

L'intérieur des petites planètes

La cohésion des objets dépend de leur dimension



Météorite martien.



Astéroïde Eros.



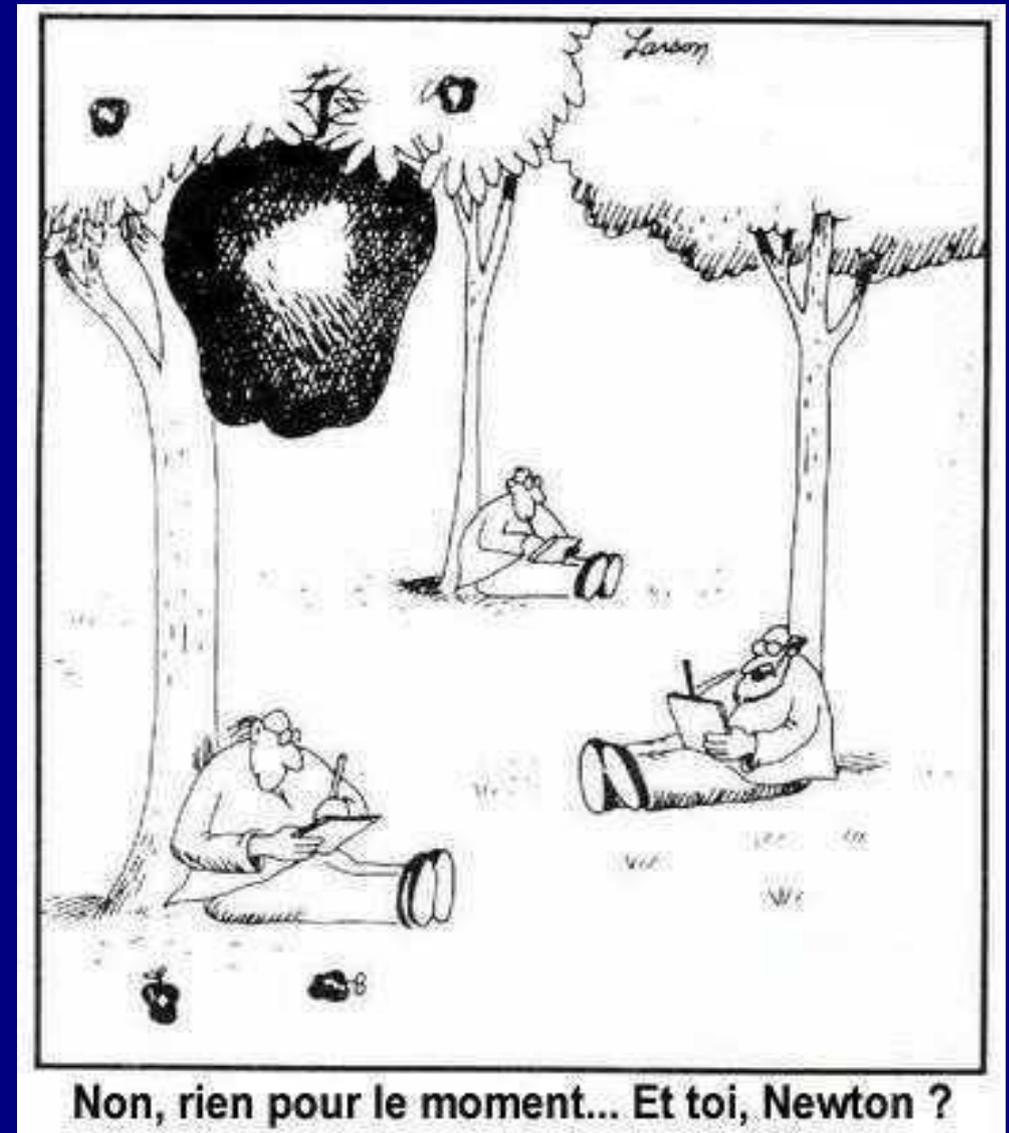
Mars

L'équilibre entre les forces de gravitation et de pression.

Qu'est-ce qui fait tomber les pommes ?

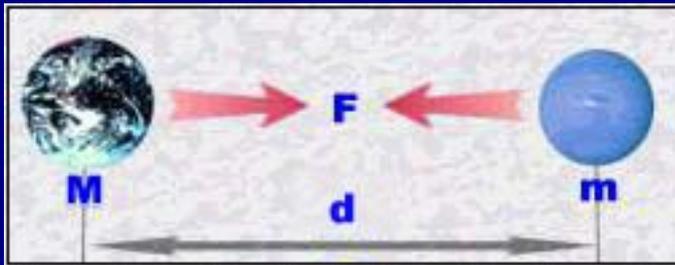
Newton a montré que la force faisant tomber les pommes est aussi la force qui fait tourner les planètes.

(C'était la première loi d'unification de la physique.)

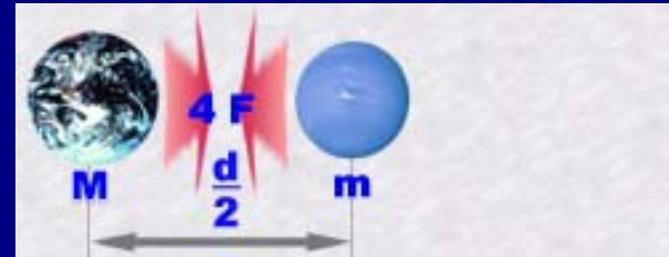


La gravitation, formule de Newton

- Force d'attraction entre objets ayant une masse.
- Newton : $F = G M m/d^2$



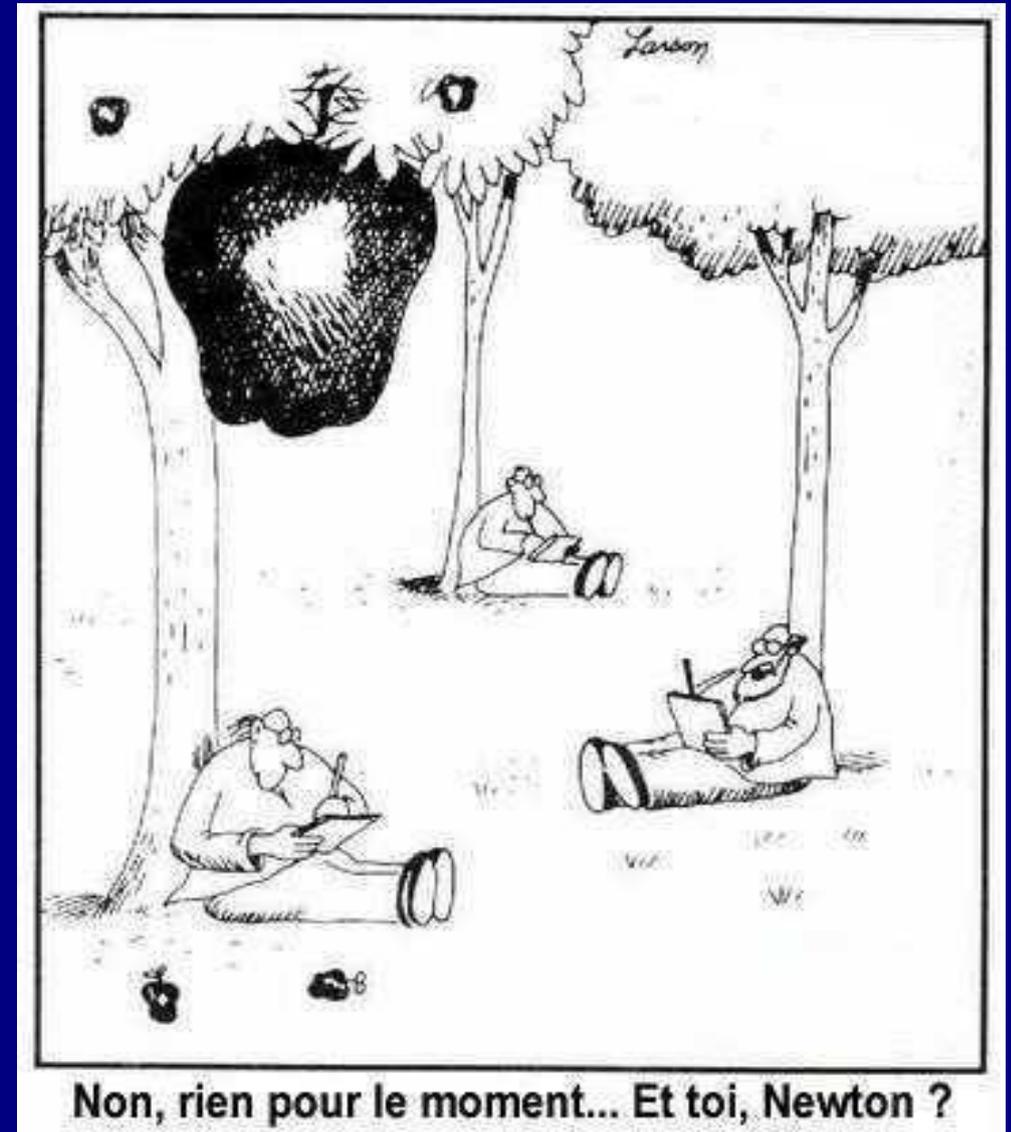
Force gravitationnelle
entre deux planètes.



Si la distance est divisée par 2,
la force est multipliée par 4.

Qu'est-ce qui fait tomber les pommes ?

La gravitation permet de considérer un astre comme un amoncellement de pommes s'attirant les unes les autres. On peut remplacer les pommes par d'autres objets pesants : atomes, molécules, électrons, protons et autres noyaux atomiques... La gravitation peut donc expliquer la cohésion des astres.



La gravitation dans une planète, un astéroïde, une étoile...

- La gravitation agit à l'intérieur des astres et assure leur cohésion.
- Dans l'astre (supposé sphérique), la force de gravitation à la hauteur r s'appliquant à de la matière de masse m est causée par la masse $M(r)$ contenue dans la sphère de rayon r .

$$F(r) = G m M(r) / r^2 = m g(r)$$

La gravitation dans un astre. Force par unité de volume.

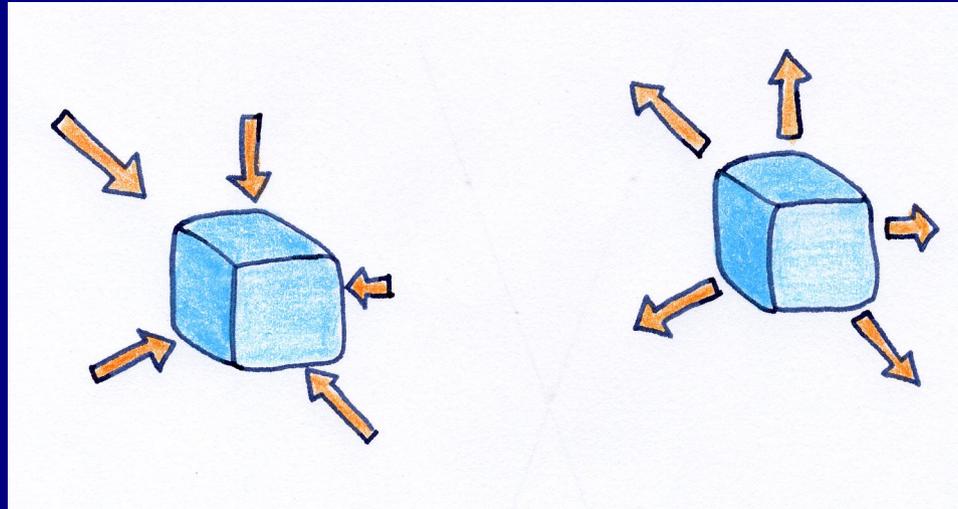
- Les astronomes aiment bien les forces par unité de volume. Cela permet de décrire les choses « localement » aux alentours d'un petit volume.
- La force de gravitation $f = F/V$ par unité de volume $V = dS \cdot dr$ fait intervenir la densité ρ de la matière.

$$f(r) = G \rho(r) M(r) / r^2 = \rho(r) g(r)$$

L'équilibre hydrostatique

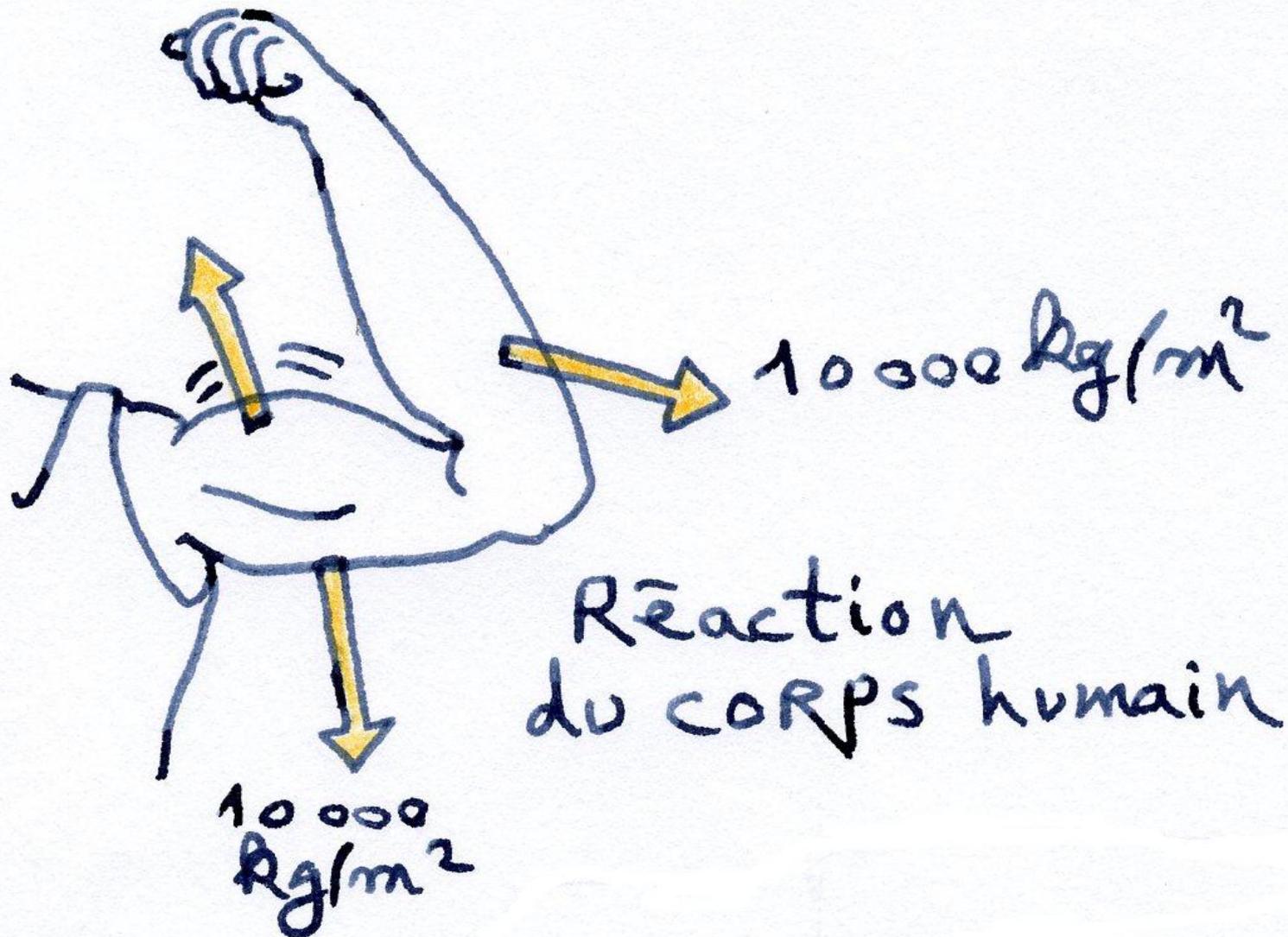
- Comment un astre, ou une partie d'un astre, s'organise en fonction de la distance au centre
- Pourquoi les astres ont-ils un volume non nul ?
- Parce qu'il existe d'autres forces que la gravitation.
- Hydrostatique : on néglige le mouvement, et on cherche l'équilibre entre les forces.
- Quelles sont les forces, à part la gravitation ?

Les forces de pression



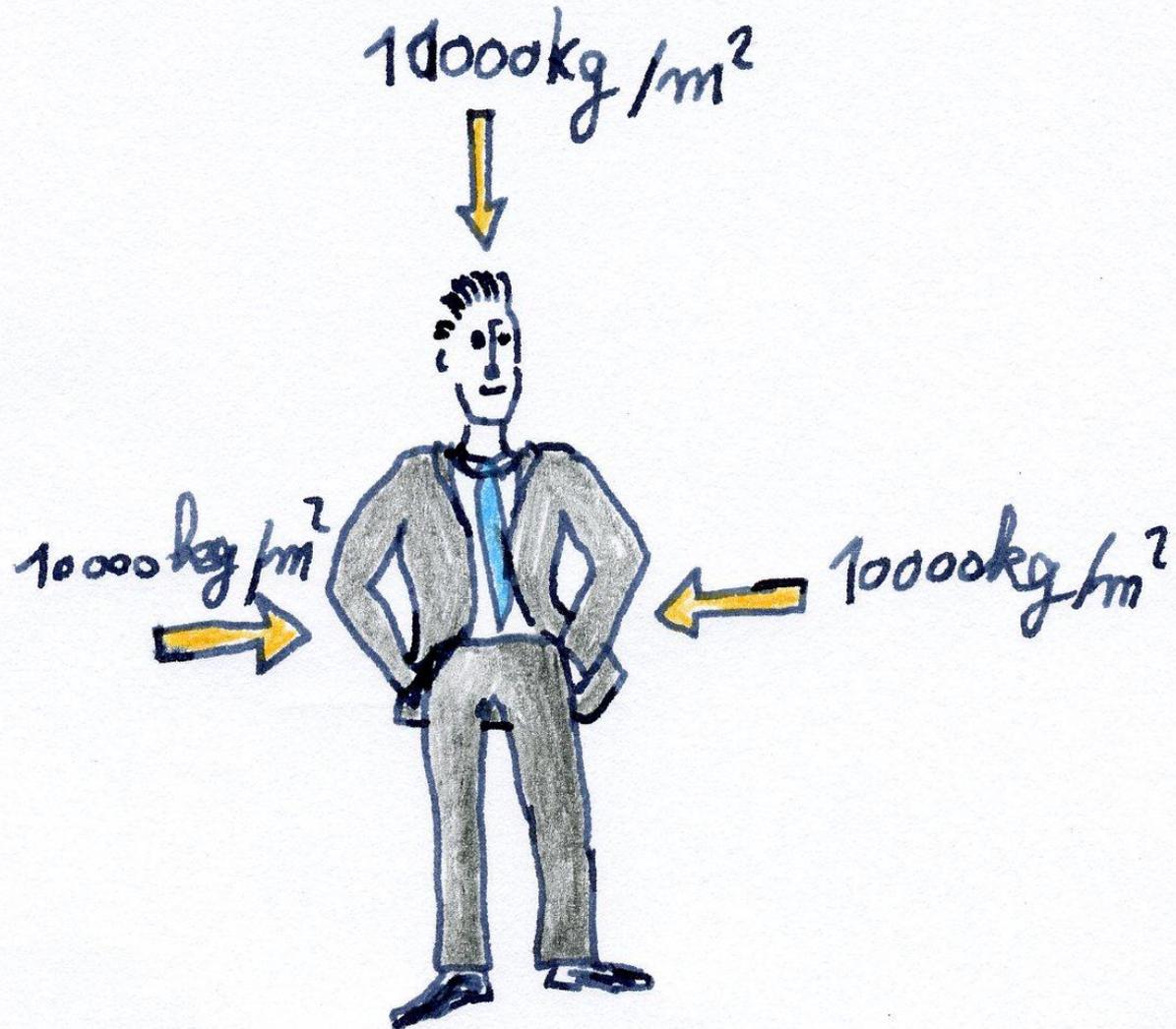
elles permettent à la matière de résister à la compression
c'est à dire à garder un volume non nul lorsqu'on leur appuie dessus.

Les forces de pression



Les forces de pression

résister à une compression dans un seul sens est difficile.
il l'est moins de résister à une compression exercée en tous sens?



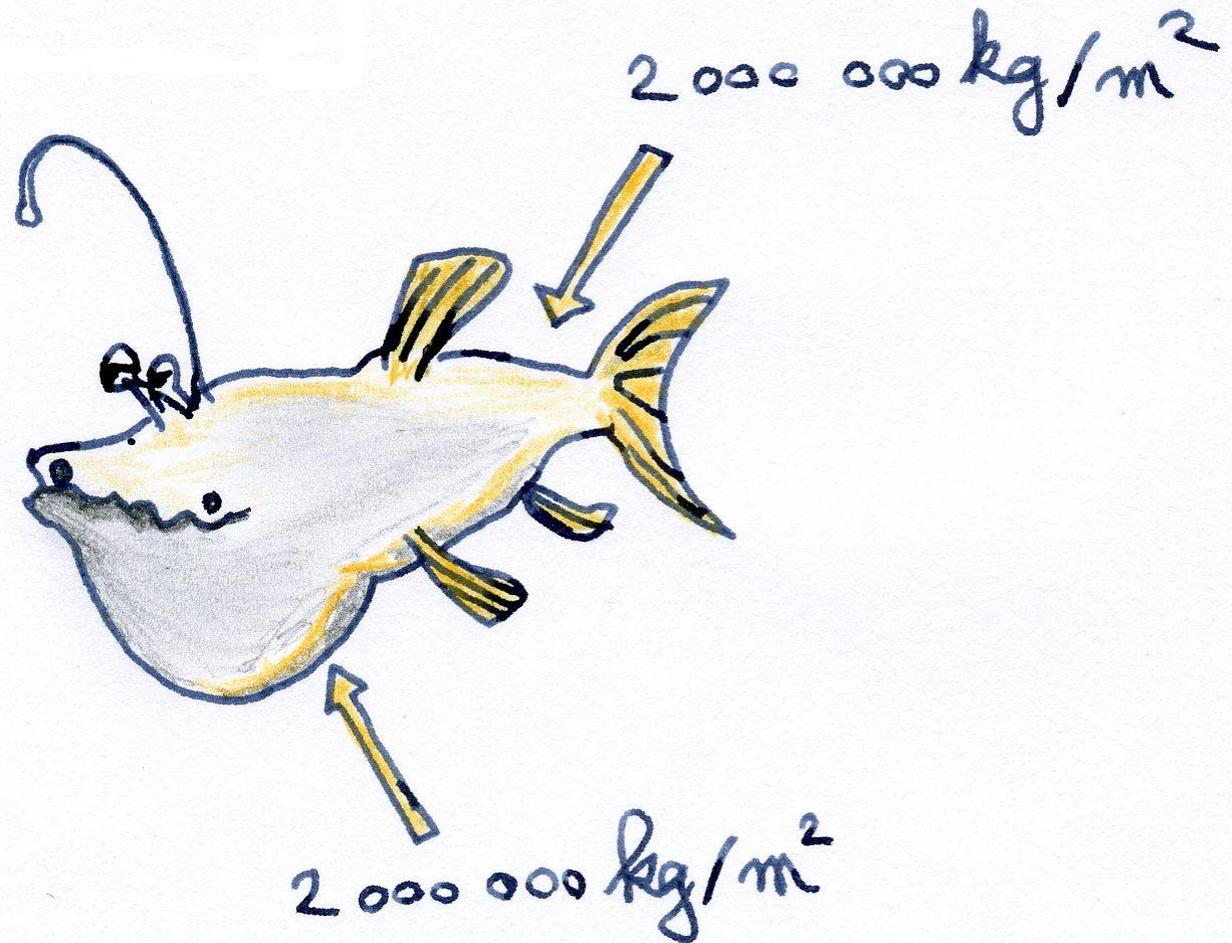
Les forces de pression

1000 m
de profondeur

$P \approx 200 \text{ bars}$

$\approx 2 \cdot 10^7 \text{ Pa}$

$\approx 2 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2$

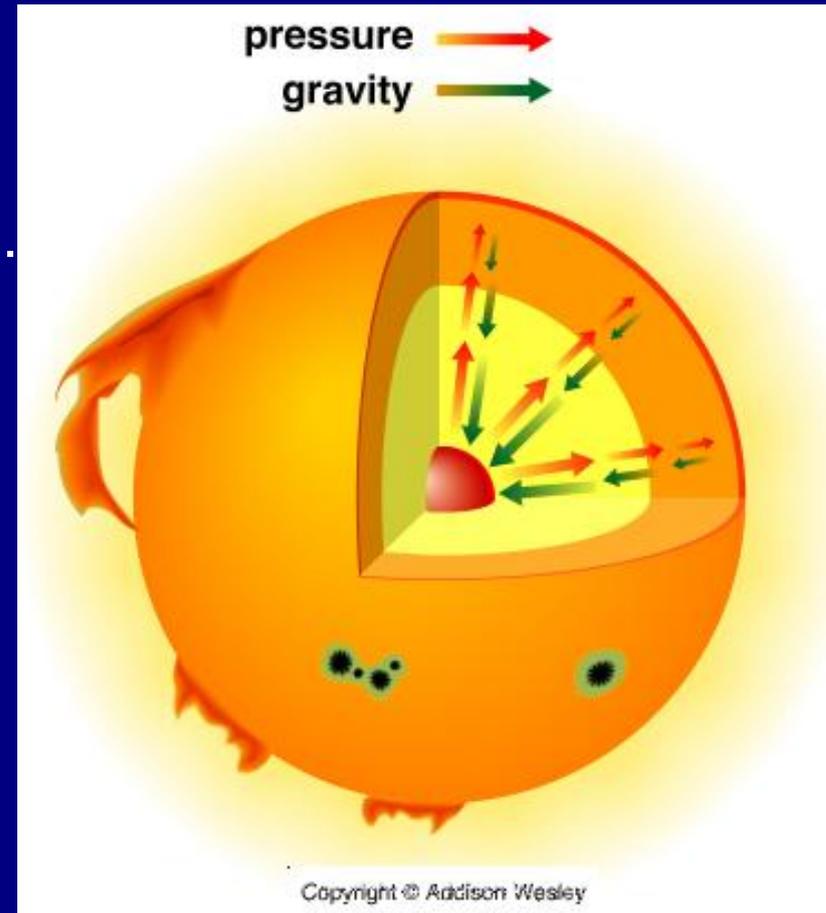


Cas d'une étoile, d'une planète...

