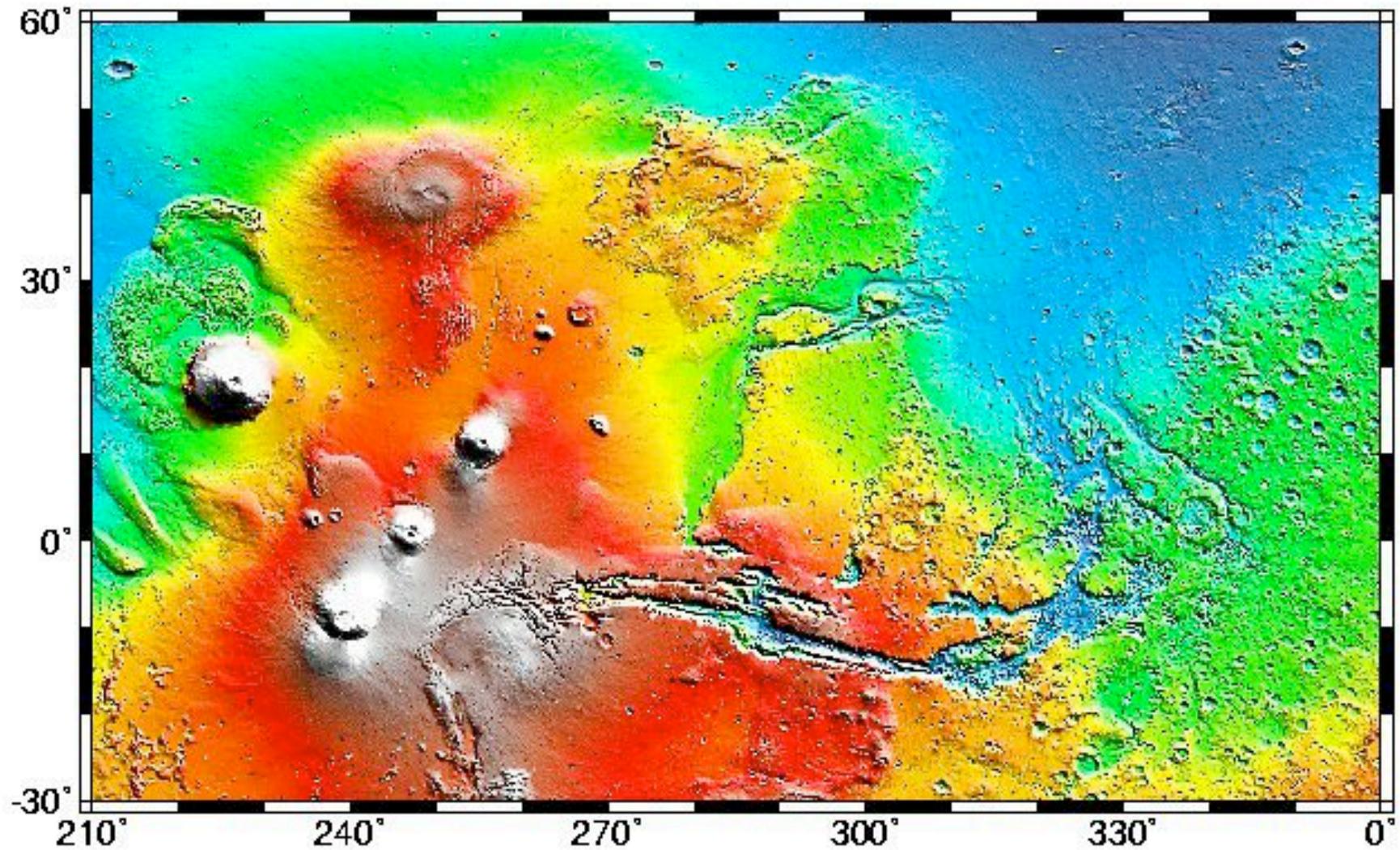
0° à 180°E



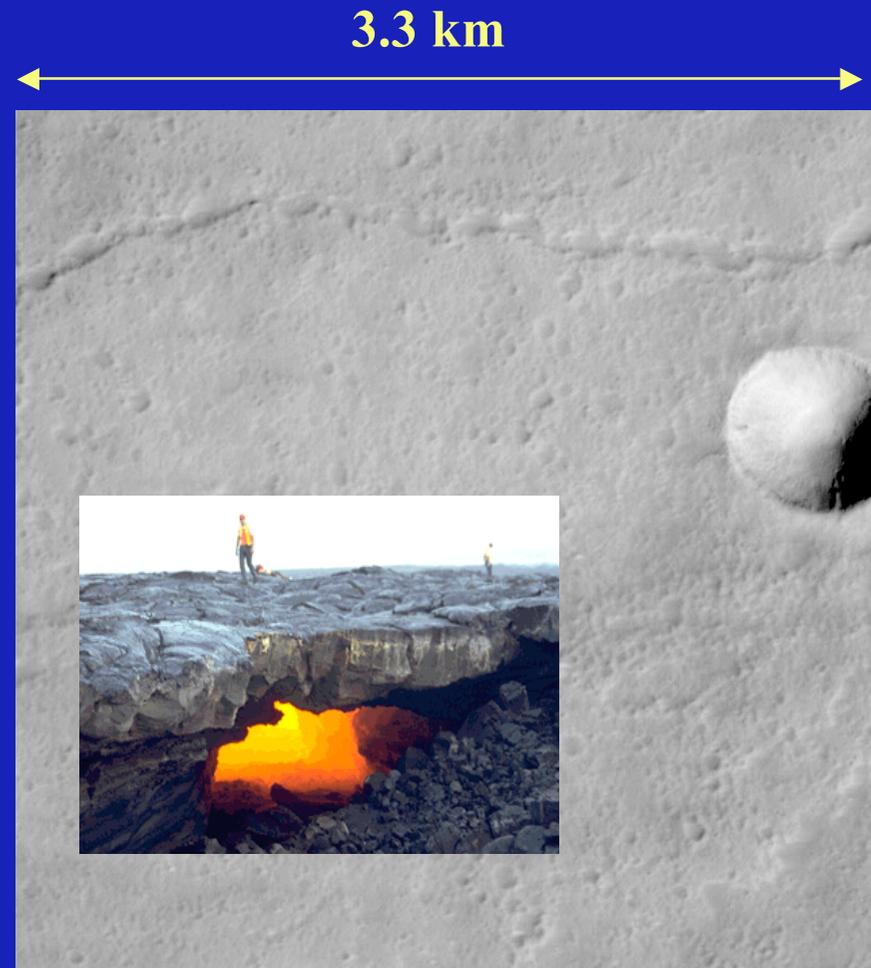
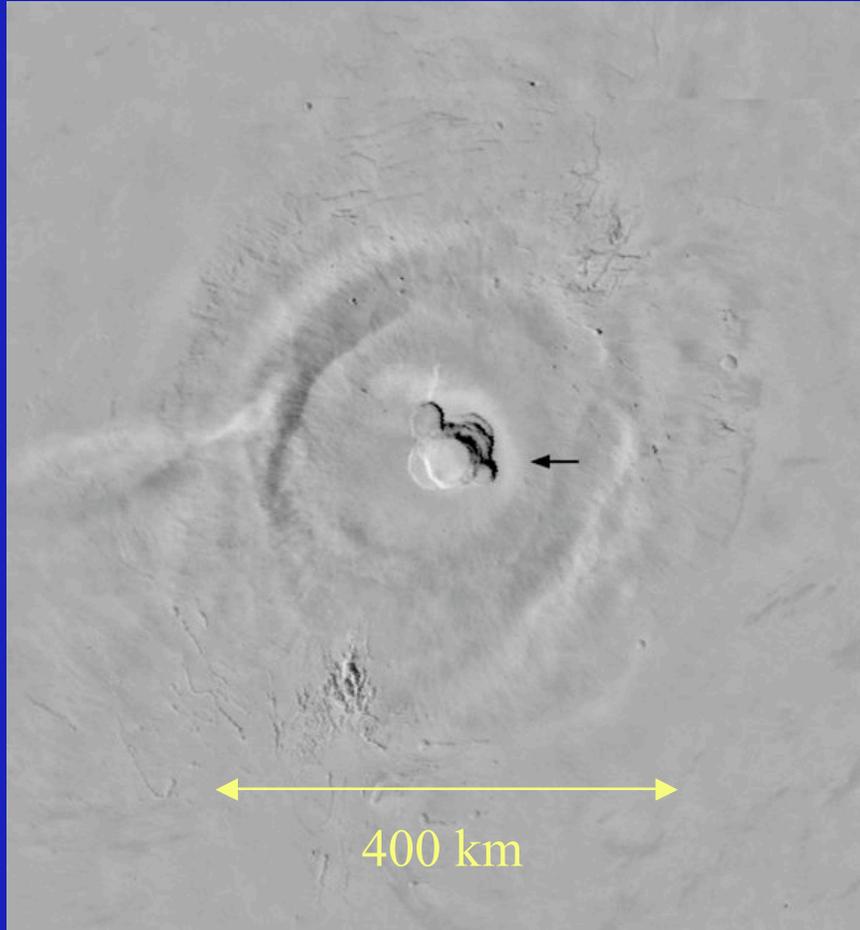
70° à 250°E

