

# Structure et dynamique du manteau profond de la terre

## 2- Les grands enjeux et la tomographie sismique

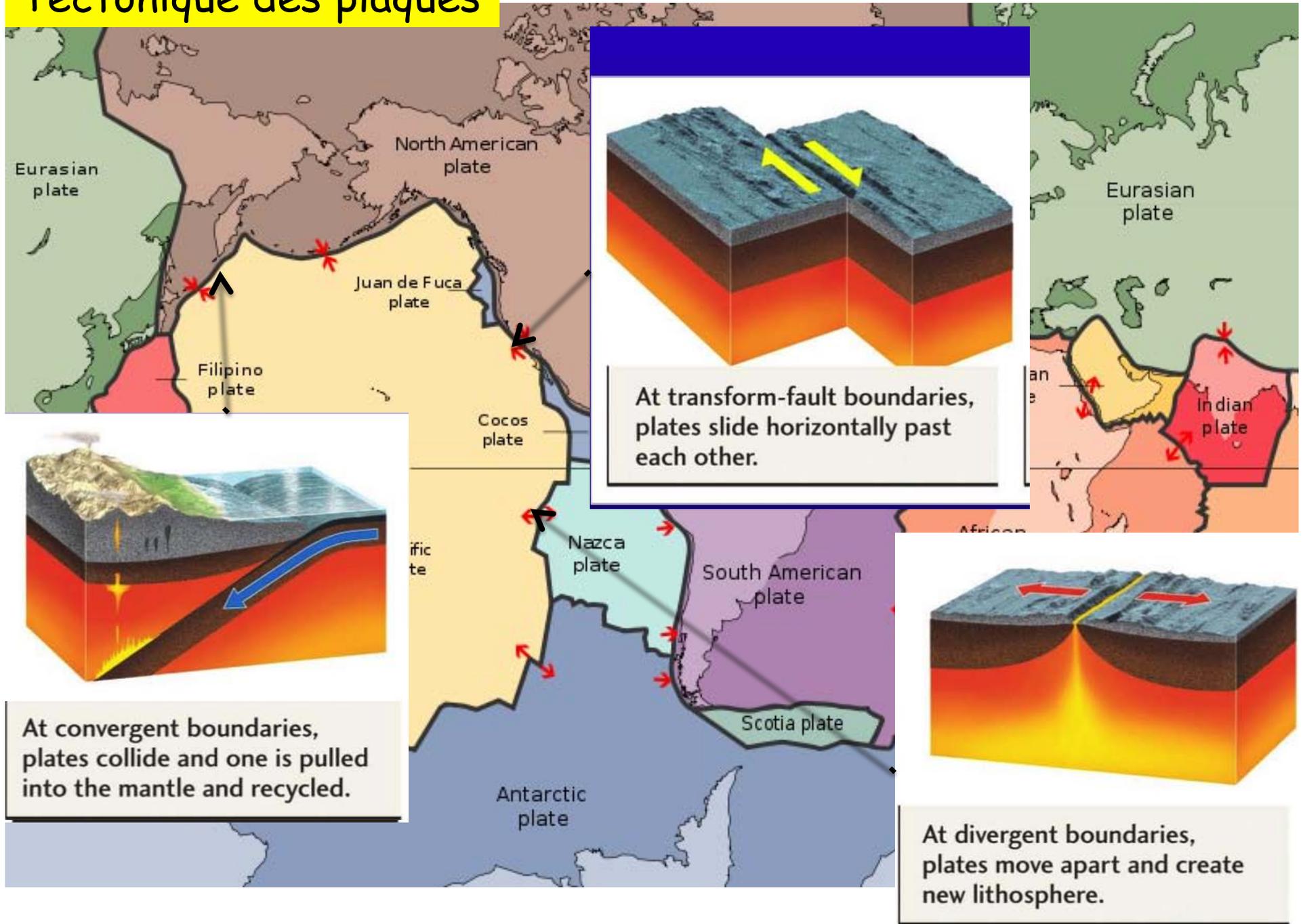
Barbara Romanowicz - Cours 2012

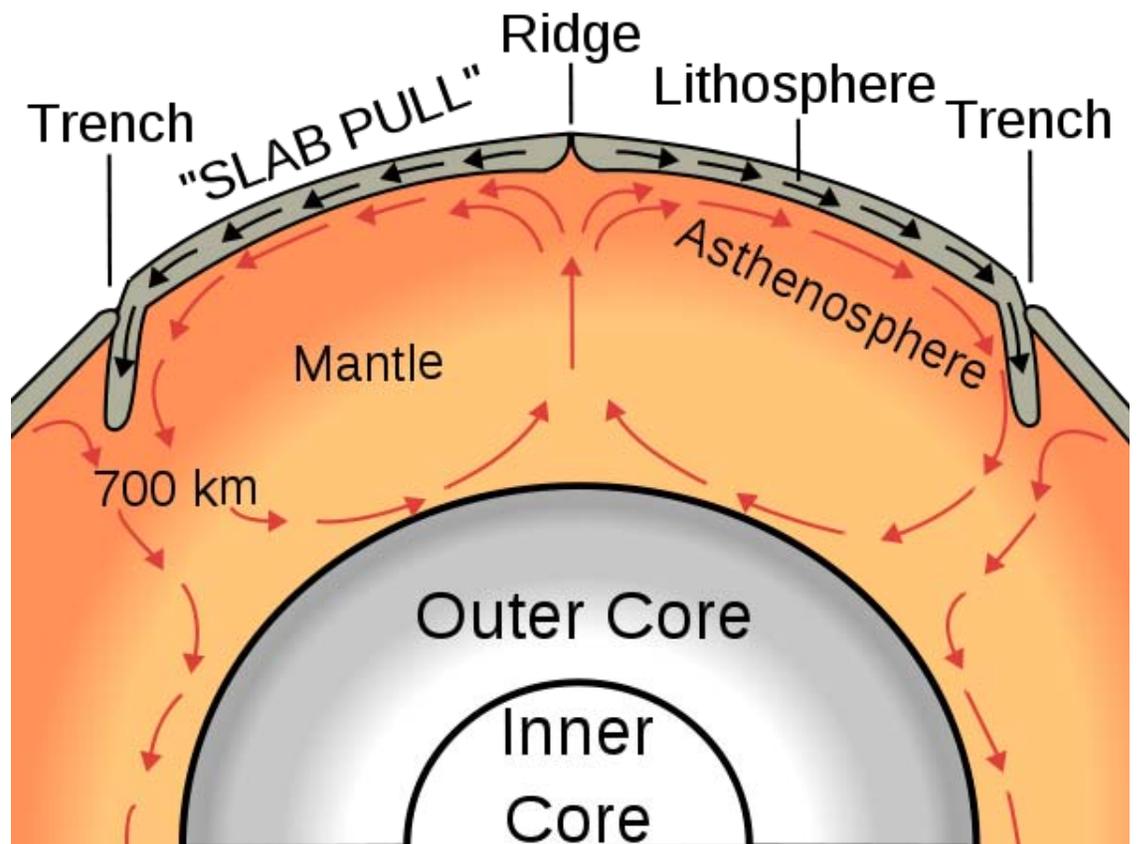
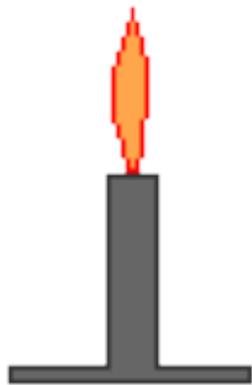
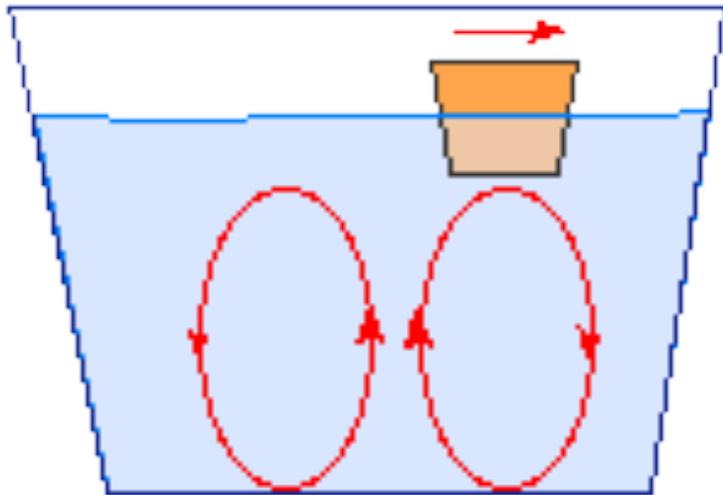
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre

Collège de France

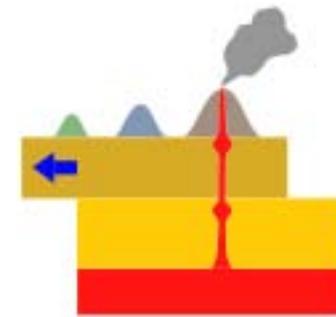
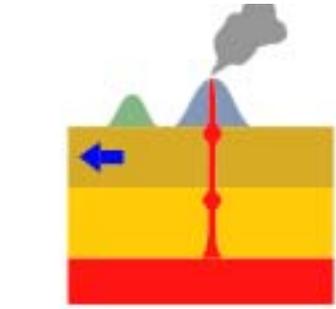
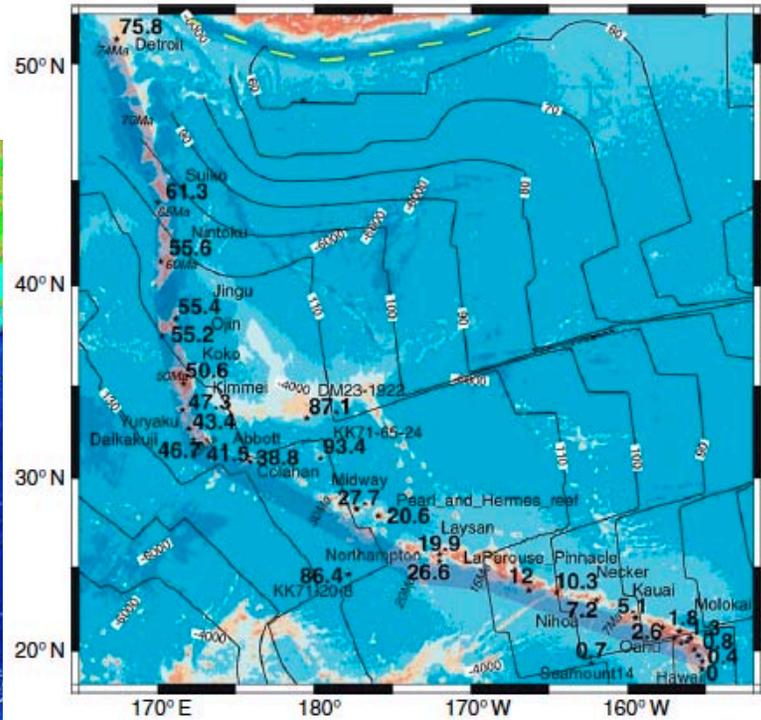
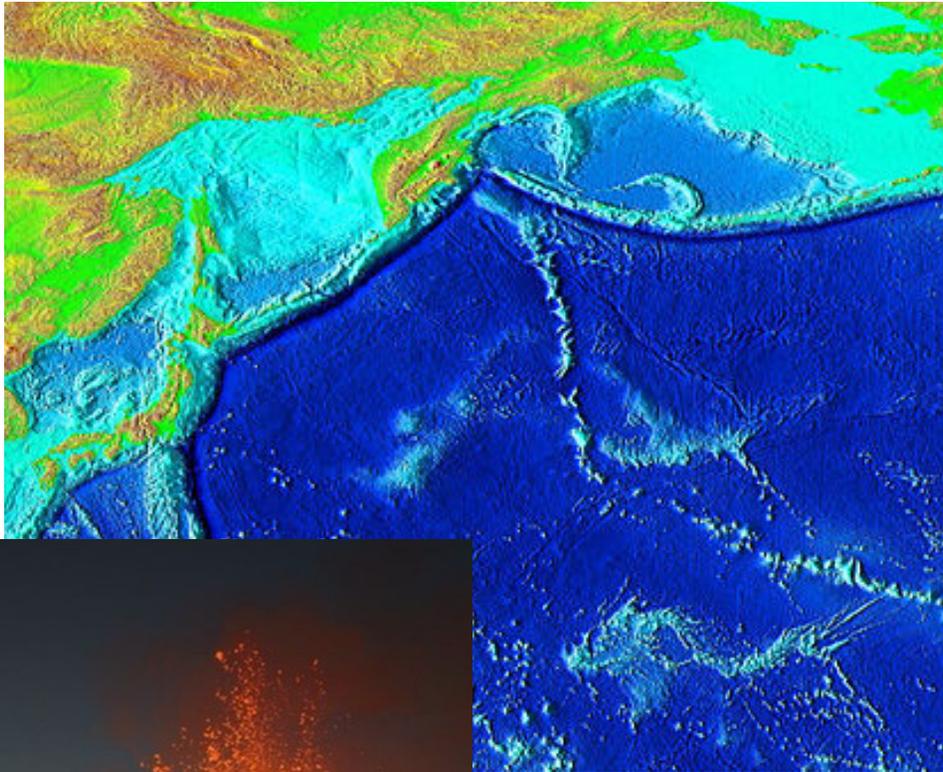
8 Octobre 2012

# Tectonique des plaques



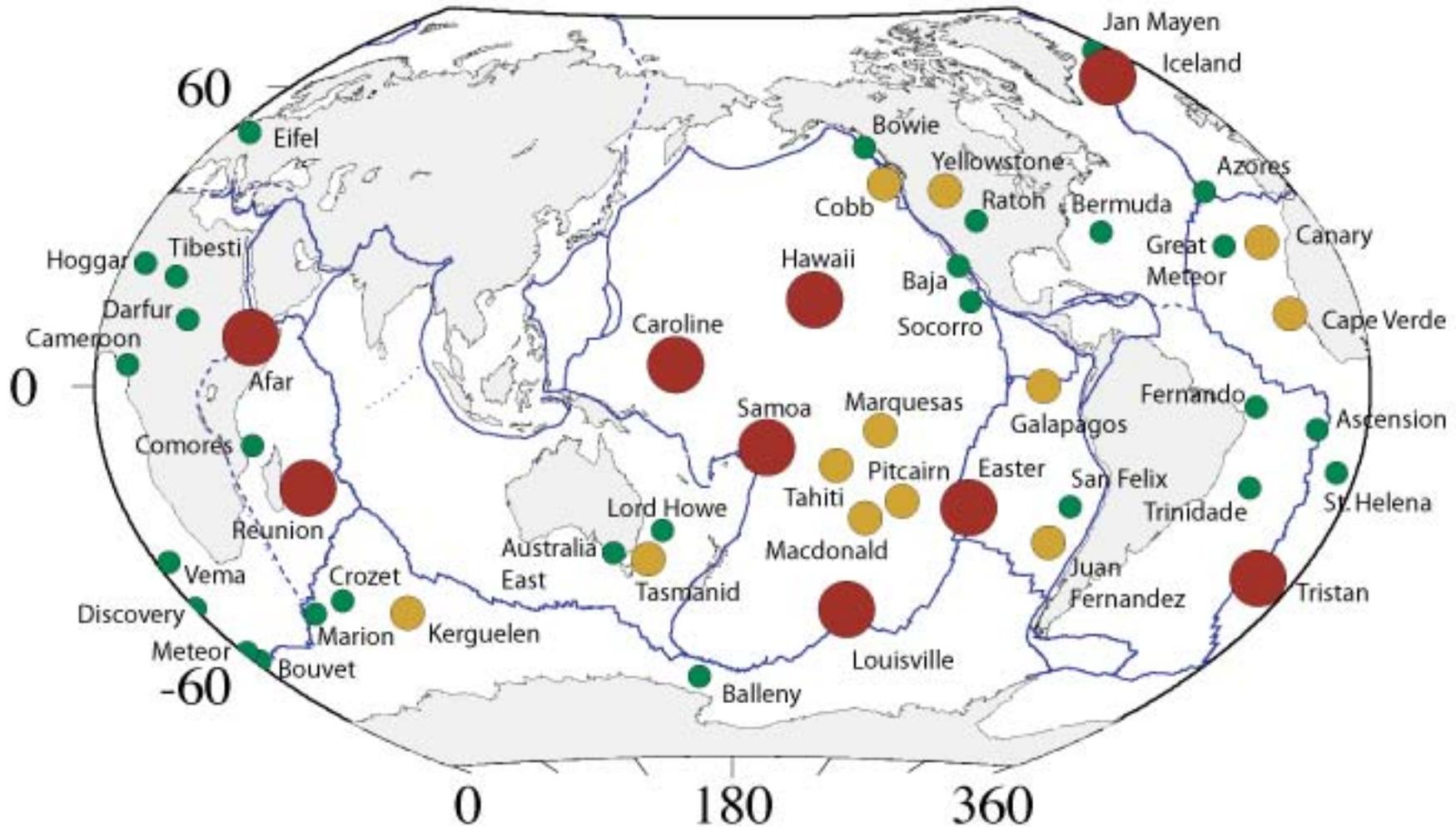


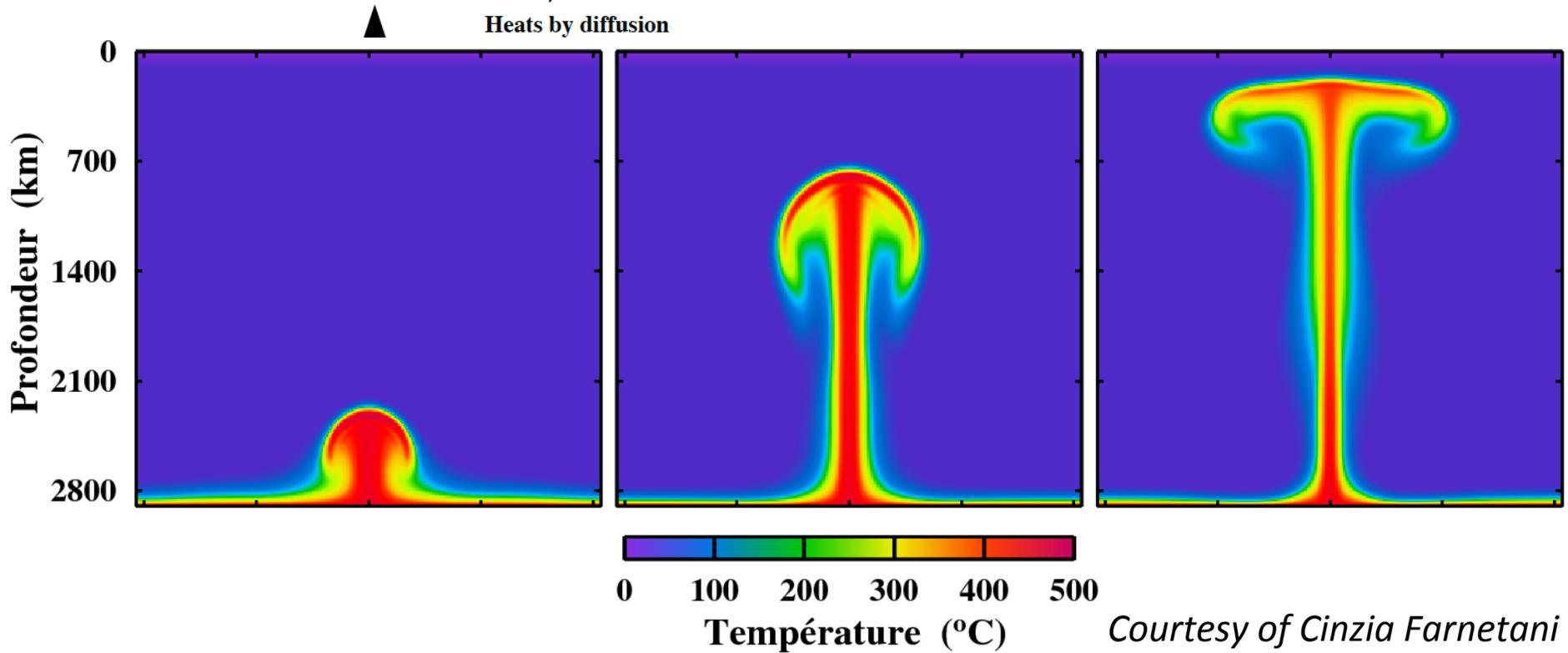
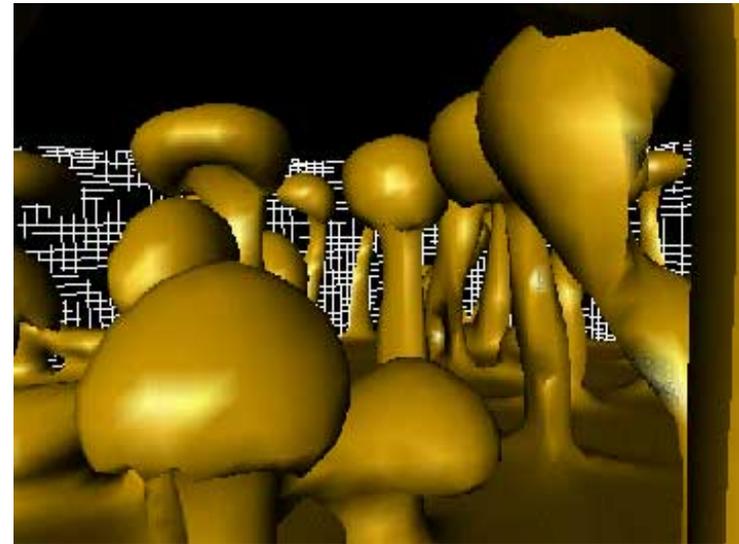
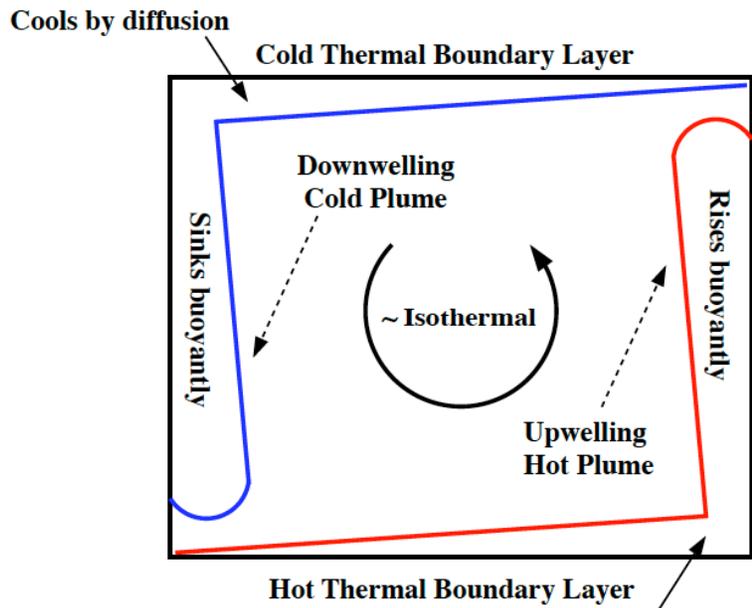
# Points chauds et



