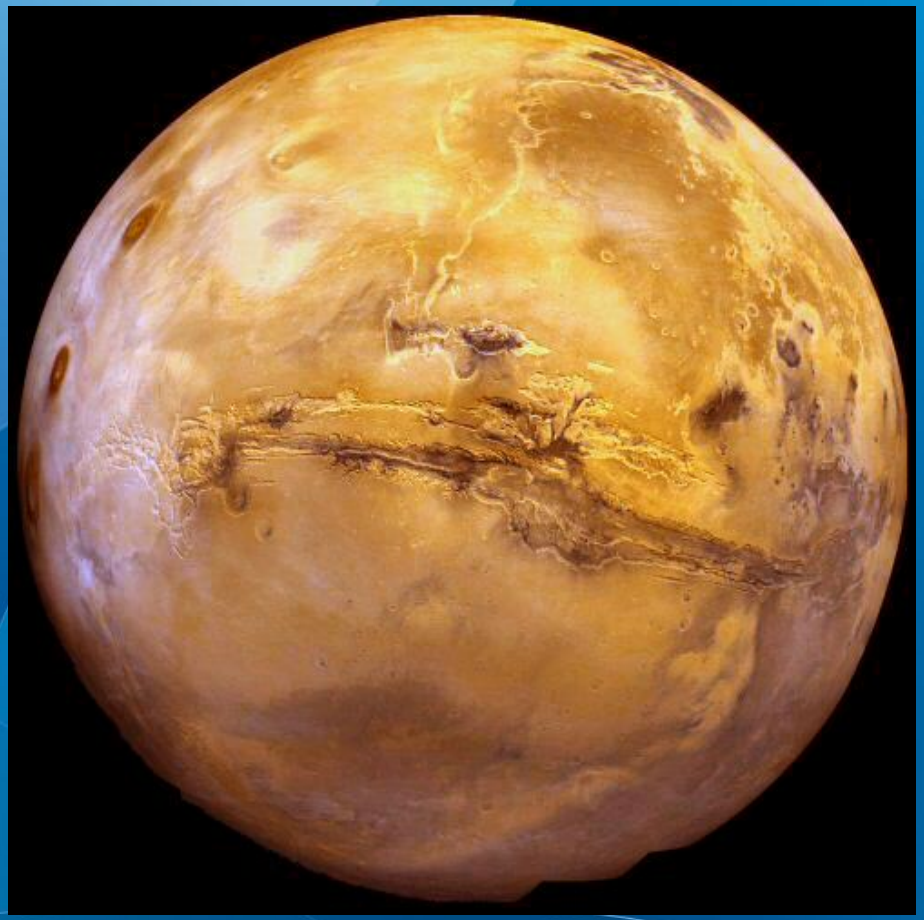
Géodynamique Interne

Laurent Stehly

Plan indicatif

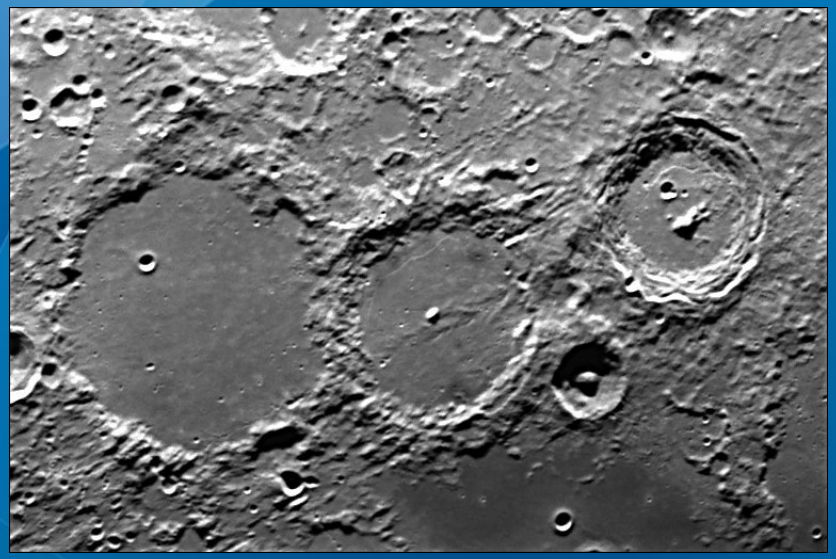
- Mercredi matin : Géodynamique Interne
- Mercredi am : Champ Magnétique + TD ?
- Jeudi matin : gravimétrie
- Jeudi am : TD
- Vendredi matin: Sismologie
- Vendredi am : TD

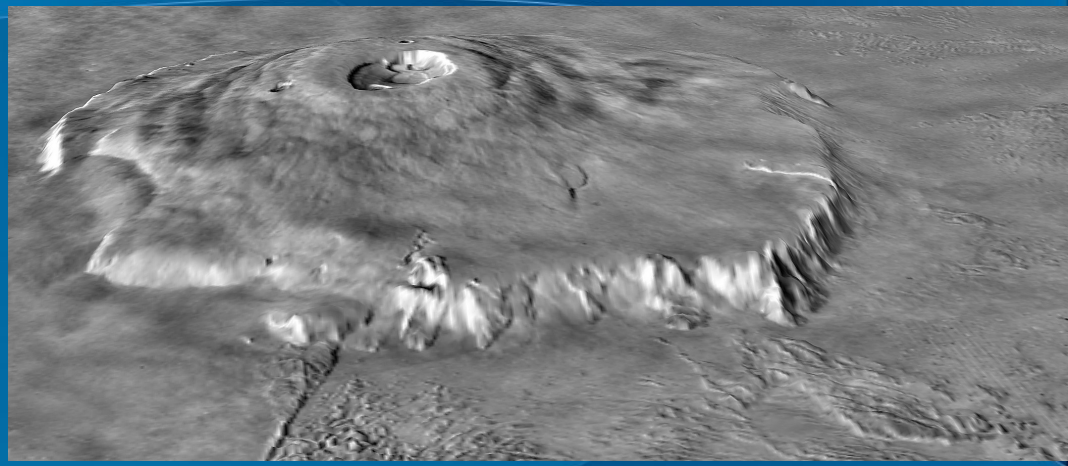
Distance au soleil : 149 M Km
Rayon : 6370 Km



Distance au soleil : 222 M Km
Rayon : 3402 Km

Terre vs Mars





Mount Olympus

Terre vs Mars

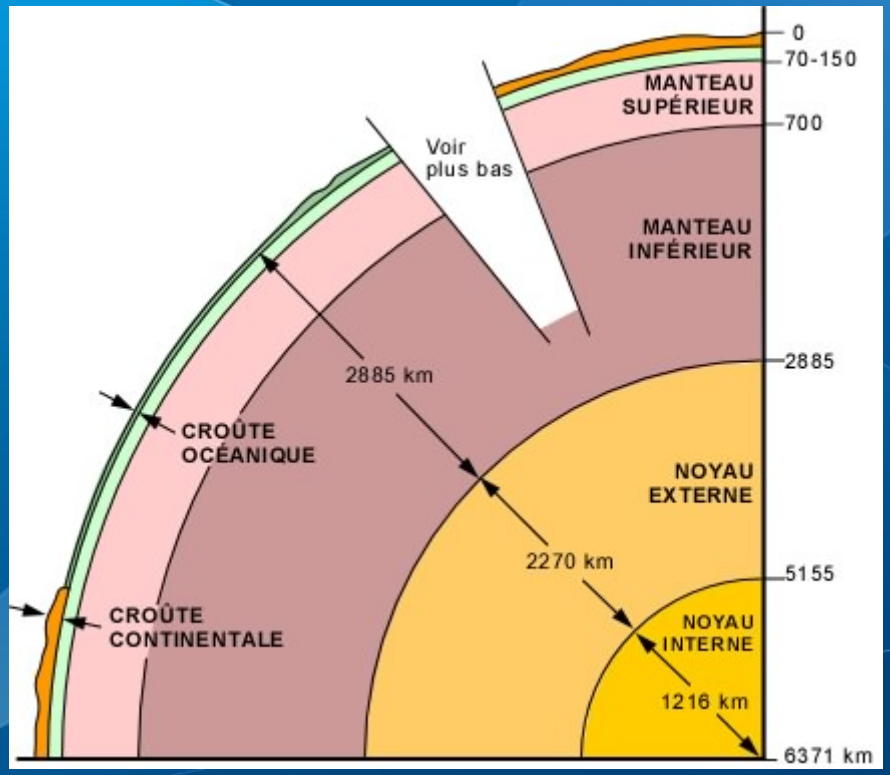
- Trace de tectonique sur les deux planètes

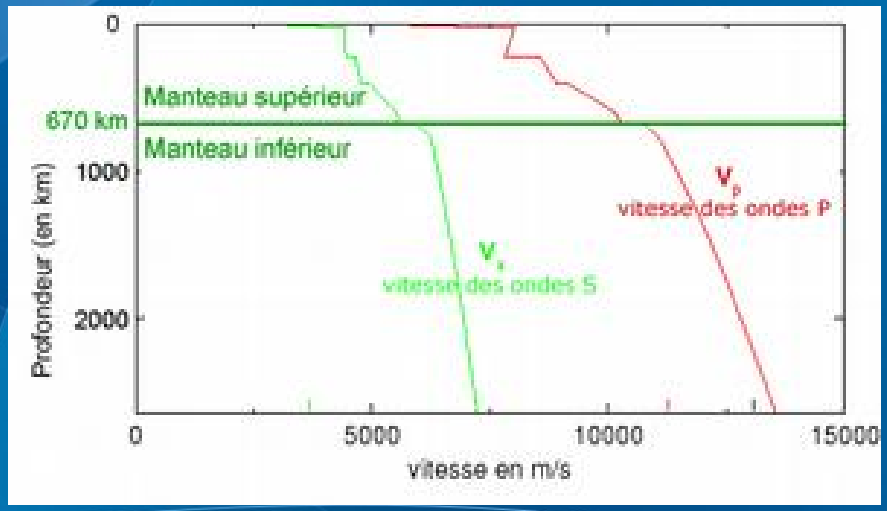
Quelles sont les principales différences entre la Terre et Mars

- Sur Terre la tectonique des plaques est toujours active => volcanisme, subduction, convection mantellique...
- Un champ magnétique nous protège => la vie est possible
- Mars a perdu son champ magnétique, son volcanisme, une grande partie de son atmosphère.

Rappel sur la structure interne de la Terre

Structure interne de la terre

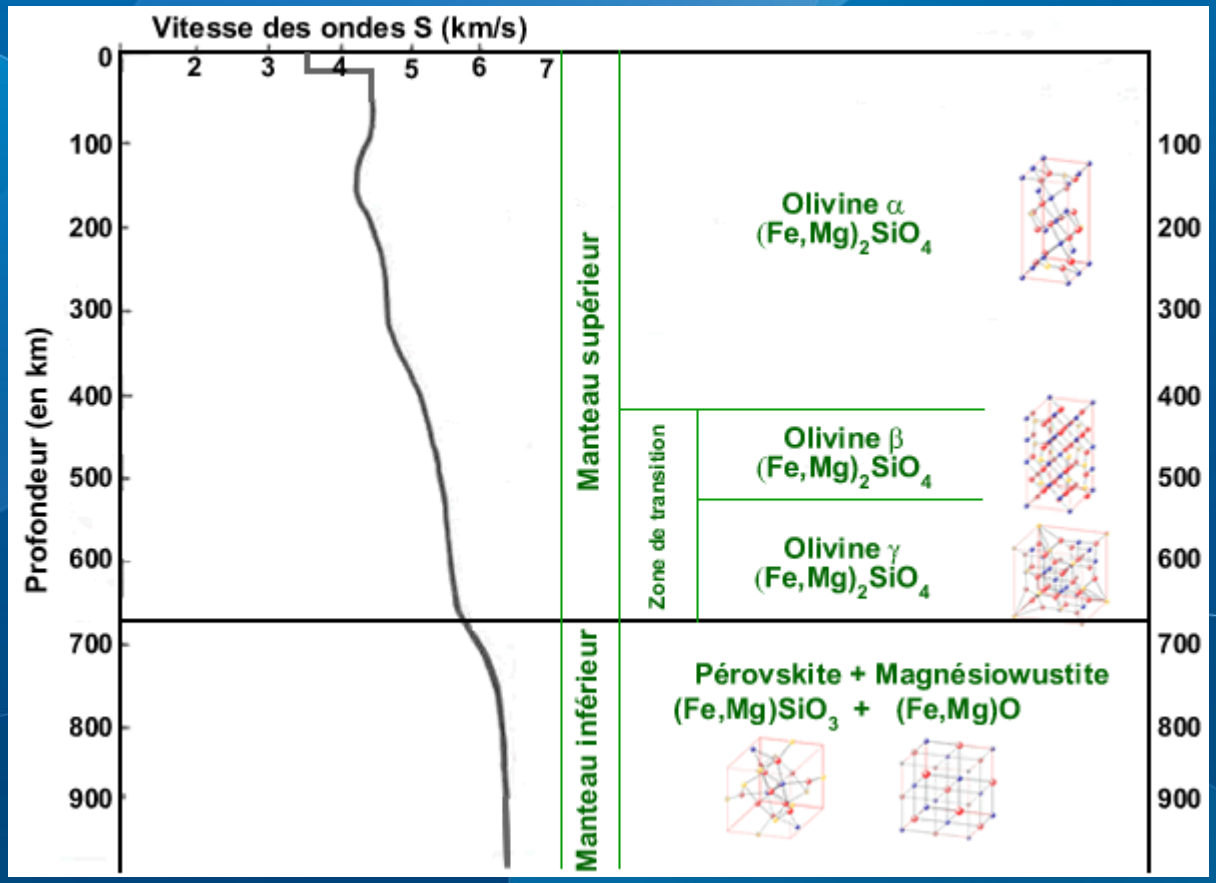




Les interfaces au sein de la Terre sont identifiées grace à la vitesse des ondes sismiques et sont interprétées via la physique des mineraux.

	Oceanic	Continental
Density	3000 kg m^{-3}	2700 kg m^{-3}
Thickness	5-10 km	20-80km
Composition	Basalt	Granite
Composition	Si02, Fe,Mg,Ca	Si02, K,Na,Al
Age	<0.1 billion years	> 1 billion years

Différence chimie manteau supérieur et inférieur



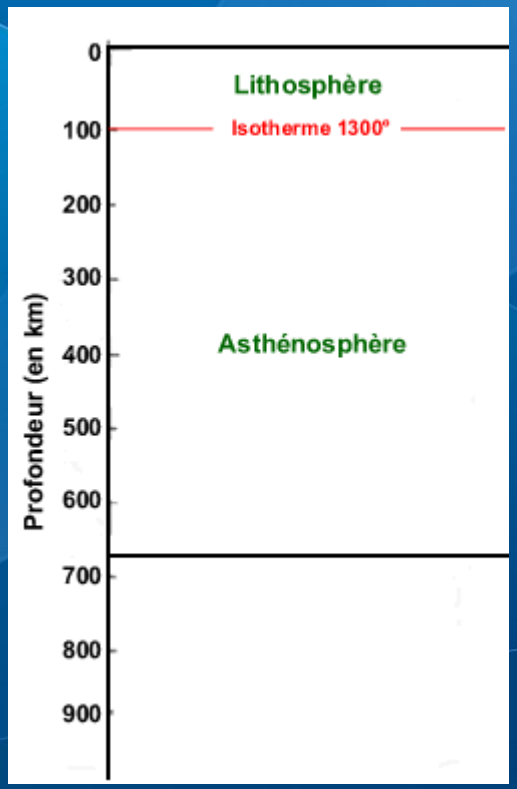
peridotite

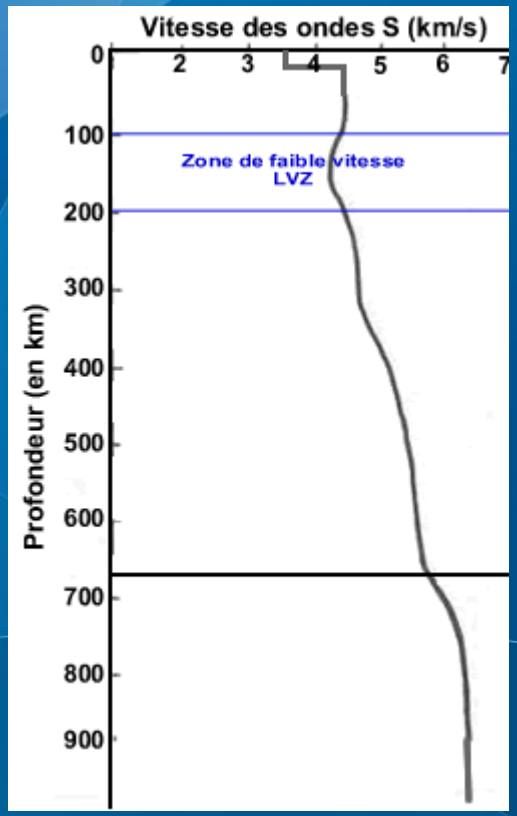
Les interfaces au sein de la Terre sont identifiées grace à la vitesse des ondes sismiques et sont interprétées via la physique des mineraux.

Résumé

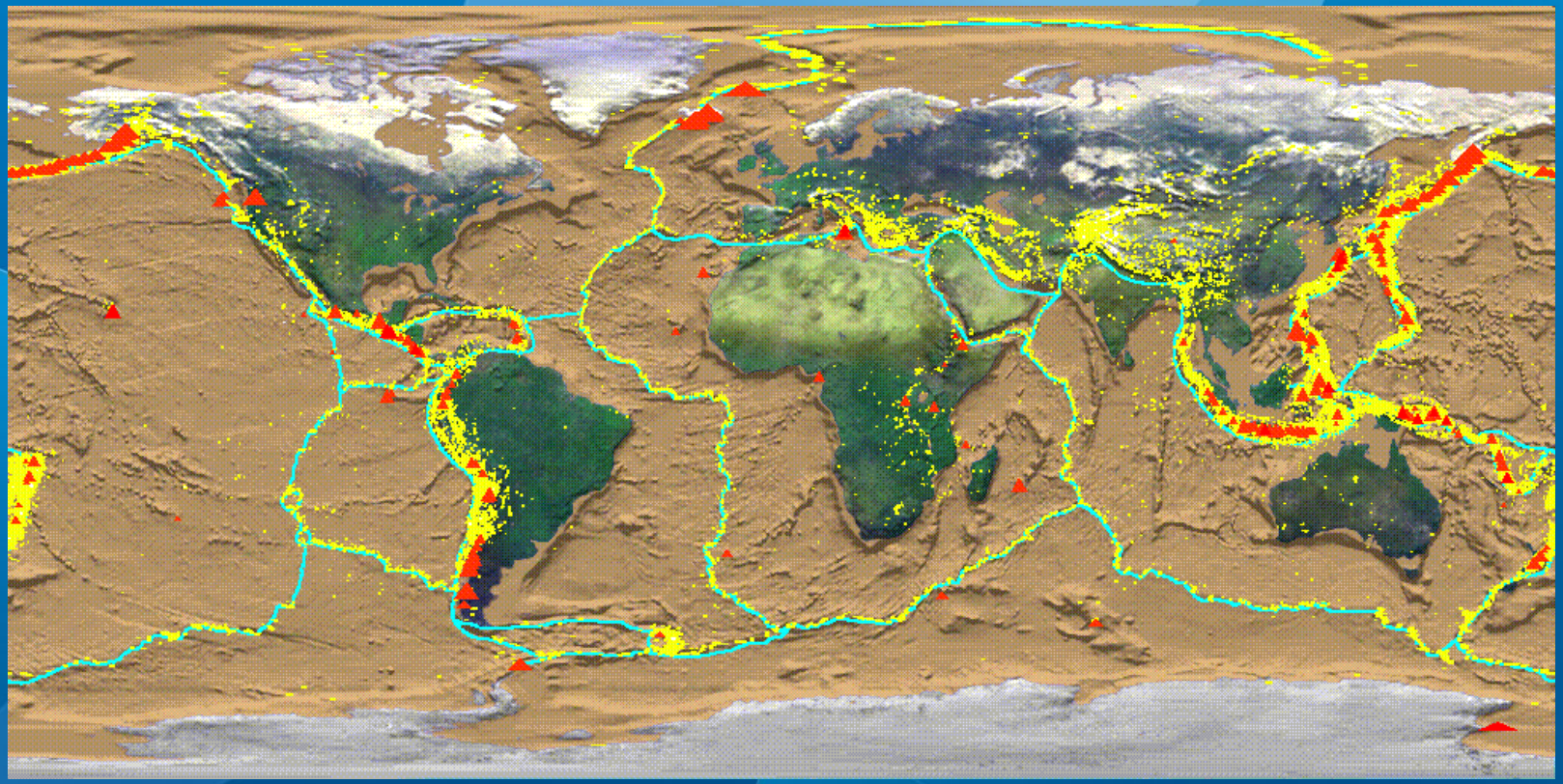
	Oceanique	Continental	Manteau	Noyau externe	Noyau Interne
Densité	3000 kg m^{-3}	2700 kg m^{-3}	3300 kg m^{-3}	10000 kg m^{-3}	13000 kg m^{-3}
épaisseur	5-10 km	20-80km	2885 km	2200 km	1400 km
Roche type	Basalt	Granite (variable)	Péridotite		
Composition	Si02, Mg,Fe, Ca	Si02, K,Na,Al	Si, O, Mg, Fe	90% Fe liquide + 12% S, 2% Ni	80% Fe, 20% Ni +O,C
Age	<0.1 Ma	> 1 Ma	> 1 Ma	-	> 1 billion years

Structure interne de la Terre en terme de couche thermique





- Lithospère : rigide, froid, cassant, pas de convection (ne se déforme pas).
- Asthenosphère : Plus chaud, la chaleur se diffuse par convection et conduction.



- La lithosphère est divisée en plaque de ~1000 à 10000 km.
- La plupart des plaques contiennent de la croute continentale et océanique

Quelques indications de la tectoniques des plaques

Meme type de fossile

Les formes coincident

Meme type de structure géologiques/roches

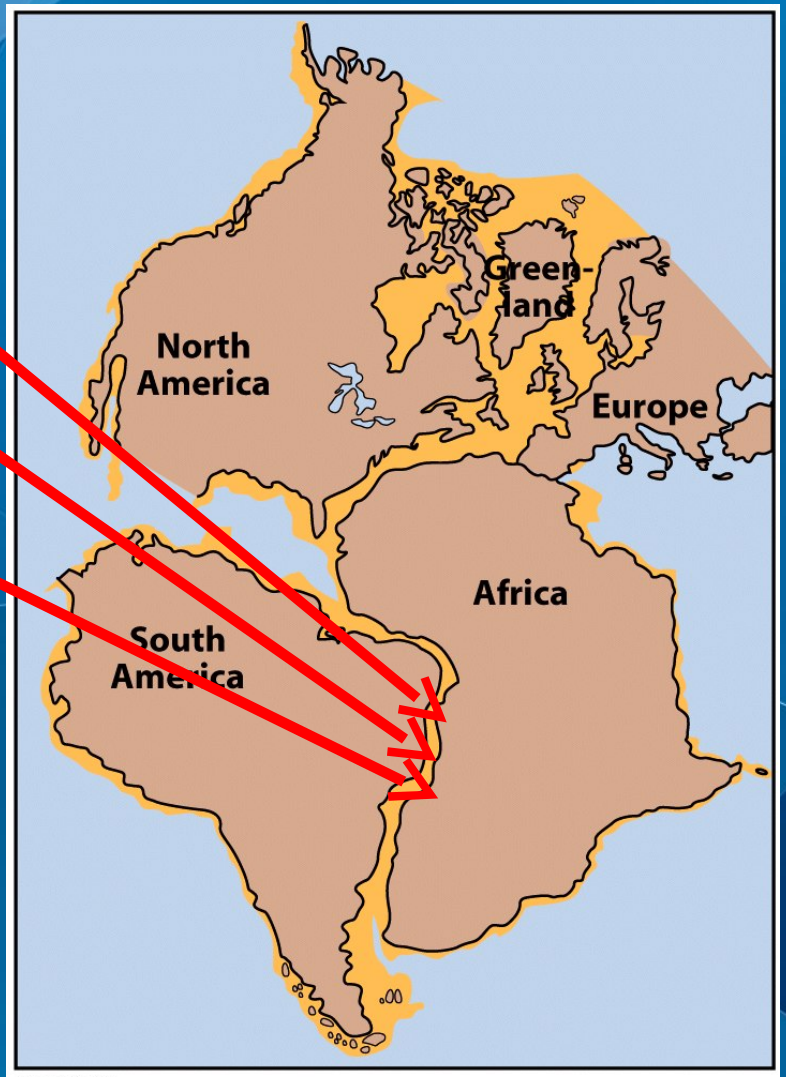
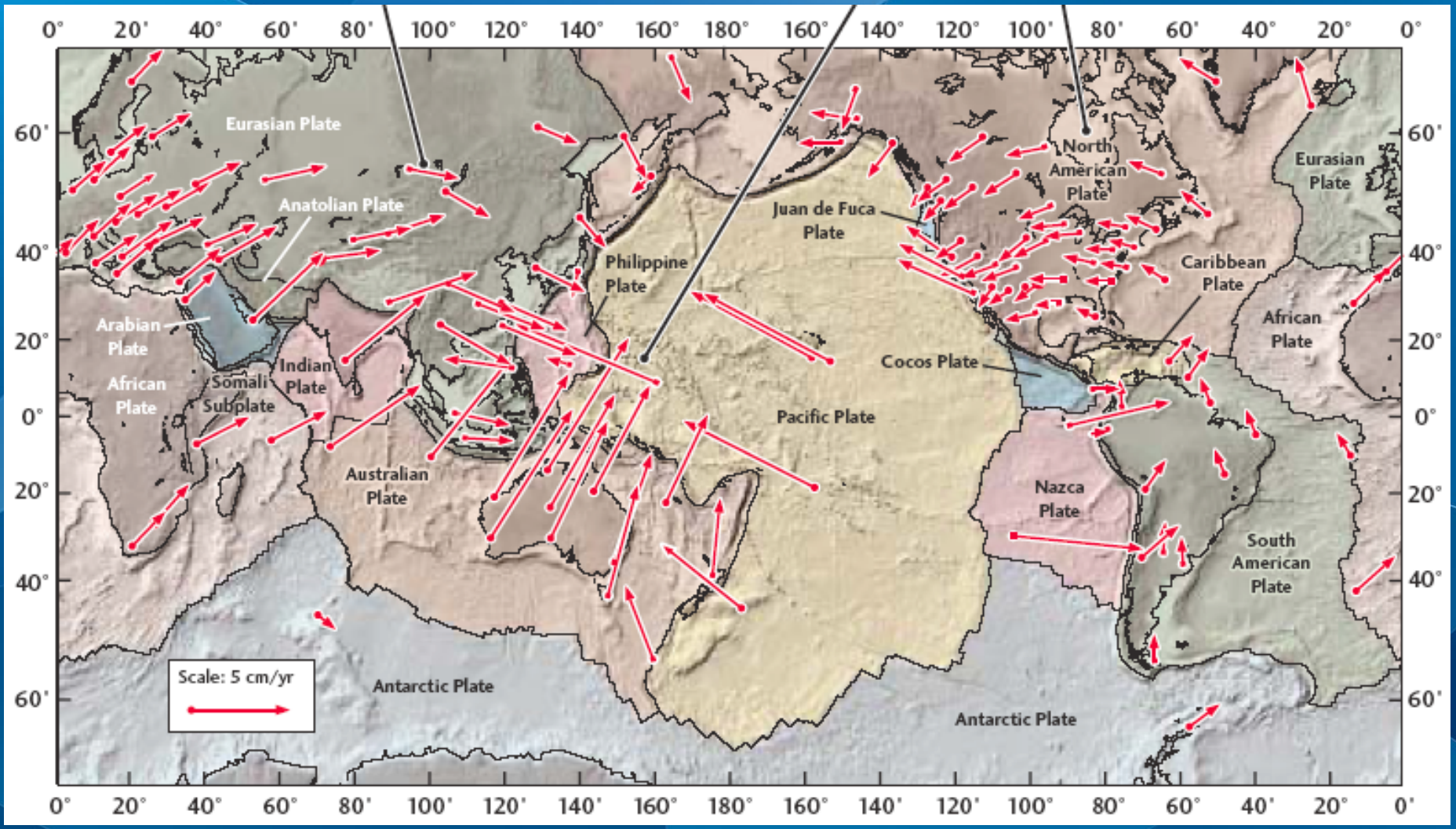
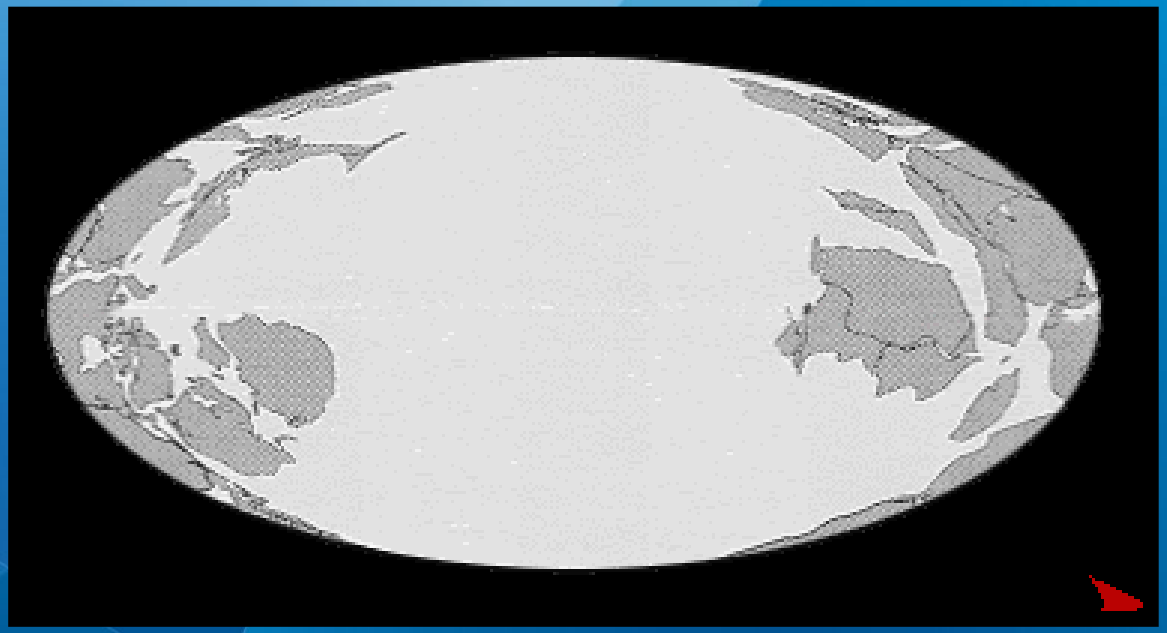


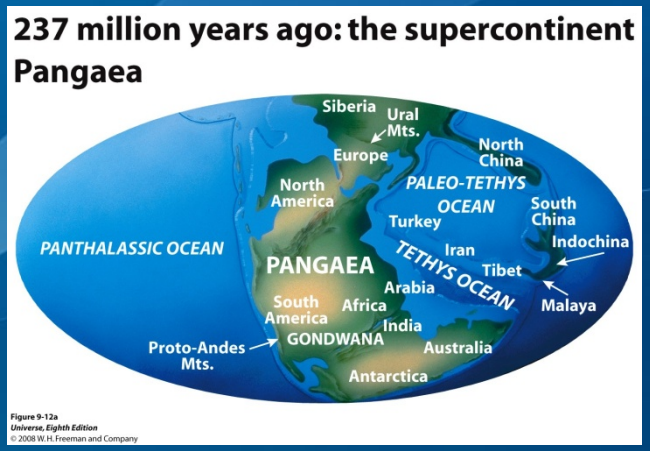
Figure 9-11
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

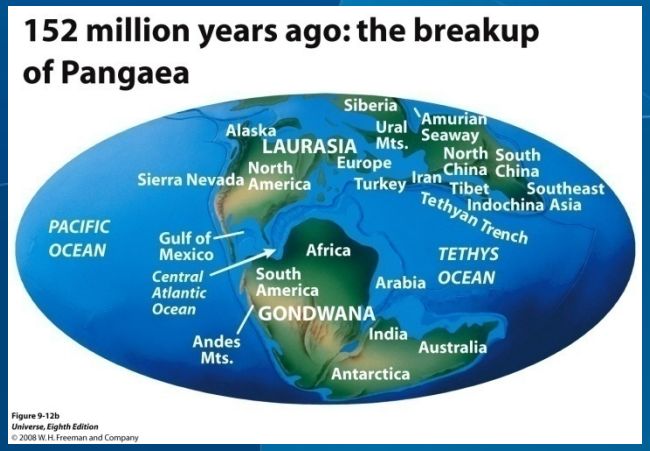
Le mouvement des plaques peut etre mesuré par GPS



- Reconstitution des mouvements des plaques (UC Berkeley)







Pourquoi les plaques se déplacent t-elles ?
Le manteau est-il également en mouvement?

Convection la théorie :

$$m\vec{a} = \vec{F}$$

Appliqué à une particule du manteau on obtient:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{dt} = \text{Archimède} + \text{Viscosité} + \text{Coriolis} + \text{FEM}$$

- Pour le manteau Coriolis et FEM = 0.
- Pour le noyau Coriolis est la force principale
- => le noyau et le manteau n'ont pas la meme dynamique

La poussée d'Archimède

- On imagine le fluide au repos :
- $\mathrm{F} = \mathrm{Poids} + \mathrm{force\ de\ pression} = \mathrm{ma} = 0$
- Pour une particule fluide on a donc:
- $F_z = \frac{dP}{dz} - \rho_0 g = 0$
- Remplaçons la particule par une particule de densité un peu différente p1. La force qu'elle subie s'écrit donc :

$$Fz = \frac{dP}{dz} - \rho_1 g = (\rho_0 - \rho_1) g$$

Que se passe t-il si on augmente la température d'une particule fluide ?

