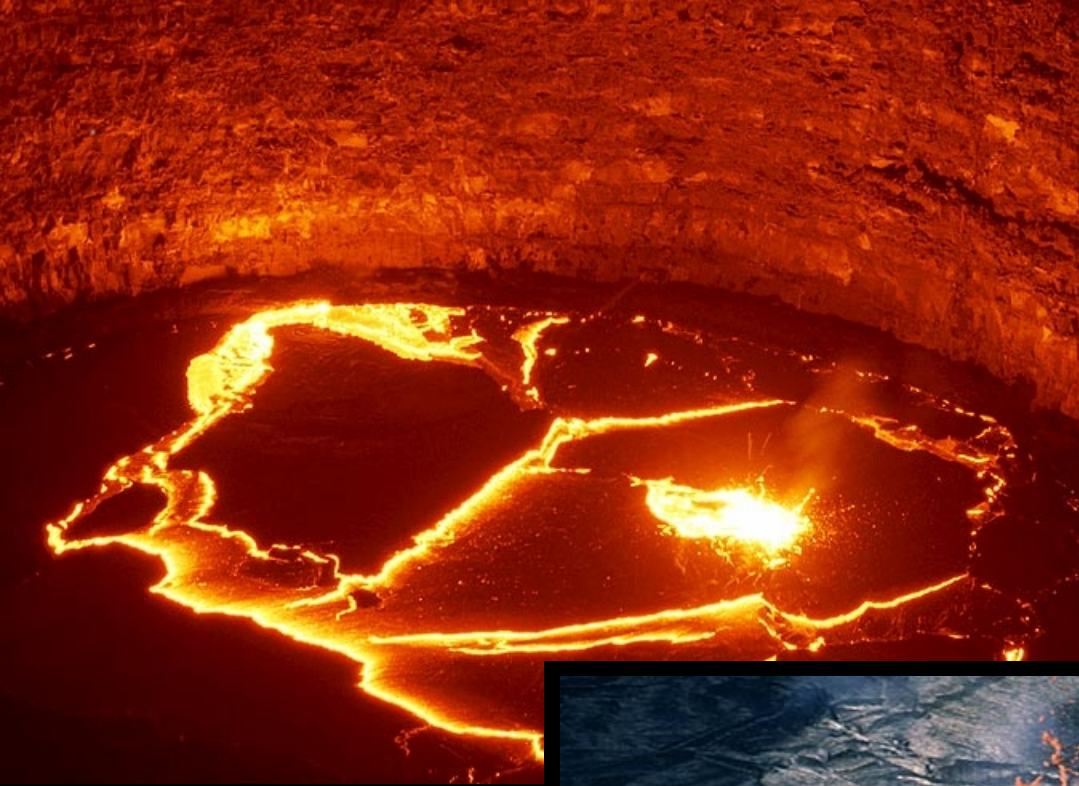


# La convection mantellique,

mythes,  
réalités, et  
questions

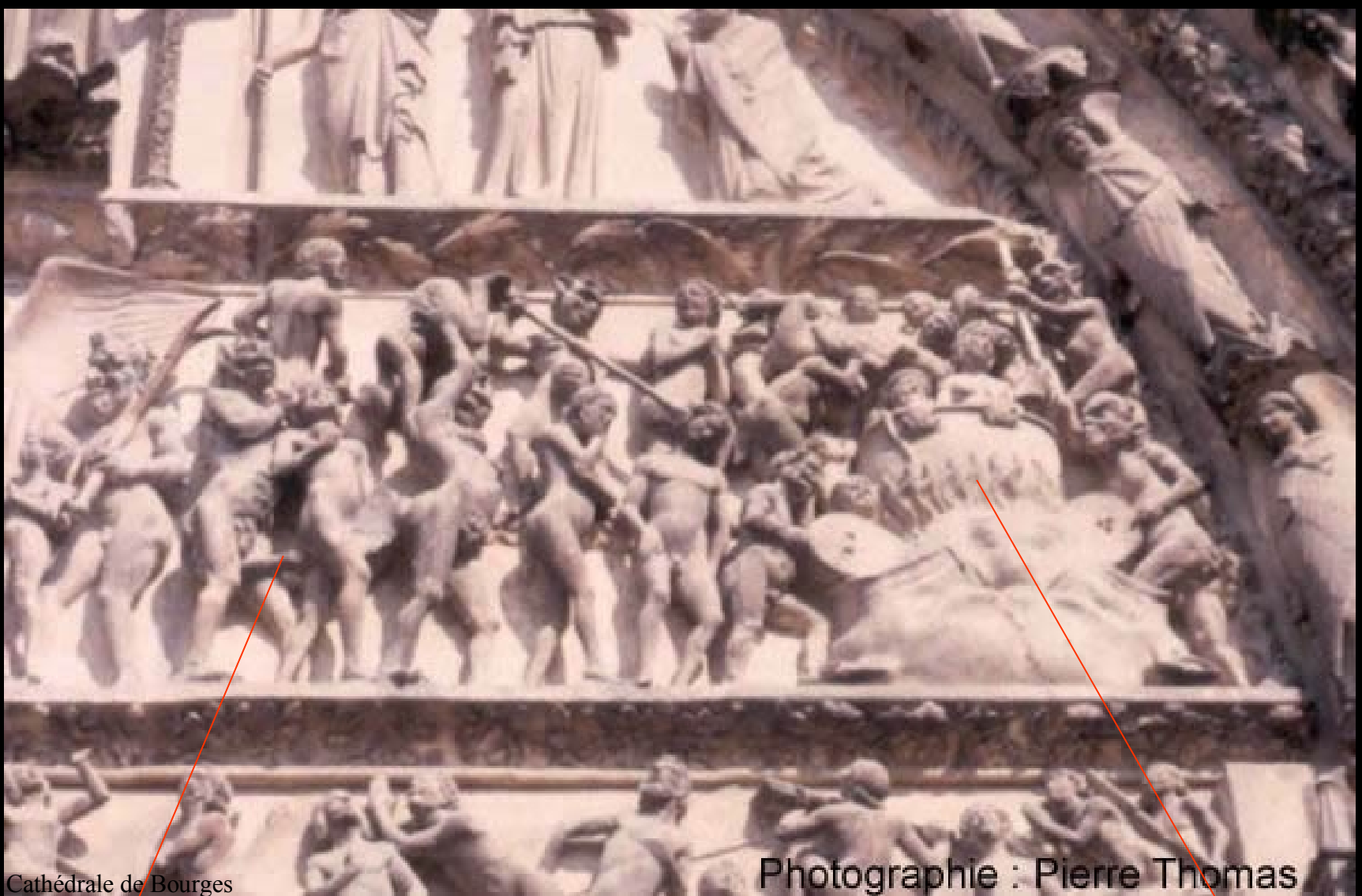






Miniature du XV<sup>ème</sup> siècle, illustrant *La Cité de Dieu*, de Saint Augustin, BNF

**L'Enfer, situé comme chacun sait au centre de la Terre, vu par un artiste du Moyen Âge**



Cathédrale de Bourges

Photographie : Pierre Thomas

L'enfer des biologistes

L'enfer des géologues

**Les damnés descendent en Enfer (au centre de la Terre), figuré par une marmite bouillante**

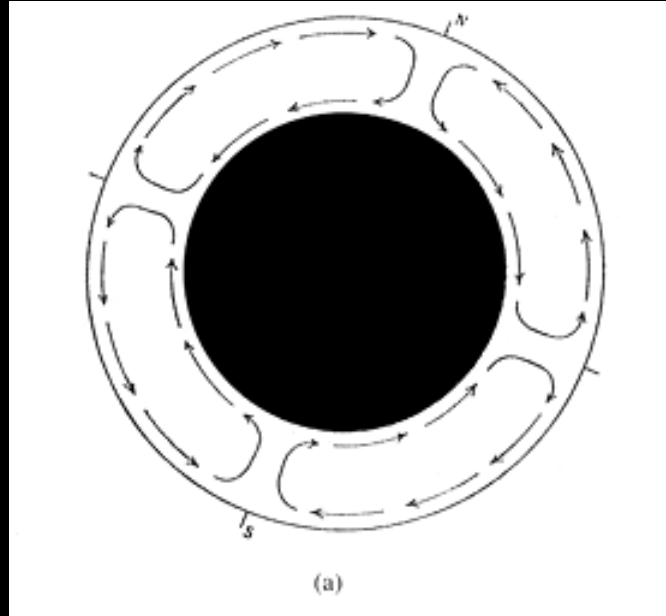




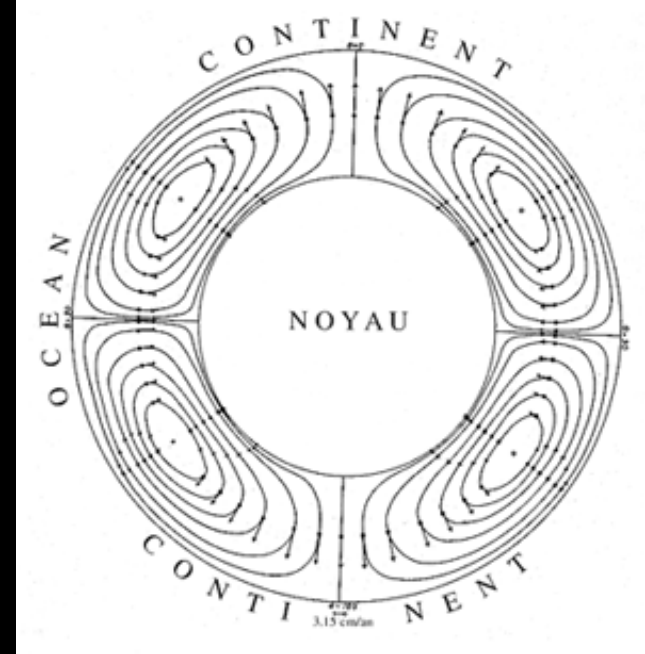
Mundus subterraneus , R.P. Kircher (1602-1680)

**Le centre de la Terre imaginé au 17<sup>ème</sup> siècle**

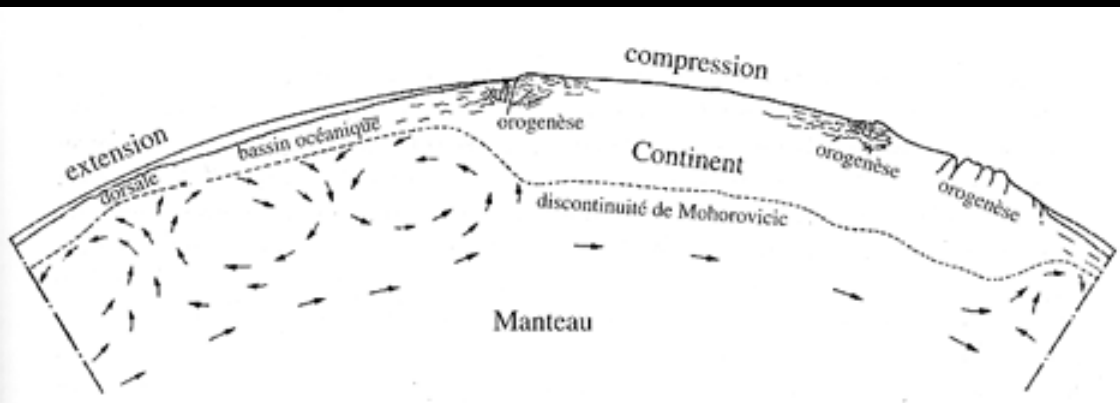




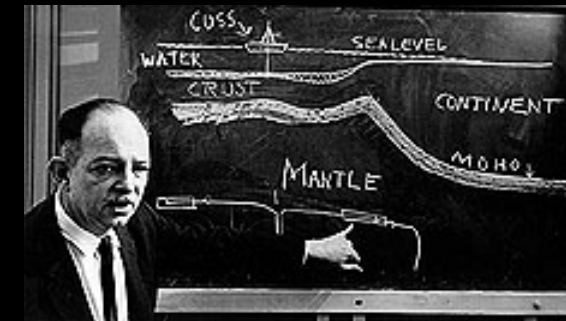
Holmes, 1928



Pekeris, 1935



Kraus, 1958

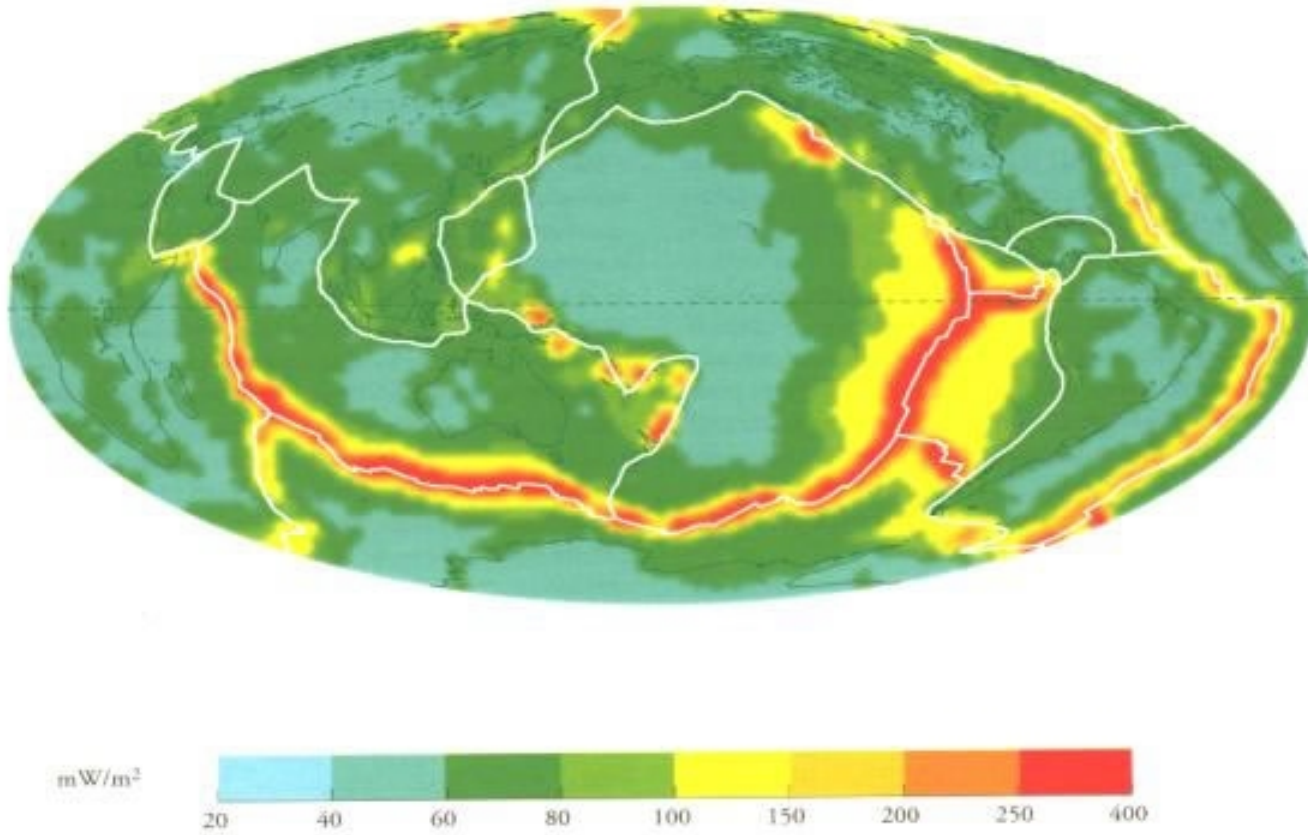


Hess, 1960

**Il y a longtemps que des géologues font convec-  
ter le manteau. Pourquoi ??**

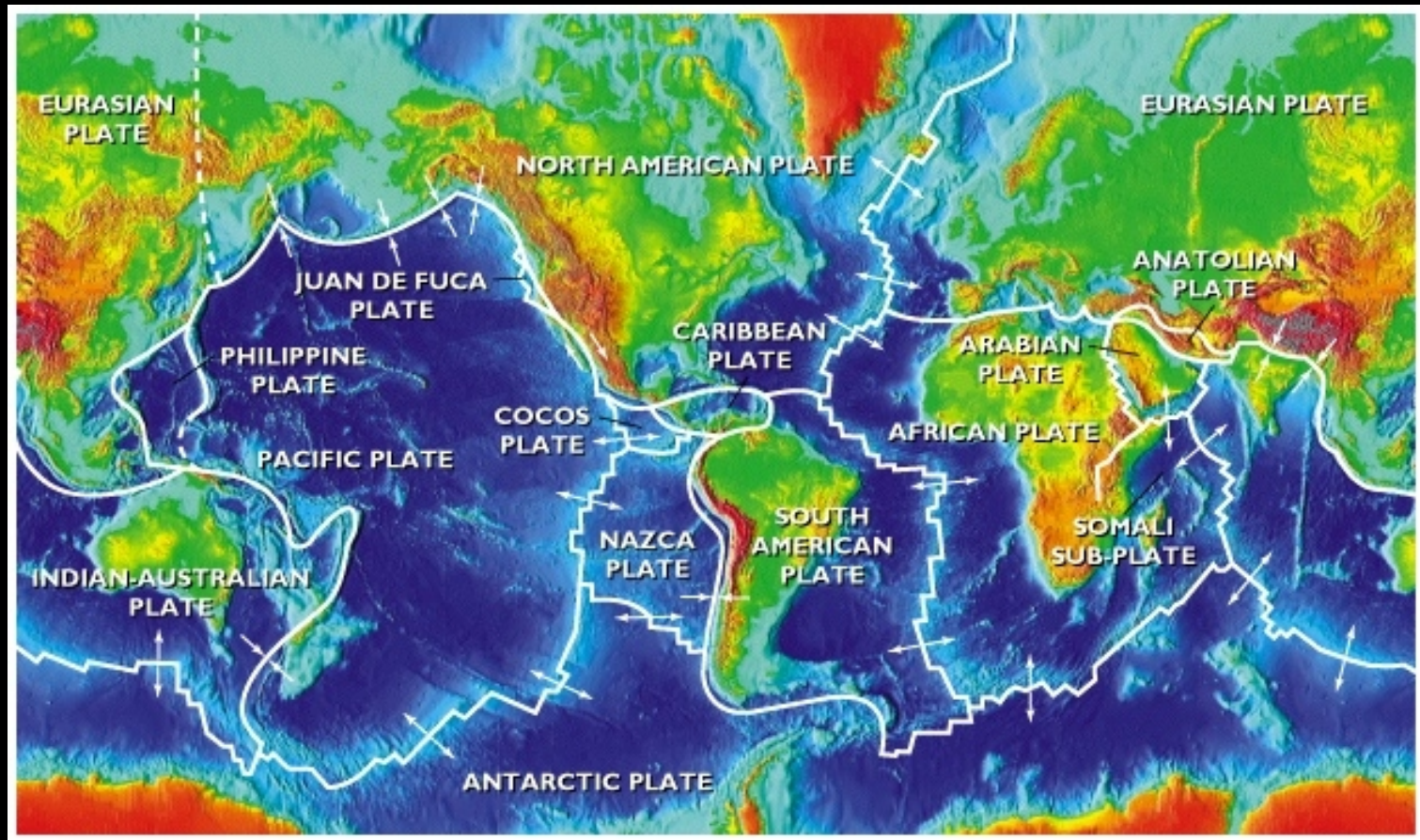


# Le Flux géothermique



**Pourquoi ? Parce qu'il sort de la chaleur de la surface. Il en sort  $44 \cdot 10^{12}$  W, dont une grosse moitié provient de la radioactivité (U, Th, K), et parce que ...**





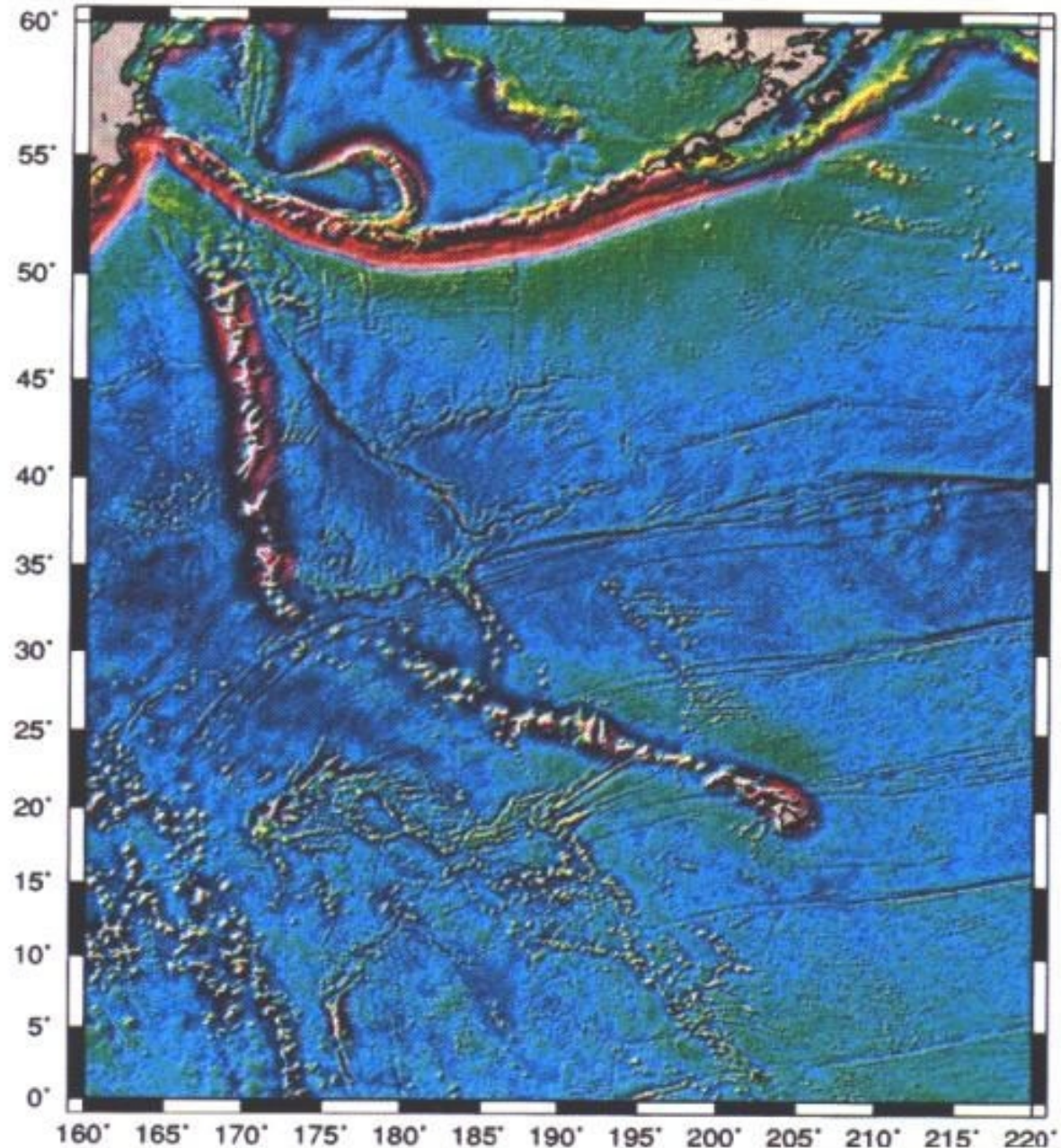
... parce qu'il y a des mouvements (je ne vais pas vous démontrer qu'il y a des mouvements !)

Et quand il y a mouvement ET chaleur, on pense  
« convection » !



**Il y a également  
des « sorties »  
plus ponctuelles  
de matière  
chaude  
(les points  
chauds pour ne  
pas les nommer)**

**→ Autre type de  
convection**

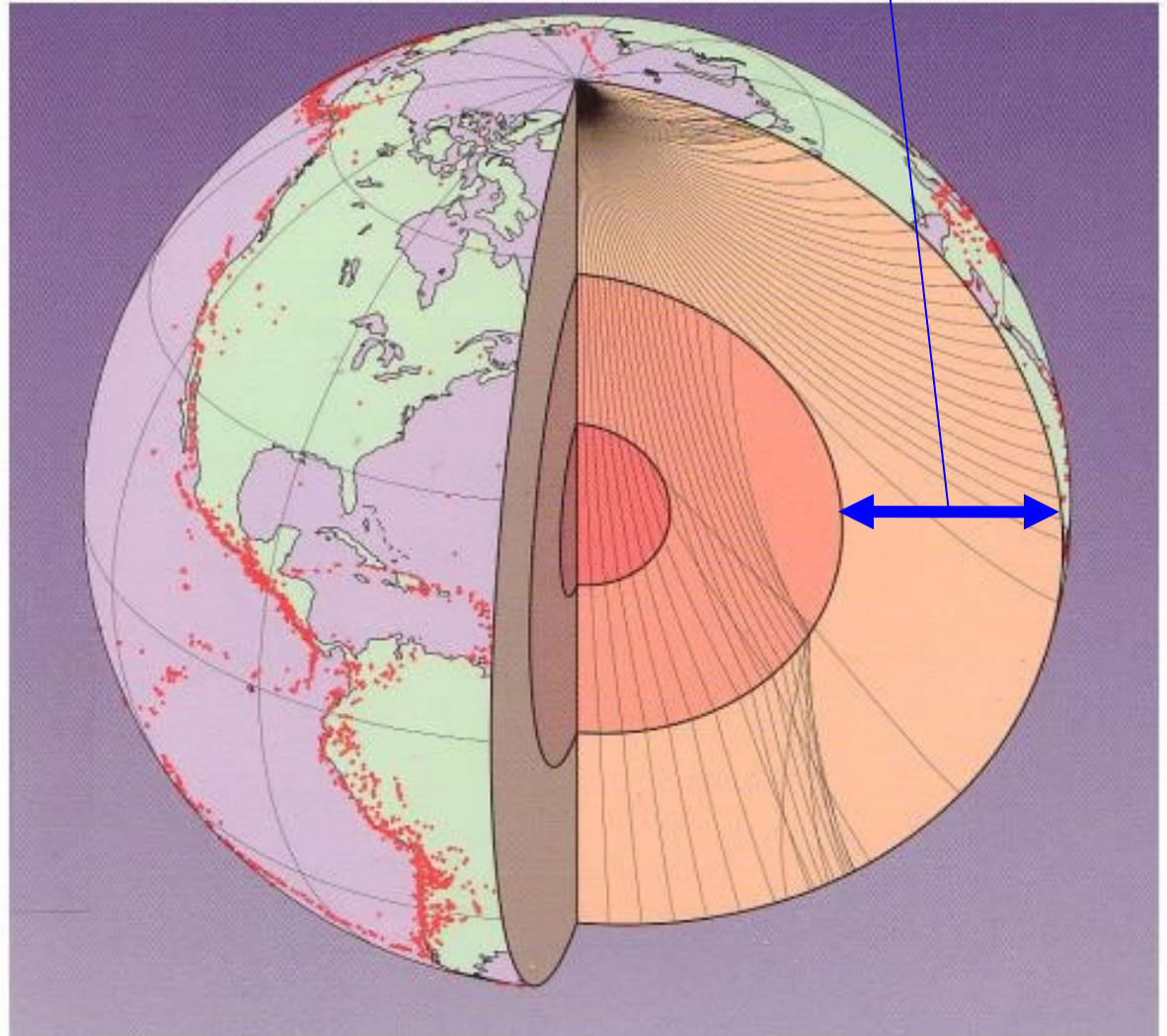


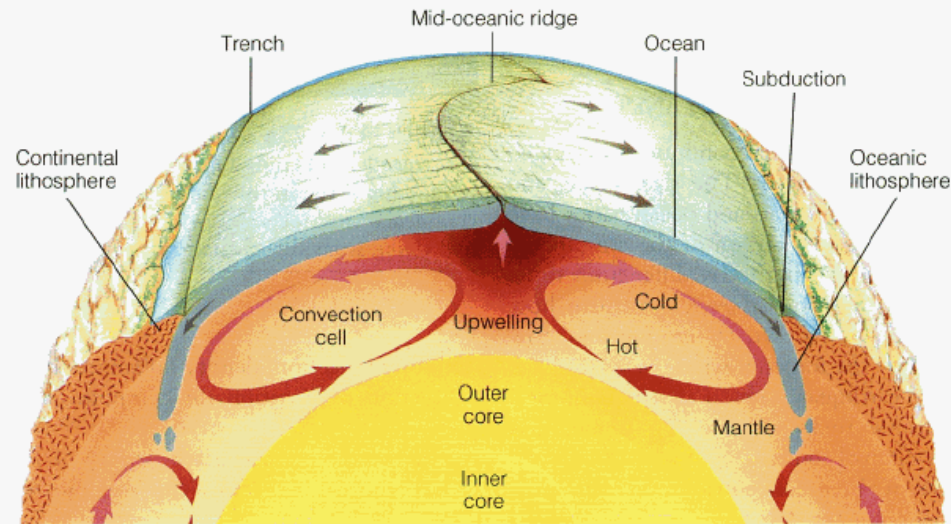


**Et si ça  
convecte, ça  
doit être dans  
le manteau et  
le noyau (que  
je ne vous  
définirai pas).**

**On ne va  
parler que de  
la convection  
mantellique.**

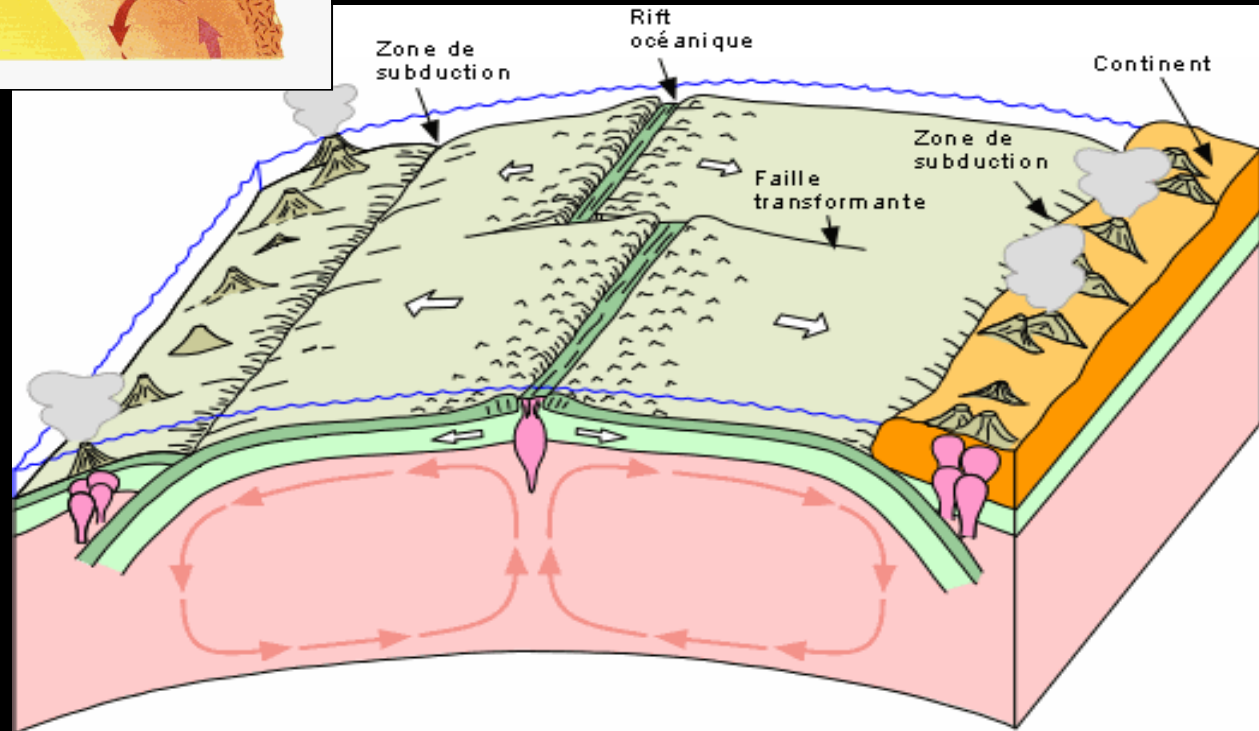
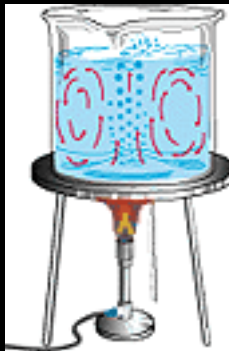
C'est dans le manteau  
que ça convecterait, à  
l'état solide bien sur.





