

M2 SVT 2010-2011

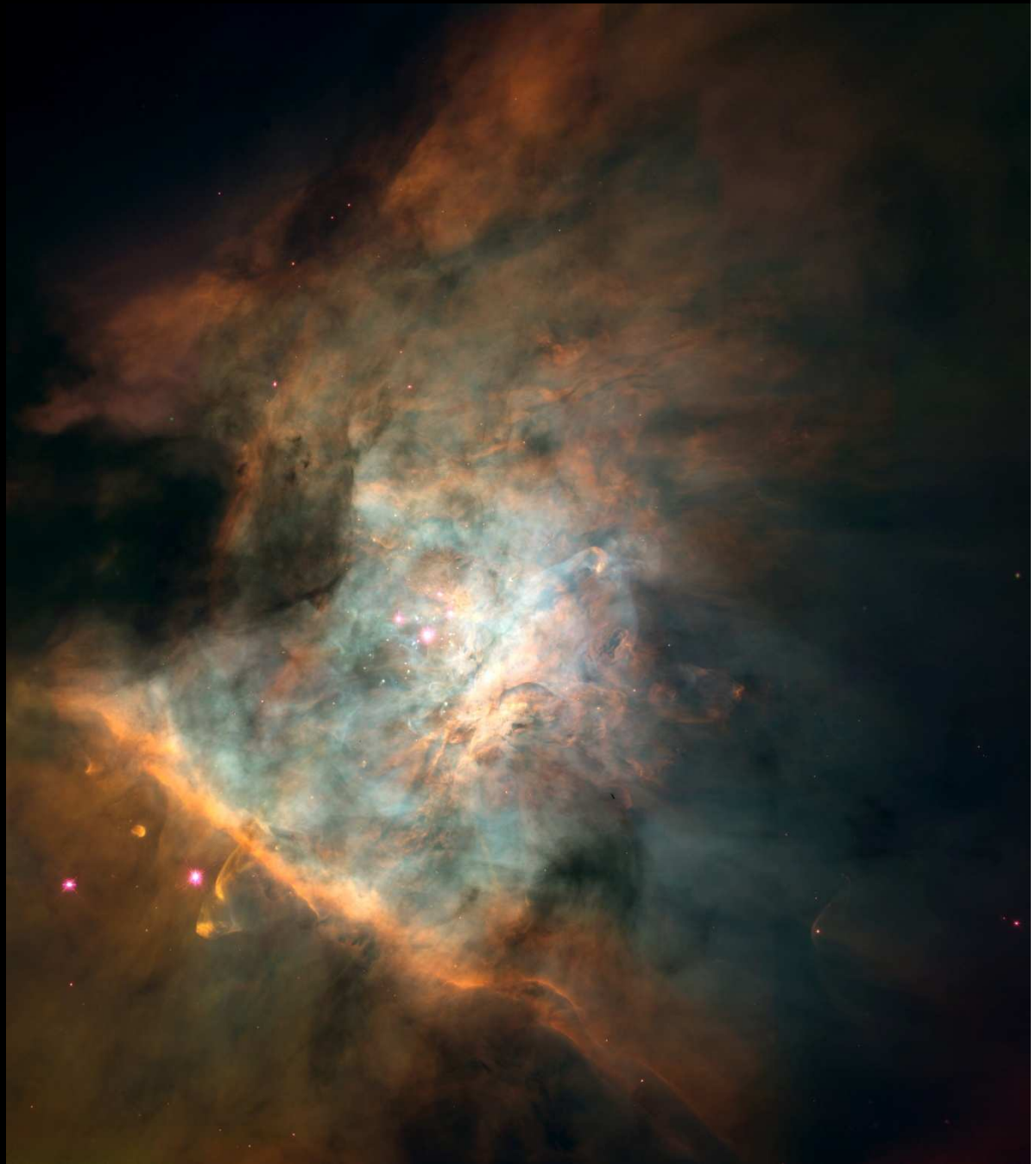
# Le Système Solaire



pierre.beck@obs.ujf-grenoble.fr  
Laboratoire de Planétologie de Grenoble

**Première partie:**

**Du gaz à la  
proto-planète**



# Le milieu interstellaire



Dans notre galaxie, 80 % de la masse est celle des étoiles, 20 % l'ISM (interstellar medium)

Deux type de régions:

HI (Hydrogène ionisé), 10000 K,  $< 1$  particules/cm<sup>3</sup>

HII (hydrogène atomique et moléculaire) 10 K,  $\sim 100$  particules/cm<sup>3</sup>

Les « nuages » sont des zones froides (HI) ou des poussières sont présentes

# Où se forment les étoiles?



**Elles se forment dans les nuages froids.**

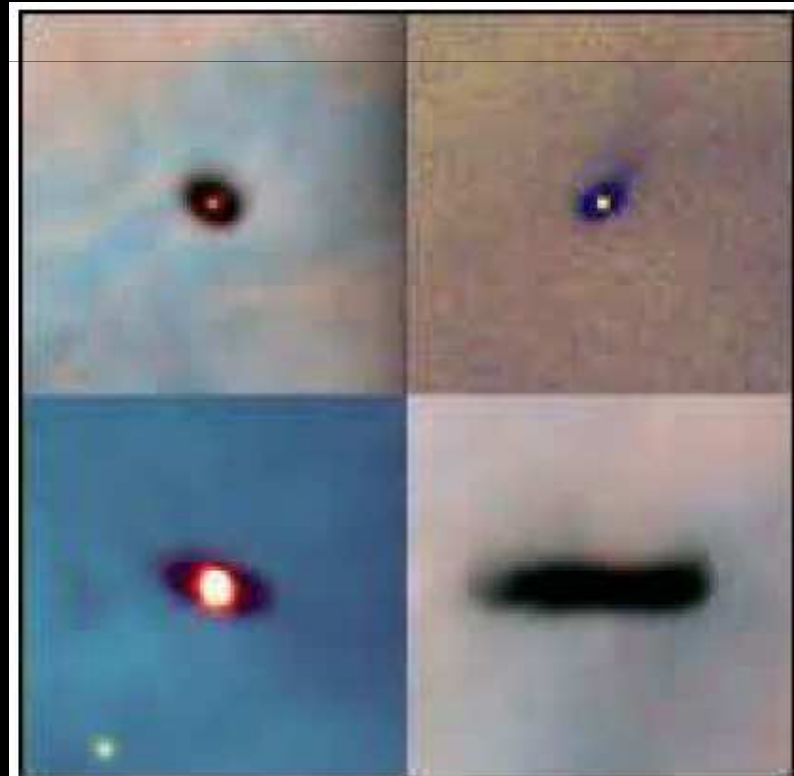
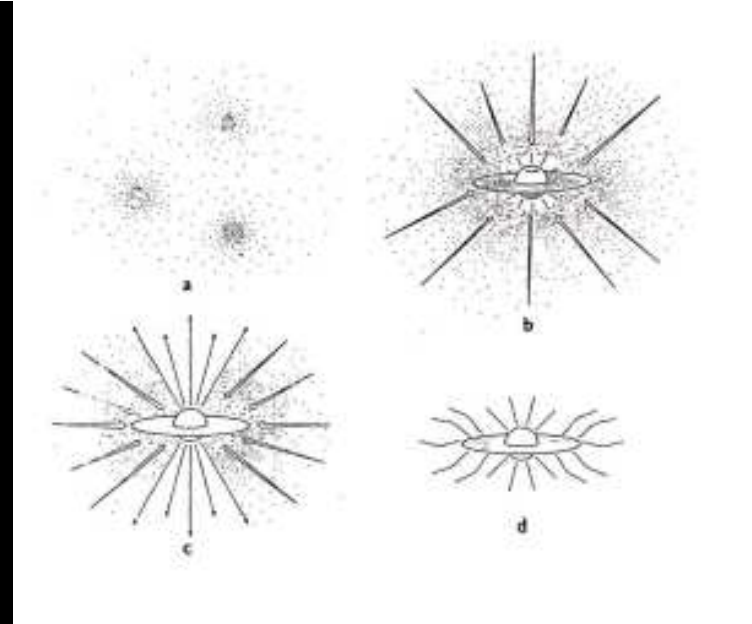
**Régions de formation appelées nébuleuse protostellaires**

# Le disque d'accrétion

La contraction est d'un facteur  $10^6$ .

Une partie du matériel ne tombe pas sur l'étoile, mais se met en rotation. C'est le disque d'accrétion.

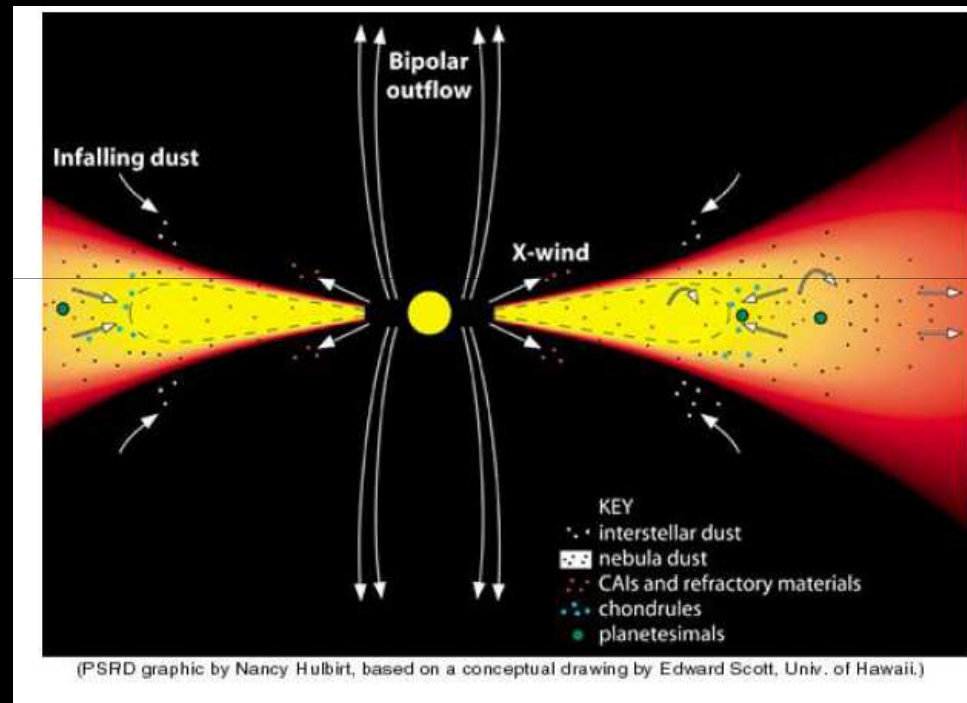
Zone de 10 à 100 a.u. pour le disque d'accrétion du SS



# Le disque d'accrétion

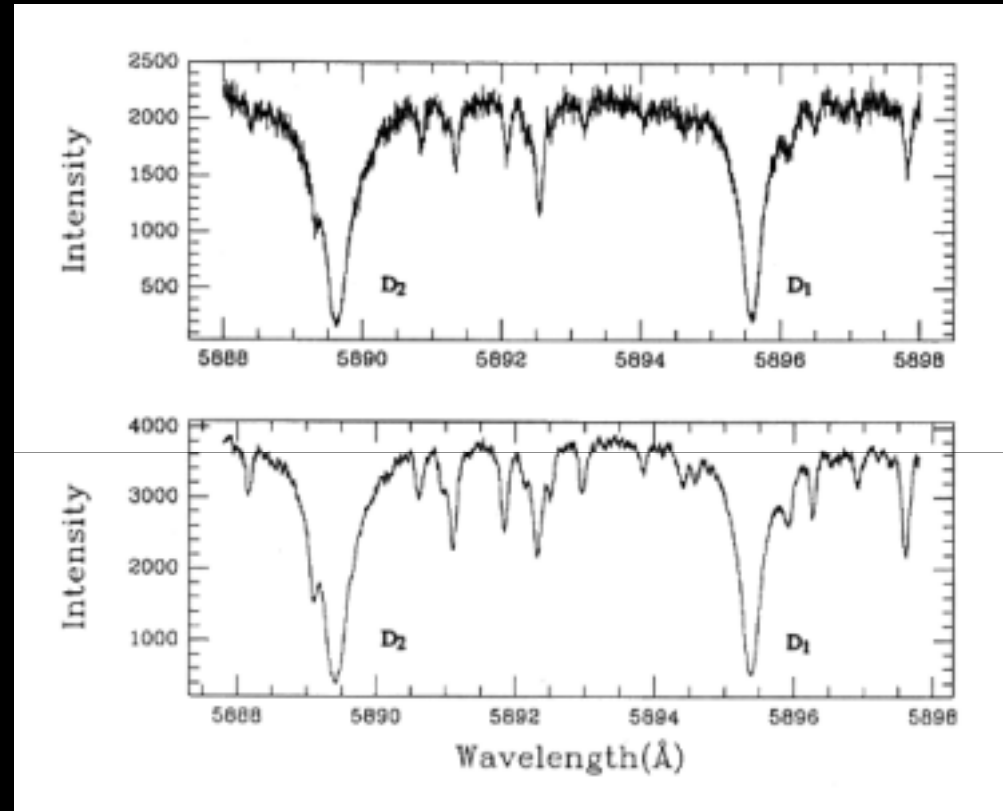
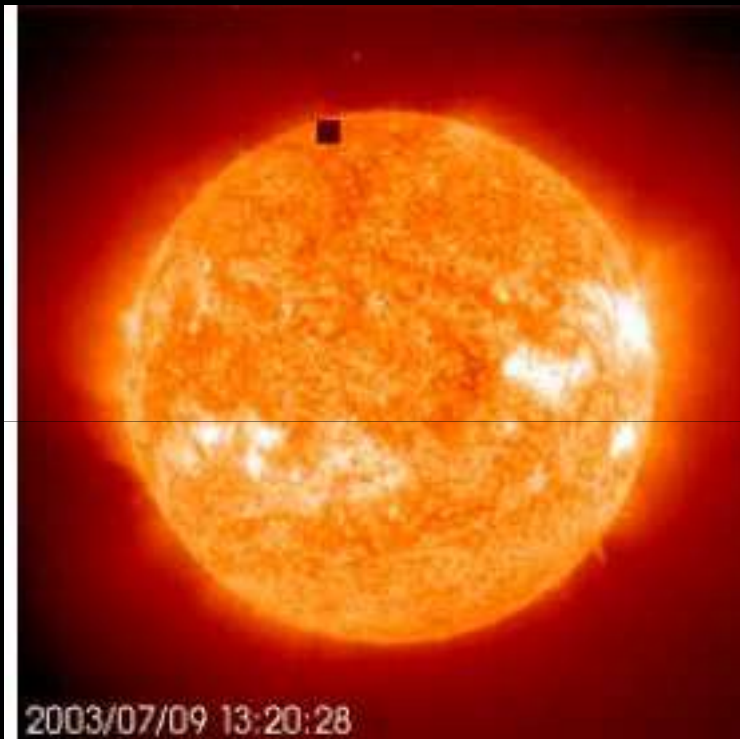
Les particules de hautes énergies sont éloignées par le champ magnétique intense.

Le flux va suivre les lignes de champ.  
Zone de très forte irradiation des particules près de l'étoile.



# **La composition chimique du Système Solaire**

# Les abondances Solaires

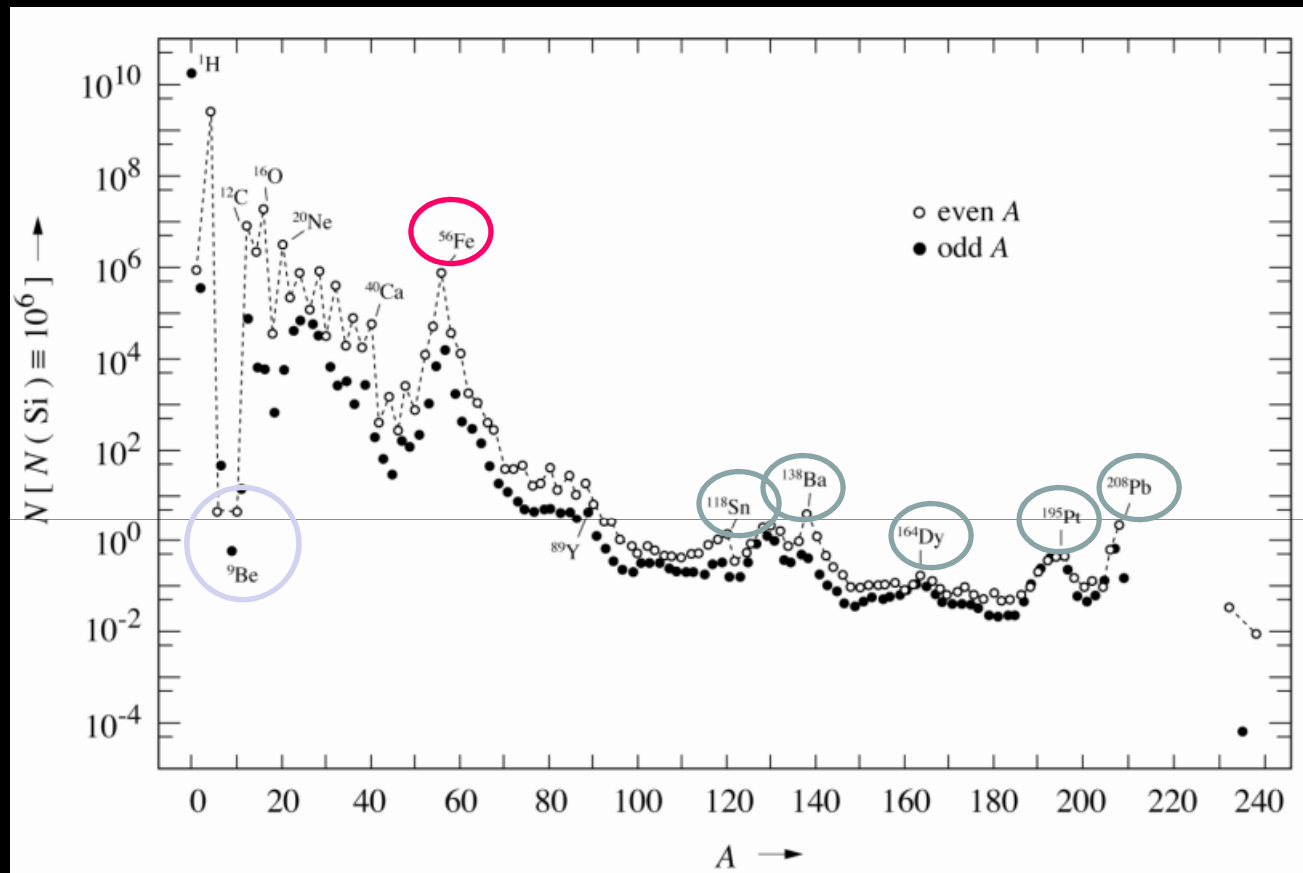


Elles sont déterminées à partir du spectre d'émission solaire.

Présence de ligne d'absorption/emission liée à des transitions électroniques



# Les abondances Solaires

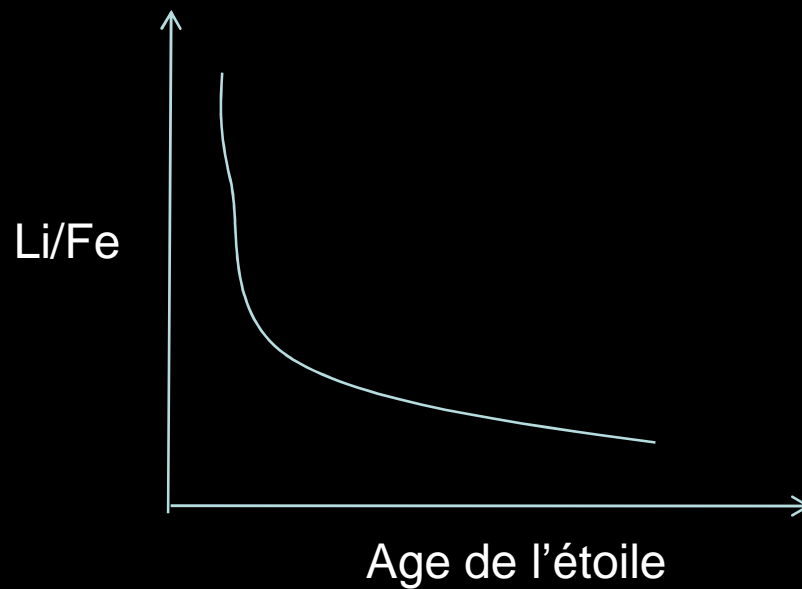


**Différence pair/impair**  
**Décroissance quand l'atome s'alourdi**  
**Pic du fer**

# La nucléosynthèse primordiale

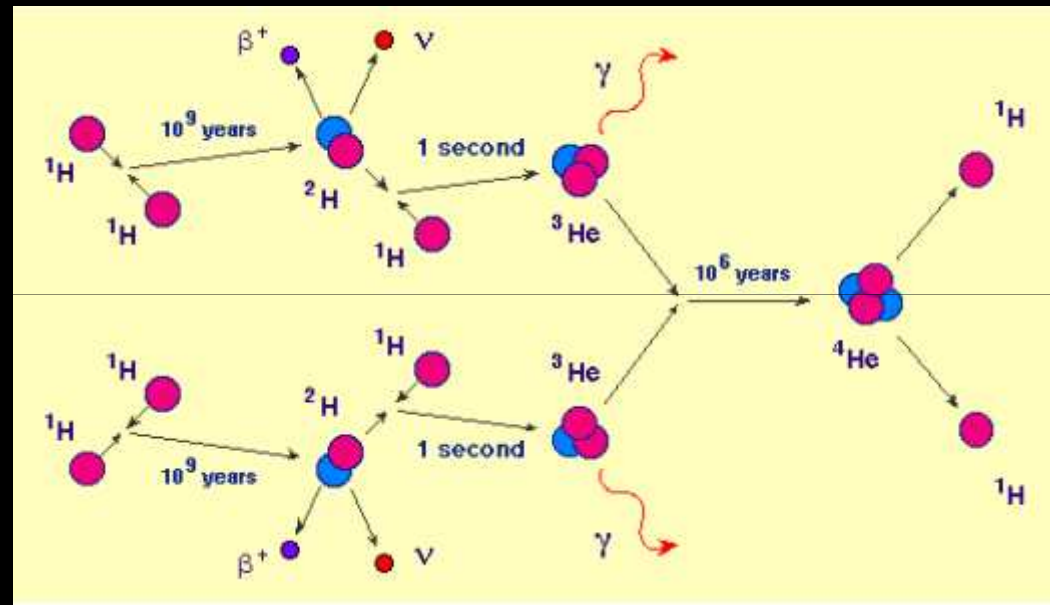
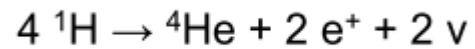
Au moment du Big Bang, on fabrique uniquement certains éléments chimiques.

éléments légers, H, D, T,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$



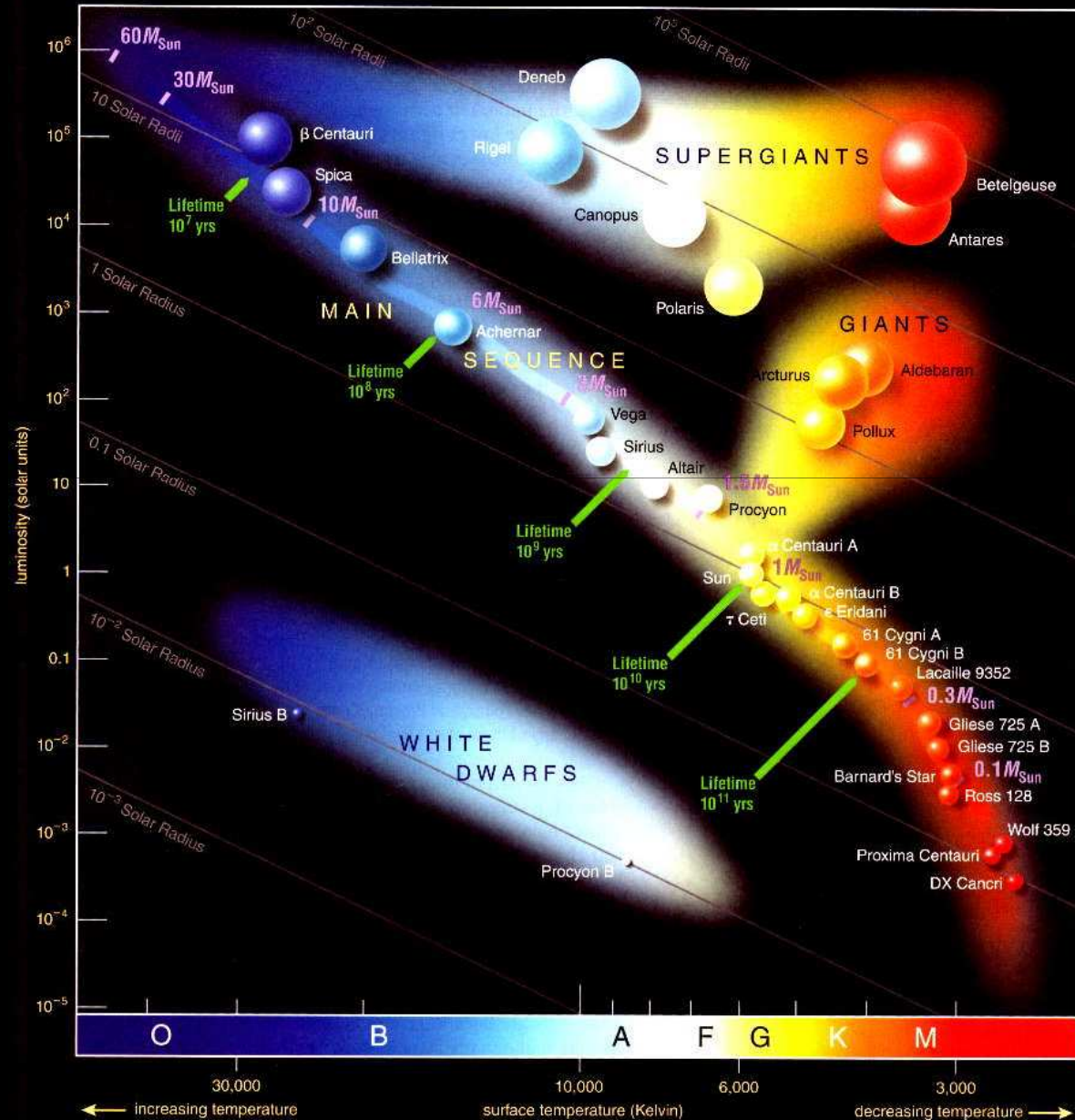
# La nucléosynthèse stellaire

## La fusion de l'hydrogène



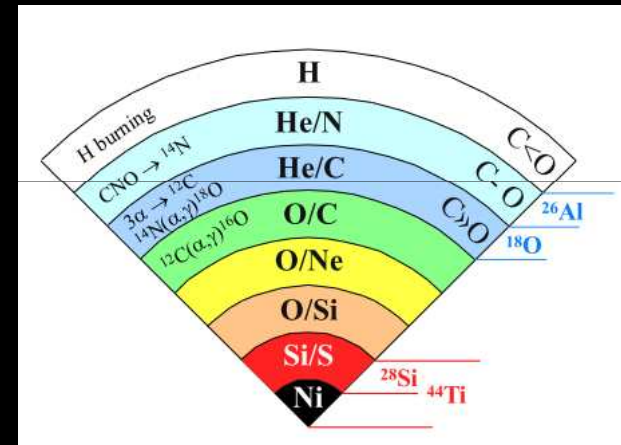
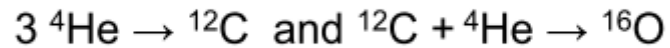
C'est la nucléosynthèse qui se produit au sein du soleil, une étoile de faible masse (et donc qui vit longtemps)

# Le diagramme H/R (Hertzprung/Russell)



# La nucléosynthèse stellaire

## Les étoiles AGB et massives



Formation d'éléments plus lourd.

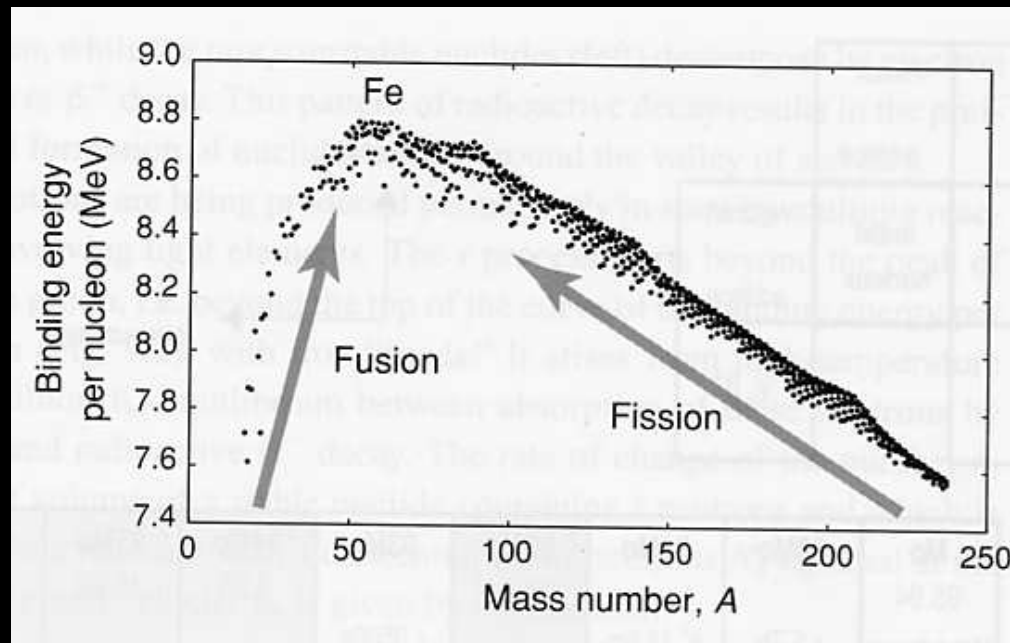
Structure en onion.

Au mieux on arrive à fabriquer jusqu'au Fer

# Le pic du fer

Réaction exothermique jusqu'au fer.

Energie de liaison du noyau



Réaction exothermique jusqu'au fer.

Il faut un apport d'énergie pour aller plus loin en masse.

# La nucléosynthèse explosive



# La nucléosynthèse explosive

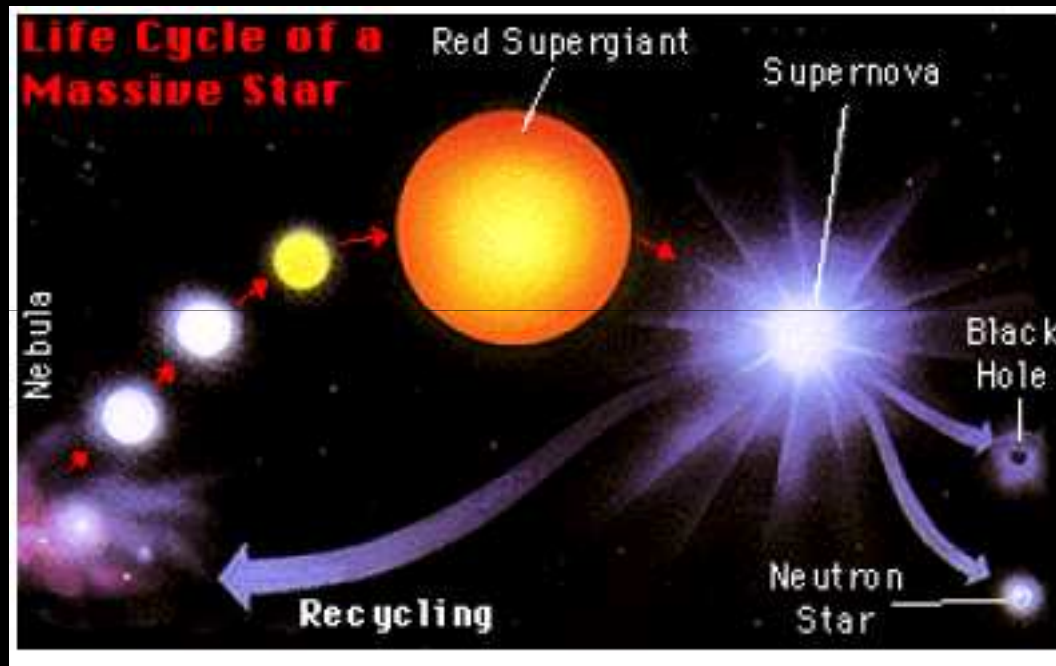
**Une étoile en fin de vie s'effondre et explose.**

**En a assez d'énergie pour fabriquer la table de Mendeleiev.**





# Le cycle de vie d'une étoile



« poussières d'étoiles »

**Chronologie:  
Radioactivités longue et  
courte**

# La radioactivité

Loi Curie-Rutherford-Soddy (CRS)

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

*Fonction du temps, indépendant de P et T*

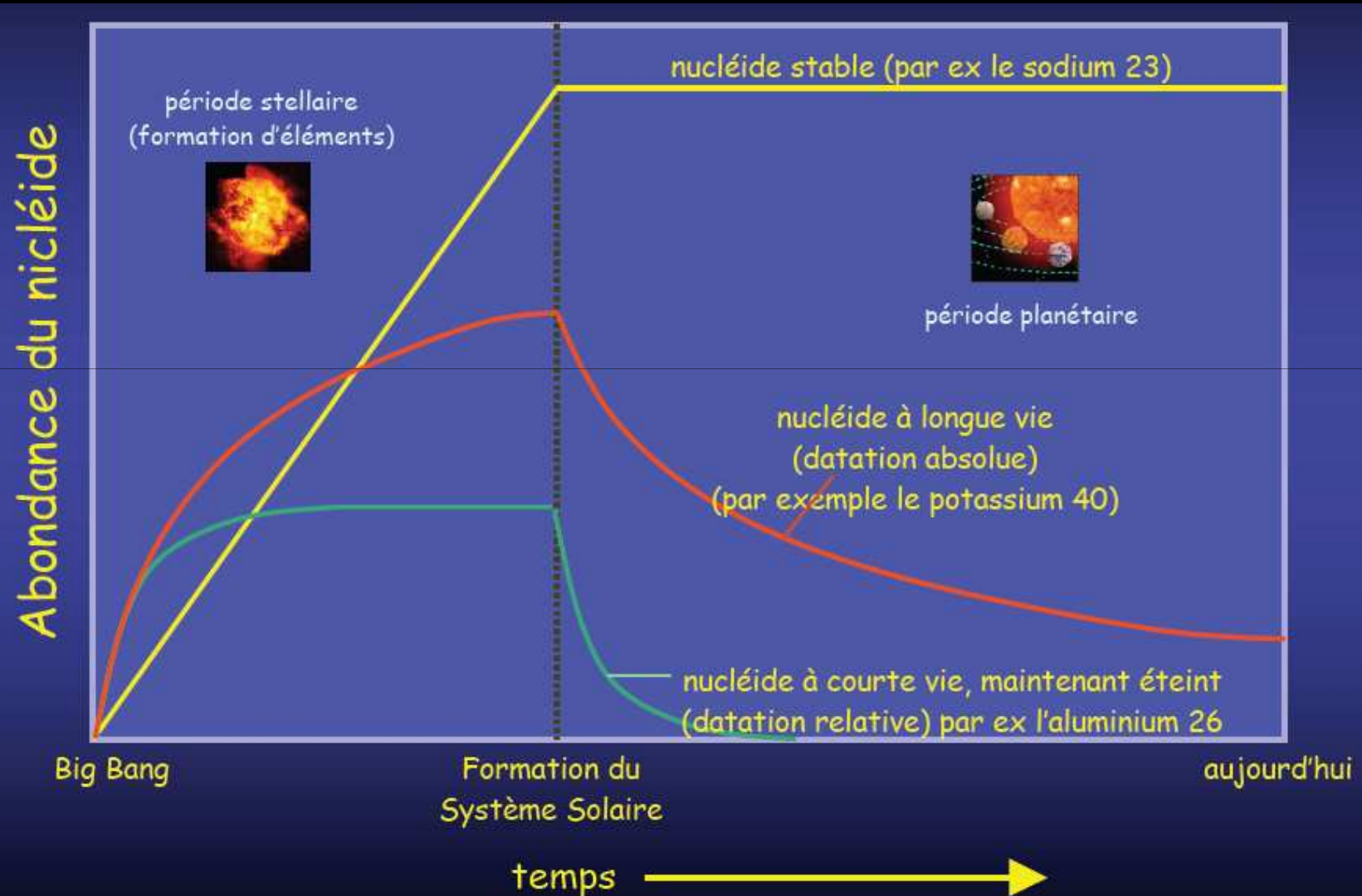
$\lambda$  ( $a^{-1}$ ) la constante de désintégration = probabilité de désintégration pendant  $dt$



$$\Leftrightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$T = \ln 2 / \lambda = 0,693 \tau$$

# Radioactivités courtes et longues

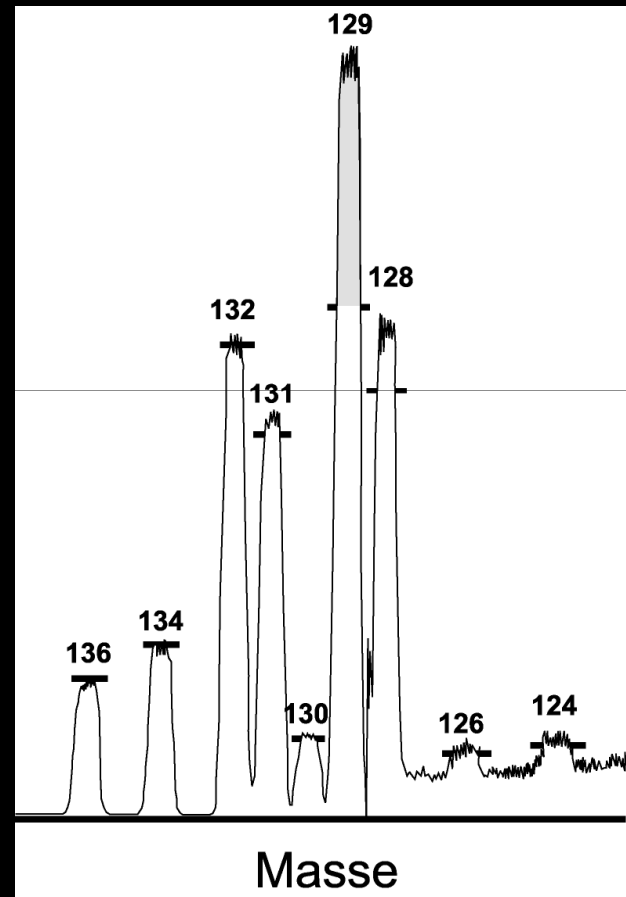


# Les radioactivités éteintes

Xe isotopes

Radioactivité éteinte: demi-vie très courte devant l'âge du SS: L'élément père est totalement désintégré.

Excès du à la désintégration de l'iode 129.