C'est la même chose :
le poids de la colonne de matière
s'accroît avec la profondeur.
Cet accroissement de poids
exerce une force de compression
qui se répartit dans toutes les directions.
Cette compression est
compensée par un accroissement
de pression du matériau.

La pression s'exerce aussi
dans toutes les directions, mais
elle ne varie que en fonction
de la profondeur.

(sur le schéma on aurait pu mettre
des flèches rouges dans tous les
sens, mais il n'y a que dans la
direction verticale qu'elles ne se compensent pas.



Comment la matière ne se laisse-t-elle pas écraser ?

L'eau dans cette piscine subit la compression due au poids de l'atmosphère au dessus d'elle, c'est à dire tout le poids de l'air qui est au dessus.

Dans l'eau, il faut ajouter le poids de l'eau au dessus.

Pourquoi l'eau ne s'aplatit pas sous son propre poids ?
Auquel cas on ajouterait de l'eau, mais la hauteur de la piscine augmenterait peu...



Une piscine remplie d'eau quasiment incompressible.

Comment la matière ne se laisse-t-elle pas écraser ?

Pourquoi l'eau ne s'aplatit-elle pas sous son propre poids ?
Auquel cas on ajouterait de l'eau, mais la hauteur de la piscine augmenterait peu...

La compressibilité : comment le volume de la matière dépend de la pression exercée.

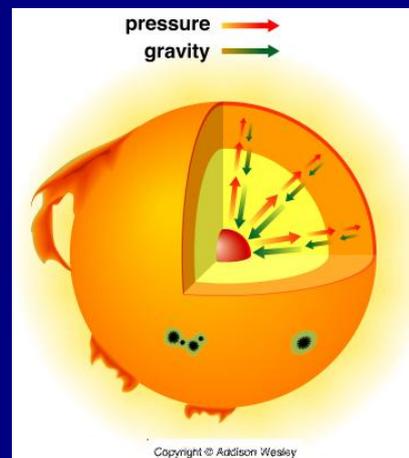
L'eau est constituée de molécules. Ces molécules, dès qu'elles sont proches les unes des autres se repoussent. C'est l'effet de forces électriques de répulsion entre leur électrons. Ces forces de répulsion sont à l'origine des forces de pression dans l'eau.



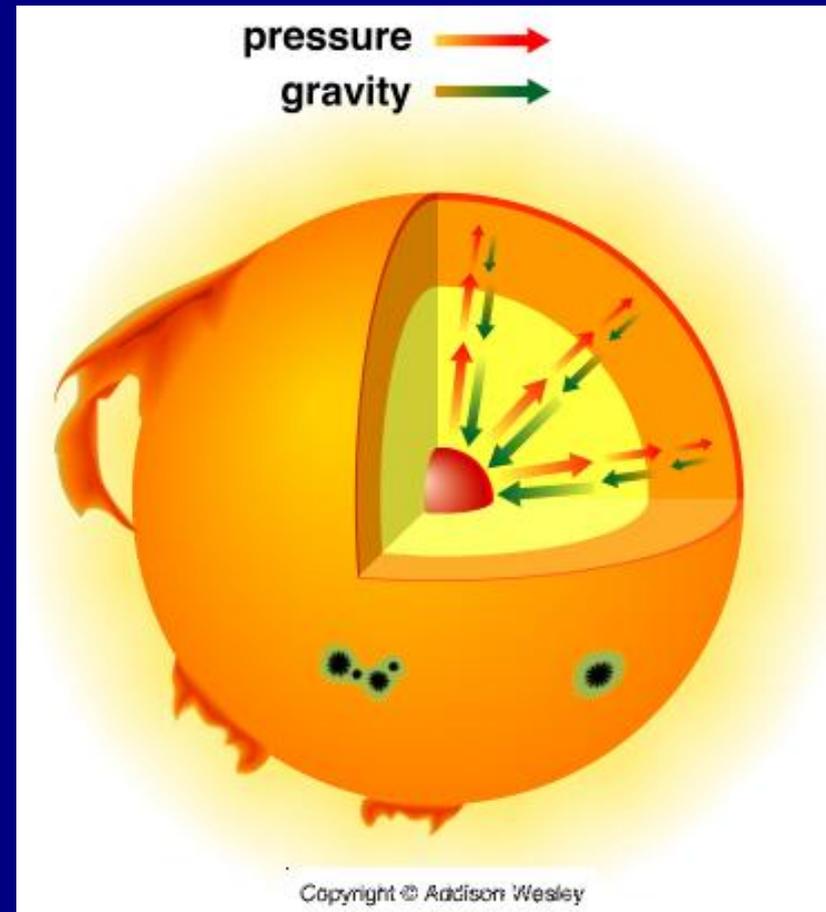
La piscine remplie avec la même masse d'eau, si l'eau était compressible

Des étoiles de même masse.

Dans une étoile, il n'y a pas d'eau, mais de la matière aux propriétés bien différentes. Si la matière constituant une étoile se comprime facilement (forces de pression moindres à masse égale), à masse égale, l'étoile est plus petite.

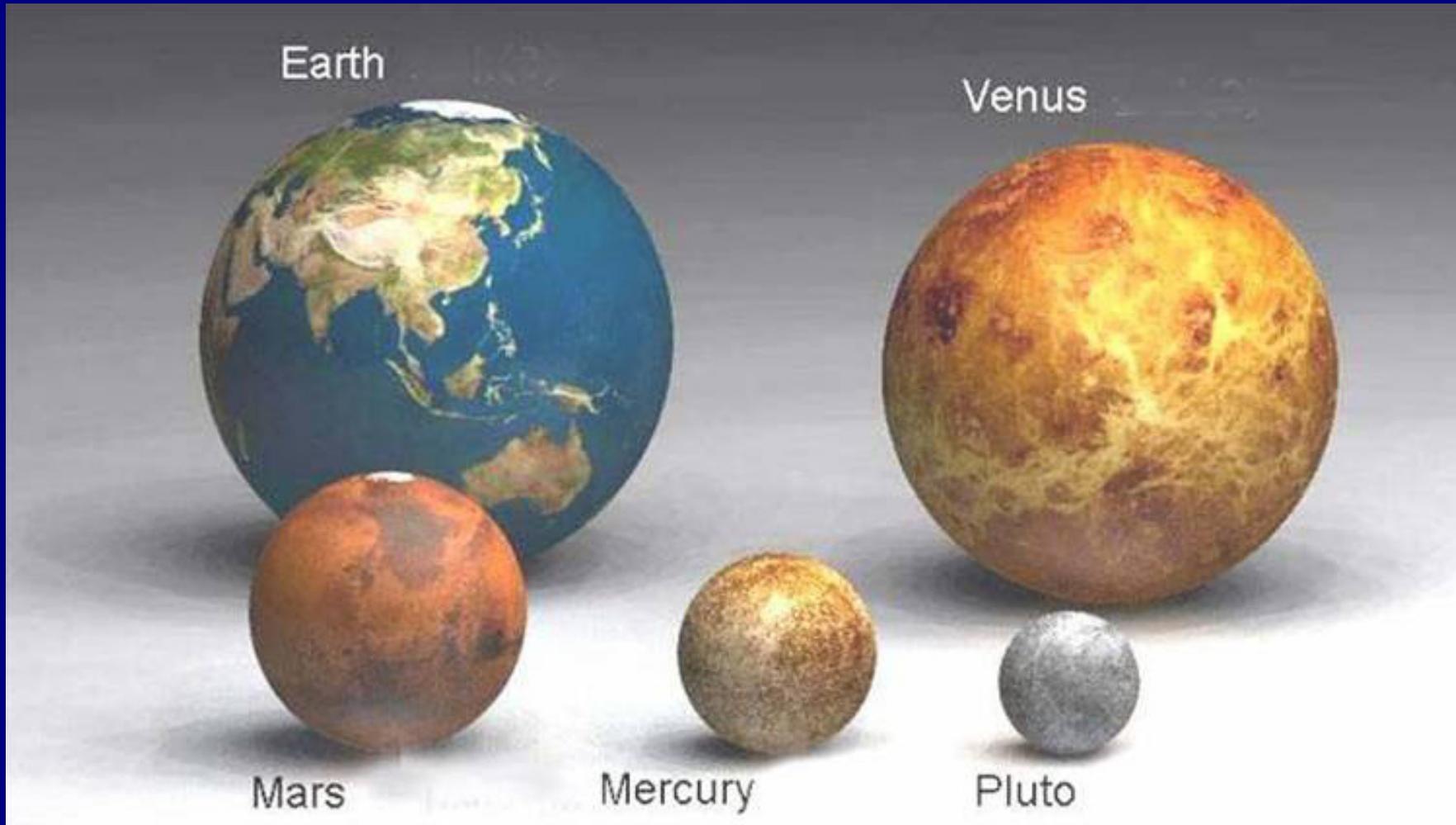


Matière plus compressible.



Matière moins compressible.
A masse égale, l'étoile est plus grande.

Dans les planètes solides, la matière est moins compressible.

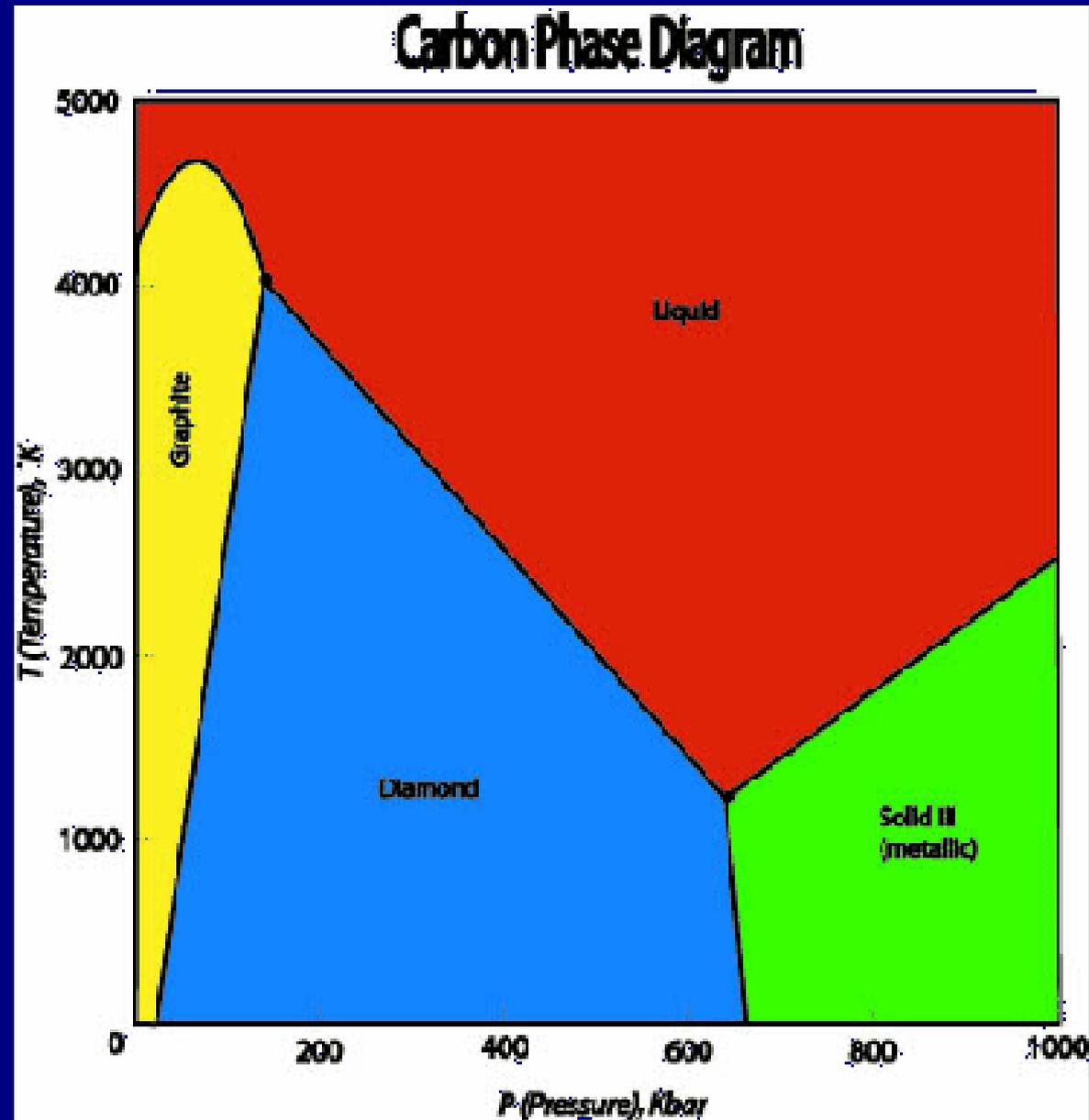


Alors le volume de la planète (solide) est à peu près proportionnel à sa masse. C'est vrai à un facteur 3 ou 4 près (à cause des densités qui varient en fonction de la composition chimique)

Les phases de la matière à haute pression

Les phases du carbone (pur) en fonction de la pression et de la température.

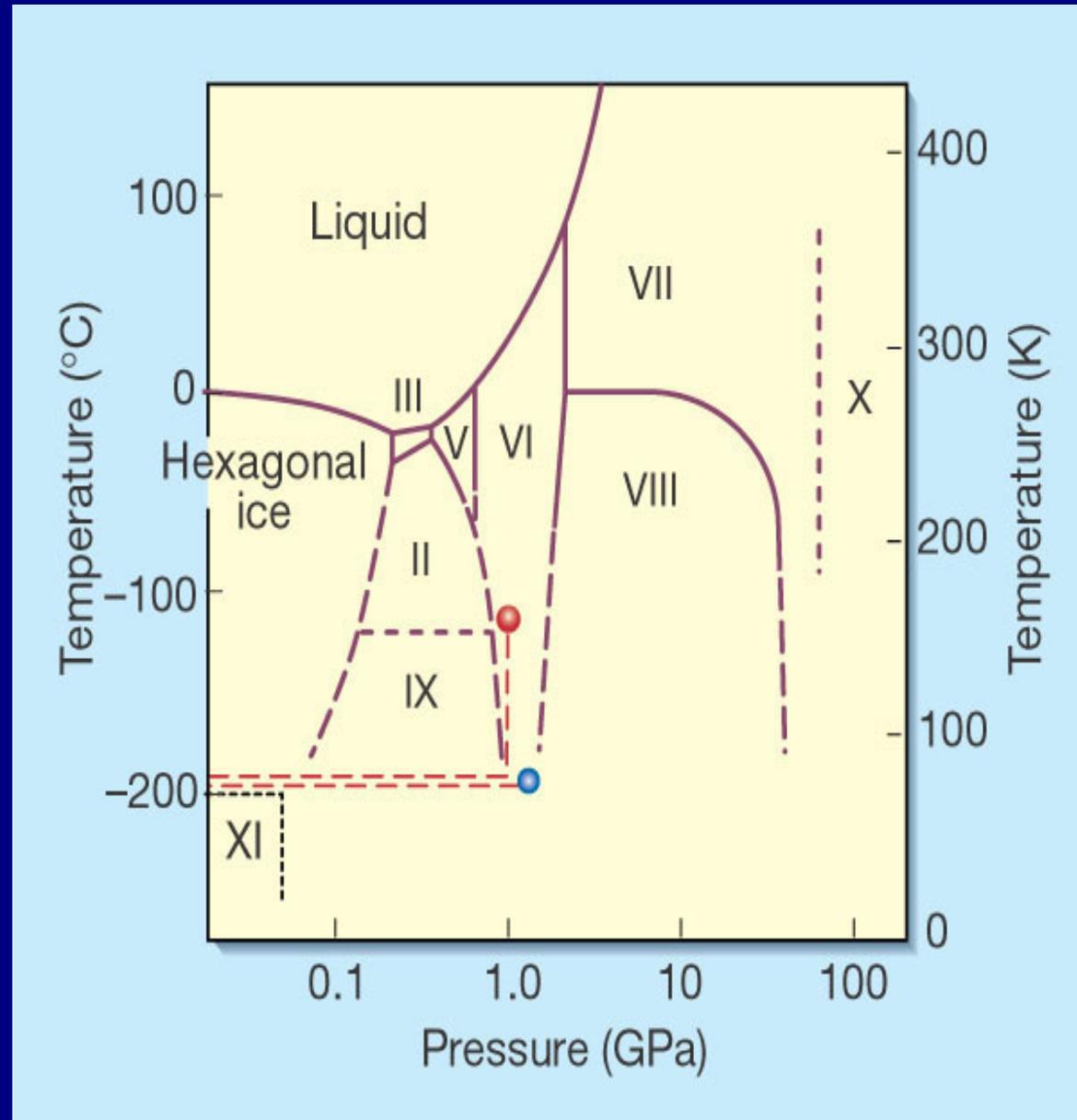
[MIT]



Les phases de la matière à haute pression

Les phases de l'eau (pure) en fonction de la pression et de la température.

