

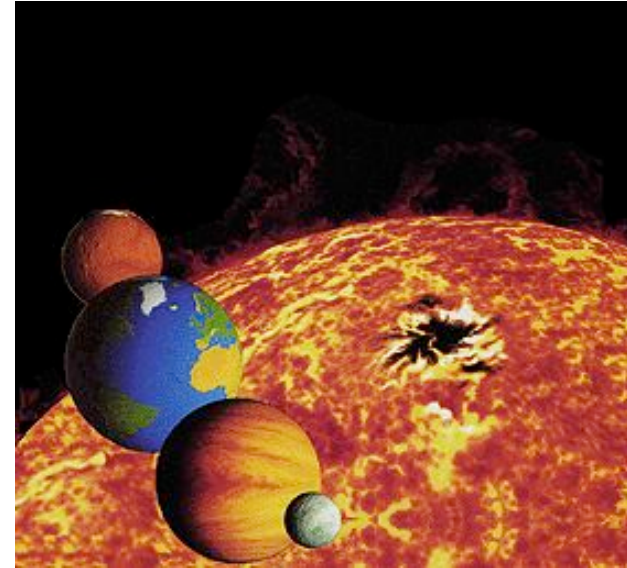
Formation des planètes telluriques

- ◆ Les planètes telluriques
 - Leur formation
 - Leur caractéristique et quelques propriétés
 - Les grandes subdivisions internes (noyau, manteau, croûte)

Planètes telluriques

◆ Mercure, Venus, Terre, Mars

- Toutes à moins de 2 UA du soleil
- Terre et Venus $\sim 90\%$ de la masse

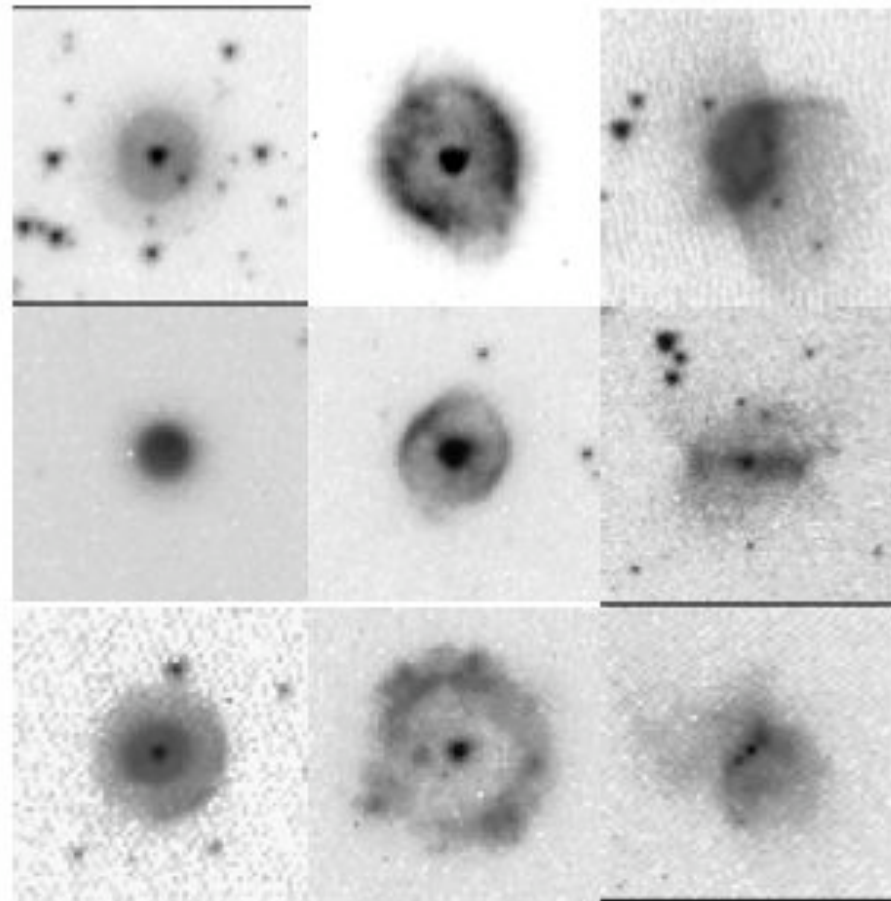
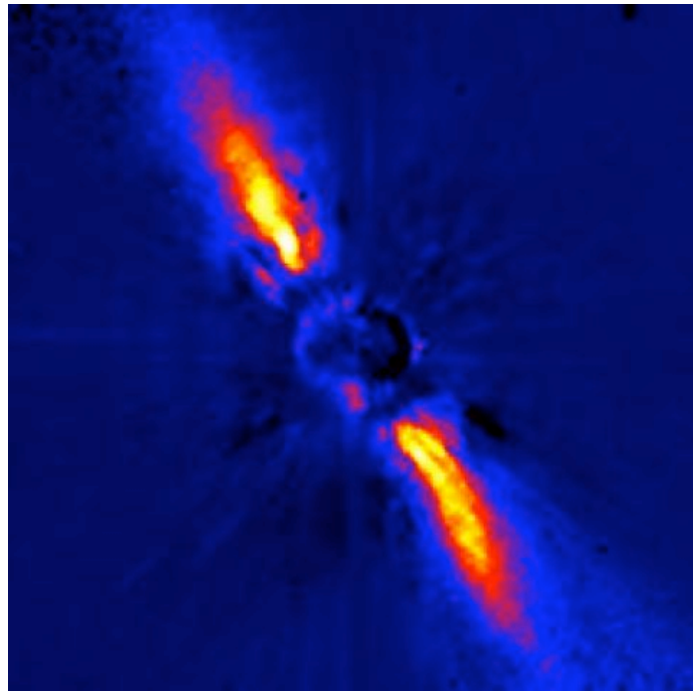
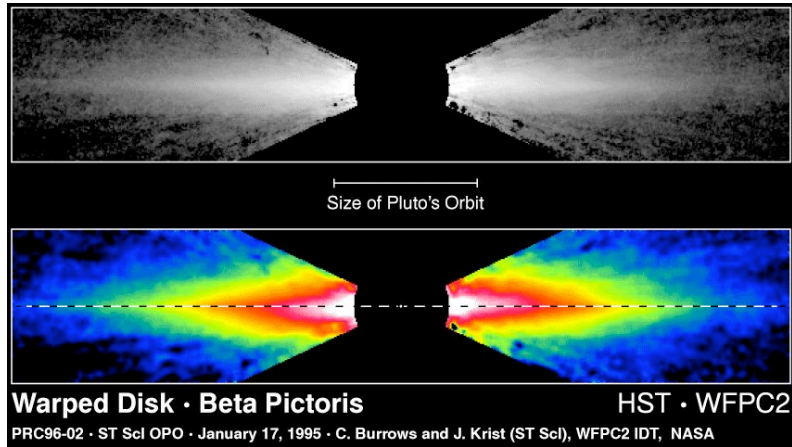


	Planètes telluriques				Planètes géantes				
	Mercure	Venus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	Pluton
Période de rotation [d ^a]	58.65	243.0 ^b	0.9973	1.026	0.4135	0.4440	0.7183 ^b	0.6713	6.387 ^b
Inclinaison sur orbite[°]	0.5	177.4	23.45	25.19	3.12	26.73	97.86	29.56	122.5
Distance Orbitale [UA ^c]	0.3871	0.7233	1.000	1.524	5.203	9.572	19.19	30.07	39.54
Période orbitale [a ^d]	0.2410	0.6156	1.001	1.882	11.87	29.39	84.16	165.0	248.8
Masse [10 ²⁴ kg]	0.3302	4.869	5.974	0.6419	1899.	568.46	86.63	102.4	0.0131

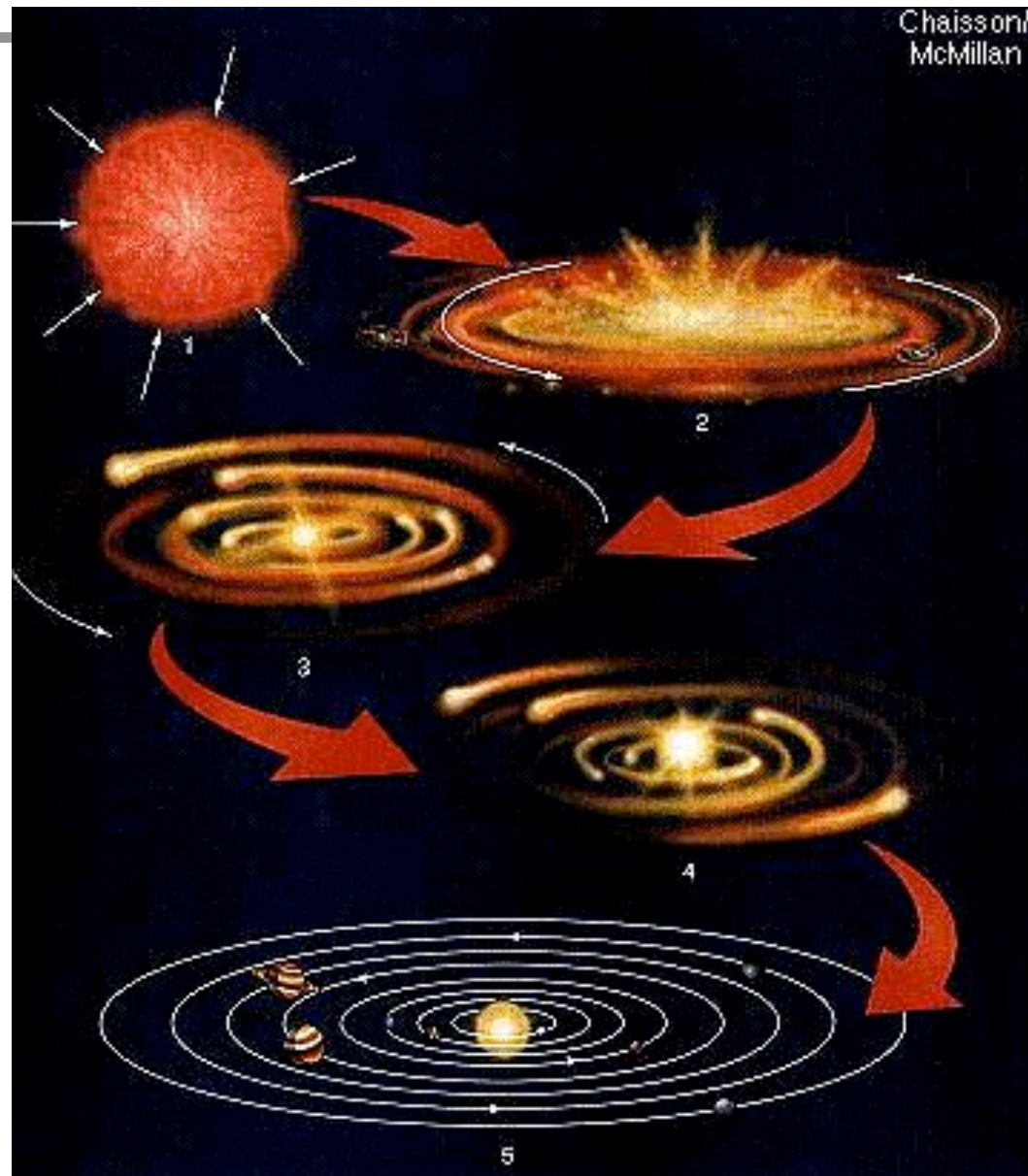
-4.56 milliards d'années



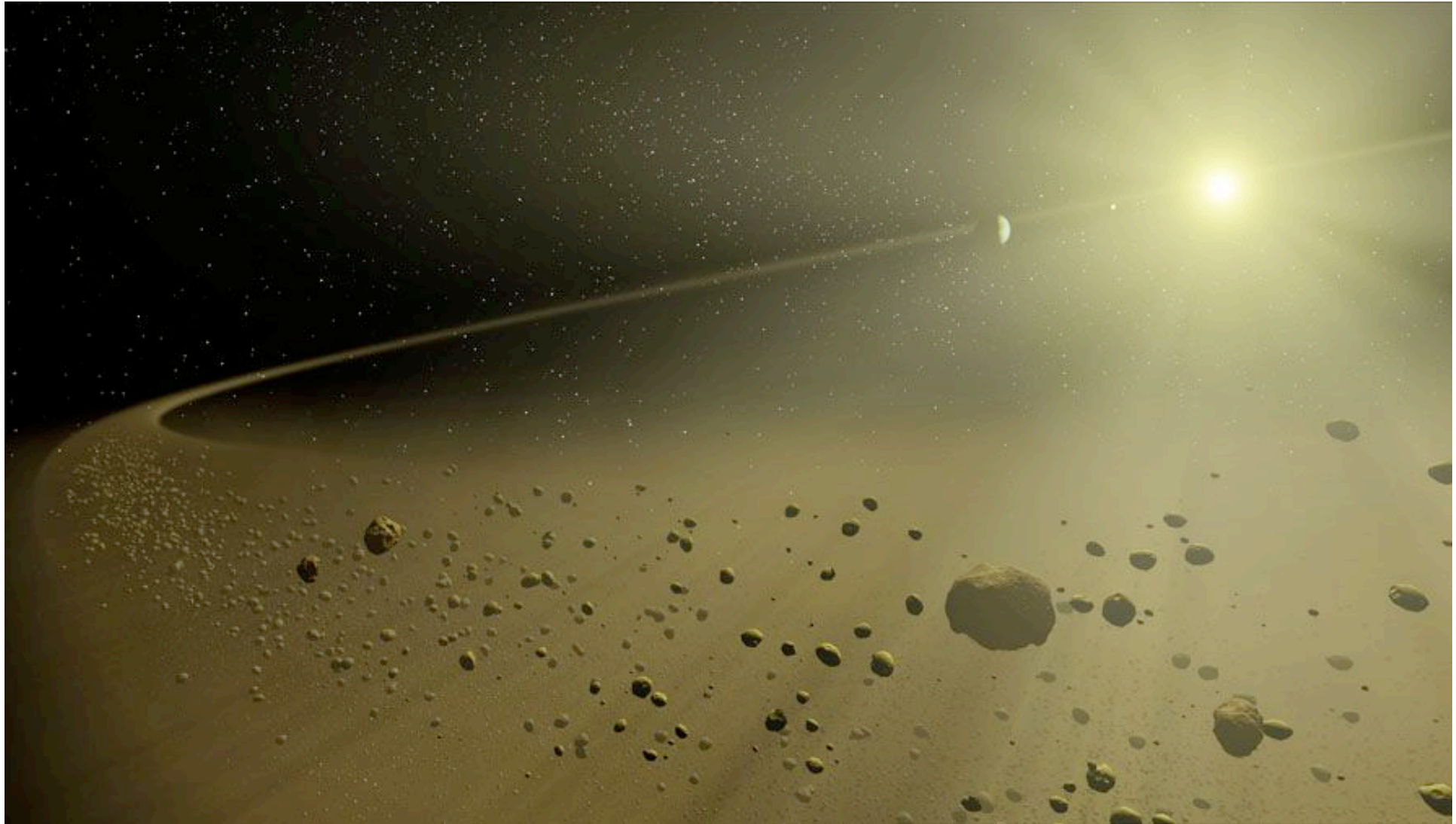
Exemple de nébuleuse proto-planétaire



Un scénario



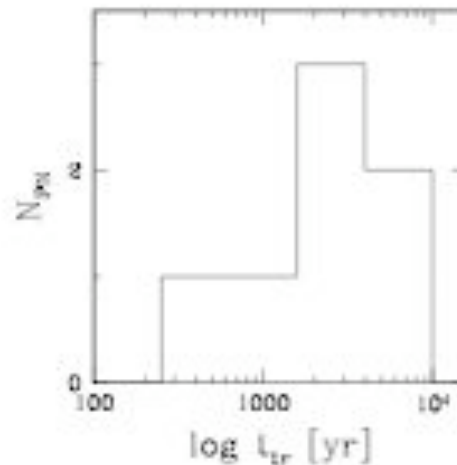
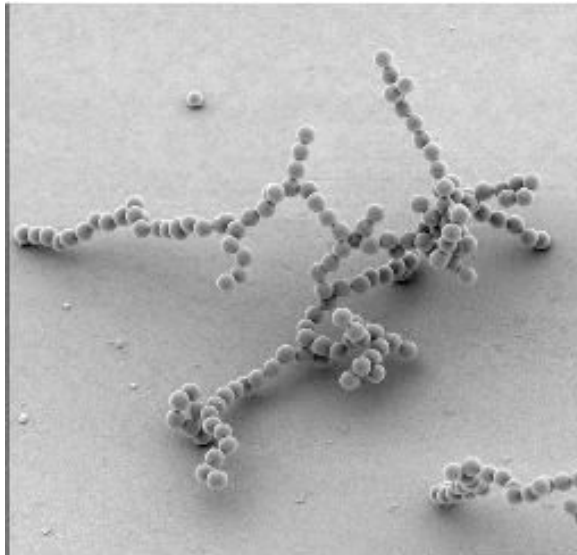
Une physique complexe pour le « collage »