- La particule fluide va se dilater, si bien que sa masse volumique diminue:
- $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_0 = \alpha\Delta T$
- La poussée d'Archimède qu'elle subie est donc:
- $F_z = \alpha g \Delta T$
- La particule a donc envie de monter

La bataille entre les forces de viscosité et Archimède

- La force d'archimède veut faire monter la particule
- La viscosité (frottement) s'oppose au mouvement
- De plus la particule perd progressivement sa chaleur en la diffusant à ses voisines

Le nombre de Rayleigh

$$Ra = \frac{\alpha g \Delta T d^3}{\nu \kappa} = \frac{\text{Force favorisant la convection}}{\text{Force empêchant la convection}}$$

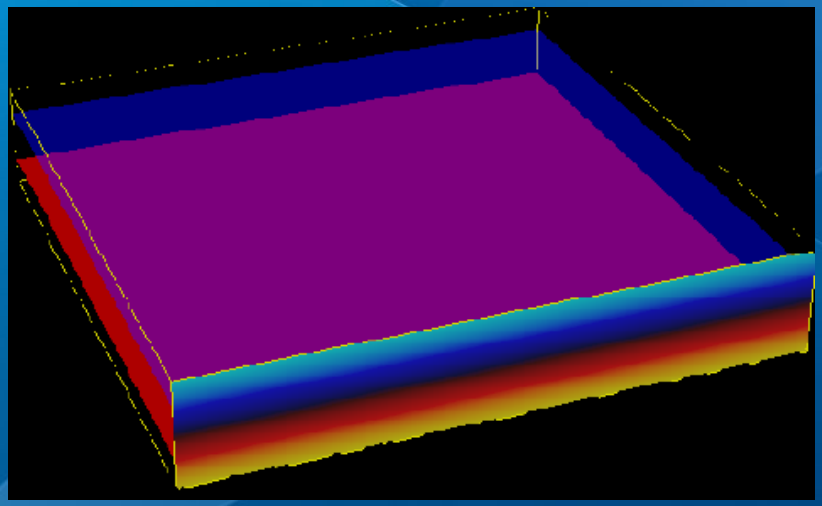
α=Dilatation thermique, g=gravité, ν= viscosité

ΔT est la variation de température sur une distance d

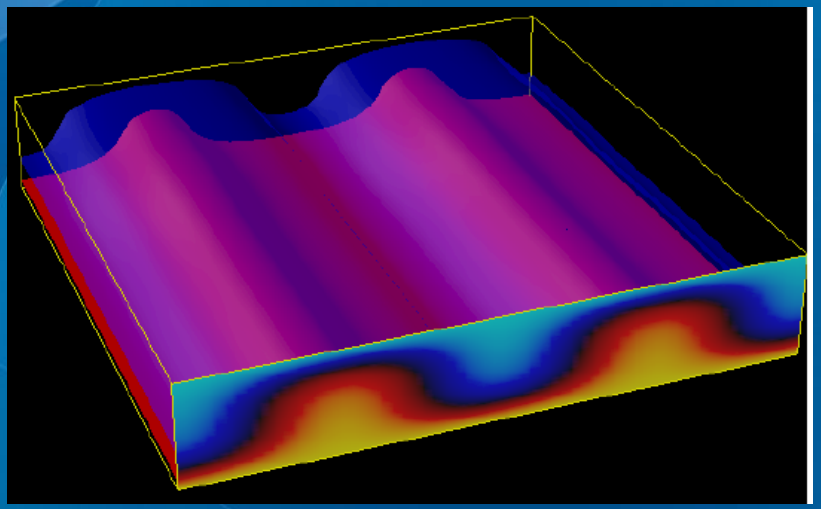
ν est la viscosité etκ est la diffusivité thermique

- Le nombre de Rayleigh est sans dimension

Influence du nombre de Rayleigh sur la convection : ex numérique

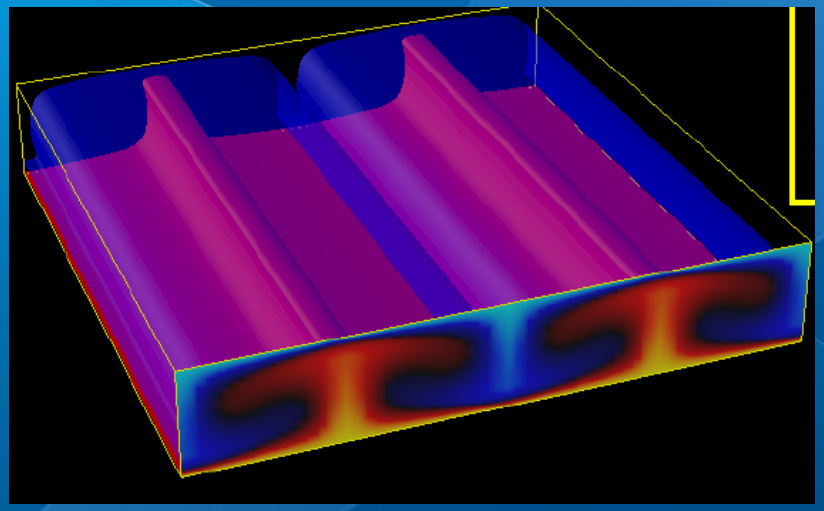


Rayleigh = 1000 : Pas de convection

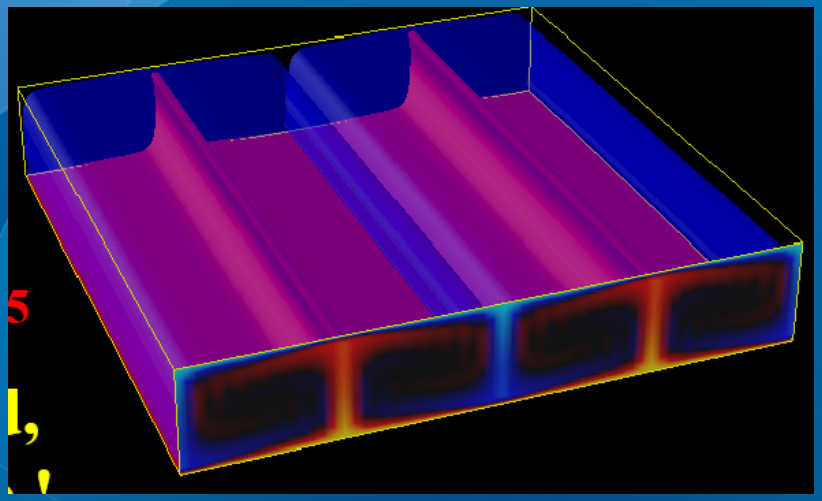


Rayleigh = 2000 : Début convection

Si Rayleigh > 2000, le système convecte !!

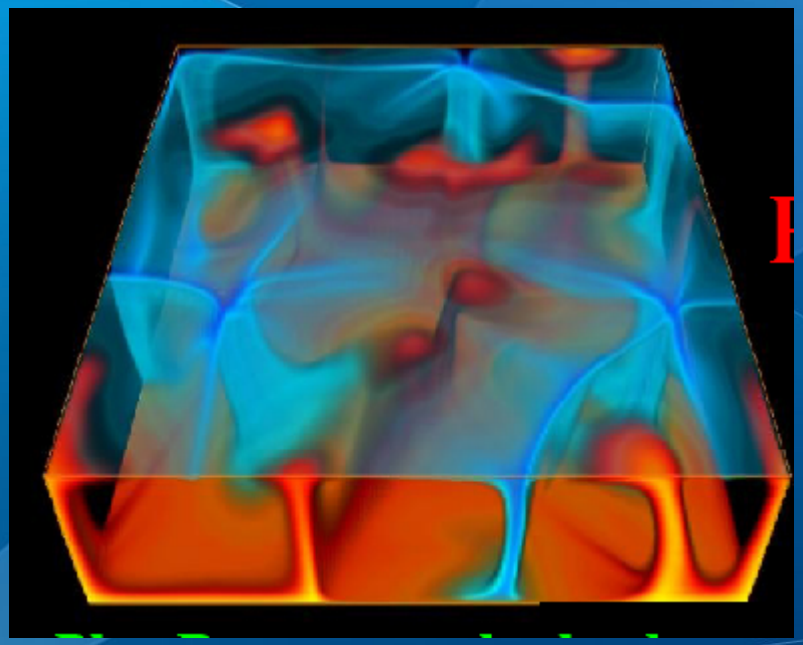


Ra = 10^4

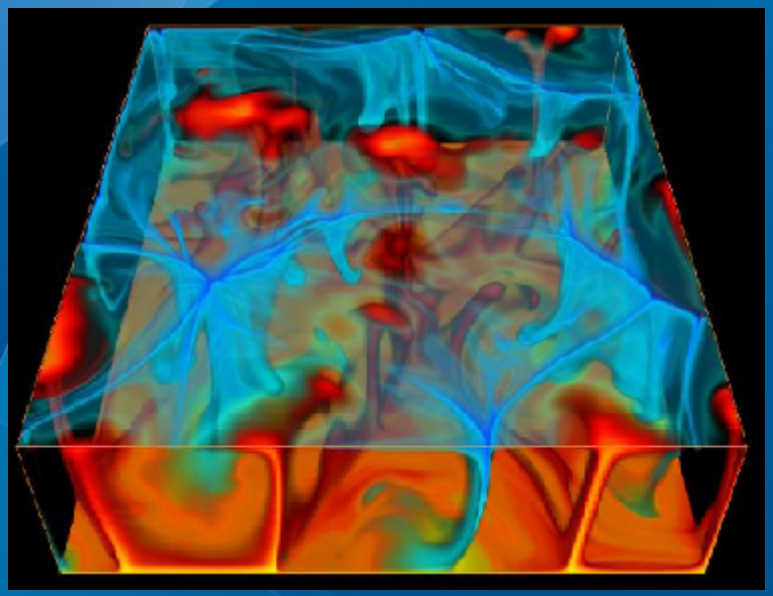


Ra= 10^5

À partir de 10^4 : la convection devient plus vigoureuse et s'organise en panache montant et descendant



Ra=10^6



Ra=10^7

Au delà de 10^6 la convection devient chaotique

Que vaut le nombre de Rayleigh pour le manteau ?

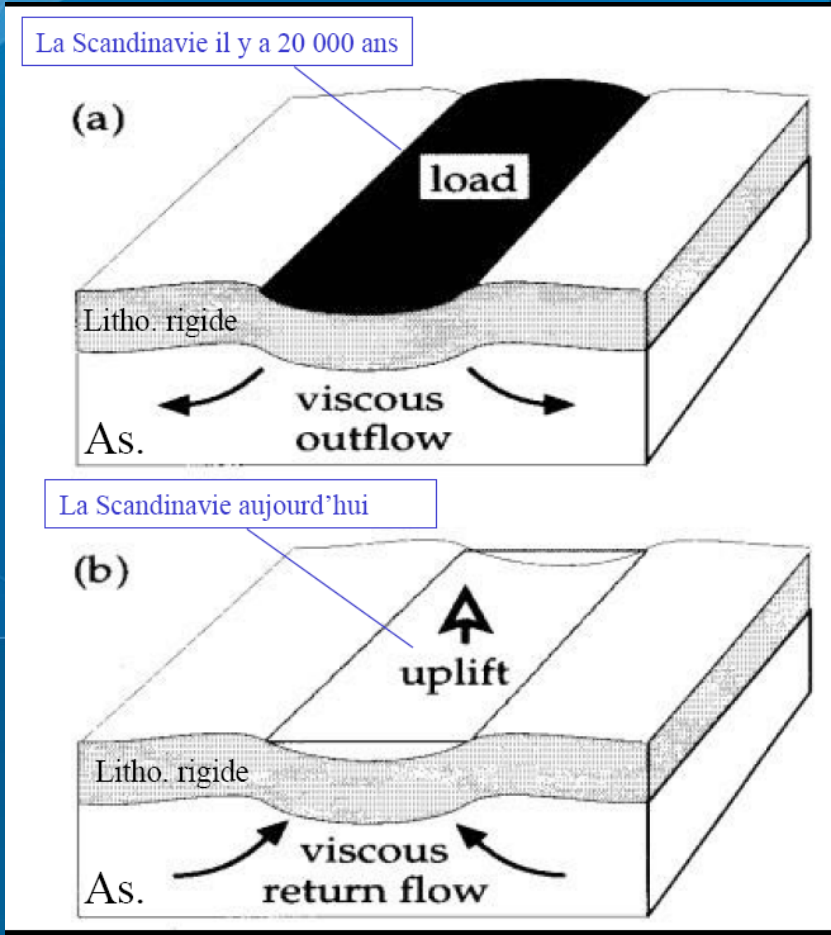
Que vaut le nombre de Rayleigh pour le manteau terrestre ?

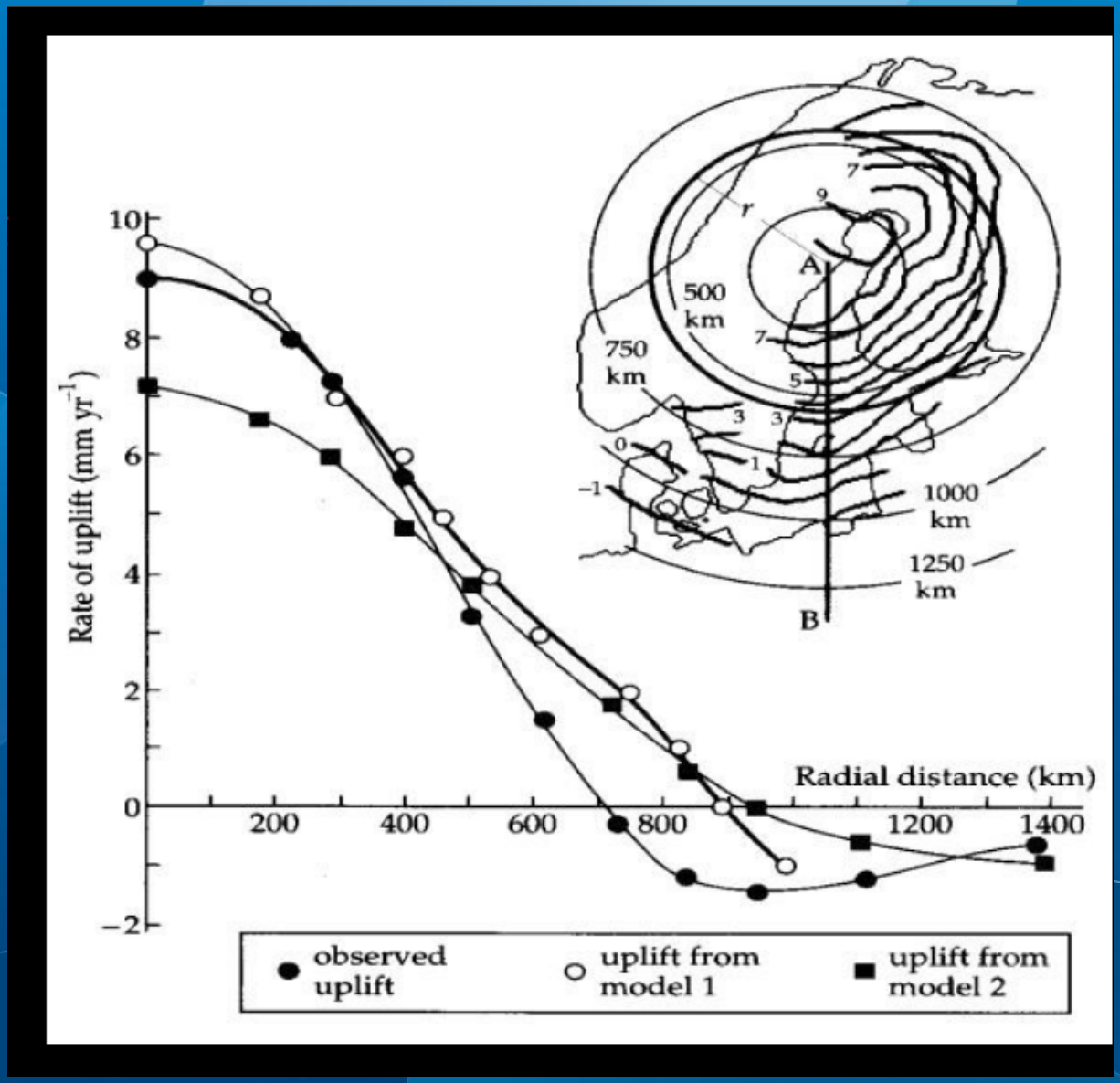
α et κ peuvent etre déterminés par des expériences en laboratoires sur des échantillons de manteau

$$\alpha = 3.10^{-5} K^{-1} \quad \kappa = 10^{-6} m^2.s^{-1}$$

Que vaut Ra ? Comment évaluer la viscosité du manteau ?

- Expérimentalement il est difficile de mesurer la viscosité en laboratoire
- On se sert du rebond post glaciaire.





- La vitesse à laquelle l'asténosphère remonte nous indique que la viscosité du manteau est de ~10^18 a 10^20 Pa.s

LA VISCOSiTÉ DANS LA TERRE

La viscosité mesure la dureté, la "déformabilité" : plus un corps est visqueux, plus il est "dur" et "rigide", moins il est déformable.
Un granite est beaucoup plus visqueux que de la confiture.

Unité de viscosité : le Pascal . seconde (Pa.s), avec 1 Pa.s = 10 poises (ancienne unité)

Attention, il existe aussi une « viscosité cinématique », en $m^2.s^{-1}$, de valeur 10^3 ρ fois plus faible)

Quelques valeur :

Eau à 20°C : 10^{-3} Pa.s ..... (= 0,003)

Huile d'olive à 20°C : 1 Pa.s

Basalte à 1100 °C : 400 Pa.s

Glace à 0°C : 10^{11} Pa.s ..... (= 100 000 000 000)

Glace à -20°C : 10^{13} Pa.s ..... (= 10 000 000 000 000)

Roches froides (granite ..) : 10^{23} Pa.s (= 100 000 000 000 000 000 000 000)

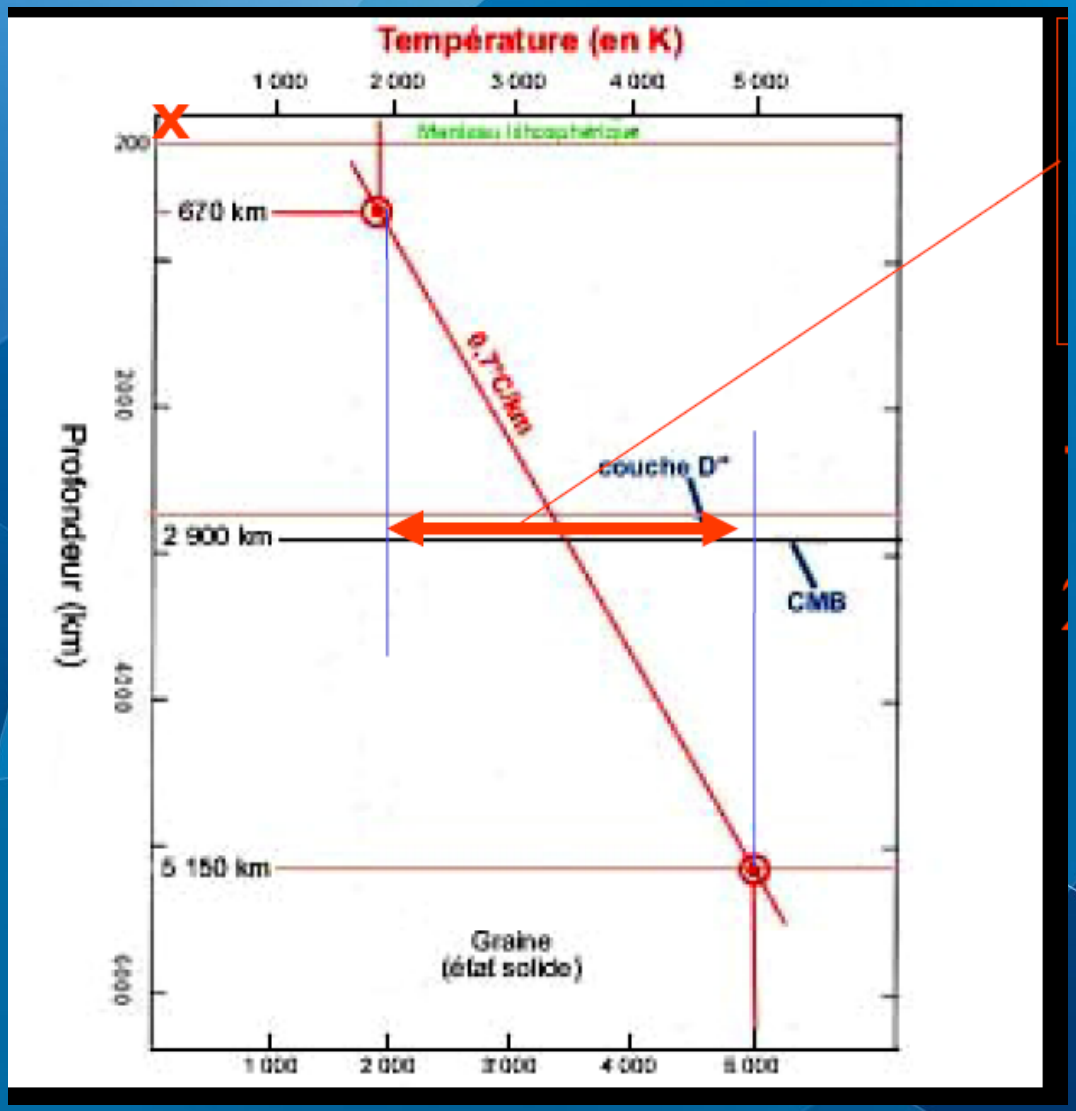
Lithosphère : $10^{23à24}$ Pa.s ..... (= 100 000 000 000 000 000 000 000)

Asthénosphère : $10^{19à20}$ Pa.s .....(= 100 000 000 000 000 000 000)

Noyau externe : : 10^{-2} Pa.s ..... (= 0,01)

Que vaut Ra ? Evaluons delta T

- A l'interface noyau interne/externe, la température est telle que le fer cristallise : ~5000 C.
- T = 2000 K à 670 Km (transition olivine ->perovskite)
- => En supposant un gradiant adiabatique (ne dépendant que de P) en on déduit que la T en bas du manteau est 3000< T < 5000



Conclusion

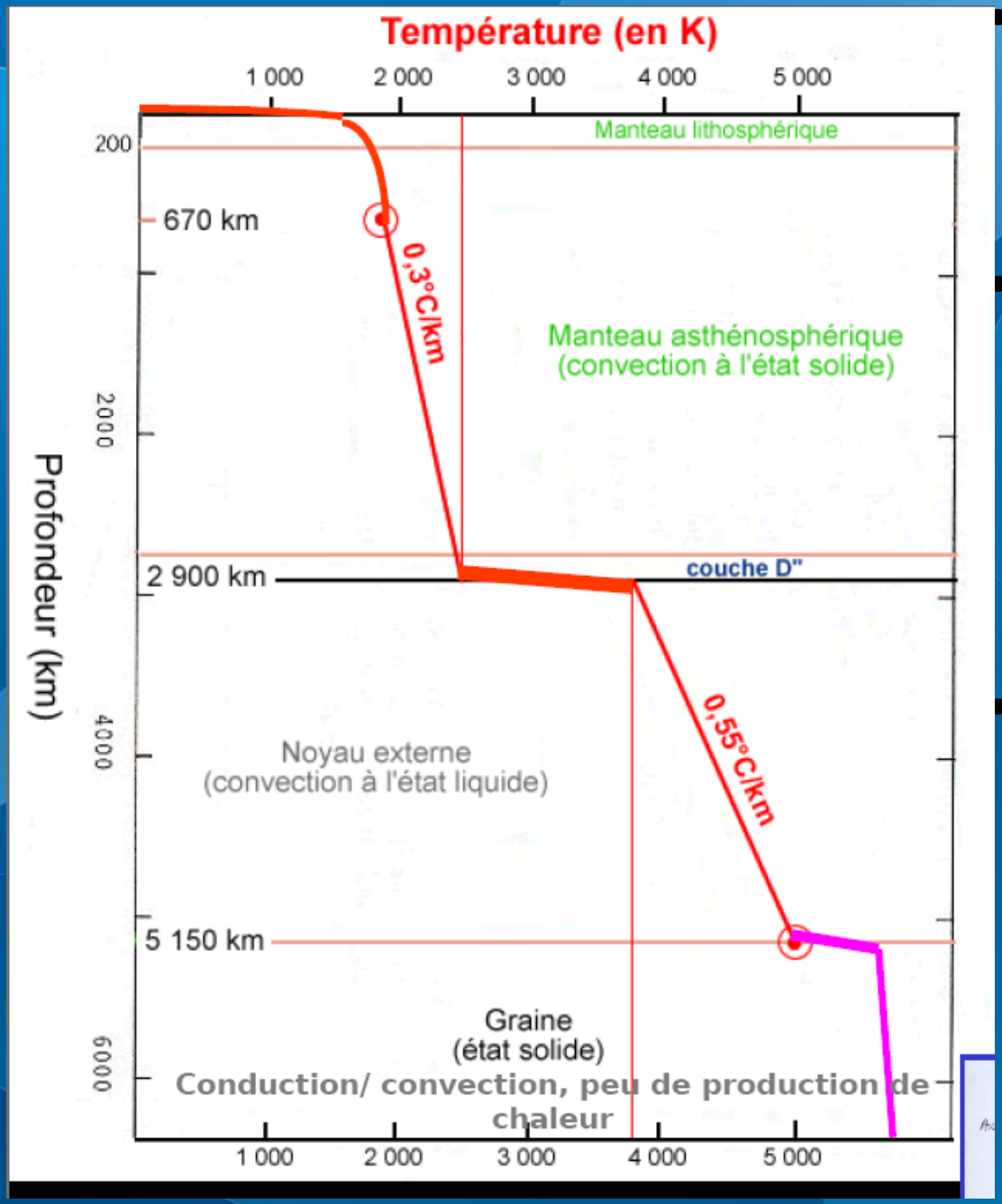
- 10^6 < Ra < 10^8 : Ca convecte !
- Il y'a donc des mouvements dans le manteau
- => En supposant que toute la chaleur est transporté par convection on va pouvoir déduire le profil de température

Définition du gradient adiabatique

- Si on suppose que les particules du manteau n'échangent pas de chaleur (ie pas de conduction que de la convection)
- => Les variations de température d'une particule qui convecte ne dépendent plus que des changements de pression
- On parle alors de variation ou de gradient thermique adiabatique.

$$\frac{\delta T}{\delta z} = \frac{\alpha g T}{C_p} = \frac{3.10^{-5} * 9.81 * 1573K}{10^3} = 4.10^{-4} K.m^{-1} = 0.4 K.km^{-1}$$

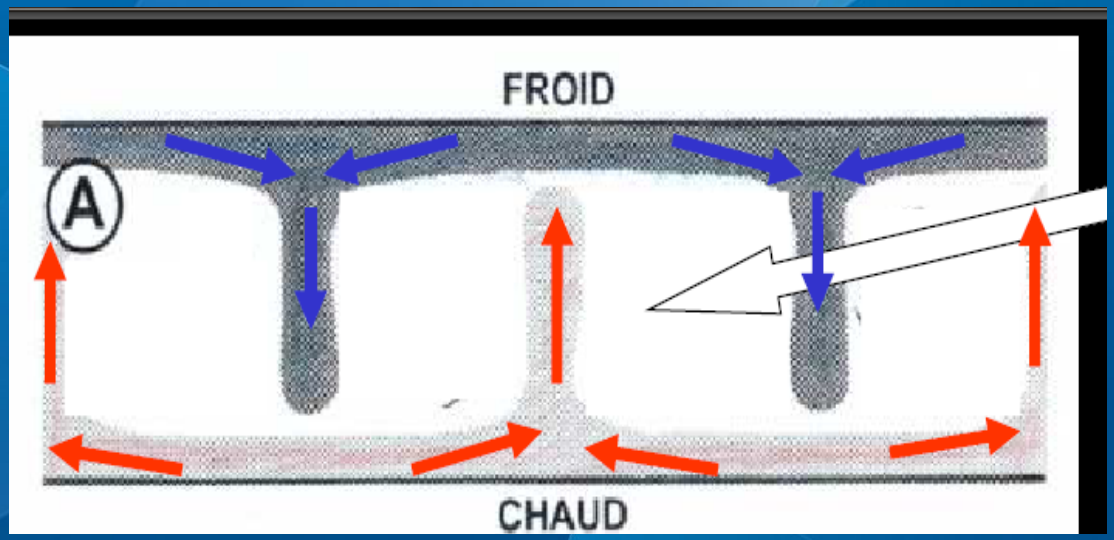
Profil de température au sein de la Terres



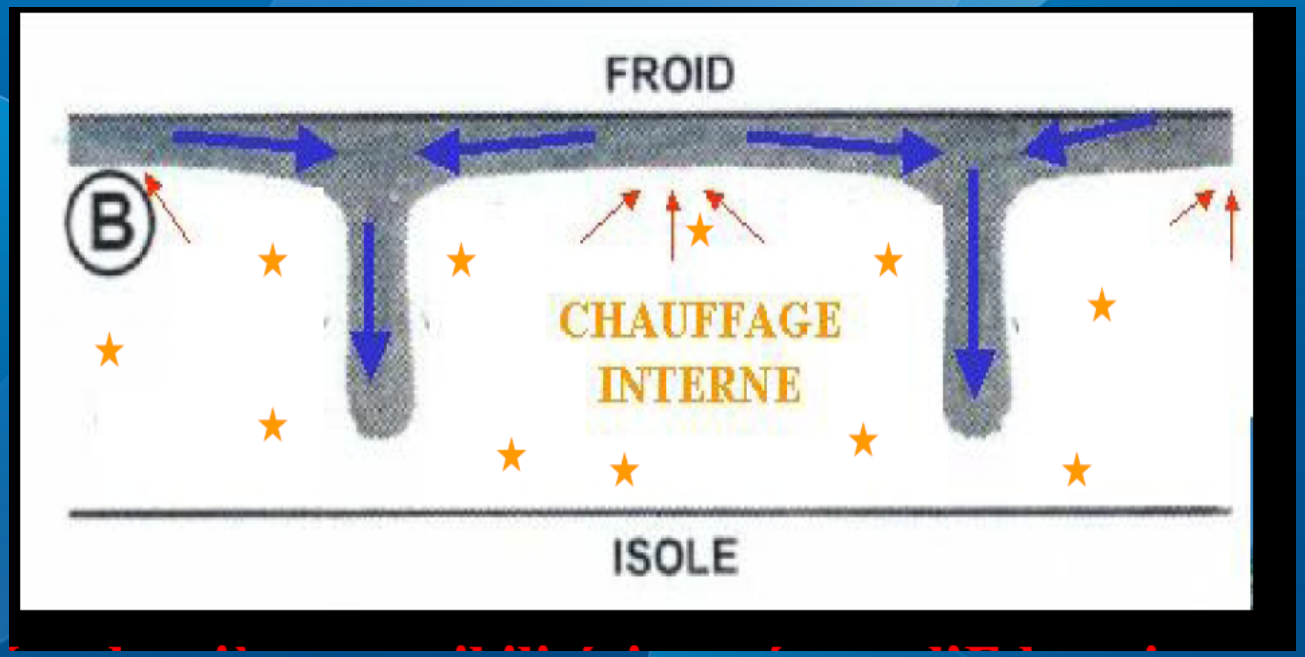
- On peut facilement calculer comment évolue la pression avec la profondeur.
- On connait la température à différentes profondeurs: surface, 440 Km, 660 Km, surface de la graine, grace à la physique des roches.
- Sachant que la chaleur n'est transporté que par convection, on peut calculer comment la température évolue entre ces points ('gradient adiabatique').

D'ou provient la chaleur permettant au manteau de convecter ?

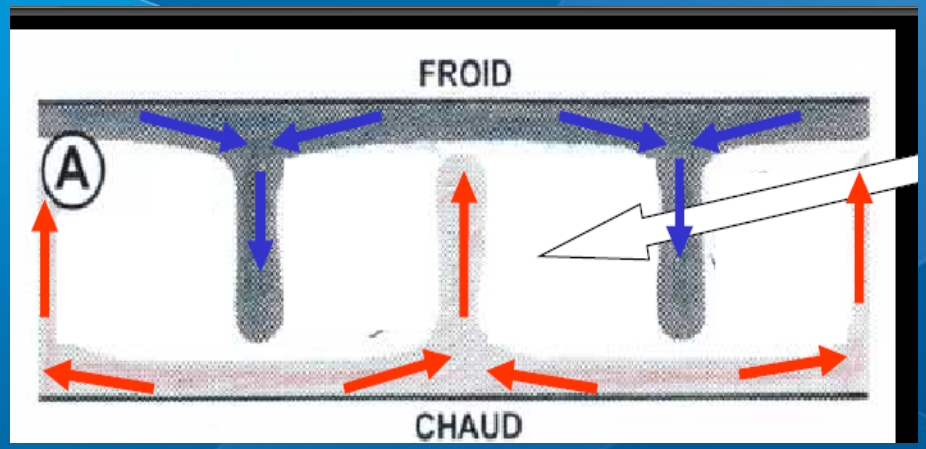
D'ou provient l'énergie permettant la convection ?

