

Flux géothermique et transfert de chaleur

Flux de chaleur de la Terre:

Quelle valeur? Pourquoi ? Comment?

Structure de la Terre

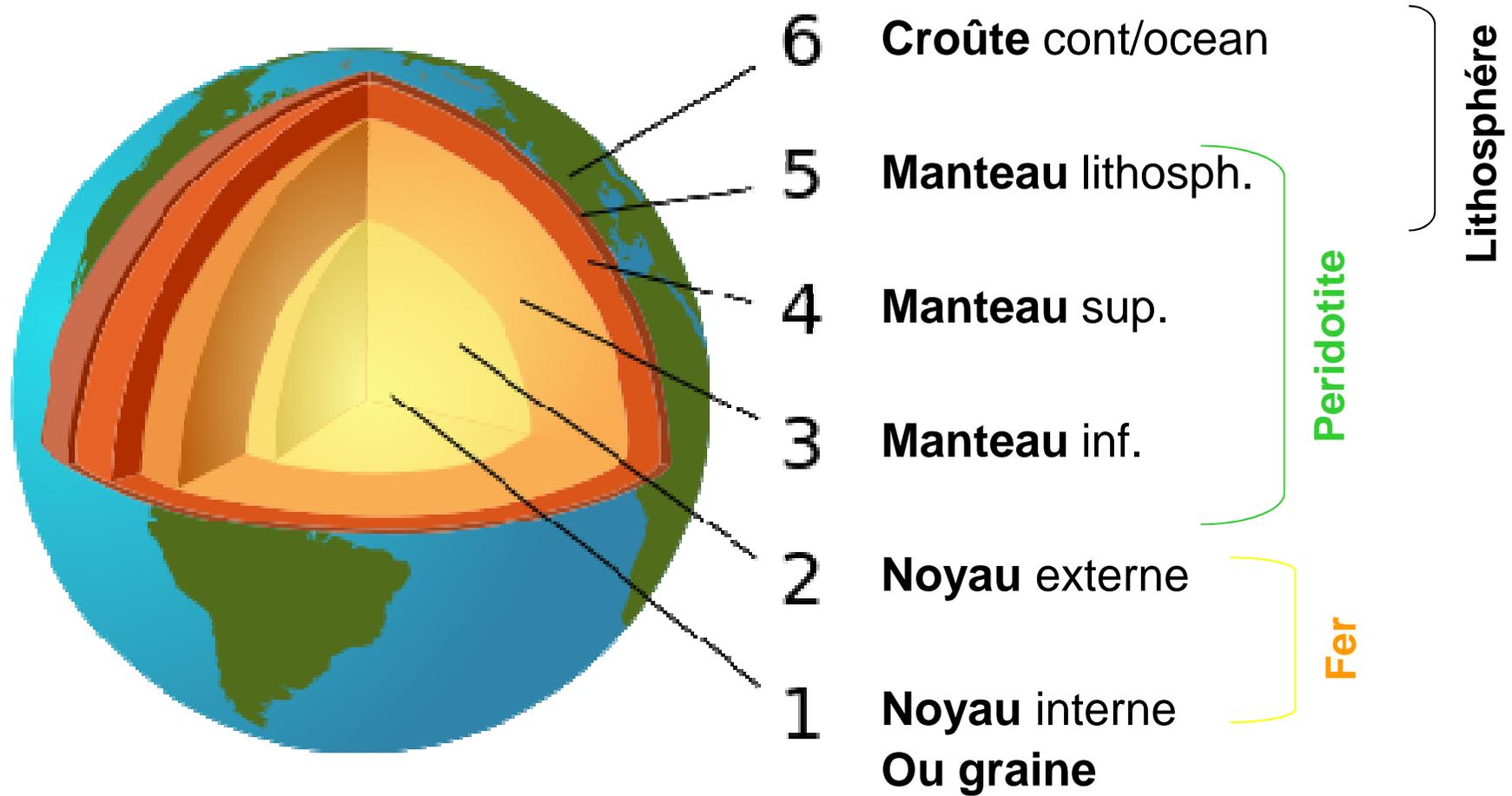
Mesure et cartographie du flux

Origine du flux géothermique

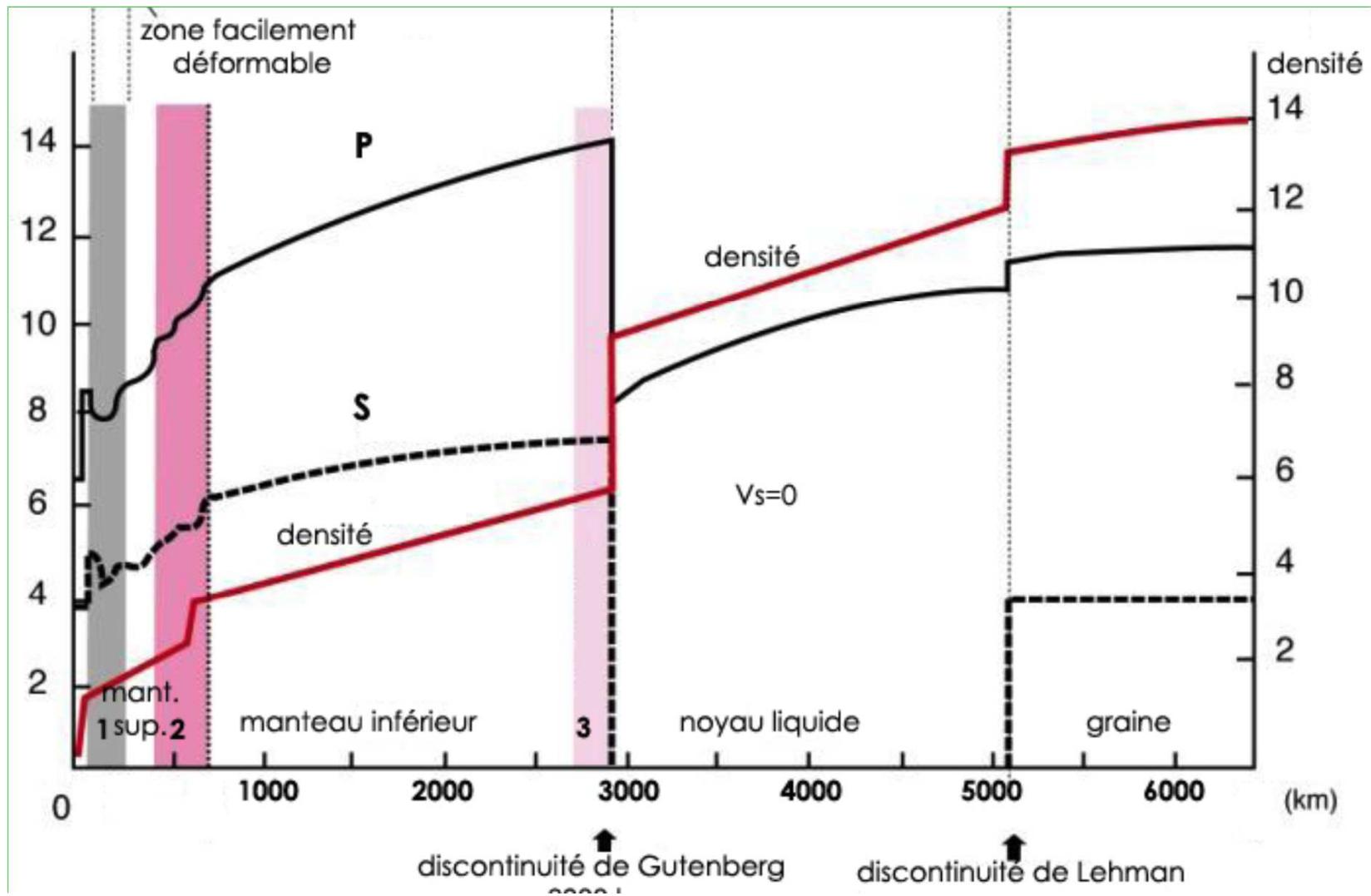
La convection dans le manteau

Fonctionnement de la machine Terre

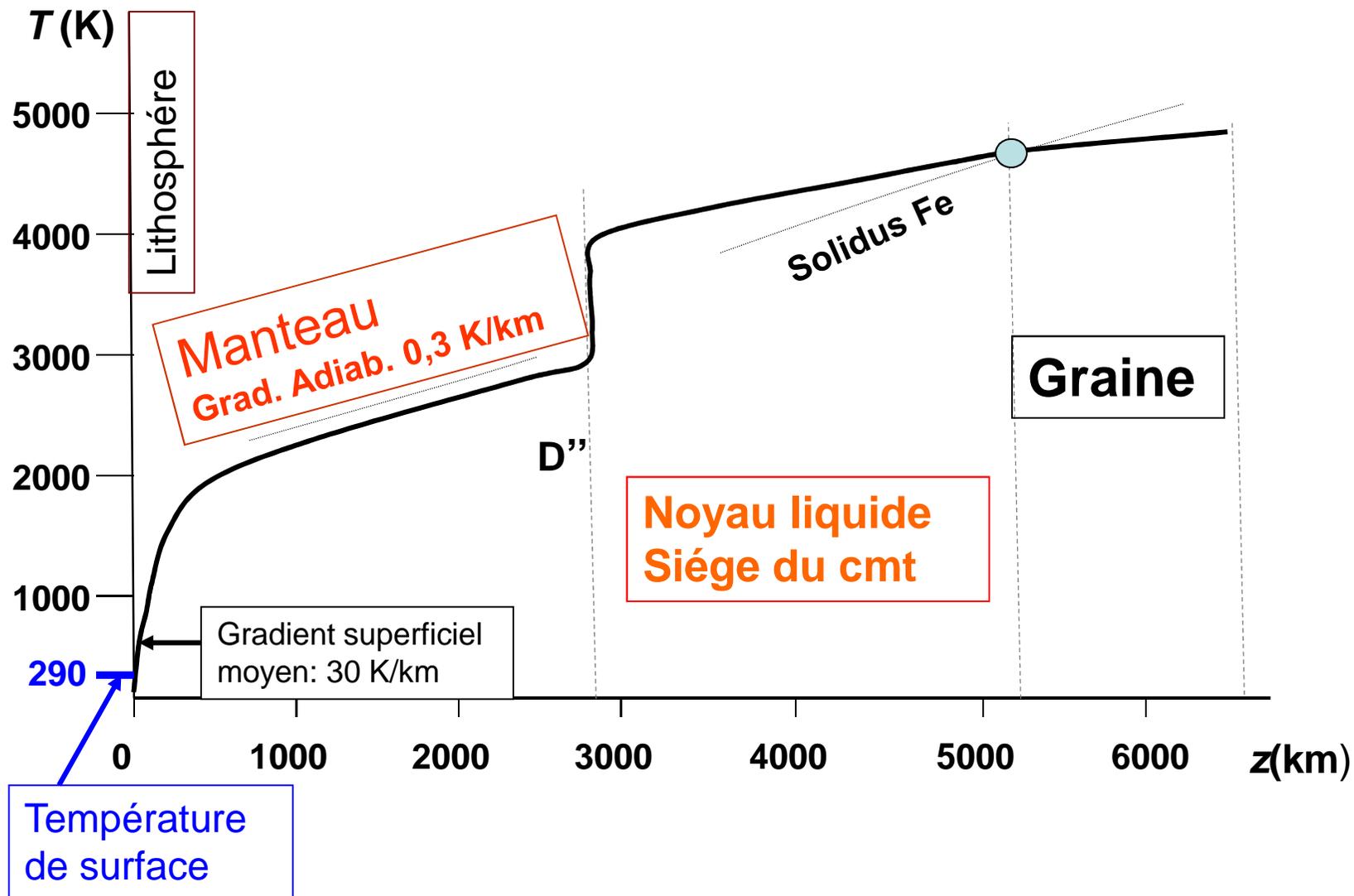
Structure de la Terre



Structure physique: vitesse du son V_p V_s et densité

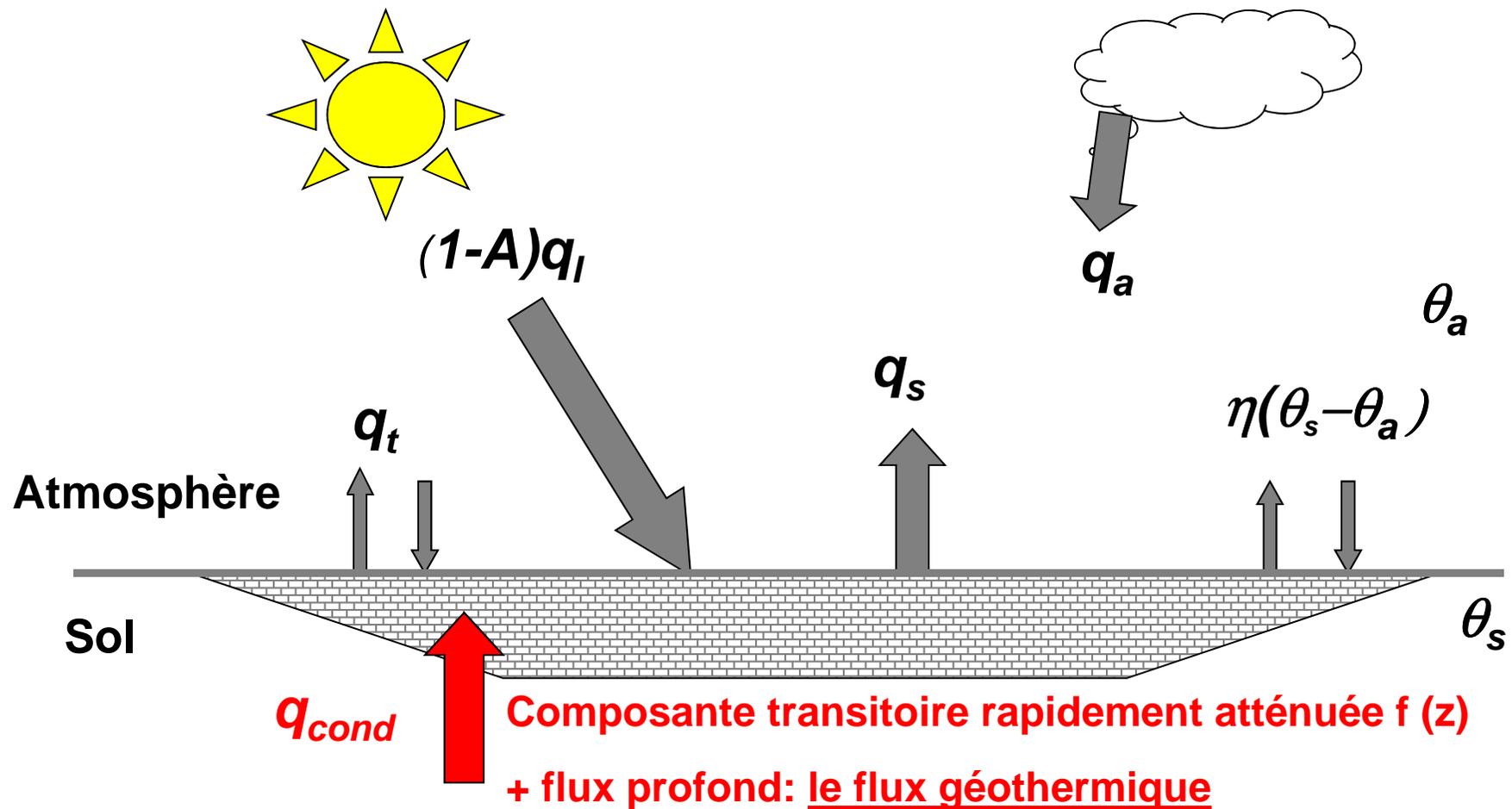


Température moyenne fonction de la profondeur z



La température du sol: bilan d'énergie

Somme algébrique des flux = 0



Près du sol: pénétration des perturbations thermiques externes

En première approximation la température $\theta(\mathbf{z}, t)$ dans le sol suit la loi de Fourier

$$q = -\partial \theta / \partial z \rightarrow \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$$

