

Evolution thermique des planètes

- Point de départ: après différenciation noyau/manteau/croûte
- Plus d'échange de matière entre le manteau et le noyau
- Suivant le style de convection, échange entre la croûte et la manteau

Sources de chaleur

- Chaleur dégagée lors de l'accrétion: condition initiale
- Chaleur dégagée par la désintégration radioactive des éléments
 - Rapport d'Urey: rapport de la chaleur d'origine radioactive à la chaleur totale
- Autres cas pour des planètes telluriques:
 - Apport d'énergie par force de Marées.. Satellites des planètes géantes

Bilan et ordres de grandeur

	Flux chaleur	Rayon	Energie	Energie/kg/s	Masse
	mw/m ² /s	km	Twatts	1e-12 W/kg	1e20 kg
Terre	86	6371	44	7,3	59742
Mars	40	3390	6	9,0	6418,5
Lune	17	1738	1	8,8	734,9
Io	2500	1821	104	1166,2	893,3

-Quelques différences:

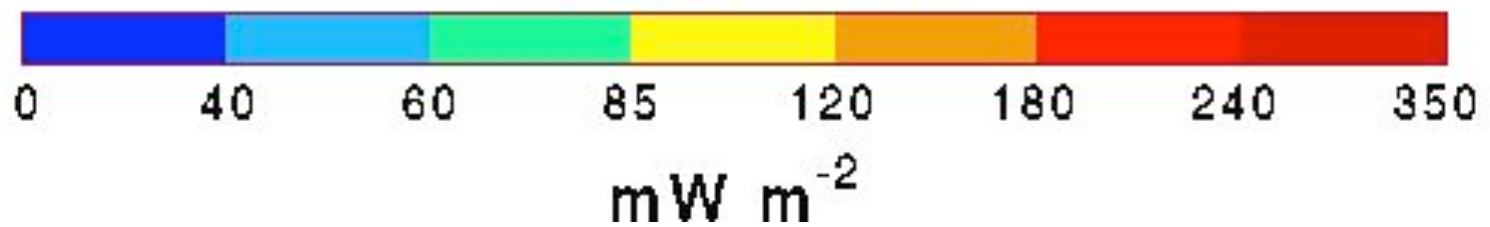
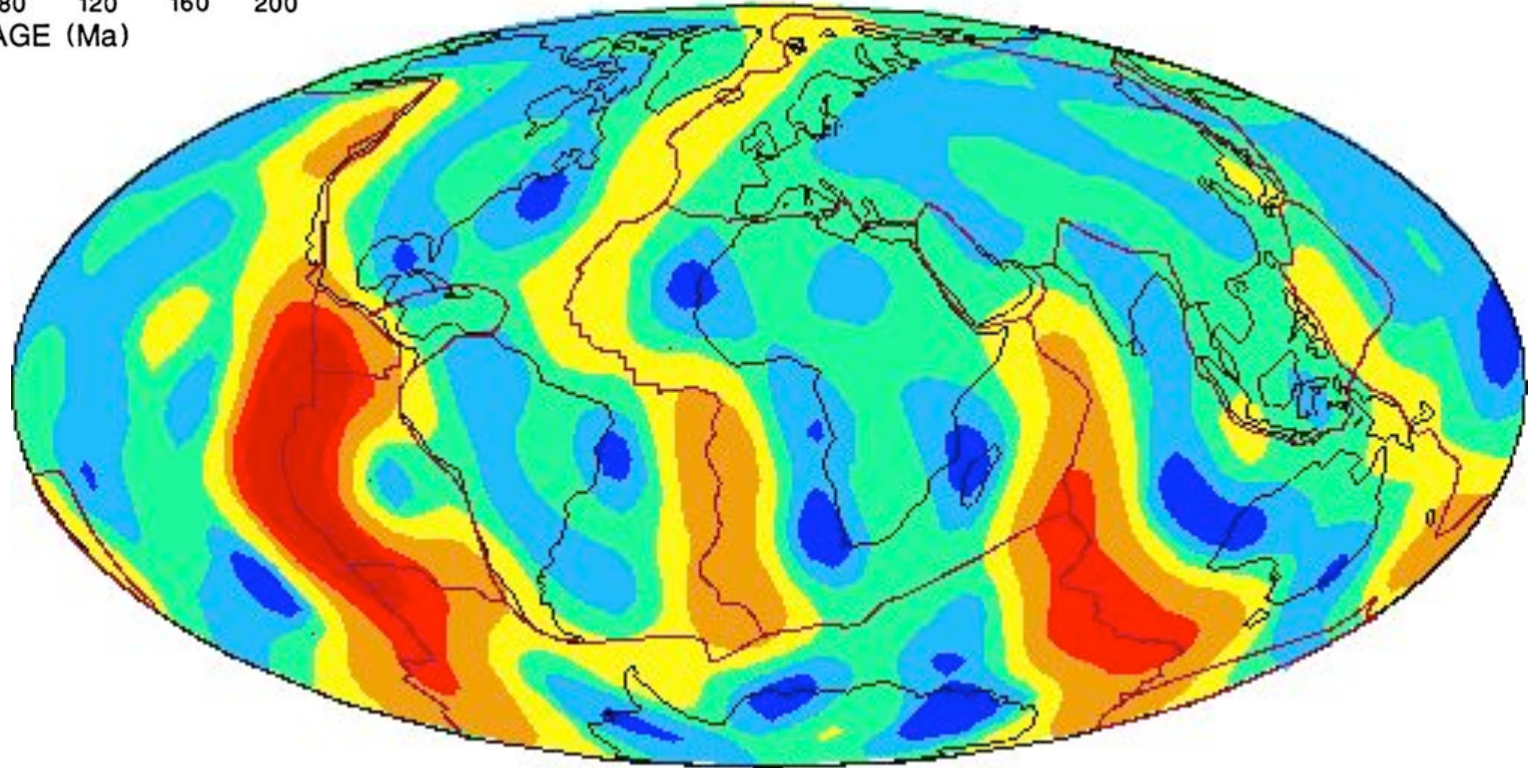
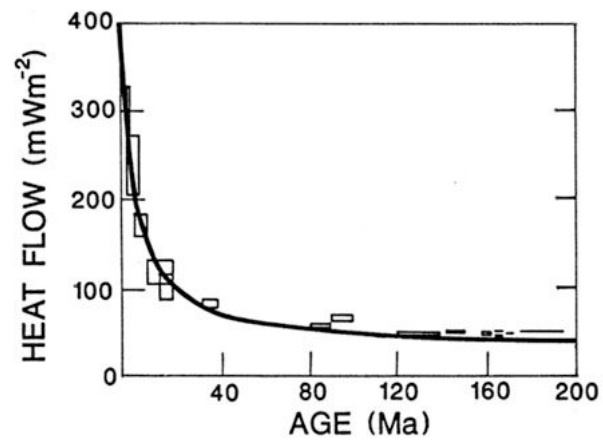
- Lune/Terre... essentiellement effet du noyau (la moitié de la masse de la Terre pour moins de 20% du flux de chaleur)

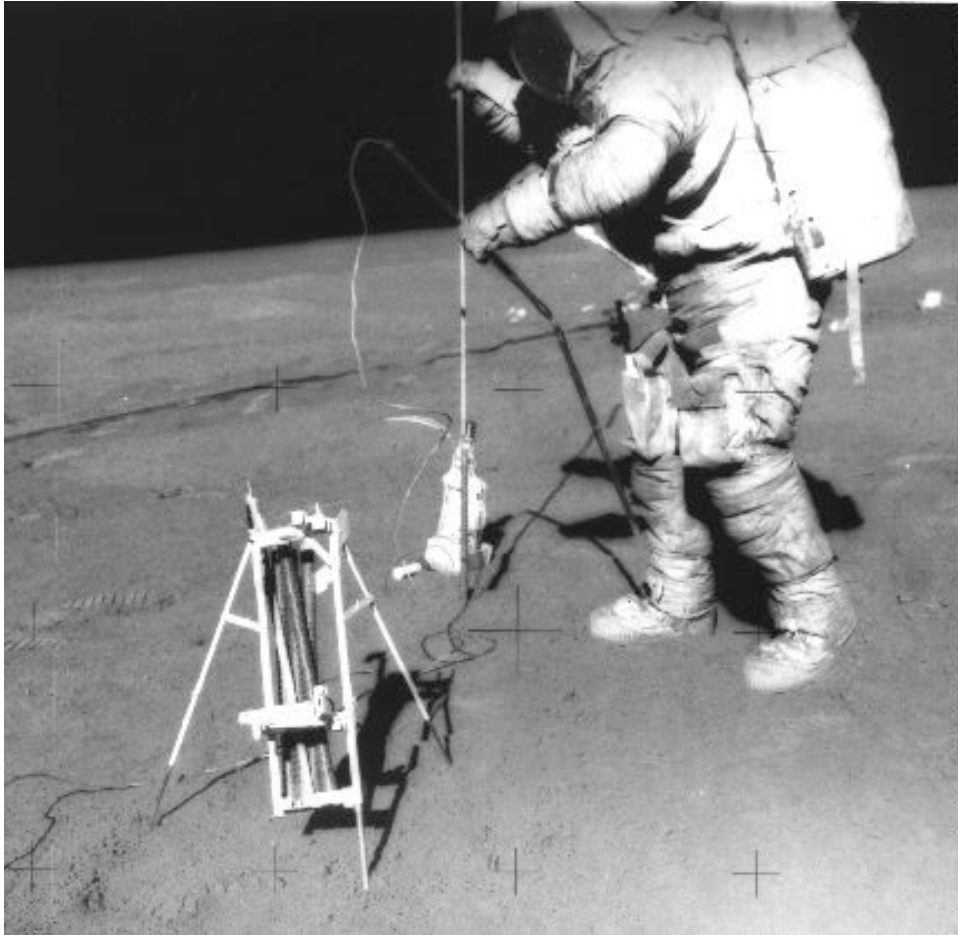
-Mars: Flux de chaleur plus élevé... Mais pas de données très fiables