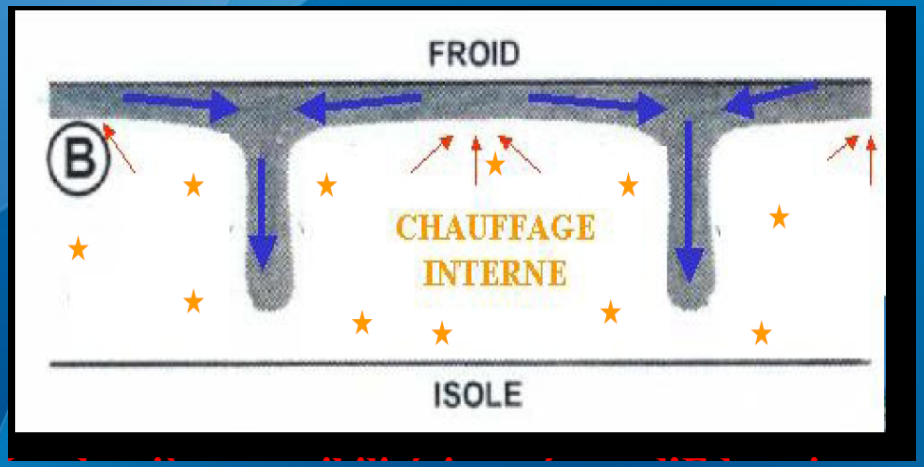


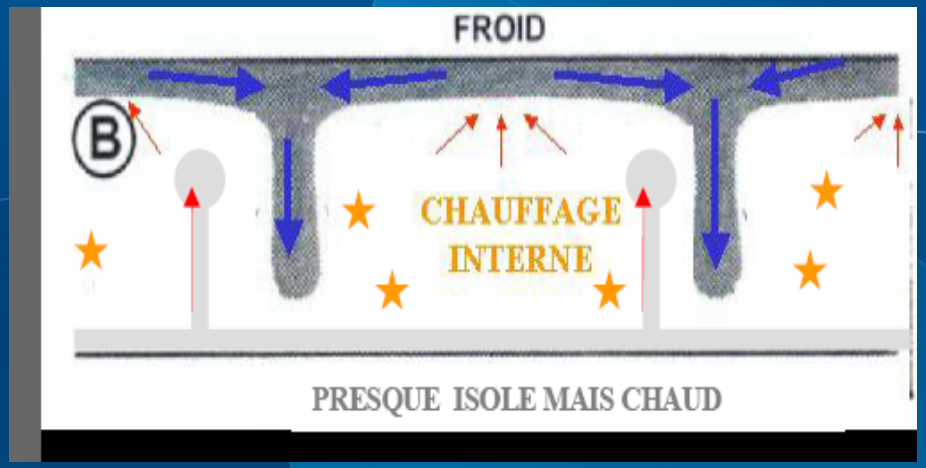
- Dans ce cas : le manteau serait :
  - chauffé par en dessous (noyau) = > création de panache mantellique
  - Refroidi au dessus (surface) => création zone subduction



- Dans ce cas la chaleur est générée partout dans le manteau. La convection est dominée par des panaches froids descendants.

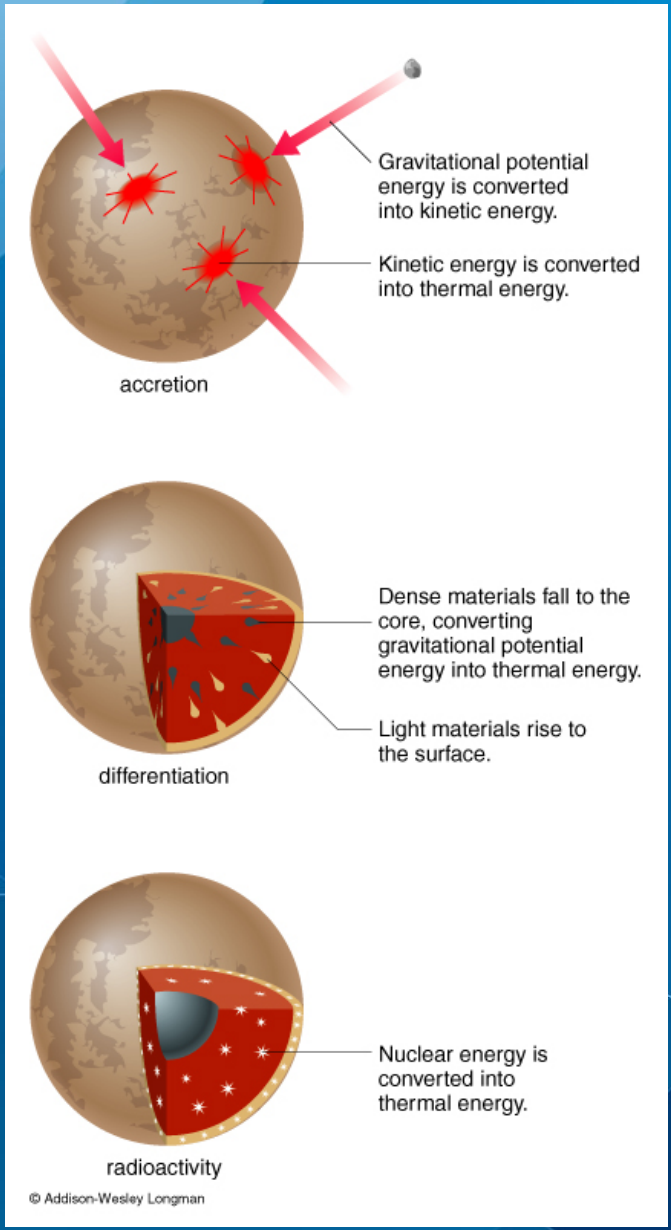

FROID
A
CHAUD


FROID
B
CHAUFFAGE
INTERNE
ISOLE


FROID
B
CHAUFFAGE
INTERNE
PRESQUE ISOLE MAIS CHAUD

D'ou vient l'énergie permettant la convection ?

- La chaleur provient de :
  - l'accrétion
  - l'energie de differenciation
  - la désintégration d'éléments radioactifs (U-Th-Potassium)



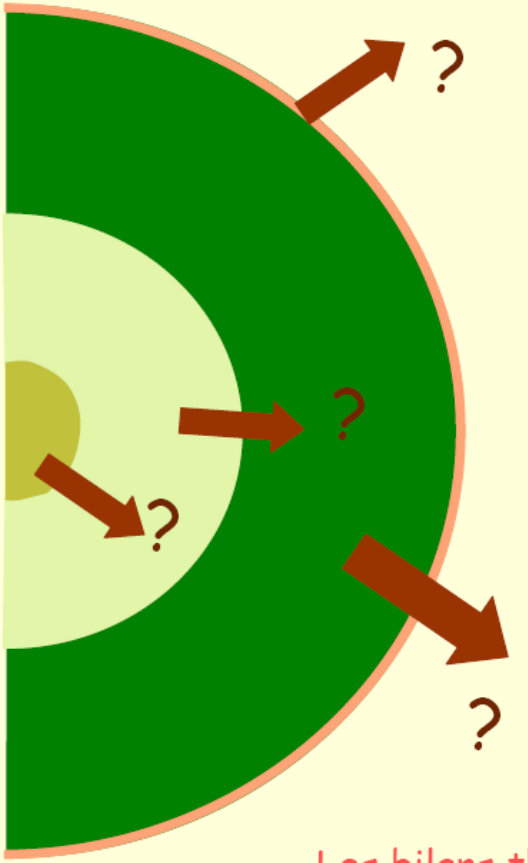
Chaleur interne	Différenciation - mouvement 7,3 TW	Désintégration Radioactive 38 TW	Total 42,3 TW	Flux moyen 70 mW/m²

Ou se trouvent les éléments radioactifs ?

chaleur libérée pour les différentes enveloppes terrestres (en 10^{12} W).

Eléments	Croûte Continentale	Croûte océanique	Manteau	Noyau
Total UTHK (W.kg-1)	$3,9.10^{-10}$	$1,7 .10^{-10}$	$0,053 .10^{-10}$	$7,0.10^{-15}$
Masse (kg)	$1,38.10^{22}$	$6,90.10^{21}$	$3,70.10^{24}$	$2,32.10^{24}$
Chaleur libérée	5,11	1,16	19,1	0,016

Bilan de l'énergie produite par la Terre



42 TW ???

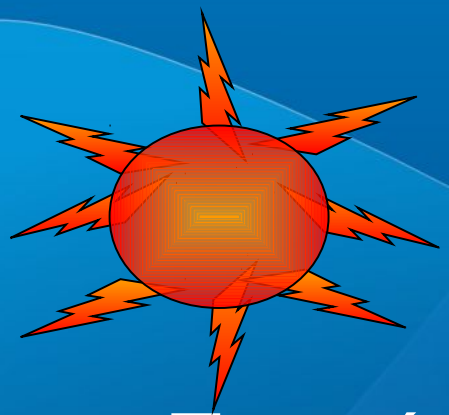
1. La désintégration des éléments radioactifs (^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K) : 35 TW ~50-80%
2. La chaleur initiale, stockage d'énergie lors de la formation de la planète : «refroidissement séculaire» : 3,8 TW ~ 10% (<20 %)
3. La différentiation des différentes enveloppes comme la croûte, le manteau, le noyau et la graine qui libèrent de la chaleur latente : 3,5 TW ~ 10%

Les bilans thermiques varient selon les auteurs…

D'ou viennent les éléments radioactifs?

Que se passe t-il dans la lithosphère?

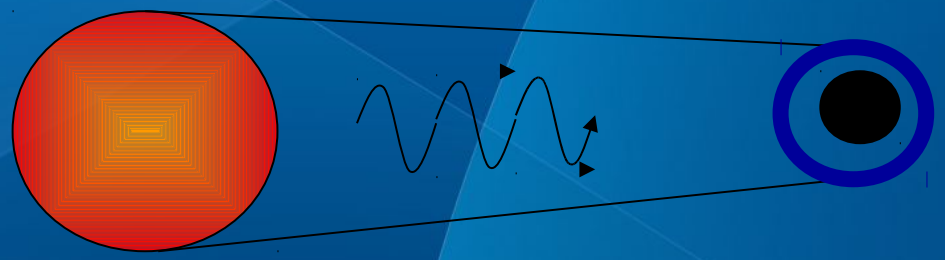
Comment transmettre de la chaleur ?
I- Par rayonnement



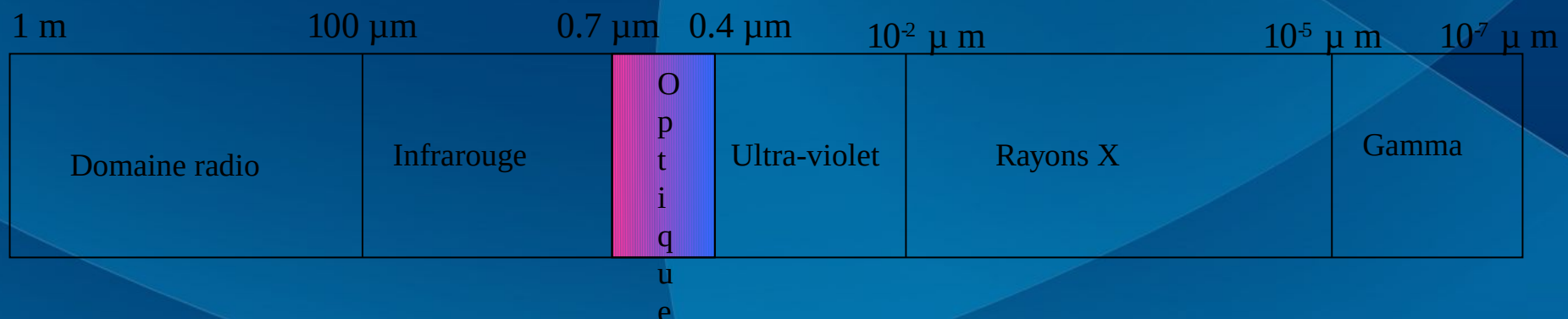
- Température = energie cinétique moyenne des particules d'un corps.
- Les particules d'un corps vibrent et émettent de la lumière (onde éléctromagnétique et photons)
- L'energie émise sous forme d'un rayonnement est $\phi = \sigma T^4 S$

Energie reçue du soleil :

- La Terre reçoit 340 W.m-2 du soleil au sommet de l'atmosphère



- Cette énergie est transmise via la lumière émise (rayonnement) essentiellement entre 0.1 et 10 um



Comment transmettre de la chaleur ?
II- Conduction

- Les particules les plus chaudes transmettent de la chaleur à leur voisine
- La chaleur se transmet ainsi de proche en proche par contact. Il n'y a pas de déplacement de matière.
- La conductivité thermique k d'un matériau indique à quelle vitesse il peut transmettre la chaleur par conduction

Conduction - II

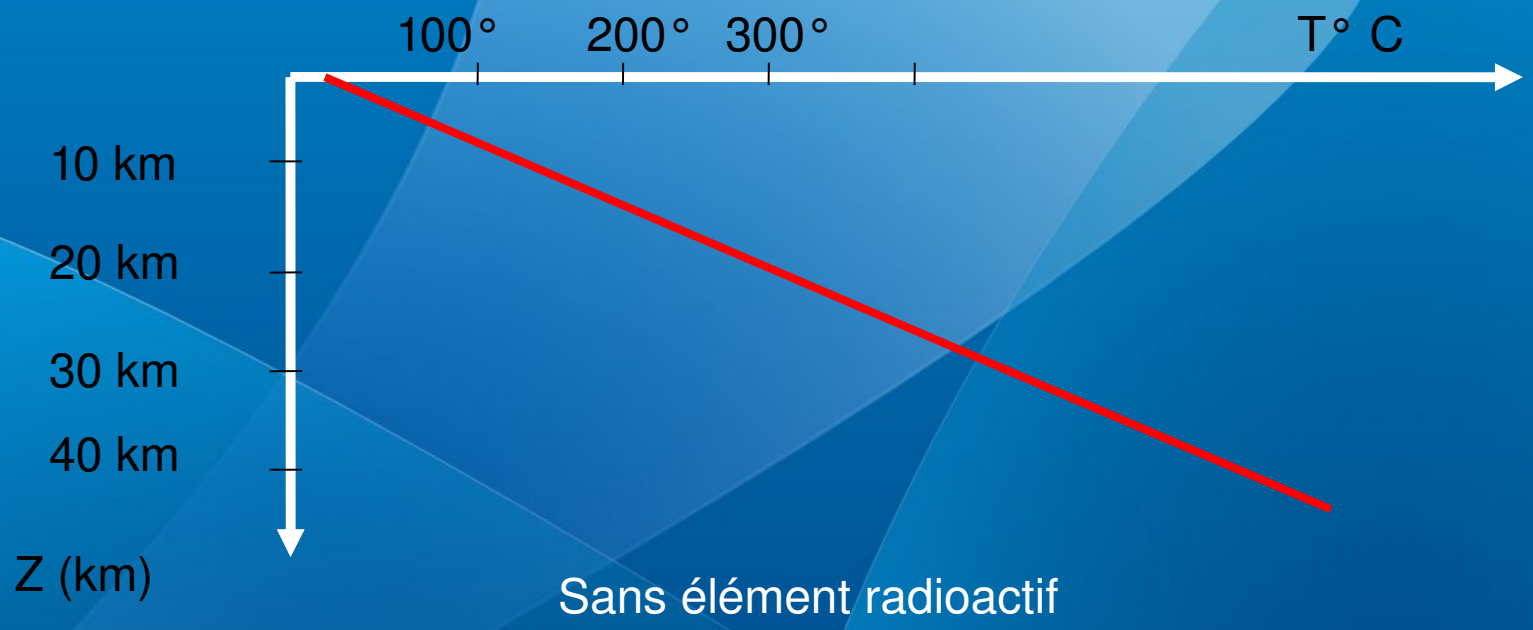
- D'après la loi de Fourier (on suppose qu'on ne produit pas de chaleur dans le milieu. On transmet juste de la chaleur par conduction):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{-A}{k}$$

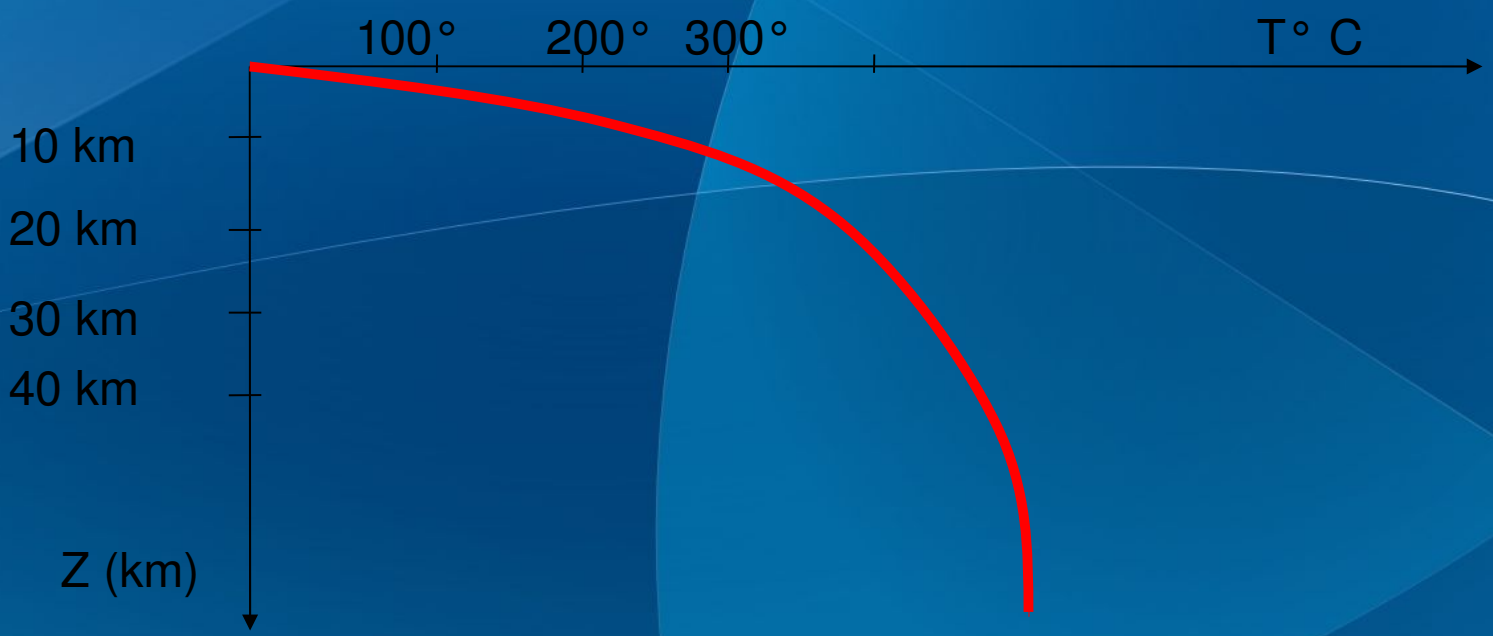
$$=> T(z) = \frac{-A}{2k} z^2 + \frac{q_0}{k} z + T0$$

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

- T=température, k=conduction thermique, q= flux chaleur [W.m-2], A= production de chaleur par les éléments radioactifs



Sans élément radioactif



Avec élément radioactif

Conduction III – Déterminer la température au sein de la lithosphère

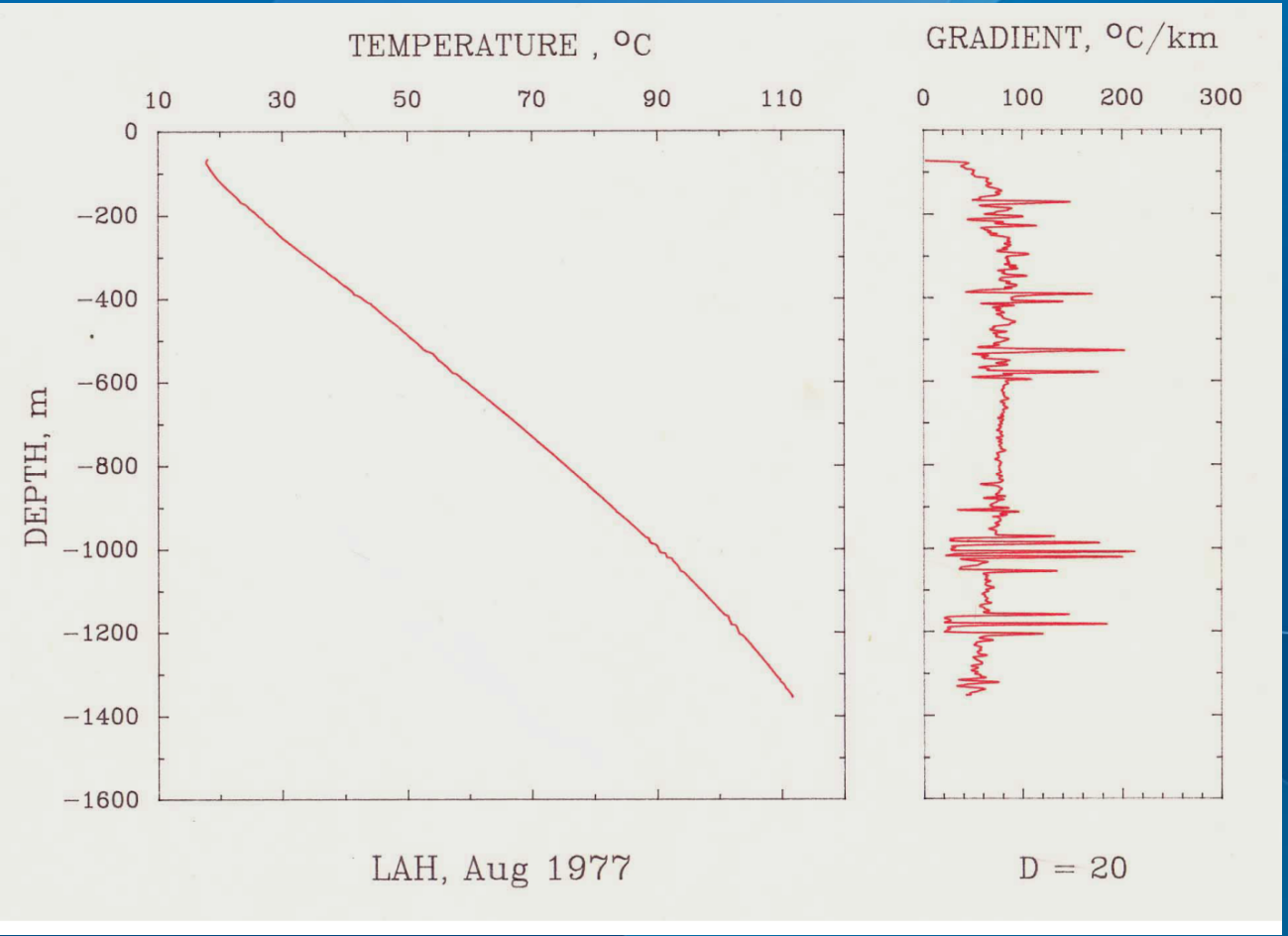
Matière	Conductivité thermique ($Wm^{-1}K^{-1}$)
Eau	6
Argent	418
Verre	1.2
Bois	0.1
Granite	2,7
Basalte	2.2
Calcaire	2.5
péridotite	3.1

Le profil de température dépend du flux de chaleur.
Comment le mesurer ?

$$=> T1 = \frac{-q}{k} z + T0$$

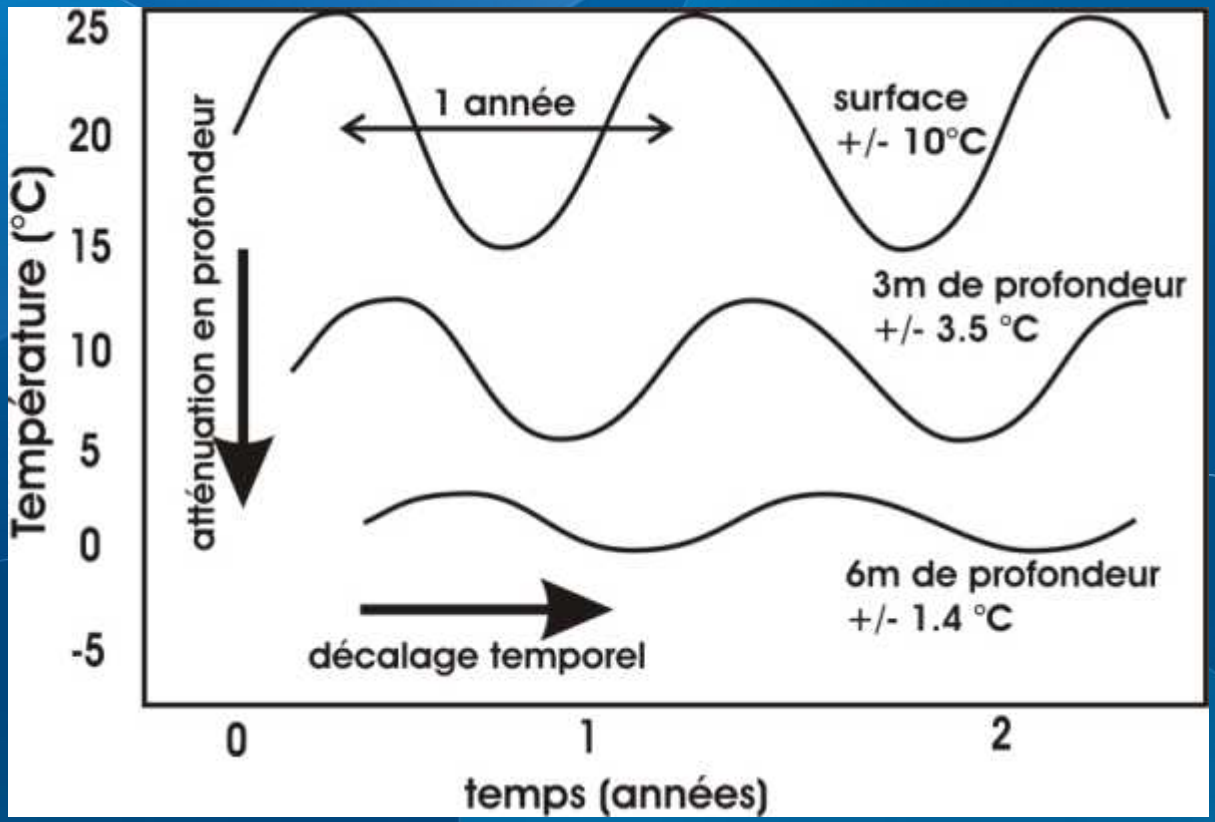
Comment mesurer le flux de chaleur de la Terre ?

Comment mesurer le flux de chaleur de la Terre ?

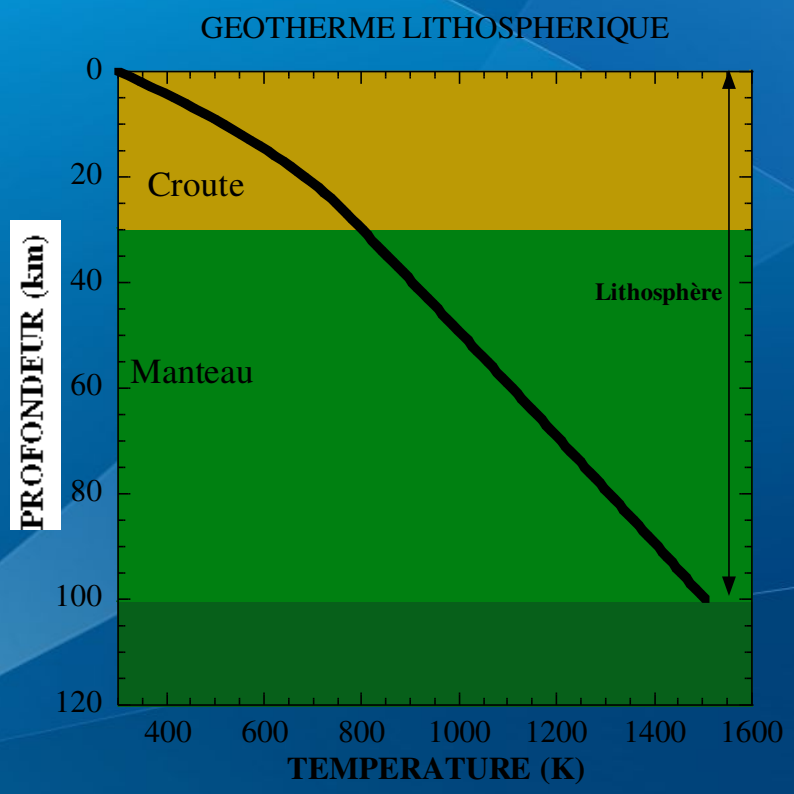


- On gagne environ 2 degrés tous les 100m =>
- q= 2.5 W.m-1.K-1*2 K/100m = 50 mW.m-2

Remarque : influence de la saison



=> Température à la base de la croute sans tenir compte des éléments radioactifs



- K pour les roches = 2.5 W.m-1.k-1
- qs en surface = 50 .10-3 W.m-2
- Ts = 300 K
- Epaisseur de la croute : H 30.10^3 m
- =>Tprof=qs/k*H+Ts = 1223 K
- => Gradient moyen : 30 degre/km-1

Température dans la croute terrestre en tenant compte des éléments radioactifs

Croûte continentale

$$T(z) = -\frac{A_{cc}}{2k} z^2 + \left(\frac{q_s}{k}\right) z + T_s$$

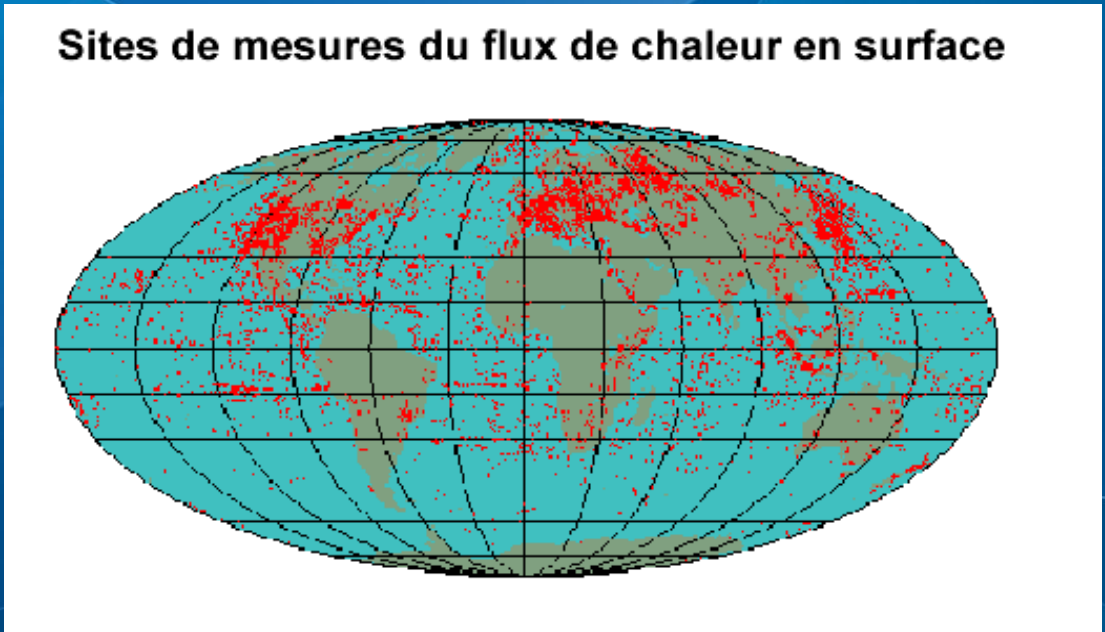
- Acc= production d'Energie radioactive = 1.13.10^-6 W.m-3
- K pour les roches = 2.5 W.m-1.k-1
- qs en surface = 60 .10-3 W.m-2
- Ts = 300 K
- Epaisseur de la croute : H 30.10^3 m
- =>T(30Km)=-A/2k+qs/k*H+Ts = 1024K
- => Gradient moyen : 24 degre/km-1

Conclusion : la Terre une machine thermique

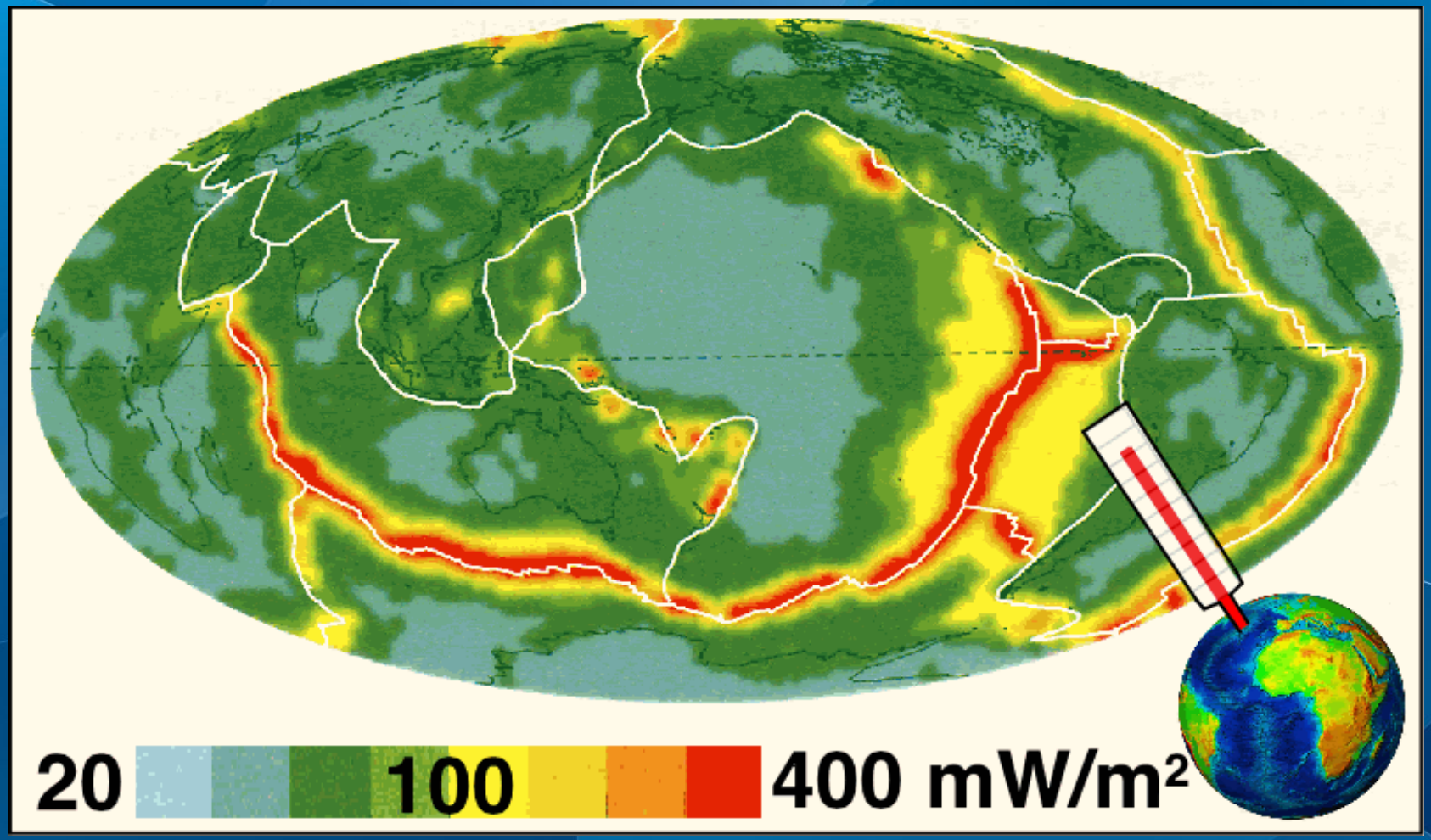
- La Terre recoit 340 W.m-2 du soleil sous forme de rayonnement visible et UV.
- La Terre produit 34 TW (désintégration de matière radioactive) dont 40mW.m-2 sont réémis vers l'espace par la surface en IR.
- L'energie produite par la Terre permet au manteau de convecter car 10^6<Ra < 10^8
- Au sein de la lithosphère la chaleur est transportée par conduction

Comment la convection dans le manteau et la tectonique des plaques se manifestent en surface ?