Des poussières aux planétésimaux

Mouvement et choc de particules en suspension dans un gaz

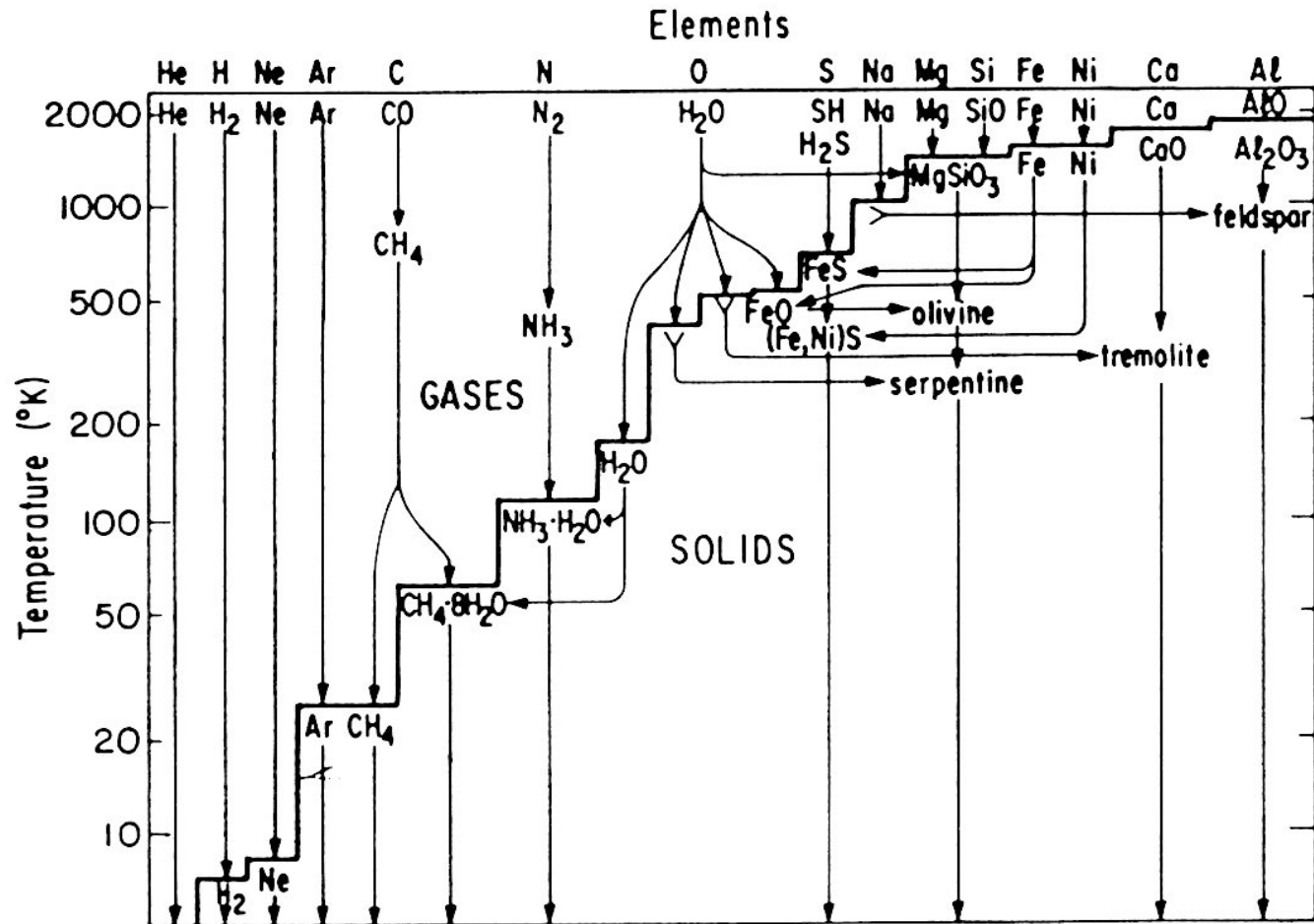
- collage par choc et sédimentation dans le plan équatorial du disque (environ 10^4 ans). Du micron au centimètre



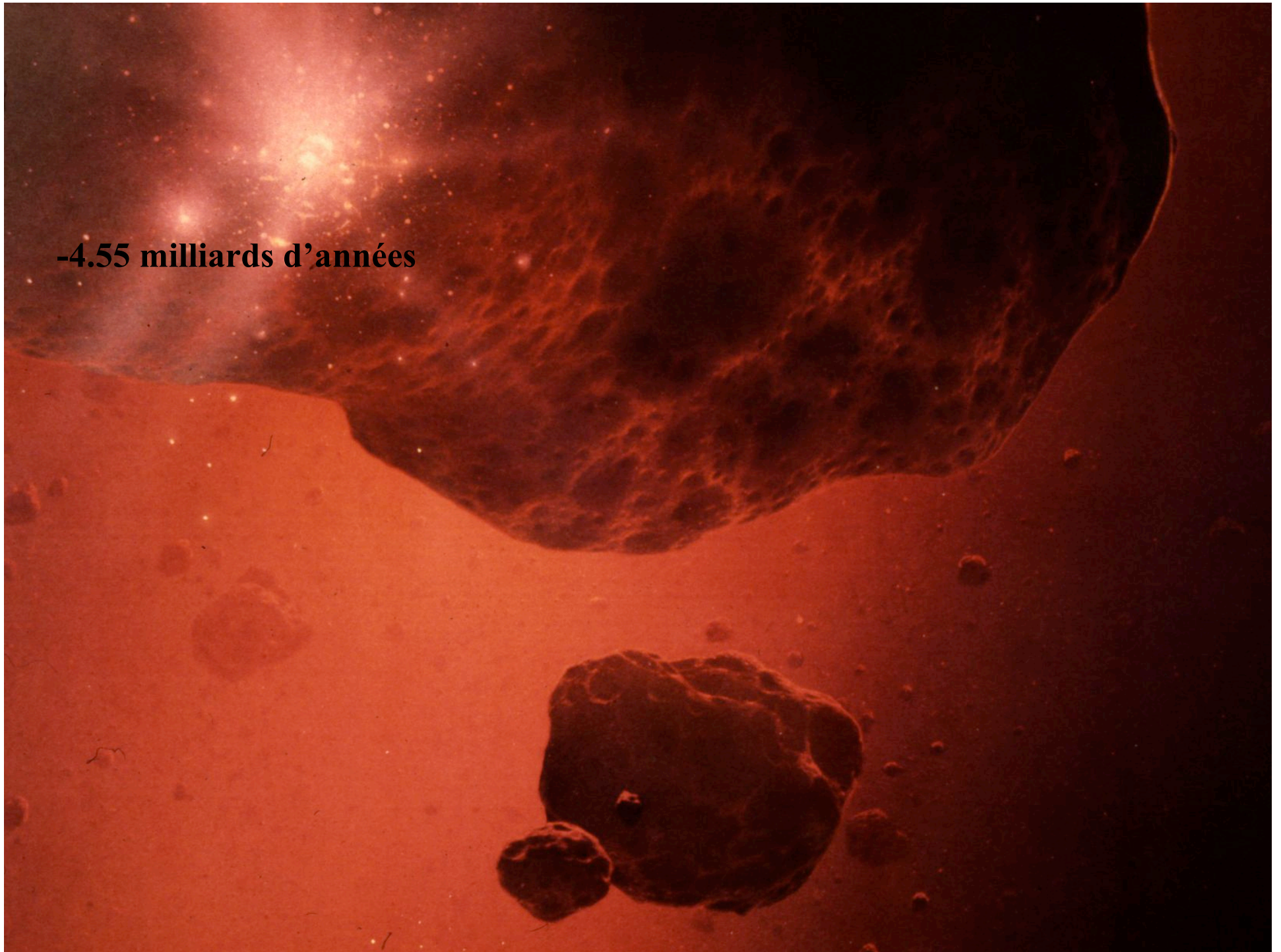
**Age des nébuleuses
Proto-planétaires**

- du centimètre au kilomètre : dépend de la vitesse relative des grains et blocs
- cette première phase est rapide (quelques millions d'années)

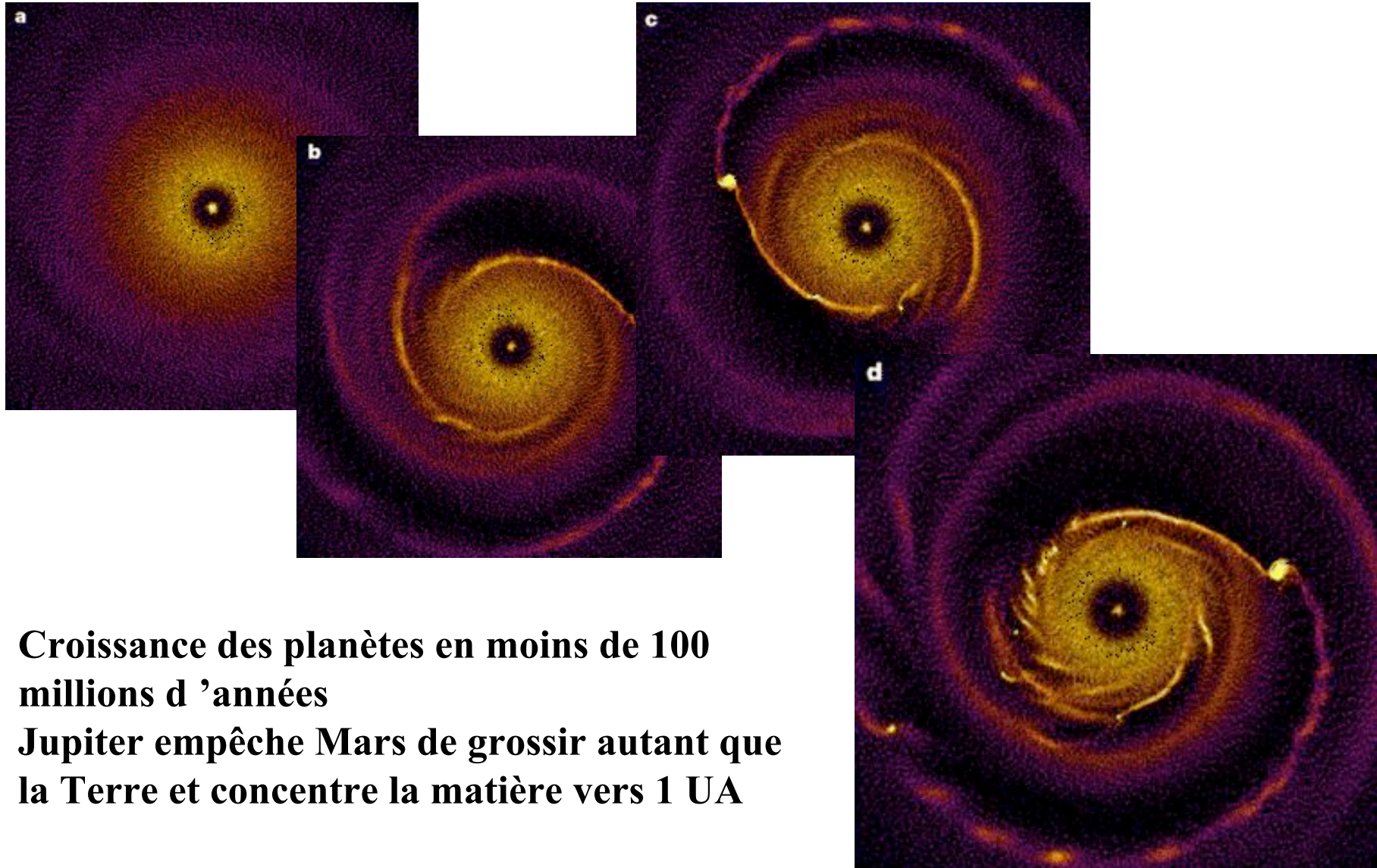
Température de condensation



-4.55 milliards d'années

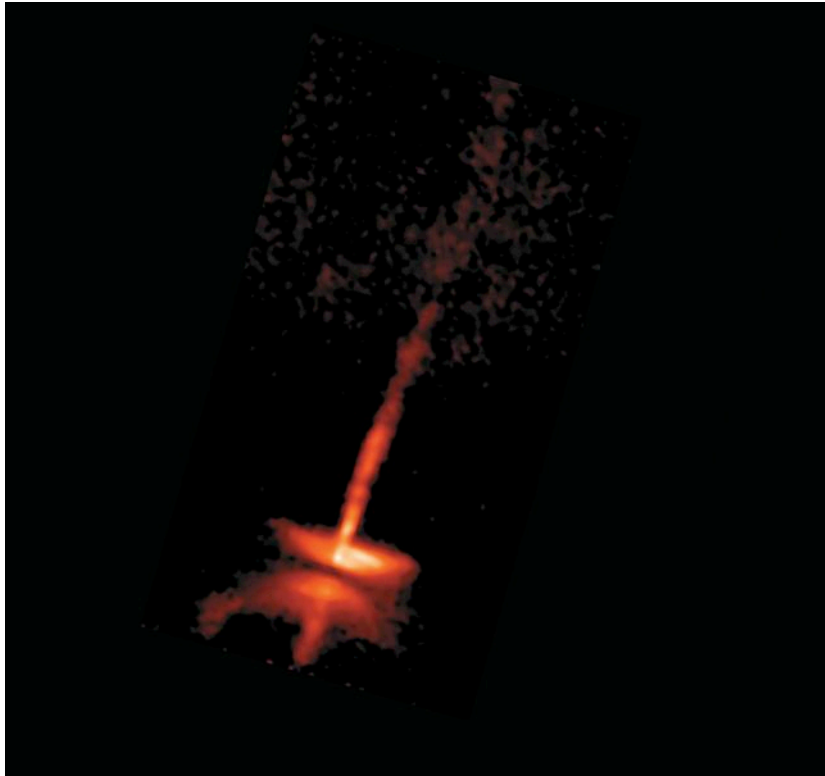


Croissance des planètes



Croissance des planètes en moins de 100 millions d'années
Jupiter empêche Mars de grossir autant que la Terre et concentre la matière vers 1 UA

Formation de Jupiter et phase Theta-Tauri



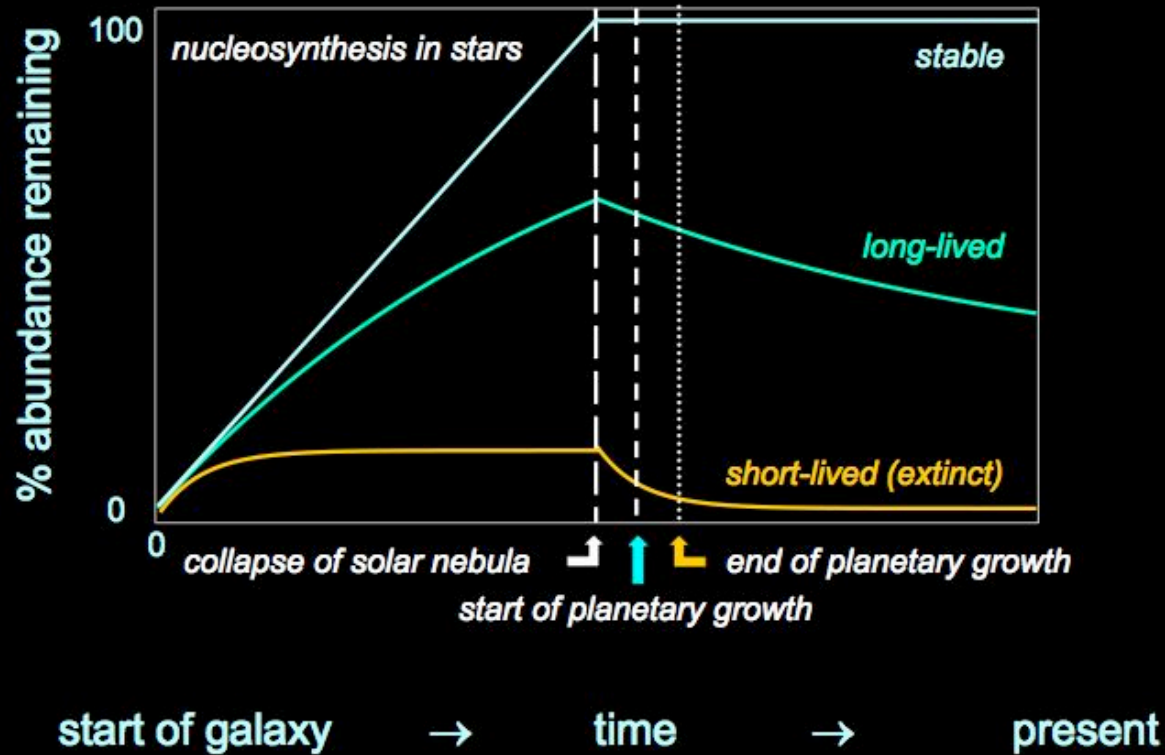
- **l'hydrogène est repoussée par le vent stellaire durant les 10 premiers millions d'années**
- **l'accrétion de Jupiter doit donc être terminée pendant cette période**

Importance des glaces

Eléments	Composés basse-température	Fraction en masse
H, He	Gaz H ₂ , He	98.4 %
C,N,O	Volatiles (glaces) H ₂ O,CH ₄ ,NH ₃	1.2 %
Si,Mg,Fe	Réfractaires (metals, silicates)	0.3 %

