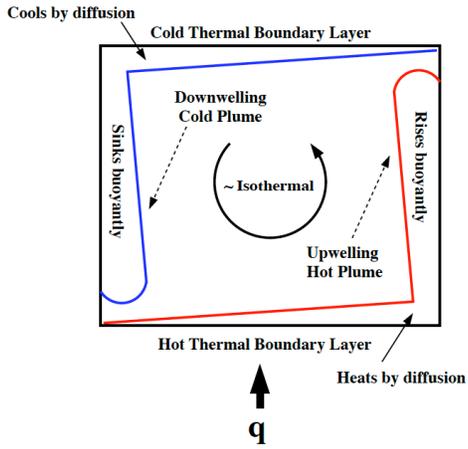


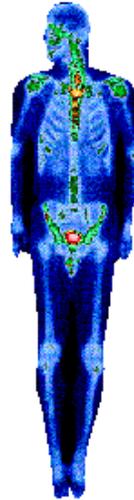
Structure et dynamique du système Lithosphère/Asthénosphère

4-Méthodes sismologiques et magnéto-telluriques:
structure "stratifiée" dans le manteau supérieur

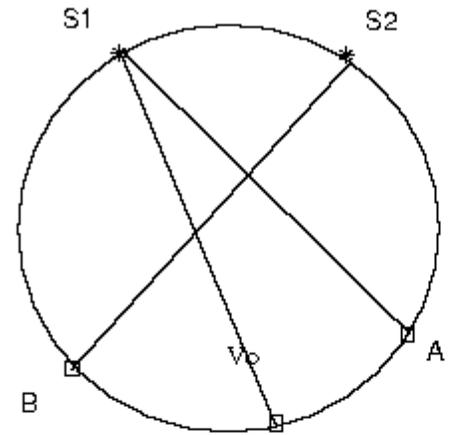
Barbara Romanowicz - Cours 2013
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre
Collège de France
28 Octobre 2013



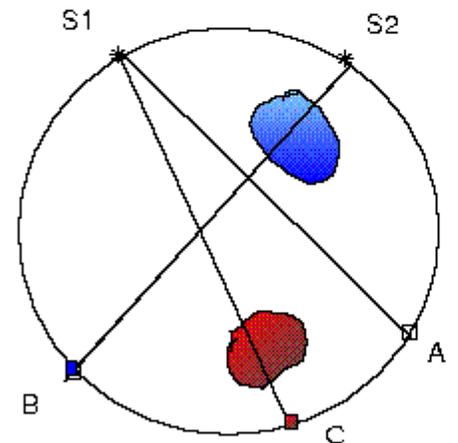
Medical Imagery



Homogeneous Body

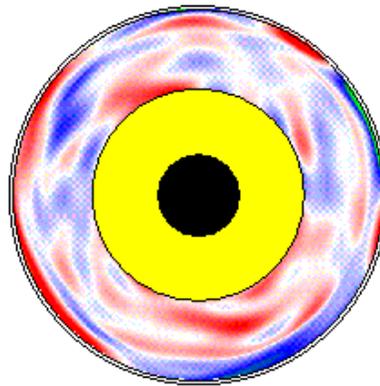


Body with inhomogeneities



Slow

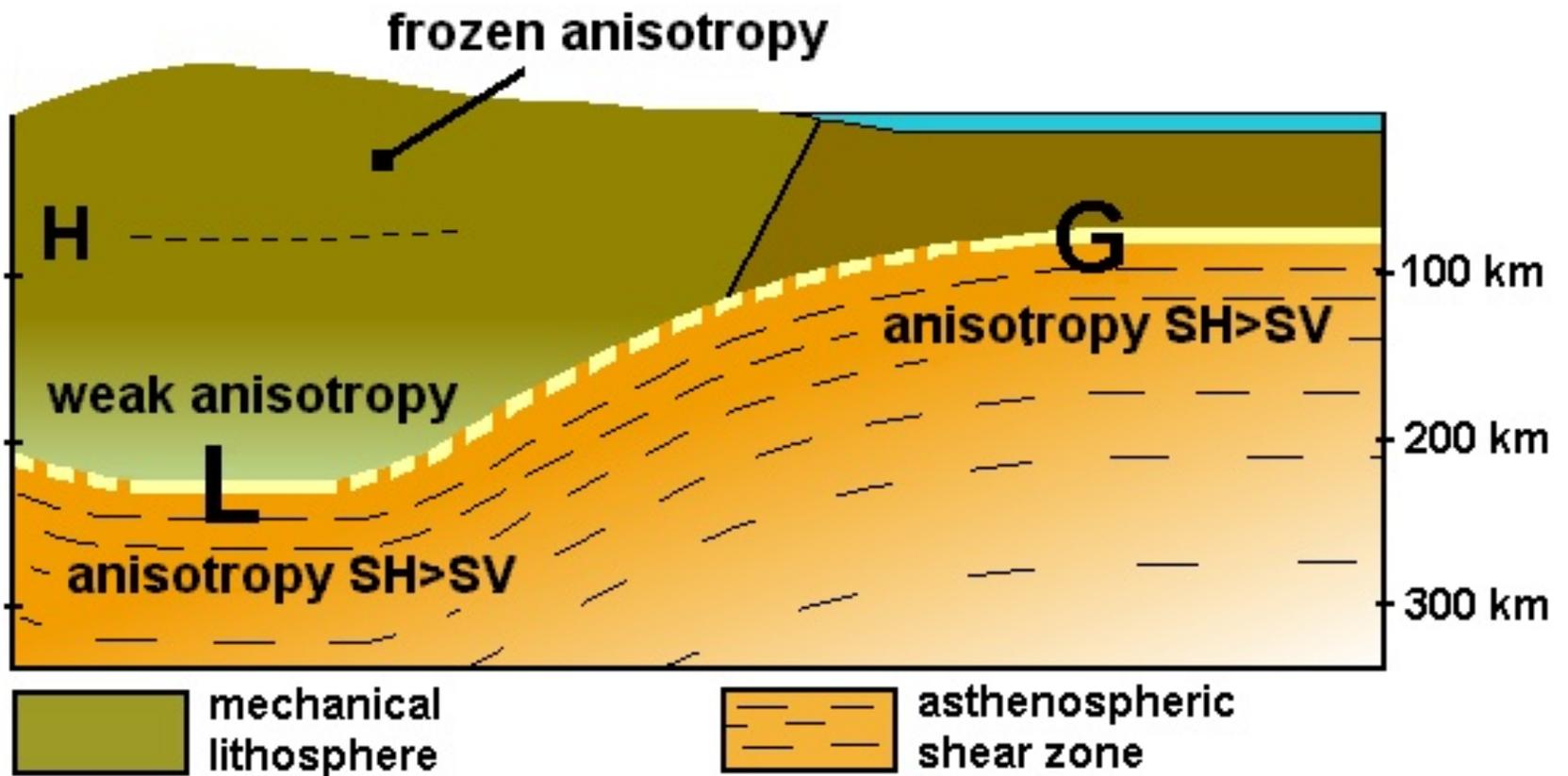
(hot)



Fast

(cold)

Seismic Tomography



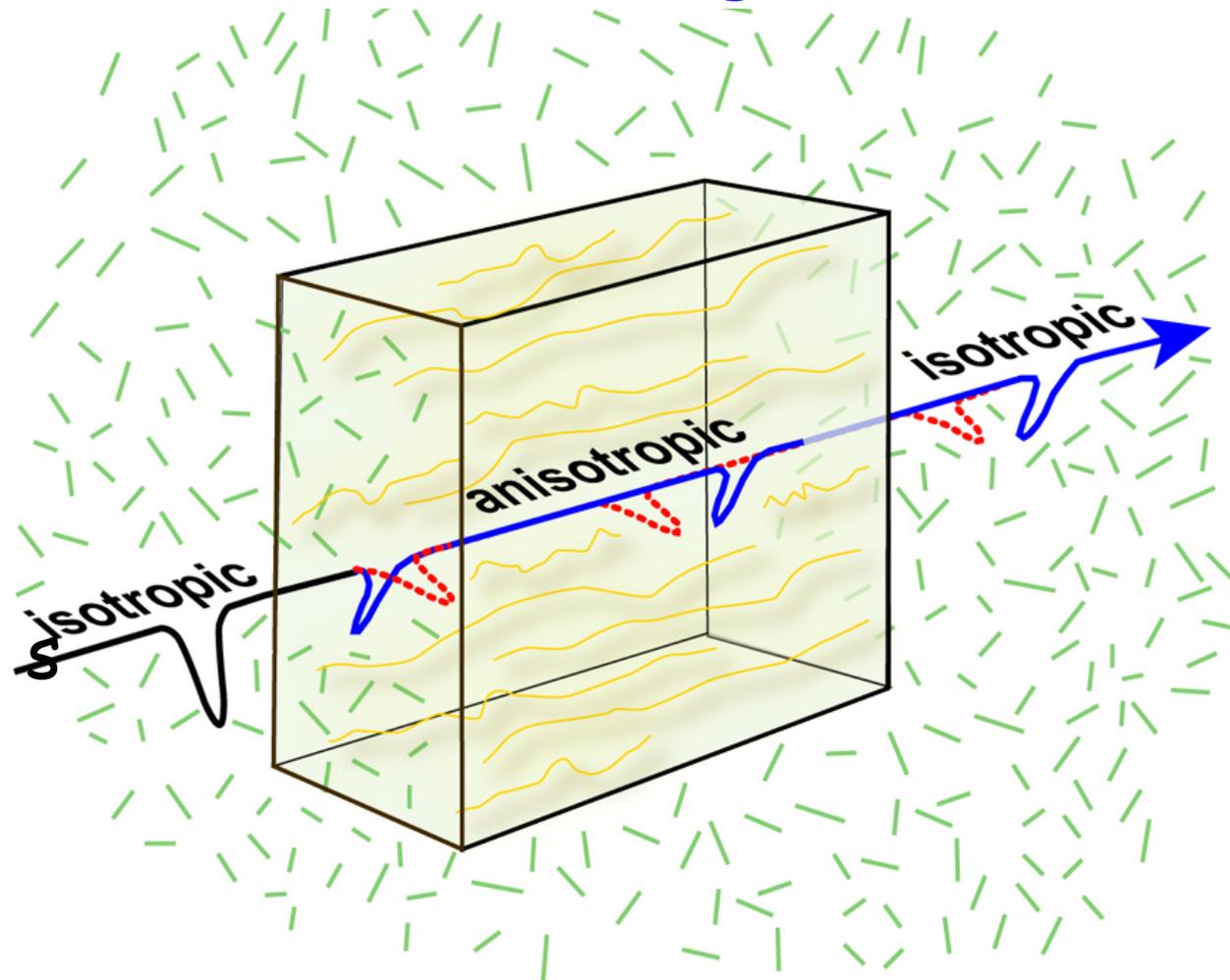
L = LAB = Lithosphere-Asthenosphere boundary

Gung et al., Nature, 2003

Méthodes sismologiques: II - ondes de volume:

- Biréfringence ("splitting") -> anisotropie
- Ondes réfléchies et converties aux discontinuités de structure
- Stratification dans les océans et les continents

Anisotropie et ondes de volume de cisaillement: "biréfringence"