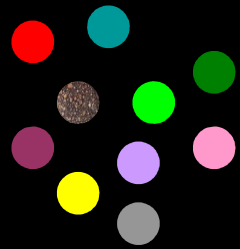


Chondrite Richardton, Reynolds 1960

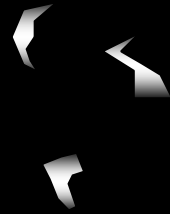
# **Les chondrites: des fossiles du Système Solaire primitif**

# Les chondrites

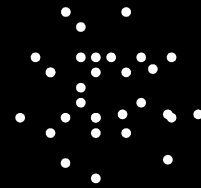
Chondres + Métal/Sulfures + Matrice + CAI



100  $\mu\text{m}$ -3 mm



50  $\mu\text{m}$ -3 mm



< 50  $\mu\text{m}$



50  $\mu\text{m}$ - 5 mm

Moyenne=600  $\mu\text{m}$   
Environnement à  
gravité réduite

=



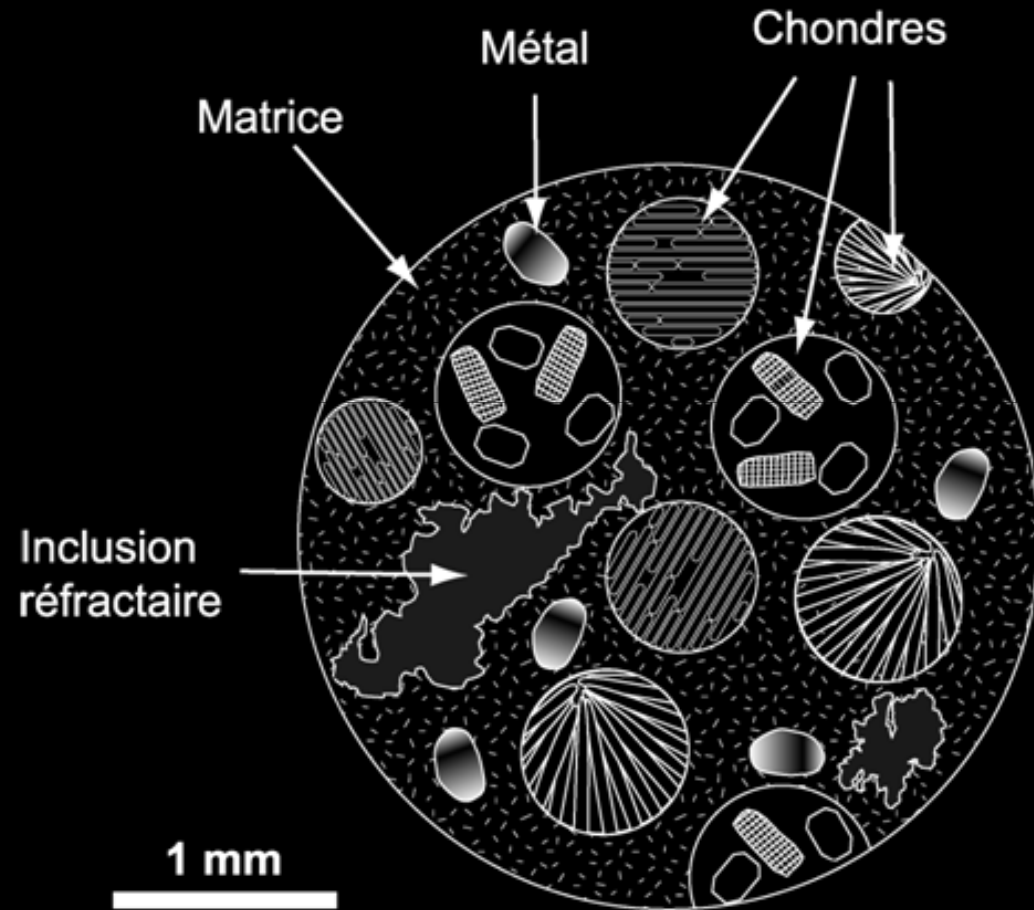
82 % des  
météorites

# Les chondrites



ALLENDE, CV3, MEXICO

Photo & Collection  
Harald Stehlik





# Les chondrites

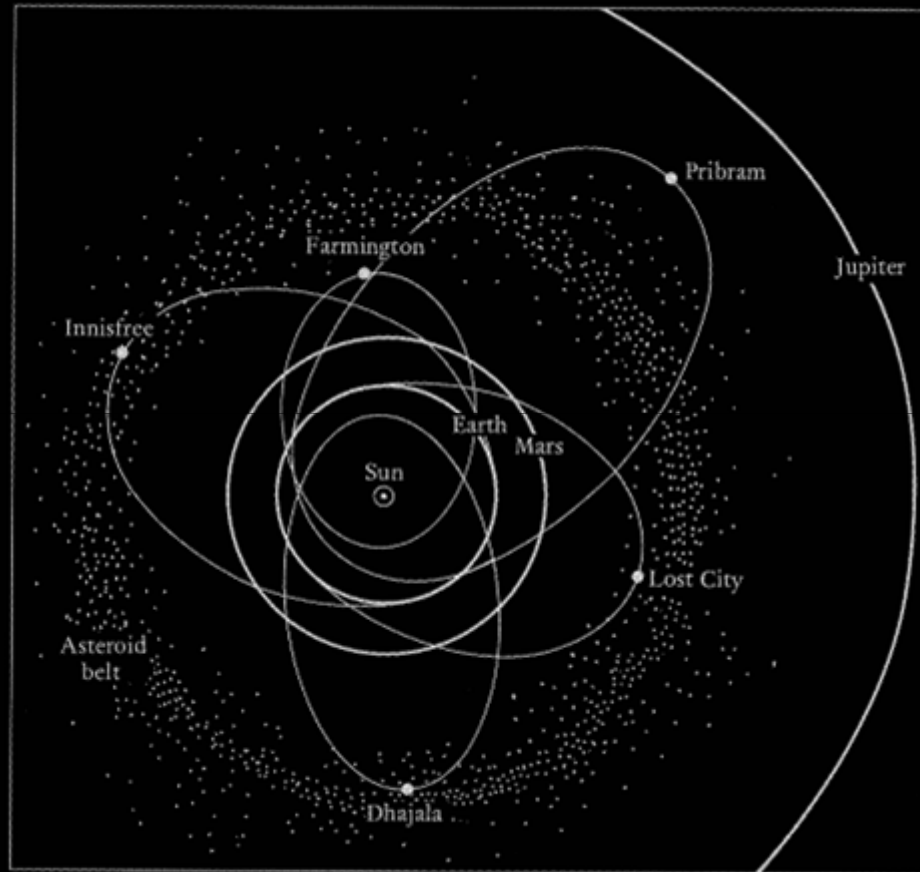
Les **chondrites** sont un peu des roches « **sédimentaires** ».

Ce sont des mélanges de **différents composés** ayant pu se former à des **endroits différents** dans le SS jeune.

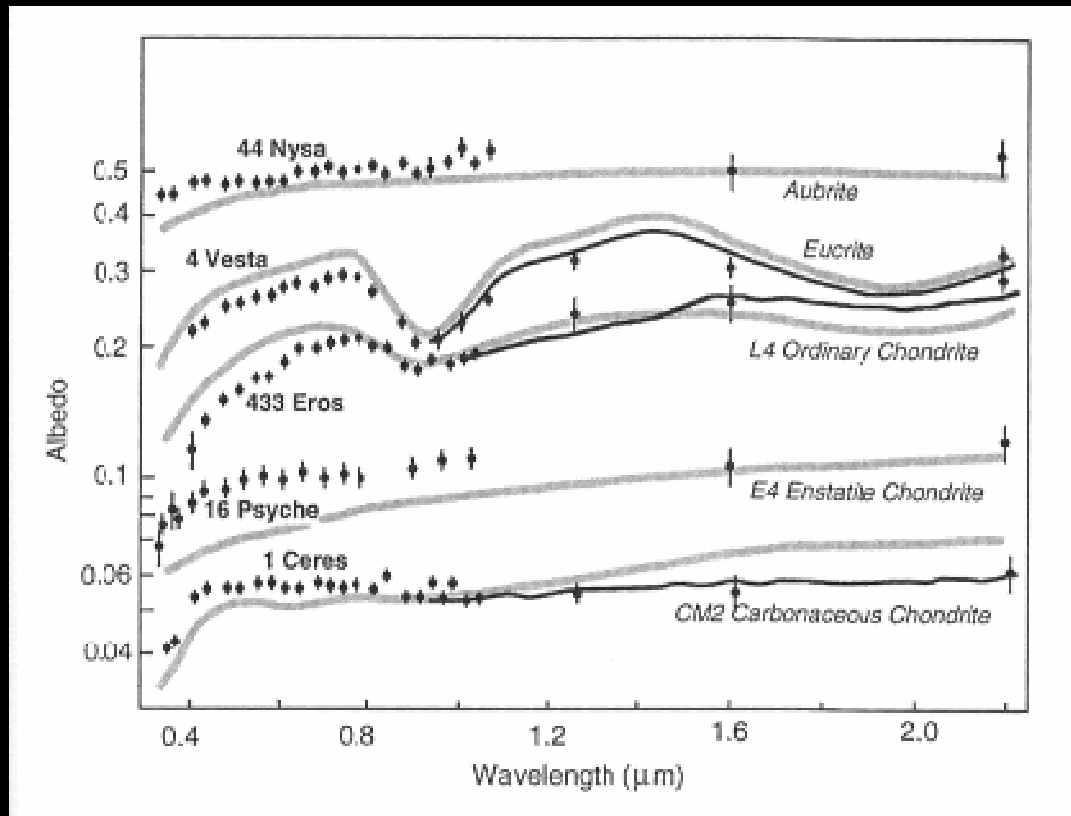
La cohésion de la roche résulte probablement d'un léger métamorphisme thermique ayant lieu sur des corps parent  $>1$  km.

**On pense que les chondrites viennent de la ceinture d'astéroïde.**

# Origine des chondrites



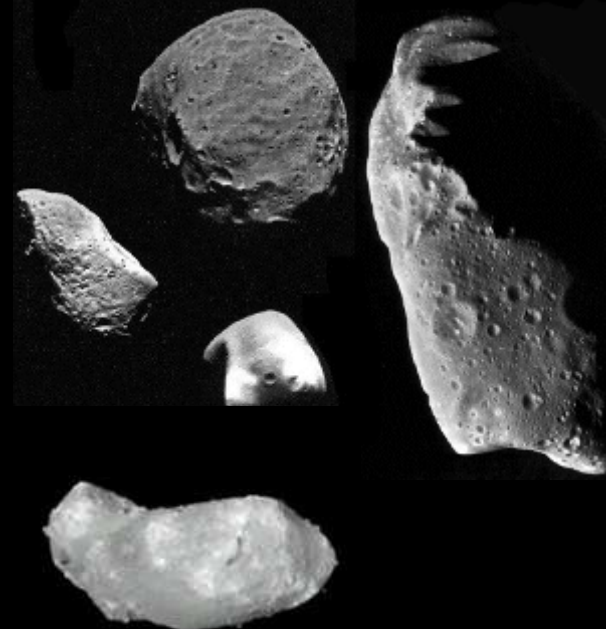
# Origine des chondrites



14 classes d'astéroïdes basées sur leur réflectance (A,B,C,D,E,F,G,M,P,Q,R,S,T,V,'K')

Diversité très supérieure à celle des météorites connues

Effet de la résonance 3:1



# Classification des chondrites

## Chondrites

Chondrites ordinaires

- LL (Saint-Mesmin)
- L (L'Aigle)
- H (Flandreau)

Chondrites carbonnées

- CI (Orgueil)
- CM (Murchison)
- CO (Ornans)
- CV (Allende)
- CK (Karounda)
- CR (Renazzo)
- CH (ALH 85085)
- CT (Tagish lake)

Chondrites à enstatite

- EL (Eagle)
- EH (Saint-Sauveur)

## Achondrites

Météorites de fer (Canyon Diablo)

Pallasites (Springwater)

Mésosidérites (Chinguetti)

H.E.D.

- Eucrites (Juvinas)
- Diogenites (Tatahouine)
- Howardite (Le Teilleul)

Météorites martiennes

- Shergottites (Shergotty)
- Nakhrites (Nakhla)
- Chassignites (Chassigny)
- ALH 84001

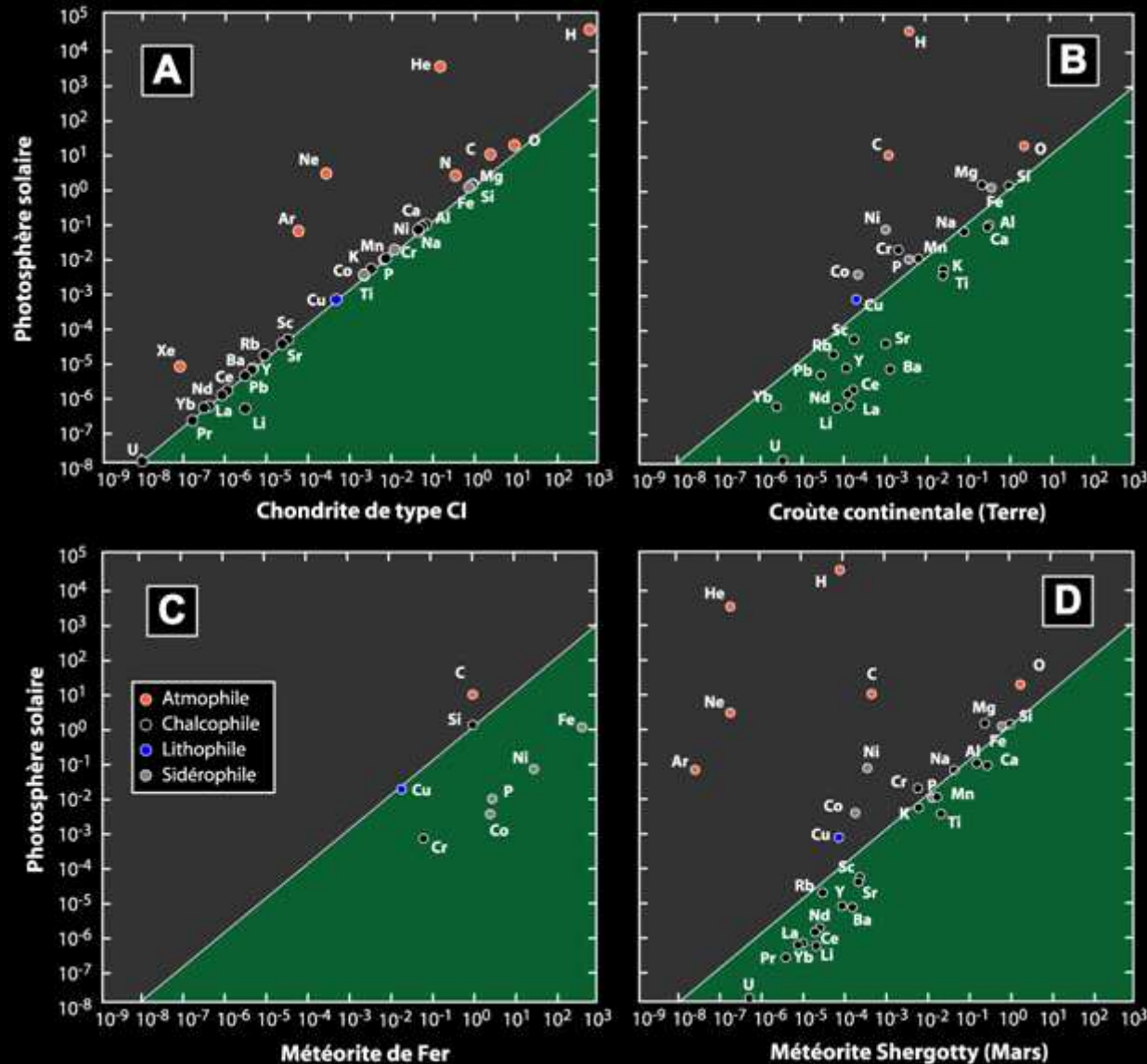
Lunaites (NWA 479)

Aubrites (Peña blanca Springs)

Ureilites (Novo Urei)

Angrites (Angra dos Reis)

# Des objets très primitifs

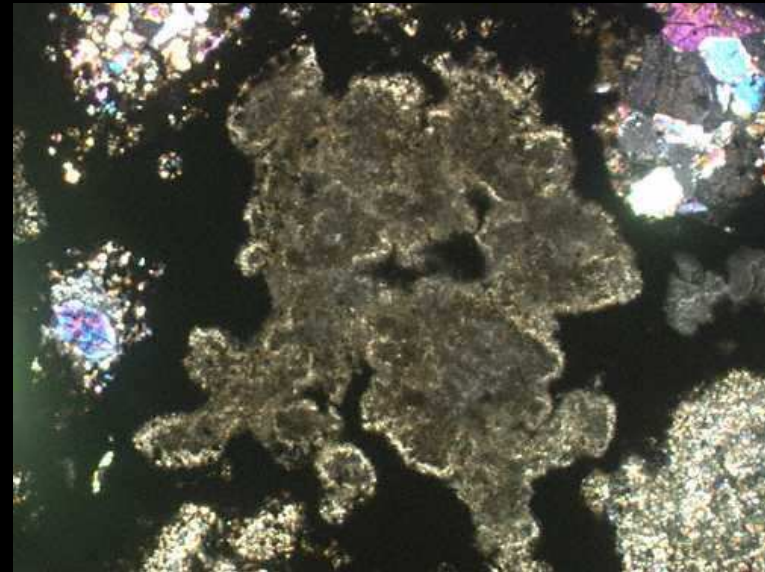
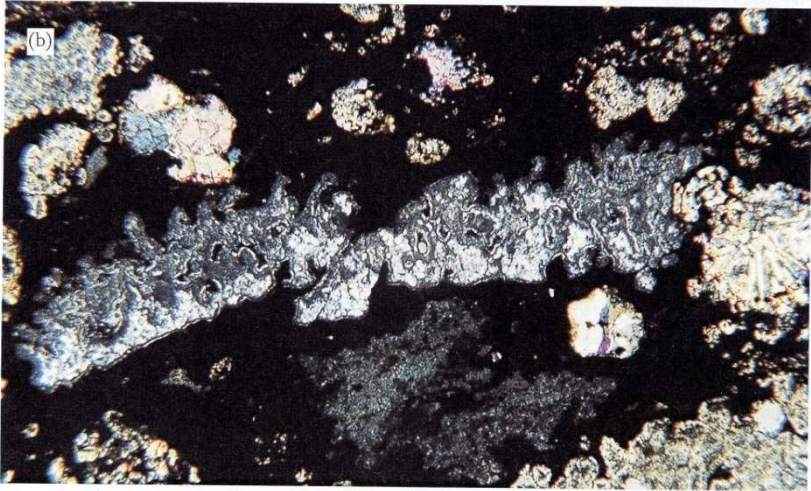
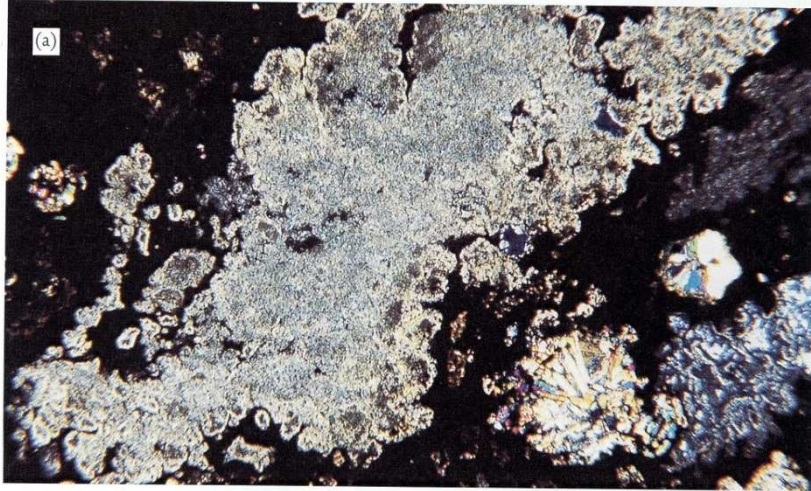


Les chondrites et plus particulièrement les chondrites carbonées ont des compositions chimiques très proches de celle de la photosphère solaire, excepté pour les éléments légers.

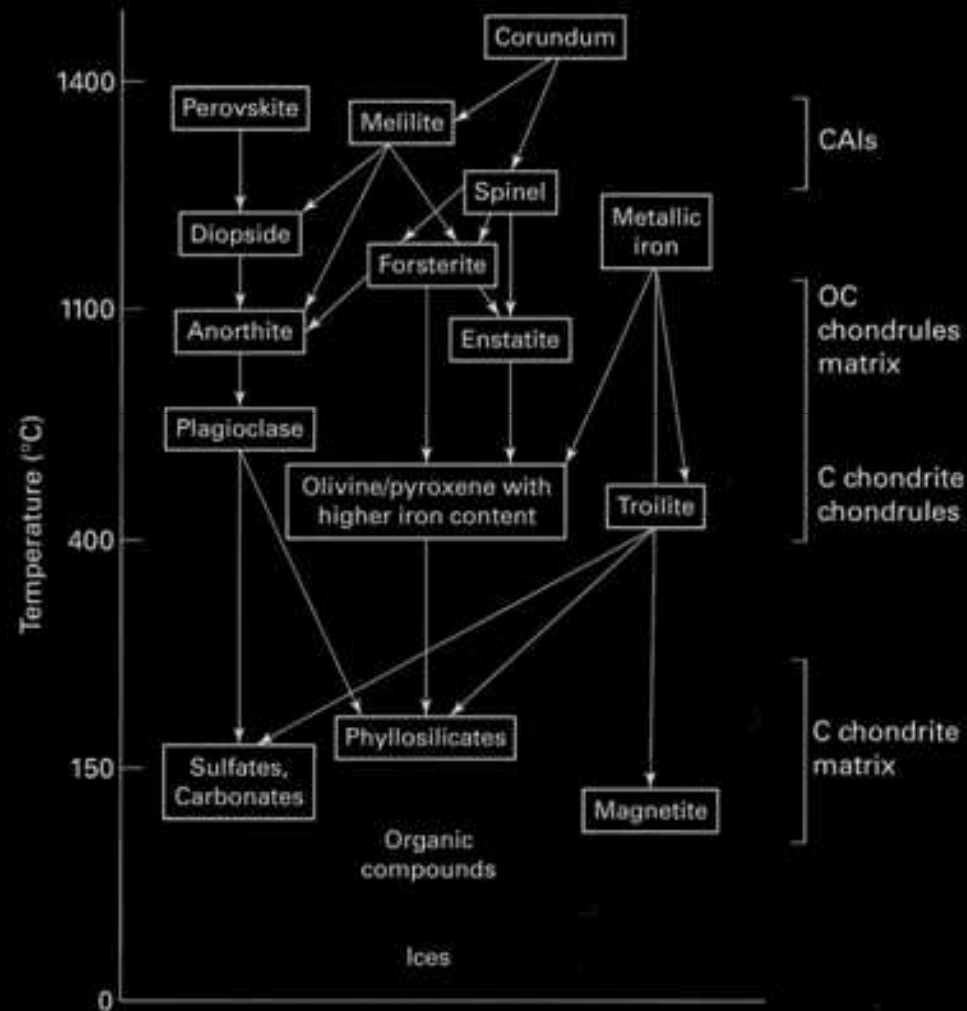
# Les inclusions réfractaires

Minéralogie réfractaire.

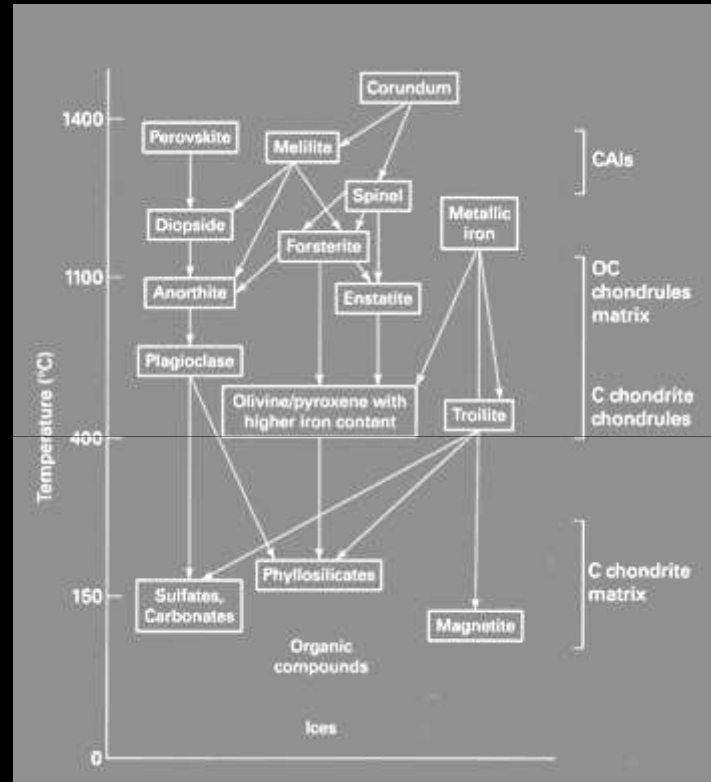
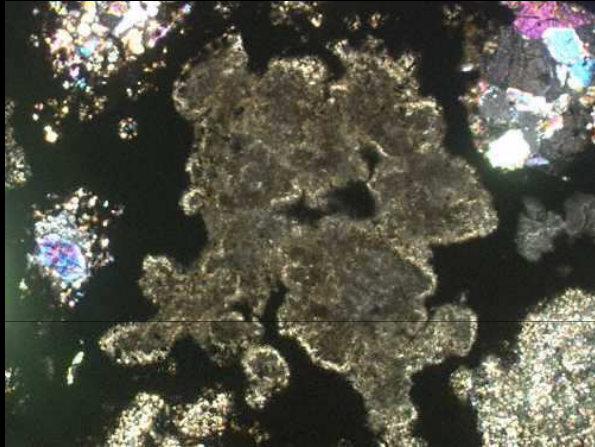
Minéraux riches en Ca et Al  
Corindon  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
Hibonite  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$   
Perovskite  $\text{CaTiO}_3$   
Melilite  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_7$   
Spinel  $\text{MgAlO}_4$



# La séquence de condensation



# Inclusions réfractaires et l'âge du Système Solaire



Chute d'Allende: bcp de matériel d'une chondrite « primitive » disponible à la communauté.



# **De la poussière à la proto-planète**

# Mécanismes de collage

## Quelle force de collage?

- Force de Van der Waals
- Electrostatique
- Magnétique
- Dissipation lors de la collision (fusion)

## Vitesse maximale de la collision pour collage.

Energie de surface

$$V_{stick} = \frac{2(E/r)^{5/6}}{Y\rho_s^{0.5}}$$

Module de Young

R=1  $\mu\text{m}$   $V_{stick} \sim 5 \text{ cm/s}$   
R=100  $\mu\text{m}$   $V_{stick} \sim 0.025 \text{ cm/s}$   
(for quartz)

# Du km à la protoplanète

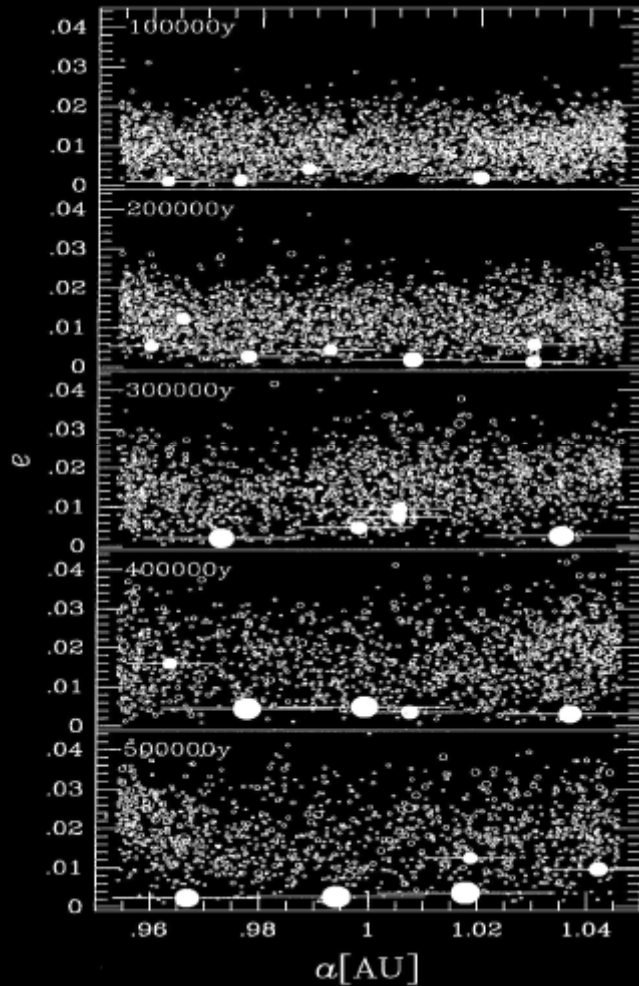
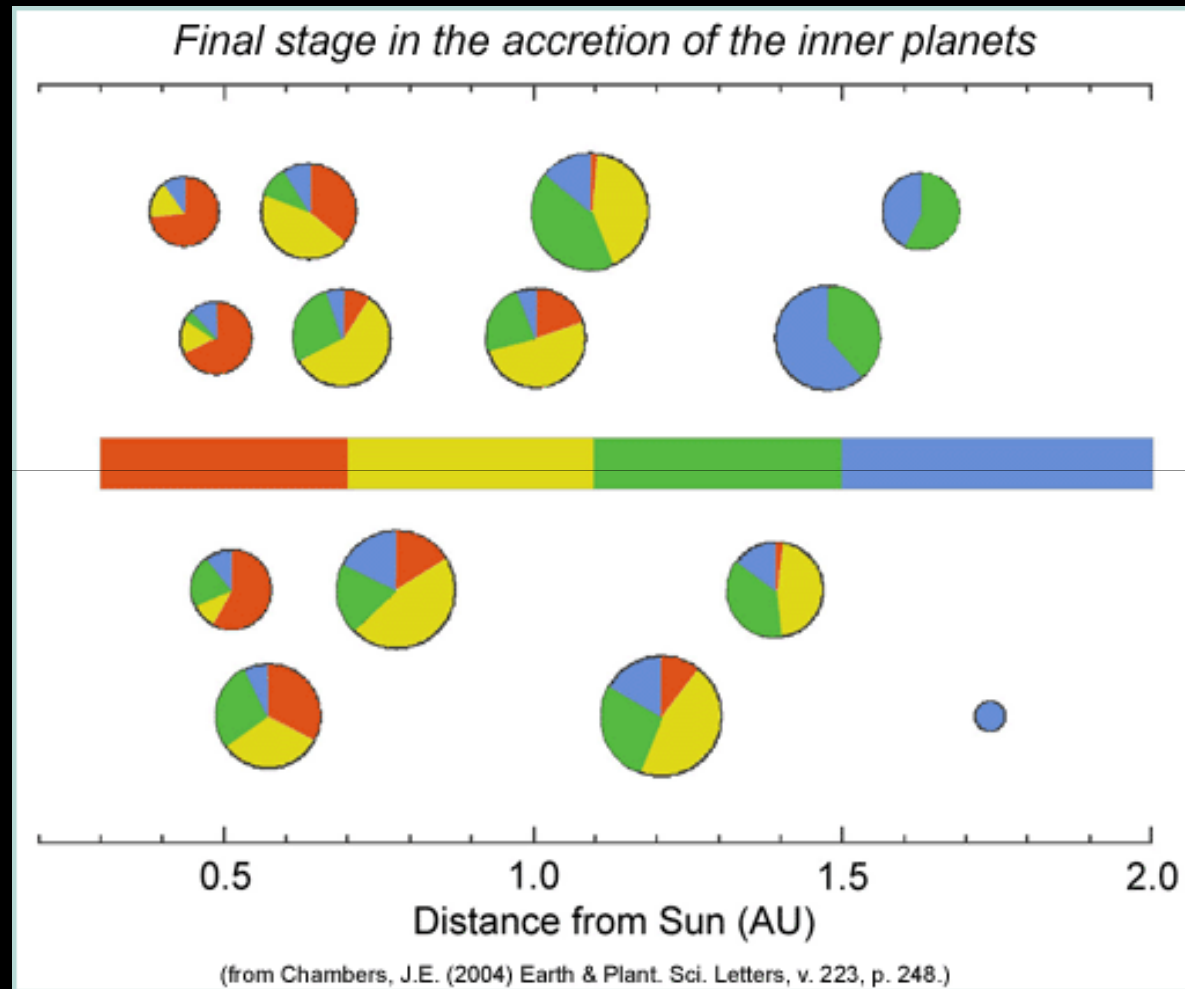


FIG. 7. Snapshots of a planetesimal system on the  $a$ - $e$  plane. The circles represent planetesimals and their radii are proportional to the radii of planetesimals. The system initially consists of 4000 planetesimals whose total mass is  $1.3 \times 10^{27}$  g. The initial mass distribution is given by the power-law mass distribution with the power index  $\alpha = -2.5$  with the mass range  $2 \times 10^{23} \leq m \leq 4 \times 10^{24}$  g. The numbers of planetesimals are 2712 ( $t = 100,000$  years), 2200 ( $t = 200,000$  years), 1784 ( $t = 300,000$  years), 1488 ( $t = 400,000$  years), and 1257 ( $t = 500,000$  years). The filled circles represent protoplanets with mass larger than  $2 \times 10^{25}$  g and lines from the center of the protoplanet to both sides have the length of  $5r_H$ .

Kokubo et Ida., 2000, *Icarus*



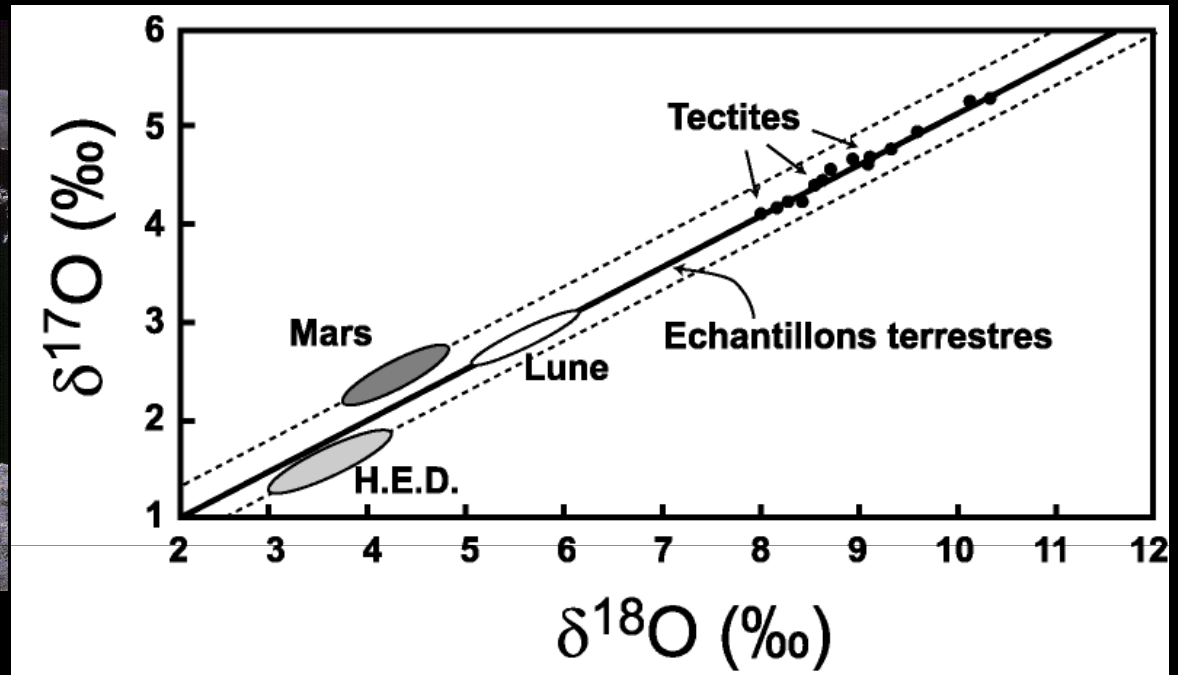
Chambers (2004) *EPSL*



Copyright (C) 2005, by Fahad Sulehria, <http://www.novacelestia.com>.