Contraintes sur la croissance: datation

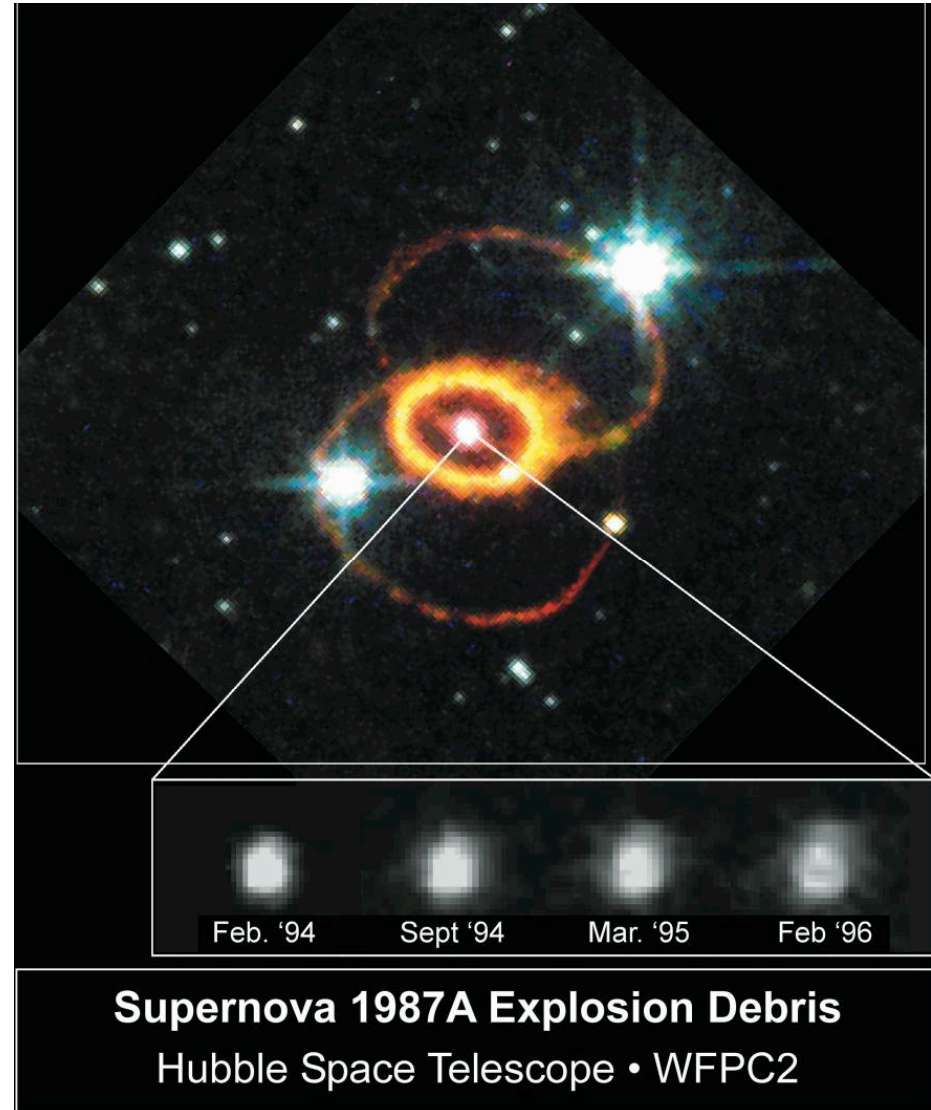
Isotopes and time-scales



Nuclide	Half-life (Myrs)	Daughter
^{41}Ca	0.1	^{41}K
^{26}Al	0.73	^{26}Mg
^{60}Fe	1.5	^{60}Ni
^{53}Mn	3.7	^{53}Cr
^{107}Pd	6.5	^{107}Ag
^{182}Hf	8.9	^{182}W
^{247}Cm	12	^{235}U
^{205}Pb	15	^{205}Tl
^{129}I	16	^{129}Xe
^{92}Nb	36	^{92}Zr
^{244}Pu	80	^{136}Xe
^{146}Sm	103	^{142}Nd
^{235}U	704	^{207}Pb
^{238}U	4468	^{206}Pb
^{87}Rb	48800	^{87}Sr

Nuclide	Half-life (Myrs)	Daughter
^{41}Ca	0.1	^{41}K
^{26}Al	0.73	^{26}Mg
^{60}Fe	1.5	^{60}Ni
^{53}Mn	3.7	^{53}Cr
^{107}Pd	6.5	^{107}Ag
^{182}Hf	8.9	^{182}W
^{247}Cm	12	^{235}U
^{205}Pb	15	^{205}Tl
^{129}I	16	^{129}Xe
^{92}Nb	36	^{92}Zr
^{244}Pu	80	^{136}Xe
^{146}Sm	103	^{142}Nd
^{235}U	704	^{207}Pb
^{238}U	4468	^{206}Pb
^{87}Rb	48800	^{87}Sr

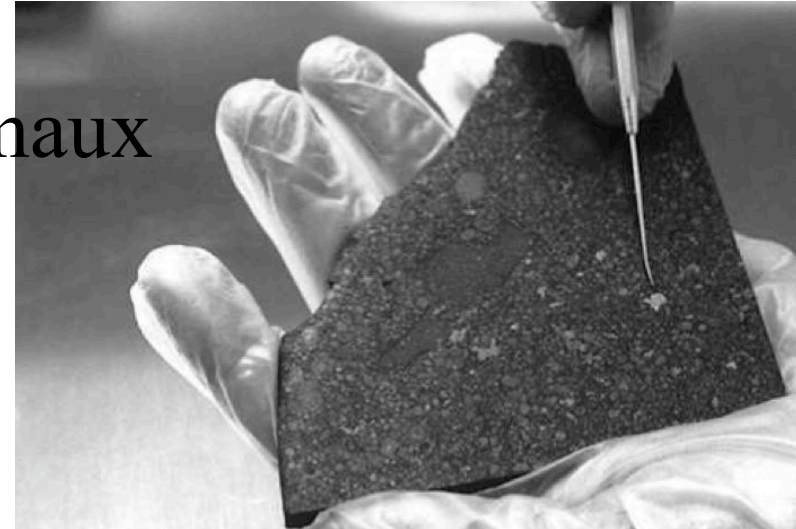
Formation des éléments légers et supernova



2 évènements clefs

◆ Formation des planétésimaux

Piégeage dans des inclusions de certaines chondrites carbonées de l'Aluminium 28 avant sa désintégration

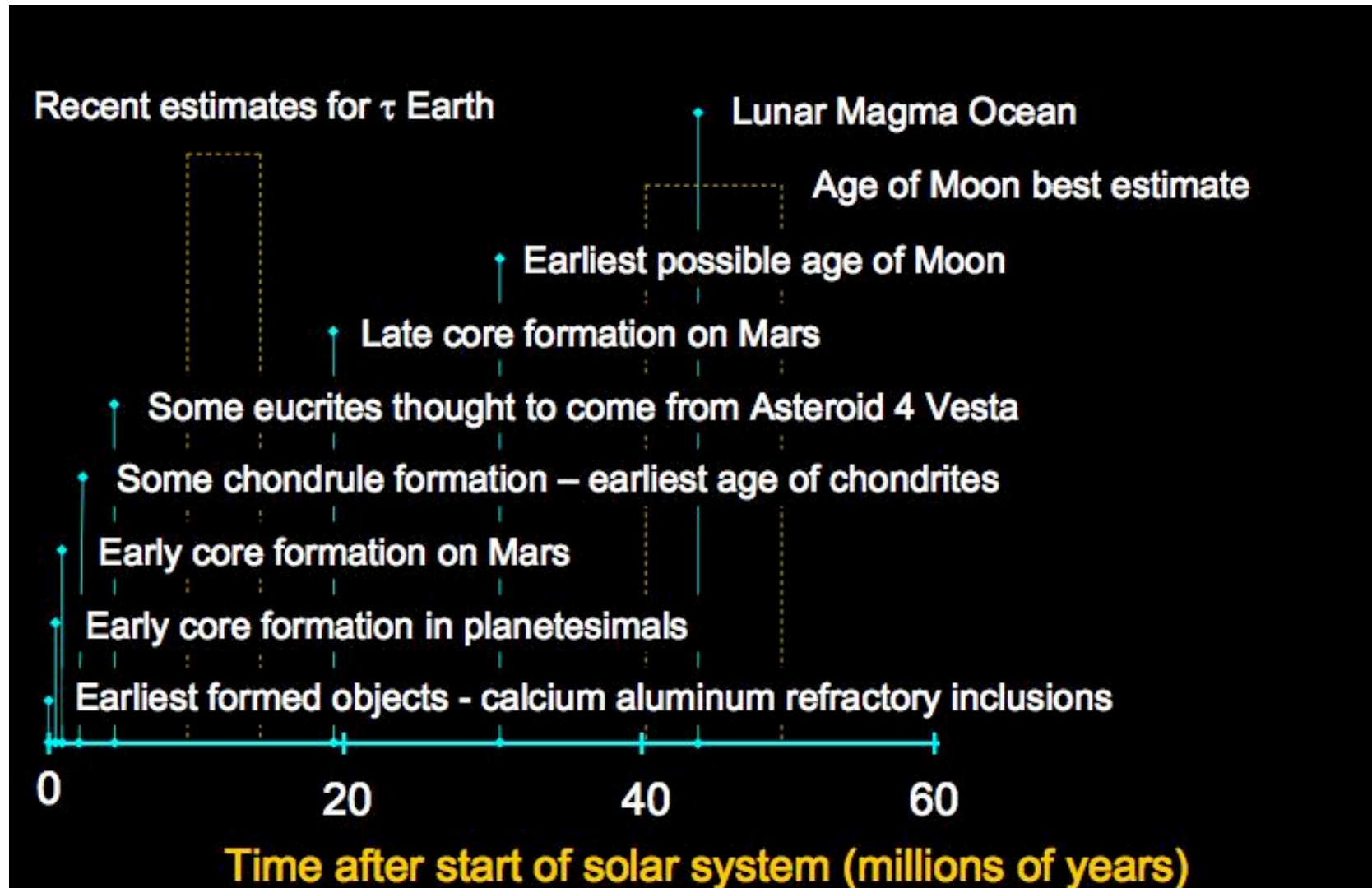


◆ Formation des noyaux planétaires

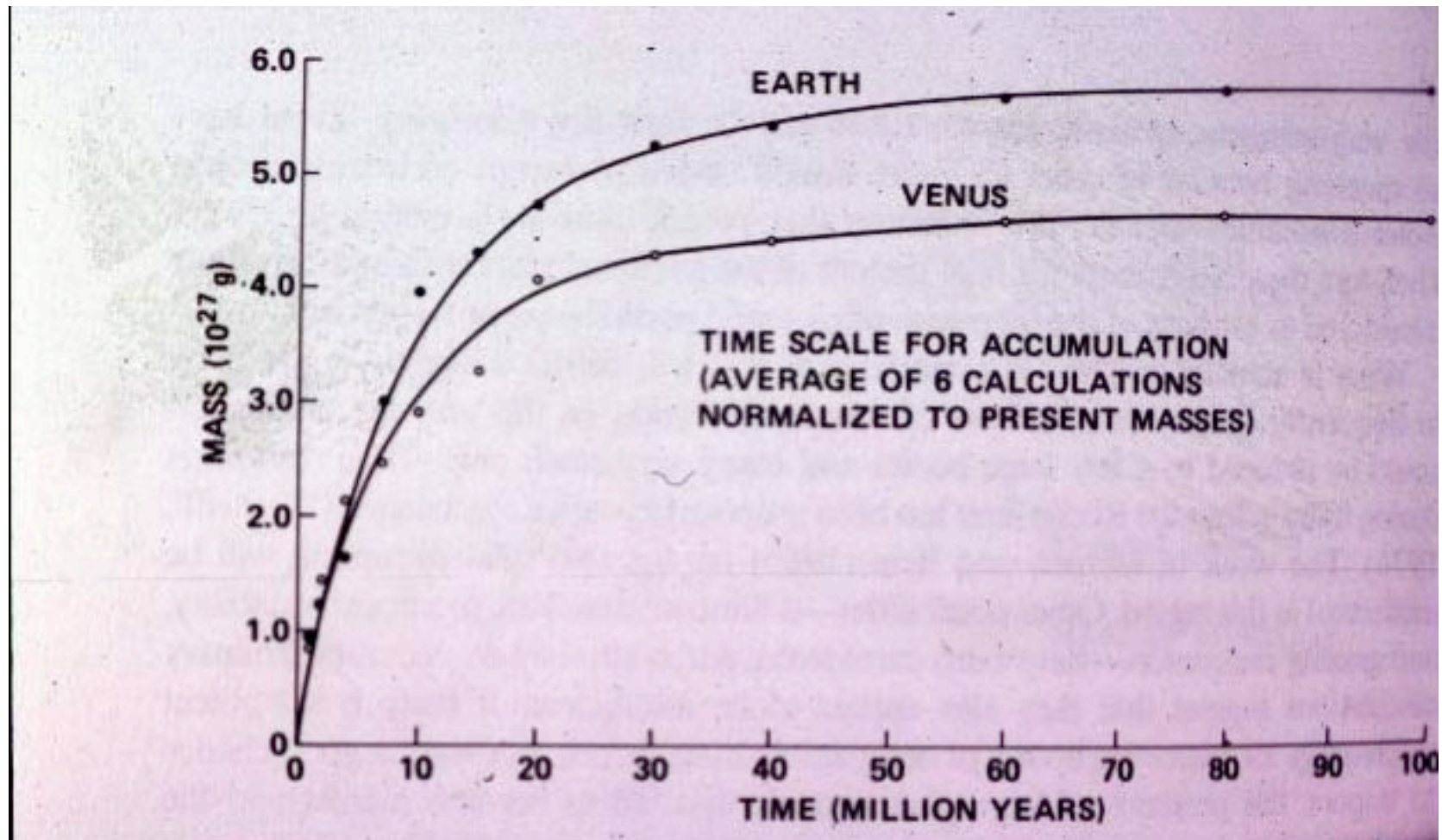
Piégeage dans les noyaux des planètes du tungstène alors que l'Hafnium reste dans le manteau



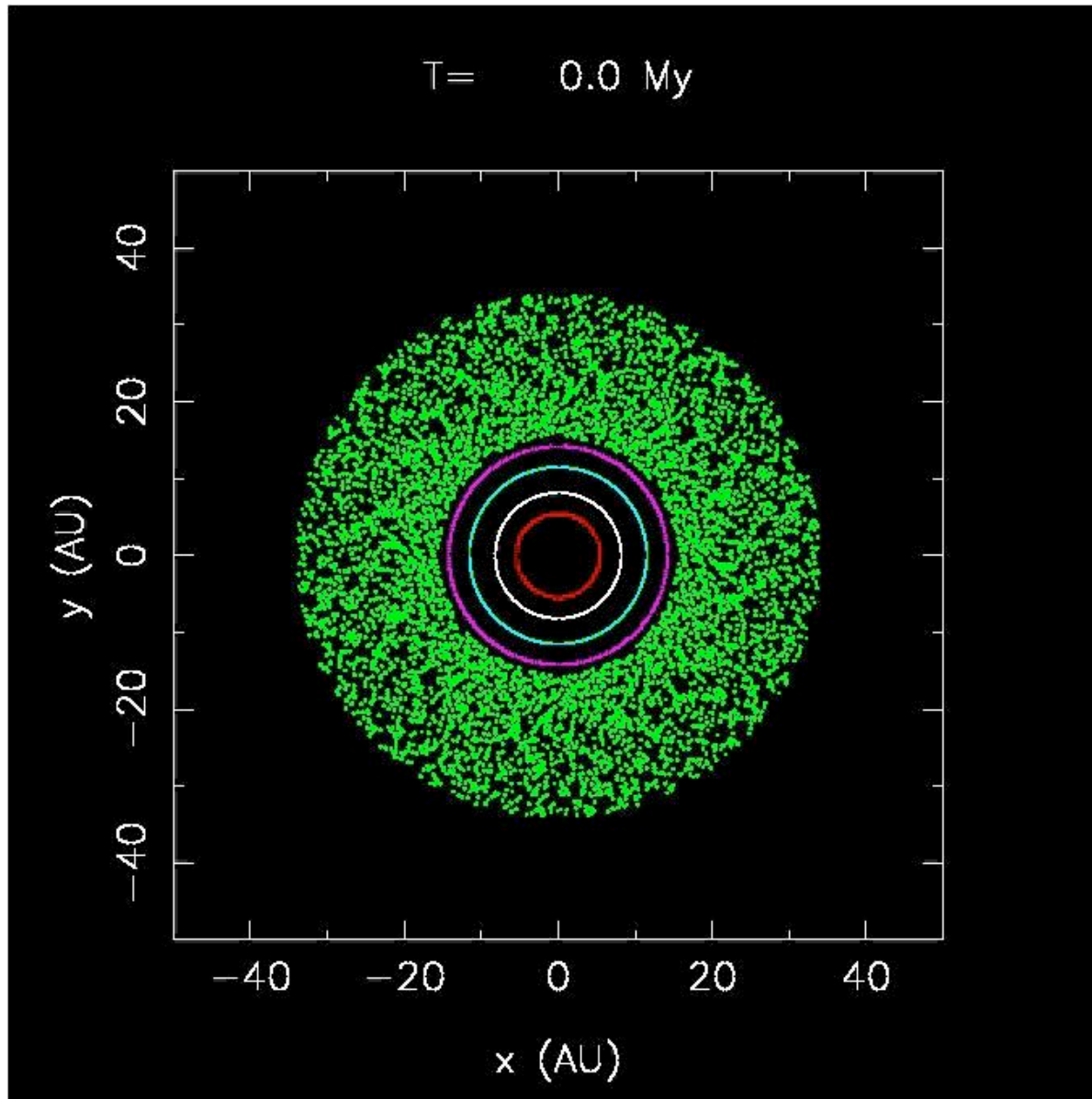
Scénario de formation



Croissance de la Terre



Migration et résonance



Etats des connaissances

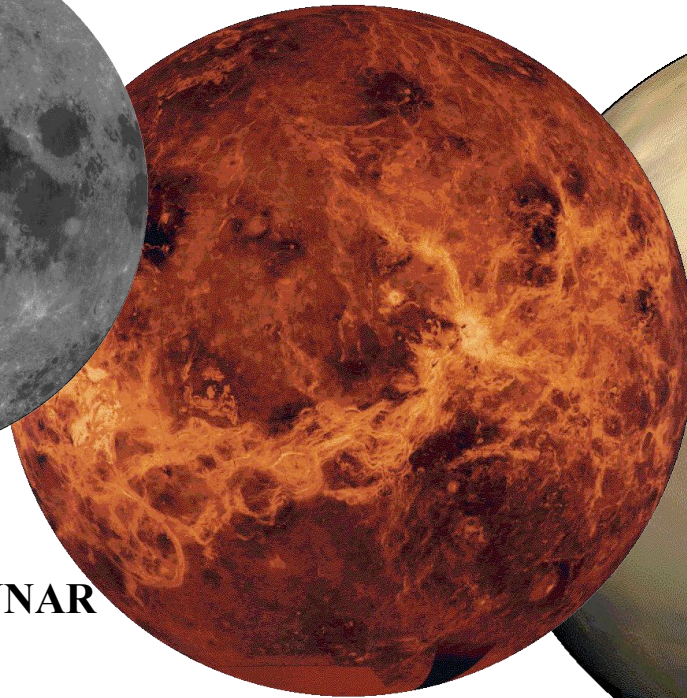
- ◆ Astronomie et observations depuis la Terre
- ◆ Missions Spatiales
- ◆ Echantillons