La **diffusivité** $k = \frac{\text{conductivité}}{\text{chaleur - spécifique}} = \frac{K}{\rho C}$

Les perturbations sinusoidales de période P dues aux variations externes

s'atténuent comme $\exp(-z/\delta)$ avec $\delta = \sqrt{\frac{kP}{\pi}}$

δ : profondeur de pénétration valeur typique:

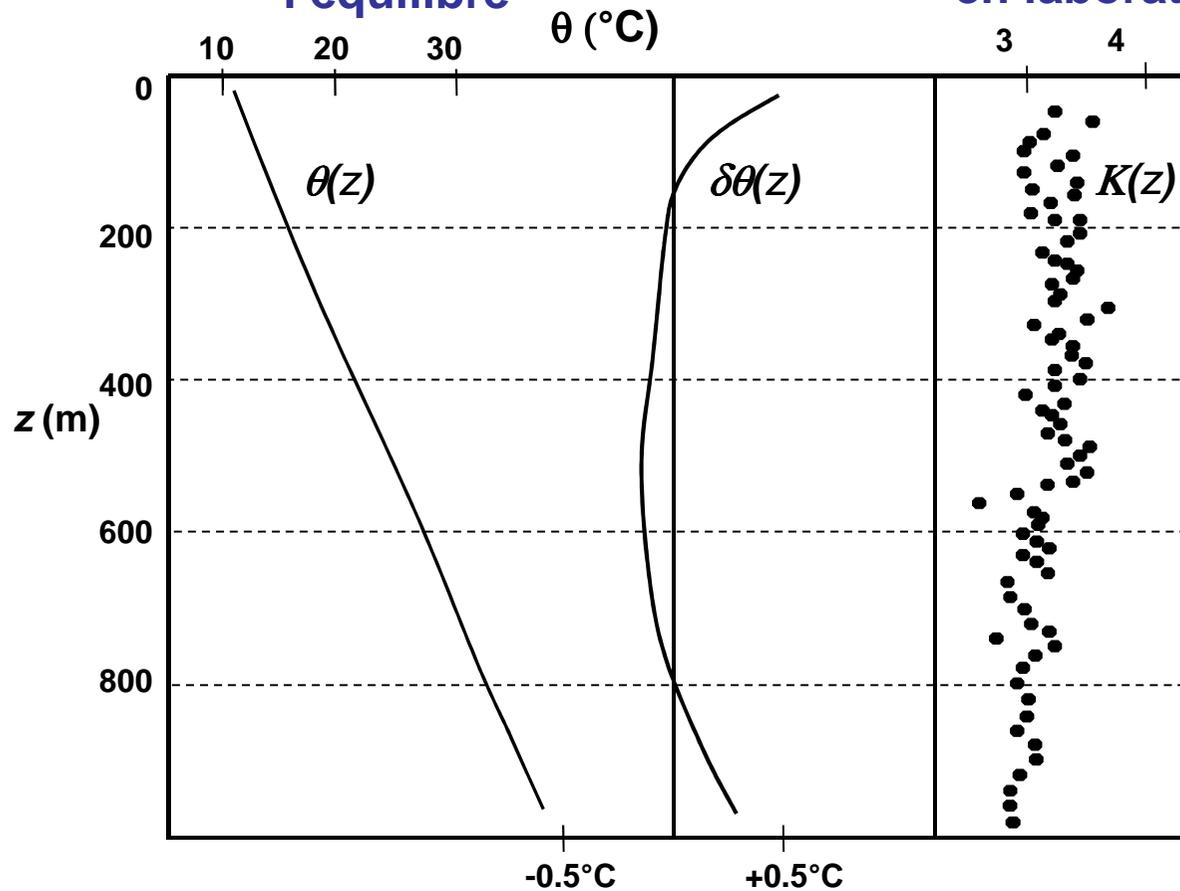
| | |
|-------|----------------------|
| P=1j | $\delta=15\text{cm}$ |
| P=1an | $\delta=3\text{m}$ |

Le flux géothermique de surface est le flux conductif évalué au dessous de ces perturbations

Exemple de mesure de flux géothermique en domaine continental

Mesure de température à l'équilibre

Mesure de conductivité en laboratoire



$$q = K \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

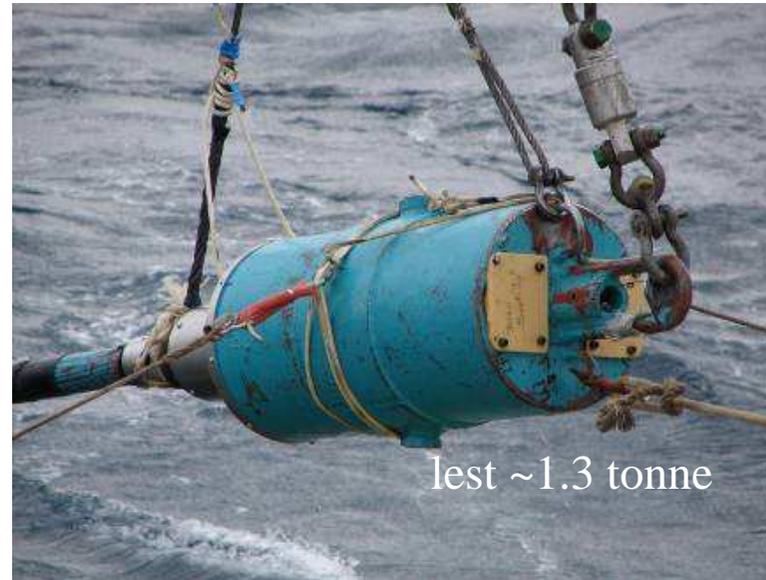
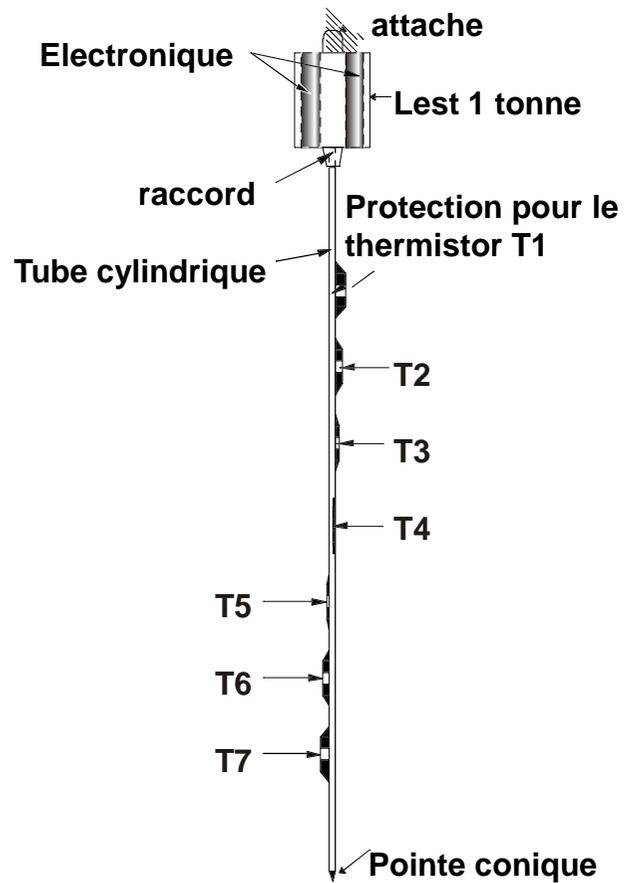
K en (Wm⁻¹K⁻¹)