Sites où le flux de chaleur a été mesuré en surface

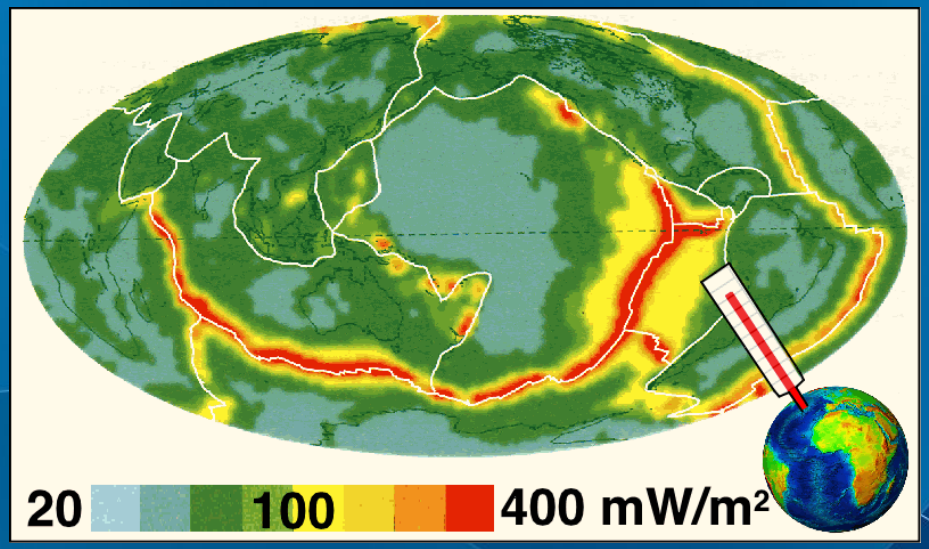


Flux de chaleur en surface

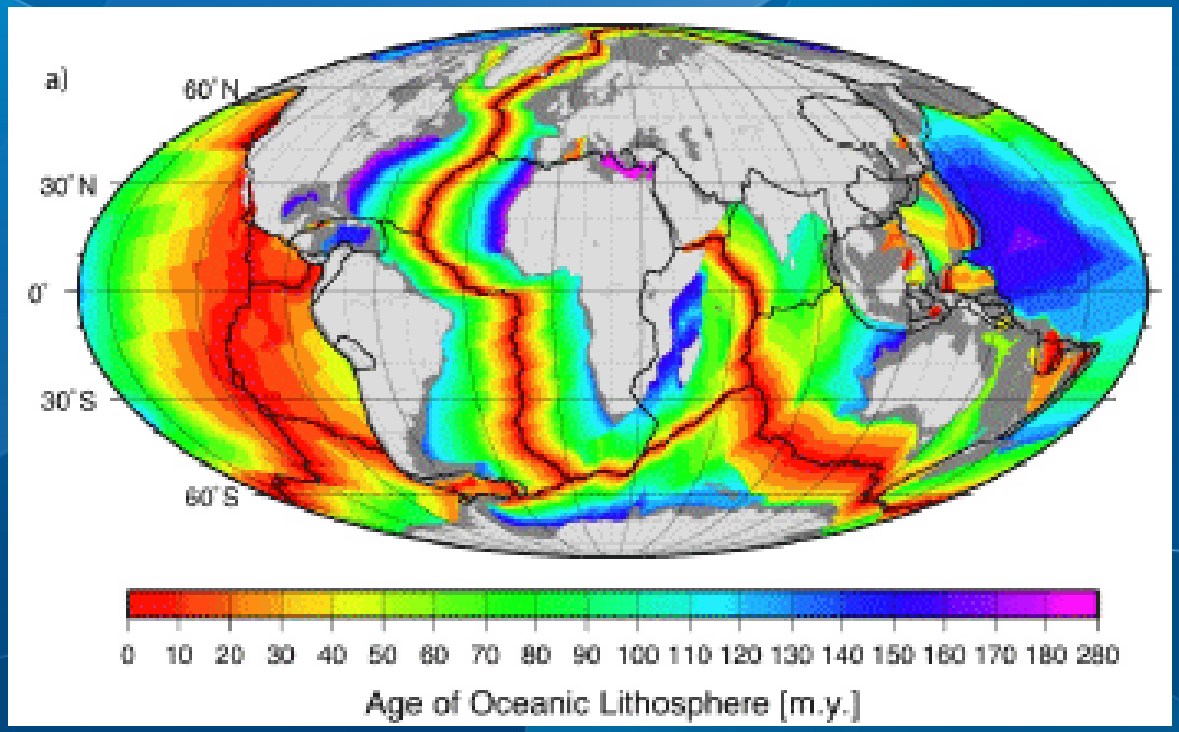


- Qu'observe t-on ?

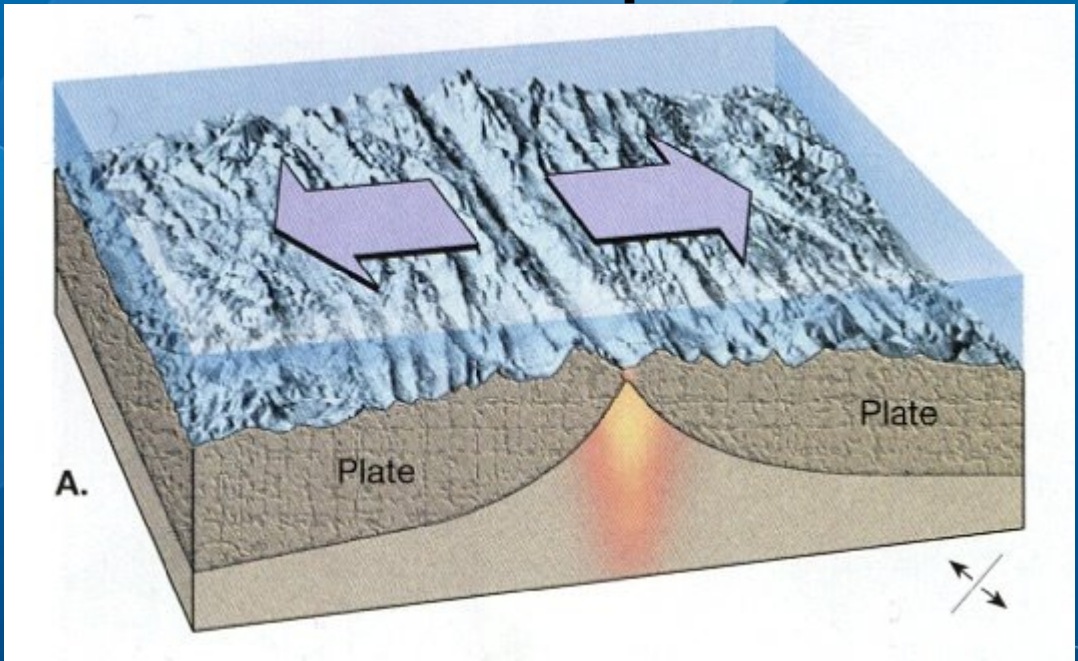
- Flux de chaleur élevé au niveau des dorsales océaniques
-Flux de chaleur diminue en s'éloignant des dorsales de 400 à 40 mW.m-2
- Matériel chaud (asténosphère) peu profond sous les dorsales et de plus en plus profond lq 'on s’éloigne des dorsales.
-flux de chaleur moyen de la Terre = 87 mW.m-1,
océans : 100 mW.m-1, et continents 65 mW.m-1.
- Flux chaleur plus important dans l'océan Pacifique que dans l'Atlantique
- Zone à flux de chaleur élevé peu large dans l'Atlantique en comparaison du Pacifique (vitesse avec la vitesse d'expansion des dorsales océaniques).
- Flux de chaleur élevé dans des arcs volcaniques
- Flux faible dans les zones de subduction

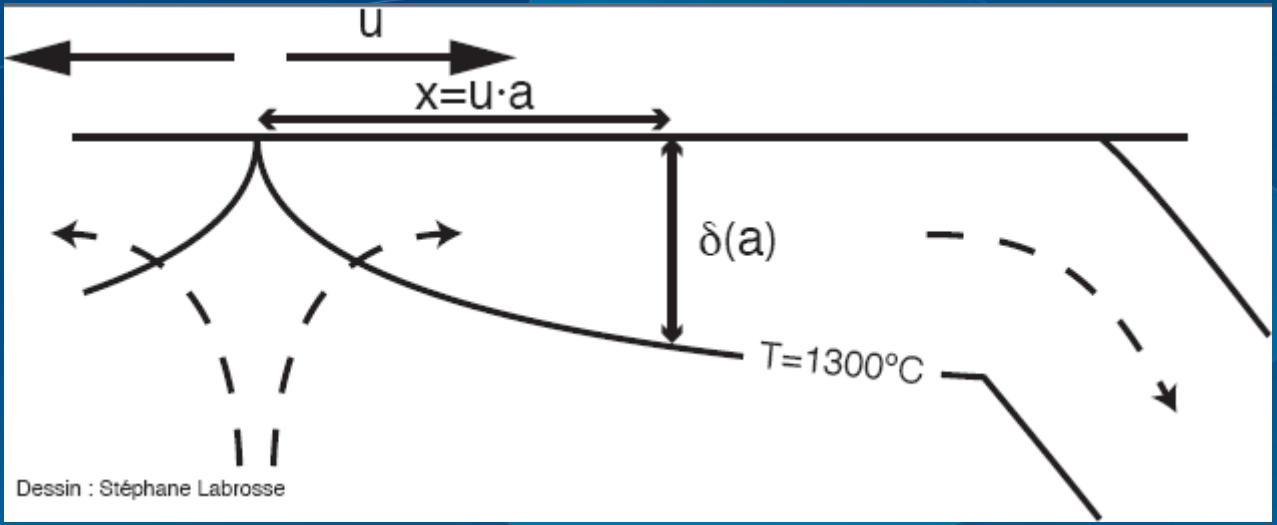


Age de la lithosphère



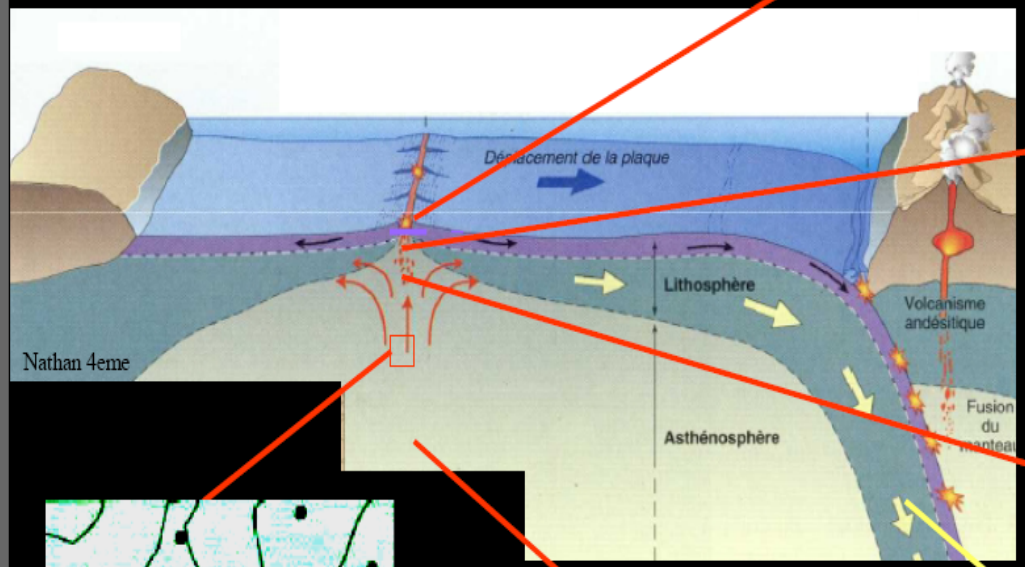
Les dorsales génèrent la croute océanique

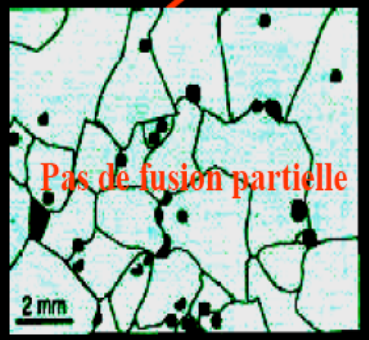




Et le magmatisme dans tout ça !
Il faut le remettre « à sa place »

Le reservoir magmatique, tout petit, intra-crustal (et déjà partiellement cristallisé, ce qui n'est pas figuré ici)





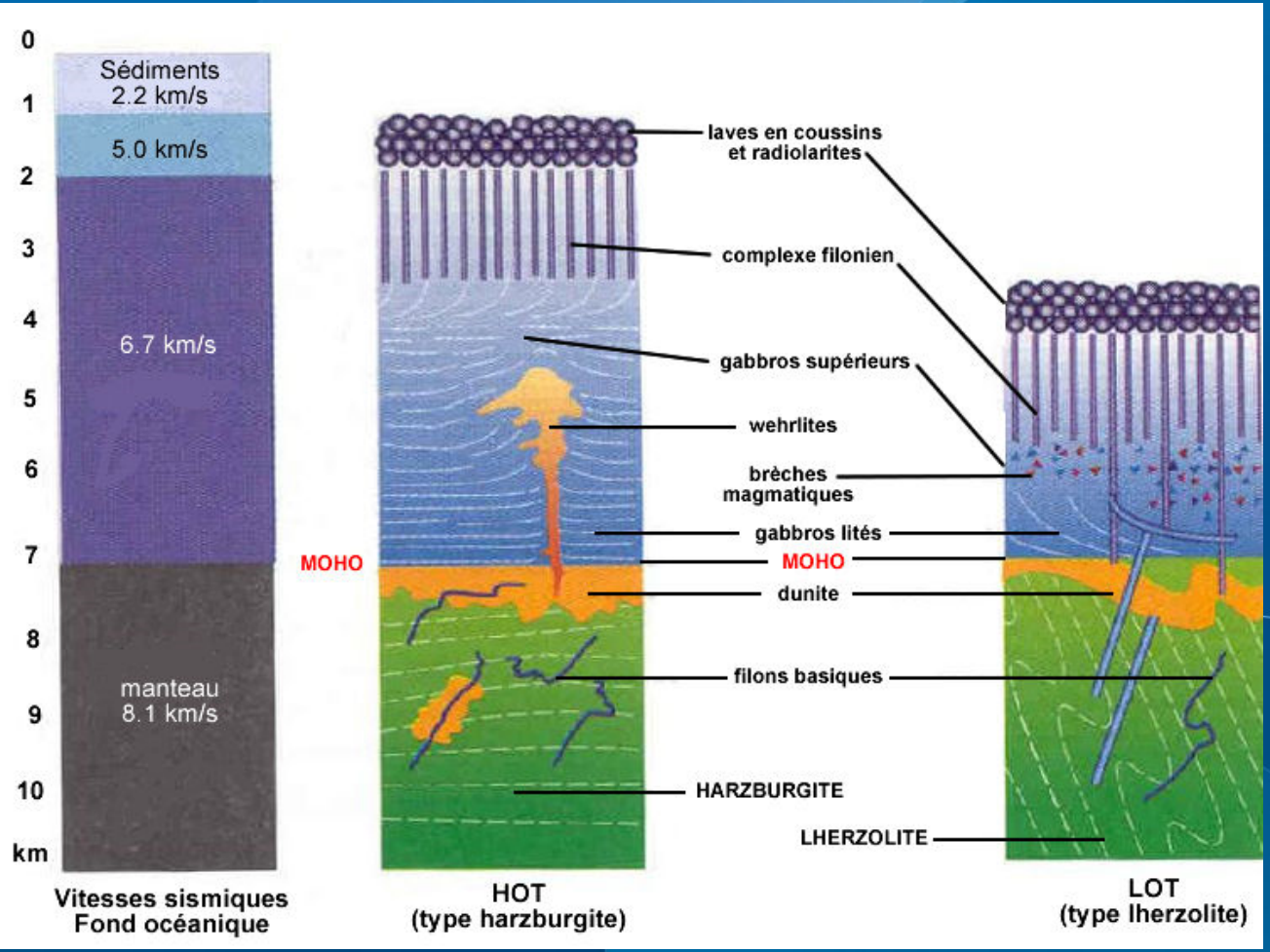
La remontée asthénosphérique ne vient pas de très profond

Mouvements lithosphériques, sans figurer dessous des mouvements asthénosphériques

Le type de roche issue de la fusion partielle du manteau (peridotite) dépend de la température

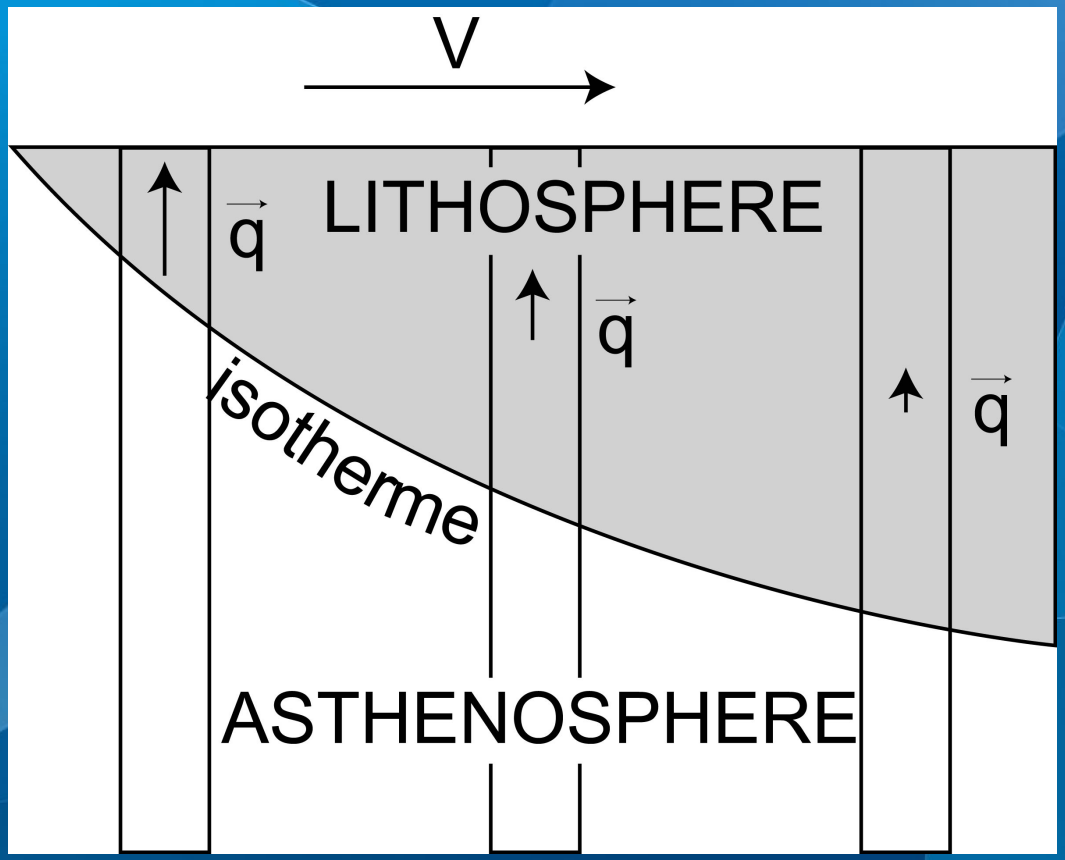
- La Si,K,Na fondent facilement par oppostion au Fe,Mg,Ca :
- Granite:
  - Tfusion : 750c
  - Riche en silicate (70%), sodium, potassium
  - 25% quartz, 60% (K-Na) feldspath + amphibole, biotite...
  - Couleur claire
- Basalte :
  - Tfusion = 1000 -1200C
  - ~50 % silicates. Riche en Fe, Mg => dense
  - Couleur sombre : pyroxene, (Ca) plagioclase, feldspath, un peu d'olivine.

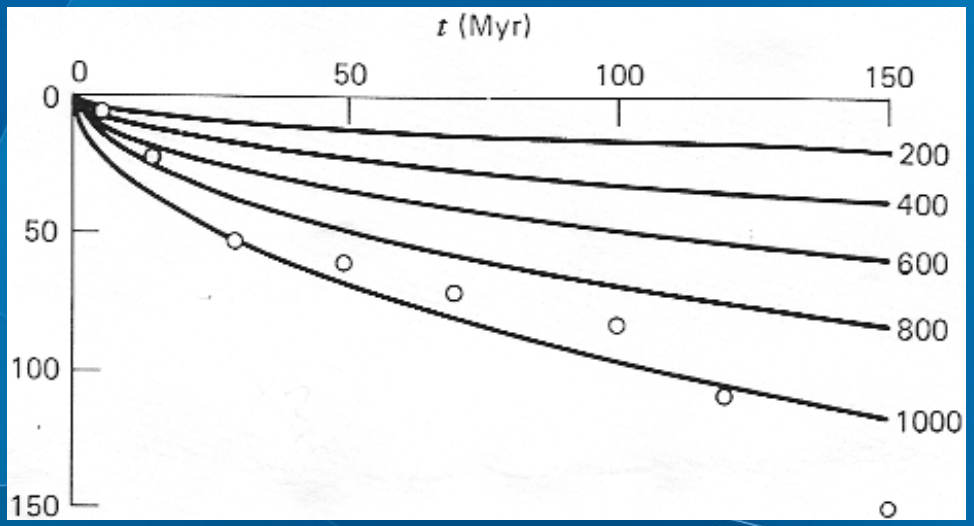
Vitesse de refroidissement contrôle la texture



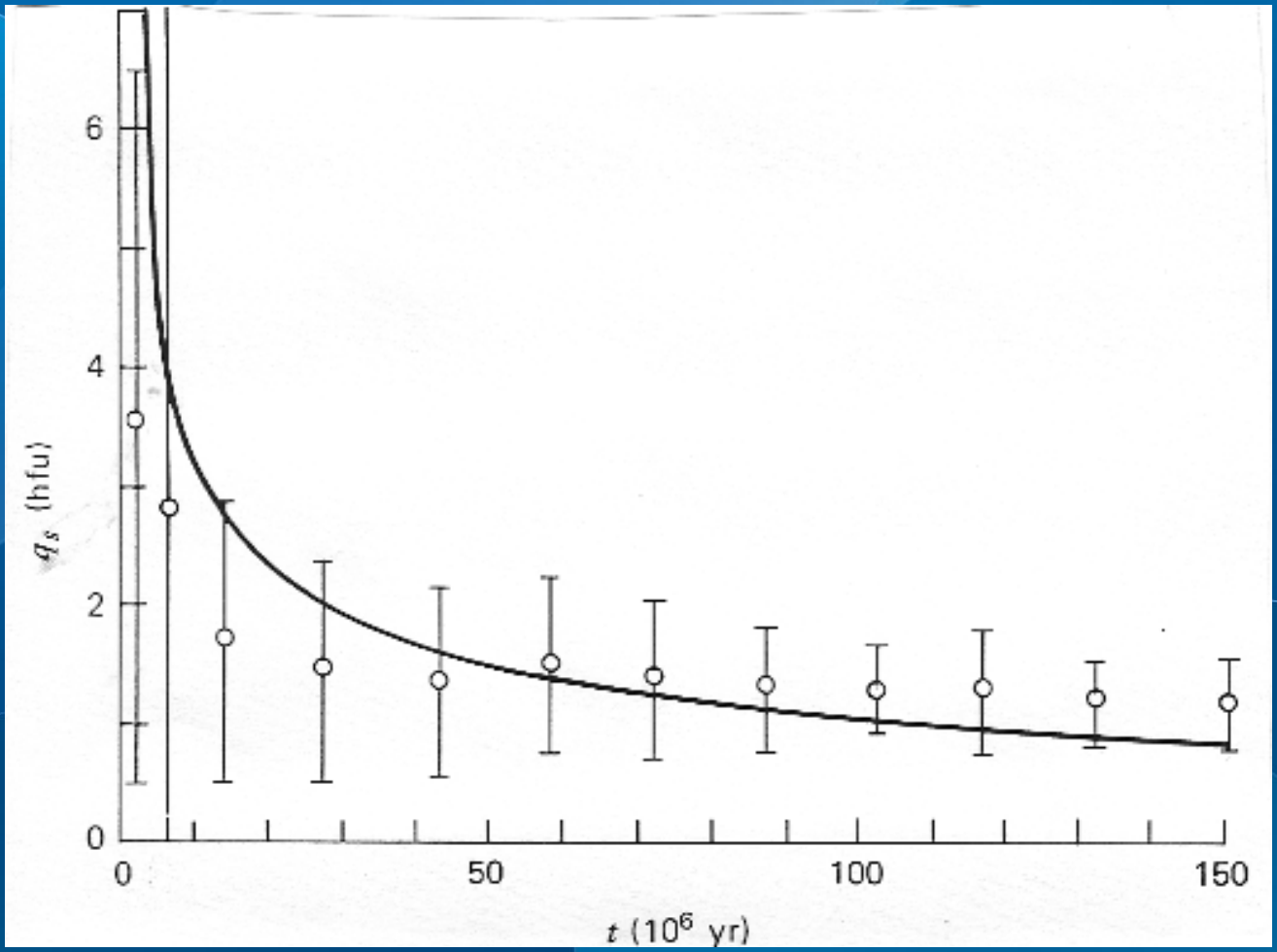
Dorsale rapide (pacifique) Dorsale lente (Atlantique)

La croute océanique refroidit au fur et à mesure qu'elle s'éloigne de la ride





Comparaison du flux de chaleur en fonction de la distance à la ride théorique (trait noir) et mesuré (rond)



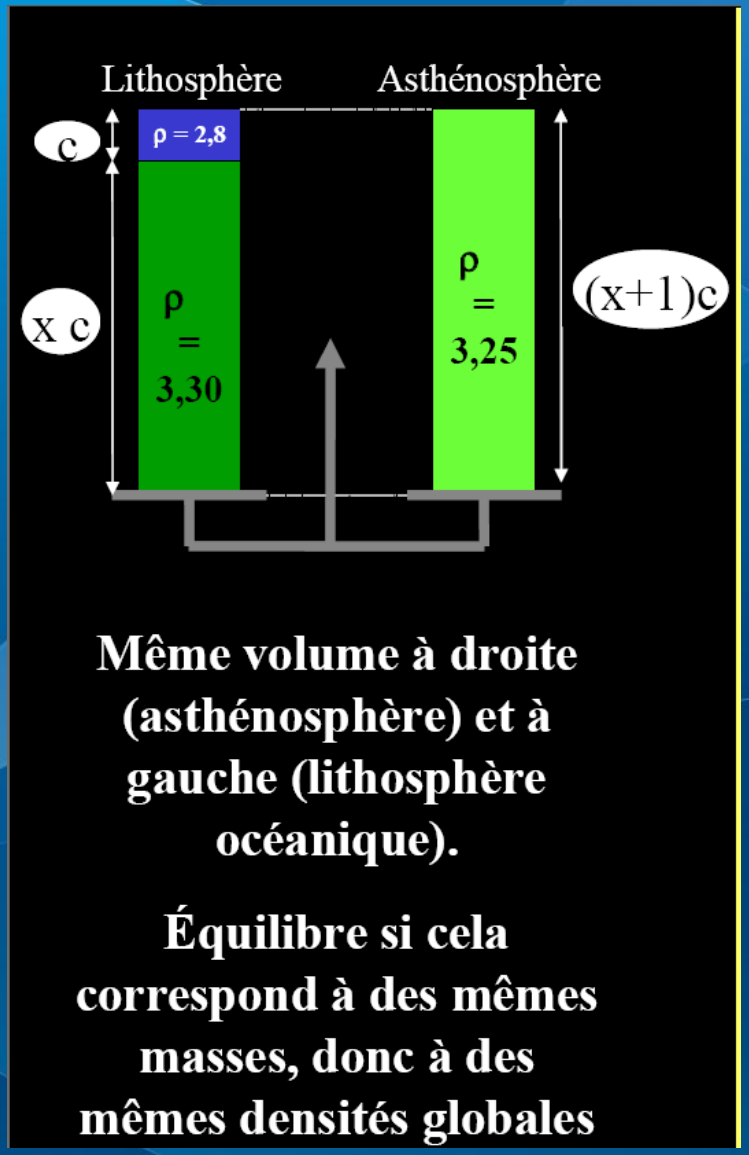
- Trait noir = flux calculé
- Rond = flux mesuré

D'où vient le désaccord théorie et la mesure ?

- L'évolution de la température et du flux de chaleur n'est pas contrôlé uniquement par la conduction comme le suppose la loi de Fourier.
- La circulation de fluides au sein de la lithosphère océanique joue également un rôle important en transportant de la chaleur.

Pourquoi la croute est-elle étirée au niveau des dorsales ???
Les zones de subduction

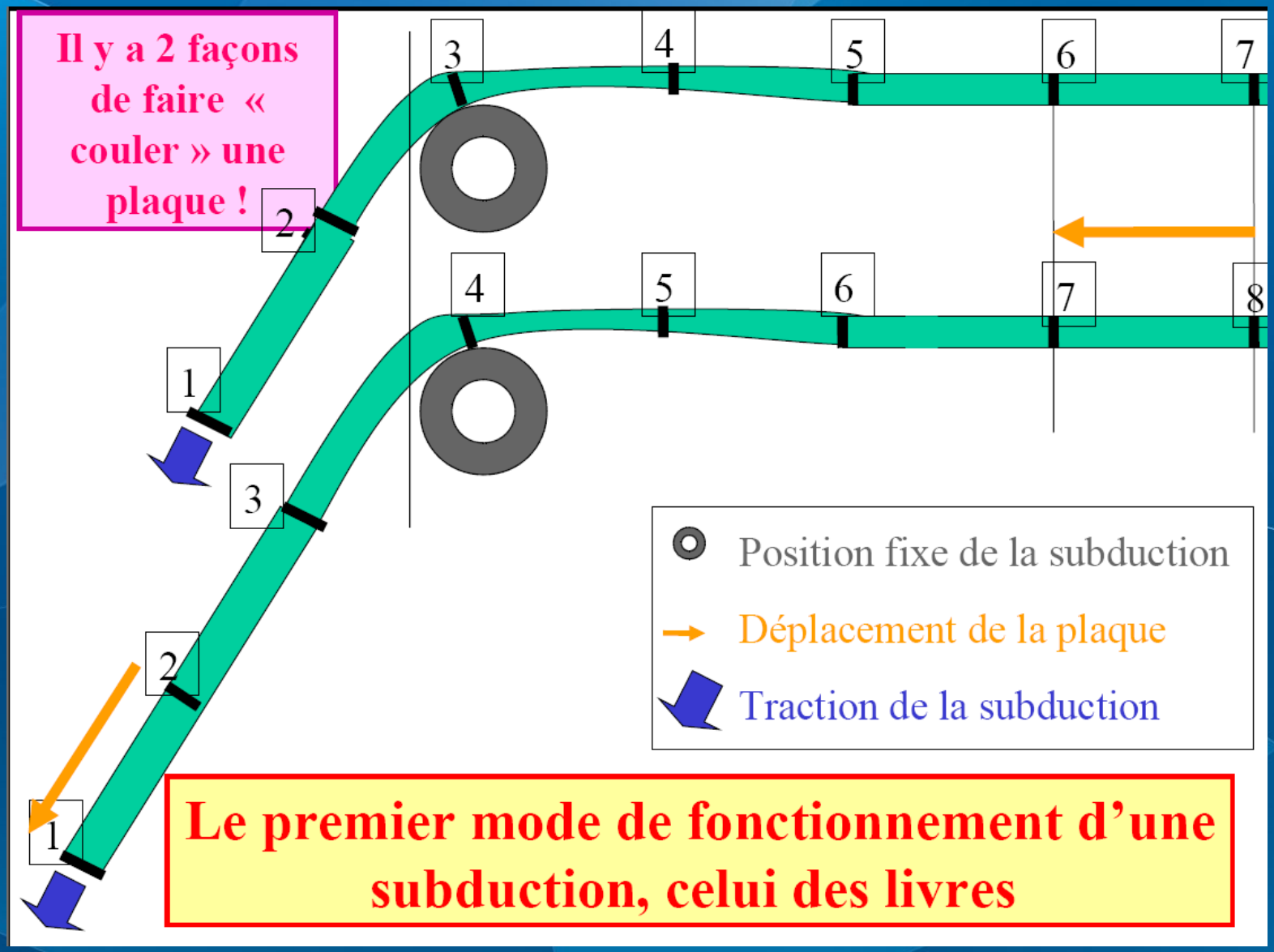
Quand la subduction s'initie t-elle ?