Morgan, 1971  
Panaches mantelliques

# Distribution des Points chauds



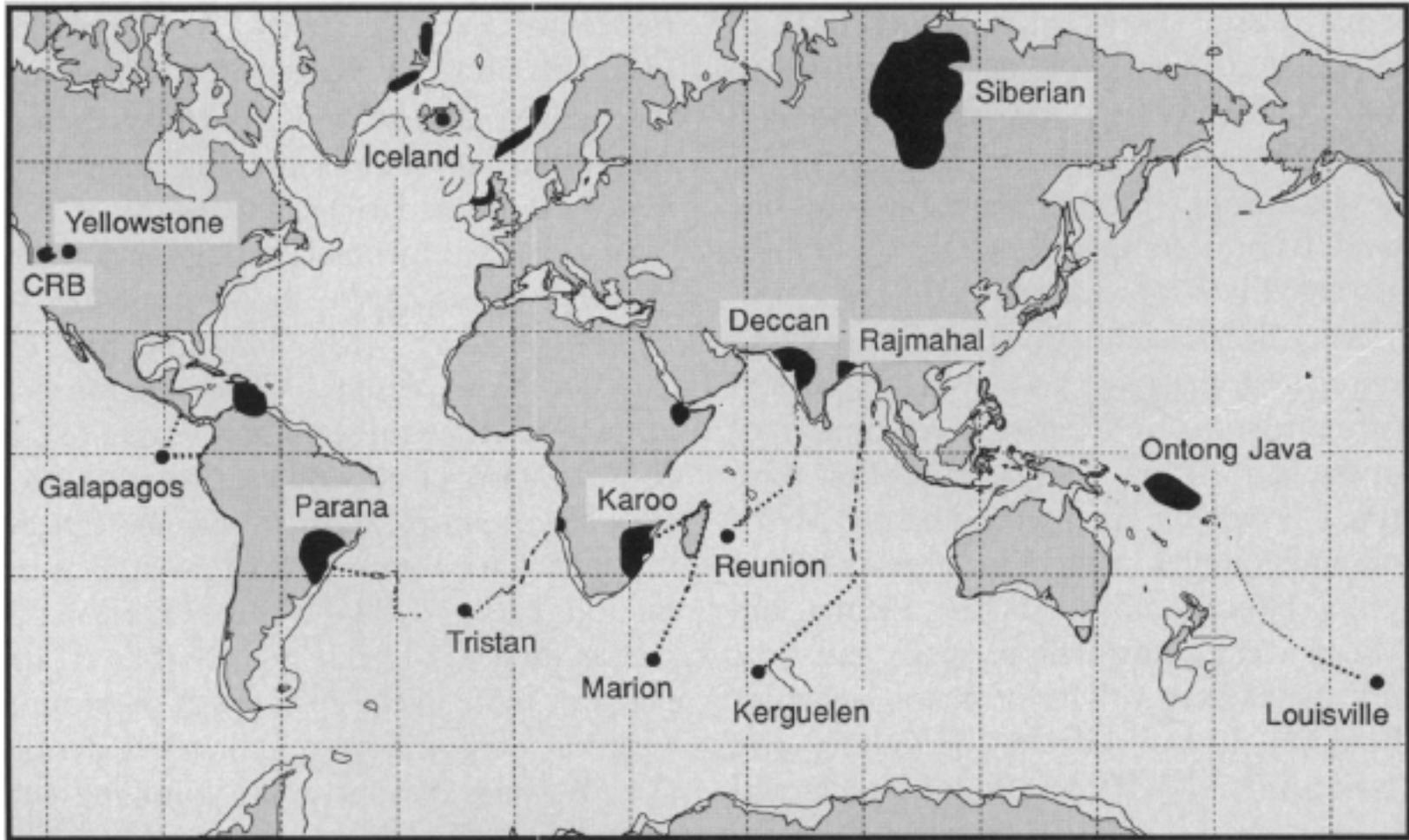


*Courtesy of Cinzia Farnetani*

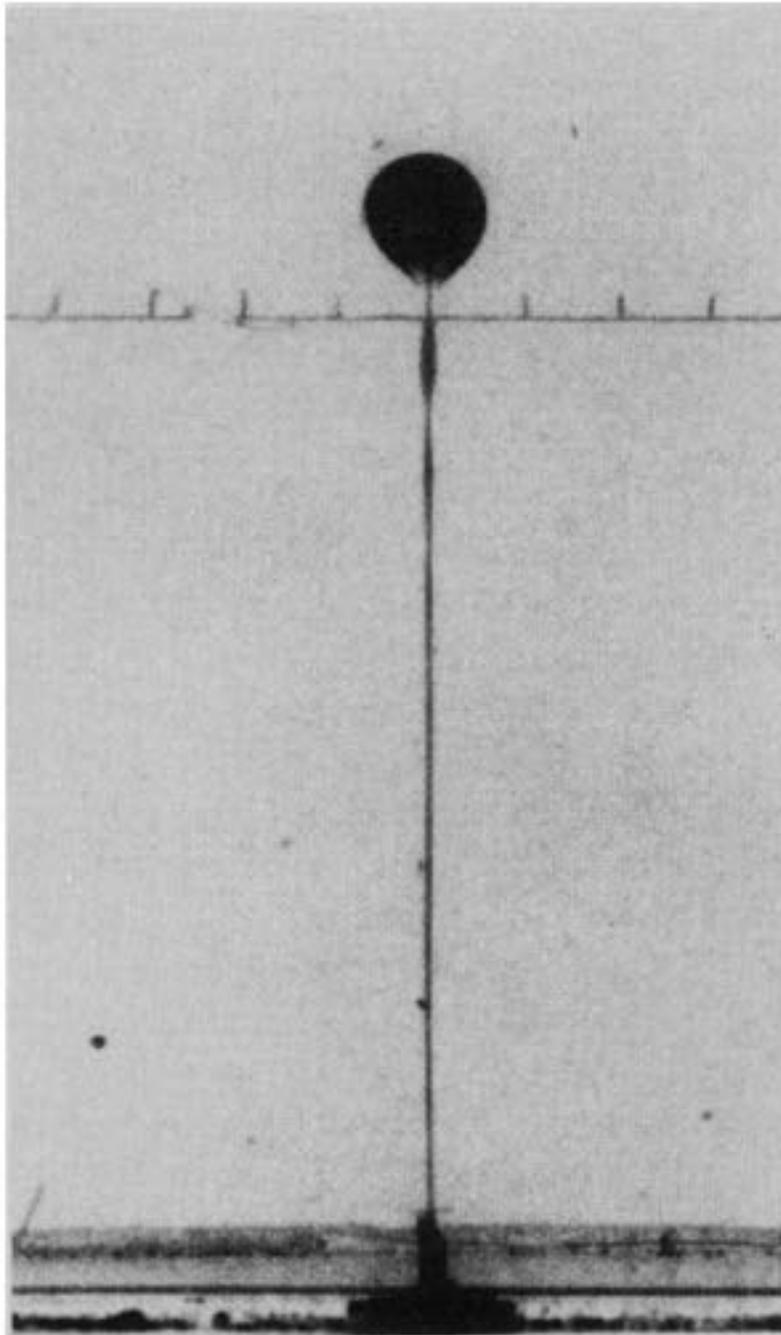
# Les "trapps" continentaux

- Epanchements massifs et soudains de laves basaltiques en quantités bien supérieures à tout processus volcanique actuel.
- Souvent associés avec le début de l'activité volcanique de points chauds majeurs, dont l'origine est sans doute dans le manteau profond
- Souvent associés à l'ouverture de rifts continentaux
- Pourraient être les « têtes » de panaches mantelliques dont les « queues » se manifestent encore par le magmatisme des points chauds?

Provinces de trapps associés à des points chauds actifs et dont l'éruption remonte à moins de 250 Ma.



**Fig. 1.** Distribution of flood basalt provinces erupted in the last 250 million years and associated active hot spots and volcanic traces; CRB, Columbia River basalts.



-> Injection d'eau  
dans du glucose  
à débit constant

-> Viscosité de l'eau  
 $10^4$  fois plus faible  
que celle du glucose

*Richards et al., 1989*

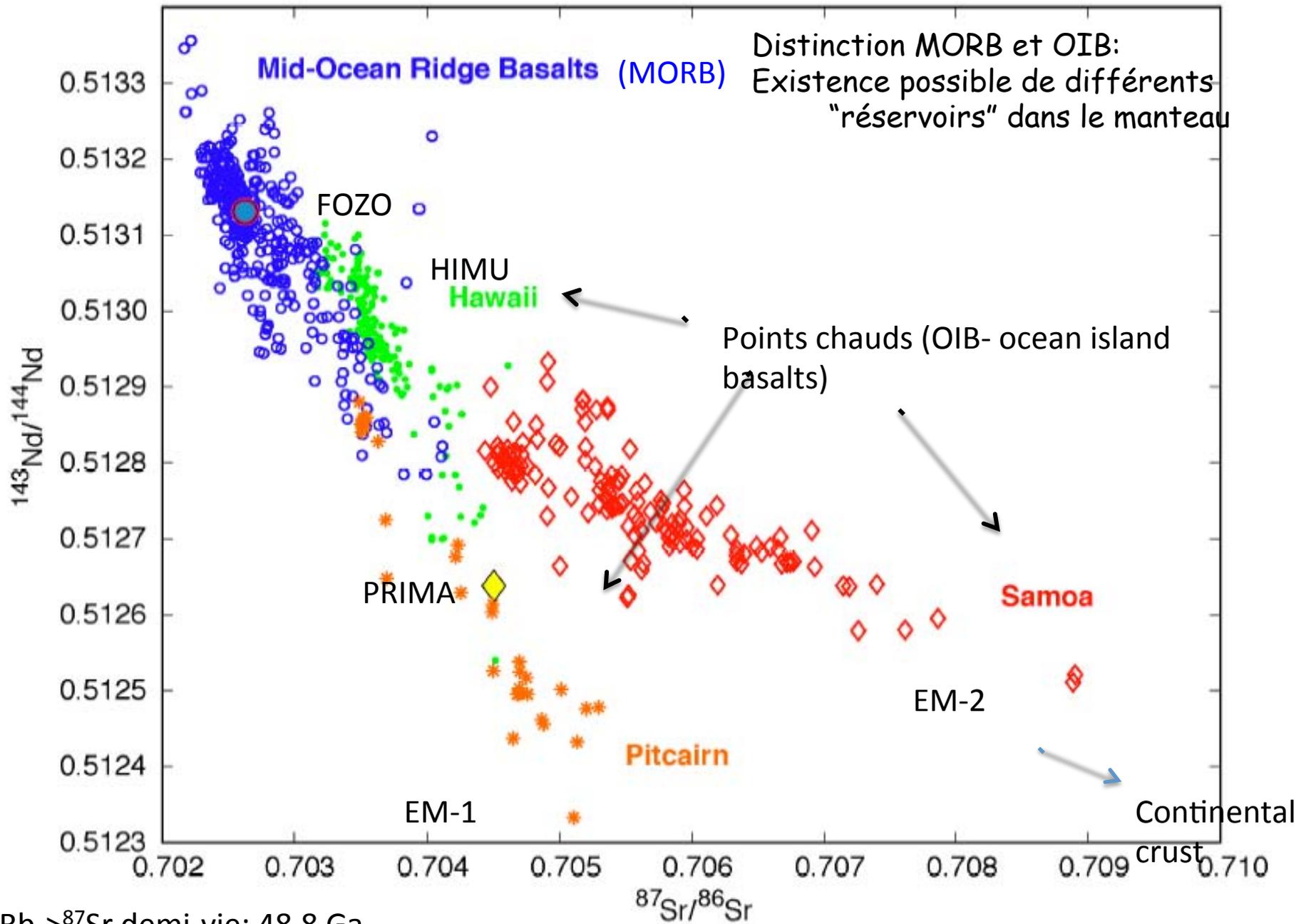
- Quelle est la "source" des panaches mantelliques et quel est leur rôle dans la convection mantellique?

- A quel niveau dans le manteau se situe cette source(670km, CMB?)

- Représente-t-elle un réservoir "primordial" de matériau terrestre non échantillonné par les basaltes des rides océaniques?

- Si la source est à la CMB, le flux de chaleur transporté par les panaches nous renseigne sur la proportion de chauffage par le bas (noyau) et chauffage interne par radioactivité

- Existence, nature et rôle des panaches mantelliques
  
- Hétérogénéités géochimiques
  - Laves basaltiques
    - MORB "Mid ocean ridge basalts"
    - OIB "Ocean Island Basalts"
  - Composition isotopique différentes pour certains éléments trace



$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$  demi-vie: 48.8 Ga  
 $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$  - 106 Ga

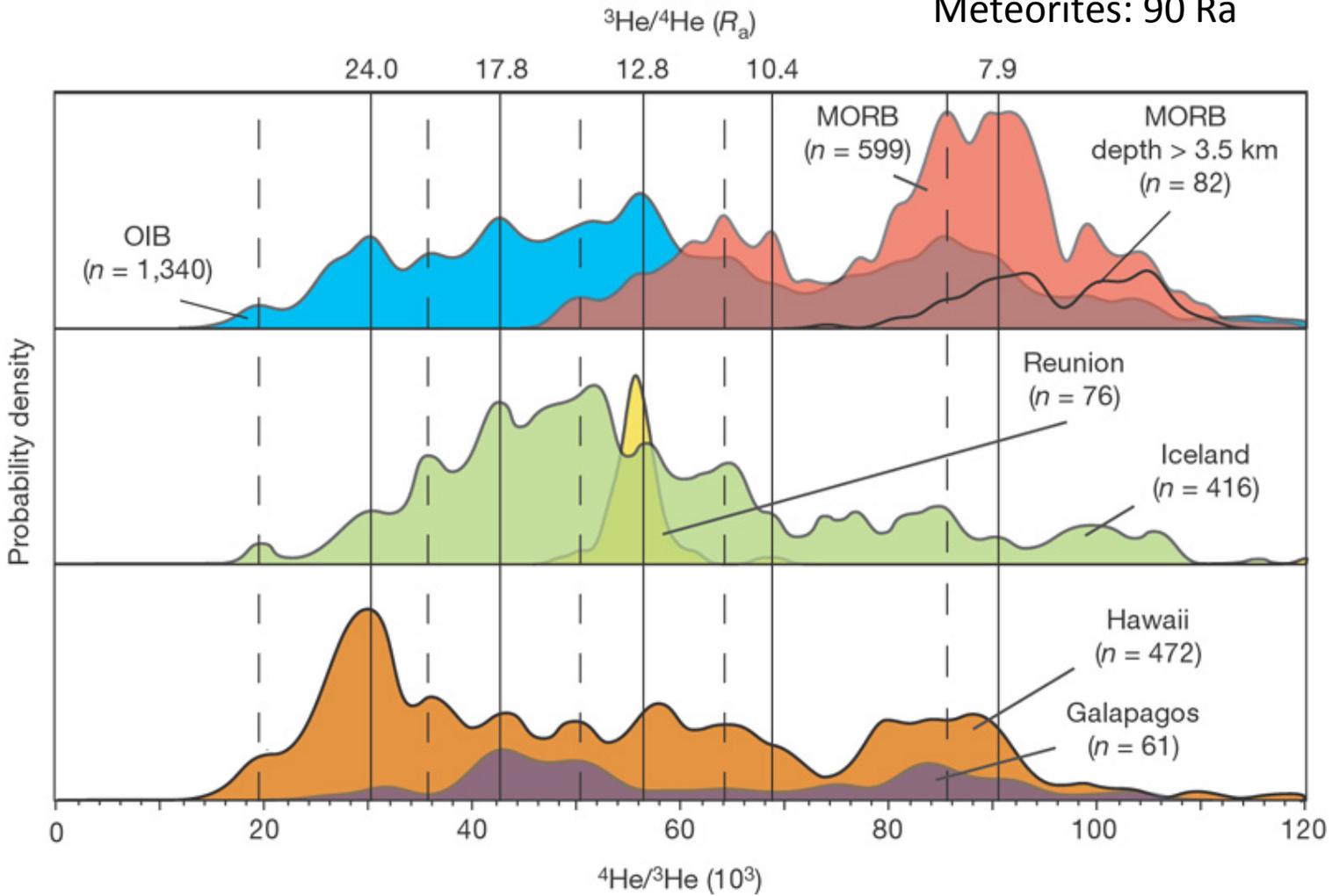
Workman, 2005

# Hétérogénéités de l'hélium

Unité Ra= rapport atmosphérique

Photosphère solaire: 318Ra

Météorites: 90 Ra



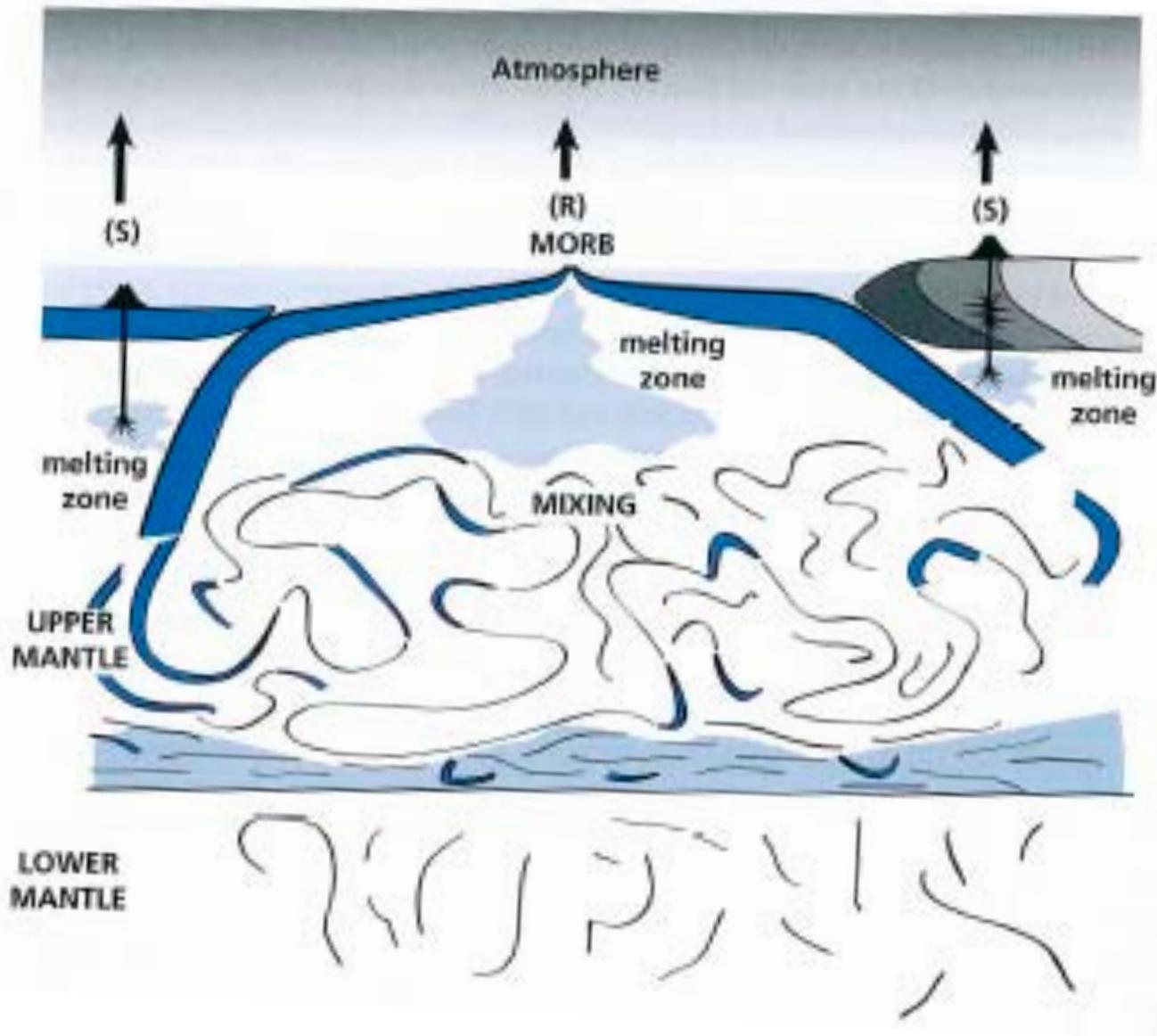
$^3\text{He}$  primordial

$^4\text{He}$  radiogenic from decay of  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$

# Hétérogénéités dans le manteau terrestre

- Tectonique des plaques -> hétérogénéités chimiques
  - Volcanisme, fusion-> ségrégation
  - Subduction: réinjecte les produits du volcanisme dans le manteau-> mélange
- Echantillons du manteau semblent appauvris en certains éléments lithophiles incompatibles, en particulier les éléments radioactifs.
  - => réservoirs "cachés" échantillonnés par les panaches?
  - => budget thermique de la terre (proportion de chauffage par radioactivité et par chauffage par le bas)

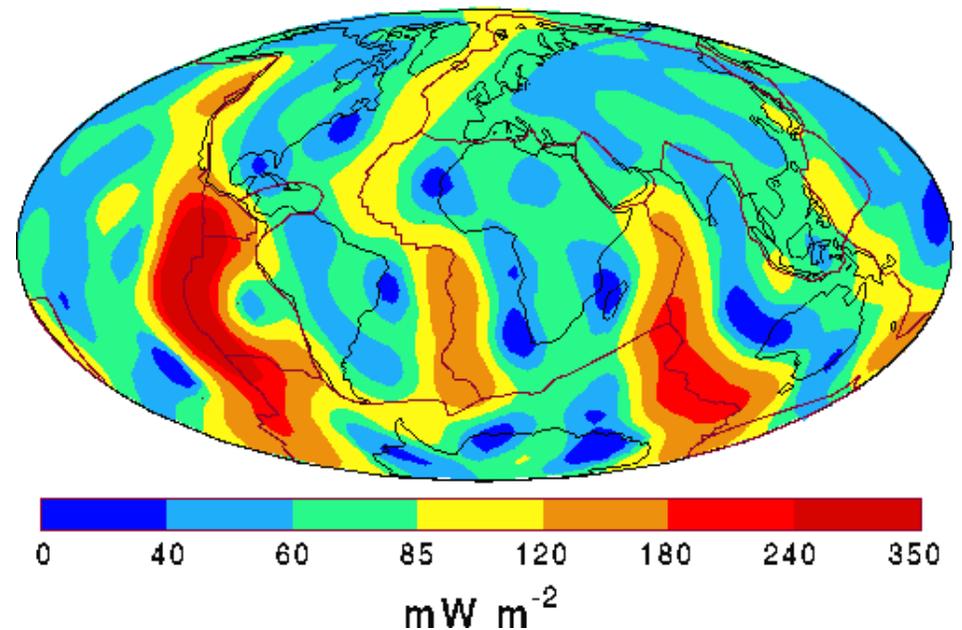
## Le cycle géodynamique vu par les géochimistes