q en Wm⁻²

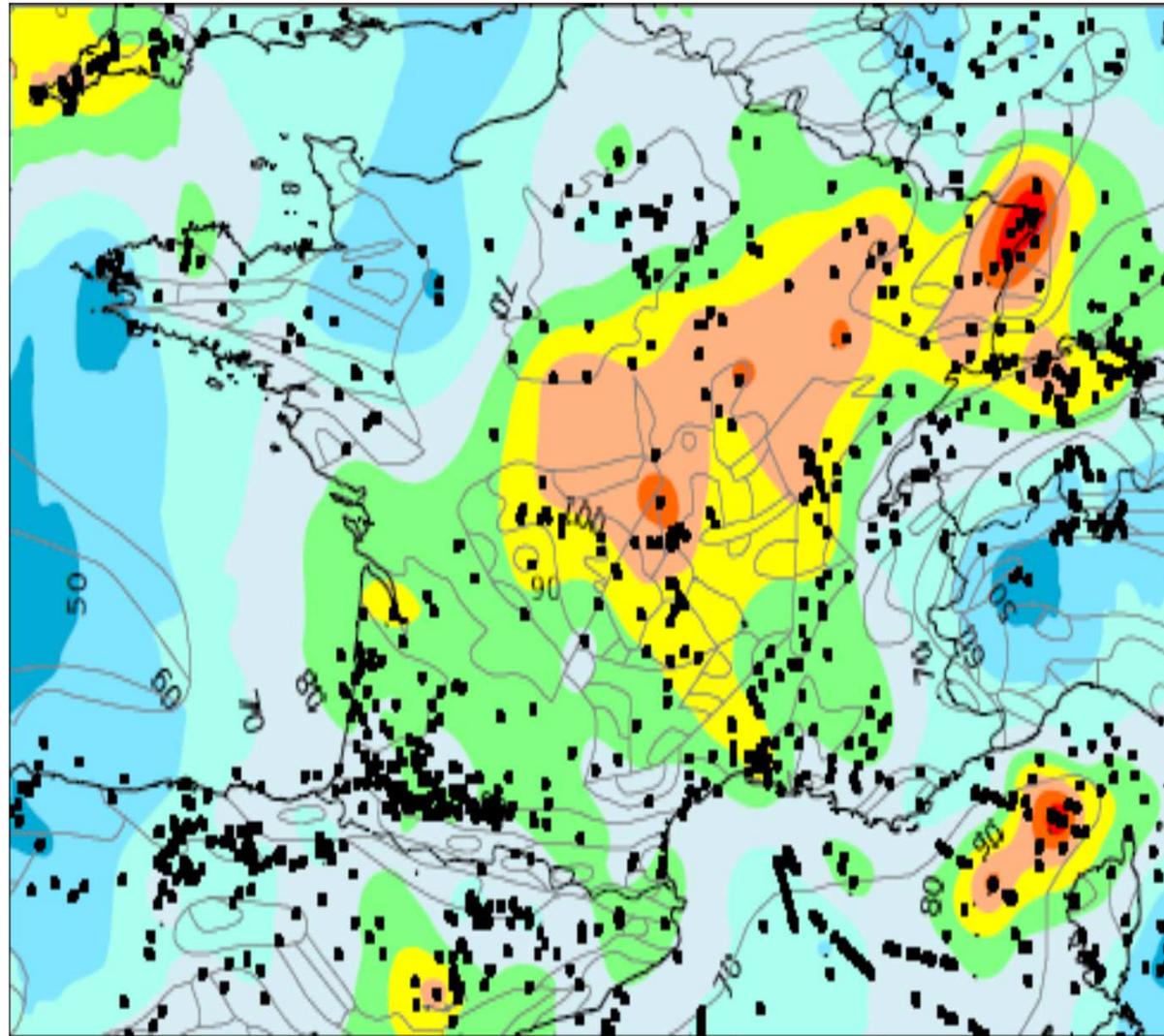
$q \approx 0,1$ Wm⁻²

*Valeur faible:
1kW requiert une
surface de 1ha*

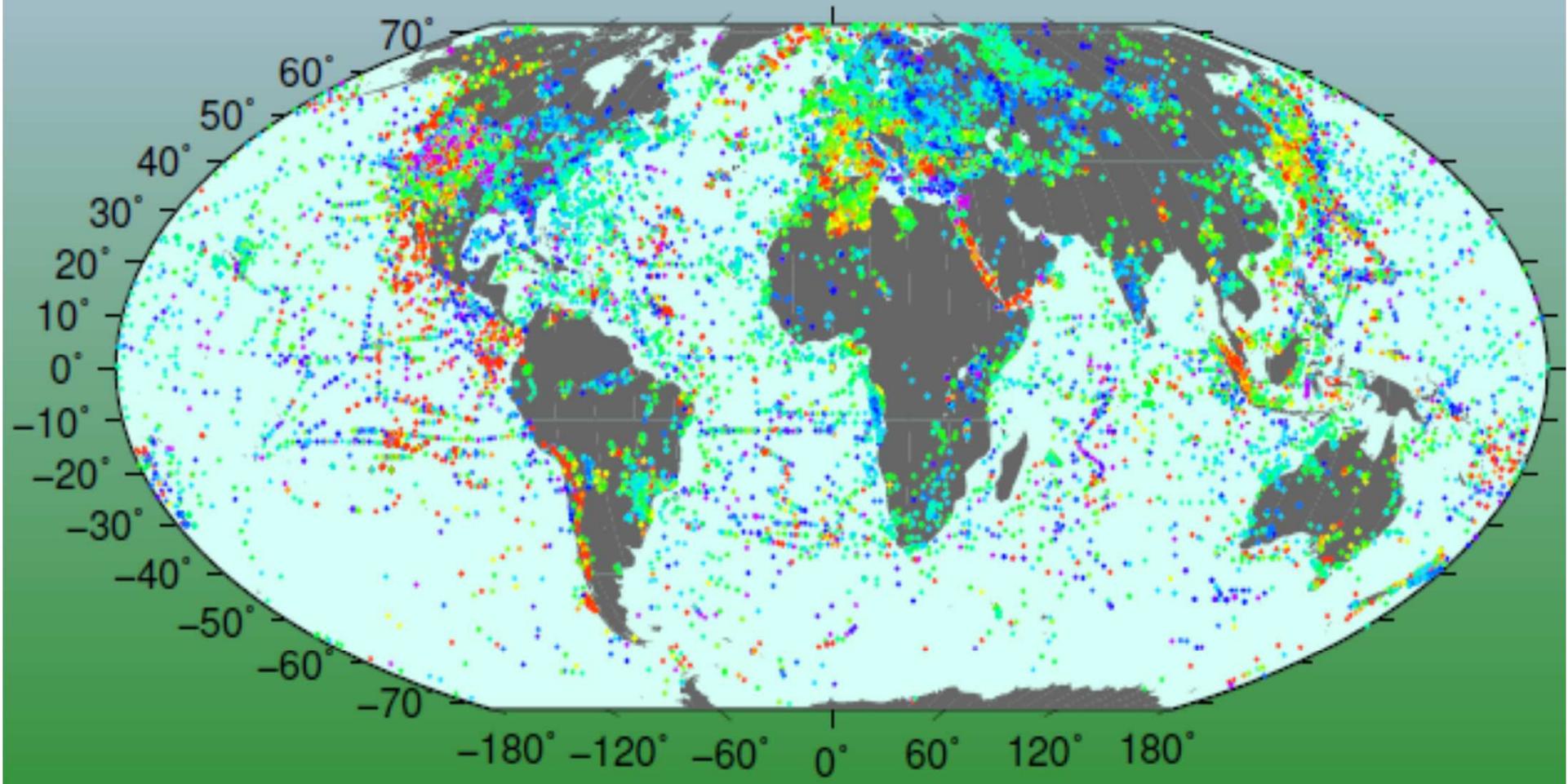
Sonde de mesure de flux océanique



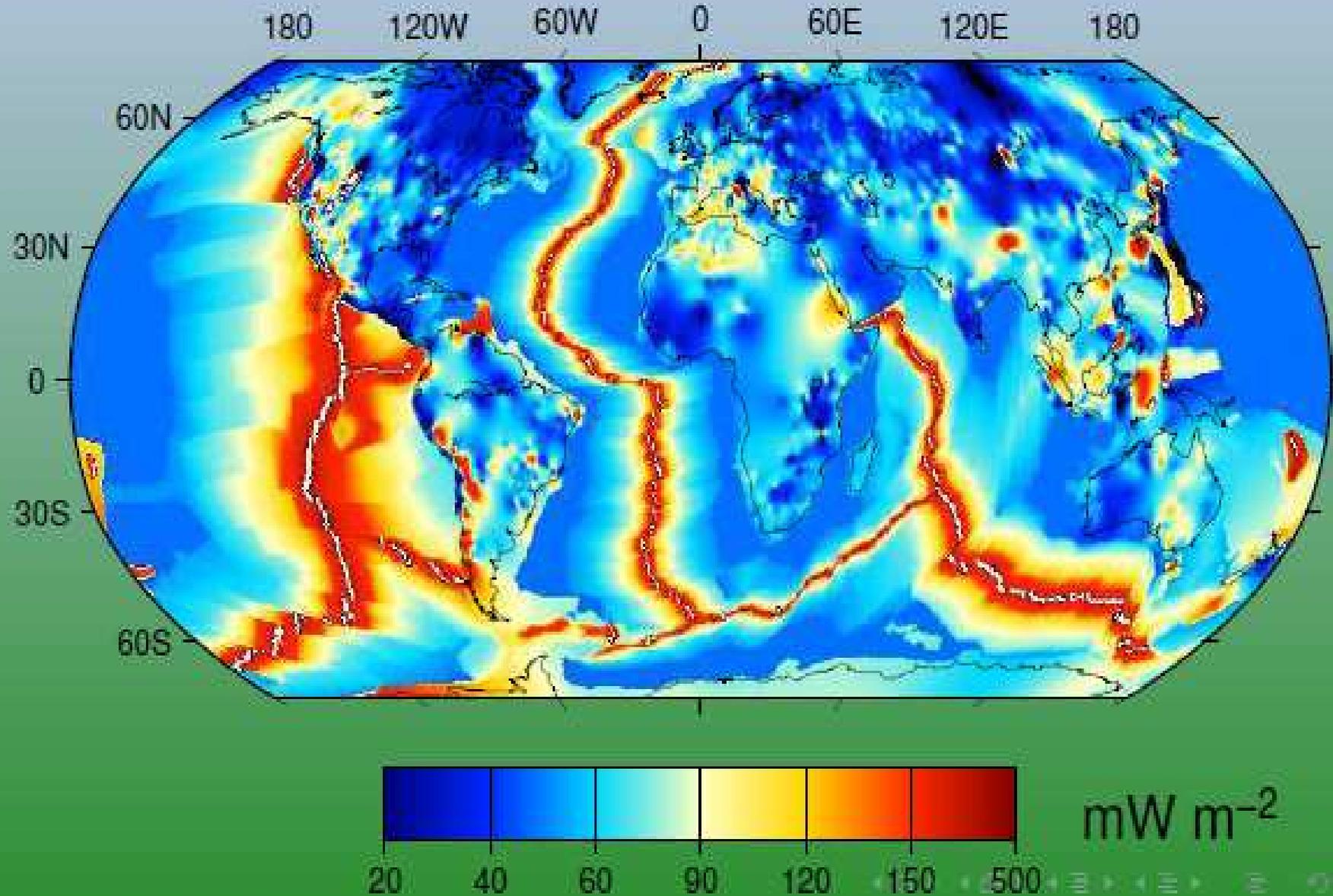
Flux de chaleur en France (Lucazeau et Vasseur, 1989)



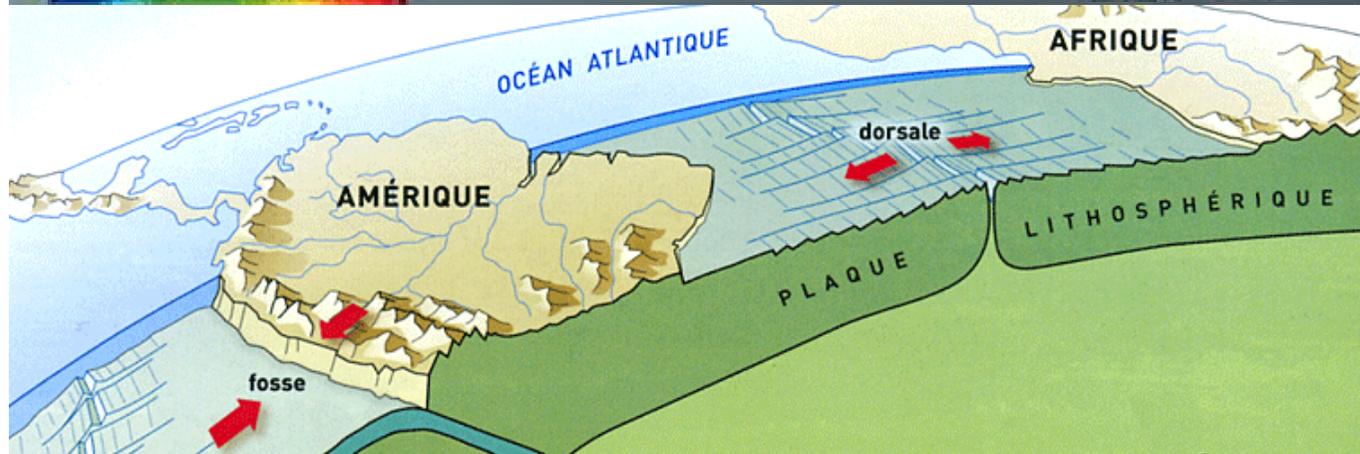
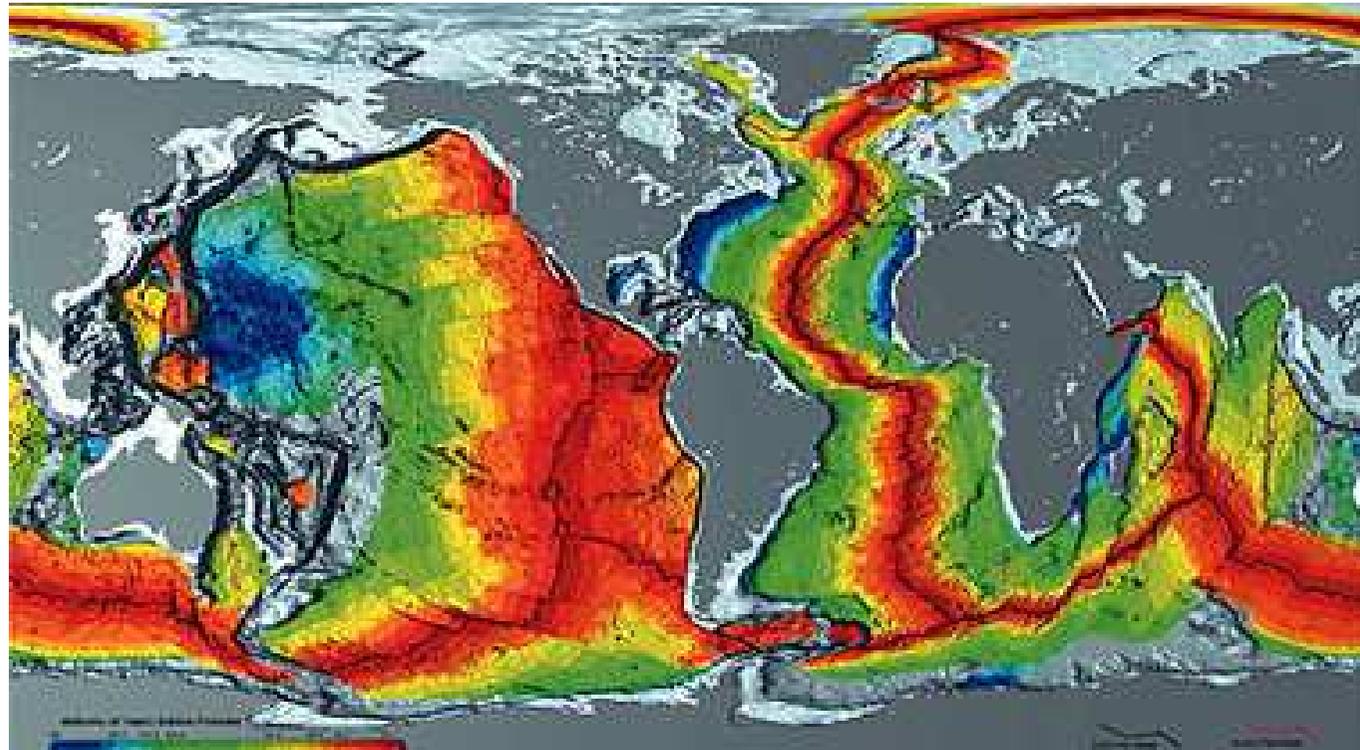
Compilation récente des mesures de flux (Goutorbe et al, 2011)



Carte du flux de chaleur mondial (Jaupart et al, 2014)



Relation évidente avec l'âge :
en rapport avec la tectonique des plaques



Comparaison de diverses énergies intégrées sur la surface du globe

| | W ou J/s | J/an |
|--|---|---|
| Flux géothermique | 4 à $5 \cdot 10^{13}$ | 1.2 à $1.5 \cdot 10^{21}$ |
| Énergie solaire | $1.8 \cdot 10^{17}$ | $6 \cdot 10^{24}$ |
| Dissipation des marées | $3 \cdot 10^{12}$ | $1 \cdot 10^{20}$ |
| Énergie sismique | – | $1 \cdot 10^{18}$ |
| Énergie des volcans | – | $1 \cdot 10^{19}$ |
| Production mondiale d'énergie | $13 \cdot 10^{12}$ | $4 \cdot 10^{20}$ |

Contexte historique

Origine du flux géoth: refroidissement??

Buffon (1783) estime à 74000 ans l'âge de la Terre à partir du refroidissement de boulets dans sa forge

Fourier (1827) attribue l'accroissement de 1°C tous les 30 ou 40 m à la chaleur résiduelle

Kelvin (1895) estime l'âge de la Terre à 20-400 Ma à partir de la diffusion de la chaleur initiale

Découverte de la radioactivité: source de chaleur

Urey (1954) estime que la concentration en U,Th,K à la formation de la Terre est celle des météorites (chondrites carbonées cf manteau primitif) > existence d'une source de chaleur interne....

Contenu en U,Th,K et production de chaleur actuelle

| | Demi-vie Ma | H μWkg^{-1} |
|-------------------|----------------|-----------------------------|
| ^{235}U | 4500 | 575 |
| ^{238}U | 700 | 92 |
| ^{232}Th | 14000 | 25.6 |
| ^{40}K | 1250 | 29.5 |

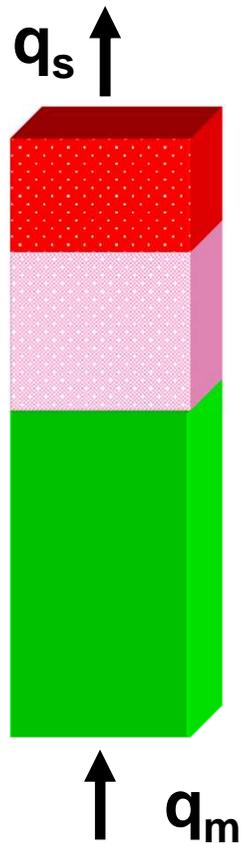
Production de chaleur
par unité de volume
Valeurs typiques
de quelques roches

Granite $H= 3 \mu\text{Wm}^{-3}$

Basalte alcalin $H= 0,5 \mu\text{Wm}^{-3}$

Péridotite $H=0,01-0,1 \mu\text{Wm}^{-3}$

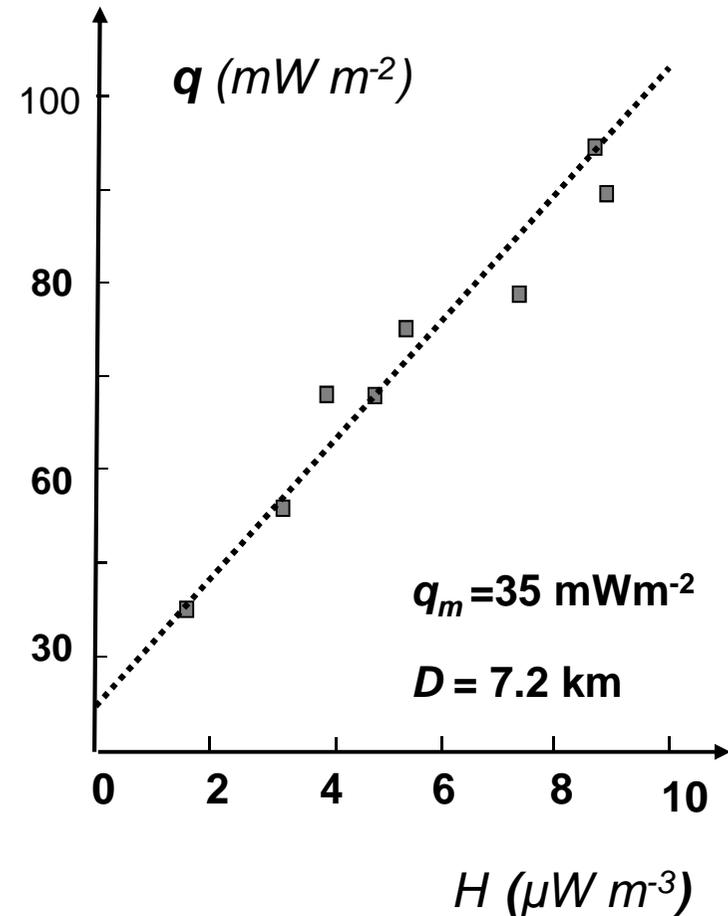
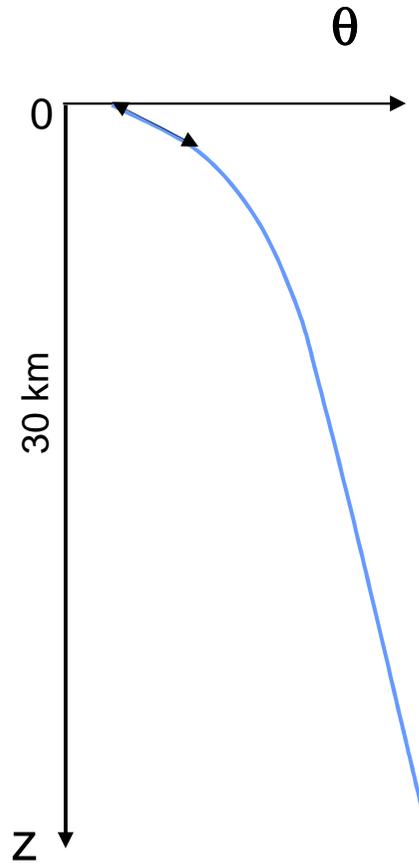
Distribution de H et θ dans la lithosphère continentale



Croûte sup.