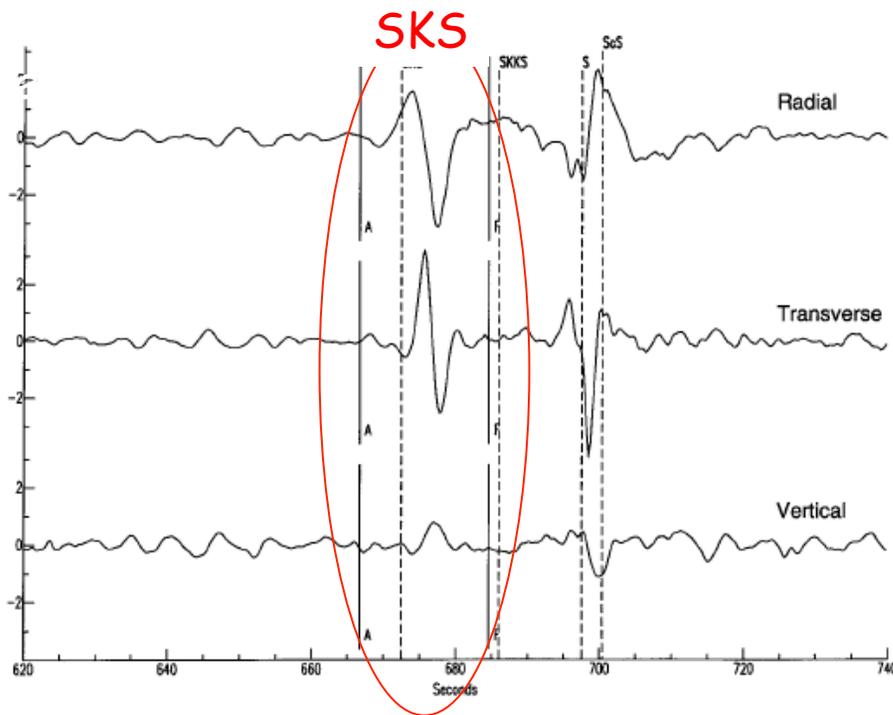
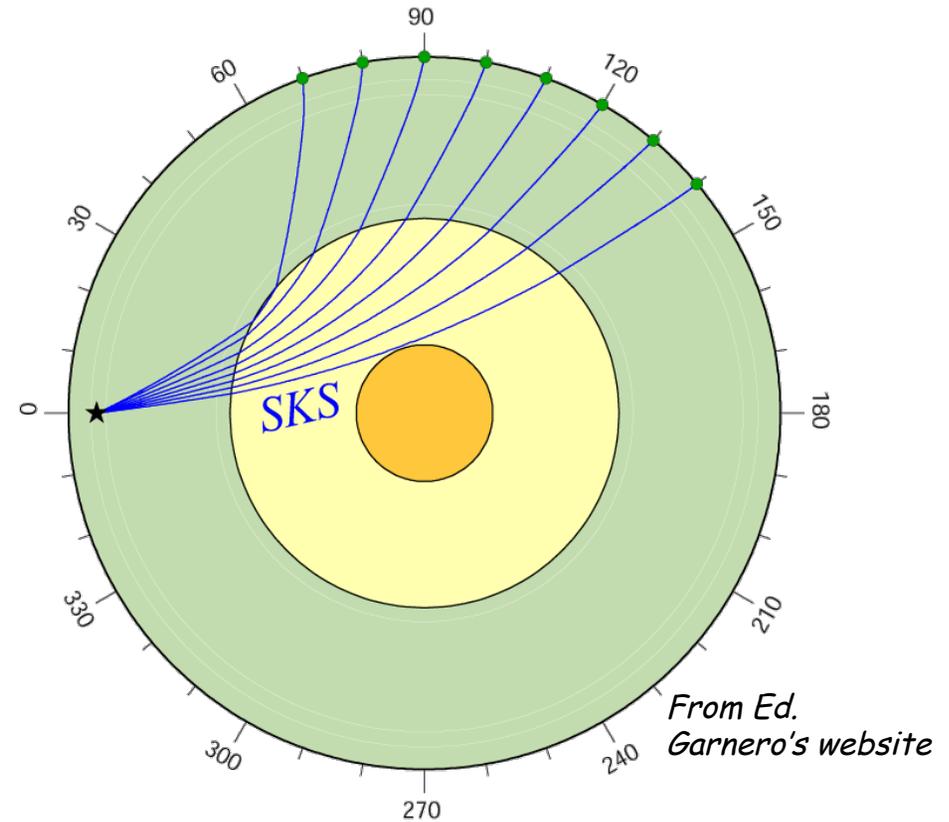
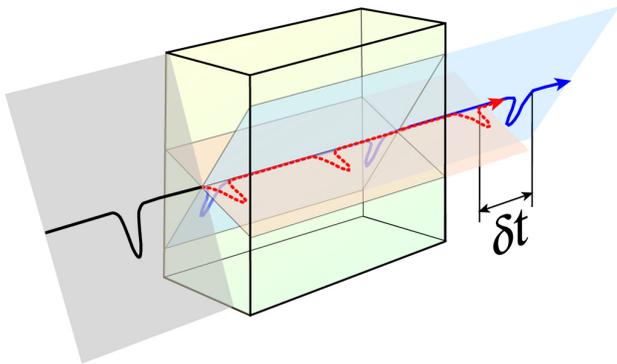


From Ed Garnero's website

(After Crampin, 1981)

"Splitting" des ondes SKS:

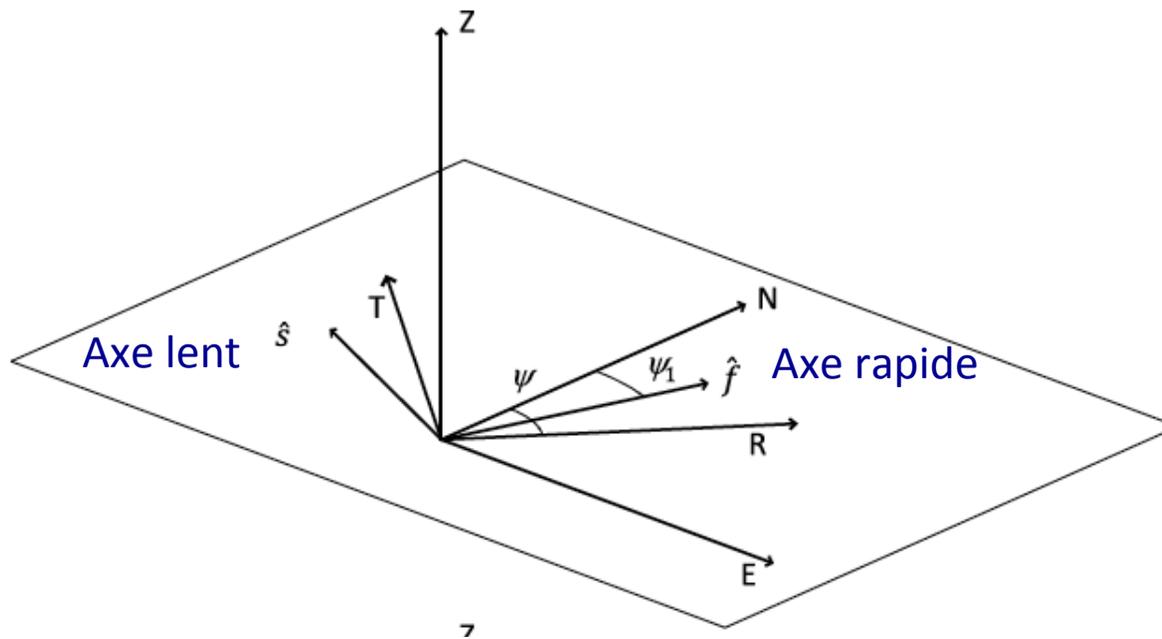
Milieu anisotrope



Dans un milieu isotrope, SKS est polarisé en "SV" et observé sur la composante radiale mais pas sur la composante transversale.

On représente le "splitting" moyenné en chaque station par 2 paramètres:

- > La direction de l'axe de vitesse rapide (Ψ_1)
- > la différence de temps entre l'onde lente et rapide: δt



$$\Psi - \Psi_1 = \beta$$

$$R(t) \sim \cos^2 \beta \cos \omega t + \sin^2 \beta \cos(\omega t - \omega \delta t)$$

$$T(t) \sim 0.5 \sin 2\beta \cos \omega t - 0.5 \sin 2\beta \cos(\omega t - \omega \delta t)$$

$$R(t) \sim \cos^2 \beta \cos \omega t + \sin^2 \beta \cos(\omega t - \omega \delta t)$$

$$T(t) \sim 0.5 \sin 2\beta \cos \omega t - 0.5 \sin 2\beta \cos(\omega t - \omega \delta t)$$

En supposant que $\omega \delta t \ll 1$, on obtient au 1^{er} ordre:

$$R(t) \approx \cos \omega t$$

$$T(t) \approx -0.5 \omega \delta t \sin 2\beta \sin \omega t$$

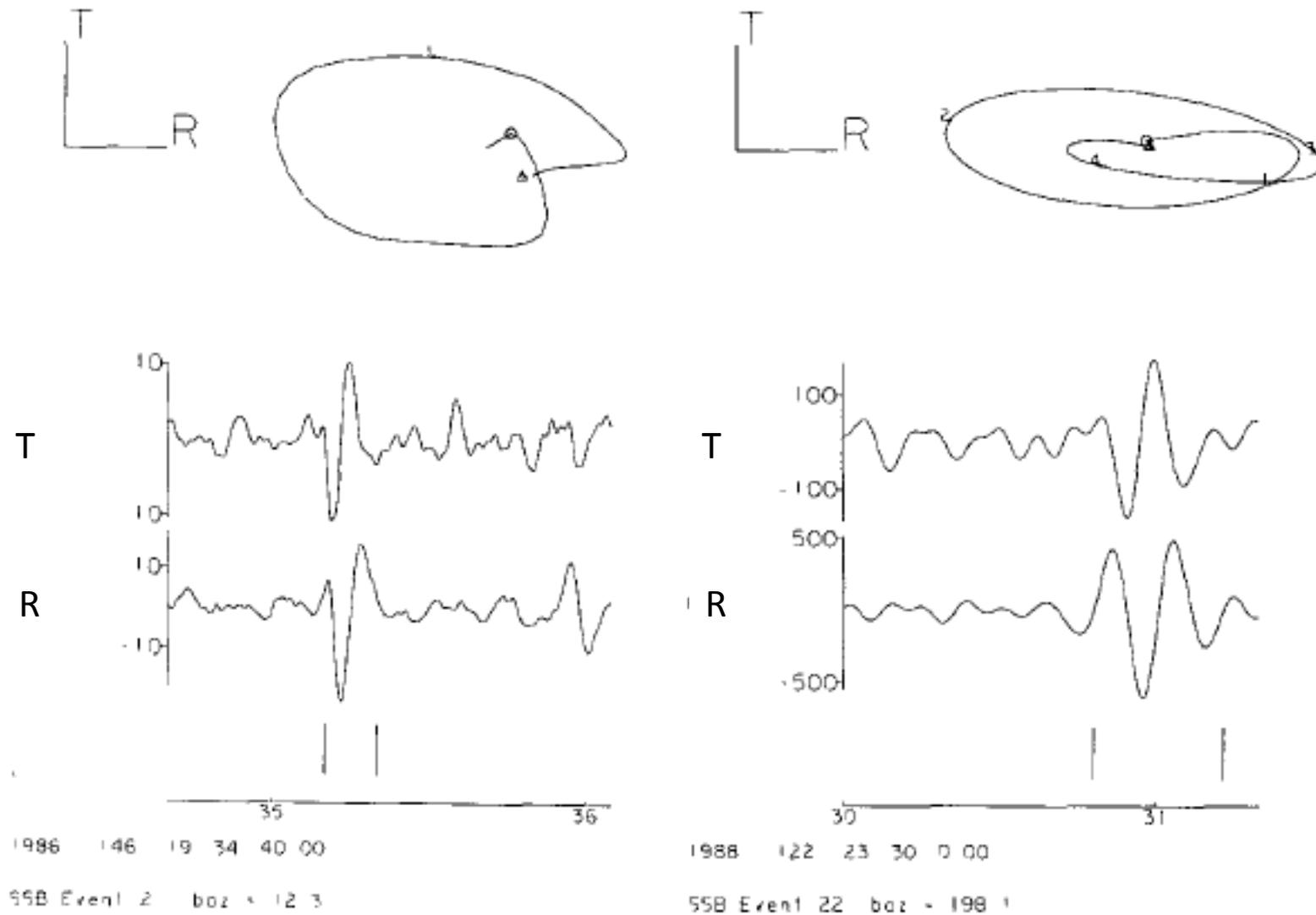
soit

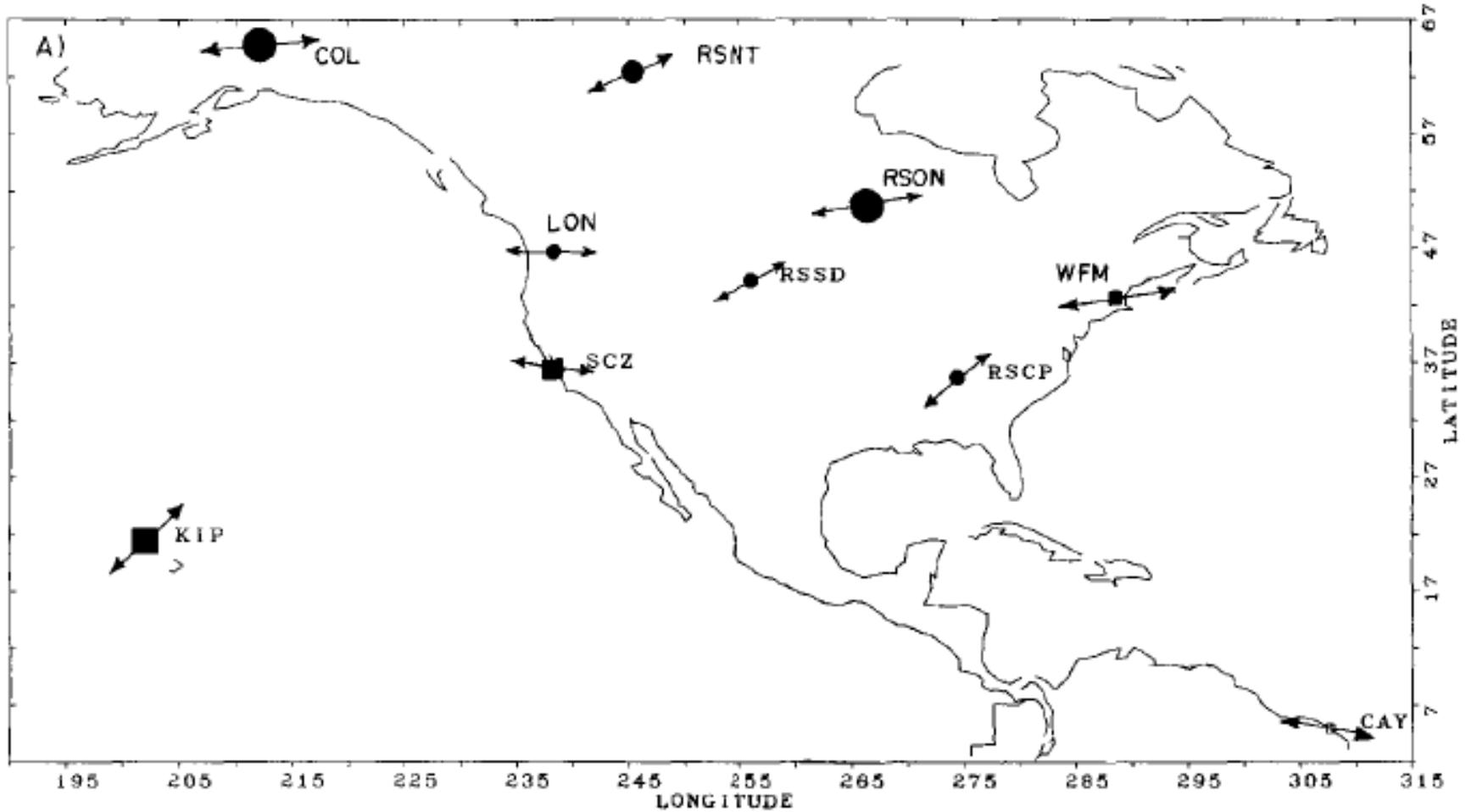
$$T(t) \approx 0.5 \delta t \sin 2\beta R'(t)$$

→ La composante T se comporte comme la dérivée en temps de la composante radiale

→ Le rapport d'amplitude T/R dépend de $\sin 2\beta$

Splitting des ondes SKS: Mouvement de particules elliptique :
 2 exemples à la station Geoscope: SSB

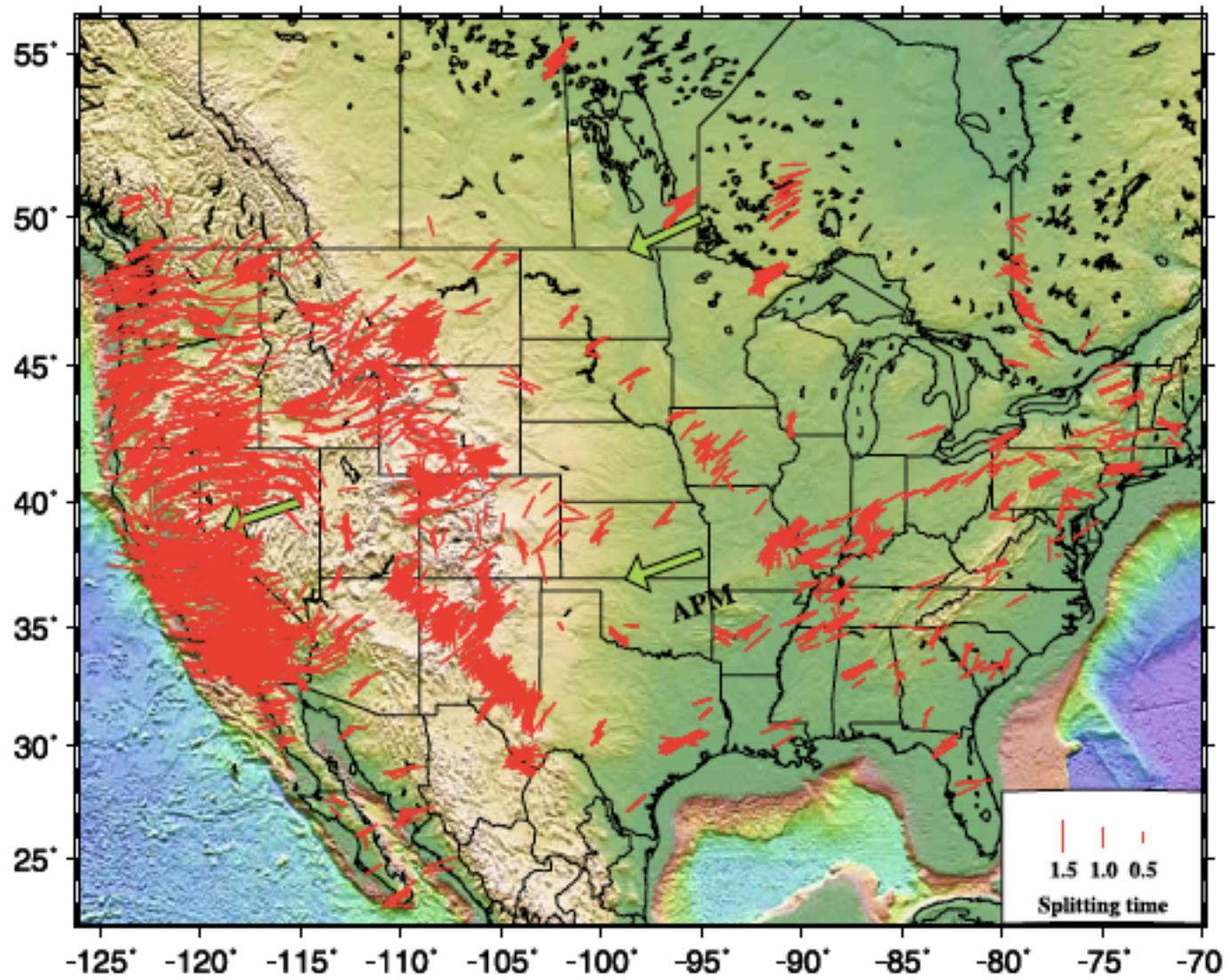




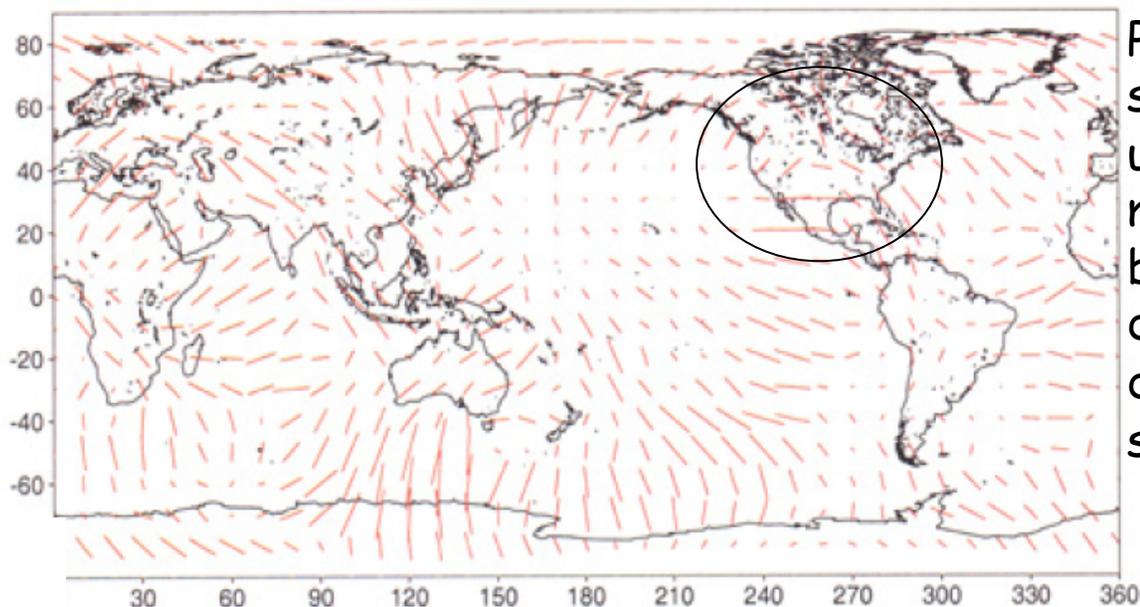
↔ δt (s)

$$\delta t = \frac{L}{v} \frac{\delta v}{v}$$

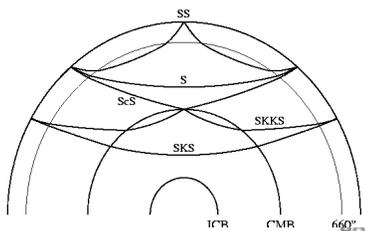
L = épaisseur de la couche anisotrope
 $\delta v/v$ = amplitude de l'anisotropie



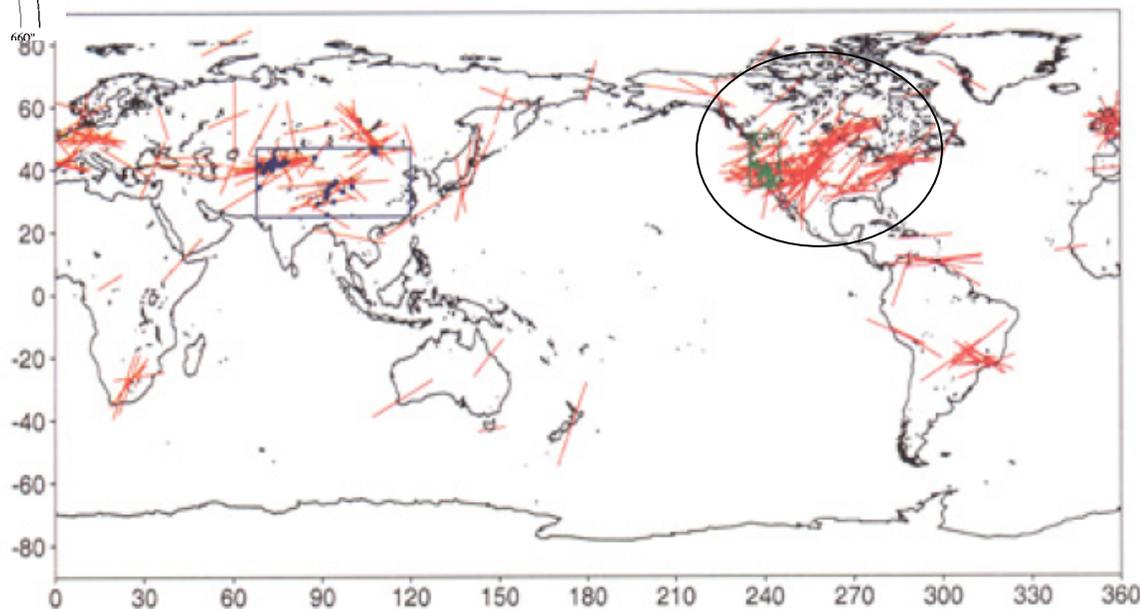
SKS [M & T data] AMAX=1.37



Predictions de splitting SKS pour un modèle du manteau supérieur basé sur l'inversion de la dispersion des ondes de surface