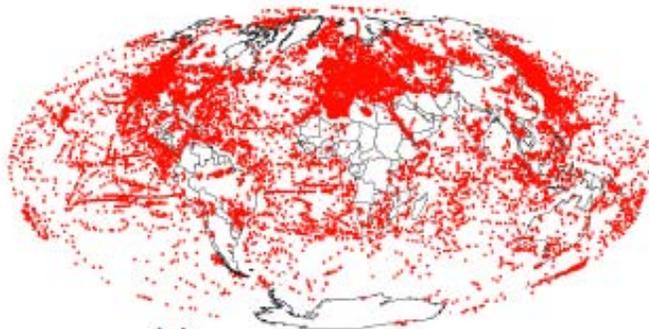
# Budget thermique et composition du chimique: sources d'hétérogénéités

- On connaît la composition en éléments radioactifs (U, Th, K) de la croûte continentale
  - Contient ~50% U, Th.
  - Manteau supérieur appauvri
- Comment estimer le reste?
  - Composition moyenne de la terre => bilan des éléments radioactifs: ~20TW
  - Ceci représente près de la moitié du flux de chaleur total ~46 +/- 3 TW

Flux de chaleur



Moyenne continents: 65 mW/m<sup>2</sup>  
Moyenne océans: 101 mW/m<sup>2</sup>



(a)

Distribution des mesures de flux de chaleur

# Composition moyenne de la terre

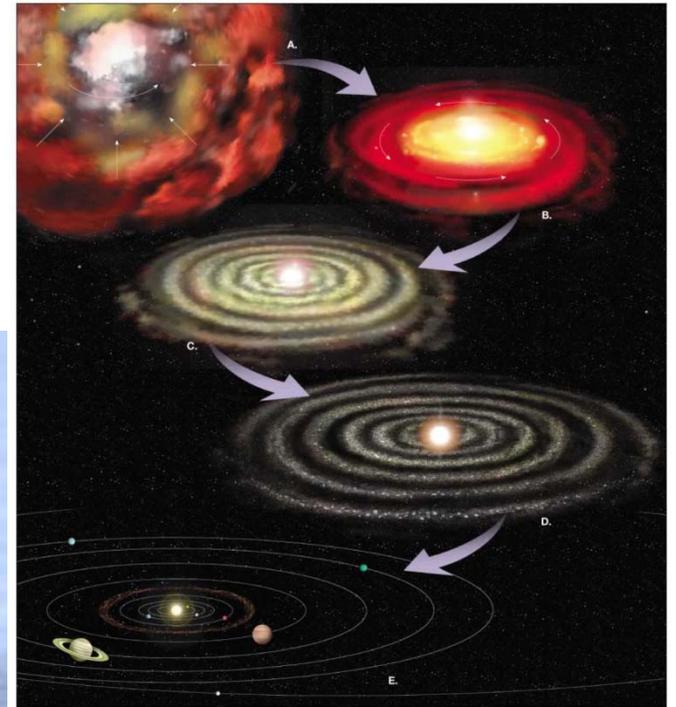
- 2 types de données:
  - Météorites
  - Echantillons du manteau
  -
- Modèle de référence "classique" = modèle chondritique
  - Modifié par l'évolution différente de la nébuleuse solaire (haute T) et de l'intérieur de la terre (basse T)

# Quelle est la composition de la terre?

Nébuleuse

Météorite

Mélange hétérogène  
de composants avec  
des températures de  
formation  
différentes et dans  
des conditions  
différentes



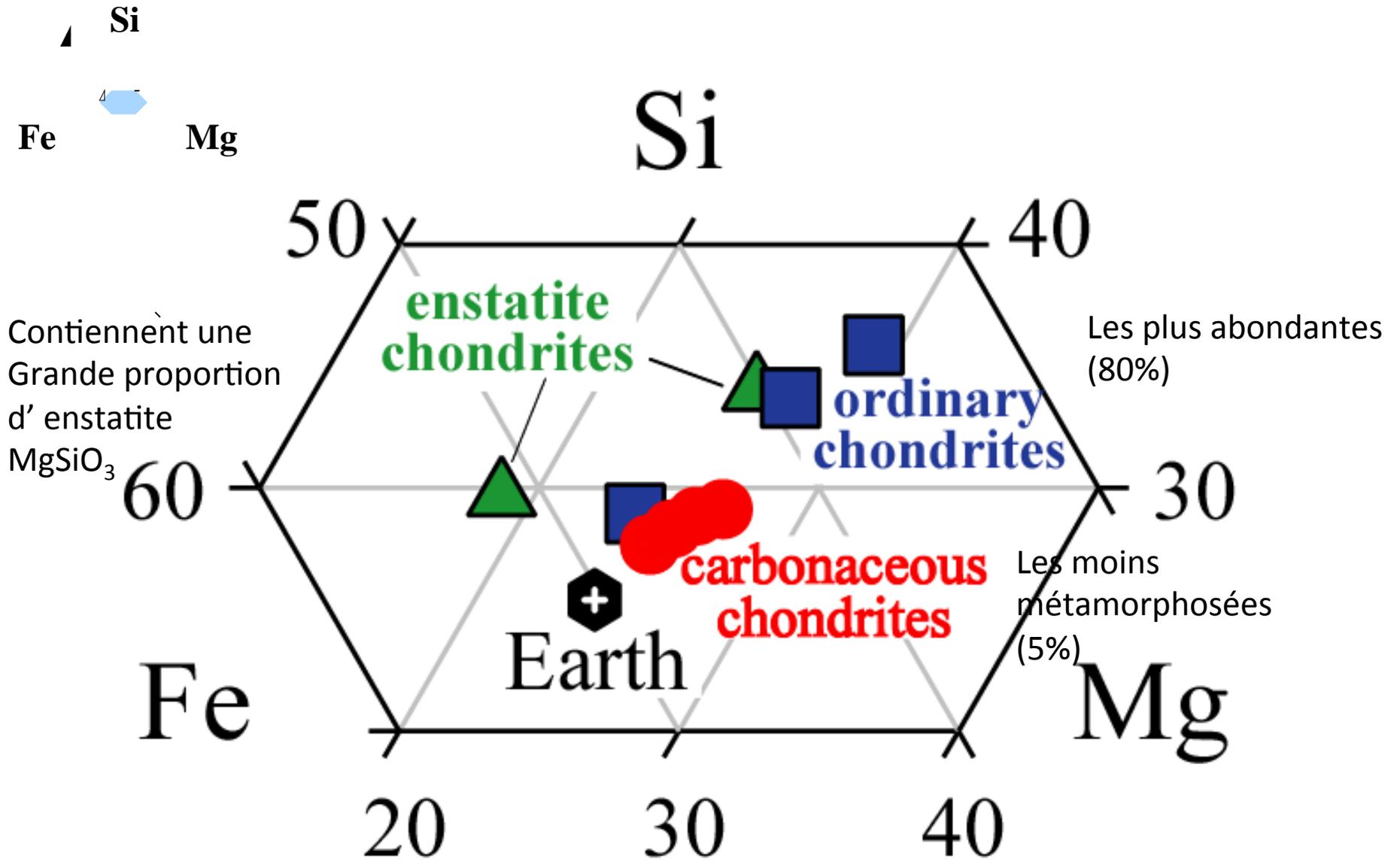
**Planète:**

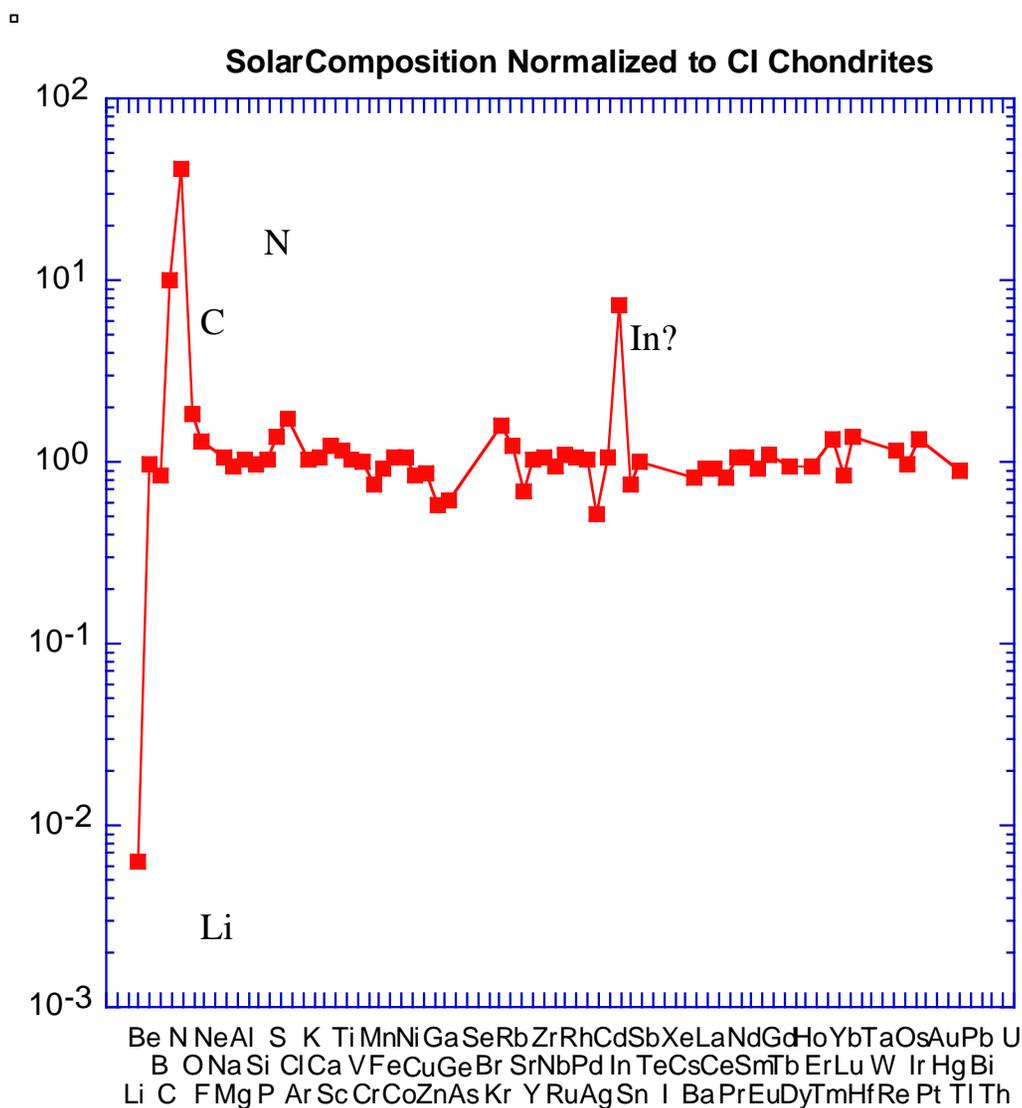
Mélange de métal, silicates, éléments volatiles

# Chondrites

- Échantillons de matériau du système solaire datant d'avant la fusion et la différenciation manteau/noyau
  - Composition varie suivant les conditions dans la nébuleuse solaire: volatilité (temp. de condensation)
  - Haute temp. de condensation (>1300K): RLE (refractory lithophile elements), ex. U Th -> ont le même rapport de masse dans toutes les chondrites
  - Potassium: K température de condensation moyenne
- Chondrites CI carbonacées s'accordent le mieux avec les concentrations du soleil, mais renferment plus de volatiles que la terre (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>)







Elements in Order of Atomic Mass

- Chondrites: échantillons de matériau du système solaire datant d'avant la fusion et la différenciation manteau/noyau

- Les CI chondrites carbonacées ont une composition semblable à celle du soleil, qui représente la "moyenne" du système solaire

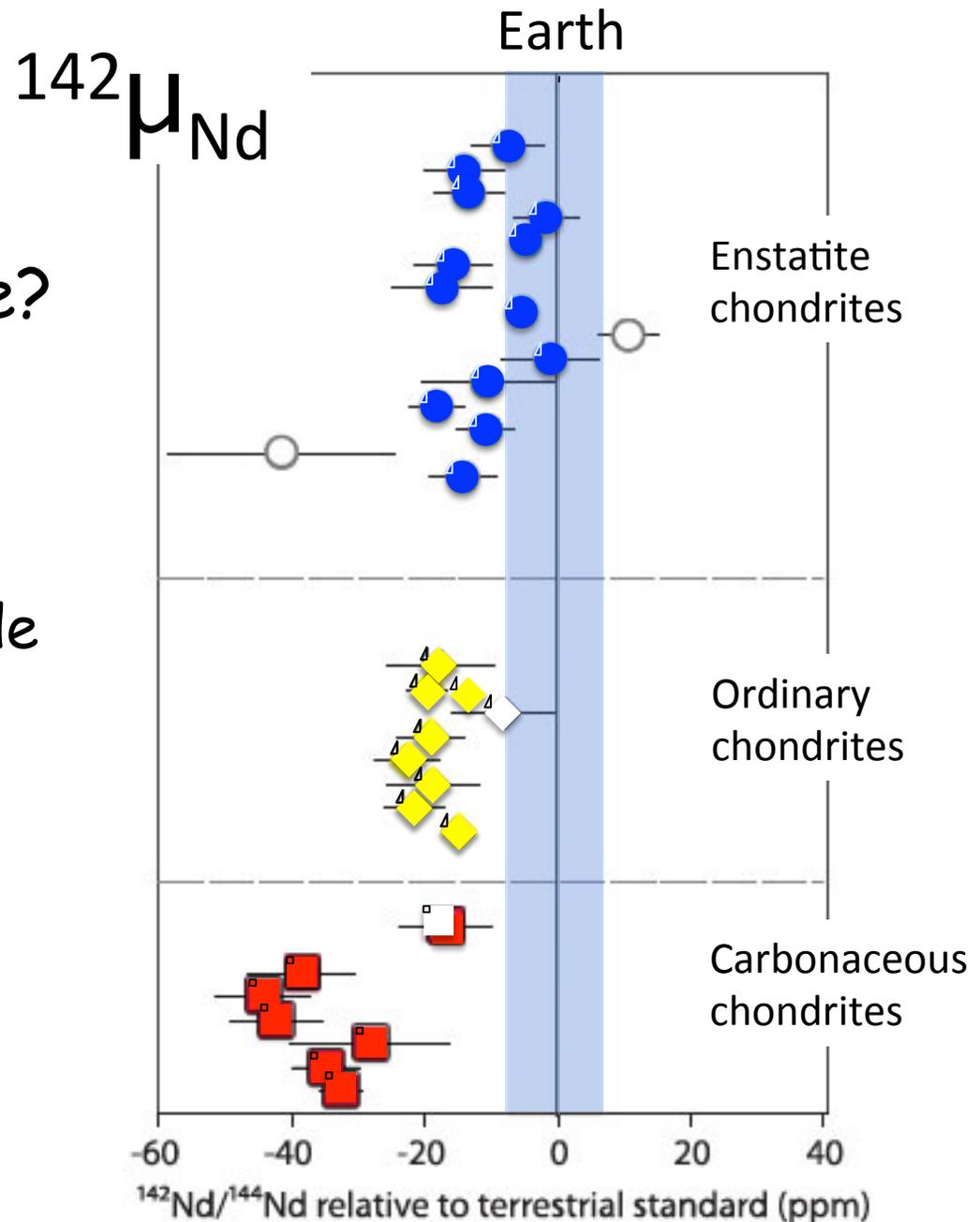
Modifiées par perte d'éléments volatiles suivie de réduction (perte d'O<sub>2</sub>)

$^{146}\text{Sm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$

$t_{1/2} = 103 \text{ My}$

## Que signifient ces données pour la terre?

- Système solaire hétérogène
- Chondrites servent de référence
- Planètes  $\neq$  chondrites ?



Data from:

Gannoun et al (2011, PNAS)

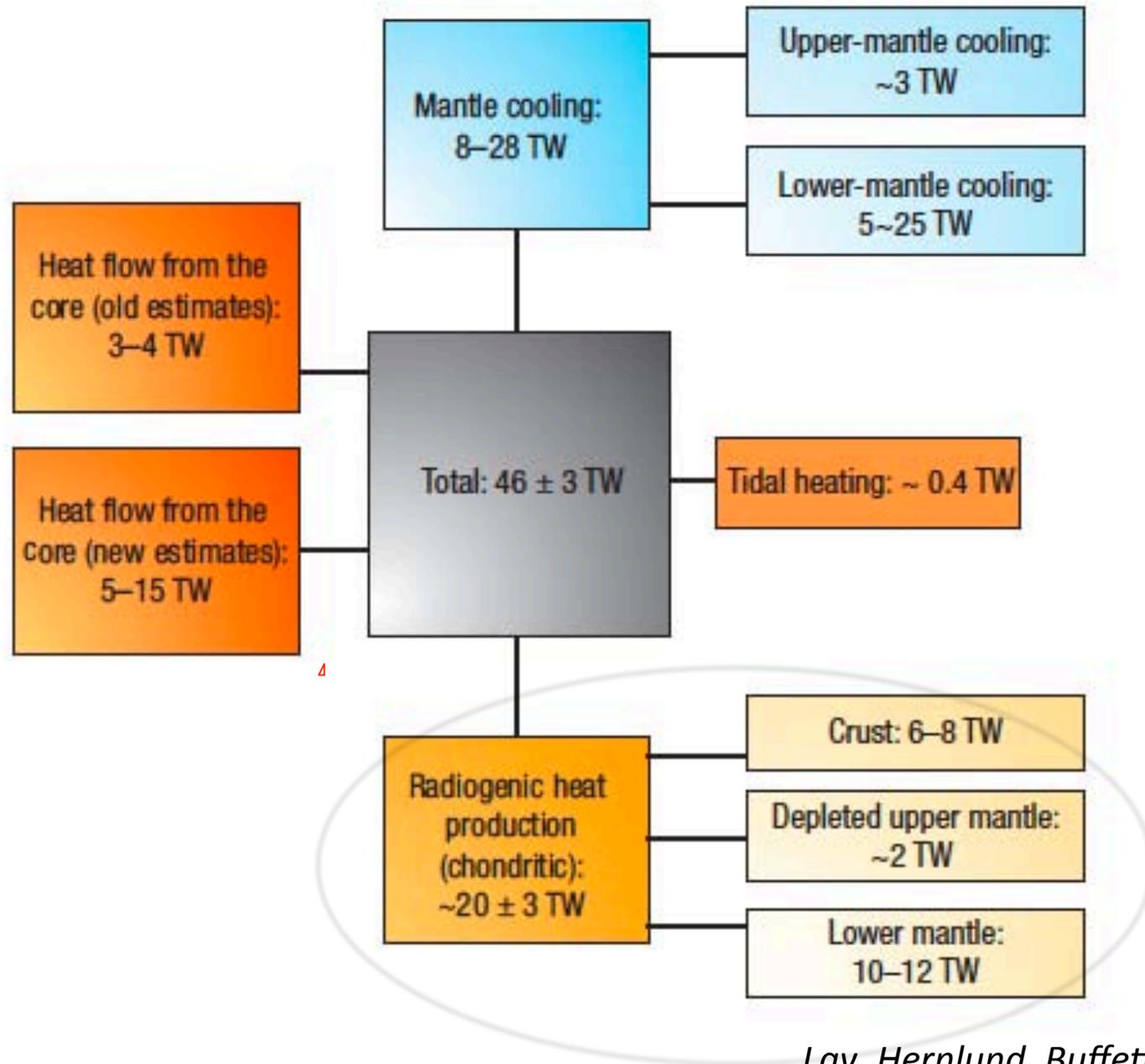
Carlson et al (Science, 2007)

Andreasen & Sharma (Science, 2006)

Boyett and Carlson (2005, Science)

Jacobsen & Wasserburg (EPSL, 1984)

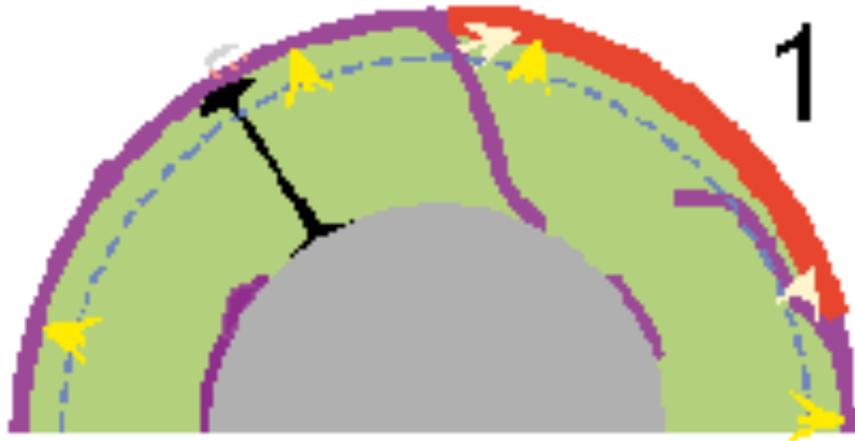
□ Bilan thermique de la terre dépend du modèle de référence



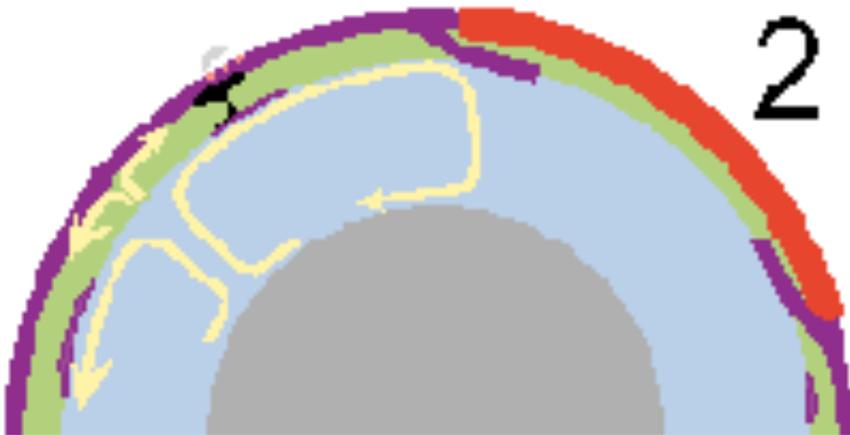
Lay, Hernlund, Buffett, 2008

- Introduction dans les années 70-80 par les géochimistes du concept de stratification du manteau avec séparation à la discontinuité de 660 km
  - Les MORB échantillonnent le manteau supérieur appauvri
  - Les OIB échantillonnent le manteau inférieur primordial
- Mais... la tomographie sismique indique que certaines plaques de subduction pénètrent dans le manteau inférieur
- Modèles géochimiques plus élaborés:
- Par exemple, Boyet and Carlson (2005, Science):
  - Le réservoir de faible rapport Sm/Nd serait de la croûte basaltique riche en éléments incompatibles, tombée au fond du manteau pour former une région isolée de la D''
  - Le processus responsable aurait dû se produire dans les premiers 10 Ma de la formation du système solaire pour empêcher le réservoir appauvri de dépasser la valeur actuelle observée dans les MORBs