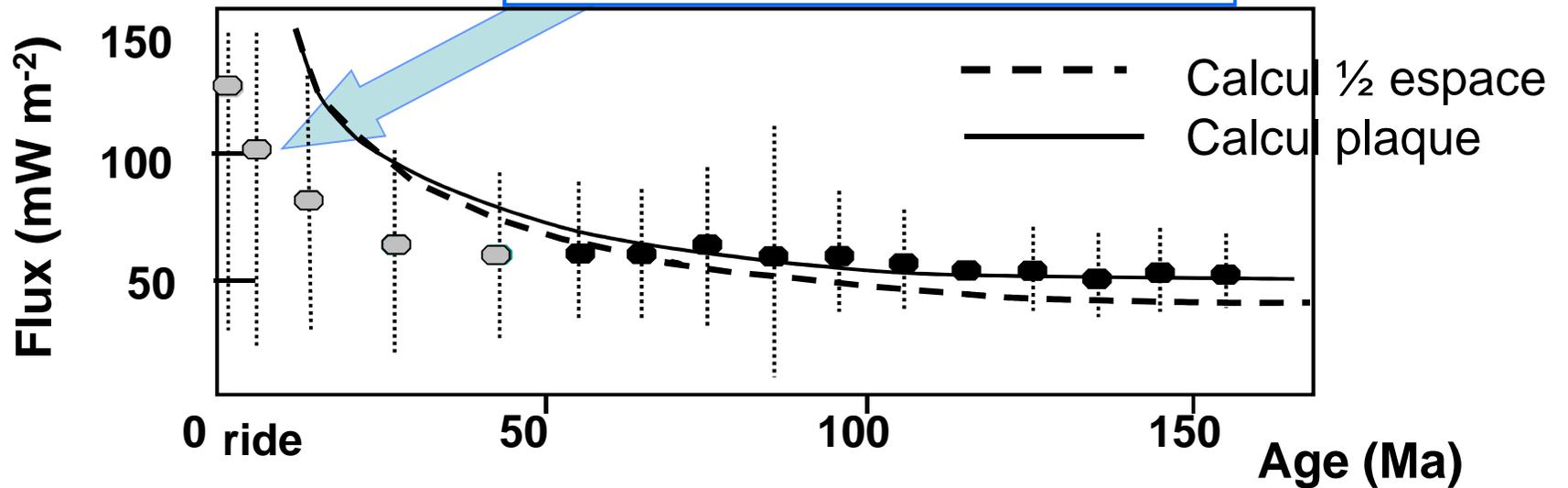
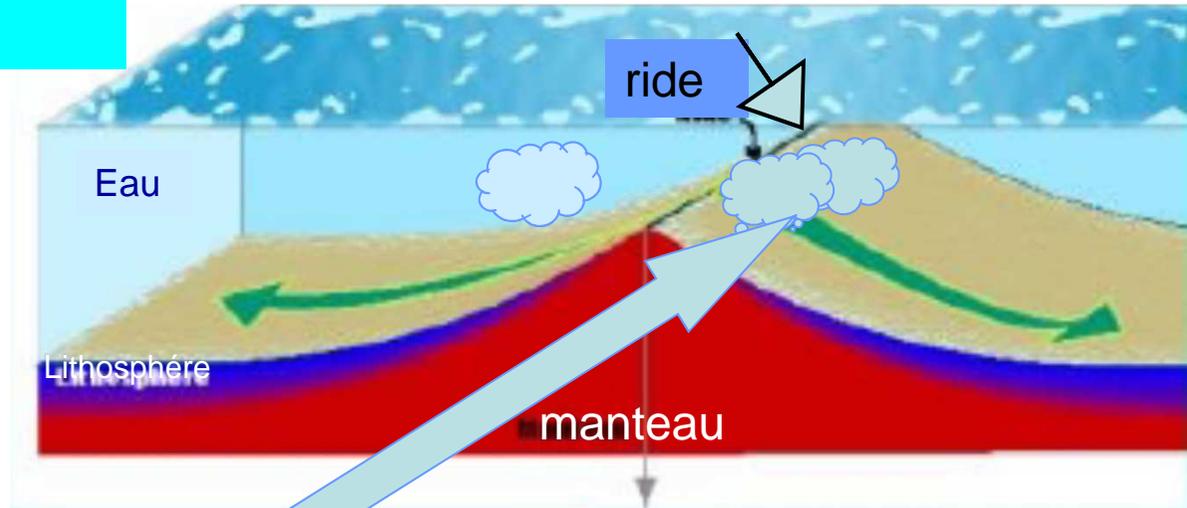
Croûte inf.

Manteau lithosph.

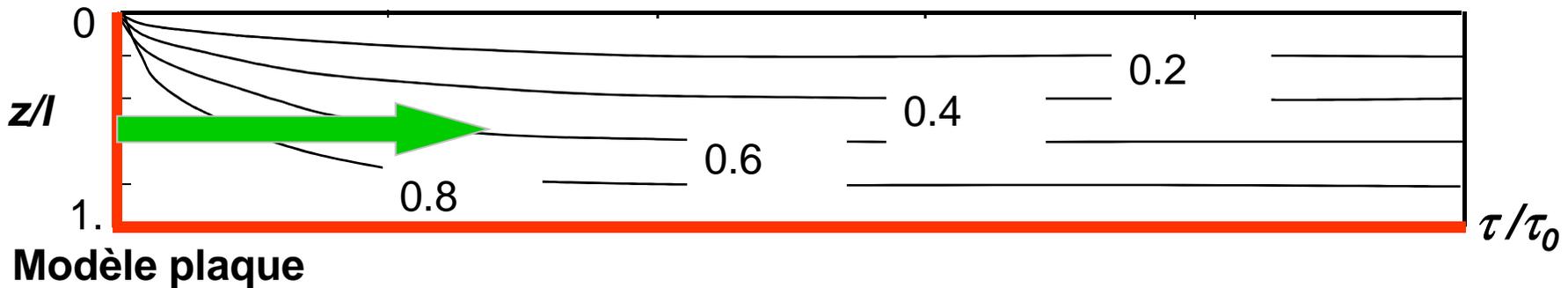
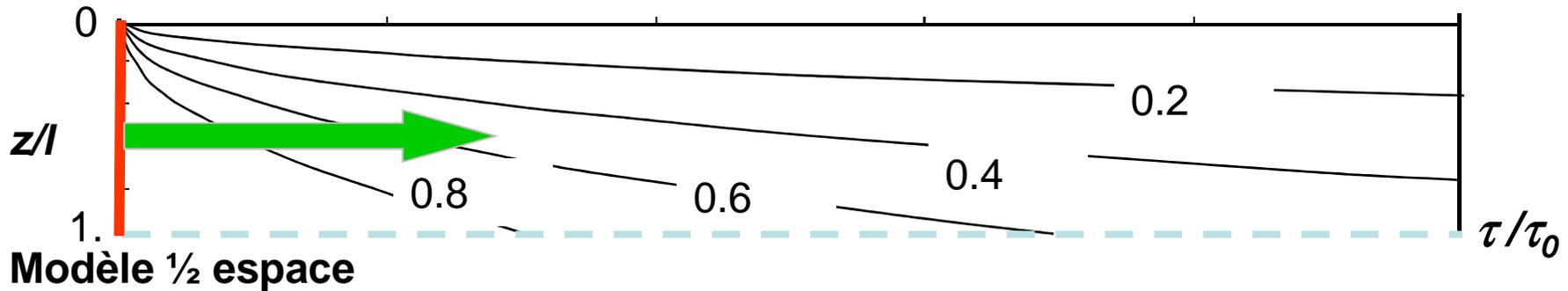


Le flux de chaleur océanique

Il varie avec la distance à la dorsale cad avec l'âge

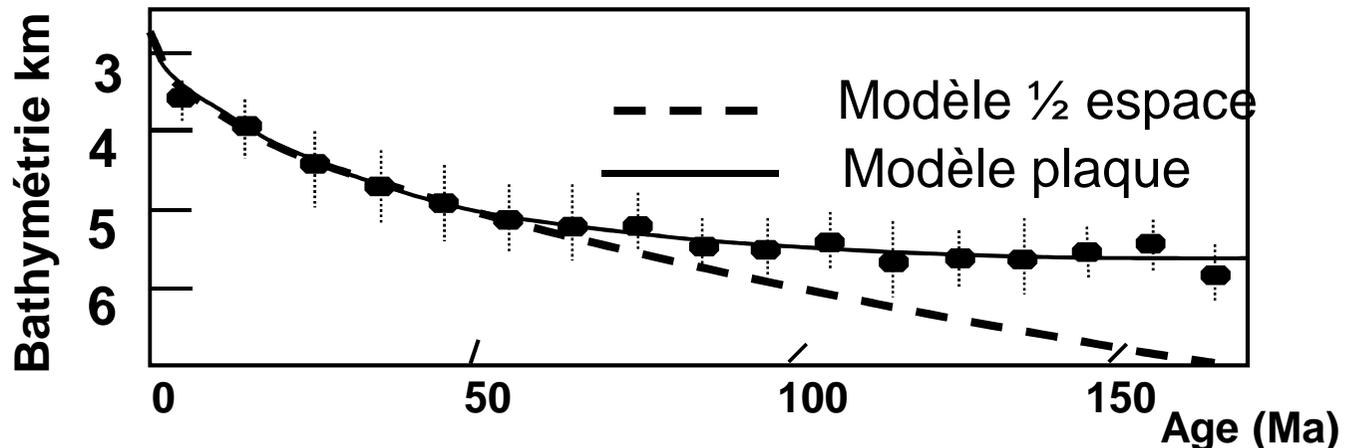


2 modèles de refroidissement conductif de la lithosphère océanique et la bathymétrie

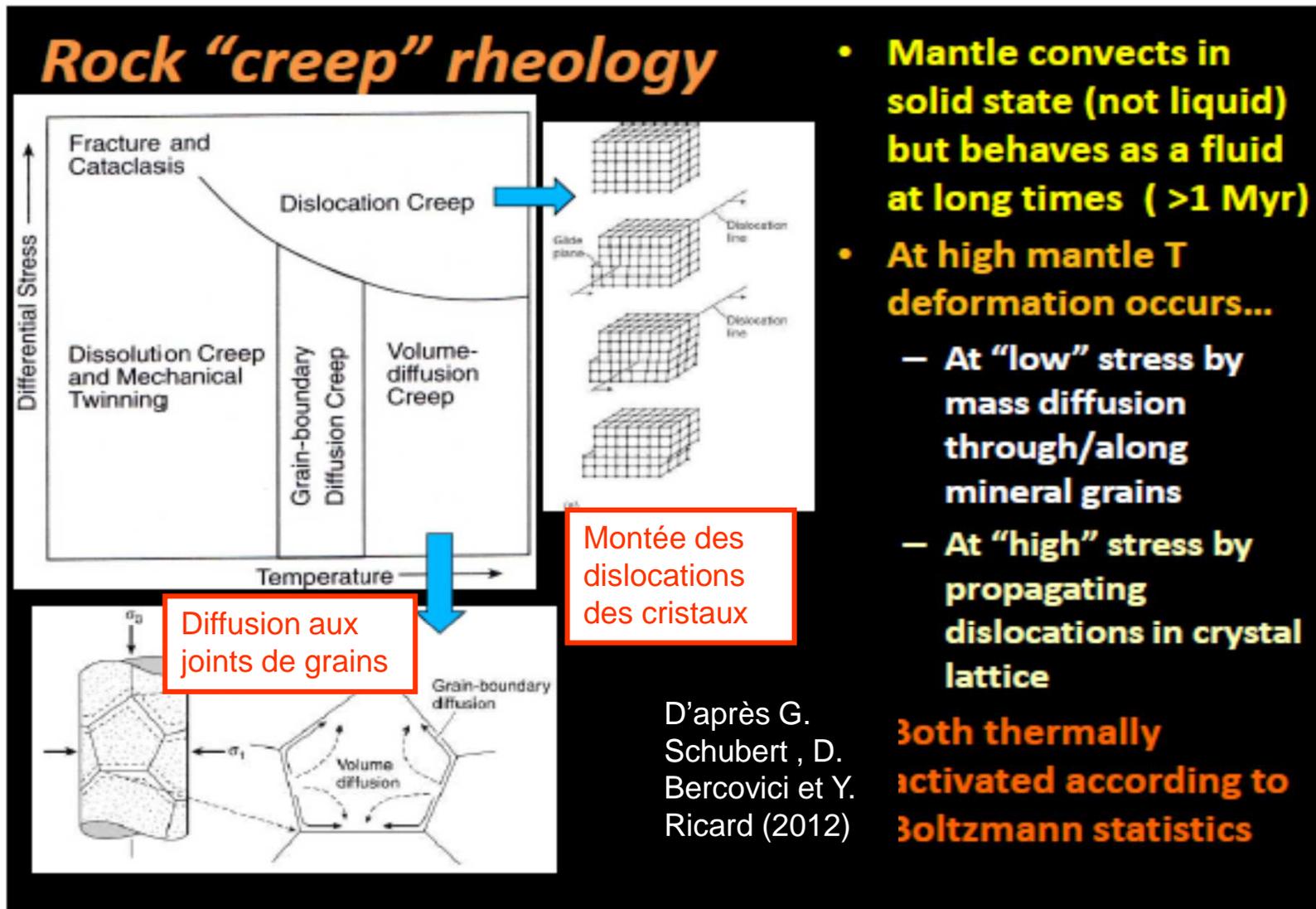


Quel modèle?: la bathymétrie montrée ici en km privilégie le 2nd et au dessous

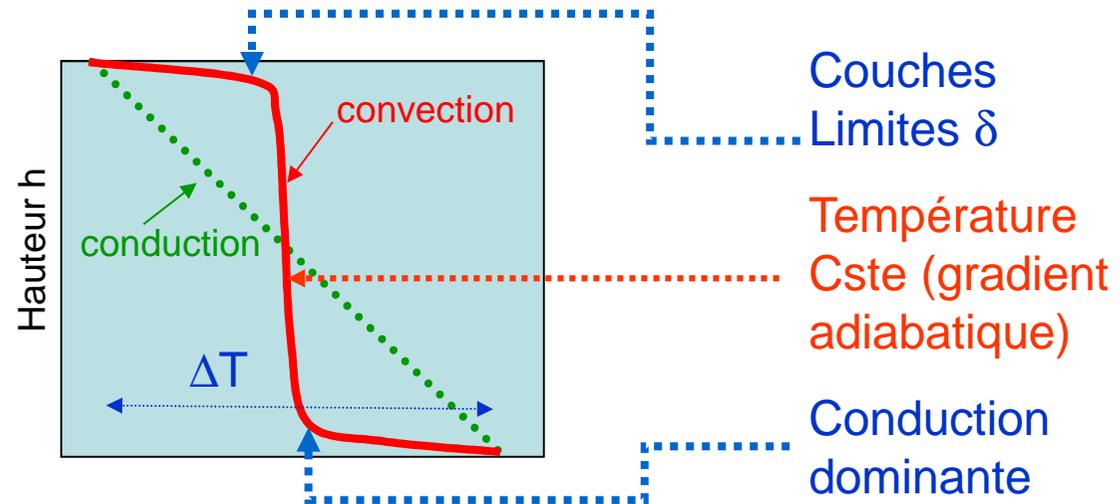
? CONVECTION



Le manteau sub-lithosphérique n'est pas un liquide mais, aux temps géologiques, il flue



Convection de Rayleigh-Bénard appliquée au manteau



Nombre de Rayleigh : $R_a = \frac{\alpha g \rho \Delta T h^3}{k \mu}$

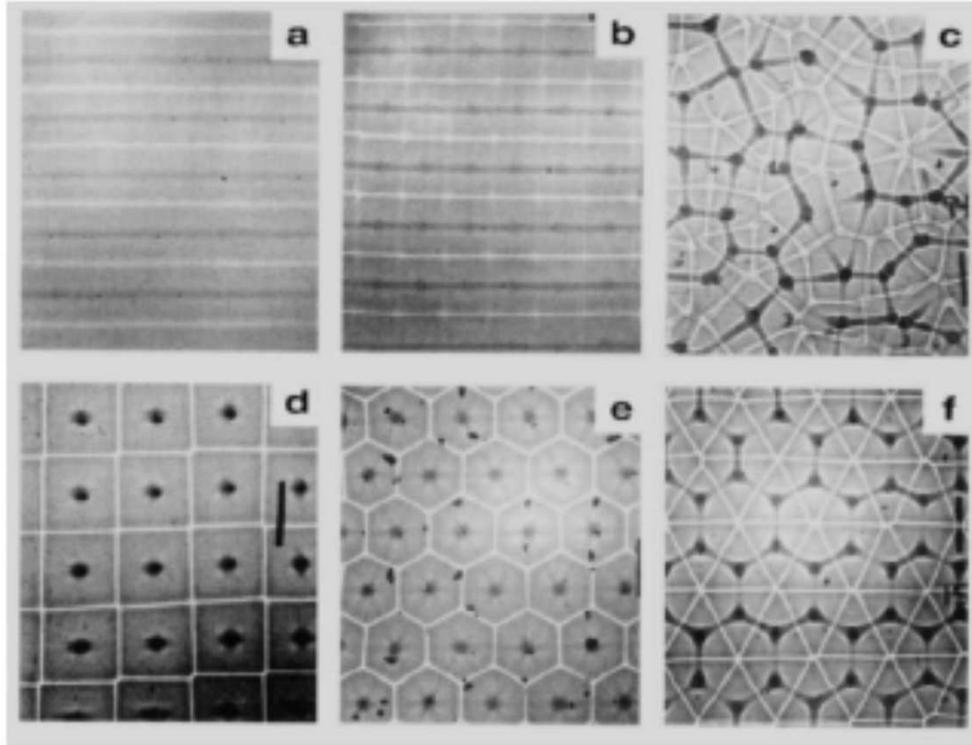
$R_a > R_c \sim 1000 > \text{convection}$