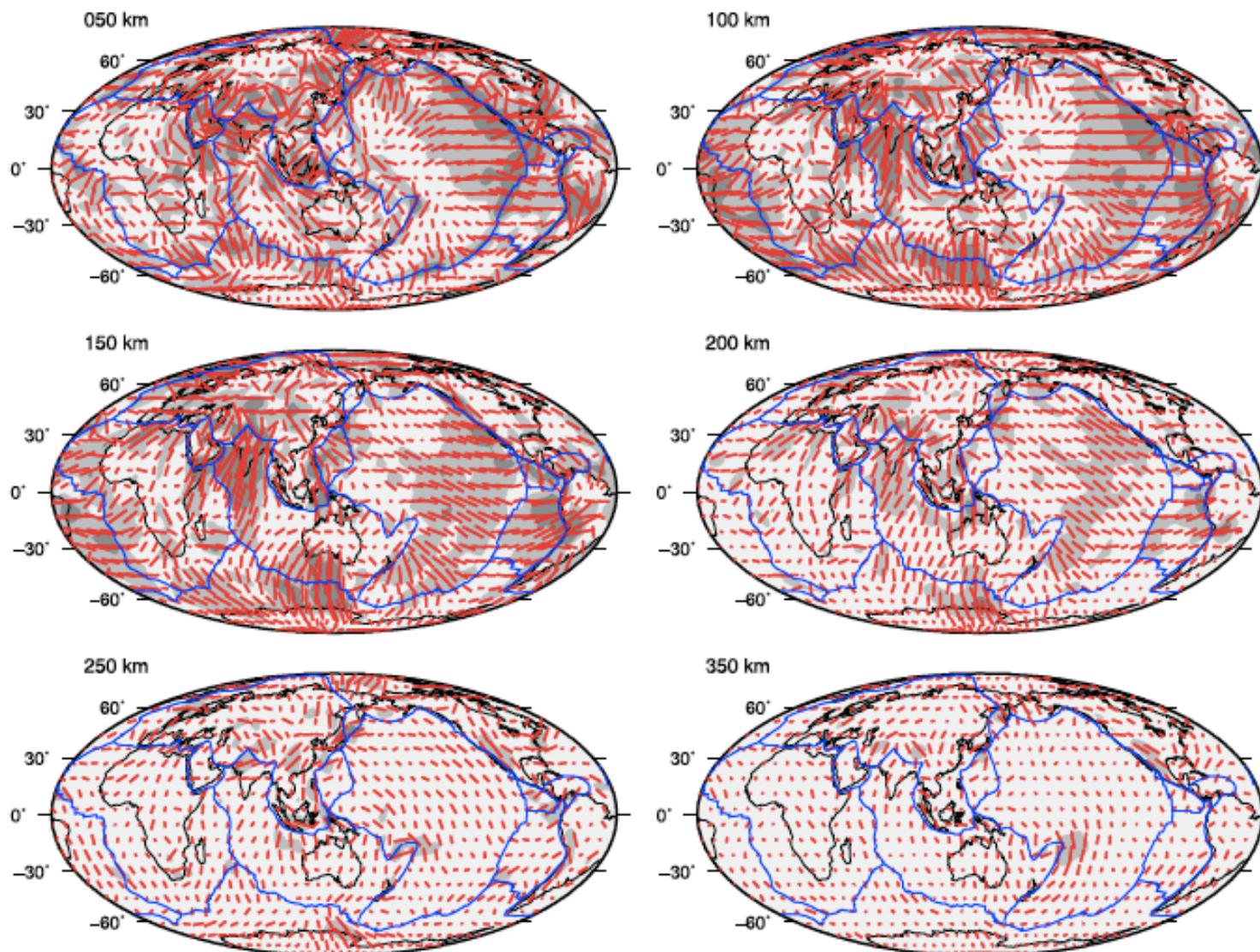
SKS [Silver 1996]



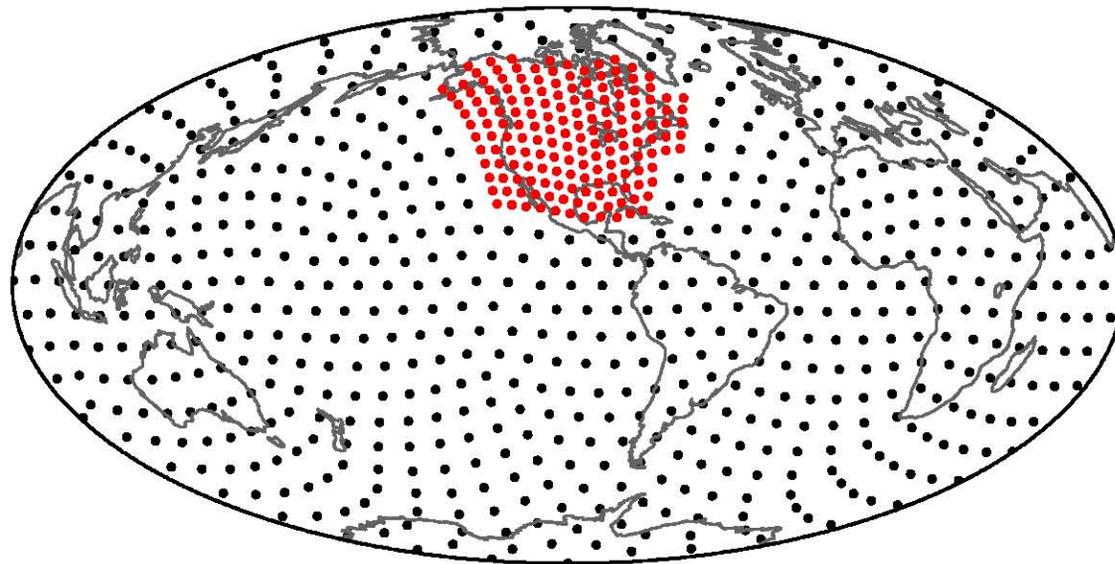
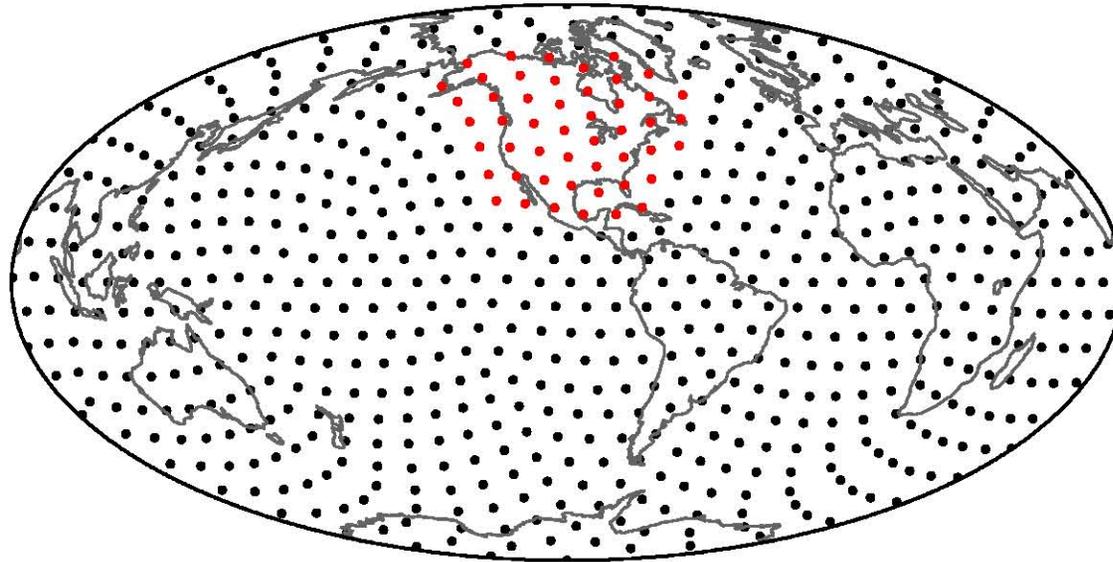
Mesures de Splitting SKS

Montagner
et al.
2000

| 4% peak to peak anisotropy

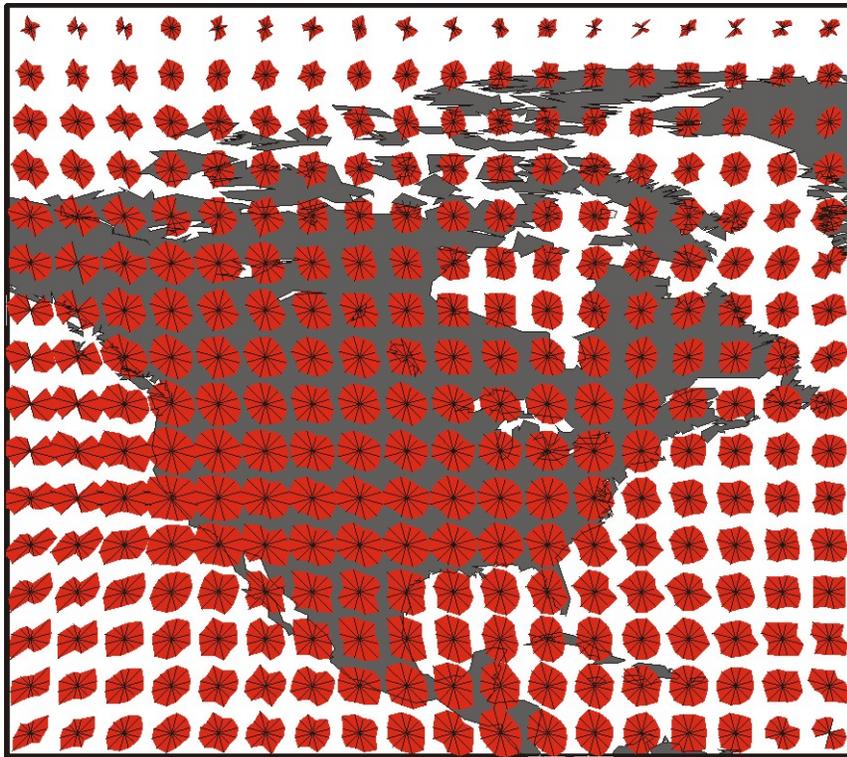


- Construction d'un modèle d'anisotropie azimuthale par inversion conjointe:
 - 1) Ondes de surface +harmoniques
 - 2) Splitting SKS

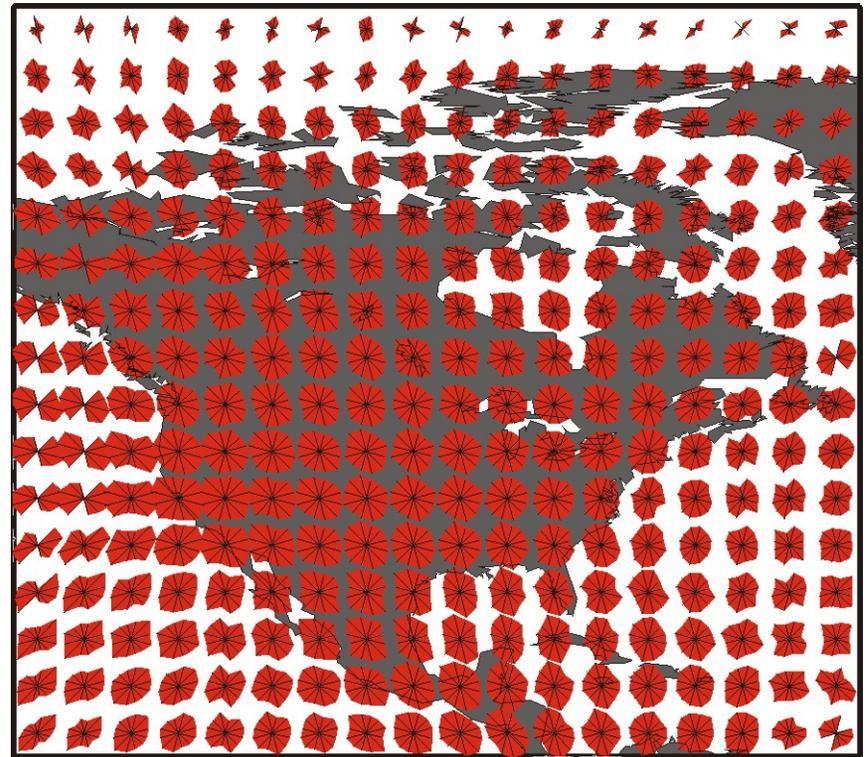


Couverture azimuthale

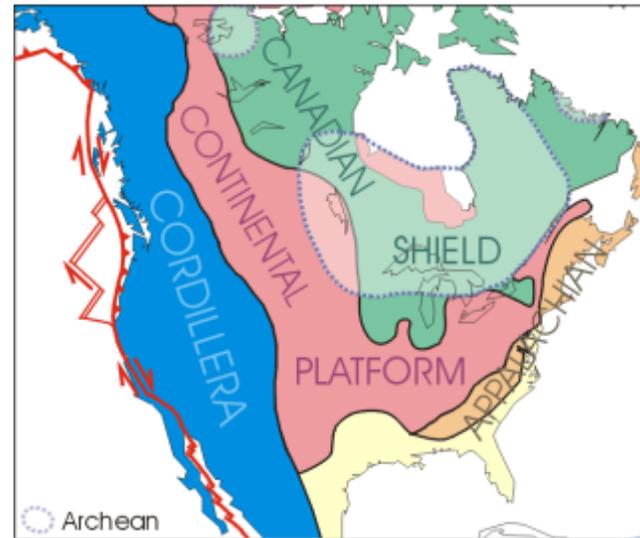
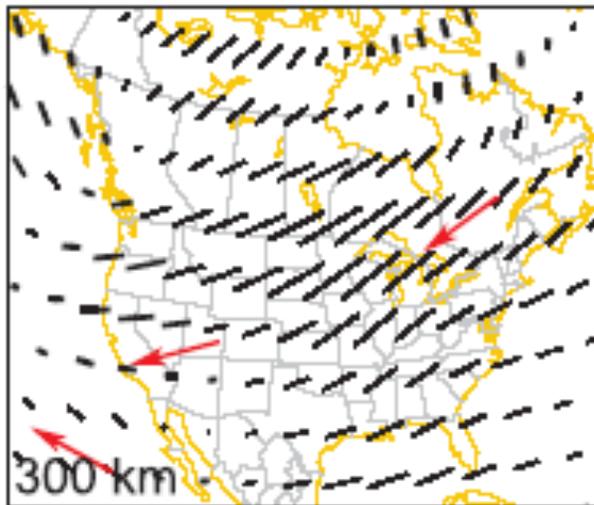
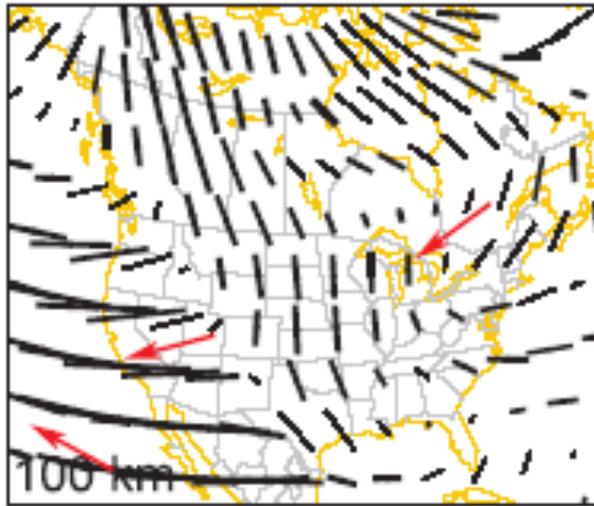
Z component