**Et entre 1960 et 1970, toutes ces observations et bien d'autres ont donné lieu à ce qu'on appelle désormais la Tectonique des Plaques**

<http://www.dstu.univ-montp2.fr/PERSO/bokelmann/convection.gif>  
[http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html)  
[http://www.geology.sdsu.edu/how\\_volcanoes\\_work/Volcano\\_tectonic.html](http://www.geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/Volcano_tectonic.html)



**Et tout le monde connaît ces schémas, légitimes entre 1960 et 1970, où il fallait convaincre une communauté de naturalistes réticents, extrêmement maladroits et pleins de sous-entendus erronés en 2006**





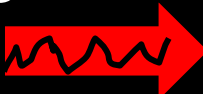
## Un peu de physique de la transmission de la chaleur

**Hypothèse de travail : on est en régime stationnaire et la production de chaleur est compensée par des pertes, d'égale valeur.**

**Il y a donc production et perte de chaleur (perte de chaleur = « source de froid »)**

# Comment transmet-on de la chaleur dans les corps « opaques » ?

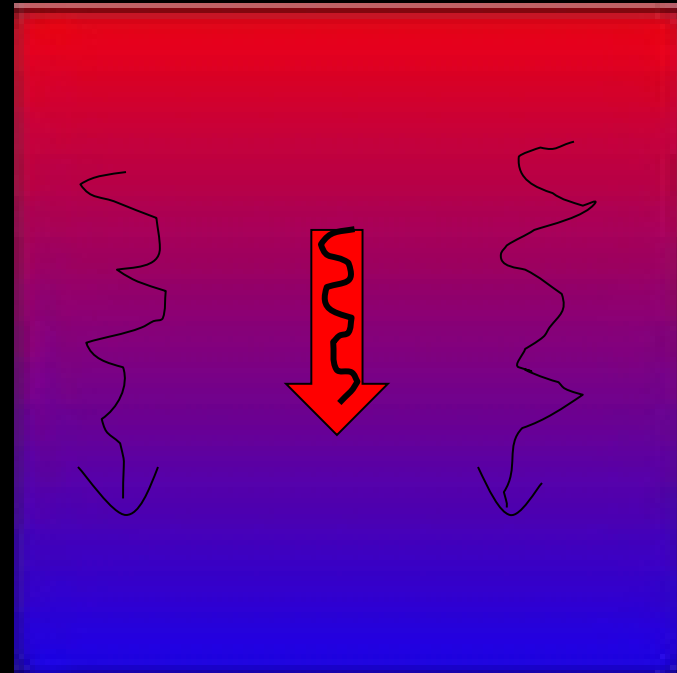
## 1<sup>er</sup> cas : corps « indéformable »

La chaleur est transmise par conduction-diffusion : propagation de proche en proche de vibrations des atomes et molécules  sans déplacement macroscopique de matière

froid (dense)



Chaud (peu dense)



Chaud (peu dense)

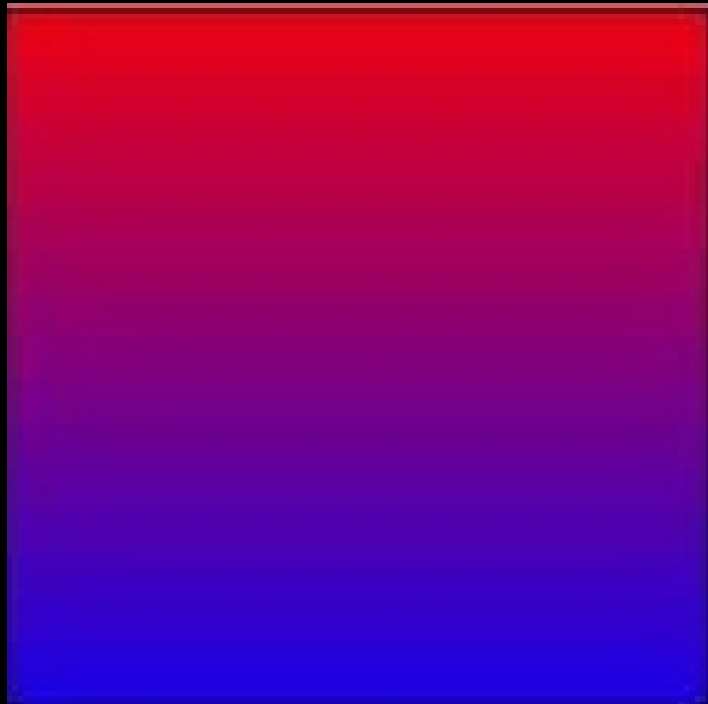
Froid (dense)



## 2<sup>ème</sup> cas : corps « déformable », gradient normal de densité (dense en bas, peu dense en haut).

C'est peu dense parce que chaud en haut, et dense parce que froid en bas. Pas de mouvement macroscopique, mais simple diffusion

Chaud (peu dense)



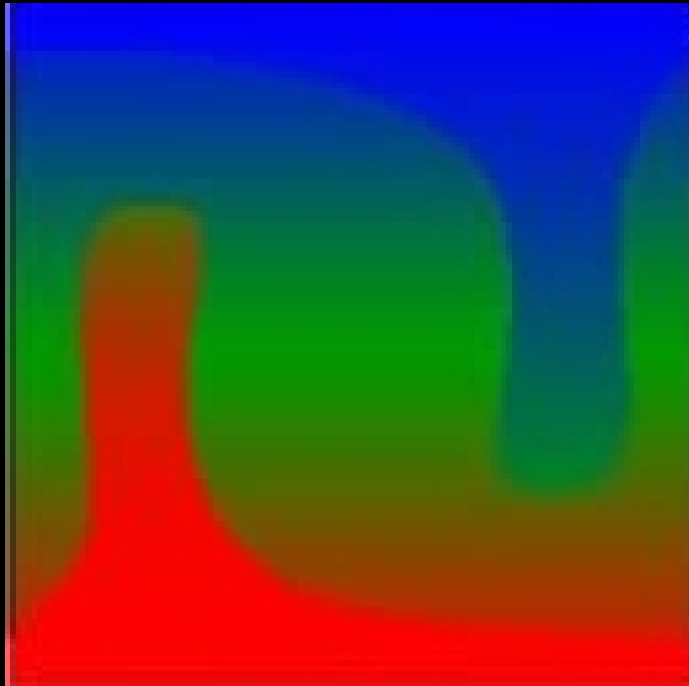
Photographie : Pierre Thomas

Froid (dense)

### 3<sup>ème</sup> cas : corps « déformable », gradient inverse de densité (dense en haut, peu dense en bas)

C'est chaud et peu dense en bas, froid et dense en haut ; c'est instable ; la matière chaude monte et la matière froide descend, avec mouvement macroscopique de matière. C'est la convection (thermique)

Froid (dense)



Chaud (peu dense)

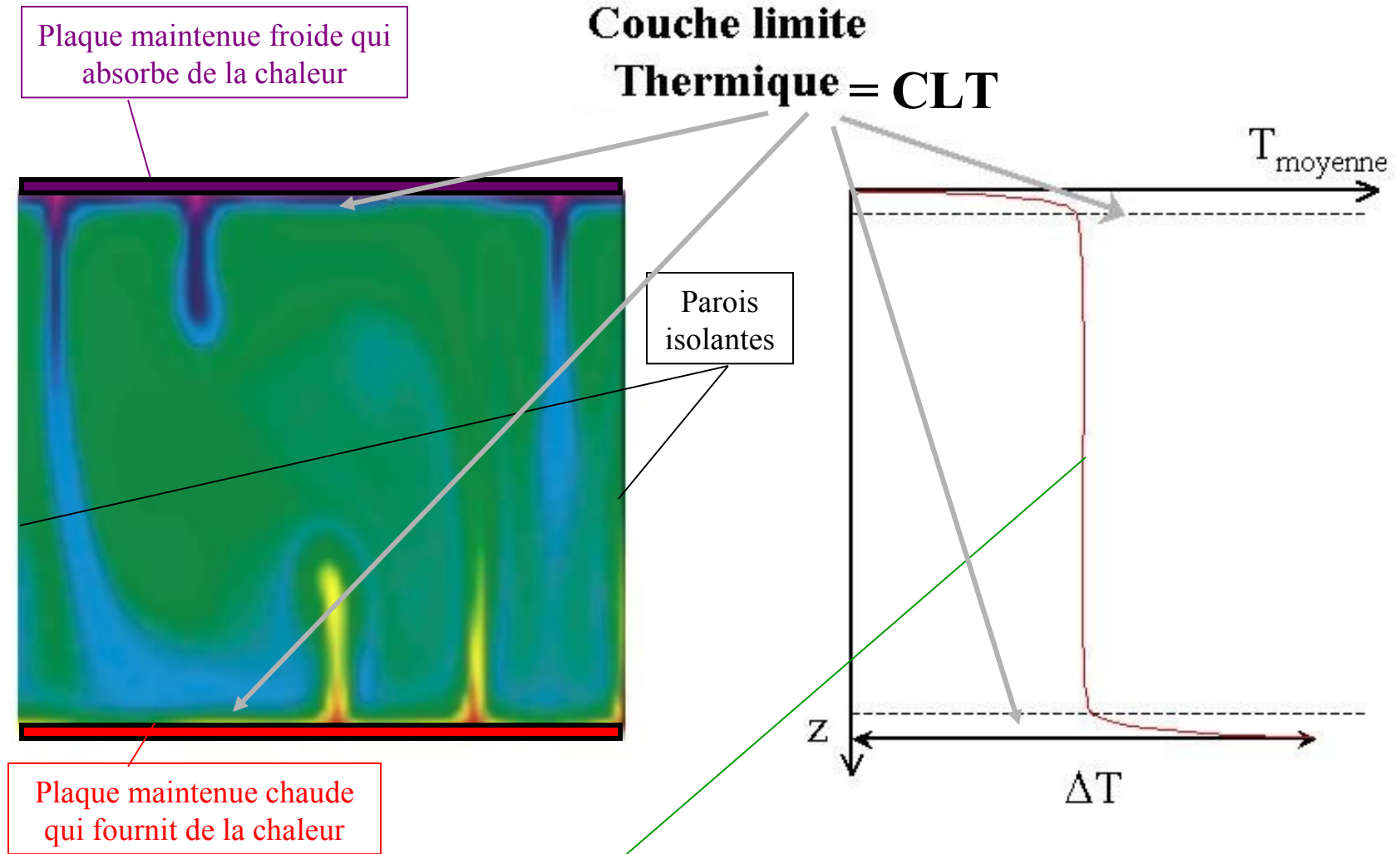
**Attention, toutes les causes de gradient de densité inverse peuvent provoquer de la convection**



Photographie : Pierre Thomas



# Un système convectif



Température quasi constante, à l'effet de la décompression (adiabatique) près !

## Qu'est ce qu'une Couche Limite Thermique ?

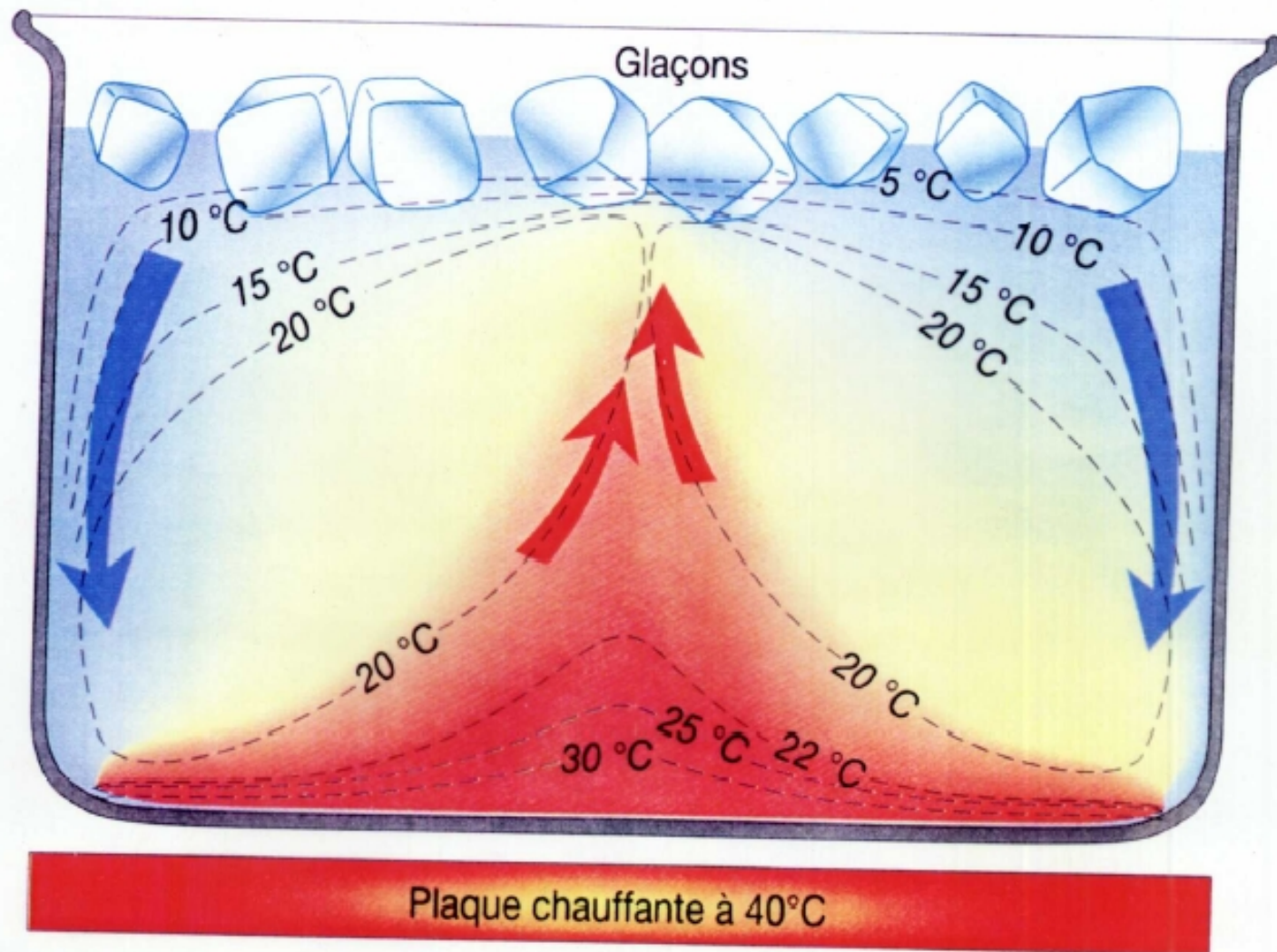
Elle(s) fait (font) partie de la convection ; c'en est la partie supérieure (inférieure). C'est dans cette (ces) CLT, mince(s), que s'effectuent les échanges de chaleur par conduction entre la cellule de convection et les sources chaudes et/ou froides extérieures. La matière de la CLT se refroidit (réchauffe) donc par conduction au contact de l'extérieur ; et dès qu'elle est devenue suffisamment dense (peu dense), elle descend (monte). Alors elle n'échange plus de chaleur par conduction avec l'extérieur (qu'elle ne touche plus), et se fait «remplacer» par de la nouvelle matière.

Nous verrons que la lithosphère océanique est la CLT supérieure des cellules de convection du manteau

La couche d'air surchauffé au-dessus des routes à l'origine des mirages est la CLT inférieure de petites cellules atmosphériques

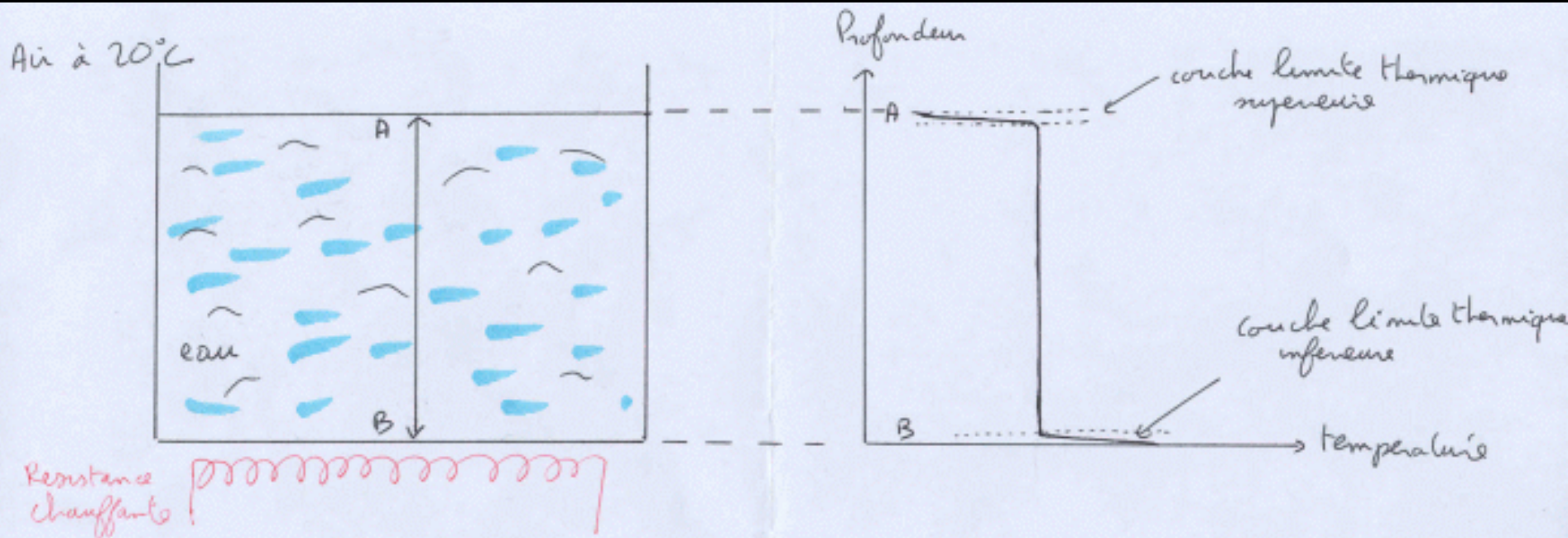






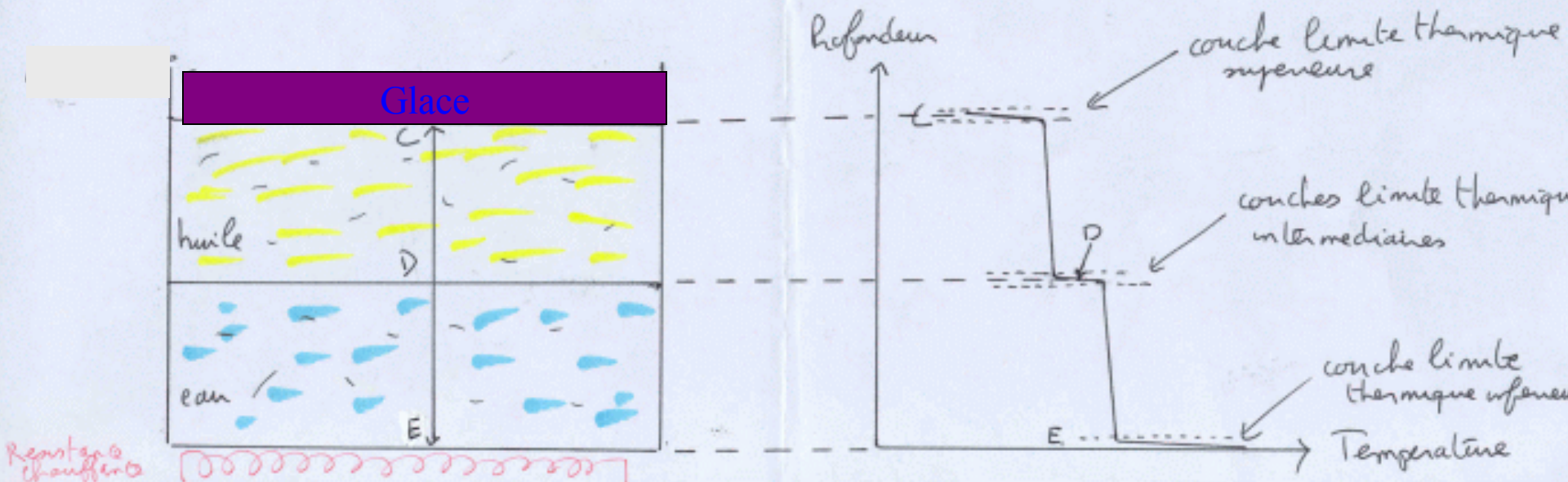
Nathan, 4eme

**Une version plus « imagée » mais qui dit la même chose**

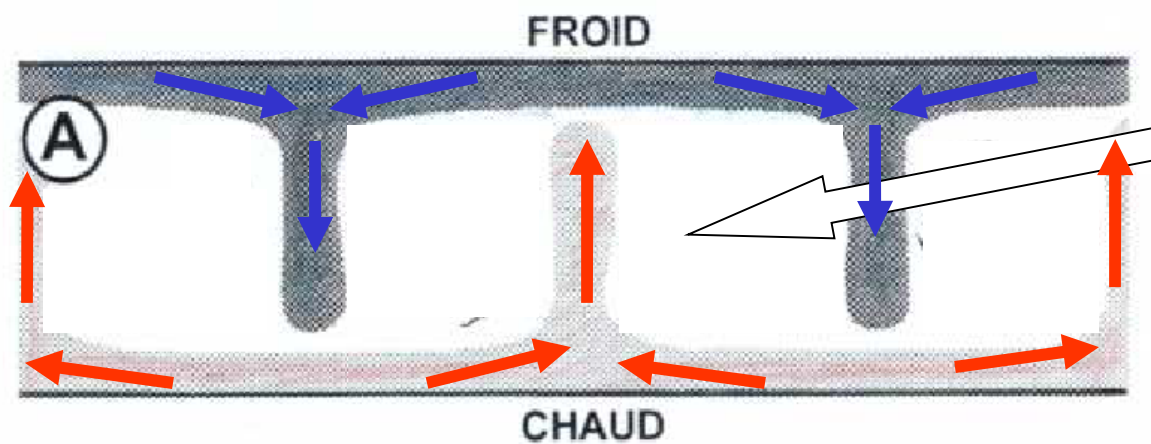


**Un de mes vieux schémas. Rien n'est faux, mais c'est un peu maladroit : je privilégiais la visibilité de source de chaleur au détriment de la source de froid (présente mais sur laquelle je n'insistais pas). Or les deux sont indispensables en régime permanent.**





**Mon vieux schéma (corrigé), montrant une convection à 2 couches, car on a 2 liquides non miscibles (huile et eau par exemple). Une analogie terrestre pourrait être la superposition manteau / noyau**



Au centre des « cellules »,  
il n'y a que peu de  
mouvements, et ils sont  
causés par les  
mouvements des CLT.

## Les deux cas de convection thermique.

**1. Cas classique :  
chauffage par le  
bas et  
refroidissement  
par le haut.**

**Montée et descente  
sont actives**

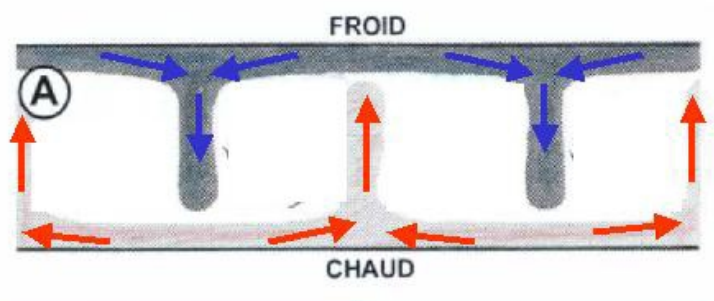


<http://www.asso-etud.unige.ch/acilisa/photos/121203-01.jpg>

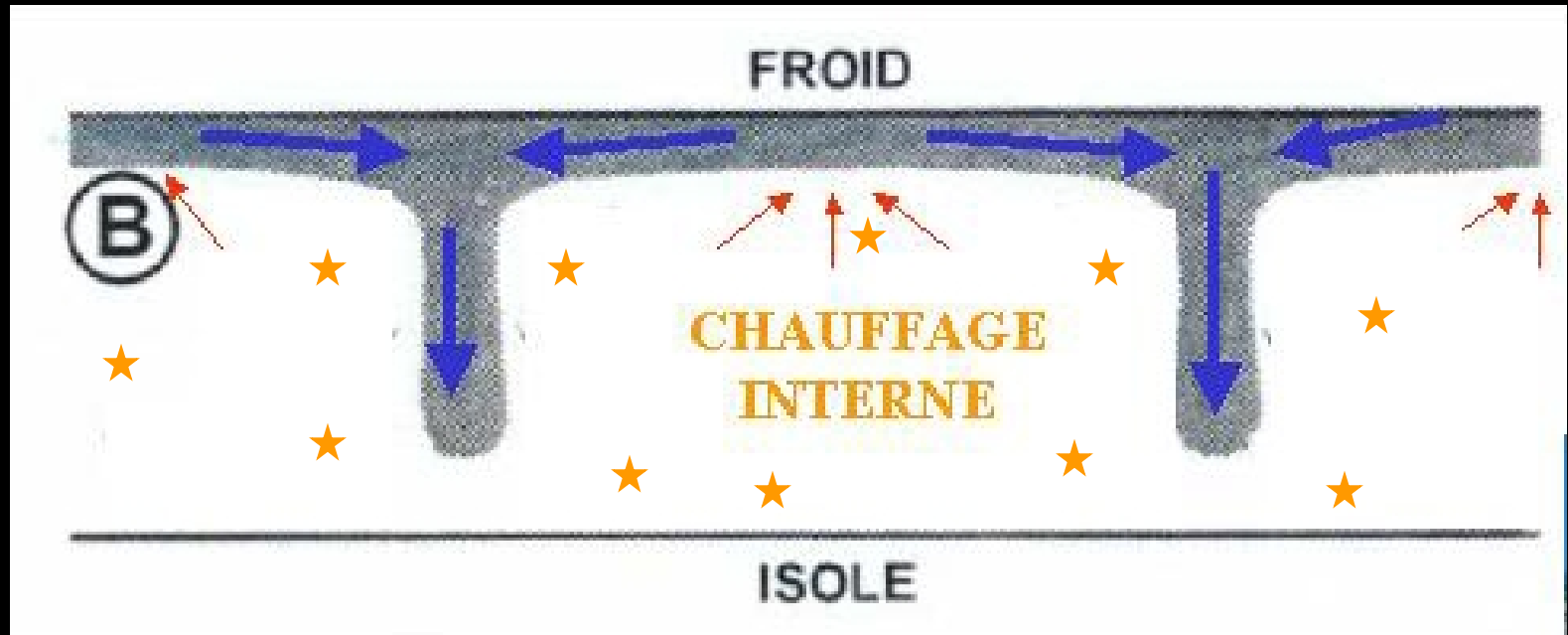
<http://www.yenwen.net/Yosemite98/YosemiteGallery.htm>



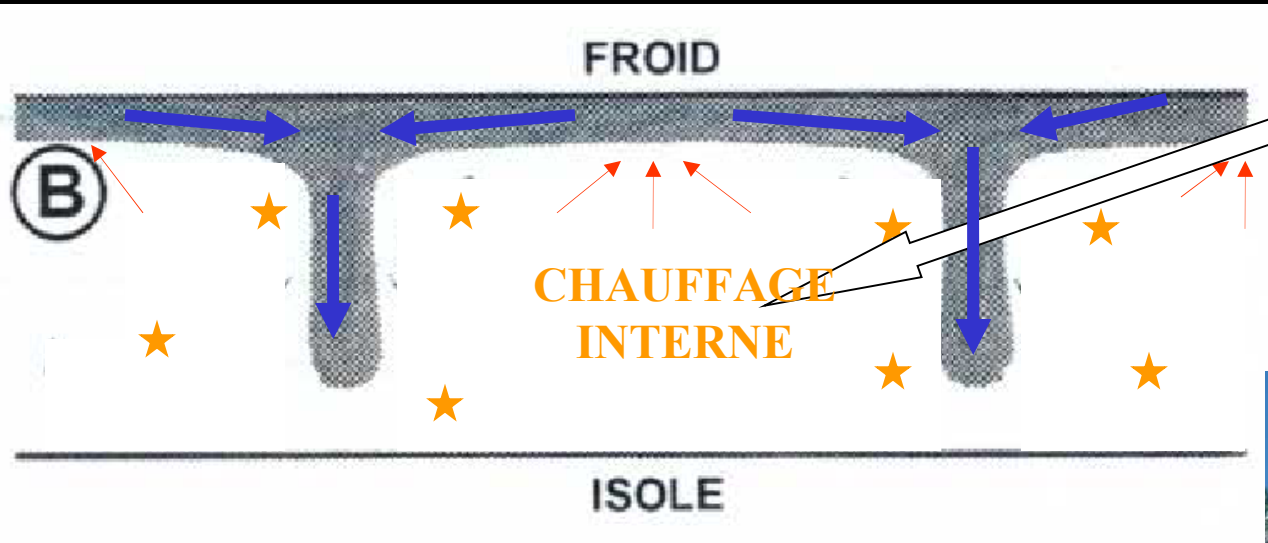




Rappel du cas  
précédent



**Une deuxième possibilité, ignorée par l'Education Nationale : refroidissement par le haut, mais pas de chauffage par le bas. Le chauffage est interne, diffus dans la masse. Cas rarissime dans la vie de tous les jours ; pas de modélisation analogique facile.**



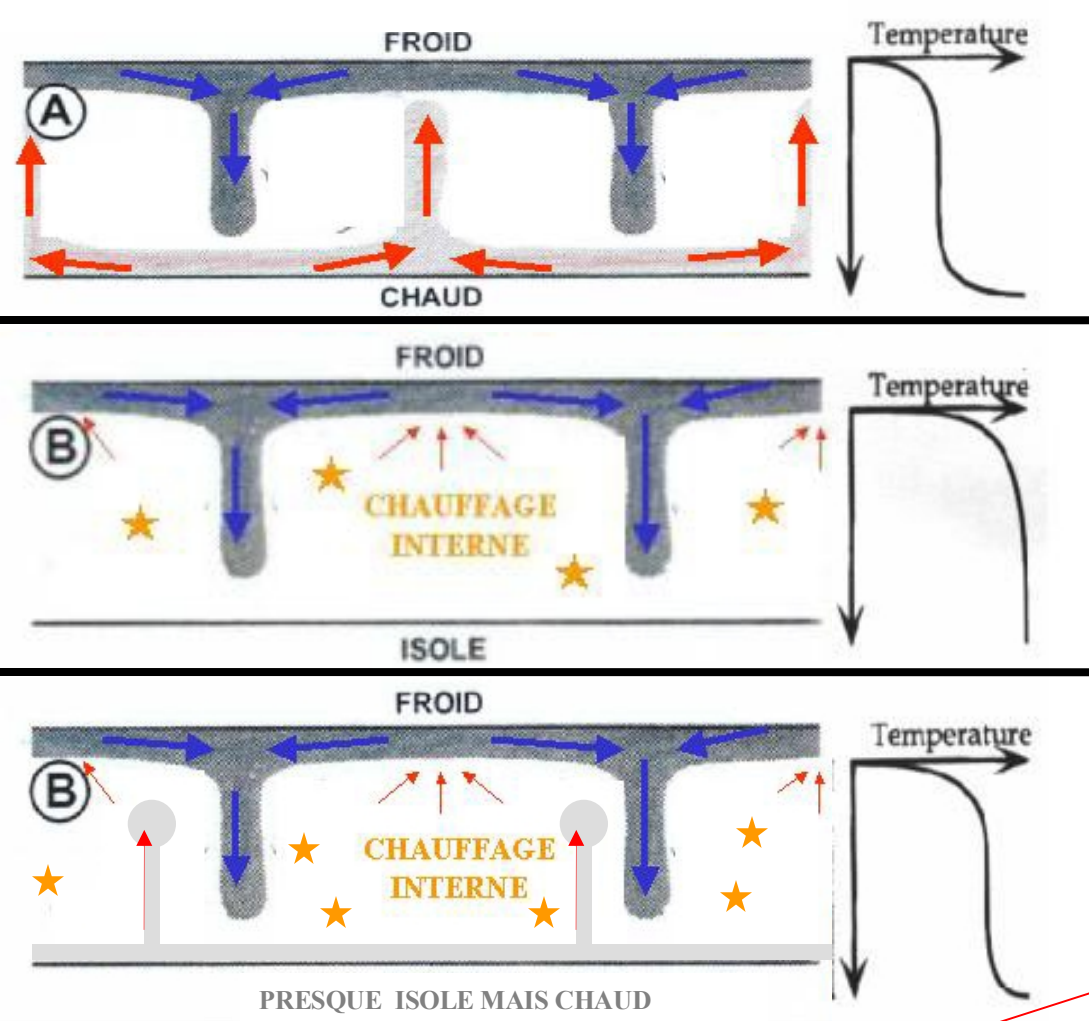
Peu de mouvements sous la CLT, et ils sont causés par l'entraînement dû à la CLT

**Que se passe-t-il dans ce 2<sup>ème</sup> cas,  
moins classique ?**

**Seule la descente est active ;  
la remontée est passive,  
simplement pour compenser  
ce qui descend**







**3<sup>ème</sup> possibilité :**  
**refroidissement par le**  
**haut, chauffage interne**  
**(>> 50%), et un petit peu**  
**de chauffage par le bas**  
**(<< 50%)**



**Descente très active**  
**Montée surtout passive, mais un**  
**tout petit peu de montée active**  
**par-ci par là.**



# Résumons : qu'est ce qui met en mouvement la surface (CLT)



<http://www.southend.gov.uk/postcards.asp>

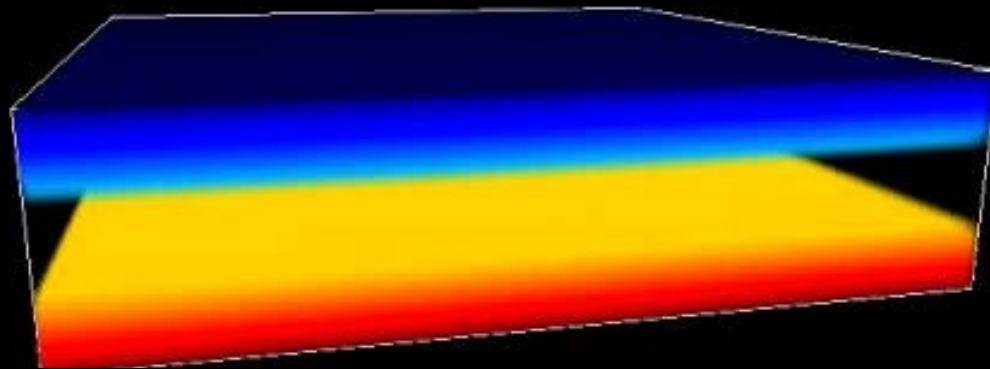
**1<sup>er</sup> cas : la CLT est supérieure « poussée » et « tirée » à la fois**



**2<sup>ème</sup> cas : la CLT supérieure n'est que « tirée » ; seule la traction met le train en mouvement.**

Nstep = 20

Time = 0.001221



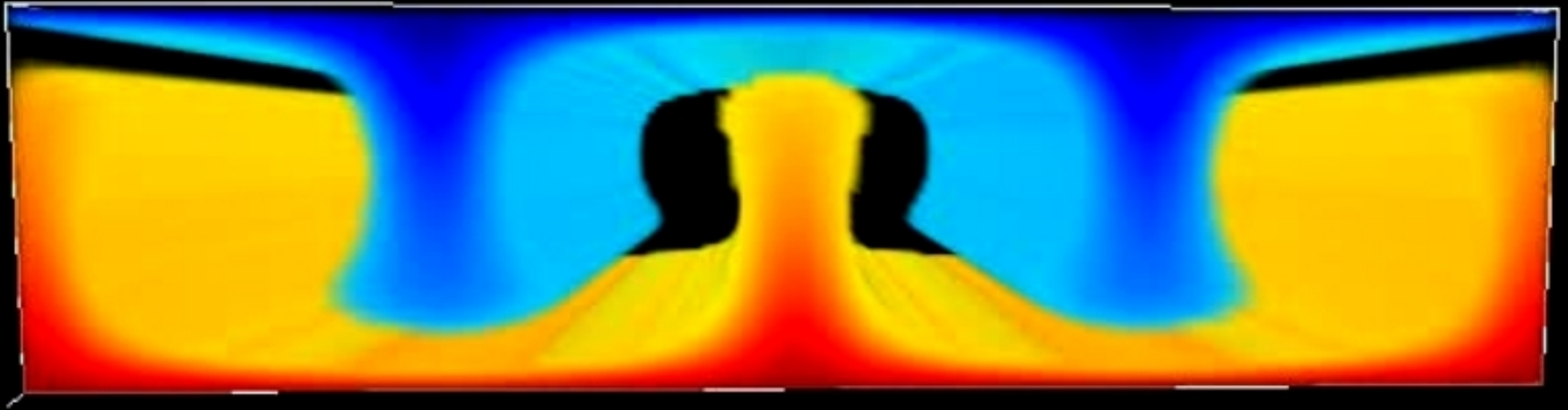
Source : Joerg SCHMALZL

simulations numériques à télécharger sur la  
page de présentation de la conférence



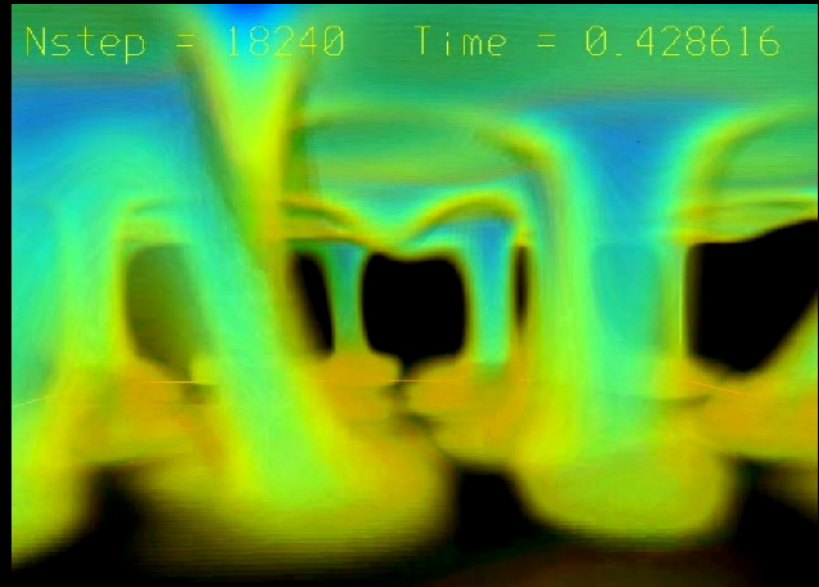
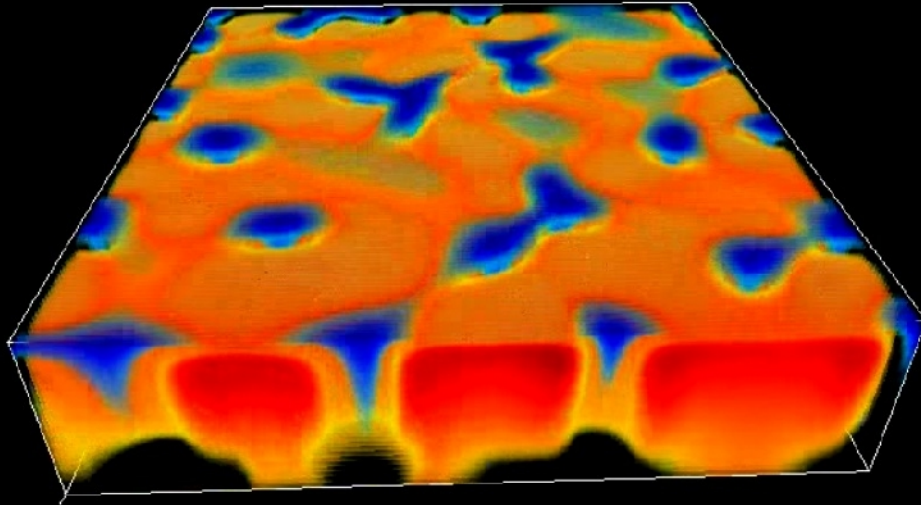
Nstep = 5190