$Nu \sim (R_a/R_c)^{1/3}$ et $\delta \sim R_a^{-1/3}$

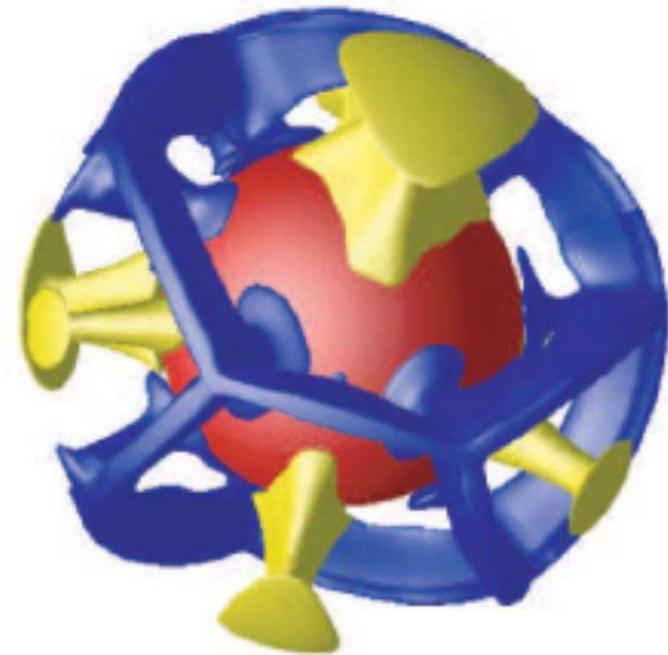
$\mu_{\text{manteau}} \sim 10^{21} \text{ Pas}$; $k = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} > R_a \sim 10^8$

→ Manteau convectif → lithosphère = couche limite supérieure

Exemples de convection de Rayleigh-Bénard

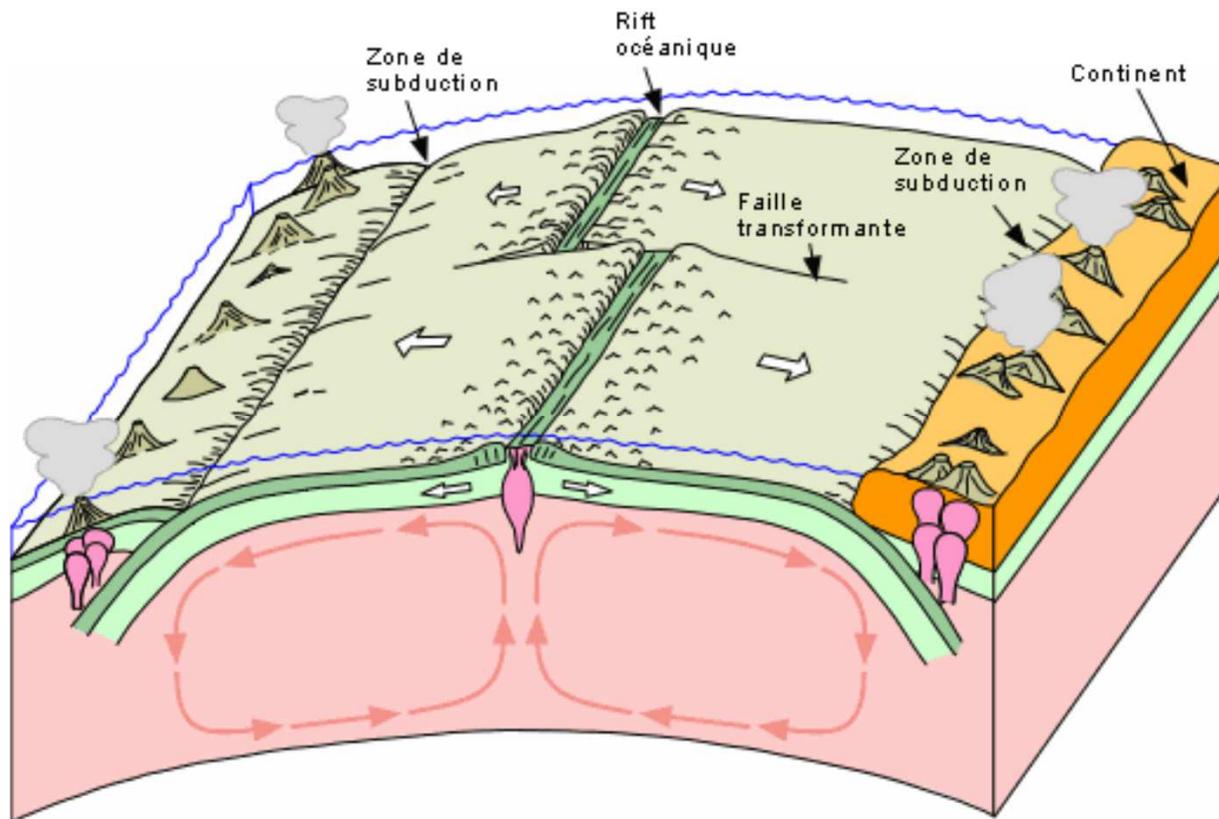


Expérience de convection de R.B. dans une réserveur rectangulaire vu de dessus par White (1988)



Convection dans une coque **sphérique** par calcul numérique (Zhong et al, 2000): panaches froids en bleu et chauds en jaune

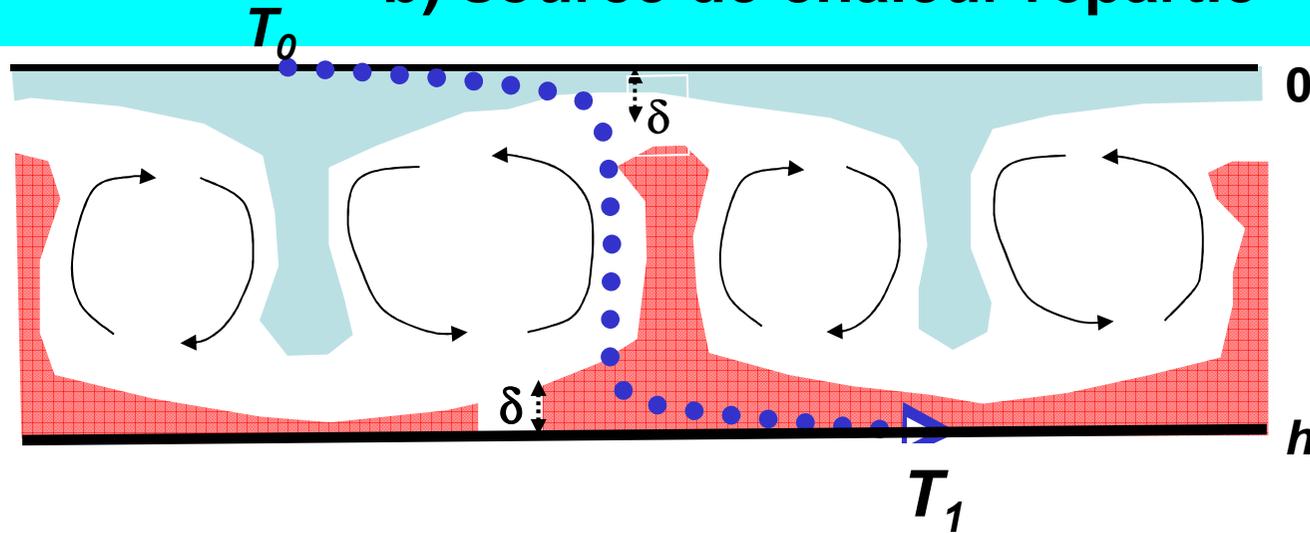
Relation tectonique des plaques convection



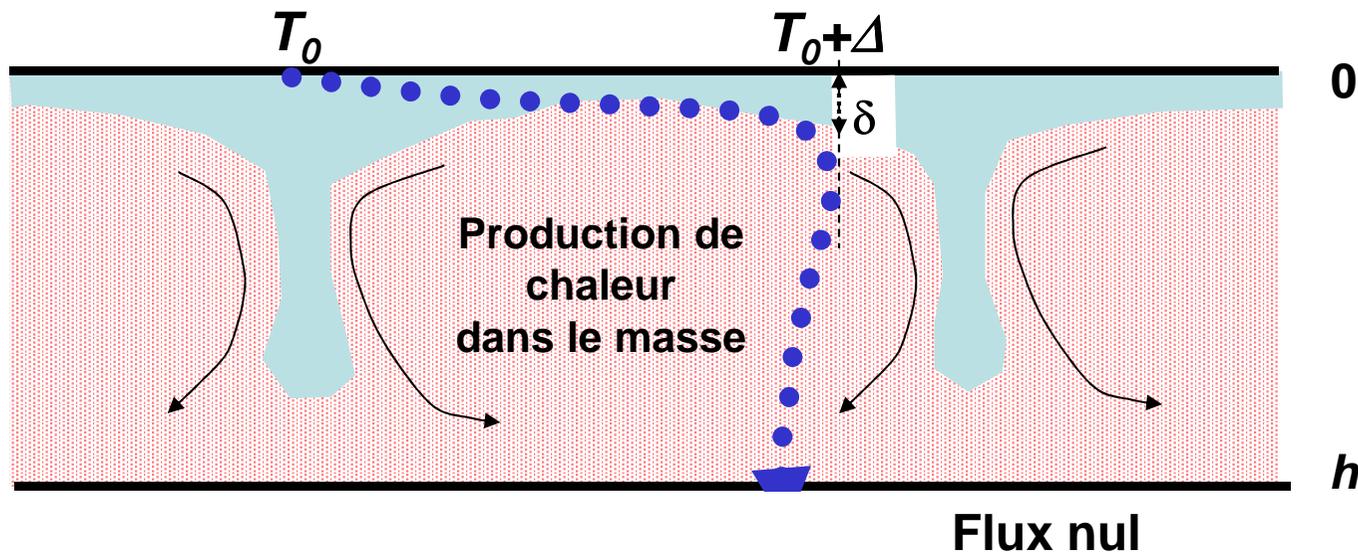
Application au manteau: source +/- répartie

a) chaleur venant uniquement d'en bas

b) source de chaleur répartie

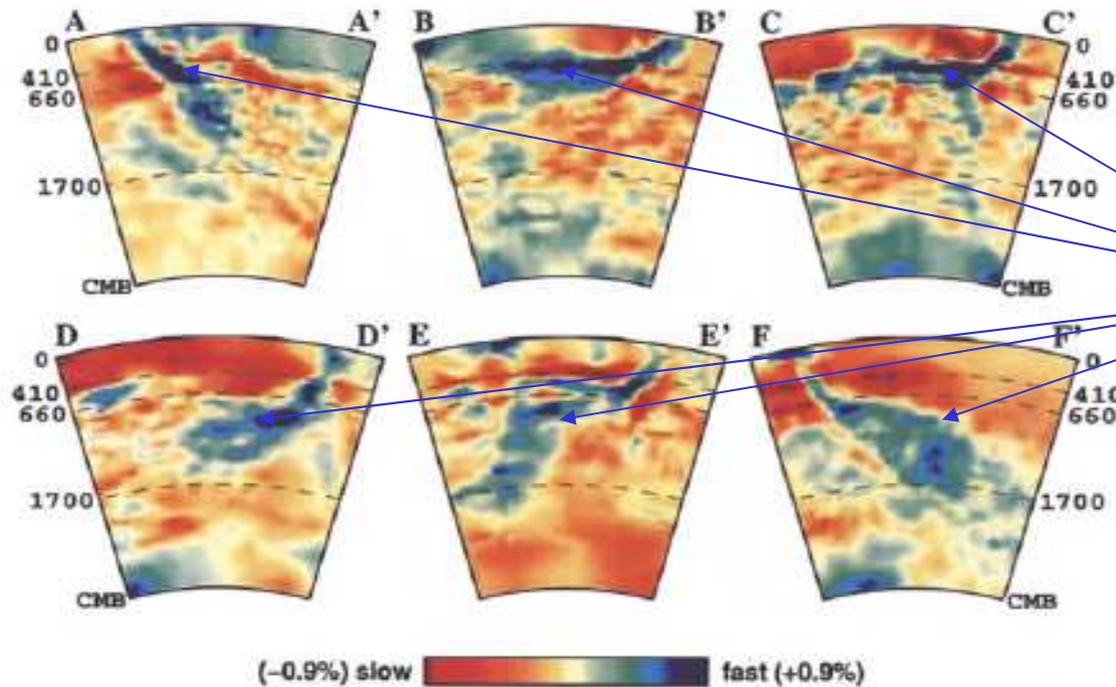


a) Chaleur venant d'en bas



b) Chaleur répartie dans la masse

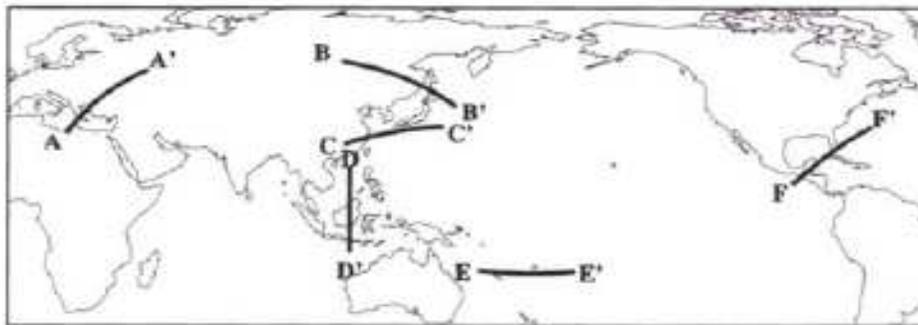
Tomographie sismique: les subductions ont une forte vitesse V_p (froides)