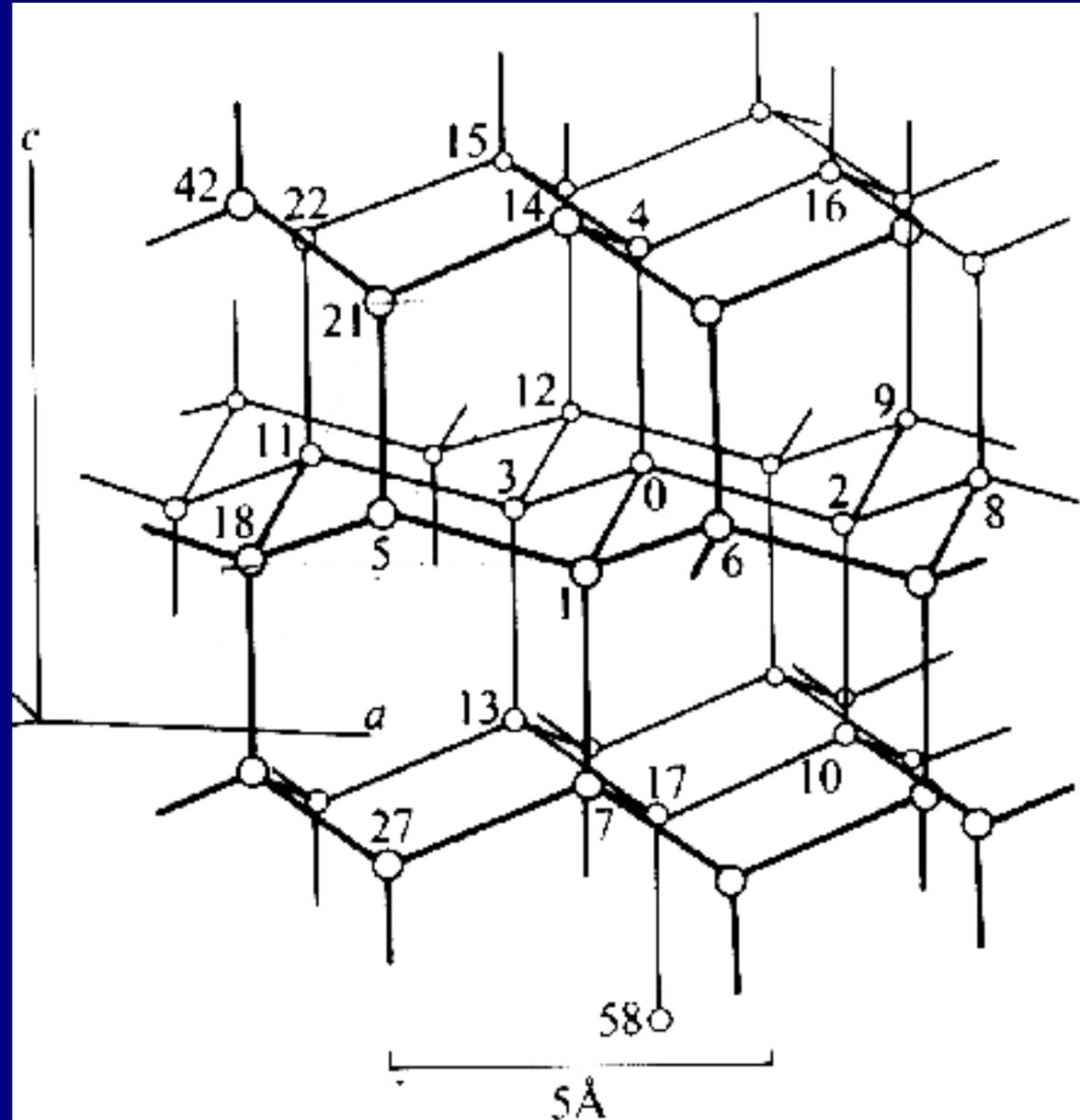
[journal Nature]



Les phases de la matière à haute pression

Structure atomique de la glace I

[MIT]

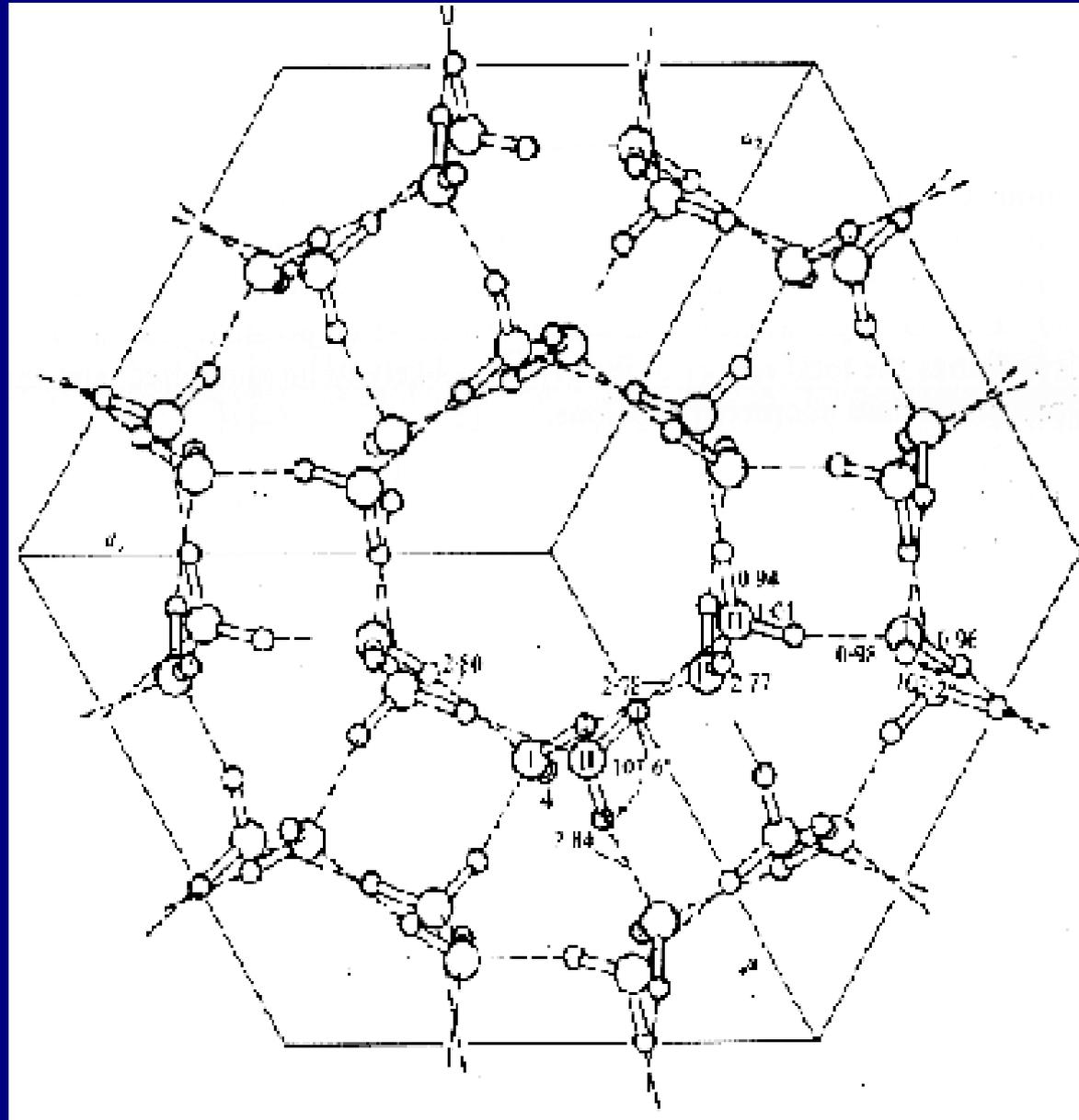


Les phases de la matière à haute pression

Structure atomique de la glace II

La phase dépend de la façon dont s'arrangent les atomes/molécules pour former

- un plasma
- un gaz
- un liquide
- différents types de cristaux.



Les phases de la matière à haute pression

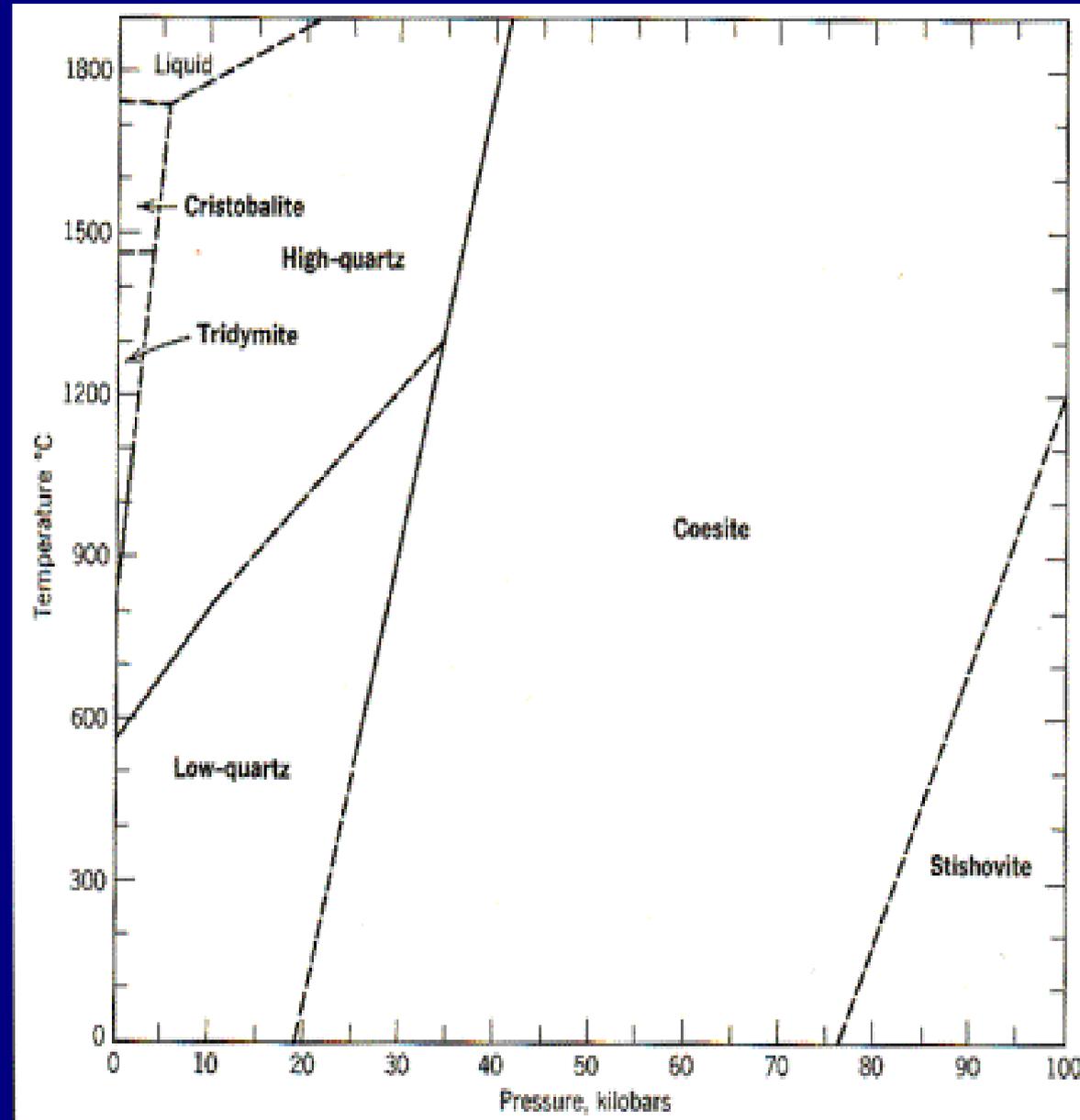
Les phases du silice (pur) en fonction de la pression et de la température.

C'est intéressant, car des planètes comme la Terre sont très riches en silicates.

Le silice est même l'élément le plus abondant.

Mais évidemment, dans une planète, il n'est pas pur...

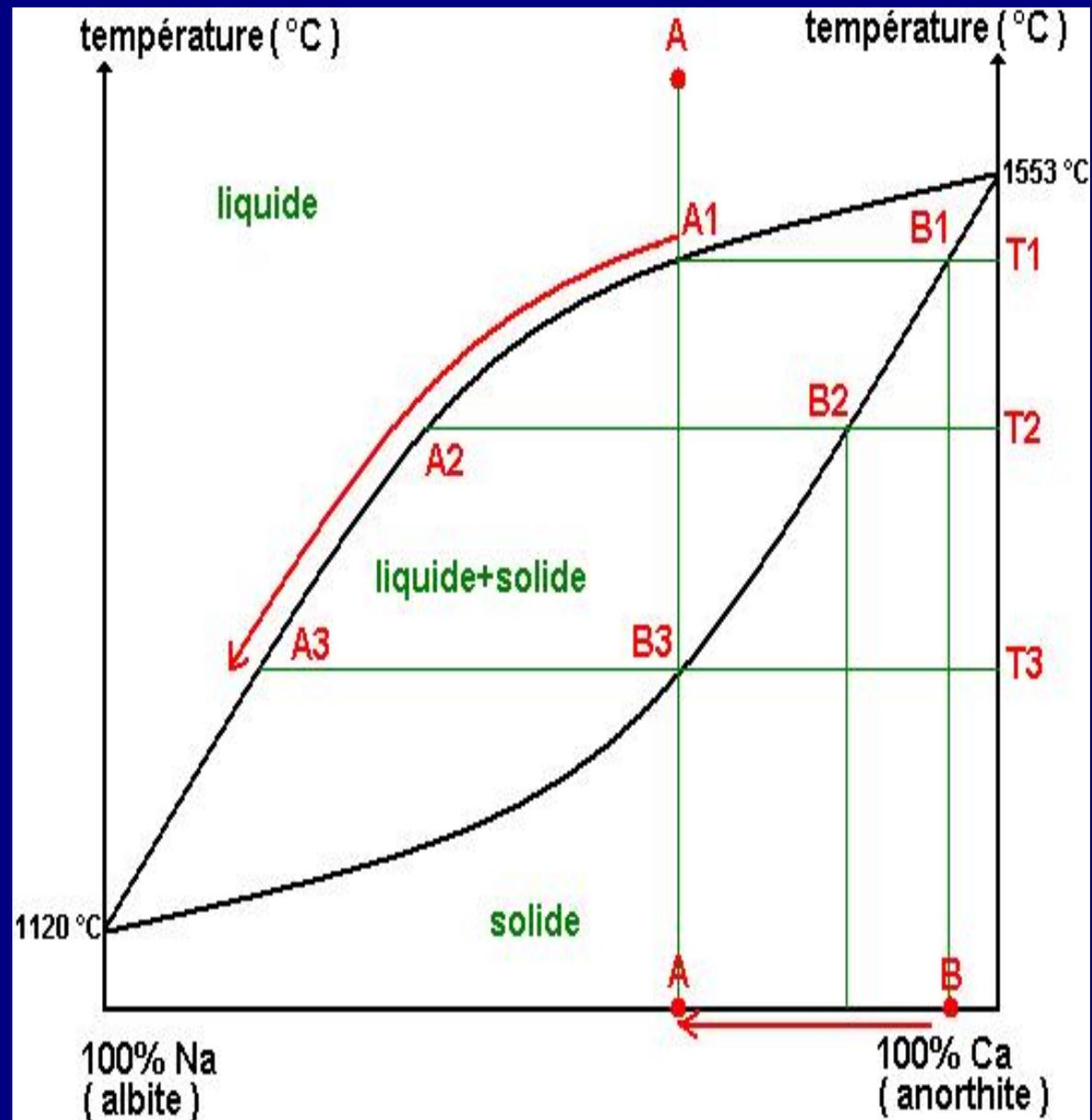
Et les pressions sont plus hautes : 3,6 Mbar au centre de la Terre.



Les phases de la matière à haute pression

Diagramme des phases d'un mélange de sodium et de calcium
(à la pression atmosphérique)

Le point de fusion (changement de phase) dépend de la température, et des proportions du mélange.



Comment observer la structure interne d'une planète ?

En creusant un trou ?

Mines les plus profondes :

En France, la houillère d'Eboulet dans la Haute-Saône, 1.010 mètres.

En Belgique, Sainte-Henriette au charbonnage du Flénu et à Mons : 1.200 mètres

Aux USA : mine de cuivre « Calumet et Hécla », 1.493 mètres.

Forage le plus profond :

Azerbaïdjan : 17 400 m (en cours) à Saatly ;

Russie : 11 000 m, presque île de Kola.

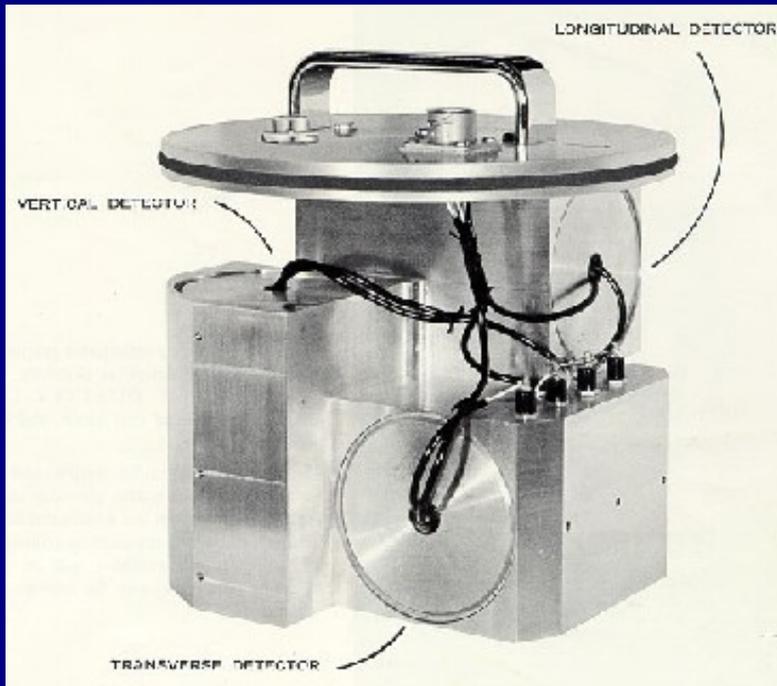
Distance au centre de la Terre :

6 400 000 mètres. On est loin du compte.

Comment sonder l'intérieur des planètes (Terre, Lune)

- La sismologie, étude des séismes.
- La propagation des ondes à l'intérieur de la Terre.
- Ondes de compression (on appuie).
- Ondes de cisaillement (on tord)
- On mesure les vibrations ailleurs sur le globe, avec un réseau de stations.
- On en déduit un modèle de l'intérieur.

Comment sonder l'intérieur des planètes (Terre, Lune)



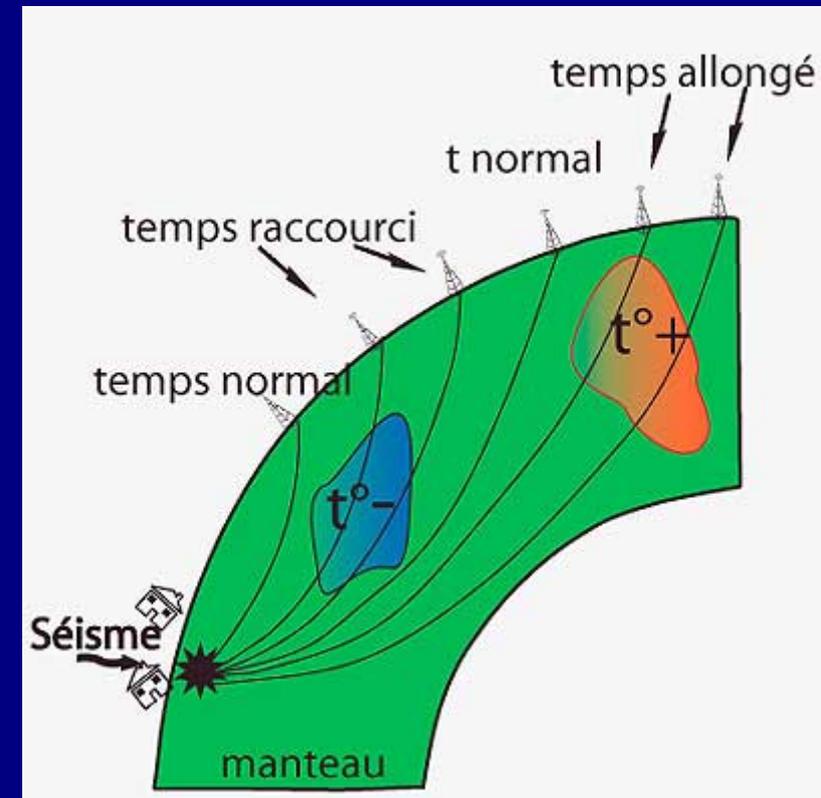
Sismomètre 3 axes L-4-3D construit par Mark Products, Inc.



Sismomètre sous-marin, jusqu'à profondeur 6000m. Réseau GEO. [CNRS-INSU IPGP]

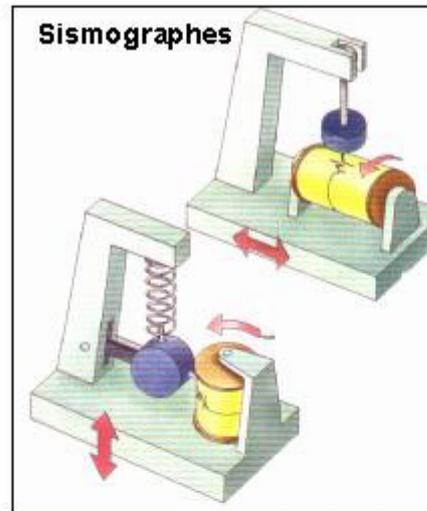
Comment sonder l'intérieur des planètes (Terre, Lune)

- Les ondes P sont des ondes de compression et de dilatation de la matière (comme les ondes « sonores »).
Ce sont les premières enregistrées par le sismomètre. Elles se diffusent de manière parallèle au sens de propagation de l'onde sismique.
- Les ondes S sont des ondes de cisaillement de la matière.
Ces ondes transversales sont liées aux déplacements de matière, perpendiculaires au sens de propagation de l'onde. Leur vitesse est plus lente que celle des ondes P et dépend de la rigidité et de la densité du milieu traversé. Elles ne se transmettent pas dans des milieux de faible cohésion comme les liquides.

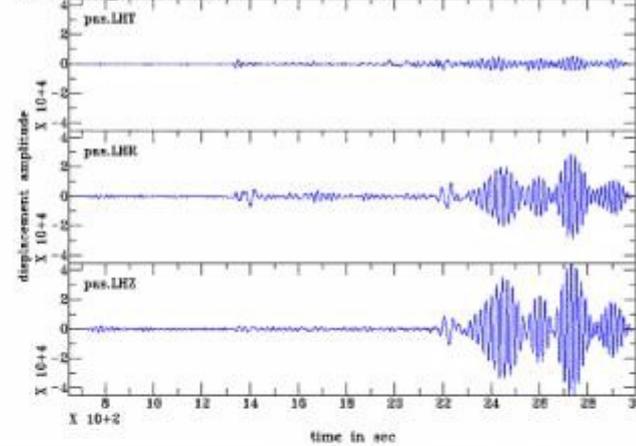


Comment sonder l'intérieur des planètes (Terre, Lune)

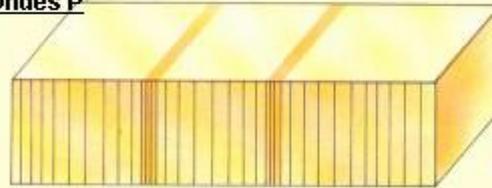
Sismologie



Sismogrammes



Ondes P

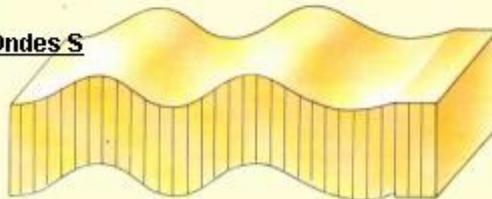


Ondes de Love

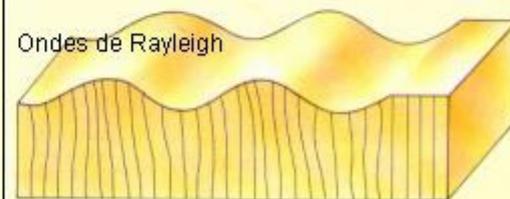


Ondes sismiques

Ondes S



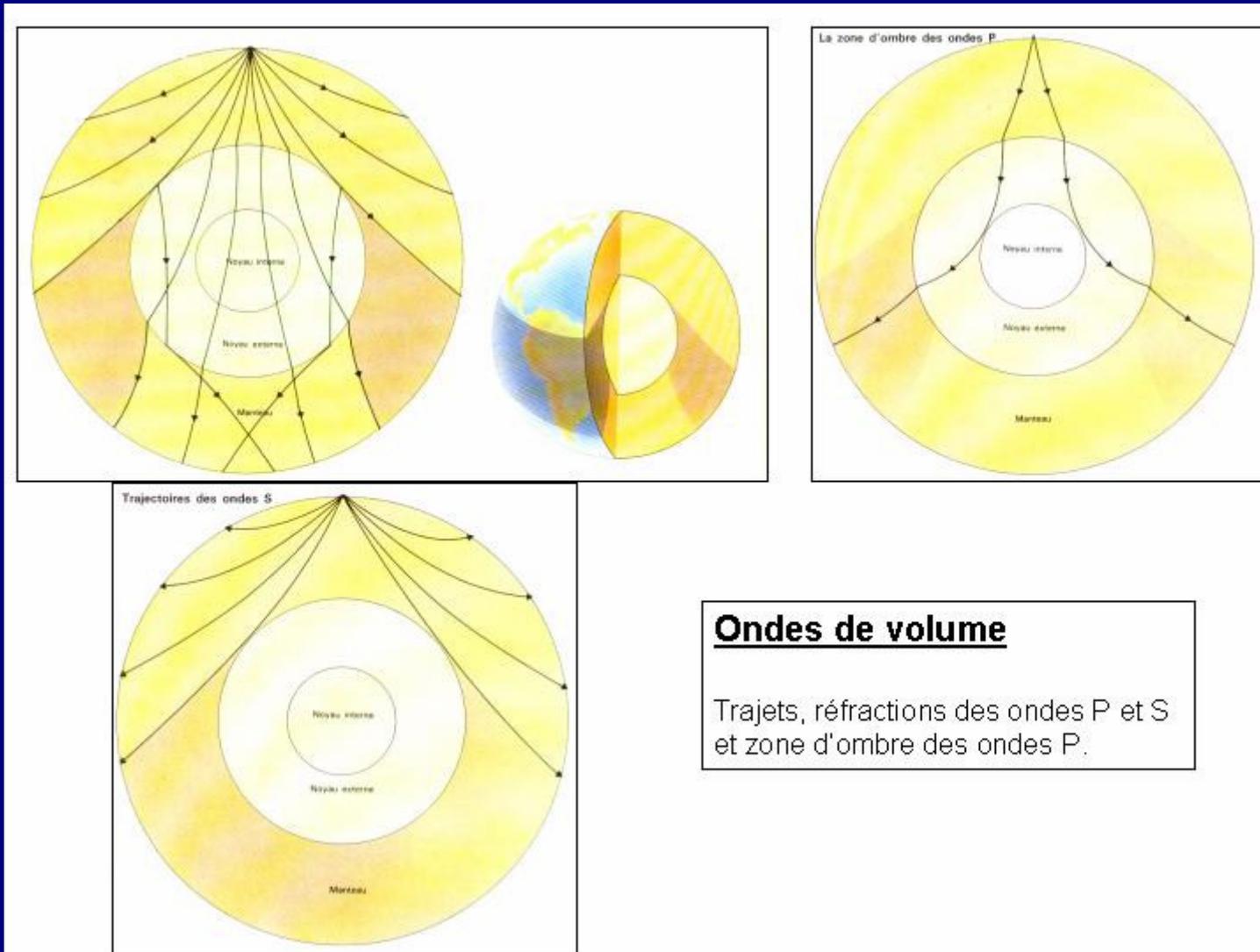
Ondes de Rayleigh



Ondes de volume

Ondes de surface

Comment sonder l'intérieur des planètes (Terre, Lune)