Zuber et al., 2000

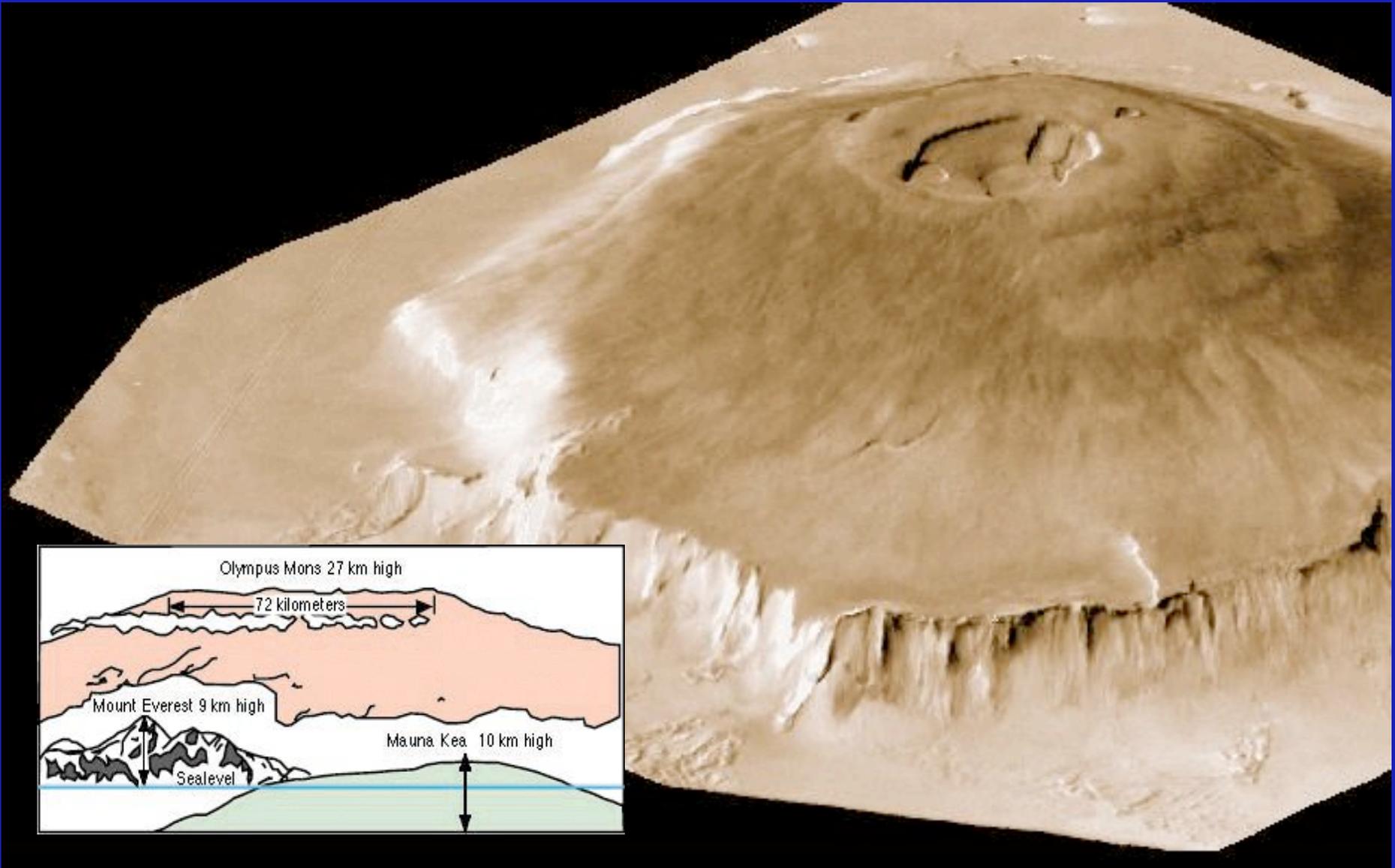
Tharsis et les volcans géants

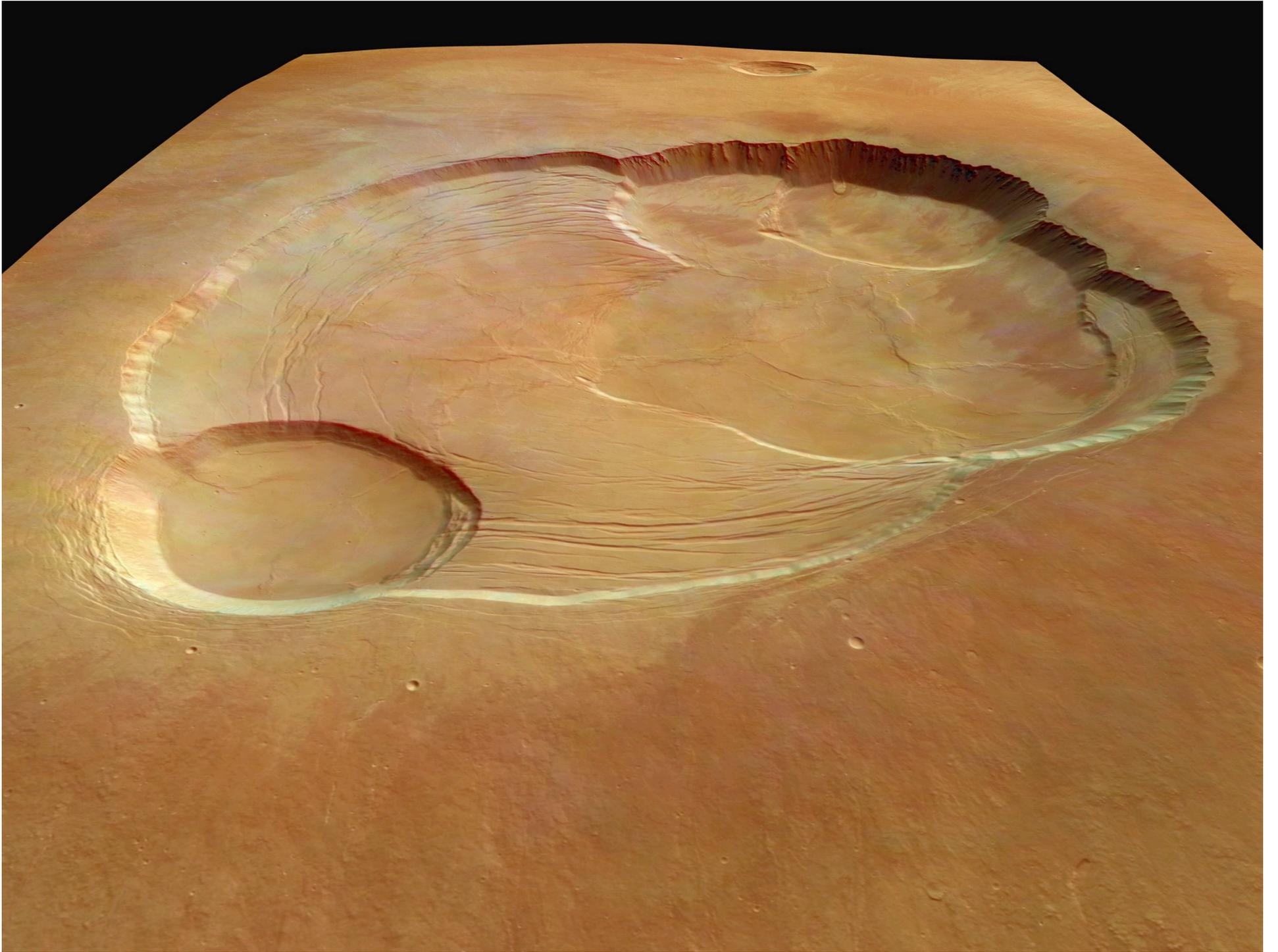


Ascraeus Mons



Le plus grand volcan du système solaire





Données gravimétriques et géodésiques: hypothèses et démarches

Masse et volume

Précession des équinoxes
+ J_2

Equation d'Euler (axi-symétrique)

Densité moyenne,
Moments d'inertie

Modèle moyen non unique
(y compris croûte moyenne)

Variation de gravité
Variation de forme

Anomalies
de Bouguer

- Variation d'épaisseur crustale (Pratt)
- Variation de densité crustale (Airy)
- Variation de densité du manteau

Charge

Rhéologie