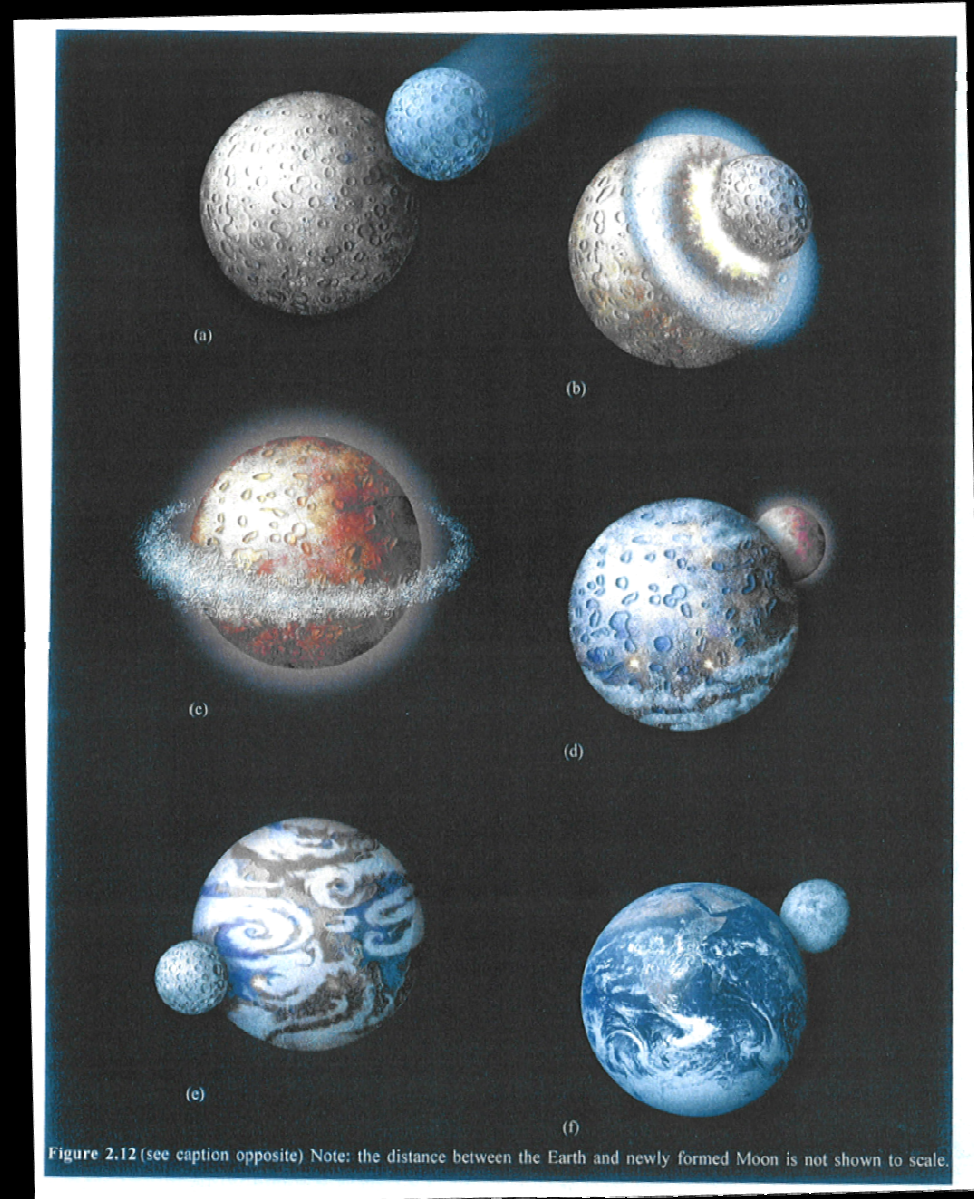
# 5. De l'accrétion à la différenciation

## 5.4 La formation de la Lune

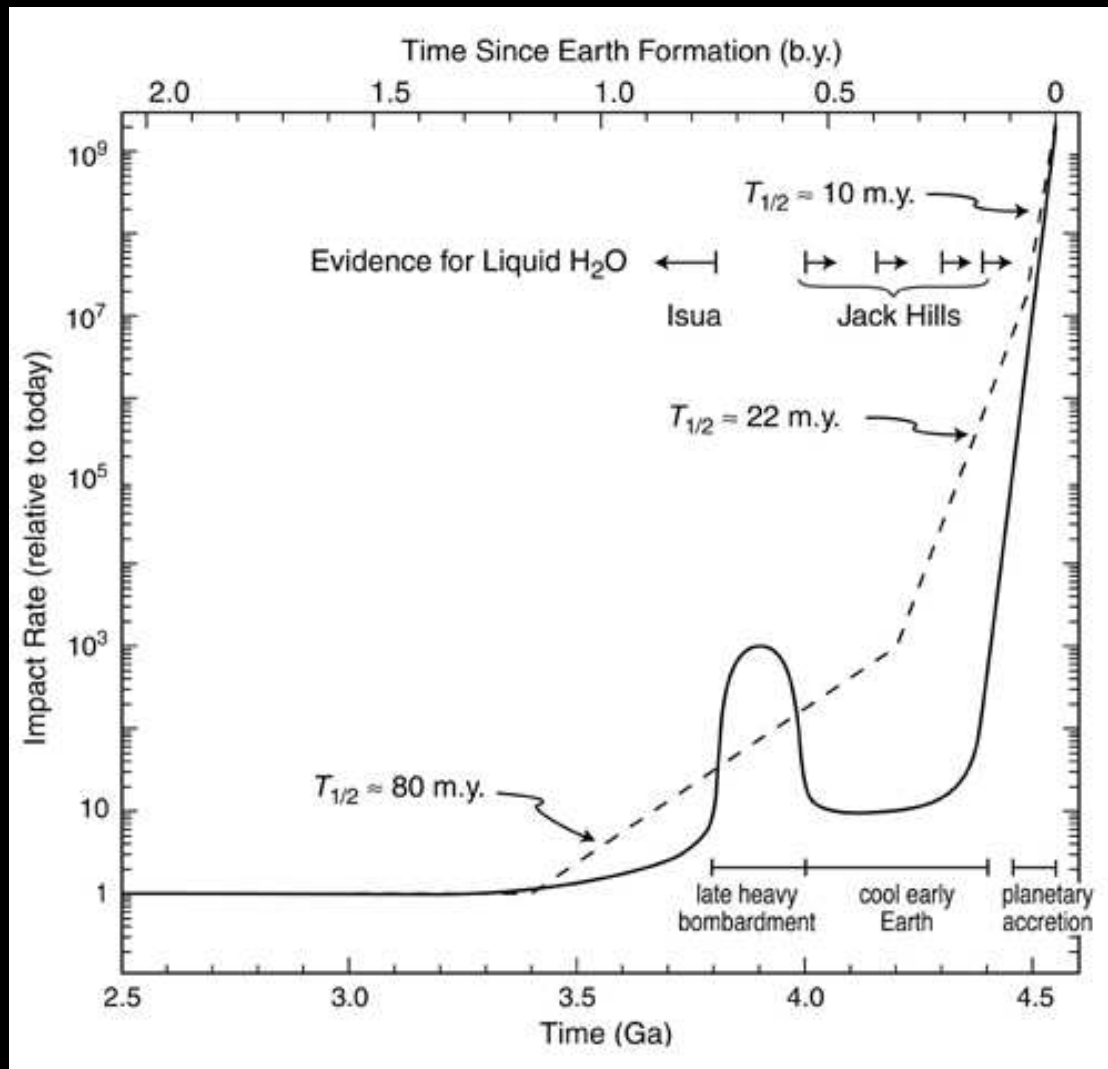
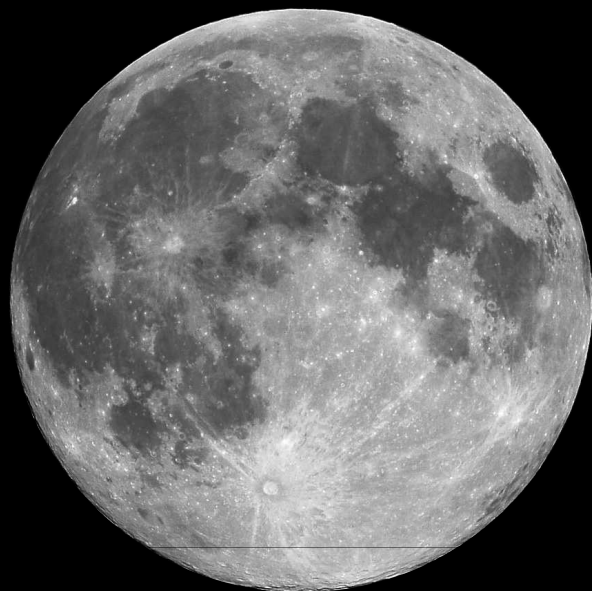


# 5. De l'accrétion à la différenciation

## 5.4 La formation de la Lune



# Le Lune et le bombardement tardif





# Le bombardement tardif

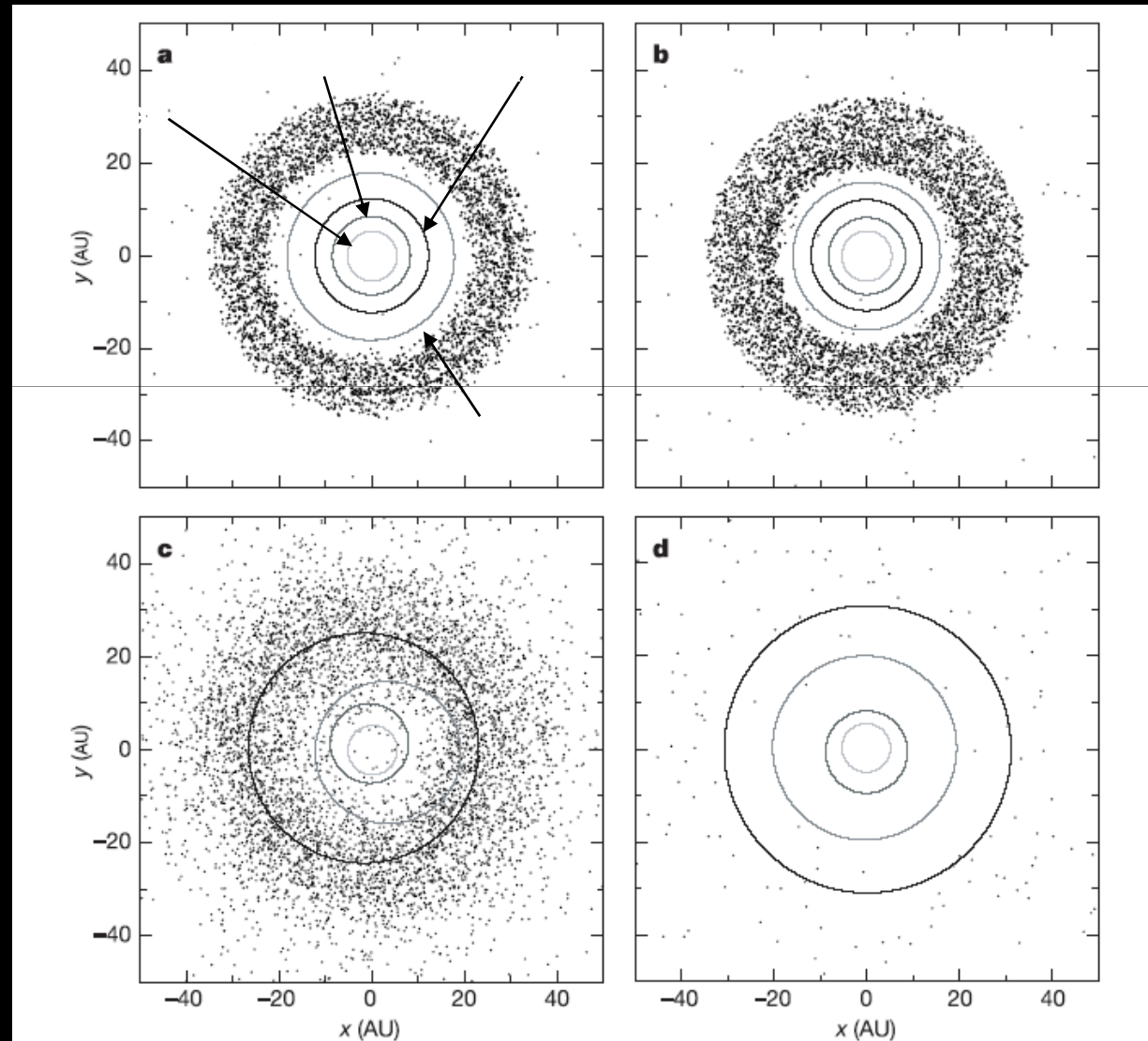
Gomes et al. (2005) *Nature*

Lorsque les planètes géantes sont formées une « ceinture de Kuiper » est présente.

Migration planétaire.

Echange orbite entre Uranus et Neptune

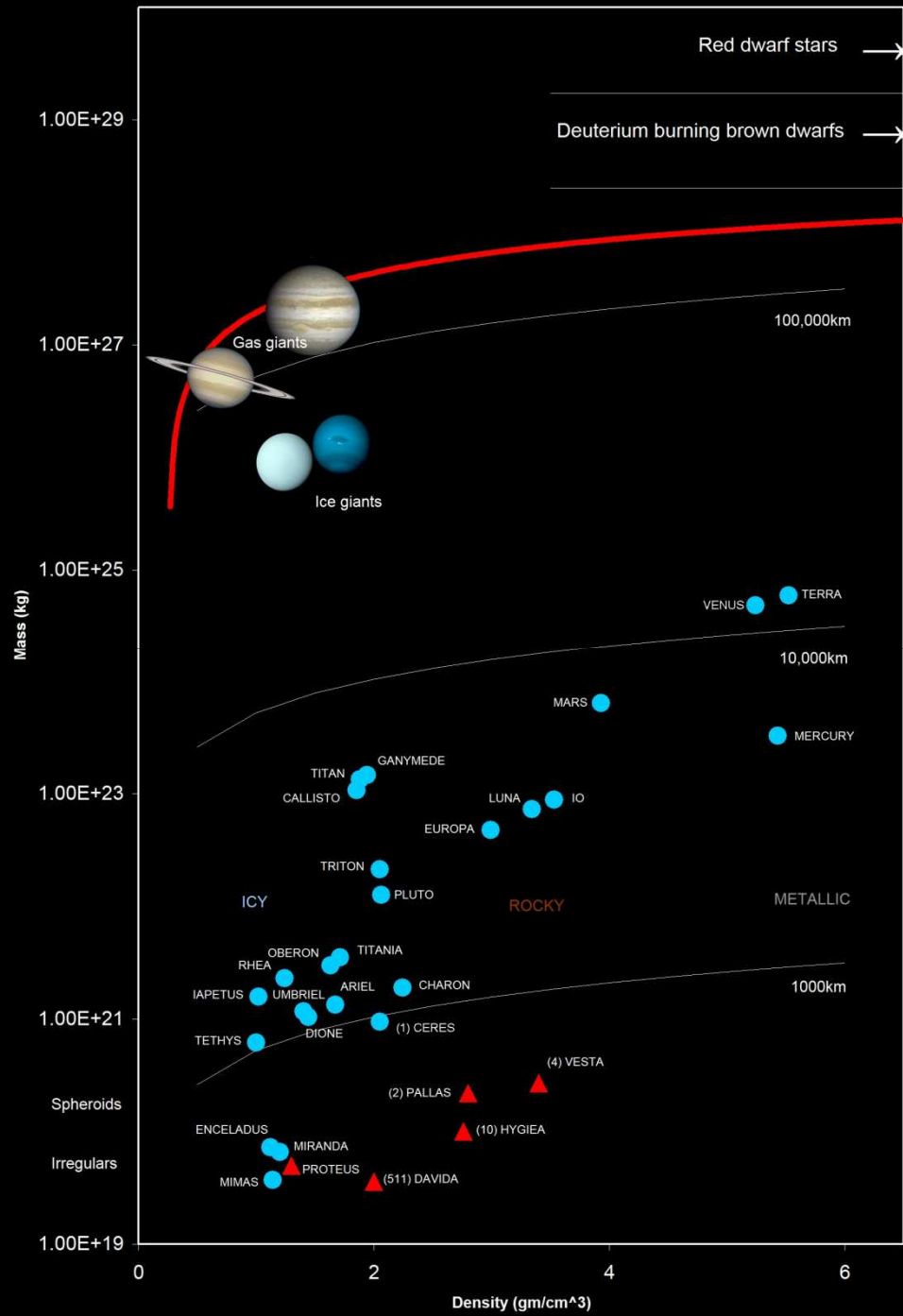
Instabilité et bombardement cataclysmique.

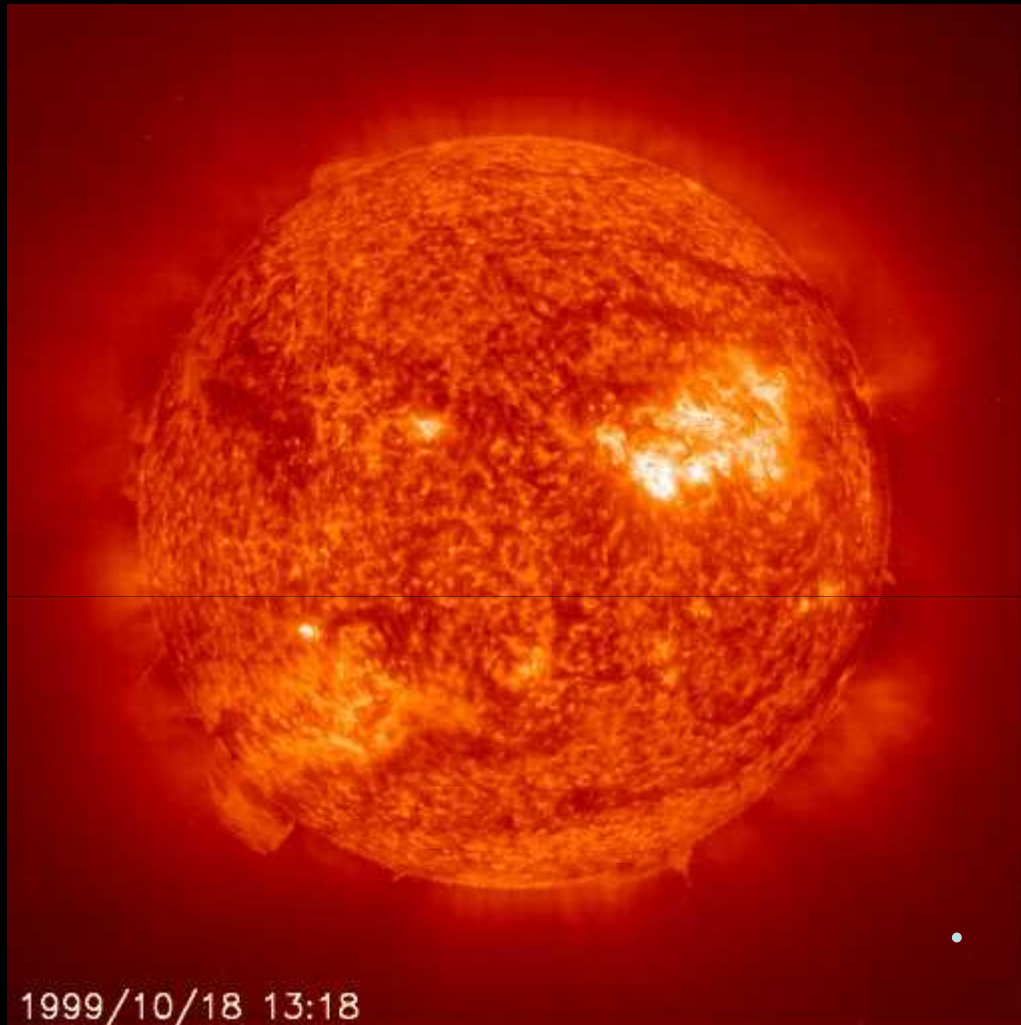


# Le bombardement tardif



# **Un panorama du Système Solaire**





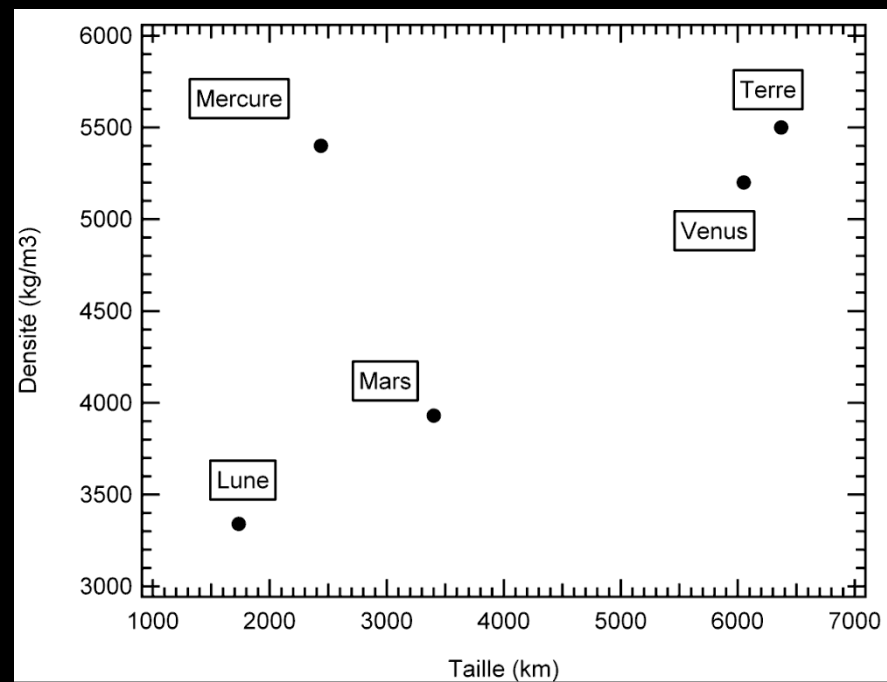
# Le Soleil

Diamètre = 1 392 000 km  
100 plus que la terre

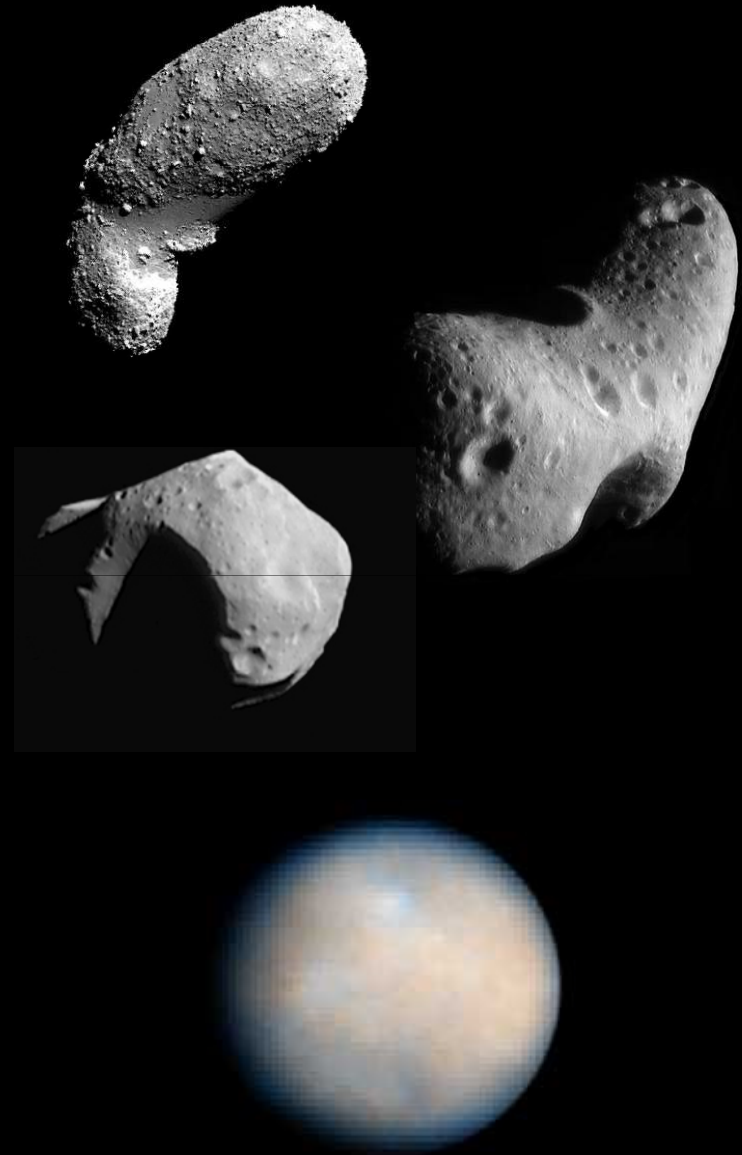
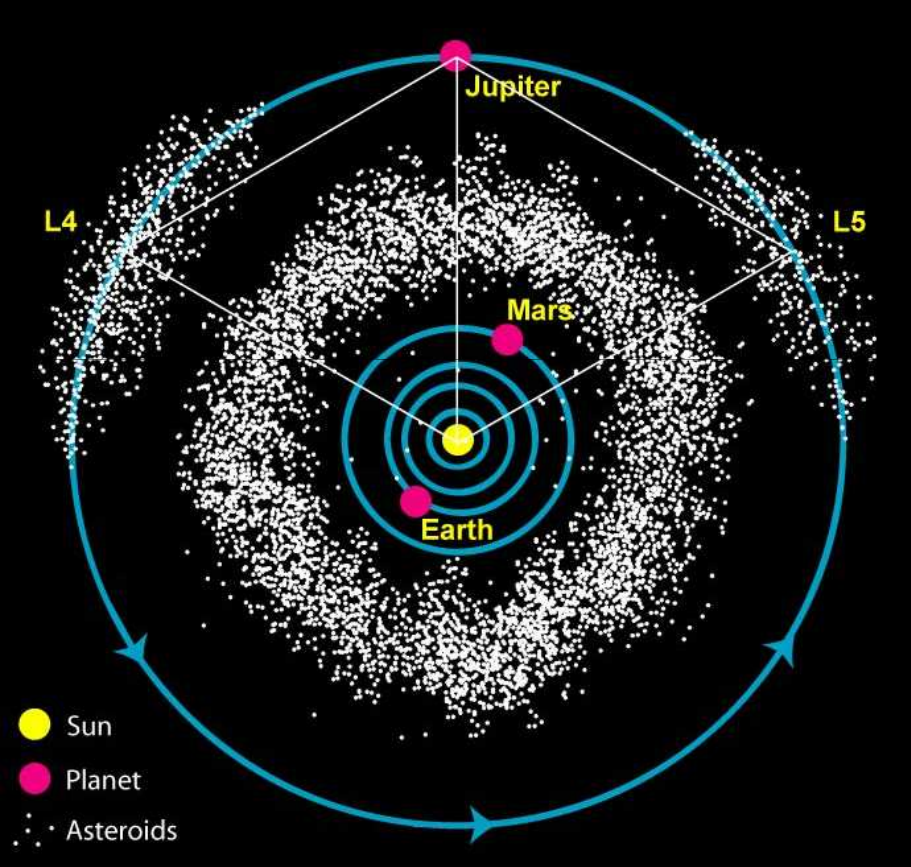
Masse =  $2 \times 10^{30}$  kg  
300 000 plus que la Terre

Température de surface = 5700°C

# Les Planètes telluriques

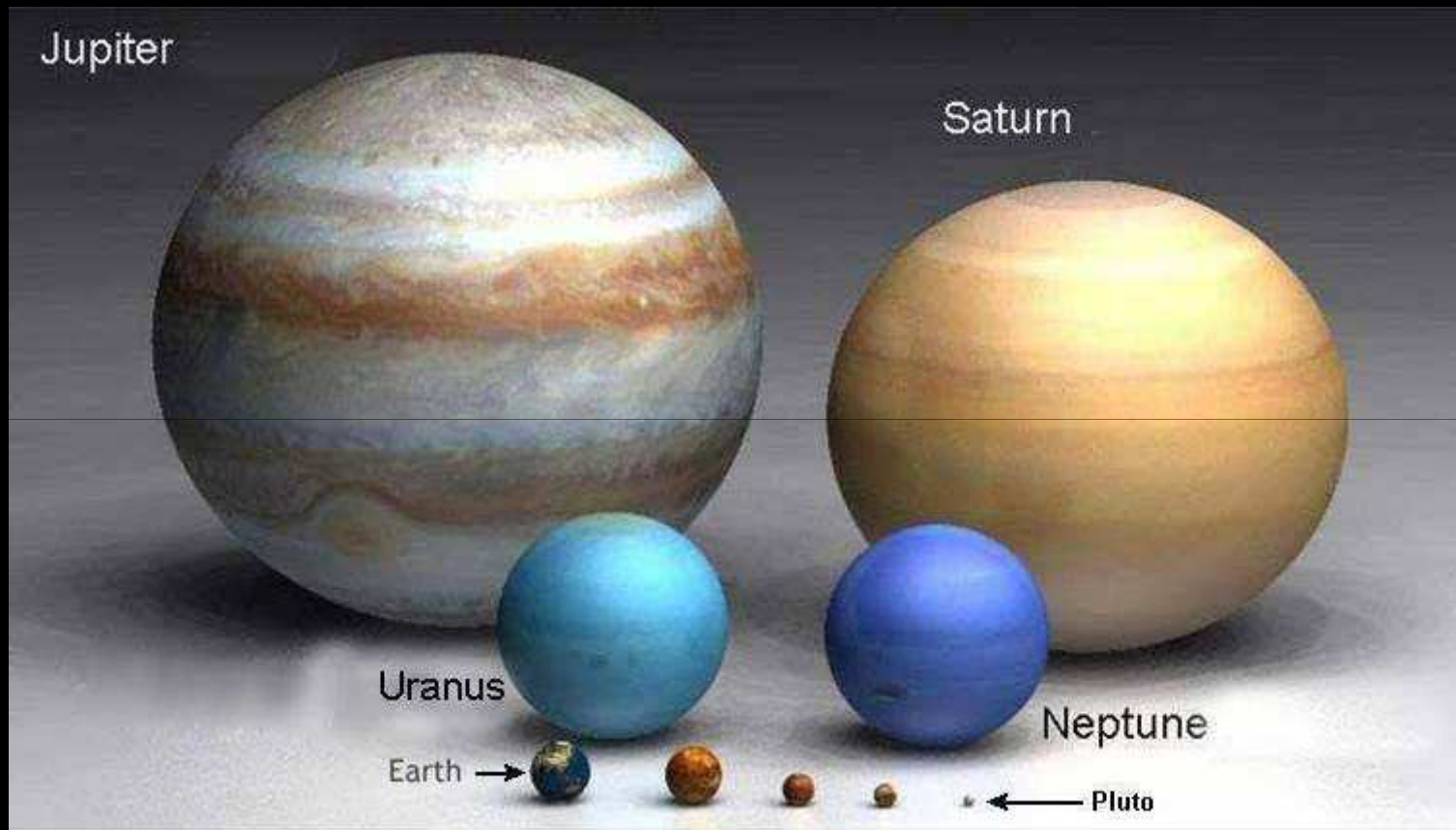


# Les astéroïdes



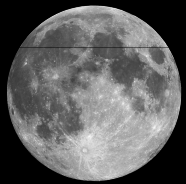
# Les Géantes gazeuses

← 140000 km →





# Les Lunes de Jupiter

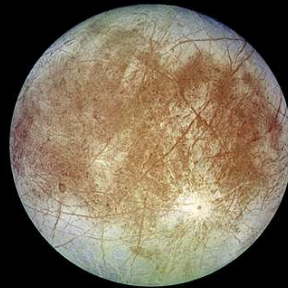


3.35 kg/m<sup>3</sup>



Io

3.53 kg/m<sup>3</sup>



Europa

3.01 kg/m<sup>3</sup>



Ganymède

1.94 kg/m<sup>3</sup>

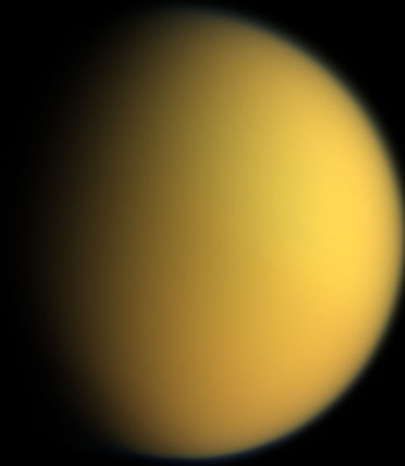


Callisto

1.83 kg/m<sup>3</sup>

# Les Lunes de Saturne

Titan



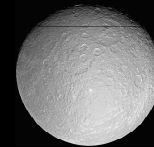
1.88 kg/m<sup>3</sup>

Japet



1.08 kg/m<sup>3</sup>

Rhéa

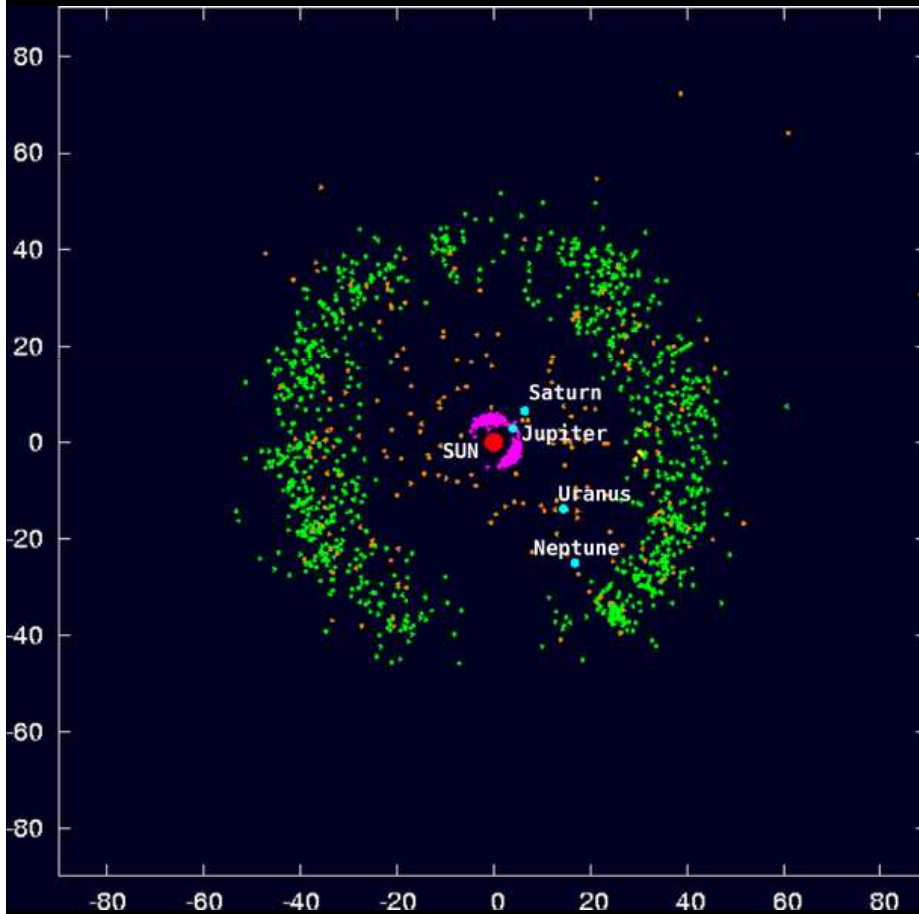


1.23 kg/m<sup>3</sup>



3.35 kg/m<sup>3</sup>

# La ceinture de Kuiper

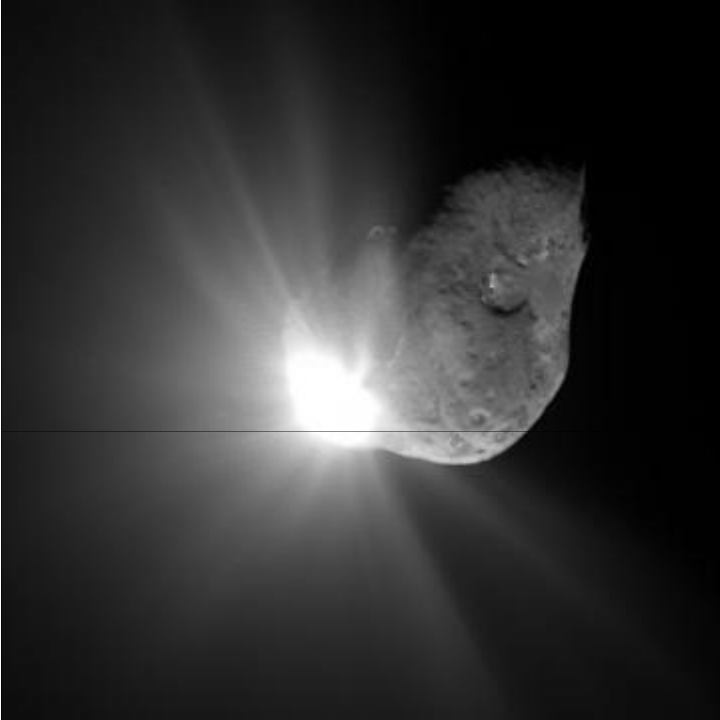


Un peu comme la ceinture d'astéroïde.

Mais objets très riches en volatiles (glace d'eau, CO<sub>2</sub> ou NH<sub>4</sub>).

Planètes naines (Pluton, Triton, ...)

# Les Comètes



1/3 cailloux, 1/3 organiques, 1/3 glace



The Oort Cloud is shown as a vast, spherical shell of billions of comets surrounding the Solar System. The Sun is at the center, and the inner planets and gas giants are visible in the foreground. A blue line points from the text box to the Oort Cloud.