T component



Azimuthal Anisotropy

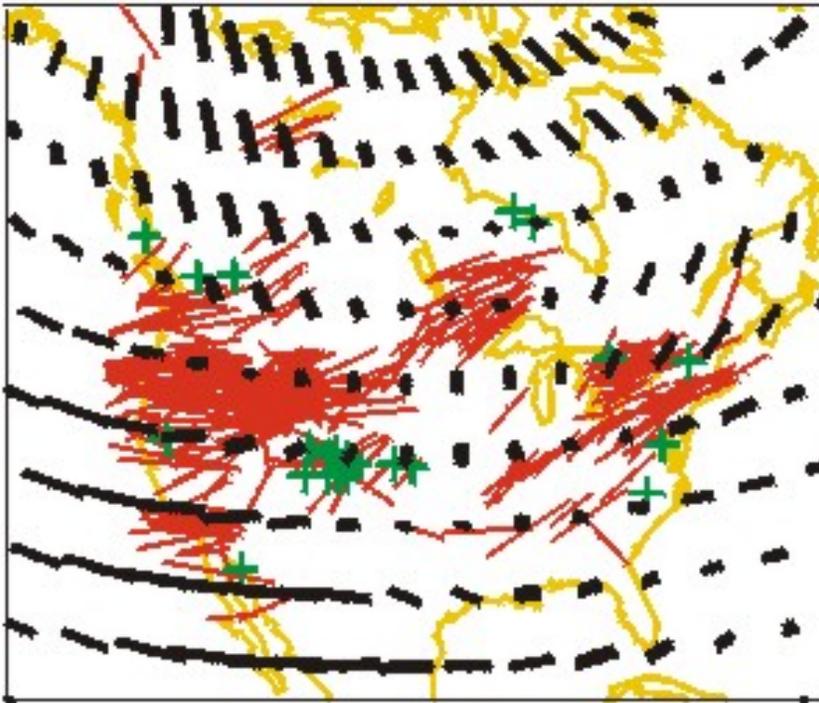


← Absolute Plate Motion

Peak-to-peak anisotropy 1% — 2% —

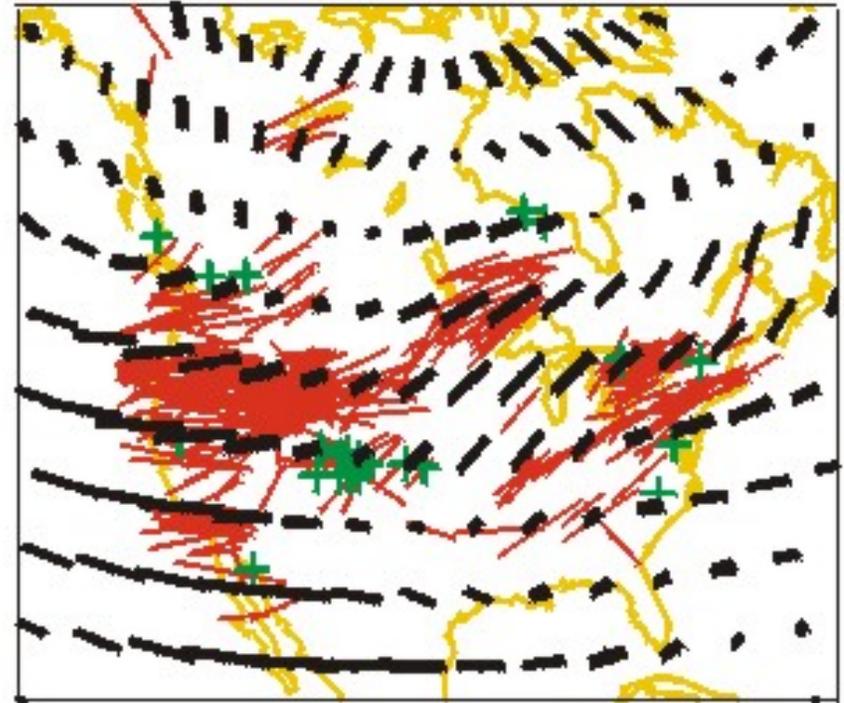
Comparison avec les données de splitting des ondes SKS

Model A



No SKS used in inversion

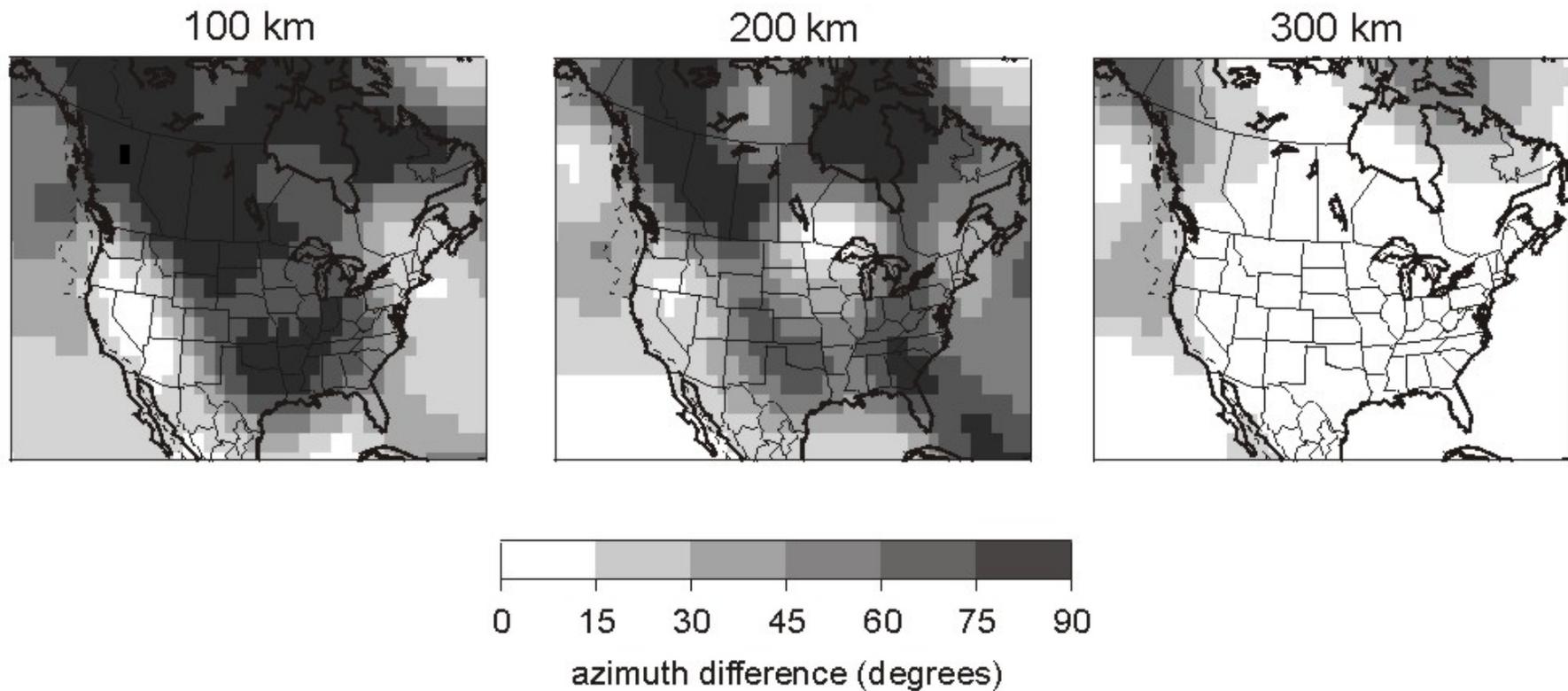
Model B



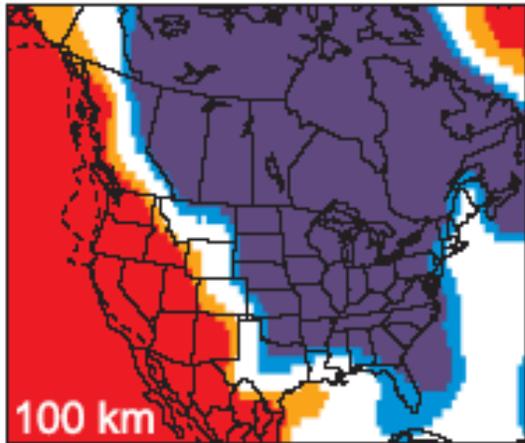
Joint inversion of Ip. Waveforms
and SKS splitting data

Delay time $1s$ —
 $2s$ —

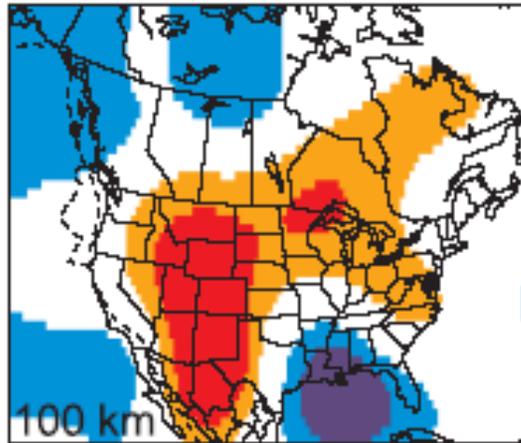
Différence entre la direction de l'axe rapide et la vitesse absolue de la plaque



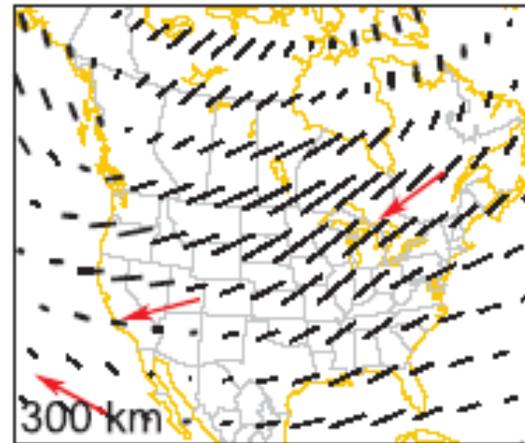
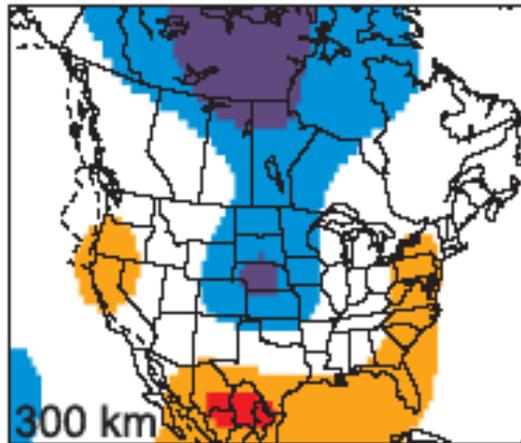
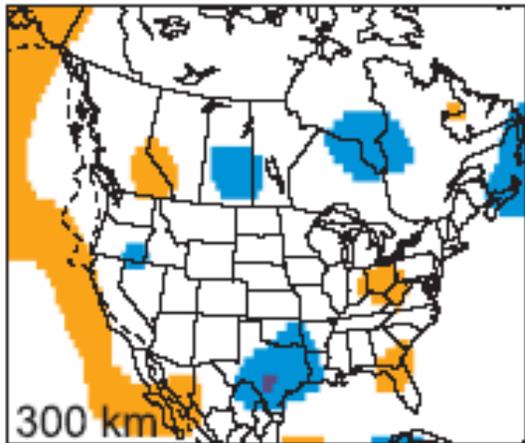
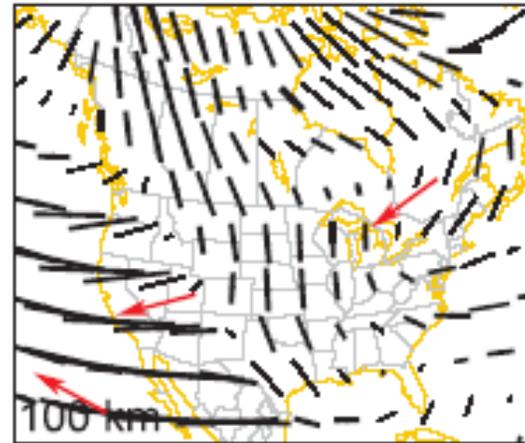
Isotropic S-velocity