Estimation régionale
de l'épaisseur de la
lithosphère élastique

Théorie de flexure des
plaques élastiques

Température
de surface

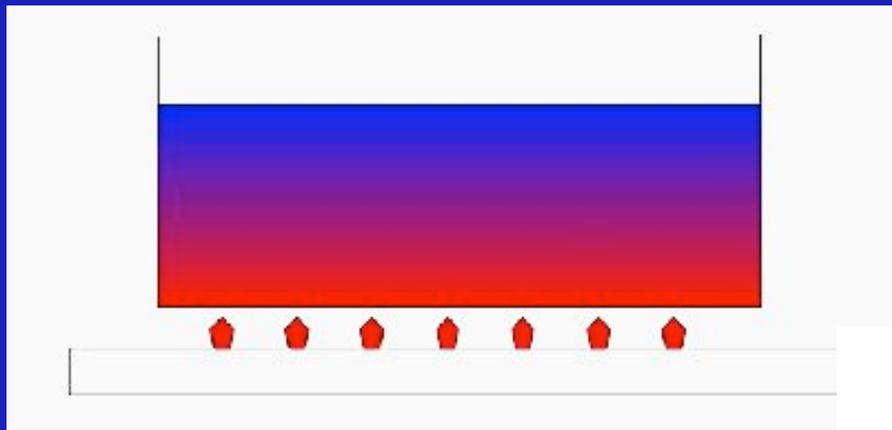
Profondeur de l'isotherme 650°C

Flux de
chaleur!

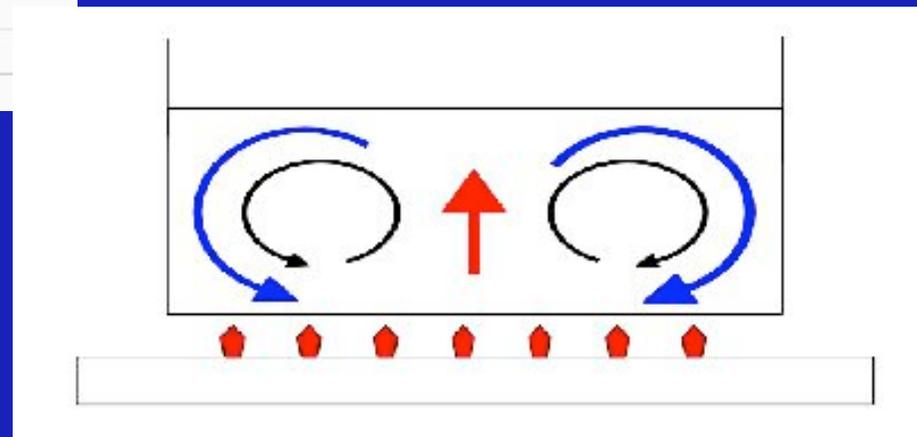
Convection et volcanisme: Mars

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

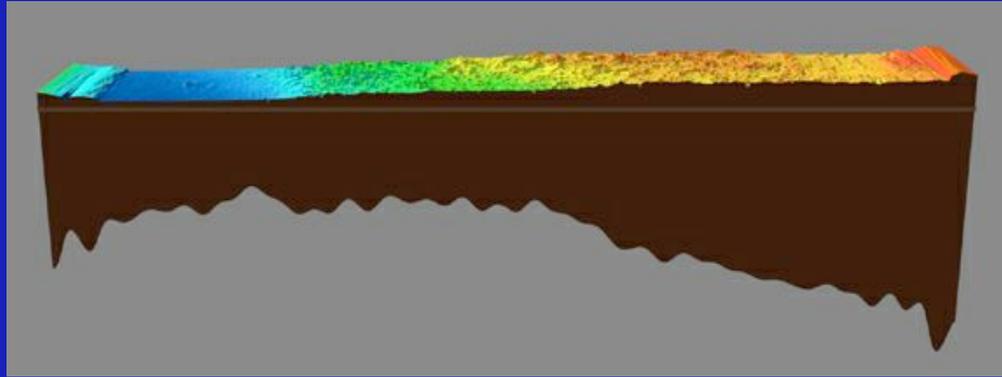
- En tombant au centre, le noyau augmente la chaleur libérée
- Chauffage par le bas.... Refroidissement par le haut



Dans une casserole...

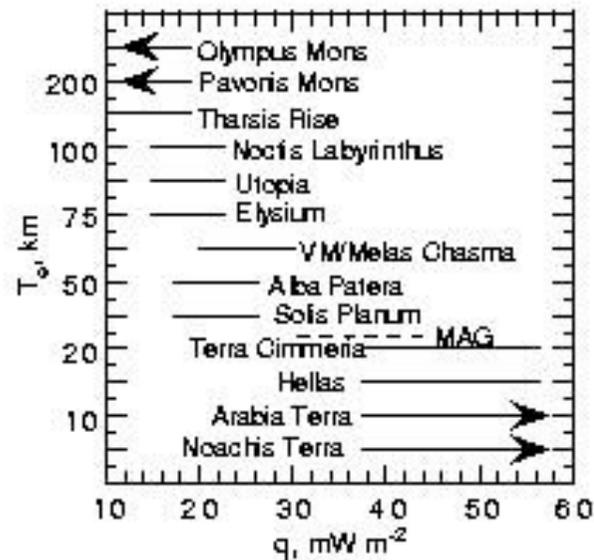
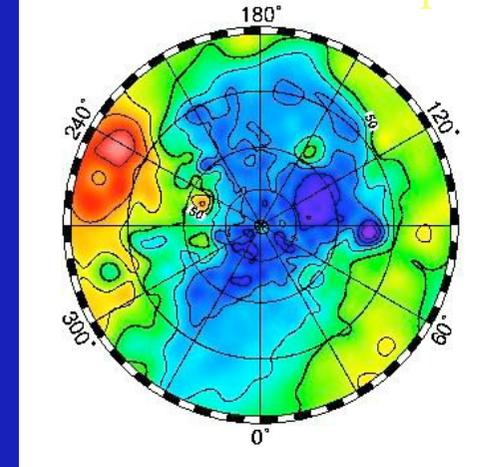


Une convection asymétrique ?