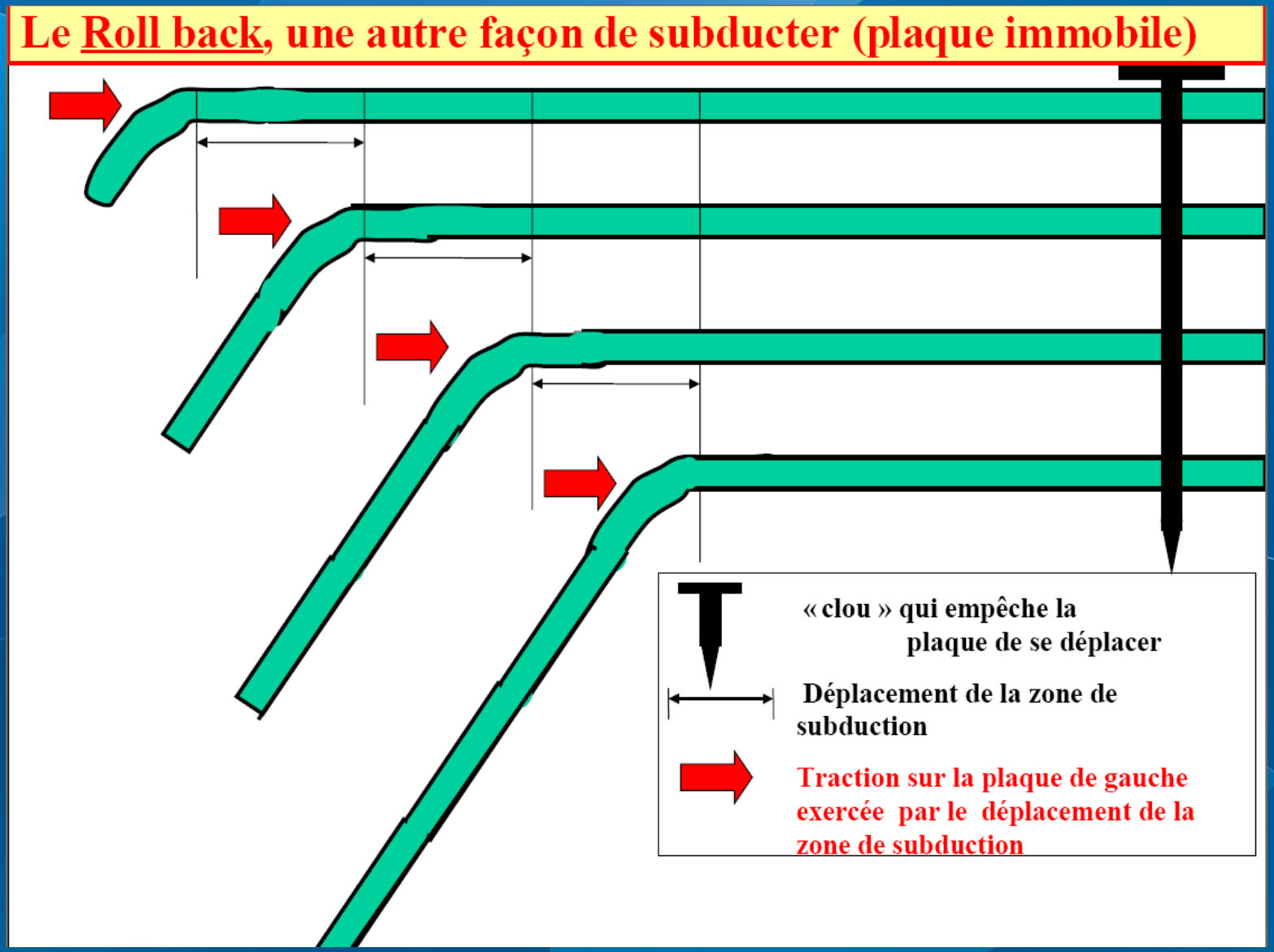
- Epaisseur croute : c
- Epaisseur manteau lithospherique: x*c
- Quand la lithosphère est-elle plus dense que l'asténosphère ?
- $$2.8c + 3.30xc = 3.25(xc + c)$$
- x=9
- => La lithosphère a suffisamment refroidit pour que son épaisseur = 10x croute, elle devient plus dense que l'asthénosphère sous-jacente et subducte.
- Pour une croute de 7Km, il faut 70 km de lithosphère ce qui s'obtient en 100ma

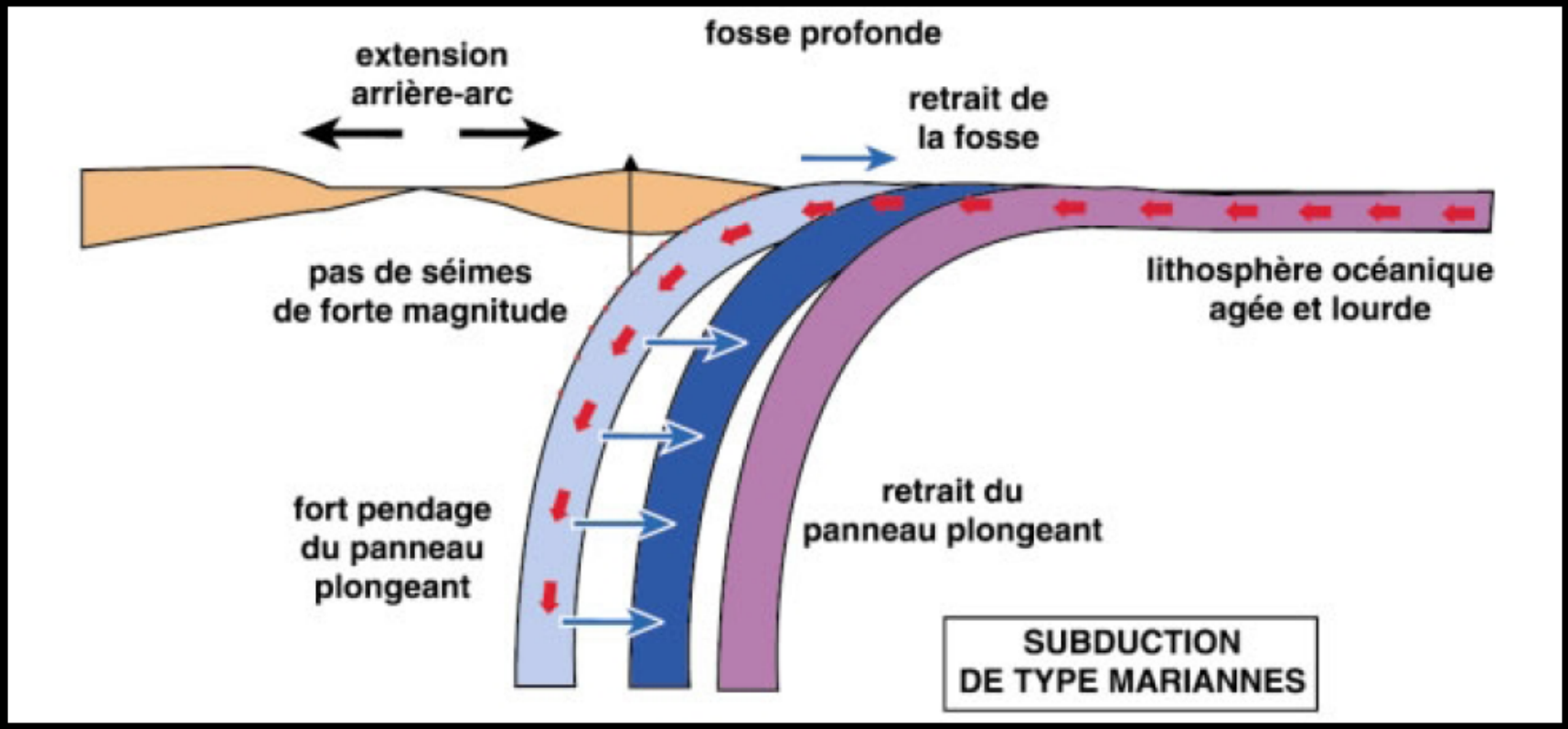
Comment la subduction évolue t-elle au cours du temps ?

Modèle 1 : Plaque se déplace, la subduction est identique



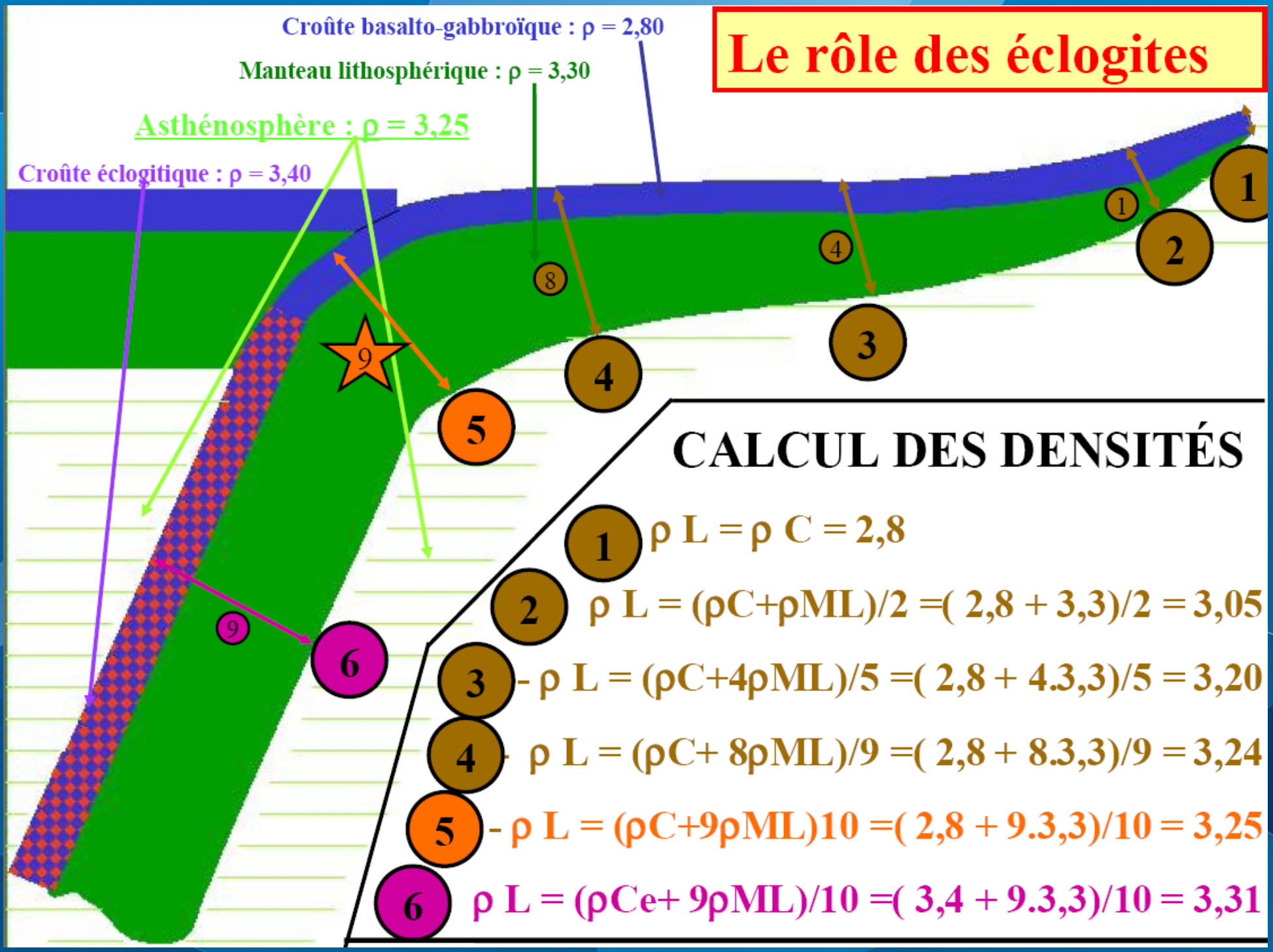
Modèle 2 : Roll Back





La réalité terrestre : souvent les 2 types à la fois .
La plaque et la zone de subduction se déplacent

Le rôle des éclogites



CALCUL DES DENSITÉS

1 ρ L = ρ C = 2,8

2 ρ L = (ρC+ρML)/2 =(2,8 + 3,3)/2 = 3,05

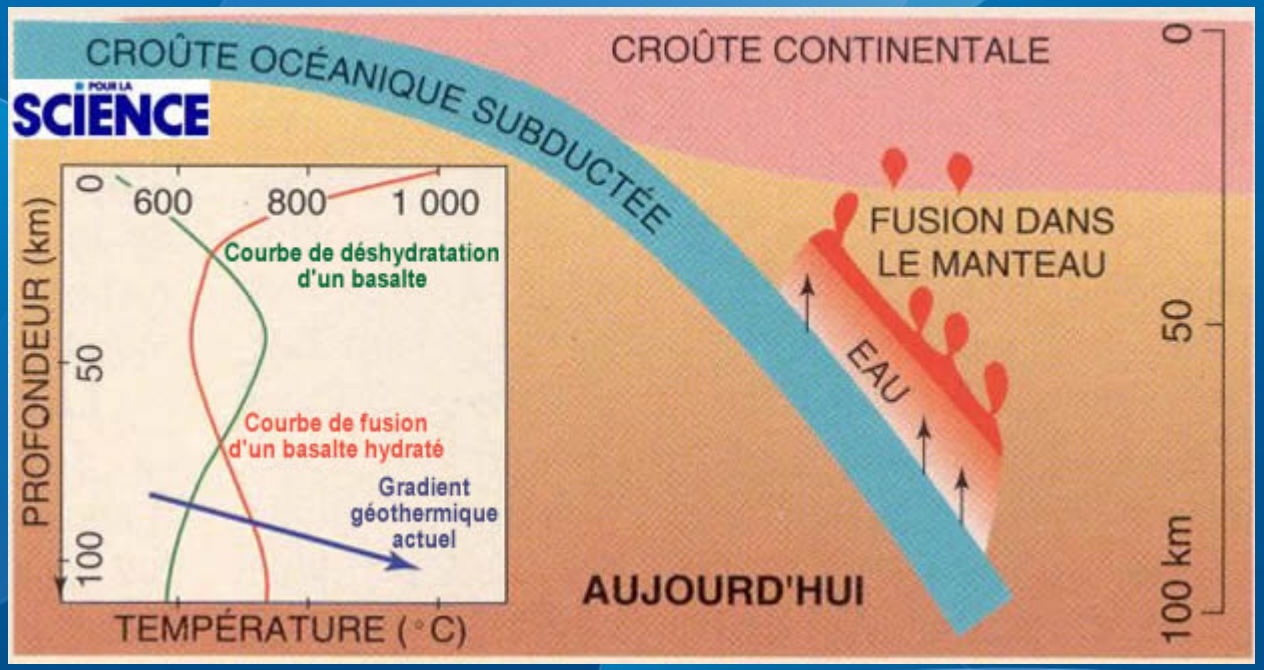
3 - ρ L = (ρC+4ρML)/5 =(2,8 + 4.3,3)/5 = 3,20

4 - ρ L = (ρC+ 8ρML)/9 =(2,8 + 8.3,3)/9 = 3,24

5 - ρ L = (ρC+9ρML)10 =(2,8 + 9.3,3)/10 = 3,25

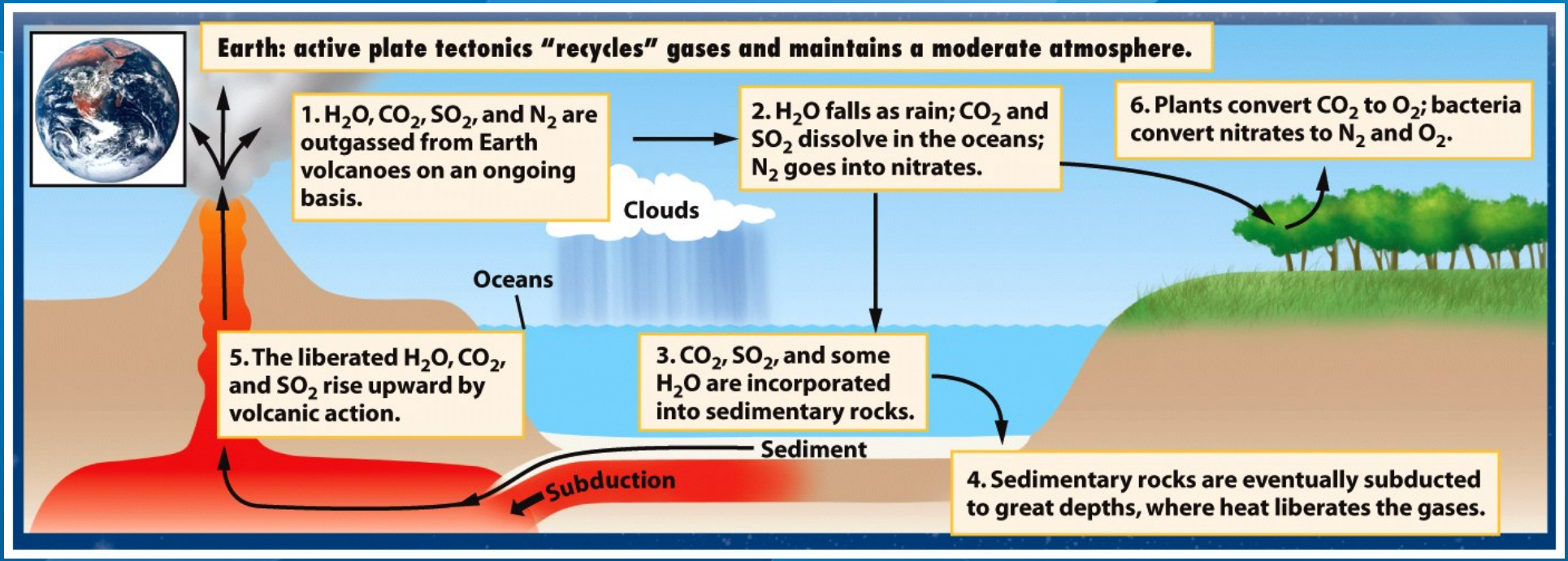
6 ρ L = (ρCe+ 9ρML)/10 =(3,4 + 9.3,3)/10 = 3,31

Subduction et fabrication de croute continentale



- En subductant la plaque se déshydrate à ~50 Km (T=600-800C)
  - => Fusion partielle du manteau et de la lithosphère subductée
  - => magma riche Si, Al + H20 + Co2 !!!
  - => Volcanisme en surface => Mise en place de la croute continentale + CO2 +H20 !!!!
  - La plaque déshydratée continue de s'enfoncer .....

Dymamique de la Terre et atmosphère



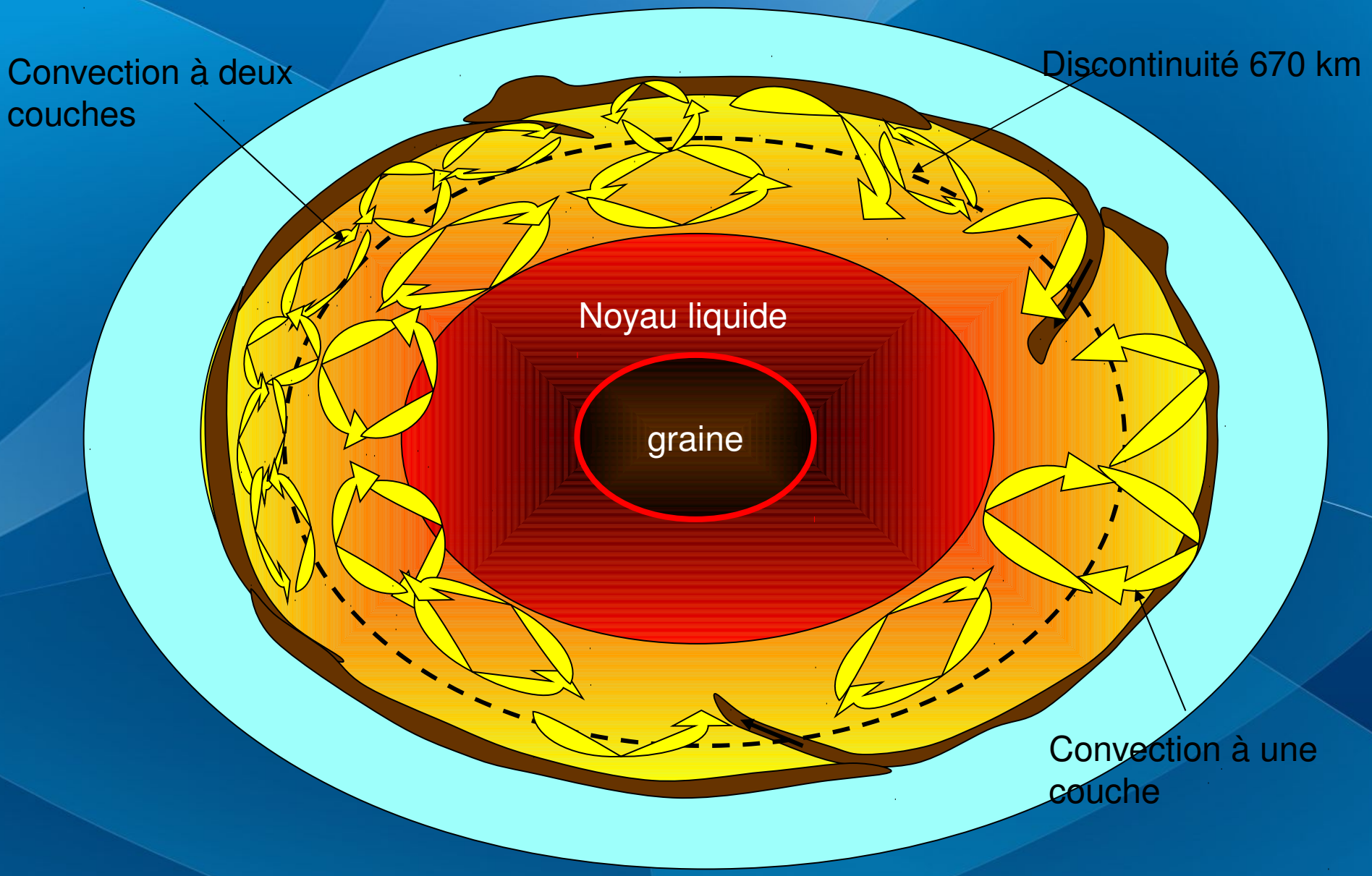
- Croute océanique en refroidissant force la lithosphère à subducter = > Formation croute continentale + Apport de Co2, H20 en surface
- => Regulation de la température par effet de Serre + Vie possible !

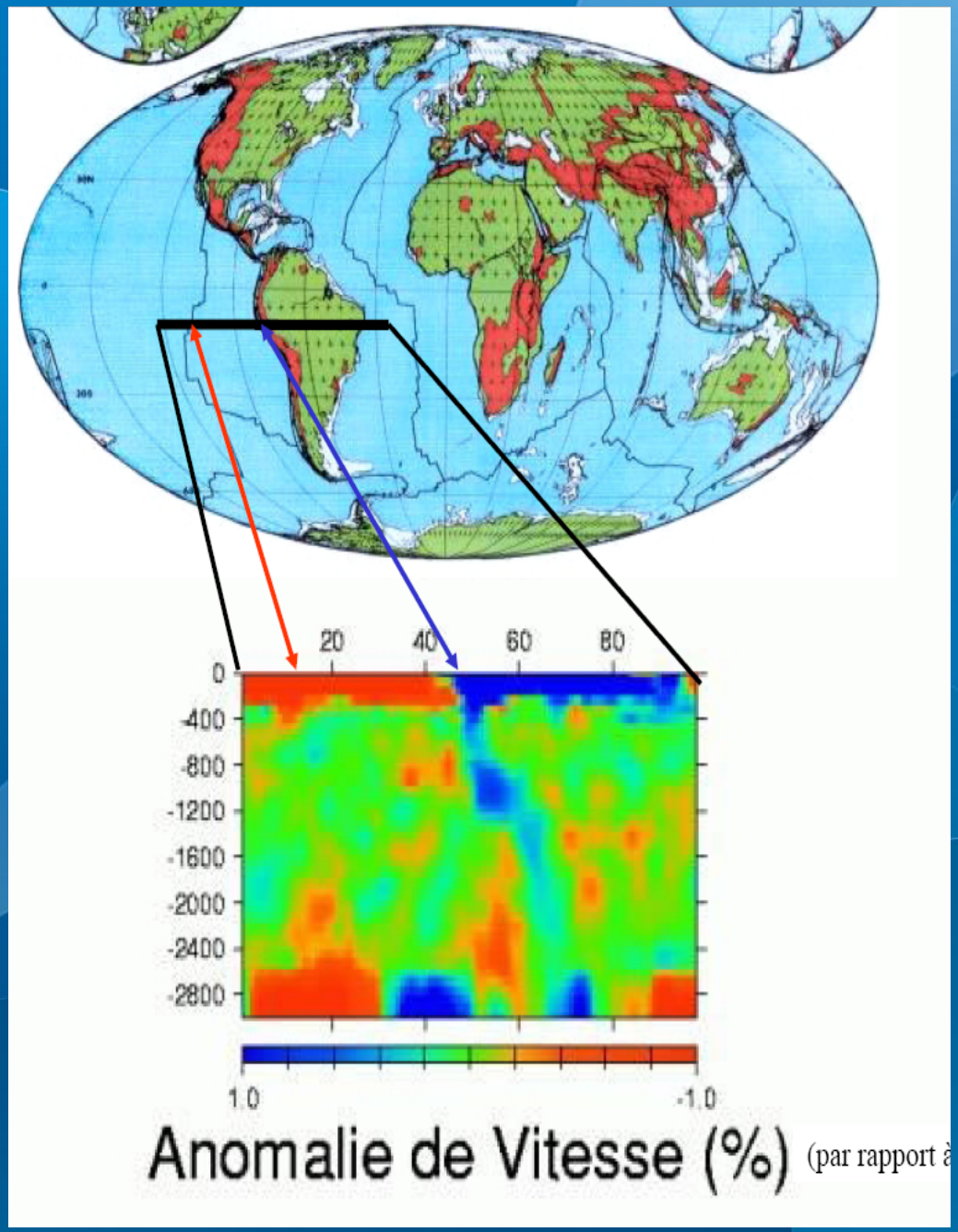
Remarques sur l'eau

- L'origine de l'eau sur Terre est encore débattue. Il y'a plusieurs hypothèses. L'eau
  - 1) L'eau aurait été apporté par des comètes
  - 2) Par des météorites
  - 3) Par des micro météorites.
  - 4) L'eau serait issue du manteau. Dans ce cas le volcanisme et les subductions auraient joués un rôle important.

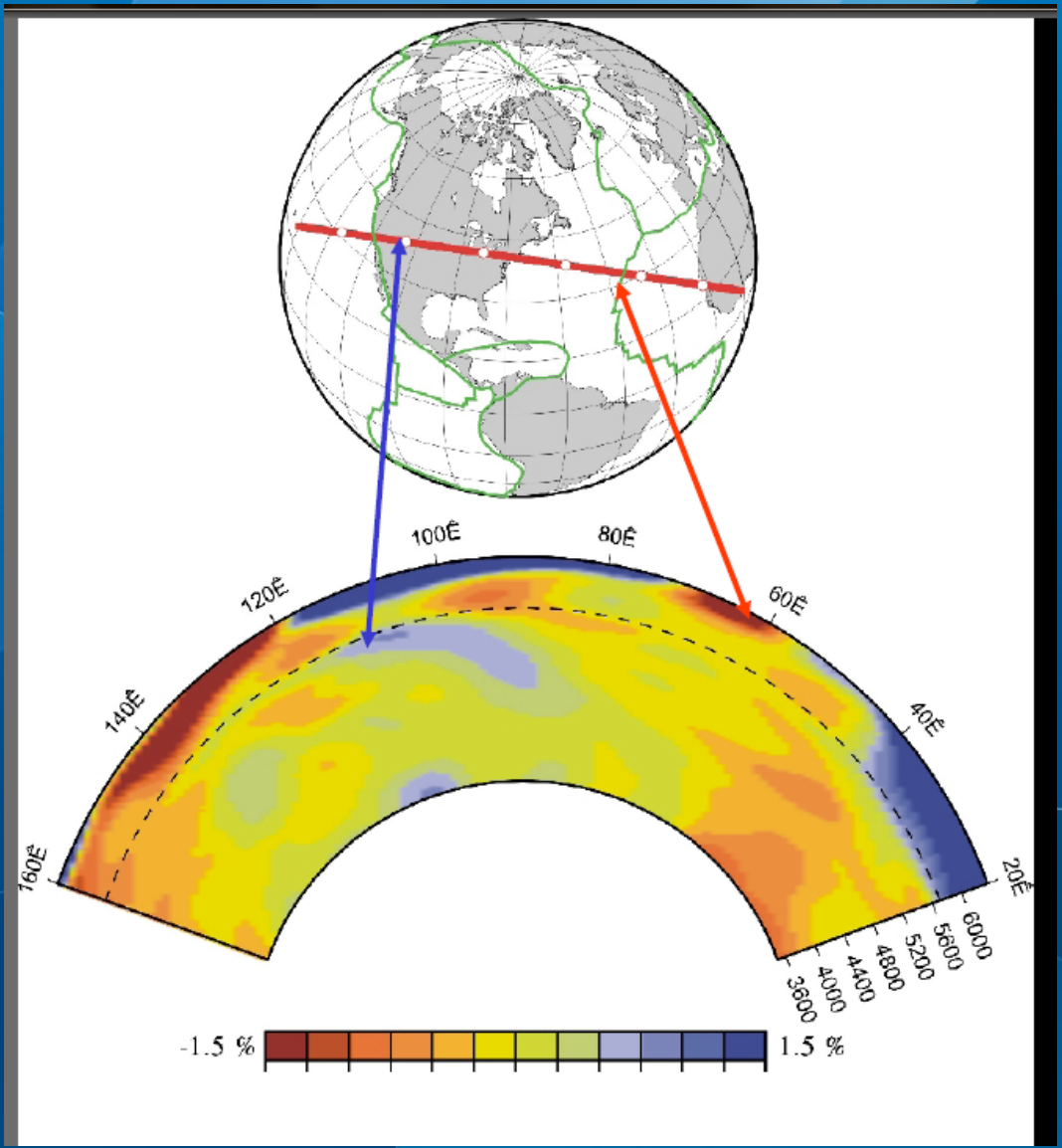
Qu'advient t-il de la plaque subductée par la suite ?

Question sur la convection: 1 ou deux couches





- Les dorsales sont superficiels
- La lithosphère subducte profondément dans le manteau


100E
80E
120E
60E
140E
40E
160E
20E
6000
5600
5200
4800
4400
4000
3600
-1.5 %
1.5 %

Poursuite de la subduction

- Quand la lithosphère atteint sa densité critique (3.25), elle subducte
- En subductant elle se réchauffe => sa densité diminue=> l'enfoncement de la plaque devrait s'arreter

La transformation basalte → éclogite transforme la croûte en éclogite ($\rho = 2{,}8 \rightarrow \rho = 3{,}4$) et ρ éclogite $> \rho$ péridotite.