Les missions spatiales : passées



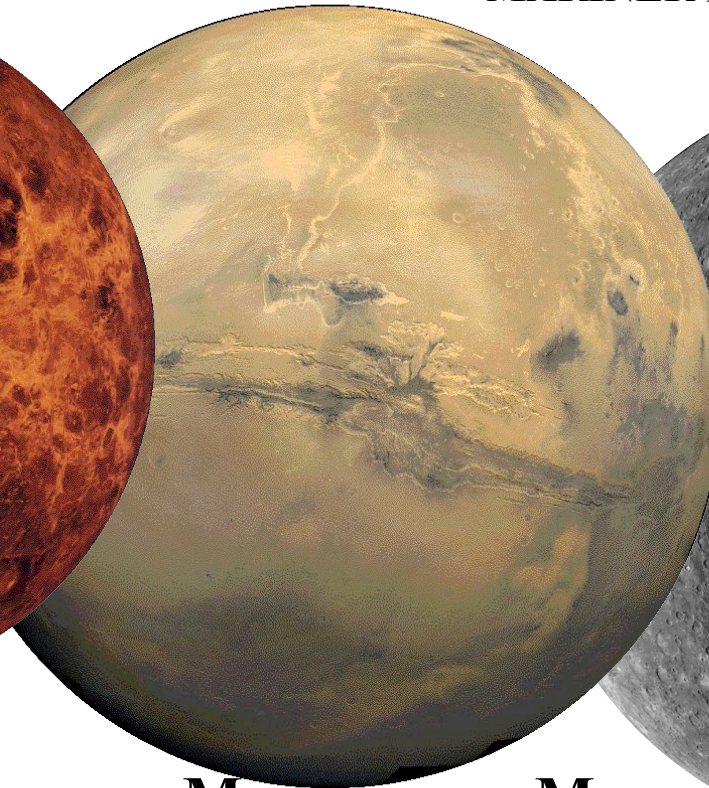
Lune

USA: APOLLO, LUNAR PROSPECTOR, CLEMENTINE
USSR: LUNA



Venus

USA: MAGELAN, PIONIER VENUS
USSR: VENERA



Mars

USA: MARINER, VIKING, PATHFINDER 1996
MGS1996
USSR: MARS

MARINER 9



Mercure

Présent et Future



Lune

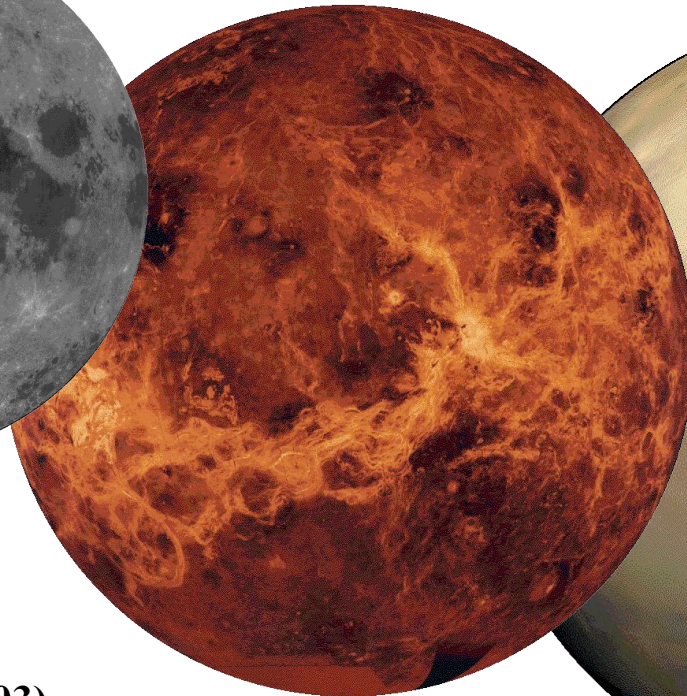
LUNAR-A/ISAS

2003

SMART 1 (ESA, 2003)

SELENE/ISAS-NASDA

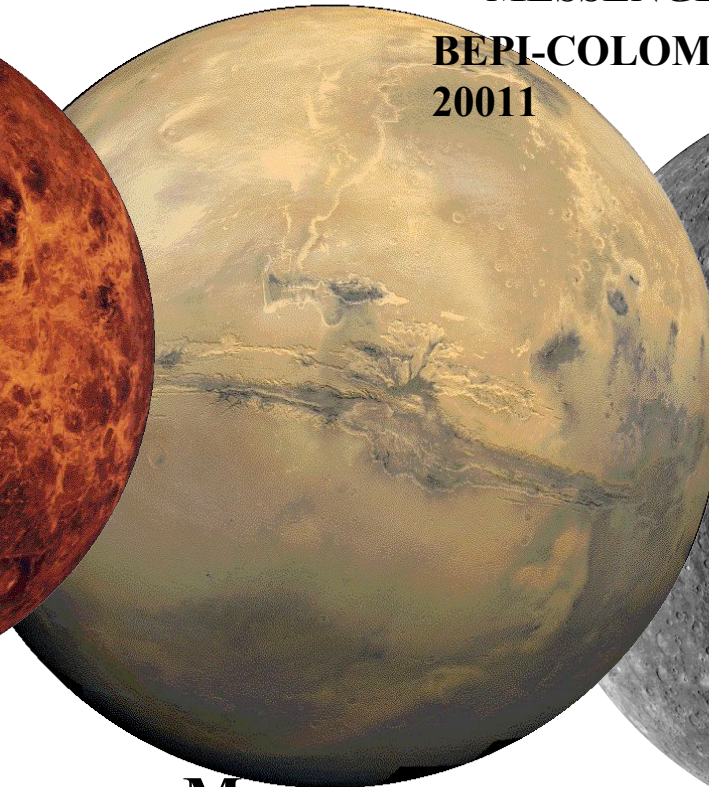
2005



Venus

VENUS EXPRESS ESA 2005

VENUS ISAS 2008

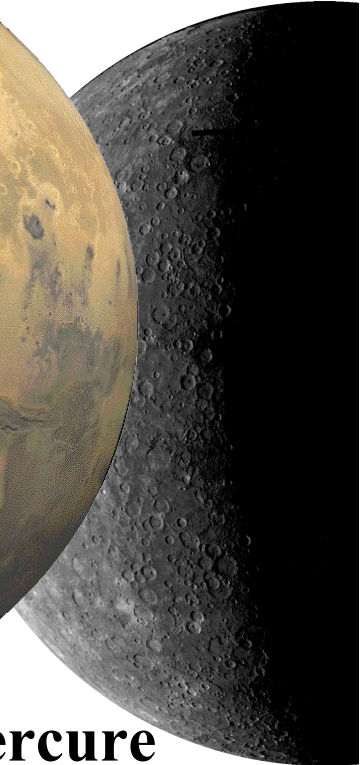


Mars

MARS EXPRESS/ESA 2003

MARS ODYSSEY, MERA-B, PHOENIX 07, MSL09

MESSENGER NASA 2004
BEPI-COLOMBO/ESA/ISAS
2011



Mercure

Echantillons

Génésis (NASA): Vent solaire
Lancement : 8 août 2001
Retour : Septembre 2004
< xx mg

Stardust : Grains cométaires
Lancement : 7 Février 1999
Retour : Janvier 2006
< xx mg

Mars
Lancement: > 2013
Retour: 3 ans après
0,5-2 Kg ?

Muses-C (ISAS) : Astéroïde 1998 SF36
Lancement : Novembre/décembre 2002
Retour : Juin 2007
< xx mg

Apollo (NASA) et Luna (USRR) : Lune
Apollo 11 16-24 Juillet 1969, 20 Kg,
Apollo 12 14-24 Novembre 1969, 34 Kg
Luna 16 12-24 septembre 1970, 101 g
Apollo 14 31 Janvier- 9 Février 1971, 42 Kg
Apollo 15 26 Juillet-7 août 1971, 66 Kg
Luna 20 14 février- 25 février 1972, 30 g
Apollo 16 16-27 Avril 1972, 96 Kg
Apollo 17 7-19 Décembre 1972, 110 Kg
Luna 24 9 août-22 août 1976, 170g



- ◆ Mais aussi des échantillons venus naturellement sur Terre
 - Météorites Lunaires
 - Météorites Martiennes (SNC)
 - Météorites de Cères (Eucrites)

Mesurer la densité d'une planète

◆ Principe de la mesure:

- Mesurer l'attraction gravitationnelle à une certaine distance et donc la masse M

$$\vec{\gamma} = -G \frac{M}{r^2} \vec{e}_r$$

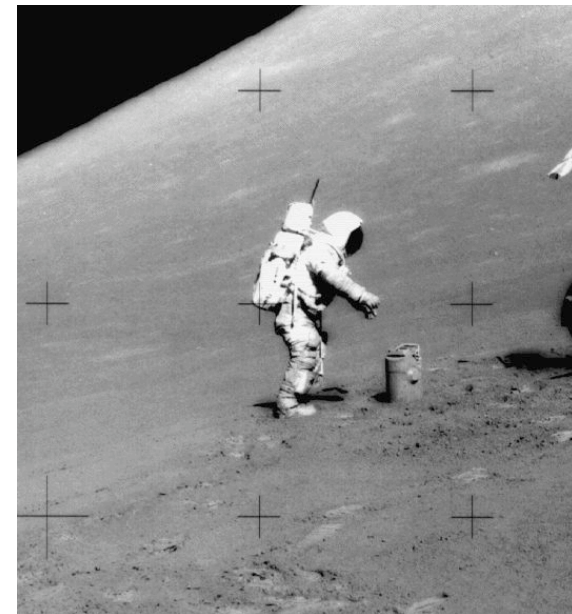
- Mesurer le rayon de la planète et donc le volume moyen $V = \frac{4}{3} \pi r^3$
- $\rho = M/V$

◆ Outils de mesure

- Sur Terre, gravimètre (mesure directe de l'accélération)
- Pour des planètes avec un satellite naturel, les lois de Kepler
- Pour des planètes sans satellite naturel, les satellites artificiels!

Gravimètres

- ◆ Gravimètres utilisés sur Terre et (sans succès) sur la Lune
- ◆ Plusieurs méthodes (masse suspendue à un ressort et mesure de la position d'équilibre, chute libre et mesure du temps de chute)
- ◆ Mesure de la pesanteur et non de la gravité (attraction ET l'accélération centrifuge associée à la rotation de la planète)



Satellites

- ◆ Considérons un satellite en orbite autour d'une planète (orbite circulaire)

$$\vec{\gamma} = -G \frac{M}{r^2} \vec{e}_r = -\omega^2 r$$

d'où

$$GM = \omega^2 r^3 = 4\pi^2 \frac{r^3}{T^2}$$

- ◆ Mars a deux satellites: Phobos et Deimos

- La mesure des périodes et demi-grand axes donne la masse de Mars avec lois de Kepler
 - » 0.16% (Hall, 1878), $3 \cdot 10^{-4}$ % (Mariner 4, 1965), $< 10^{-4}$ % (Mariner 9-Viking, 1976)
 - » Erreur sur $G = 14 \cdot 10^{-4}$ % , première source d'erreur sur la masse des planètes

Densité des planètes

- ◆ Différence de densité non comprimée
 - $<.1$ pour Jupiter/Saturne (riches en Hydrogène)
 - 0.3 pour Uranus/Neptune (glaces volatiles)
 - $3,75-4$ pour Venus-Terre-Mars: assez comparables
 - $5,3$ pour Mercure: une exception?

	Planètes Telluriques				Planètes géantes				
	Mercure	Venus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune	Pluton
Rayon [km]	2438.	6052.	6371.	3390.	71492.	60268.	24973.	24764.	1152.
Mass [10^{24} kg]	0.3302	4.869	5.974	0.6419	1899.	568.46	86.63	102.4	0.0131
Masse volumique [10^3 kg/m ³]	5.430	5.243	5.515	3.934	1.326	0.6873	1.318	1.638	2.050
Masse volumique non-comprimée [10^3 kg/m ³]	5.3	4.0	4.05	3.75	0.1	0.1	0.3	0.3	2.0

Pression et gravité

- ◆ Pression et gravité dans une planète

$$-\frac{dP}{dr} + \rho g = 0$$

$$M(r) = \frac{4\pi}{3} \rho r^3$$

$$g = -G \frac{M(r)}{r^2} = -\frac{4\pi G}{3} \rho r$$

- ◆ Dans le cas homogène

$$P = P_s + \frac{4\pi G}{6} \rho^2 (a^2 - r^2)$$

Pression et gravité

◆ Pression et gravité dans une planète

$$-\frac{dP}{dr} + \rho g = 0$$

$$M(r) = \frac{4\pi}{3} \rho r^3$$

$$g = -G \frac{M(r)}{r^2} = -\frac{4\pi G}{3} \rho r$$

Application:

$\rho=4000$

R=1740 km P~7 Gpa

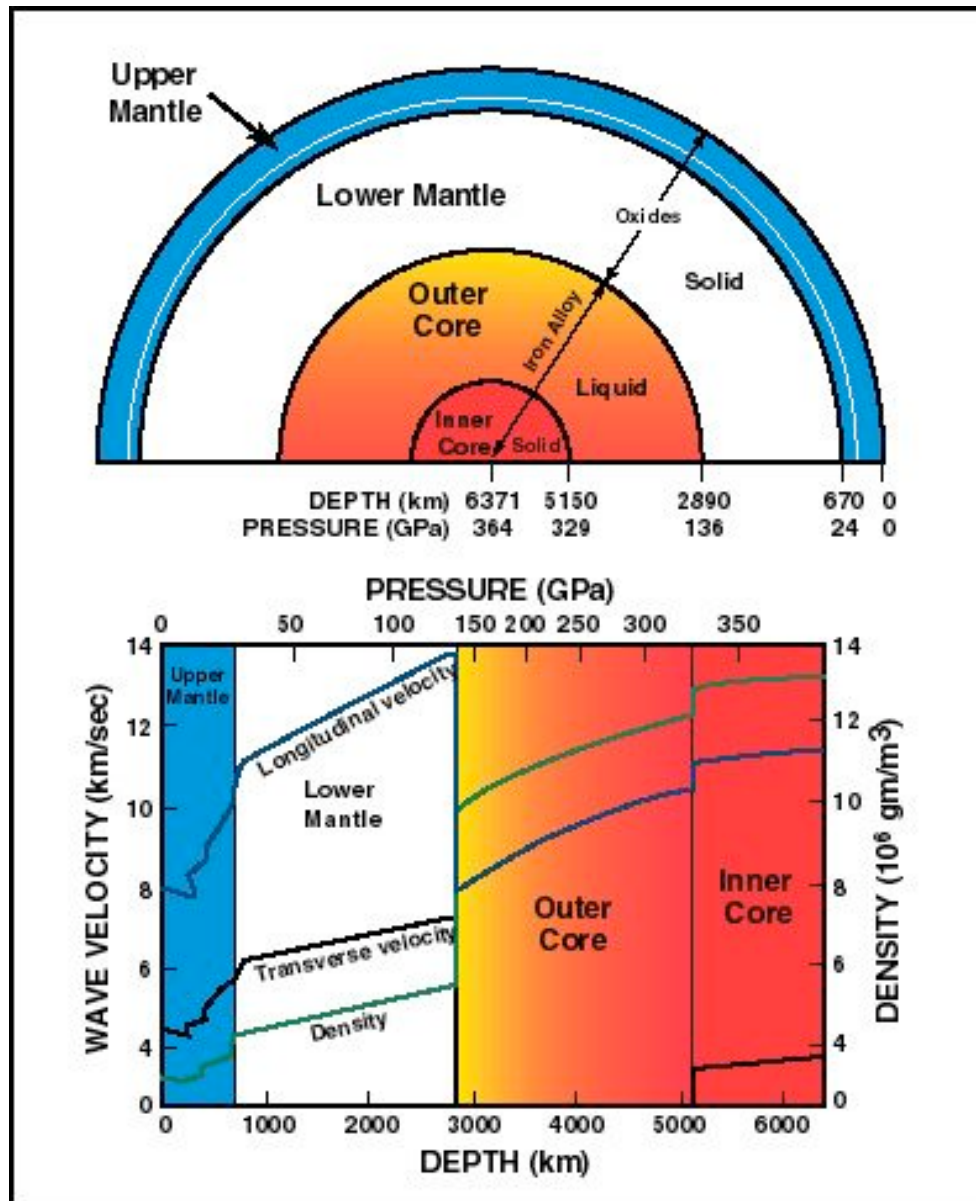
R=3400 km P~26 Gpa

R=6400 km P~100 Gpa

◆ Exercice: montrer que dans le cas homogène

$$P = P_s + \frac{4\pi G}{6} \rho^2 (a^2 - r^2)$$

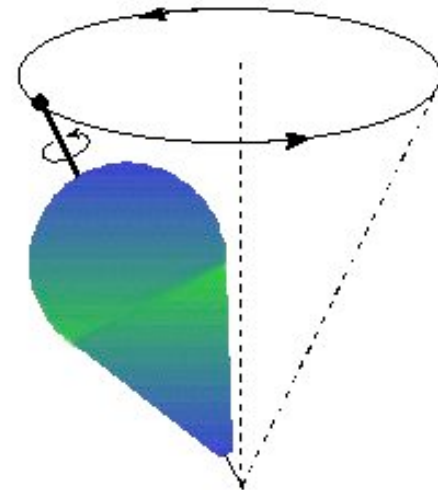
Noyau des Planètes



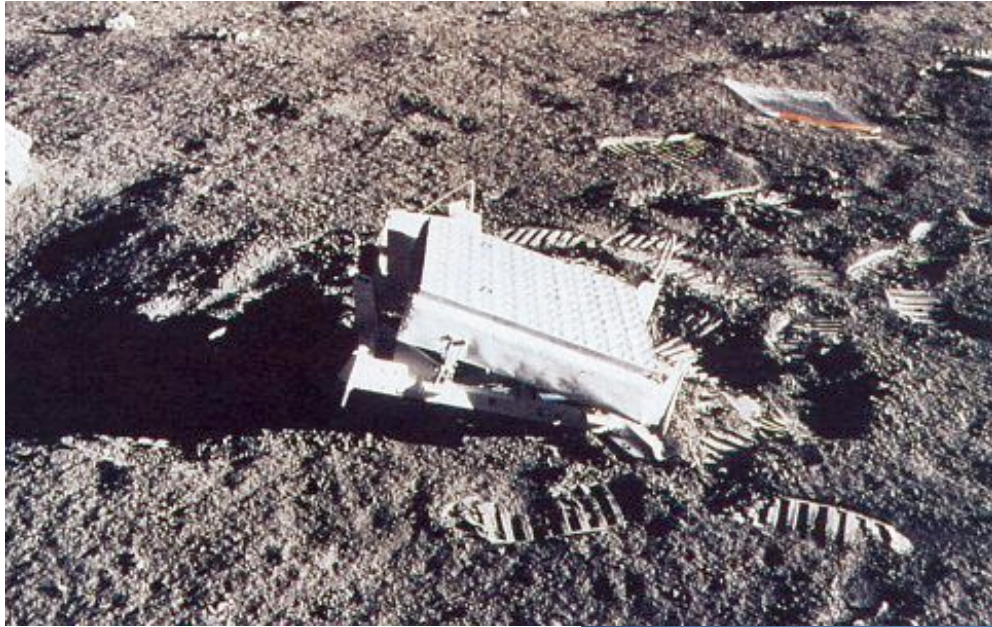
- ◆ Les densités des planètes telluriques sont trop importantes pour avoir uniquement des matériaux silicatés
- ◆ Seul un noyau avec des densités élevées permet de les expliquer
- ◆ Plus d'information?

Mesurer le moment d'inertie

- ◆ Etude de la rotation des planètes
- ◆ Pour la Terre, première étude faite par Hyparque vers 130 AC
 - Période de précession de 26 000 ans
- ◆ La rotation est connue avec précision
 - depuis les missions Apollo pour la Lune
 - Depuis le mission Pathfinder pour Mars
 - Elle reste inconnue pour Mercure et pour Vénus



Mesure pour la Lune



Mesure pour Mars

- ◆ Mesures de Doppler et de distance de Pathfinder, 20 ans après Viking
- ◆ Mesure directe de la vitesse de précession des équinoxes
- ◆ Le moment d'inertie est déduit à partir de l'équation de la rotation de la planète
 - Calcul des moments exercés par l'attraction des autres planètes

Constante de précession:

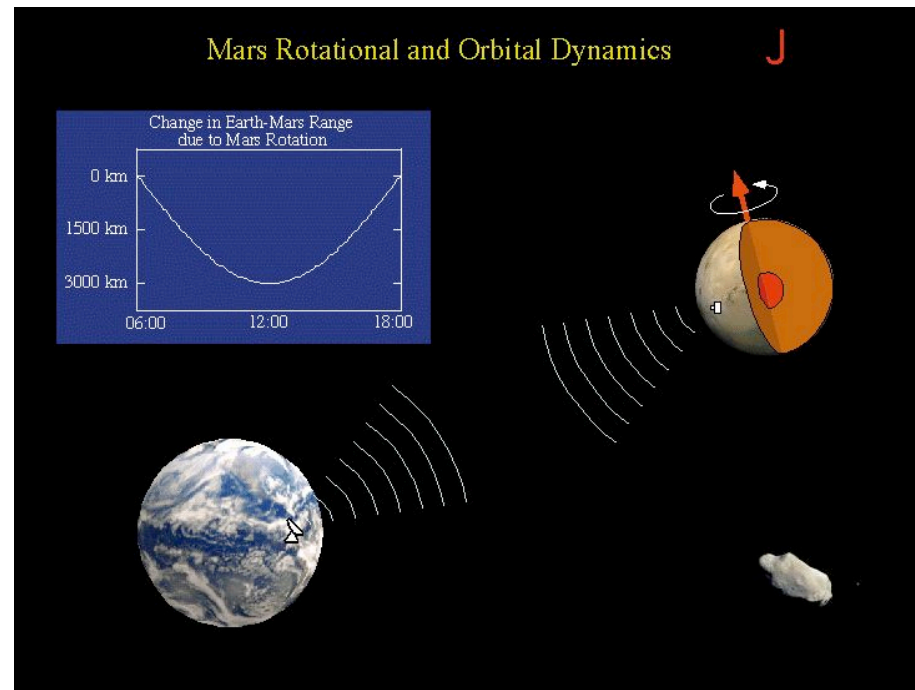
-7576 ± 35 mas/an

Période de précession:

170 000 ans

Moment d'inertie C

$C/Mr^2 = 0.3662 \pm 0.0017$



Moment d'inertie

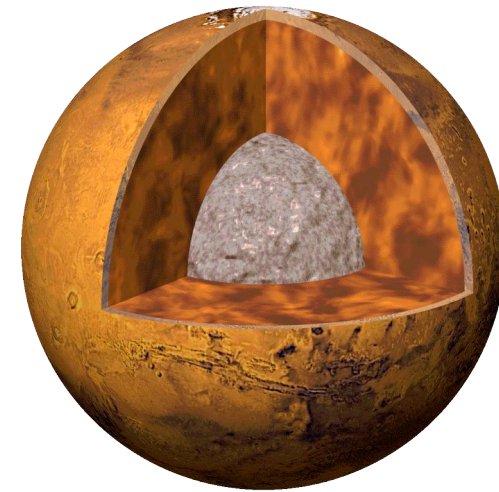
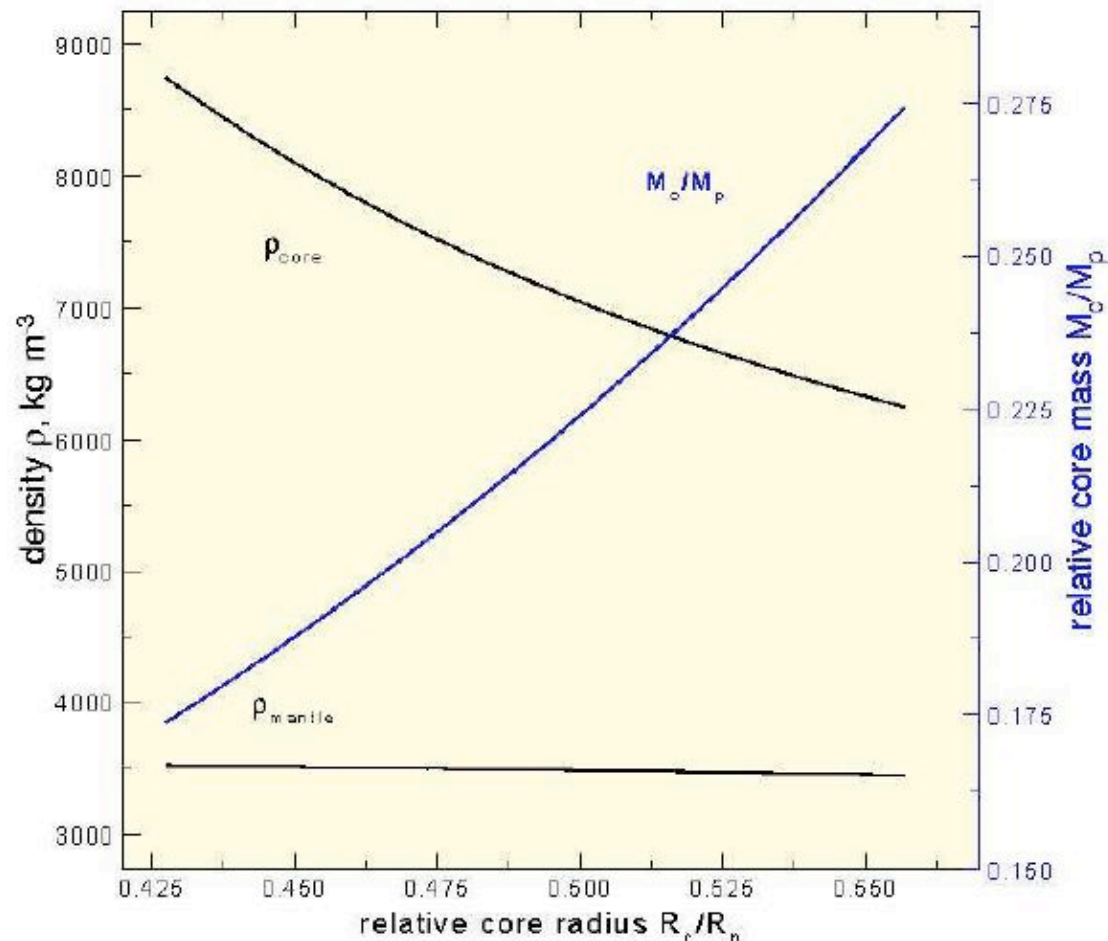
- ◆ Moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation C

$$C = \int dV \rho d^2 \approx \frac{2}{3} \int dV \rho r^2$$

- ◆ Exercice: Calculer le moment d'inertie pour une planète homogène
- ◆ $0 < C < 2/5 Ma^2$
- ◆ Cas extrêmes
 - pour une planète homogène
 - pour une « planète » avec toute la masse concentrée au centre

Mars et son noyau

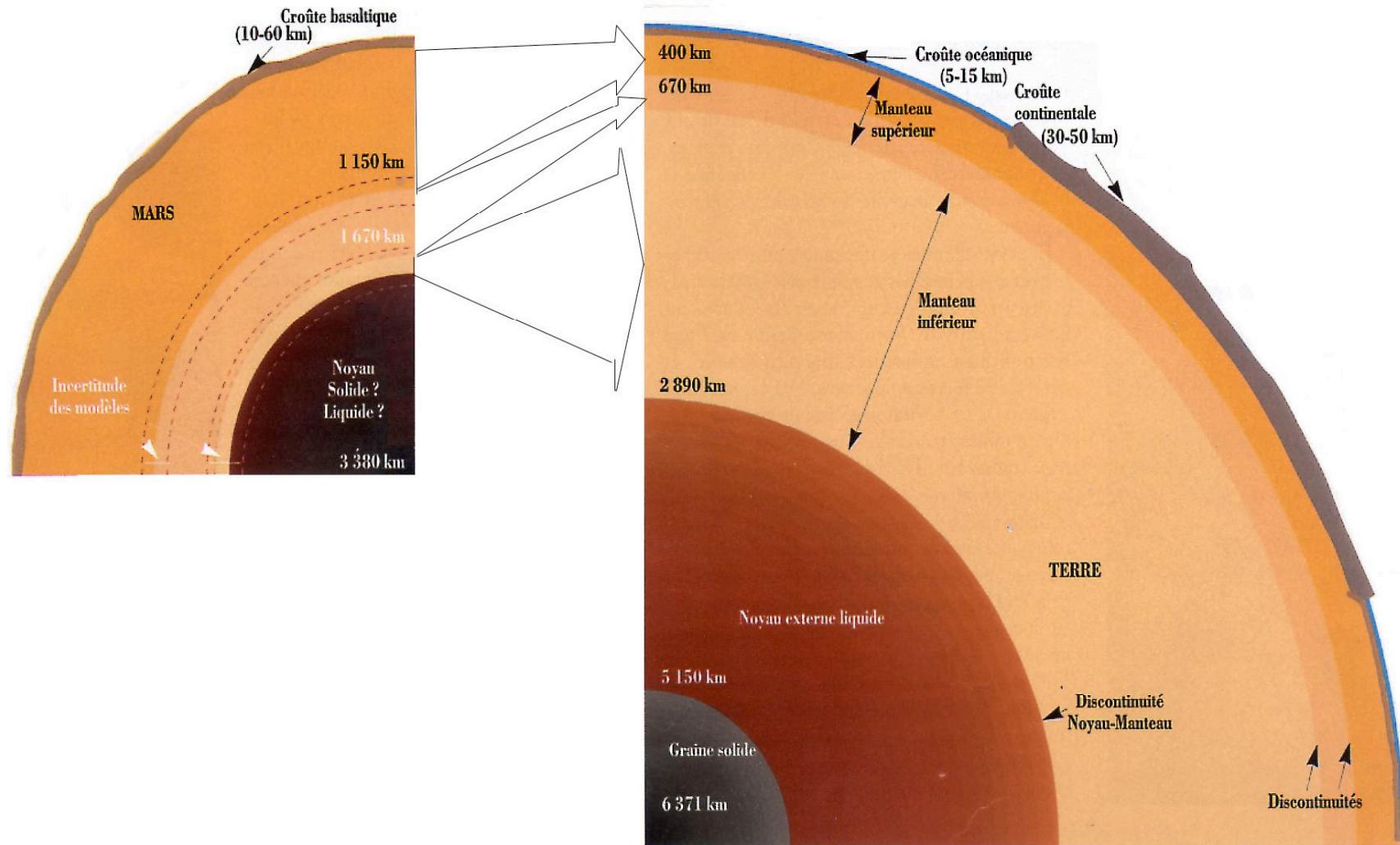
Mantle and Core Densities and Core Mass Fraction



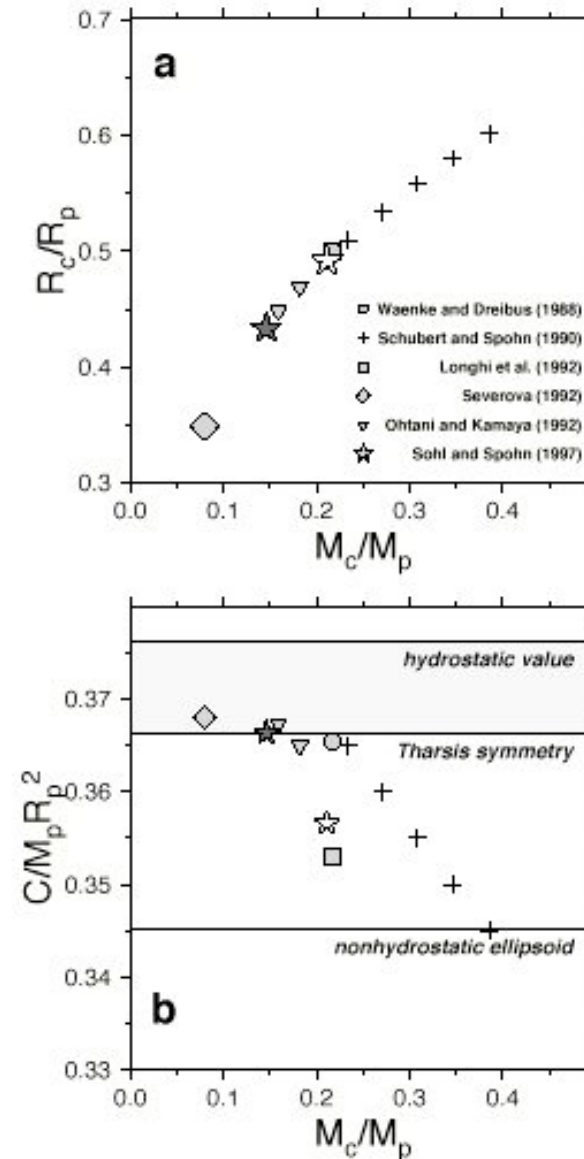
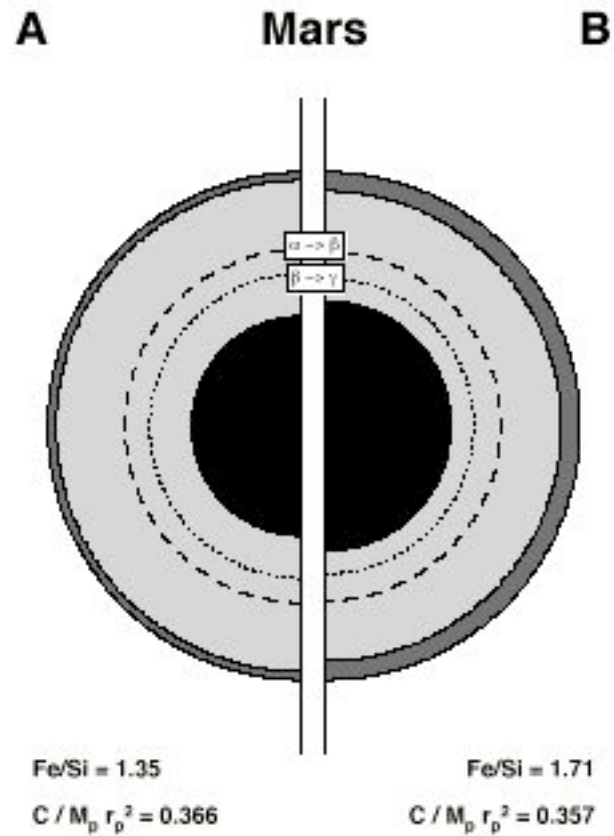
Mars

- 2 nombres sont disponibles
Si la densité du manteau est donnée, deux nombres peuvent être estimés (taille et densité du noyau)

Structure interne a priori



contraintes géophysiques...