Coupe nord-sud

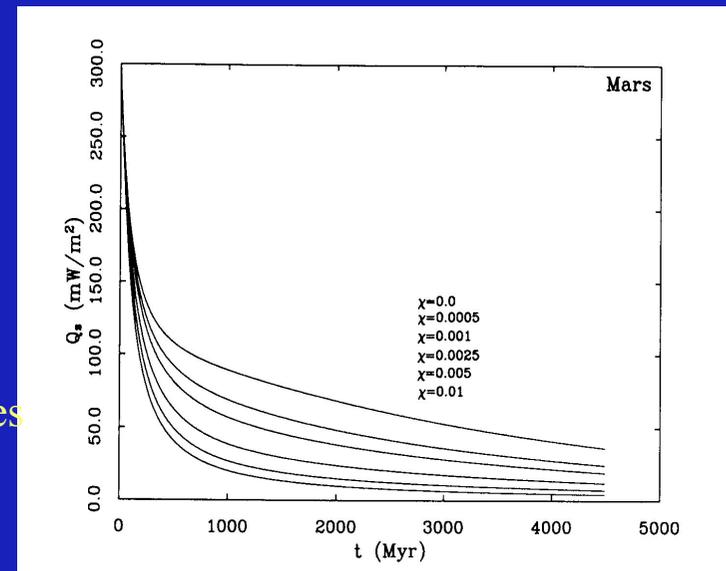
Epaisseur crustale vue du pôle Nord



Estimations locales

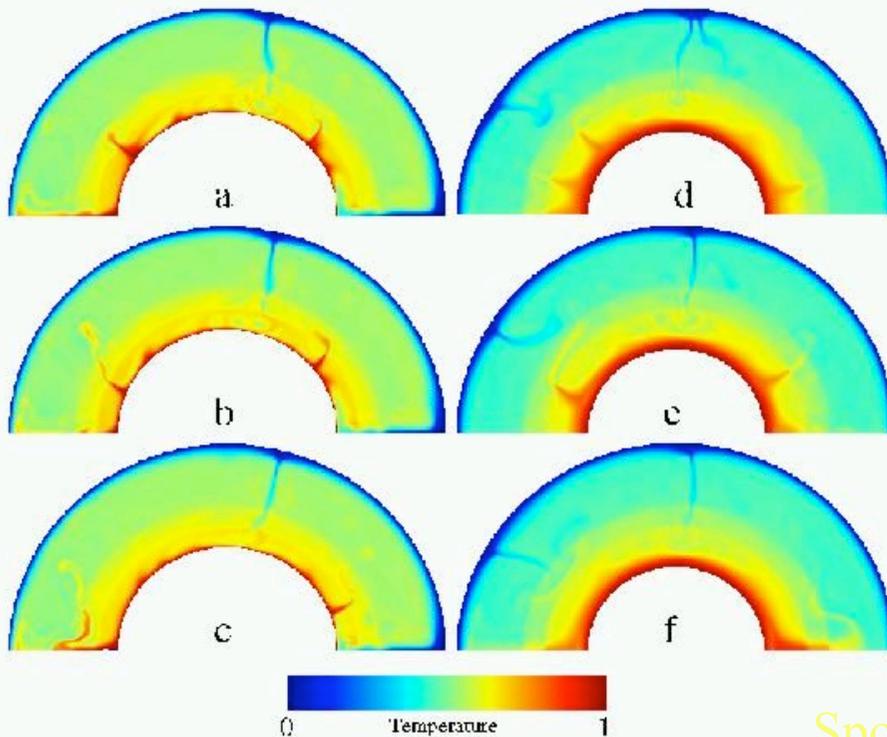


Estimations globales

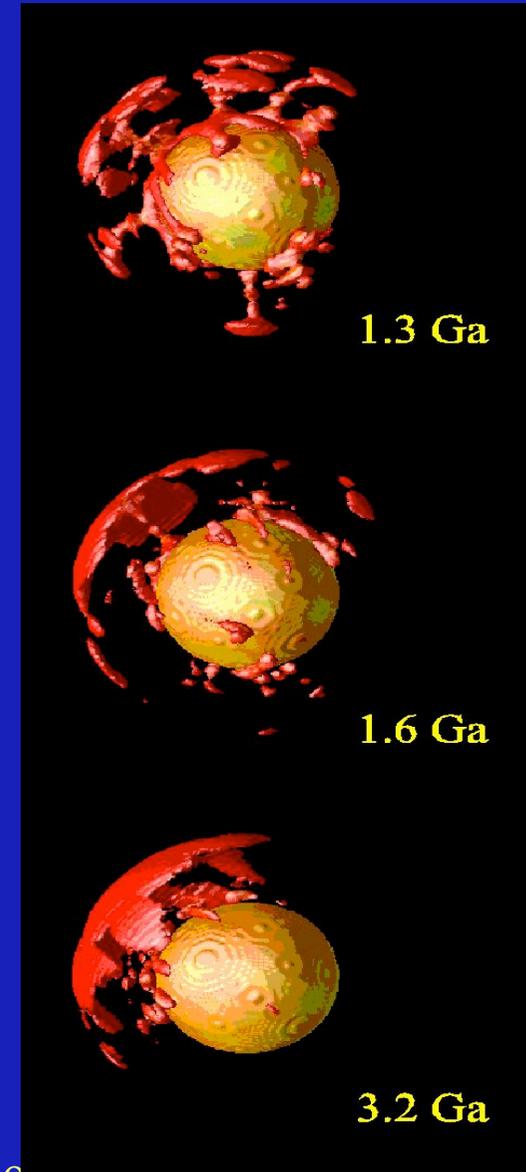


Température et discontinuités...

- ◆ Discontinuités exothermiques α -Olivine/ β -spinelle, β -spinelle/ γ -spinelle, éventuellement discontinuité endothermique γ -spinelle-pérovskite
- ◆ Impact important de l'existence de γ -spinelle-pérovskite sur dynamique du manteau et température... mais disparition possible lors du refroidissement...