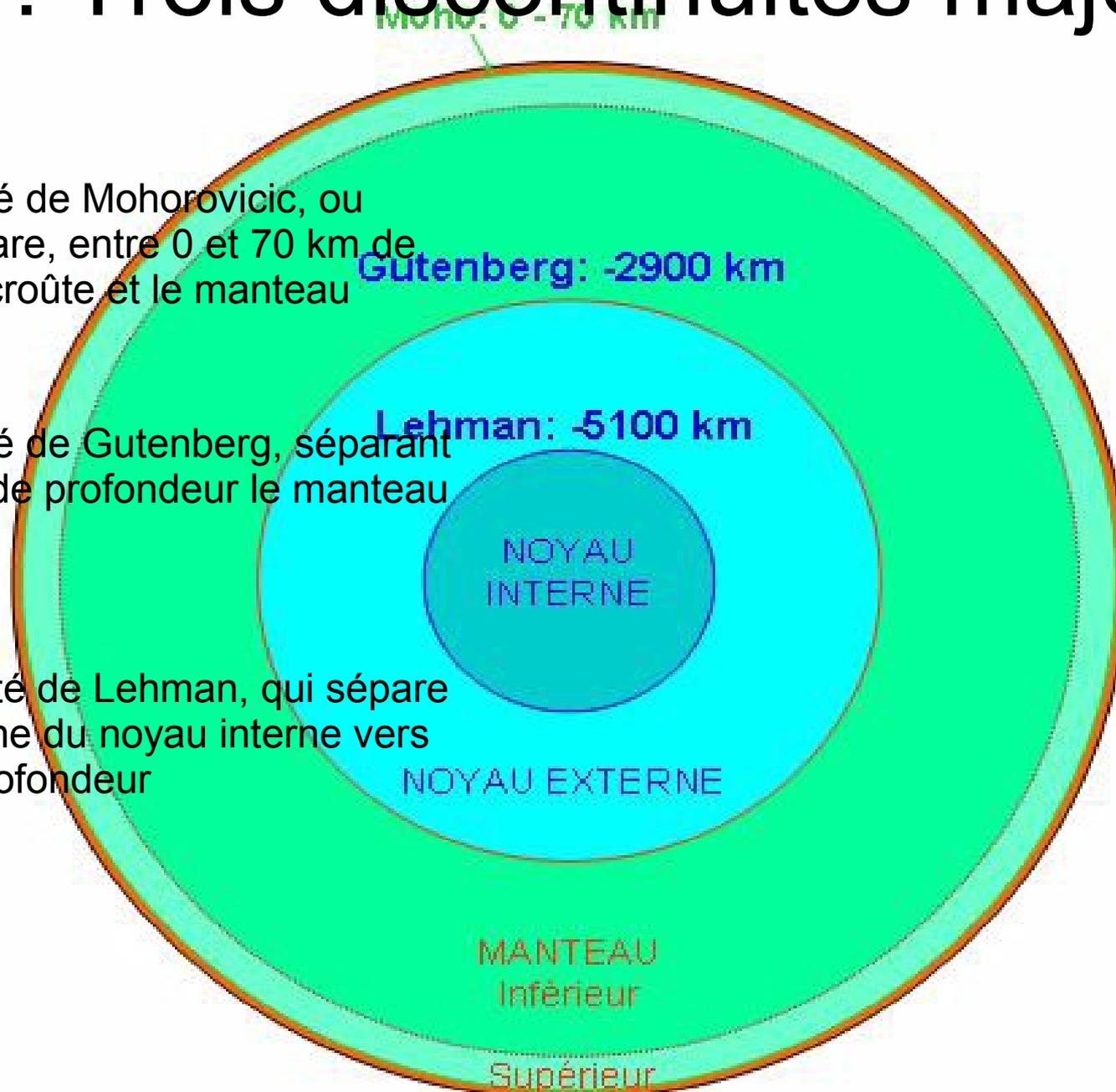
Discontinuités majeures

Terre : Trois discontinuités majeures

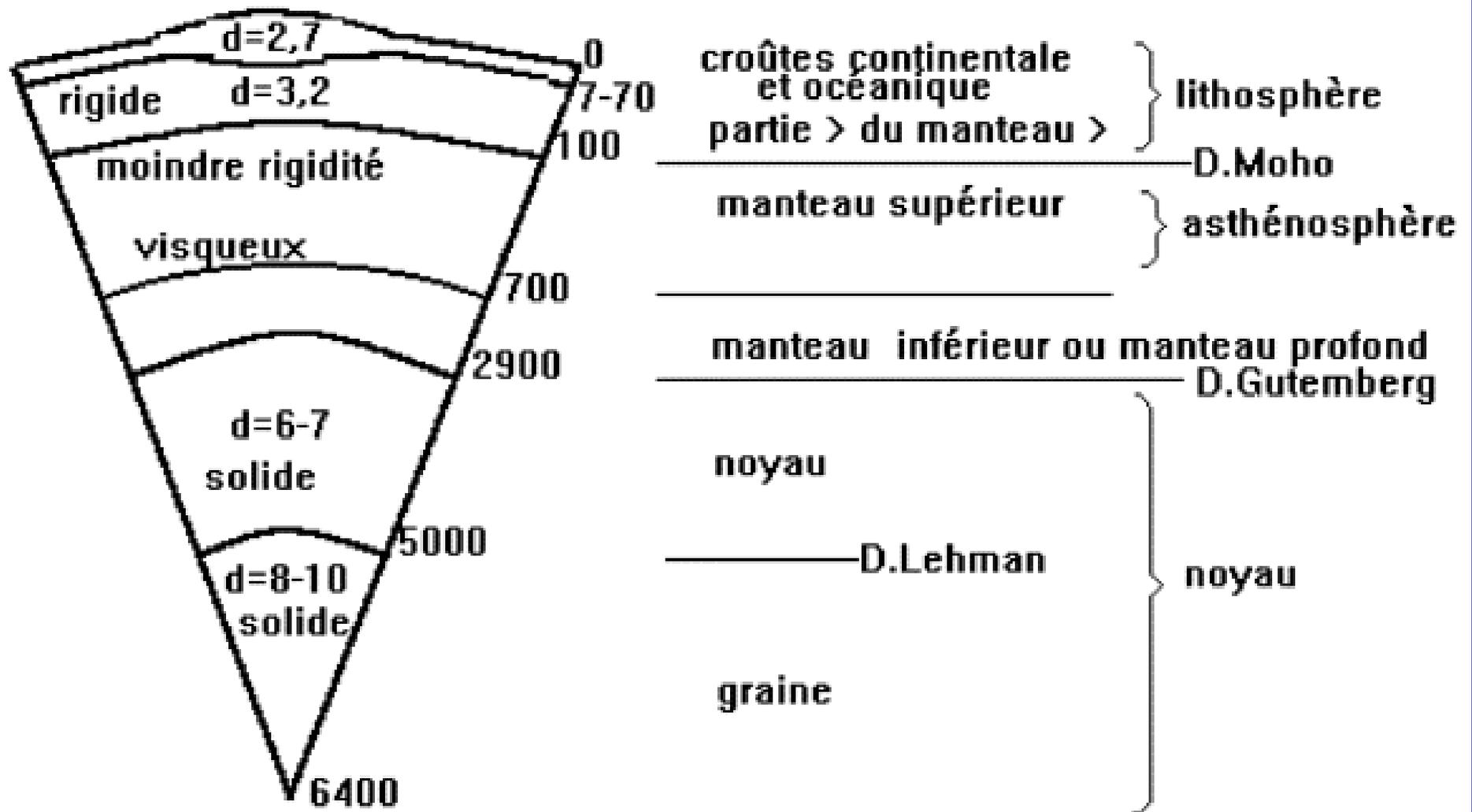
La discontinuité de Mohorovicic, ou Moho, qui sépare, entre 0 et 70 km de profondeur la croûte et le manteau

La discontinuité de Gutenberg, séparant vers 2900 km de profondeur le manteau du noyau

La discontinuité de Lehman, qui sépare le noyau externe du noyau interne vers 5100 km de profondeur



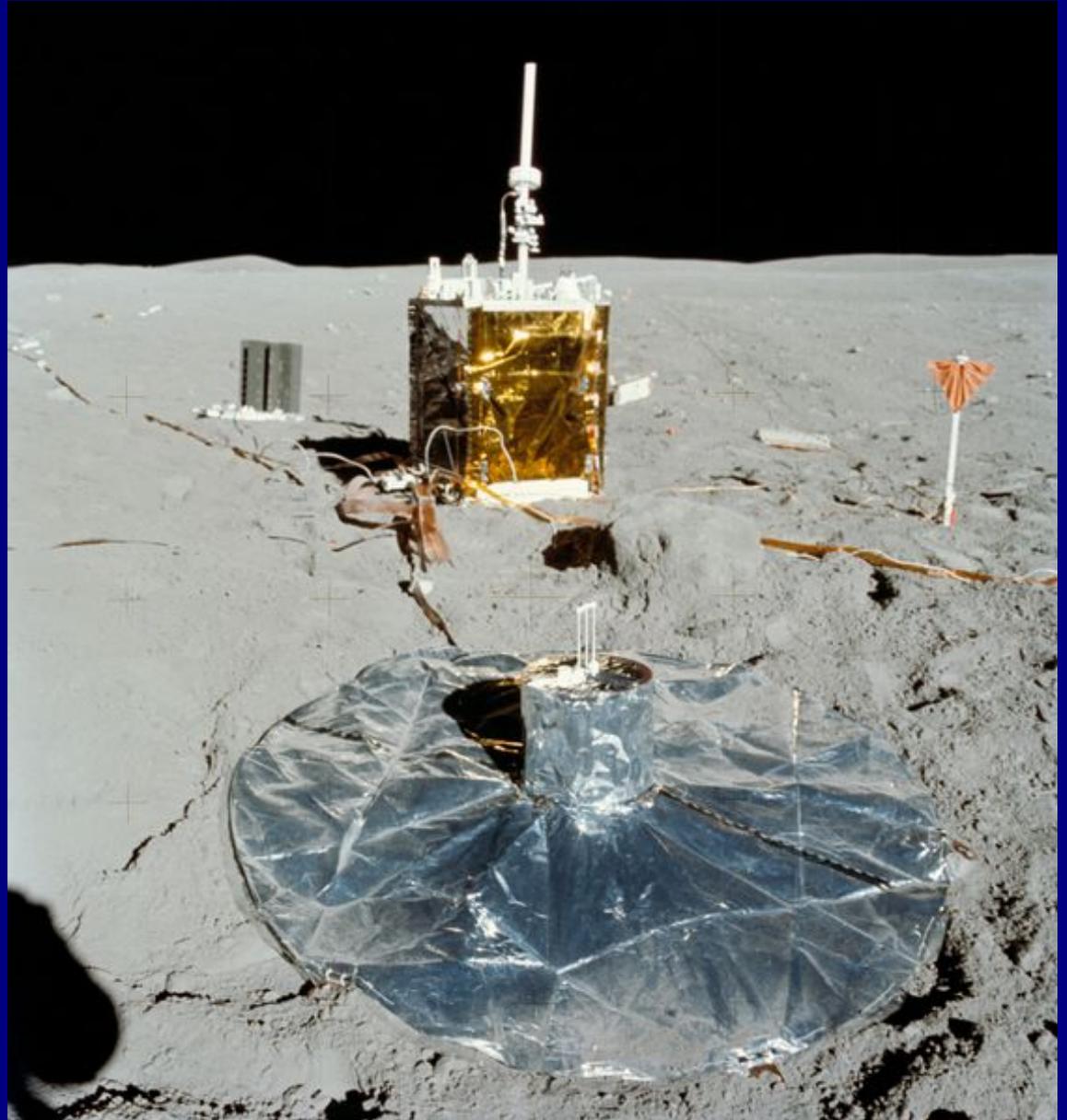
Structure interne de la Terre



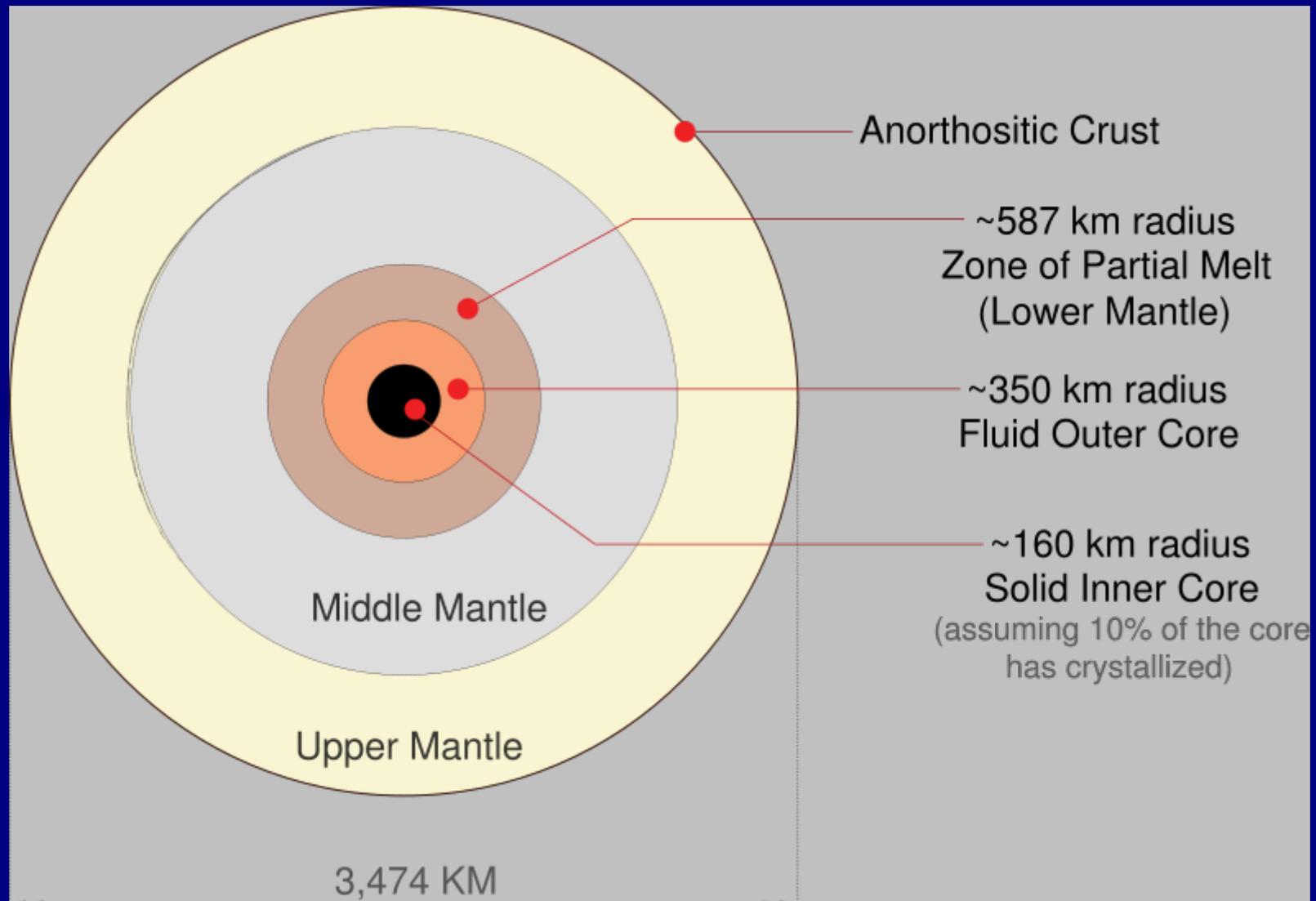
sismologie sur la Lune

Sismomètre passif installé sur la Lune, mission Apollo 16.

Séismes :
associés aux impacts de météorites,
et à des « craquements » internes.

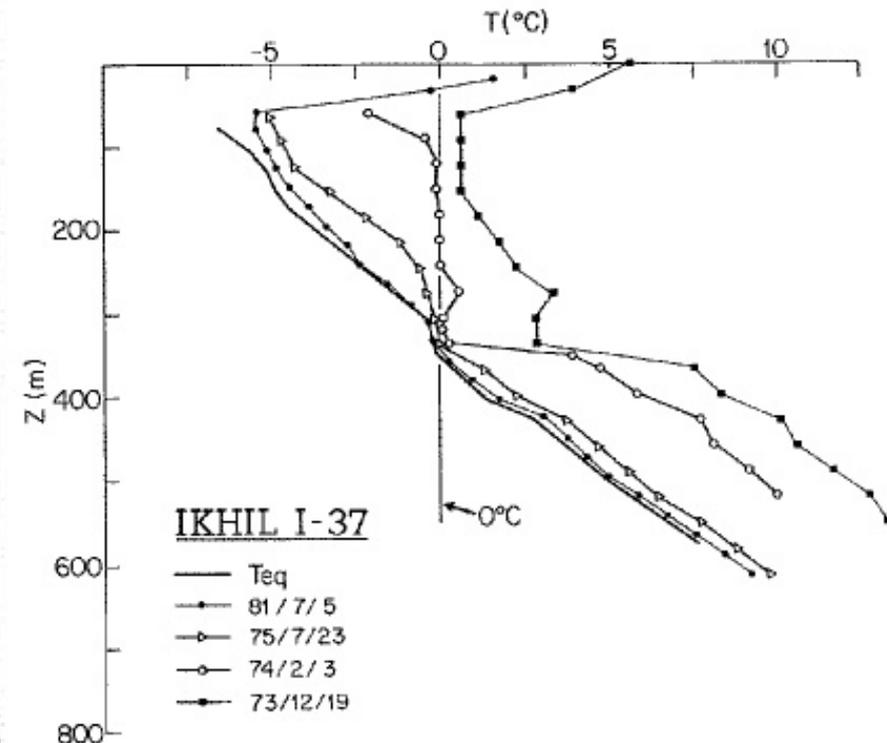
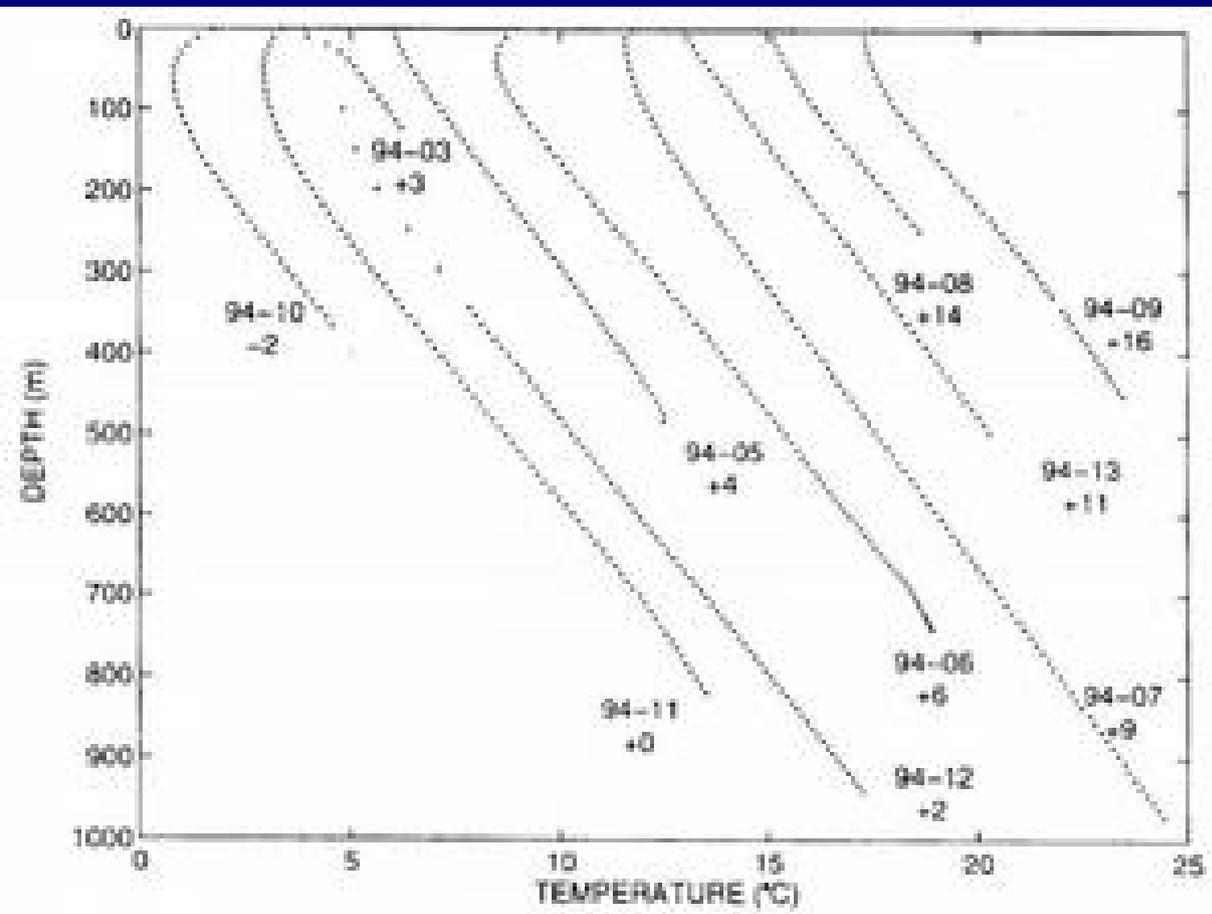