Time = 0.316772

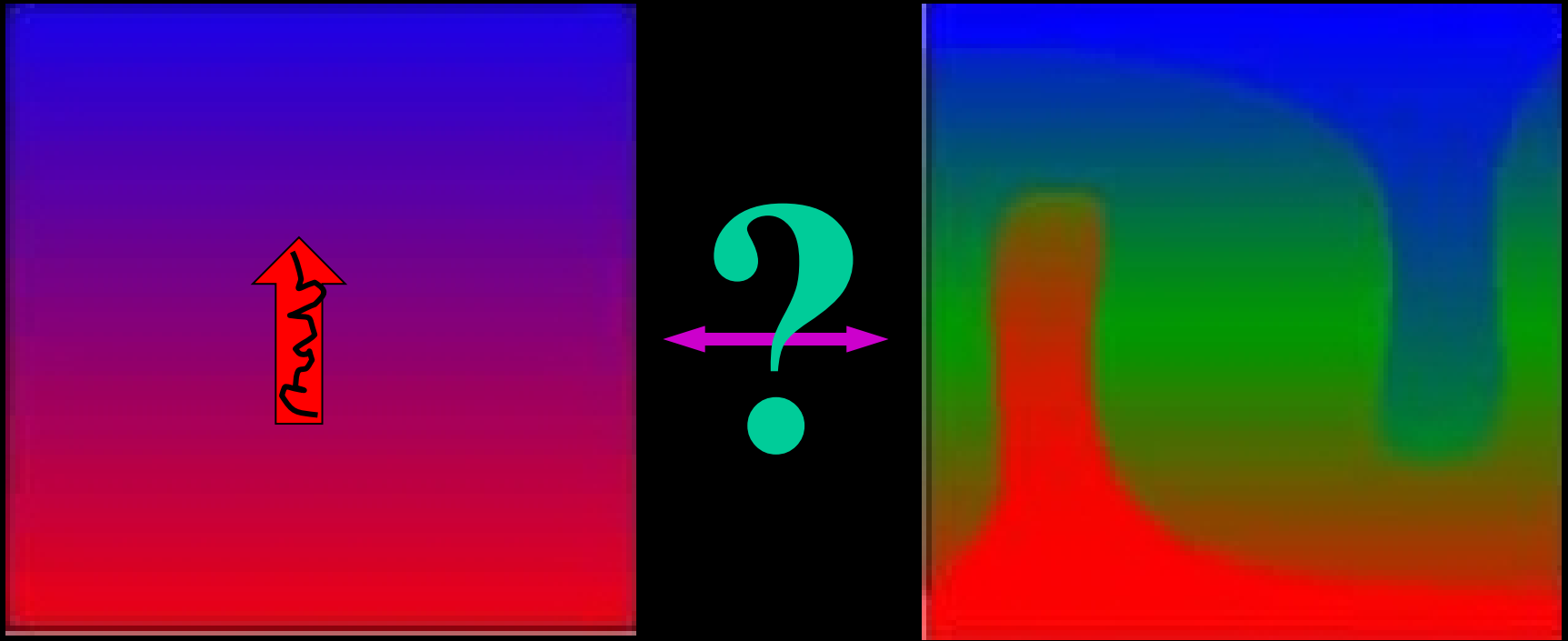


Simulation : convection1.mpg  
Chauffage par le bas, refroidissement par le haut

Nstep = 11540    Time = 0.274905



Simulation : convection2.mpg  
Chauffage dans la masse, refroidissement par le haut

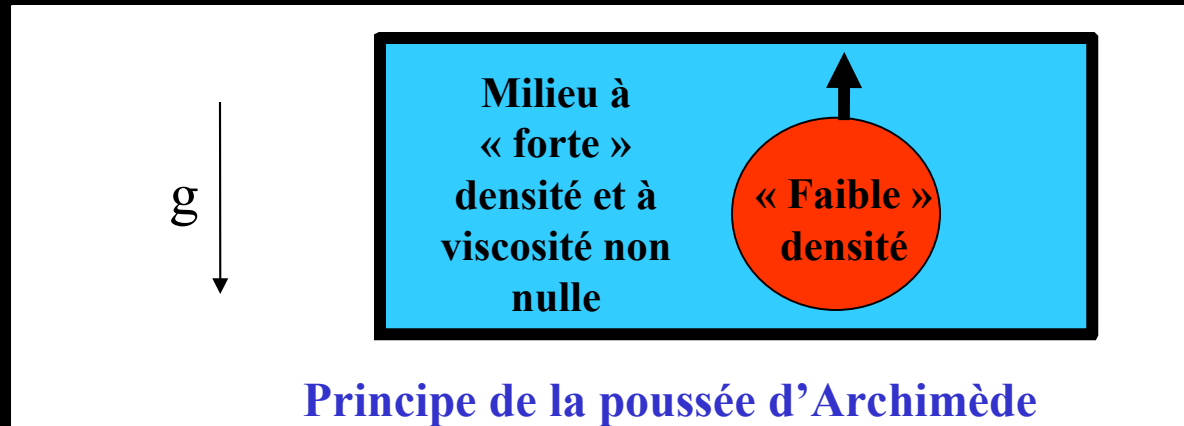


**Diffusion-conduction ou convection ,  
« that is the question » ?**

**Tout à l'heure, j'ai dit « déformable » ou  
« indéformable ». Précisons cela !**



# La physique de la convection : une instabilité avec seuil



Lorsque la force de résistance est vaincue par la force d'Archimède, l'instabilité se déclenche et le “ballon” rouge monte.

## L'instabilité de Rayleigh-Bénard:

- \* Les Différences de densité sont dues aux différences de température.
- \* Mécanismes stabilisants:
  - La force visqueuse est la force de résistance.
  - La diffusion de la chaleur diminue les différences de température

## Critère de Seuil

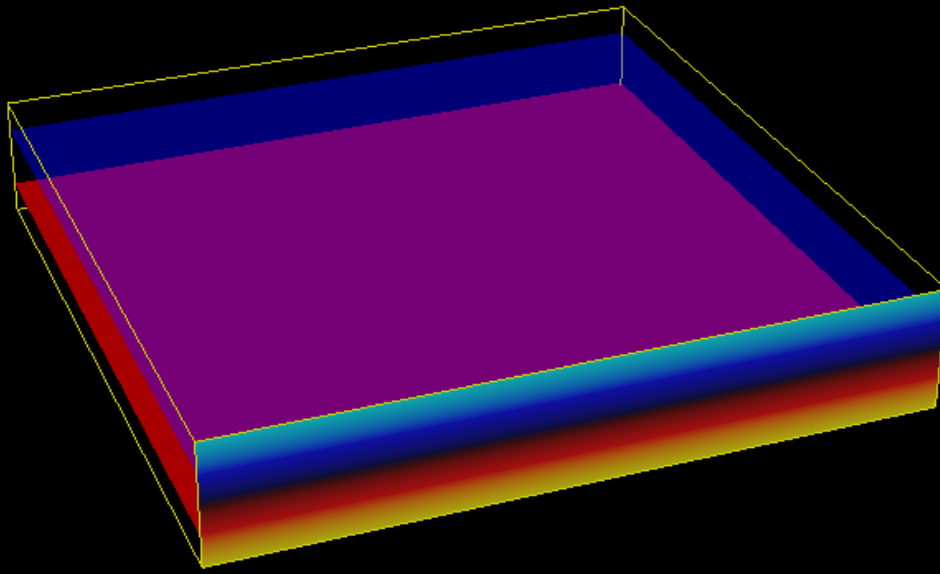
Pour que l'instabilité se déclenche, il faut que:

Pour un temps donné (où la diffusion est négligeable) : la force motrice (force d'Archimède) > la force de résistance (force visqueuse), d'où

$$Ra = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot g \cdot d^3}{\nu \cdot \kappa}$$

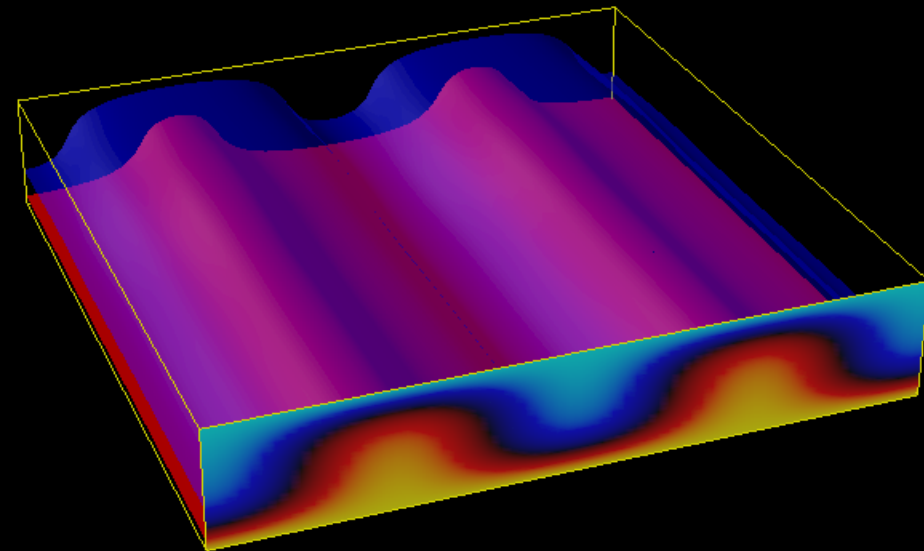
avec ***Ra*** est le nombre de **Rayleigh** , avec  **$\alpha$**  le coefficient de dilatation thermique, ***g*** l'accélération de la gravité,  **$\Delta T$**  une différence de température sur une hauteur ***d*** (dimension caractéristique du système),  **$\nu$**  la viscosité cinématique et  **$\kappa$**  la diffusivité thermique

*C'est un nombre sans dimension, un nombre critique !*



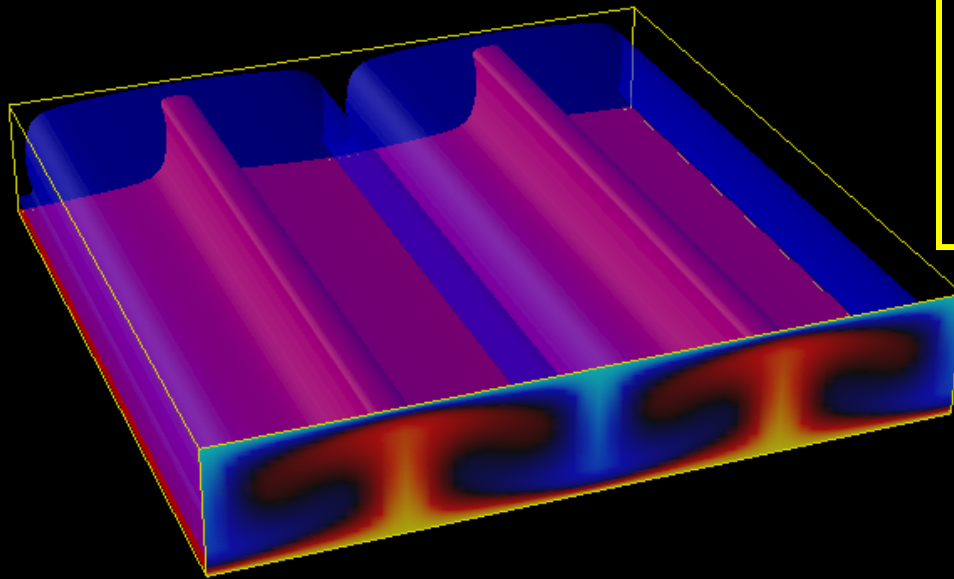
Pour  $Ra < 1000$   
Ca ne convecte pas !

Pour  $1000 < Ra < 2000$ ,  
on atteint une **Valeur**  
**critique** . Cela  
« ondule », frémit ...

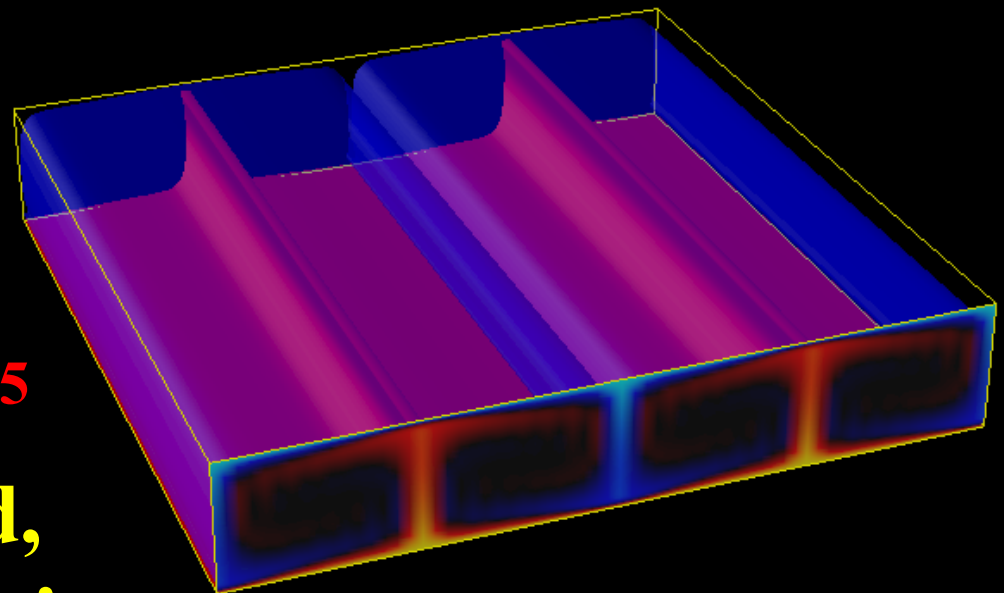




**Pour  $Ra > 2000$ ,  
cela convecte**

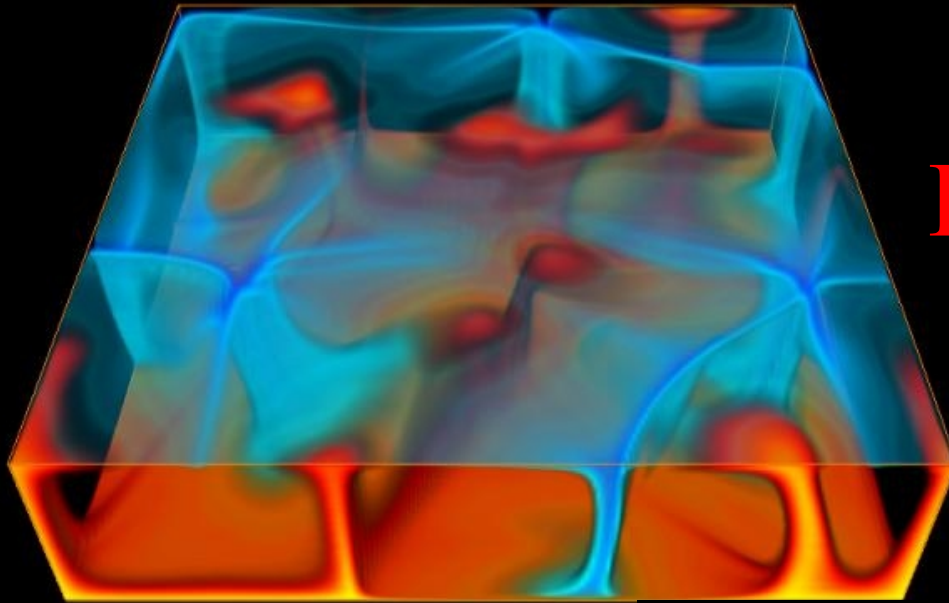


**$Ra = 10^4$**



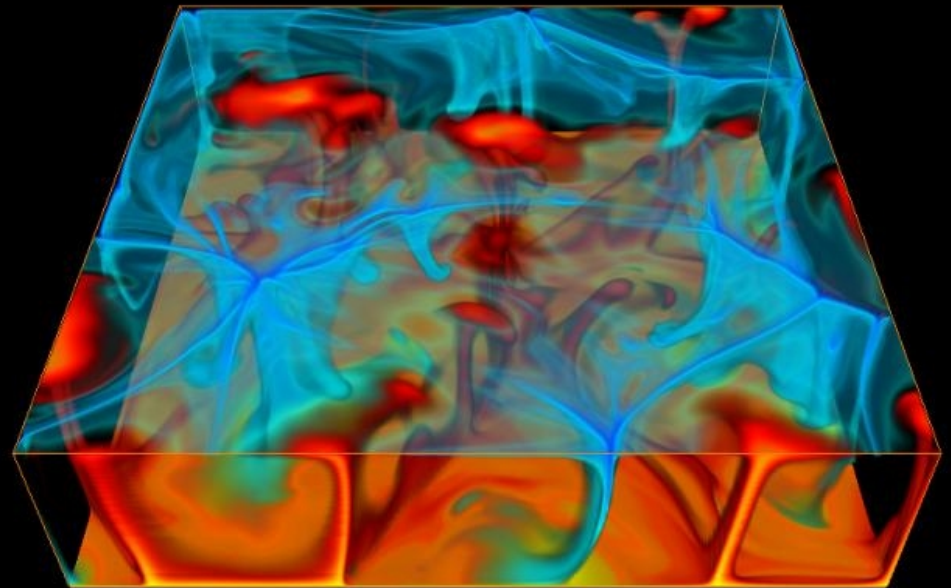
**$Ra = 10^5$**

**Plus  $Ra$  est grand,  
plus cela convecte !**

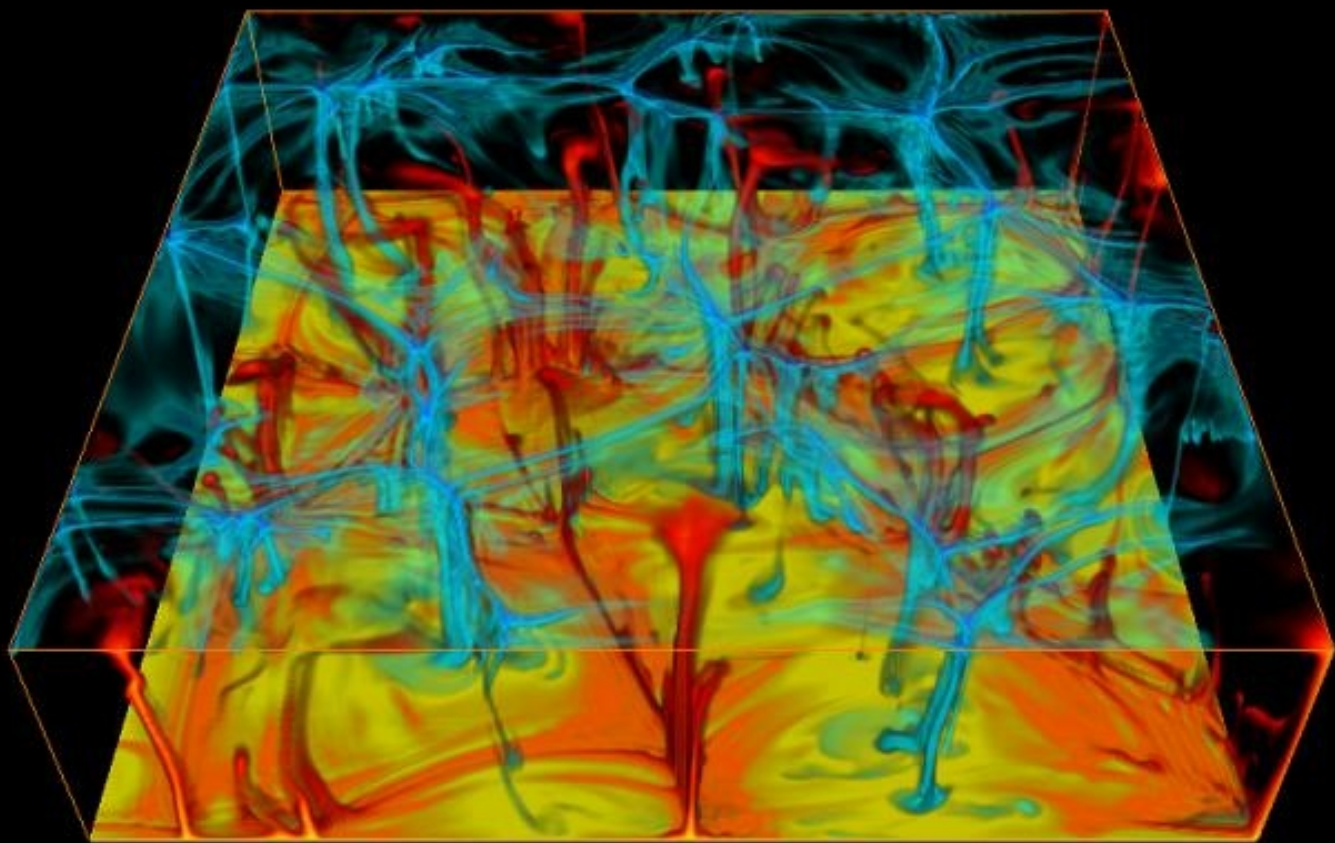


$$\text{Ra} = 10^6$$

Plus Ra est grand, plus la convection est « anarchique » !



$$\text{Ra} = 10^7$$

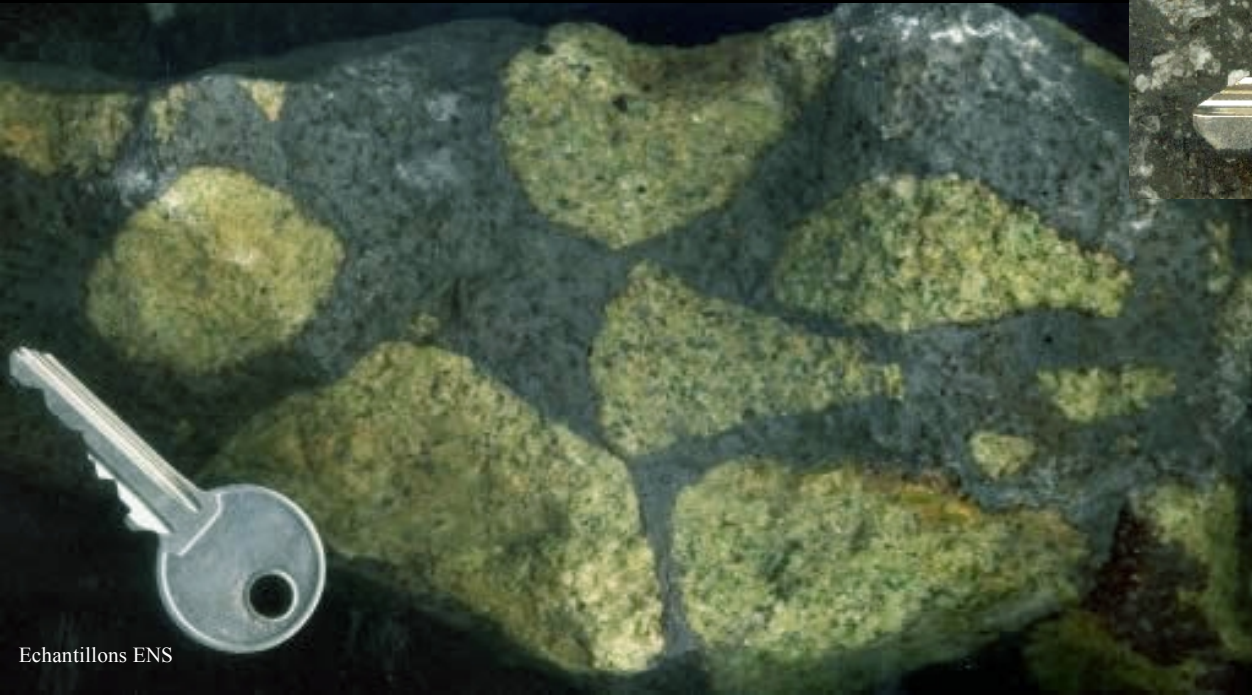


$$\text{Ra} = 10^8$$



D'où la question : quel est  
le nombre de Rayleigh du  
manteau terrestre ?

Il nous faut connaître  
 $g$ ,  $d$ ,  $\alpha$ ,  $K$ ,  $v$  et  $\Delta T$



$\alpha$  et  $K$  : mesures  
très faciles au  
laboratoire ; des  
élèves pourraient  
le faire !





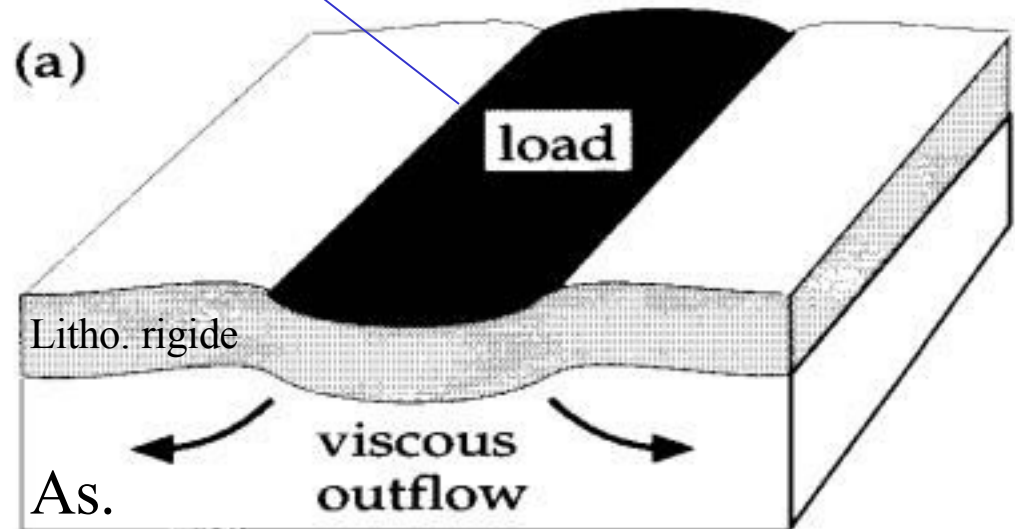
**Quelle est la viscosité du manteau terrestre ?**

**Cette image d'un glacier canadien est là pour nous rappeler que les solides sont visqueux, et qu'ils peuvent donc se déformer**

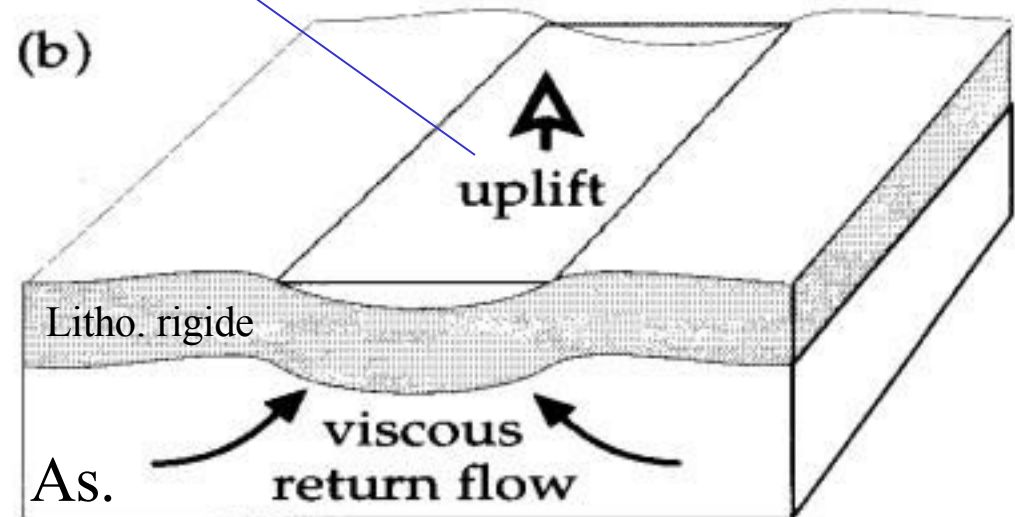


**Comment  
mesurer la  
viscosité du  
manteau ? On  
peut mettre une  
péridotite à P et  
T mantelliques,  
et faire des  
expériences.  
C'est difficile !  
On peut utiliser  
le rebond post-  
glaciaire**

La Scandinavie il y a 20 000 ans



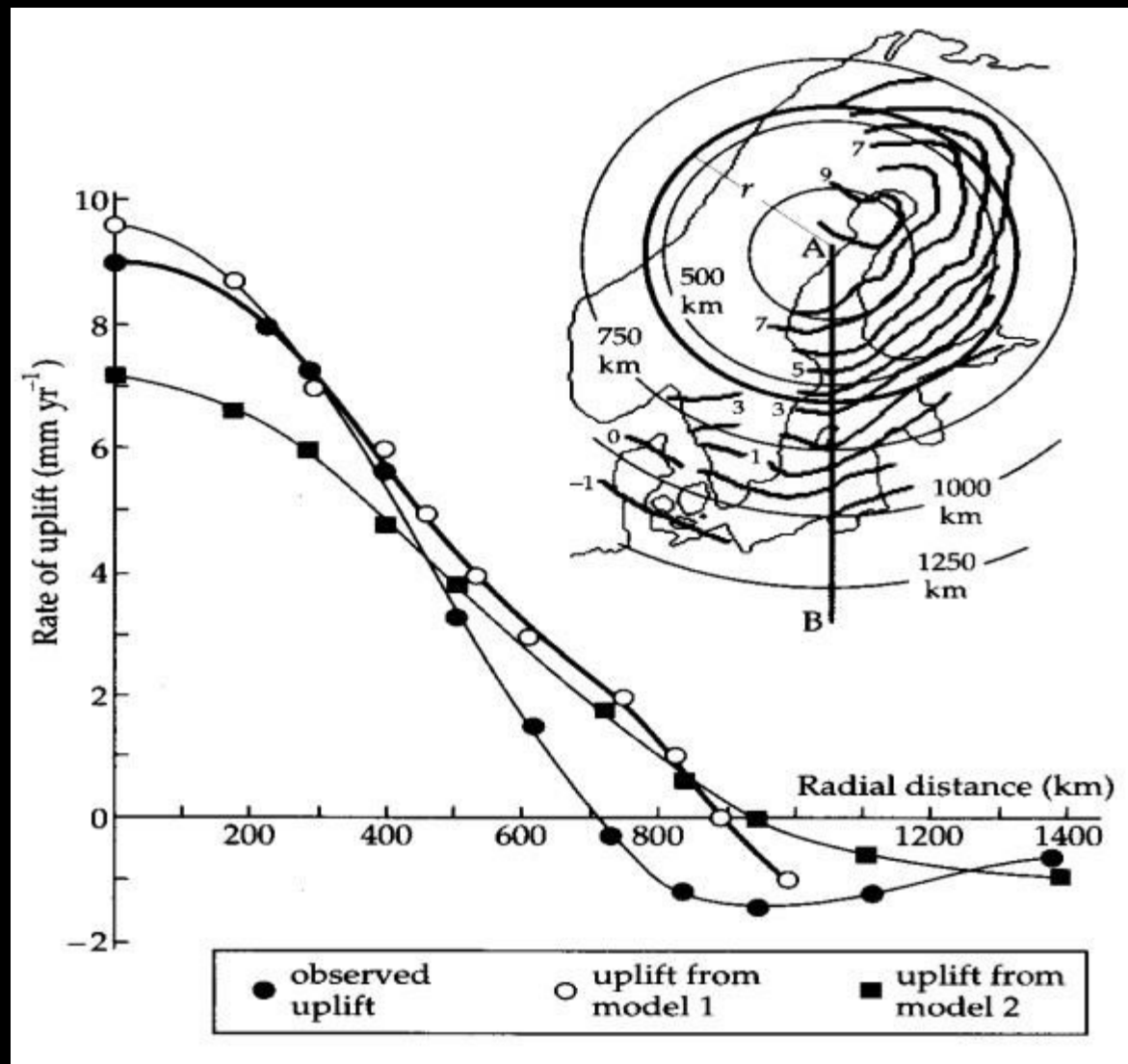
La Scandinavie aujourd'hui





La vitesse et la « forme » de la remontée dépendent de la viscosité de la couche visqueuse, l'asthénosphère. Avec les plages quaternaires soulevées, les données historiques, les mesures de nivellement ... on détermine

vitesse et forme, on rentre ça dans les équations de la mécanique des fluides, et on trouve :  $\nu = 10^{18} \text{ à } 10^{20} \text{ Pa.s}$



# 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  $1 \text{ Pa.s} = 10 \text{ poises}$  (ancienne unité)

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

Quelques valeur :

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

Huile d'olive à  $20^\circ\text{C}$  :  $1 \text{ Pa.s}$

Basalte à  $1100^\circ\text{C}$  :  $400 \text{ Pa.s}$

Glace à  $0^\circ\text{C}$  :  $10^{11} \text{ Pa.s}$  ..... (= 100 000 000 000)

Glace à  $-20^\circ\text{C}$  :  $10^{13} \text{ Pa.s}$  ..... (= 10 000 000 000 000)

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

Lithosphère :  $10^{23}\text{à}24 \text{ Pa.s}$  ..... (= 100 000 000 000 000 000 000 000)

Asthénosphère :  $10^{19}\text{à}20 \text{ Pa.s}$  ..... (= 100 000 000 000 000 000 000)

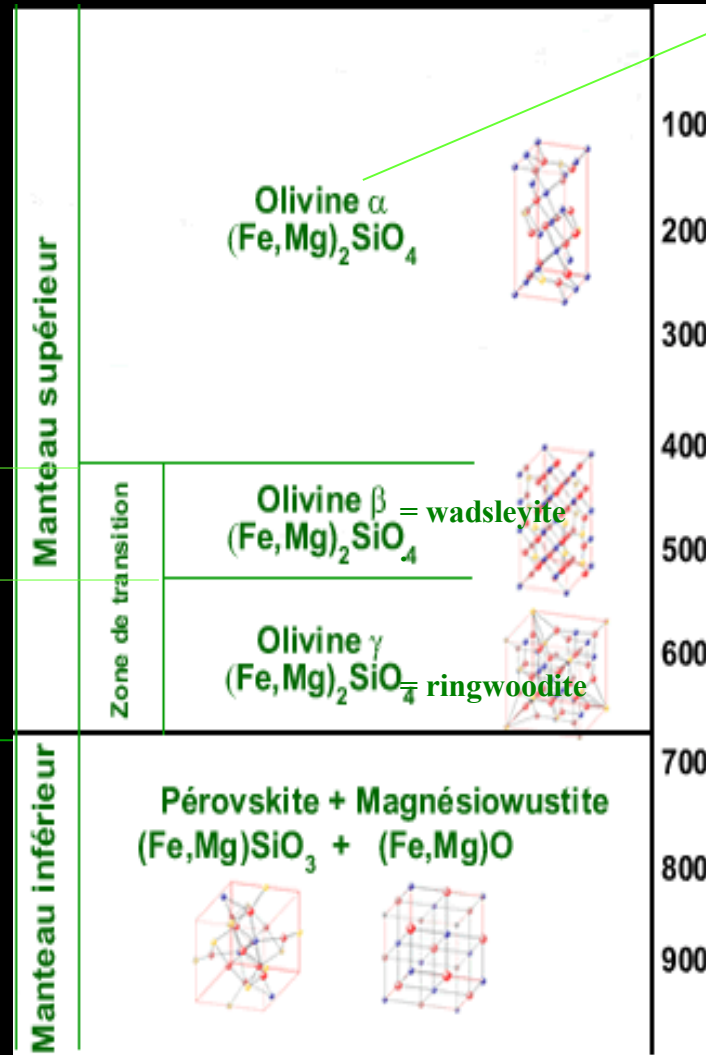
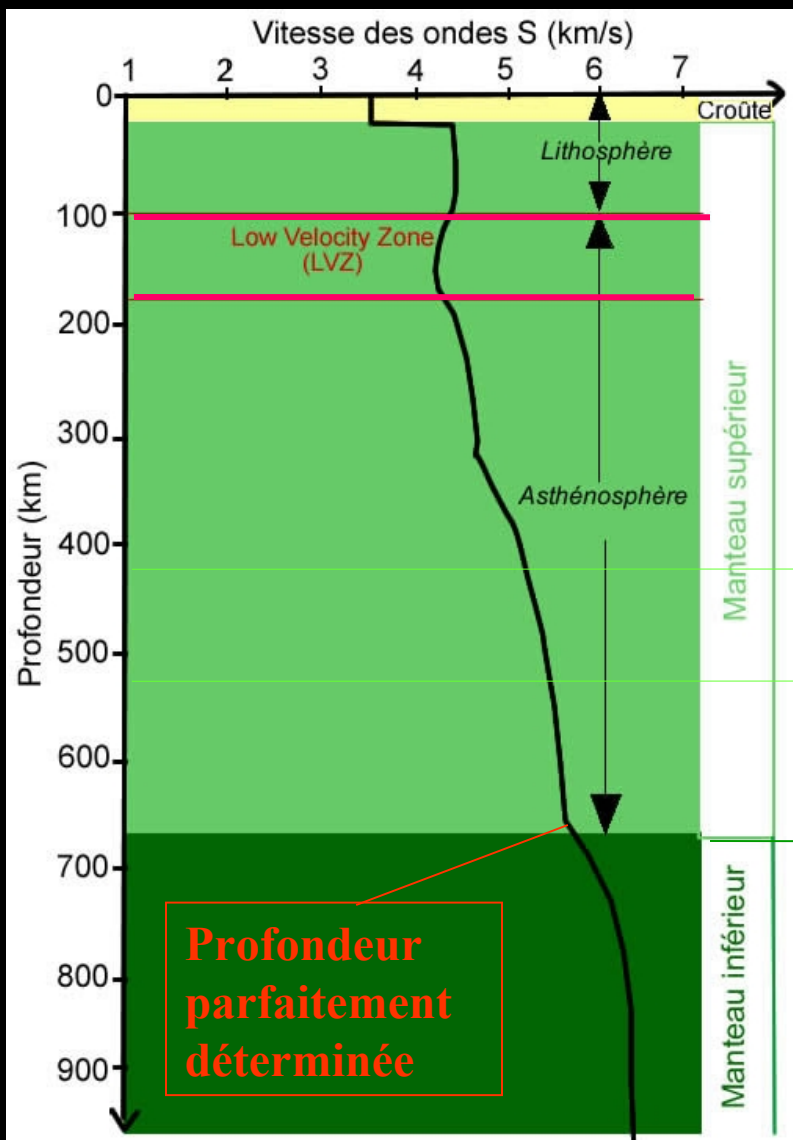
Noyau externe : :  $10^{-2} \text{ Pa.s}$  ..... (= 0,01)