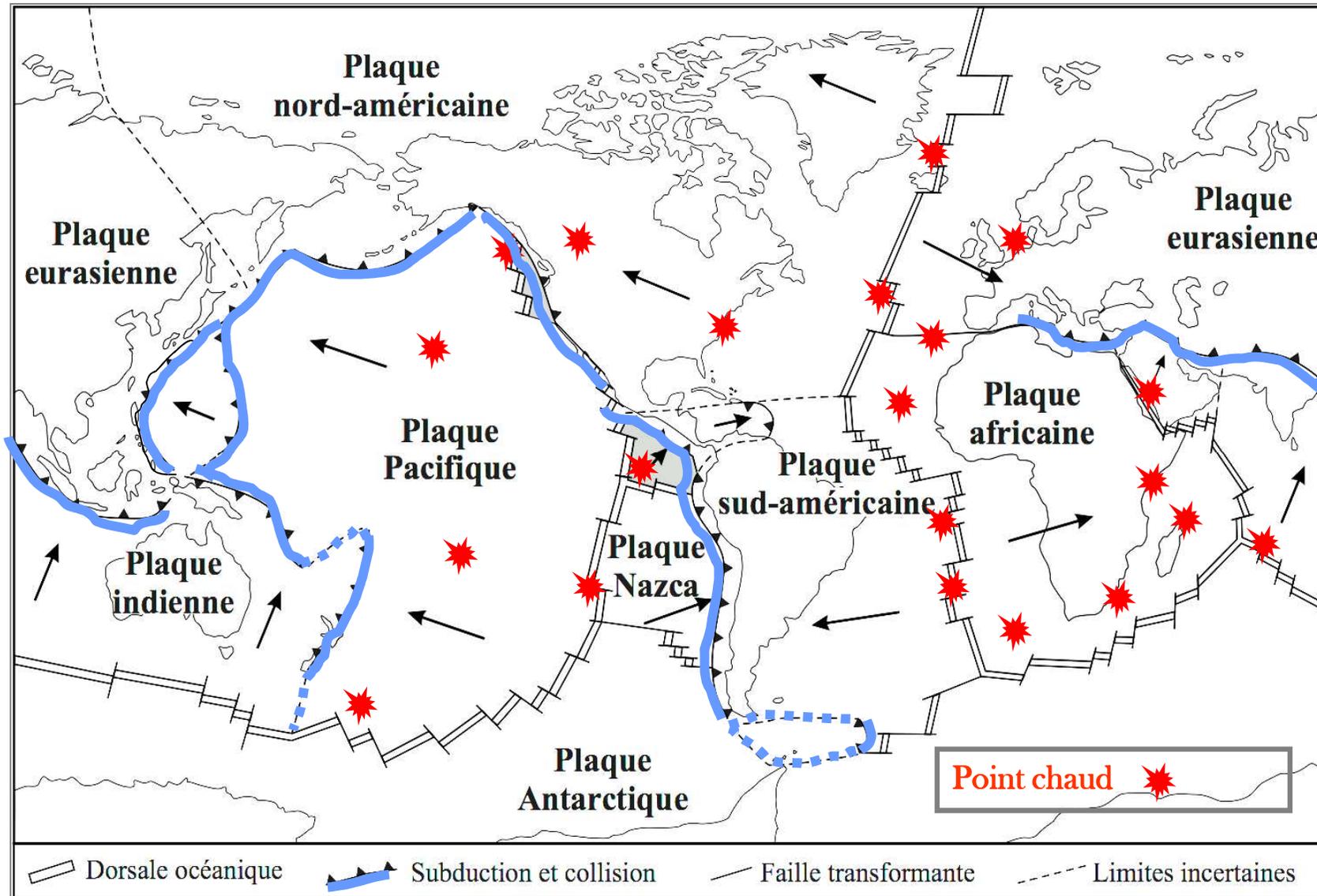
Les zones de subduction apparaissent en bleu

Autre preuve de leur rôle majeur:

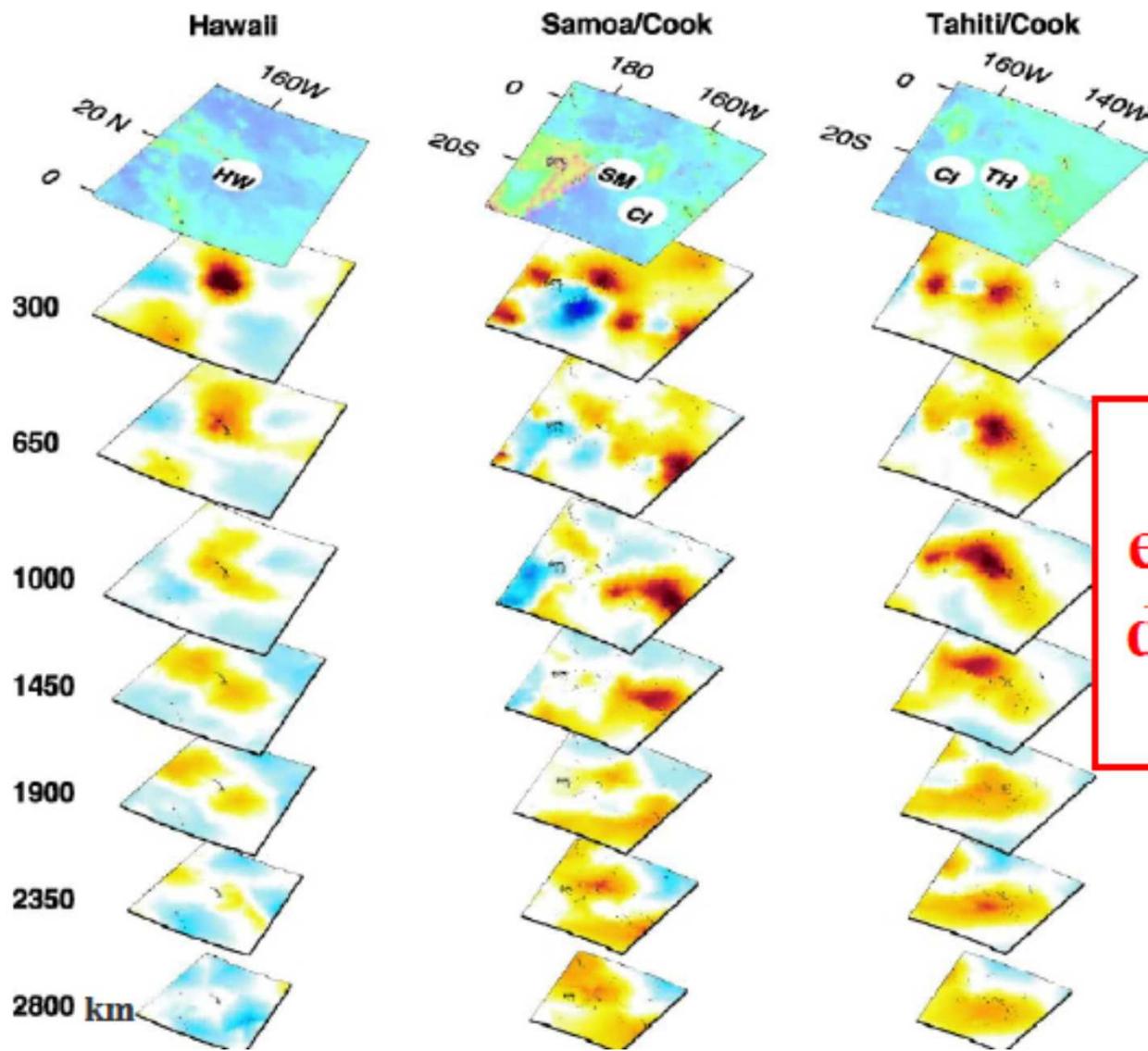
Les plaques les plus rapides sont caractérisées par un % de frontière en subduction le plus grand.



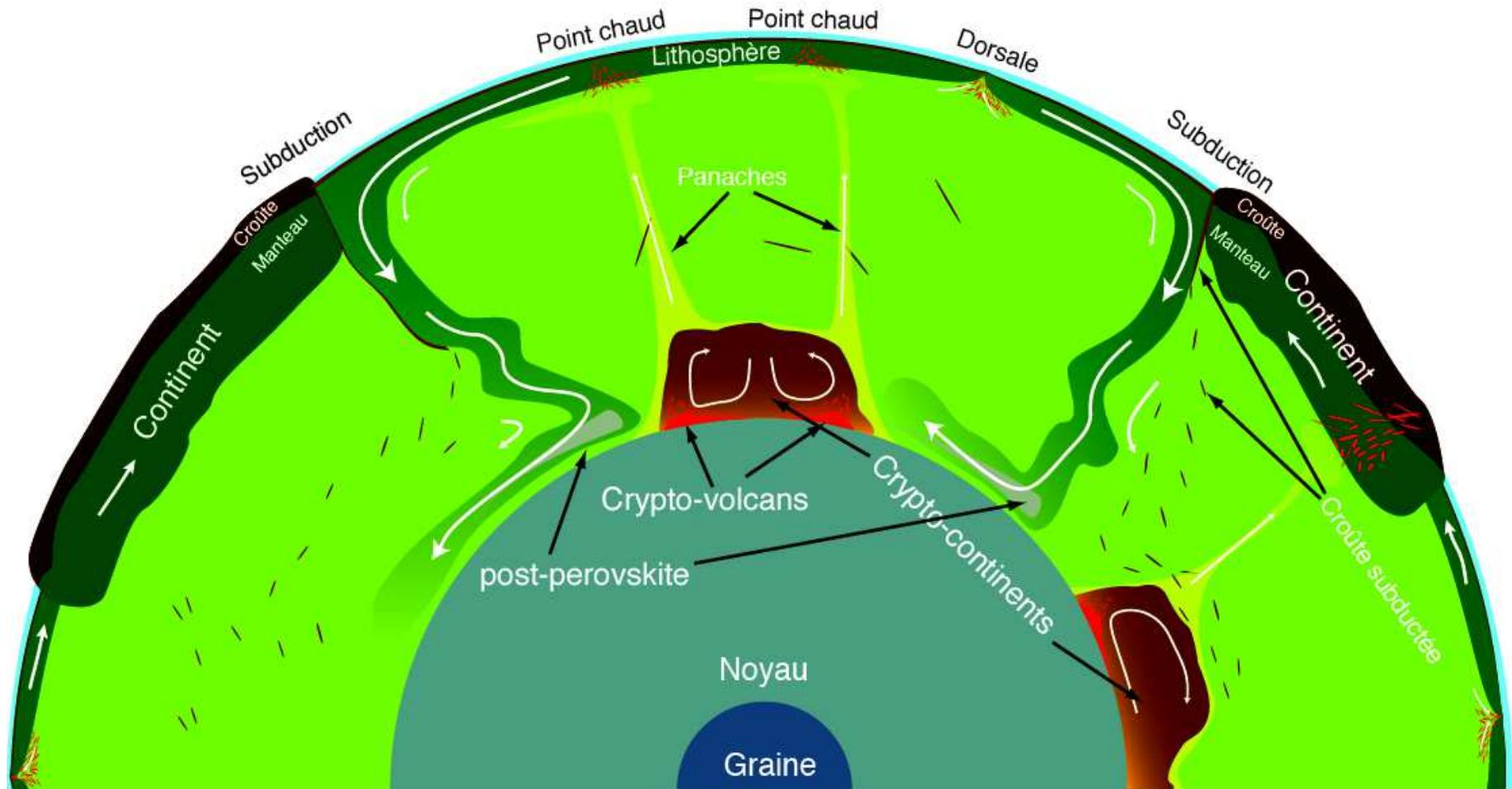
Les plaques lithosphériques: zones de subduction et points chauds



Et les points chauds vus en sismique



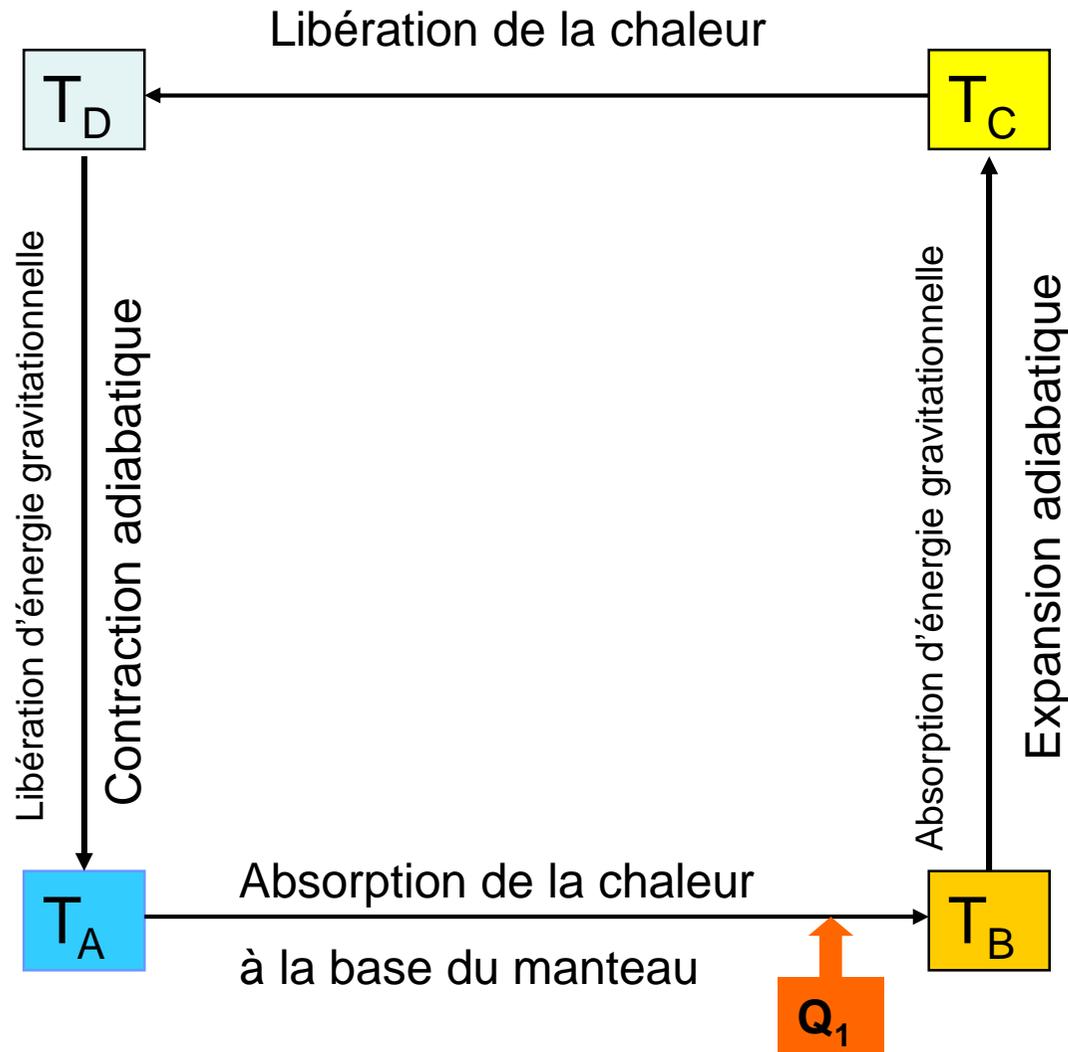
Convection et tectonique d'après Labrosse



Bilan global: origine de la chaleur en TW

| | Stacey Davis (2008) | Davies (1999) | Jaupart et al (2007) |
|--|---------------------------|------------------|-------------------------|
| Production de chaleur crustale $10^{12}W$ | 8 | 5 | 7 |
| Production de chaleur mantellique $10^{12}W$ | 19 | 12-28 | 13 |
| Différentiation manteau/noyau et gravitationnelle $10^{12}W$ | 4 | 1 | 0.3 |
| Refroidissement du noyau $10^{12}W$ | 3 | 5 | 10 |
| Refroidissement du manteau $10^{12}W$ | 10 | 9 | 16 |
| Bilan total $10^{12}W$ | 42 | 41 | 46 |

Cycle de Carnot appliqué à la convection mantellique



Origine de la chaleur initiale de la Terre (d'après Schubert, 2011)



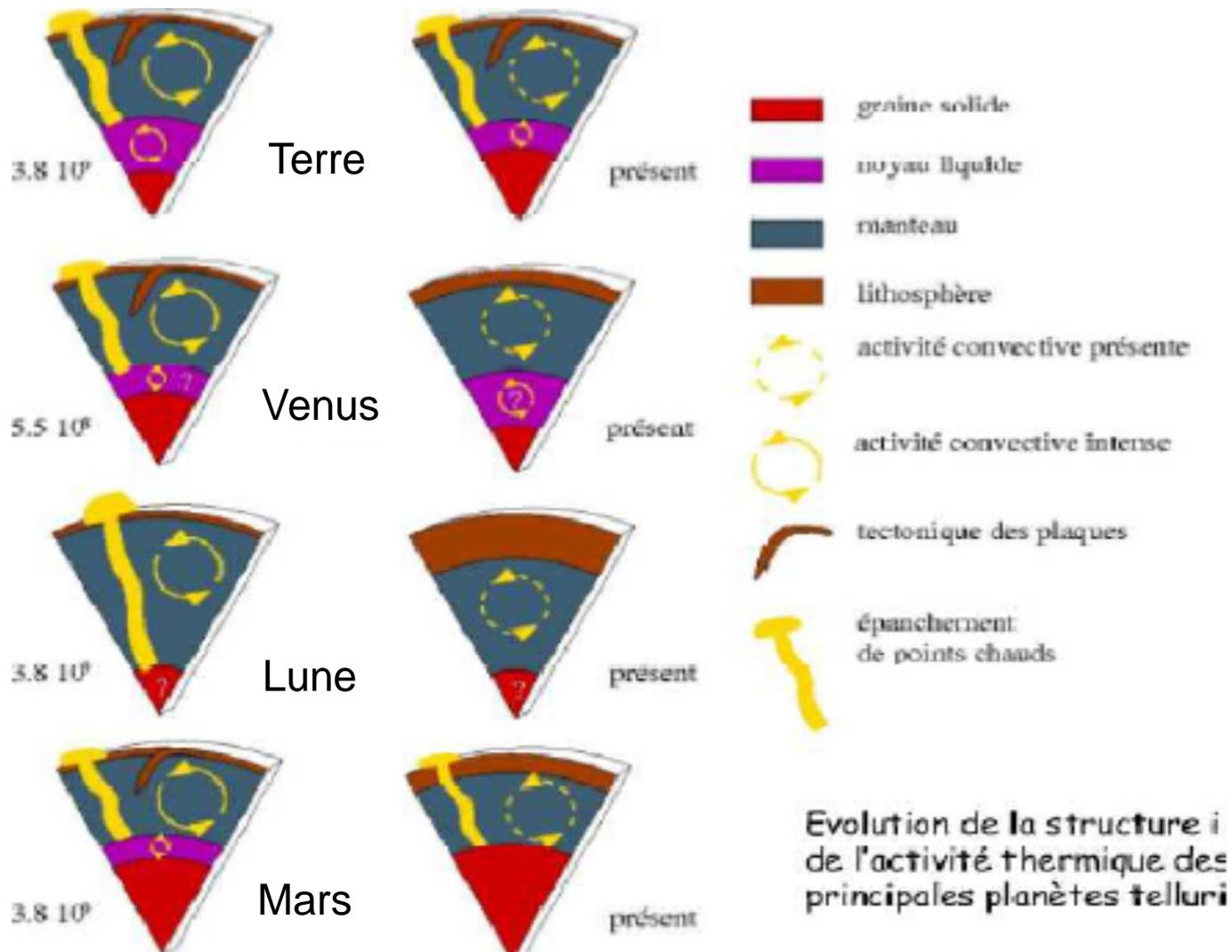
Subsequent impacts continue to store heat.
Leaves present-day energy source which is...