-Io: flux de chaleur incompatible avec du chauffage par radioactivité

Terre

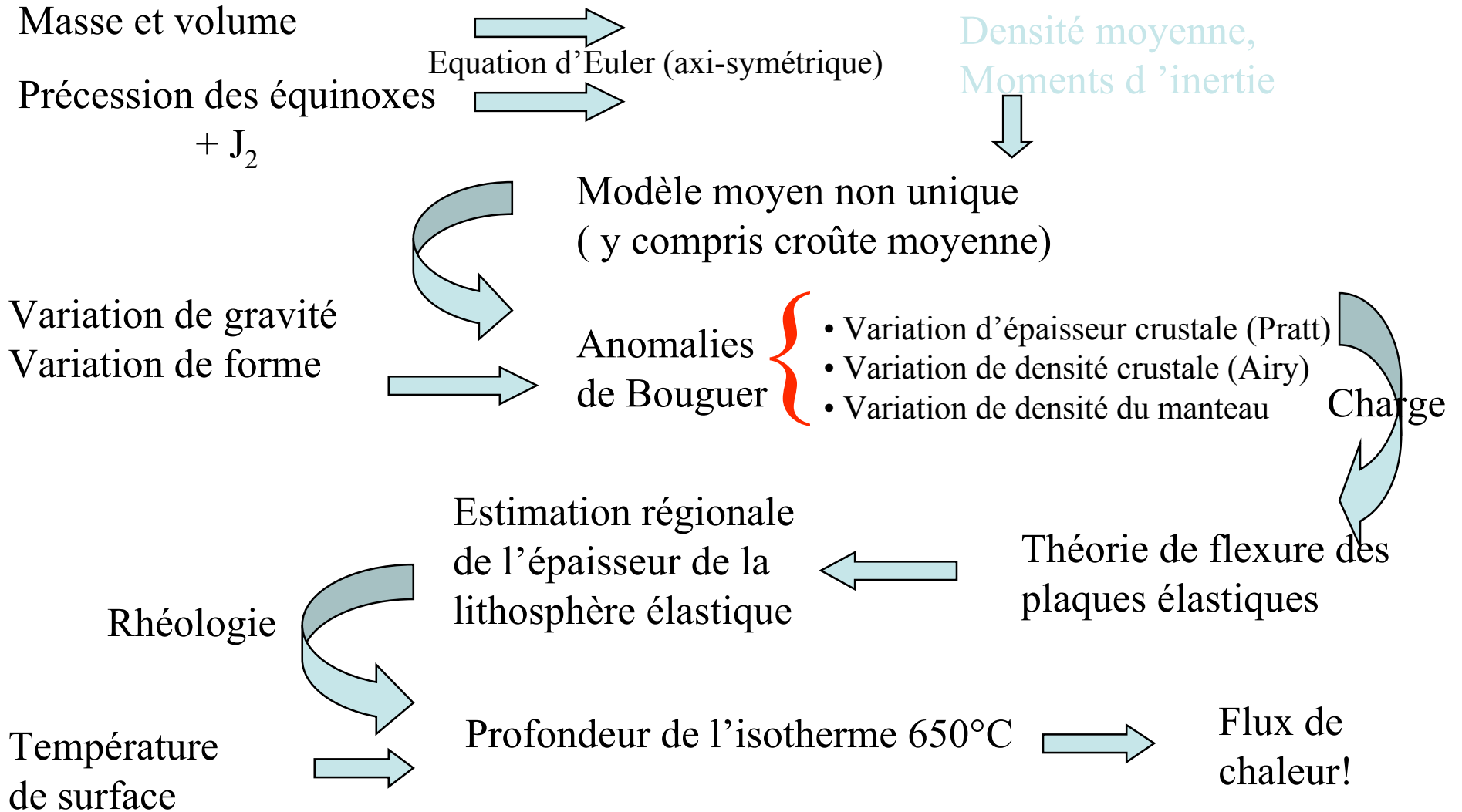
Heat Flow



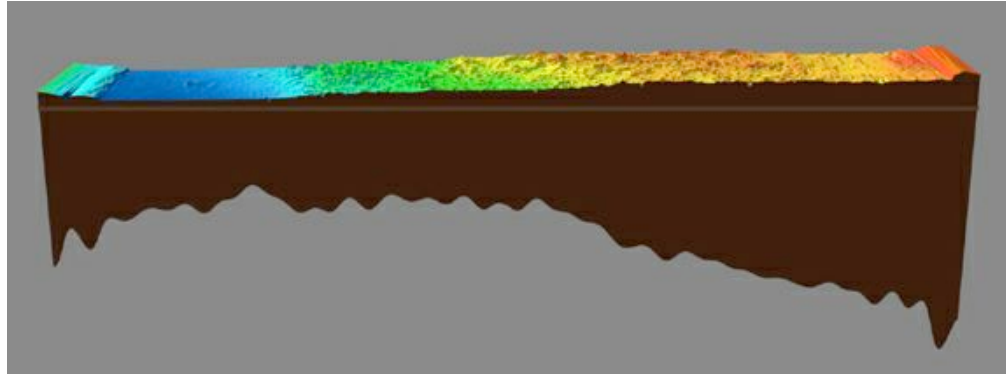


- 2 mesures effectuées
 - 21 ± 3 mW/m²/s
 - 14 ± 2 mW/m²/s
- Mais ces deux mesures sont peut être pas représentatives de la moyenne et des valeurs basses ont été proposées
 - 12 mW/m²/s

Données gravimétriques et géodésiques: hypothèses et démarches

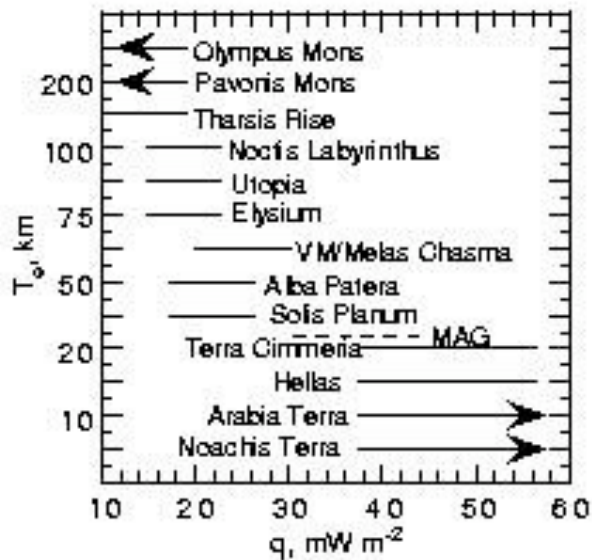
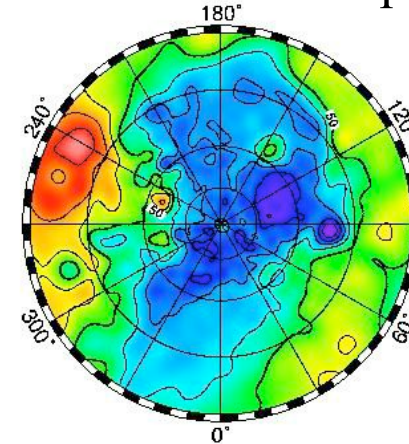


Une convection asymétrique ?



Coupe nord-sud

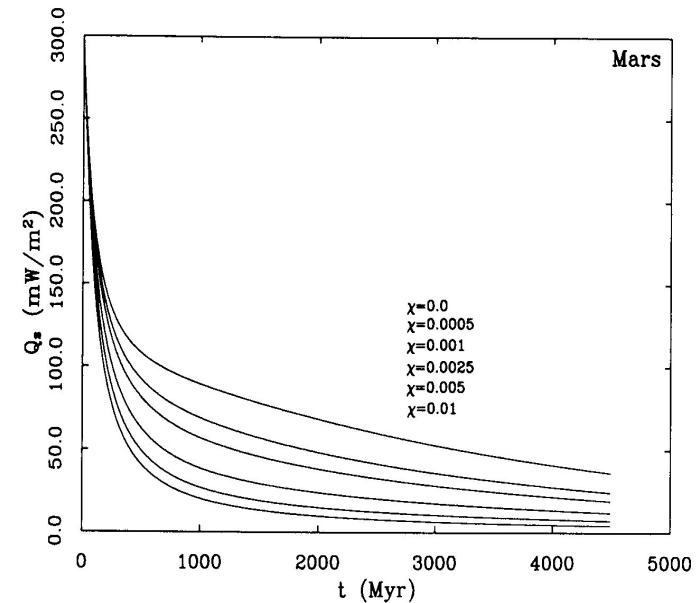
Epaisseur crustale vue du pôle Nord



Estimations locales

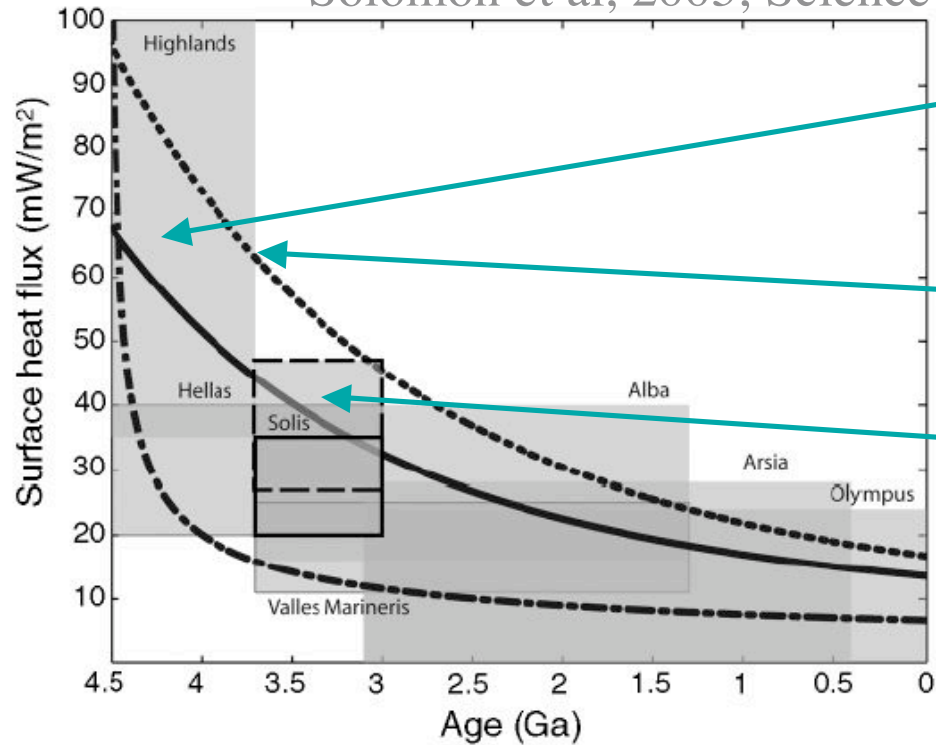
↔

Estimations globales



Flux de chaleur Martien

Solomon et al, 2005, Science



Etudes sur la limite élastique de la lithosphère

Etudes théoriques

Modélisation de structure de plis de contraction

Transport par conduction:

- Exemple de la Lune

$$\vec{\phi} = -k \frac{dT}{dr}$$

- Cas stationnaire

$$-4\pi r^2 k \frac{dT}{dr} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho H \quad \rho C_p \frac{dT}{dt} = -\text{div} \vec{\phi} + \rho H$$

$$T = T_s + \frac{\rho H}{6k} (a^2 - r^2) = T_s + \frac{\phi_s a}{2k} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)$$

$$\phi = \frac{\rho H}{3} r$$

- Applications

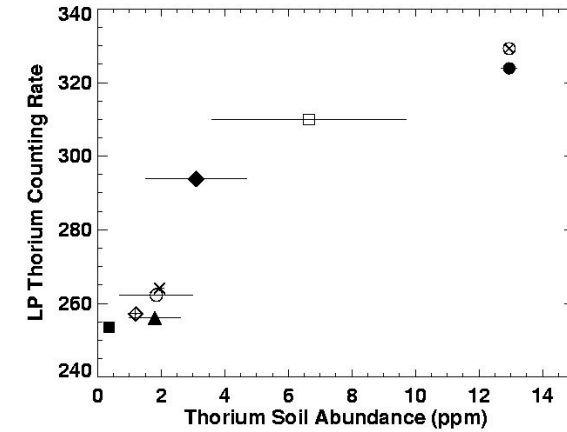
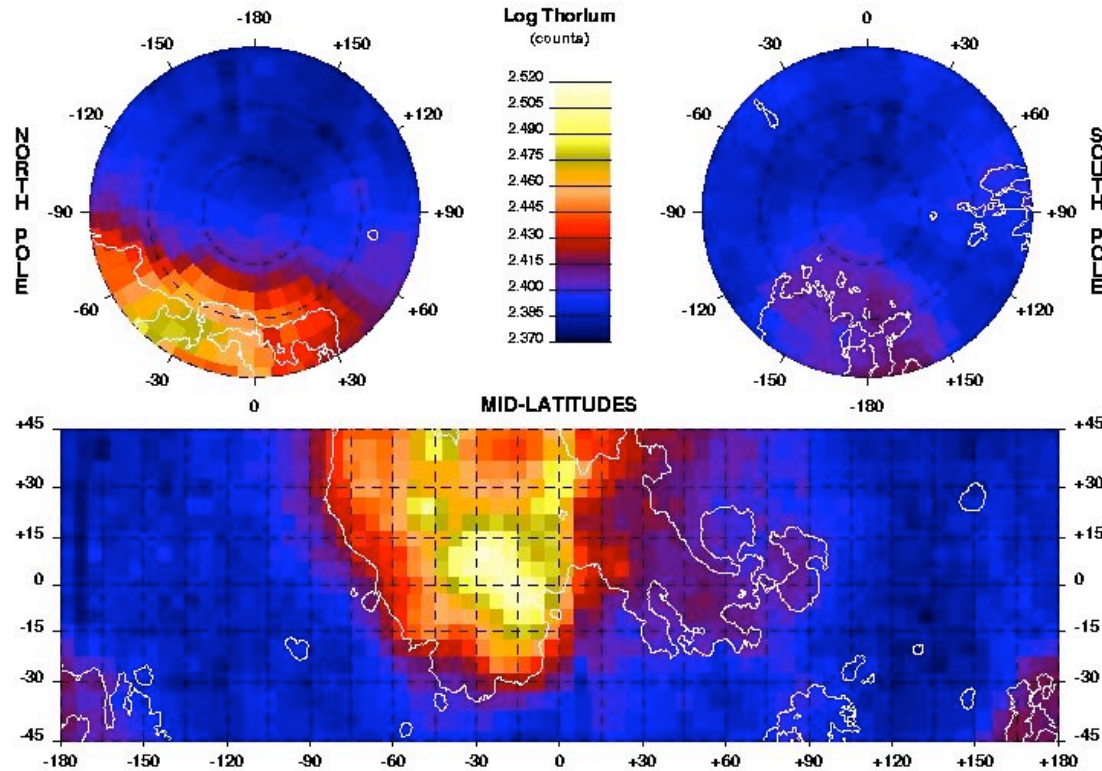
- $a=1740$ km, $k = 4$ W/m/K, $\Phi=18$ mW/m²
- $T \sim 4000$ K
- Ne s'applique donc pas à la Lune (fusion et convection)