<http://www.leler.com/hawaii/>

**Autre question : quel est le  $\Delta T$  du manteau terrestre ?**



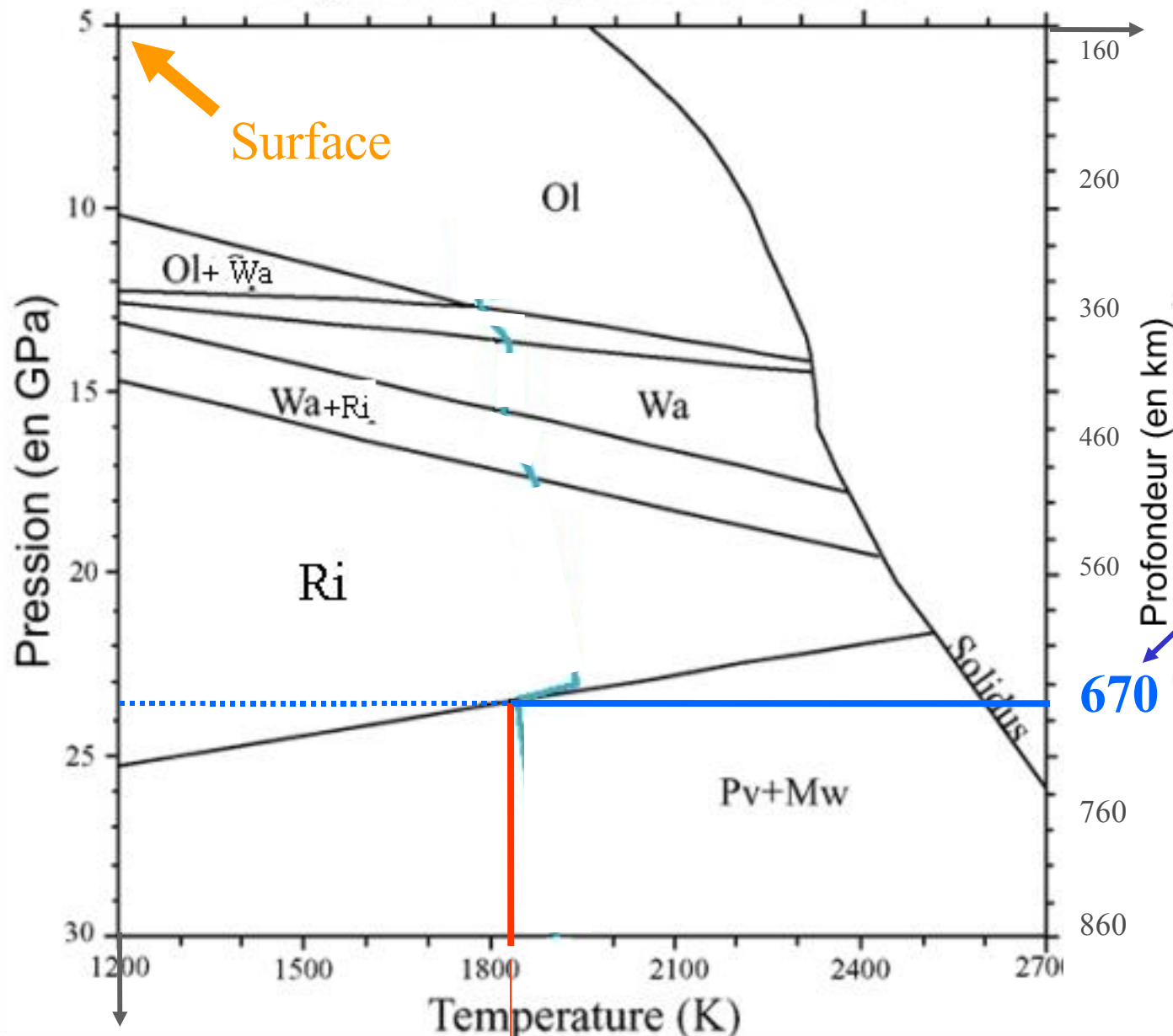


Généralement appelée  
« olivine » (tout court)

Anciennement  
regroupés sous  
le terme de  
« spinelle » ou  
« phase  
spinelle »

**Pour répondre, on utilise les discontinuités  
sismiques et les changements de phase de l'olivine**

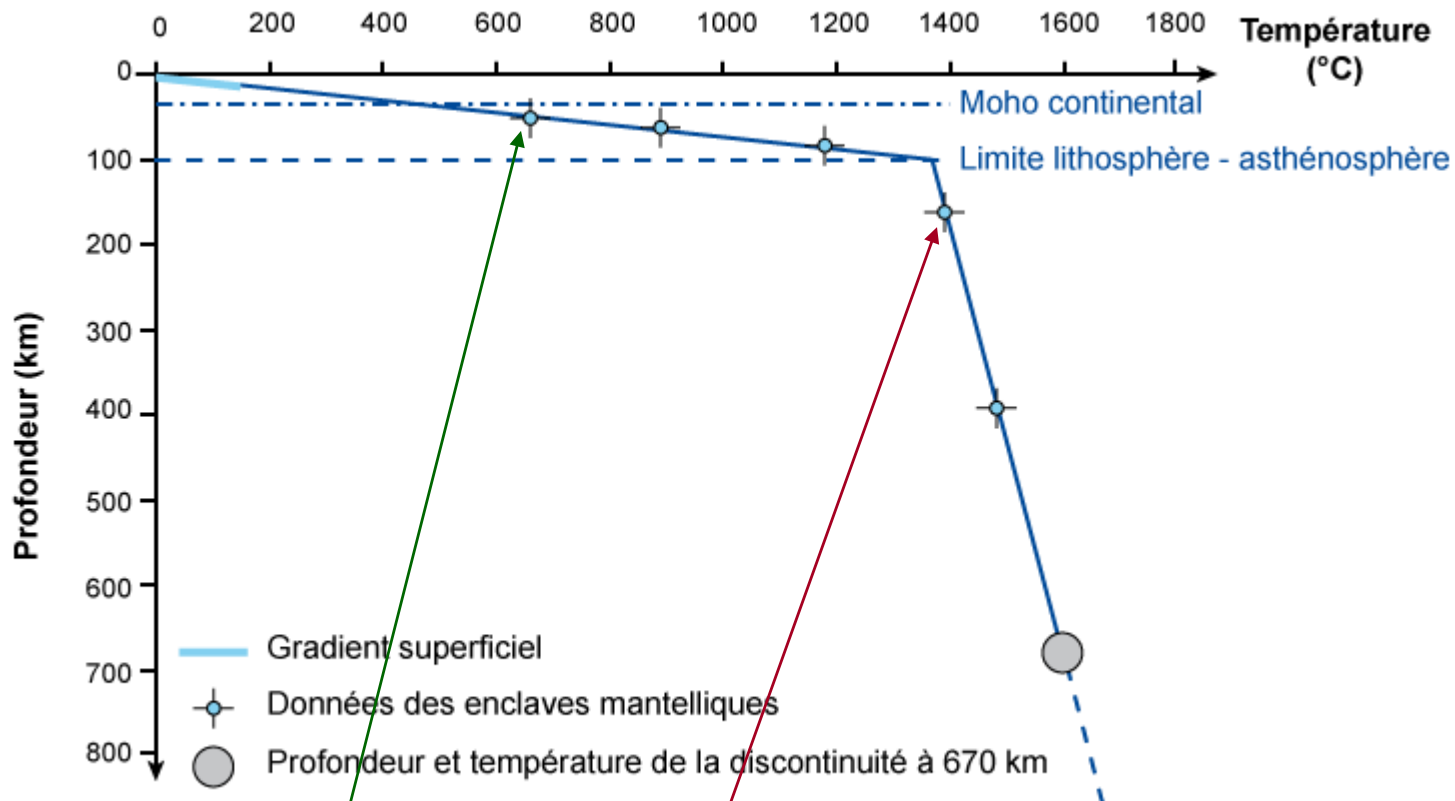
# Diagramme de phase de l'olivine



On connaît le diagramme de changement de phases de l'olivine.

On connaît la profondeur (sismologie) de la transition  $Ri \rightarrow Pv+Mw$

On trouve ainsi la température à 670 km

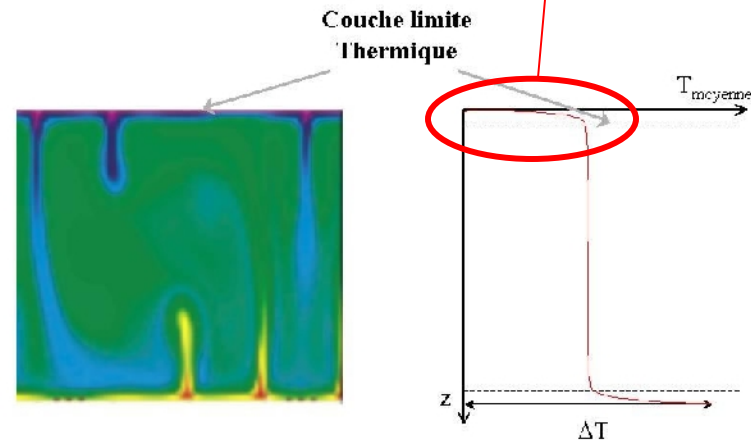


Avouez  
que ça  
ressemble !

Courbe très schématique

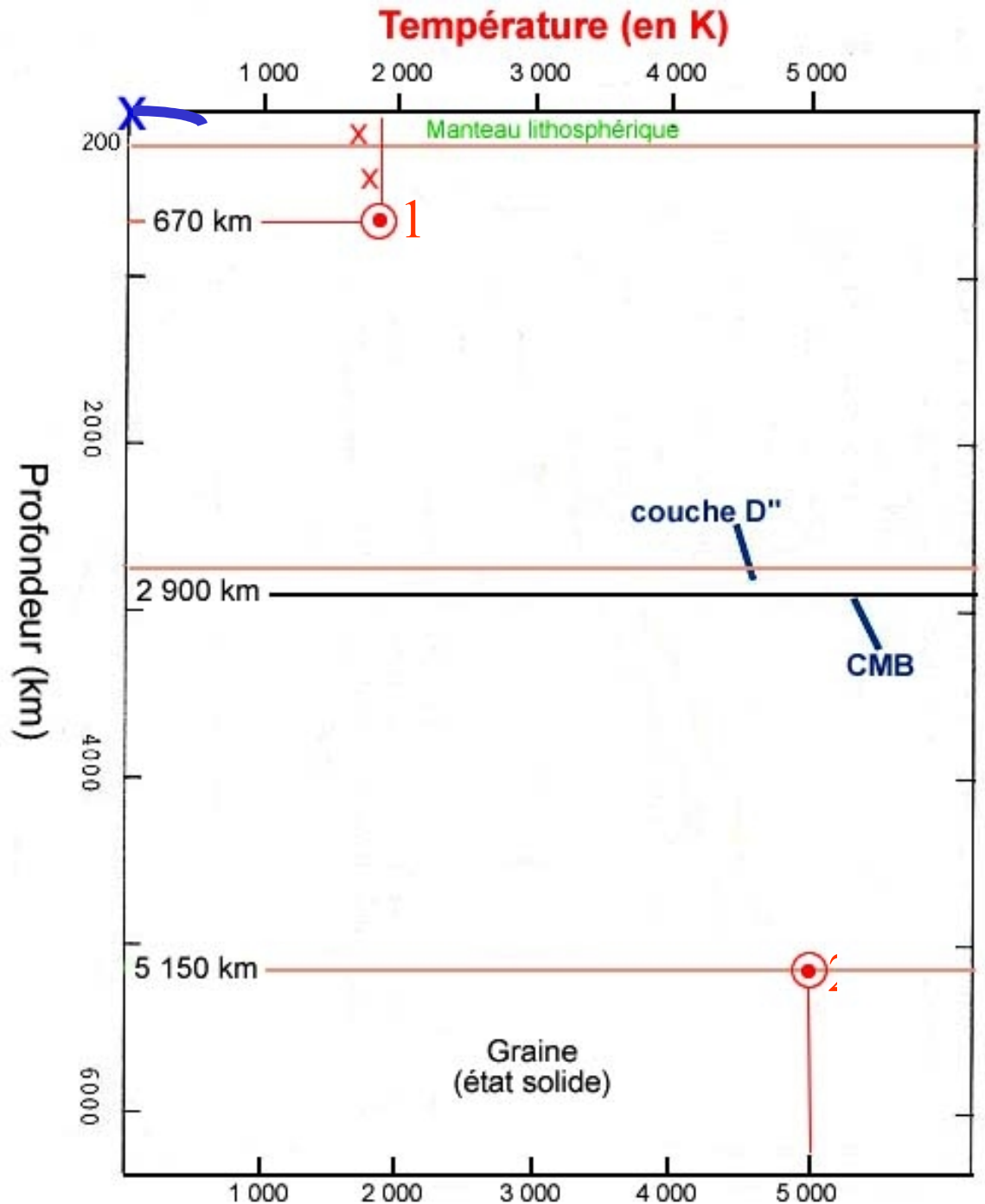


Un système convectif



La température dans les 700  
premiers kilomètres de la Terre





# Où connaît-on T dans la Terre ?

**X** : T en surface

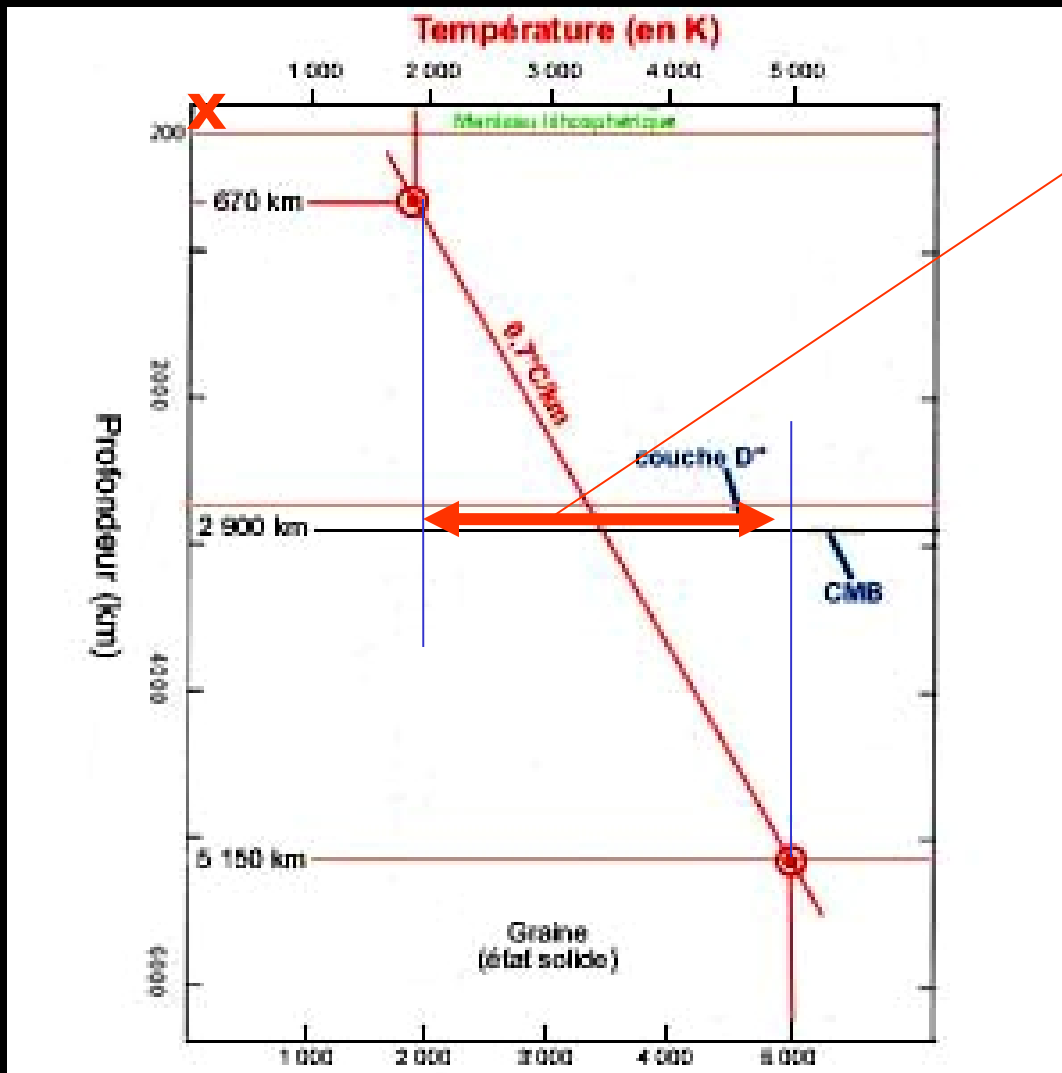
-- : gradient en surface

**X** : données des enclaves

**1** : T à 670 km

**2** : T à 5150 km

(température de cristallisation du fer à cette pression, à l'interface noyau externe / noyau interne)



La température à la base du manteau se trouve quelque part entre 2000 et 5000 K

→

$2000 < \Delta T < 5000 \text{ K}$

**Donc,  $\Delta T$  est compris entre 2000 et 5000 K**

Maintenant, on connaît  
 $g$ ,  $d$ ,  $\alpha$ ,  $\kappa$ ,  $v$ ,  $\Delta T$ ,  
on peut calculer  $Ra$   
du manteau :

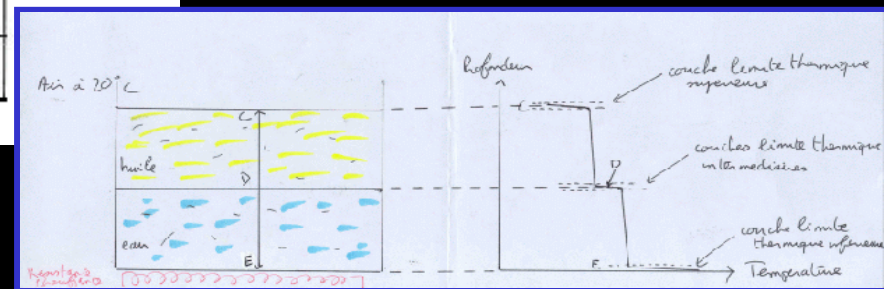
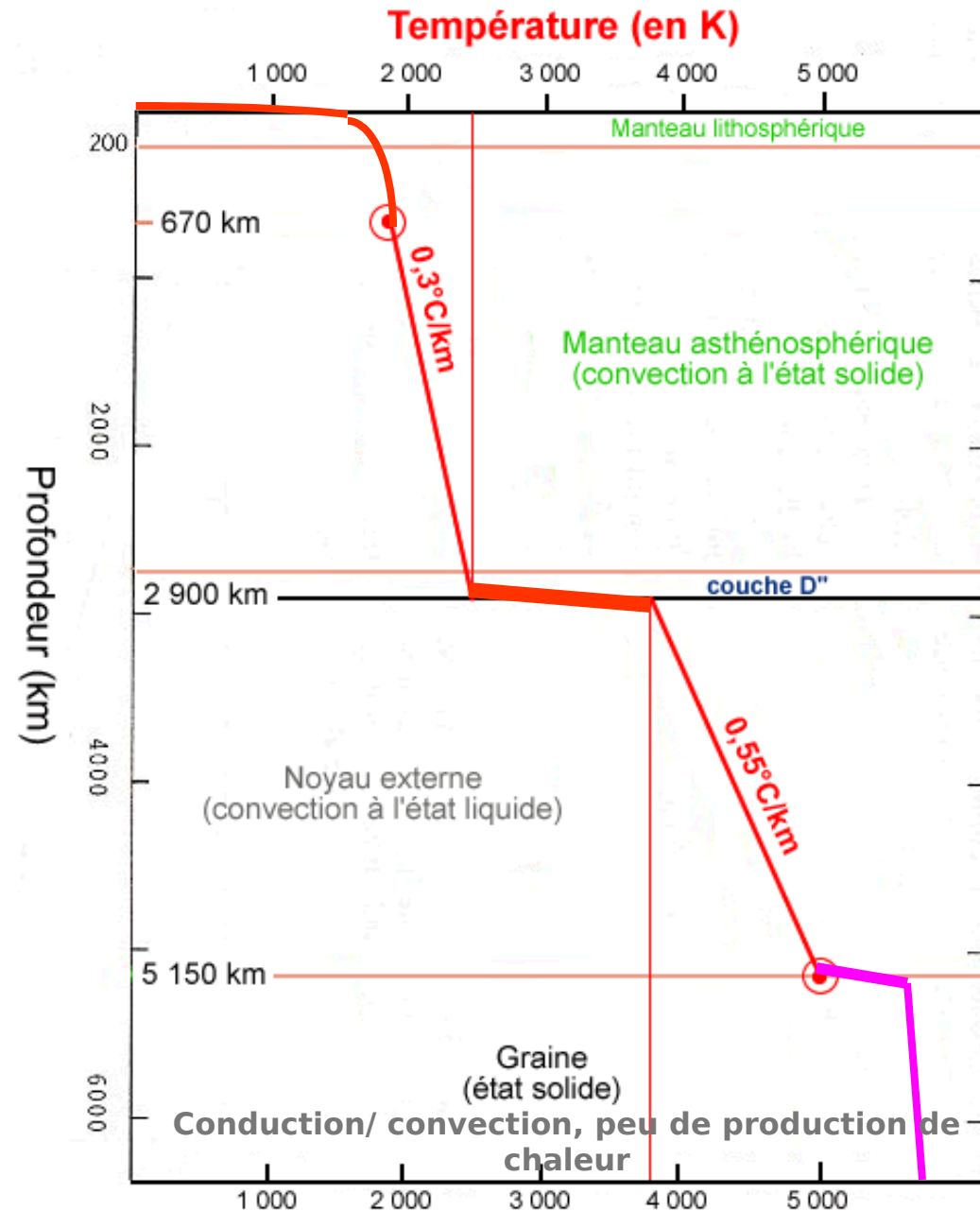
$$10^6 < Ra < 10^8$$



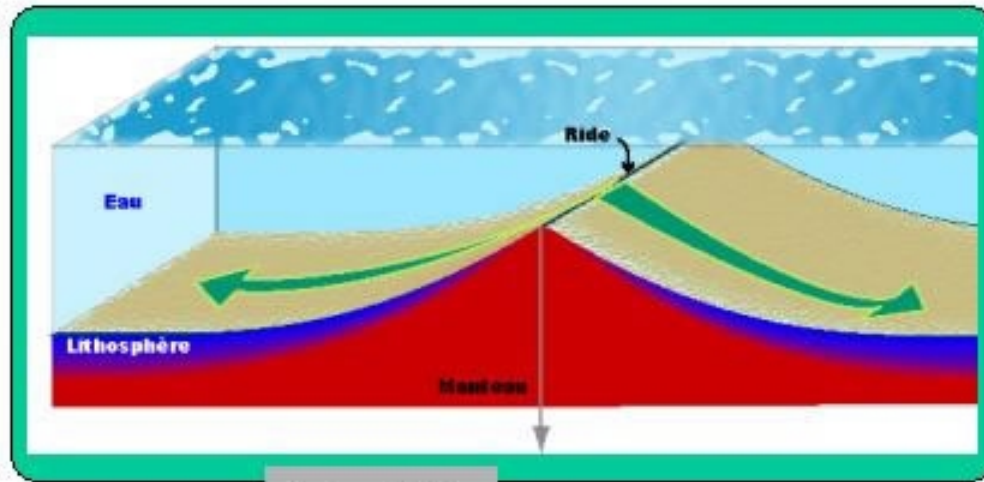
$Ra > 2.10^3$   
Donc, le manteau  
de la Terre  
convecte, CQFD.



**Et puisque le manteau convecte, (et le noyau externe sans doute aussi), on peut, grâce au gradient adiabatique, calculer T en tous points de la Terre**

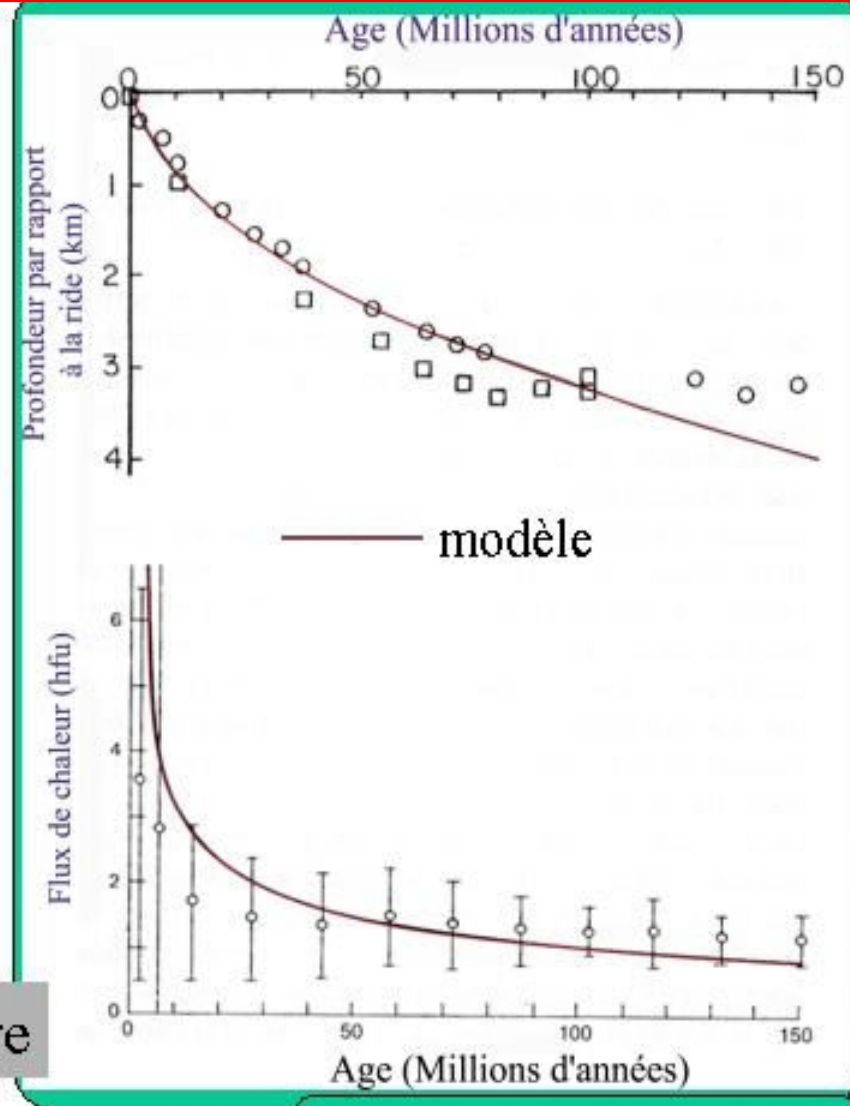


**Selon ce modèle, la lithosphère correspond à la couche limite thermique. Ce modèle permet d'en calculer l'épaisseur, de calculer le flux thermique ..., et de comparer à la nature. Ca colle !**



Modèle

**Au fur et à mesure qu'elle perd de la chaleur, la CLT (la lithosphère océanique) s'épaissit.**



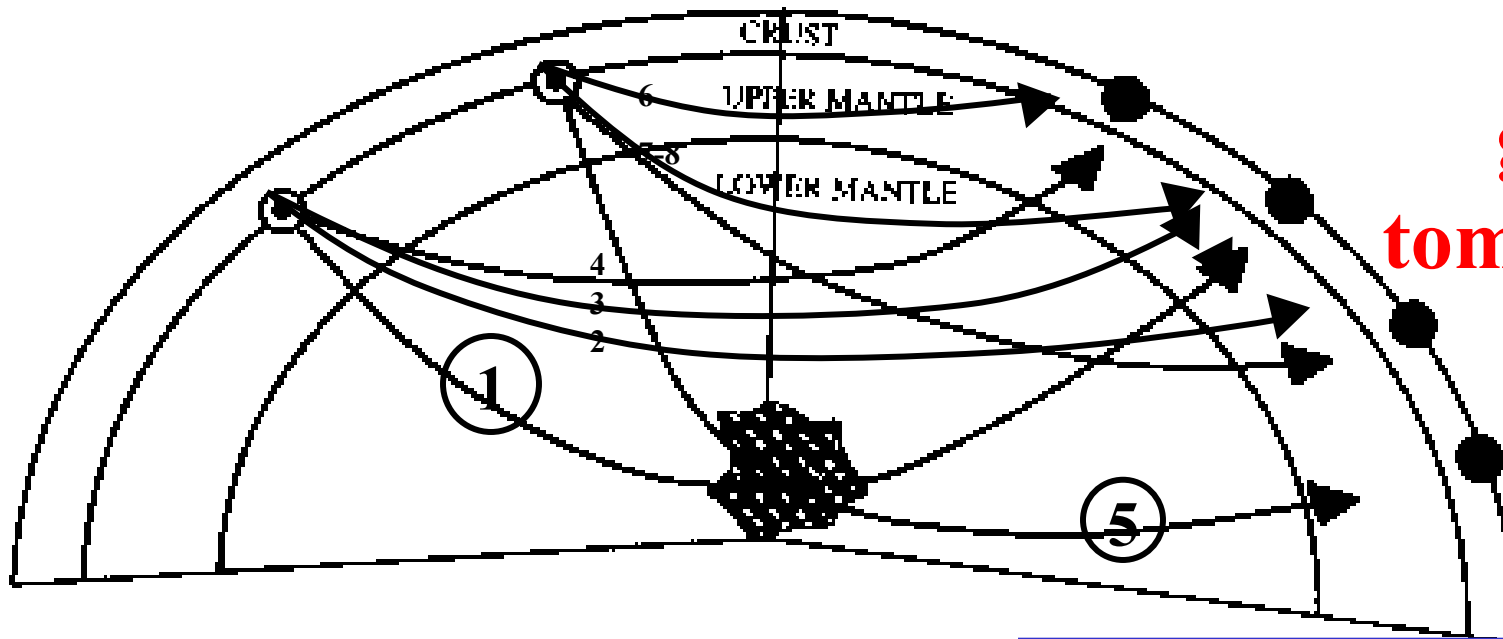
Mesure

**Résumons et allons plus loin :**

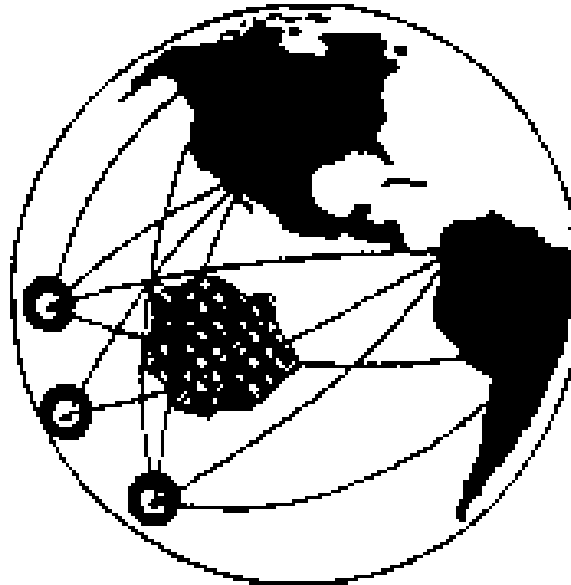
- \* Le manteau « doit » (théoriquement) convecter.**
- \* La lithosphère (océanique) est la couche limite thermique (supérieure) du système convectif.**
- \* Le manteau représente 85% du volume de la Terre. Il produit la majorité de l'énergie de la Terre**
- \* Le noyau avec ses 14% du volume produit encore moins d'énergie, car U, Th et K sont très « sidérophobes ».**
- \* Donc théoriquement, dans le manteau terrestre, il y a « descente active » et « montée passive ».**
- \* le peu d'énergie produit dans le noyau peut entraîner une remontée active très limitée.**