Primordial Heat
(heat left over from planet formation).

- In the beginning....
- Earth “accretes” about 4.6 billion yrs ago
- Energy of colliding/sticking bodies stored as heat



Et sur les autres planètes telluriques d'après Beck (2011)?



Résumé: origine du flux de chaleur et mode de transfert

La lithosphère

Sources radioactives concentrées en surface

Mécaniquement rigide > **conduction verticale**

Le manteau

Sources radioactives réparties peu concentrées et refroidissement

Composé de roches solides, mais pas aux échelles de temps géologiques > **convection à l'origine de la tectonique des plaques**

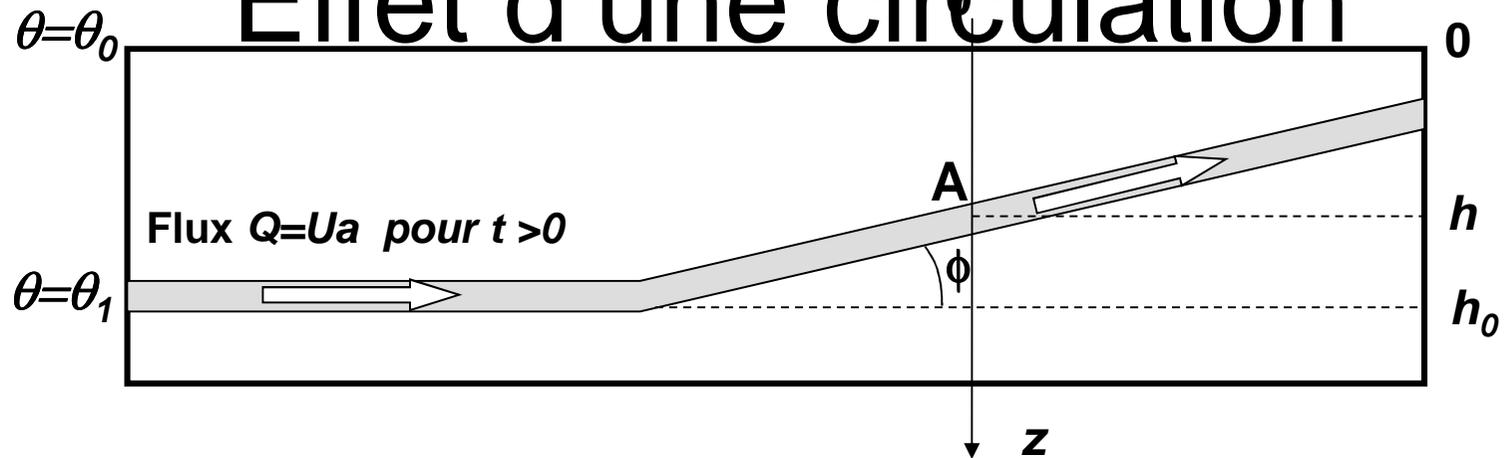
Le noyau

Refroidissement depuis 4000 Ma

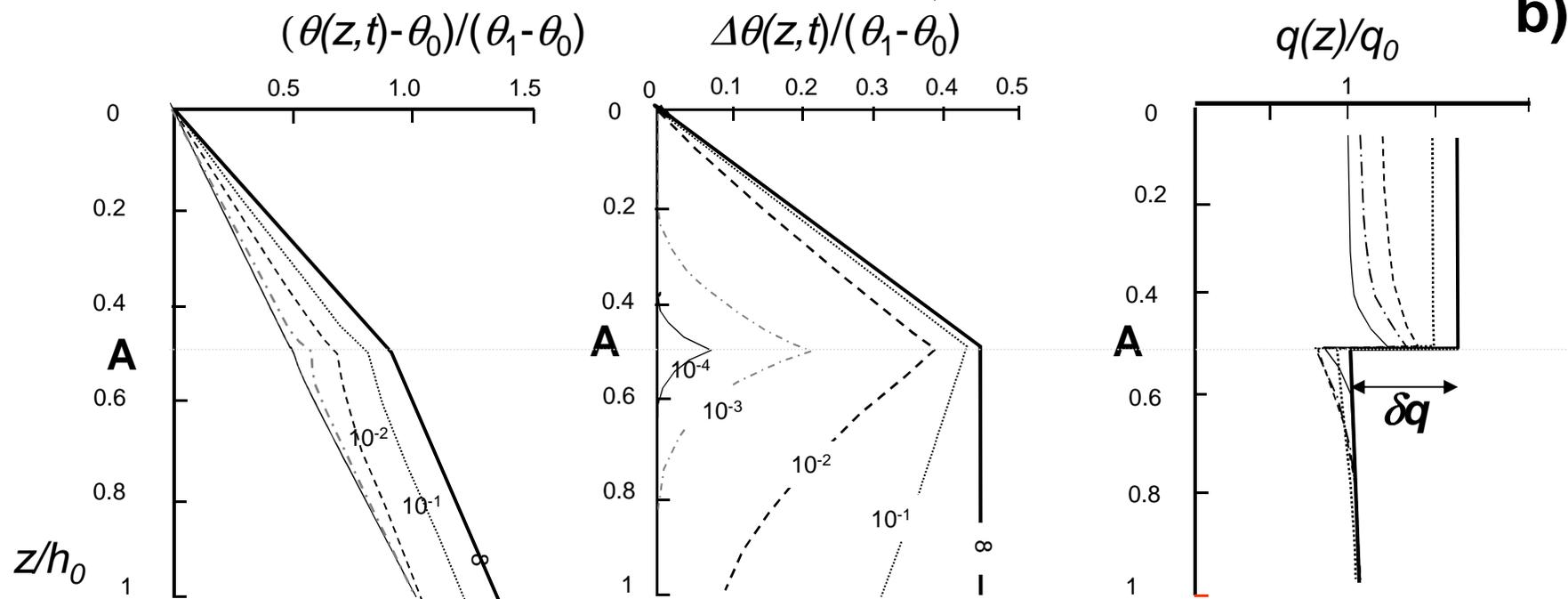
Sources radioactives en très faible concentration.

Alliage Fe,Ni liquide dans la partie externe > **convection intense à l'origine du champ magnétique terrestre**

Effet d'une circulation

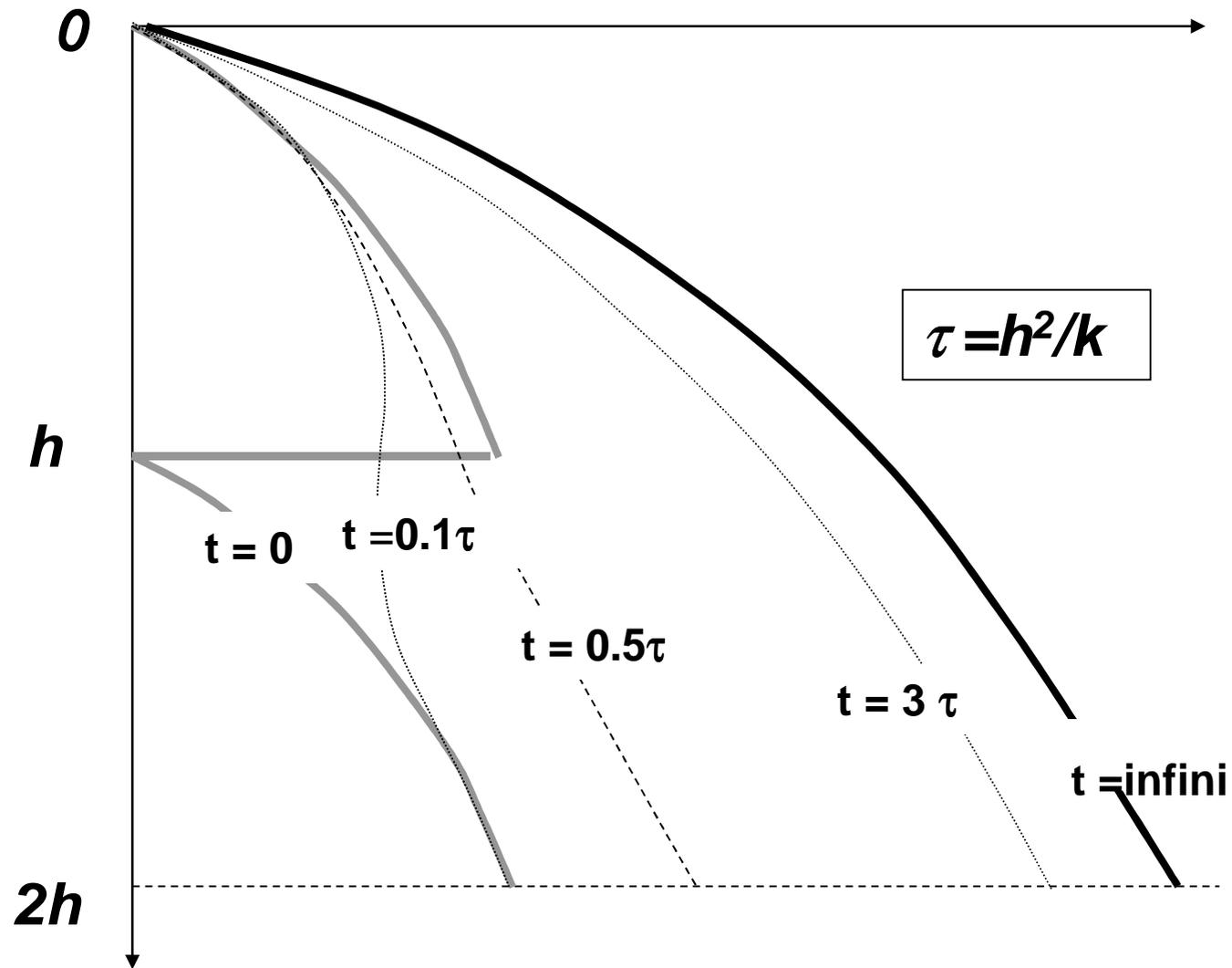


a)

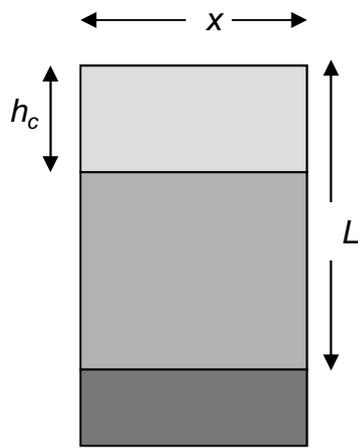


b)

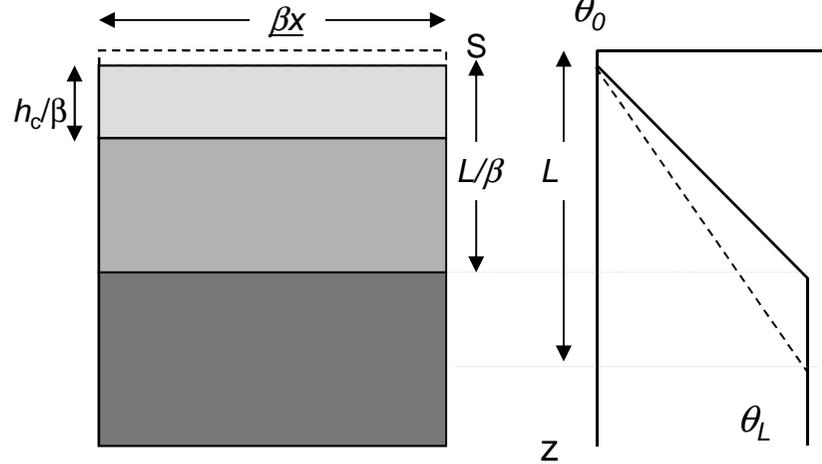
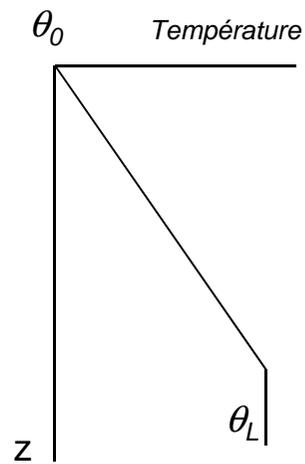
Effet d'une coute doublée τ



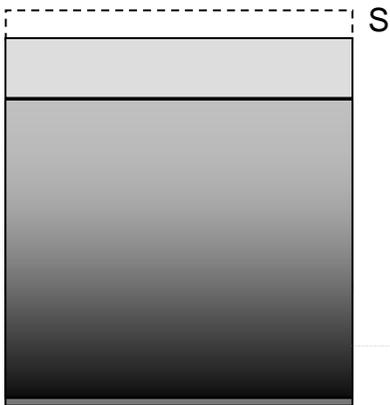
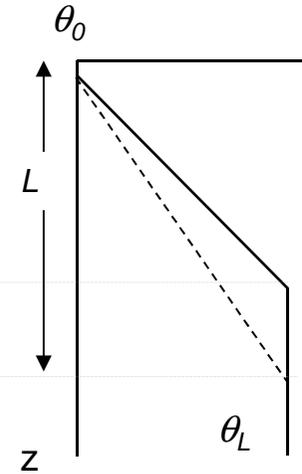
Effet d'un amincissement crustal