Radioactivité de la croûte

Valeur moyenne de la croûte lunaire

Th = 1.05 ppm, U = 286 ppb

Th/U = 3.67



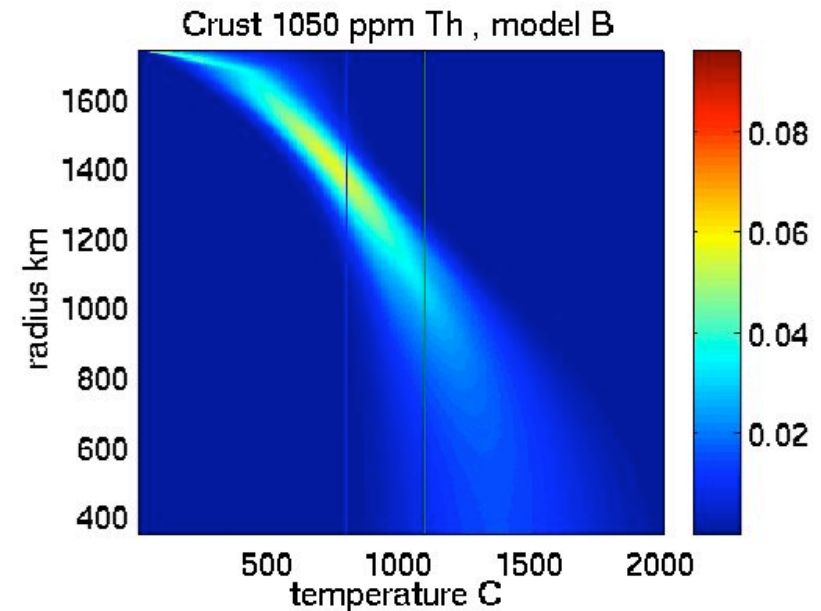
Effet de la croûte

- Enrichissement d'au moins 4 de la croûte

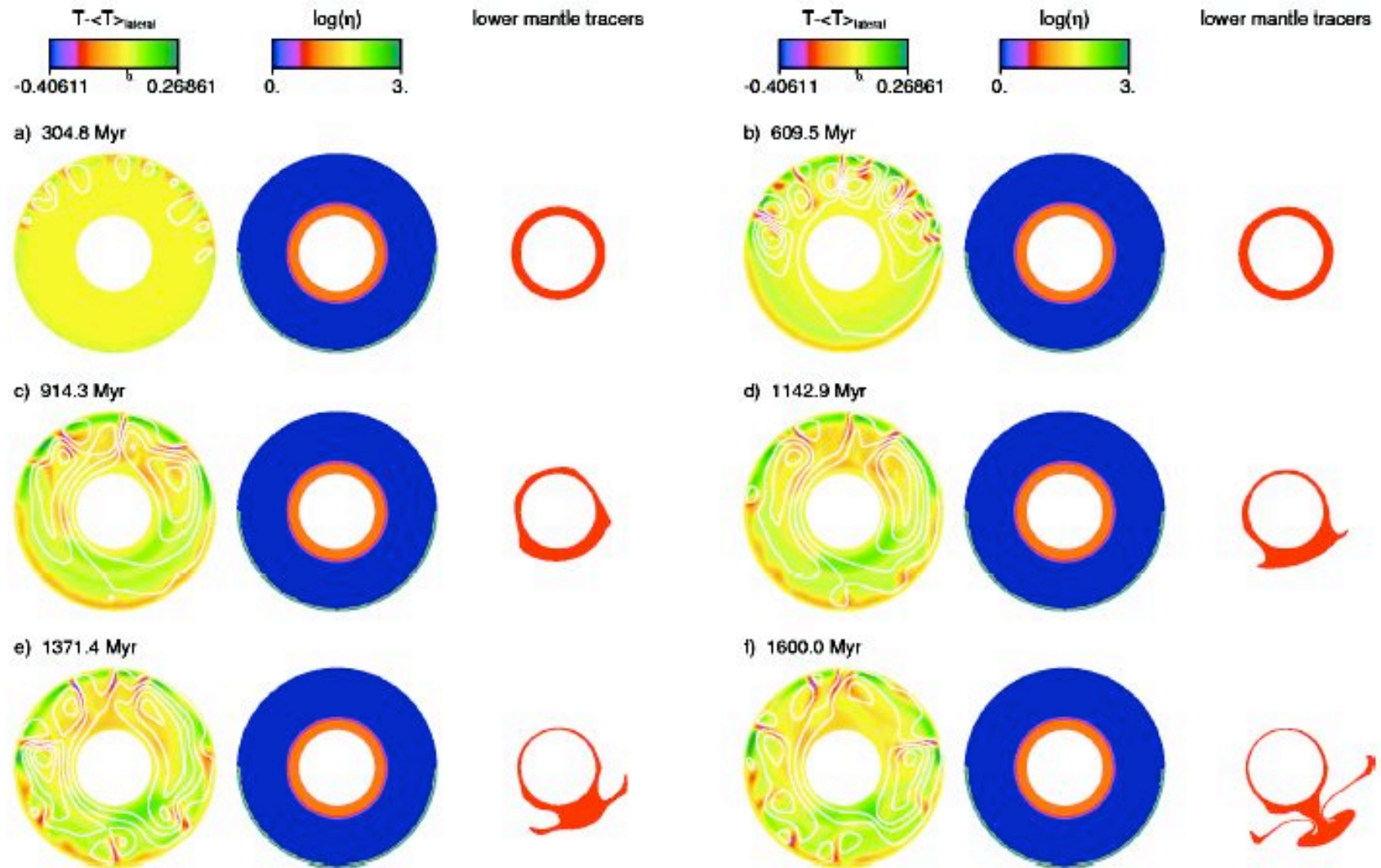
$$\Delta T_c = \frac{\phi_s}{k_c} D = \frac{0.018}{2} 45000 = 405K$$

$$\Delta T_m = \frac{\rho H_m}{6k_m} (a^2 - r^2) = \frac{a\phi_s}{k_m} \frac{H_m}{H_c} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \approx \frac{4000}{4}$$

- Si le noyau est liquide, probablement pas du fer pur mais du fer avec éléments légers



formation of large martian volcanic provinces



Rapport d'Urey

- Quelle est la part de la chaleur associée à la radioactivité
- Terre:
 - 8 TWatts dans les continents
 - Concentration des matériaux radioactifs dans la croûte
 - <20% provenant du noyau
 - Rapport de 40% (?) mais encore de grandes incertitudes

Transfert de chaleur dans une planète

- Transfert conductif
- Transfert convectif

$$R_a = \frac{\alpha_T (T_1 - T_2) g \rho_0 L^3}{k_d \nu}$$

- Viscosité dépend de la température, des volatiles
- Nombre de rayleigh dépend de la gravité, de la différence entre la température du bas et du haut