Structure interne de la Lune



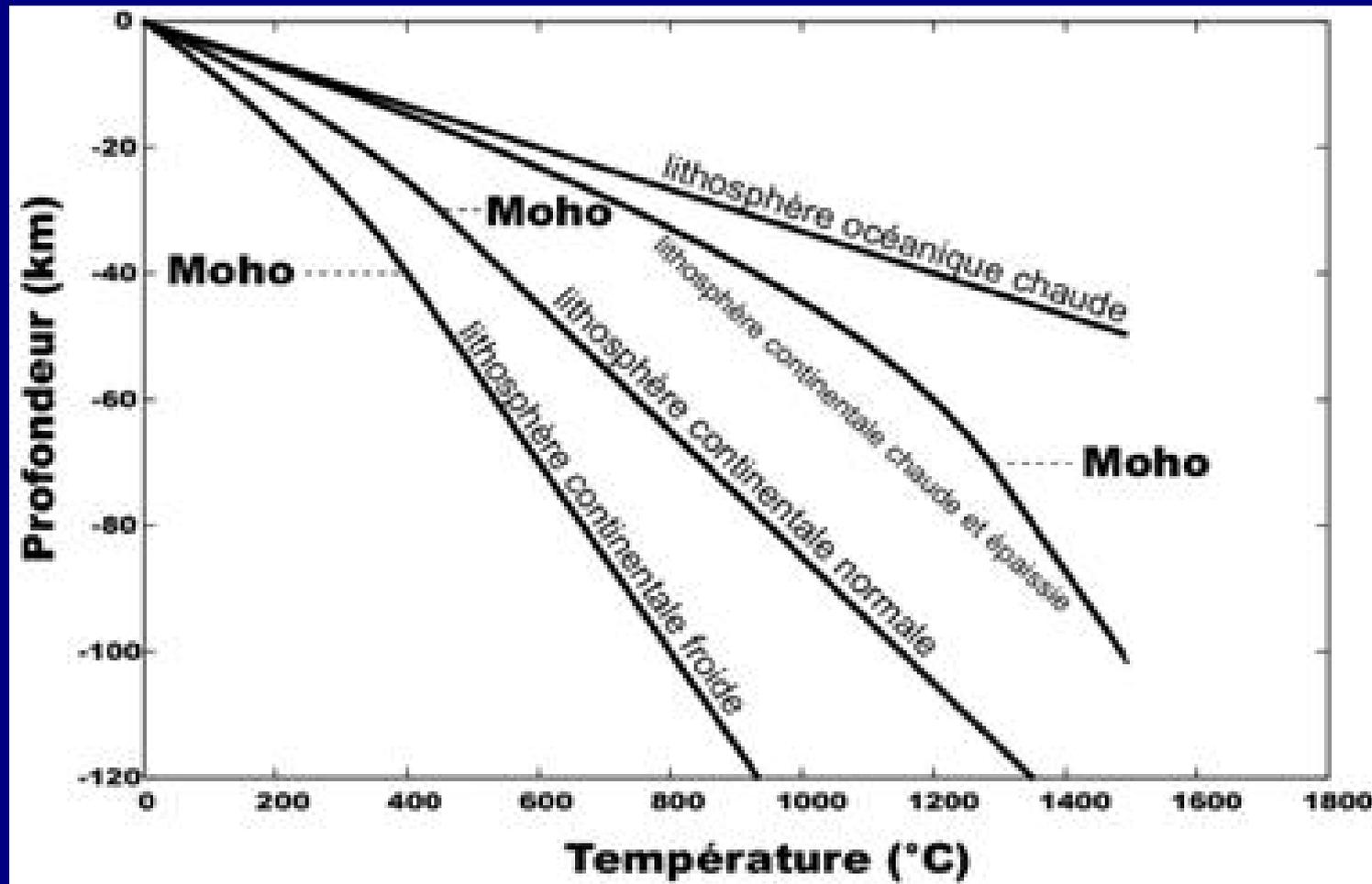
La matière dans les planètes est-elle figée ?

Plus on descend, plus il fait chaud



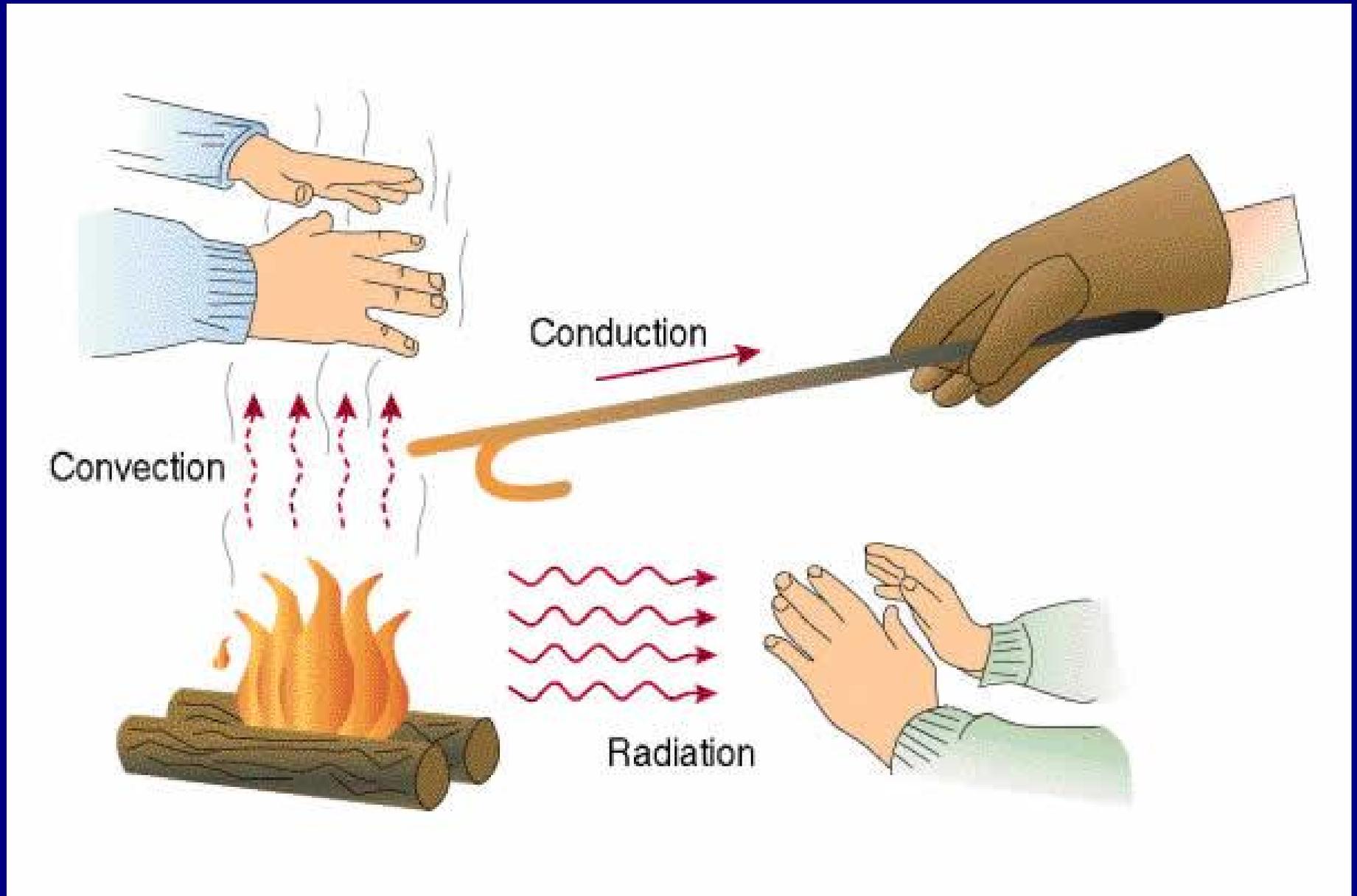
Mesures de température en fonction de la profondeur dans des mines et un forage (ici au Canada)

Plus on descend, plus il fait chaud

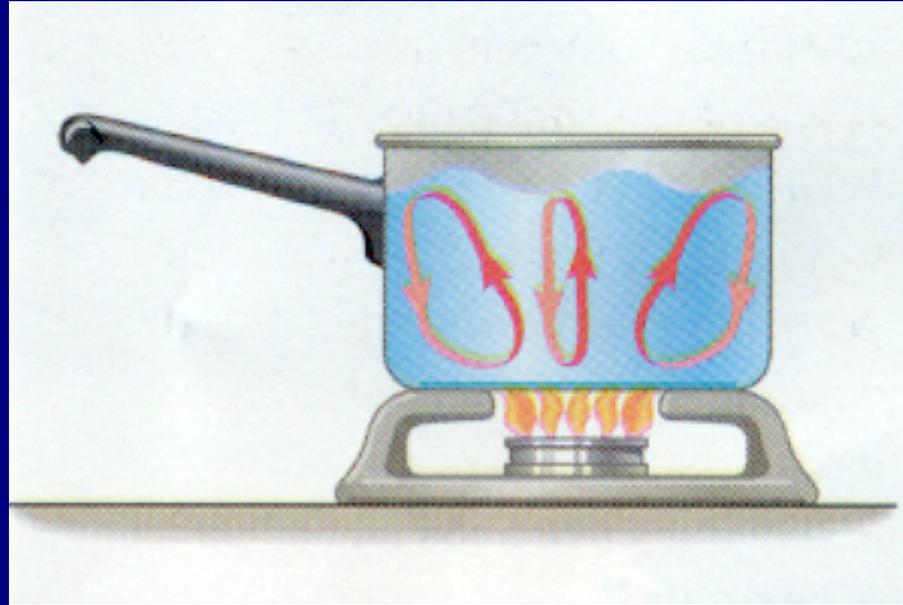


Des modèles de température produits à partir de mesures indirectes.

Le transport de la chaleur dans les planètes



Le transport de la chaleur dans les planètes



Transport de la chaleur par convection : la différence de température est grande. L'eau chaude se dilate et monte (ce qui est facilité par sa faible viscosité). En haut, l'eau refroidit, donc devient plus dense et redescend.

(L'ébullition : c'est une autre histoire, car en plus, l'eau s'évapore au fond de la casserole.)

Il y a une vitesse de convection, et une vitesse du transport de la chaleur sans convection (par **conduction**), effective avant que l'eau se mette à circuler (au début, quand on vient d'allumer).

La fluidité des liquides et des solides. (Une question de temps.)

La glace se comporte-elle comme un solide ou un fluide ?

En quelques heures : un solide.

En quelques mois : un fluide visqueux.

A l'échelle de quelques millénaires : un fluide en écoulement « rapide ».

La fluidité des liquides et des solides. (Une question de temps.)

Un échelle de temps intéressante pour l'intérieur des planètes :

comparer la vitesse de refroidissement par conduction (sans mouvement) à la vitesse possible de la matière.

ce qui équivaut à comparer ...

le temps de refroidissement au temps qu'il faut pour parcourir une fraction importante de la planète.

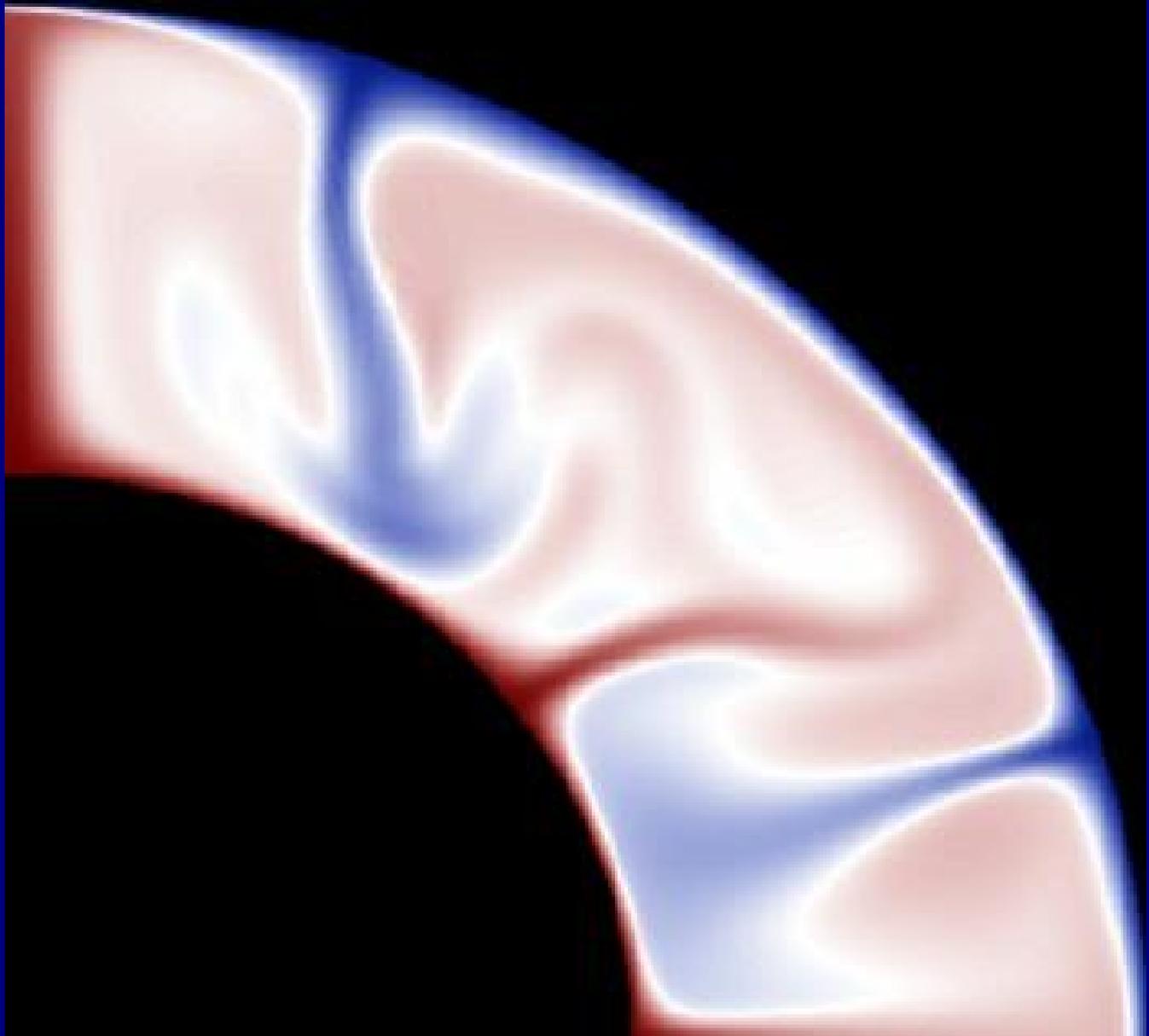
Cela va déterminer si il y a des mouvements de convection à l'intérieur de la planète, si elle est chauffée en son centre.

Le refroidissement des planètes

Simulation numérique
des mouvements de convection
du manteau terrestre chauffé
par le noyau.

Quel choix a été fait sur la nature
de la matière ? Sur sa viscosité.

[Debra Tjoa, Univ. of Michigan]



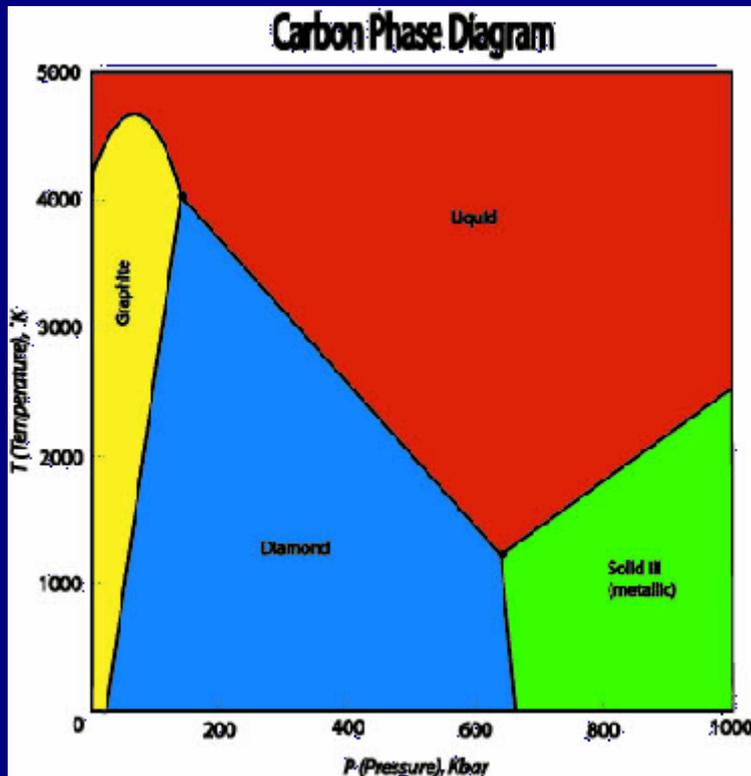
Un aperçu de la matière du magma.

Une preuve expérimentale directe
qu'il existe sous terre
de la matière liquide et chaude.

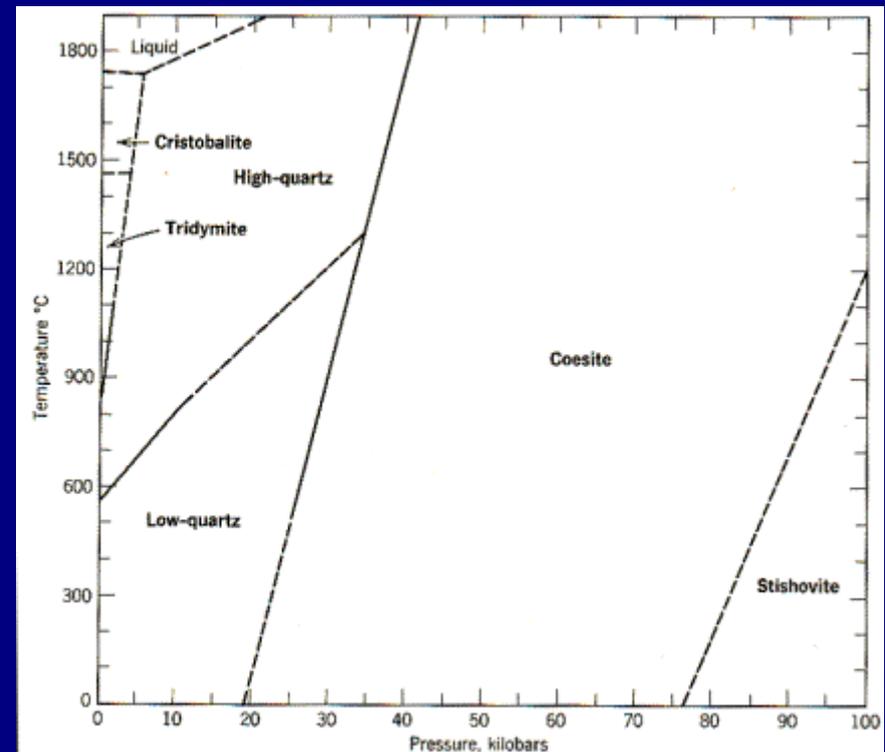
Eruption du Piton de La Fournaise,
Ile de la Réunion
[photo Richard Bouhet]



Faut-il être chaud pour être liquide ?



Carbone : pas nécessairement.

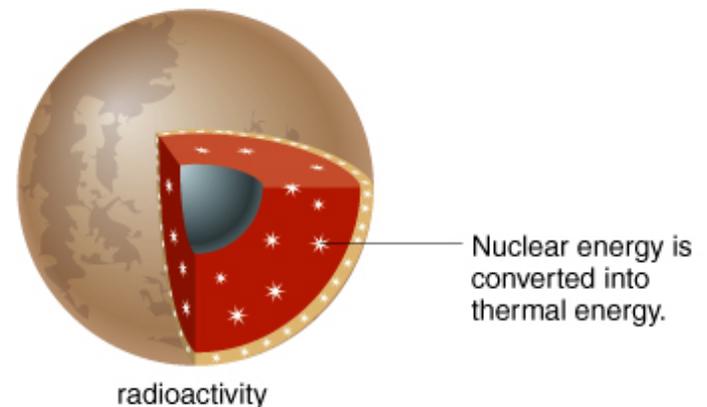
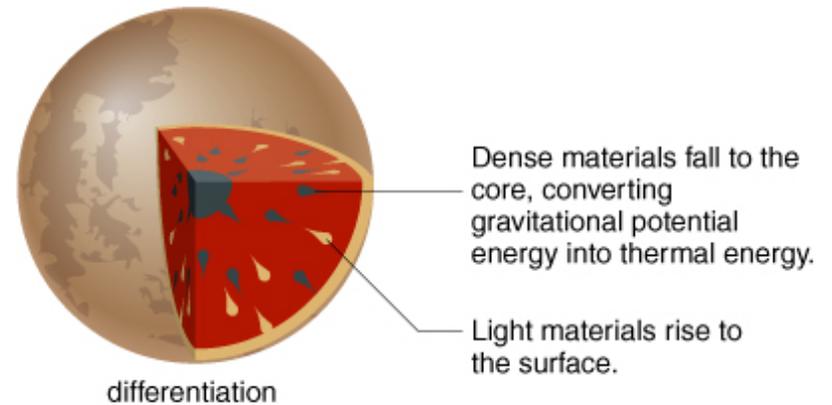
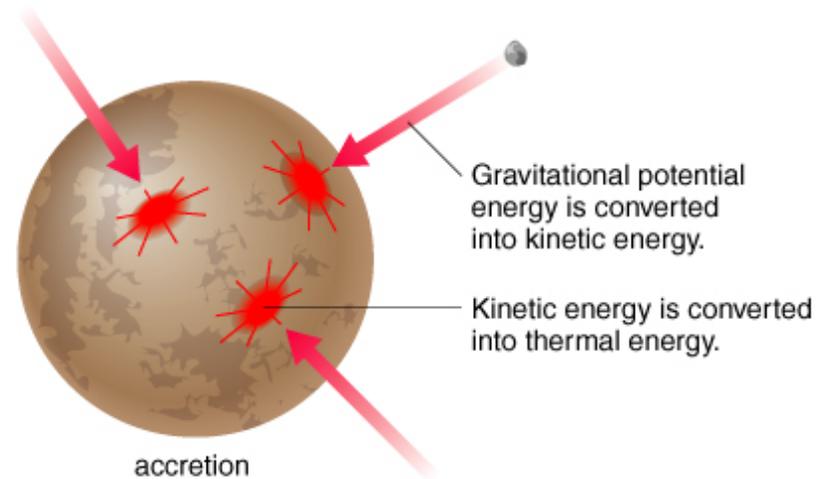


Silice : pour liquéfier, il faut chauffer.

Composition du magma : surtout du silice. Mais d'autres éléments, Al, Ca, Mg...
Dans les régions moins chaudes que les plumes volcaniques :
un mélange de pierres (silicates) et de matériaux liquéfiés.
Comme la glace : solide à l'échelle de qq jours, liquide en qq 10 000 ans.
Assez liquide pour permettre des mouvements de convection.

Comment est chauffée une
planète ?

Le chauffage par bombardement météoritique.



Energy of Accretion

A planet grows every time a little mass m is added to its mass. If we assume these little masses fall from infinity, we can calculate the amount of gravitational energy contained in each mass, add up each bit of energy from each bit of mass that goes into our planet, and from this total up the maximum possible accretional energy available to heat up a planet.

The total energy that a little mass m has as it falls must be constant as it falls, because energy is conserved. Assume that this total energy is zero (that is, the little mass m began at infinity, where $U = 0$, and with zero speed, so that its initial kinetic energy K was also 0).