The Oort Cloud  
(comprising many billions of comets)

*Oort Cloud cutaway  
drawing adapted from  
Donald K. Yeoman's  
illustration (NASA, JPL)*

# Géologie des planètes tellurique



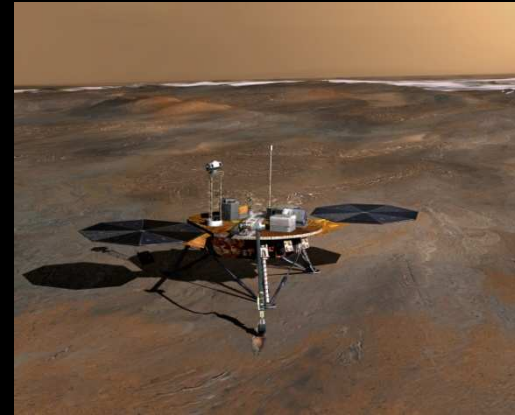
# Méthodes d'observation

## Observatoire



*Keck observatory Chilli*

## Lander



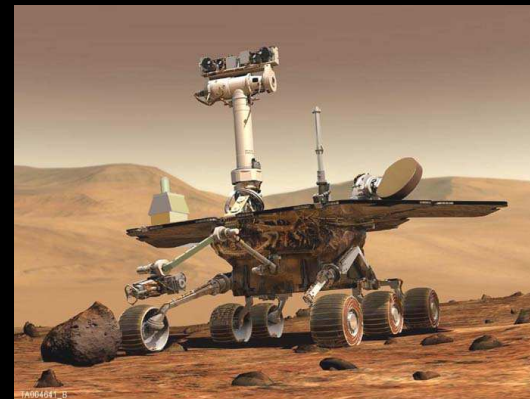
*Phoenix*

## Telescope spatiaux



*Spitzer*

## Rover



*Spirit & Opportunity*

**La Lune**

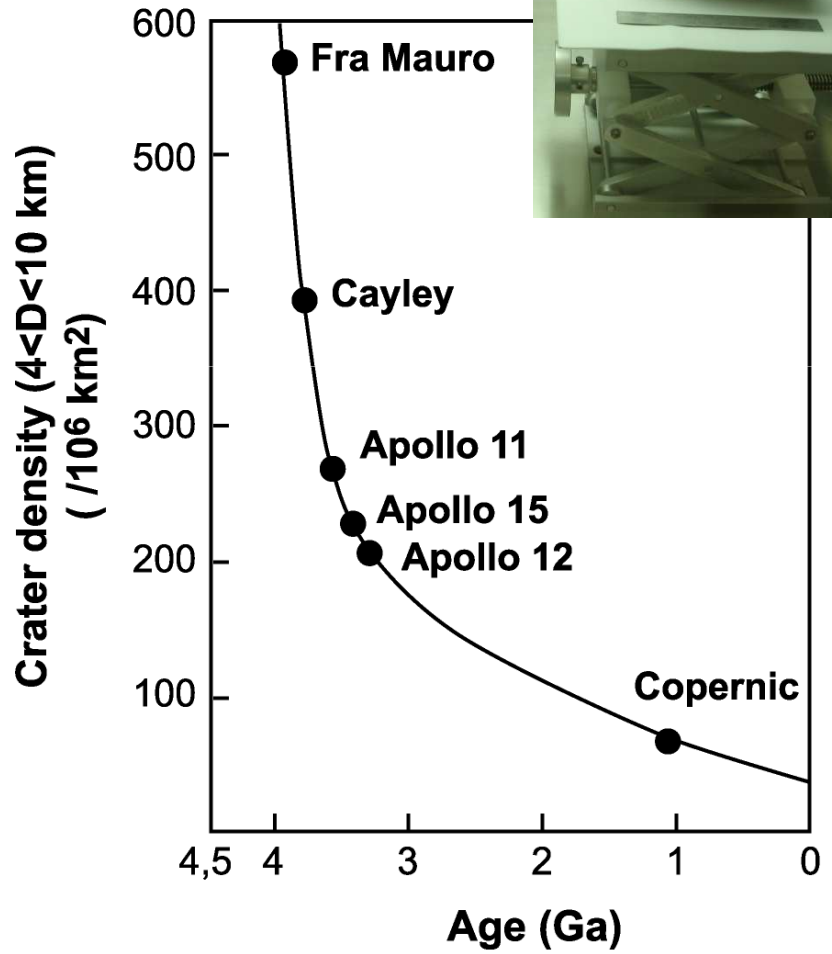
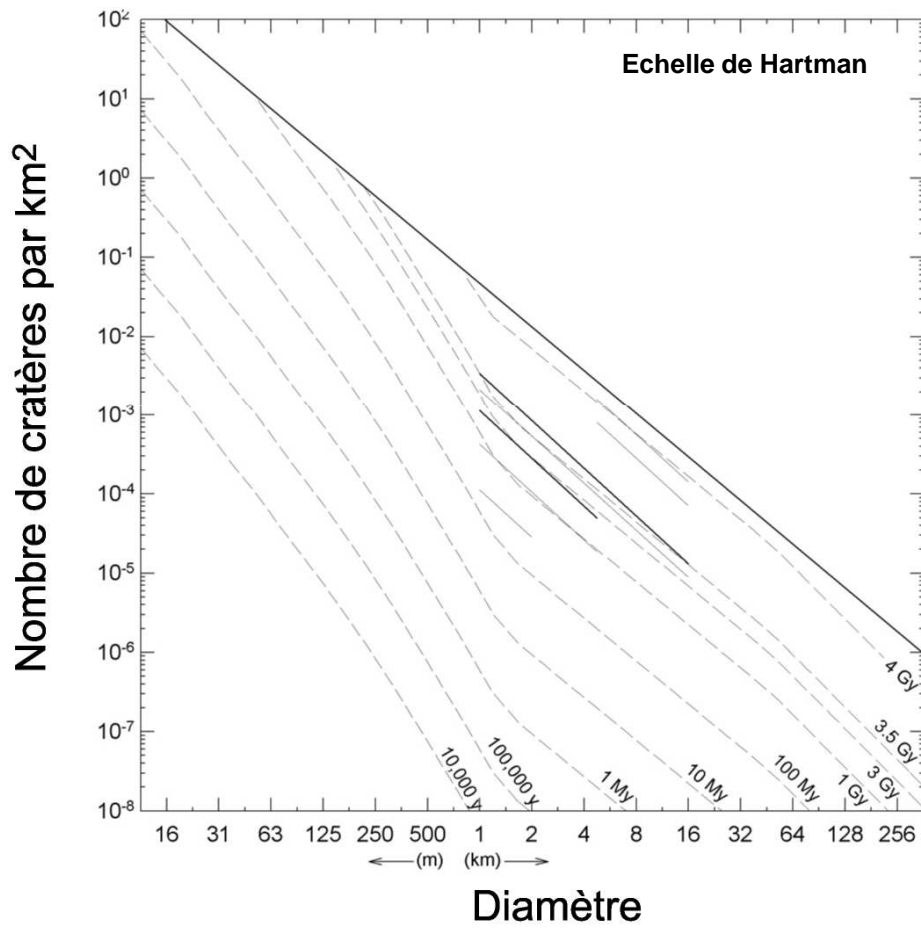
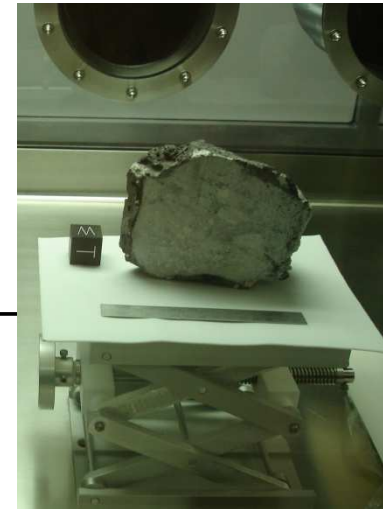




# Pourquoi être allé sur la Lune



# L'échelle chronostratigraphique



# L'échelle chronostratigraphique

Extrapolation aux autres corps:

Dépend de la **distance à la ceinture d'astéroïde**  
(différence de flux et de vitesse d'impact)

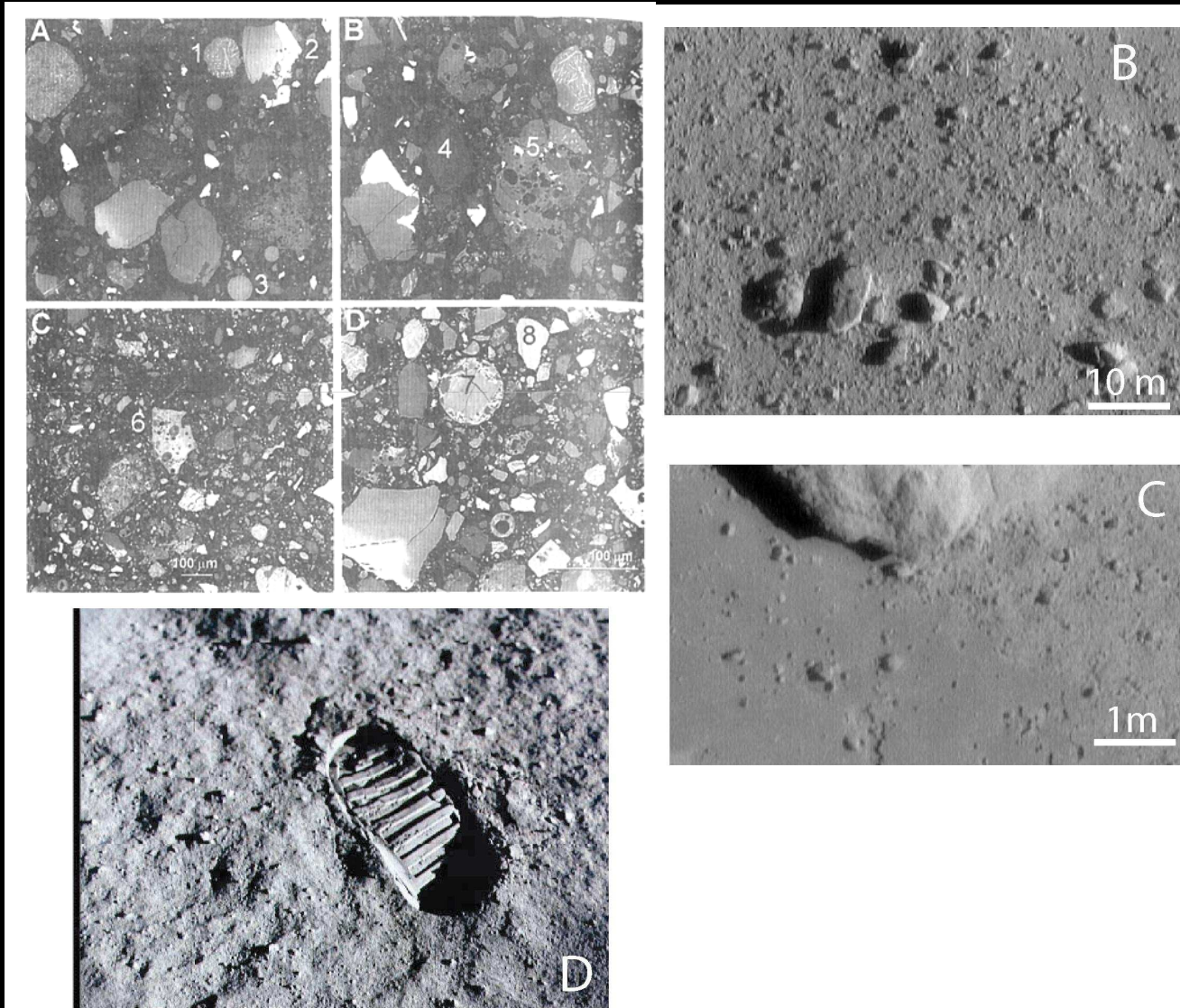
Dépend de la **gravité**.

Dépend de la **géométrie de l'orbite**.

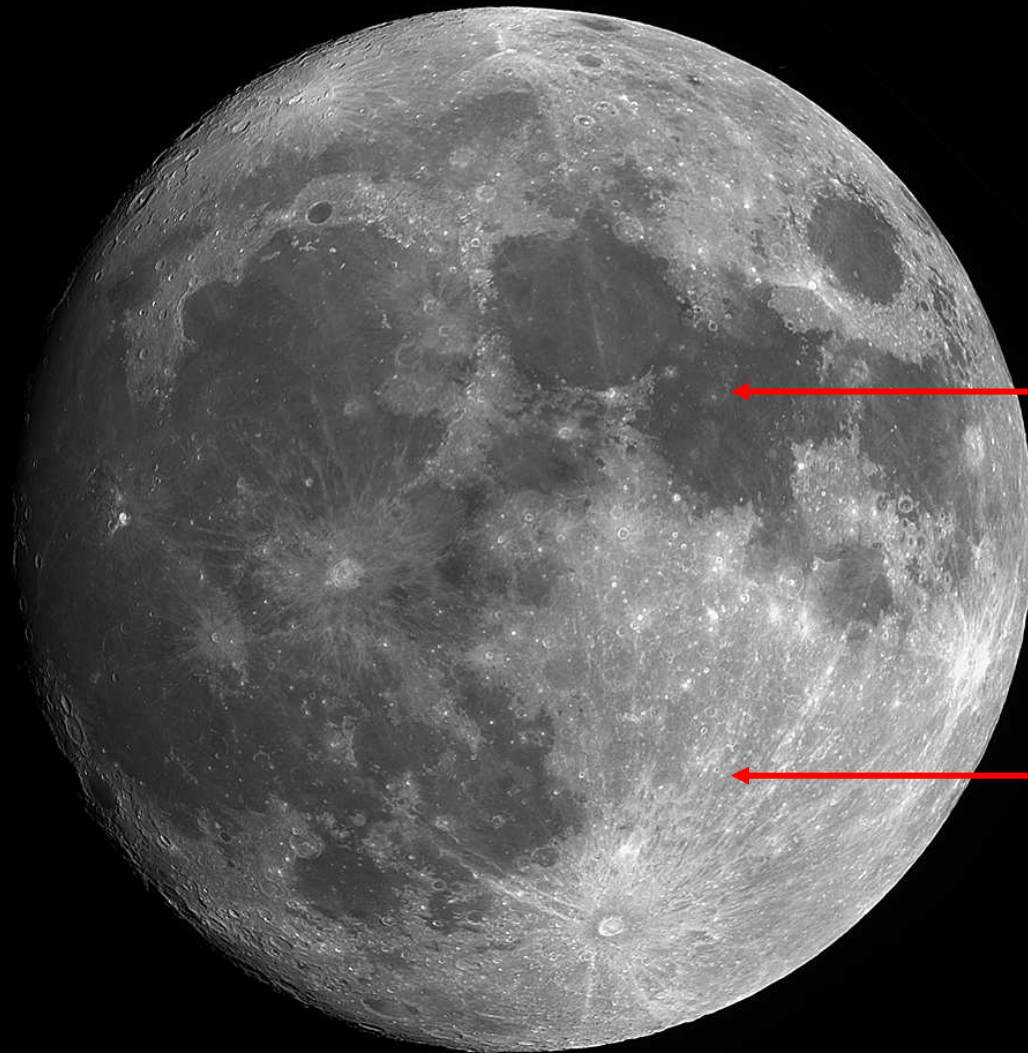
Dépend de la présence d'un « **filtre atmosphérique** ».

On peut toujours faire une datation relative sur une même planète.

# Le régolithe lunaire



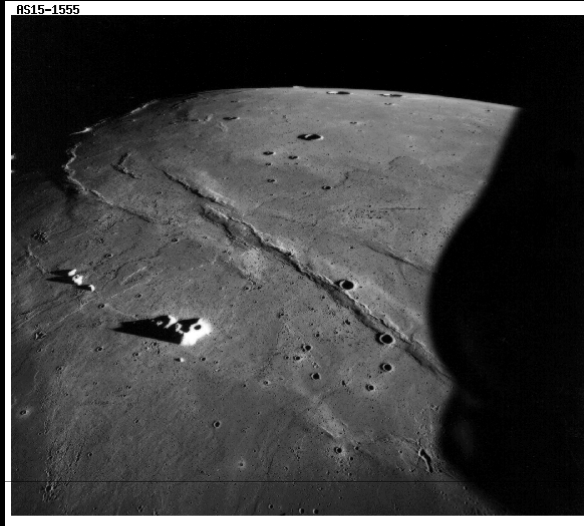
# La surface de la Lune



Mer (+jeune)

Highland (-jeune)

# Les mers lunaires



Elles couvrent **17 %** de la surface de la Lune.

Ce sont des coulées de lave **basaltiques** de 10-40 m, très plate (1:500), et très longue (jusqu'à 1500 km).

Succession de coulées qui font une couche d'~1-2 km.

Basalte **pauvre en silice** (37-45 wt%) et **riches en fer** (18-22 % FeO).

Age entre 3.83 et 3.00 Gyr (pour échantillons apollo). Leur source à 4.44 Gyr.

# Les plateaux



3 types de roches principalement.

-Les **anorthosites** ferreuses (~80 % surface highlands)

95% de plagioclase (anorthite 95-97) et 5 % de pyroxène ferreux.

Age de 4.44 Gyr

-la « **Mg-suite** » (10% surface highlands):

norites, troctolite, dunite, anorthosites gabbroïques.

roches riches en Mg par rapport aux anorthosites.

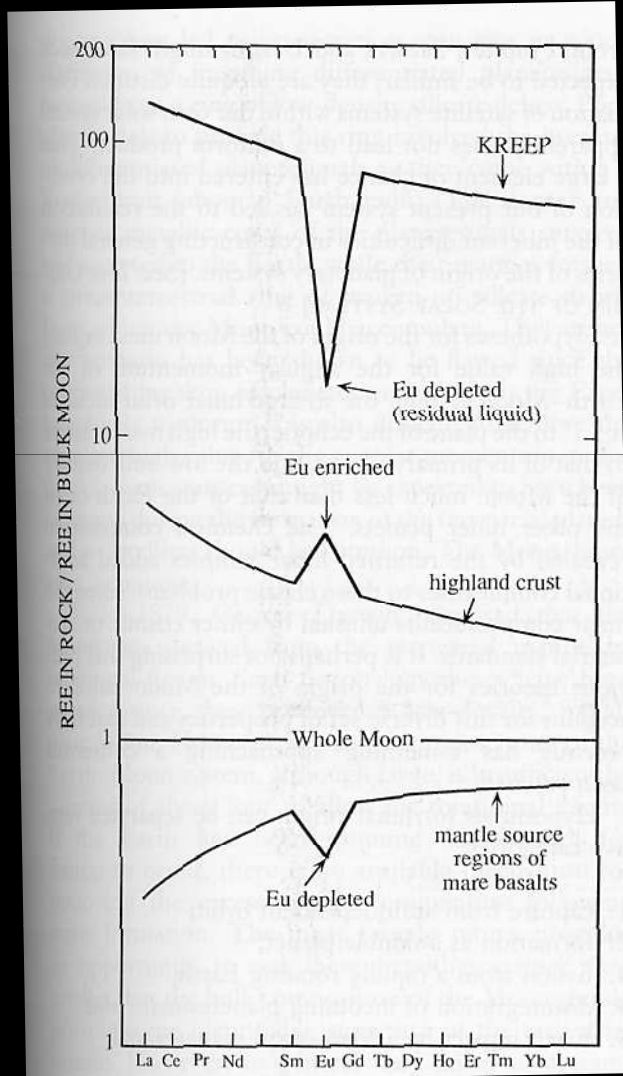
Age de 4.44 à 4.42 Gyr.

-les **KREEP**:

roches très enrichies en éléments lithophiles

(K, REE et P)

# L'océan magmatique



La croûte contient près de la moitié du Ca et de l'Al de la planète.

Fusion à très grande échelle!

Cristallisation du Ca-feldspath.

Par flotation formation de la croûte d'anorthosite (lunar highlands, 4.44Gy)

Magma résiduel enrichi en élément lithophiles (KREEP, 4.44 à 4.35).

Magmatisme plus tardif lié au réchauffement radiogénique, pendant 1 Gyr.  
=mers lunaires.



# Structure interne

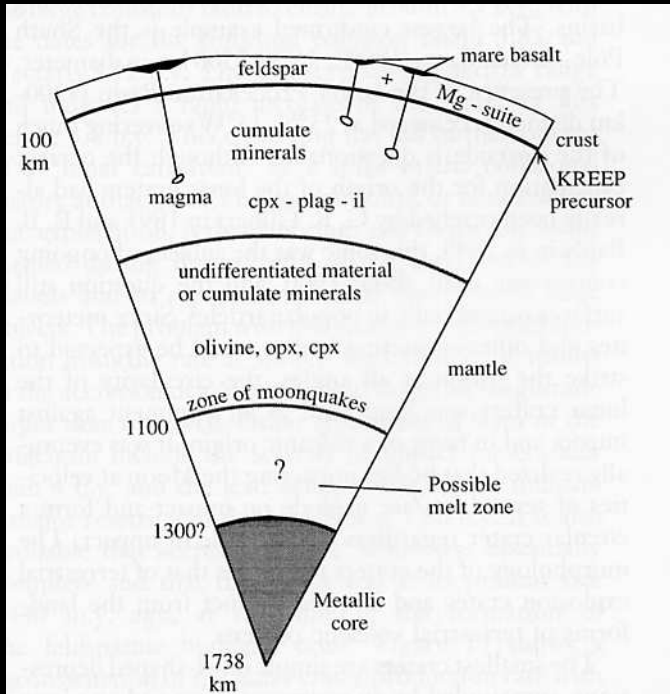
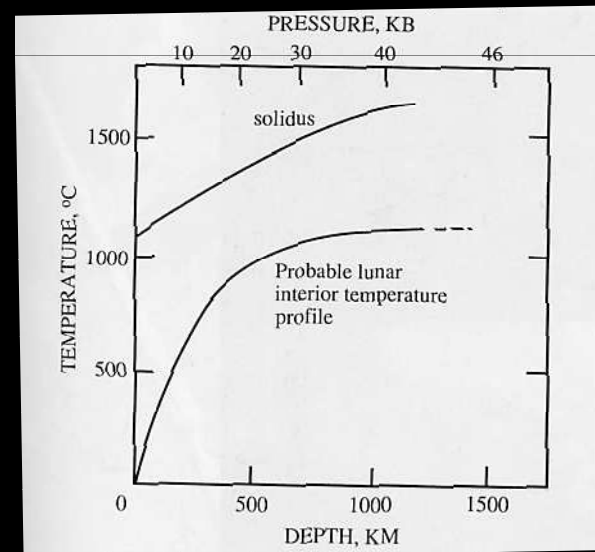


FIGURE 8 A diagram of the internal structure of the Moon.

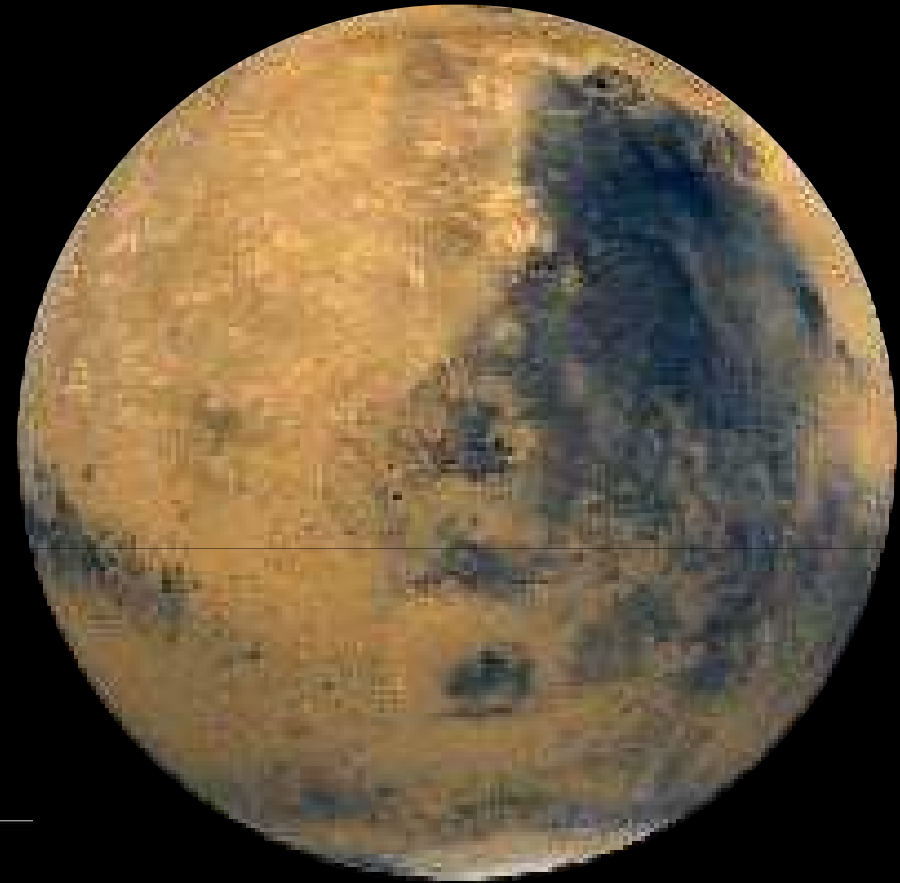
Le moment d'inertie est bien connu.  
On a besoin d'un matériel plus dense au cœur.  
Petit noyau (R~350 km)



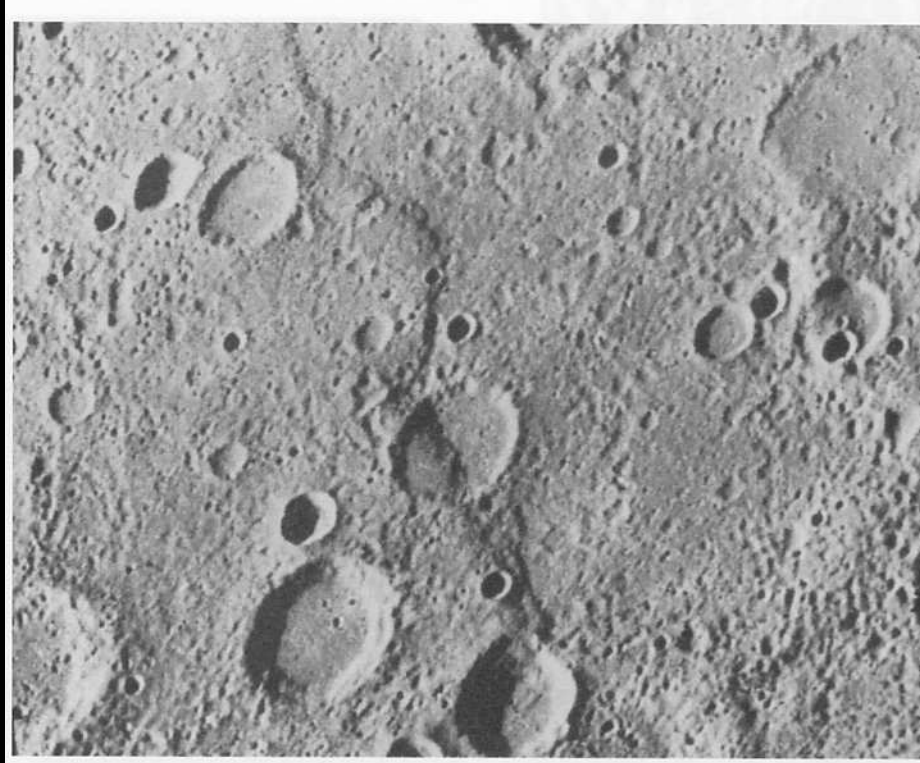
Il y a eu un champ presque aussi intense que sur Terre.  
Très mal compris aujourd'hui.

Flux de chaleur mesuré = 1-2 mW/m<sup>2</sup>

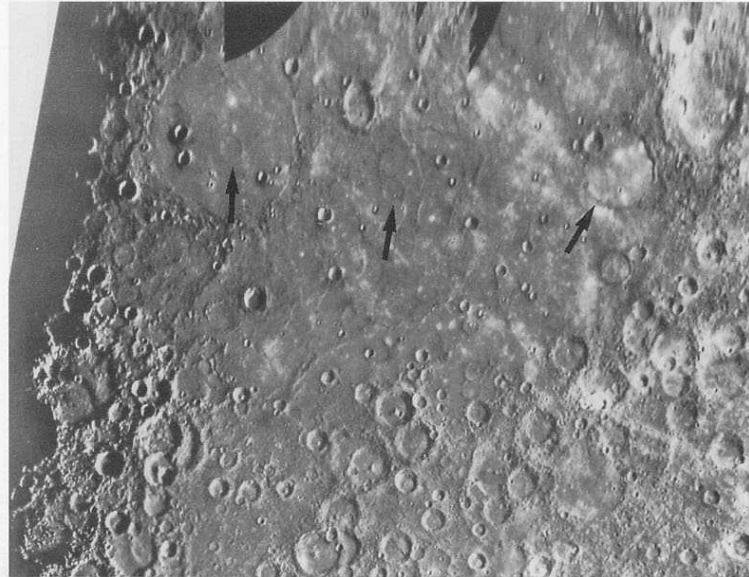
# Mercure



# Les plaines inter-cratères



# Les plaines lisses



**FIGURE 14** Photomosaic of the Borealis Basin showing numerous craters (arrows) that have been flooded by smooth plains. The largest crater is the Goethe basin, 340 km in diameter. (Courtesy of NASA.)

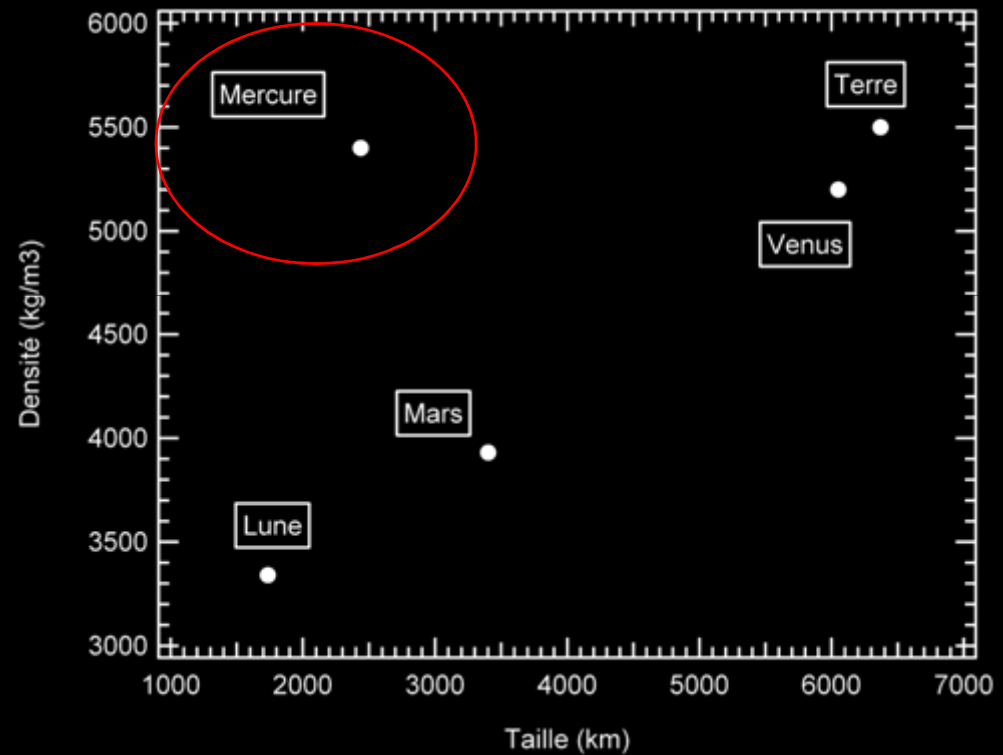
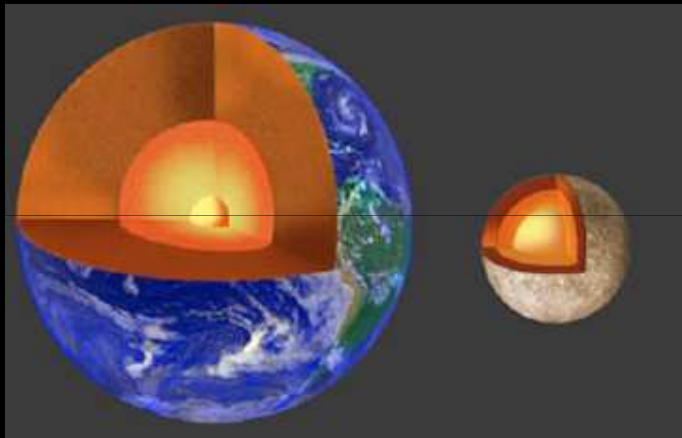
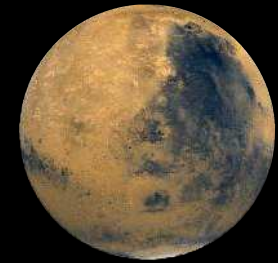
Volcanisme à basse viscosité.

Roche pauvre en  $\text{FeO}$  (<6%) et riche en feldspath.

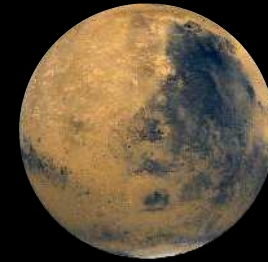
Signature du plagioclase observée.

Basalte alcalin pauvre en fer?

# Mercure, densité



# Mercure, structure



La composition chimique de Mercure et sa structure radiale sont très mal connus.

On ne connaît pas son moment d'inertie.

La croûte ressemble à celle de Lune (plagioclase)

Mercure est une planète très dense.

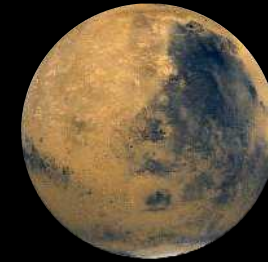
Vieille théorie: plus près du soleil. Enrichissement en métal lors de l'acréation.

Théories actuelles:

- évaporation du manteau ( $T_{surf} \sim 800K$ )

- impact géant sur une planète deux fois plus grosse déjà différenciée

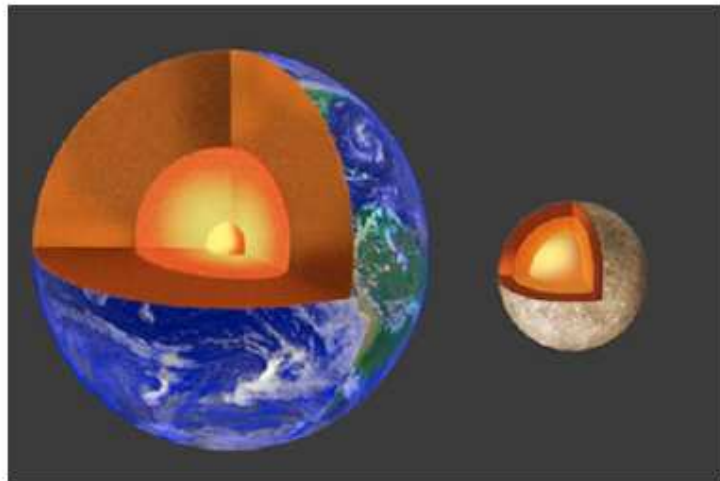
# Mercure, magnétisme



## Large Longitude Libration of Mercury Reveals a Molten Core

J. L. Margot,<sup>1\*</sup> S. J. Peale,<sup>2</sup> R. F. Jurgens,<sup>3</sup> M. A. Slade,<sup>3</sup> I. V. Holin<sup>4</sup>

Observations of radar speckle patterns tied to the rotation of Mercury establish that the planet occupies a Cassini state with obliquity of  $2.11 \pm 0.1$  arc minutes. The measurements show that the planet exhibits librations in longitude that are forced at the 88-day orbital period, as predicted by theory. The large amplitude of the oscillations,  $35.8 \pm 2$  arc seconds, together with the Mariner 10 determination of the gravitational harmonic coefficient  $C_{22}$ , indicates that the mantle of Mercury is decoupled from a core that is at least partially molten.



Mercure a un champ magnétique bi-polaire  
Noyau liquide??

3<sup>ème</sup> partie: Les surfaces planétaires

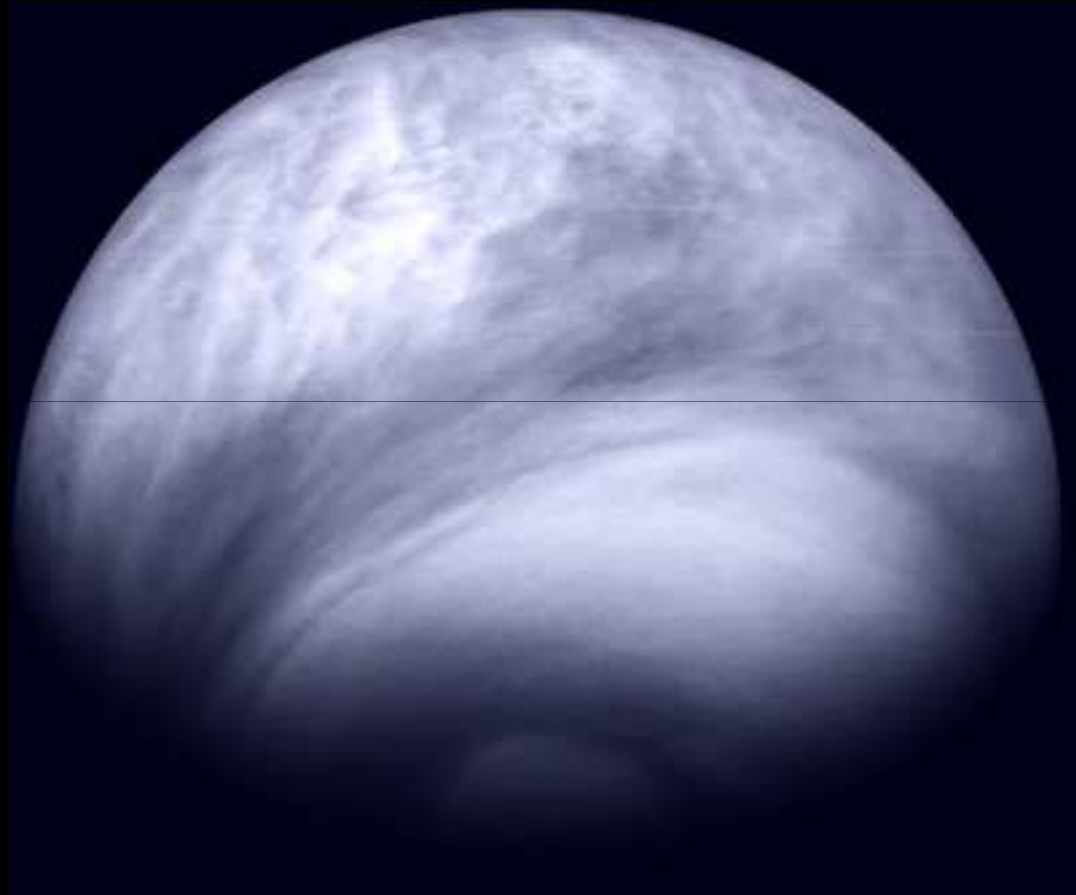
## 3. Géologie des surfaces planétaires

### Mercury: fentes de contraction

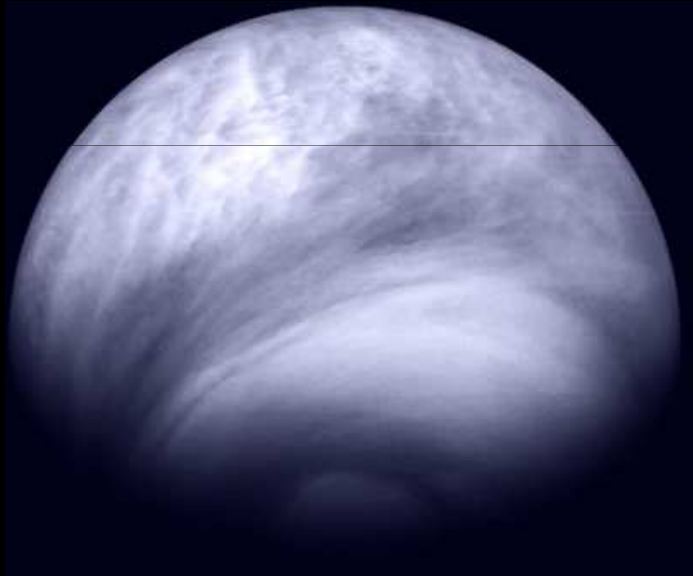




Vénus ♀



# Vénus, voir à travers l'atmosphère



# Vénus, cratérisation



69 km de diamètre

~1000 cratères sur Vénus  
Pas de cratère < 5km (atmosphère)  
Datation difficile

# Vénus, les volcans

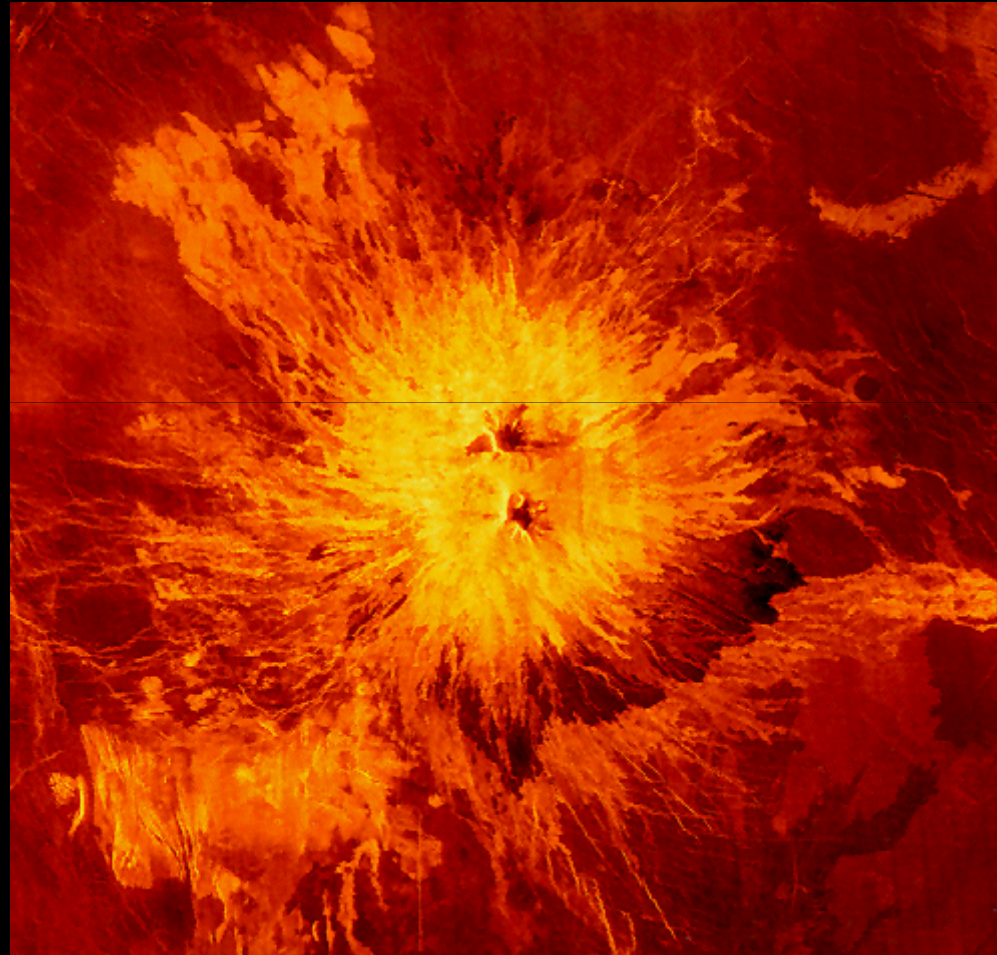
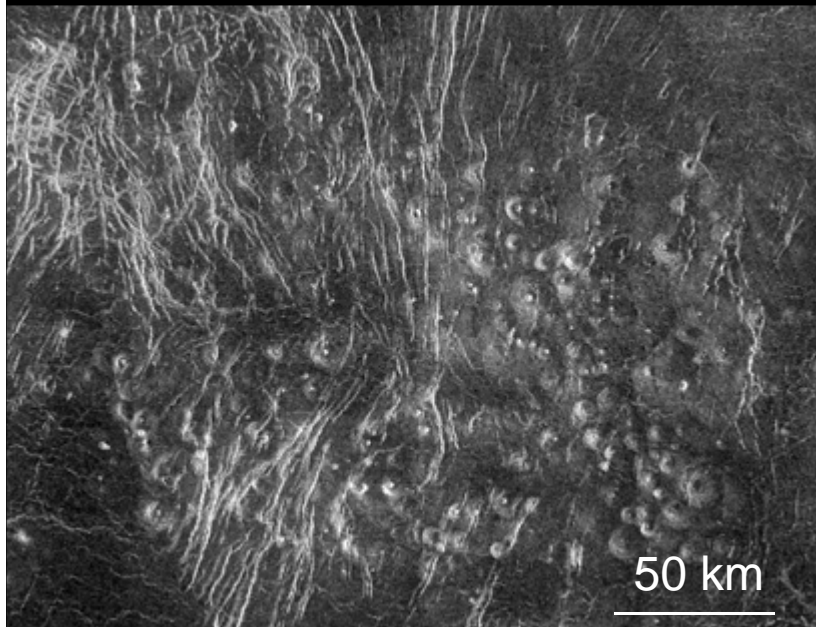
70 > 100 km