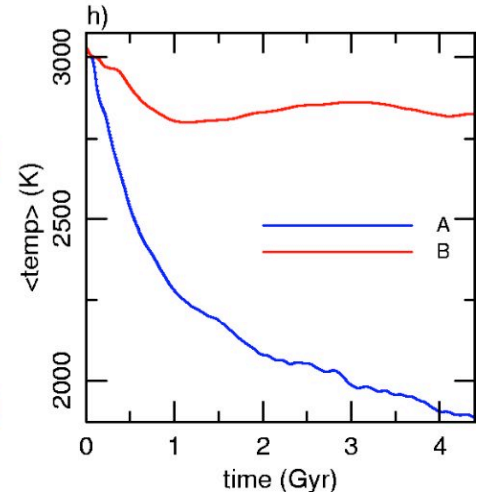
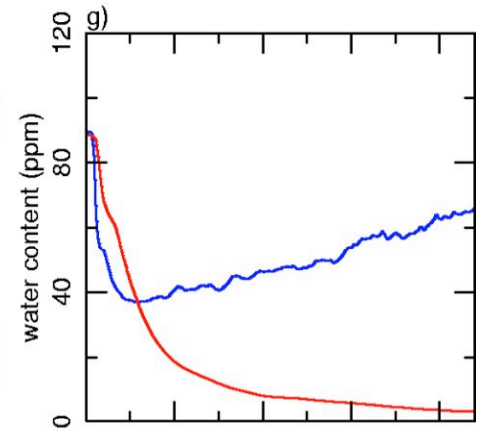
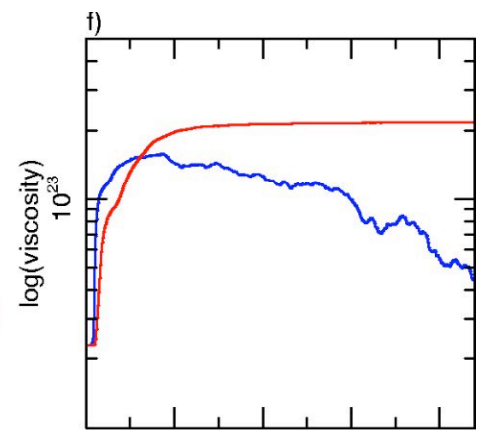
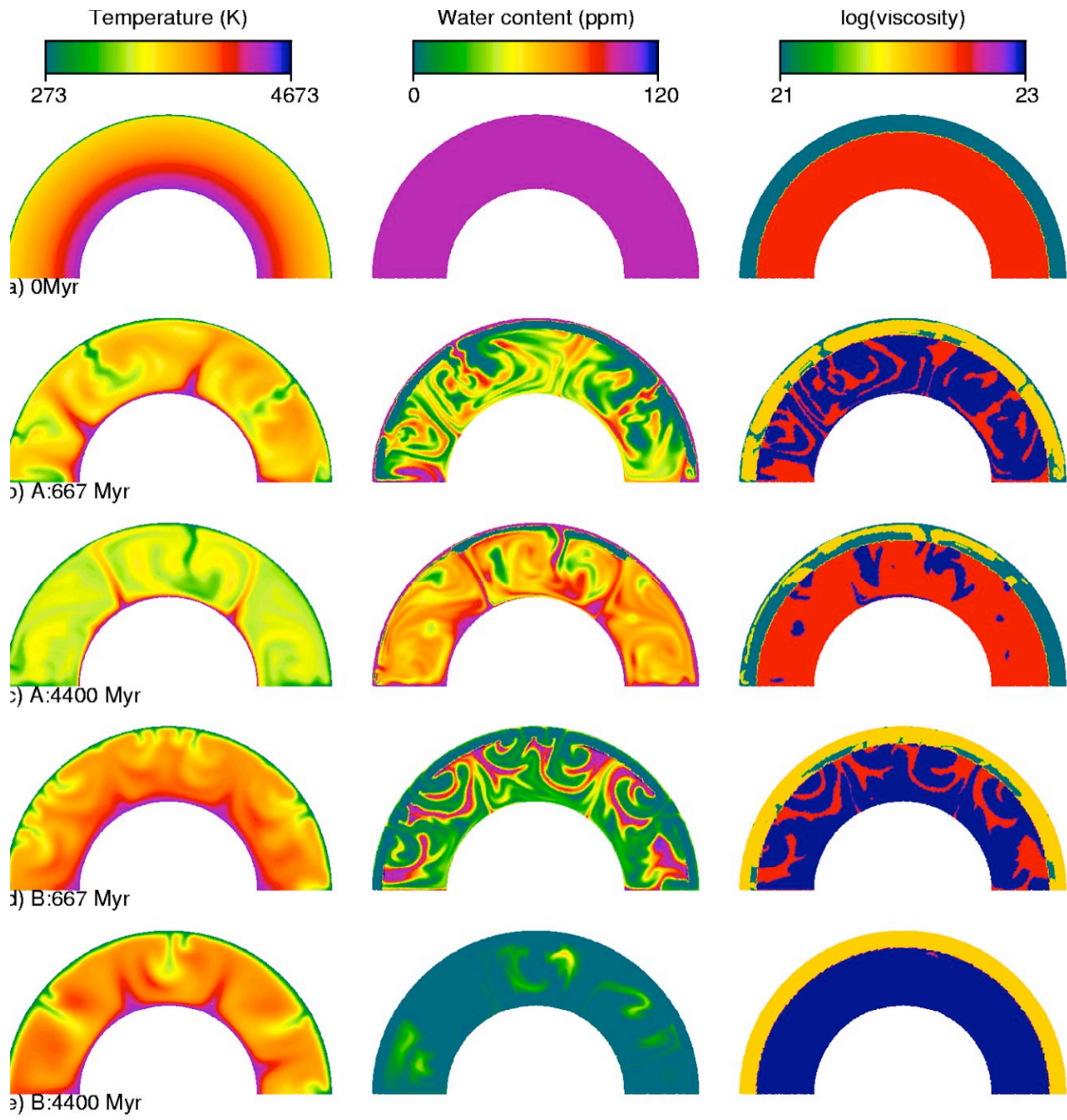
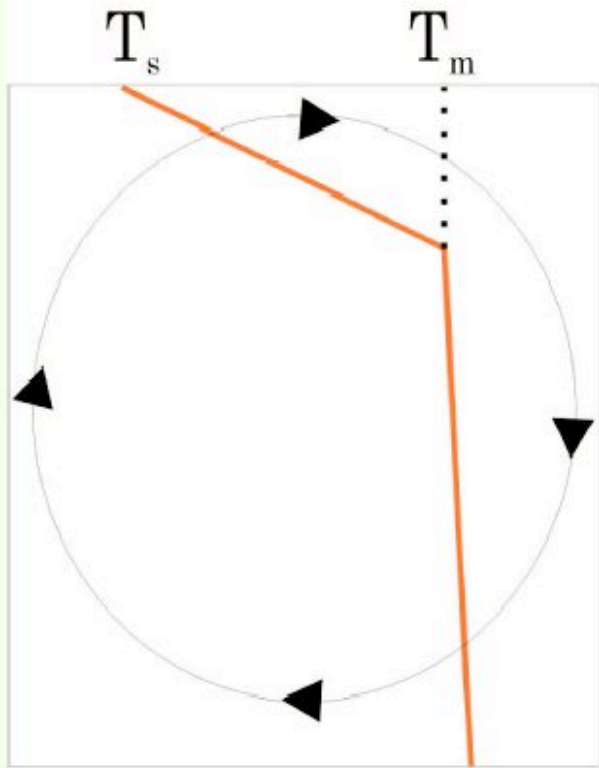
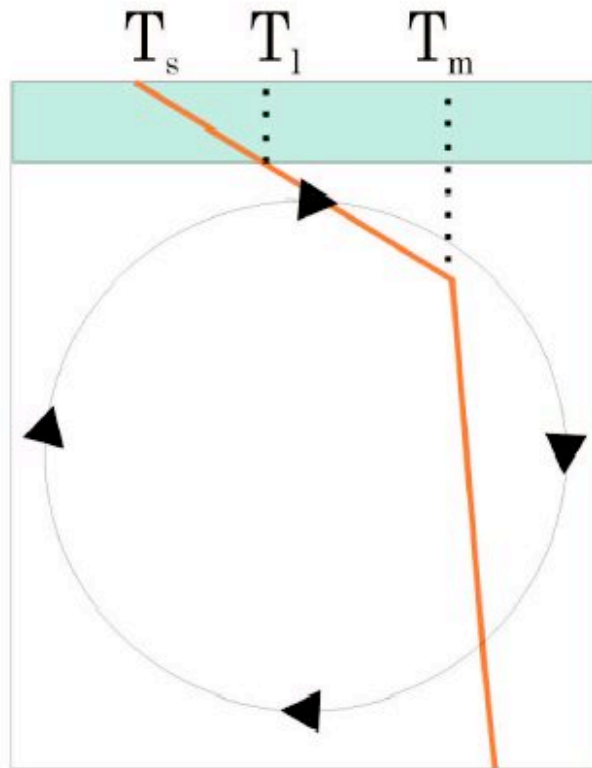