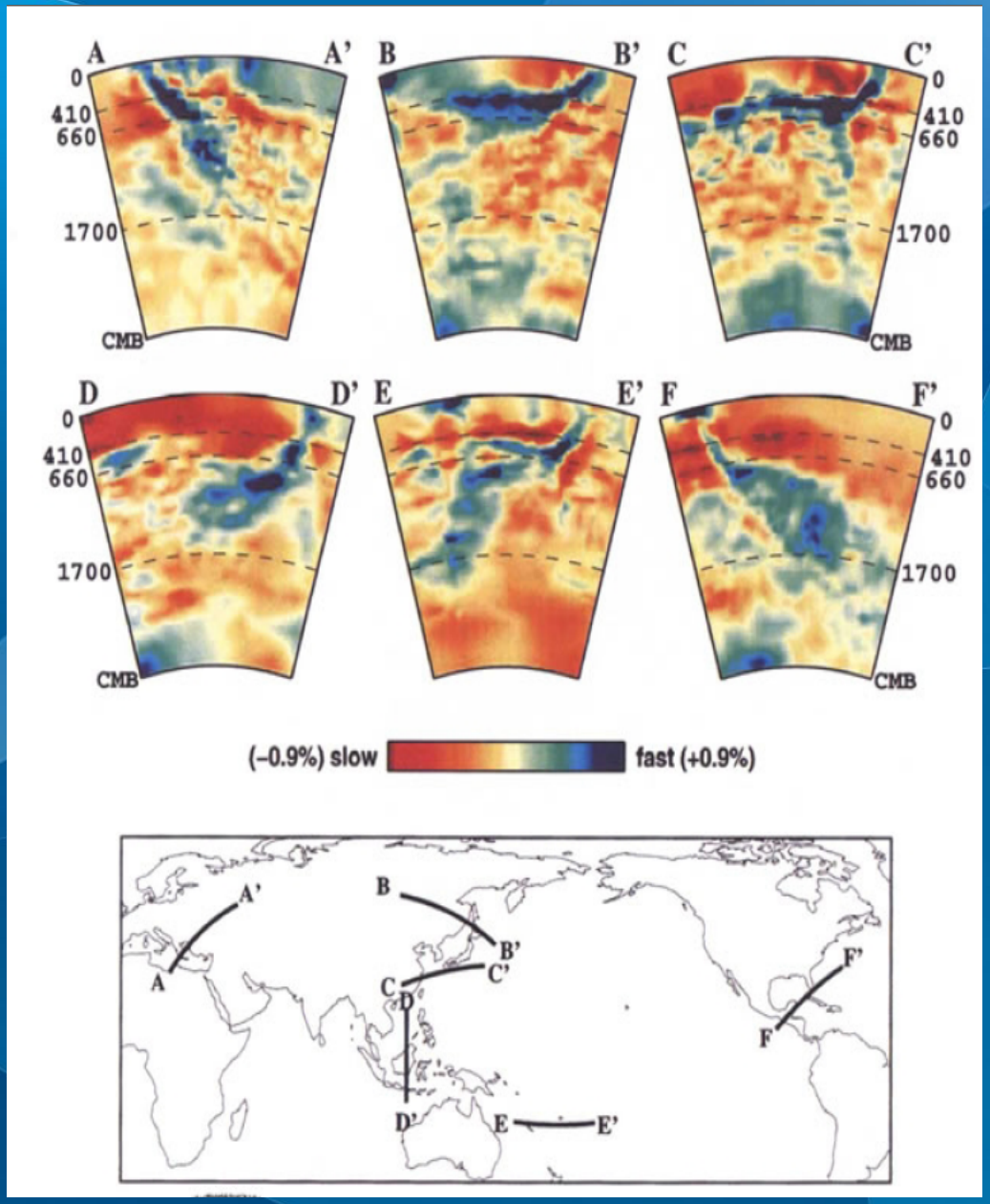
Son action de « flotteur » devient « lest »

Photo Pierre Thomas

Echantillon Pierre Thomas

http://www.physics.udel.edu/~bcwalker/image/ballon.jpg

Quelques exemples de slabs

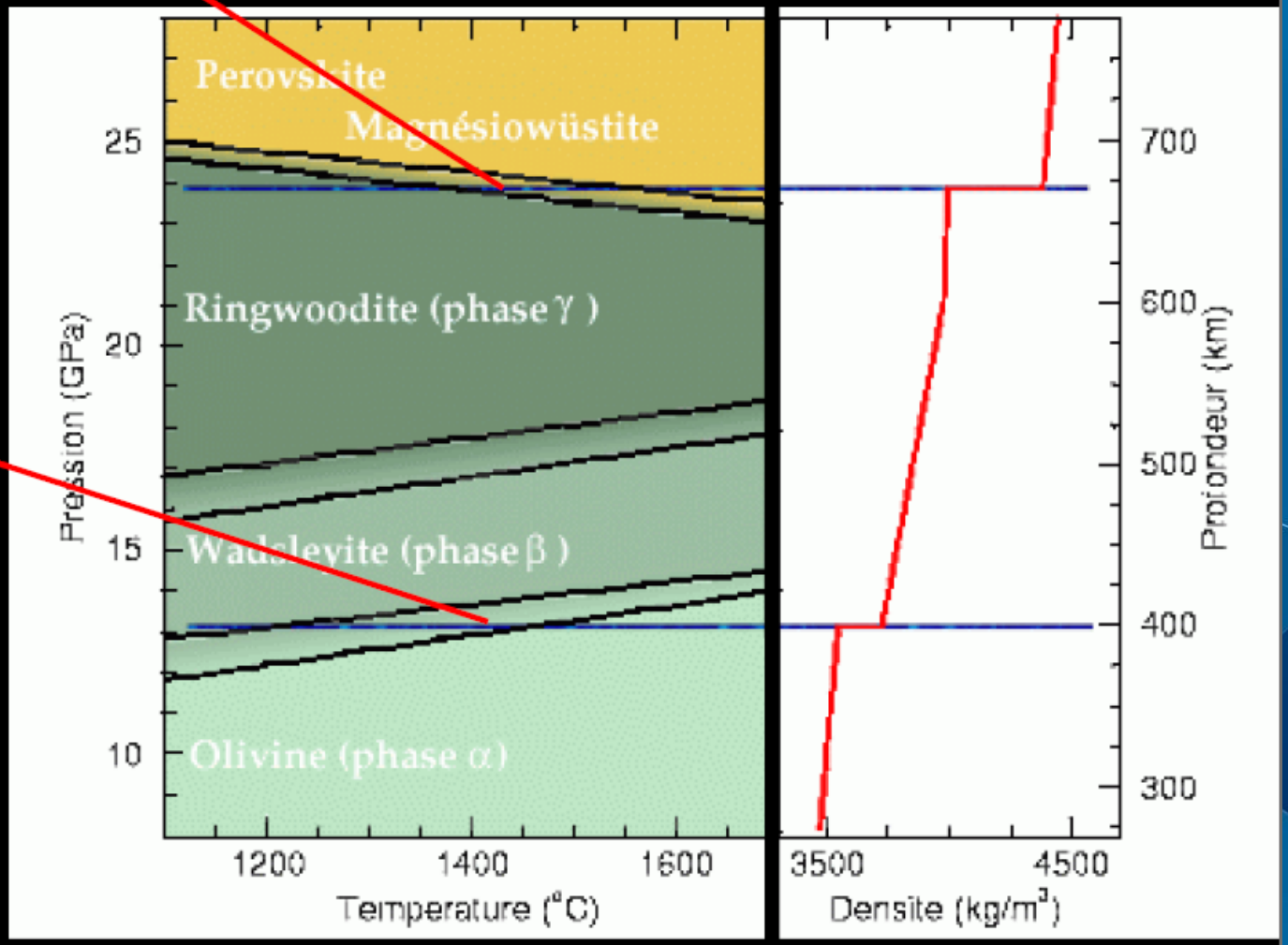


- Souvent les slabs stagnent à 670 km. Pourquoi ?

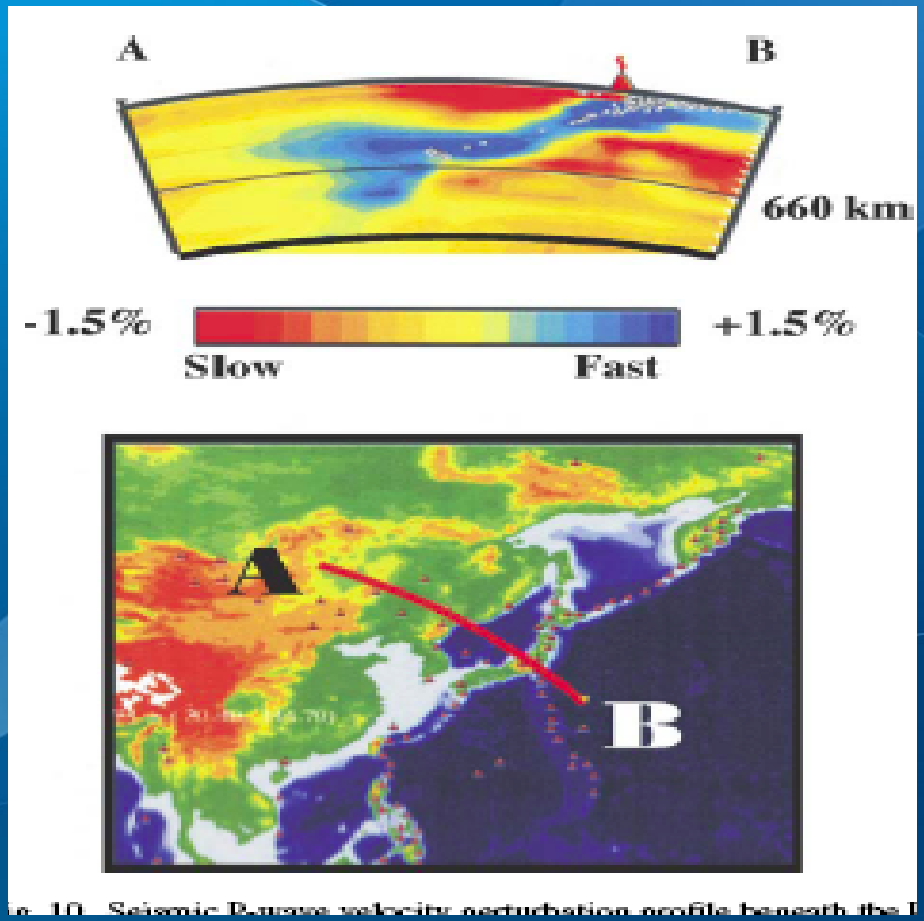
Pourquoi cette « stagnation » à 670 km ?

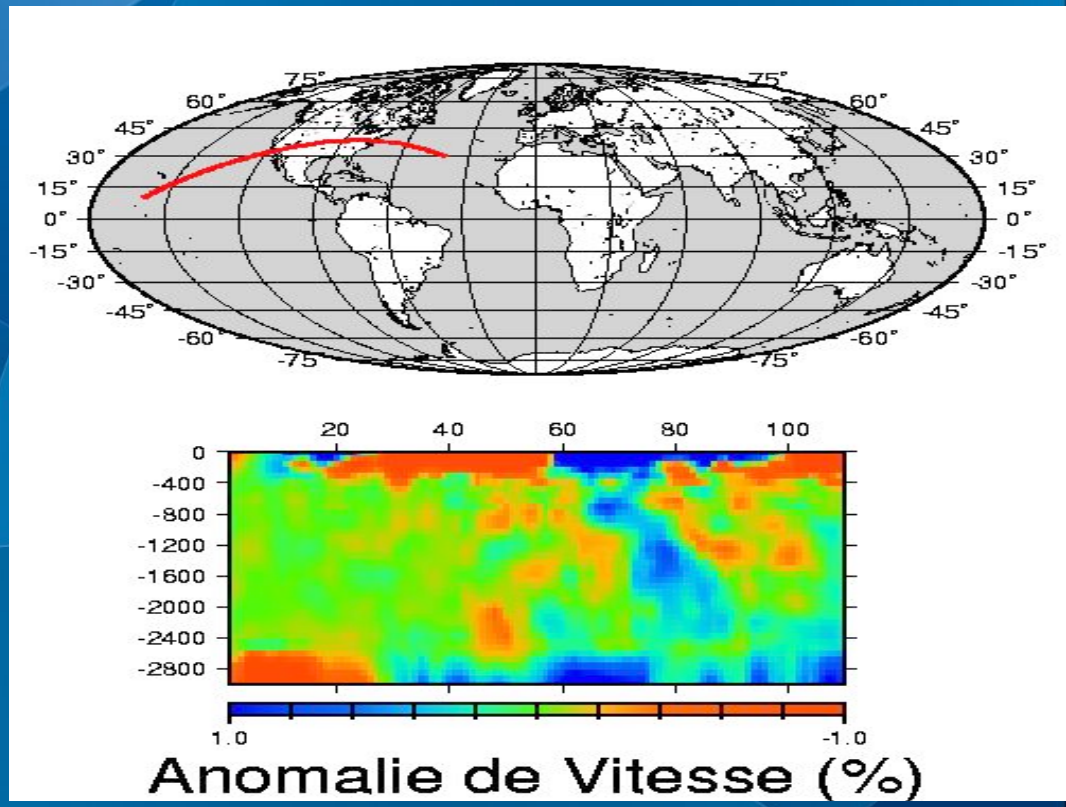
Le slab, plus froid, est encore en phase γ quand il arrive à 670 km. Il a du mal à s'enfoncer

Le slab, plus froid, passe en phase β à une profondeur inférieure à 400 km. Quand il arrive à 400 km, il est déjà en β et n'a aucun problème pour continuer à descendre

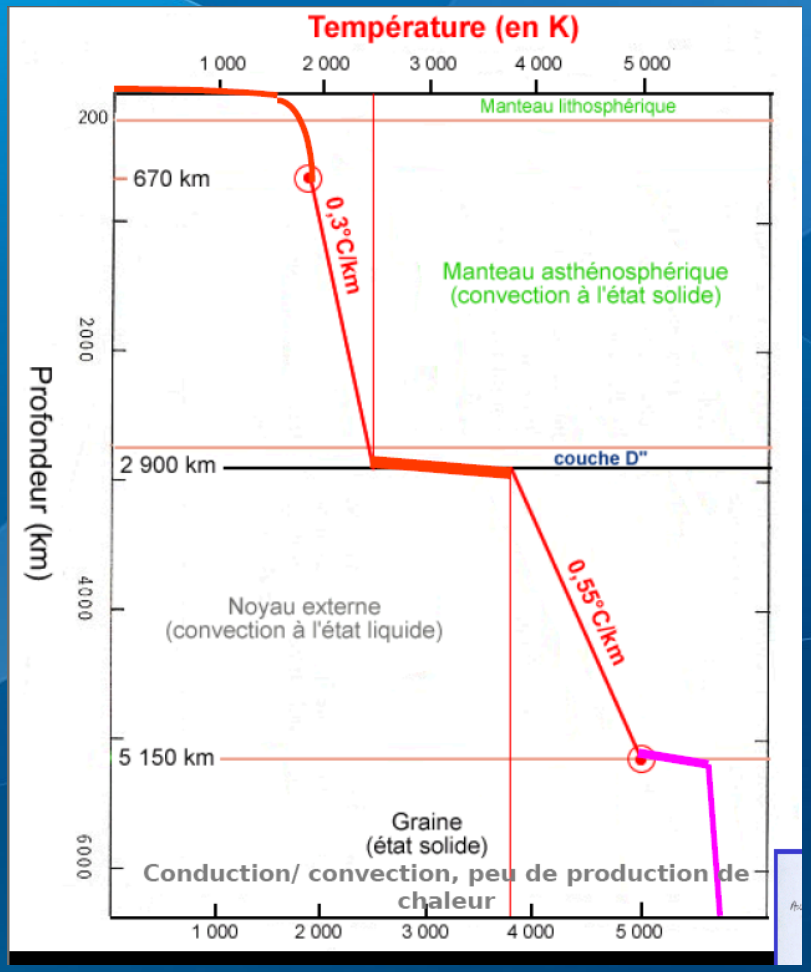


Les plaques traversent-elles la discontinuité de 670 Km?





Points Chauds



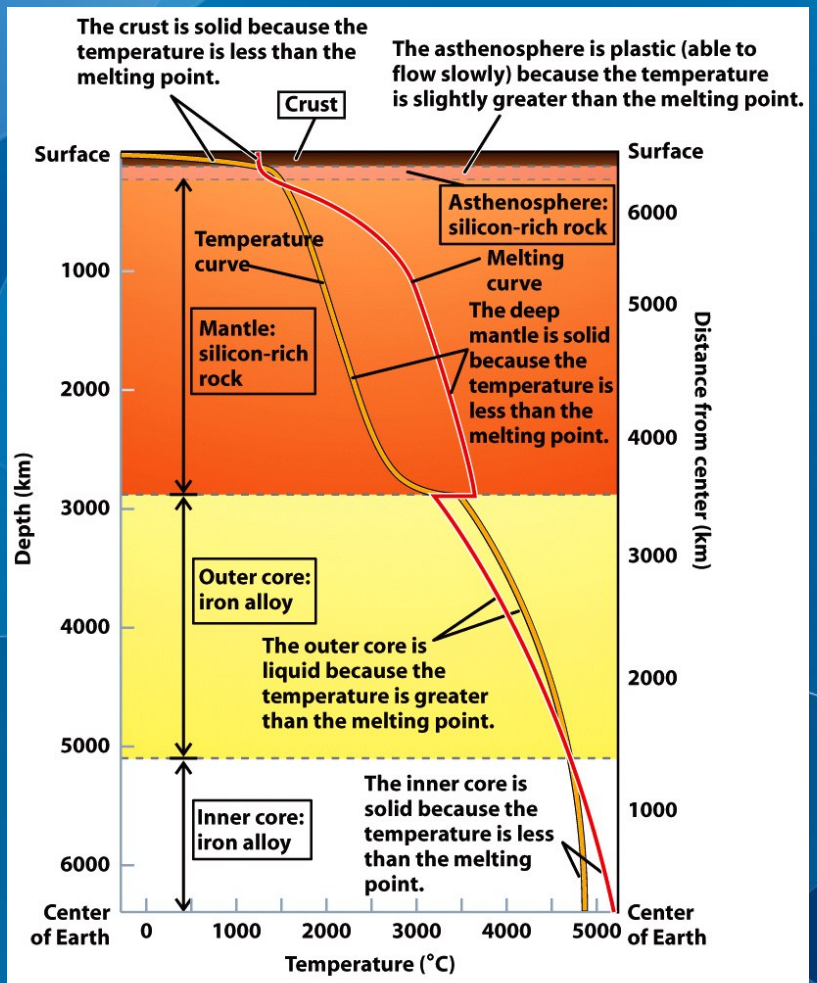
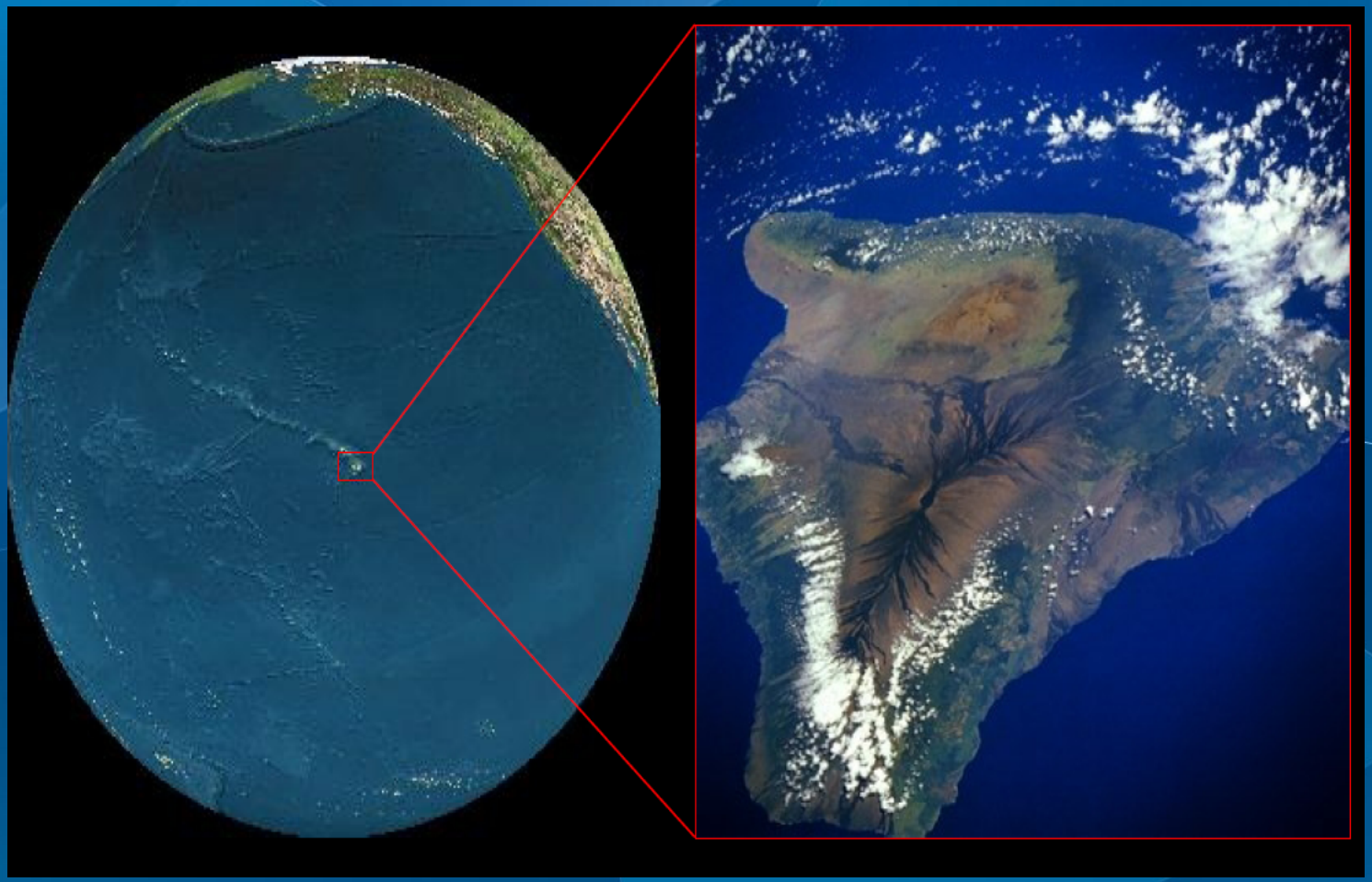
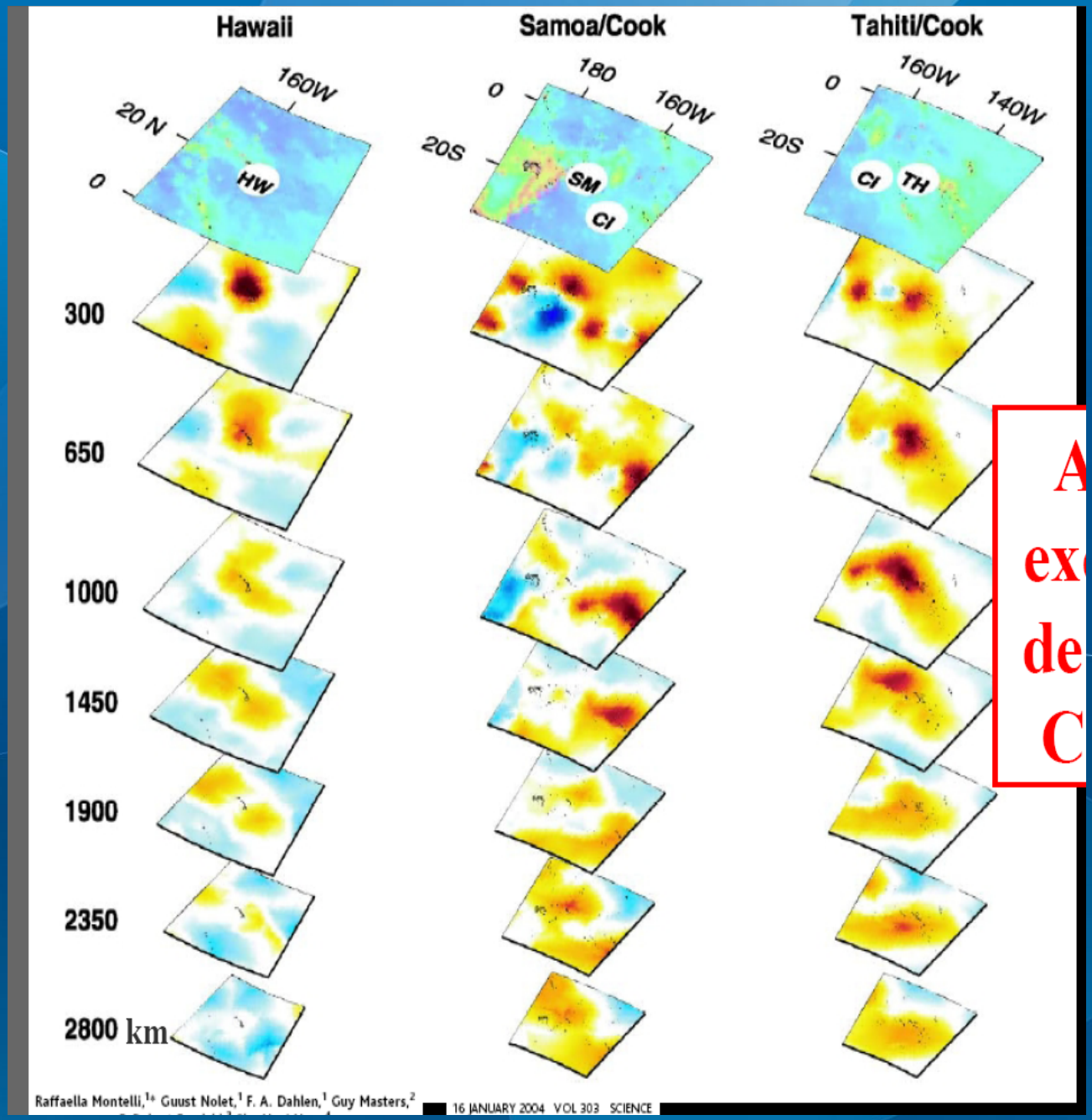


Figure 9-10
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Points Chauds



Exemples de points chauds



A
ex
de
C

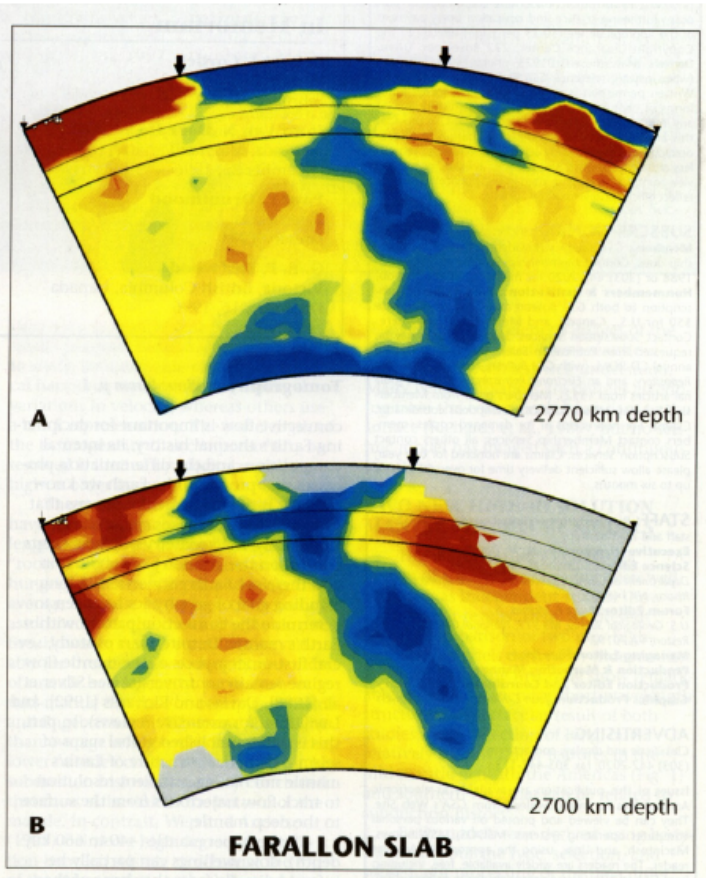
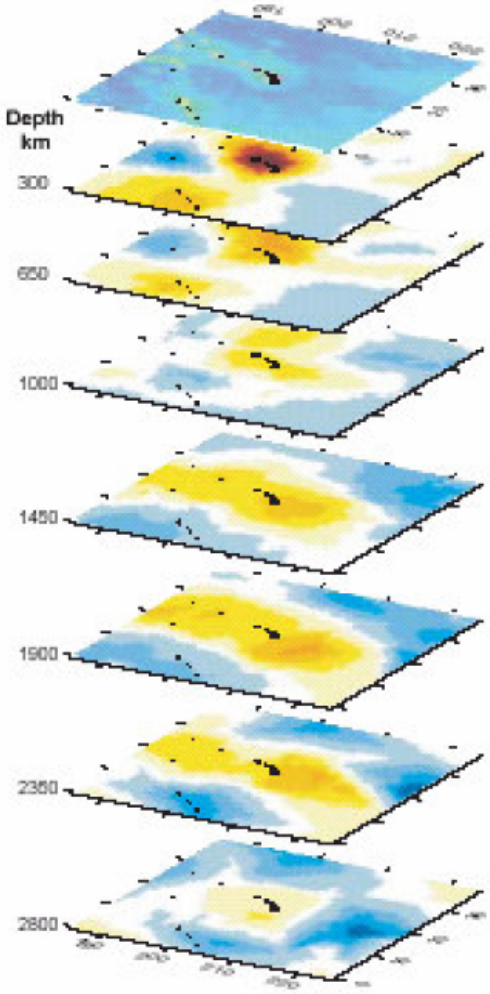


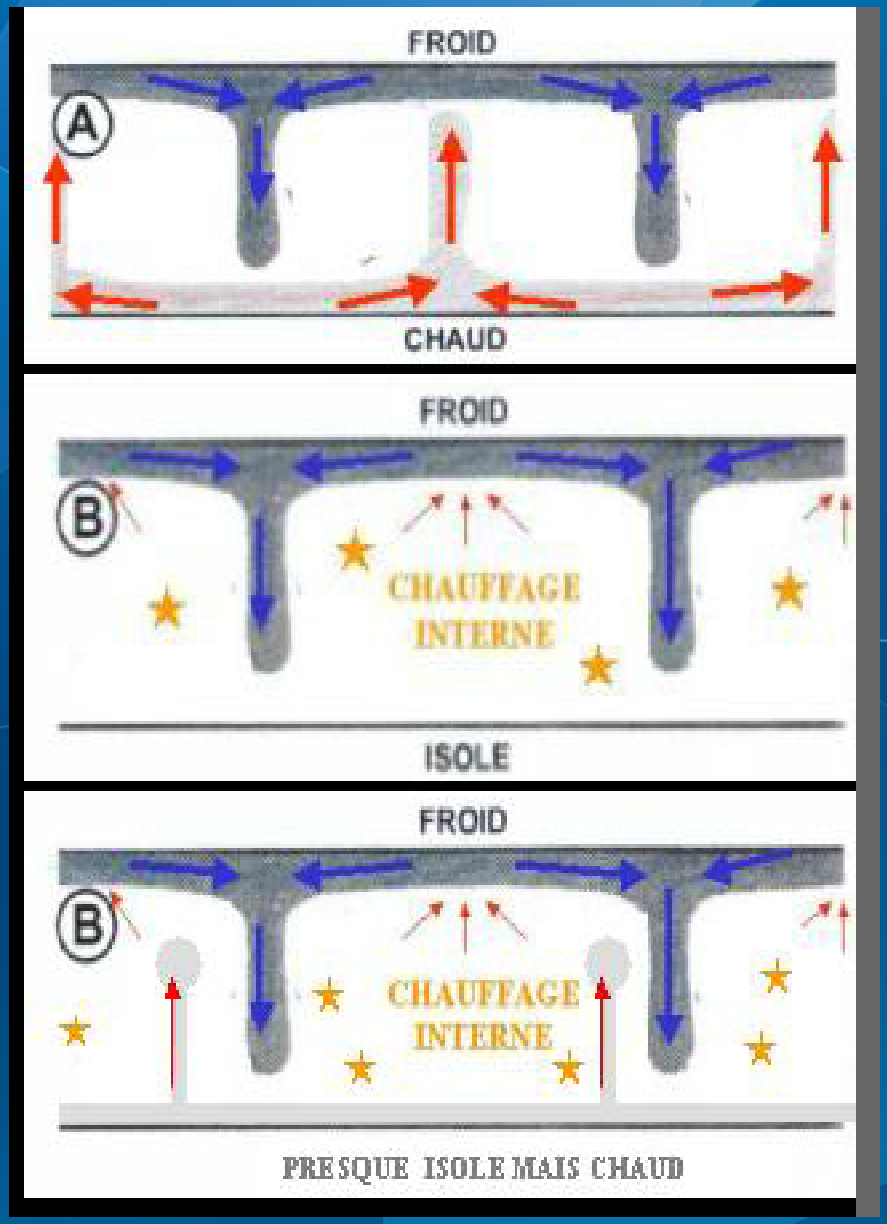
Figure 1. Cross sections of mantle P-wave (A) and S-wave (B) velocity variations along a section through the southern United States. The endpoints of the section are 30.1°N, 117.1°W and 30.2°N, 56.4°W. The images show variations in seismic velocity relative to the global mean at depths from the surface to the core-mantle boundary. Blues indicate faster than average and reds slower than average seismic velocity. The large tabular blue anomaly that crosses the entire lower mantle is probably the descending Farallon plate that subducted over the past ~100 m.y. Differences in structure between the two models in the transition zone (400 to 660 km depth) and at the base of the mantle are probably due to different data sampling in the two studies.