At any position r between the planet and the small mass, m has a potential energy $U = -GMm/r$ (Equation 9.9), where G is the universal gravitational constant and M is the total mass of the body that is attracting the extra mass m . As the mass falls to the body, r gets smaller and the potential energy becomes an increasingly large negative number, so the kinetic energy must be increasingly large and positive. (In other words, the object speeds up as it falls.) Thus the kinetic energy is always $K = -U = +GMm/r$, keeping the total energy constant and equal to zero. Thus, at the surface of the body, the amount of kinetic energy the small mass m has when it hits is $+GMm/R$, where R is the radius of the body. This kinetic energy is added to the heat budget of the body.

As the body grows, M and R increase; one must sum up over a large number of little m 's until the whole mass of the body M_{final} is achieved. The amount of energy dK which is gained when a mass dm is added to some intermediate stage of the growing body, a stage where the body has a radius r and a mass M already, is given by

$$dK = \frac{GM}{r} dm \quad (5.27)$$

But if we assume that the body is spherical and has a constant density ρ , then we can write the mass M as

$$M = \frac{4}{3}\pi\rho r^3 \quad (5.28)$$

and if the infinitesimal addition of mass dm is done in a spherically symmetric shell, then

$$dm = 4\pi\rho r^2 dr \quad (5.29)$$

Thus we can substitute Equations 5.28 and 5.29 into Equation 5.27 and integrate from a radius of 0 to a total radius R :

$$\Delta K = \int_0^R 3G \left(\frac{4}{3}\pi\rho\right)^2 r^4 dr \quad (5.30)$$

$$= \frac{3}{5}G \left(\frac{4}{3}\pi\rho\right)^2 R^5 = \frac{3}{5}G \frac{M^2}{R} \quad (5.31)$$

That's the total energy going into the body.

The amount of heat generated during core formation can be estimated using this same logic. Here it is important to realize that material is not falling from infinity and that as core material falls into the planet's center, releasing energy, some of that energy is needed to displace the less-dense rock and move up and out of the core. One estimate for the average temperature change when a core is formed is given by the equation

$$\Delta T \approx (1-f)f\Delta\rho \frac{GM}{3R\rho C} \quad (5.32)$$

where f is the fraction of mass in the core, $\Delta\rho$ is the difference in density between the core and the mantle material, R is the total radius of the planet, ρ is its average density, and C is its average heat capacity. G is the universal gravitational constant, and M is the total mass of the planet. This formula is only an approximation, but it gives a good order-of-magnitude estimate of just how important core formation is likely to be for any given solar system body.

Le chauffage par bombardement météoritique.

TABLE 5.2

Maximum Temperatures Attainable by Accretion from Infinity

Object	Radius (in km)	Density (in g/m ³)	ΔT (in K)
Earth	6,378	5.5	375,000
Venus	6,052	5.24	325,000
Mars	3,397	3.9	75,000
Ganymede	2,631	1.94	23,000
The Moon	1,738	3.4	7,000
Ceres	512	3	1,300
Vesta	277	3	360
Enceladus	250	1.13	120
An asteroid	50	3	13
Thebe	50	1.6	4

[cours du LASP, U. Boulder]

FURTHER INFORMATION...

Energy of Accretion

A planet grows every time a little mass m is added to its mass. If we assume these little masses fall from infinity, we can calculate the amount of gravitational energy contained in each mass, add up each bit of energy from each bit of mass that goes into our planet, and from this total up the maximum possible accretional energy available to heat up a planet.

The total energy that a little mass m has as it falls must be constant as it falls, because energy is conserved. Assume that this total energy is zero (that is, the little mass m began at infinity, where $U = 0$, and with zero speed, so that its initial kinetic energy K was also 0).

At any position r between the planet and the small mass, m has a potential energy $U = -GMm/r$ (Equation 9.9), where G is the universal gravitational constant and M is the total mass of the body that is attracting the extra mass m . As the mass falls to the body, r gets smaller and the potential energy becomes an increasingly large negative number, so the kinetic energy must be increasingly large and positive. (In other words, the object speeds up as it falls.) Thus the kinetic energy is always $K = -U = +GMm/r$, keeping the total energy constant and equal to zero. Thus, at the surface of the body, the amount of kinetic energy the small mass m has when it hits is $+GMm/R$, where R is the radius of the body. This kinetic energy is added to the heat budget of the body.

As the body grows, M and R increase; one must sum up over a large number of little m 's until the whole mass of the body M_{final} is achieved. The amount of energy dK which is gained when a mass dm is added to some intermediate stage of the growing body, a stage where the body has a radius r and a mass M already, is given by

$$dK = \frac{GM}{r} dm \quad (5.27)$$

But if we assume that the body is spherical and has a constant density ρ , then we can write the mass M as

$$M = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \quad (5.28)$$

and if the infinitesimal addition of mass dm is done in a spherically symmetric shell, then

$$dm = 4\pi r^2 dr \quad (5.29)$$

Thus we can substitute Equations 5.28 and 5.29 into Equation 5.27 and integrate from a radius of 0 to a total radius R :

$$\Delta K = \int_0^R 3G \left(\frac{4}{3}\pi\rho\right)^2 r^4 dr \quad (5.30)$$

$$= \frac{3}{5}G \left(\frac{4}{3}\pi\rho\right)^2 R^5 = \frac{3}{5}G \frac{M^2}{R} \quad (5.31)$$

FORMATION

That's the total energy going into the body.

The amount of heat generated during core formation can be estimated using this same logic. Here it is important to realize that material is not falling from infinity and that as core material falls into the planet's center, releasing energy, some of that energy is needed to displace the less-dense rock and move up and out of the core. One estimate for the average temperature change when a core is formed is given by the equation

$$\Delta T \approx (1-f) f \Delta\rho \frac{GM}{3R\rho C} \quad (5.32)$$

CORE FORMATION

where f is the fraction of mass in the core, $\Delta\rho$ is the difference in density between the core and the mantle material, R is the total radius of the planet, ρ is its average density, and C is its average heat capacity. G is the universal gravitational constant, and M is the total mass of the planet. This formula is only an approximation, but it gives a good order-of-magnitude estimate of just how important core formation is likely to be for any given solar system body.



Le chauffage par bombardement météoritique.

TABLE 5.2

Maximum Temperatures Attainable
by Accretion from Infinity

<i>Object</i>	<i>Radius (in km)</i>	<i>Density (in g/m³)</i>	<i>ΔT (in K)</i>
Earth	6,378	5.5	375,000
Venus	6,052	5.24	325,000
Mars	3,397	3.9	75,000
Ganymede	2,631	1.94	23,000
The Moon	1,738	3.4	7,000
Ceres	512	3	1,300
Vesta	277	3	360
Enceladus	250	1.13	120
An asteroid	50	3	13
Thebe	50	1.6	4

L'accrétion peut chauffer un astre de quelques centaines/milliers de degrés, s'il est assez gros.

Un astre petit ne sera pas chauffé, donc sa matière ne fondra pas et se mélangera peu.

La question est de savoir si le refroidissement ne s'opère pas plus vite que le chauffage, auquel cas, l'accroissement de température ne pourrait pas atteindre les valeurs présentées ci-contre.

Le chauffage radiogénique

$${}^{206}\text{Pb} = {}^{206}\text{Pb}_0 + {}^{238}\text{U}(e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

avec $\lambda_{238} = 1,55125 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$ (*demi-vie* = 4,47 Ga)

$${}^{207}\text{Pb} = {}^{207}\text{Pb}_0 + {}^{235}\text{U}(e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

avec $\lambda_{235} = 9,8485 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$ (*demi-vie* = 0,704 Ga)

$${}^{208}\text{Pb} = {}^{208}\text{Pb}_0 + {}^{232}\text{Th}(e^{\lambda_{232}t} - 1)$$

avec $\lambda_{232} = 4,9475 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$ (*demi-vie* = 14,0 Ga)

Présence d'éléments radio-actifs à l'intérieur de la planète. Leur désintégration dégage de la chaleur. Certains éléments se désintègrent vite et ont disparu.

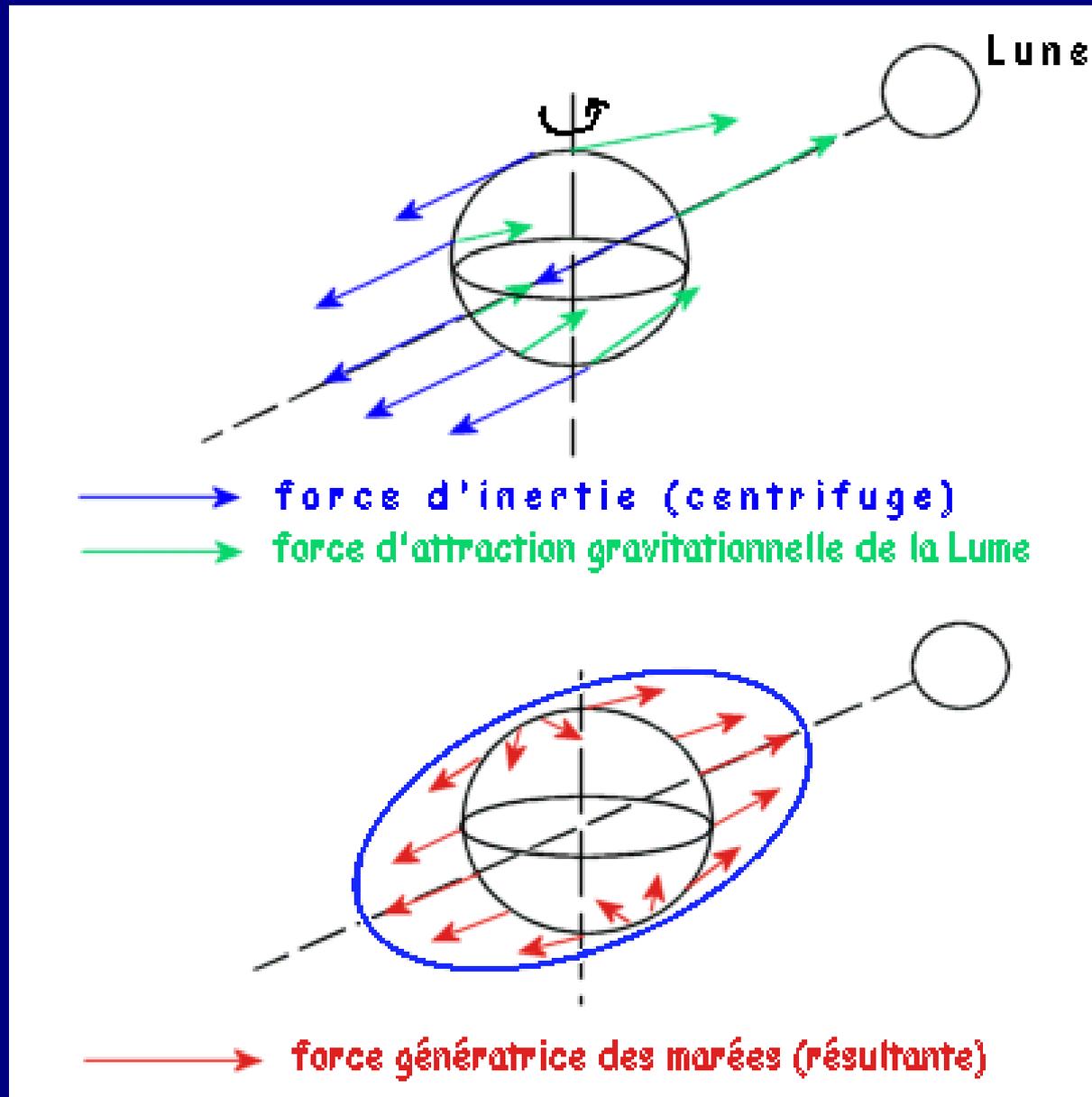
Ceux qui chauffent l'intérieur d'une planète ont une longue durée de vie.

Exemple : Uranium, Plomb, Thorium...

L'avantage : ce chauffage peut durer très longtemps : qq Md années.

L'inconvénient : il ne peut se produire que pour des planètes rocheuses ayant des éléments radio-actifs. Pas pour des planètes formées de glace d'eau.

Le chauffage par effet de marées

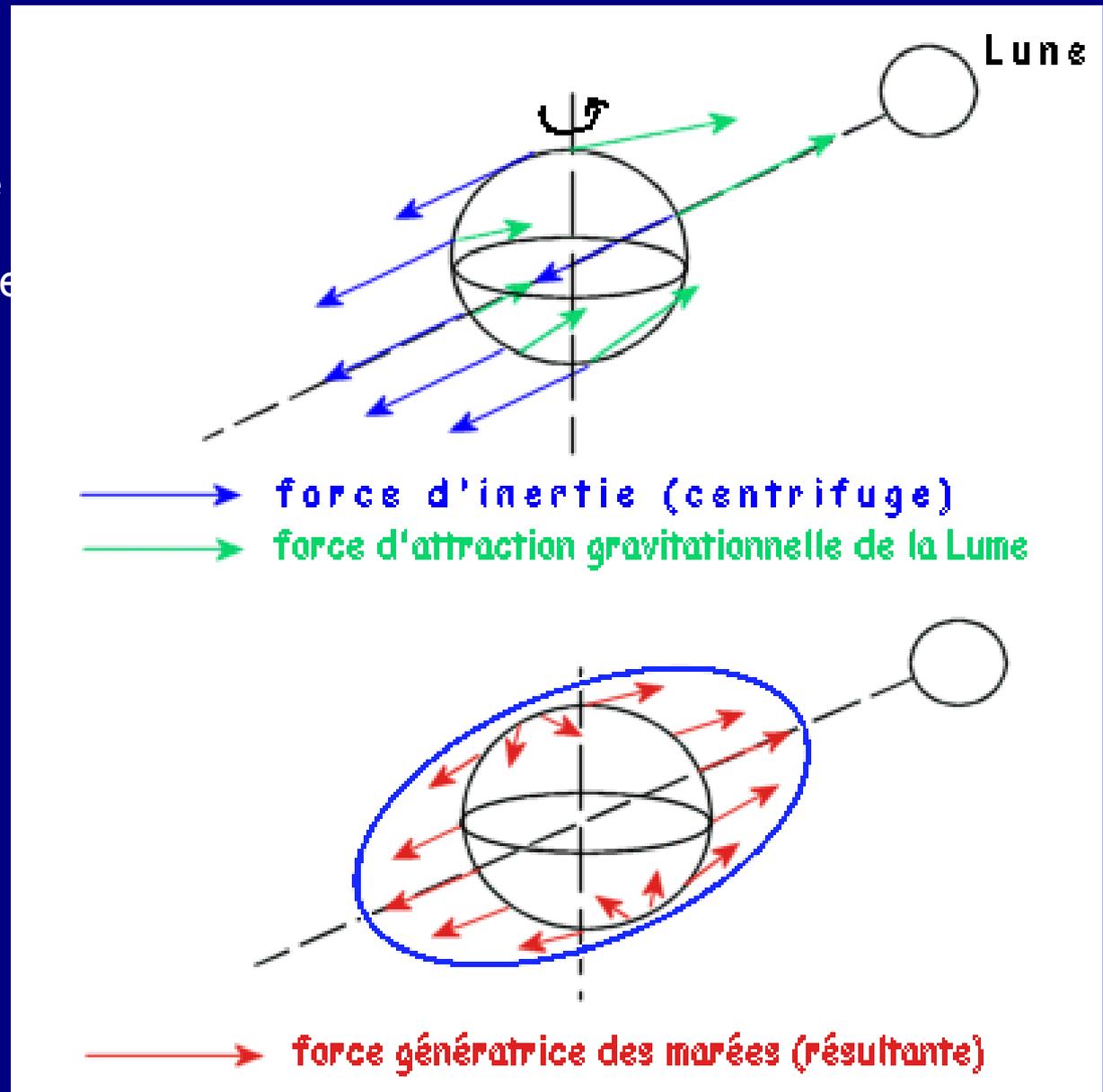


Le chauffage par effet de marées

Si la planète tourne sur elle-même avec une période différente de la rotation autour de l'autre, la planète est continuellement déformée.

Cas de la **Terre** avec la Lune : 24 heures et 28 jours.

Mais pas le cas de la **Lune** : 28 jours dans les deux cas.



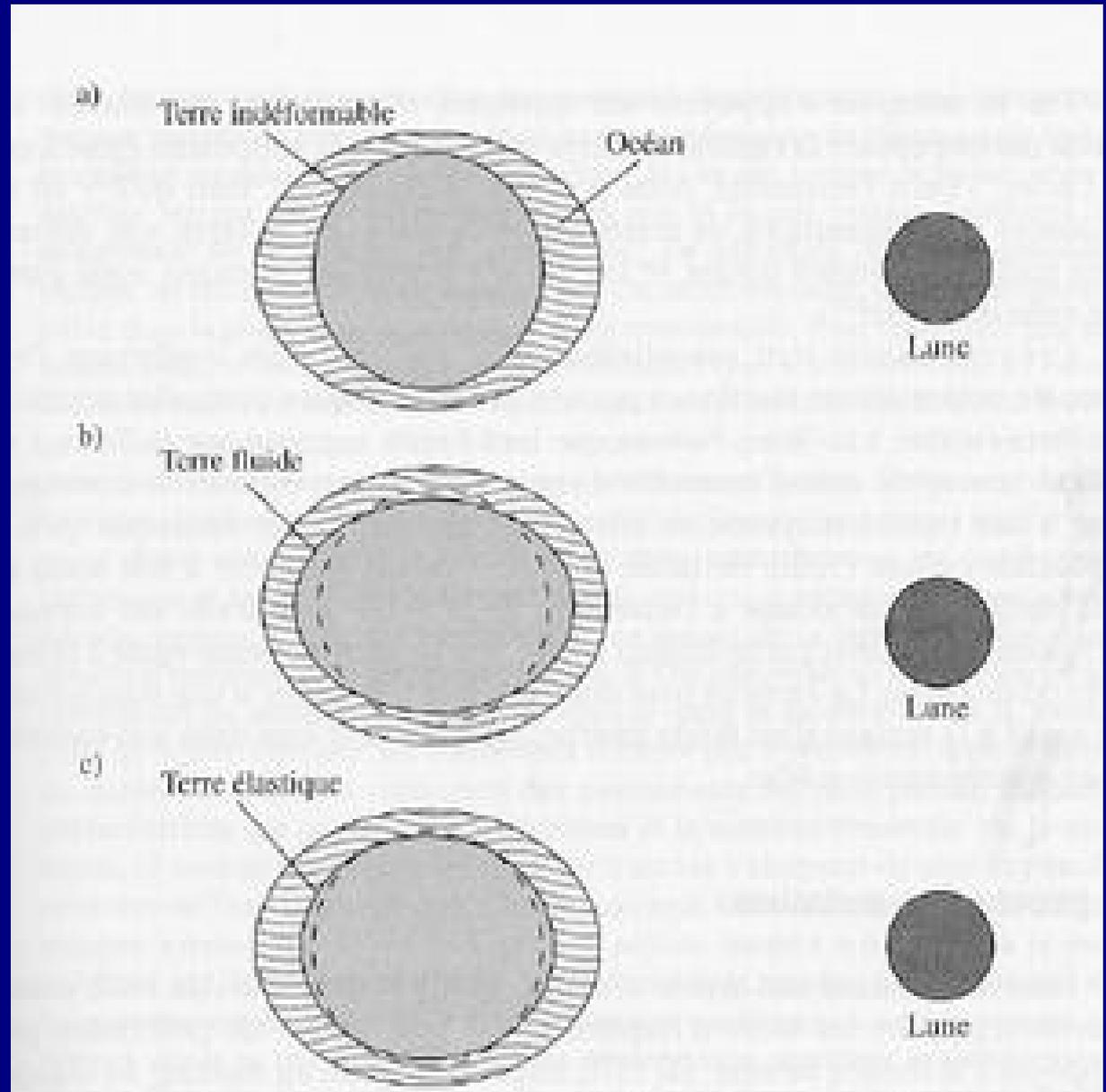
Le chauffage par effet de marées

Si la planète tourne sur elle-même avec une période différente de la rotation autour de l'autre, la planète est continuellement déformée.

Cas de la **Terre** avec la Lune : 24 heures et 28 jours.

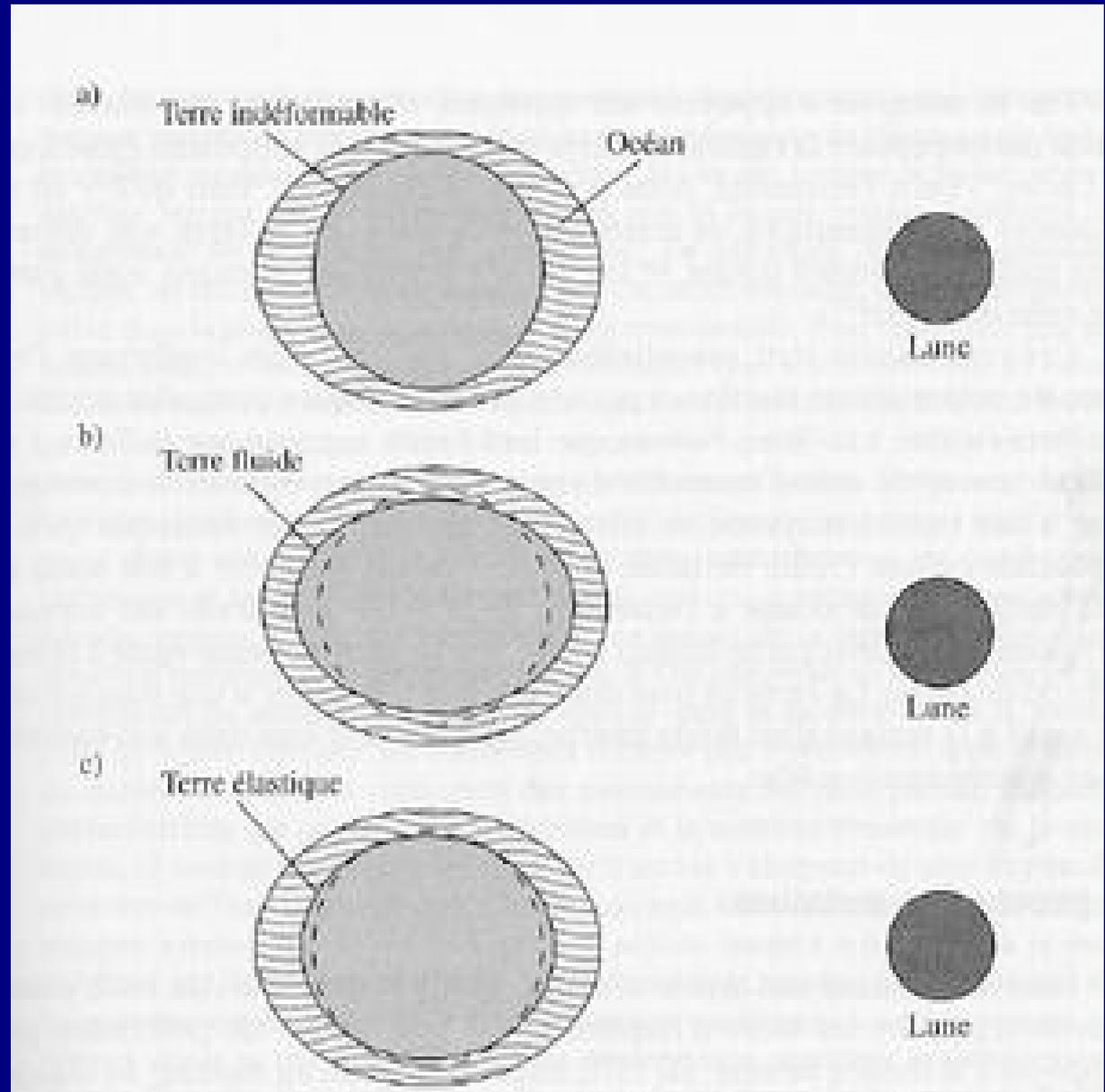
Marées océaniques : qq mètres.
Marée de Terre (élastique) : 70 cm.