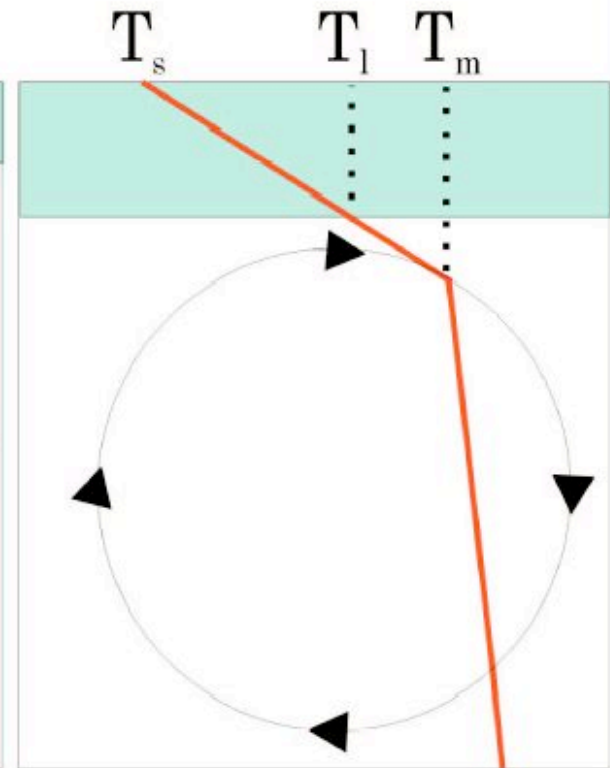
Plate Tectonics



Lithosphere delamination

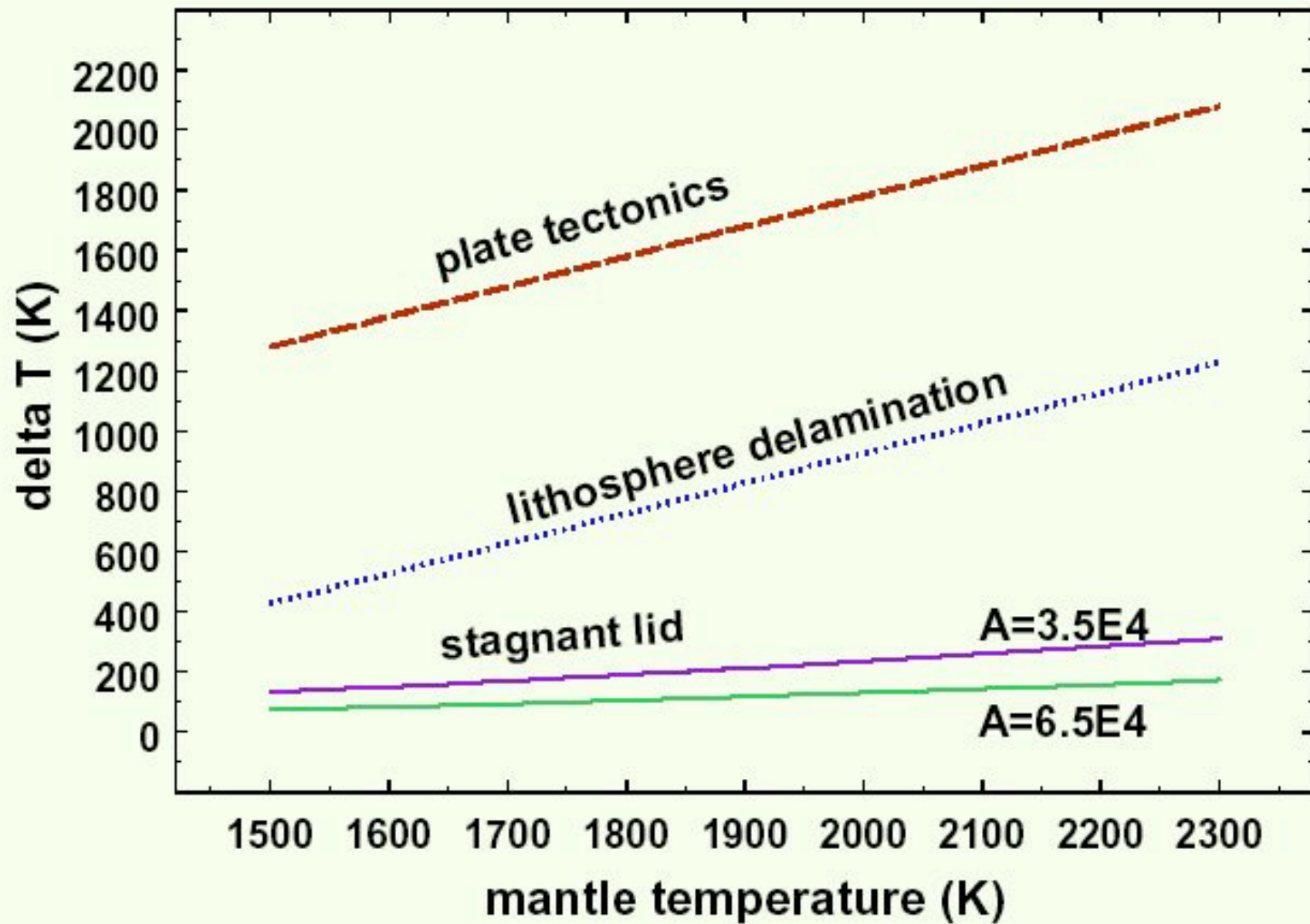


Stagnant Lid

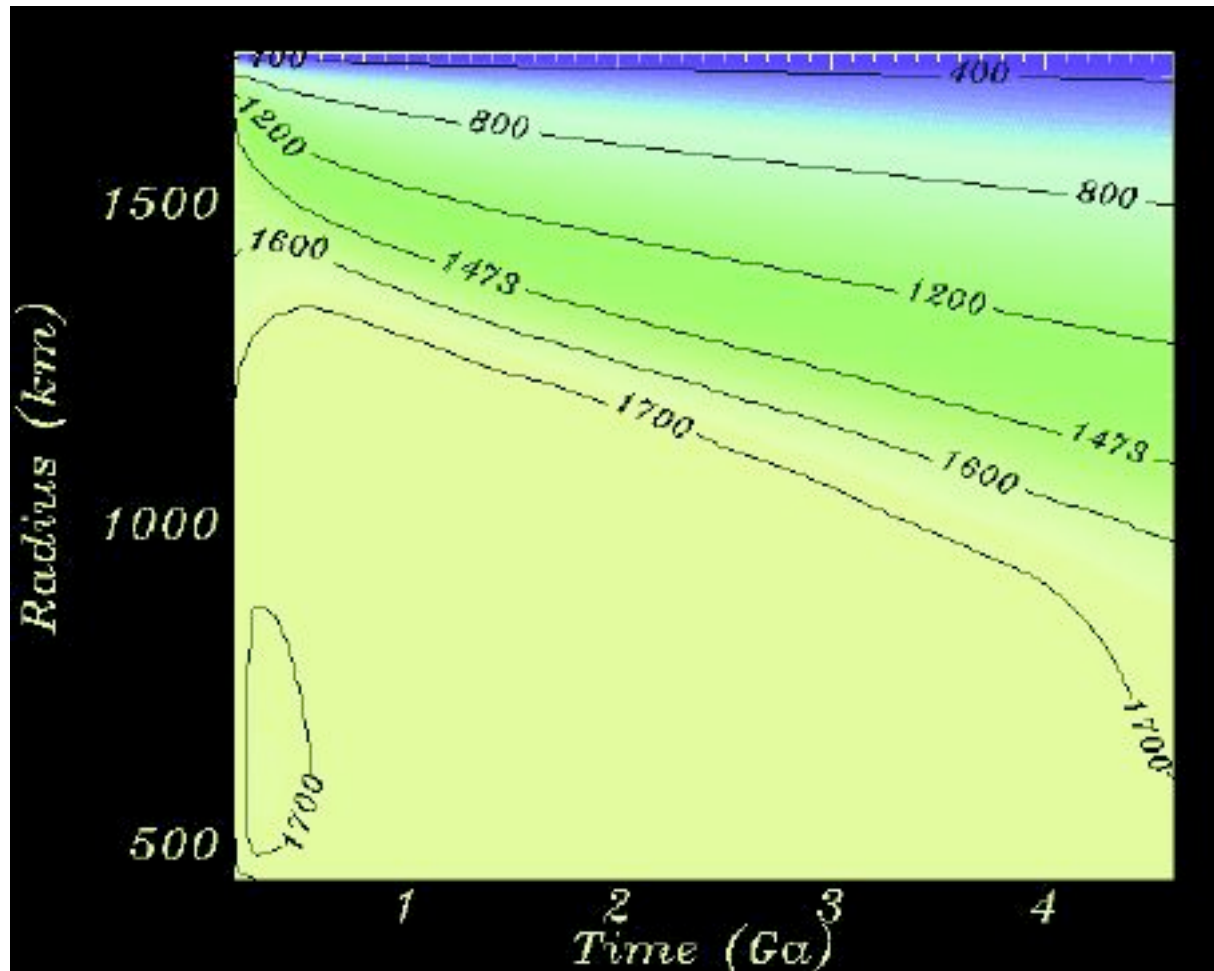


$$T_l = 1073 \text{ K}$$

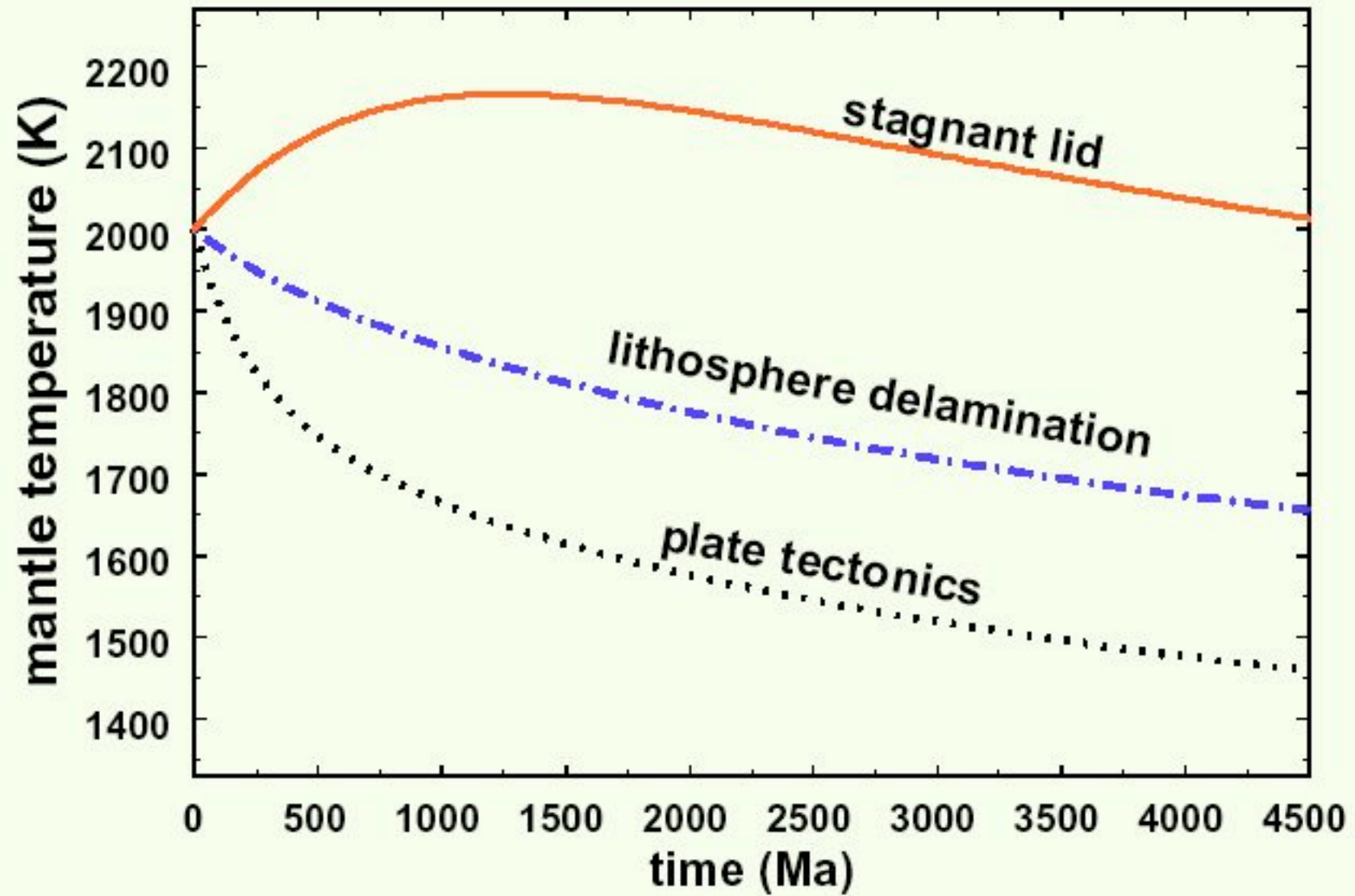
$$T_l = T_m - 2.21 \mu / d\mu/dT$$



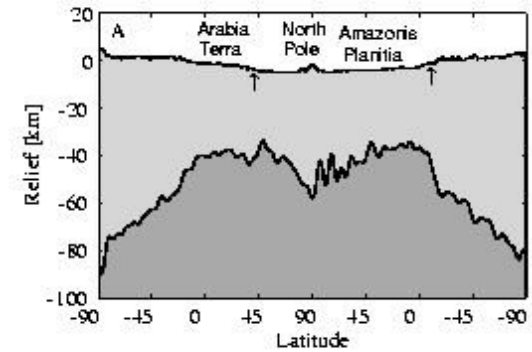
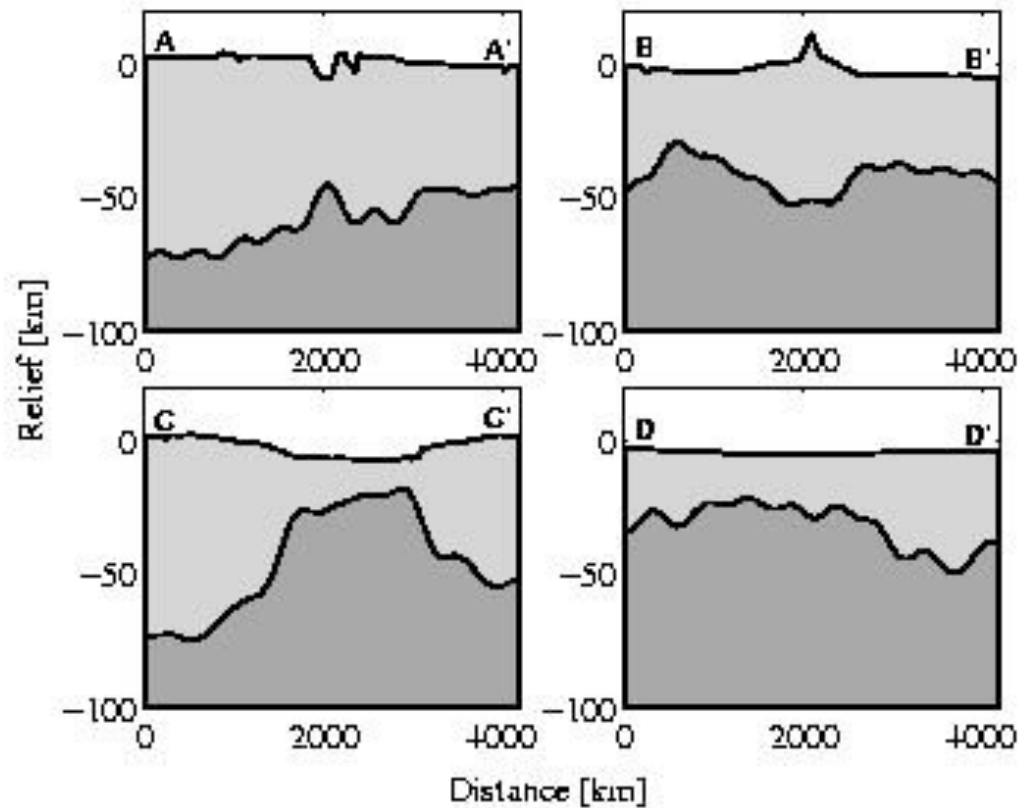
Evolution de la Lune