Spohn, Breuer et al., 1997



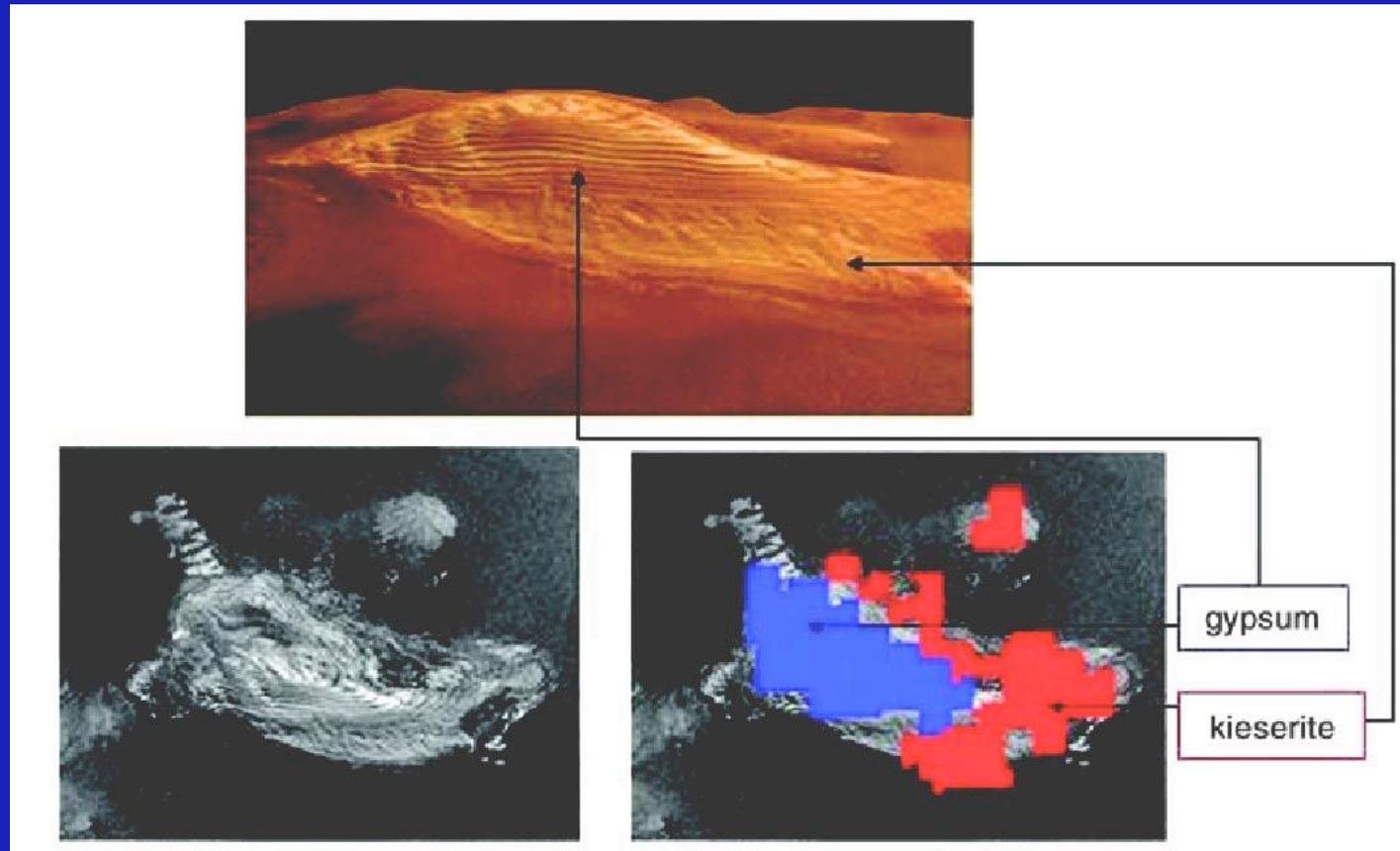
Le dégazage de l'atmosphère.. et de l'eau



- ◆ **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 CO₂ 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 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