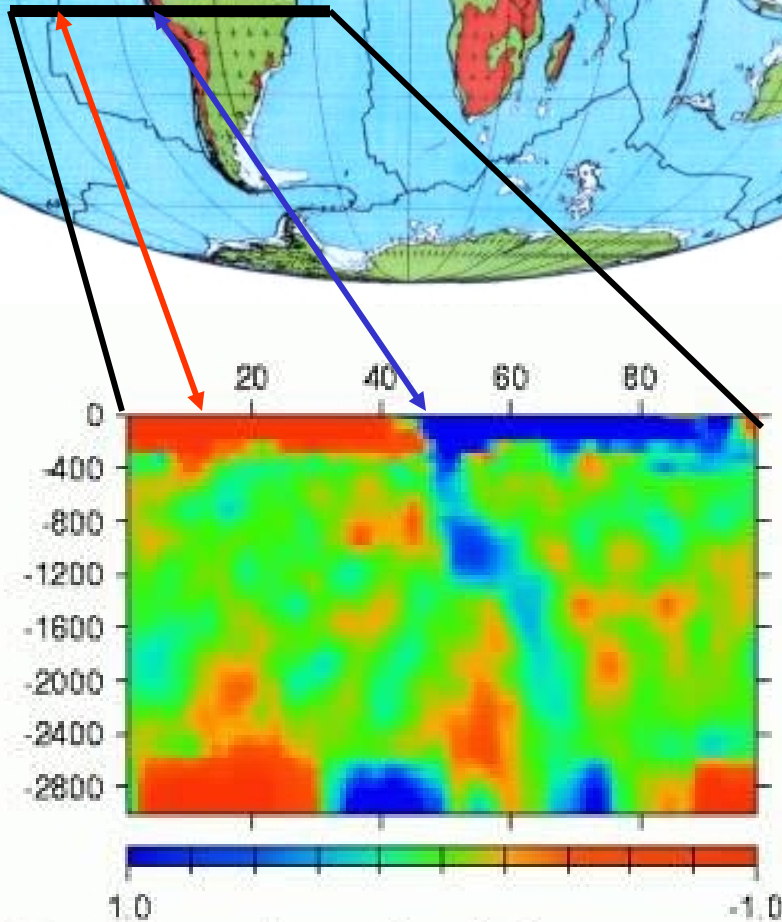
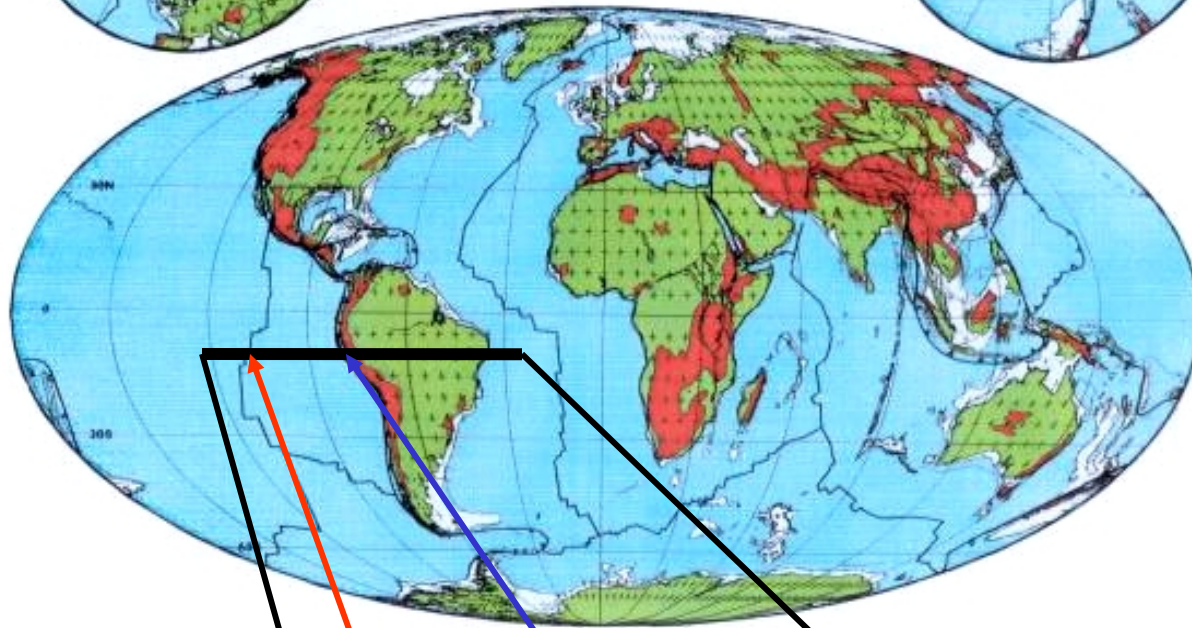
# Vérifions grâce à la tomographie sismique



## Le principe

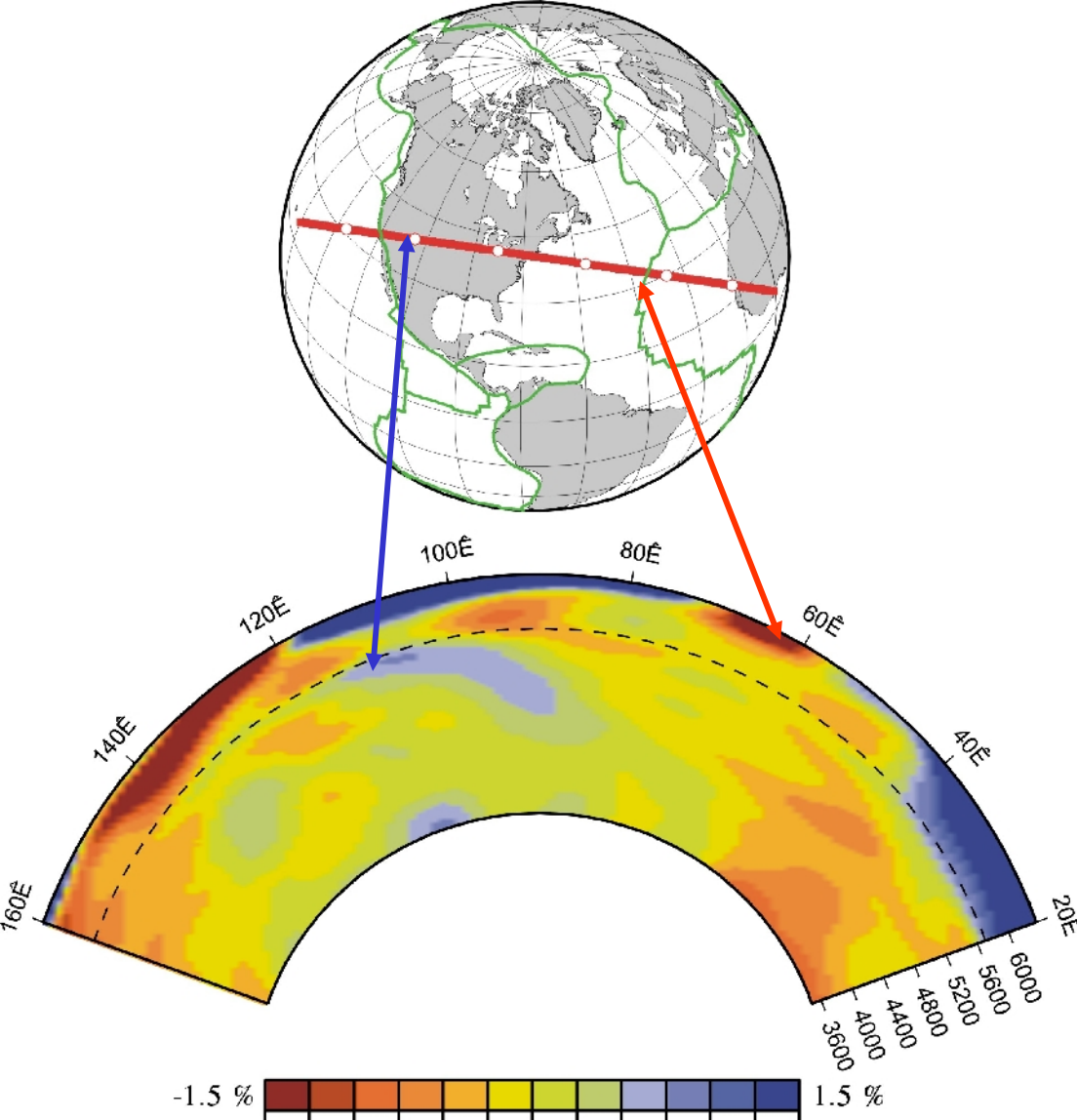


Les ondes 1 et 5 arrivent avec une vitesse « anormale ». Les trajets 2, 3, 4, 6, 7 et 8 arrivent avec une vitesse « normale ». Il y a une anomalie de vitesse à l'intersection des trajets 1 et 5, rien sur les autres trajets



**Anomalie de Vitesse (%)** (par rapport à la moyenne à cette profondeur)

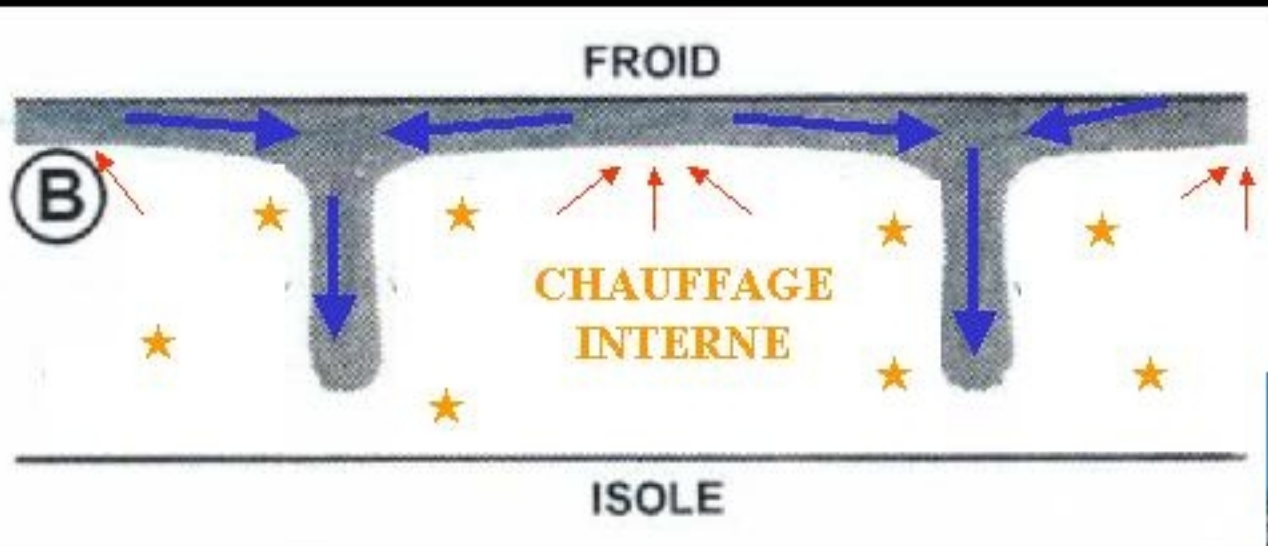
**Résultats : les dorsales ne se « voient » qu'en surface et ne s'enracinent pas ; les subductions se « voient » très profond dans le manteau.**



**Idem :**

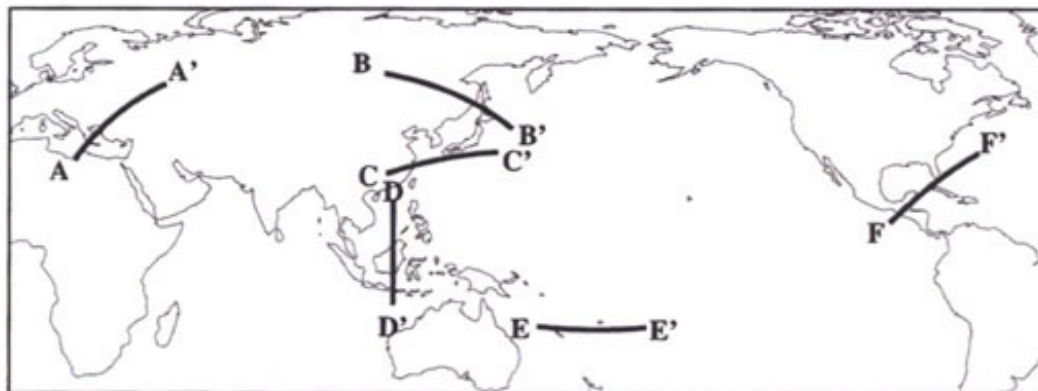
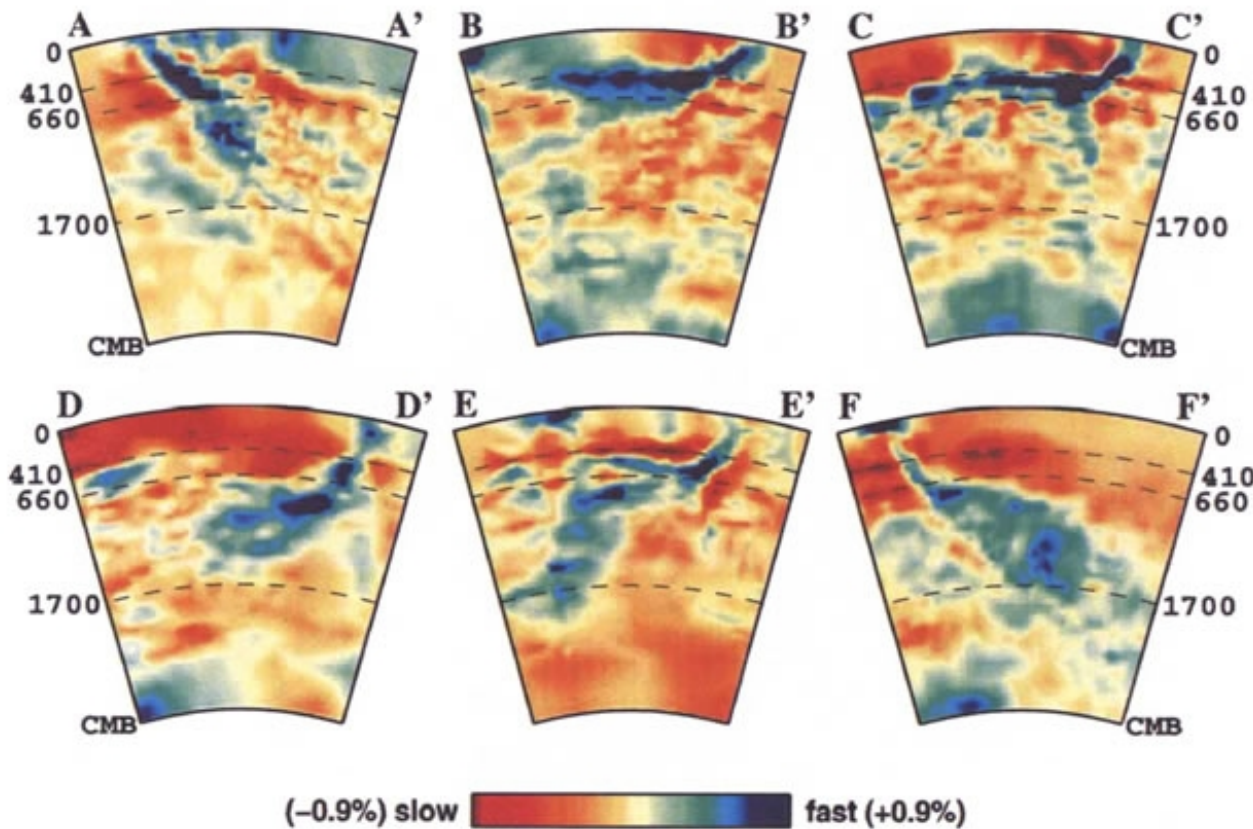
**Résultats : les dorsales ne se voient qu'en surface et ne s'enracinent pas ; les subductions se voient très profond dans le manteau.**





**Cela confirme ce que suggérerait  
fortement la théorie : les  
subductions sont actives et  
descendent jusqu'au noyau ; les  
dorsales ne sont que des  
remontées locales et passives, qui  
ne s'enracinent pas en  
profondeur**





**Quelques  
exemples de  
« slabs ».**

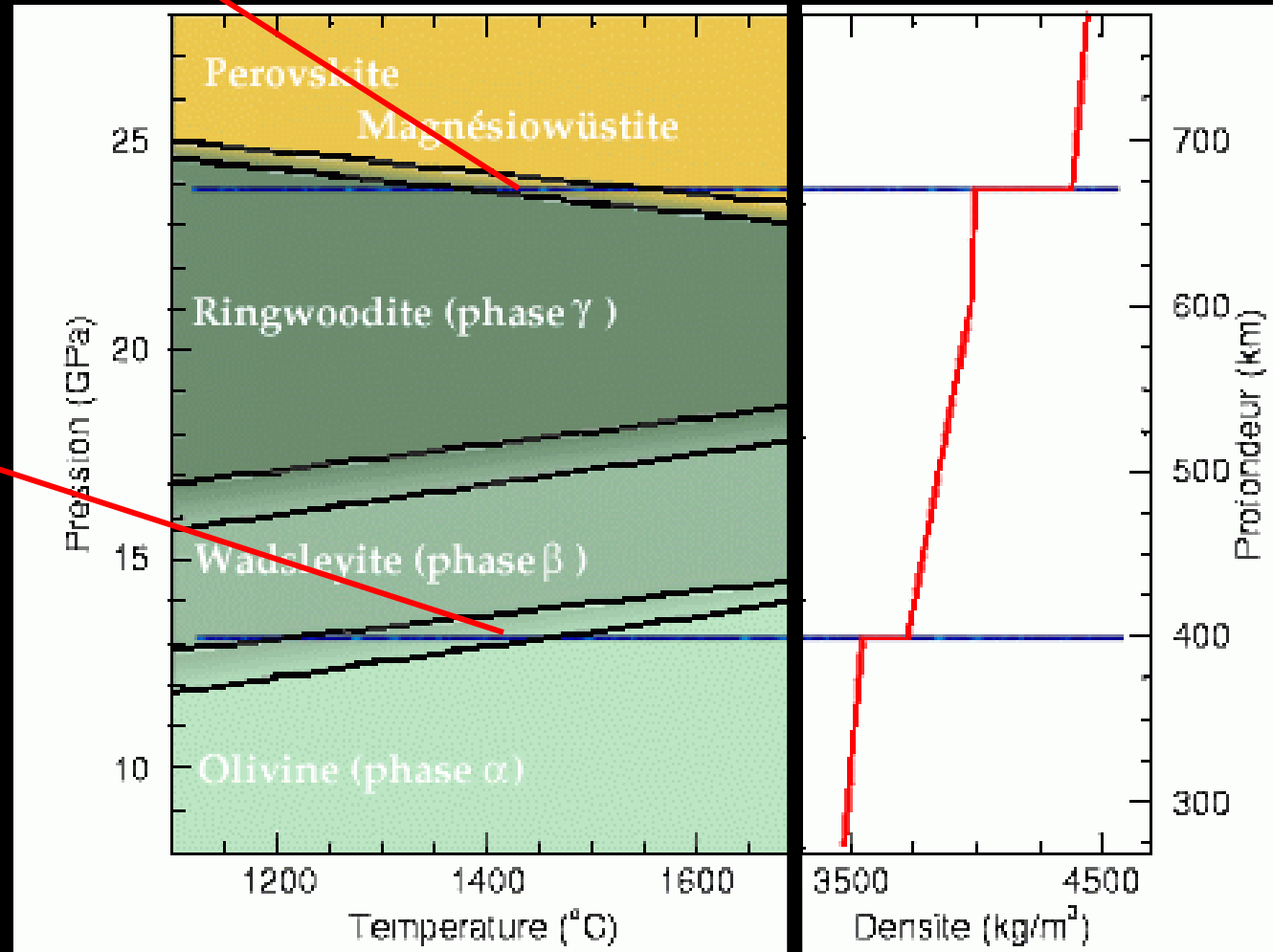
**Notons la  
fréquente  
« stagnation »  
à 670 km.**

**Pourquoi ?**

# Pourquoi cette « stagnation » à 670 km ?

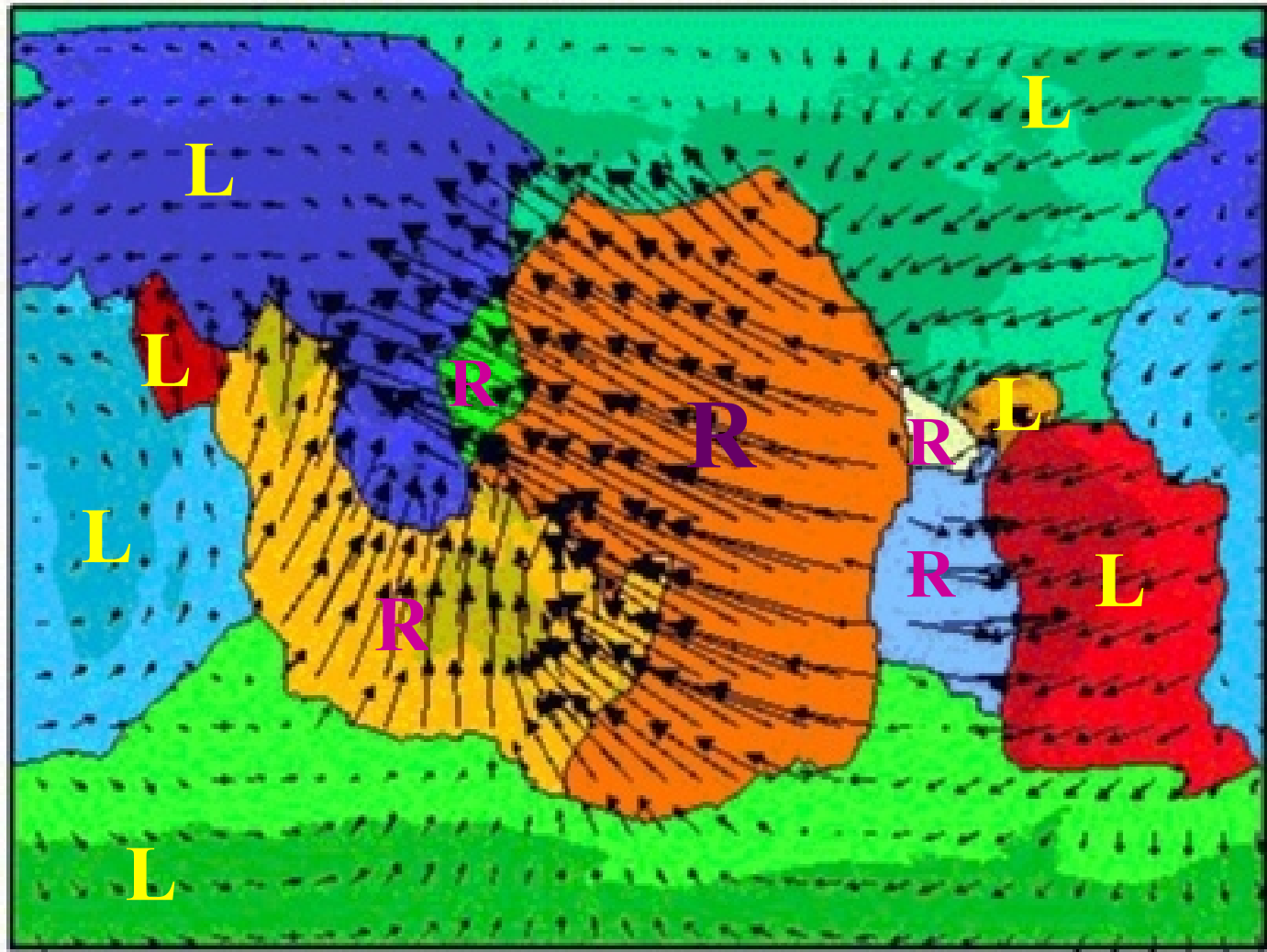
Le slab, plus froid, est encore en phase  $\gamma$  quand il arrive à 670 km. Il a du mal à s'enfoncer

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

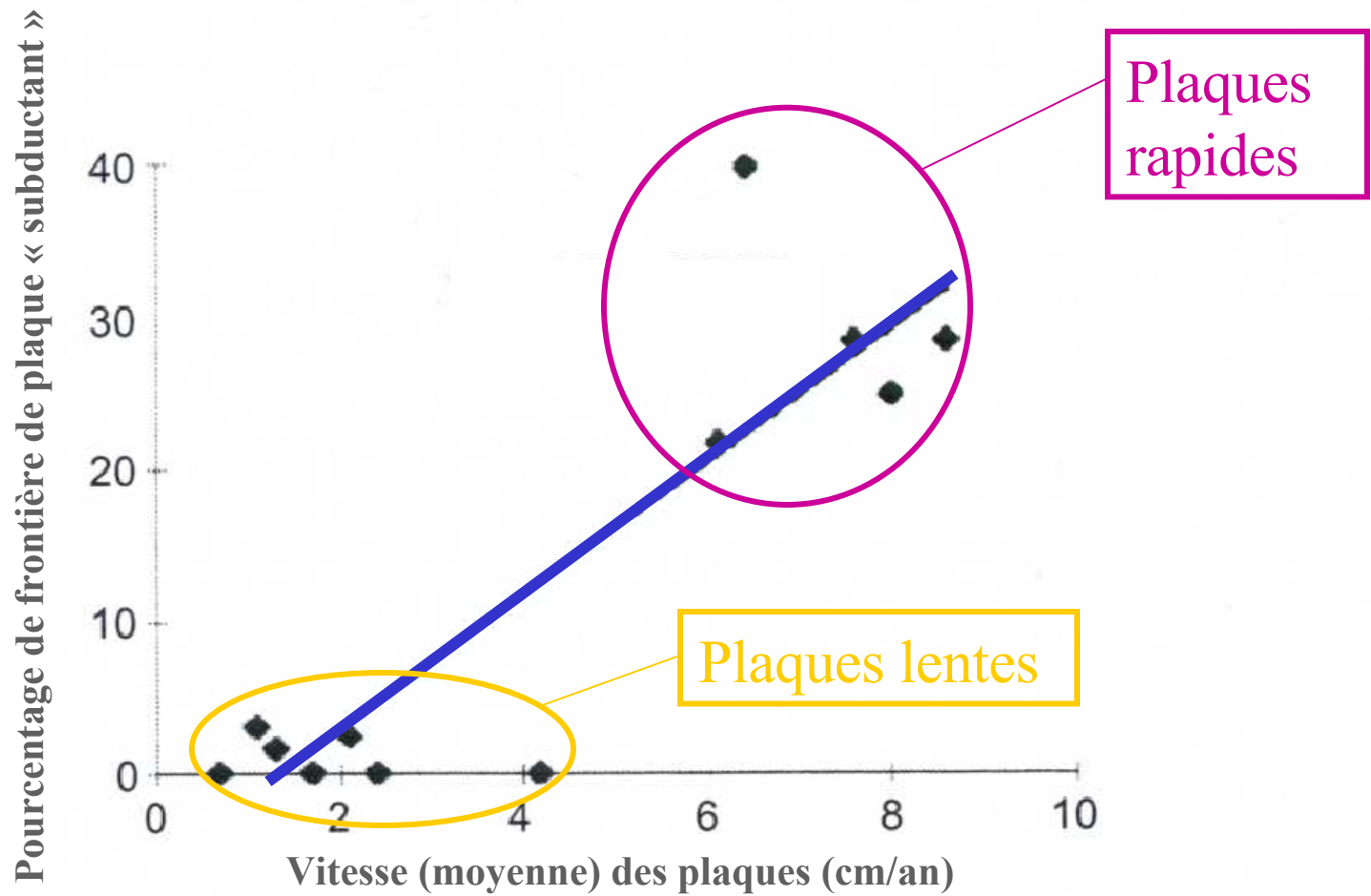




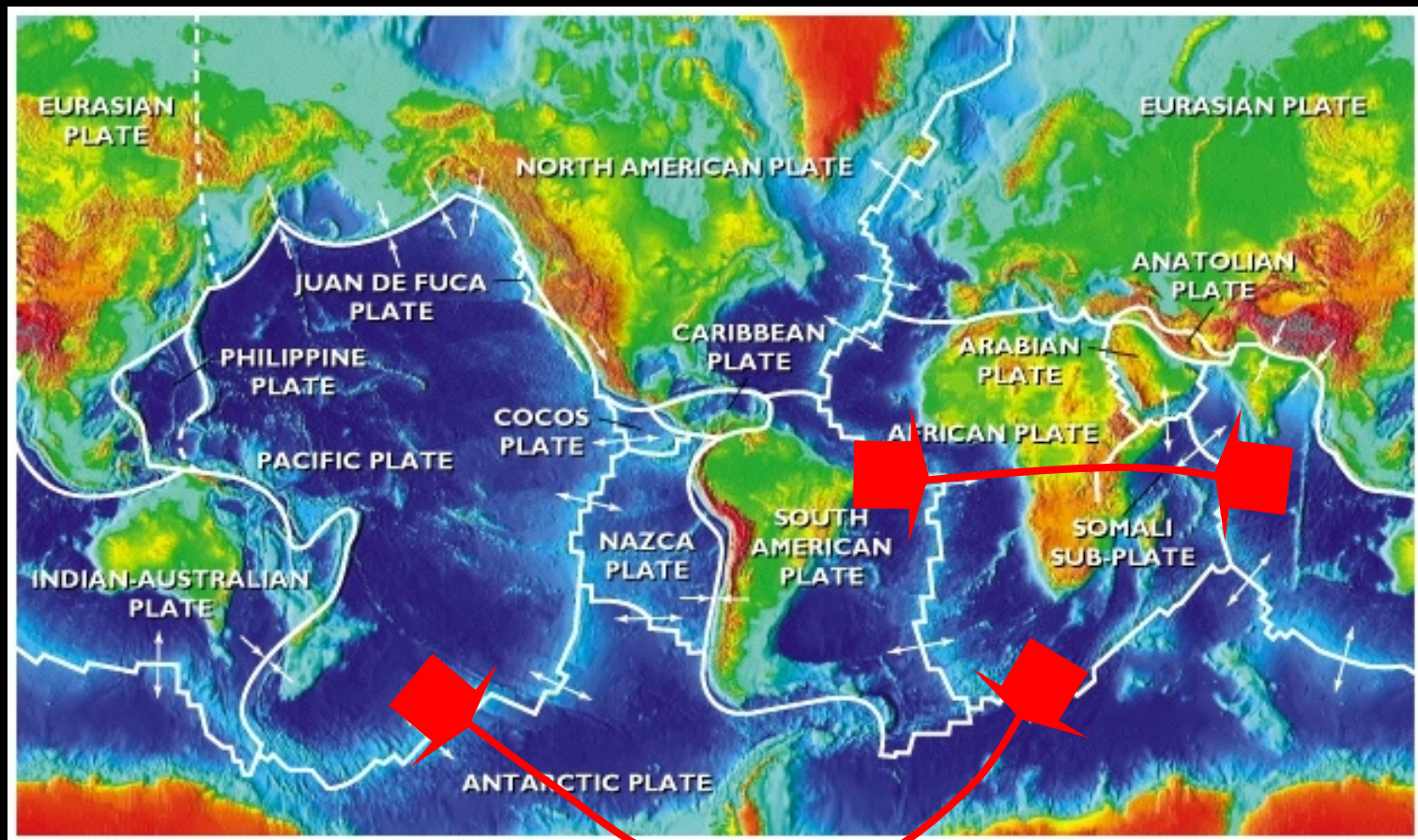
L = plaque lente  
R = plaque rapide



Une autre « preuve » du rôle moteur des  
subduction : le mouvement absolu des plaques, mis  
en relation avec ...

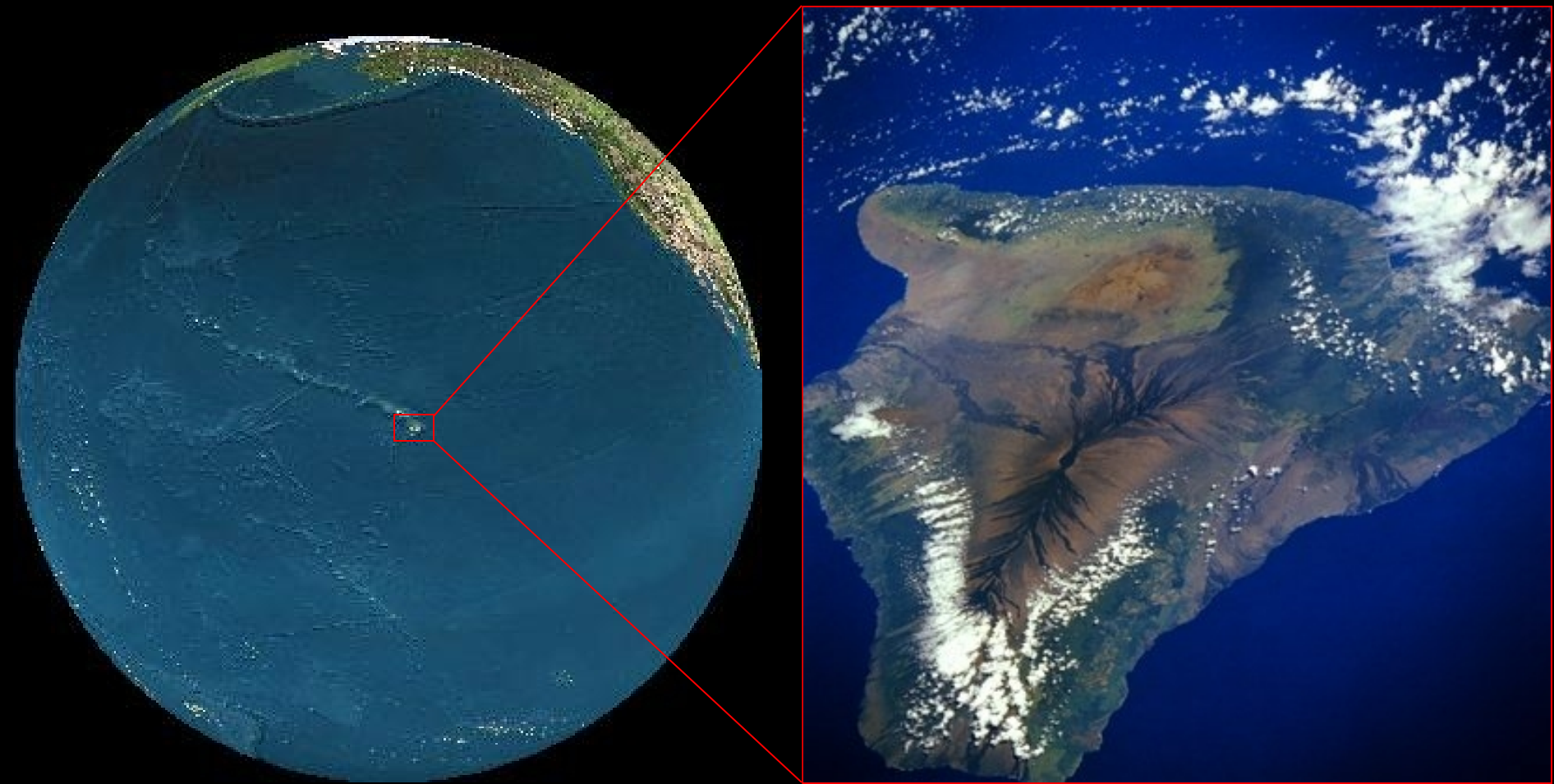


**... la proportion de leur frontière qui subduit. Les plaques qui subduisent vont « vite » ; les plaques qui ne subduisent pas ne bougent que peu. Idem pour les dorsales, rapides quand elles sont « attachées » à des subductions, lentes dans le cas inverse**



**Et si les dorsales avaient un rôle moteur actif majeur, imaginez ce que seraient les plaques ceinturées de dorsales !**