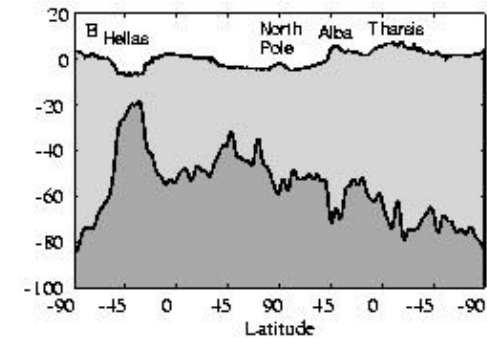
Breuer und Spohn, 2003



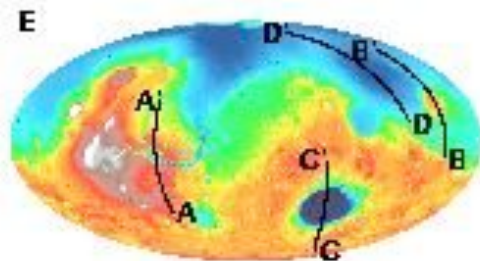
Dichotomie Nord sud et détails



0° à 180°E



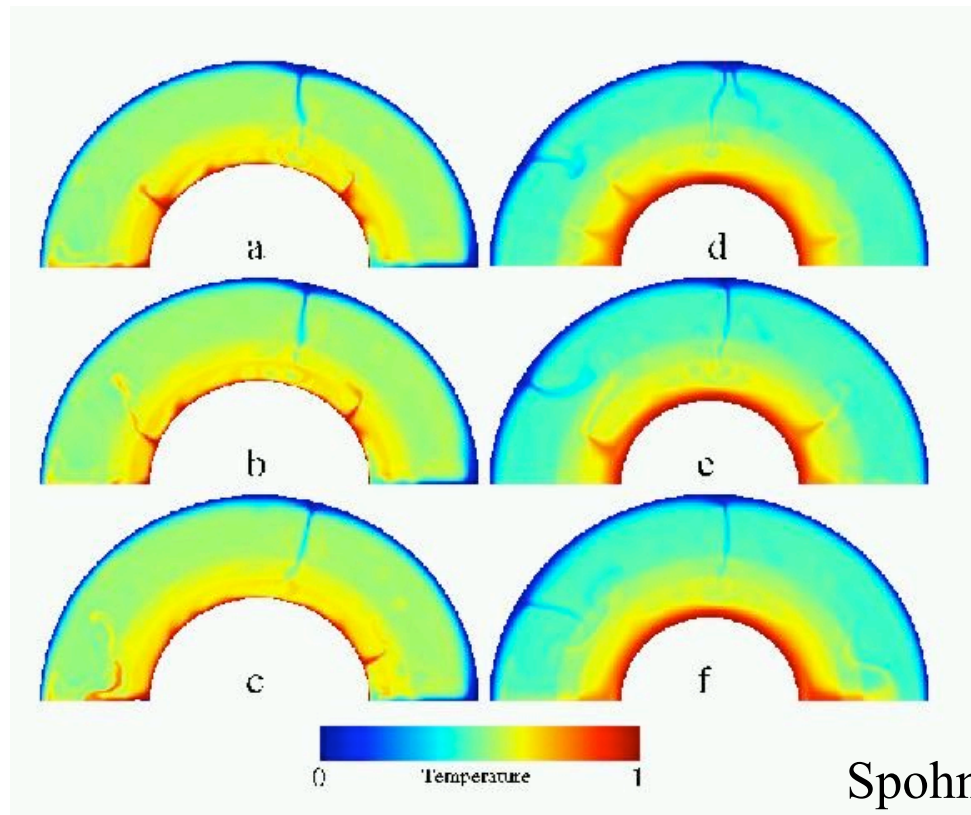
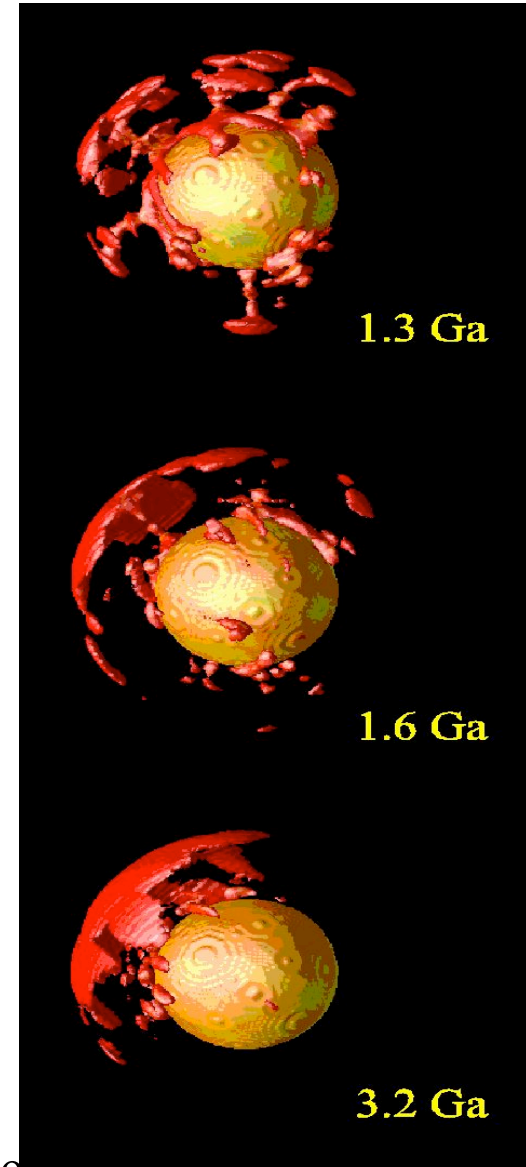
70° à 250°E



Zuber et al., 2000

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

Champ magnétique

En orbite depuis le 11 septembre 1997

JPL

Mars Global Surveyor Project MGS Spacecraft In Mapping Configuration

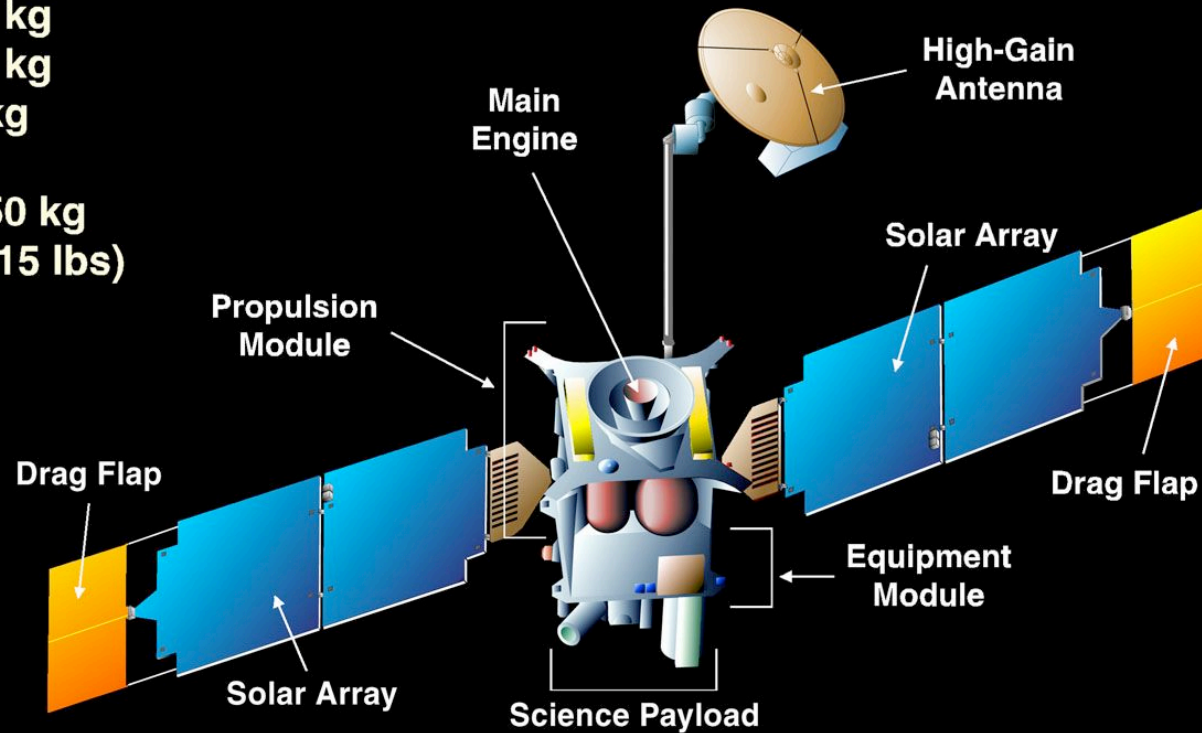


Structure Mass: 595 kg
Propellant Mass: 380 kg
Payload Mass: 75 kg

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

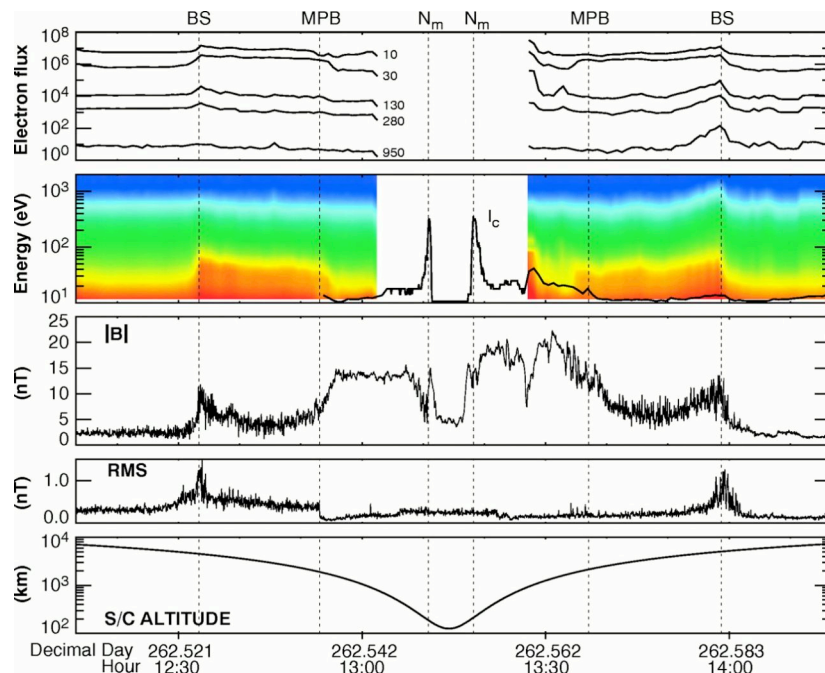
Science Payload:

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

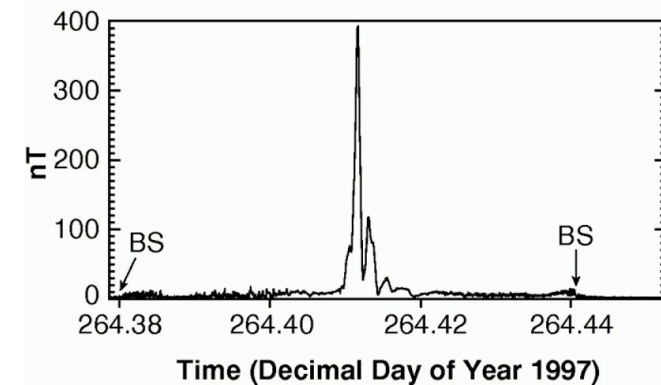
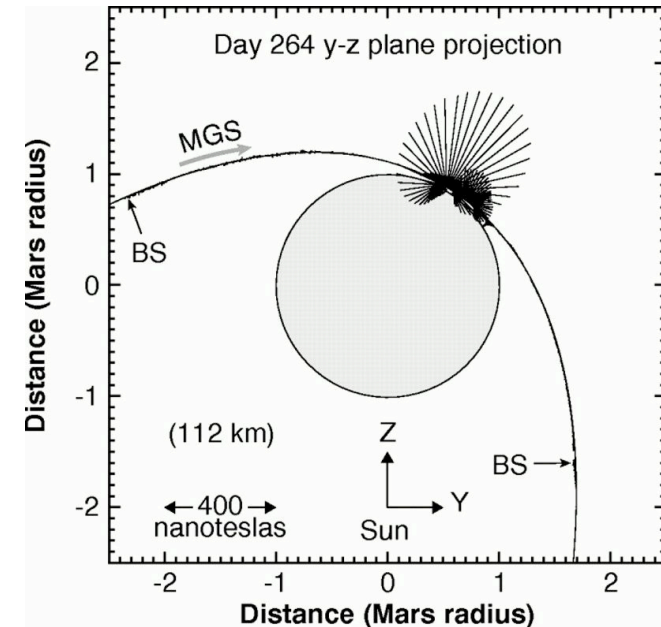


MGS-Magnétomètre-réfectomètre à électrons

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

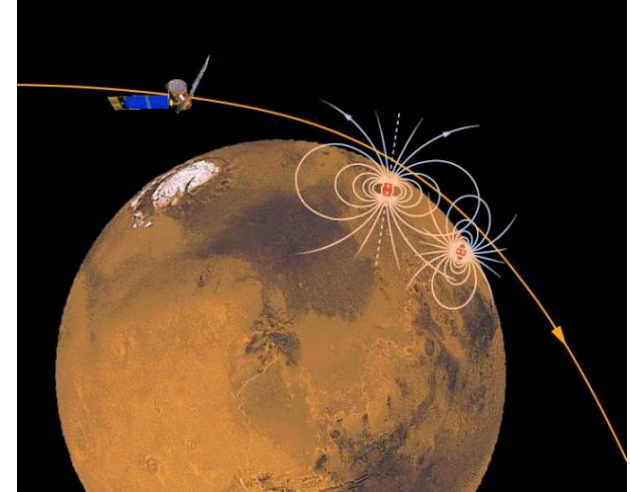
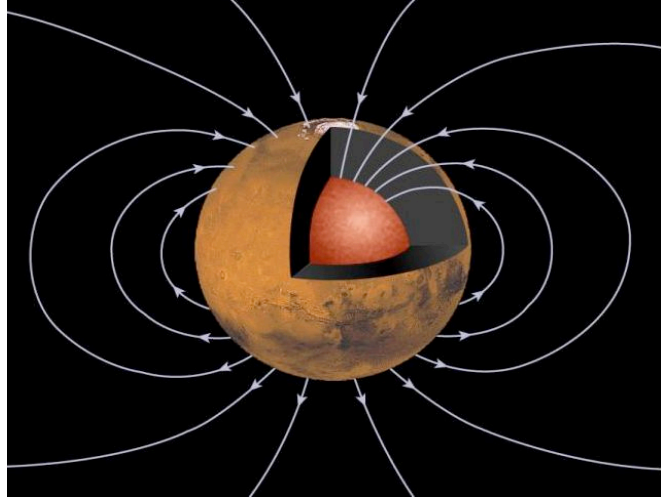