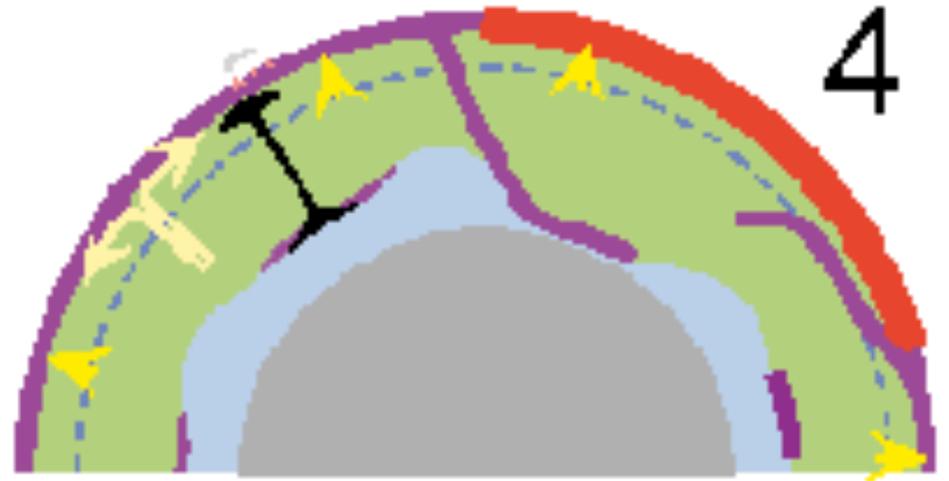
Convection à  
"une couche"



Convection à  
"2 couches"



"Abyssal Layer"

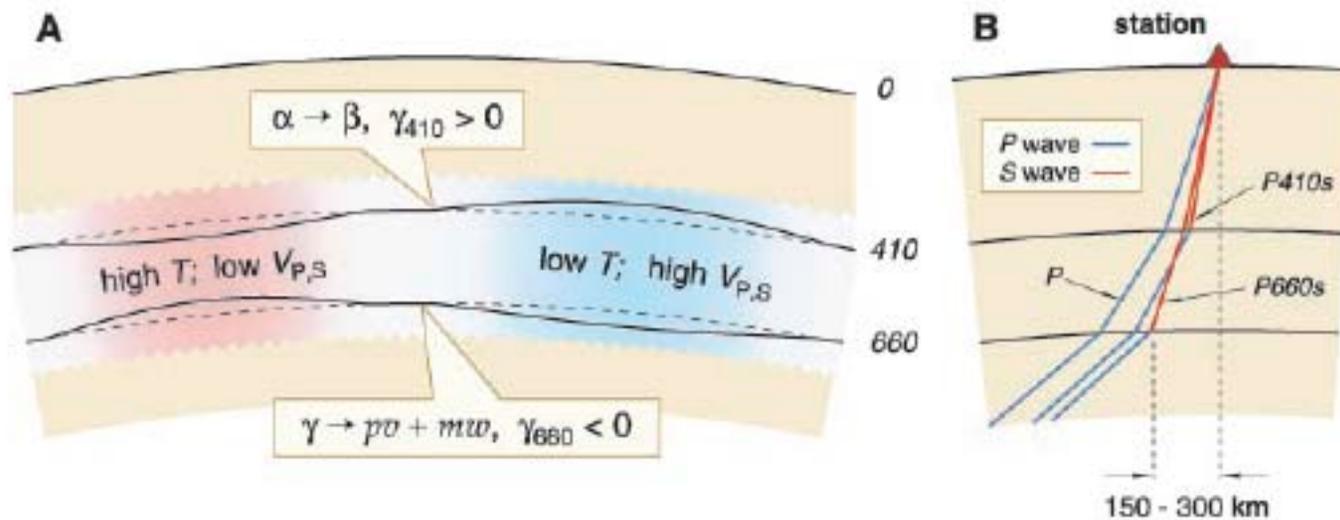


*D'après Albarède et Van der Hilst, 1999*

Communication ou non entre le  
manteau supérieur et le manteau  
inférieur?

Rôle de la discontinuité de 660 km

# Topographie des discontinuités sismiques due aux variations latérales de température

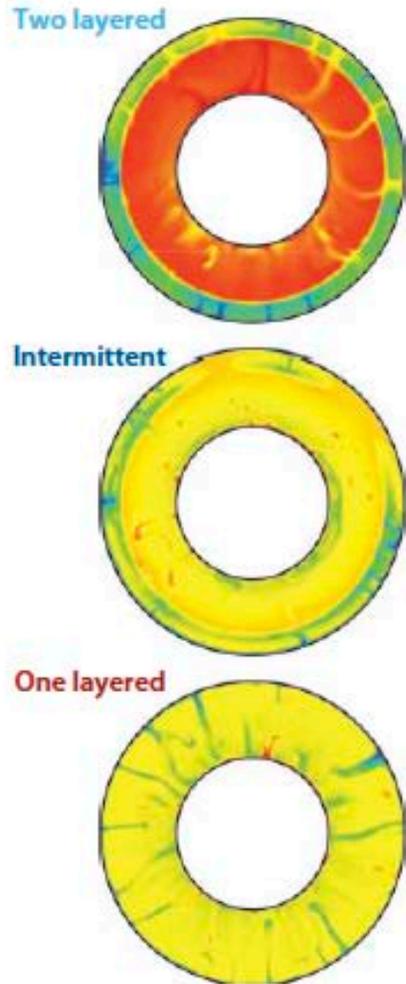


⇒ Estimation "sismique" de la pente de Clapeyron de la discontinuité de 660 km,  $\sim -2$  à  $-3.5$  Mpa/K ⇒ présence d'eau dans la zone de transition

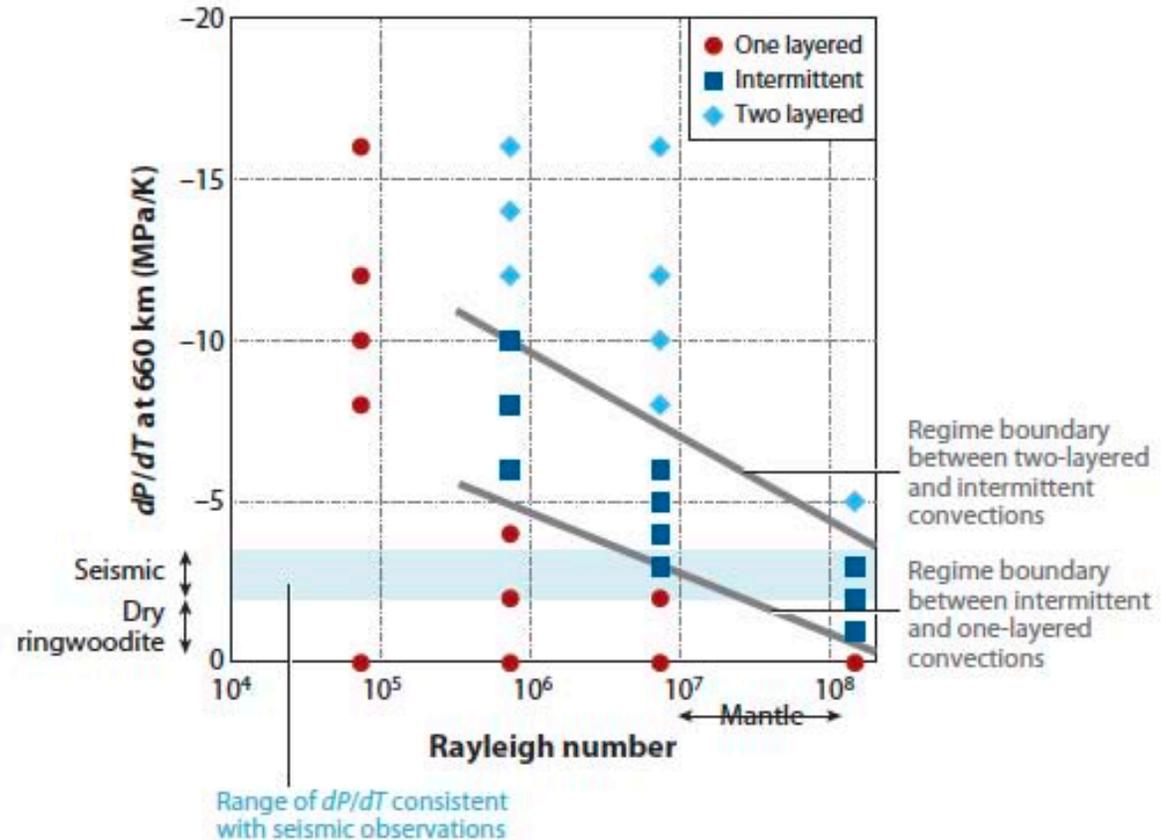
*Lebedev et al., 2002*

Trois modes possibles de convection suivant la pente de Clapeyron de la discontinuité de 670 km

a



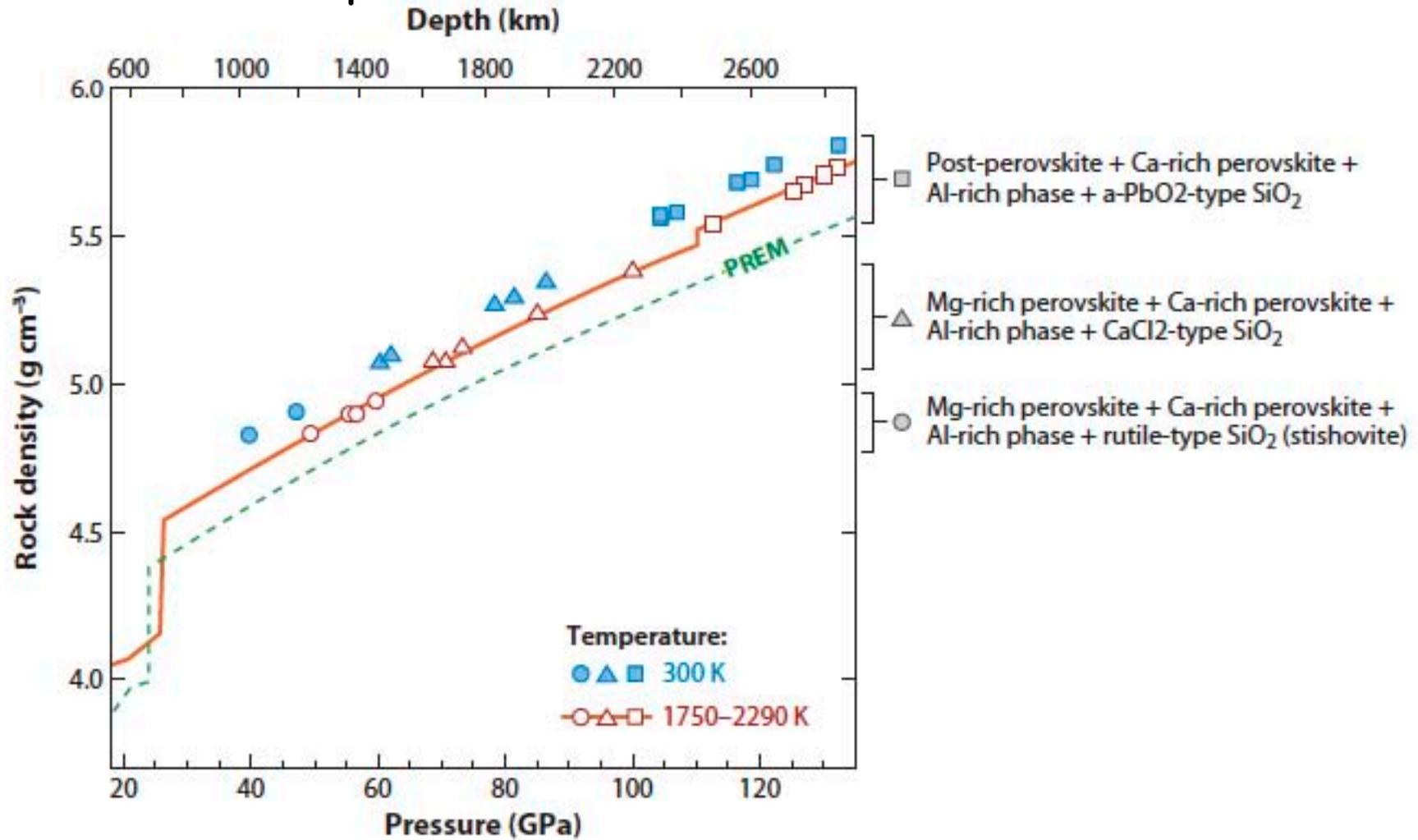
b



Viscosité constante!  
50% Chauffage interne

Fukao, 2009  
D'après Yanagisawa et al., 2005

Croûte des MORBs est plus dense que le manteau ambiant dans le manteau profond



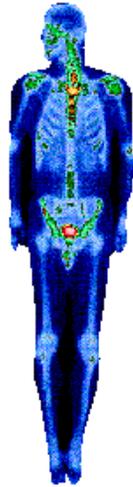
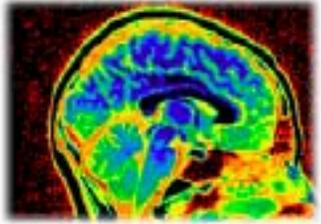
Fukao (2009)  
D'après Hirose et al. (2005)

# Que nous enseigne la tomographie sismique?

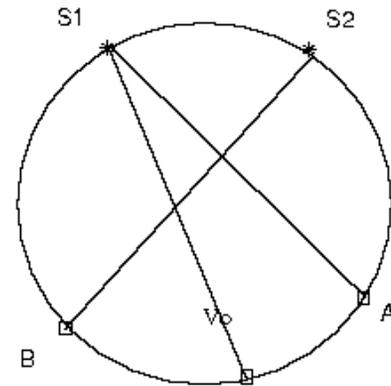
- Principe de la tomographie sismique



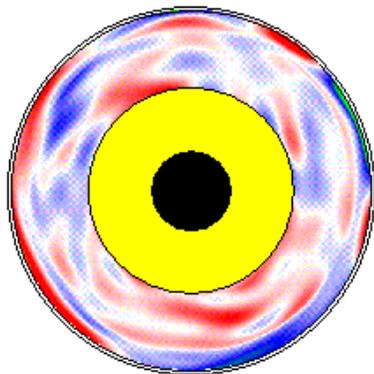
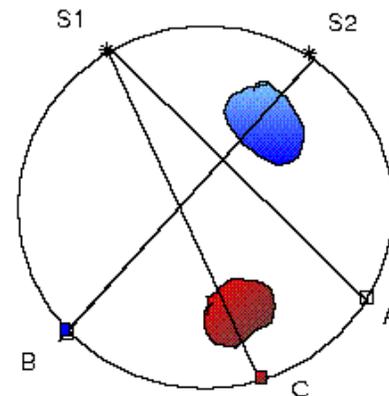
# Imagerie médicale



## Corps homogène



## Corps avec hétérogénéités

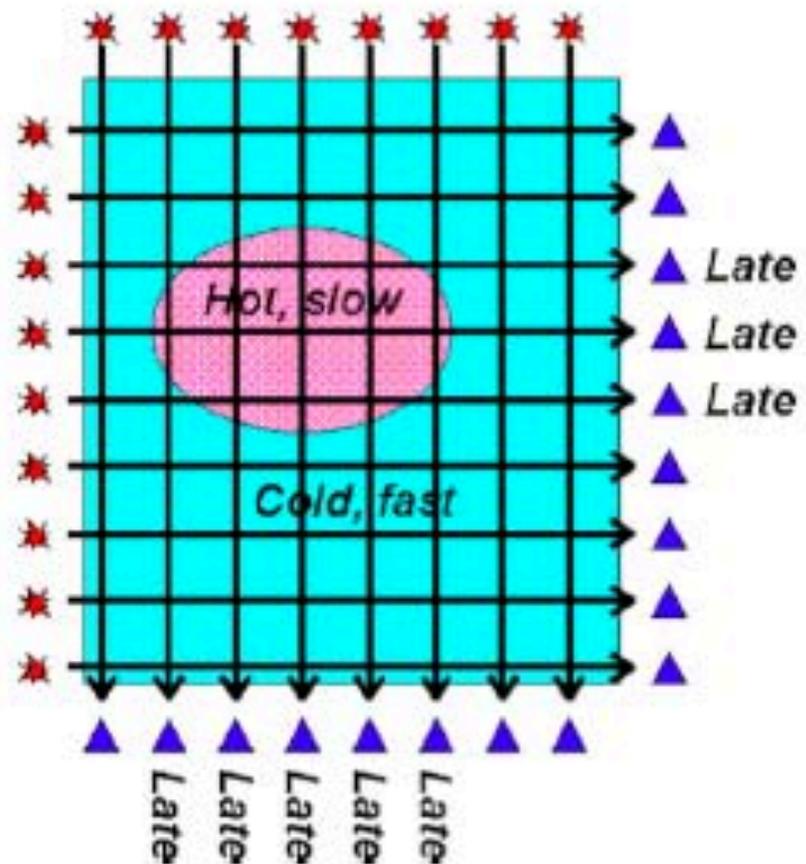


## Tomographie sismique

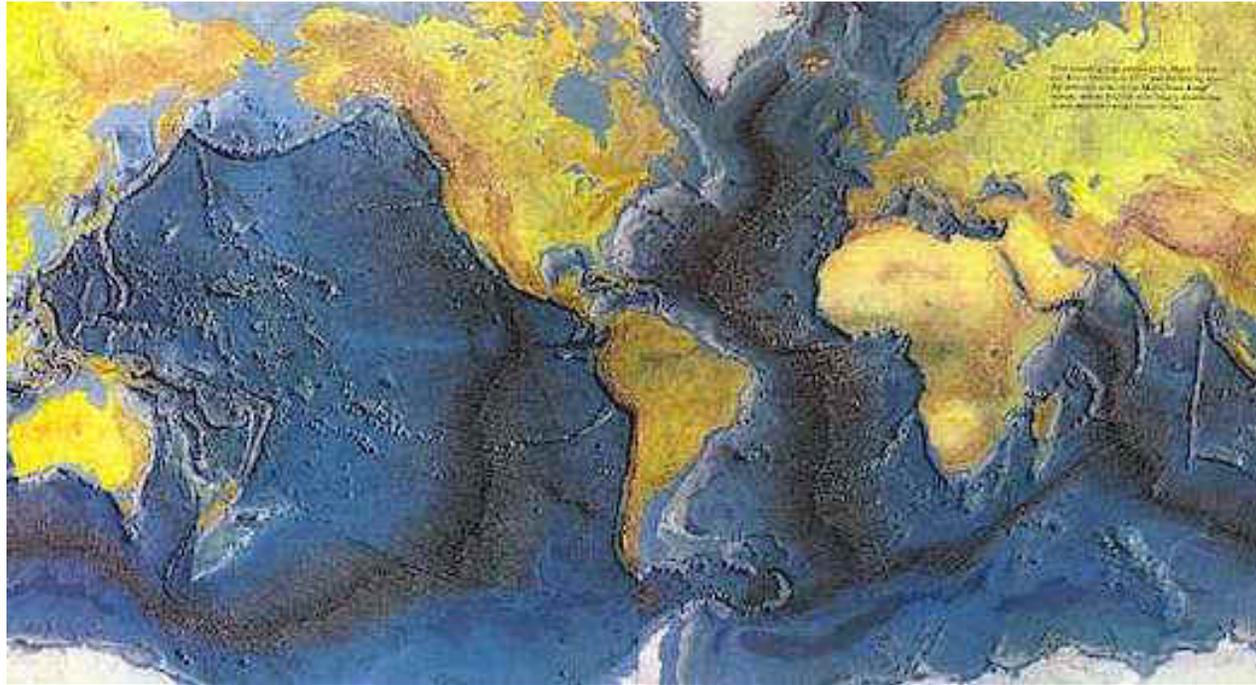
# Tomographie sismique

Dans la méthode classique, on utilise les variations dans les temps de parcours des ondes sismiques pour déterminer les régions de vitesses lentes ou rapides par rapport à un modèle de référence (par exemple, le PREM), dans le cadre de la théorie des rais -

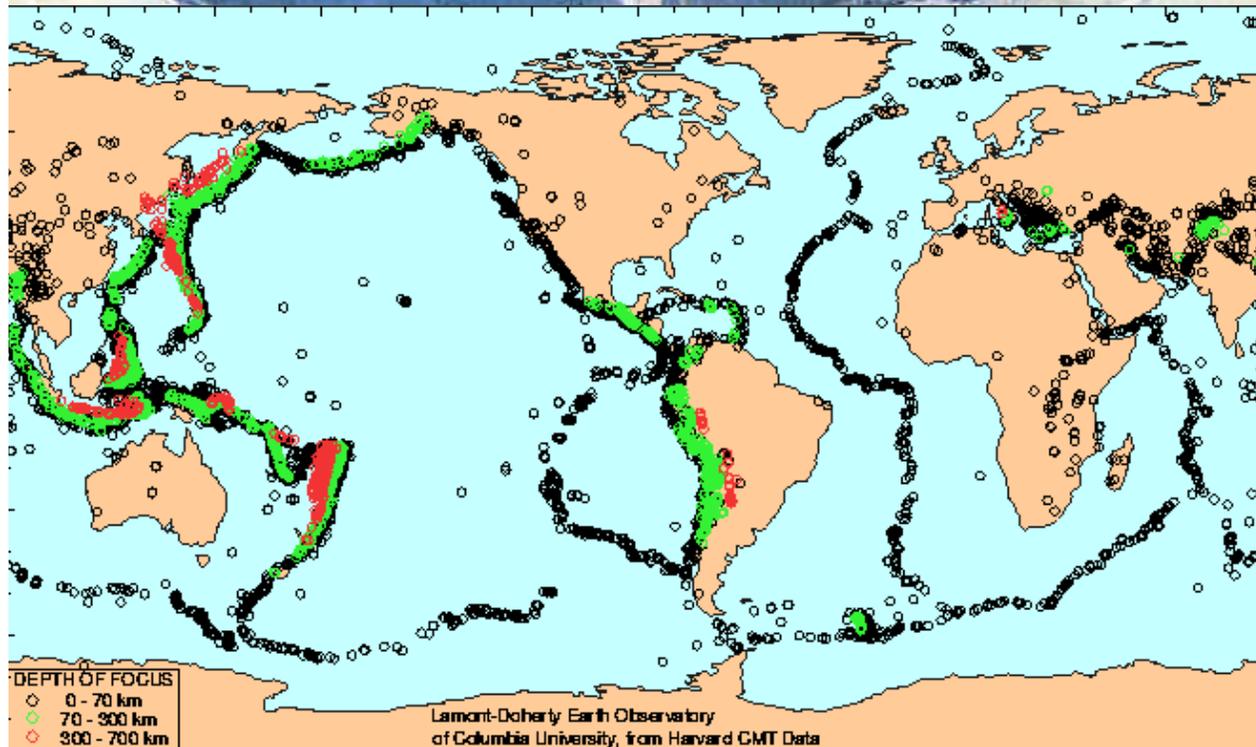
problème inverse non-linéaire  
qu'on linéarise, avec des  
itérations successives