1200 > 20 km

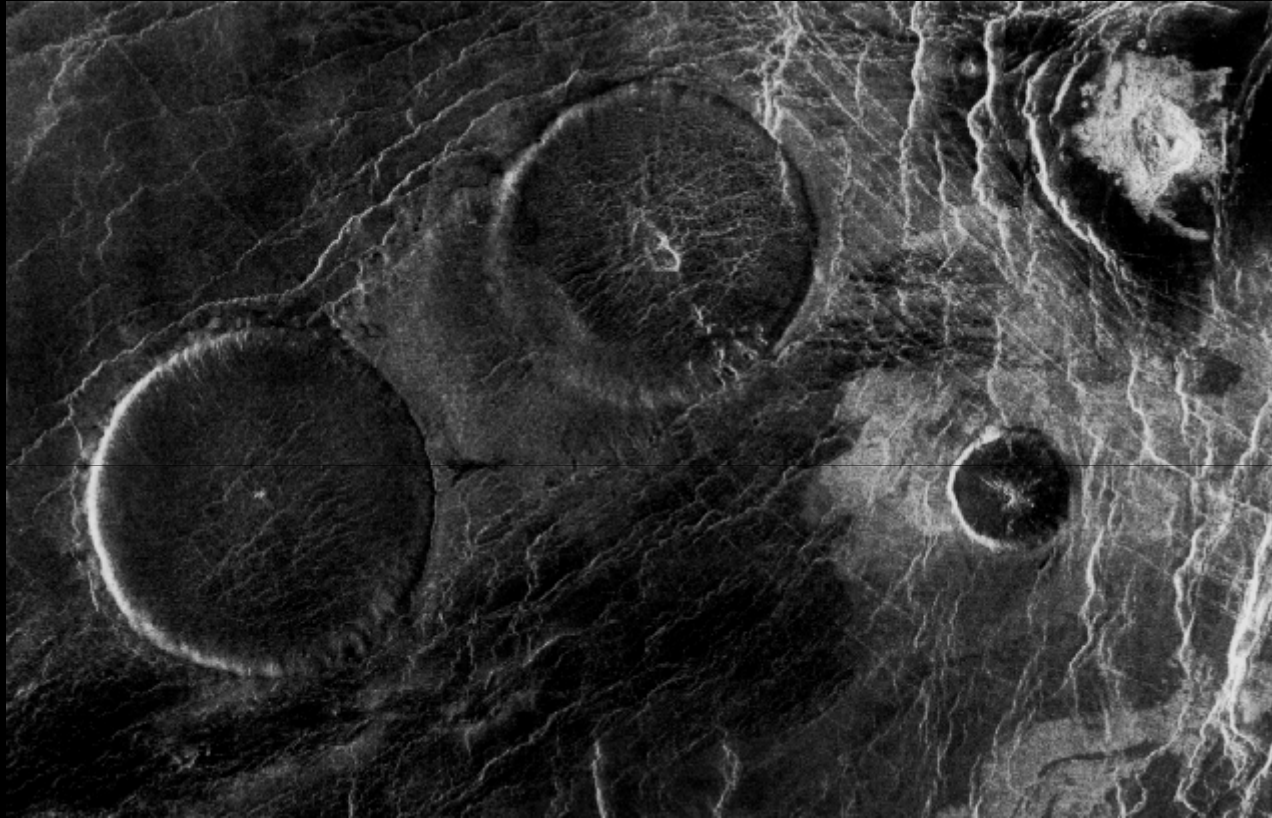
1 000 000 plus petits

Forte pression atmosphérique

Pas de volcanisme explosif



# Vénus, domes rhyolitiques



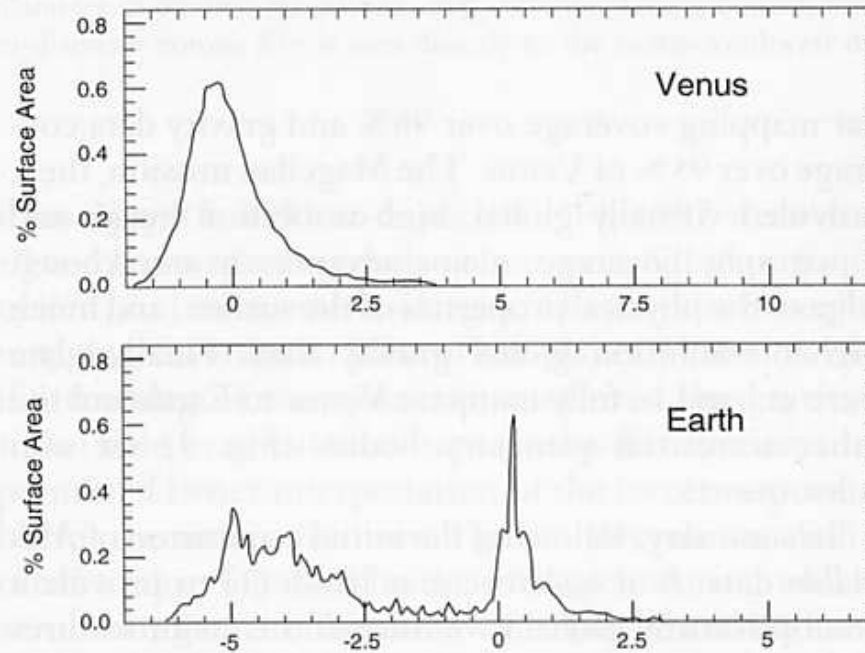
100 km

Domes rhyolitiques?

# Vénus, une seule plaque

Sur Terre dichotomie océans/continents.

Celle-ci est absente sur Vénus.



**FIGURE 5** Altitude frequency distribution of topography for Venus and Earth shown as hypsometric curves [representing the percentage of surface area at different elevations relative to mean sea level on Earth or mean planetary radius (MPR) on Venus].

# Vénus, composition des laves



« Globalement » du basalte alcalin.

Sonde russe  
Venera 14  
(1982)

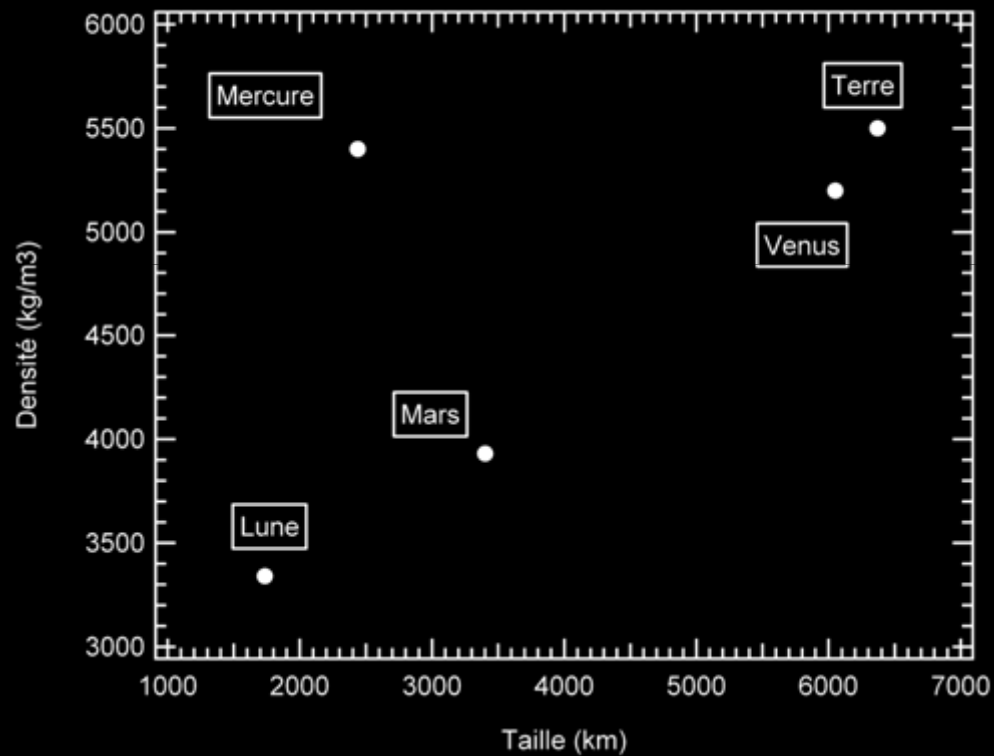


ВЕНЕРА-14 ОБРАБОТКА ИППИ АН СССР И ЦДКС



ВЕНЕРА-14 ОБРАБОТКА ИППИ АН СССР И ЦДКС

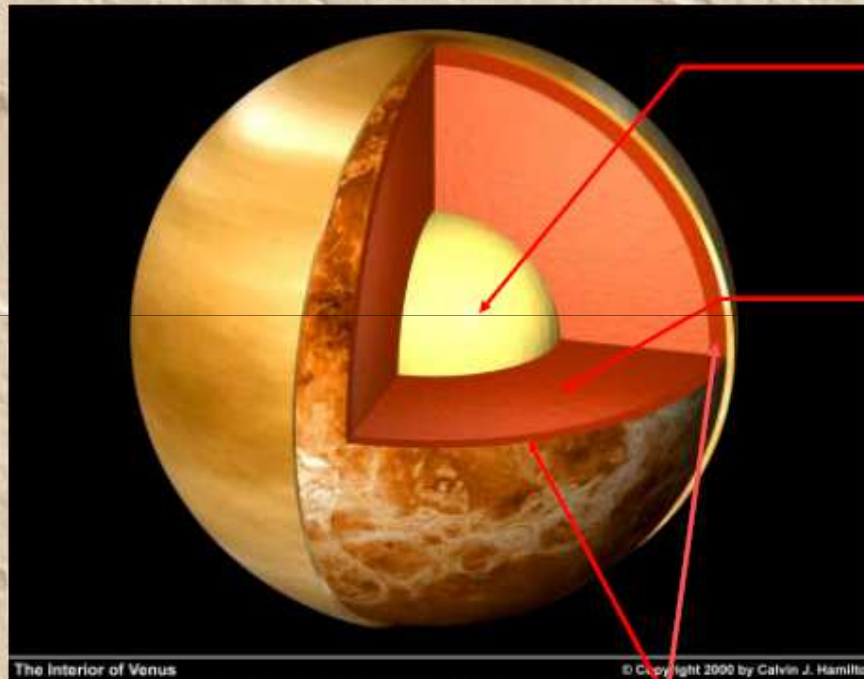
# Vénus, structure interne





# Vénus, structure interne

## Structure interne



Rayon 3270 km  
35,5 % masse totale

Manteau 2780 km  
64,5% masse totale

Absence de  
champ  
magnétique  
interne

épaisseur de la lithosphère  
➢ 400-500 km pour Beta Regio  
➢ 200-400 km en moyenne

Croûte  
entre 25 et 60 km

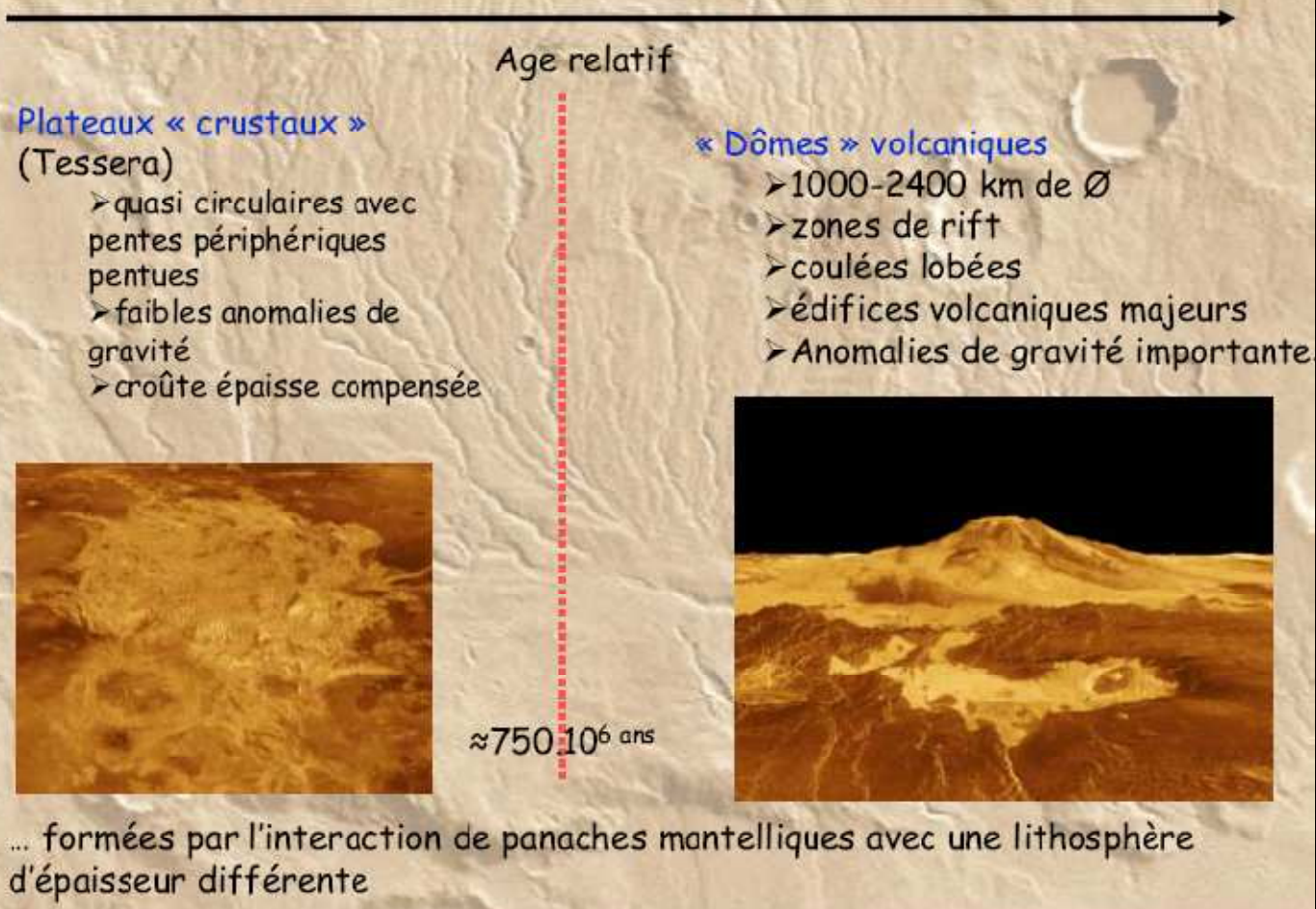
The Interior of Venus

© Copyright 2000 by Calvin J. Hamilton

# Vénus, tectonique



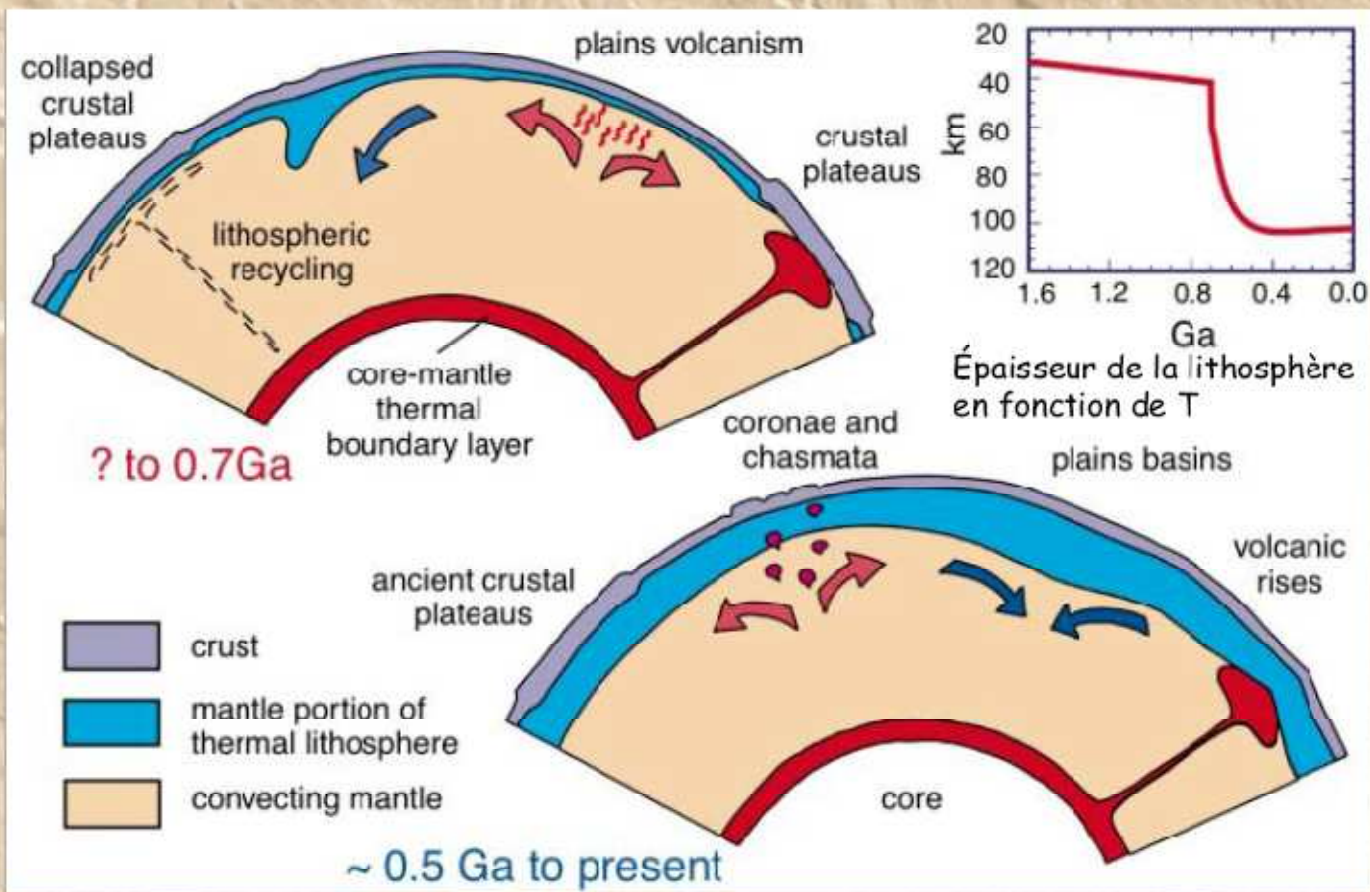
Deux régimes tecto-volcaniques globaux, deux structures emblématiques ...



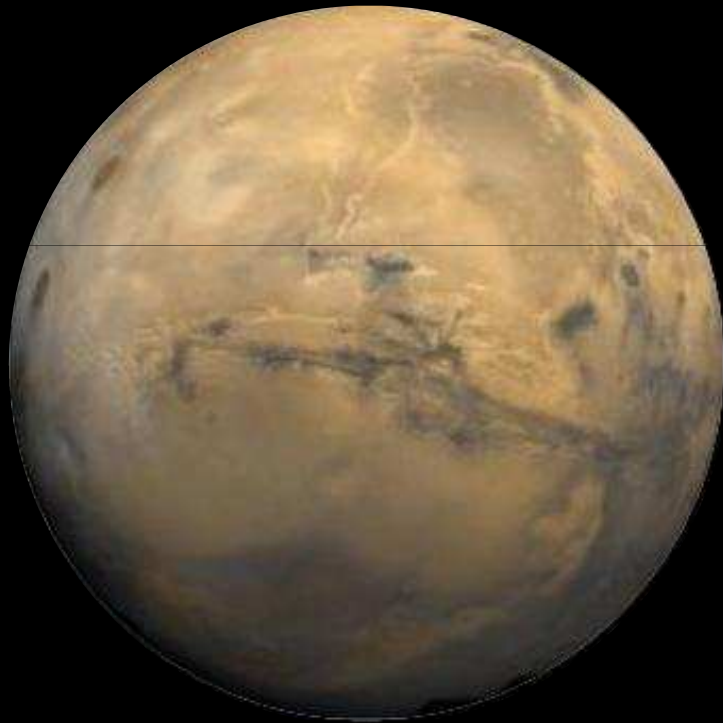
# Vénus, tectonique



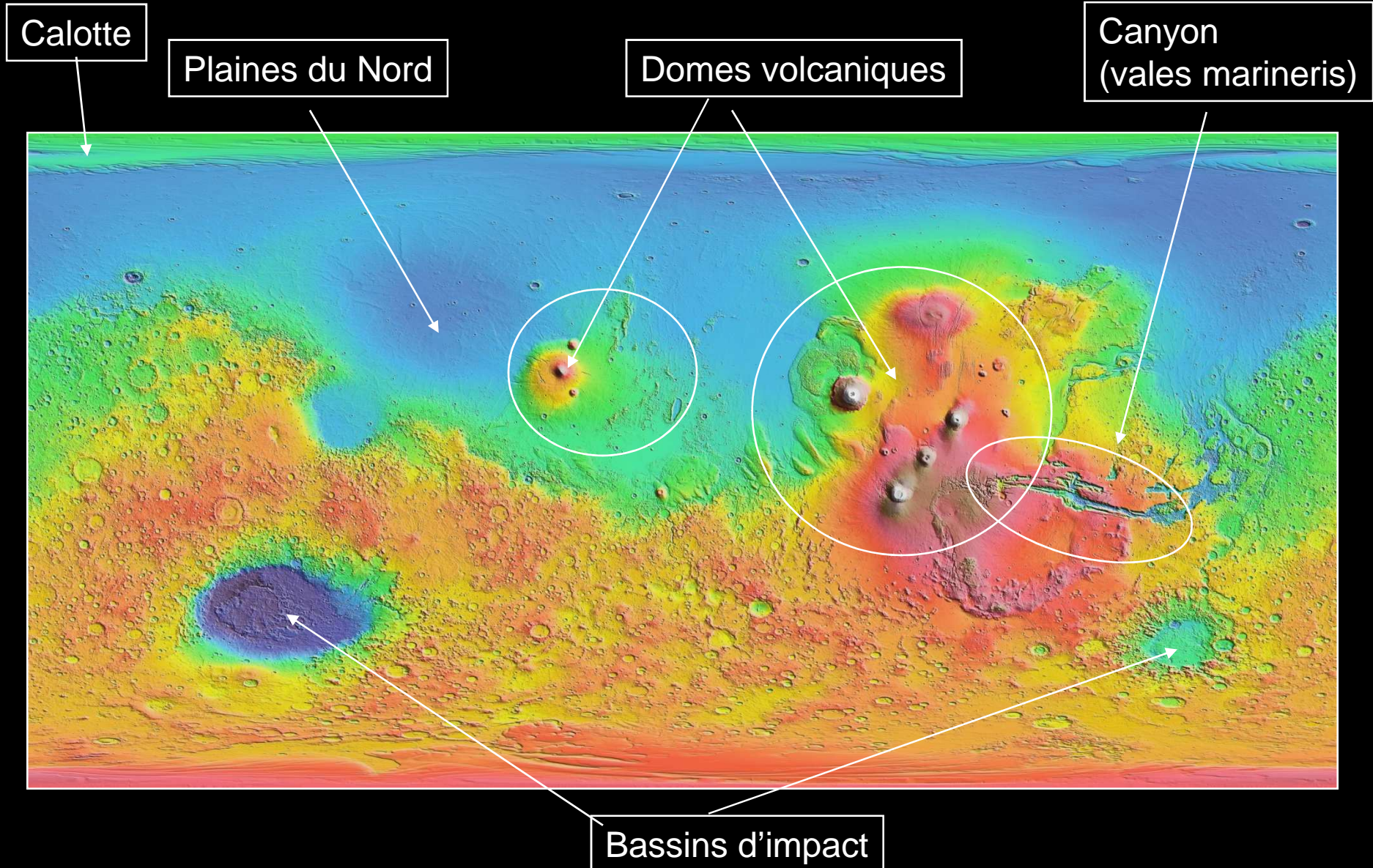
Modèle d'évolution de la structure interne et de la dynamique vénusienne



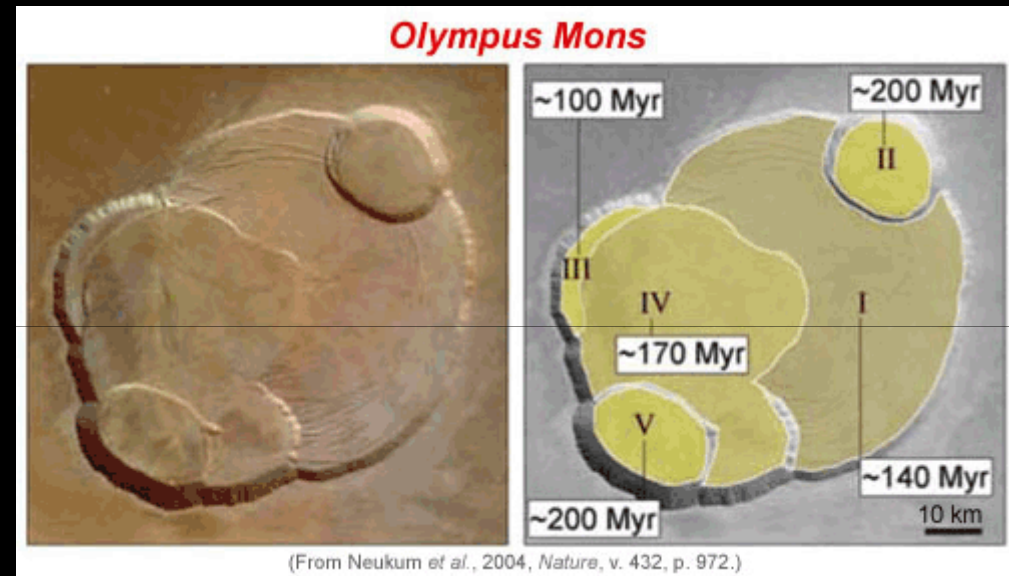
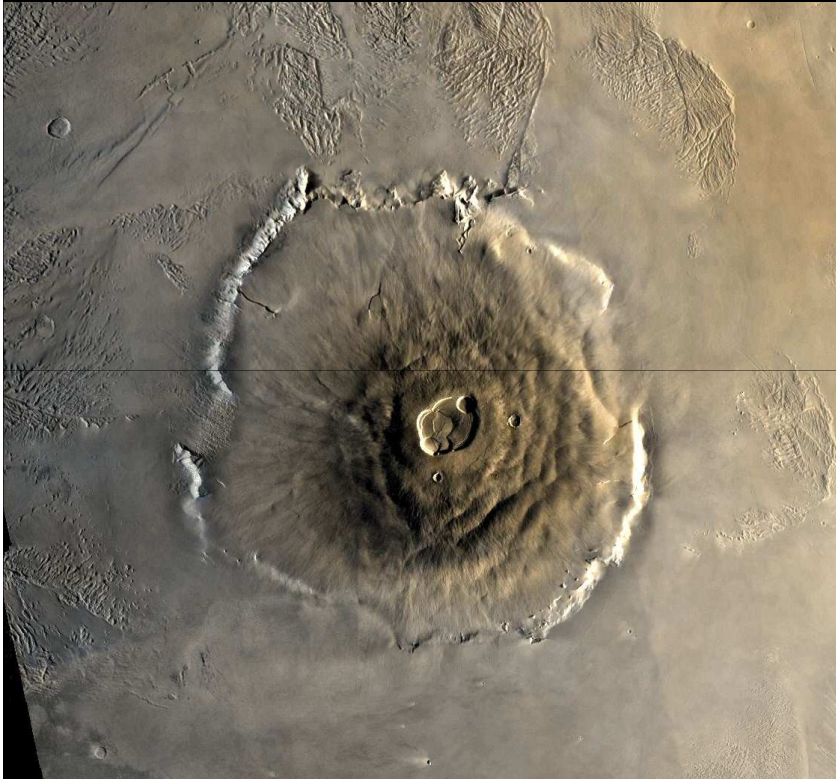
Mars ♂



# Mars, topographie

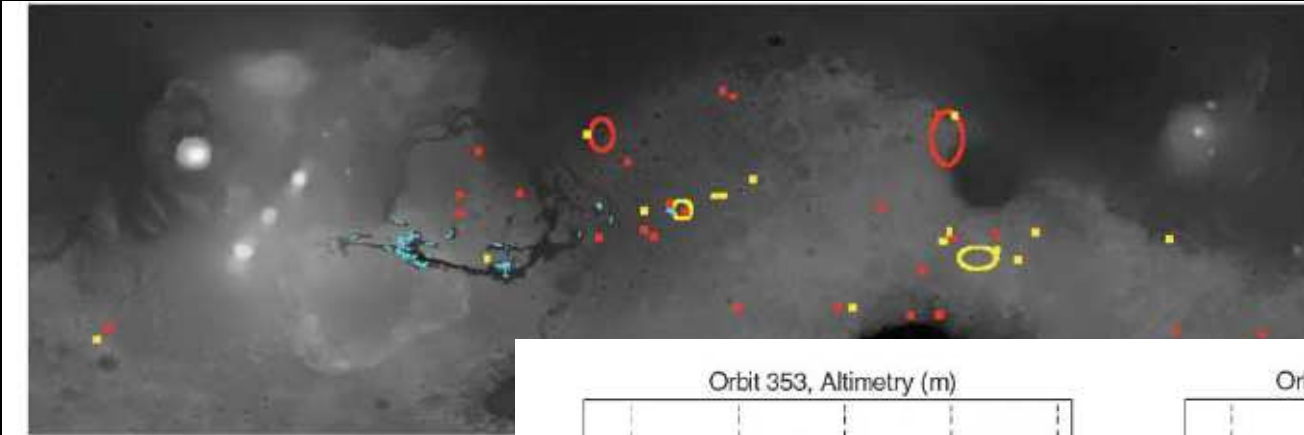


# Mars, un volcanisme récent



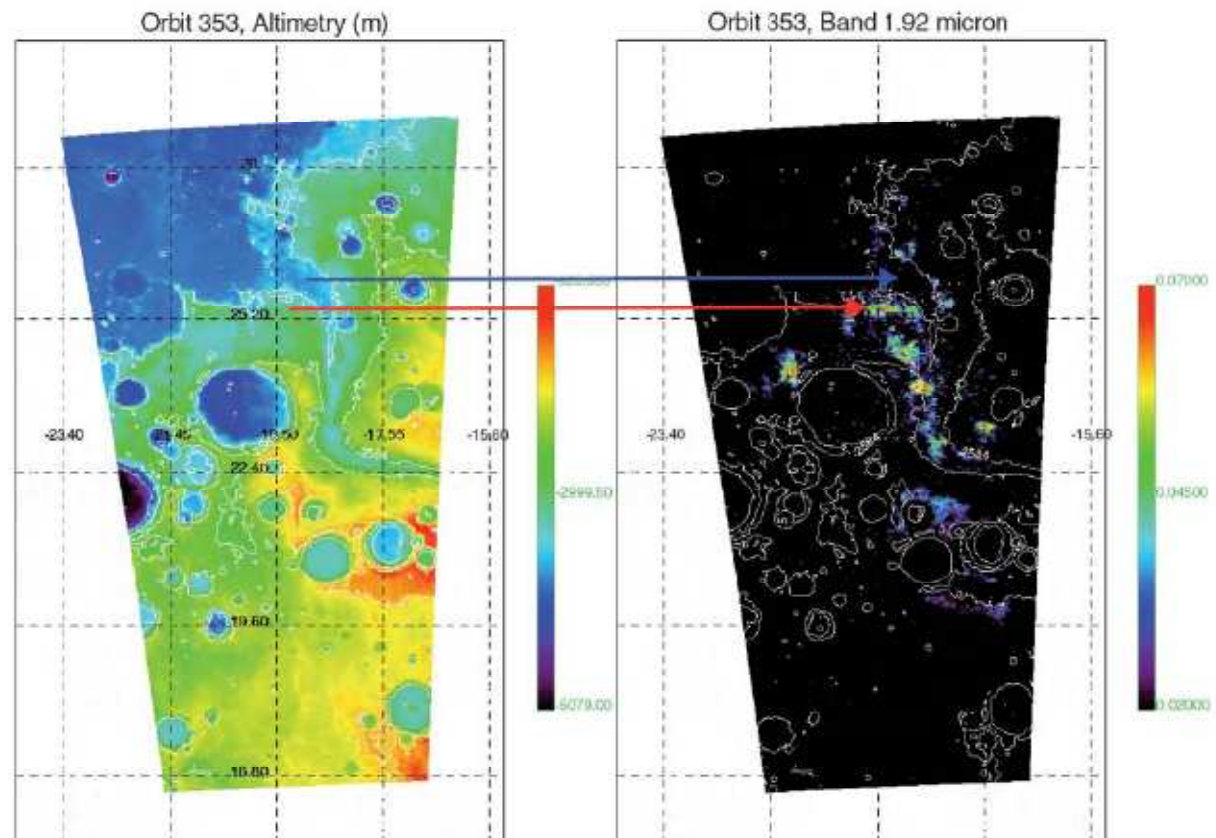
Volcanisme basaltique.  
Des roches acides ont été reportées.

# Mars, phyllosilicates

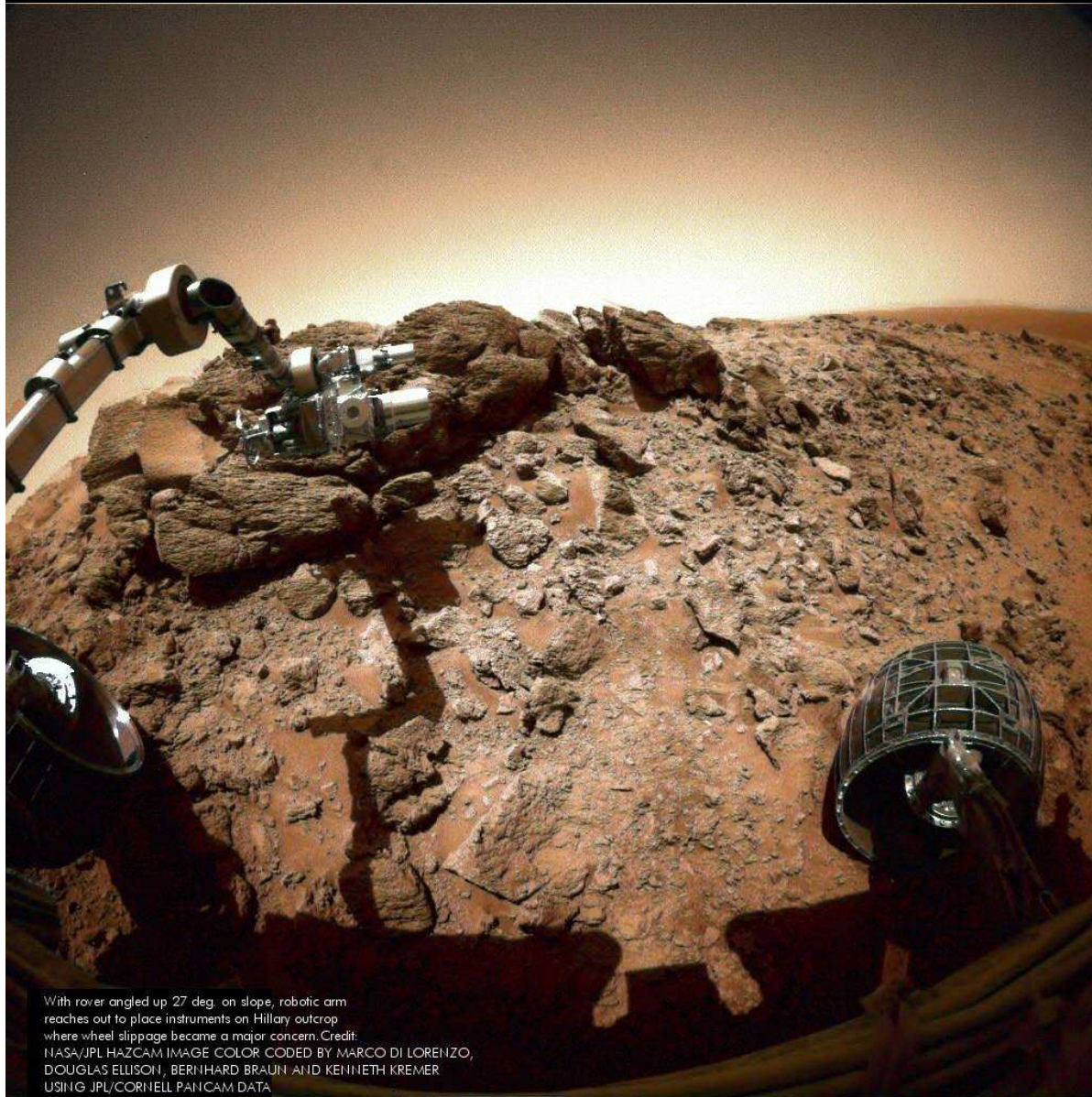


Bibring et al., 2006

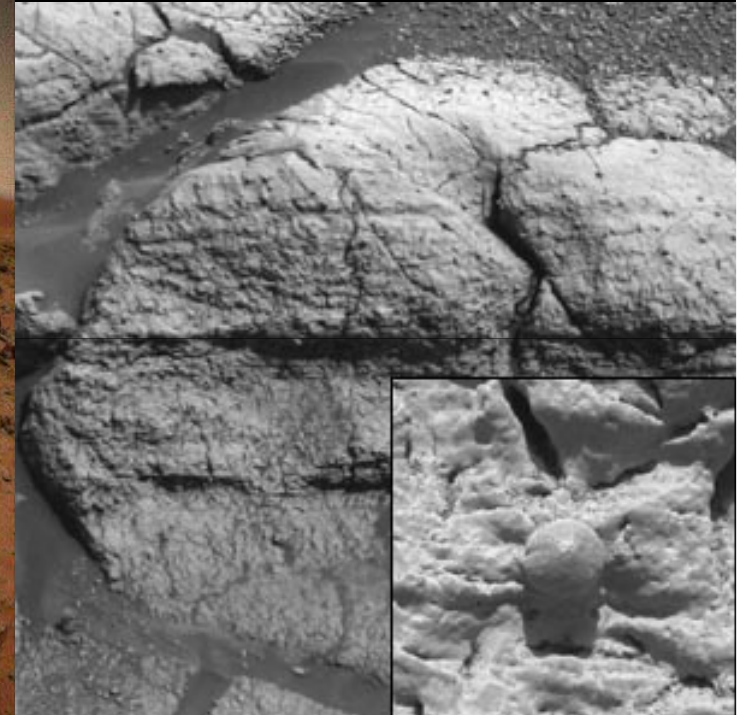
Altération aqueuse.