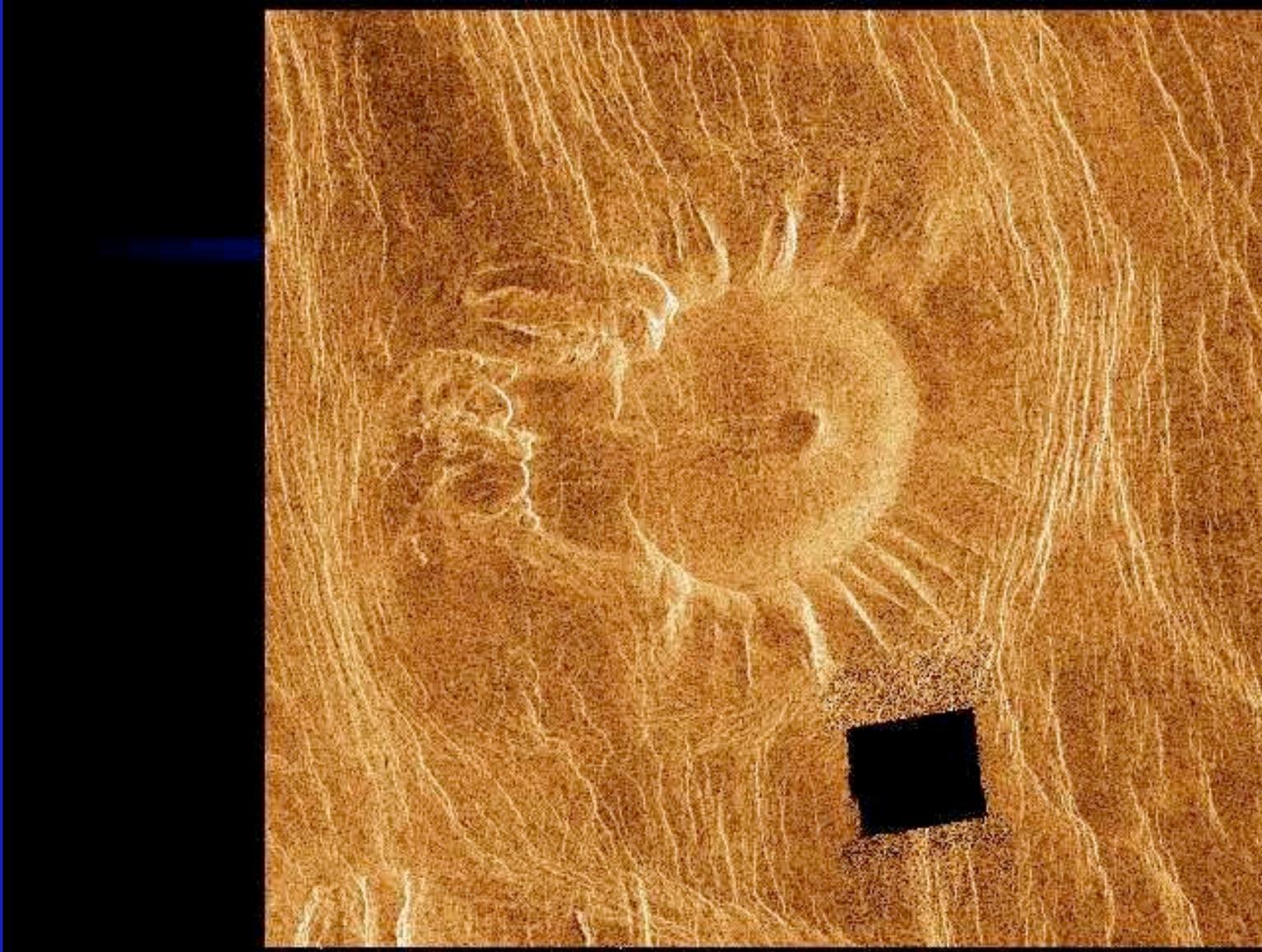


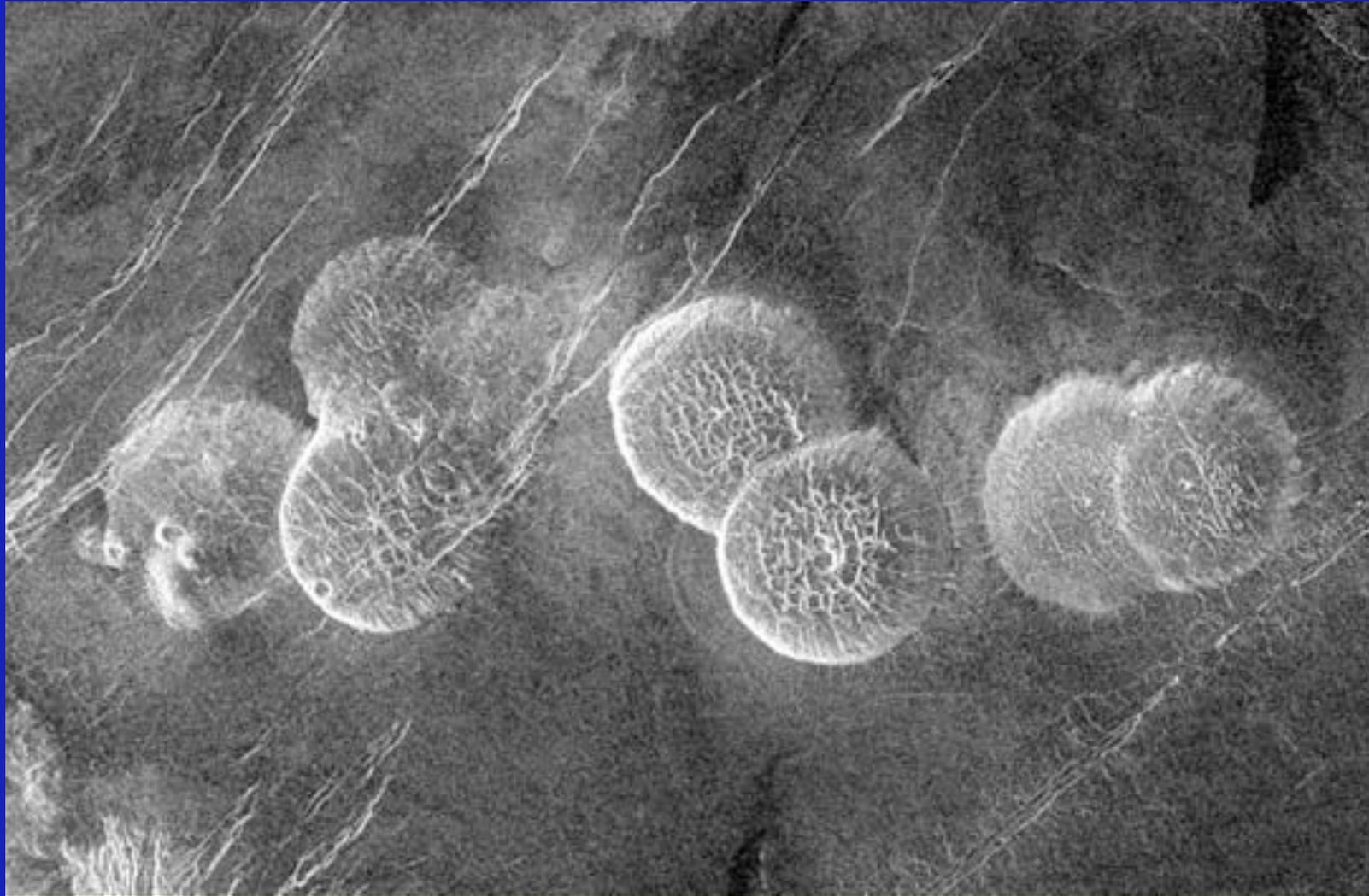
Et toujours.. des dépôts massifs de sulfates
(Spirit, 23 Mars2006)

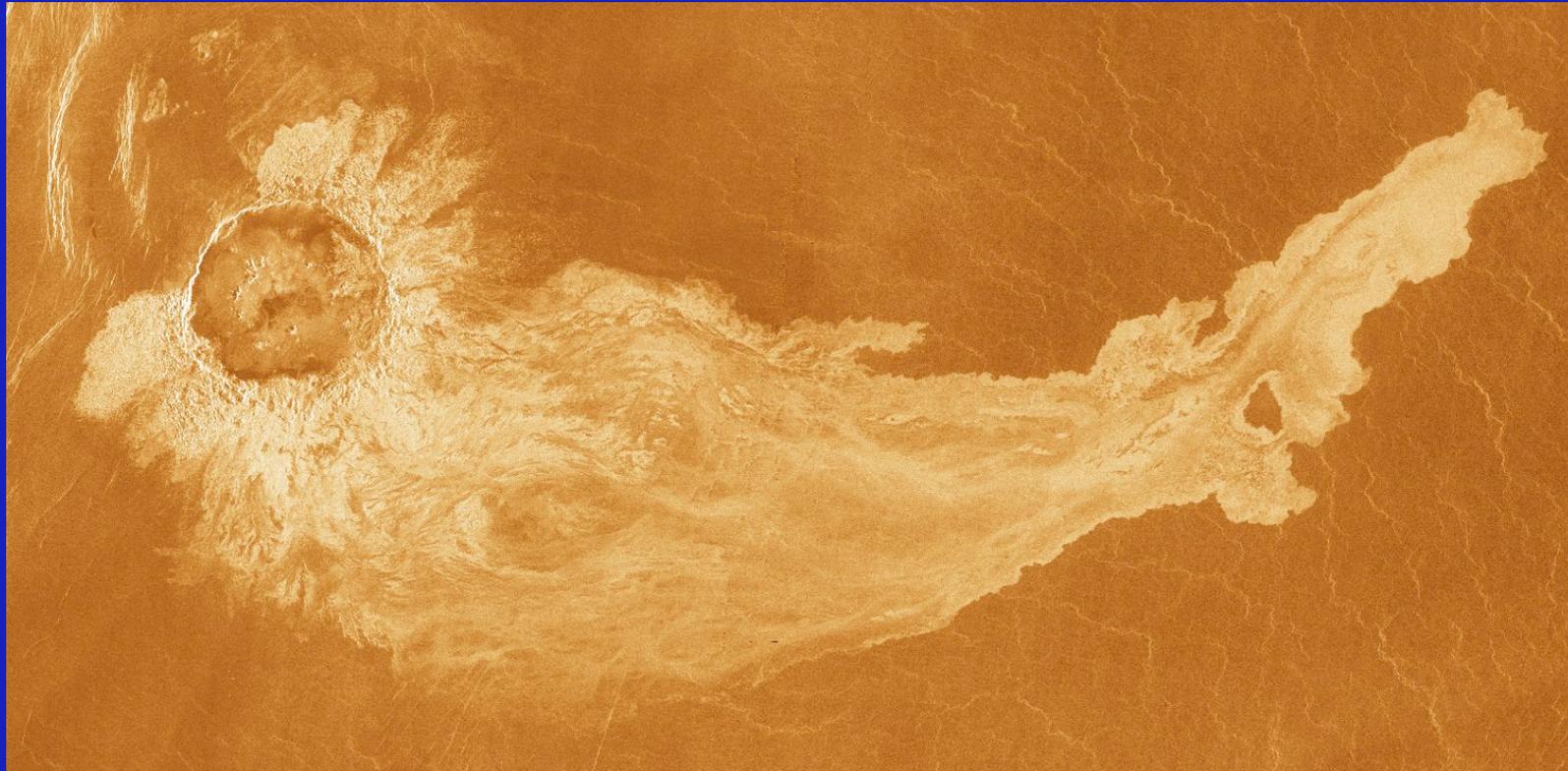
Evolution thermique de Venus

◆ 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° Latitude, 98.90° 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)