Topographie

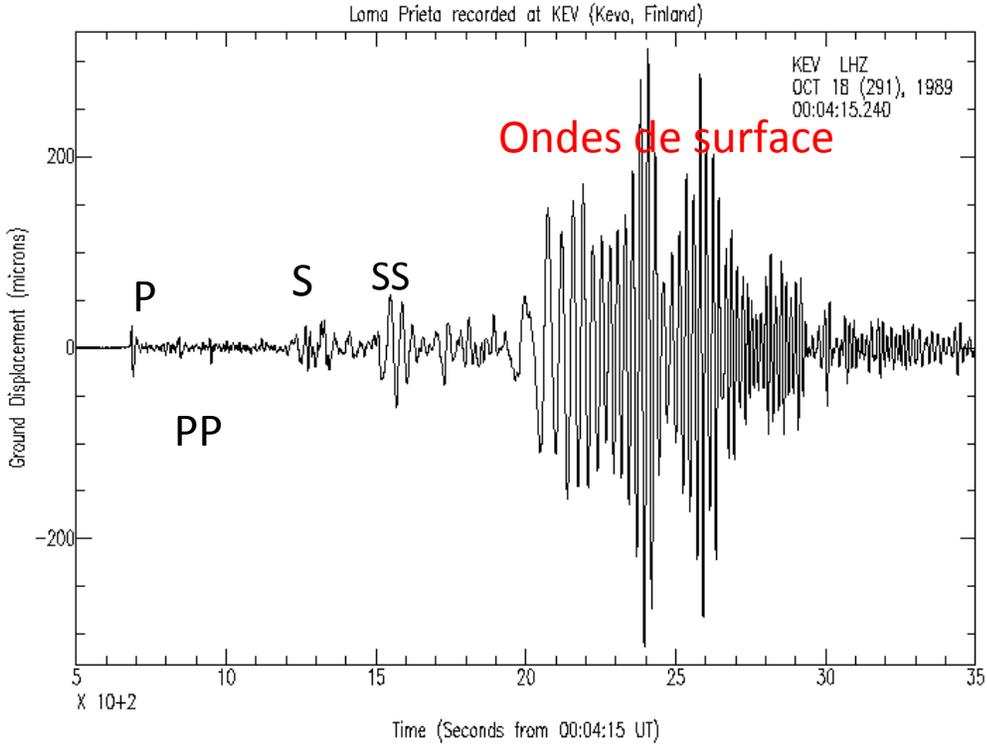


Sismicité  
globale  
1977-1992



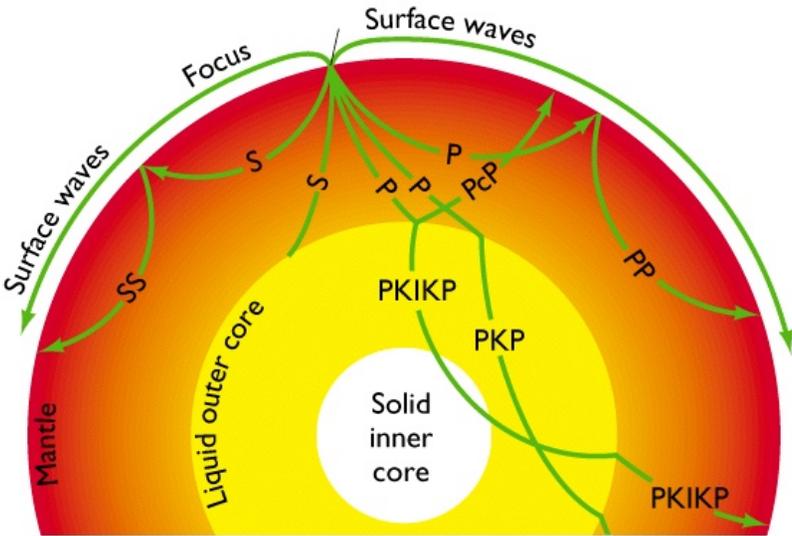
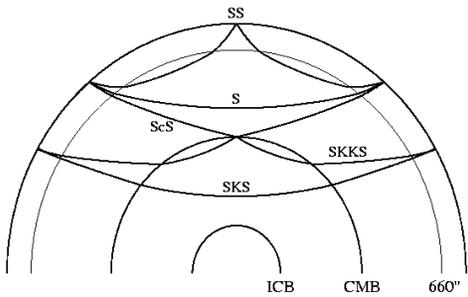


:



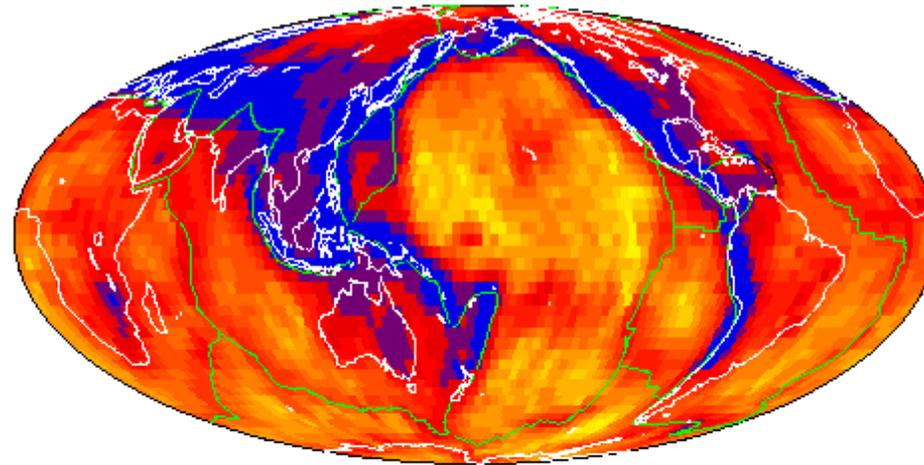
Temps de propagation des ondes de volume: P, PP, S, SS  
 Arrivées d'énergie bien séparées sur les sismogrammes, mesures Des temps précises.

- En général:*
- théorie des rais
  - méthodes de "back-projection"
  - itératives
  - paramétrisations "locales", par exemple en "blocs"

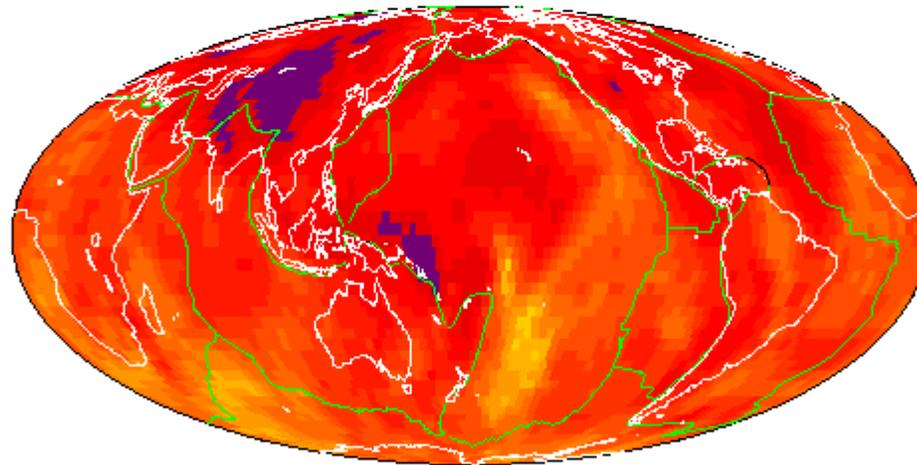


Tomographie globale  
"p"

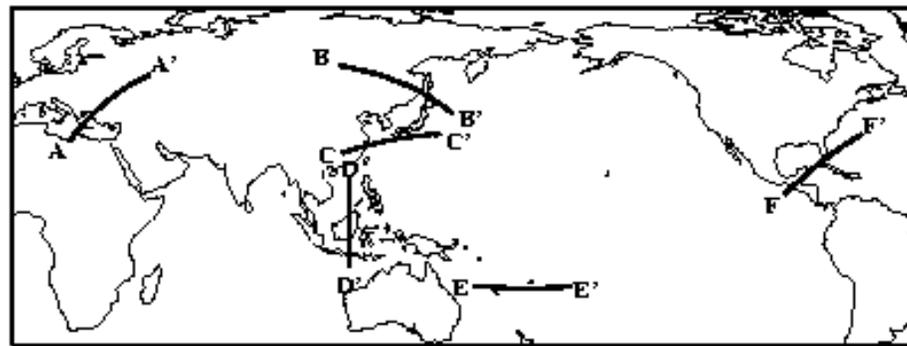
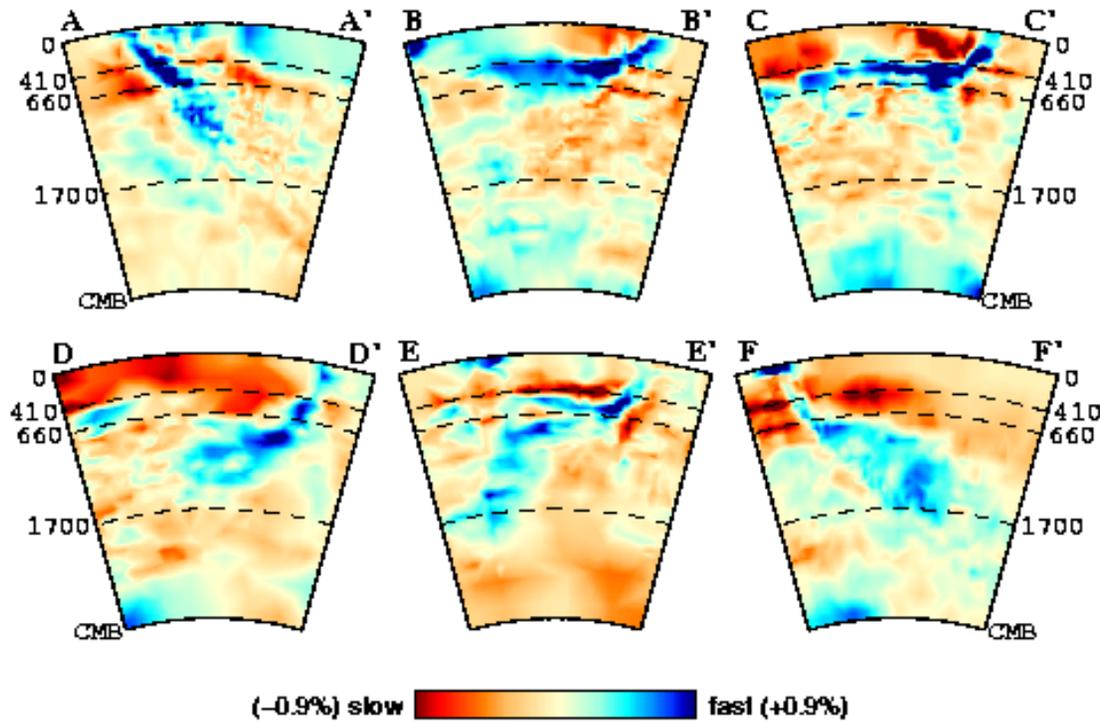
COMPRESSIONAL (660–870 KM)



COMPRESSIONAL (2670 KM–CMB)

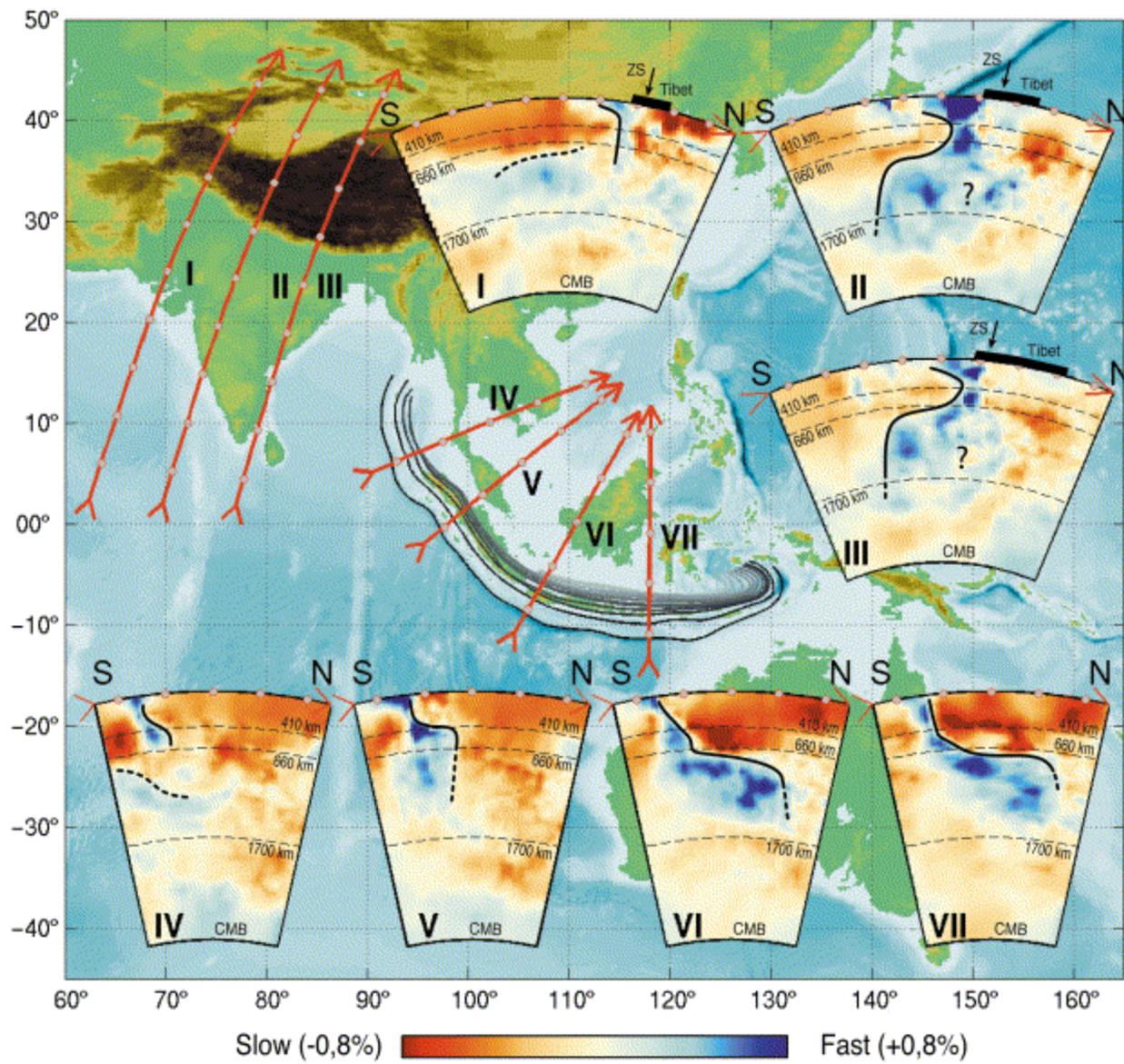


*Vasco and  
Johnson, 1998*

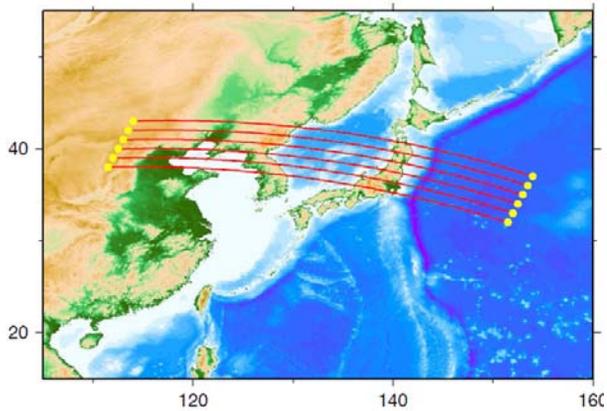


Tomographie sismique "P"

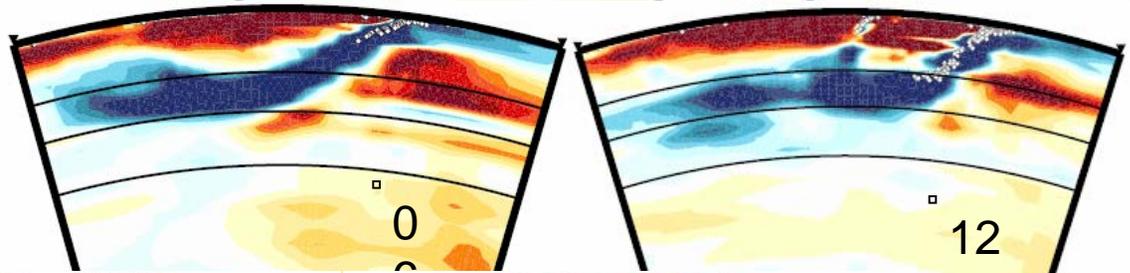
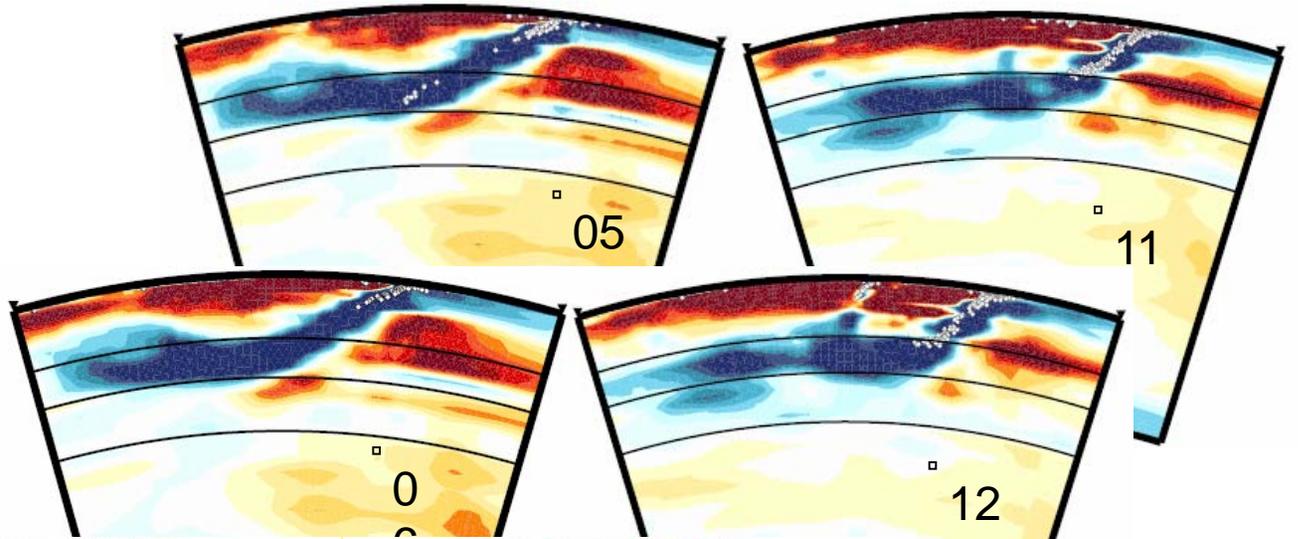
*Van der Hilst et al., 1998*



*Replumaz et al., EPSL, 2005*



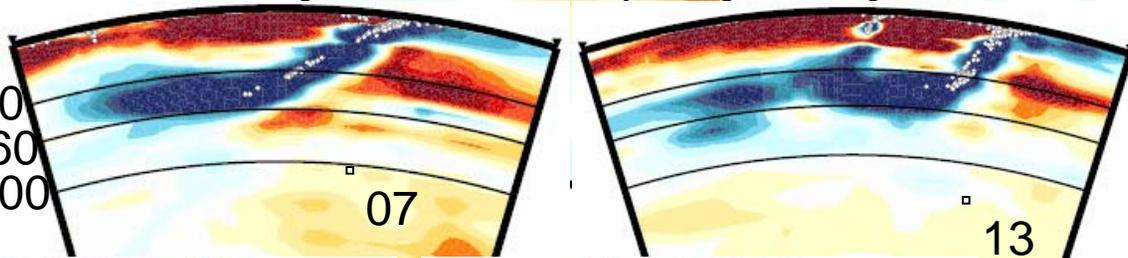
**Honshu**



*Fukao and  
Obayashi  
2011*

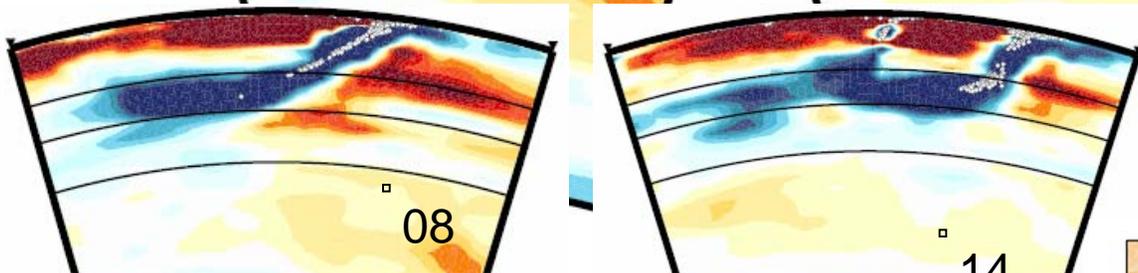
410  
660  
1000

$\pm 1.5\%$

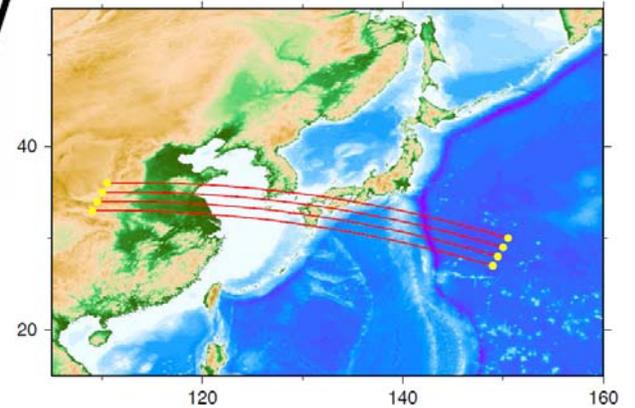
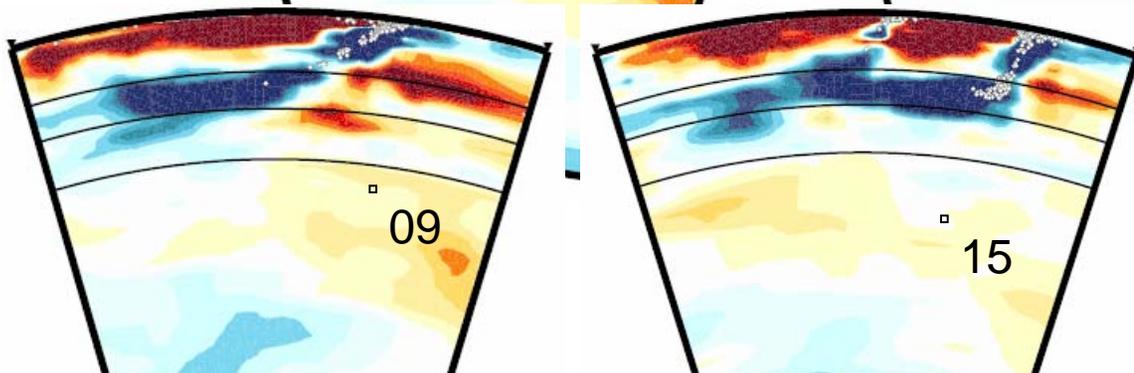