# Mars, des sulfates



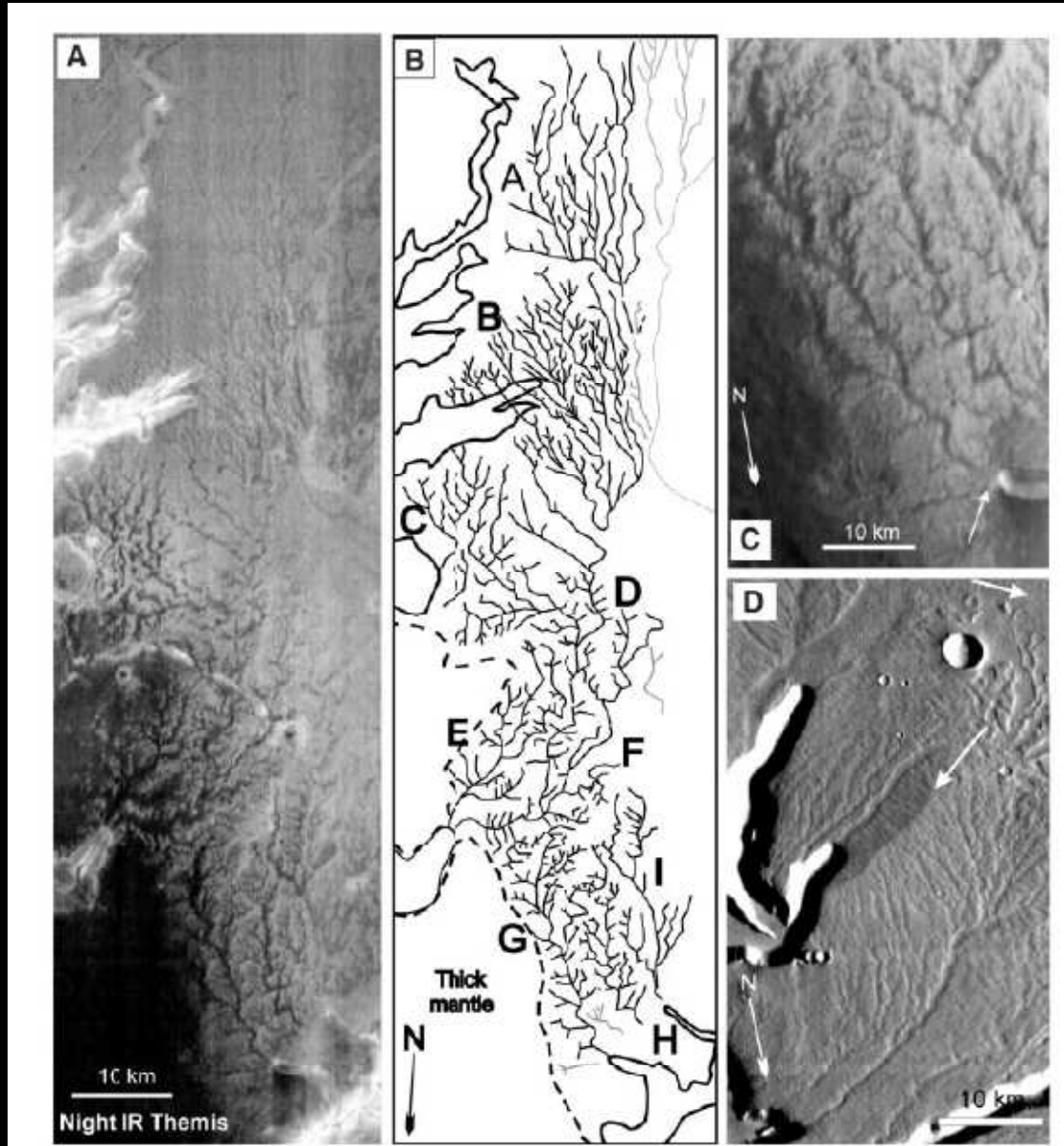
With rover angled up 27 deg. on slope, robotic arm reaches out to place instruments on Hillary outcrop where wheel slippage became a major concern. Credit: NASA/JPL HAZCAM IMAGE COLOR CODED BY MARCO DI LORENZO, DOUGLAS ELLISON, BERNHARD BRAUN AND KENNETH KREMER USING JPL/CORNELL PAN/CAM DATA.



Depot en milieu aqueux?



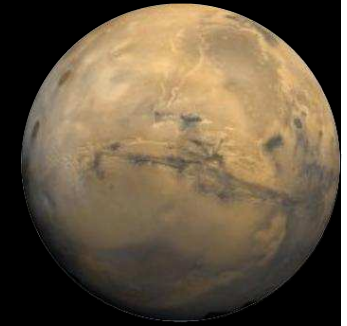
# Mars, réseau hydrographiques



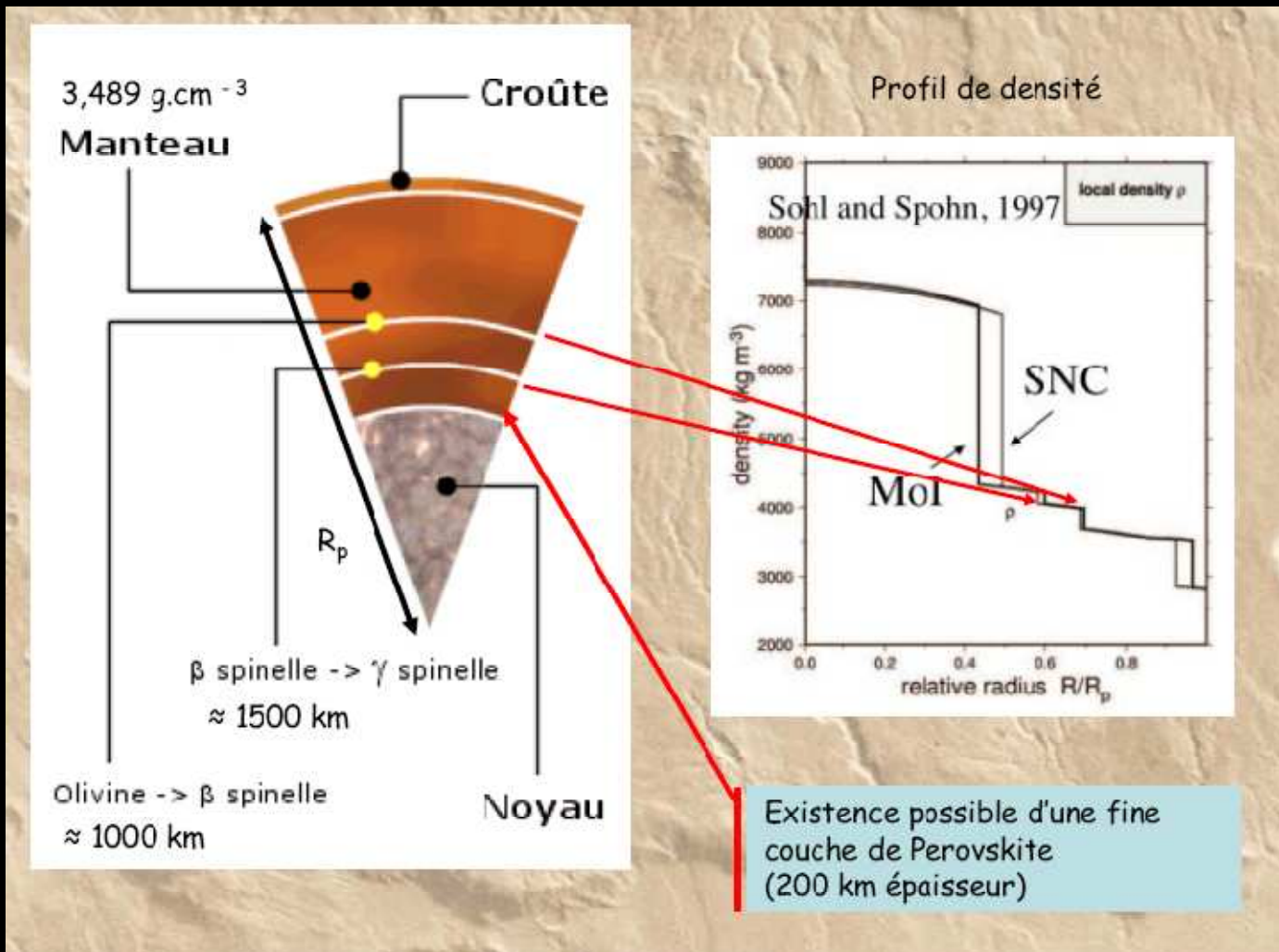
*Mangold et al., 2004*

Il a plu sur Mars.

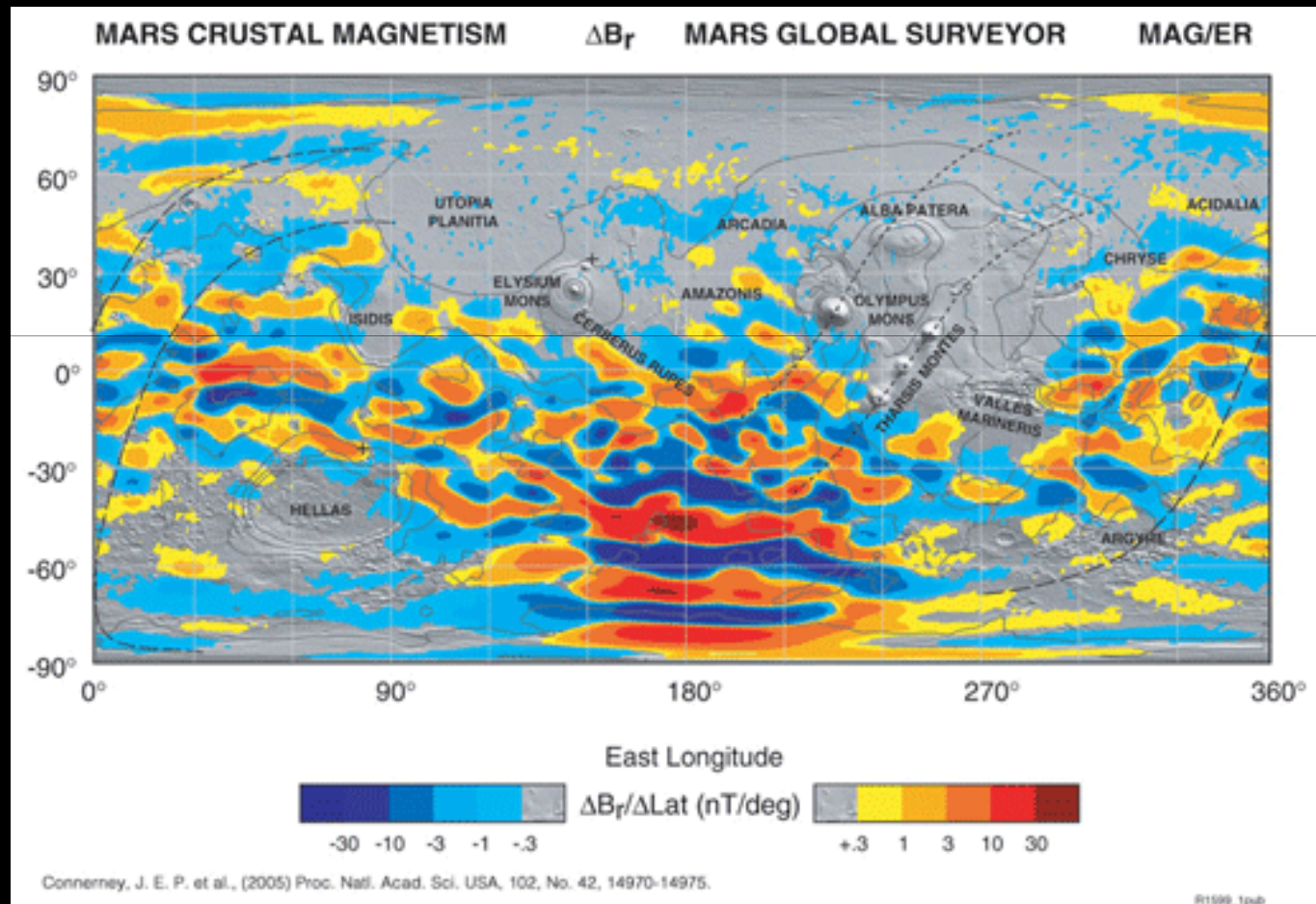
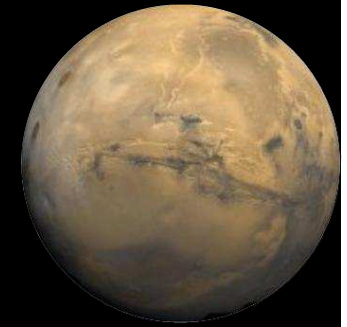
# Mars, structure radiale



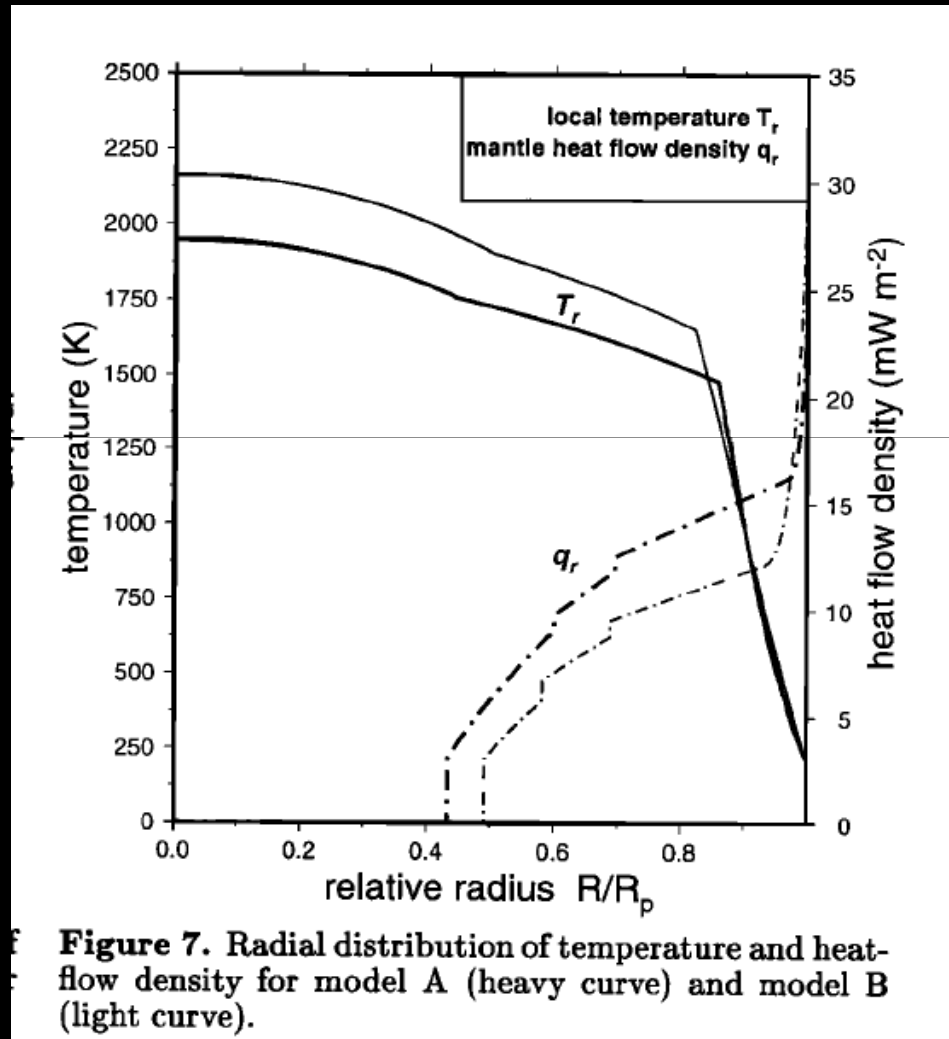
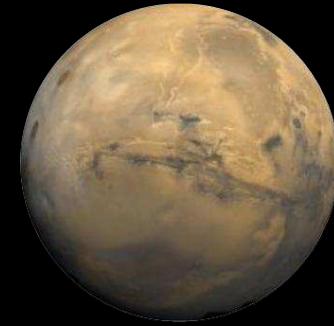
Modèle pas trop mal contraint grâce aux météorites.



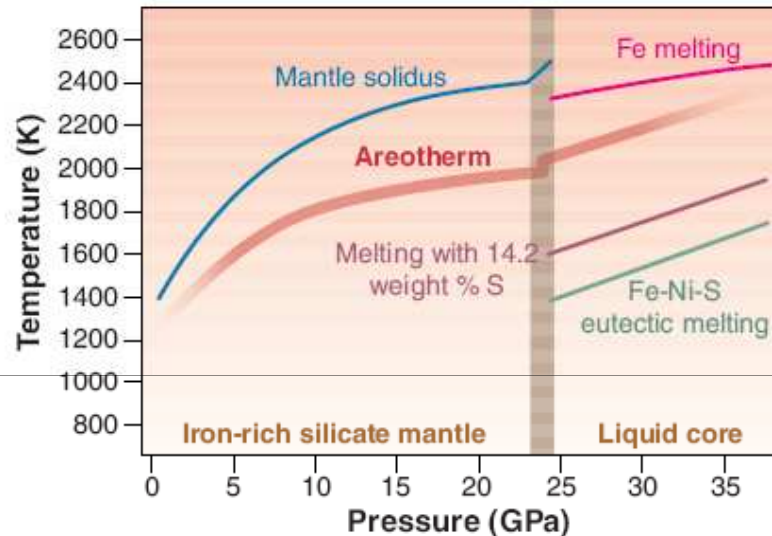
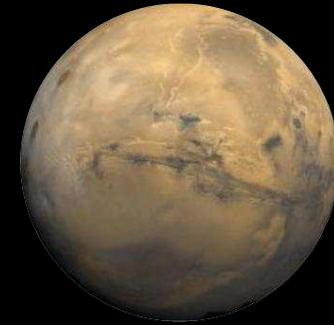
# Mars, champ magnétique



# Mars, noyau liquide?

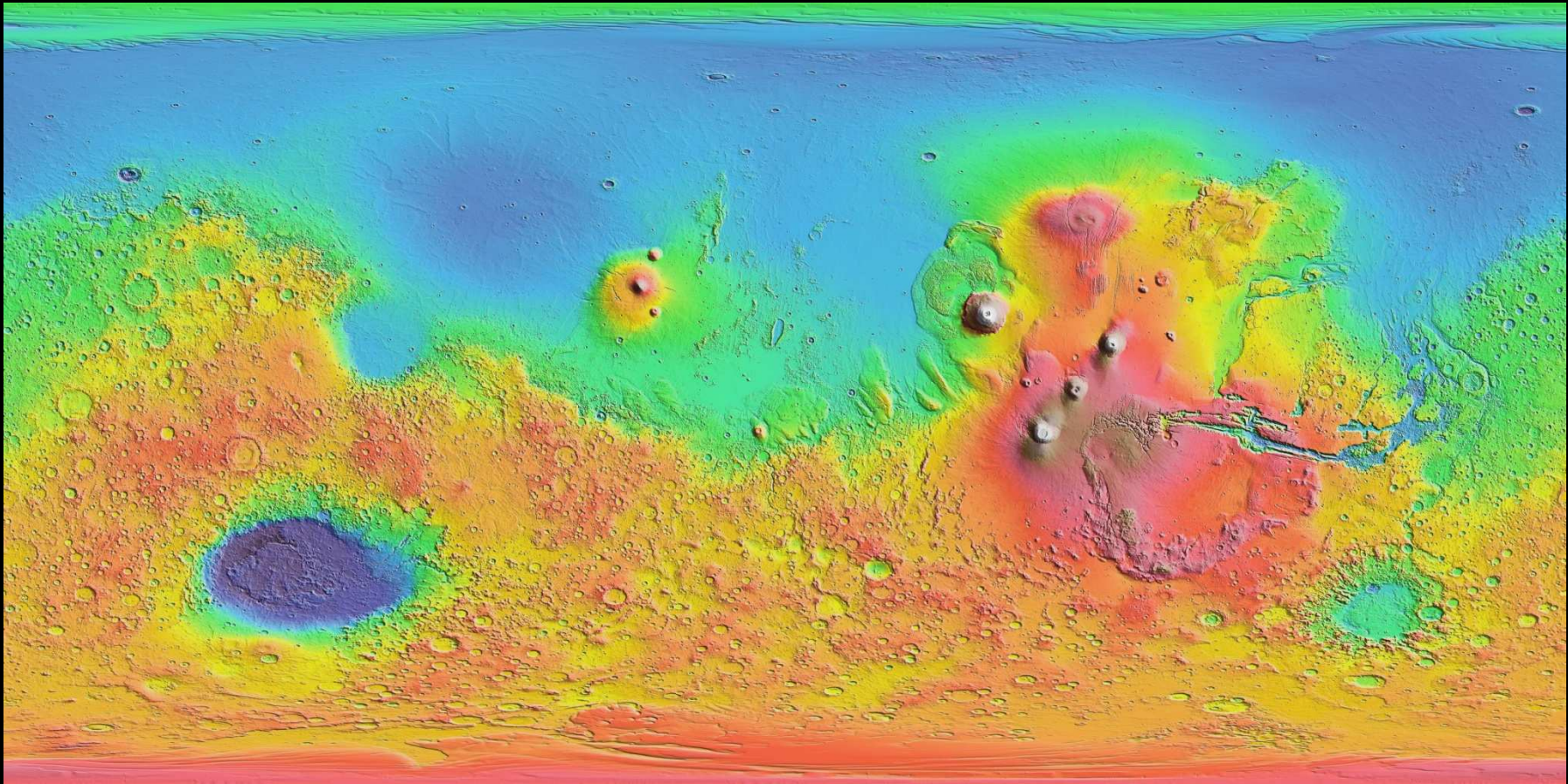
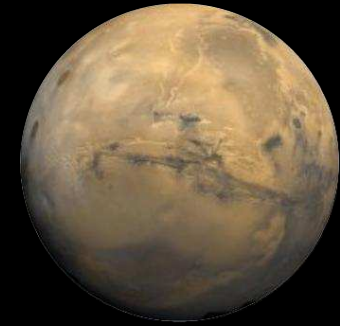


# Mars, noyau liquide?

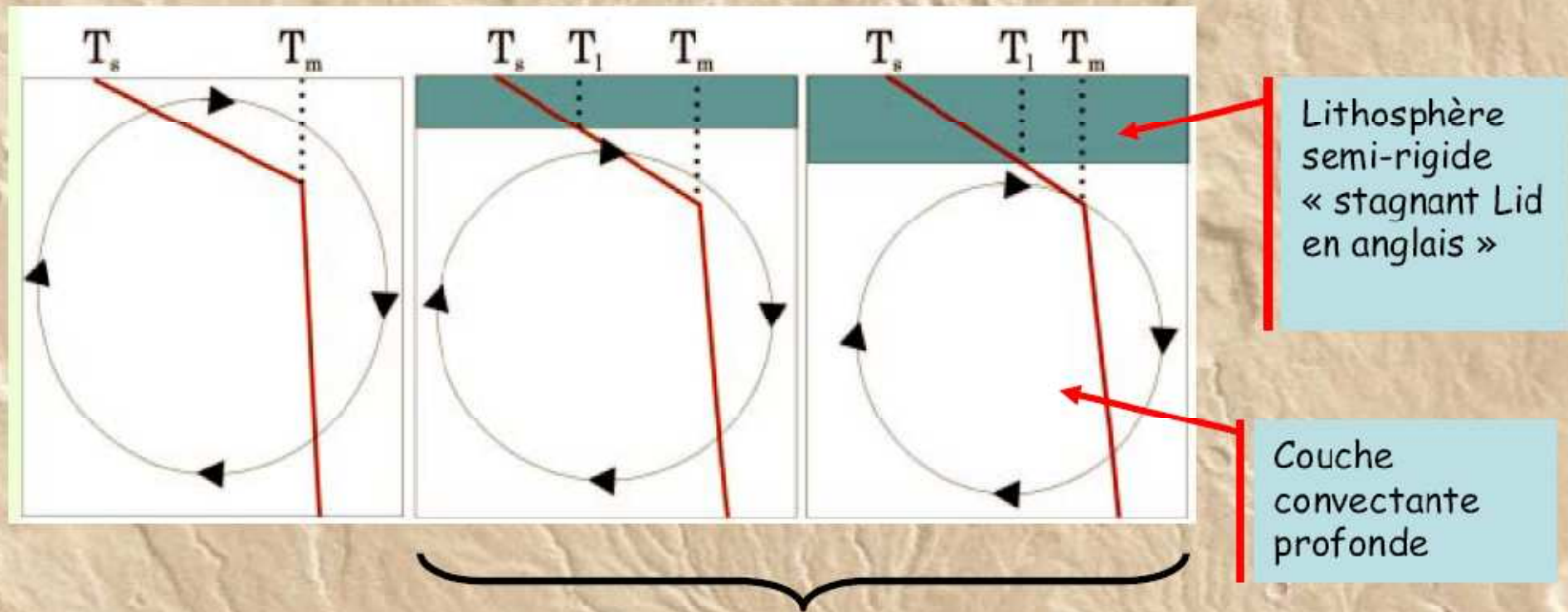


**Evidence for a liquid core.** Melting curves of putative martian mantle and core materials are compared with the estimated temperature profile (areotherm) for the martian interior. The martian mantle is expected to be solid, because its temperature is lower than the mantle solidus (the temperature at which melting begins). The minimum melting temperature in the Fe-Ni-S system (the eutectic melting temperature) at martian core pressures is also shown. Given an estimated core temperature of 2000 K, Mars has an entirely liquid core for a model core composition with 14.2 weight % sulfur.

# Mars, dichotomie



## ✓ Modèle d'évolution thermique de la mono-plaque



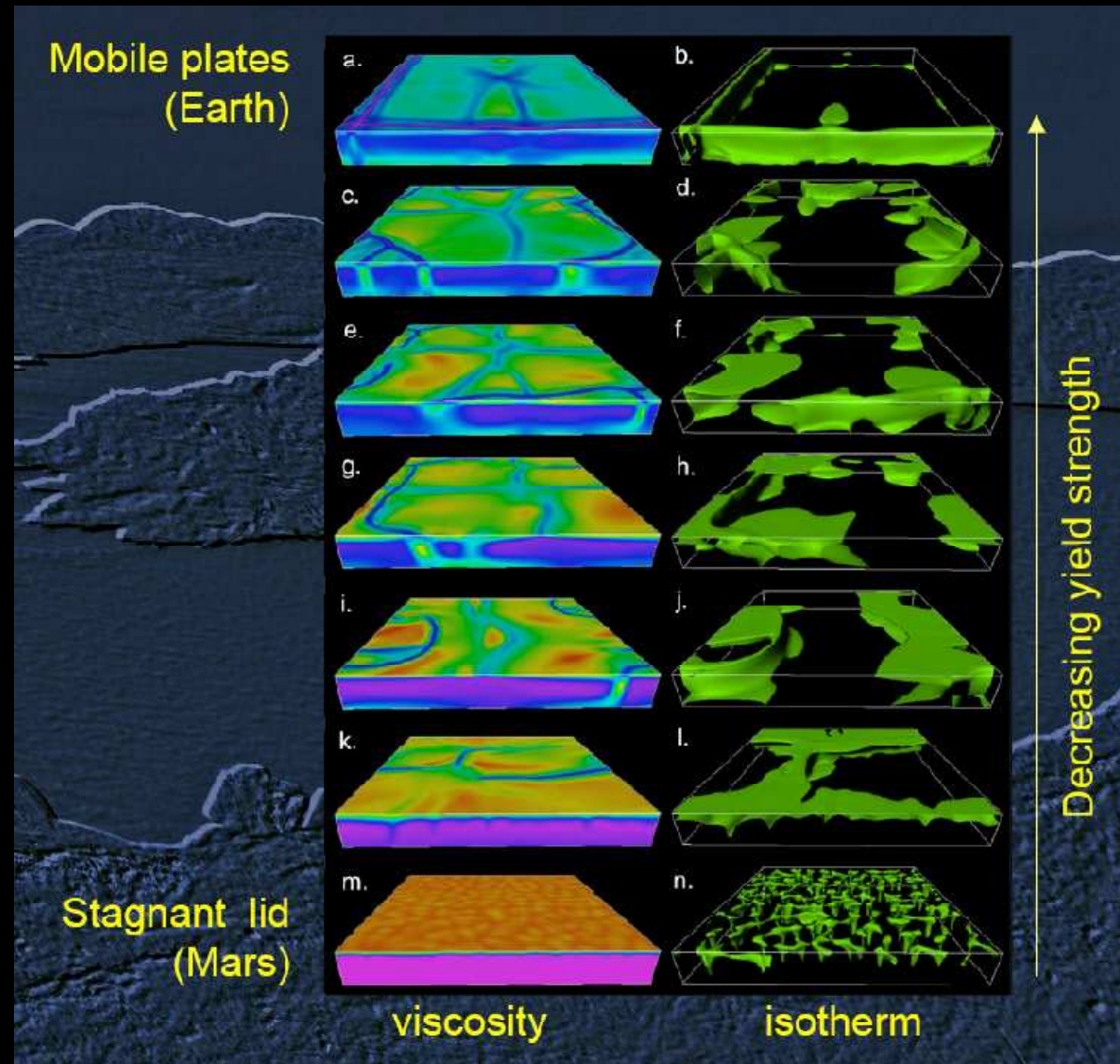
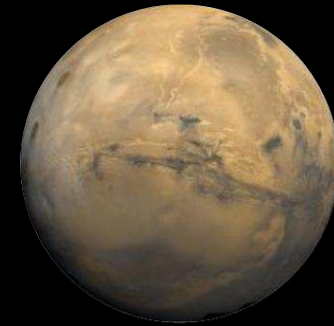
### Tectonique des plaques

La croûte est constamment recyclée •  
par de croissance verticale  
Refroidit efficacement le manteau  
Les hétérogénéités chimiques initiales de  
la lithosphère océanique disparaissent

### Mono-plaque

La lithosphère reste à peu près toujours  
à même  $T$  mais s'épaissit au cours du  
temps  
 $T$  toujours élevée de la couche  
convectante profonde  
Les hétérogénéités chimiques initiales de  
la lithosphère demeurent

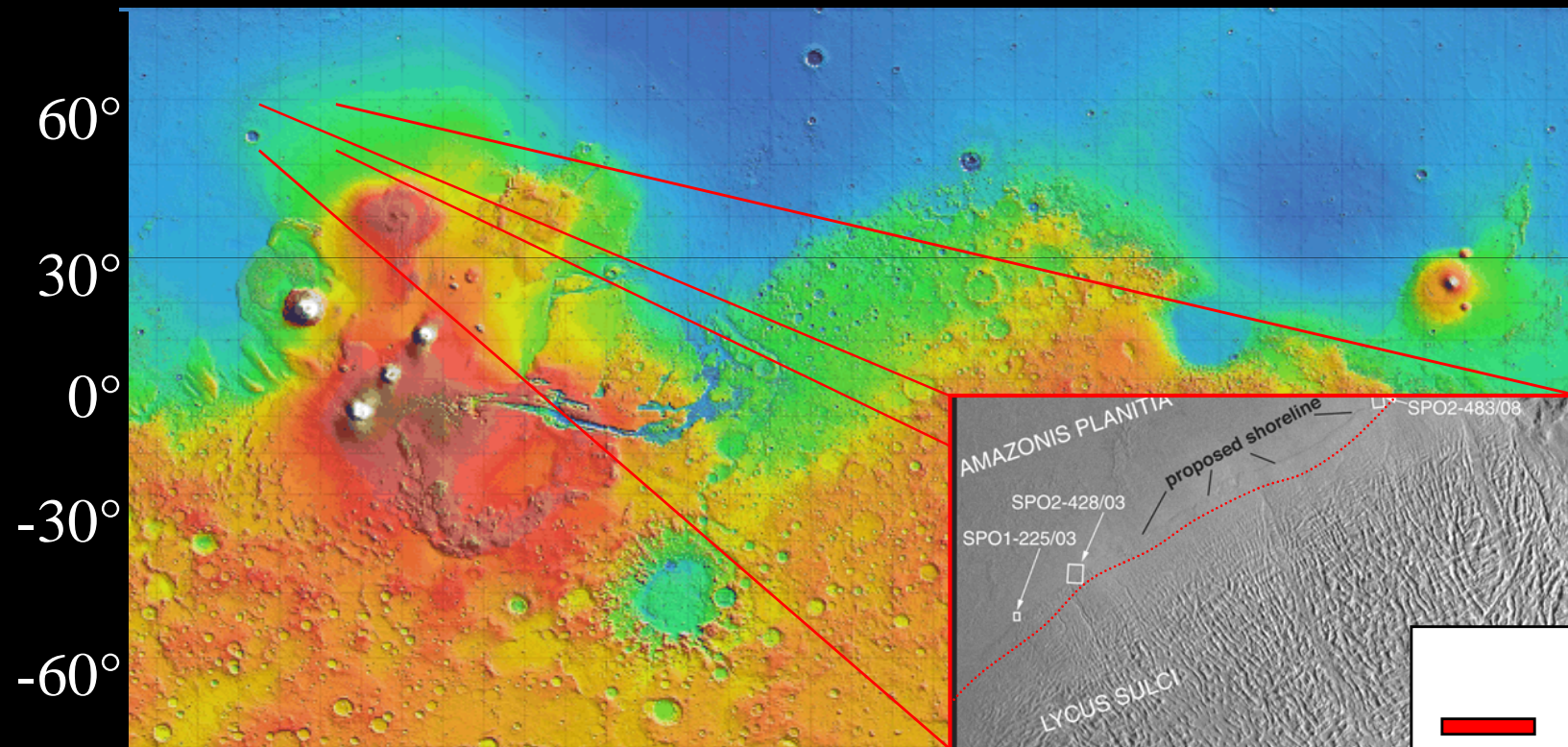
# Qu'est-ce qui controle la tectonique?