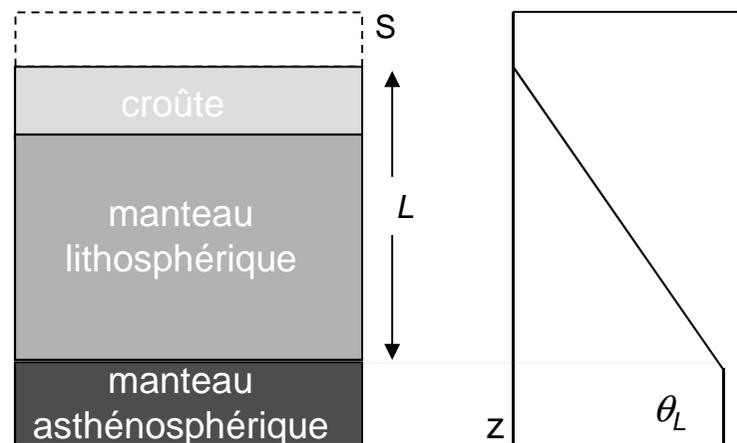
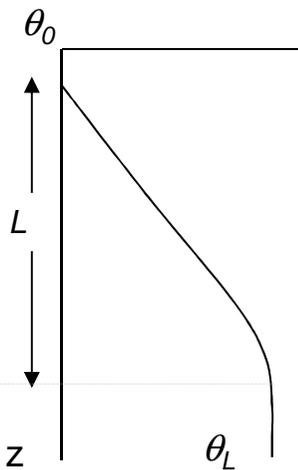
a) $t=0^-$



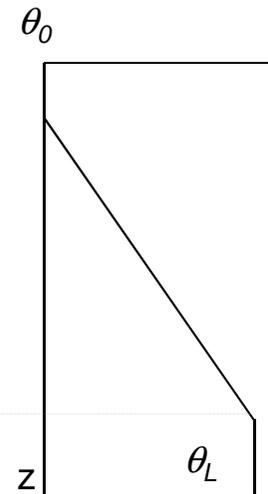
b) $t=0^+$



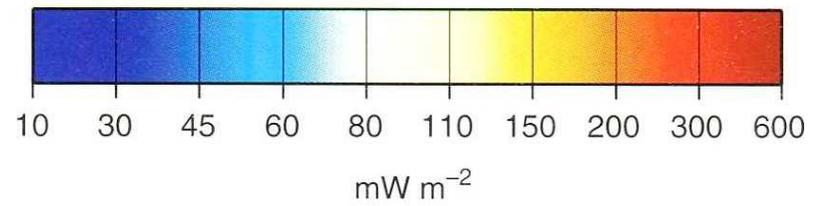
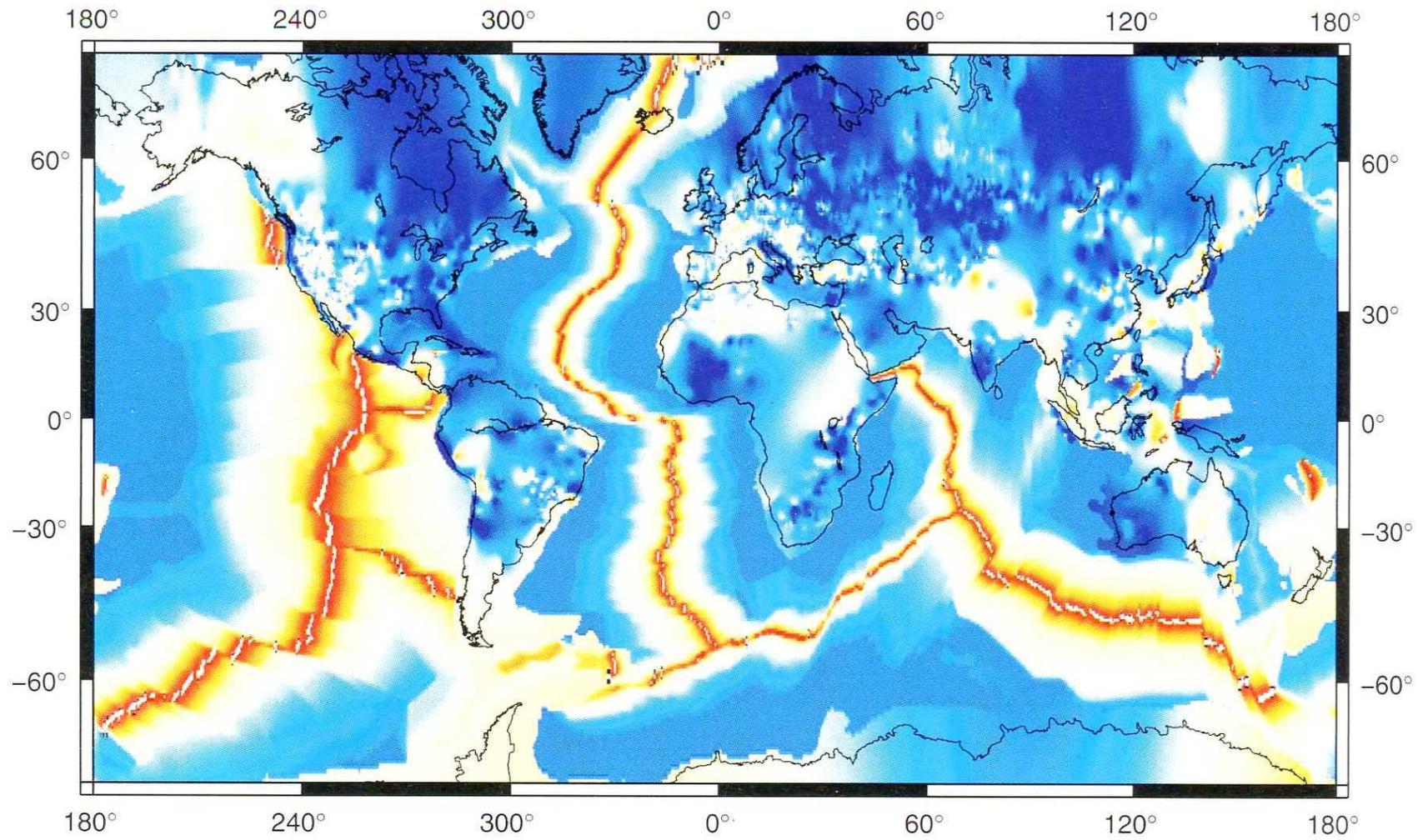
c) $t = L^2/k$



d) $t = \infty$



Flux mondial JCM



Origine du flux de chaleur et mode de transfert

La lithosphère

Sources radioactives concentrées en surface

Mécaniquement rigide > **conduction verticale**

Le manteau

Sources radioactives réparties et concentrées et refroidissement

Composé de roches solides, mais pas aux échelles de temps géologiques > **convection à l'origine de la tectonique des plaques**

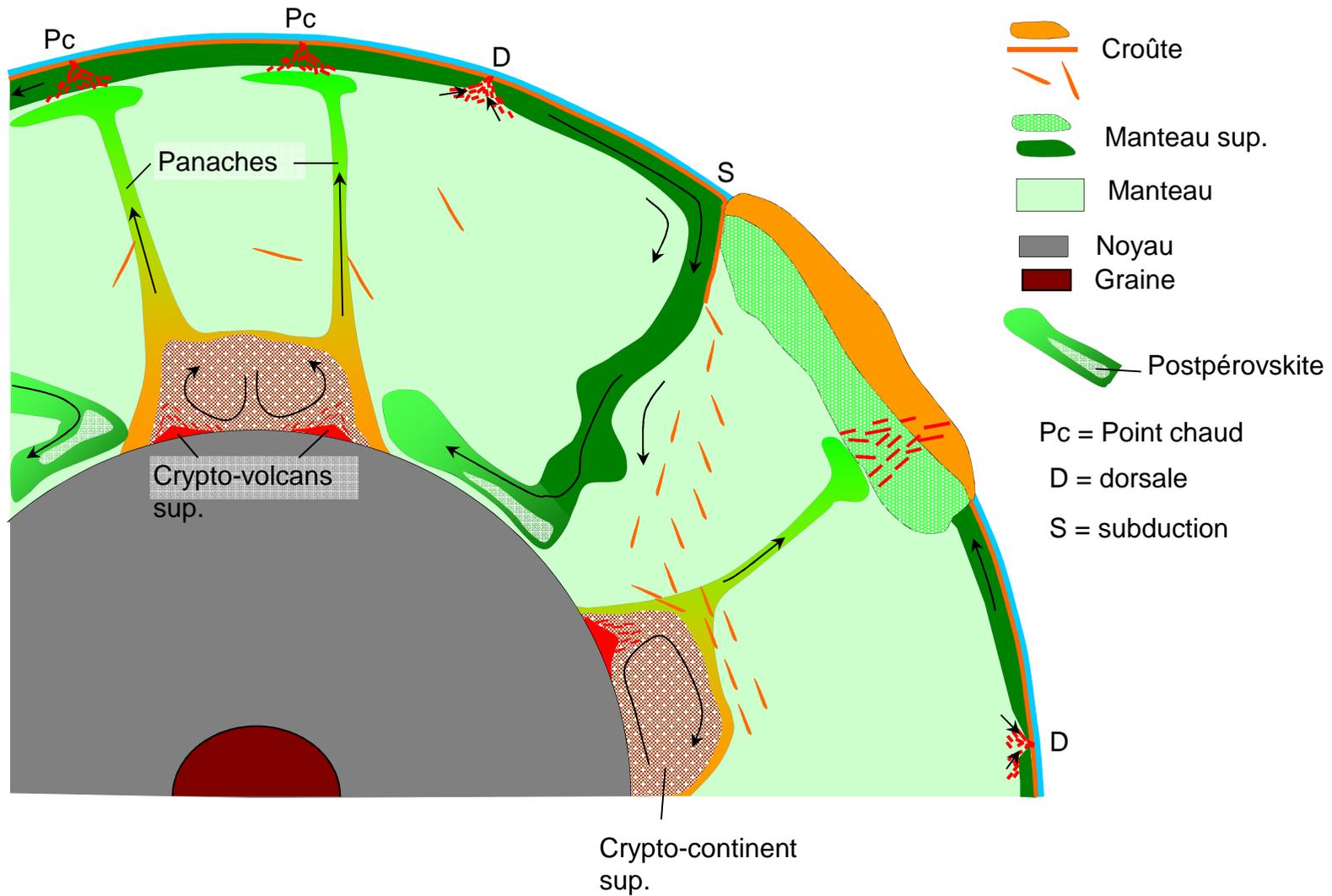
Le noyau

Refroidissement depuis 4000Ma

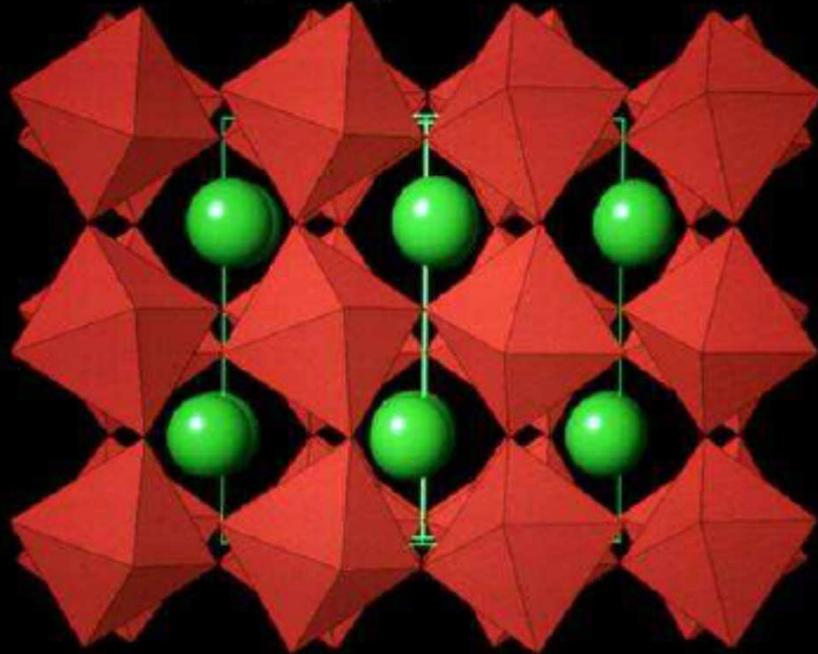
Sources radioactives en très faible concentration.

Alliage Fe,Ni liquide dans la partie externe > **convection intense à l'origine du champ magnétique terrestre**

Convection et tectonique d'après Labrosse



Perovskite MgSiO_3



Vert= Mg

Rouge= octaèdres SiO_6

Mantle Convection in the Earth and Planets



Gerald Schubert

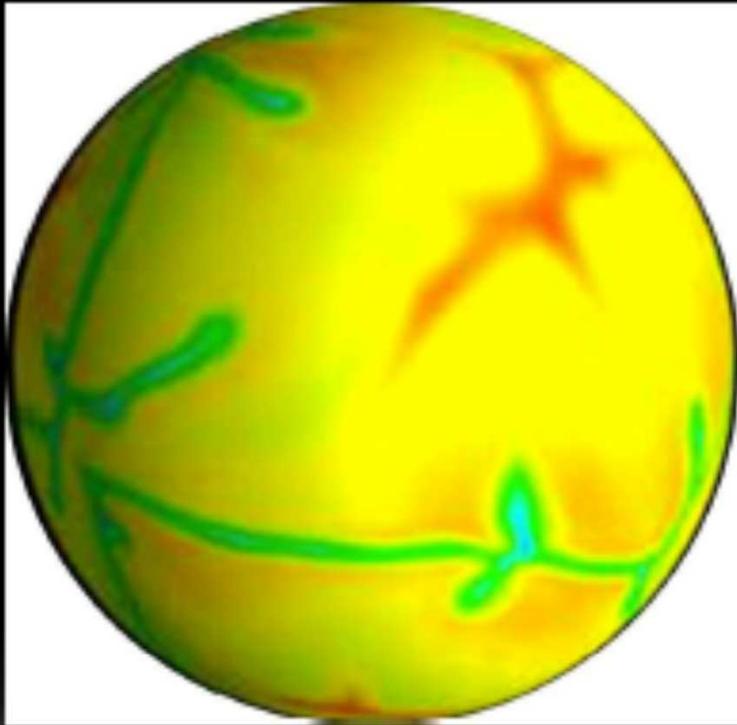
Department of Earth and Space Sciences

**Workshop on Geophysical Data Analysis and Assimilation
ICTP, Trieste, Italy, October 29-November 3, 2012**

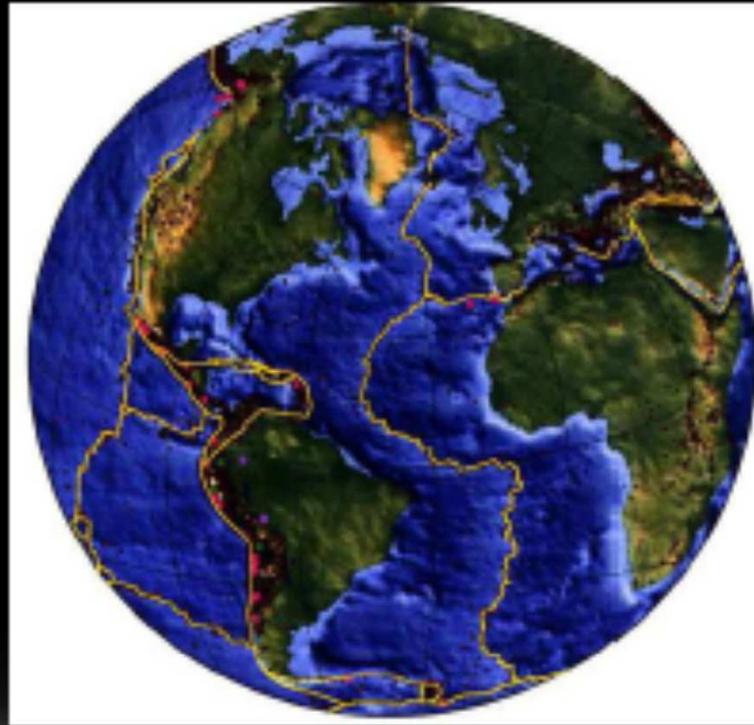
Convection calculée/observée

However....

While these models look like
this at the surface....



...actual mantle convection at the
Earth's surface looks like this



That is.....PLATE TECTONICS