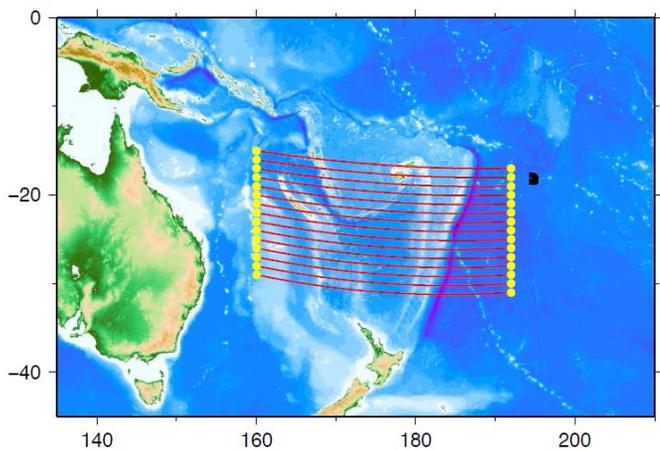
$\pm 1.5\%$

**Tomographie  
ondes P**



**northern Bonin**

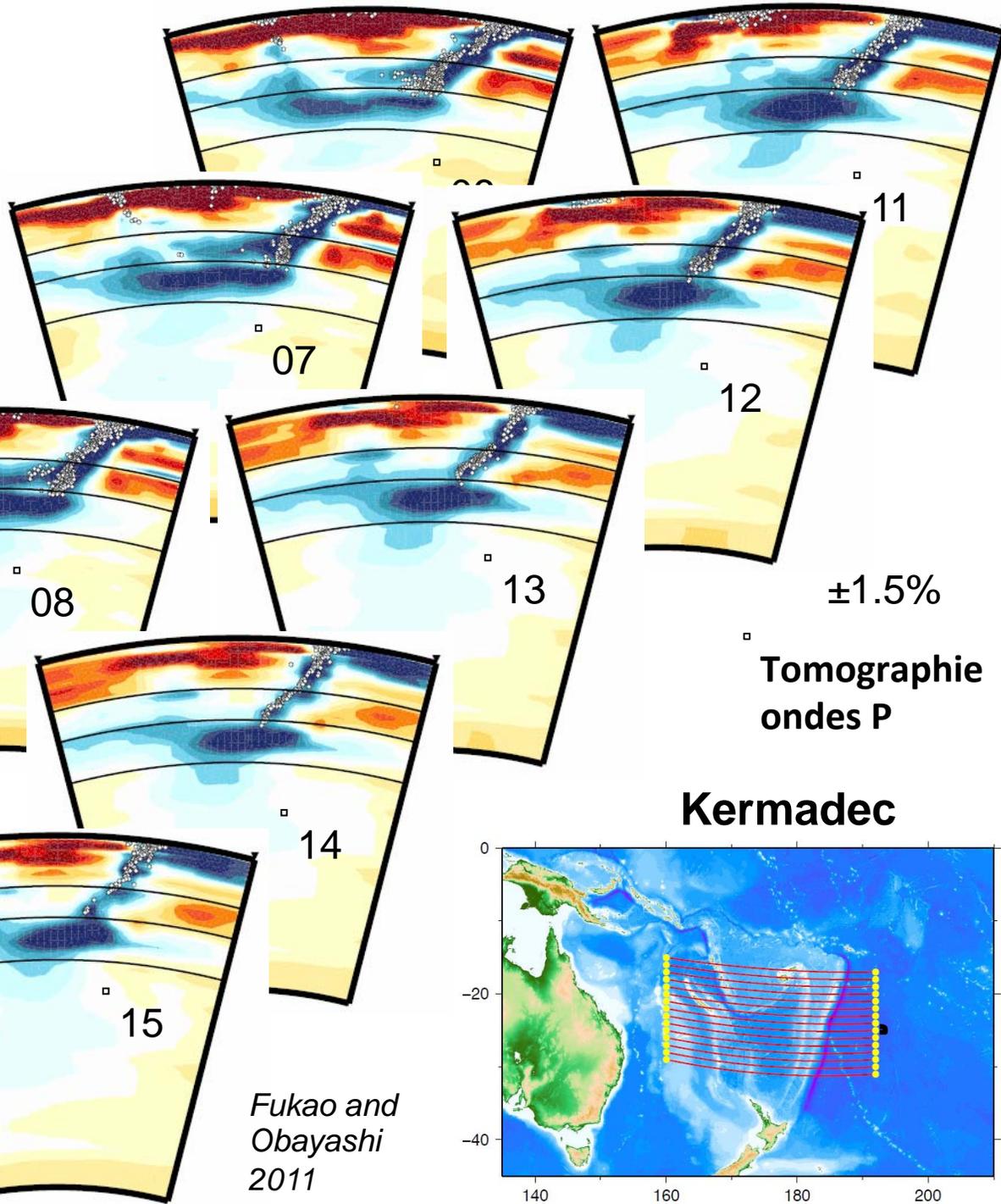




**Tonga**

$\pm 1.5\%$

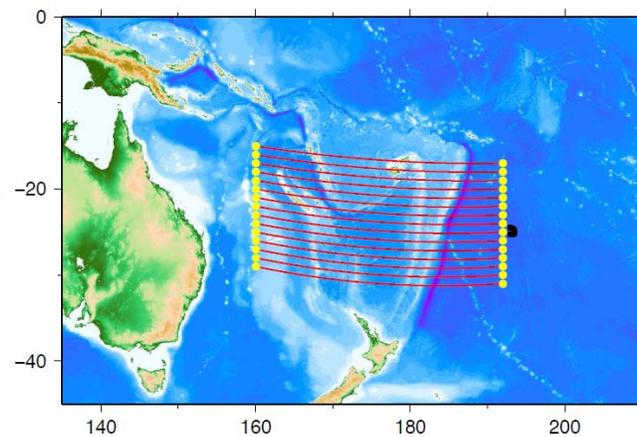
410  
660  
1000



$\pm 1.5\%$

Tomographie  
ondes P

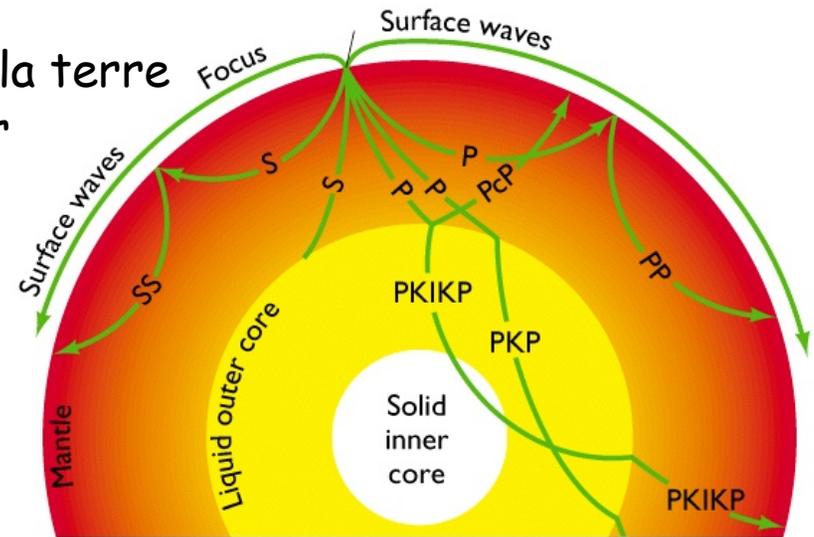
**Kermadec**



*Fukao and  
Obayashi  
2011*

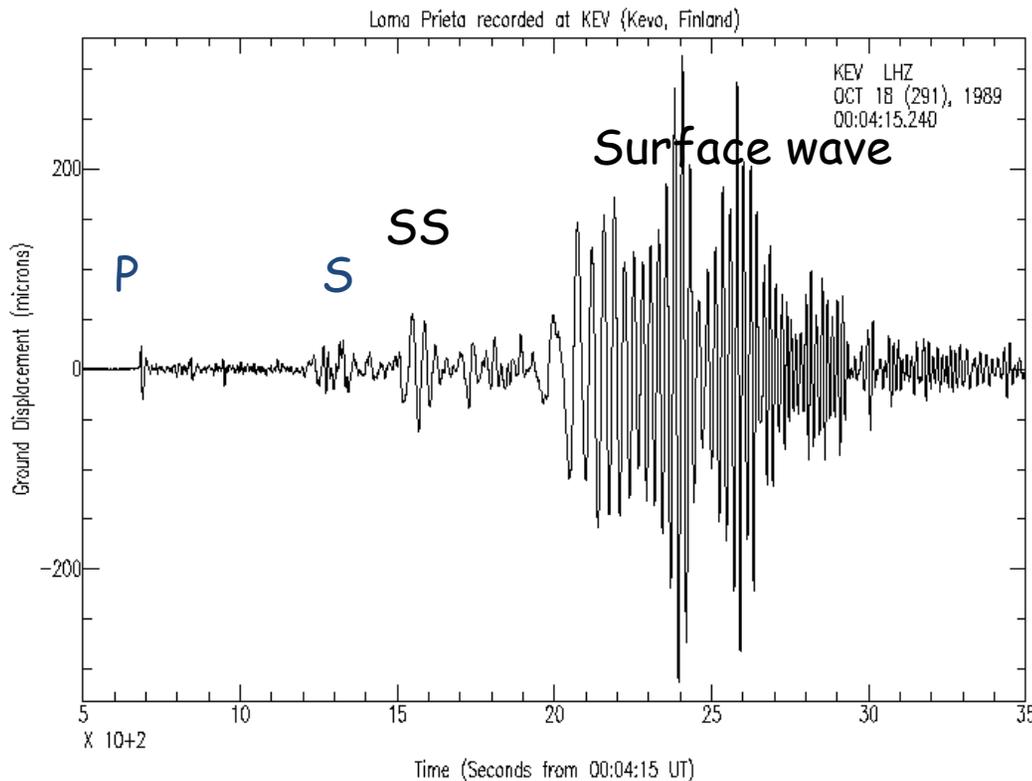
# Ondes de volume P et S

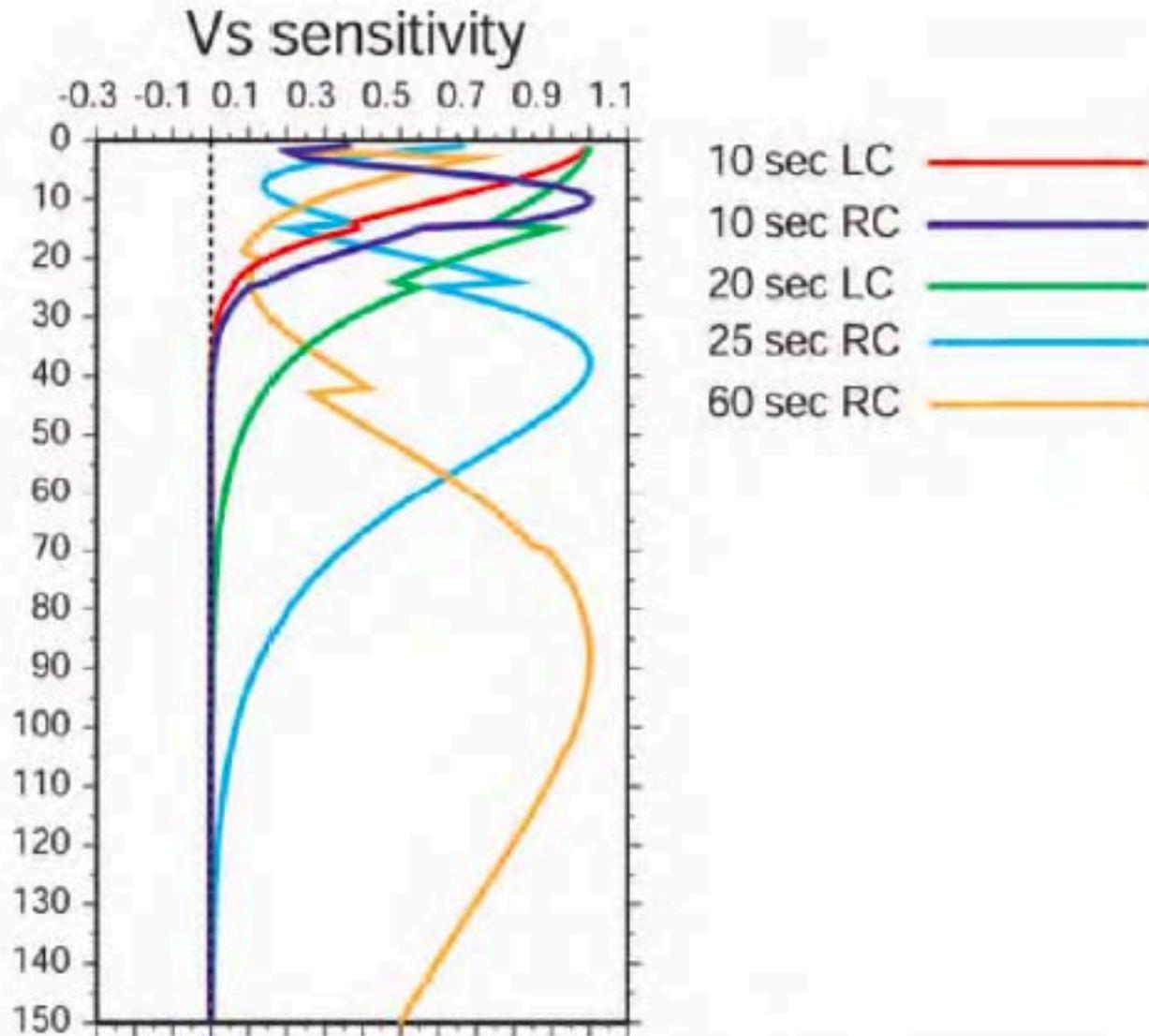
- l'énergie se propage à travers l'intérieur de la terre
- Les "rais" se courbent et sont réfléchis sur les discontinuités de structure  
→ *Loi de Descartes (Snell's law)*



# Ondes de surface

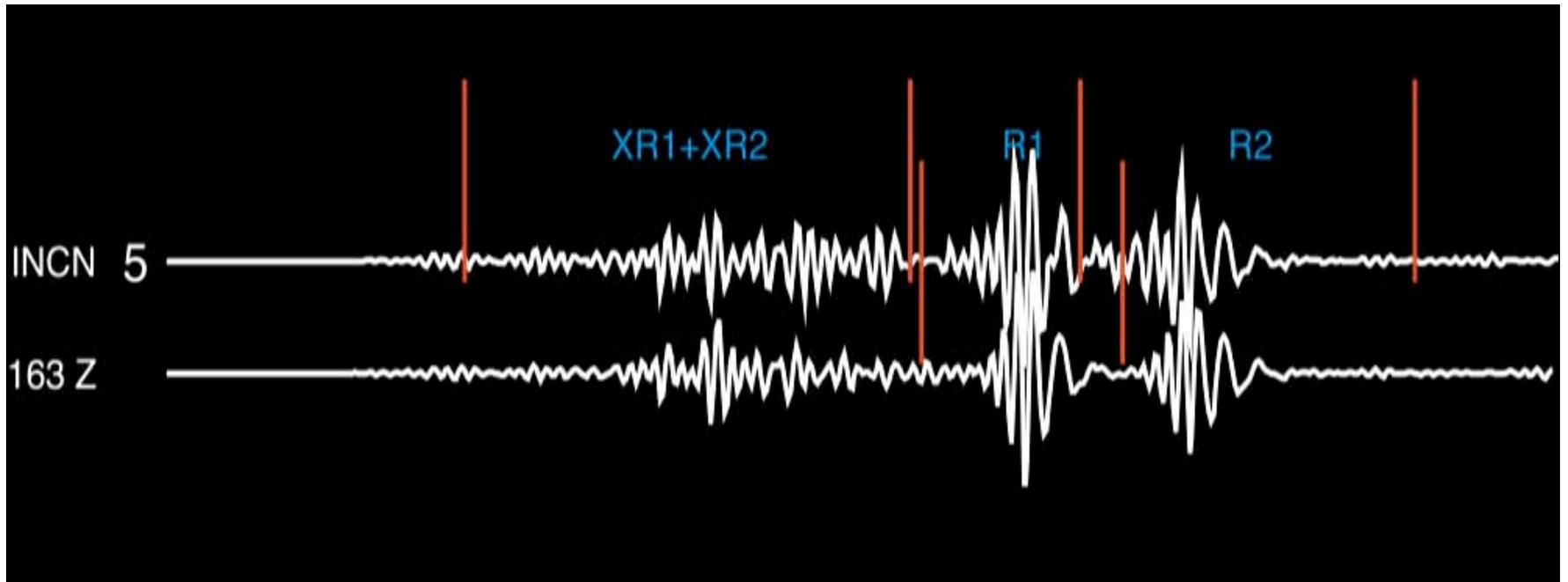
- l'énergie se propage le long de la surface de la terre
- Décroît avec la profondeur (exponentiellement)
- Dispersives: la vitesse de prop. dépend de la fréquence
- Contiennent l'énergie longue période engendrée par les séismes
- Grandes amplitudes dominent les sismogrammes





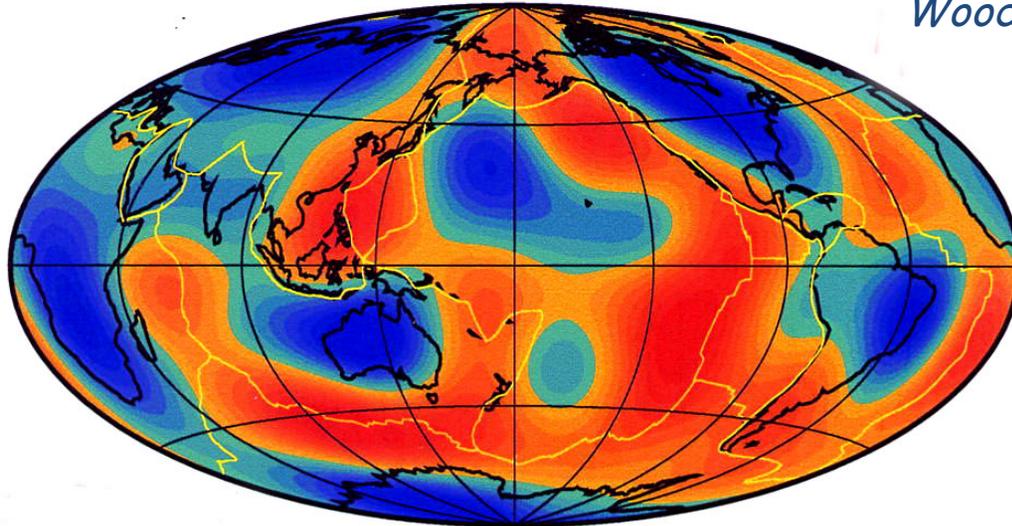
Noyaux de sensibilité des ondes de Rayleigh en fonction de la profondeur à différentes périodes

# Tomographie de forme d'onde:

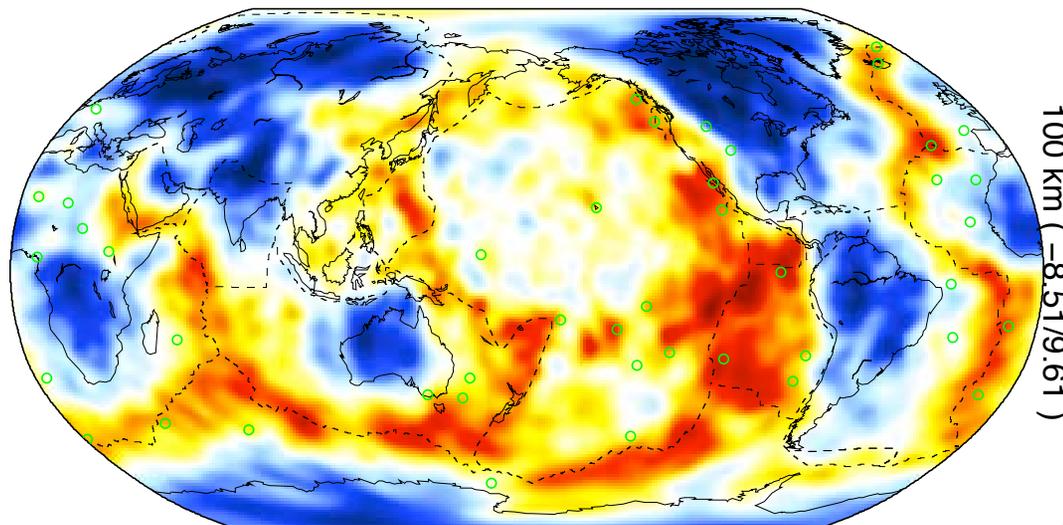


Model M84C (100 km)