Deux marées par jour dans le cas « idéal », elles correspondent au franchissement des deux bourrelets.



Le chauffage par effet de marées

Pour un astre soumis aux marées, le franchissement des bourrelets provoque une compression/décompression de la matière, et cela la chauffe.



La rotation synchrone des satellites

Tout comme la Lune qui tourne sur elle même avec la même période que la rotation autour de sa planète, les autres satellites du système solaire tournent autour d'eux-mêmes avec la même période que la rotation autour de leur planète.

On parle de rotation synchrone.

Les satellites montrent donc tous toujours la même face à leur planète.

Une exception : hypérioron autour de saturne : elle est dans les anneaux, et ces anneaux rendent ses mouvements chaotiques, et asynchrones.



Hypérioron, diamètre 370 km.
[Cassini, NASA]

Les satellites perturbés par leurs voisins

Les satellites Io (Jupiter) et Encelade (Saturne) sont très près de leur planète.

Ils sont fortement synchronisés avec leur planète...

mais un satellite voisin passe à proximité très régulièrement, et tend à modifier leur trajectoire.

Et cette trajectoire se remet bien vite en synchronisation... aux prix de déformations du satellite par effets de marée...

... ce qui le chauffe très efficacement.



La distance entre Io et Jupiter n'est que de 6 rayons de Jupiter. (60 dans le cas Terre-Lune)
[Galileo, NASA]

Les satellites perturbés par leurs voisins

Io tourne en 1,77 jours. Mais Europe, le gros satellite situé juste après tourne en 3,55 jours, c'est à dire le double.

Alors un tour sur deux, Europe tire Io vers lui et cela tend à rendre la trajectoire de Io ovale. Si la trajectoire est ovale, les forces de marée de Jupiter sont variables, et donc elles déforment Io. Et Io chauffe.

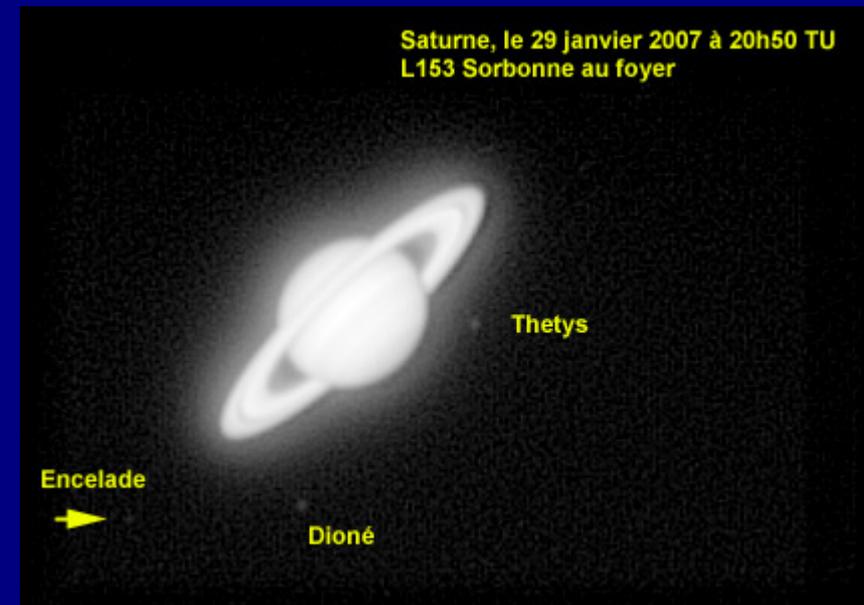


La distance entre Io et Jupiter n'est que de 6 rayons de Jupiter. (60 dans le cas Terre-Lune)
[Galileo, NASA]

Les satellites perturbés par leurs voisins

Encelade tourne en 1,37 jours.
Résonance orbitale $\frac{1}{2}$ avec Dioné
Période de Dioné : 2,74 jours.

Son orbite est elliptique, ce qui provoque des variations des forces de marée (une fois par jour). Déformation d'Encelade de plus de 1 mètre. Cela donnerait assez d'énergie pour expliquer le volcanisme d'Encelade
[Nimmo et al, Nature 2007]



Encelade et autres vues à Paris.

Pourquoi les planètes sont-elles rondes, pourquoi les astéroïdes ne le sont pas (en général) ?

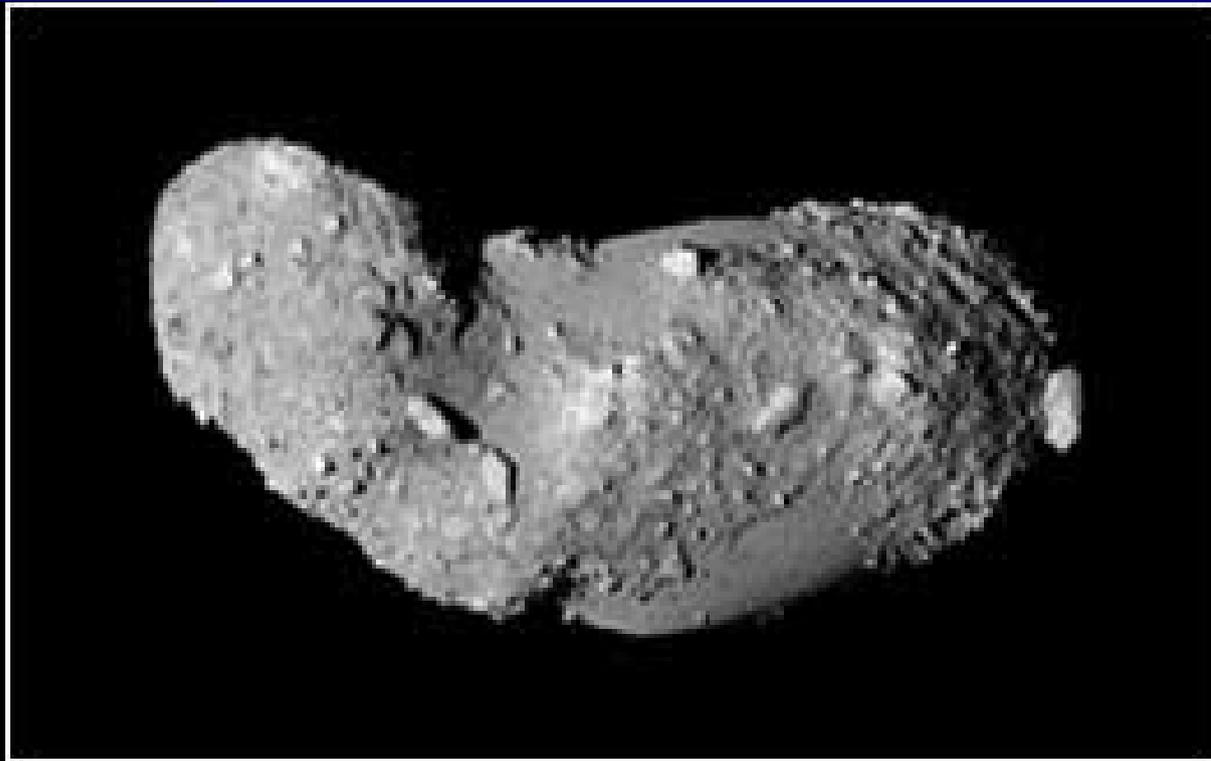
Pourquoi les planètes sont-elles rondes, sauf les petites ?

La sphère correspond à la symétrie causée par les forces de gravitation : elles poussent la matière vers le centre de l'astre, et à cause de la pression, la matière s'empile, sous la forme d'une sphère.

Mais les petits objets solides tiennent à cause des forces de cohésion électrique : cailloux, pierres, rochers.

Un astre devient rond lorsque la gravitation l'emporte sur la cohésion des roches. Autrement dit : quand l'écrasement sous leur propre poids écrabouille les roches, les transformant en sable, ou en liquide. Alors les fragments de roches peuvent glisser les uns contre les autres, et se répartir sphériquement.

Pourquoi les planètes sont-elles rondes, sauf les petites ?



Eros (33km) et Itokawa (500 m) sont des astéroïde trop peu massifs : la gravitation ne l'emporte pas totalement sur la cohésion propre des rochers qui les constituent.

Vitesse d'évasion d'Itokawa : 20 cm/s (Terre : 11 km/s)

La composition chimique d'une
planète varie-t-elle avec la
profondeur ?

La différenciation.

La différenciation

Si une planète est assez massive, et s'il est assez chaud, non seulement il s'arrondit, mais la matière devient molle (parfois même liquide).

Alors, la matière la plus dense coule vers le fond et la plus légère remonte.

C'est la différenciation.

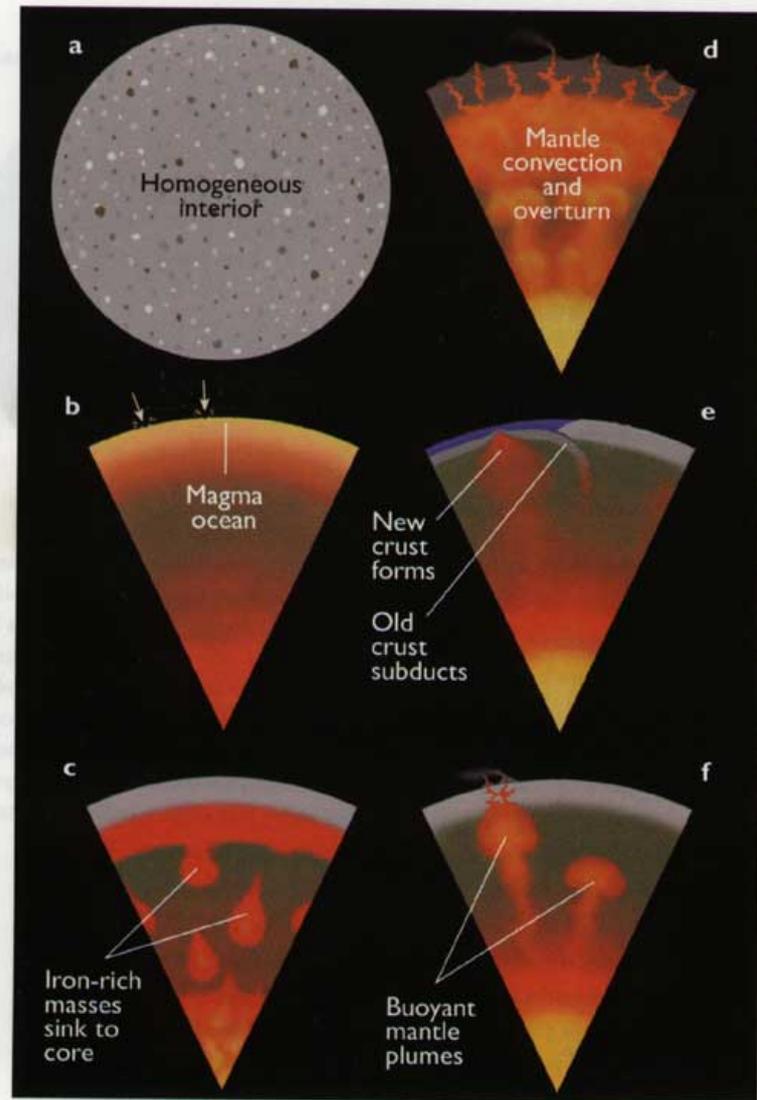
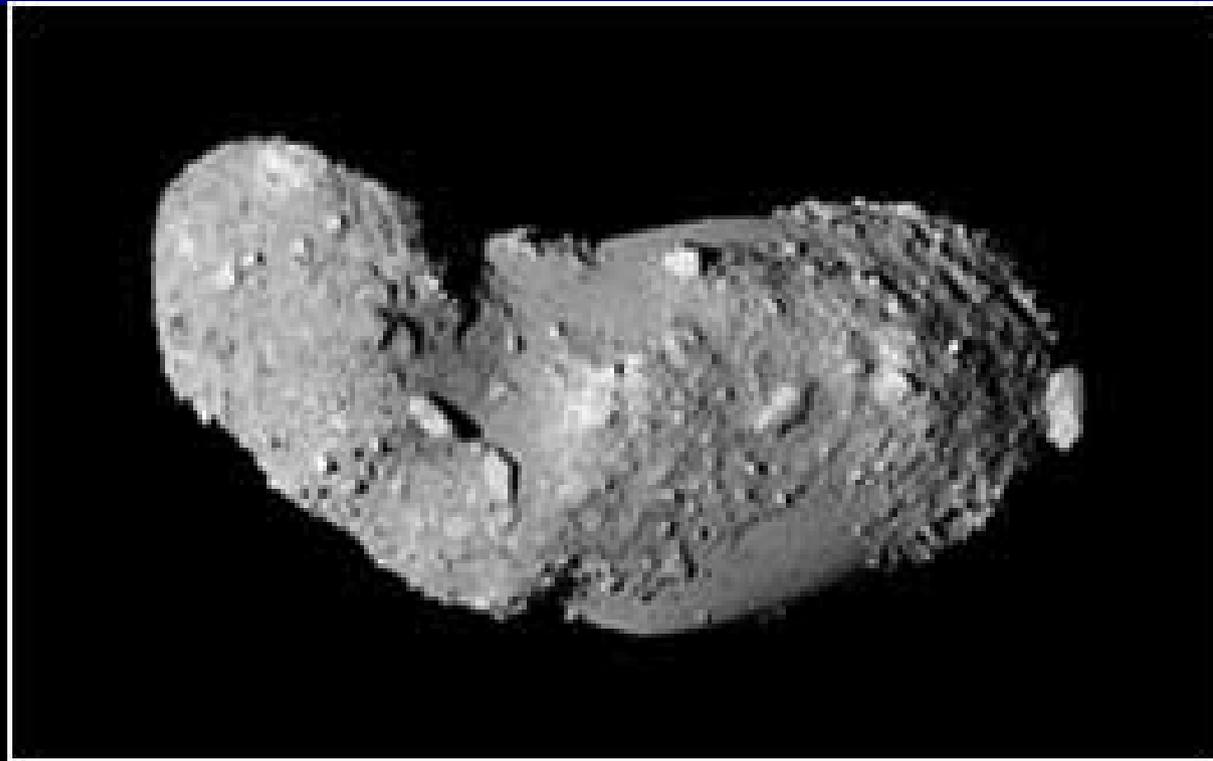


Figure 3. Differentiation is the process by which a body's initially homogeneous primitive materials (a) become segregated in planetary interiors. A number of different mechanisms contribute to differentiation. For example, the kinetic energy delivered by impact bombardment (b) can cause widespread — even global — melting of near-surface layers. Denser material collects and sinks to form a core (c), and the heat released from this event can trigger further differentiation. Deep-seated compositional and thermal instabilities (d) can cause materials to become less dense than their surroundings, resulting in rising plumes that undergo mixing and further differentiation. On Earth's ocean floors, differentiation also occurs as slabs of oceanic crust (e), mixed with water and sediment, are forced down into the crust and remelted. On Venus (f), vertical crustal accretion may continue until density instabilities cause the crust to founder, allowing planetwide resurfacing by volcanism.

La différenciation sur les petits corps



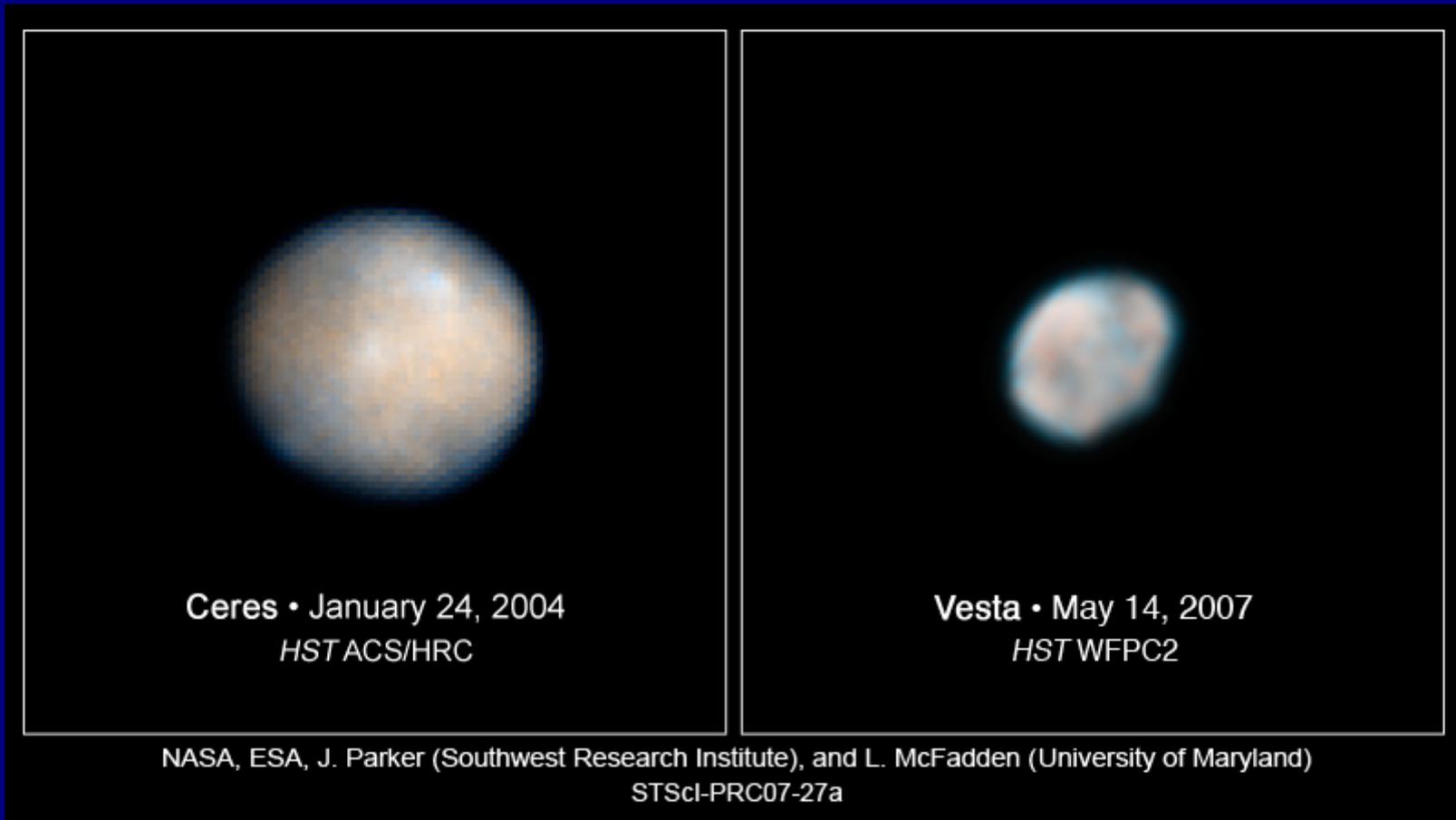
Eros (33km) et Itokawa (500 m) sont des astéroïde trop peu massifs : la gravitation ne l'emporte pas totalement sur la cohésion propre des rochers qui les constituent.

Vitesse d'évasion d'Itokawa : 20 cm/s (Terre : 11 km/s)

Néanmoins, ils sont couverts de poussière qui est facile à faire bouger. Sur Eros, les rochers semblent avoir coulé sous la poussière. Pas sur Itokawa, plus légère, non différenciée.

En fait, des petites vibrations sont propices à y faire remonter les corps les plus gros. Et plus l'astre est petit, plus de faibles impacts le feront vibrer.

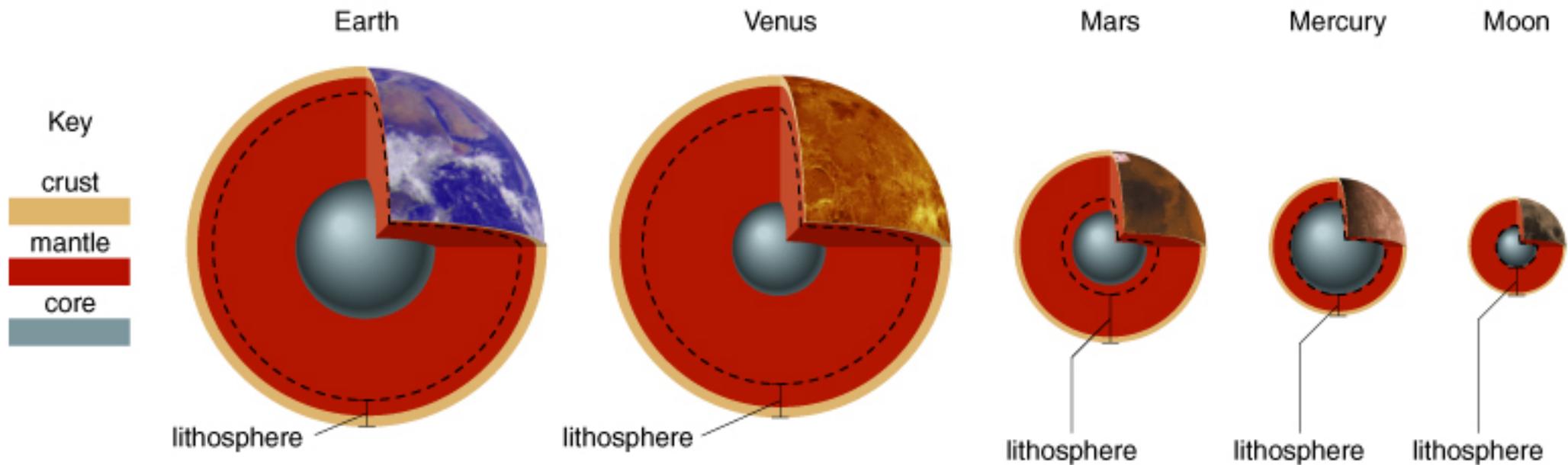
la différenciation



L'astéroïde Ceres, sphérique, a dû connaître une époque de fusion. On s'attend à une structure interne stratifiée : les éléments les plus lourds seraient surtout au centre.
(Dawn 2015.)

L'astéroïde Vesta, 530 km de diamètre, n'est pas totalement circulaire, déformée par un énorme impact de cratère (456 km). Les irrégularités de couleur suggèrent, comme pour la Lune, des coulées de lave, donc fusion et différenciation. (Dawn 2011.)