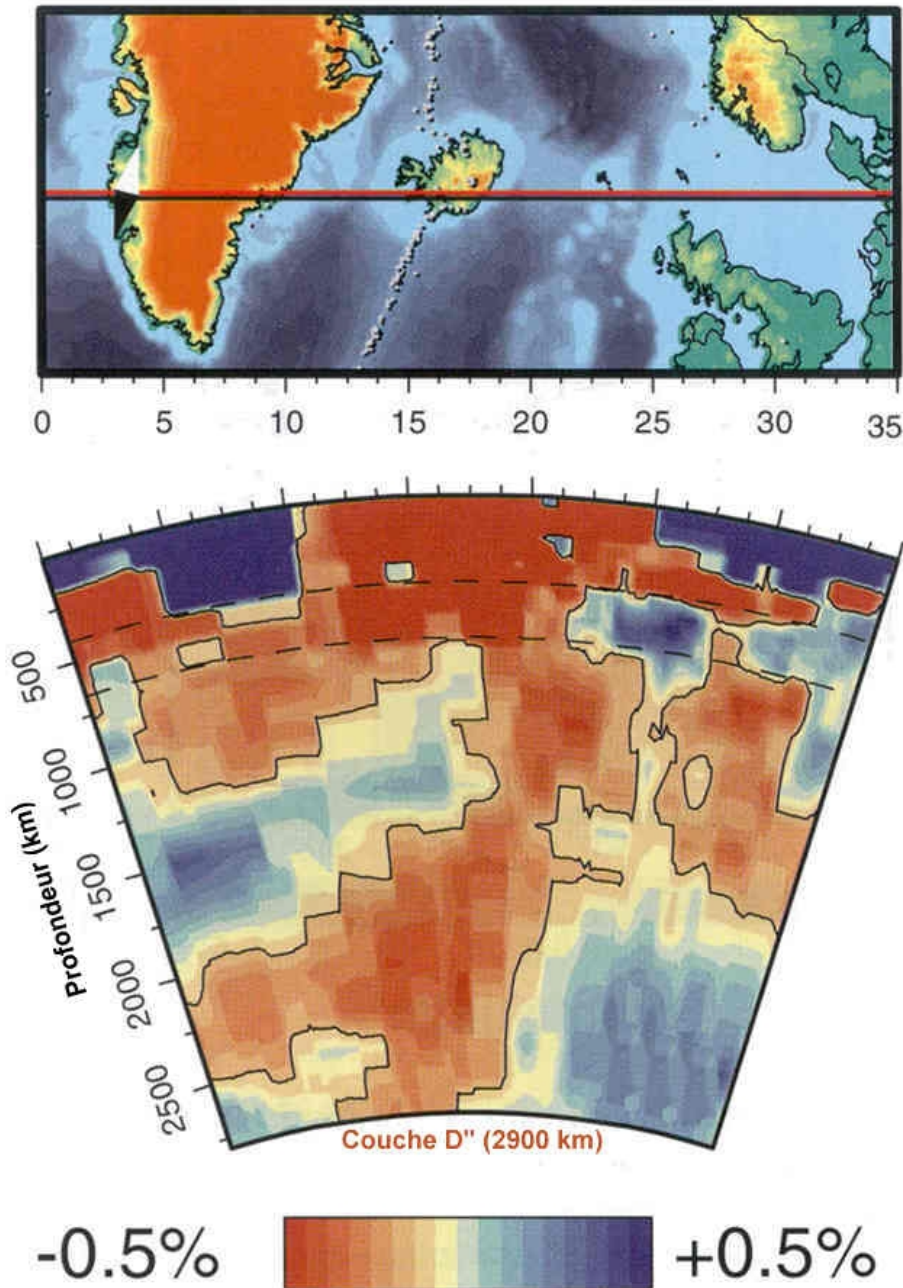




**Et les points chauds dans tout ça ?**

**Tomographie  
sous l'Islande  
(point chaud sous  
dorsale).**

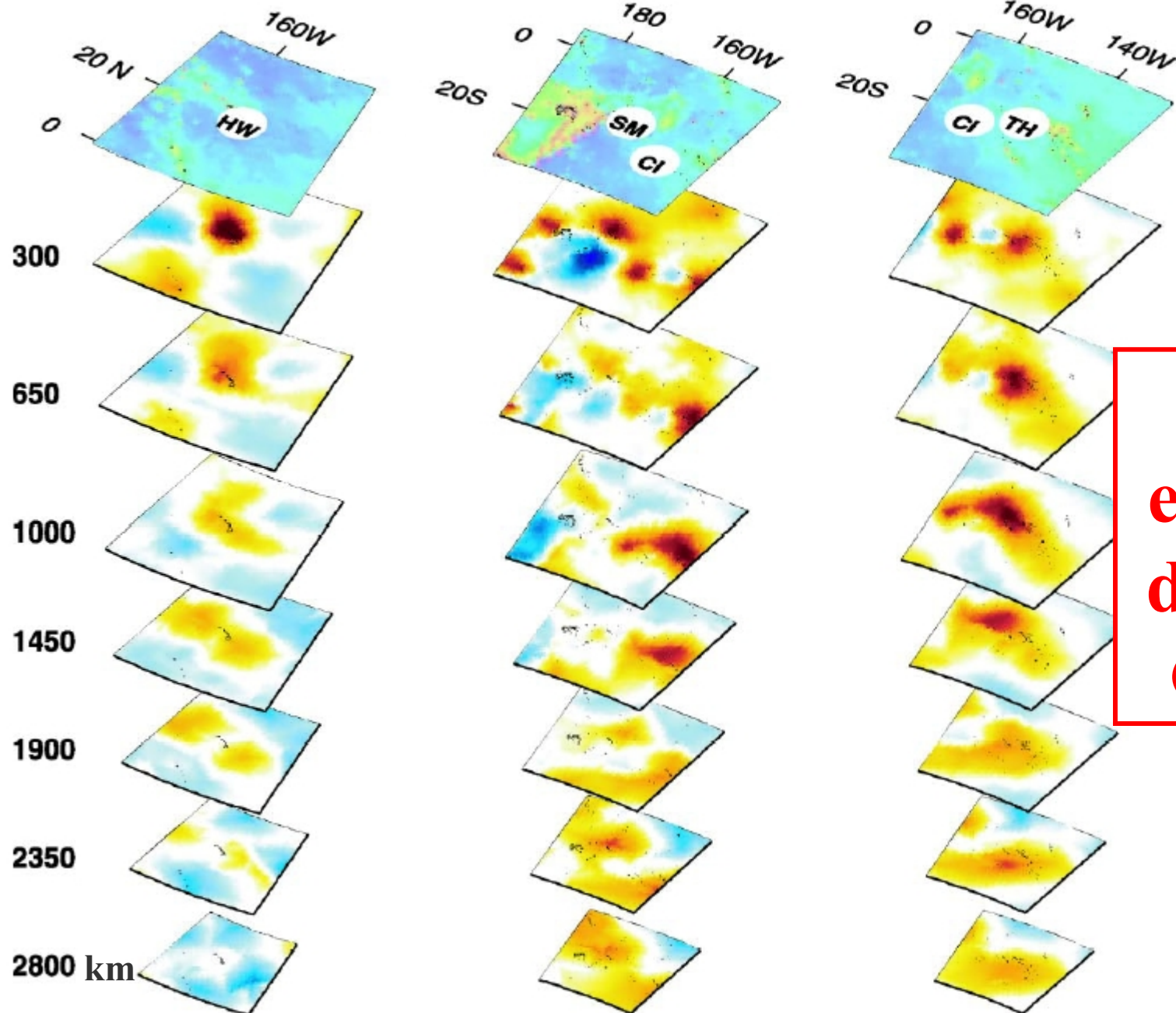
**Rappelez vous,  
sous une dorsale  
ordinaire, rien de  
visible au delà de  
300 km**



Hawaii

Samoa/Cook

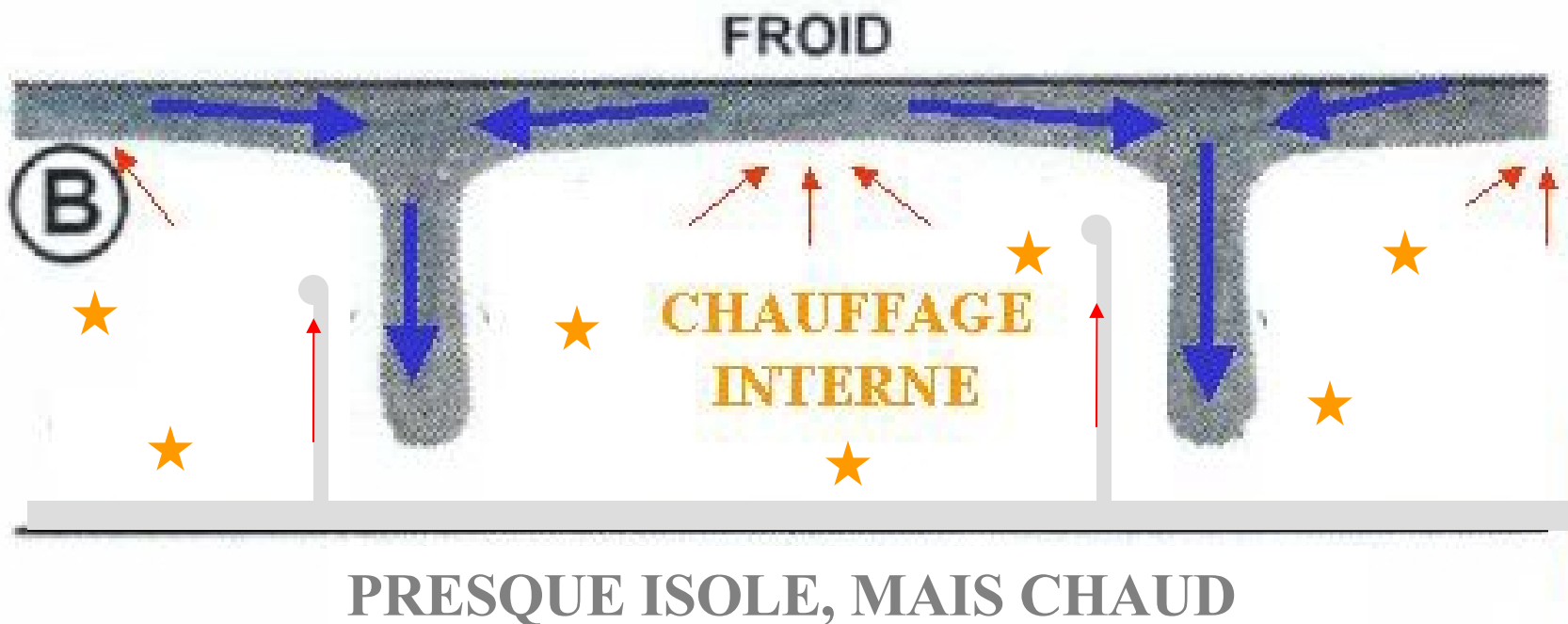
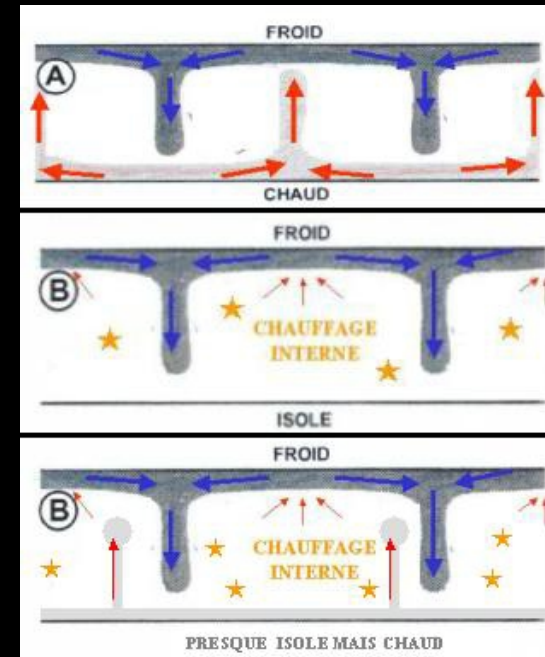
Tahiti/Cook

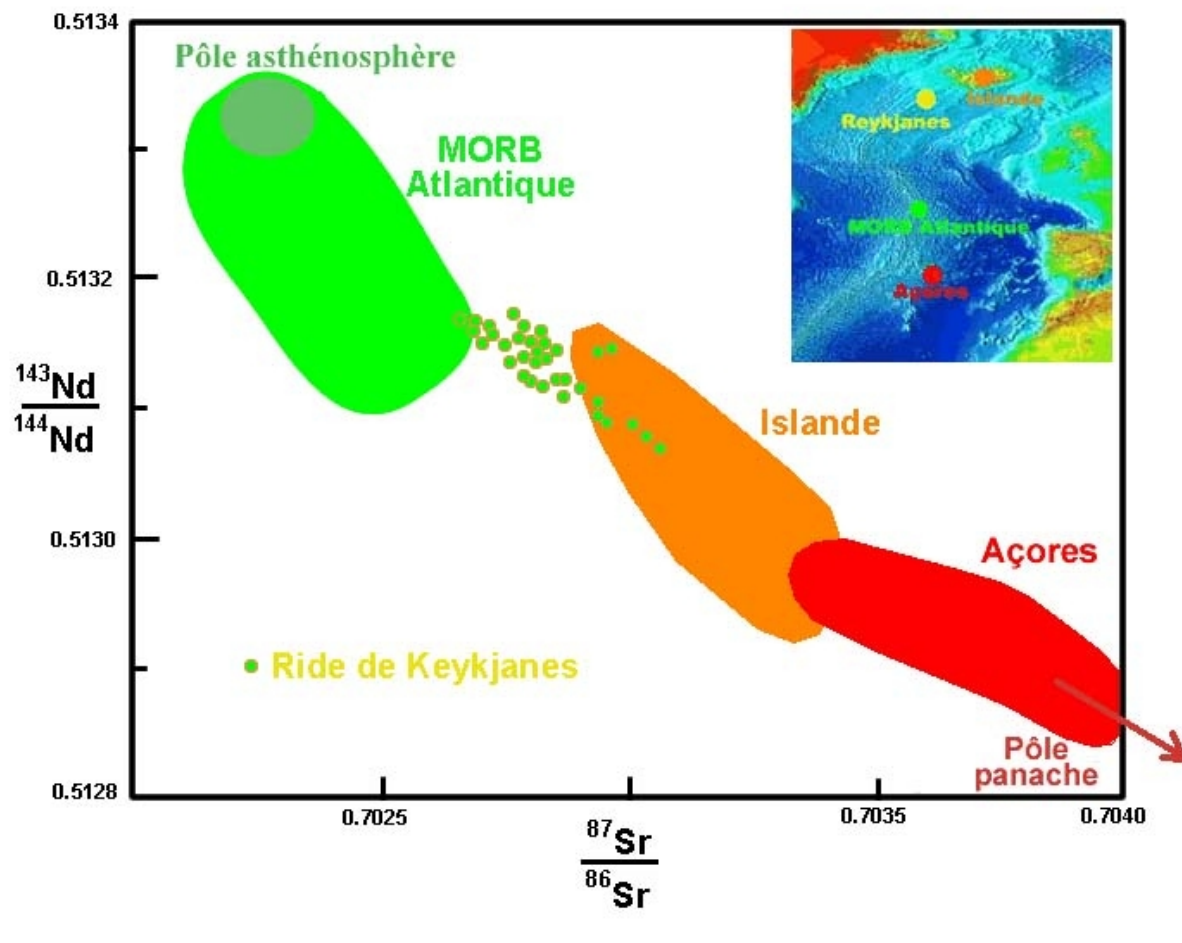


**Autres  
exemples  
de Points  
Chauds**

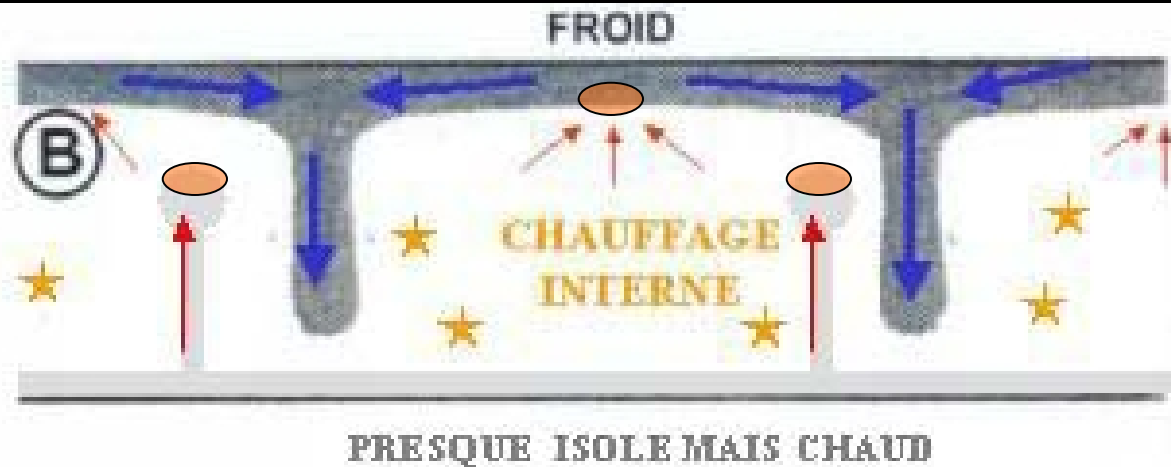


Pour expliquer les points  
chauds, des 3 possibilités  
théoriques vues précédemment,  
la 3<sup>ème</sup> possibilité serait la  
« bonne ».





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



Il y a une cinquantaine de points chauds. Si on leur suppose 100 km de diamètre, cela fait, mis bout à bout, un chapelet virtuel de 5000 km de long. Il y a 50 000 km de zone de subduction (et de dorsales, conséquences des subductions), soit 10 fois plus.

90% de la chaleur s'évacue par le processus [ subduction (active) + dorsale (passive) ], et 10% par point chaud.

**Dans la compétition « remontée active / remontée passive », c'est la remontée passive (conséquence de la subduction) qui gagne, et de loin**





**Peut-on faire des modèles analogiques réalistes ?**

**Le but, ce n'est pas de manipuler pour manipuler,  
mais bien de faire des modèles RÉALISTES, qui  
apportent de vrais renseignements, et non pas des  
idées fausses**

# Peut-on faire des modèles analogiques réalistes ?

- 1- Il est impératif de faire prendre conscience aux élèves qu'en prenant un liquide, on diminue la viscosité de  $10^{20}$ , ce qui permet d'aller « plus vite », mais ...
- 2 – Il est impératif d'insister sur le rôle majeur de la source de froid supérieure
- 3 – On ne pourra pas chauffer le liquide dans sa masse avec un montage simple, donc on ne reproduira pas les modalités de la convection mantellique
- 4 – On peut essayer de s'affranchir de cette difficulté en travaillant en régime transitoire, soit en refroidissant un liquide chaud par la surface du haut (essayer de refaire de la subduction), soit en réchauffant ponctuellement par le bas un liquide froid (essayer de faire un point chaud)

# On va essayer de visualiser la convection par la méthode d'ombroscopie

Liquide à une température  $T_1$ ,  
donc à un indice de réfraction  $N_1$

SOURCE DE RAYONS  
PARALLELES.

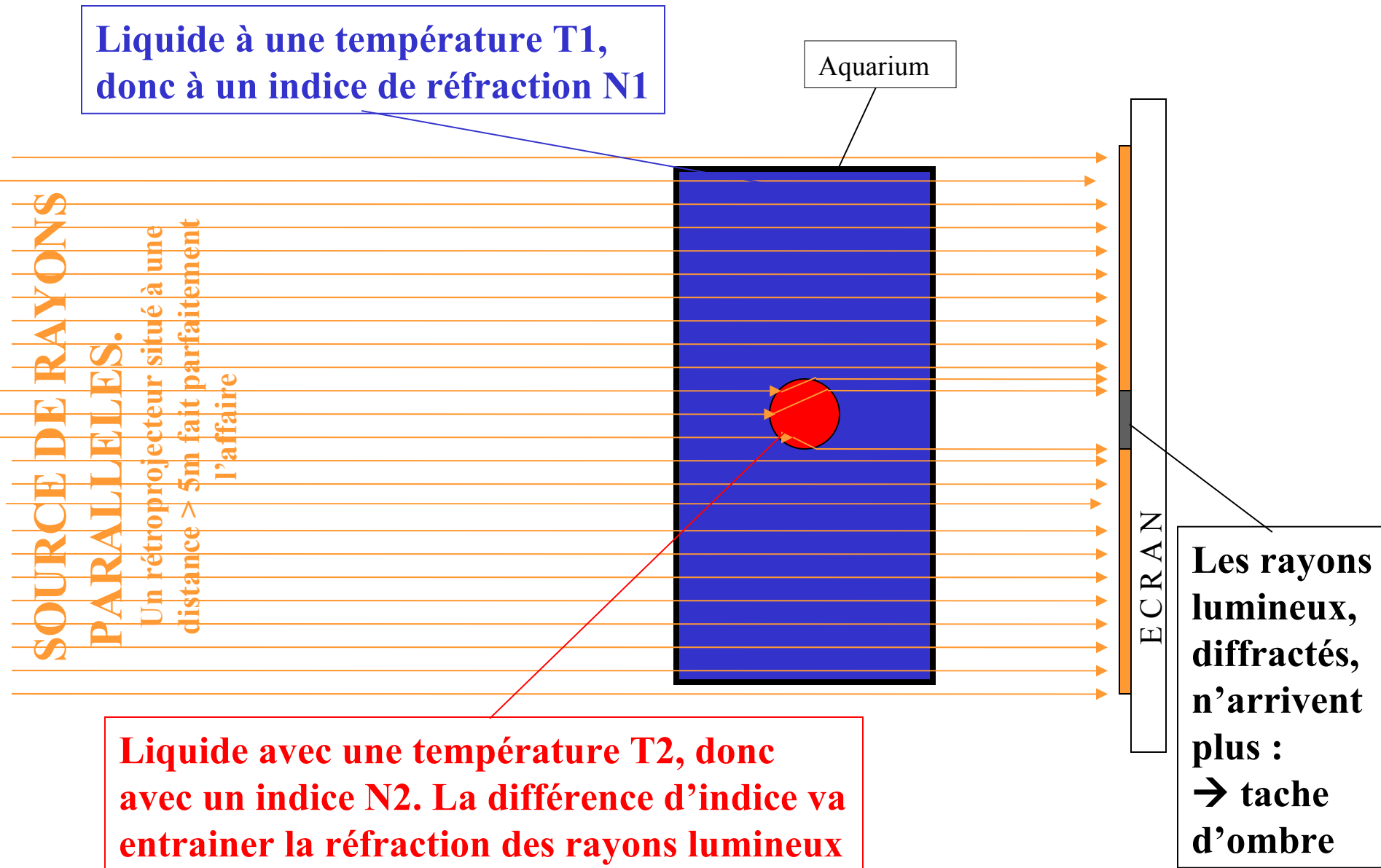
Un rétroprojecteur situé à une  
distance  $> 5\text{m}$  fait parfaitement  
l'affaire

Aquarium

ECRAN

Liquide avec une température  $T_2$ , donc  
avec un indice  $N_2$ . La différence d'indice va  
entraîner la réfraction des rayons lumineux

Les rayons  
lumineux,  
diffractés,  
n'arrivent  
plus :  
→ tache  
d'ombre







**On arrive relativement bien  
à simuler un point chaud.  
Noter la forme de la tête,  
caractéristique d'un  
écoulement fin s'amortissant  
dans un fluide immobile.**



**On n'arrive pas à simuler une subduction,  
même en refroidissant toute la surface. On fait  
plutôt une série de « points froids »  
coalescents.**

**Pourquoi ne peut-on pas réussir de simulation analogique simple qui «reproduisent» une subduction?**

**Il y a 2 raisons :**

**1 – Contrairement à l'eau qui ne change que très peu de viscosité quand on change T, il y a un facteur  $10^4$  entre la viscosité de la couche limite thermique et celle de manteau sous-jacent → la CLT (lithosphère océanique) a une individualité mécanique, en plus de son individualité thermique**

**2 – La CLT possède un « flotteur » attaché à sa face supérieure, la croûte, flotteur moyennement efficace pour la lithosphère océanique, très efficace pour la lithosphère continentale**



À défaut de modèles réalistes, on peut faire des calculs simples, et riches d'enseignements.

En voici quelques exemples.

Soyons conscient qu'il ne s'agit que d'approximations-simplifications, parfois grossières (pour être faisables par des élèves de 1<sup>ère</sup> et T S), dont le but n'est que de donner des ordres de grandeur

Pour  $r_s \leq \lambda$ , la particule ne peut plus « communiquer » avec elle-même ! Le physicien peut poser son stylo ! Soit

$$\frac{2Gm}{c^2} \leq \frac{h}{mc}$$

ou

$$m \leq \sqrt{\frac{hc}{2G}}$$

$m_{pl}$  masse de Planck,

masse du plus petit trou noir compatible avec la physique quantique.

$m_{pl} \approx 1,6 \cdot 10^{-27}$  g ou  $1,2 \cdot 10^{19}$  GeV, soit  $T \approx 10^{32}$  K. La taille correspondante est le rayon de Planck

$$r_{pl} = \frac{2G}{c^2} \sqrt{\frac{hc}{2G}} = \left(\frac{2Gh}{c^3}\right)^{1/2} \approx 2,2 \cdot 10^{-33} \text{ cm}$$

Le temps de Planck est le temps nécessaire à la lumière pour parcourir  $r_{pl}$  soit

$$t_{pl} = \frac{r_{pl}}{c} = \sqrt{\frac{2Gh}{c^5}} \approx 7 \cdot 10^{-44} \text{ s} \approx 10^{-43} \text{ s}$$

Temps et rayon de Planck sont les plus petites unités de temps et de distance compatibles avec la physique quantique.

# Quelques valeurs de températures, de densités (masses volumiques) ...

$\rho$  croûte océanique = 2,80-2,90 .

$\rho$  péridotite à 0°C = 3,35

T lithosphère, de 0° à 1200-1300°C, moyenne de 600°C.

T asthénosphère = 1300°C

$\alpha$  péridotite =  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

$dV / V = - dp / \rho = \alpha \cdot dT$  (un corps se dilate de façon proportionnelle à  $\Delta T$ )

Pour 600° de  $\Delta T$  (différence entre T litho. et T asthéo.) :

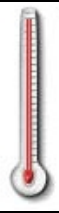
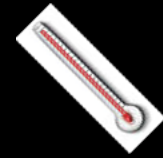
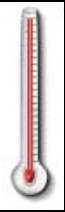
$$\Delta \rho = \rho \cdot \alpha \cdot \Delta T = 3,35 \cdot 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 600 = 0,05$$

$\rho$  péridotite en surface (0°C) = 3,35

$\rho$  manteau lithosphérique (600°C) = 3,30

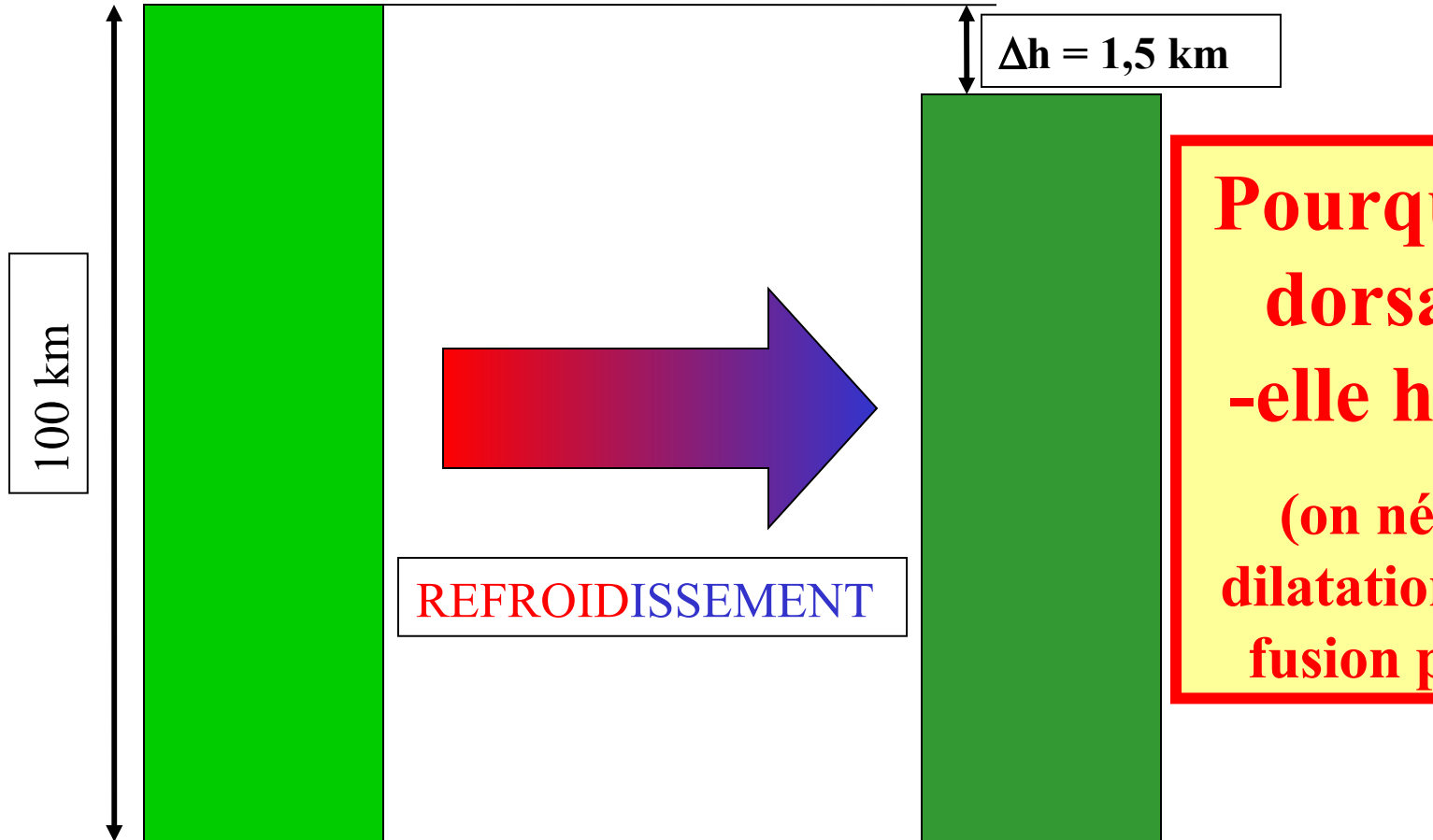
$\rho$  manteau asthénosphérique (1200°C) = **3,25**

→ 1 m<sup>3</sup> de manteau lithosphérique pèse 50 kg de plus qu'1 m<sup>3</sup> de manteau asthénosphérique



DORSALE

PLAINE ABYSSALE



**Pourquoi une dorsale est-elle haute ?**

(on néglige la dilatation due à la fusion partielle)

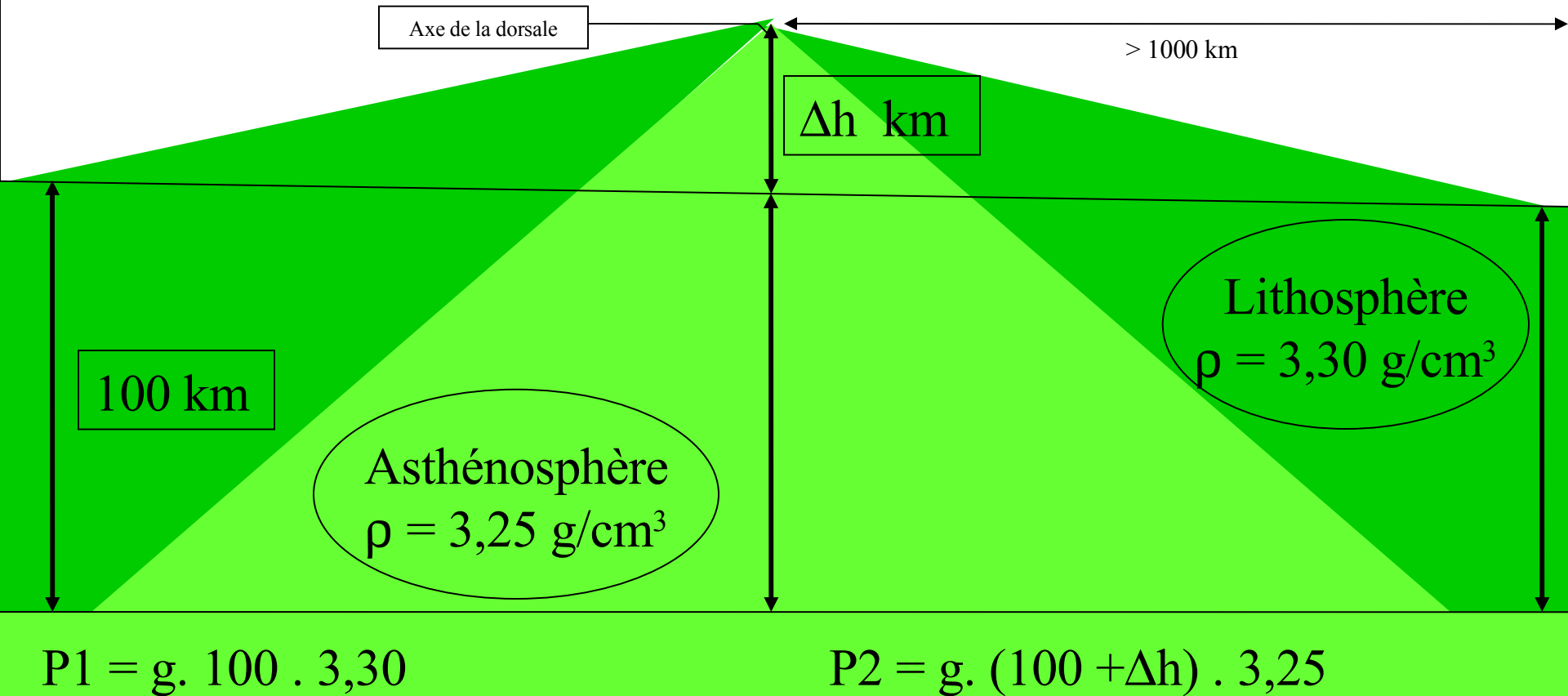
100 km  
d'asthénosphère

$T = 1200^\circ\text{C}$

Lithosphère :  $T \text{ moyen} = 600^\circ\text{C}$   
hauteur :  $100 \text{ km} - \Delta h$ ,  
avec  $\Delta h = 100 \cdot \alpha \cdot \Delta T$   
 $= 100 \cdot 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 600 = 1,5 \text{ km}$



**Pourquoi les dorsales sont hautes ? Une autre approche pour trouver (bien sûr) le même résultat (on néglige la présence de la croûte et de l'eau de l'océan)**

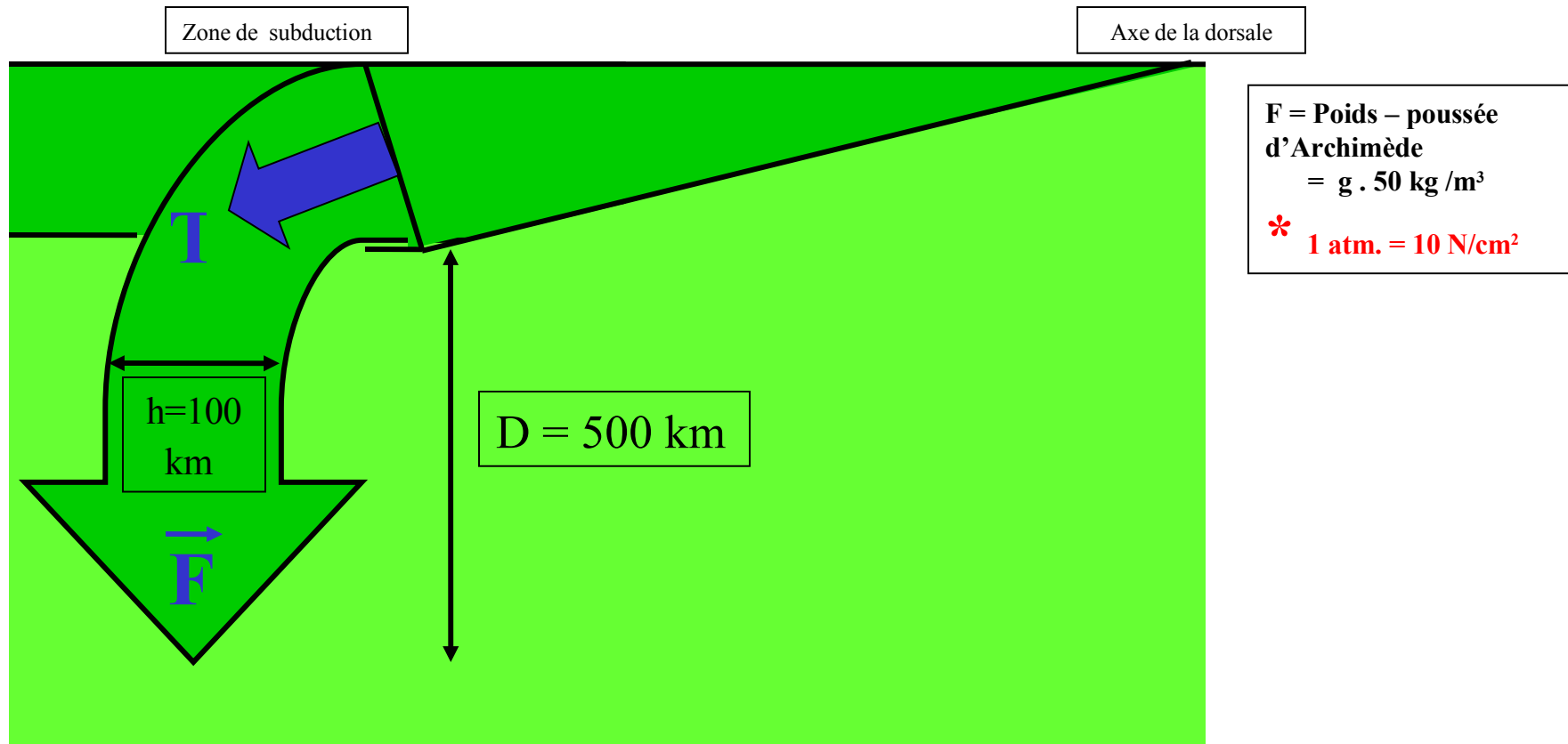


$$P1 = P2 \rightarrow$$

$$\Delta h = 1,5 \text{ km}$$



# Calcul simplissime de la traction au niveau d'une subduction



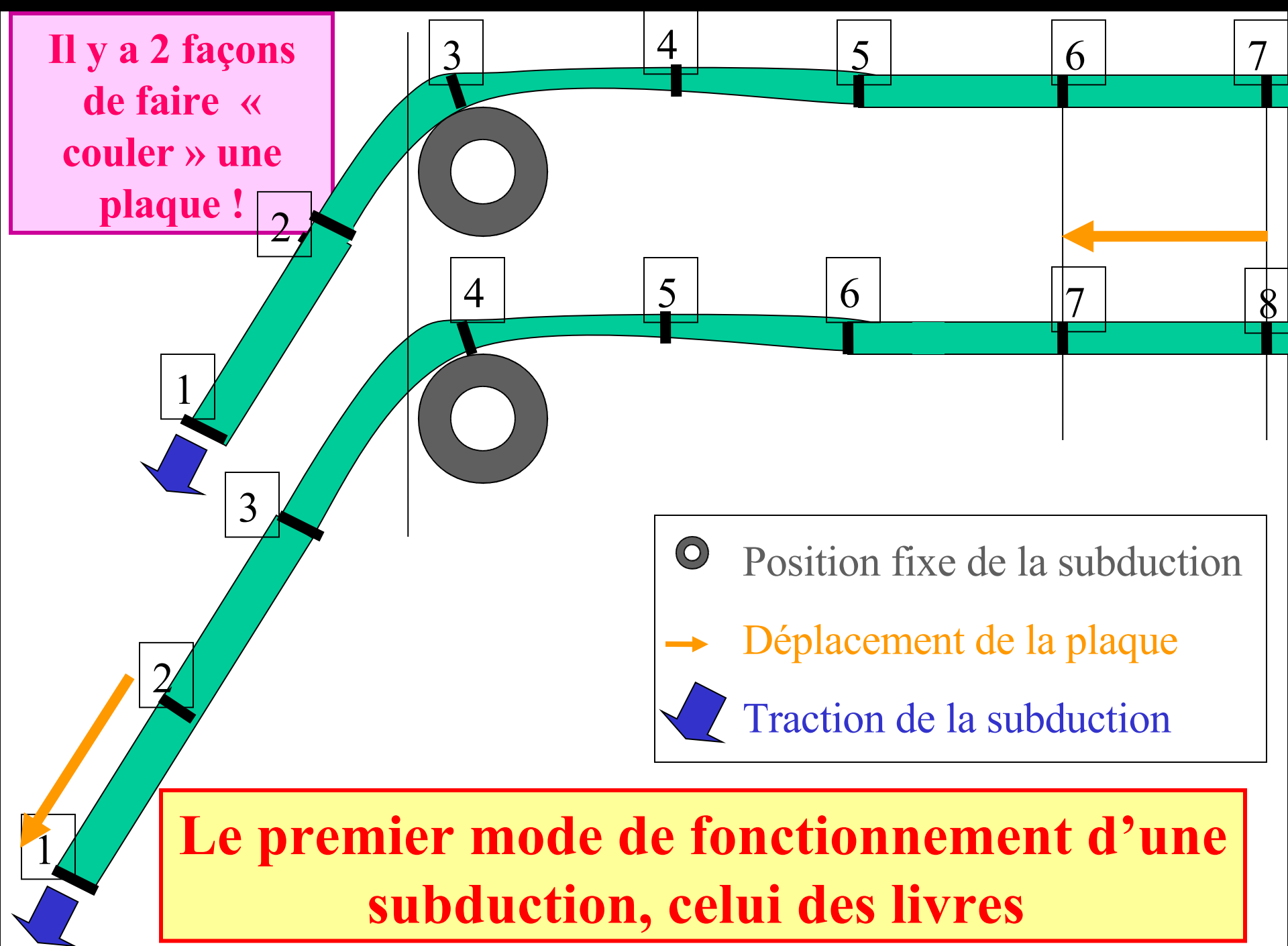
$$\vec{F} = h \cdot D \cdot g \cdot 50 \quad \text{Traction de subduction } \vec{T} = F/h = D \cdot g \cdot 50$$