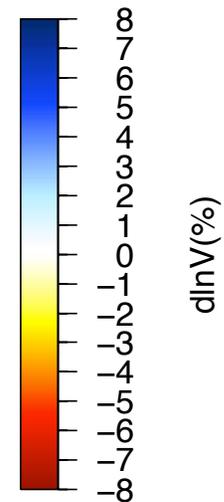
*Woodhouse and Dziewonski, 1984*



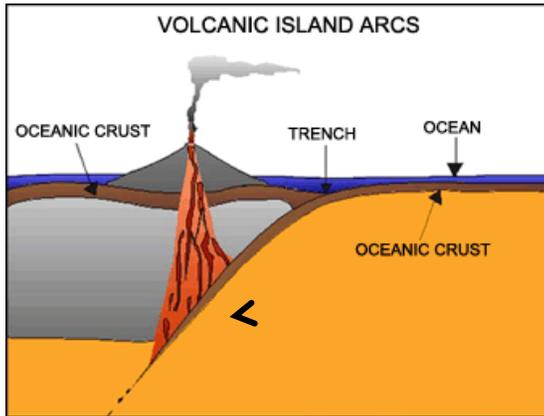
SEM-based model - Berkeley -2010



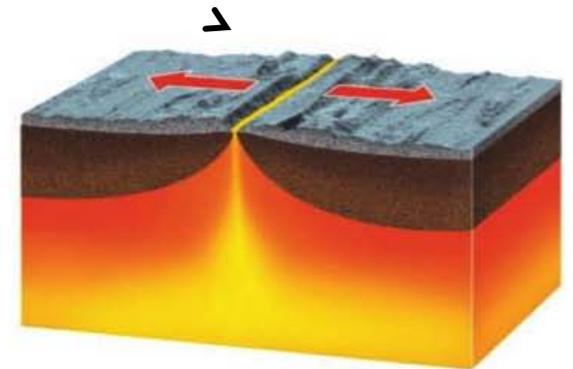
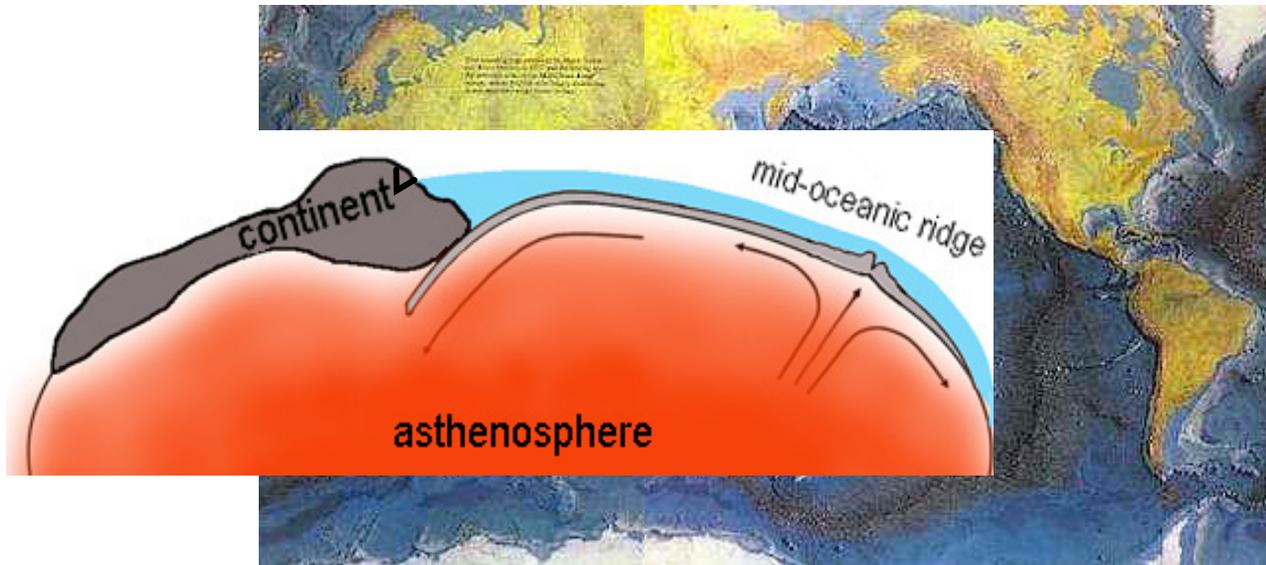
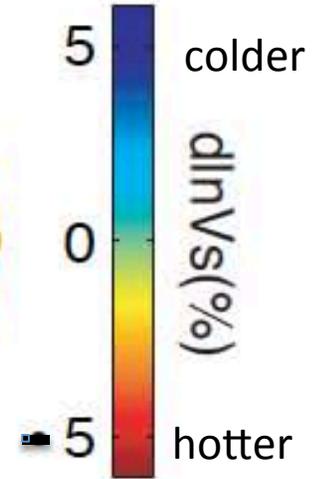
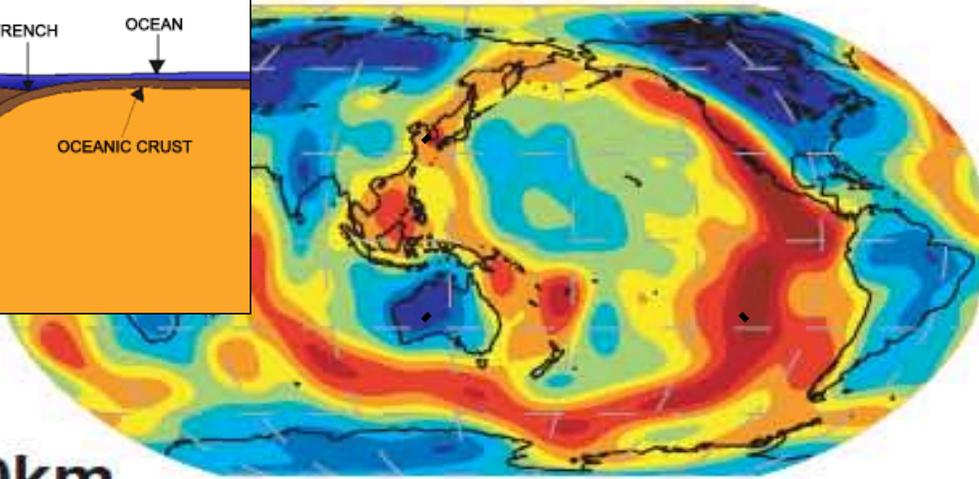
100 km ( -8.51/9.61 )

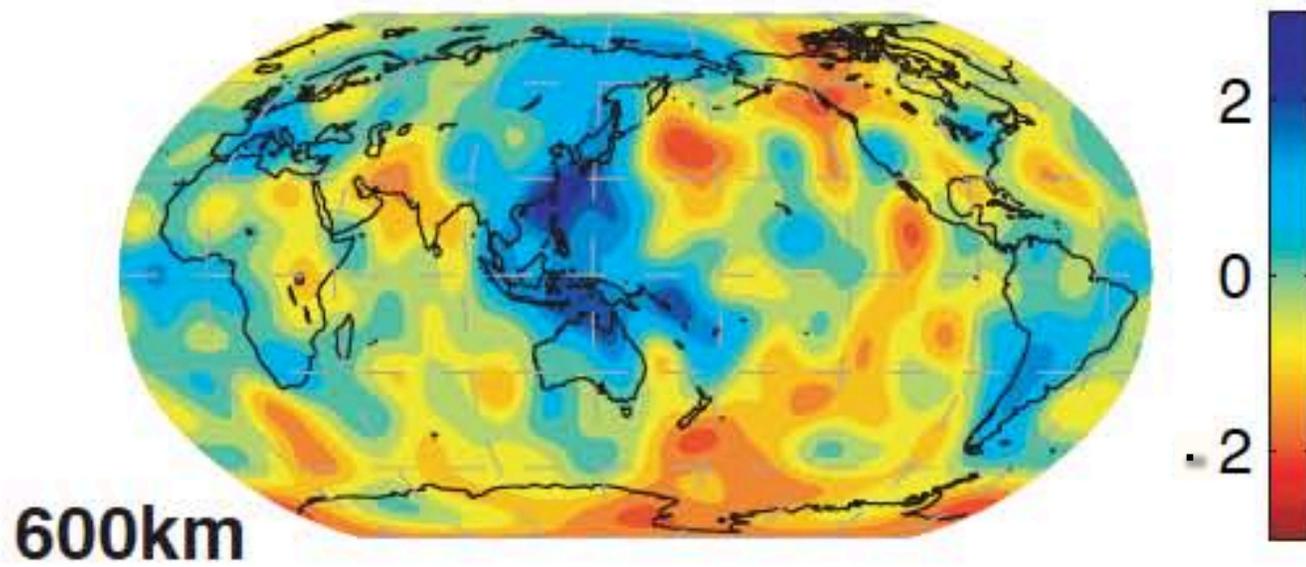
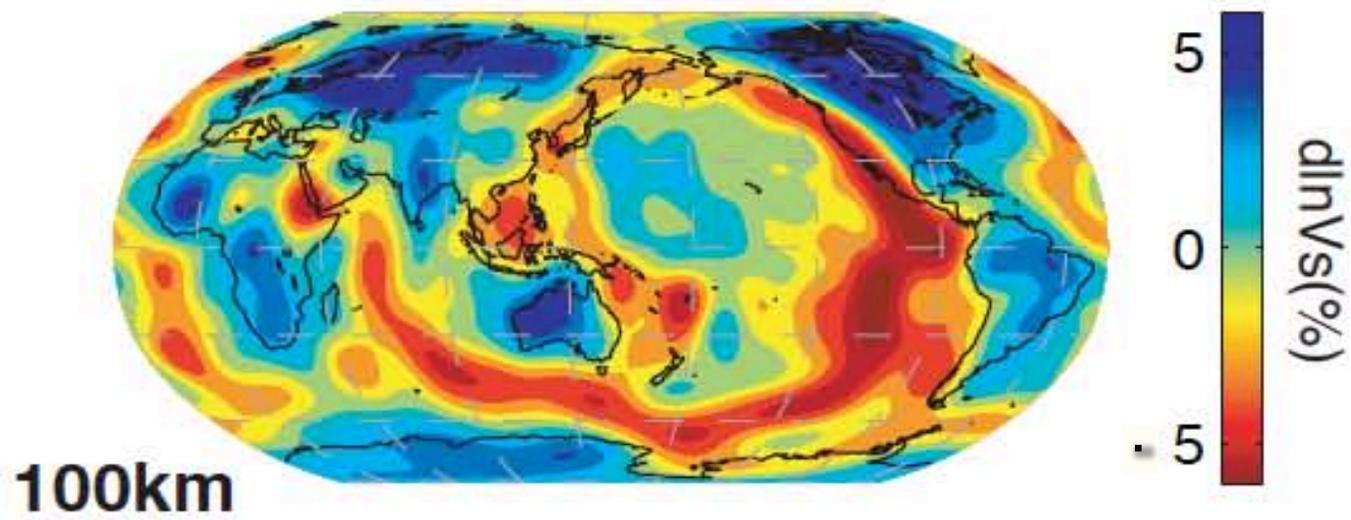


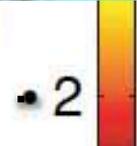
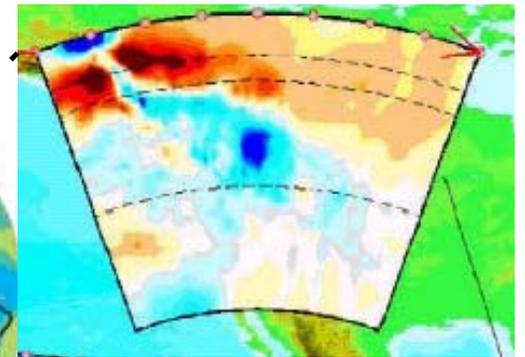
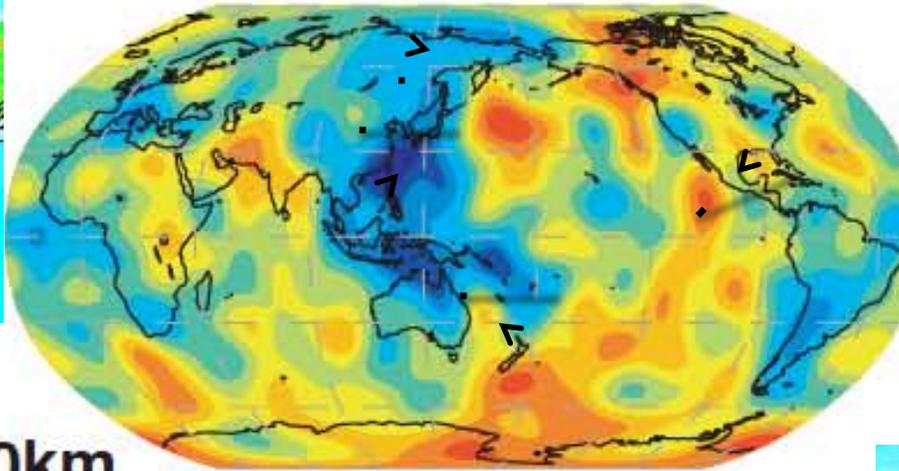
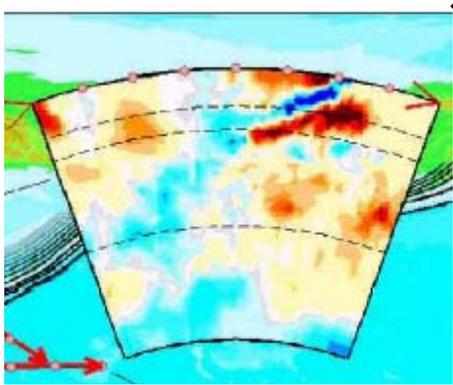
*Lekic and Romanowicz, 2011*



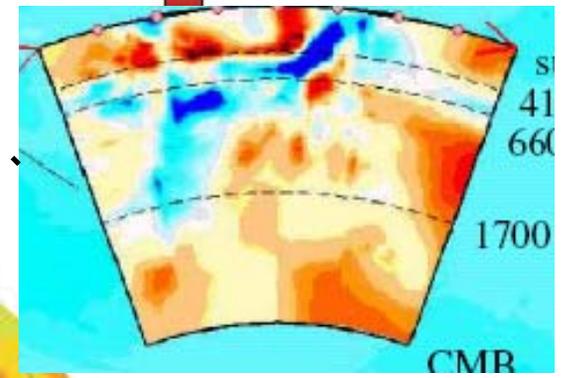
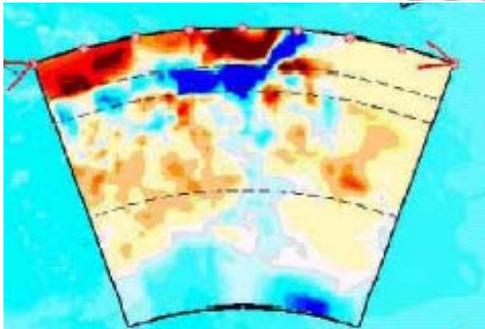
100km



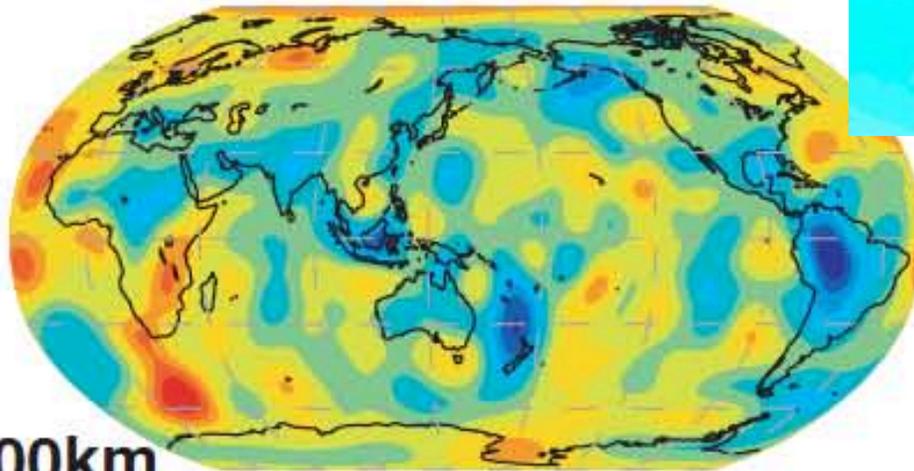


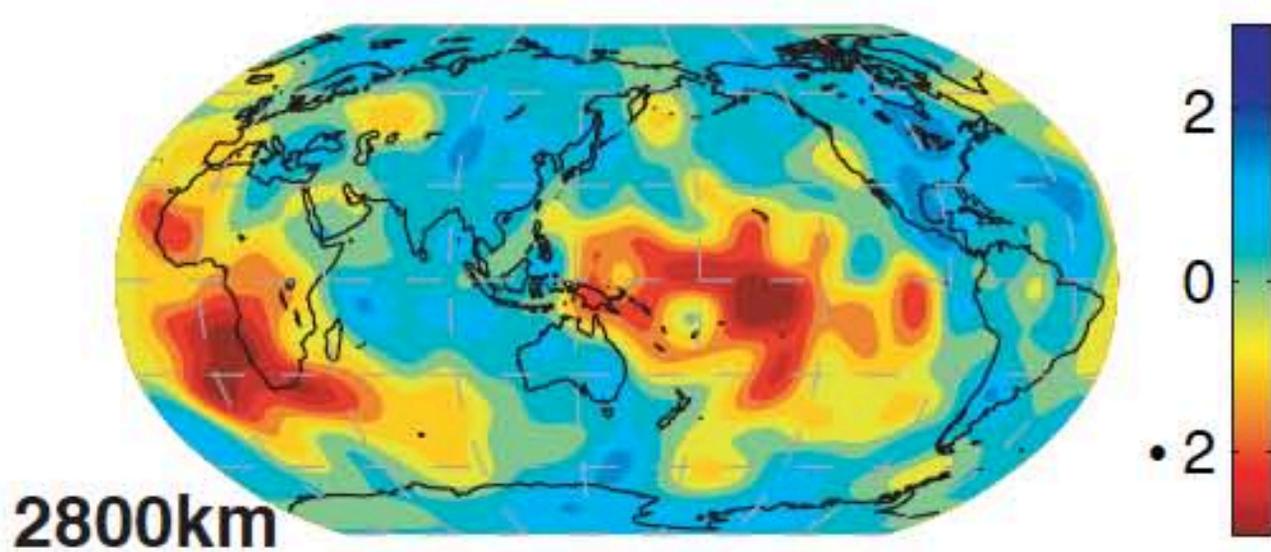
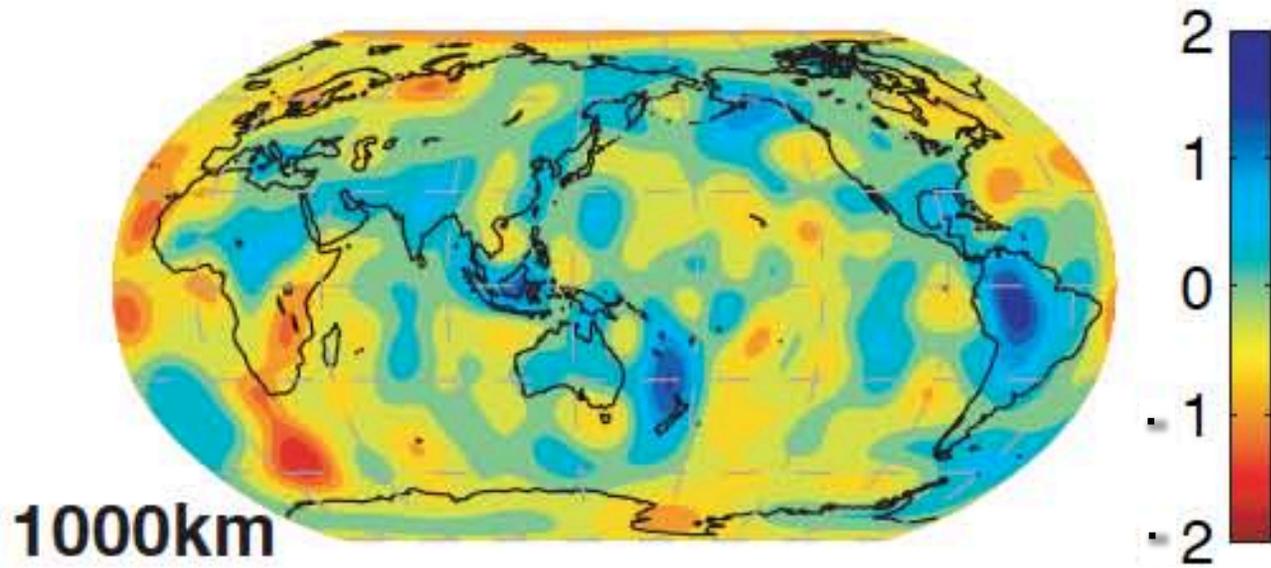


600km

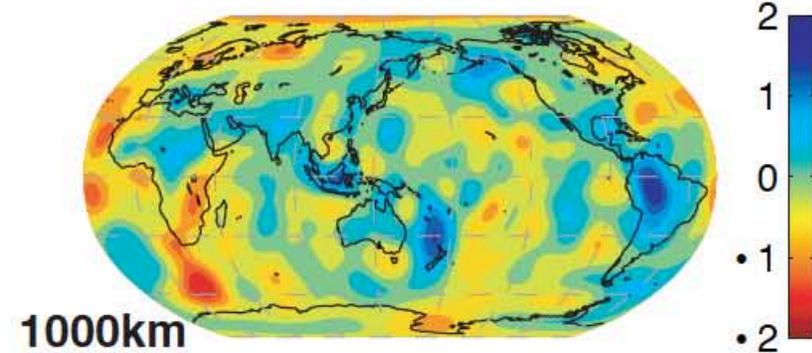
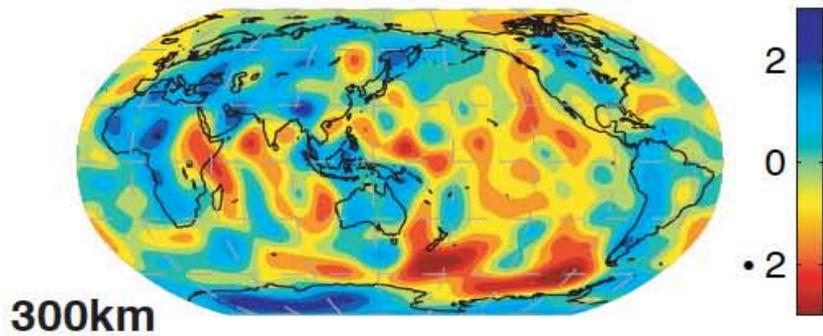
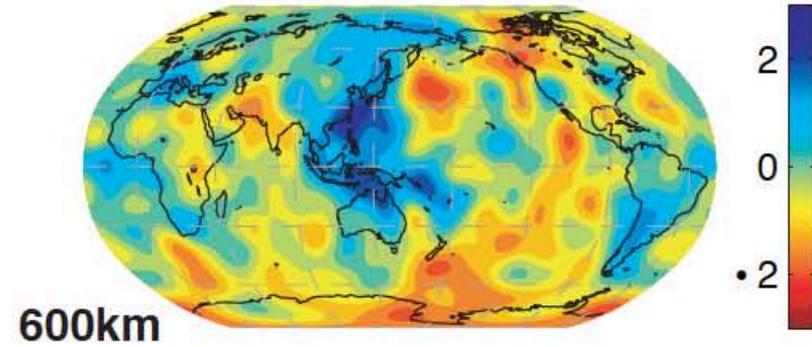
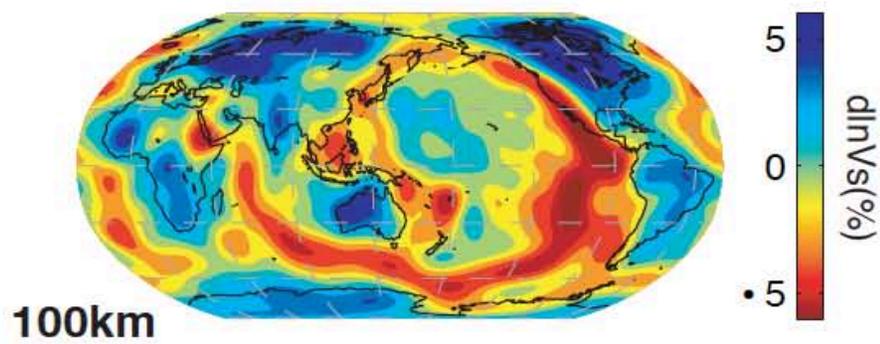