Mesure avec anomalie

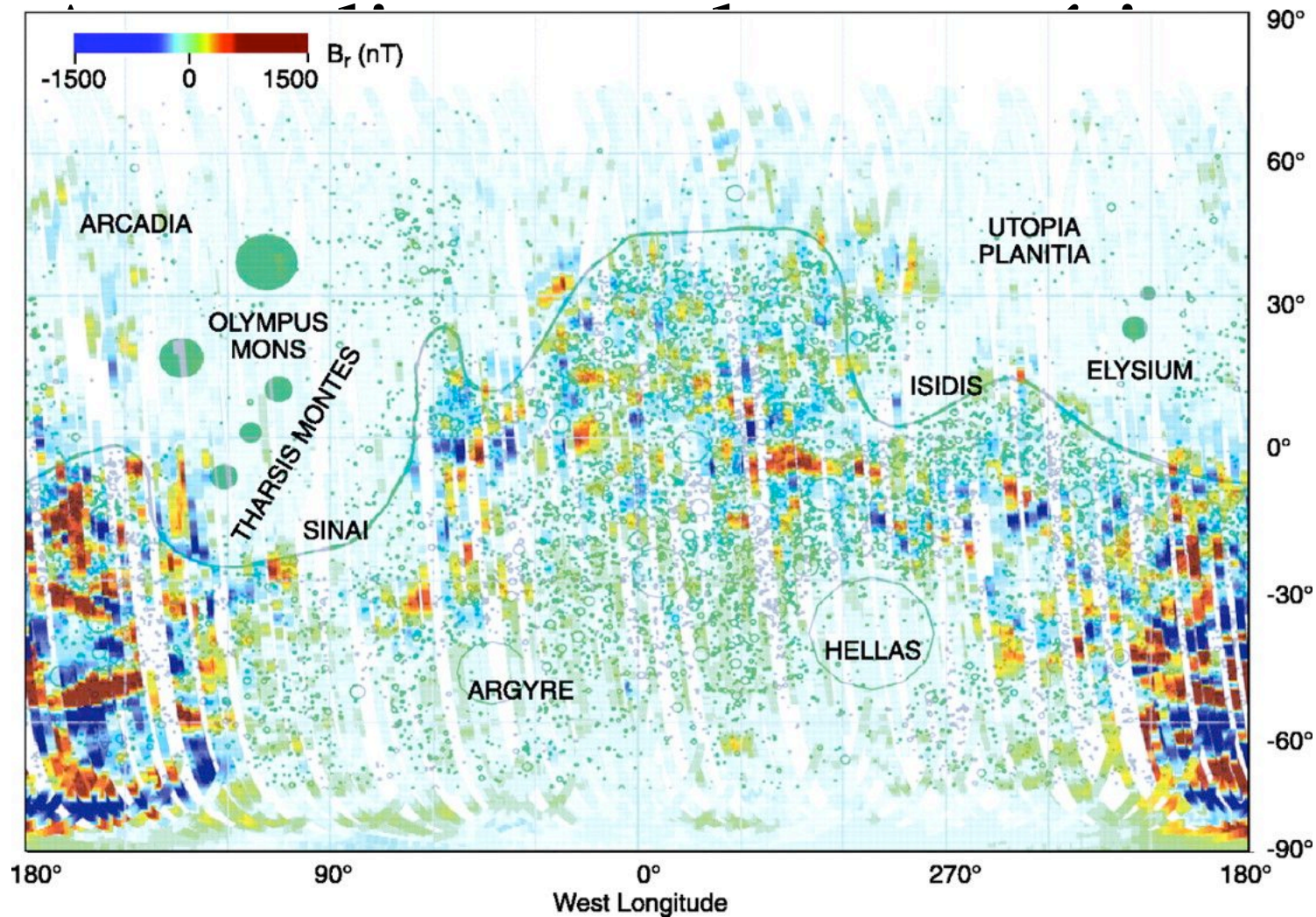


Mesure sans anomalie

Interprétation...

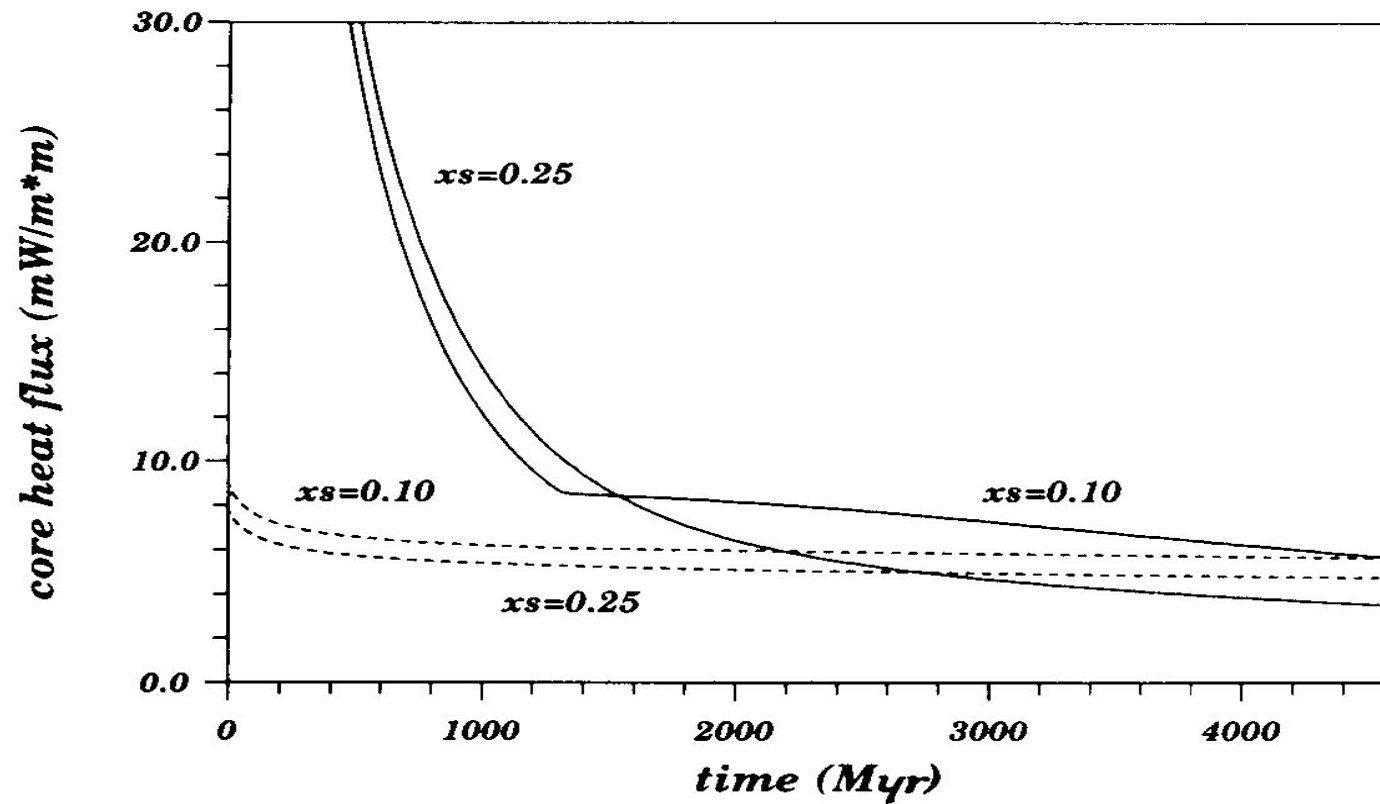


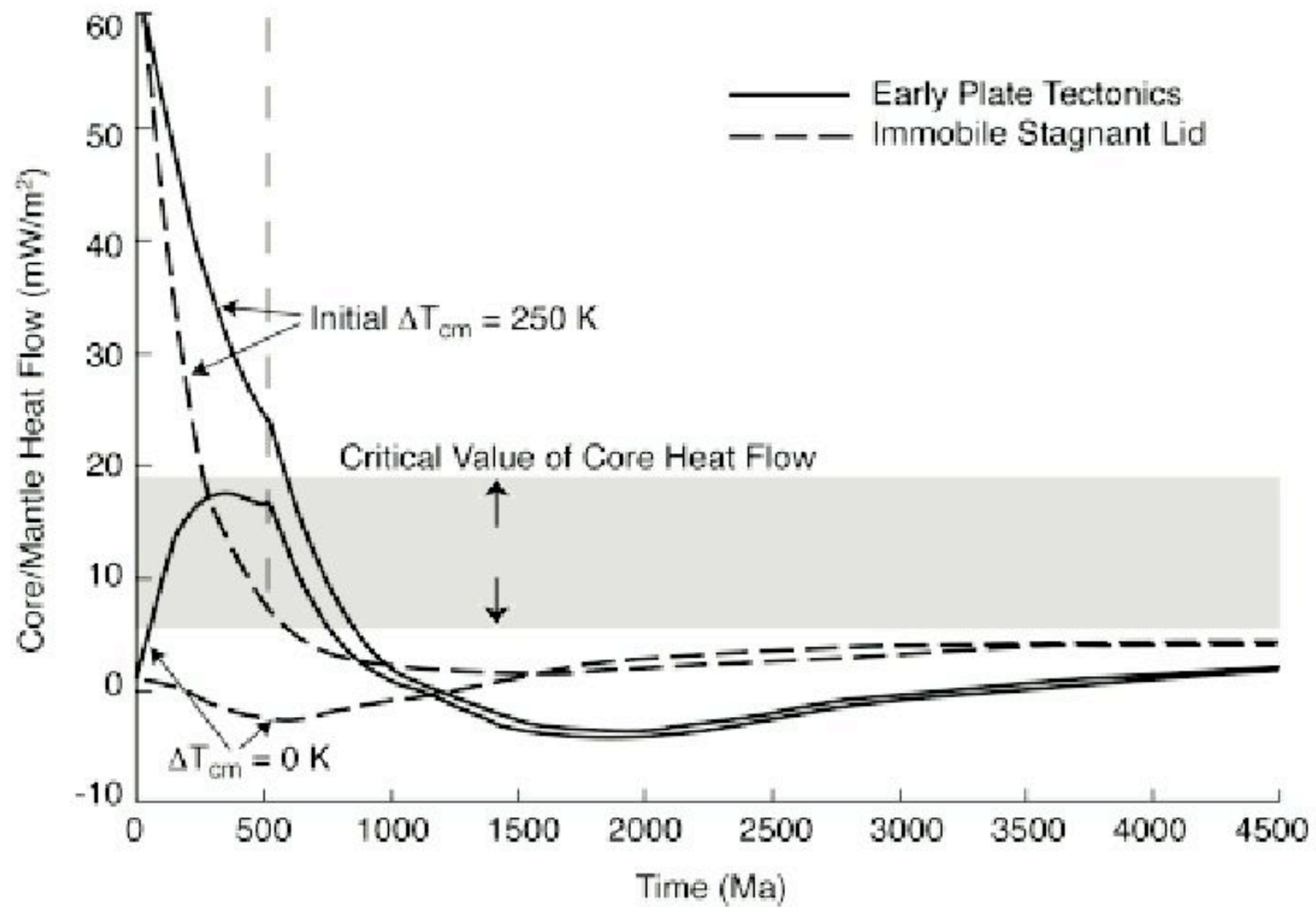
- Pendant 500 à 1000 millions d 'années.. Dynamo active
- Lors de la phase d 'activité: acquisition rémanente de magnétisme lors du refroidissement de laves
- La croûte a gardé cette aimantation, détectée par la sonde