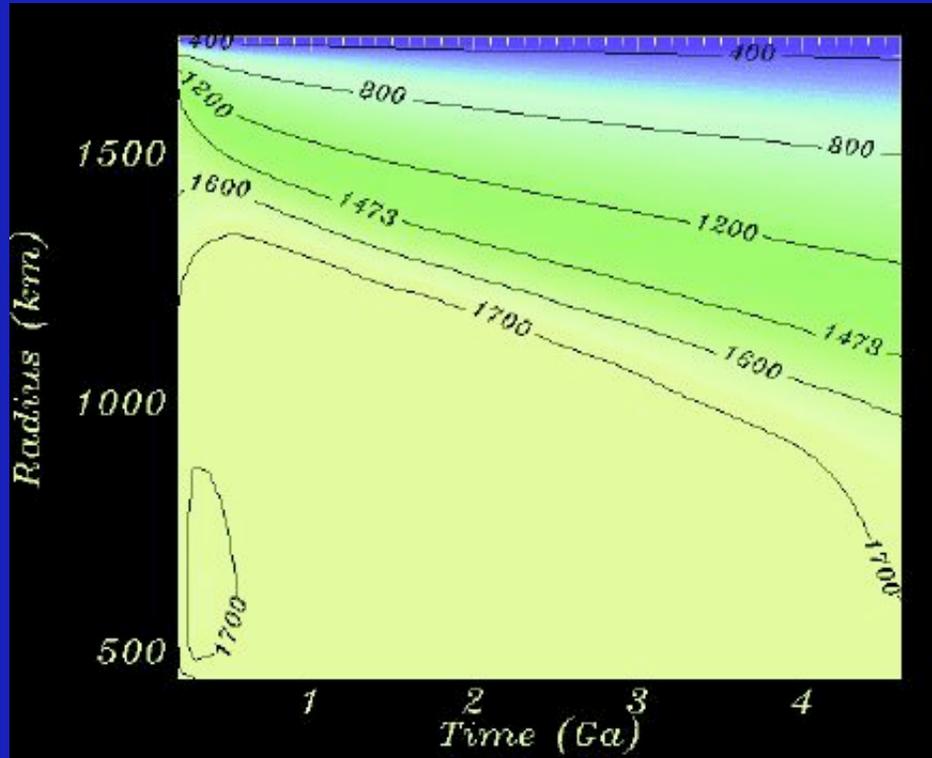
- » Manteau (transport possible par convection)

- ◆ 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'intérieur)

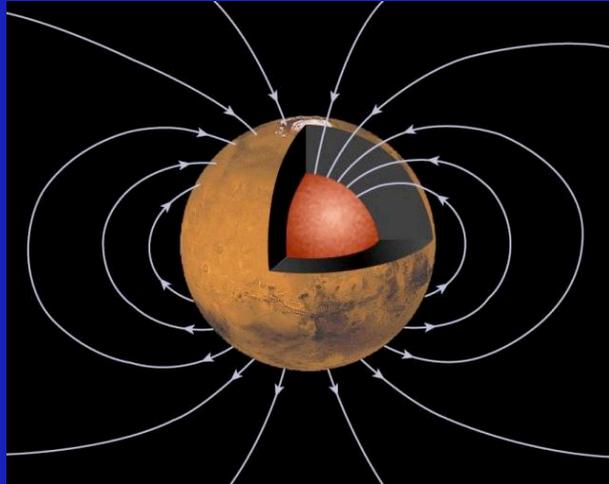
Refroidissement d'une planète à une plaque