1000km



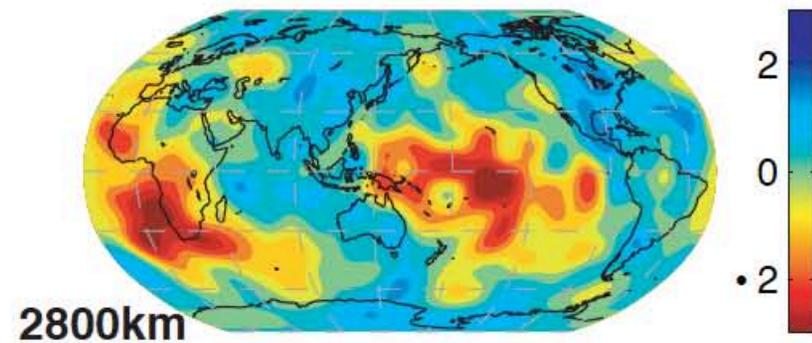


# Coupes horizontales à travers le manteau

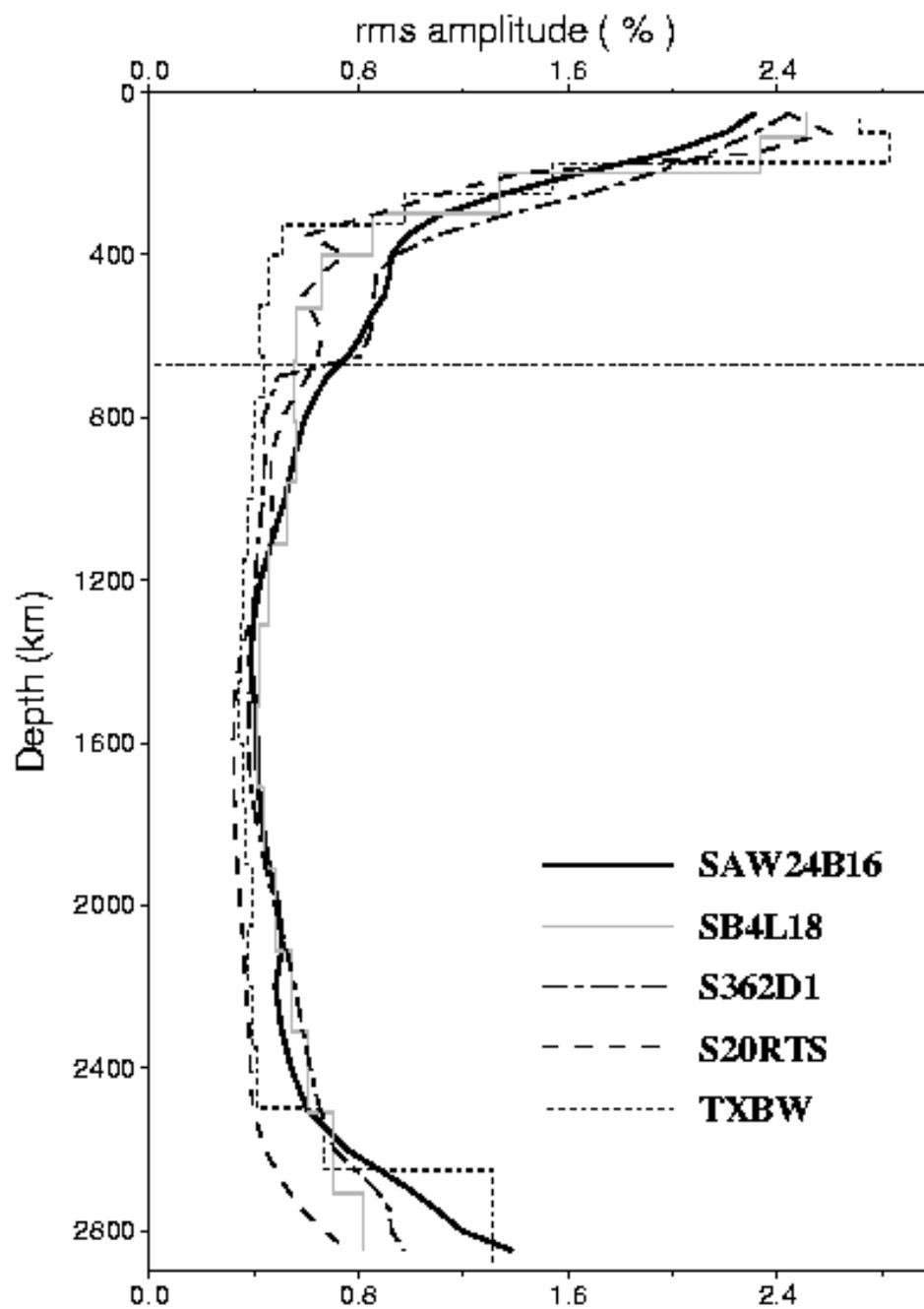


Bleu = rapide ~ froid

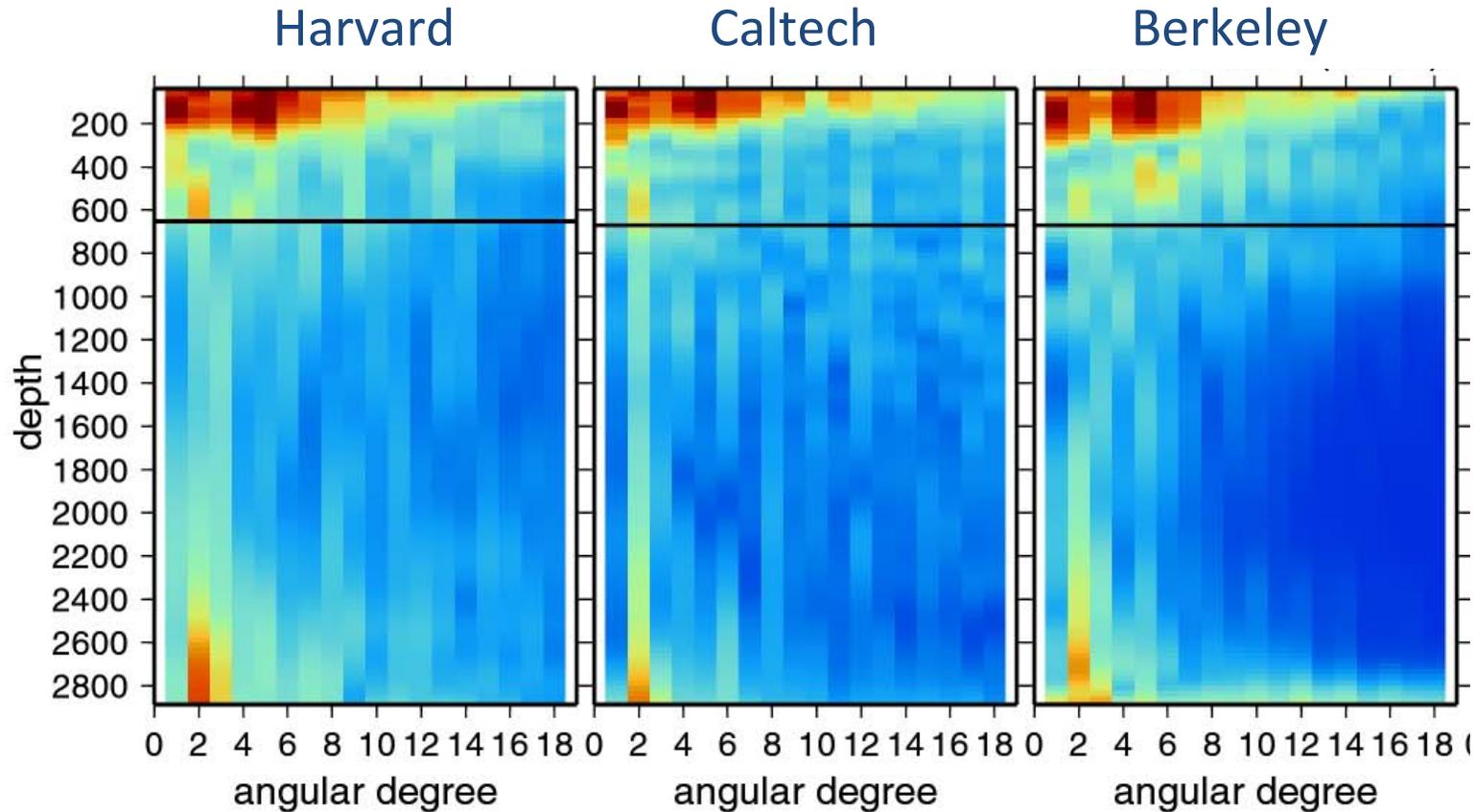
Rouge = lent ~ chaud



Amplitude rms  
des variations  
latérales des  
vitesses  
d'ondes S en  
fonction de la  
profondeur



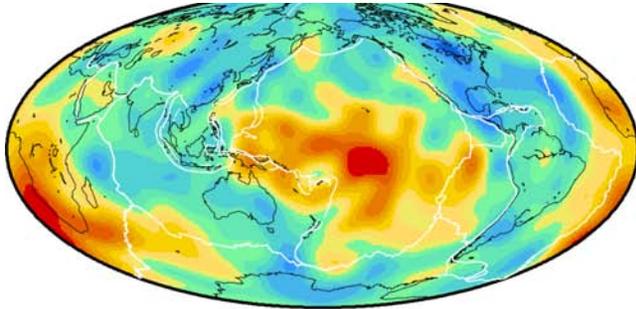
# Spectre de puissance de 3 modèles



# Isotropic $V_s$ Profondeur = 2800 km

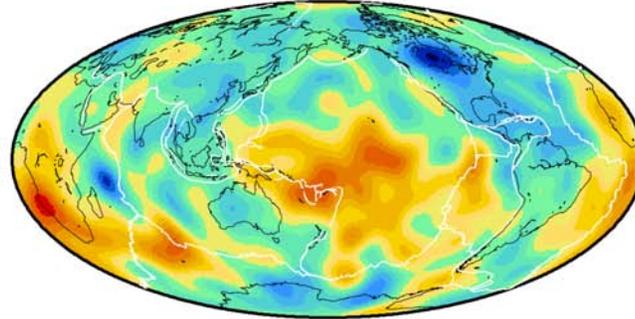
S362ANI

from Kustowski, 2006



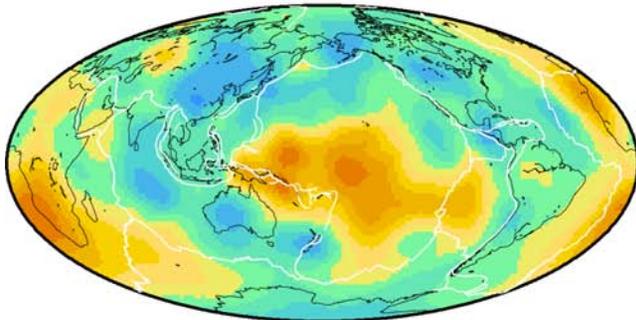
S362D1

Gu et al. (2001)



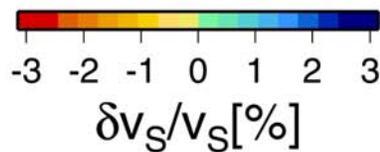
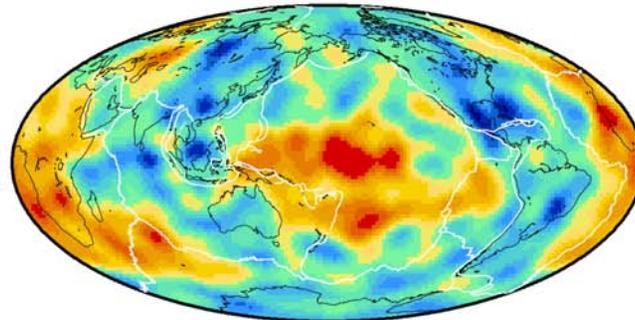
SB4L18

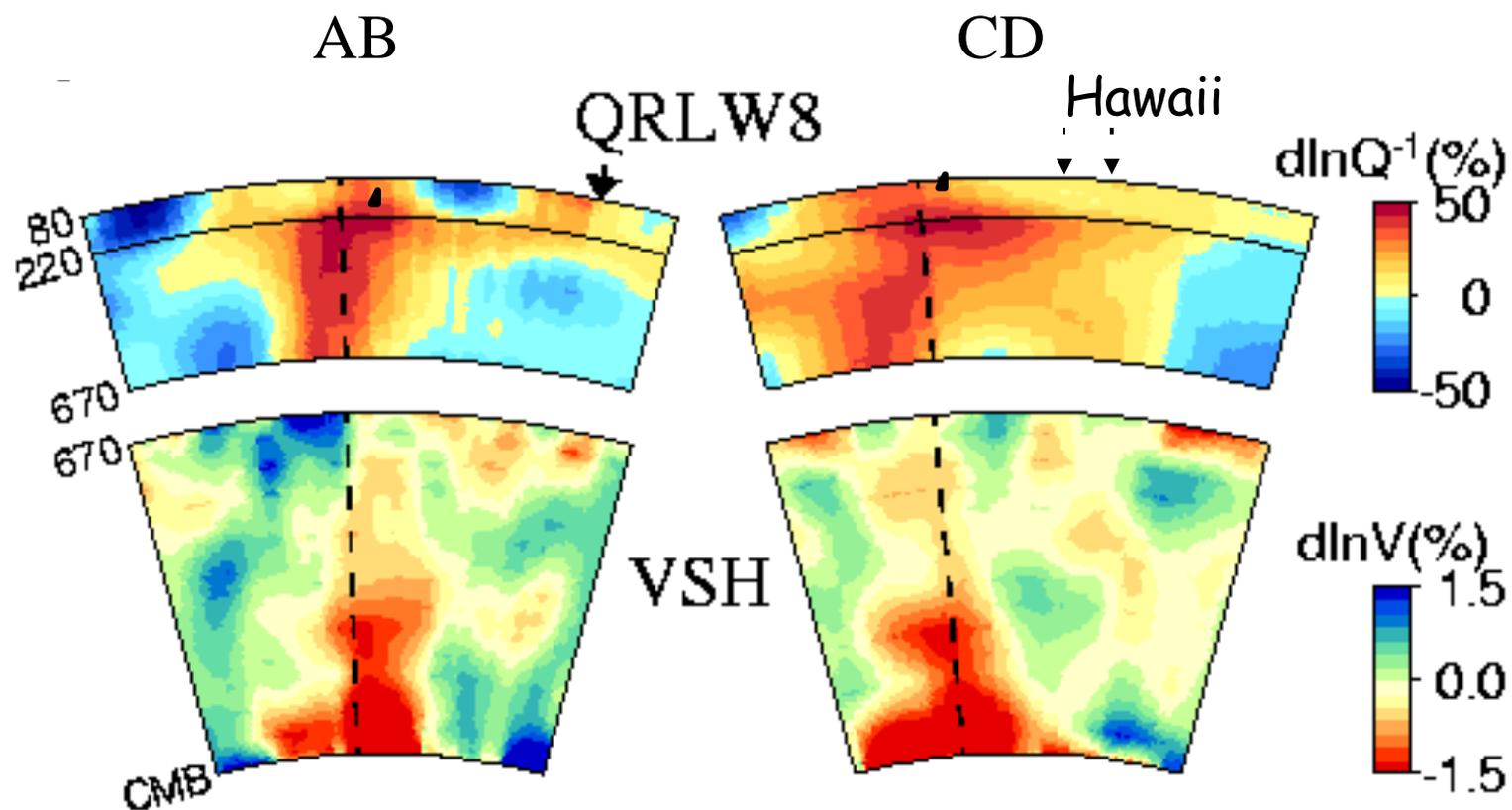
Masters et al. (2000)



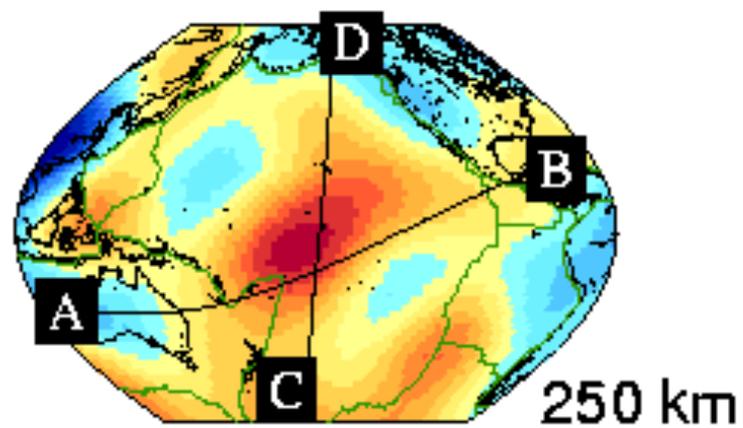
SAW24B16

Megnin & Romanowicz (2000)

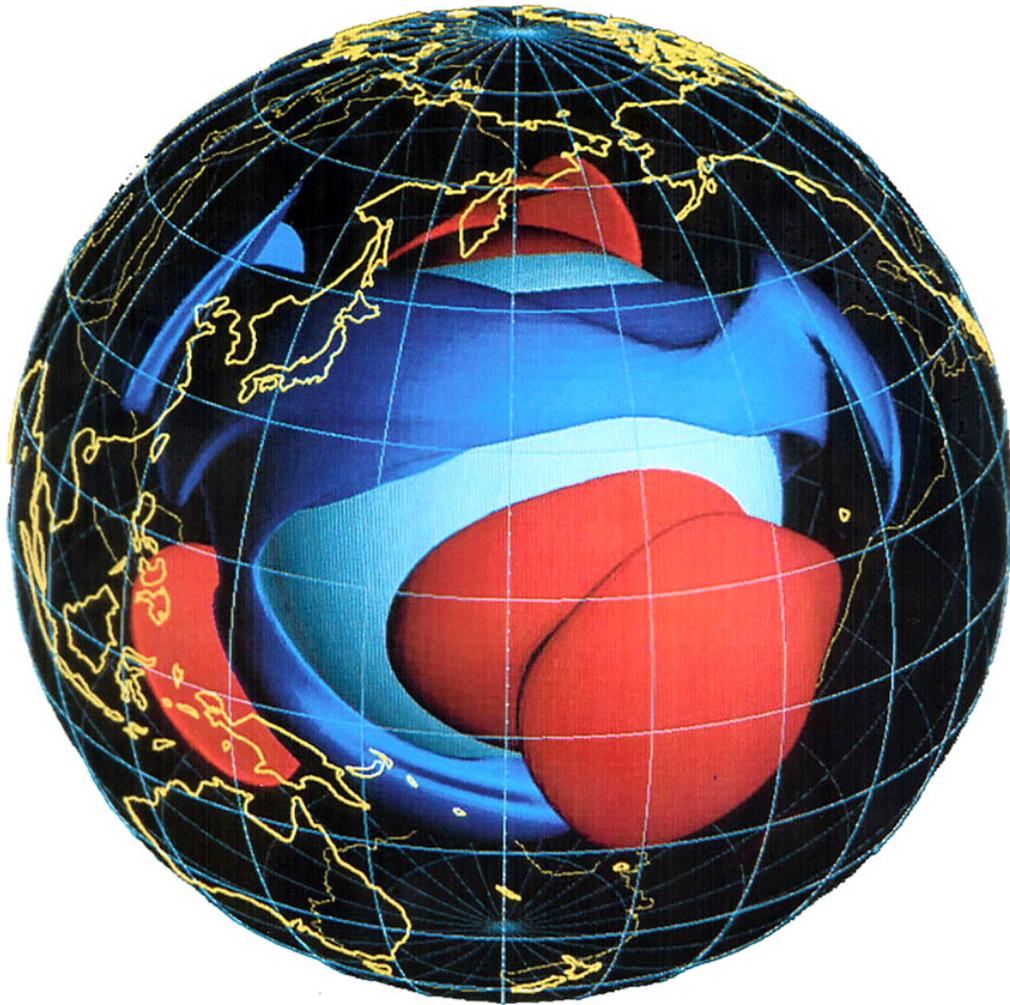




Pacific Superplume



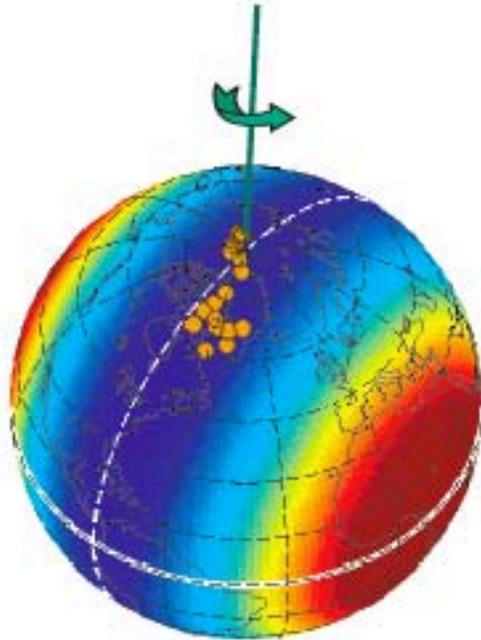
*Romanowicz and Gung, 2002*



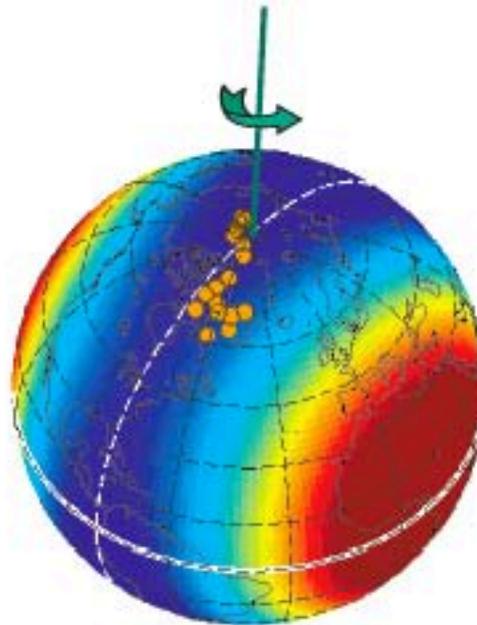
Méga-panache  
du  
Pacifique  
et  
anneau de vitesses  
rapides qui l'entoure

# Composante de la structure en "Degré 2"

S362ANI



SAW24B16



S20RTS