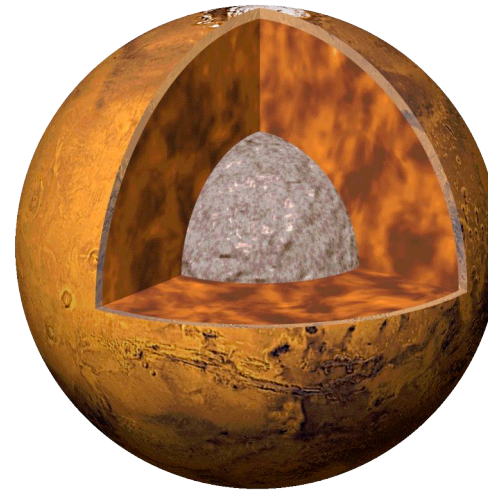


Noyaux planétaires

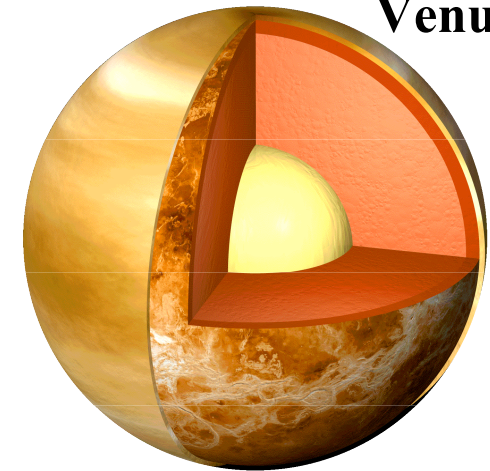
	Mercure	Venus	Terre	Mars	Lune	Ganymede	Io
Rayon	0,38	0,95	1	0,54	0,27	0,41	0,28
Masse	0,055	0,815	1	0,107	0,012	0,018	0,015
densité	5430	5250	5515	3940	3340	1940	3554
Densité non comprimée	5300	4000	4100	3800	~3300	1800	~3500
Moment d'Inertie	0,34	?	0,3355	0,3662	0,3905	0,3105	0,378
Rayon Noyau	0,8	0,55	0,546	0,5	0,25	0,30	0,50
Sismologie	NON	NON	OUI	NON	NON	NON	NON

Noyaux planétaires

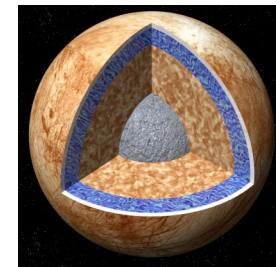
- ◆ Généralité des planètes telluriques
- ◆ Typiquement 0,5 en rayon
- ◆ Deux exceptions:
 - La Lune : petit noyau
 - Mercure Gros Noyau
- ◆ Une explication:
 - les impacts catastrophiques ?
 - La proximité du soleil pour Mercure?



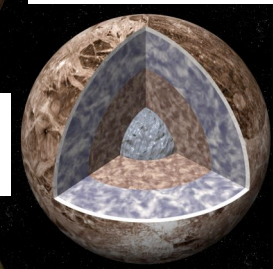
Mars



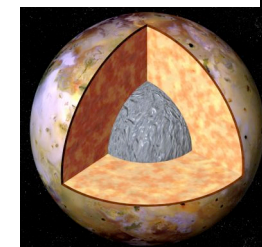
Venus



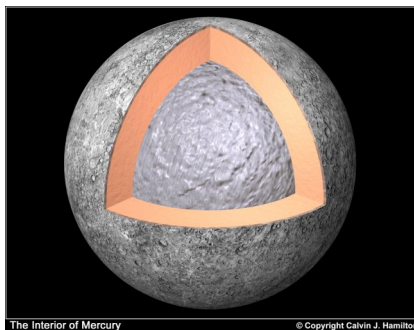
Europa



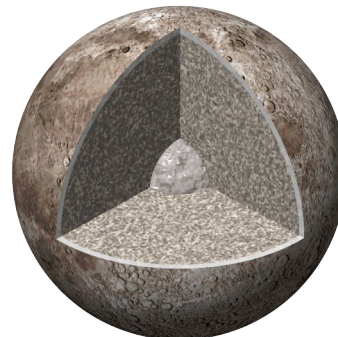
Ganymede



Io



Mercure



Lune

Les impacts catastrophiques

◆ Les paramètres

- Vitesse d'impact: 20-30 km/s
- Vitesse de libération
- Où g est la gravité, a le rayon

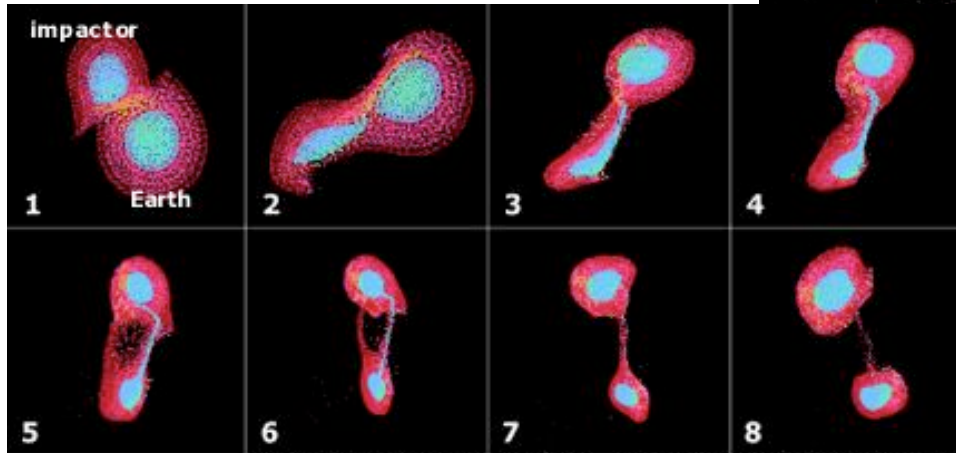
$$\frac{1}{2}v_{lib}^2 = G \frac{M}{a} = ga$$

d'où

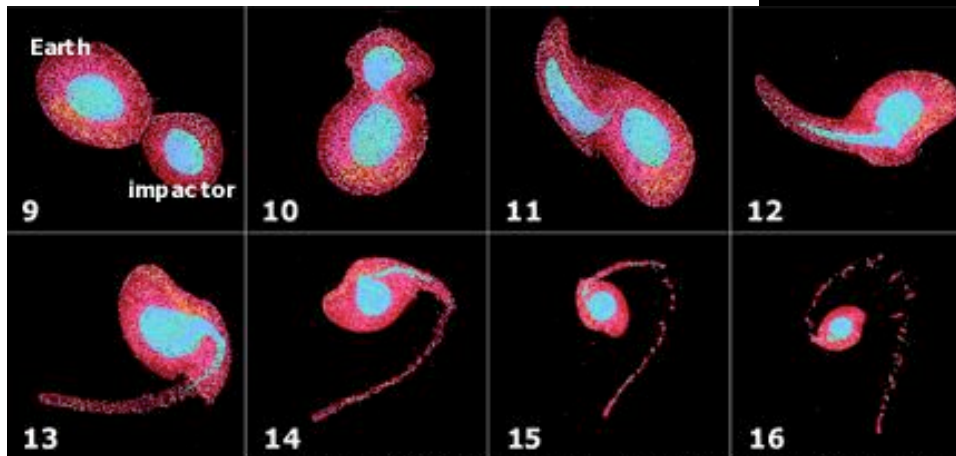
$$v_{lib} = \sqrt{2ga}$$

	Masse	Gravité	Vitesse libération (km/s)
Terre	1	9,78	11,18
Venus	0,815	8,60	10,36
Mercure	0,055	3,71	4,25
Mars	0,107	3,72	5,02

Formation de la Lune: Impact



(Courtesy of A. G. W. Cameron, Harvard College Observatory.)



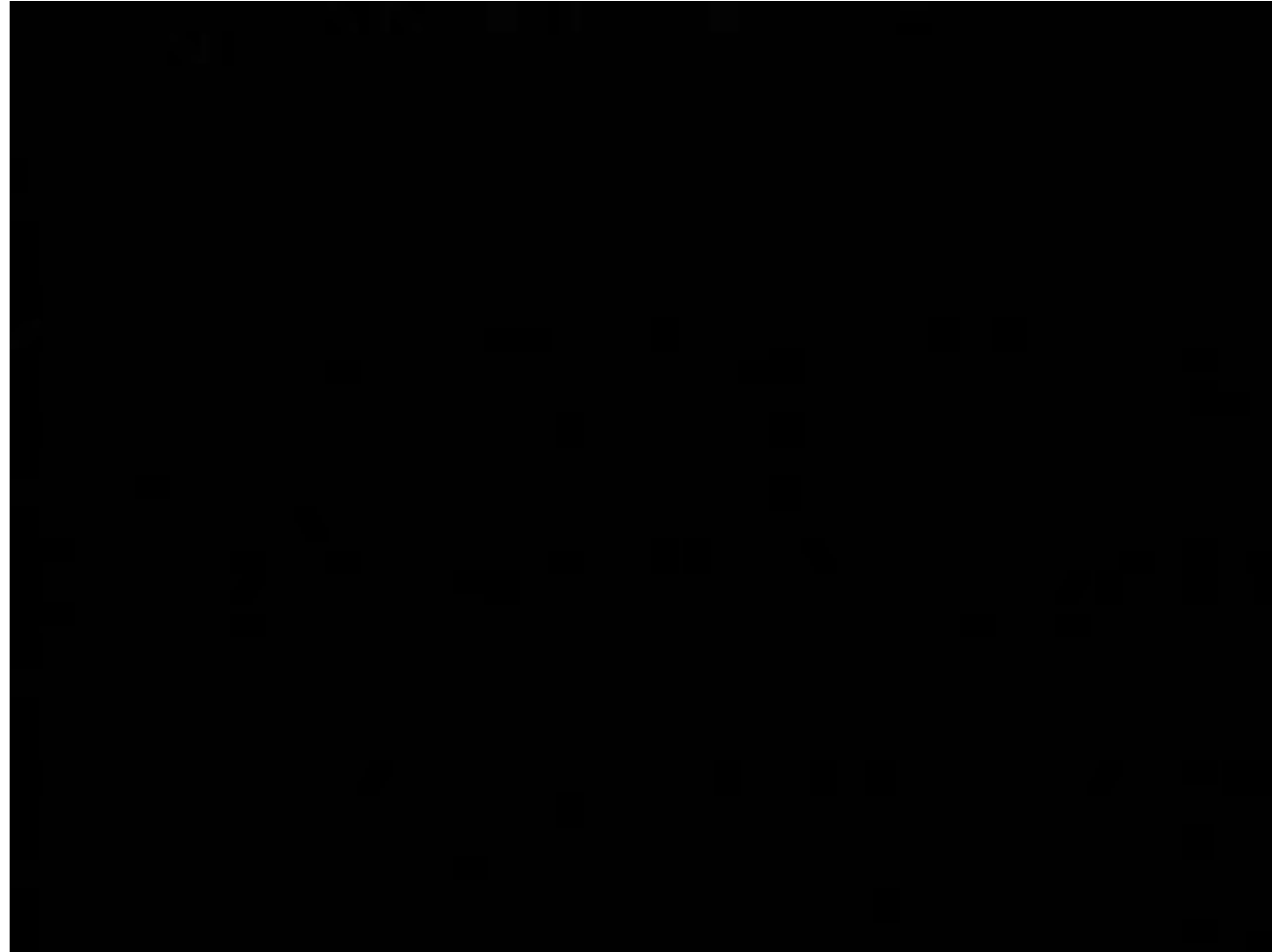
(Courtesy of A. G. W. Cameron, Harvard College Observatory.)

- ◆ Impact géant avec une planète de la taille de Mars
- ◆ Transfert du noyau vers la “Terre”
- ◆ Libération énorme d’énergie

Quelques arguments

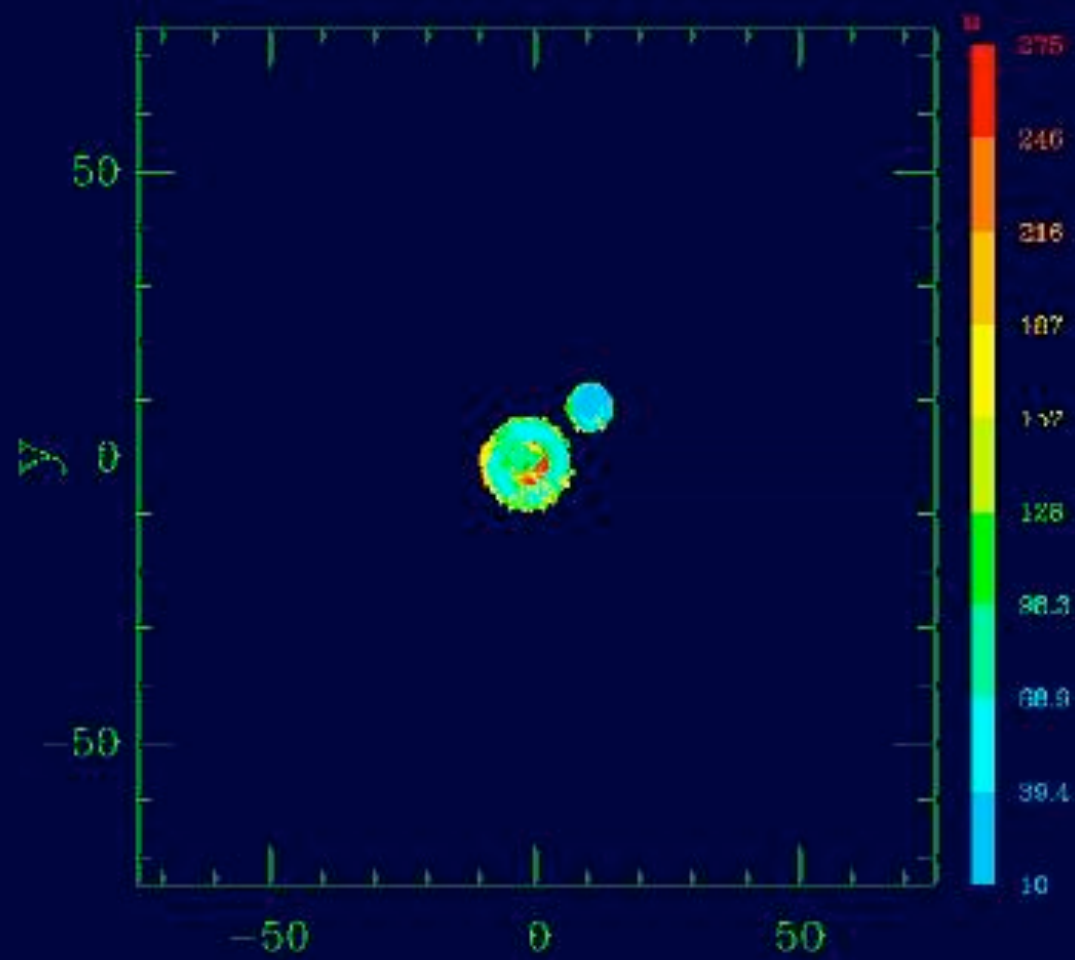
- ◆ Densité moyenne du système Terre-Lune = 4.09 (Vénus = 4., léger enrichissement en éléments lourds)
- ◆ Signature isotopique du manteau et de la Lune très proche: les deux réservoirs ont été mélangés

Les impacts catastrophiques: la Lune



Kokubo et al., 2000

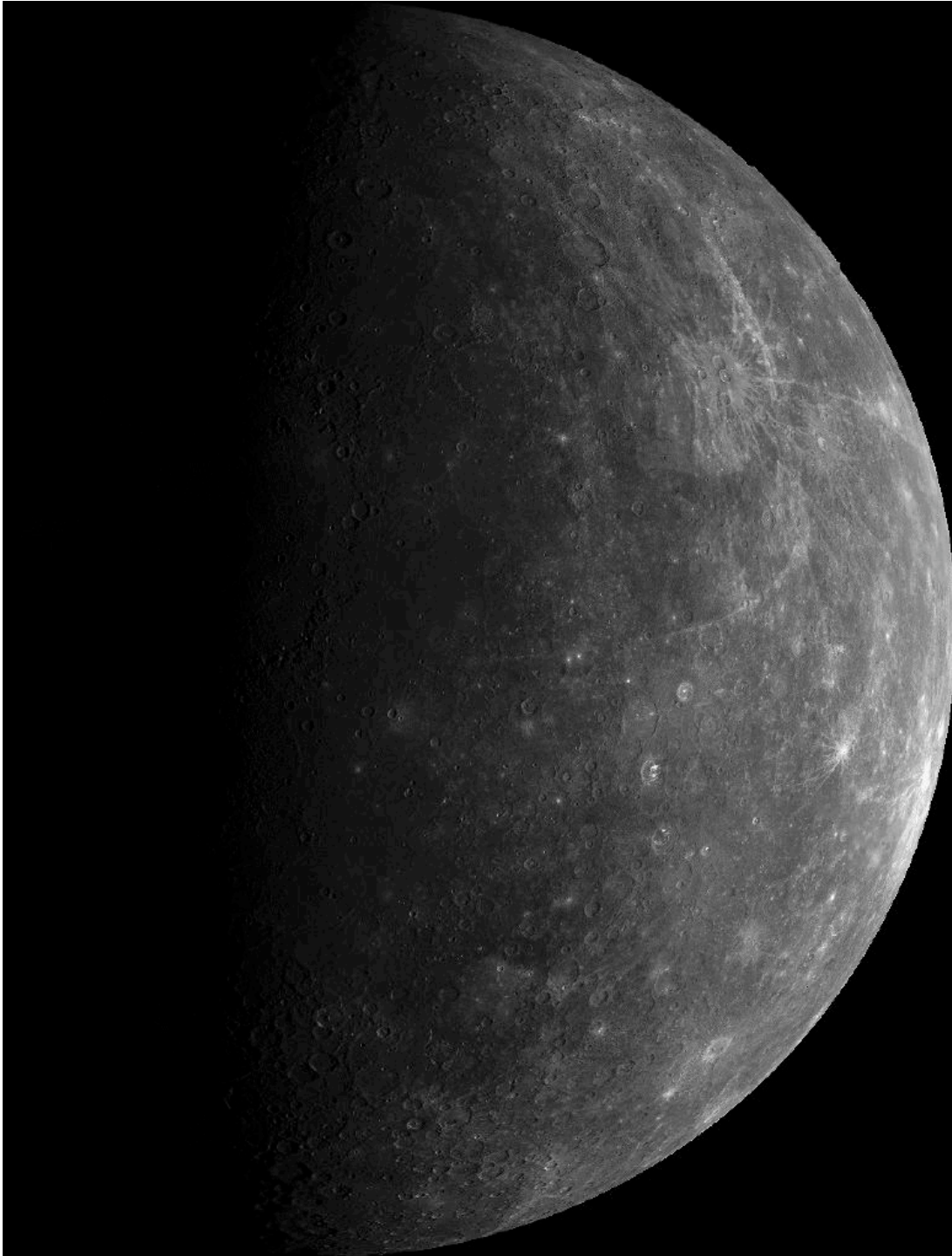
Run 24n



SPH

X

SwRI
xplot



Et Mercure ?