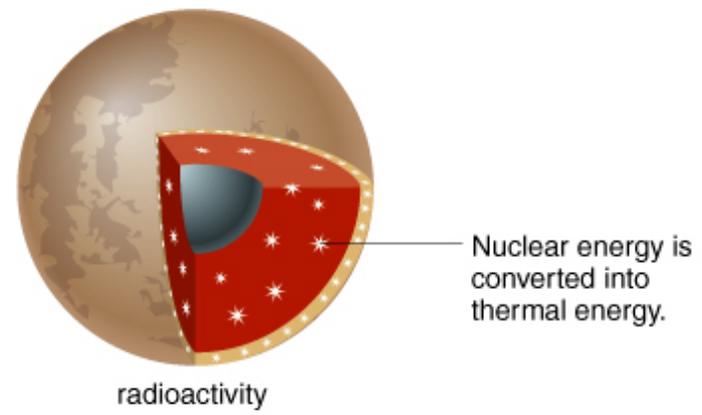
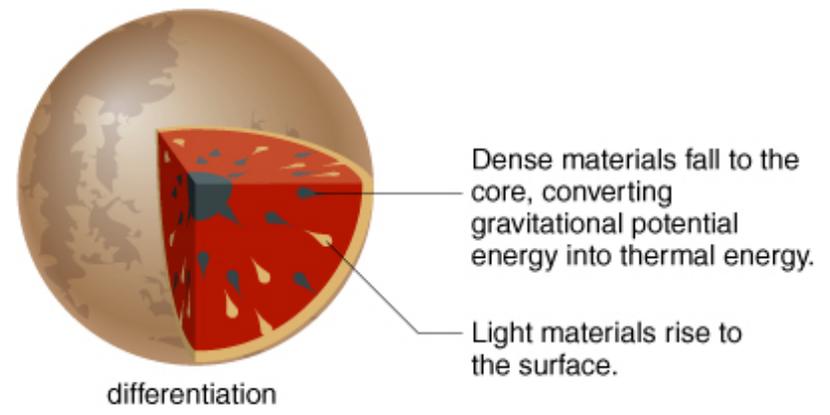
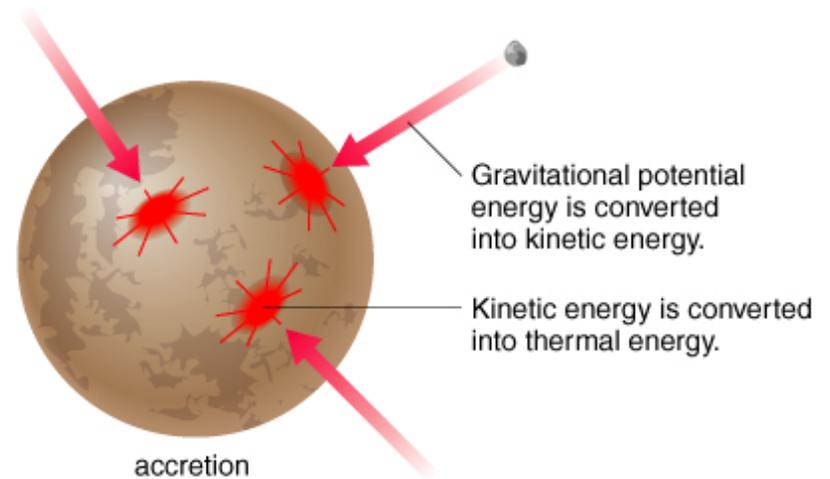
la différenciation



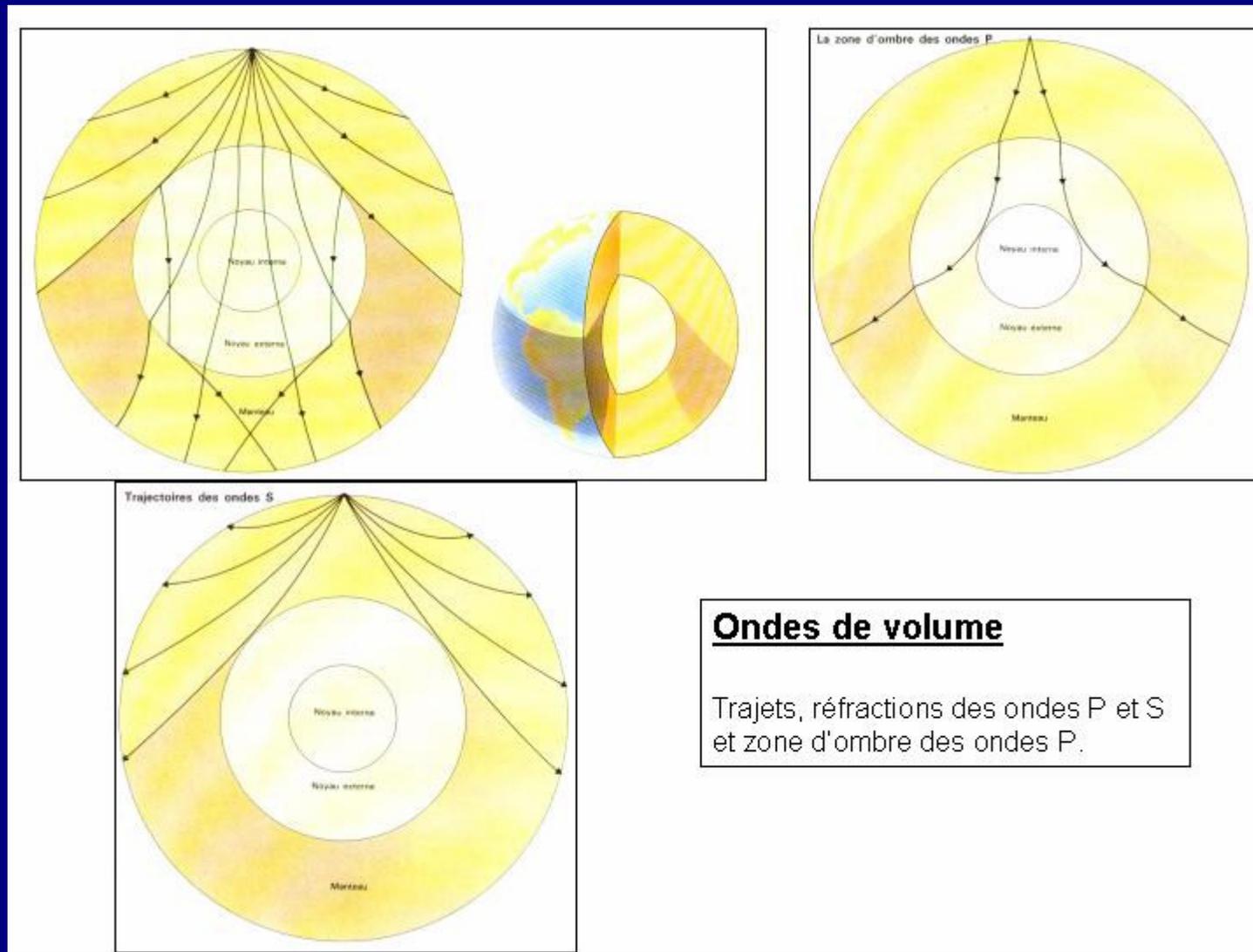
© Addison-Wesley Longman

Les planètes assez grosses sont toutes différenciées.
Elles possèdent un noyau riche en Fer (densité 7) en leur centre.
Puis un manteau riche en silicates (densité 3-4).
Puis une croûte, bien plus froide que le manteau, et assez mince.

Le chauffage radiogénique est plus efficace après la phase de différenciation (époque actuelle).



le noyau des planètes



Les éléments radioactifs à longue durée étant massifs, ils sont concentrés dans le noyau. Donc c'est surtout le noyau des planètes qui est chauffé. Le manteau en recèle néanmoins. Noyau de la Terre : $T=5000\text{ K}$ (d'après des modèles, pas directement mesuré).

Le refroidissement des planètes

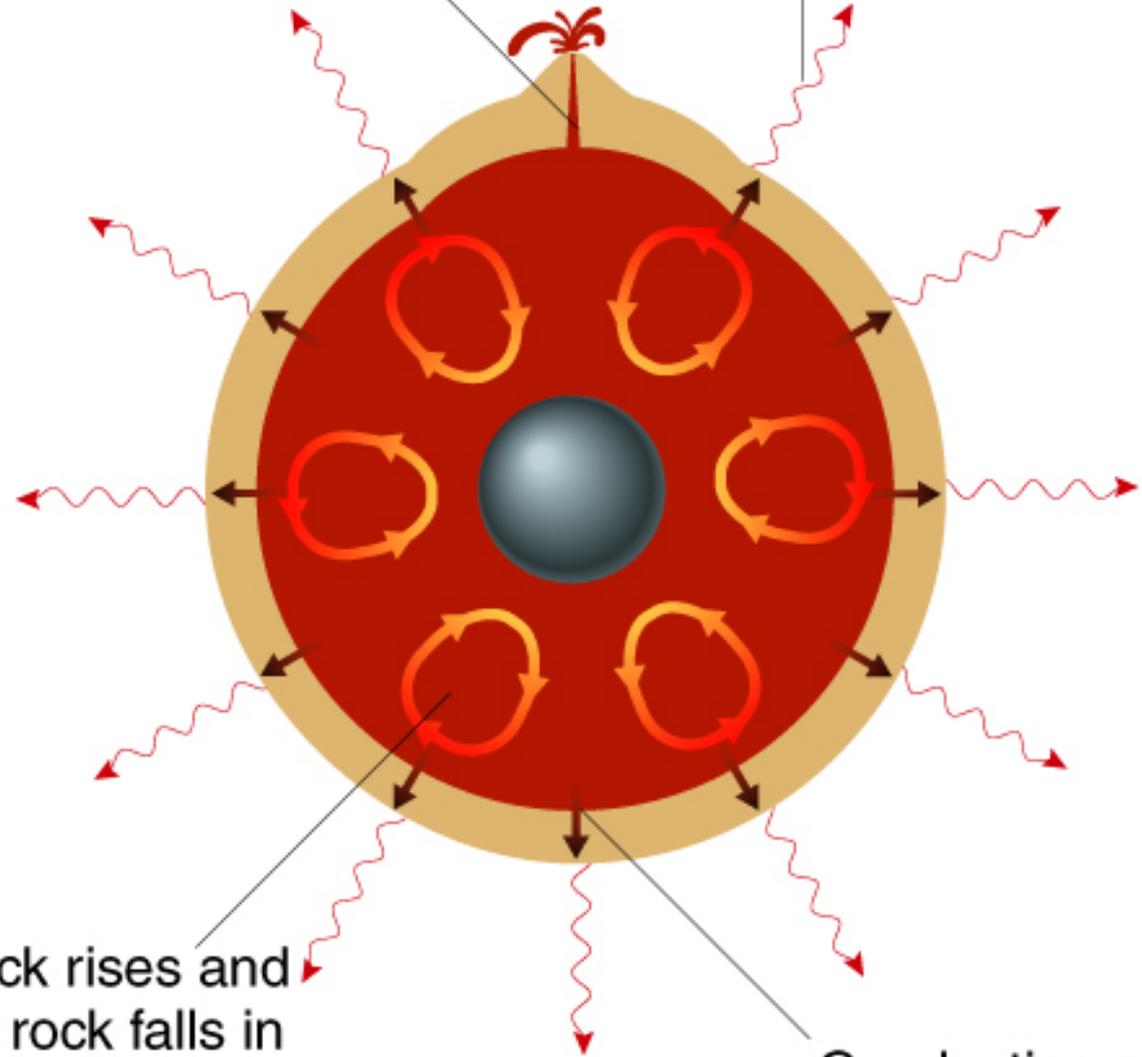
Plus une planète est grosse, moins elle se refroidit vite.

Une planète est active si le chauffage l'emporte sur le refroidissement.

Une planète se refroidit par l'extérieur. Donc la partie externe, plus froide est plus dure que les parties internes.

Eruptions bring hot lava up from the interior.

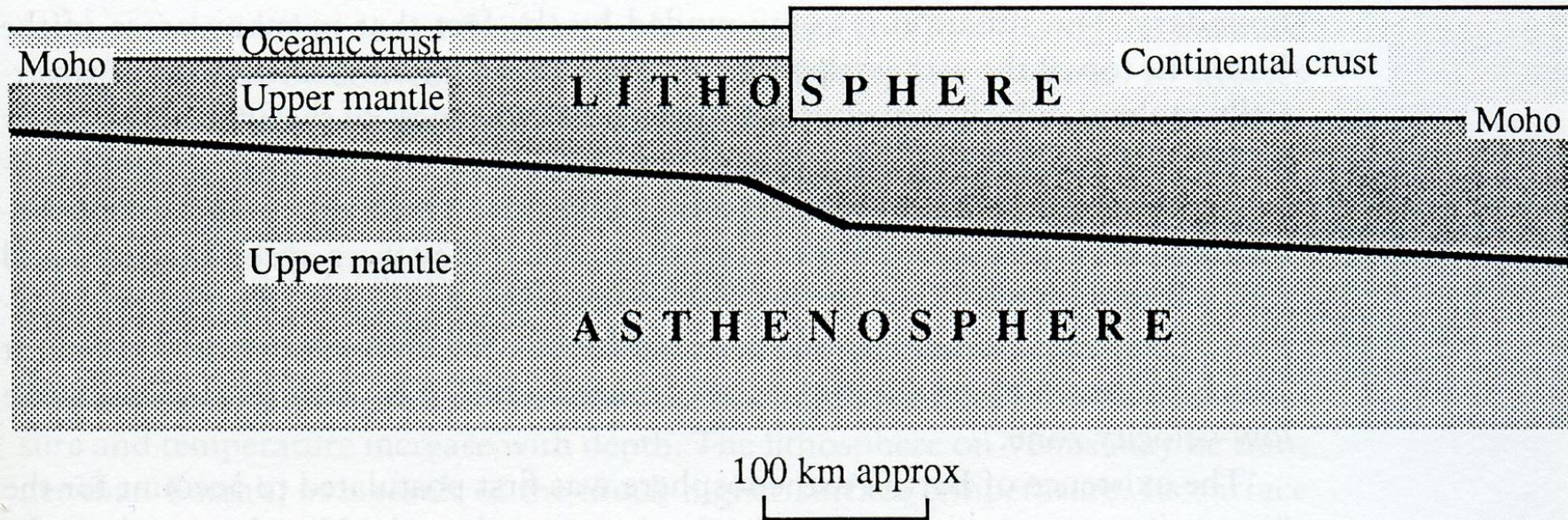
Energy is radiated into space.



Hot rock rises and cooler rock falls in a mantle convection cell.

Conduction carries heat in the rigid lithosphere.

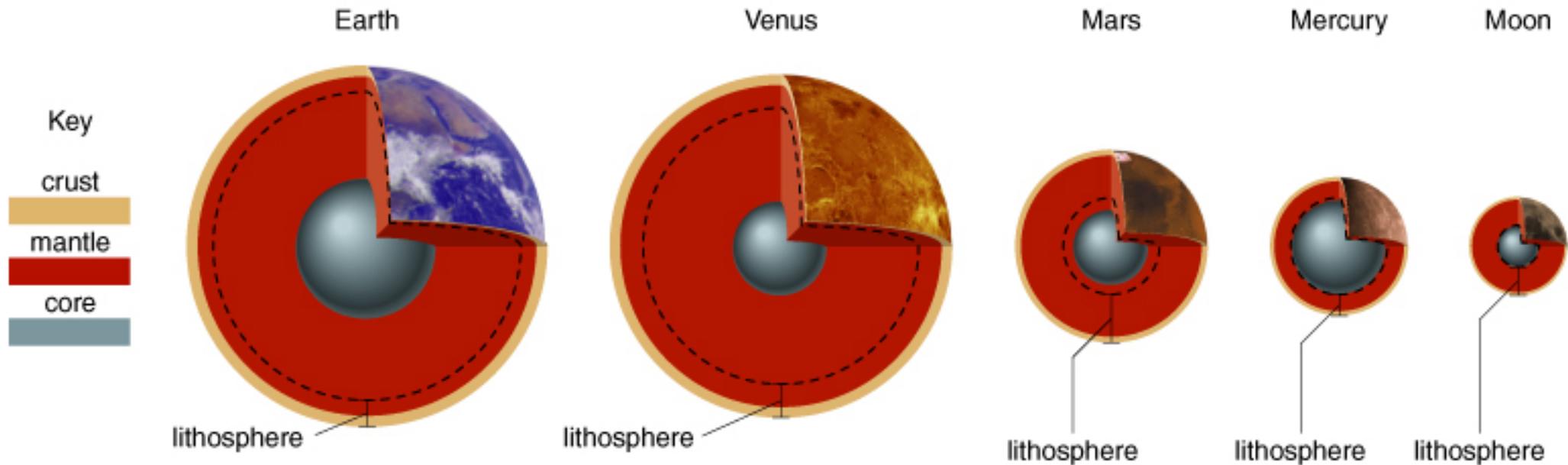
La croûte, le manteau



Dans les planètes différenciées, les matières les plus légères ont flotté sur les plus lourdes (du temps où tout cela était chaud et mou). Depuis, elles sont restées à la surface : océans (densité 1), croûte (densité d'environ 3). A part l'eau (cf aussi Titan), tout cela a durci.

La transition croûte/manteau est principalement de nature chimique. La matière en haut du manteau a une composition chimique différente (un peu plus dense), mais elle est solide (et dure, peu meuble) également.

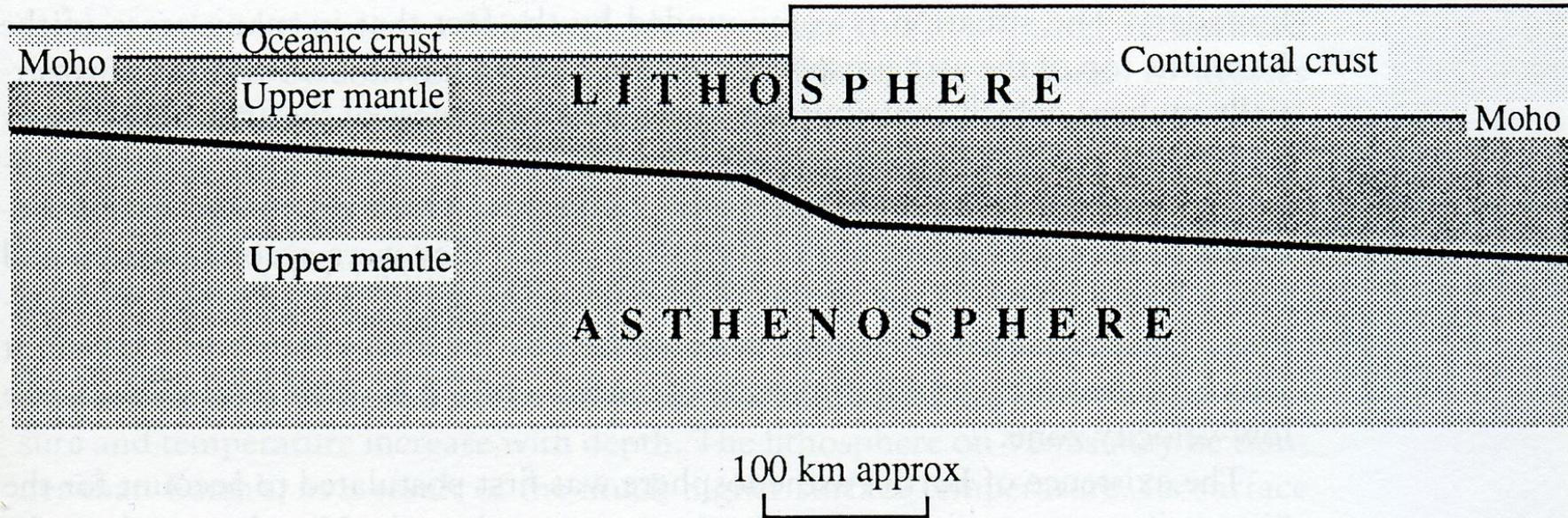
La croûte, le manteau



© Addison-Wesley Longman

Toutes les planètes différenciées ont une croûte.

La lithosphère, l'asthénosphère



Comme la région externe d'une planète est plus froide, elle est aussi plus rigide.

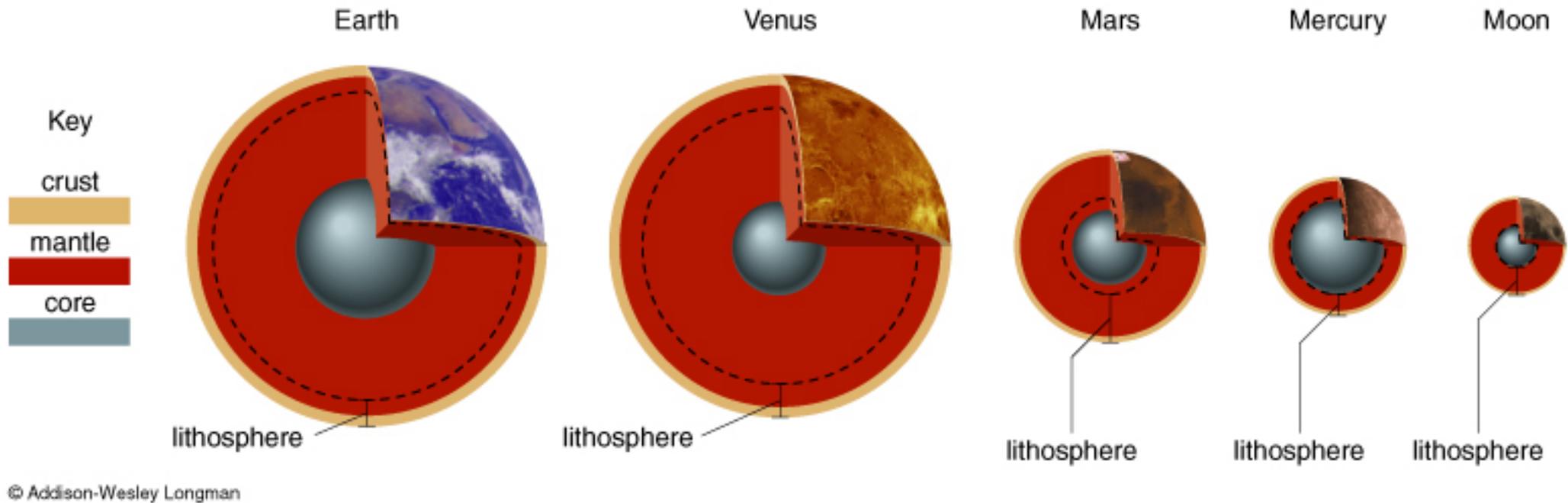
La partie rigide est la lithosphère (litho : pierre -> dur).

La partie molle est l'asthénosphère (asthéo : faible -> mou).

Plus une planète a eu le temps de refroidir, plus la lithosphère (partie dure) est épaisse.

La transition lithosphère-asthénosphère est de nature physique, pas chimique.

La lithosphère, l'asthénosphère



Comme la région externe d'une planète est plus froide, elle est aussi plus rigide. La partie rigide est la lithosphère (litho : pierre -> dur). La partie molle est l'asthénosphère (asthéo : faible -> mou).

Plus une planète a eu le temps de refroidir, plus la lithosphère (partie dure) est épaisse.

La structure interne des planètes.

- Dépend fortement de leur masse : forme sphérique et différenciation.
- Dépend de leur composition chimique : chauffage radiogénique du noyau... propriétés du manteau.
- On y observe des alternances de régions dure (en particulier les régions externes) et de régions molles.
- A court terme, les matières molles sont comme des solides.
- A des échelles géologiques, elles sont fluides, mais leur viscosité (opposition à l'écoulement) est très dépendante de la masse de la planète, de la chimie, et de la température.
- D'où une grande diversité de structures dans le système solaire.
- Tant qu'il y a du mou, il peut y avoir du mouvement... et des volcans.