Les plaques coulent dans le manteau

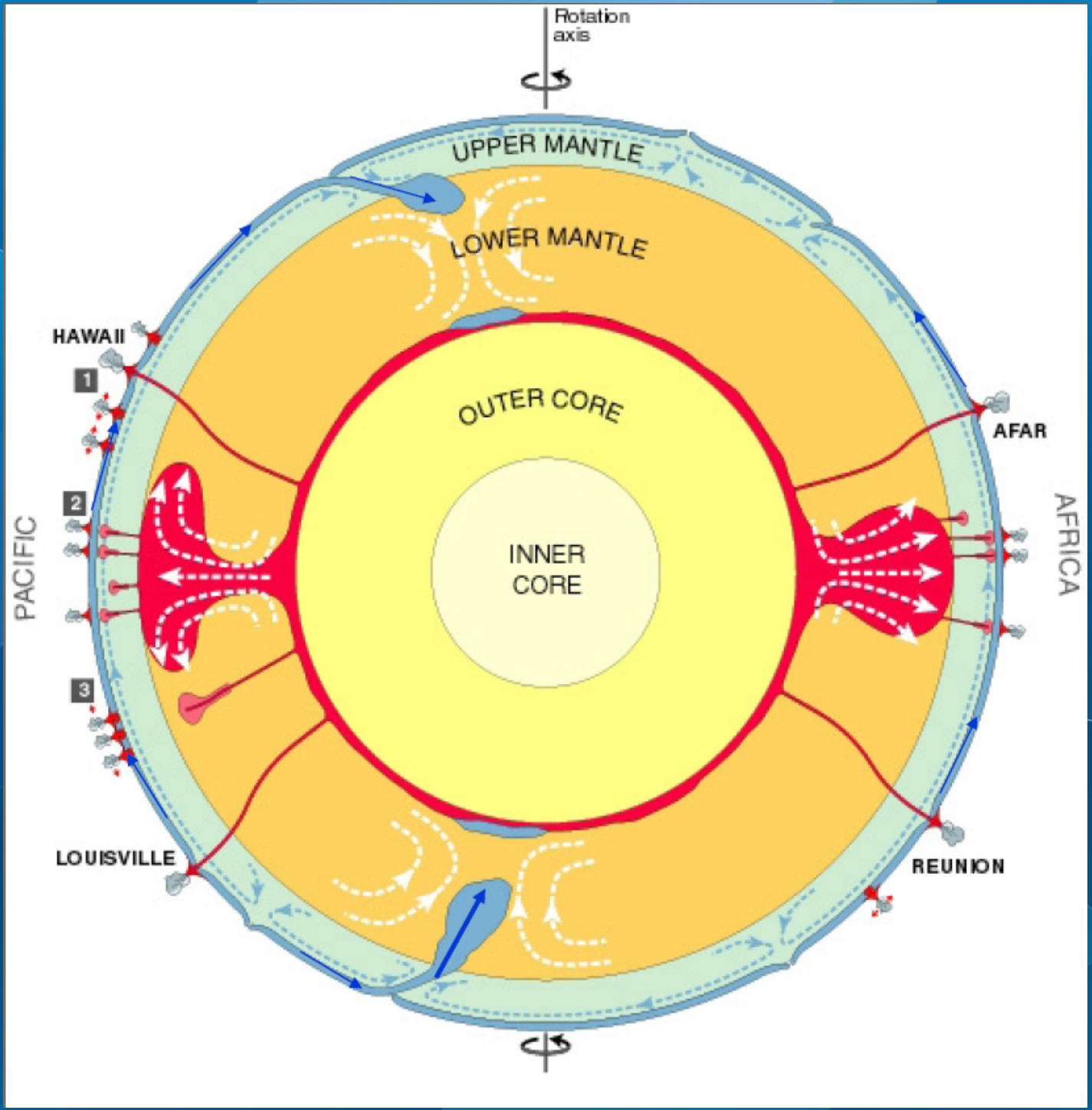


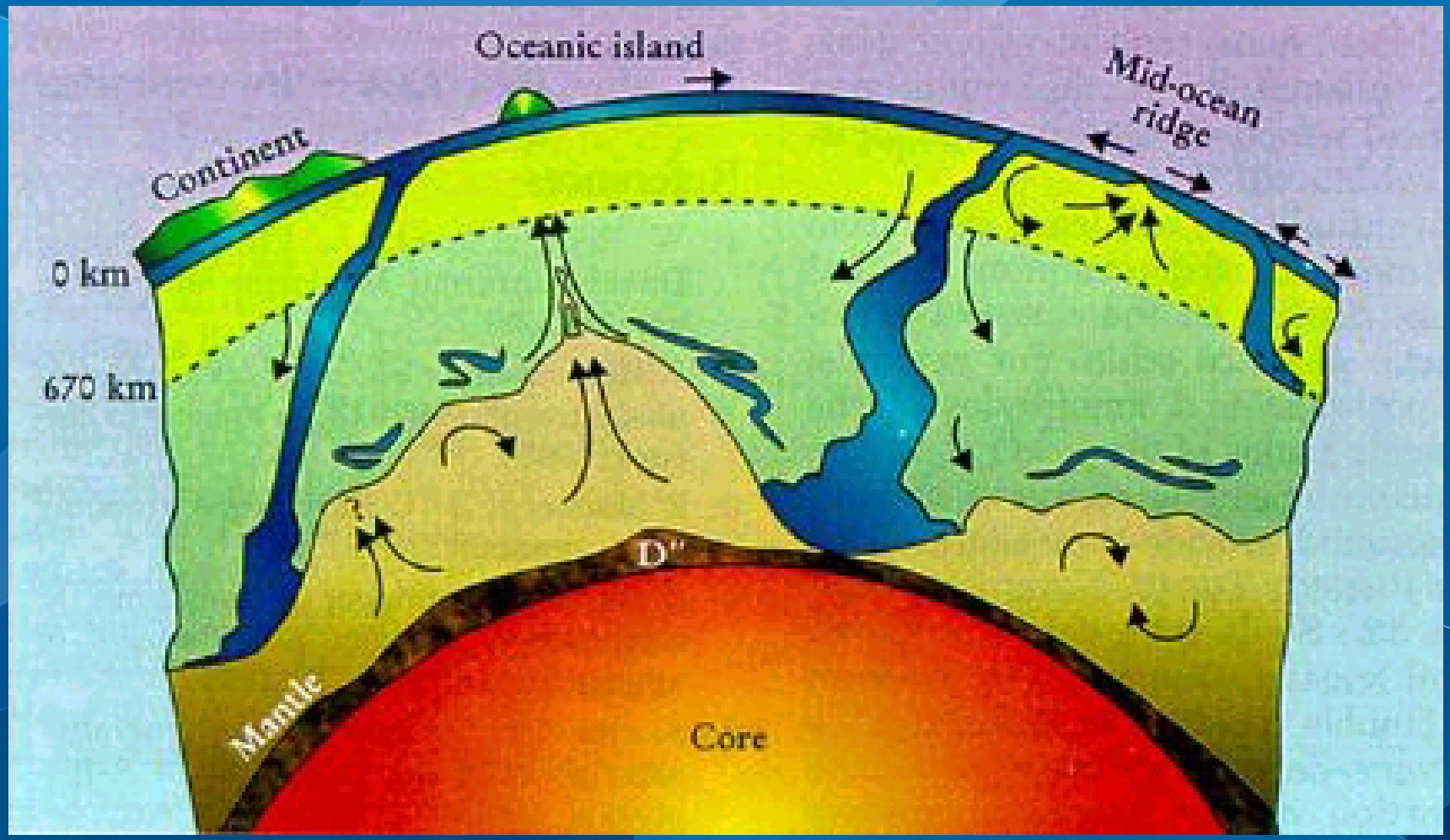
Les panaches existent (Hawaii)

Pour expliquer les points chauds, le 3eme modèle convient

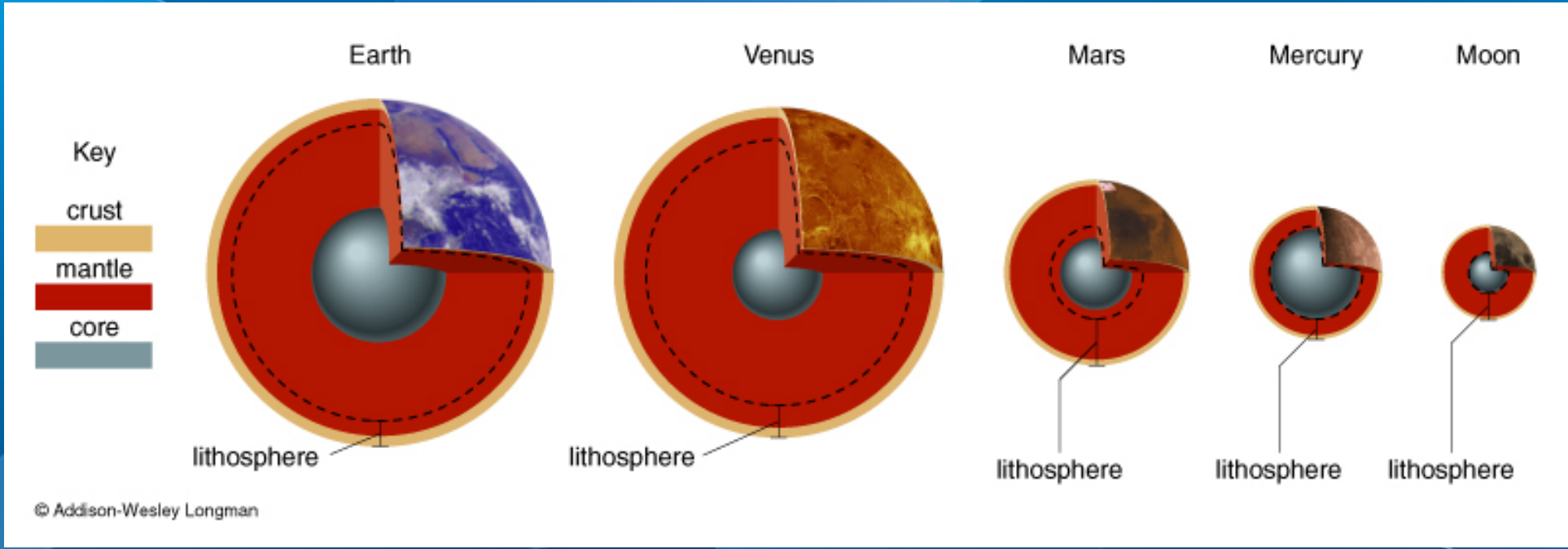


Bilan de la dynamique de la Terre


Rotation axis
UPPER MANTLE
LOWER MANTLE
OUTER CORE
INNER CORE
HAWAII
1
2
3
PACIFIC
LOUISVILLE
AFAR
AFRICA
REUNION


Oceanic island
Mid-ocean ridge
Continent
0 km
670 km
D''
Mantle
Core

Influence de la masse d'une planète sur son évolution



- Les planètes + petite refroidissent plus vite => lithosphère plus épaisse => Rayleigh + petit
- Lune n'a pas forcément de noyau
- Mercure a un noyau disproportionné.
- Terre a deux types de croutes + tectonique active

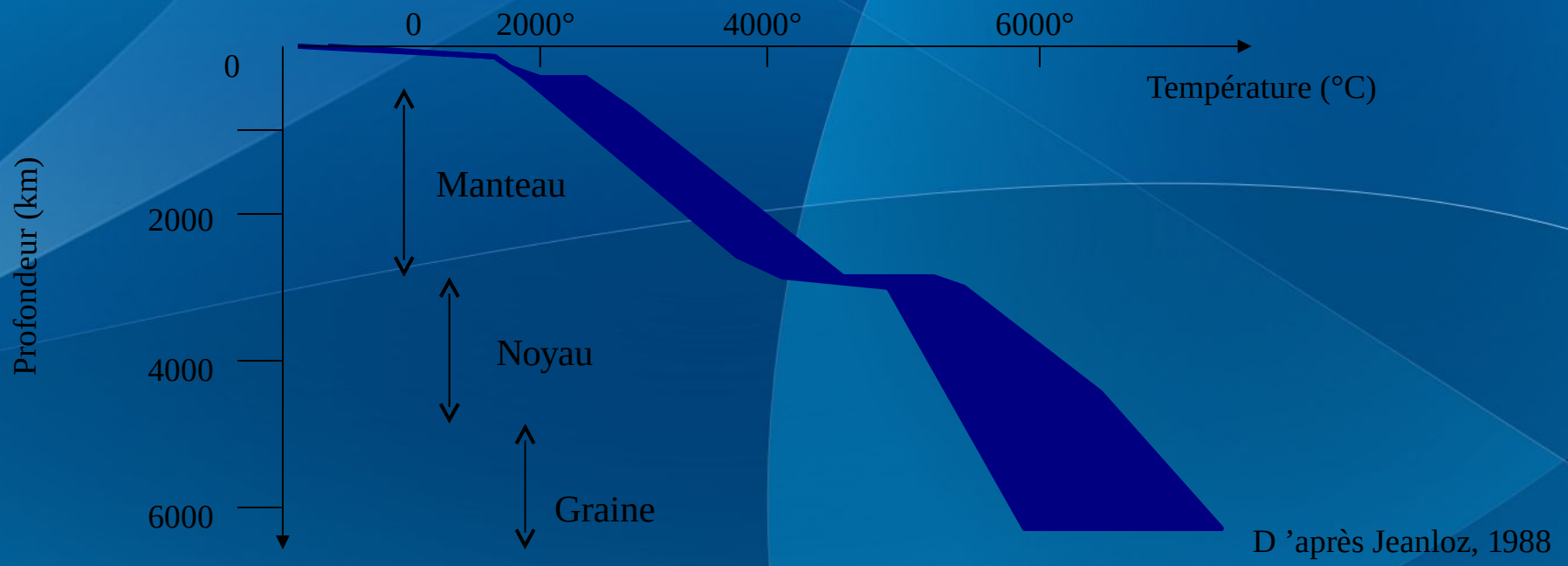
La taille de la planète détermine son avenir !!!!

- Si on multiplie par 2 la taille d'une planète :
  - Refroidissement 4x plus rapide (plus de surface)
  - Mais i8x plus de chauffage interne (plus de volume)
  - => Le rapport volume/surface est + important
  - => Les planètes les plus grandes restent chaudes et peuvent convecter plus longtemps.

Que se passe t-il si une planète est trop petite ?

- Gravité faible => atmosphère s'échappe
- Refroidissemment rapide => pas de convection => pas de champ magnétique, pas de tectonique des plaques
- Meme si tectonique des plaques, la profondeur à laquelle une plaque subductée se déshydrate est + importante car la gravité et donc la pression est plus faible.
- => Il est difficile d'apporter le carbone et l'eau en surface
- => Vie telle qu'on la connait sur Terre est impossible !

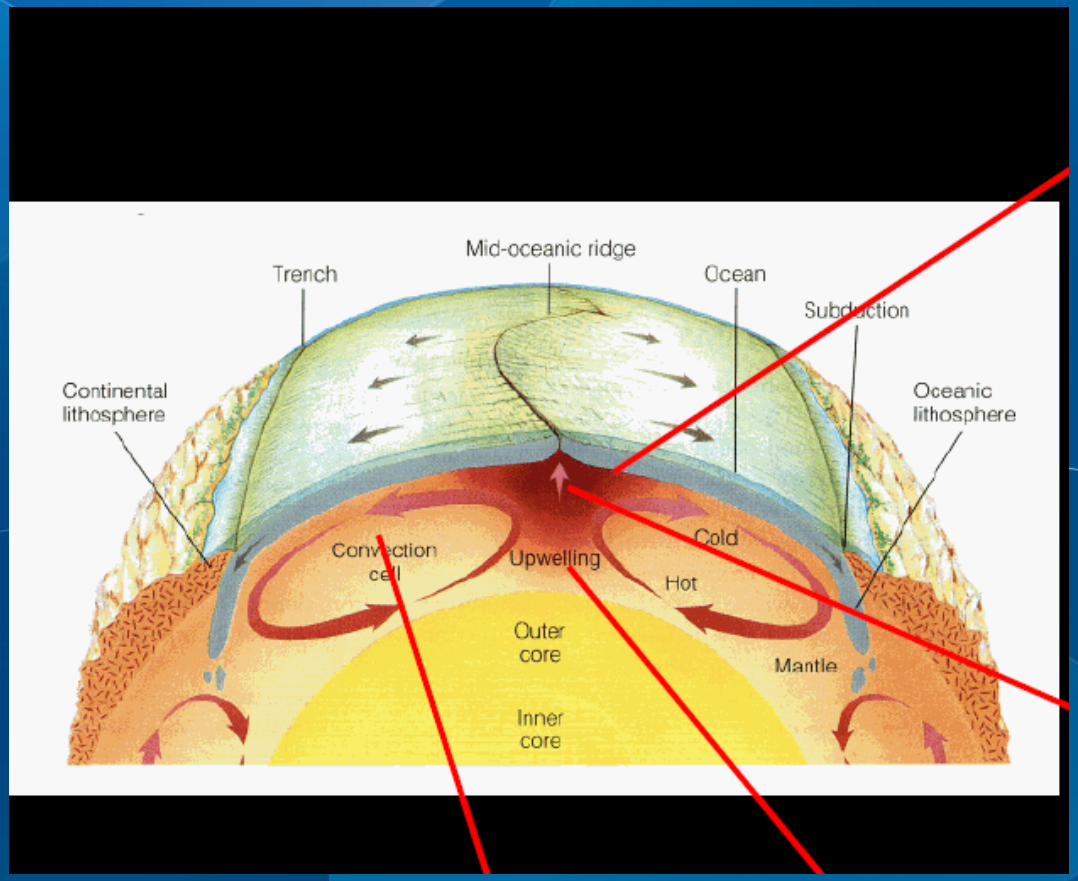
profondeur	Température	
30 km	700 °C	base de croûte Continentale
70 km	1000° C	
100 km	1350° C	base de lithopshère
670 km	1600° C	limite manteau Inf/Sup.
2900 km	4700° - 5500° C	limite manteau/noyau
5100 km	5500° - 7200° C	limite noyau/graine
6380 km	6600° ± 1000° C	centre de la Terre

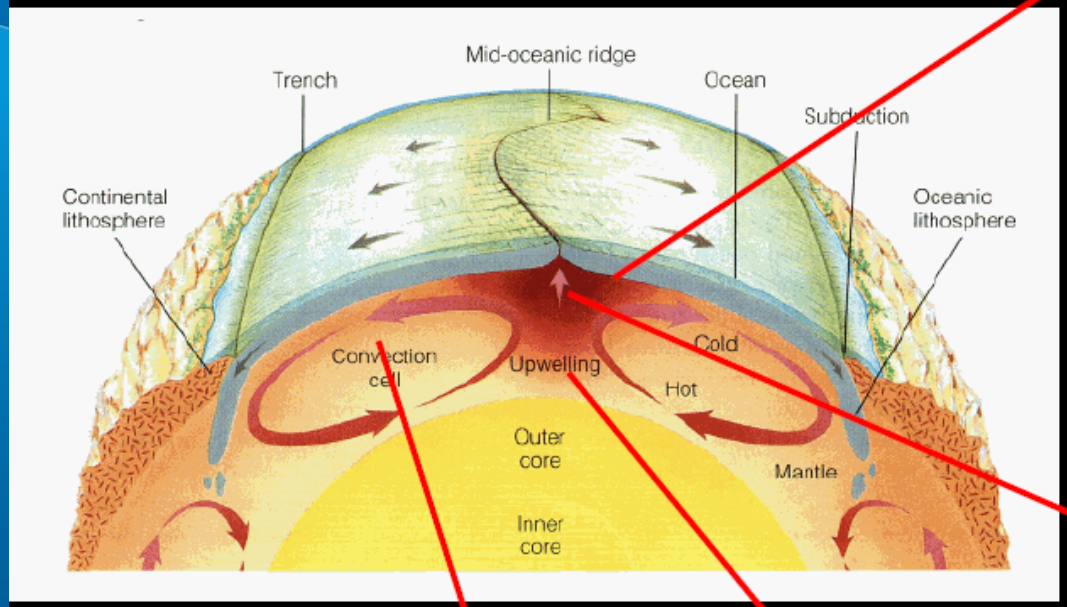


D ’après Jeanloz, 1988

Les idées fausses sur la convection et la dynamique de la Terre

Qu'est ce qui paraît incorrect?



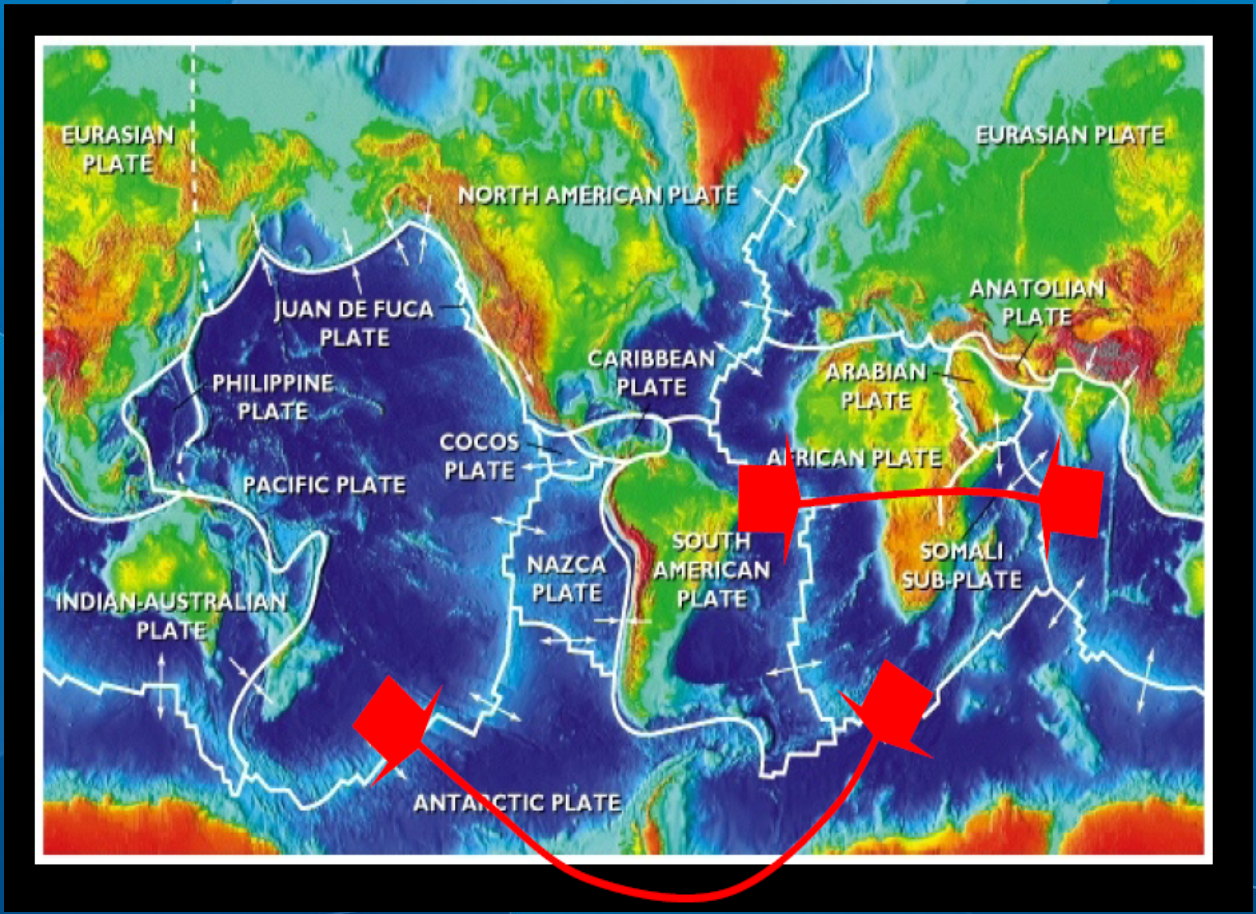


Le manteau est couleur « lave », ce qui renforce l'idée d'un manteau liquide

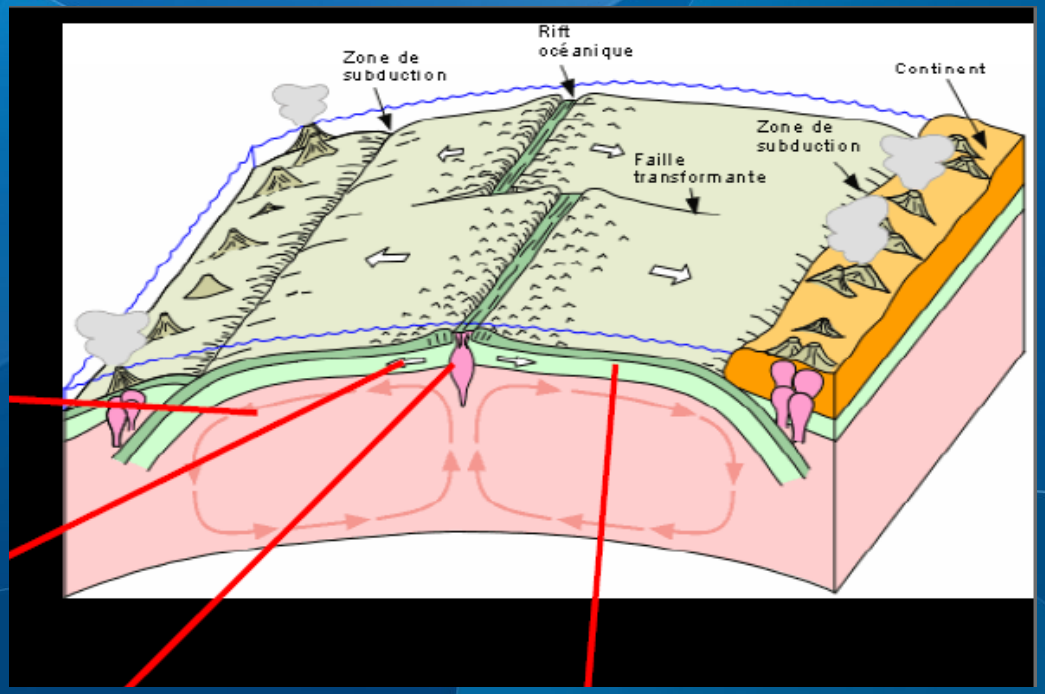
La dorsale est au centre du schéma, ce qui, implicitement, lui donne un rôle majeur, qu'elle n'a pas

On a l'impression que les mouvements sous-lithosphériques entraînent la lithosphère, alors que c'est l'inverse

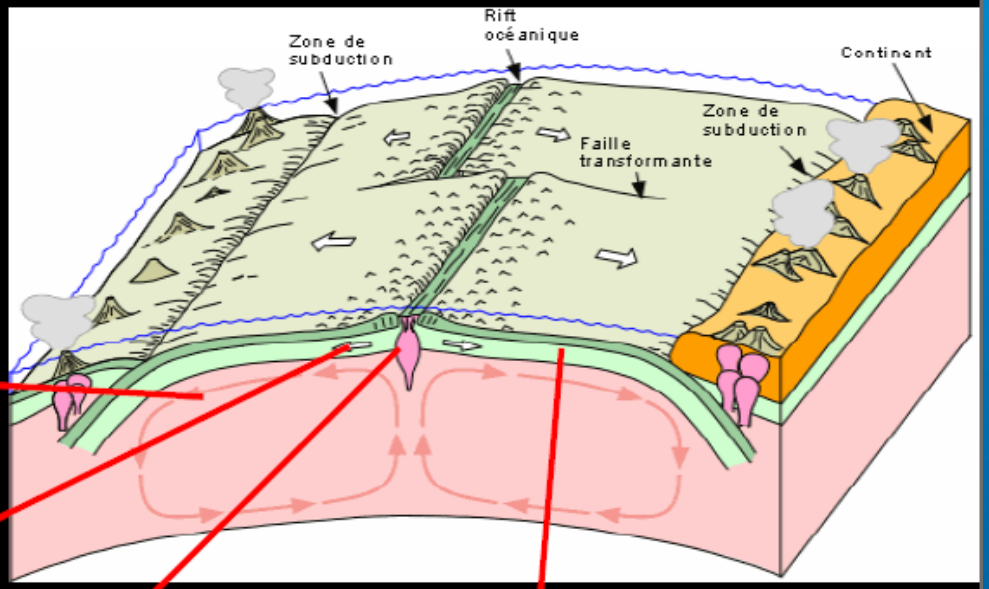
L'ascension sous les dorsales part de la base du manteau, ce qui est faux



- Si les dorsales avaient un rôle moteur majeur dans la tectonique des plaques imaginez ce que deviendraient les plaques entourées de dorsales


Rift
océanique
Zone de
subduction
Continent
Zone de
subduction
Faille
transformante

On a l'impression que les mouvements asthénosphèriques (flèches roses) sont plus rapides que les mouvements de la lithosphère (flèches vertes). C'est l'inverse !

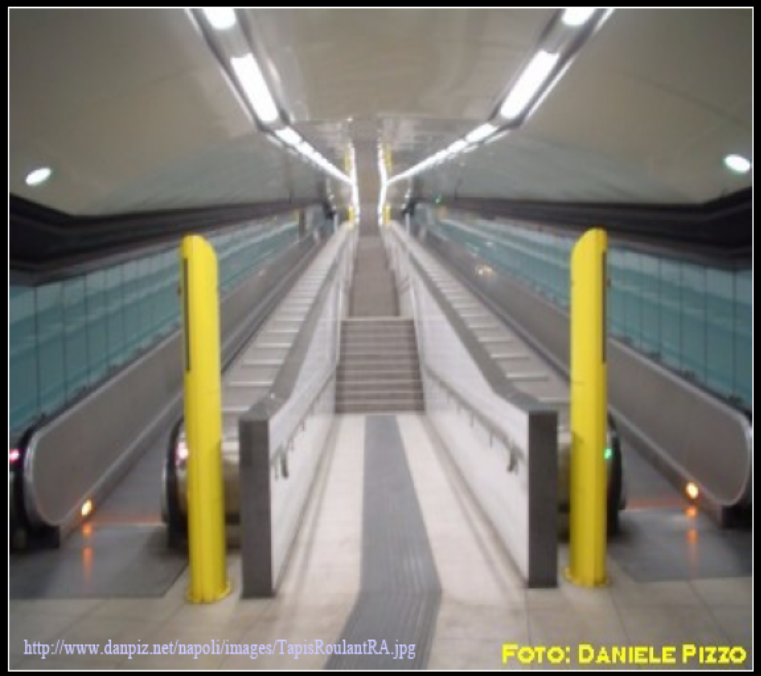


La lithosphère océanique à une épaisseur constante, ce qui est faux

Ce figuré donne l'impression de « chambres magmatiques » s'enracinant dans l'asthénosphère, alors qu'elles sont intra-crustales

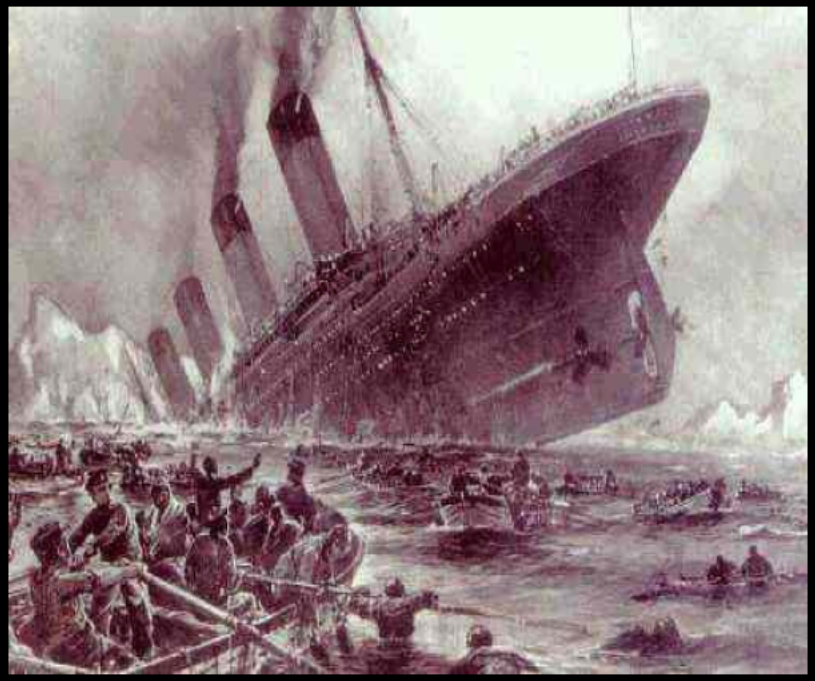
Prendre une casserole, chauffée par le bas et où le refroidissement superficiel ne saute pas aux yeux comme analogie de la convection mantellique

La Terre n'est pas réchauffée par le bas, mais dans sa masse, et est refroidie par le haut



Comparer l'expansion des fonds océaniques et la tectonique des plaques à un tapis roulant

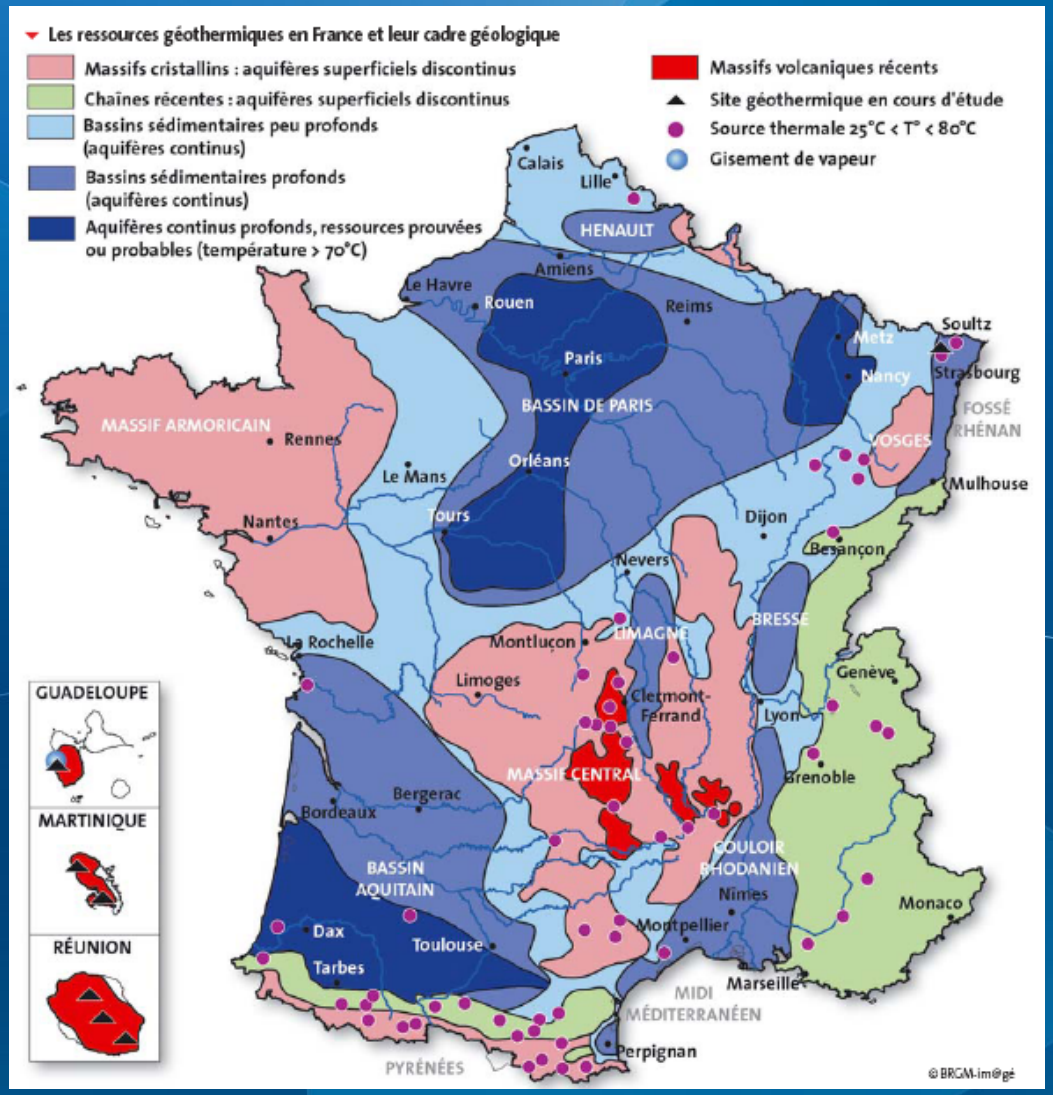
Un tapis roulant est mis en mouvement par des engrenages situés sous lui ; et ce n'est pas l'asthénosphère qui met en mouvement la lithosphère, mais l'inverse !