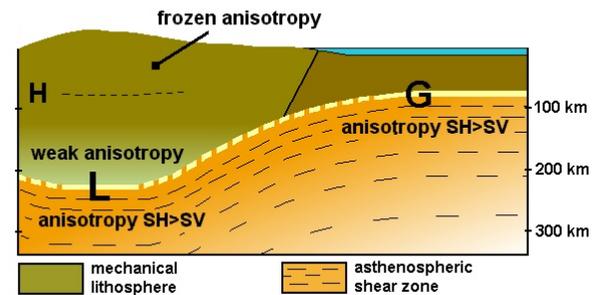
Radial Anisotropy



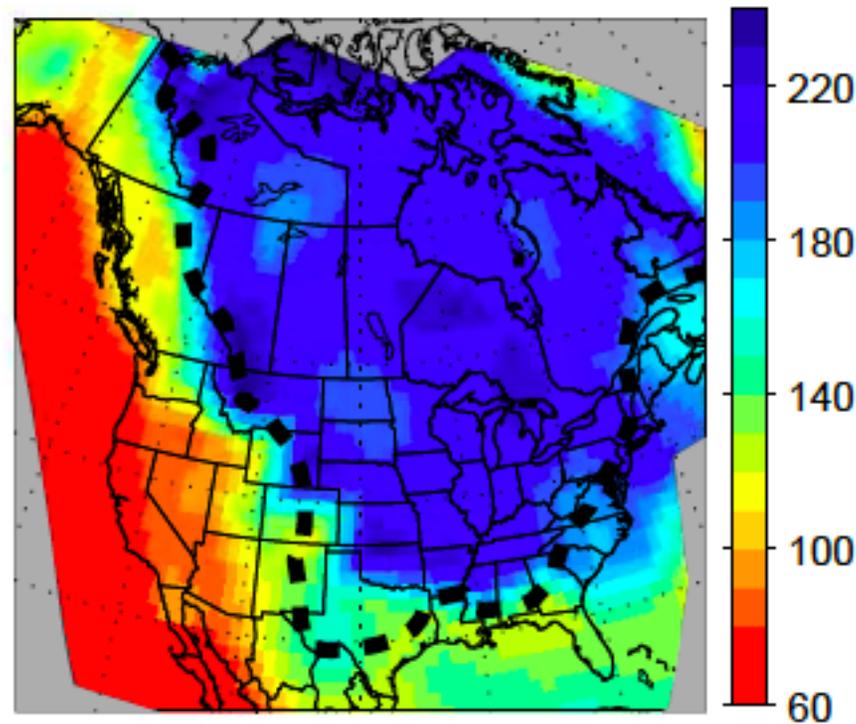
Azimuthal Anisotropy



Marone and Romanowicz, 2007



Épaisseur de la lithosphère continentale à partir de l'imagerie de l'anisotropie azimuthale:

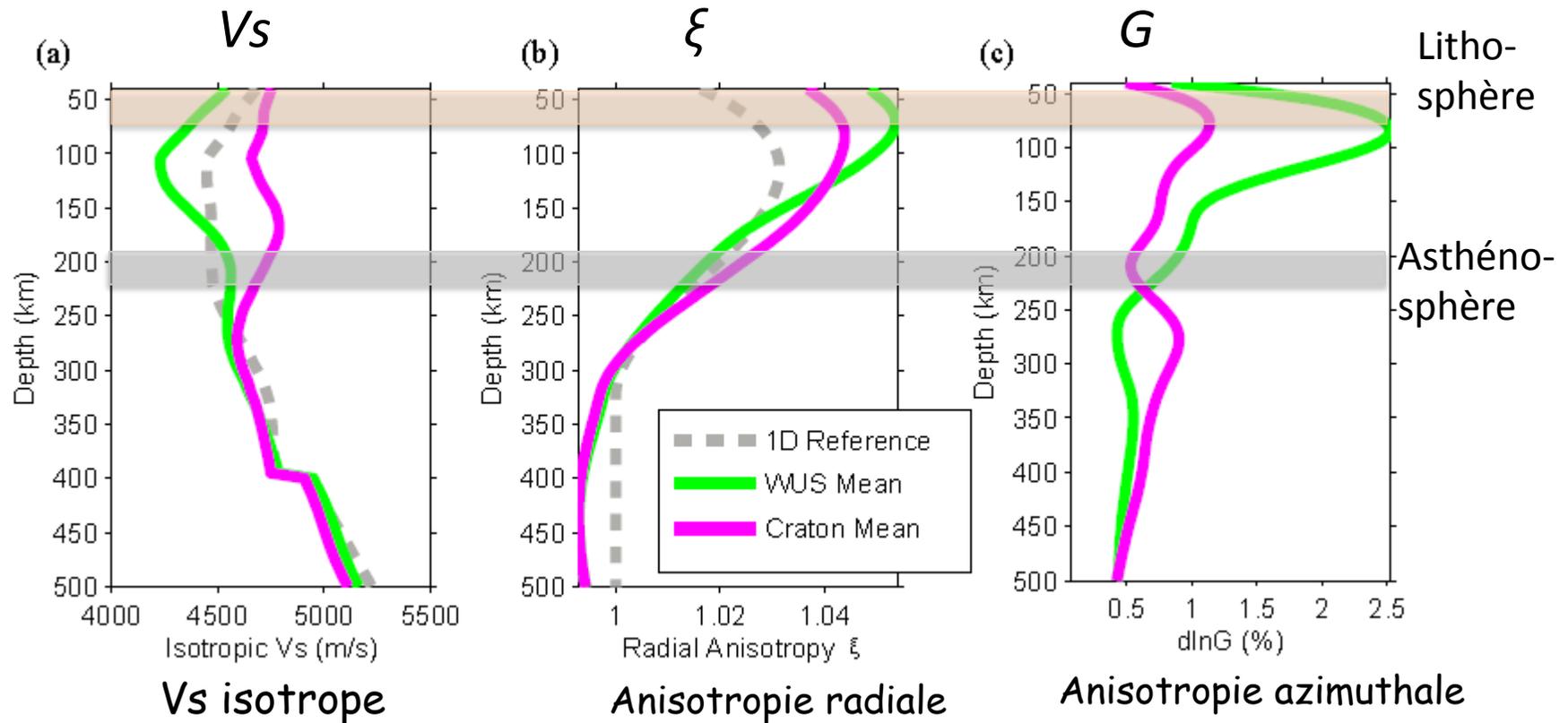


Yuan and Romanowicz, 2010

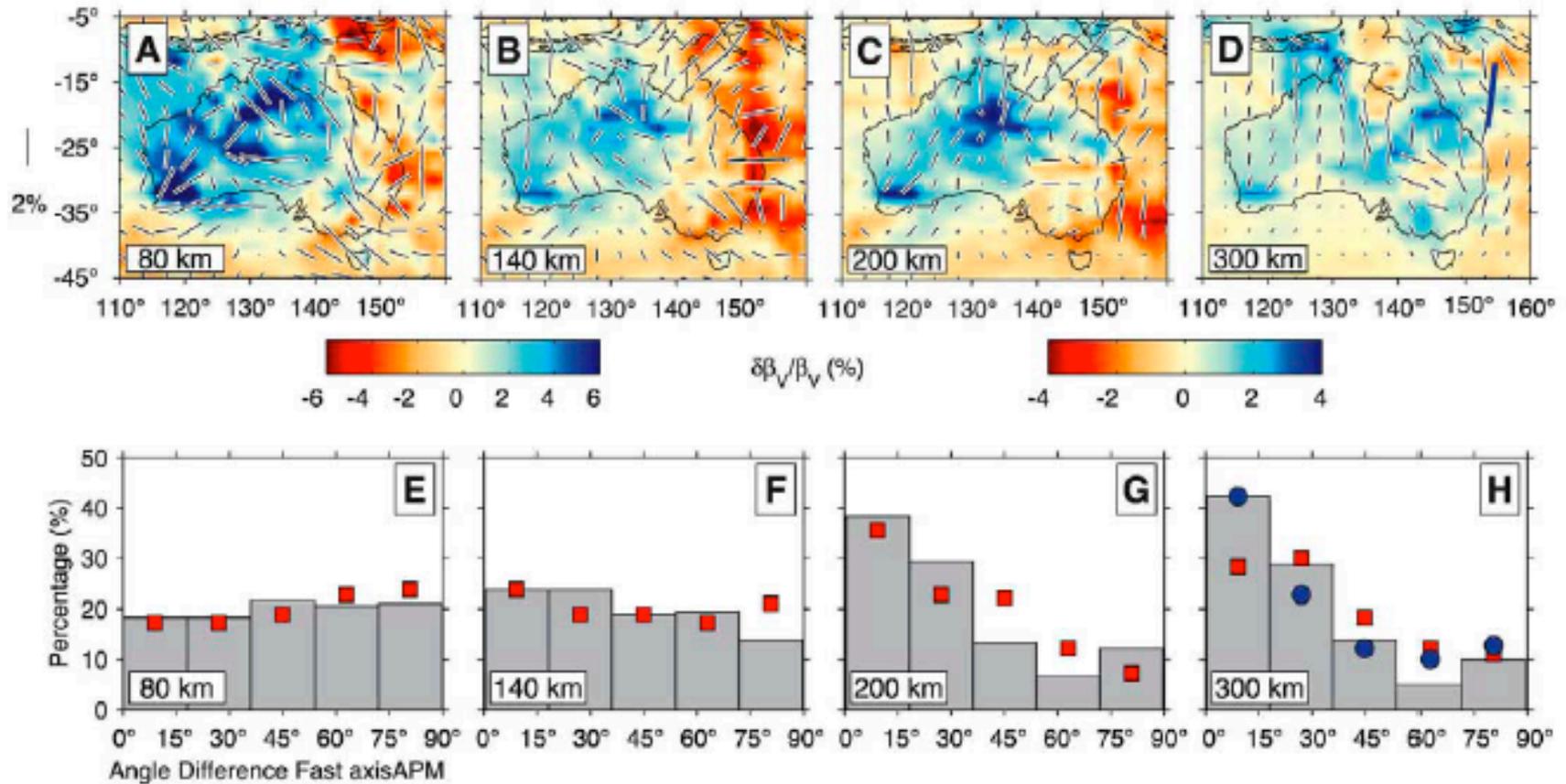
A la transition entre la lithosphère et l'asthénosphère, on observe un changement de direction de l'axe rapide de l'anisotropie azimuthale vers une direction qui s'aligne avec la direction du mouvement absolu de la plaque

Profils des différents paramètres élastiques en fonction de la profondeur:

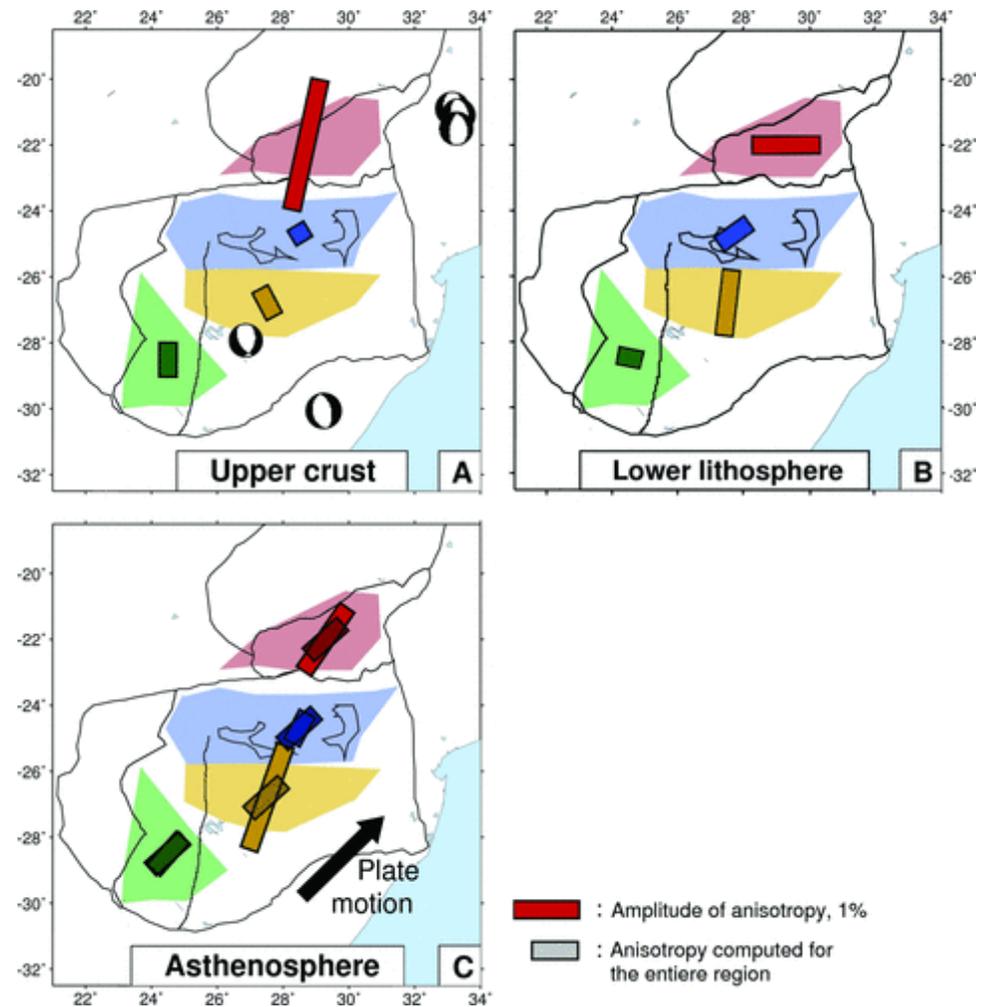
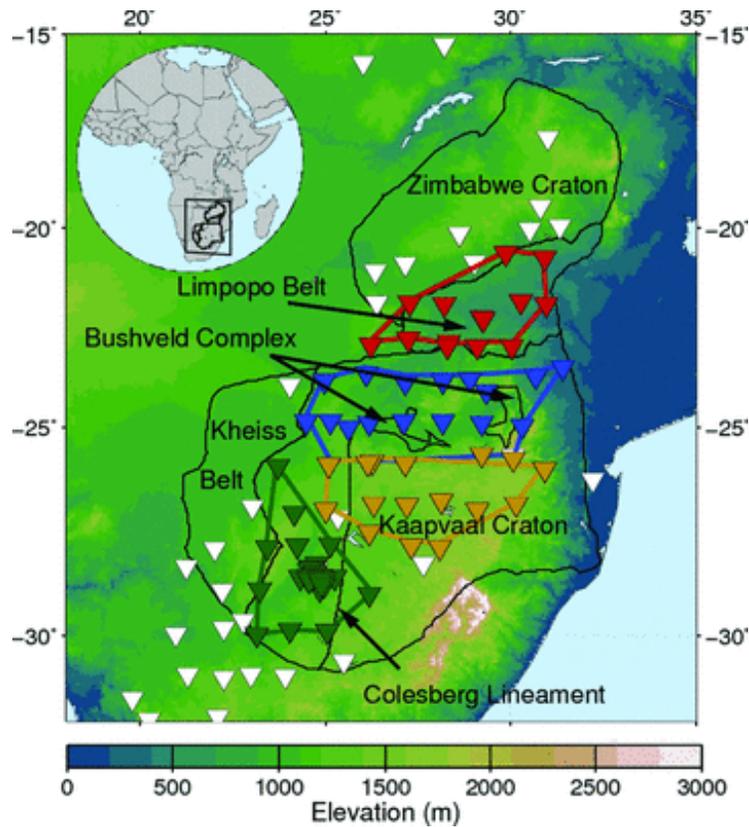
Contraste entre le craton et l'ouest de l'Amérique du Nord



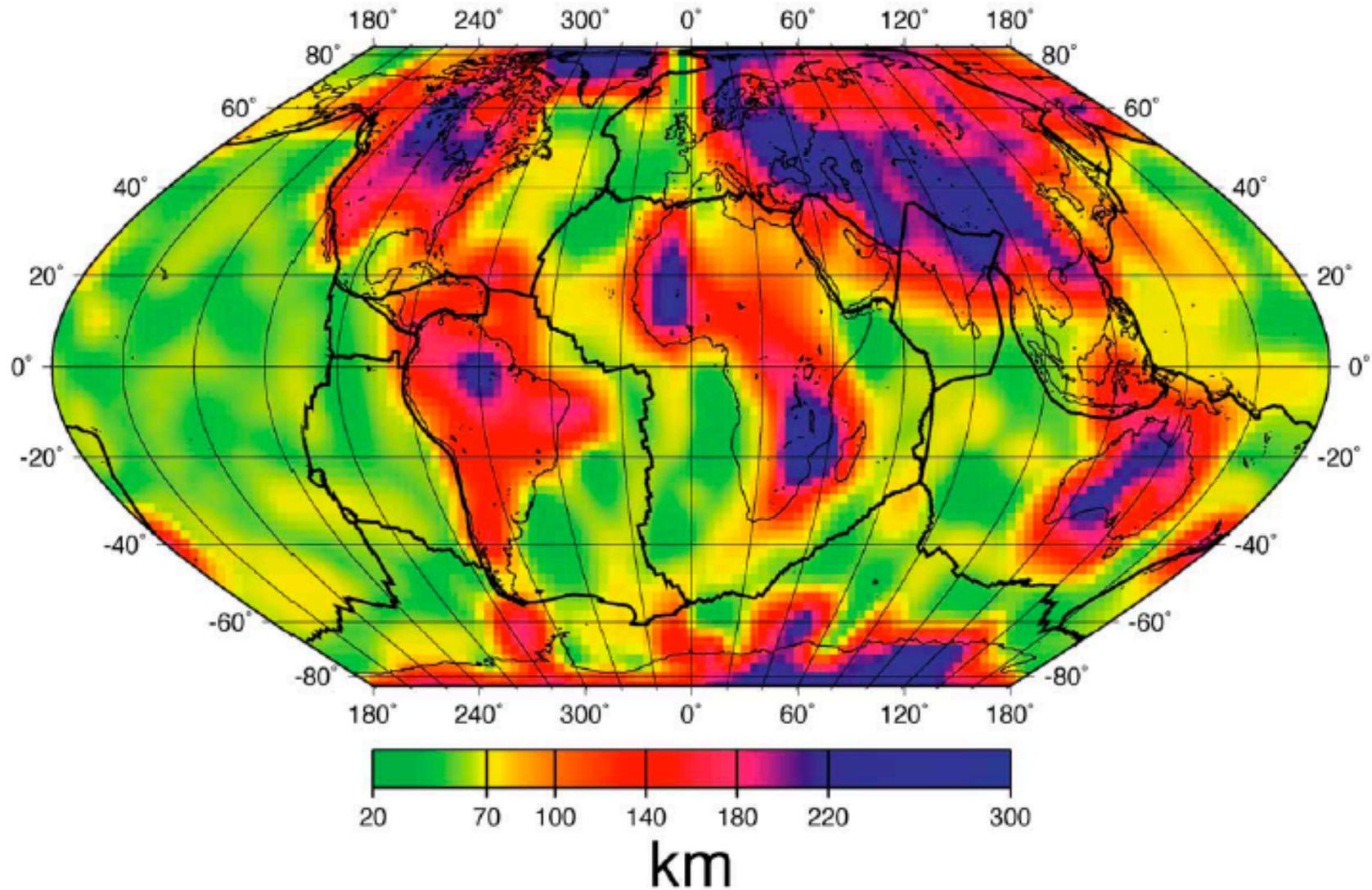
Cas du continent australien



Anisotropie azimuthale sous l'Afrique du Sud à partir de mesures de dispersion des ondes de surface



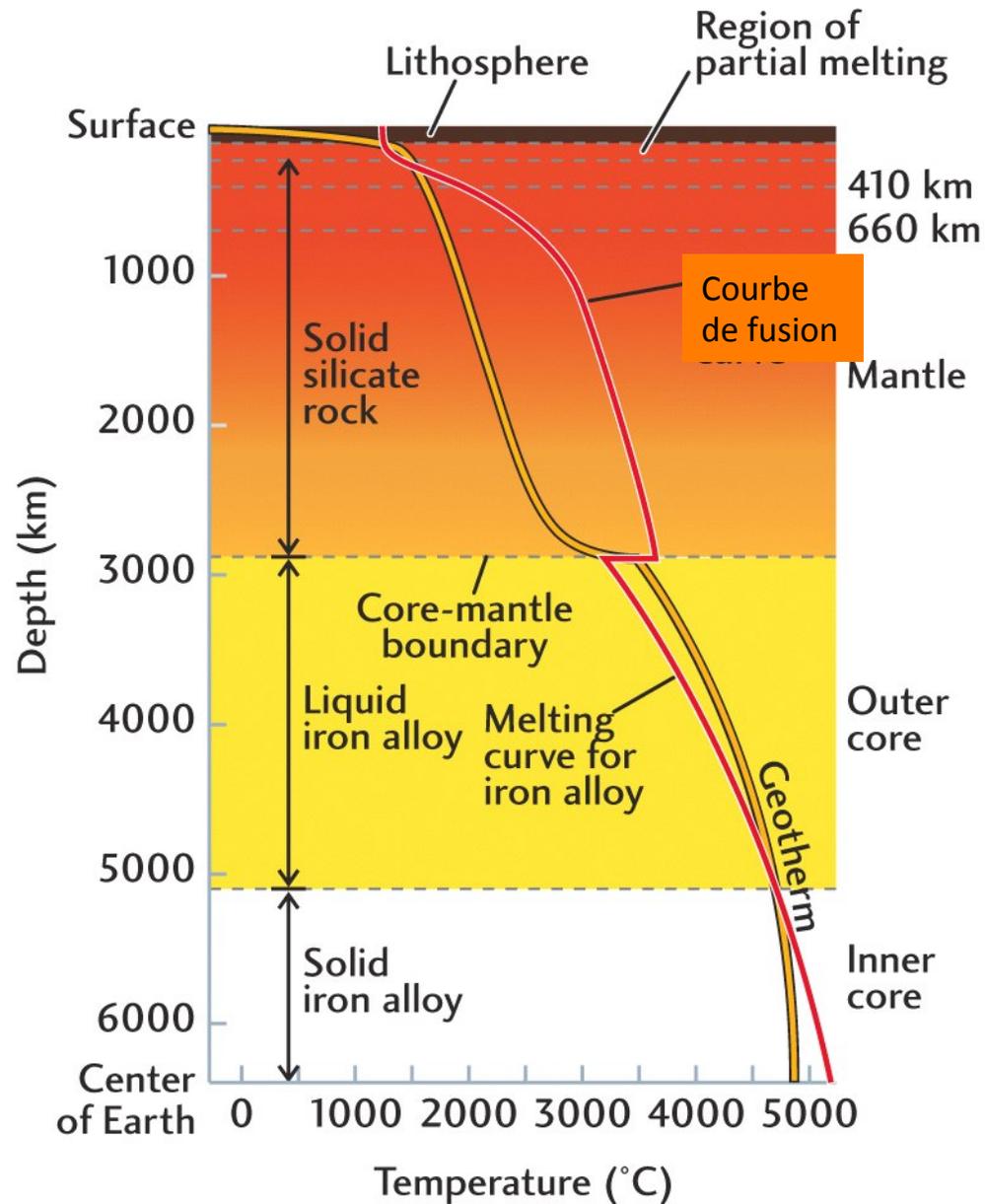
Exemple de carte globale de la limite lithosphère-asthénosphère à partir de mesures d'anisotropie sismique



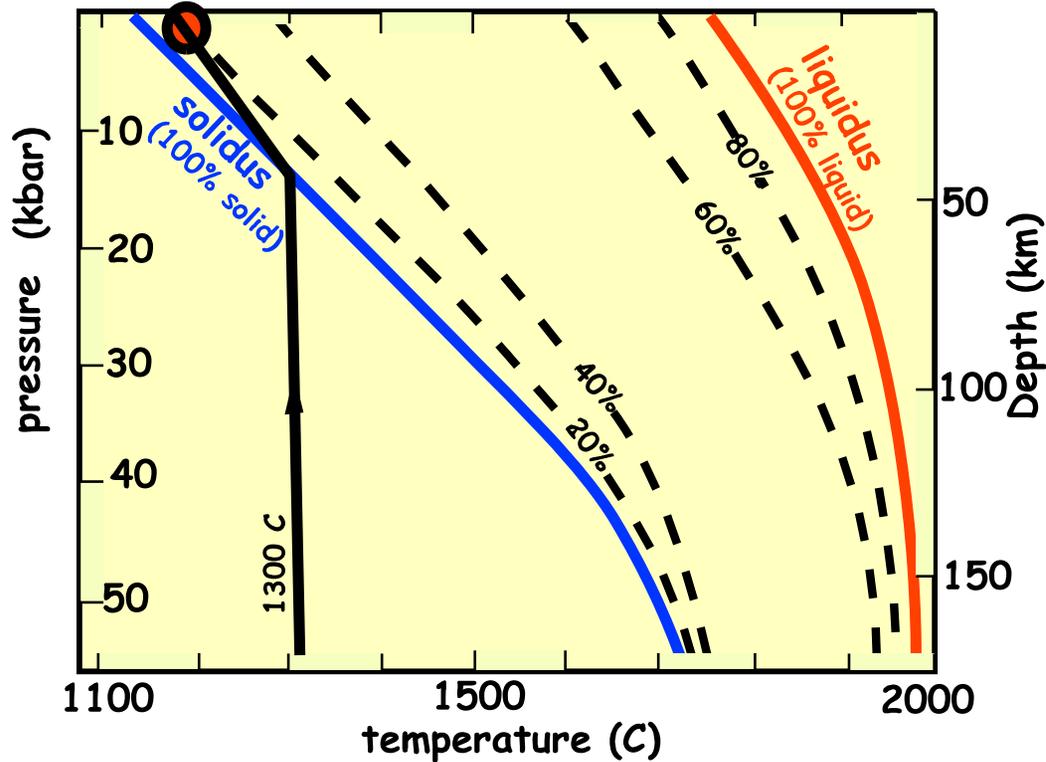
Plomerova et al., 2002

- Nature physique de la zone à faible vitesse et de la LAB dans les océans:
 - Effets purement thermiques ?
 - Déshydratation de la plaque au moment de sa formation (conséquence de la fusion partielle, séparation basaltes et harzburgite) (*Gaherty and Jordan, 1996*)
 - -> lithosphère : harzburgite appauvrie en eau
 - -> asthénosphère: péridotite plus hydratée
 - Présence de fusion partielle dans l'asthénosphère

Géotherme et fusion partielle dans le manteau



Fusion partielle par décompression



Décompression d'un morceau de roche provenant du manteau à une température potentielle de 1300°C. Lorsqu'il traverse le solidus il commence à fondre. A peu près 20% aura fondu à l'arrivée à la surface.