Application numérique :  $T = 25\,000 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2 = 25\,000 \text{ N/cm}^2 *$

**Traction de subduction = 10 fois la Poussée à la dorsale !**

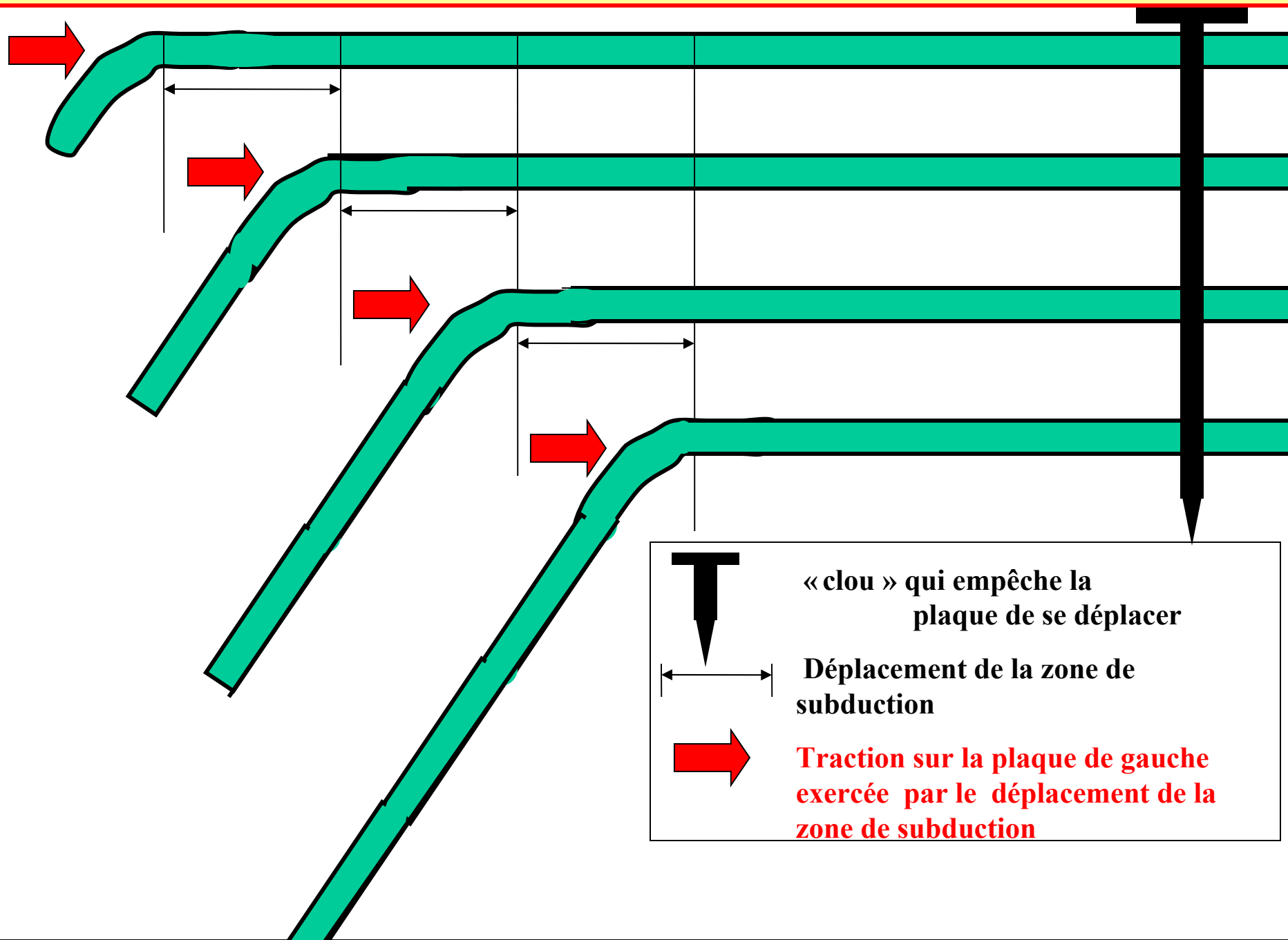


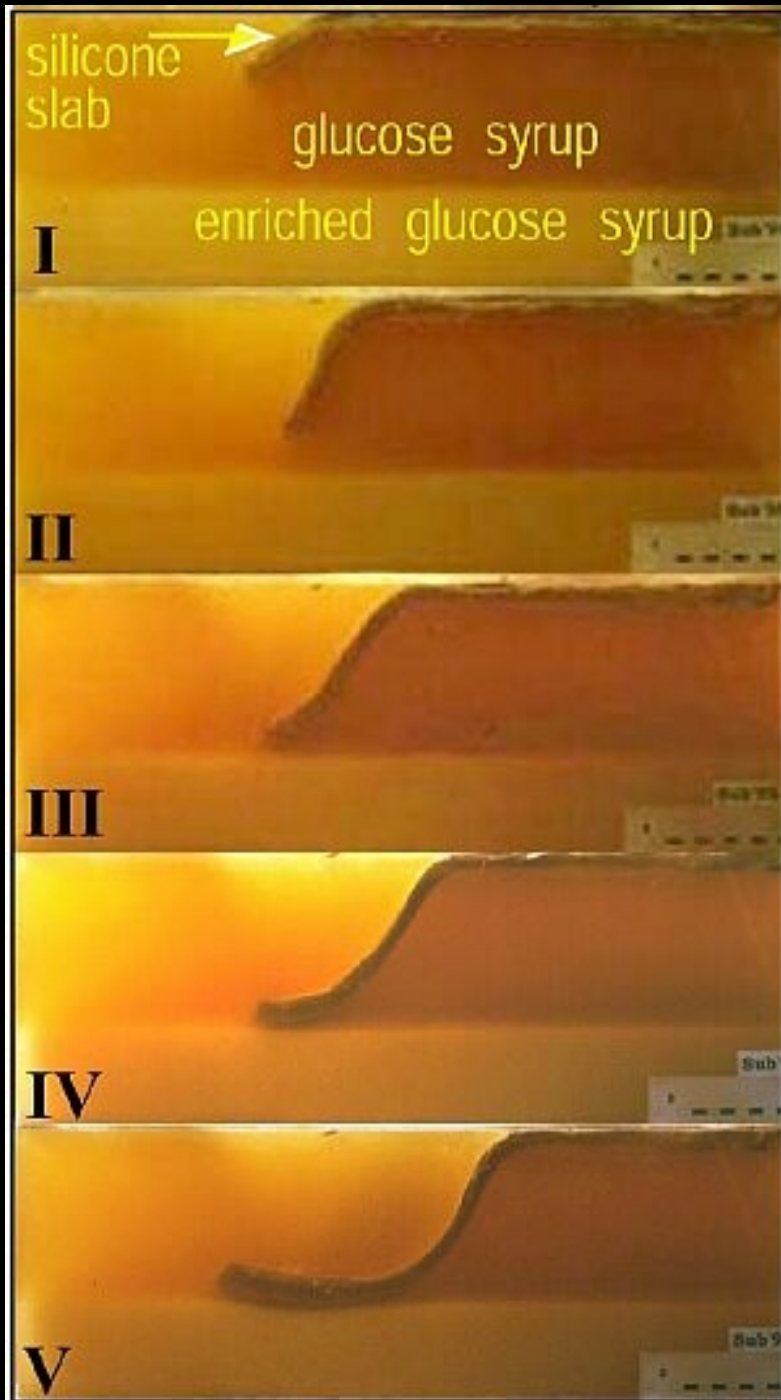
**Il y a 2 façons  
de faire «  
couler» une  
plaque !**



**Le premier mode de fonctionnement d'une  
subduction, celui des livres**

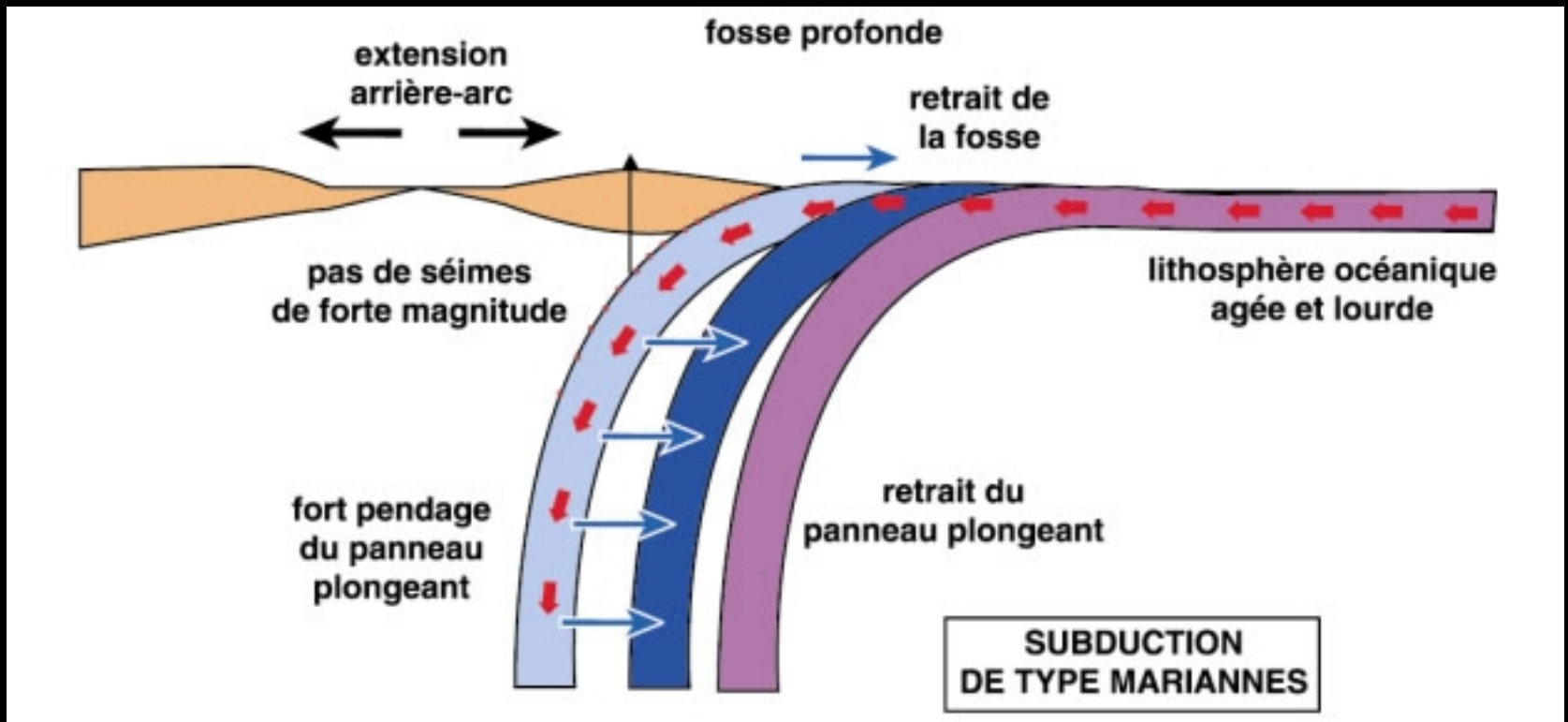
# Le Roll back, une autre façon de subduiter (plaque immobile)





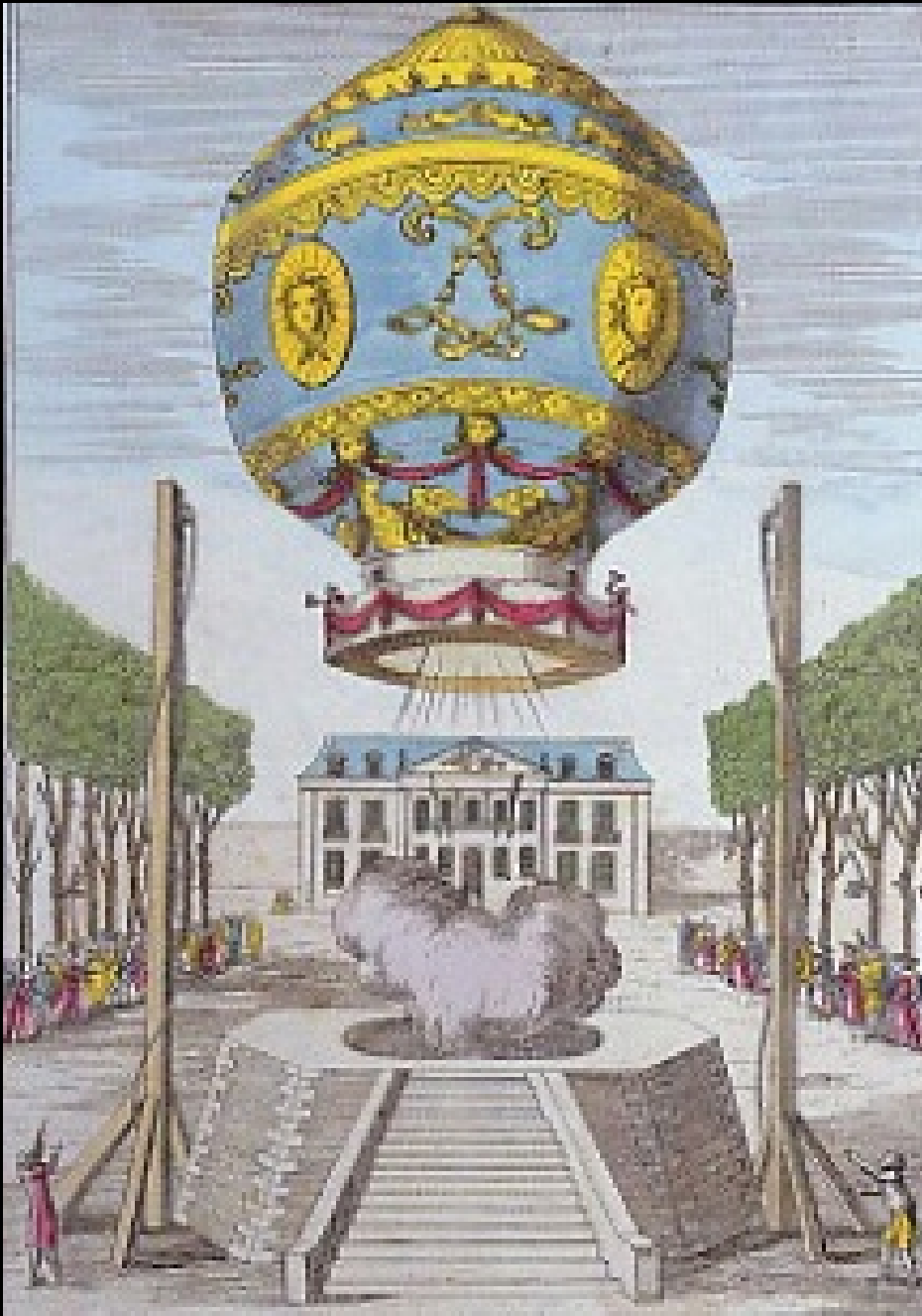
**Cette subduction par « roll back » peut, elle, facilement se modéliser analogiquement**

( cf. Diapositives de la conférence de Laurent Jolivet : la subduction à l'échelle lithosphérique, sur Planet-Terre)

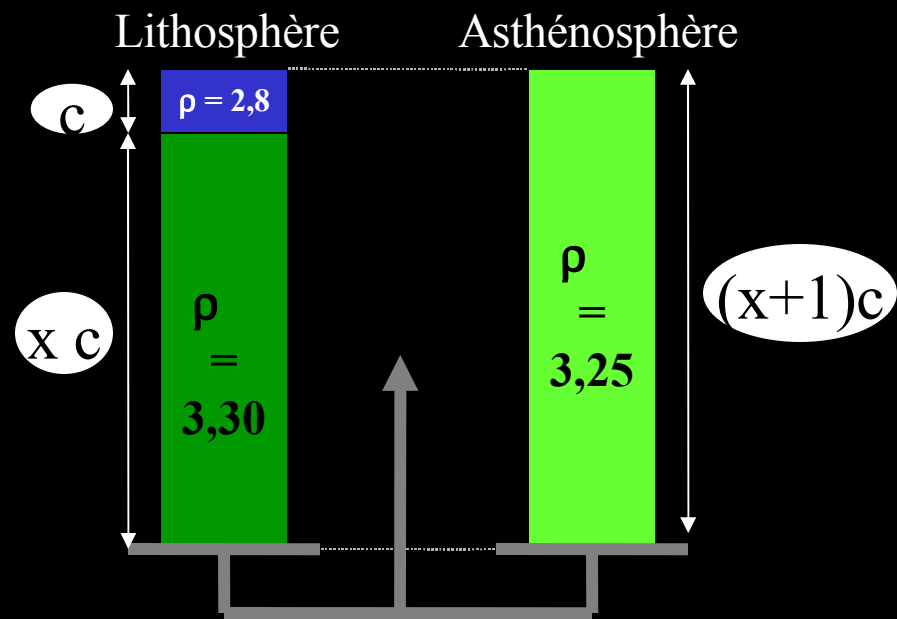


**La réalité terrestre : souvent les 2 types à la fois .**  
**La plaque et la zone de subduction se déplacent**  
(et en plus, le froid du slab induit une petite convection thermique annexe ; et il peut aussi y avoir entraînement mécanique)





**Mais il y a la  
croûte  
océanique qui  
joue un rôle de  
flotteur.  
Quand ce  
flotteur va-t-il  
devenir  
insuffisant ?**



Il y a équilibre de la balance si :

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

$$\rightarrow x = 9$$

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

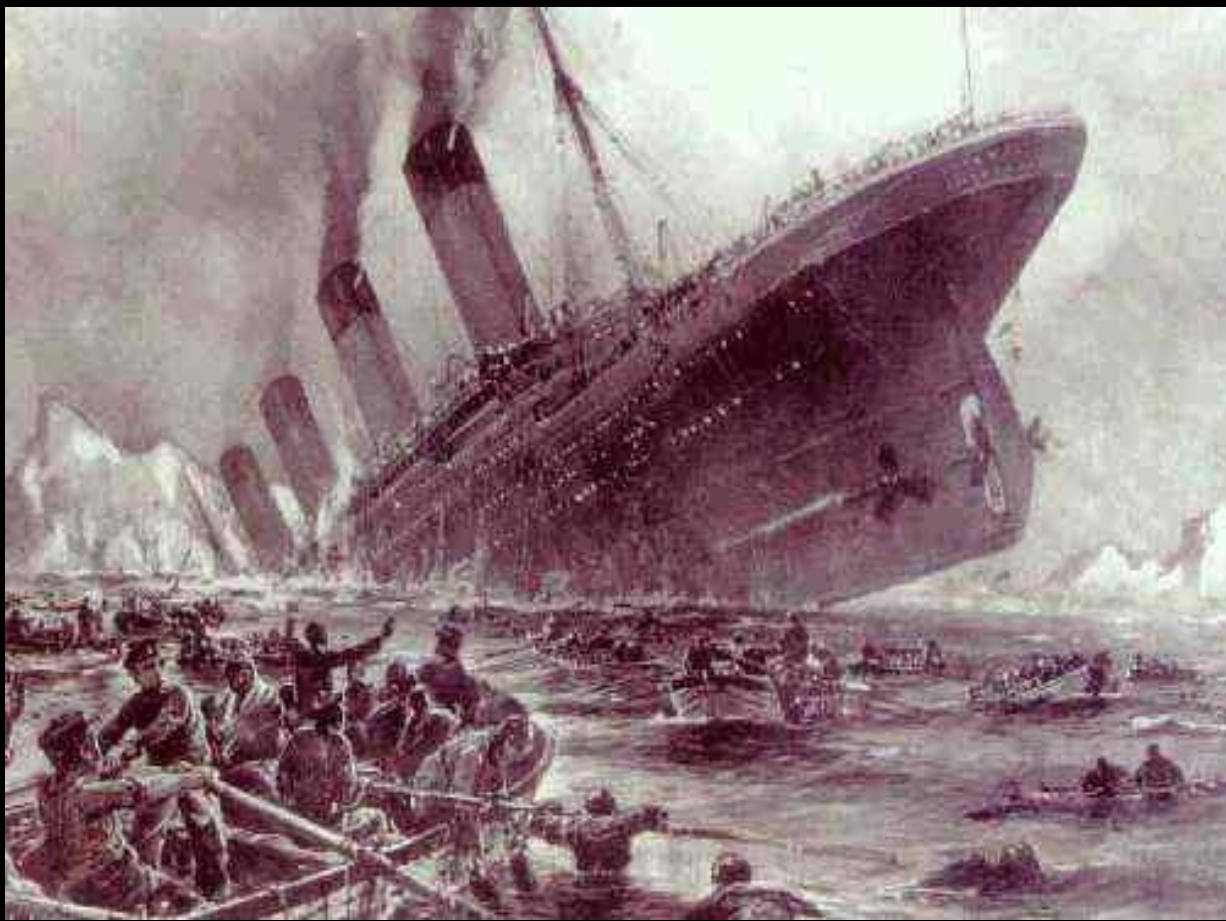
$$\rho_{\text{lithosphère}} = \rho_{\text{asthénosphère}}$$

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

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

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



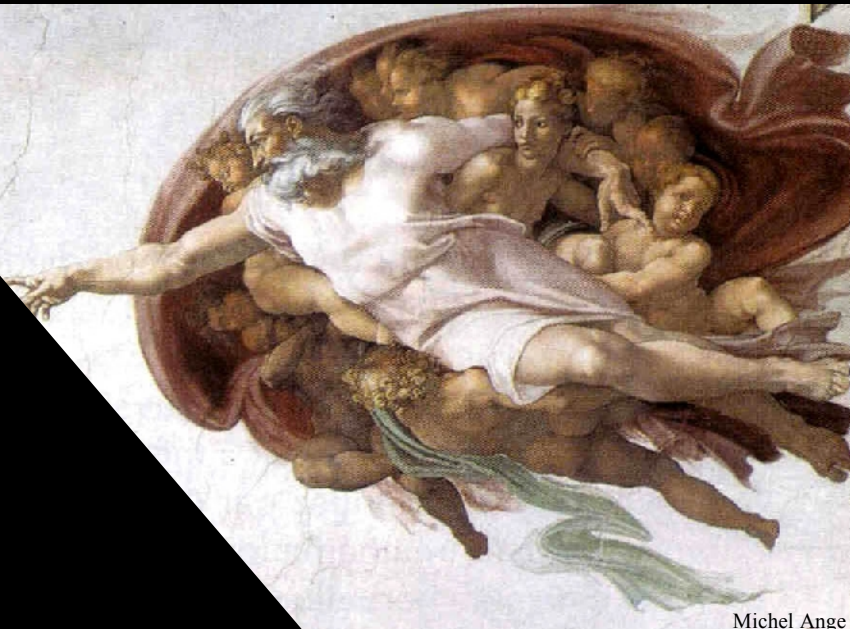
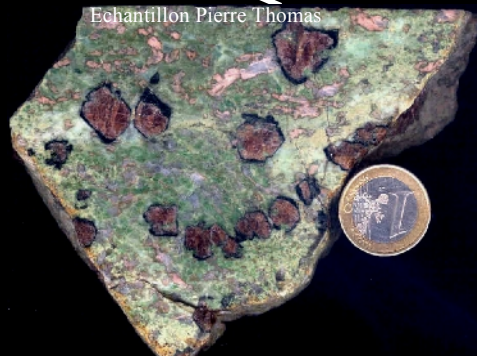
**Quand la lithosphère océanique (croûte + manteau refroidi = la CLT) atteint 70 km, et ce en approximativement 100 MA, elle atteint une masse volumique égale à celle de l'asthénosphère. Elle « doit » couler spontanément, même si dans la nature il y a souvent un « retard au plongement ».**

**Problème : quand une lithosphère atteint sa densité critique (3,25) et qu'elle commence à subduire, elle se réchauffe, pas beaucoup mais un peu quand même.**

**Sa densité diminue un peu, donc redevient inférieure à celle de l'asthénosphère, et l'enfoncement devrait s'arrêter. Tout ça à cause du « flotteur » que représente la croûte océanique, flotteur qui n'existe pas dans les modélisations simples.**

**Heureusement, Dieu a créé les éclogites !**

Eclogite,  $\rho = 3,40$



Michel Ange



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

**Son action de  
« flotteur »  
devient « lest »**



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



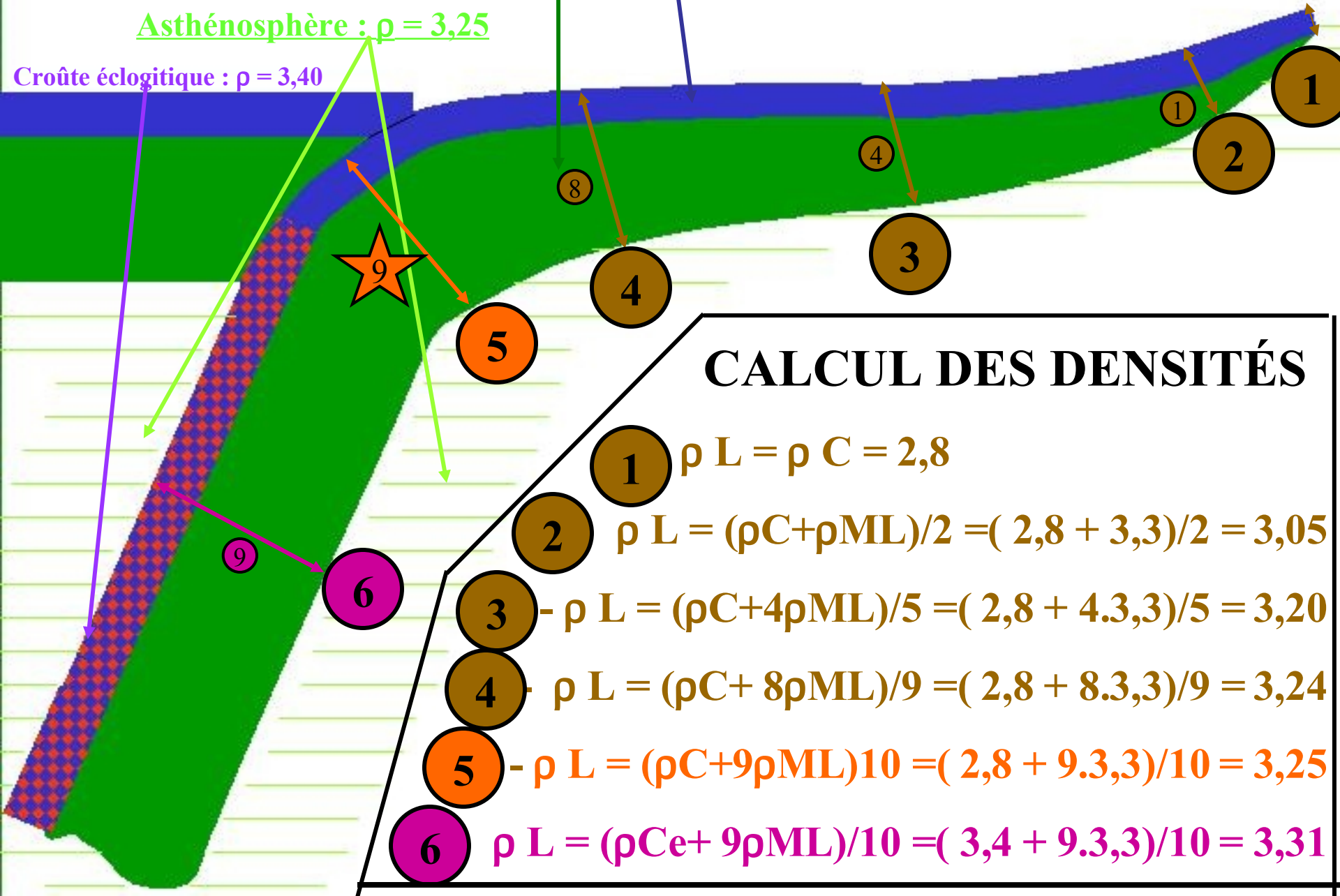
# Le rôle des éclogites

Croûte basalto-gabbroïque :  $\rho = 2,80$

Manteau lithosphérique :  $\rho = 3,30$

Asthénosphère :  $\rho = 3,25$

Croûte éclogitique :  $\rho = 3,40$



## CALCUL DES DENSITES

1  $\rho L = \rho C = 2,8$

2  $\rho L = (\rho C + \rho ML) / 2 = (2,8 + 3,3) / 2 = 3,05$

3  $\rho L = (\rho C + 4\rho ML) / 5 = (2,8 + 4 \cdot 3,3) / 5 = 3,20$

4  $\rho L = (\rho C + 8\rho ML) / 9 = (2,8 + 8 \cdot 3,3) / 9 = 3,24$

5  $\rho L = (\rho C + 9\rho ML) / 10 = (2,8 + 9 \cdot 3,3) / 10 = 3,25$

6  $\rho L = (\rho Ce + 9\rho ML) / 10 = (3,4 + 9 \cdot 3,3) / 10 = 3,31$

# Les interrogations majeures en suspens

1- Quid des dorsales lentes, en particulier de leur initiation ?

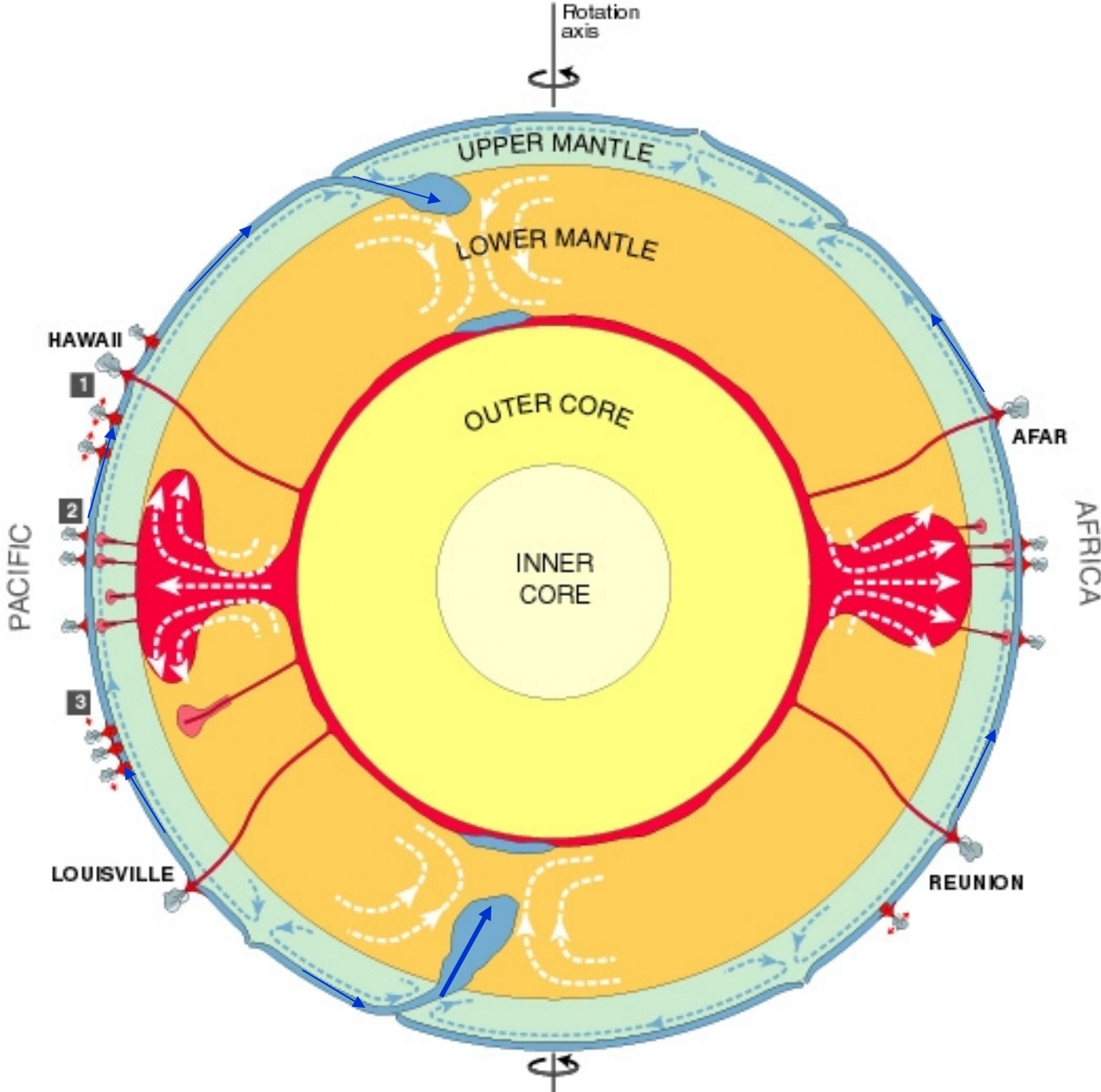
2 – Quid des mouvements mantelliques sous les plaques rapides ? Le manteau sous-lithosphérique est vraisemblablement entraîné par le mouvement de la plaque, mais jusqu'à quelle profondeur ; y a-t-il des mouvements « propres » (sans doutes), et quelle en est la géométrie ?