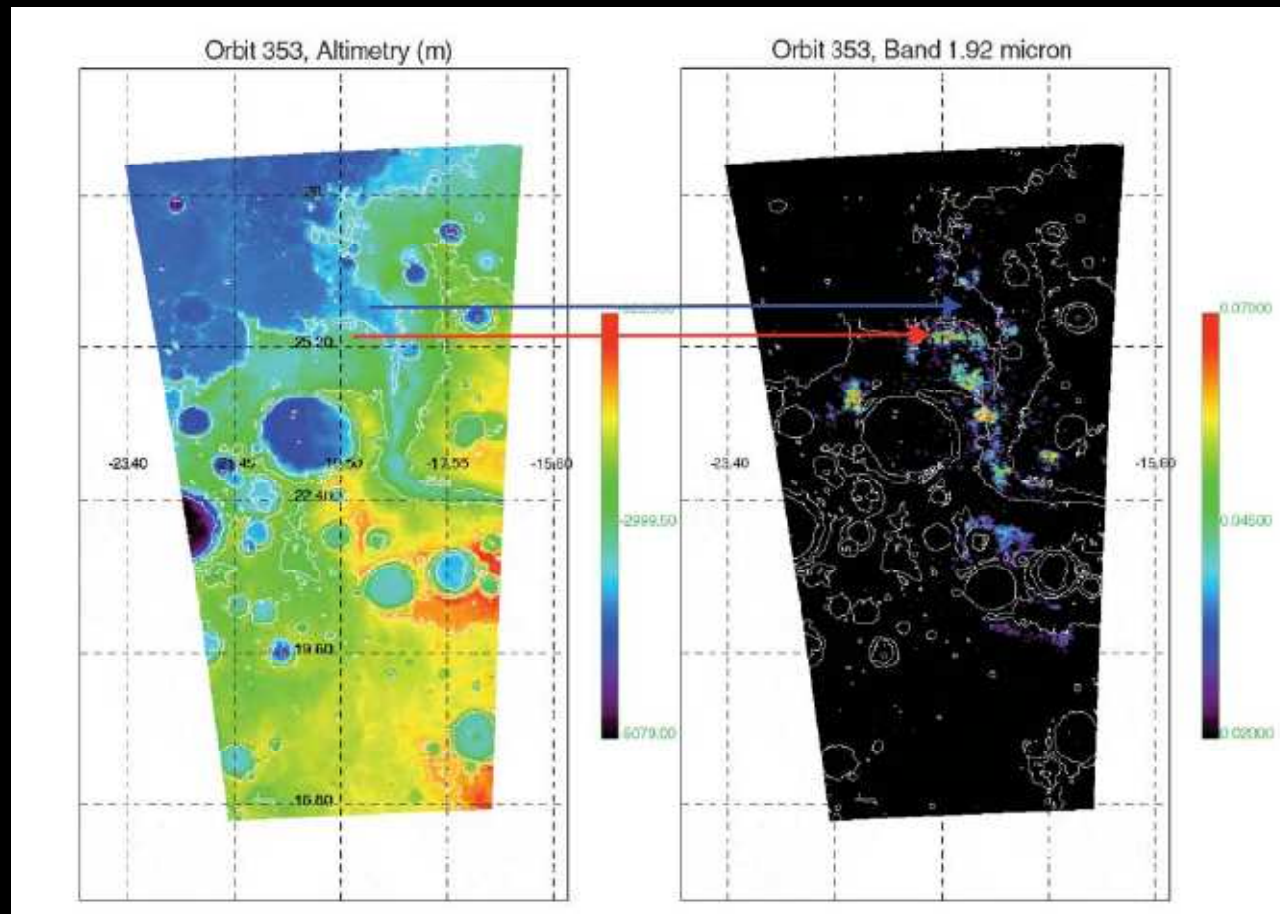
# Une ligne de rivage

-8 0 12 km

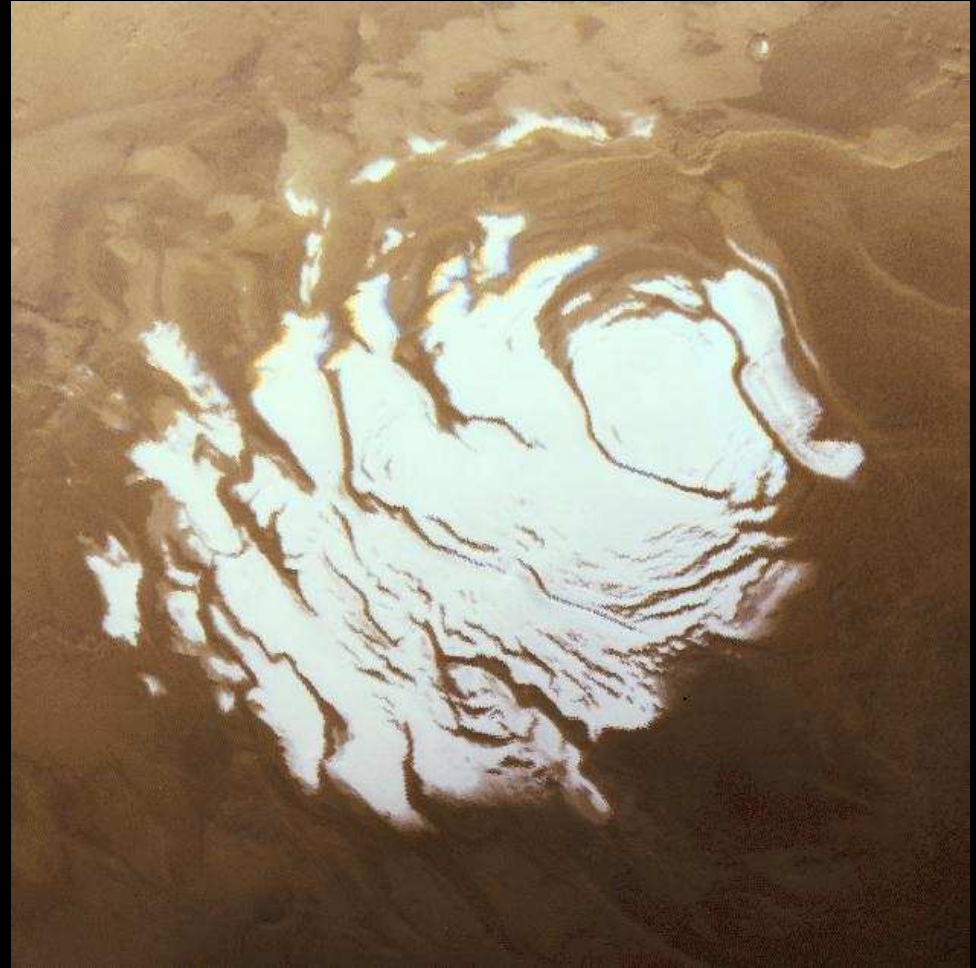
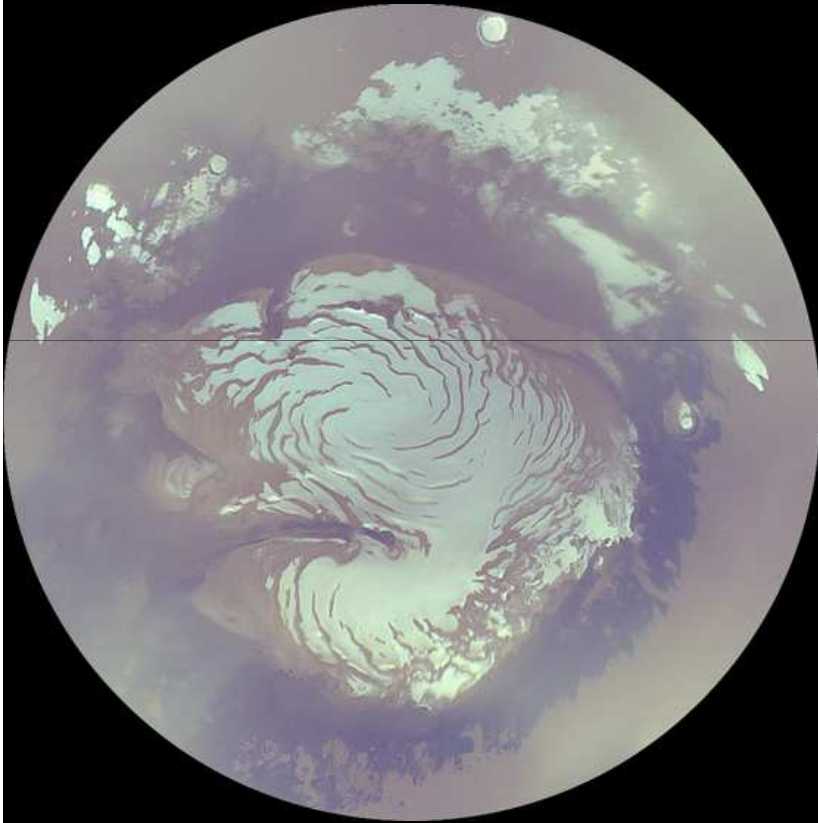


→ Un océan sur Mars?

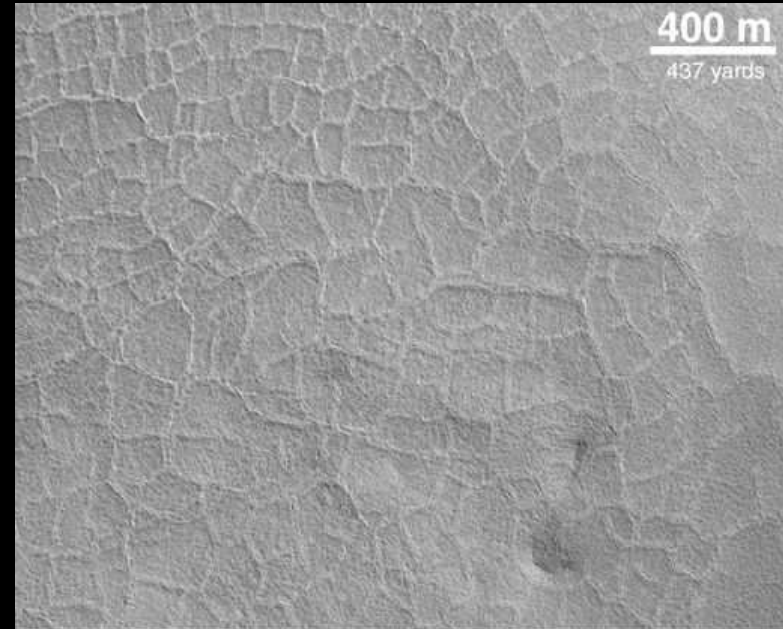
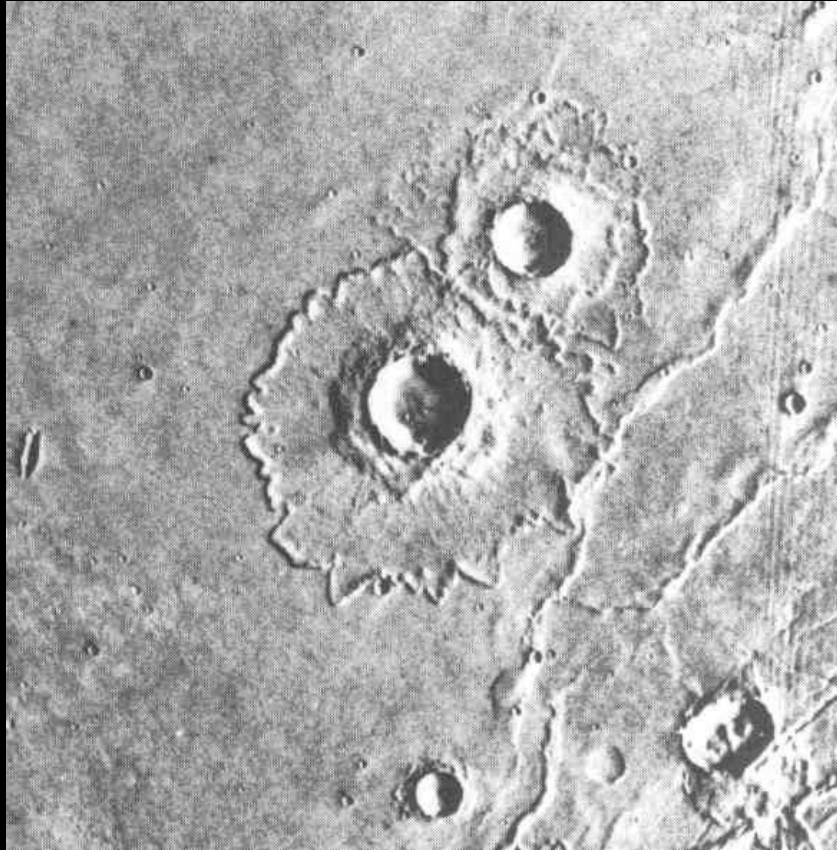
# Des argiles!



# Des calottes polaires

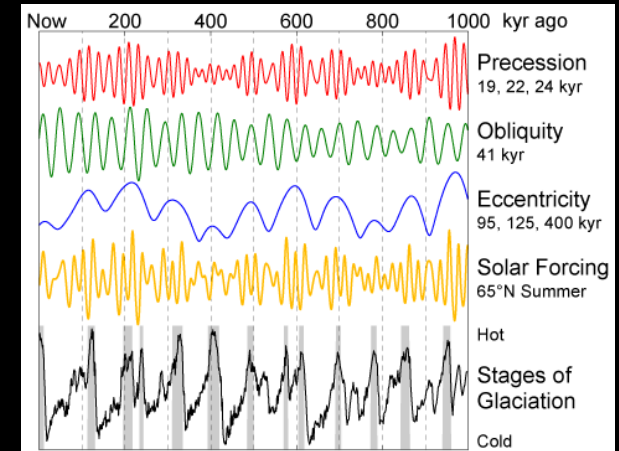
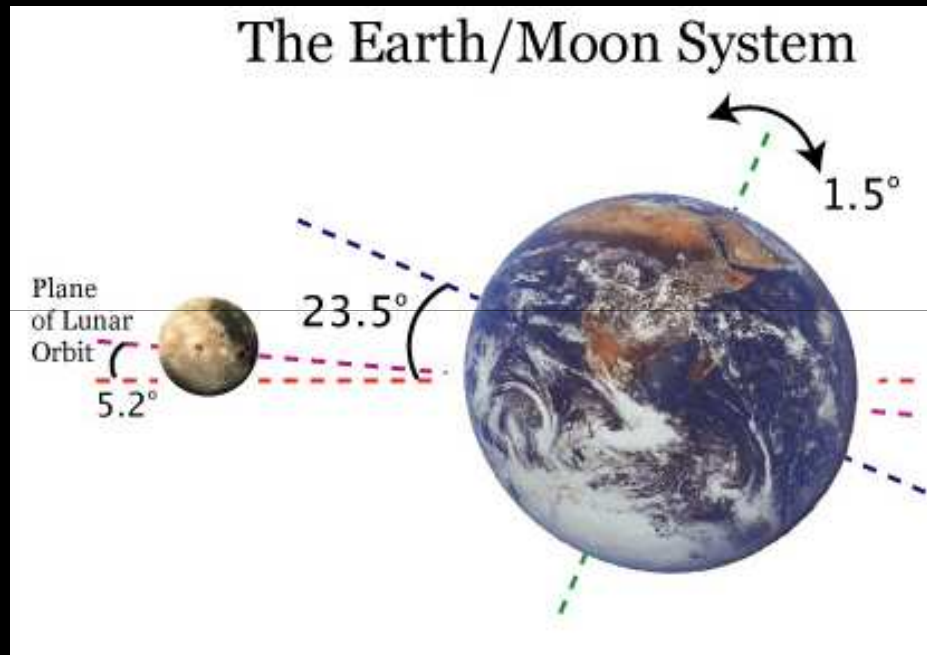


# Un pergélisol

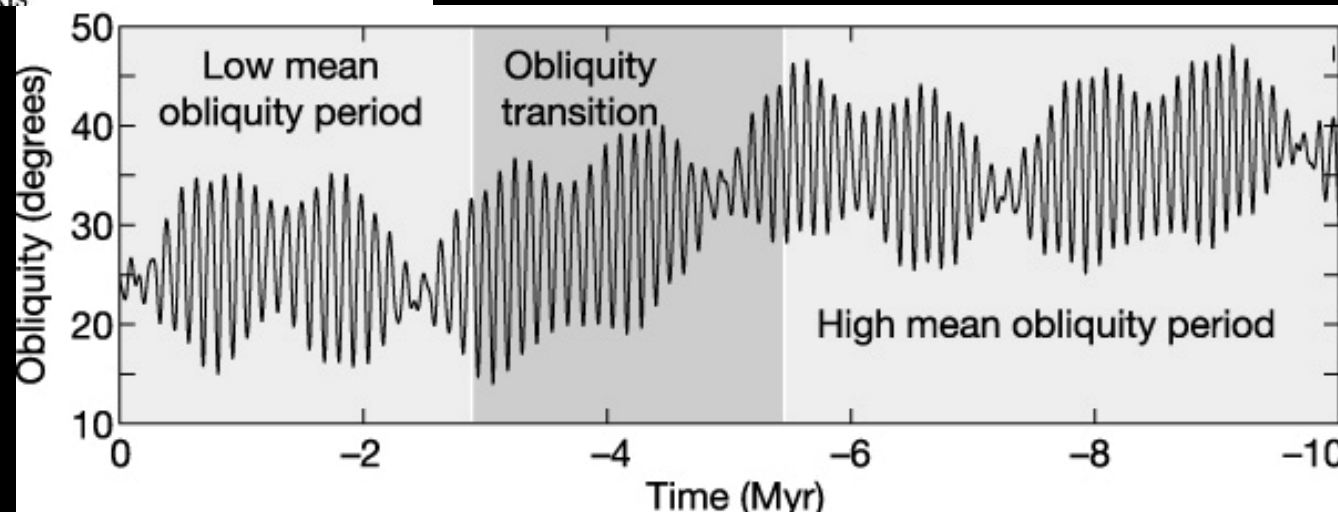
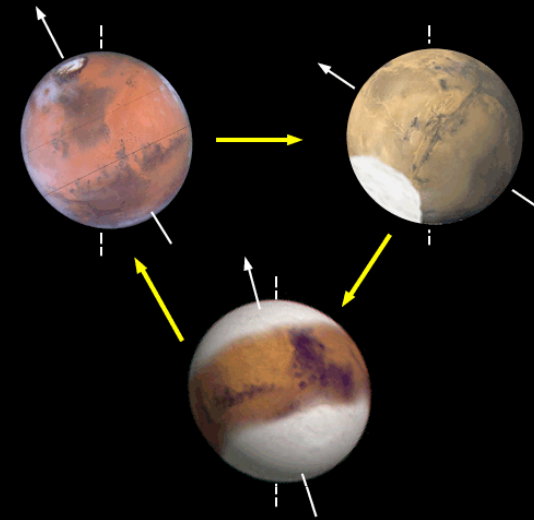
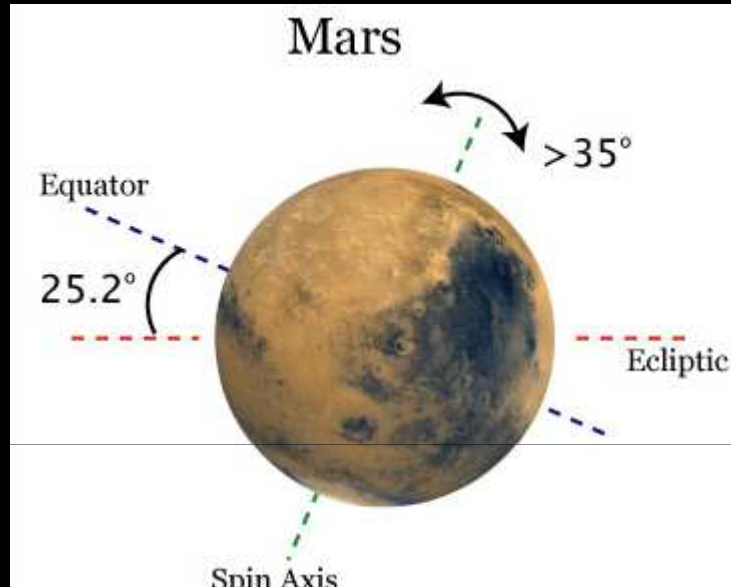


MOC2-150 Malin Space Science Systems/NASA

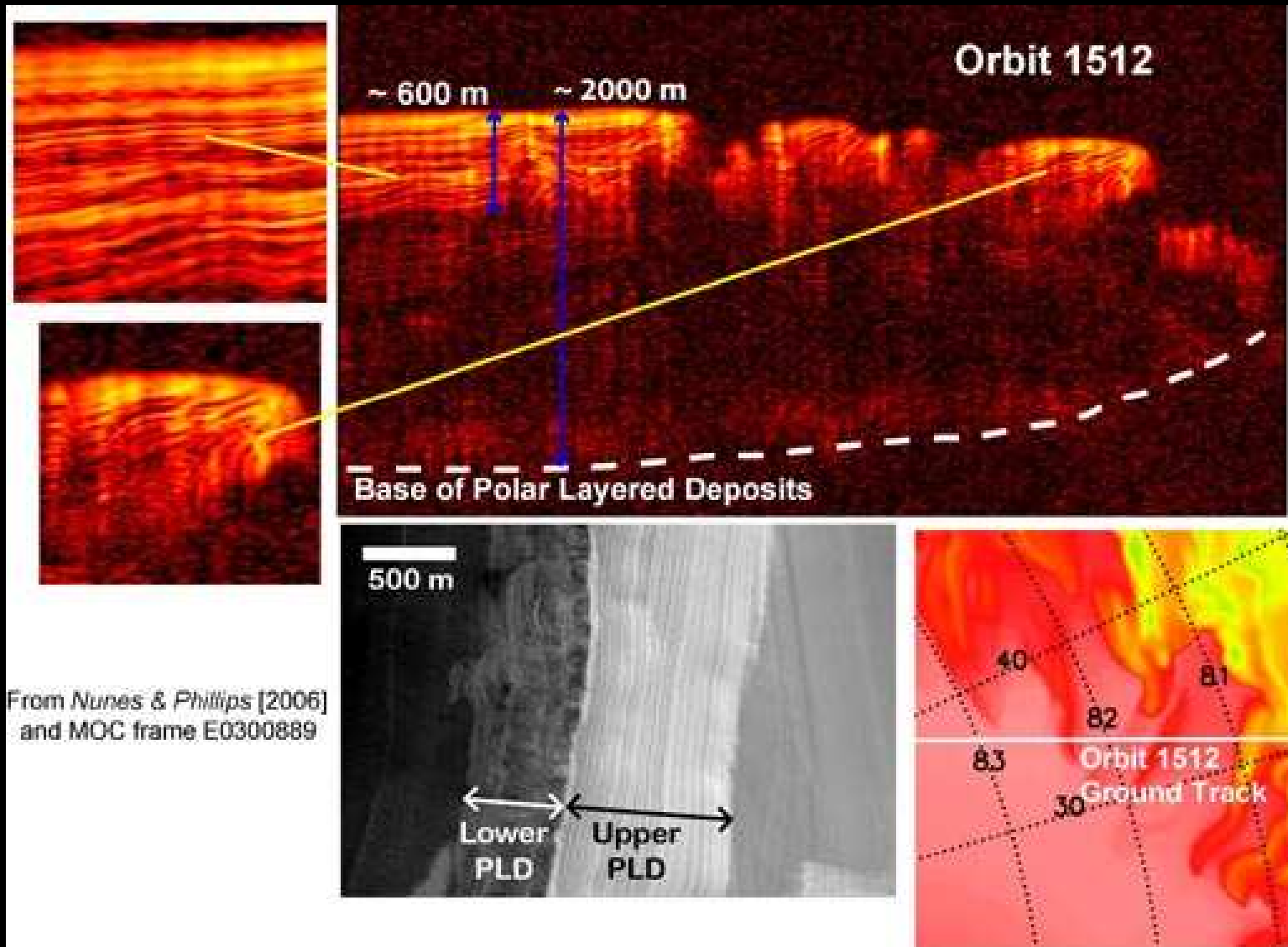
# Les cycles astronomiques sur Terre



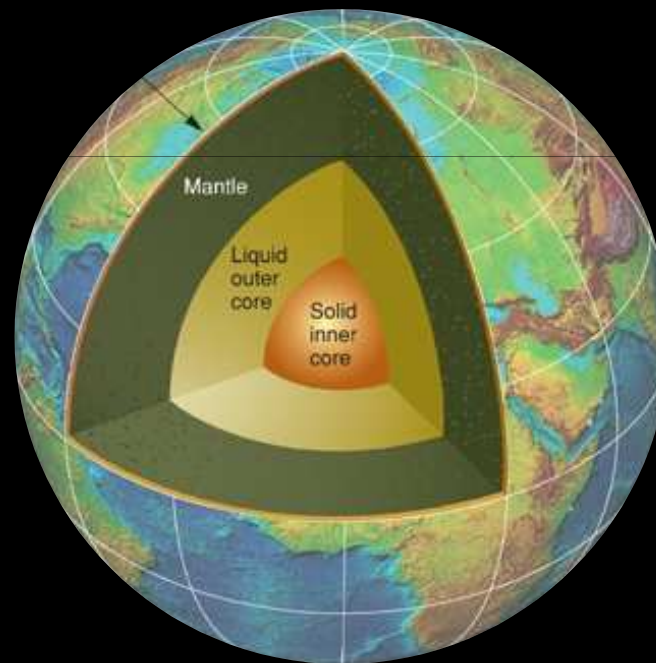
# Les cycles astronomiques sur Mars



# Les cycles astronomiques sur Terre

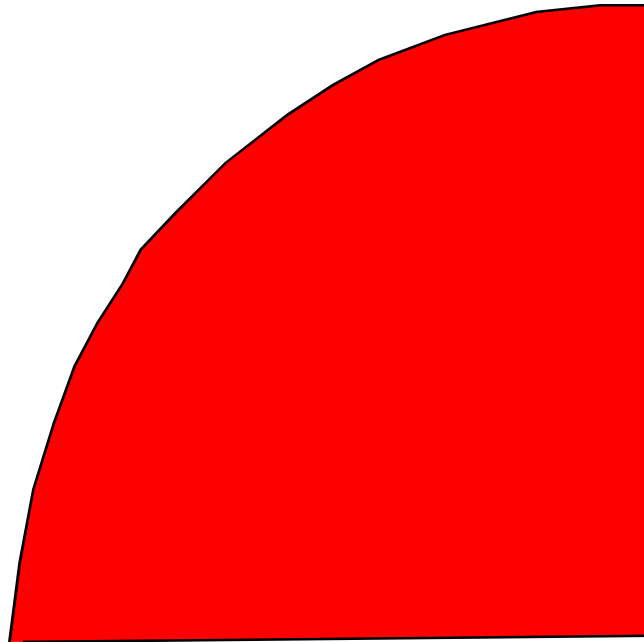


# La différenciation des enveloppes solides

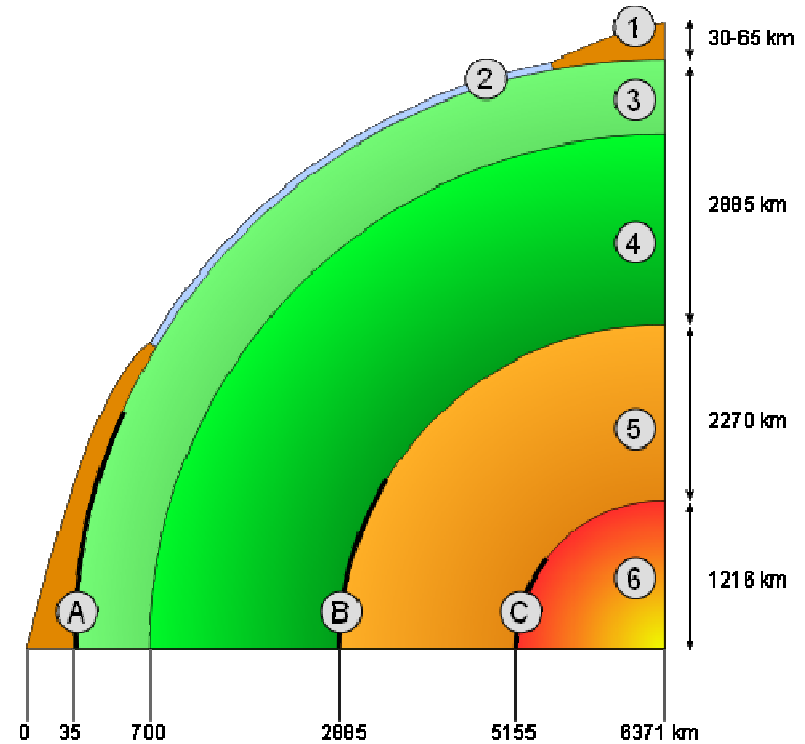




# La différenciation planétaire: Définitions



Non-différencié  
Ex: Astéroïde



Différencié:  
Ex: Terre, Mars,

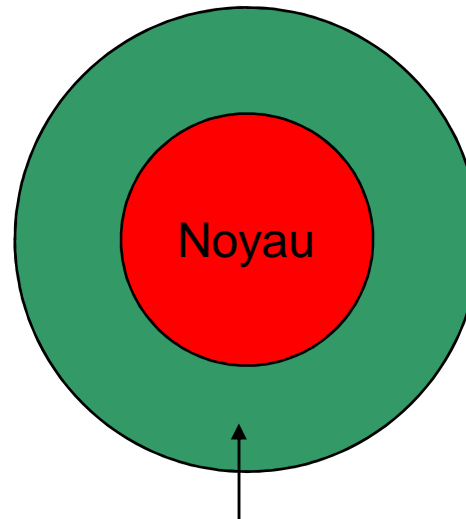
**Différenciation**= séparation en enveloppes chimiques de composition différentes.

# La différenciation planétaire: Définitions

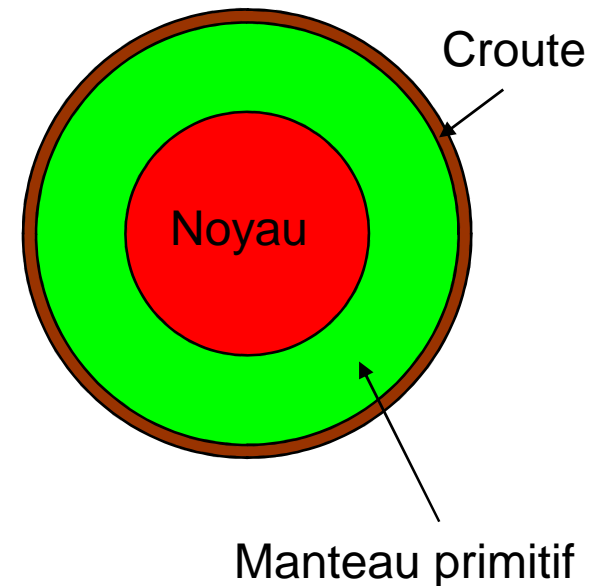
Chondrites=Terre Globale



Terre primitive



Terre différenciée



**Différenciation**= séparation en enveloppes chimiques de composition différentes.

# Les énergies impliquées

Pour différencier une planète, le mieux c'est de la faire fondre.

$$E_P = \frac{3GM^2}{5R}$$

Energie potentielle d'acréation  
Terre=2,2.10<sup>32</sup> J

$$E_M = \frac{M}{L}$$

Energie nécessaire à fondre  
Terre, L~1<sup>e</sup>5 J/kg

$$E_C = \frac{M}{\rho c_p \Delta T}$$

Energie pour chauffer  
Terre, c<sub>p</sub>~1000 J/(K.kg), DT=2000, r=5500 kg/m<sup>3</sup>

**Qu'est ce qui nous manque??**

# Effet des radioactivités éteintes

Quels éléments radioactifs?

$^{26}\text{Al}$

$$\left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}}\right)_0 = 5 \cdot 10^{-5}$$

$$[\text{Al}]_{\text{Chon}} = 1.2 \%$$

Decay energy = 3 MeV

L'autre candidat est le  $^{60}\text{Fe}$

$$\left(\frac{^{60}\text{Fe}}{^{56}\text{Fe}}\right)_0 = 3 \cdot 10^{-6}$$

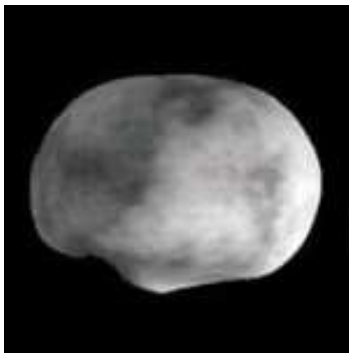
Plus l'astéroïde s'est accrété tôt plus il a de chance d'être différentié.

# Energies impliquées: résumé

**Gros corps** (planètes): la **chaleur d'acréation** est suffisante.



**Petits corps** (astéroïdes): il faut de la **radioactivité éteinte**.  
certains astéroïdes sont différenciés, d'autre non.

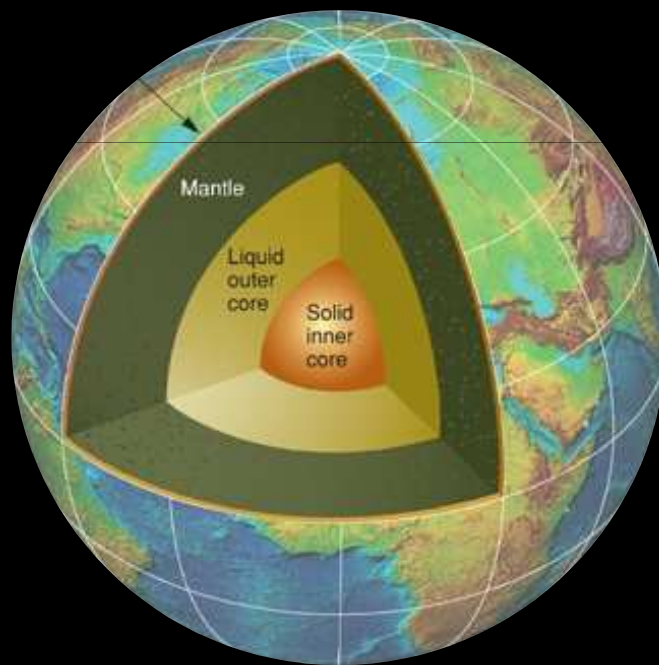


4-Vesta, différencié



Mathilde, non-différencié

# Chronologie de la différenciation des enveloppes solides



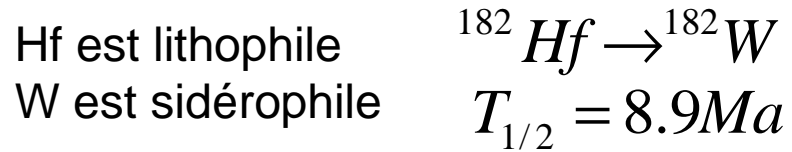


Campo del Cielo  
IAB 1576

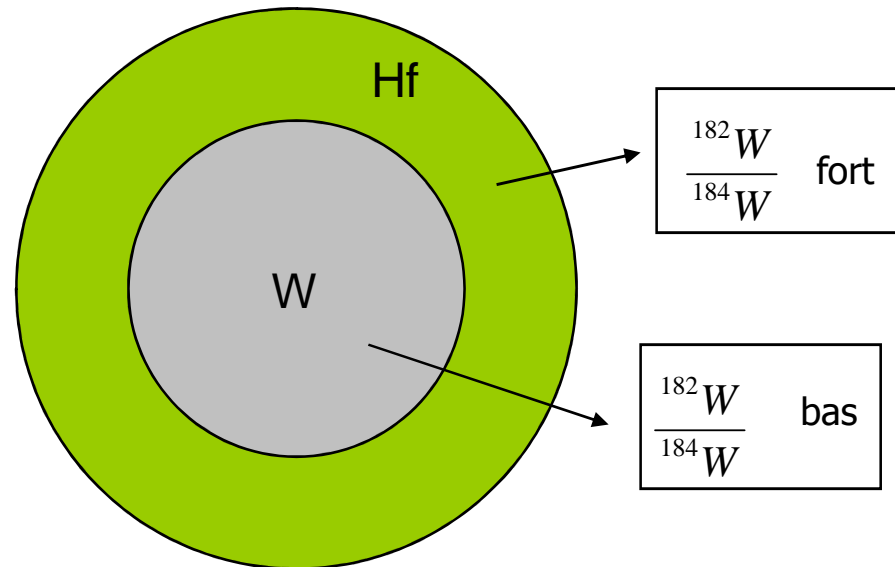


# Le Système $^{182}\text{Hf}/^{182}\text{W}$

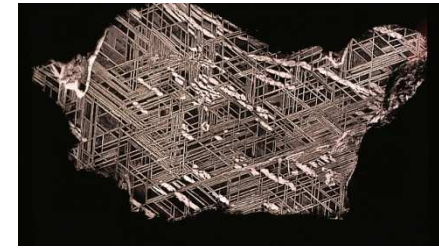
Le système Hf/W date la séparation noyau/manteau.



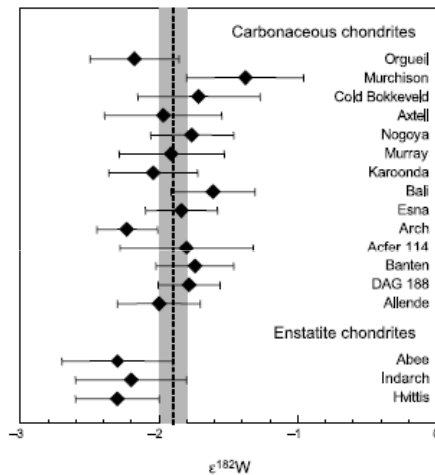
Les deux éléments sont fractionnés lors de la séparation du noyau. Evolution différente du rapport isotopique  $^{182}\text{Hf}/^{180}\text{Hf}$ .