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

Mécanisme de convection

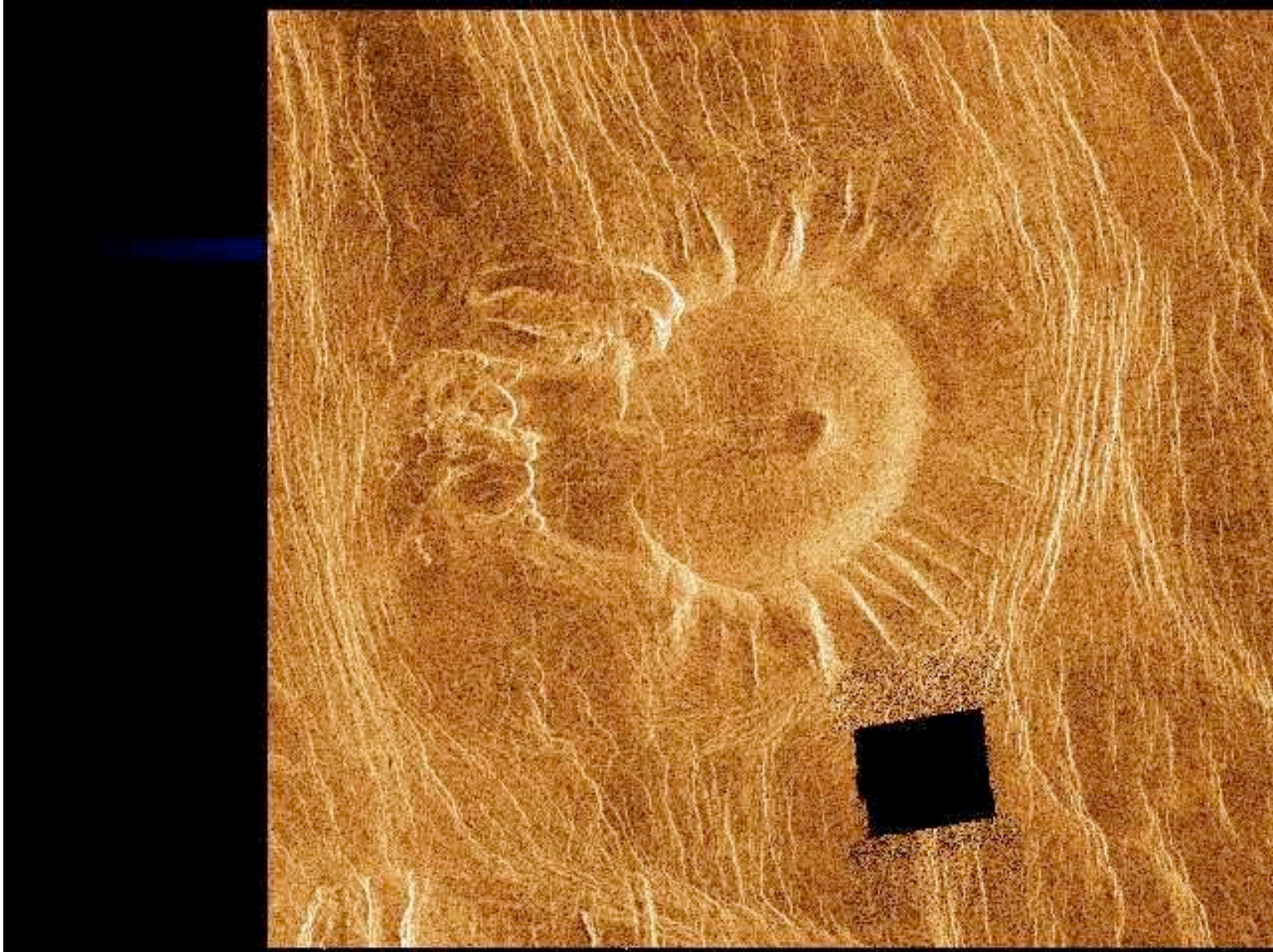


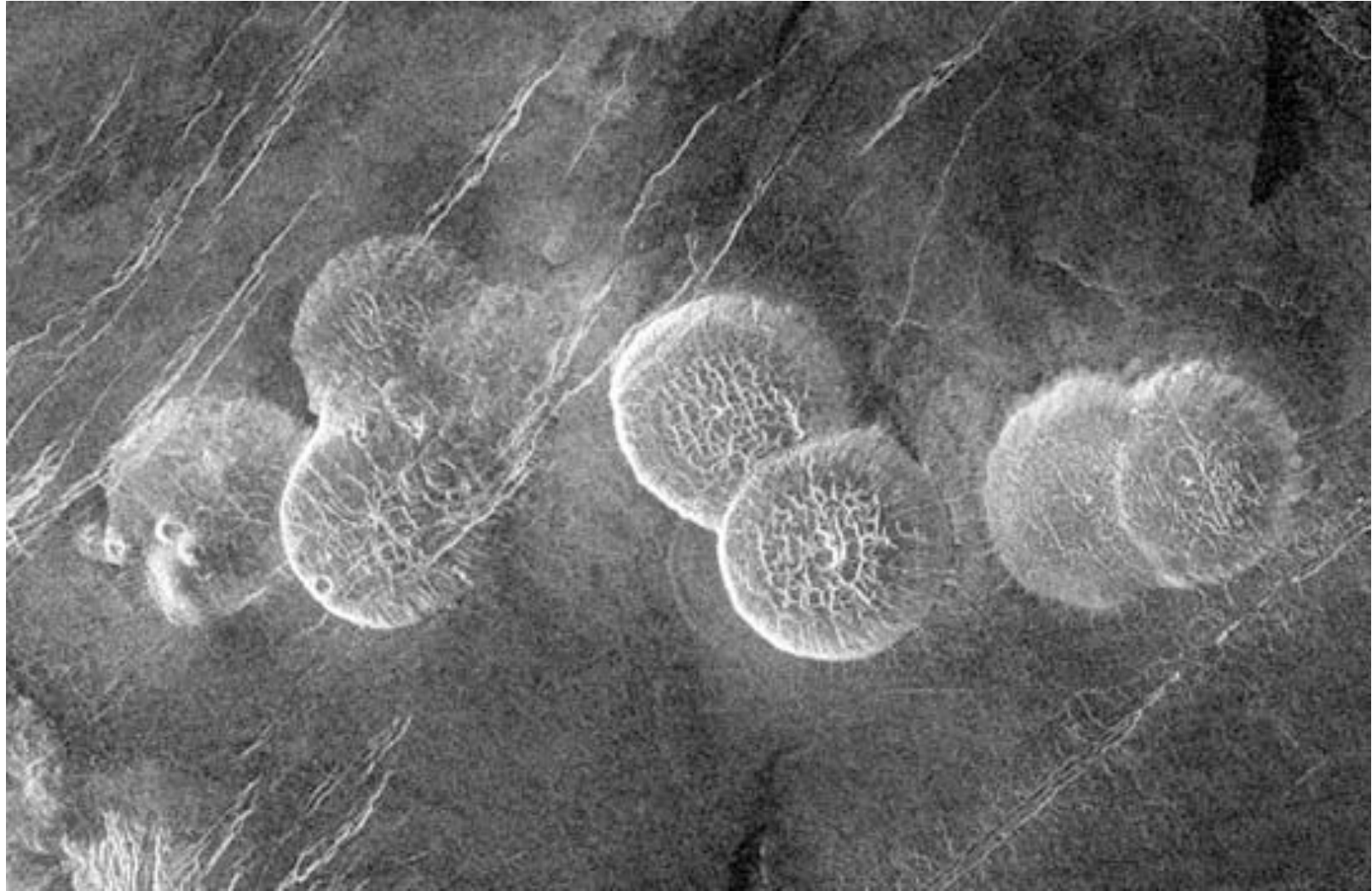


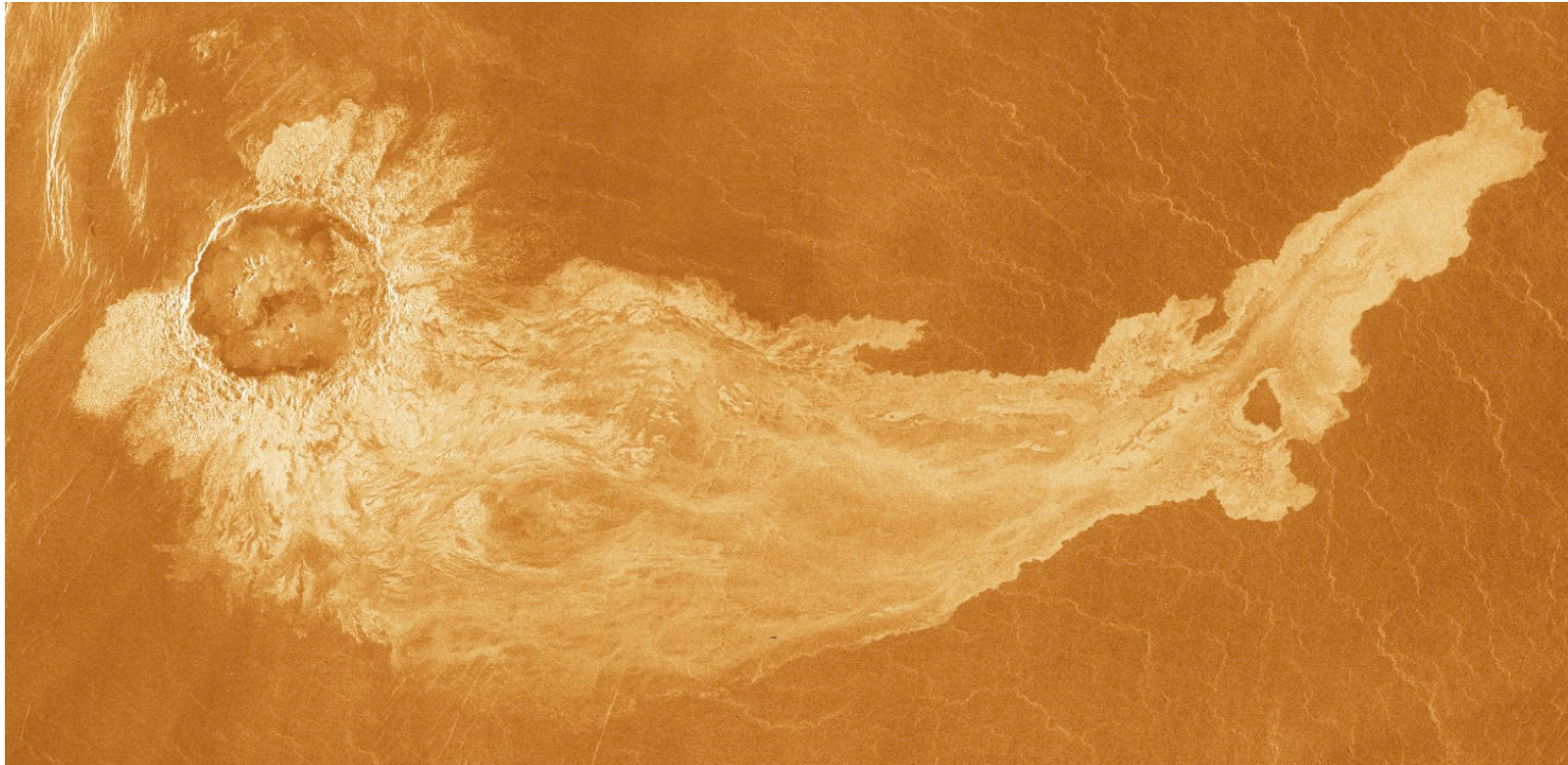
Evolution thermique de Venus

- 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