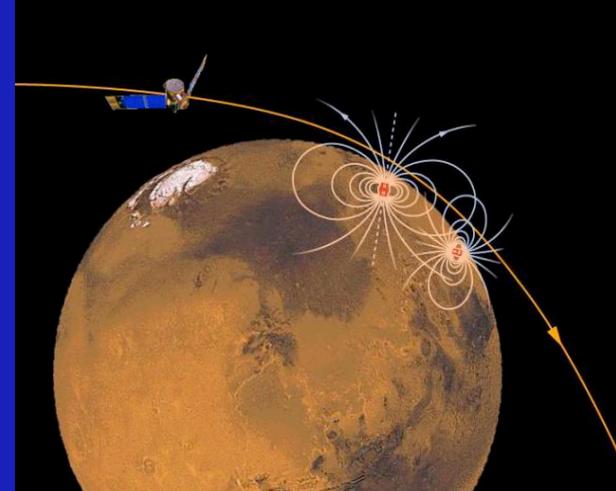
Refroidissement de la Lune

- 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

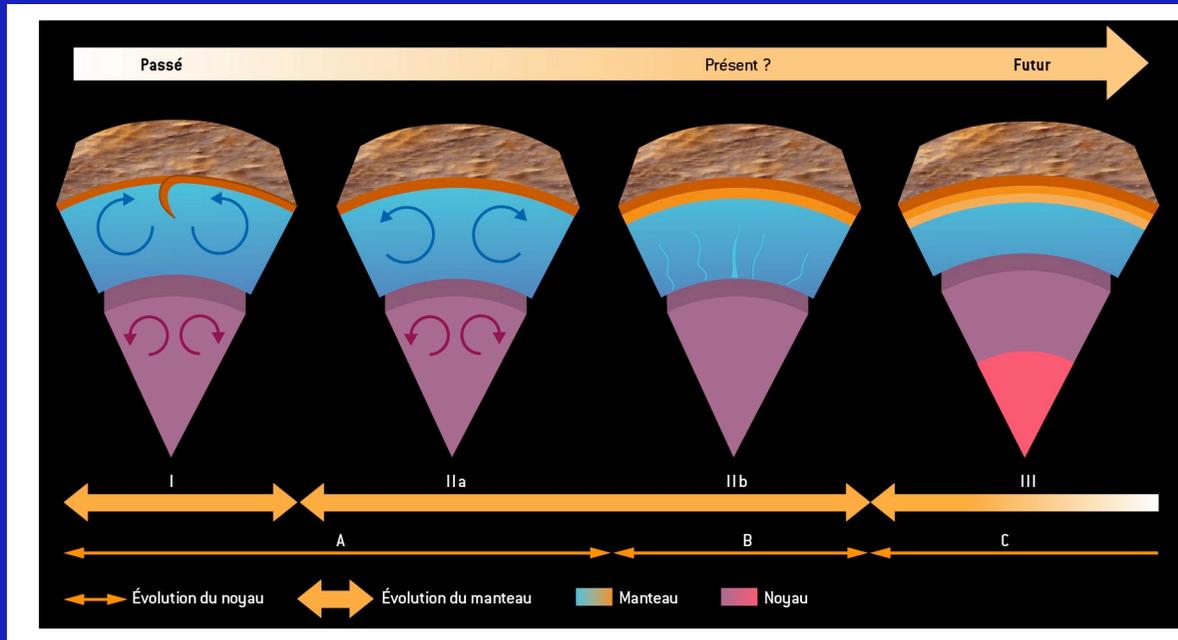
La planète s'arrête de fonctionner



Arrêt de la
dynamo



Mars la
Jeune



Mars
aujourd'
hui

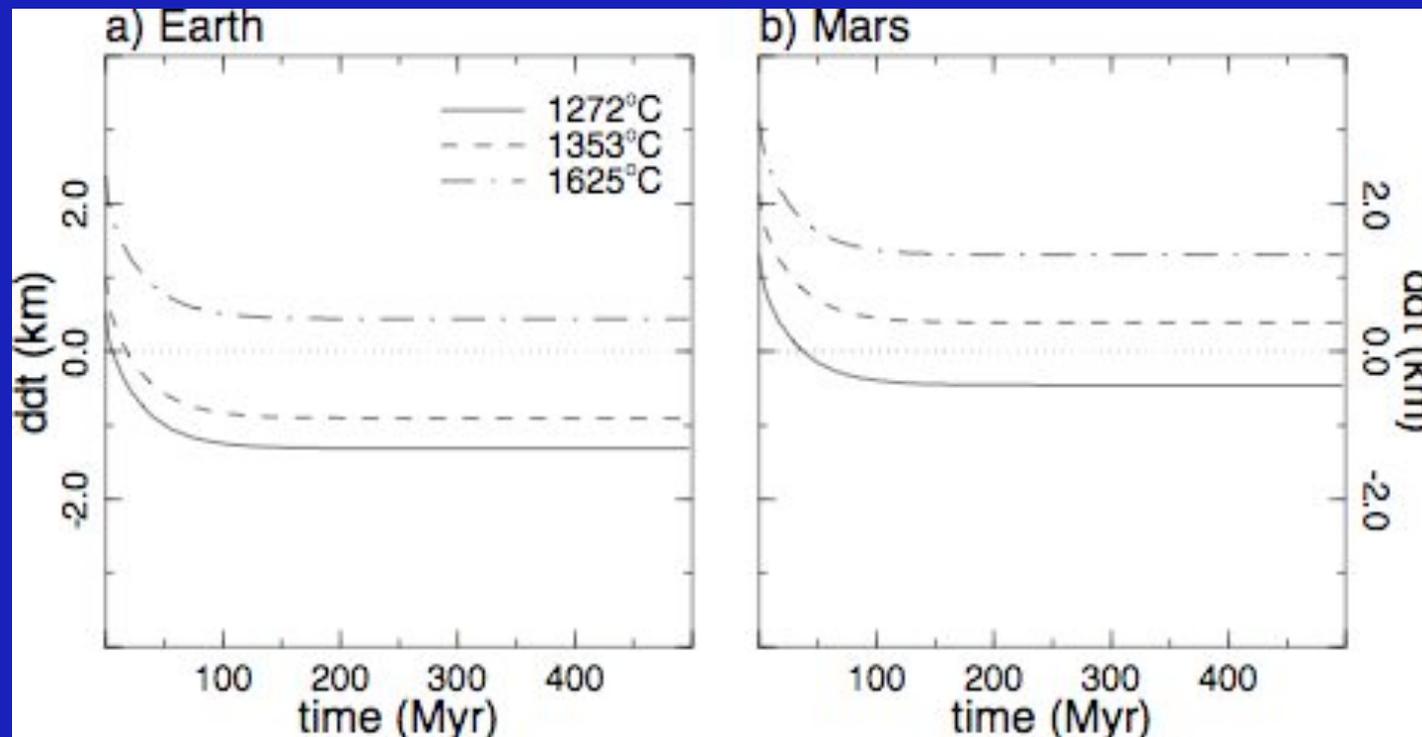
Subduction et tectonique des plaques

- ◆ 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

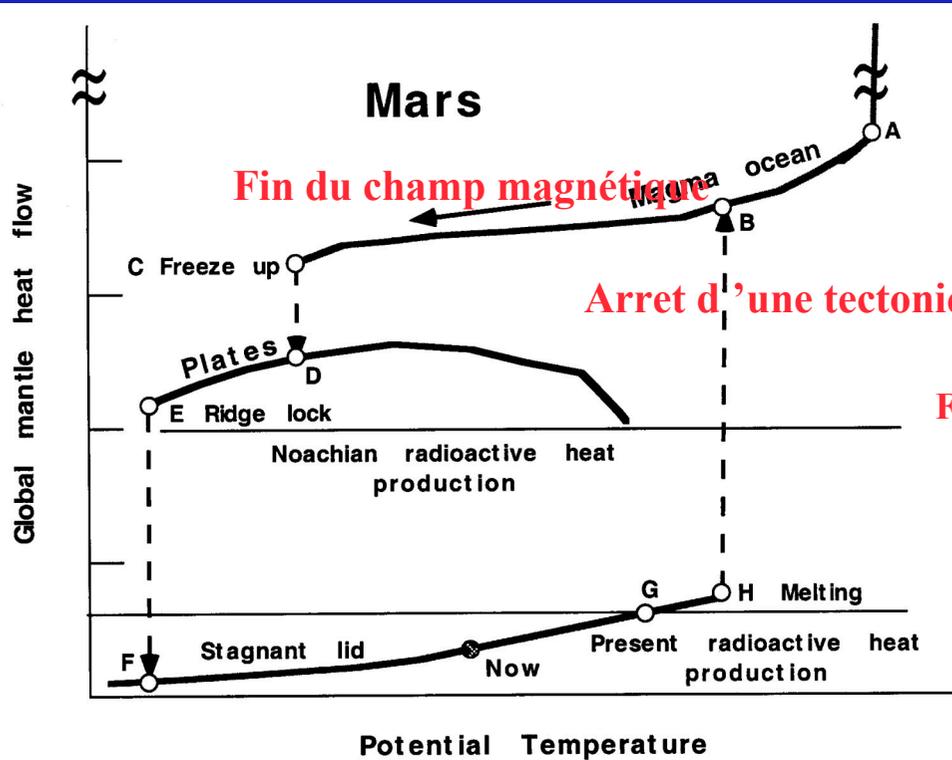
$$S' = 100 \left[\frac{1}{R_0 - R_L} \int dr \frac{[\rho_{sl} - \rho(r)]}{\rho_{sl}} \right]$$

Effet de la gravité

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

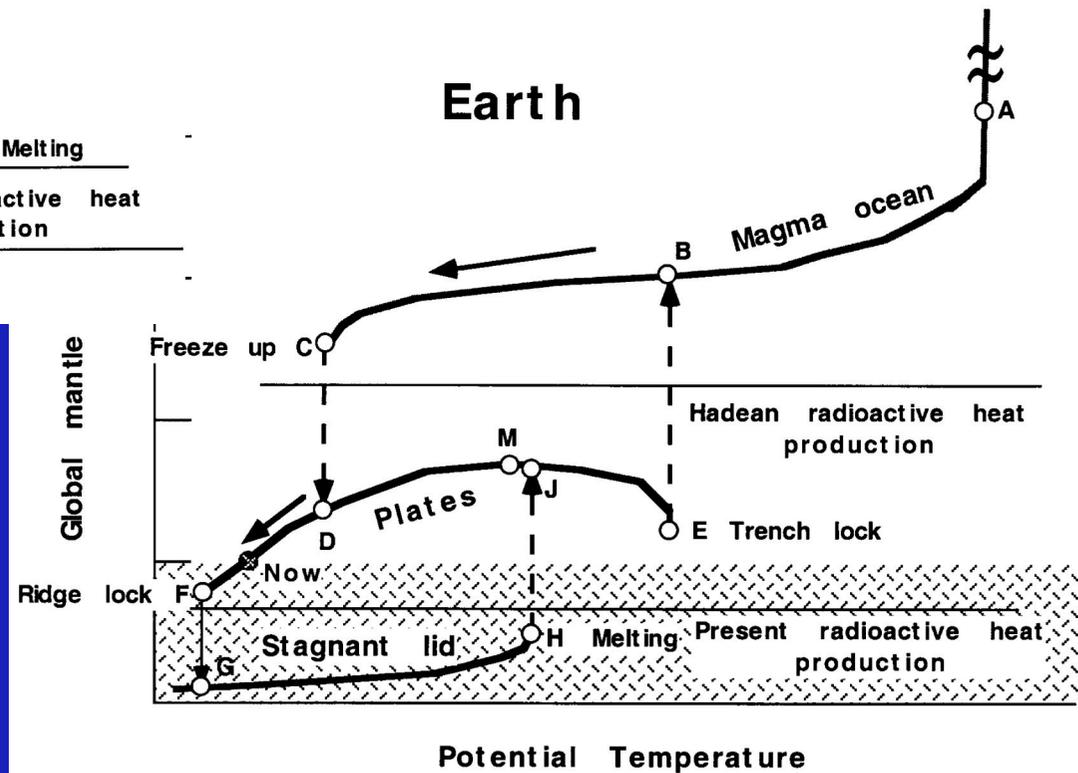


Mars comparé à la Terre...



Arret d'une tectonique des plaques

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



Quelle est la température du manteau?