3 – Quid des mouvements mantelliques sous les plaques lentes, en particulier sous leur part continentale ?

4 – Quid de la séparation « géochimique » entre manteau supérieur et inférieur ?

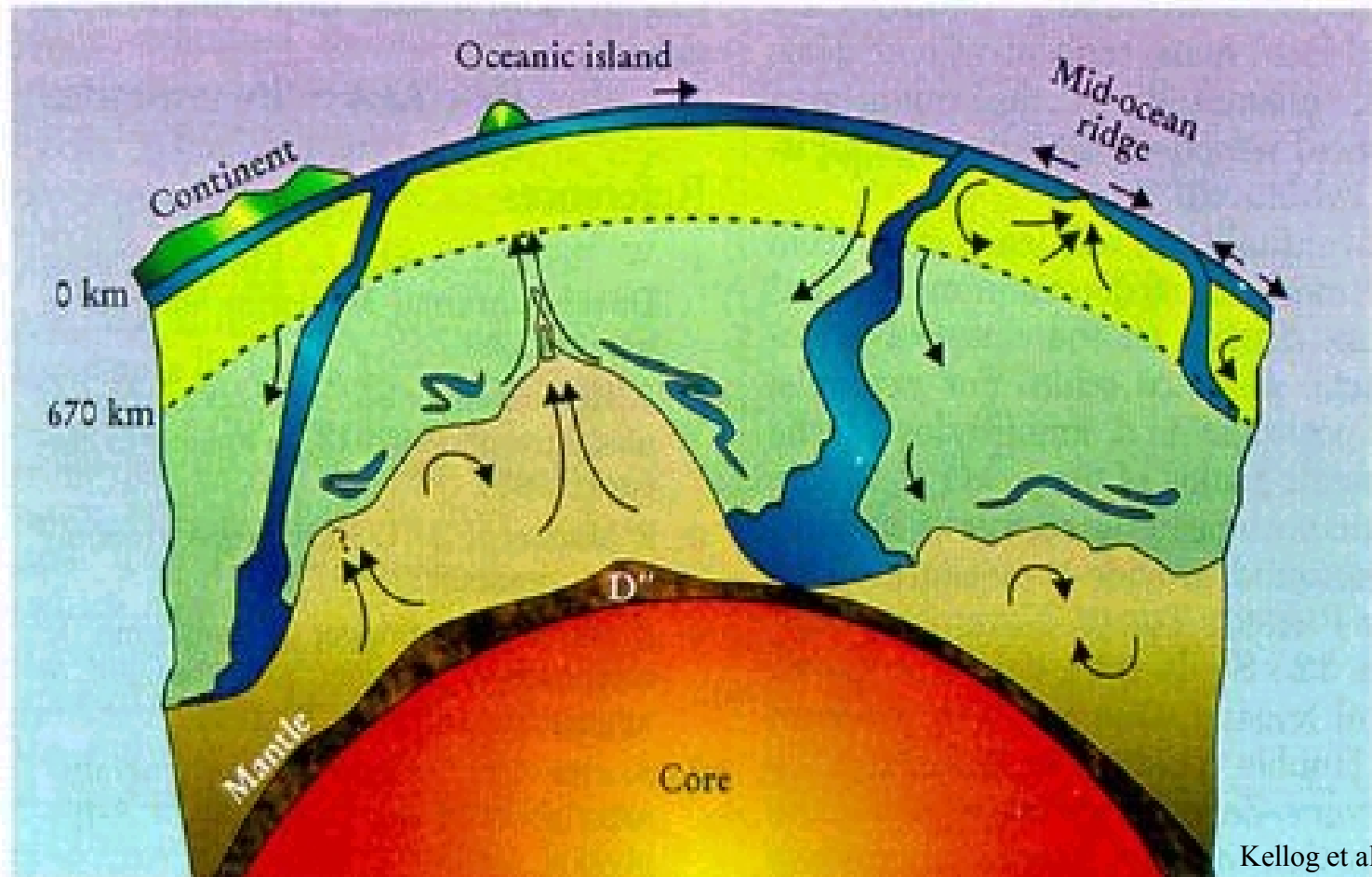






**Malgré ces questions et problèmes en suspens, voici une première tentative de réponses partielles**



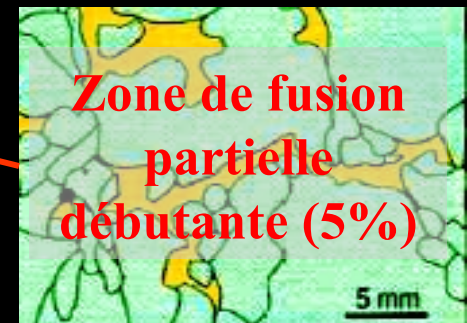
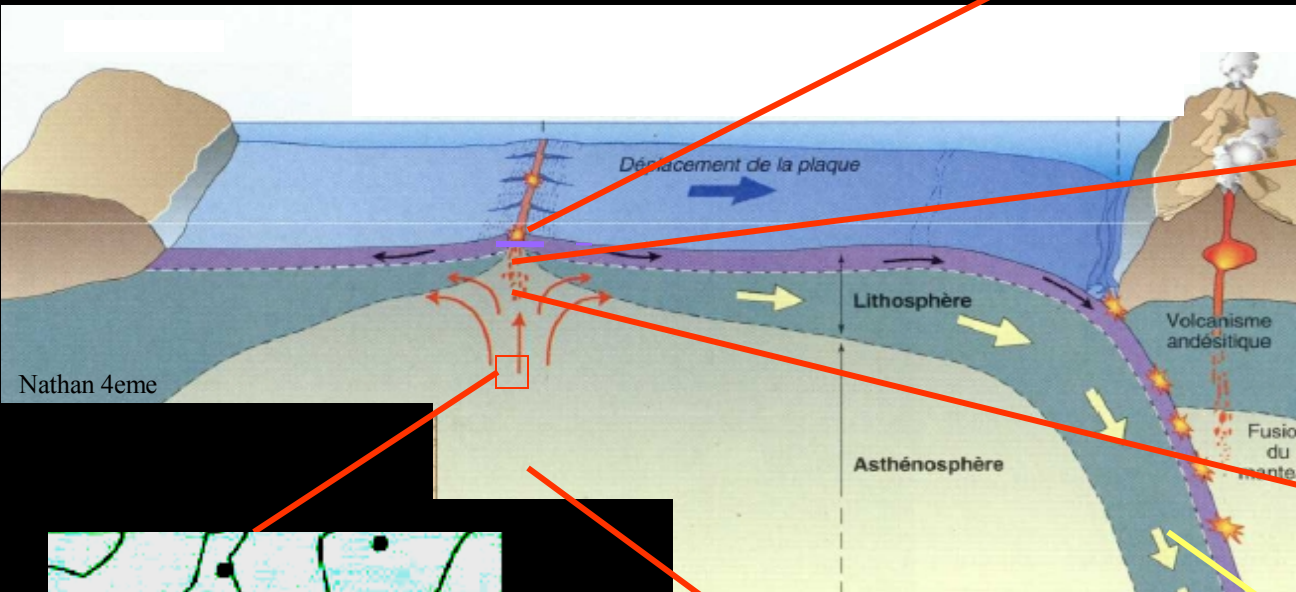


Kellog et al, 1999

**Et voici une deuxième tentative.**  
**Remarquez qu'il y a unanimité sur le caractère superficiel**  
**des dorsales et le caractère « majeur » des subductions**

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

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



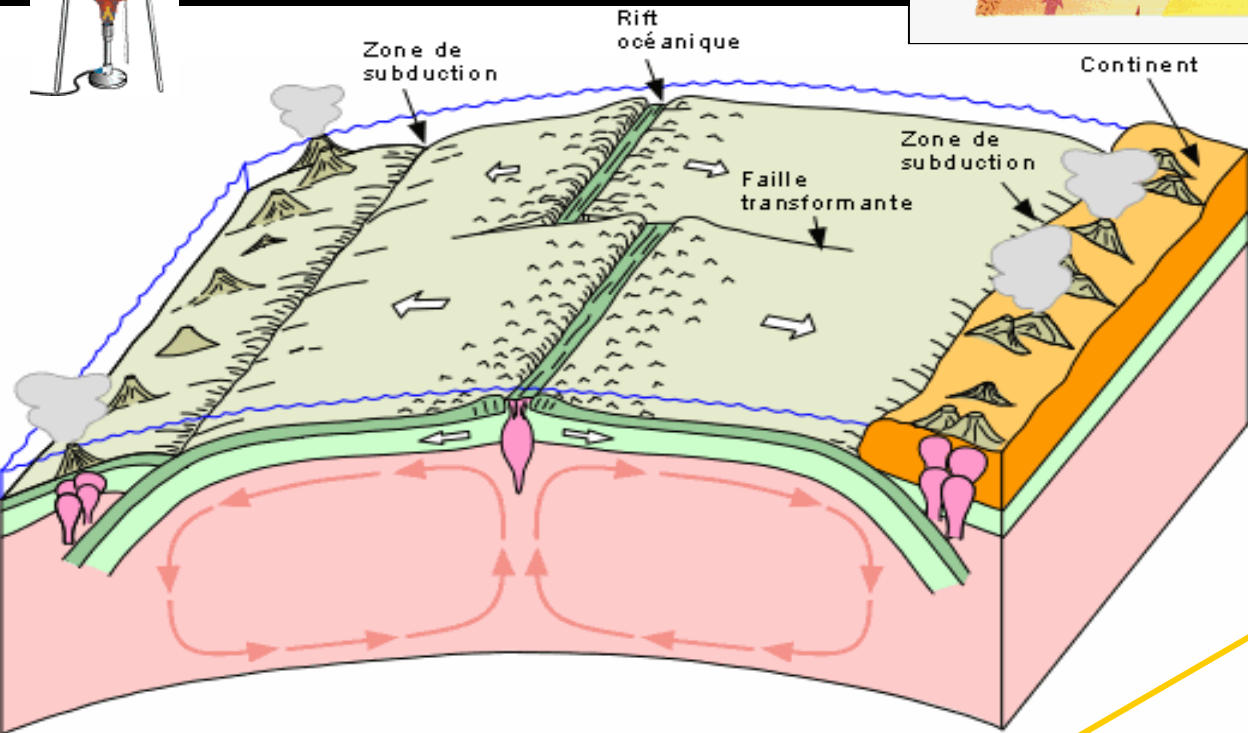
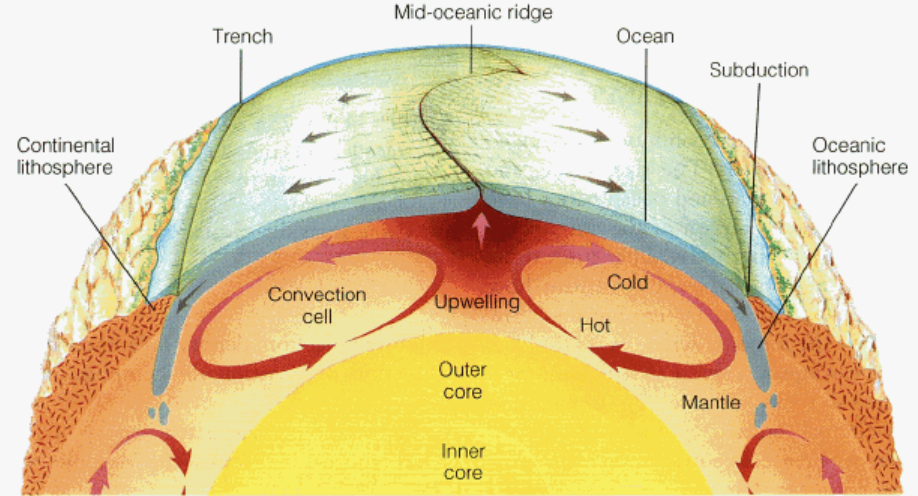
La remontée asthénosphérique ne vient pas de très profond

Mouvements lithosphériques, sans figurer dessous des mouvements asthénosphériques



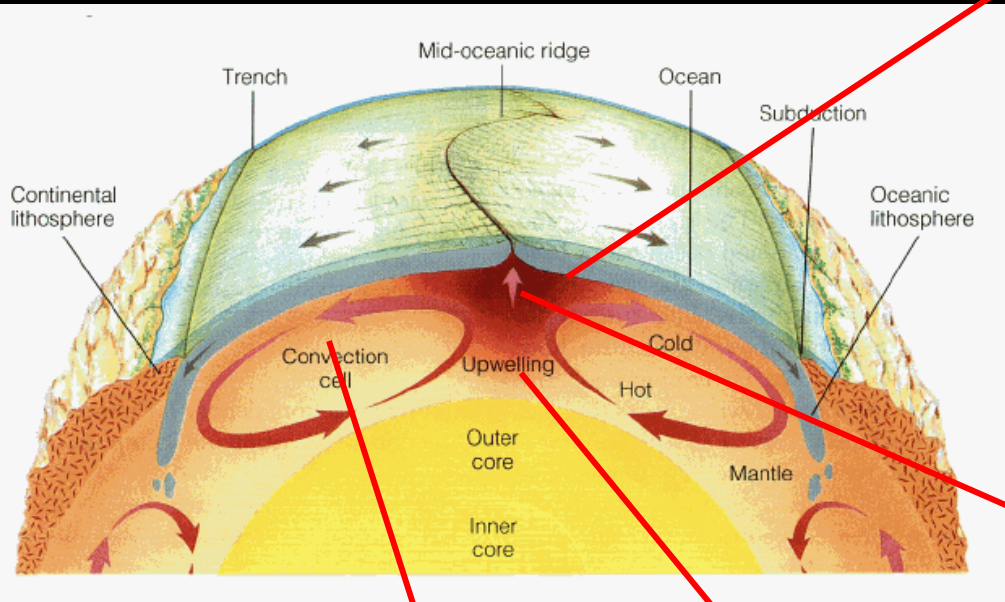
**Les maladresses  
et erreurs  
impardonnables  
en 2006, bien que  
très couramment  
faites par des  
agrégés, des  
universitaires, des  
chers collègues ...**

Reprenons les schémas classiques que j'ai critiqués en début de conférence.



Qu'est-ce qui « ne va pas » (erreurs ou maladresses) et qui induit, voire enduit, les élèves en erreur ?





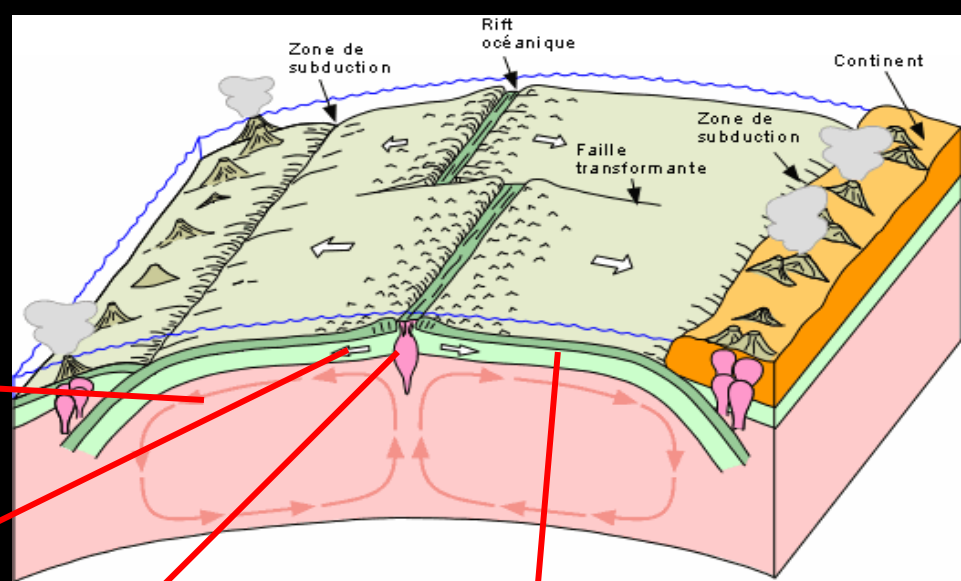
**Le manteau est couleur « lave », ce qui renforce l'idée d'un manteau liquide**

**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**

**On a l'impression que les mouvements asthénosphériques (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**

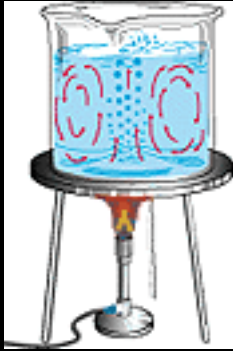


**Quelques expressions  
toutes faites**

**et autres lieux  
communs ...**

**... qu'il faut  
combattre de toutes  
ses forces**





**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**

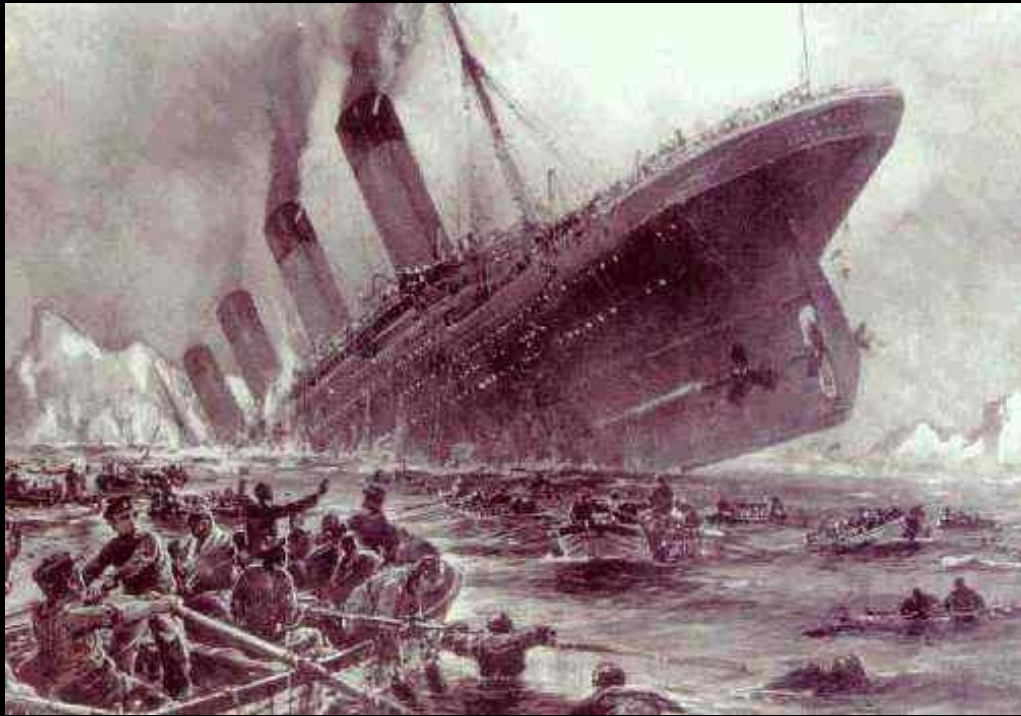




**Comparer l'expansion  
des fonds océaniques et  
la tectonique des plaques  
à un tapis roulant**

**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 côté (lithosphère continentale, iceberg  
...), mais la densité de ce qu'il y a dessous  
(asthénosphère, eau de mer ...) !**



**L'expression « comme il y a fabrication de surface océanique au niveau des dorsales et que la Terre n'augmente pas de volume, il faut bien qu'il y ait disparition d'océan quelque part (les subductions) ».**

**L'inverse serait plus correct : comme il y a disparition de surface océanique au niveau des subductions et que la Terre ne diminue pas de volume, il faut bien qu'il y ait création d'océan quelque part !**

**Employer le mot « croûte »  
à la place du mot  
« lithosphère » (dans une  
subduction, la croûte  
s'enfonce, ou encore la  
dorsale qui fabrique de la  
croûte ...**



**Tout cela n'est pas faux, mais une dorsale  
fabrique de la lithosphère, et c'est la lithosphère  
qui subduit. Vous ne diriez pas que pendant 9  
mois votre mère a fabriqué des intestins (ce qu'elle a  
fait), mais qu'elle a fabriqué un bébé (qui, certes, contient  
des intestins) !**



**Dire qu'il y a  
« création » de matière  
au niveau des dorsales**



**Depuis le Big bang, puis  
Lavoisier, et sauf dans les  
contes de fées, on sait qu'il n'y  
a pas de création de matière.  
Au niveau d'une dorsale, il y a  
remontée et refroidissement de  
matière**

# Et les autres planètes ?

**Il y a au moins 3 « planètes \* » silicatées actives, avec très vraisemblablement une convection mantellique actuelle qui « implique » la surface. Mais seule la Terre semble avoir des plaques.**

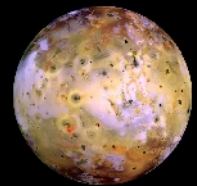
**Pourquoi ?**



La Terre



Vénus



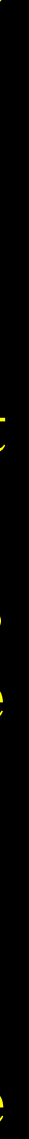
Io

\* Lune et Mercure : pas de convection actuelle

Mars : ??

**Ce qui fait l'originalité de la convection « type plaque », c'est que la lithosphère a une « individualité et une continuité mécanique » par rapport à l'asthénosphère. Il y a un saut « brutal » de viscosité entre lithosphère et asthénosphère ( facteur  $10^4$ ). Cela permet à la lithosphère de « glisser facilement » sur l'asthénosphère, et de transmettre les forces sur de longues distances, comme le font des câbles. La traction des subductions peut s'exercer au niveau de dorsales, situées à des milliers de km.**

**Ce « style » de convection est conditionné par ce saut de viscosité**



[http://bass2000.obspm.fr/gallery/pic\\_du\\_midi/telepherique](http://bass2000.obspm.fr/gallery/pic_du_midi/telepherique)



**Or, ce saut de viscosité serait dû au fait que le manteau est hydraté, ce qui abaisse considérablement sa viscosité : le manteau contient approximativement 0,1% d'H<sub>2</sub>O (la masse d'eau mantellique est du même ordre de grandeur que la masse d'eau des océans).**

**Les volcans crachent  $2 \cdot 10^{12}$  kg/an d'H<sub>2</sub>O (2 GT/an). Or la subduction introduit  $2 \cdot 10^{12}$  kg/an d'H<sub>2</sub>O dans le manteau. Malgré le volcanisme qui déshydrate le manteau, la présence d'H<sub>2</sub>O dans l'océan cause sa réhydratation, par les branches descendantes de la convection**



[http://volcanoes.usgs.gov/Images/jpg/Pinchincha/19991007\\_Pinchi\\_caption.html](http://volcanoes.usgs.gov/Images/jpg/Pinchincha/19991007_Pinchi_caption.html)



<http://pegasus.me.jhu.edu/~lpei/images/pei/ocean.jpg>

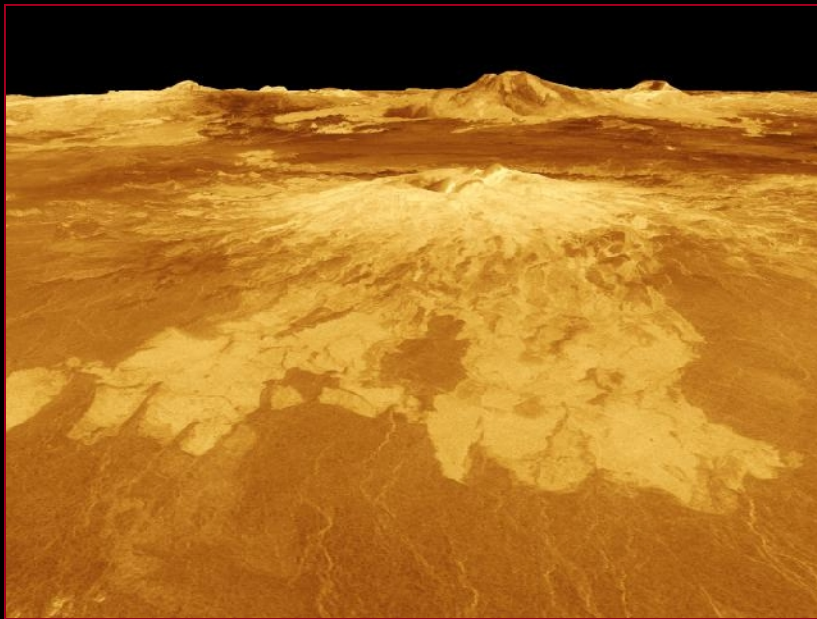


**Sur Vénus et Io, pas d'océan liquide, donc pas de réintroduction d'H<sub>2</sub>O dans le manteau, alors que le volcanisme le déshydrate.**

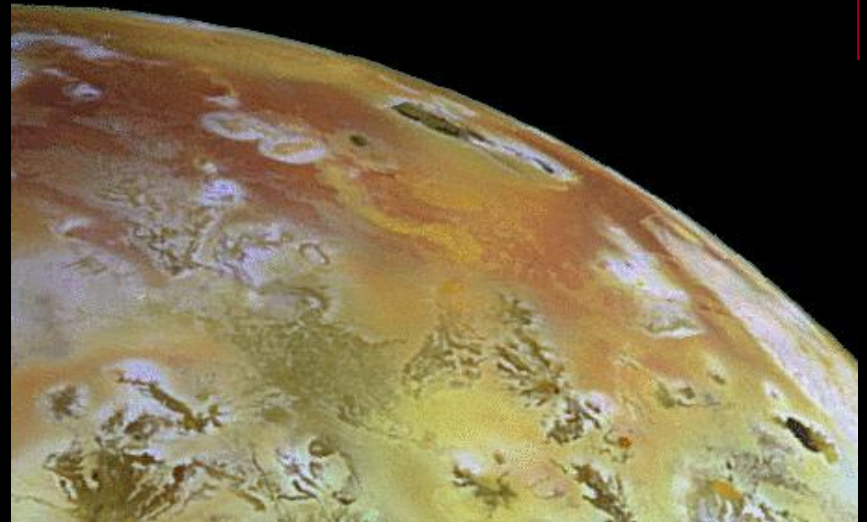
**→ Le manteau ne contient pas (plus) d'eau**

**→ Faible contraste de viscosité entre lithosphère et asthénosphère**

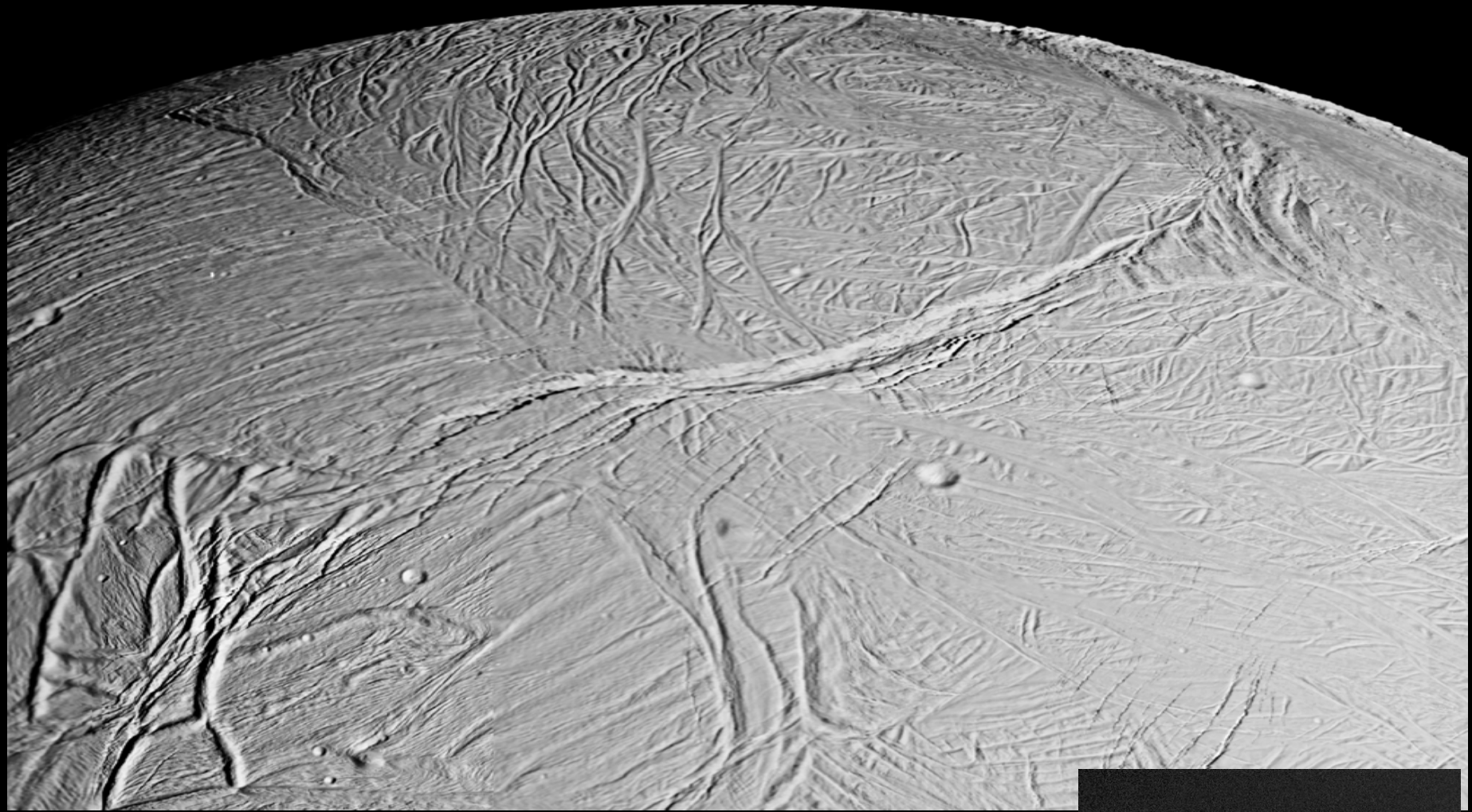
**→ Convection d'un autre type que le type « plaque »**



Vénus



Io



**Et n'oublions pas l'activité (convective)  
« délirante » des planètes et  
satellites de glace, ici Encelade.**

**Panaches  
volcaniques**

Encelade



# La convection mantellique,



<http://volcanoes.usgs.gov/Products/Pglossary/pglossary.html>

mythes,  
réalités, et  
questions



<http://hvo.wr.usgs.gov/kilauea/history/1959Nov14/main.html>



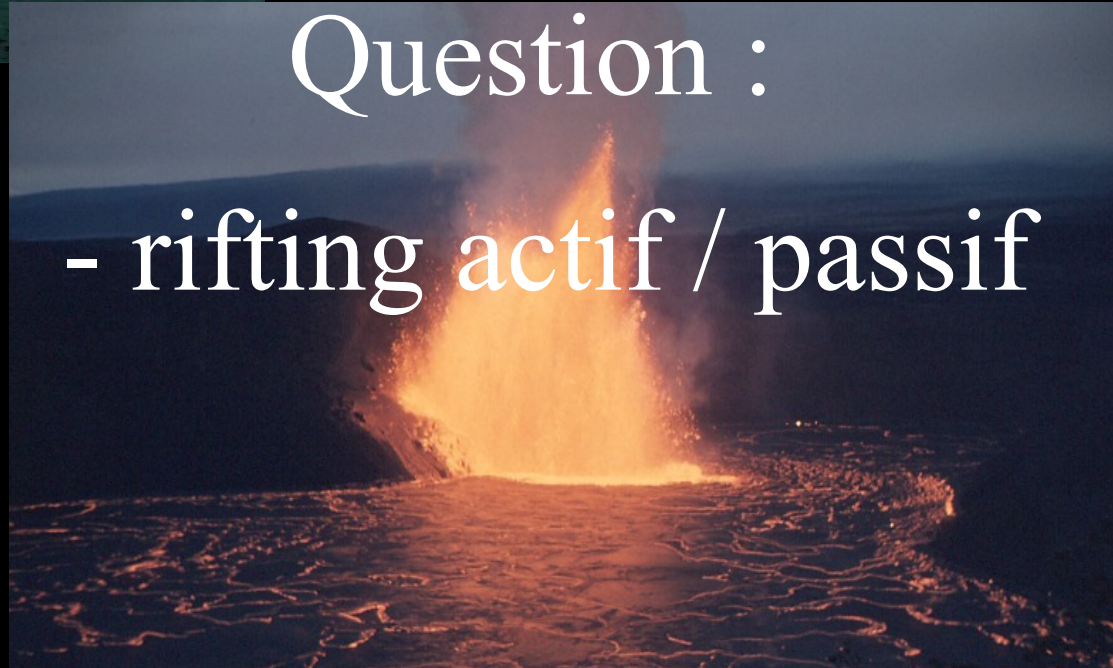
<http://volcanoes.usgs.gov/Products/Pglossary/pglossary.html>

# La convection mantellique,

Question :

- rifting actif / passif

mythes,  
réalités, et  
questions



<http://hvo.wr.usgs.gov/kilauea/history/1959Nov14/main.html>





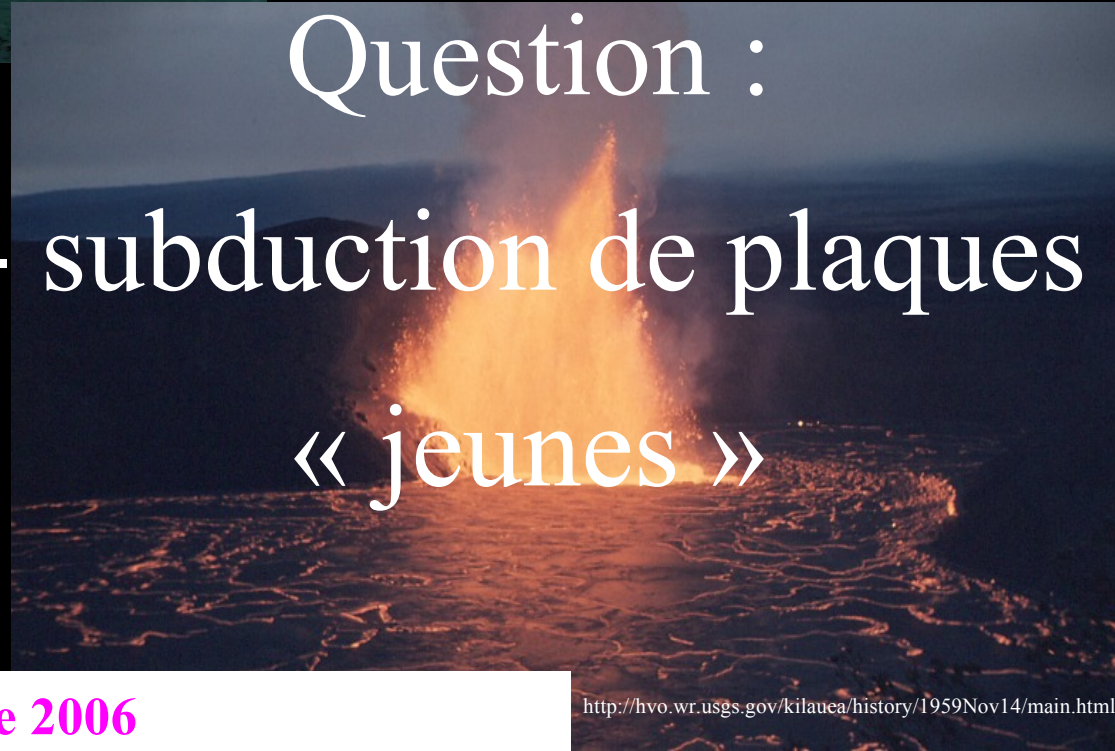
<http://volcanoes.usgs.gov/Products/Pglossary/pglossary.html>

# La convection mantellique,

**mythes,  
réalités, et  
questions**

Question :

- subduction de plaques  
« jeunes »



<http://hvo.wr.usgs.gov/kilauea/history/1959Nov14/main.html>