La phrase classique « quand une lithosphère océanique rencontre une lithosphère continentale, c'est la lithosphère la plus dense (l'océanique) qui subduit ! »

Quand quelque chose coule (lithosphère océanique, Titanic …), ce qui importe, ce n'est pas la densité de ce qu'il y a à coté (lithosphère continentale, iceberg …), mais la densité de ce qu'il y a dessous (asthénosphère, eau de mer …) !

Utilisation des sources thermales



- Creation croute continentale
- Bilan creation oceanique (formation basalte, pillow lava,...)
- Exemple du Chenaillet.
- Trappe

Croute Terrestre

- Croute océanique : ~7 km d'épaisseur. Roche type est du basalte
- Croute continentale : ~30 Km d'épaisseur (80 Km au Tibet). Roche type du granite
- Composition chimique : Si02, Al

D'ou vient l'energie de la permettant convection ?

- La chaleur peut provenir de 3 sources :
  - 1) L'énergie d'acrétion
  - 2) L'énergie de différentiation (tout les changements de phase exothermiques)
  - 3) La désintégration d'éléments radioactifs

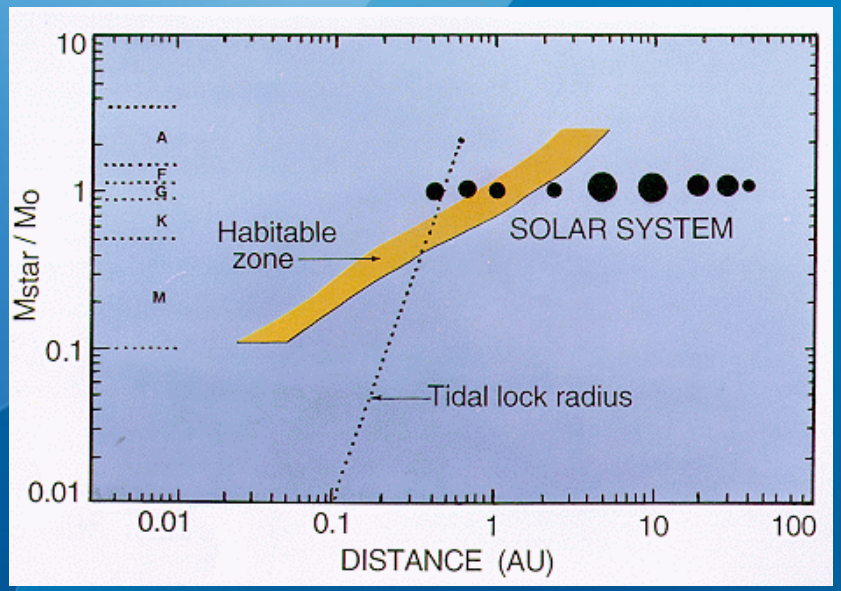
Différenciation - mouvement	Désintégration Radioactive	Total	Flux moyen
7,3 TW	38 TW	42,3 TW	70 mW/m²

Chaleur interne

En 1ère approximation → Dynamique interne de la planète

The Early Earth

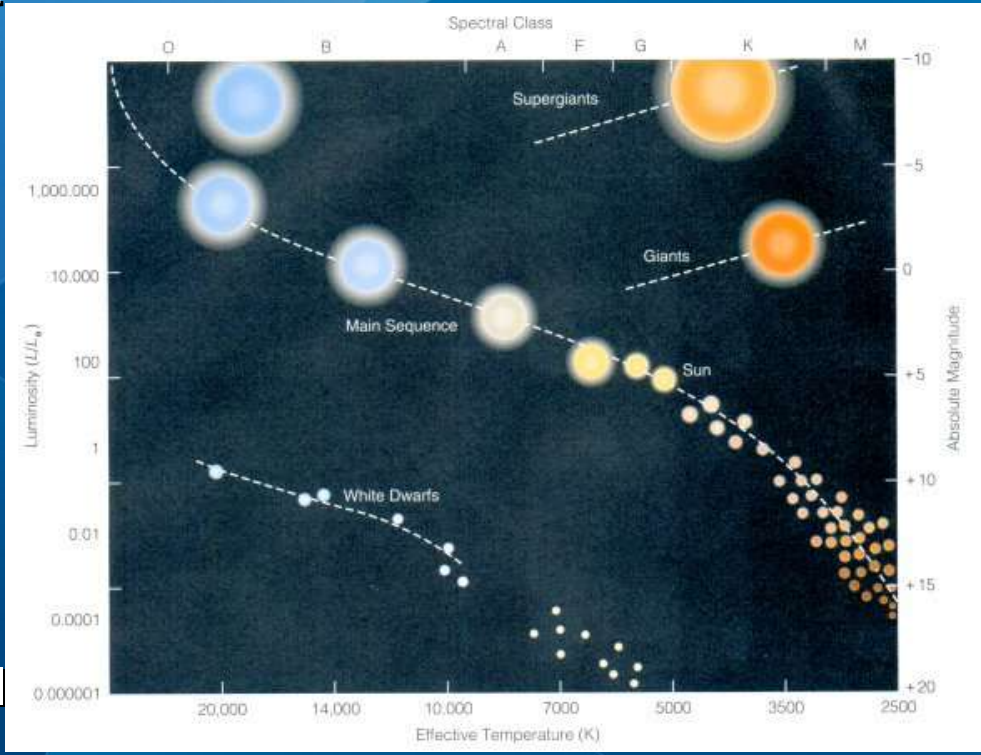
- We know life arose in at least one place…
  - The solar system is half way out in the galaxy
    - Safe from other stars
    - Enough raw material to build planets
  - Earth orbits a mediocre star
    - Big enough to power life
    - Small enough to last a long time
  - Earth is in the habitable zone
    - Liquid water is common
  - We have a nearby friendly gas giant planet – Jupiter
    - Cleared away many small bodies
    - Didn't migrate close to the sun and kill us all
  - Earth seems to have struck the balance in regulating atmospheric CO_2
    - Plate tectonics



- You need the right kind of star

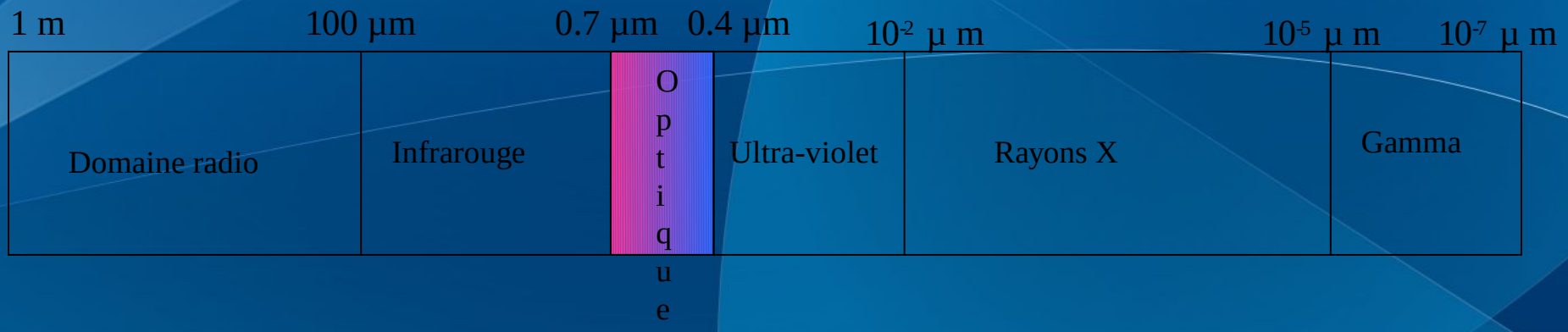
- Supermassive stars burn up their fuel and explode
  - They live only a few million years
  - Not enough time to develop life
    - Or even planets

- Very small stars last almost forever
  - Long after the galaxy is a cold dead place these little stars will still be shining feebly
  - They don't supply much solar energy to planets
  - The planetary systems also tend to be low-mass

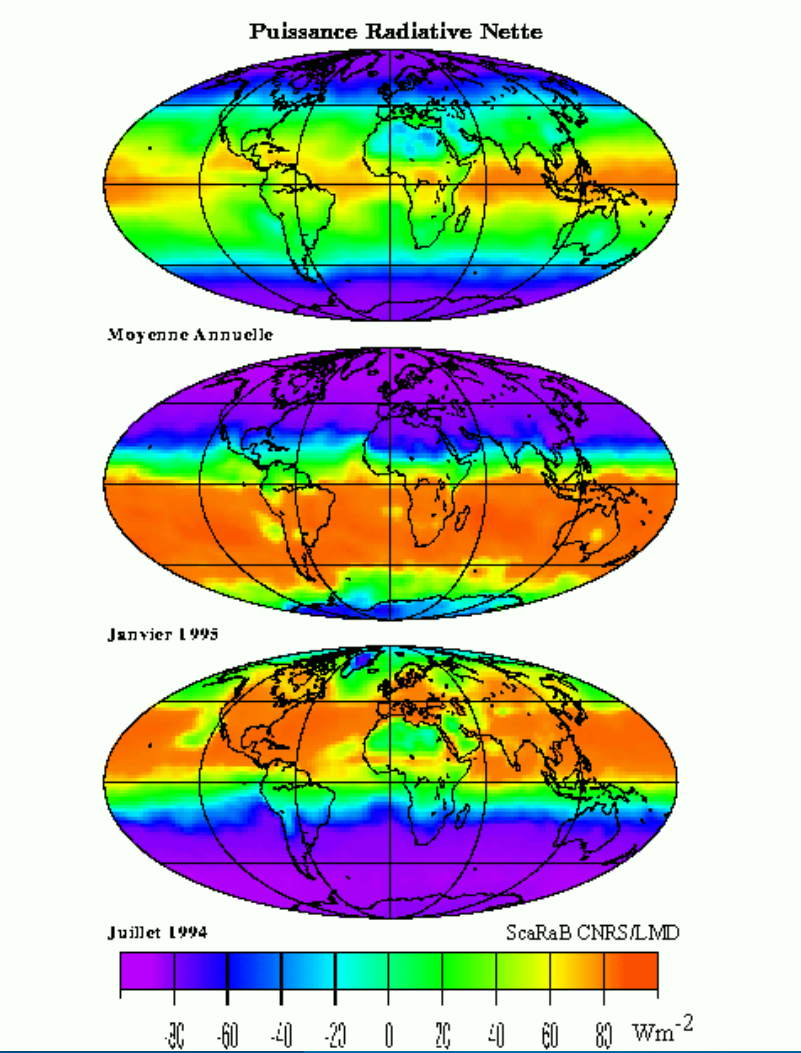


La Terre renvoie également de l'energie

- La Terre :
  - reçoit 340 W.m-2 du soleil par rayonnement
  - Produit de l'energie (radioactivité) et réemet XX W.m-2 en emettant des infrarouge



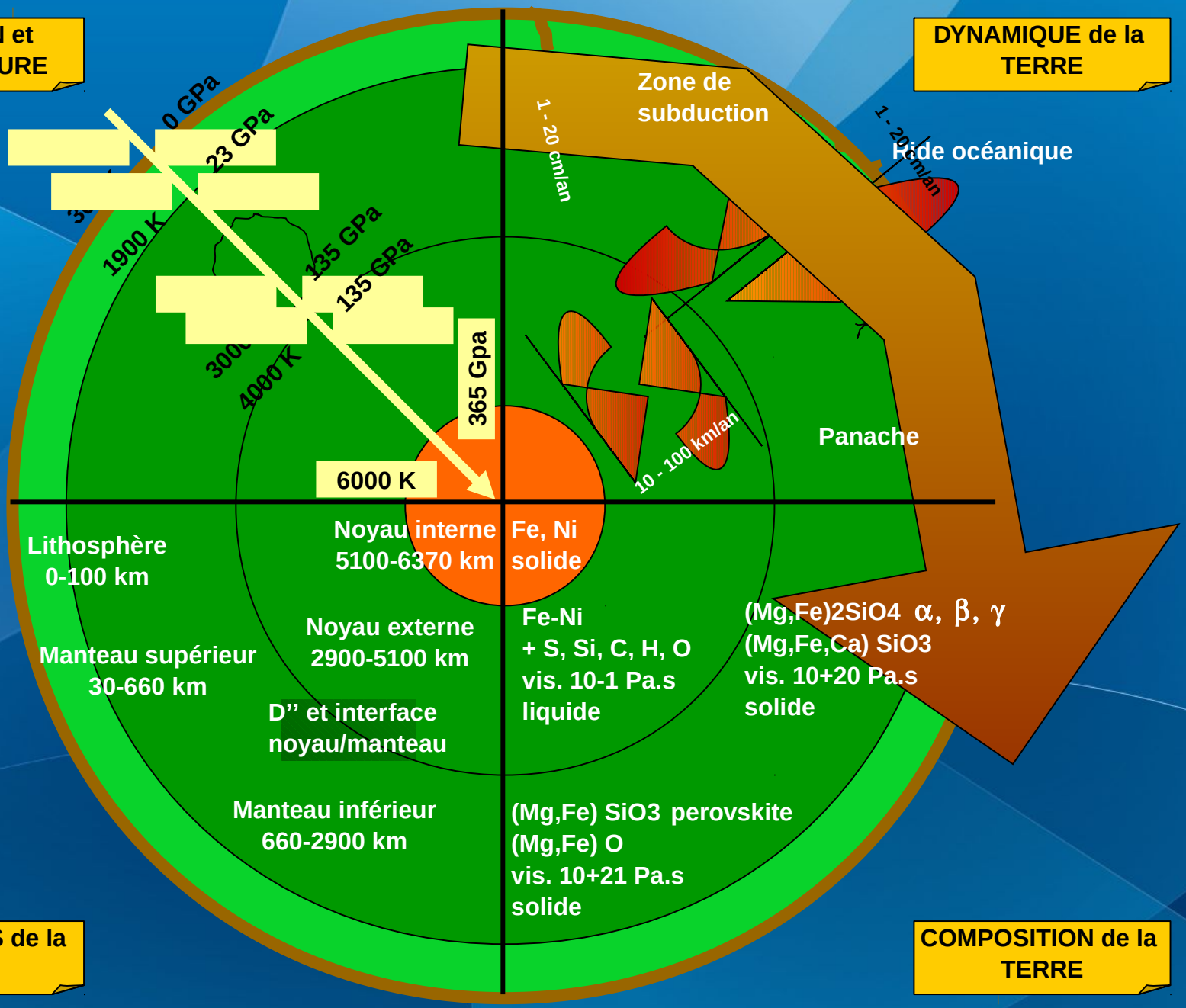
Différence entre le flux d'energie recu du soleil, et l'energie émise par la Terre sous forme d'IR



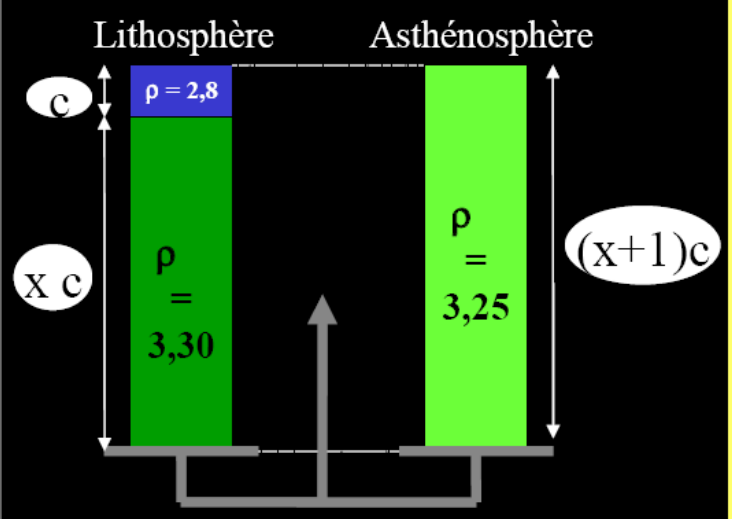
Moyenne annuelle

Hivers

été


PRESSION et TEMPERATURE
DYNAMIQUE de la TERRE
0 GPa
23 GPa
1900 K
135 GPa
135 GPa
4000 K
365 Gpa
6000 K
Zone de subduction
1 - 20 cm/an
1 - 20 cm/an
Ride océanique
10 - 100 km/an
Panache
Lithosphère
0-100 km
Manteau supérieur
30-660 km
Noyau interne
5100-6370 km
Noyau externe
2900-5100 km
D'' et interface
noyau/manteau
Manteau inférieur
660-2900 km
Fe, Ni
solide
Fe-Ni
+ S, Si, C, H, O
vis. 10-1 Pa.s
liquide
(Mg,Fe)2SiO4 α, β, γ
(Mg,Fe,Ca) SiO3
vis. 10+20 Pa.s
solide
(Mg,Fe) SiO3 perovskite
(Mg,Fe) O
vis. 10+21 Pa.s
solide
ENVELOPPES de la TERRE
COMPOSITION de la TERRE

Initiation de la subduction



Même volume à droite (asthénosphère) et à gauche (lithosphère océanique).

Équilibre si cela correspond à des mêmes masses, donc à des mêmes densités globales

Il y a équilibre de la balance si :

$$2{,}80 \,.\, c + 3{,}30 \,.\, xc = 3{,}25 \,.\, (x+1)\, c$$

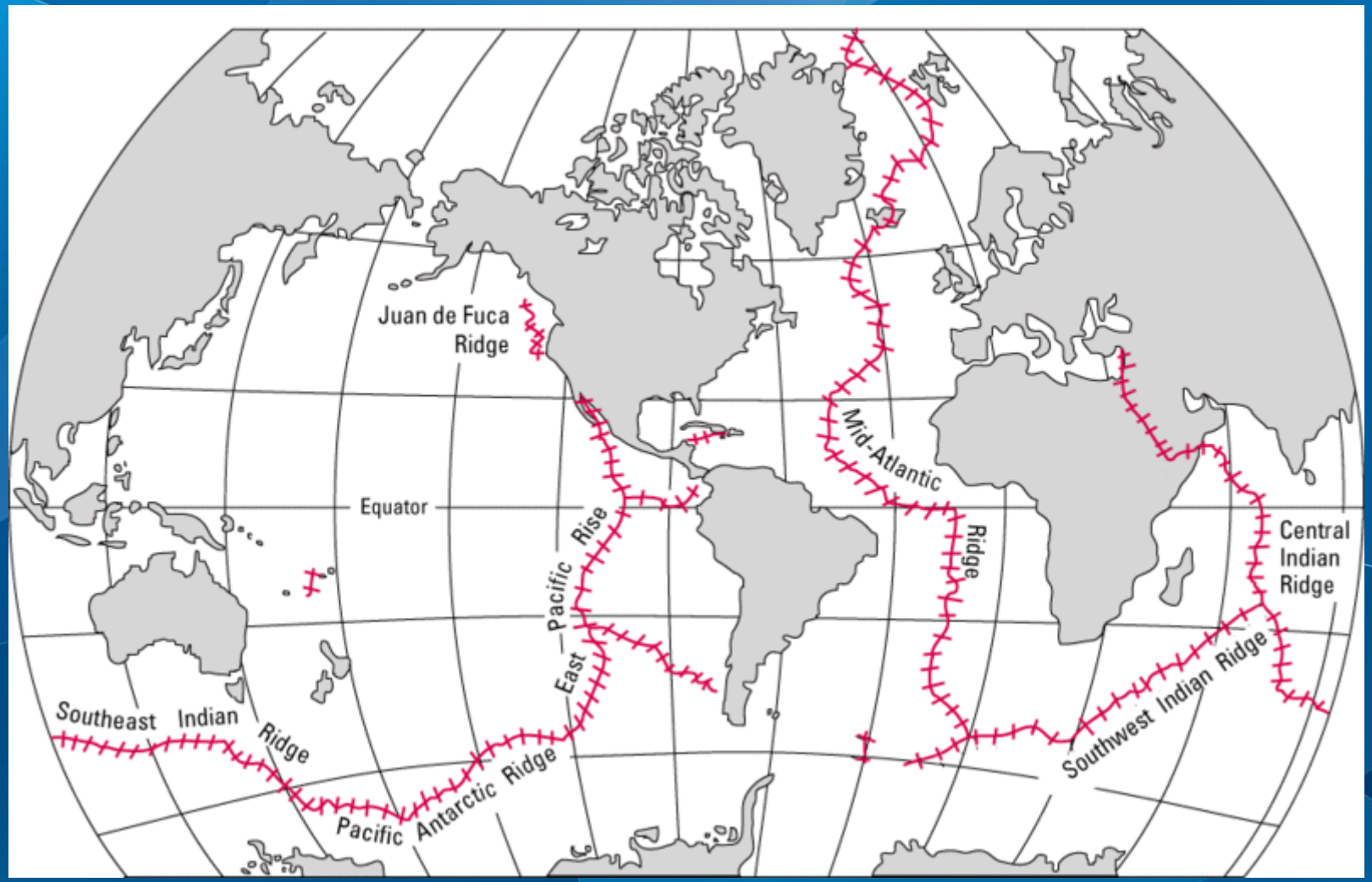
$$\rightarrow \quad x = 9$$

Dès que le manteau lithosphérique (= le manteau refroidi) atteint 9 fois l'épaisseur de la croûte, c'est à dire dès que la lithosphère globale est égale à 10 fois la croûte, alors

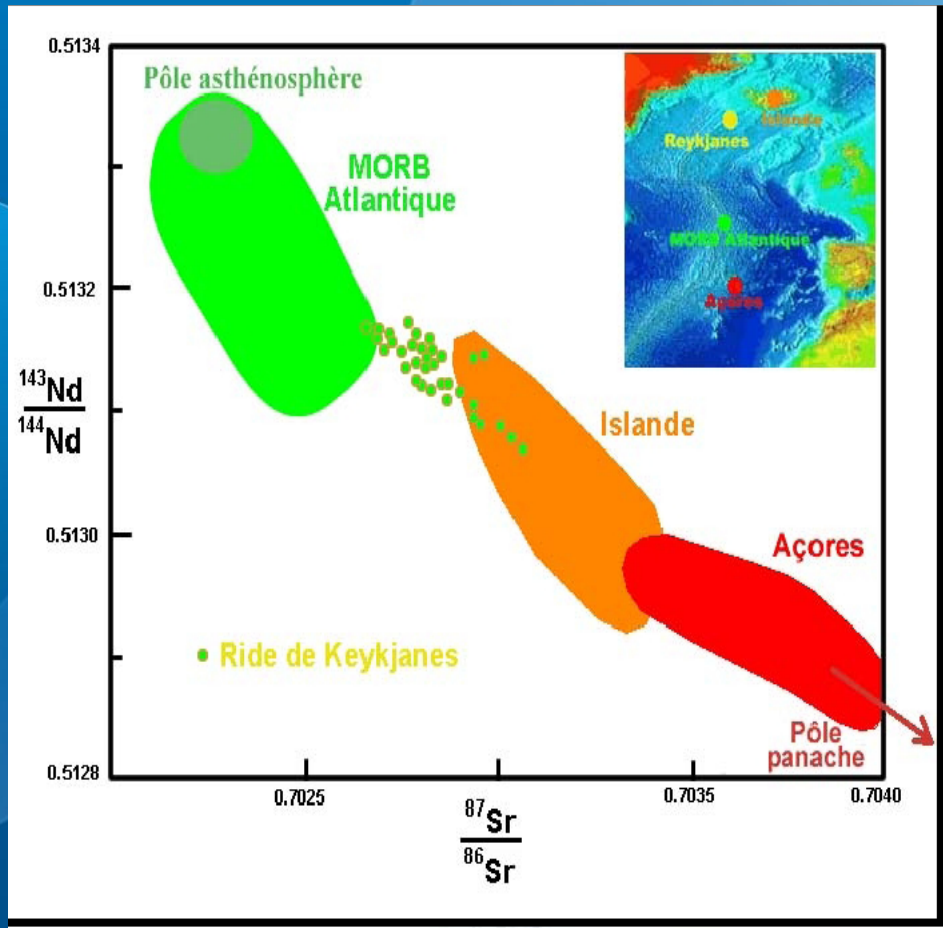
$$\rho_{\text{lithosphère}} = \rho_{\text{asthénosphère}}$$

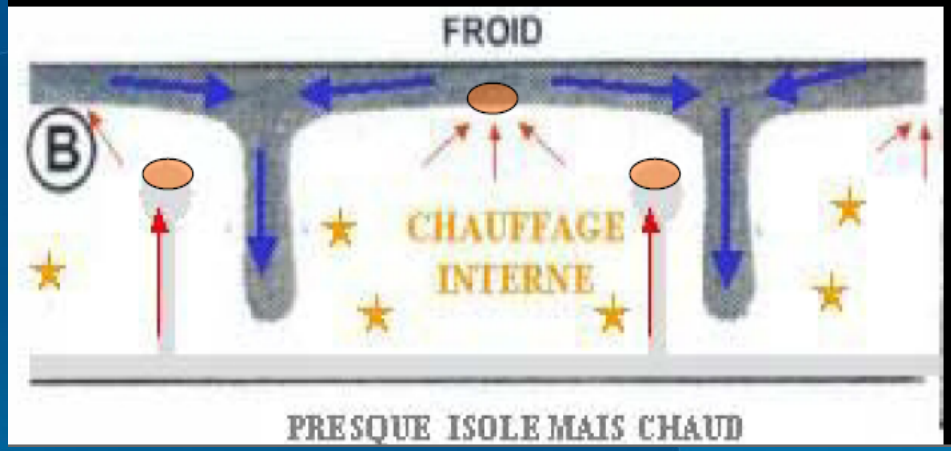
et la subduction est spontanée.

Pour une croûte de 7 km, cela correspond à une lithosphère océanique de 70 km d'épaisseur. Cette épaisseur est obtenue en approximativement 100 MA


Juan de Fuca
Ridge
Equator
East Pacific Rise
Mid-Atlantic Ridge
Central
Indian
Ridge
Southeast Indian Ridge
Pacific Antarctic Ridge
Southwest Indian Ridge

Eurasian plate
North American plate
Eurasian plate
Juan de Fuca plate
Caribbean plate
Filipino plate
Arabian plate
Indian plate
Cocos plate
EQUATOR
Pacific plate
Nazca plate
South American plate
African plate
Australian plate
Australian plate
Scotia plate
Antarctic plate

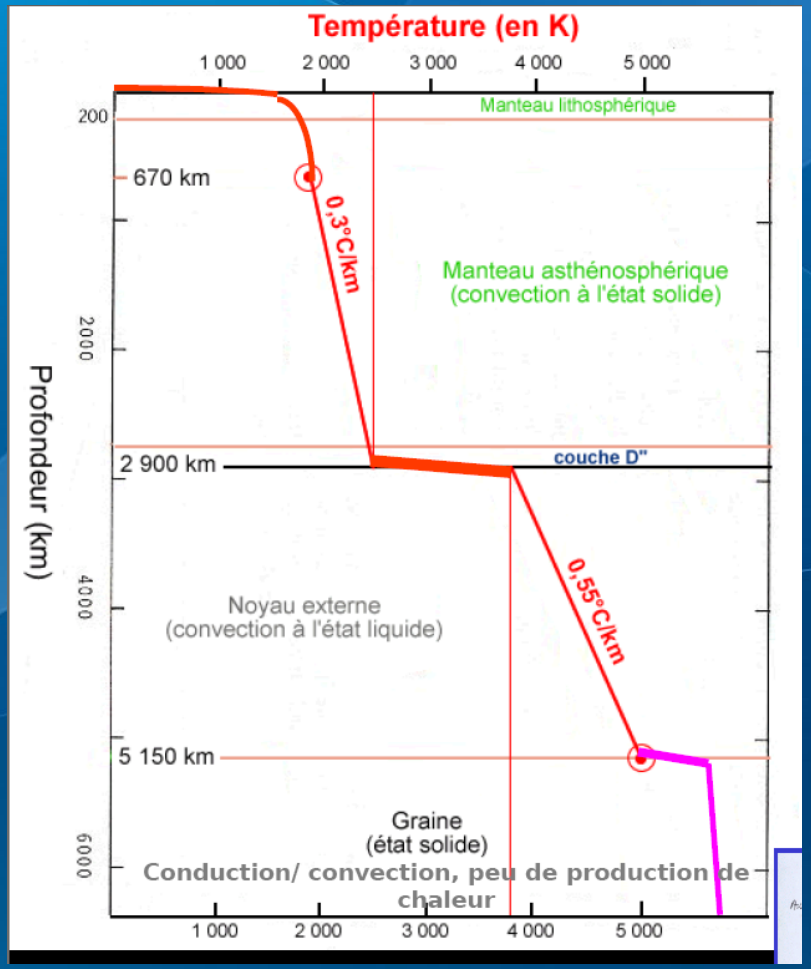




Une autre preuve que le manteau qui fond partiellement sous les dorsales (manteau superficiel) n'est pas le même que celui qui fond sous les points chauds (manteau profond remonté)

● Zone de fusion partielle

Peut-il y avoir fusion partielle du manteau ?



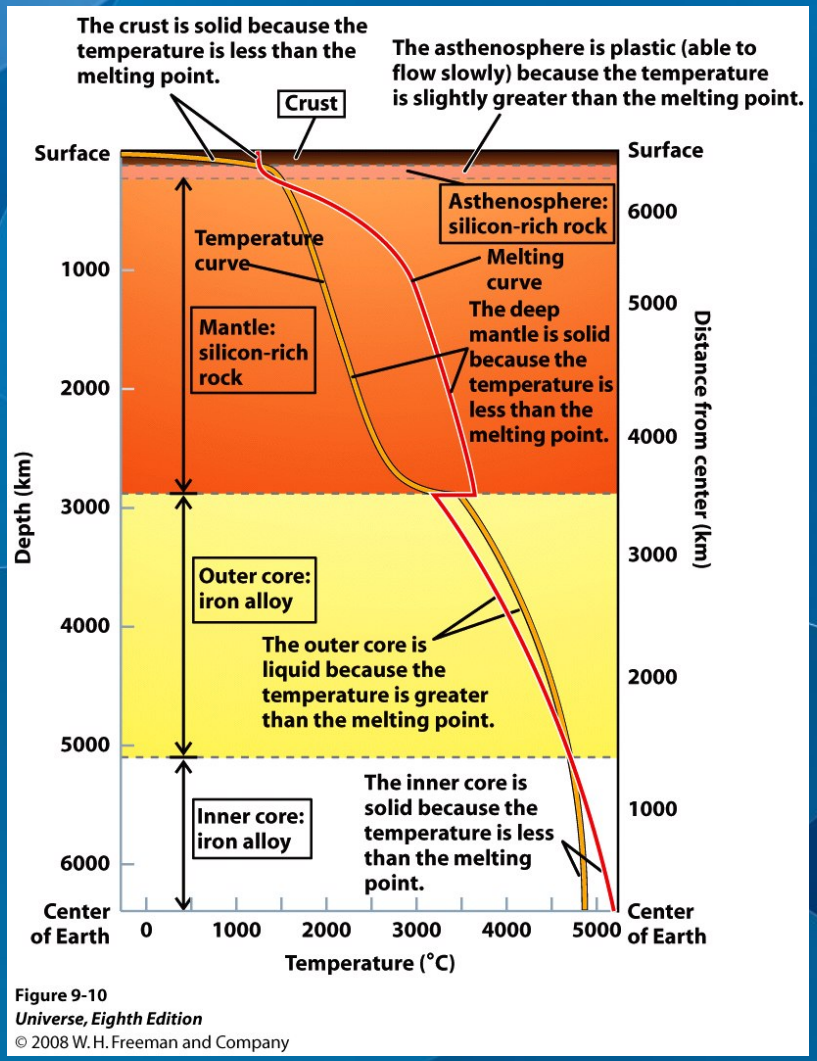


Figure 9-10
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company