Premières idées et théorie:

- appauvrissement en volatiles en raison de la proximité du soleil dans la nébuleuse primitive
- accrétion à partir de planétésimaux déjà appauvris en volatils



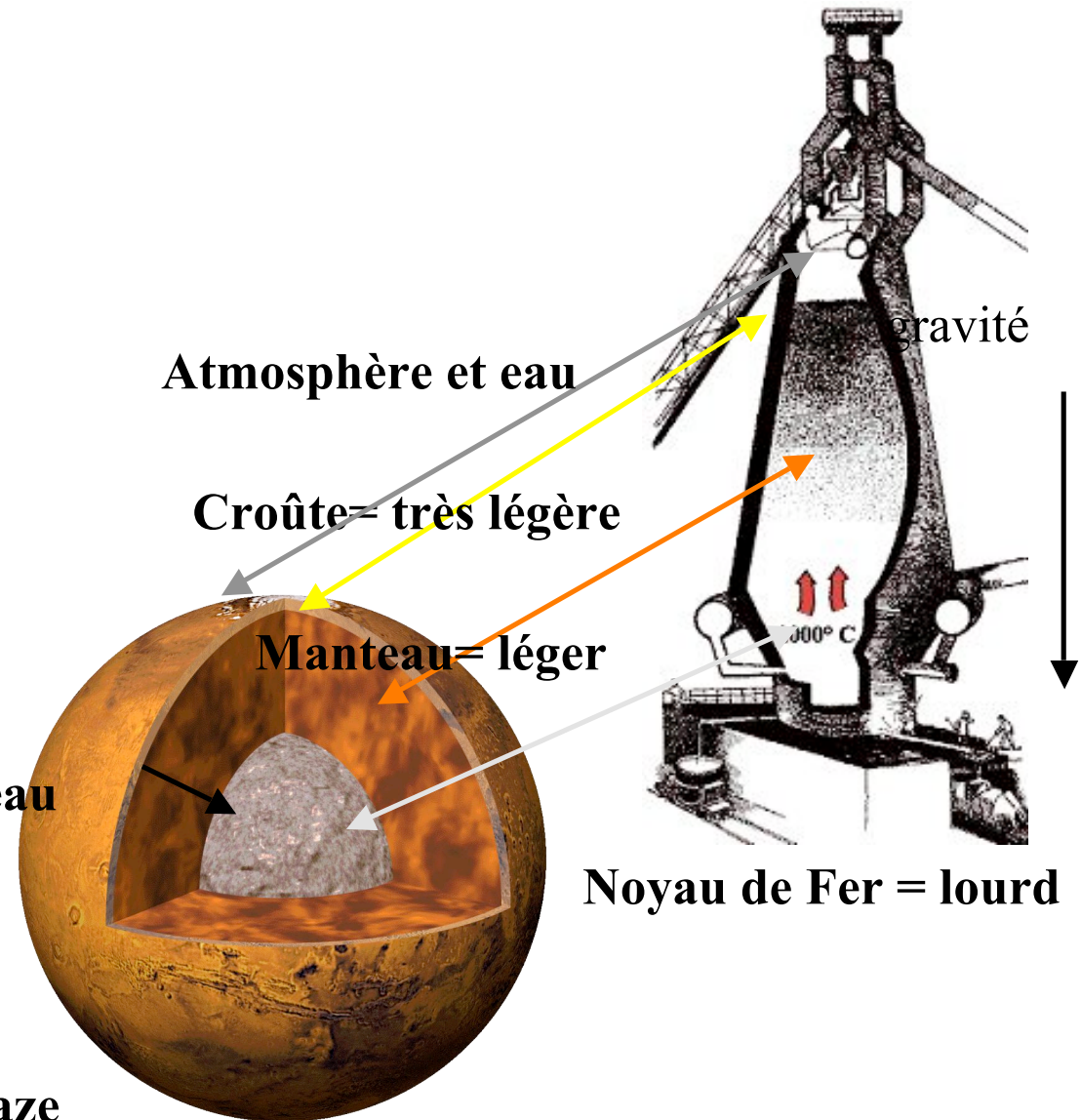
Formation des planètes



Météorites= mélange de fer, de Carbone, d'eau et de roches

**Impacts violents = chaleur =
Température d'un haut fourneau**

Formation de la croûte qui remonte, du noyau qui tombe. Entre les deux le manteau. Au dessus une atmosphère qui dégaze



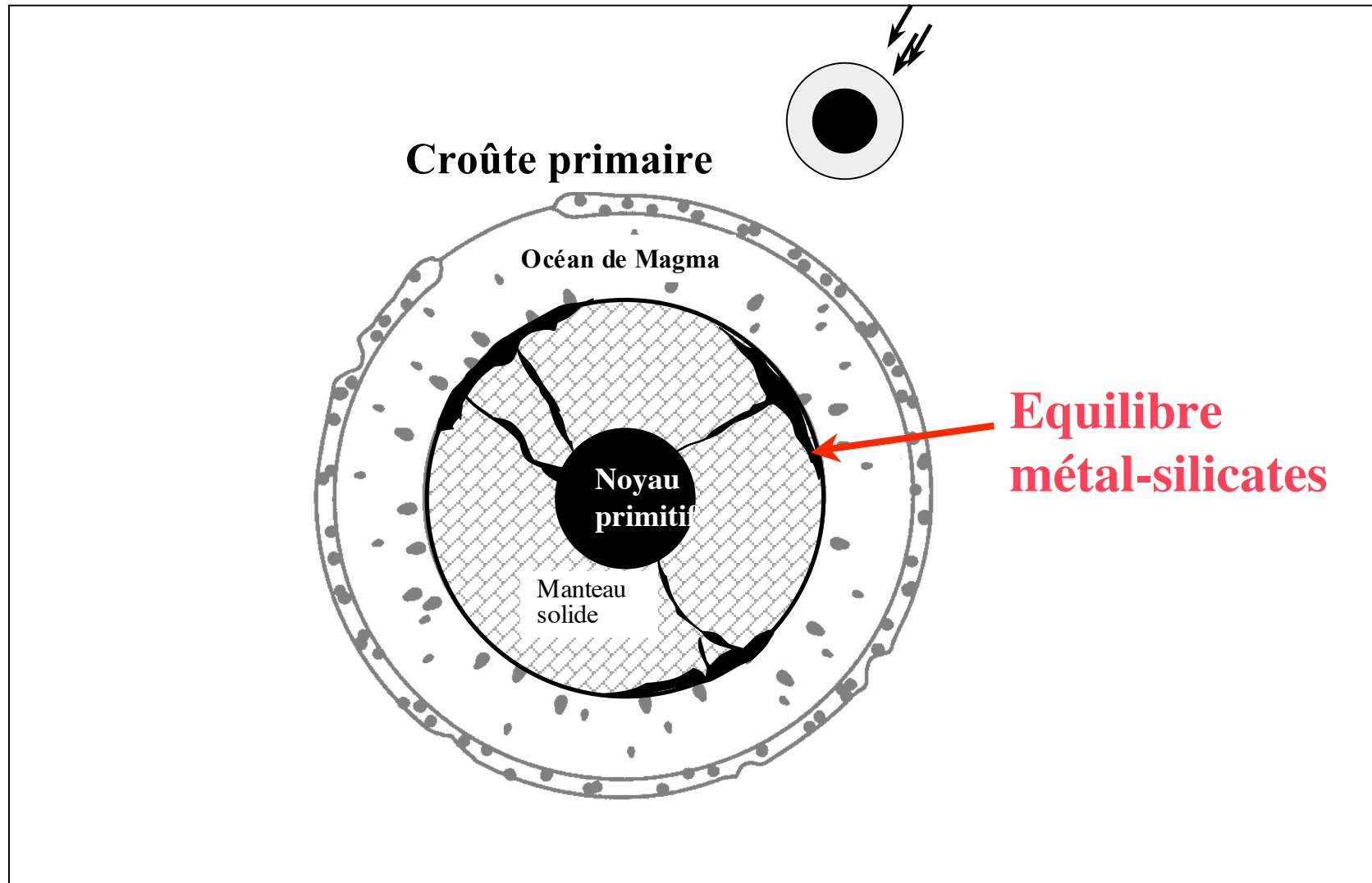
Quelques ordres de grandeur

- ◆ Exercice: calculer l'énergie gravitationnelle d'une planète homogène
- ◆ Ordre de grandeur:
 - Mars 8.25 MJ/kg
 - Terre 37.5 MJ/kg
- ◆ En terme de température
 - $C_p = 1.2$ kJ/kg
 - Même pour Mars, correspond à plus de 6000°C d'élévation de température
 - Energie à l'origine de l'océan de magma
 - Perte d'énergie limitée par une atmosphère dense

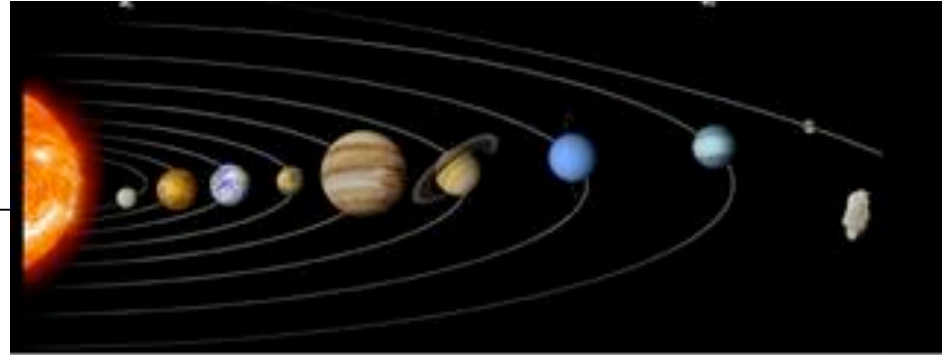
$$U = \frac{3}{5} G \frac{M^2}{a}$$

$$\frac{U}{M} = \frac{3}{5} G \frac{M}{a}$$

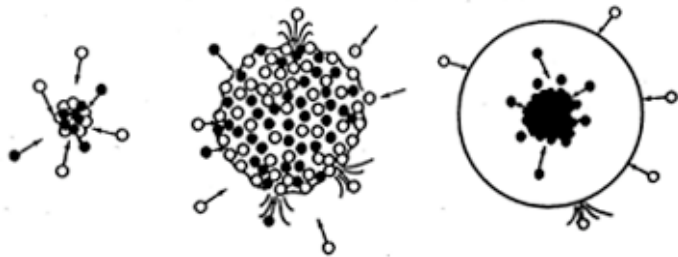
Formation du noyau dans l'océan de Magma



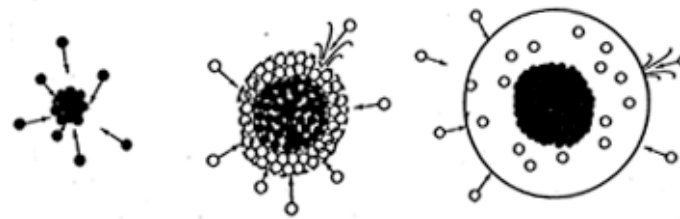
Formation du noyau



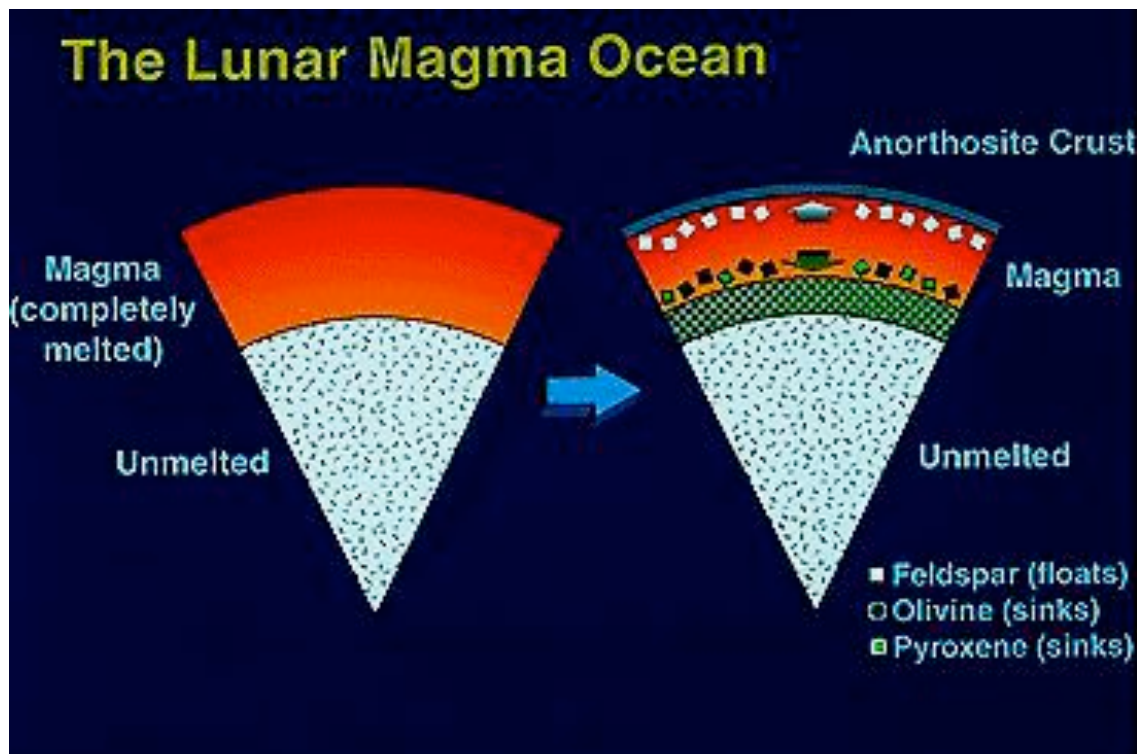
ACCRETION HOMOGENE



ACCRETION HETEROGENE



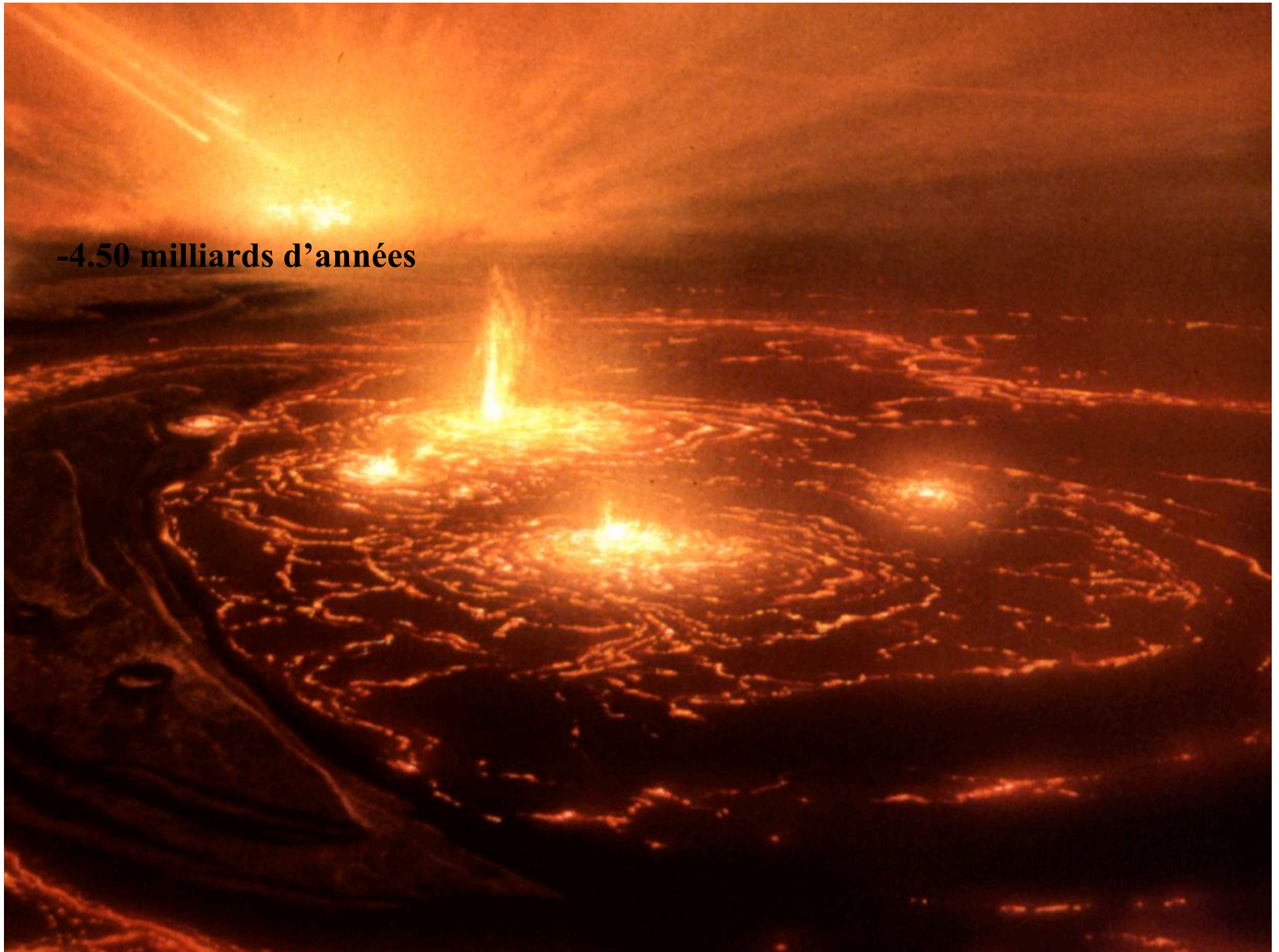
Formation de la croûte primaire



(Graphic by Brooks G. Bays Jr., PSRD graphic artist, Univ. of Hawaii)