# Le Système $^{182}\text{Hf}/^{182}\text{W}$

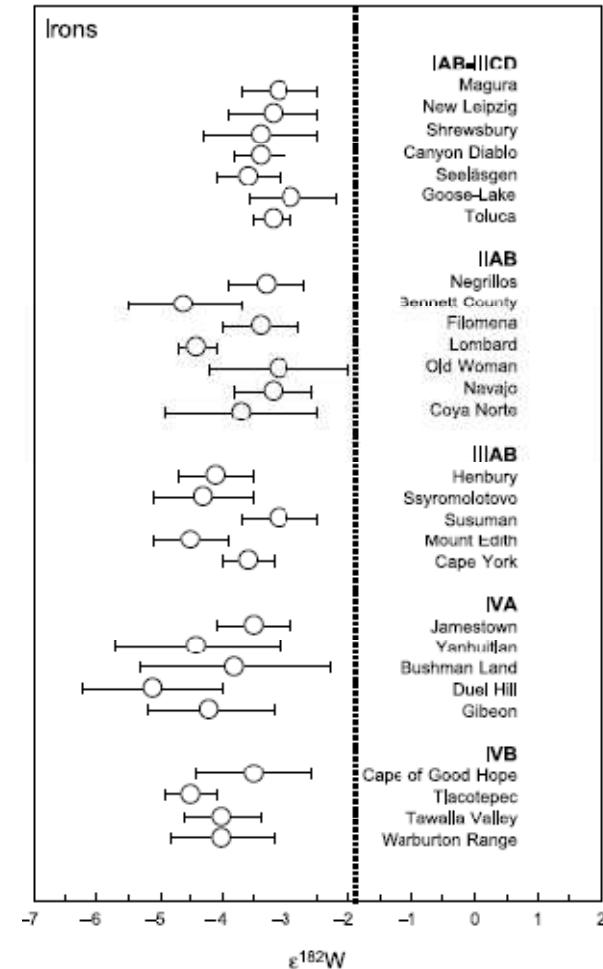


$$\epsilon_{182} = 10000 \left[ \frac{\left( \frac{^{182}\text{W}}{^{184}\text{W}} \right)_{\text{echantillon}}}{\left( \frac{^{182}\text{W}}{^{184}\text{W}} \right)_{\text{reference}}} - 1 \right]$$

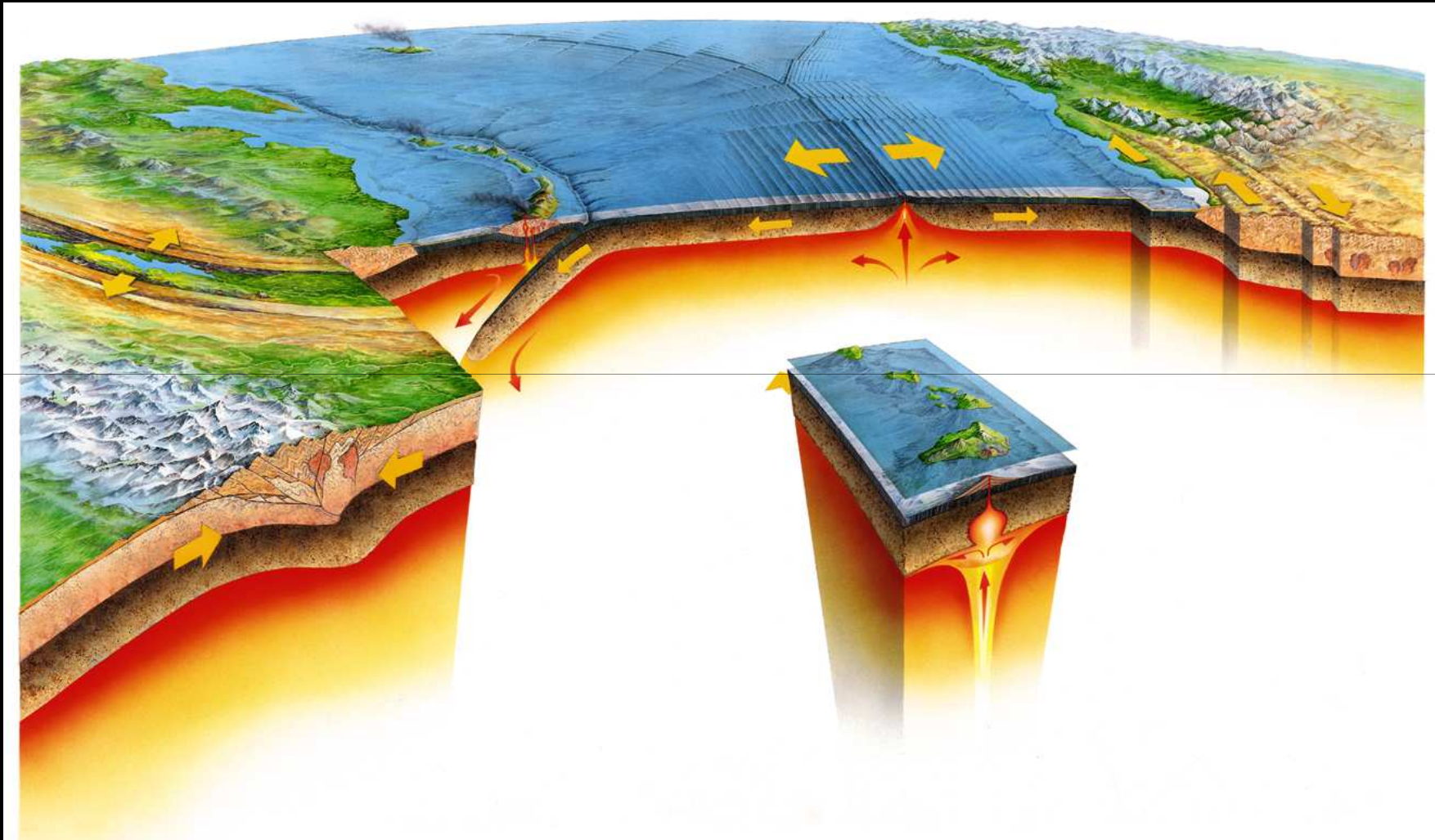


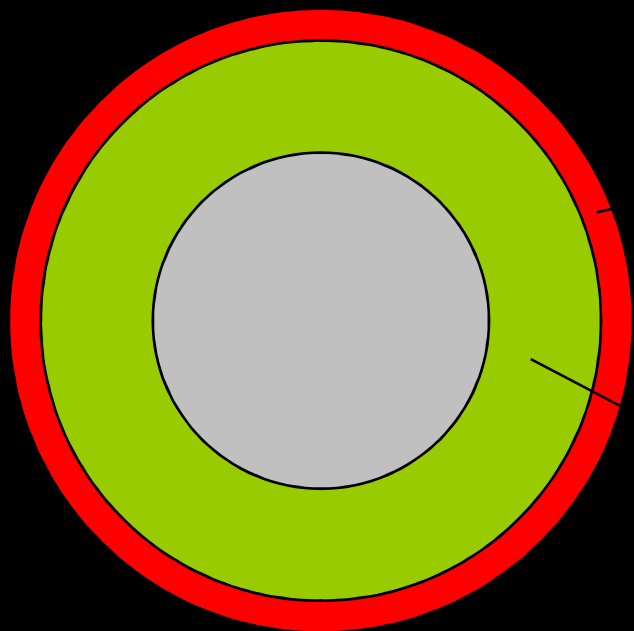
Chondrites  
 $\epsilon = -2$

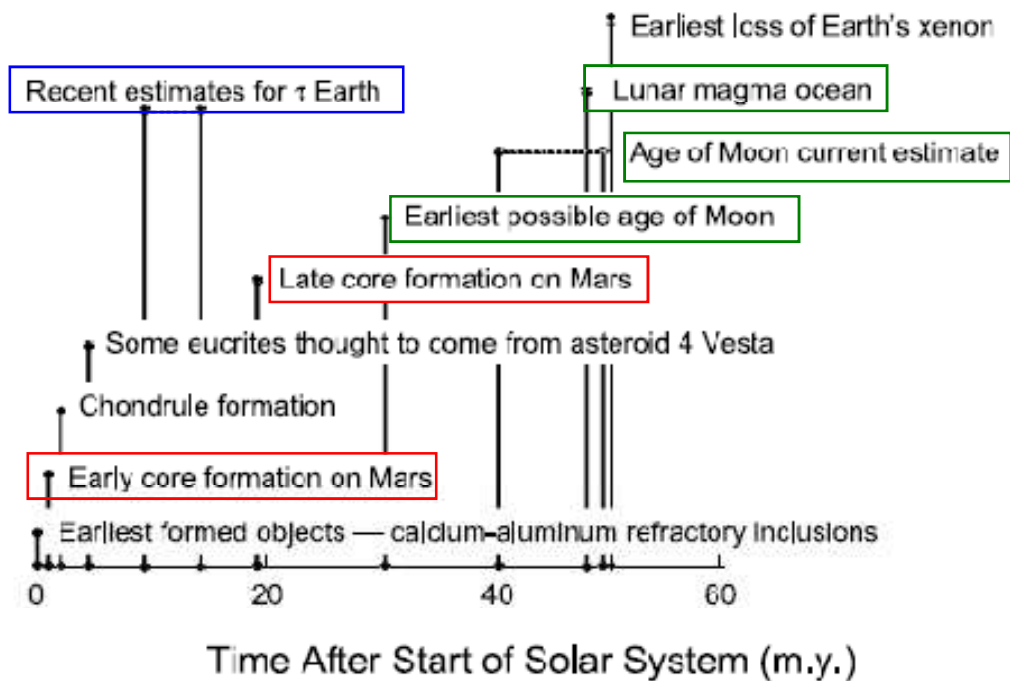
Les météorites de fer sont moins radiogéniques que les chondrites.  
Fractionnement Hf/W pendant que  $^{182}\text{Hf}$  est toujours « vivant ».  
Formation d'un noyau dans les premiers 10 Ma.



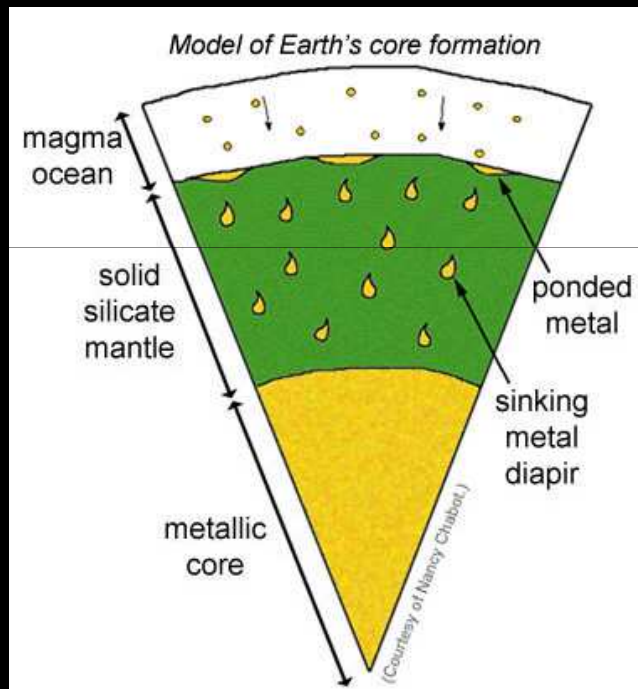
Meteorites de Fer  
 $\epsilon = -2$  à  $-5$





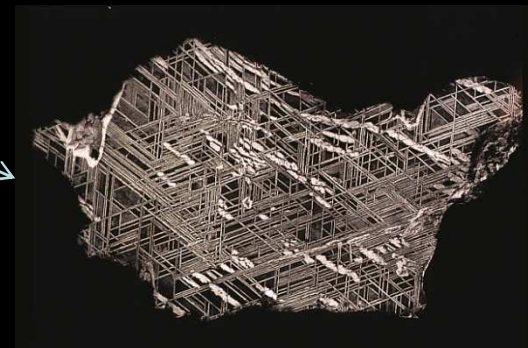
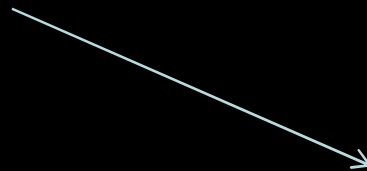
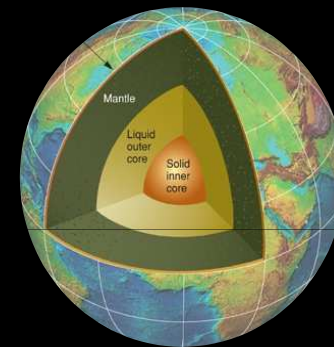
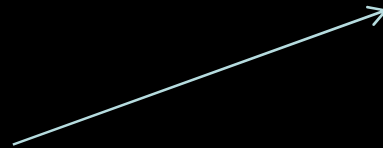


# Mécanismes de la différenciation noyau/manteau

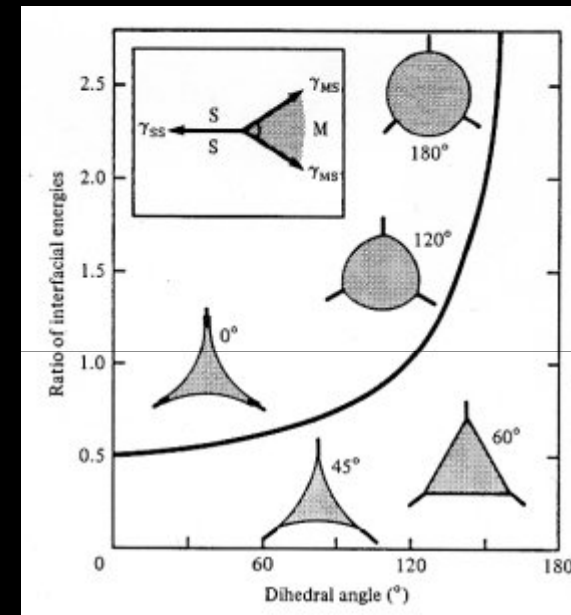
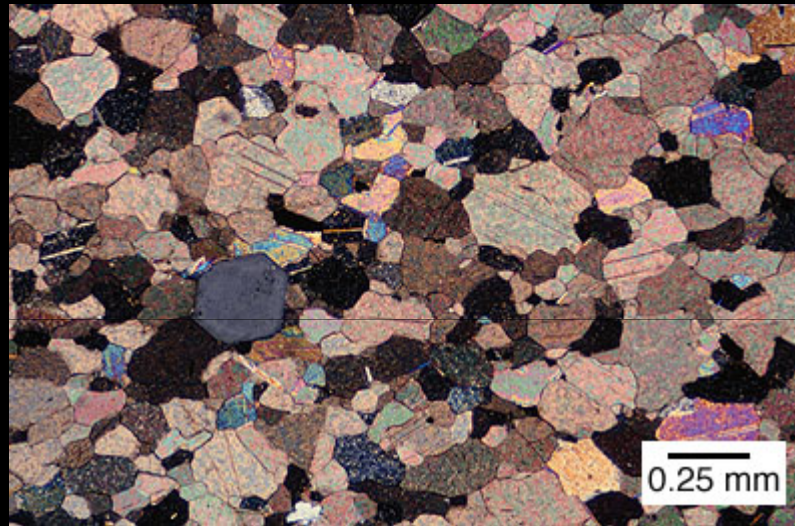


# Problème:

Comment séparer métal et silicates à grande échelle??

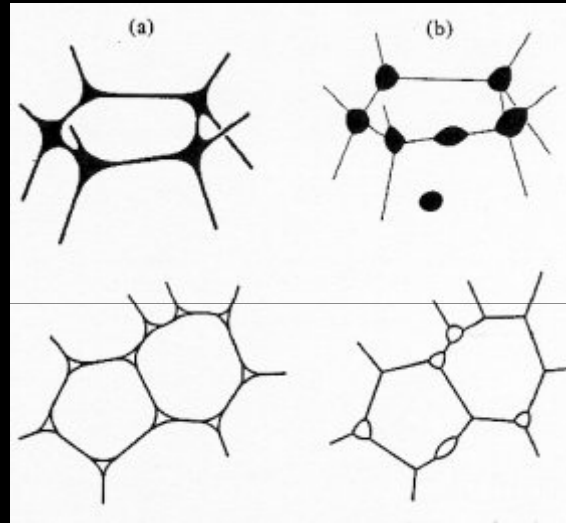


# L'angle solide dihédral

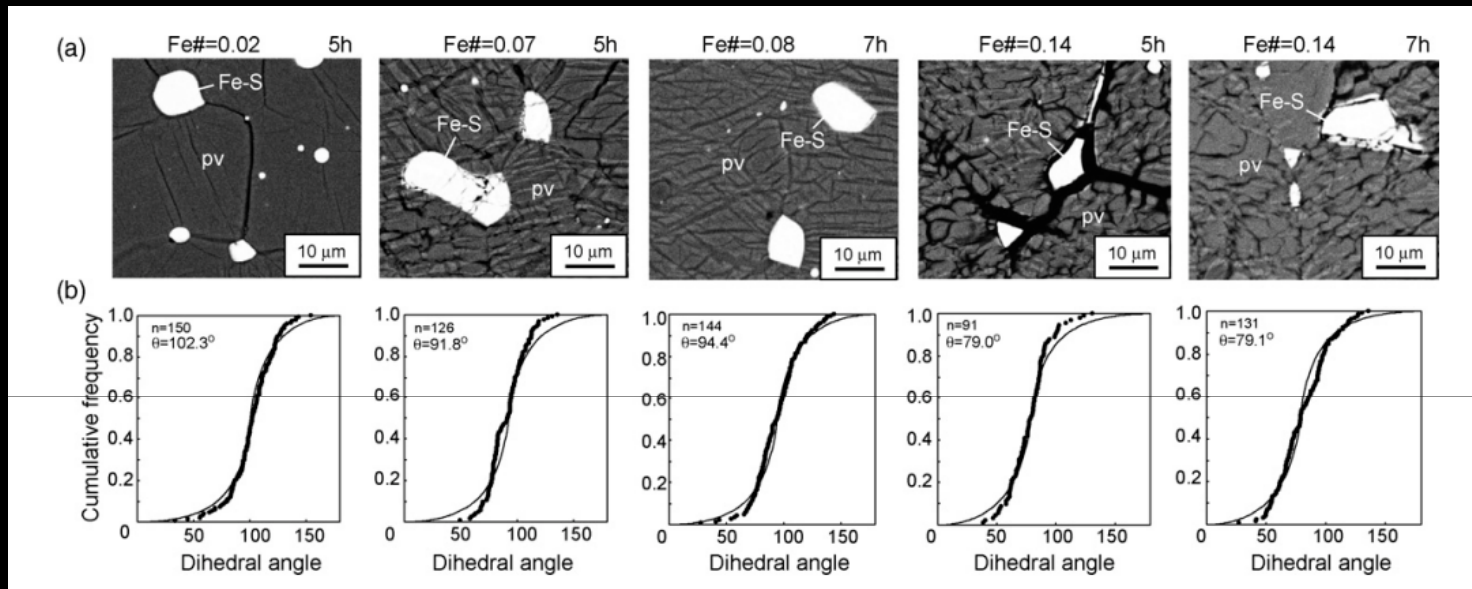




# L'angle diédral et la percolation



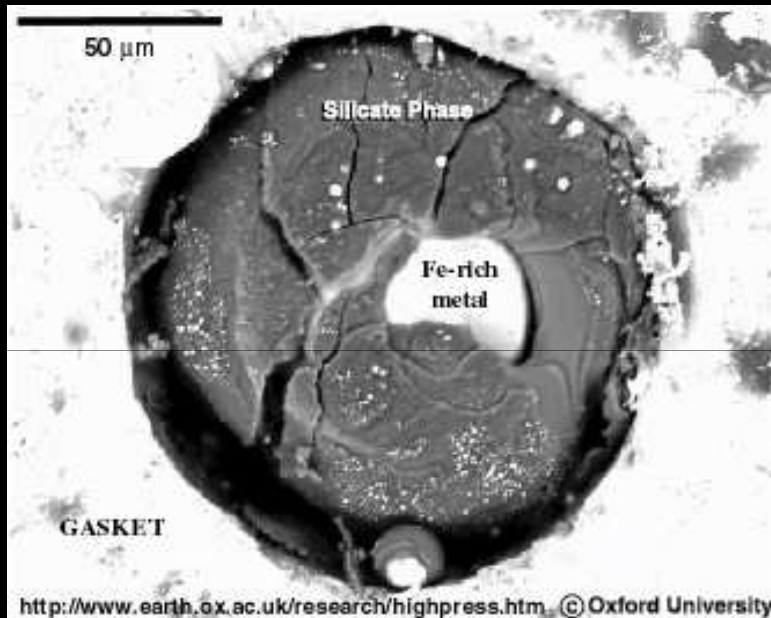
# Ségrégation/percolation à l'état solide



Yoshino et al., Nature, 2003

Expérience sur des péridotite à haute pression: on arrive pas à des angles  $<70^\circ$

# Et si on fait carrément fondre?



Si vous faites fondre une chondrite, les liquides silicatée et métalliques sont immiscibles.

Les gouttelettes de métal peuvent alors sédimenter.

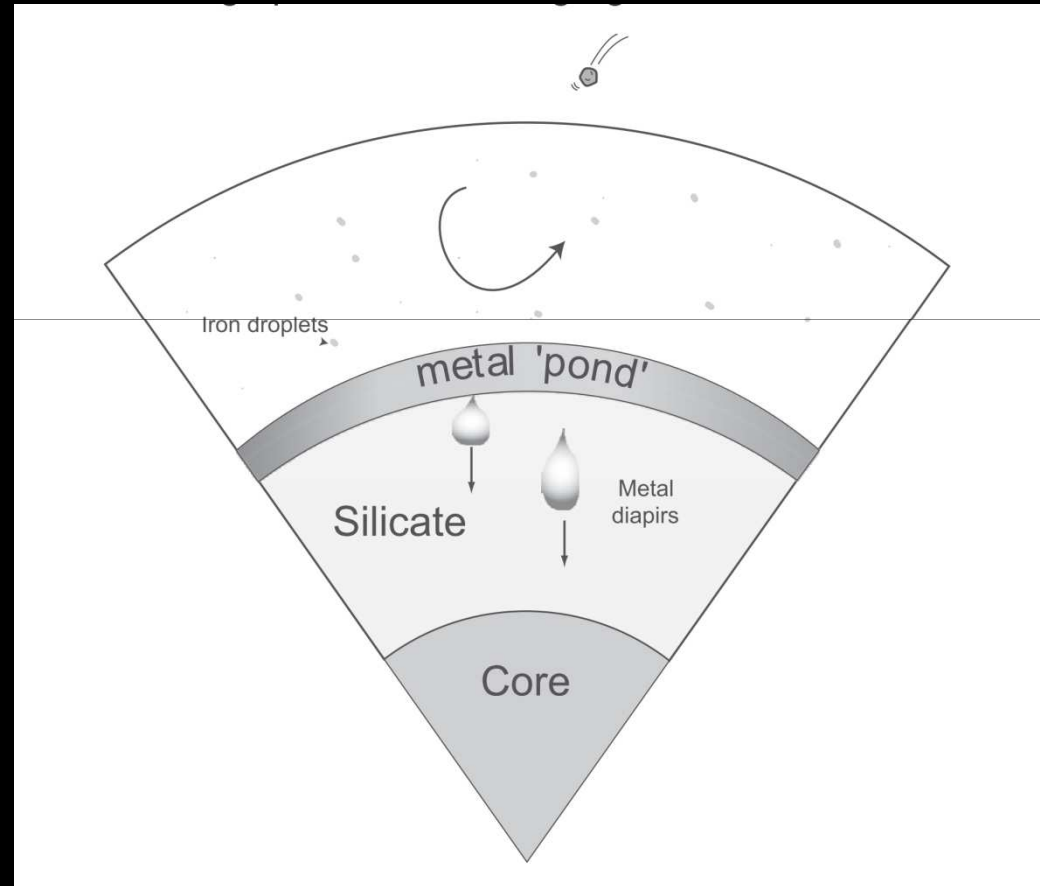
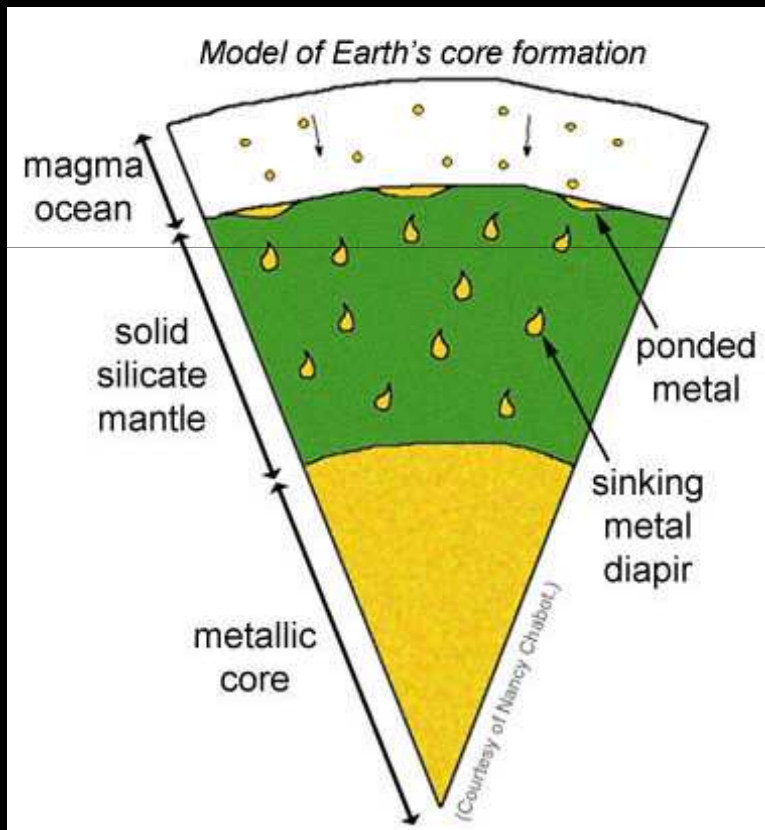
# L'océan magmatique

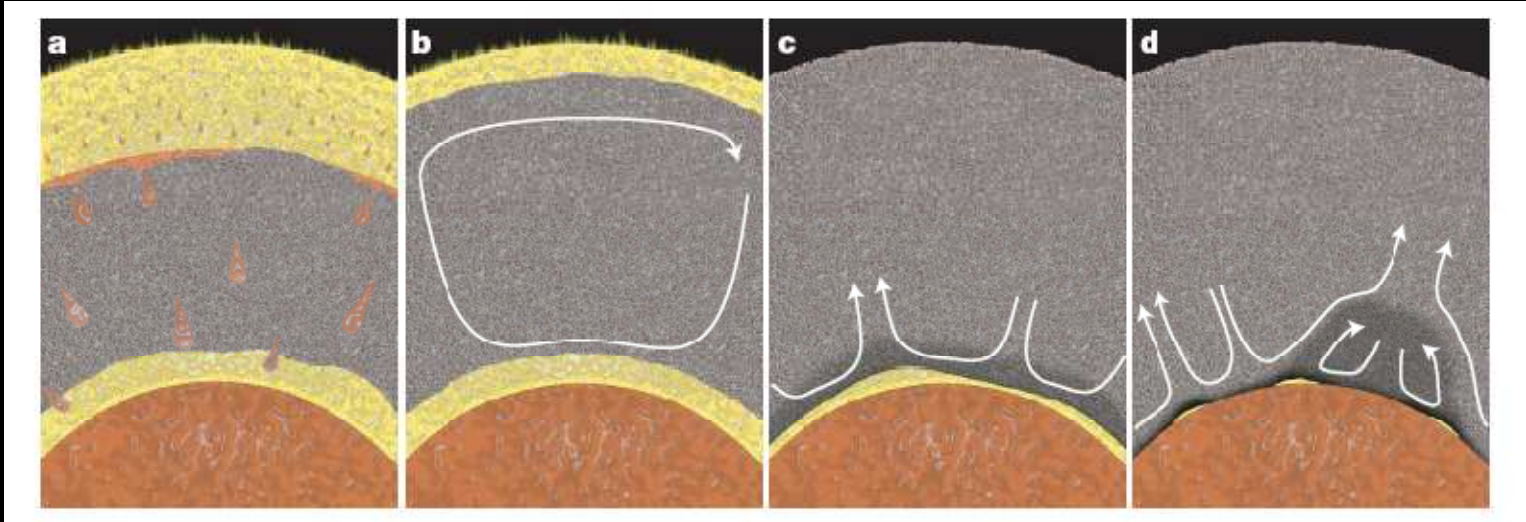
La Lune a vu un épisode d'océan magmatique.

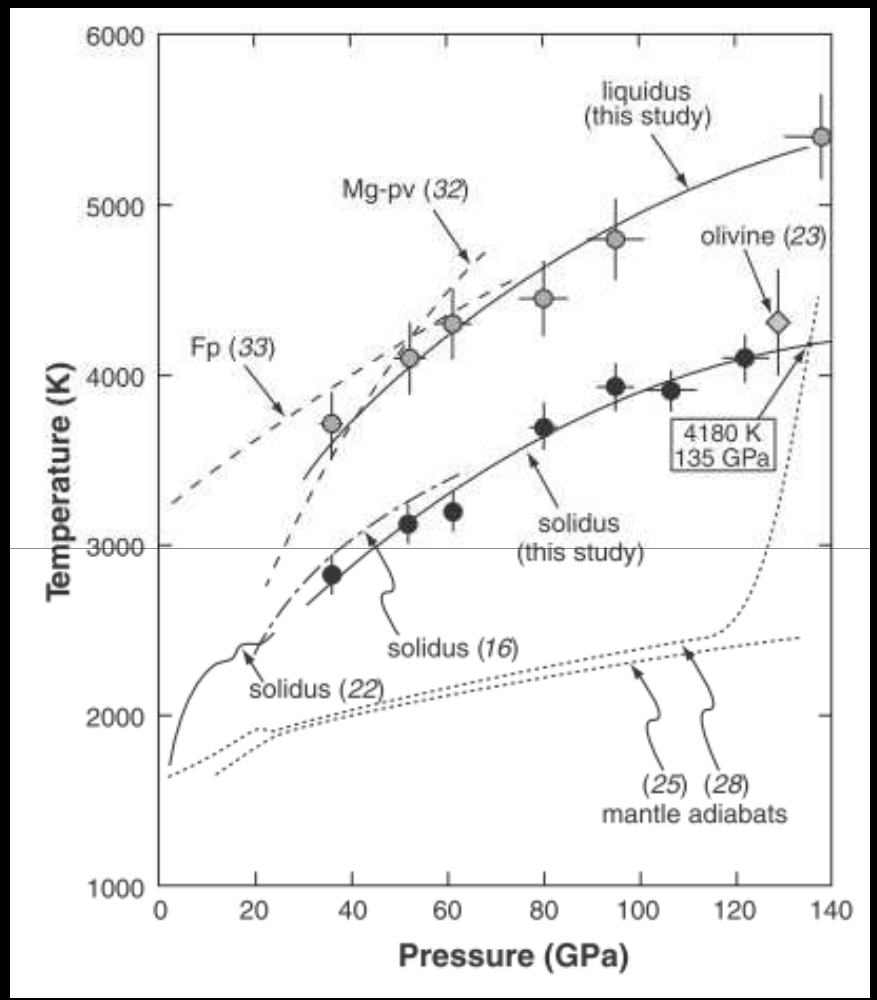
Formation de la croûte d'anorthosite par flottaison.

Sur Terre aussi?

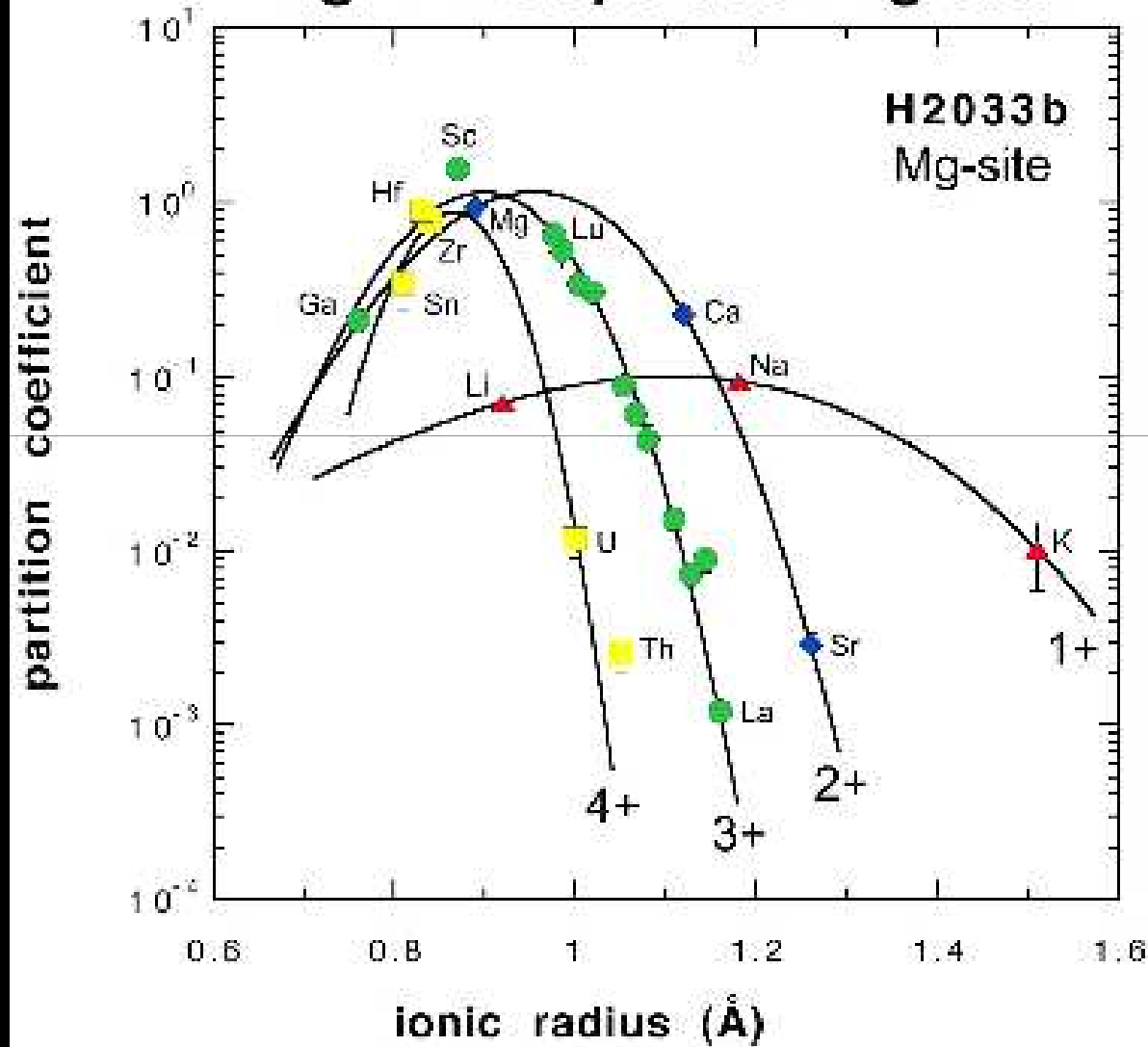








# MgPv-melt partitioning data





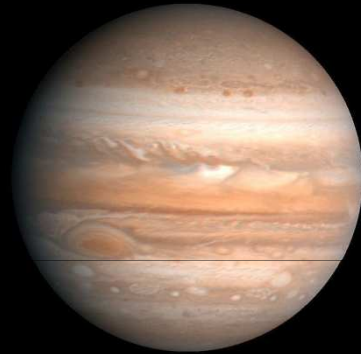


# La différenciation de l'atmosphère

# Planète géante vs atmosphère tellurique

Planète géante

$H_2$   
 $CH_4$   
 $H_2O$   
 $NH_3$   
 $H_2S$



Atmosphère des planètes telluriques

$CO_2$   
 $H_2O$   
 $N_2$   
 $SO_2$   
 $O_2$



Les gaz des planètes géantes sont plus réduits que ceux présents dans les atmosphères des planètes telluriques.  
Absence de  $H_2$ , un agent réducteur .

# Composition théorique de l'atmosphère d'une planète tellurique

Si formée par capture de gaz « nébulaire », la composition devrait être:

CO<sub>2</sub> 63 %

Ne 22%

N<sub>2</sub> 10%

COS 4%

On a donc un problème, en particulier pour le Ne (10<sup>10</sup> fois pas assez abondant), mais aussi tout les autres gaz rares (10<sup>6</sup> pas assez abondant)....

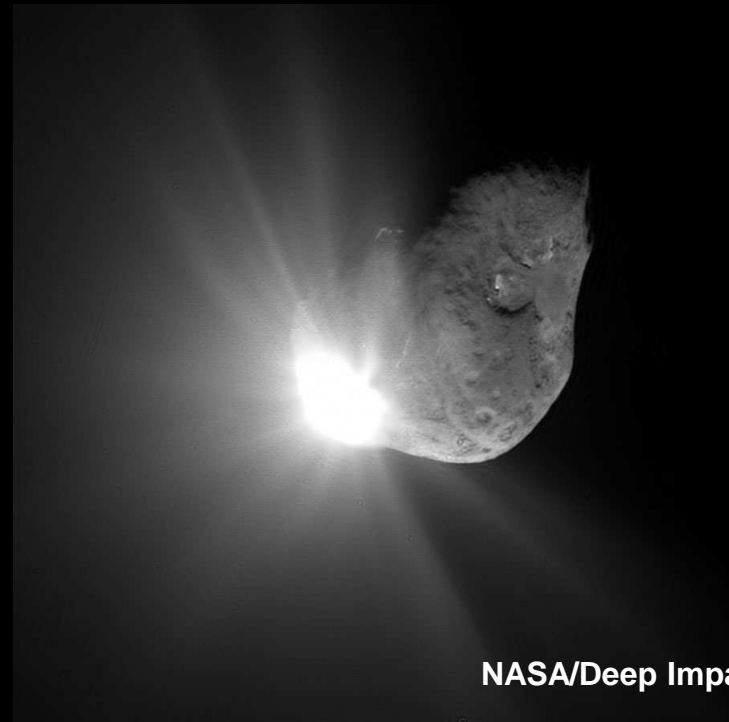
Origine secondaire?

# Une origine secondaire?

Dégazage par le magmatisme.  
Eau issue de l'acrétion initiale.



Impact d'astéroïde et de comètes



# La Terre est-elle dégazée?

Une partie des gaz a du être rejetée dans l'atmosphère alors que l'Iode 129 était encore « vivant »

Dégazage précoce de l'atmosphère donc (160 Ma).



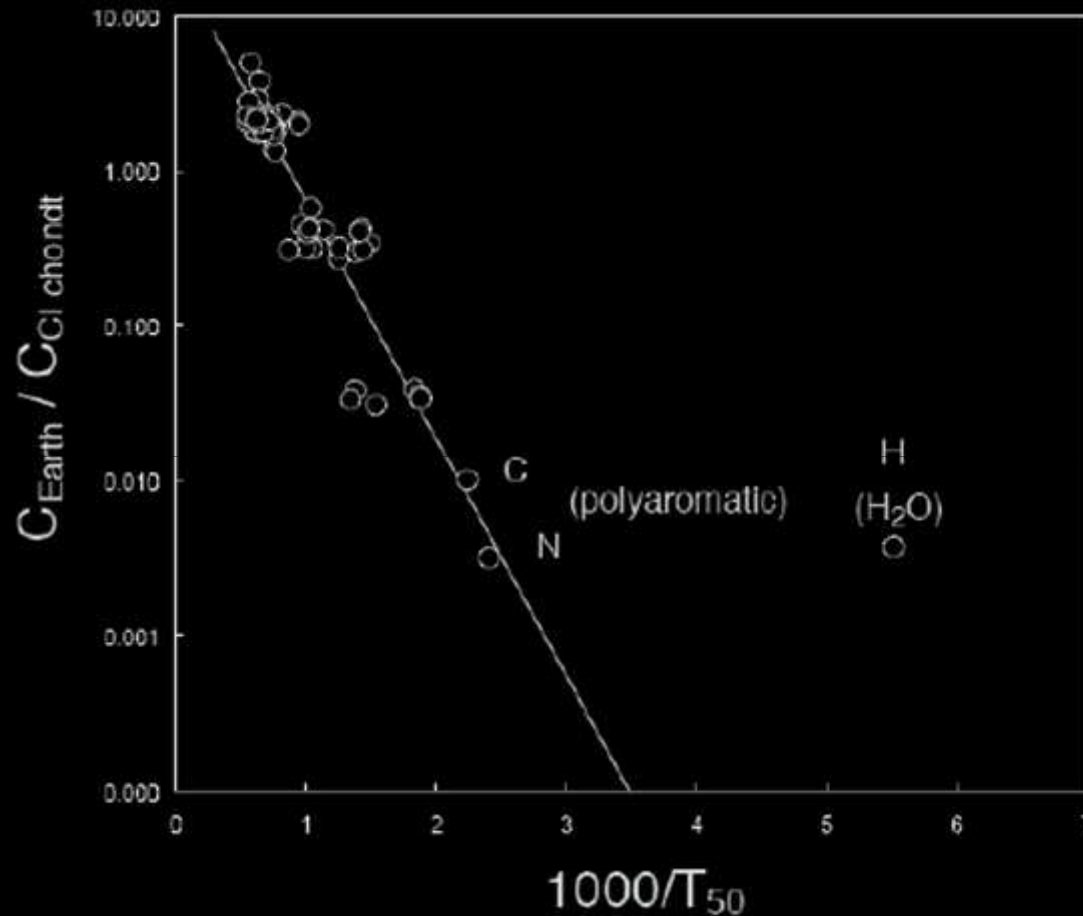
# La Terre dégaze encore

Présence d 'Helium dans l'atmosphère  
qui a un temps de résidence très courts (1  
Ma car il s'échappe)

Il doit être produit...

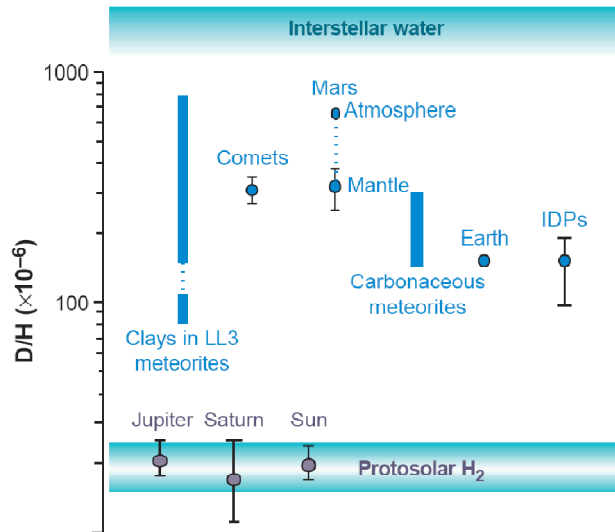


# La Terre s'est accrétée sèche?



La Terre se serait accrétée sèche?

# L'apport des isotopes de l'hydrogène



**An isotopic enigma.** Distribution of the hydrogen isotopic composition in solar system bodies. Blue, water; purple, molecular hydrogen.

Eau primitive 50-90%  
 Impact tardif d'astéroïde 10-50%  
 Impact tardif cométaire 0-10 %

La valeur initiale du D/H de la Terre est très mal contrainte.  
 Peut-être encore plus basse

**Avant**

**Après**

	Asteroids	Comets	Early Earth	Present Earth
H <sub>2</sub> O (10 <sup>-3</sup> mol g <sup>-1</sup> )	3.2 ± 0.3–3.8 ± 0.2	32 ± 5–36 ± 6	—	0.016–0.027
D/H (10 <sup>-6</sup> )	159 ± 10–181 ± 10	311 ± 13	128–136	149–153





**La différenciation planétaire:  
un phénomène toujours actif  
(sur Terre et au moins Vénus)!**