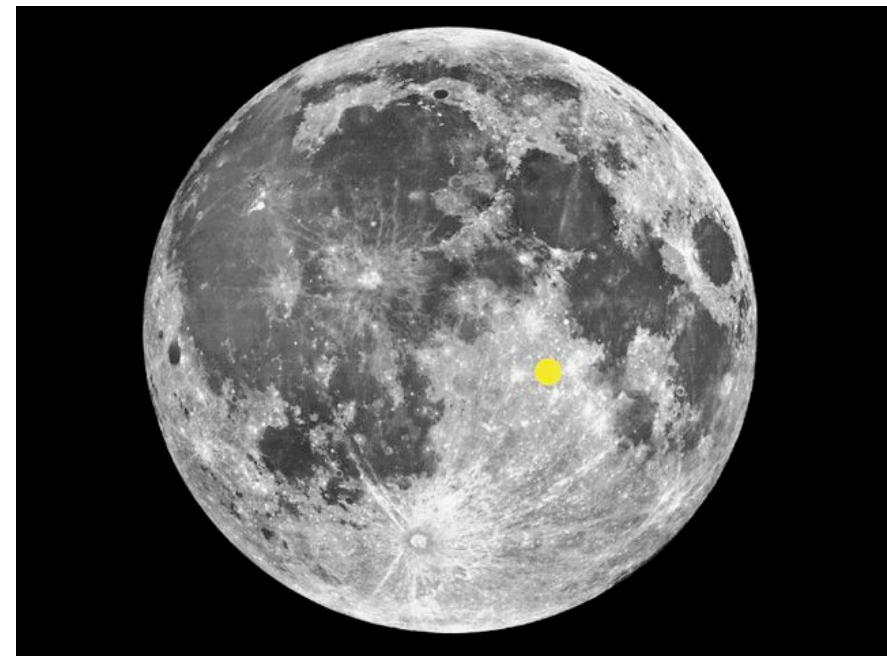
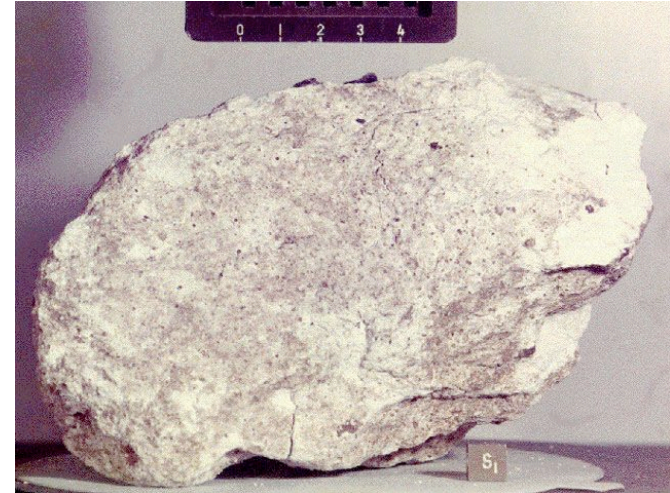
- ◆ Résulte de la différenciation du manteau
- ◆ Produit direct de l'océan de magma

-4.50 milliards d'années

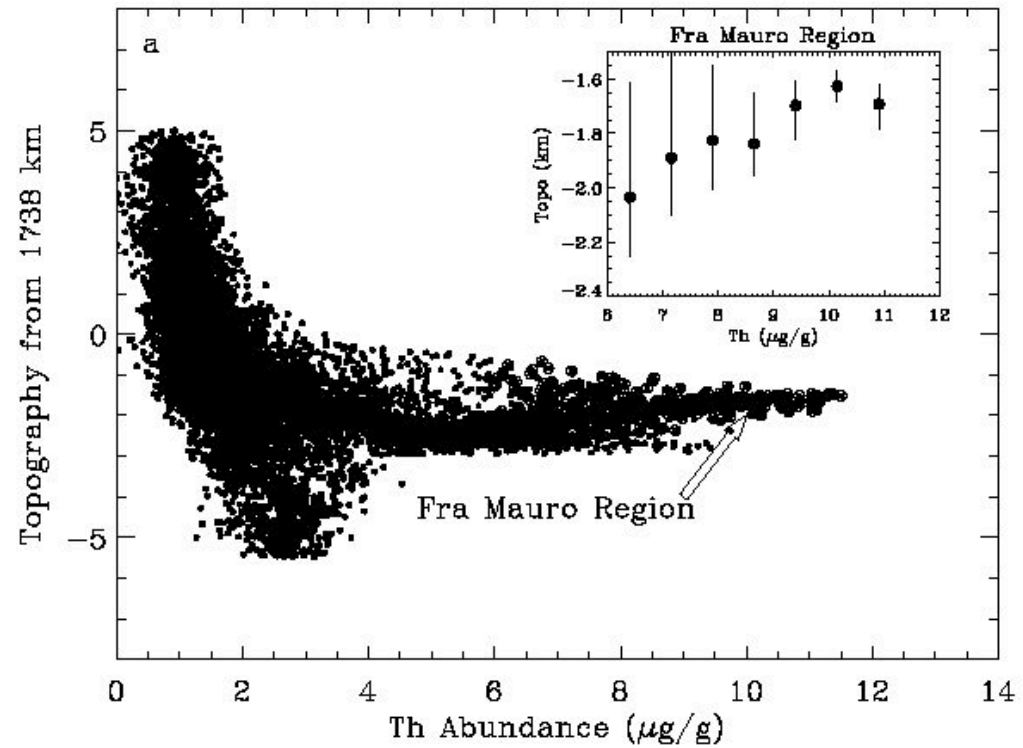
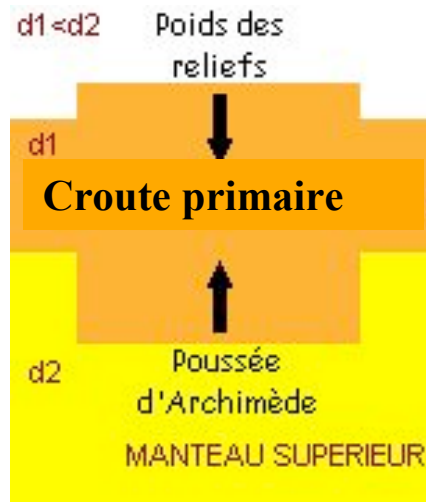
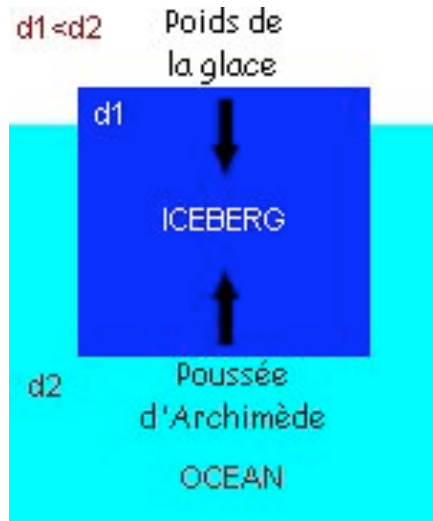


Croute lunaire primaire

- ◆ Anorthosite lunaire
 - Riches en Ca et Al
 - Roches très anciennes (4.2 à 4.44 Milliards d'années)
 - Densité faible (2700 kg/m³. Densité moyenne de la croûte profonde terrestre ou de basaltes 3200-3400 kg/m³)
 - Terres hautes qui « flottent »
 - Relativement pauvre en éléments radioactifs

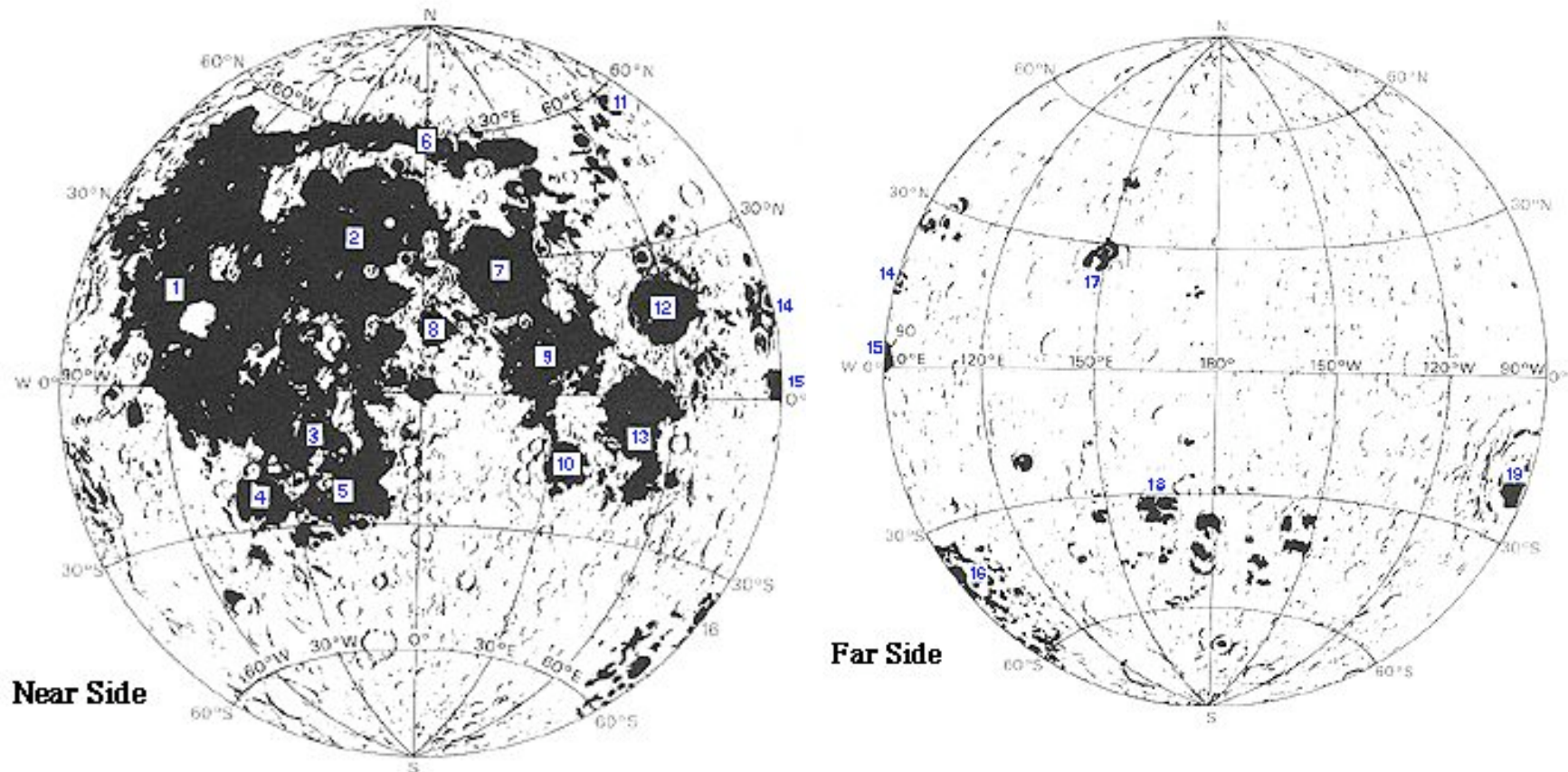


Highland (hautes terres)



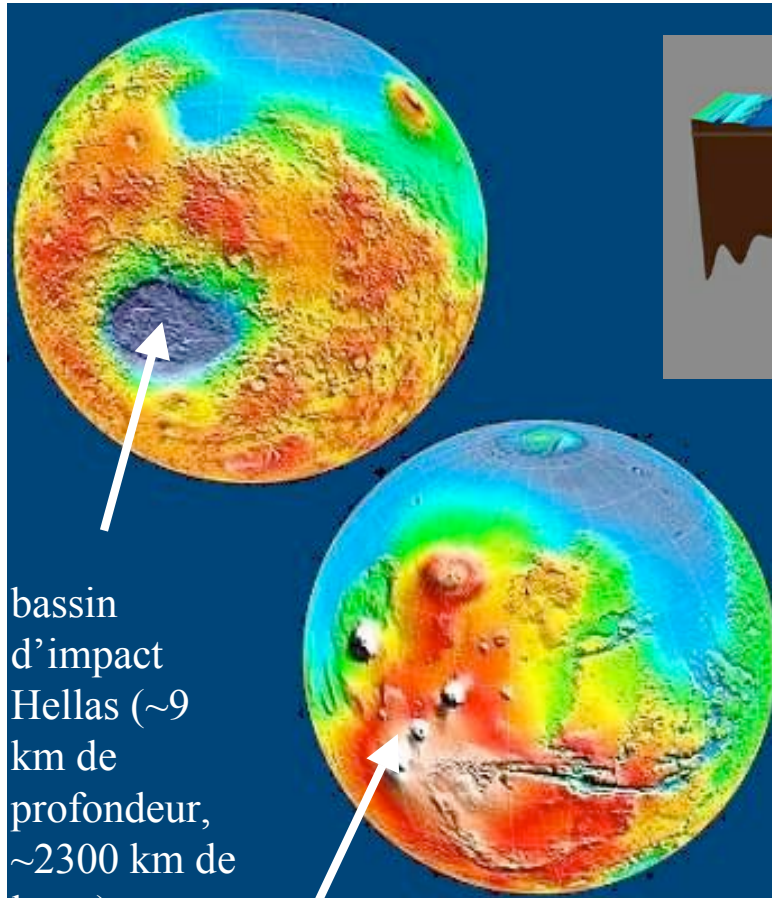
Lawrence et al., 2000

Croûte secondaire (volcanisme)



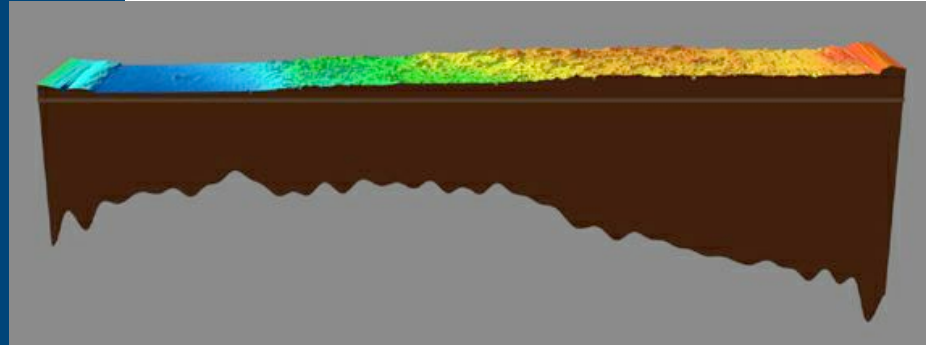
- 1 Oceanus Procellarum 2. Mare Imbrium 3. Mare Cognitum 4. Mare Humorum 5. Mare Nubium 6. Mare Frigoris 7. Mare Serenitatis 8. Mare Vaporum 9. Mare Tranquillitatis 10. Mare Nectaris 11. Mare Humboldtianum 12. Mare Crisium 13. Mare Fecunditatis 14. Mare Marginis 15. Mare Smythii 16. Mare Australe 17. Mare Moscoviense 18. Mare Ingenii 19. Mare Orientale

Mars



bassin
d'impact
Hellas (~9
km de
profondeur,
~2300 km de

Mont Tharsis



- Pour Mars, hémisphère sud vraisemblablement très ancien
- densité légère et racines profondes
- peut être 30 % de la croûte martienne est une croûte primaire

Croûte tertiaire

- ◆ Produit direct des processus de sédimentation, de métamorphisme, etc
- ◆ A priori pas de croûte tertiaire sur la Lune et sur Mercure
- ◆ Une grande inconnue sur Mars