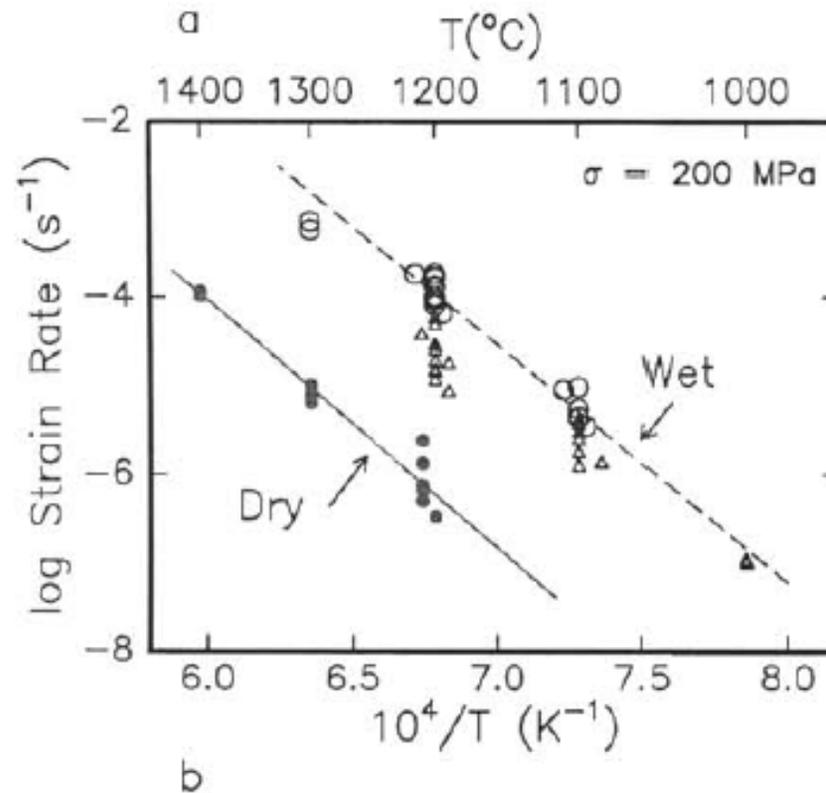
Fusion partielle et contenu en eau

- La fusion partielle commence à plus basse température en présence d'eau
- On peut estimer la profondeur à laquelle la fusion commence à la ride en fonction de la proportion d'eau contenue dans la roche mère et le géotherme
- La fusion partielle influence la distribution en eau:
 - Solubilité de l'eau dans le produit de fusion est $\sim 10^3$ fois plus grande que dans la roche mère, le processus de fusion à la ride peut efficacement "sécher" le manteau.
- La fusion partielle au dessous des rides médio-océaniques n'est pas contestée. Mais loin des rides, sa présence est très controversée
 - > peu d'influence sur les vitesses sismiques pour les quantités de fusion partielle estimées à partir des échantillons de roches (1-3%) (n'explique pas la zone à faible vitesse)
- La présence d'eau a une influence importante sur la viscosité et sur les vitesses sismiques (par l'intermédiaire du facteur de qualité Q)

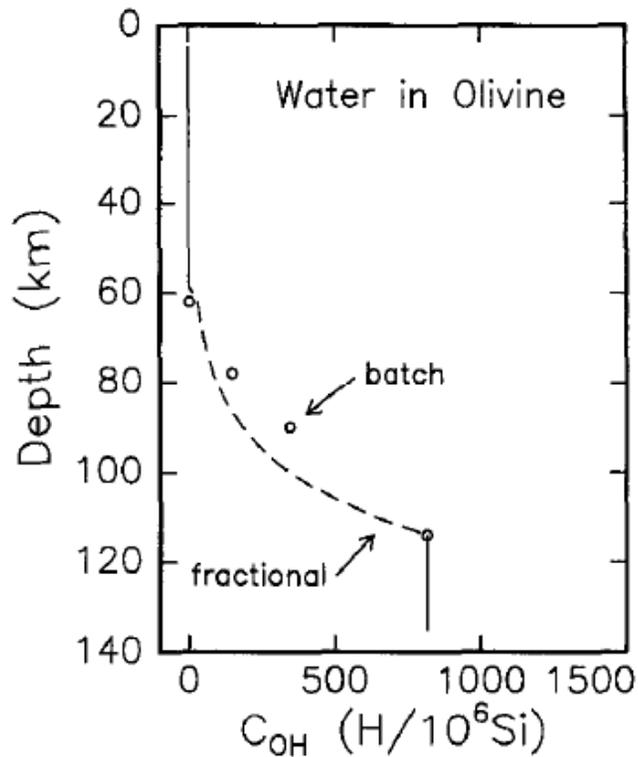
Effet de l'eau sur la viscosité

- Mesures de la quantité d'eau dans les MORBs (Mid Ocean Ridge Basalts) des rides océaniques: 0.05% (masse) H_2O
- MORBs issus de 10-20% de fusion partielle de la péridotite
 - $> 125 \pm 75 \cdot 10^{-6}$ (masse) H_2O dans la roche source
 - $> 810 \pm 490 \text{ H} / 10^6 \text{ Si}$ dans l'olivine (modèle pyrolitique)
- Comparaisons avec les mesures de laboratoire sur la variation de viscosité avec le contenu en H de l'olivine (*Hirth and Kohlstedt, 1996*)
 - $>$ viscosité du manteau est 500 ± 300 fois plus faible que celle de l'olivine sèche à T,P donnés

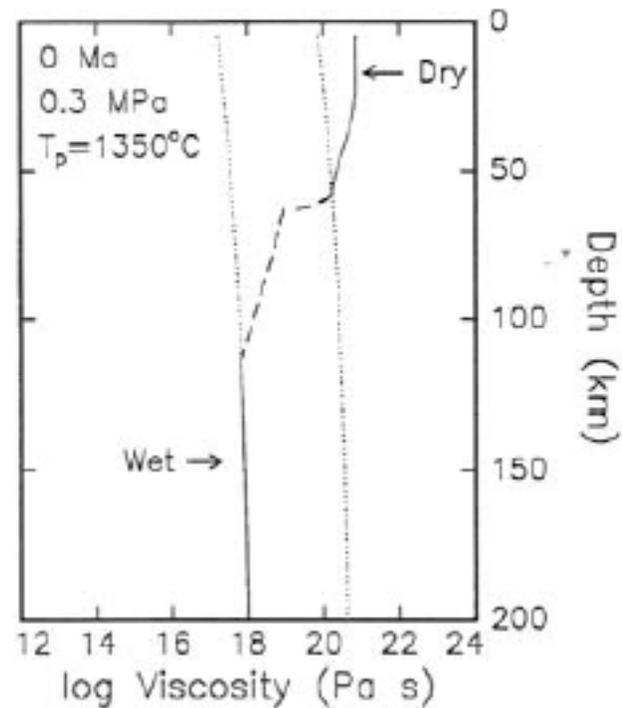
La viscosité du manteau est 500 ± 300 fois plus faible que celle de l'olivine sèche à T,P donnés



- Solubilité de l'eau dans le produit de fusion est $\sim 10^3$ fois plus grande que dans la roche mère, le processus de fusion à la ride peut efficacement "sécher" le manteau.



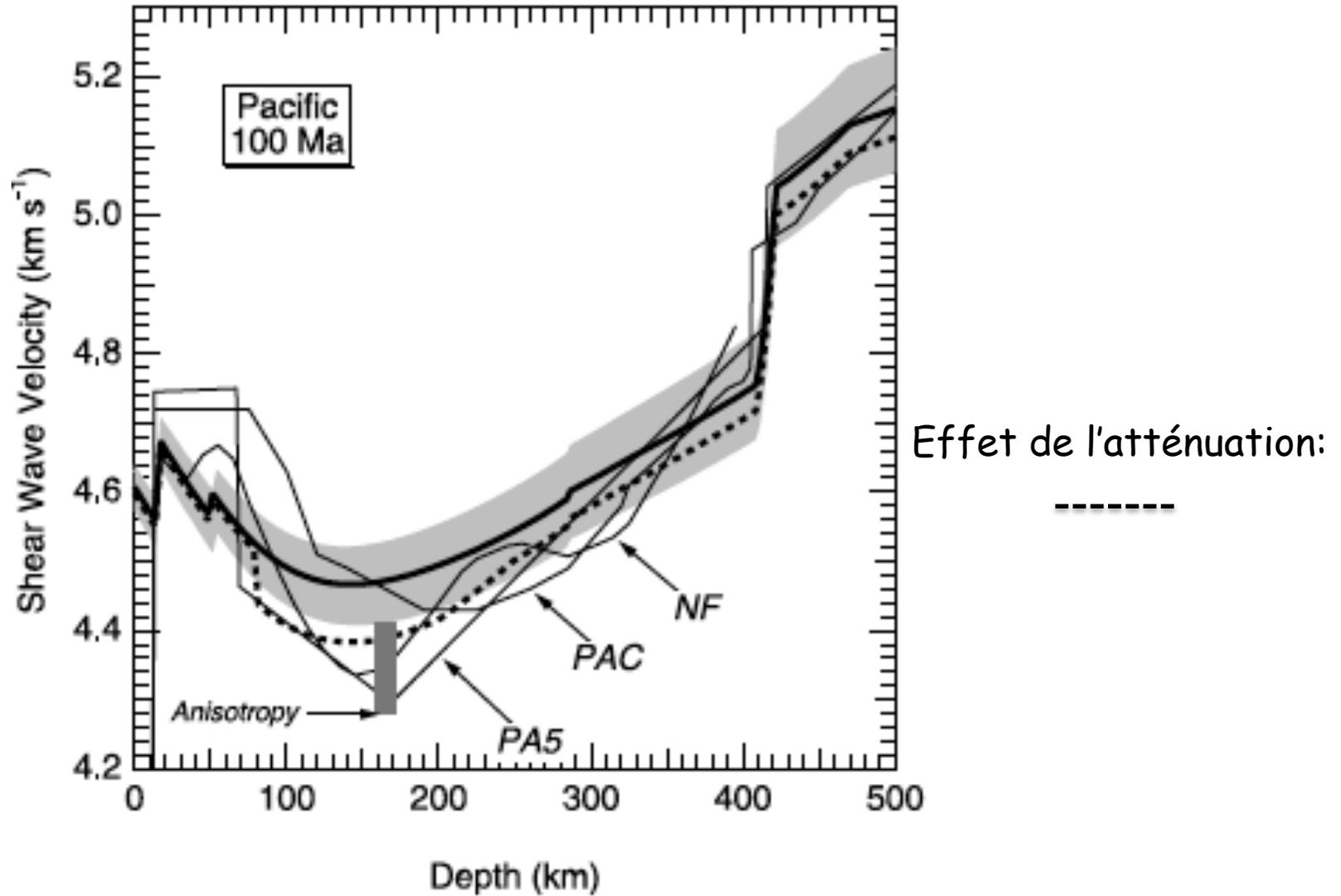
Pour un géotherme adiabatique



Hirth and Kohlstedt, 1996

- -> Lithosphère océanique "sèche" et asthénosphère "hydratée"
- -> Diffusion de H lente dans les roches du manteau: la distribution d'eau ne doit pas changer beaucoup en fonction de l'âge de la lithosphère
- -> Possibilité de transition brusque entre la lithosphère et l'asthénosphère:
 - Viscosité
 - Vitesses sismiques réduites (effet de l'eau par l'intermédiaire de l'atténuation (Q^{-1}), Karato and Jung, 1998)

Modèle pyrolitique et vitesses sismiques "observées"

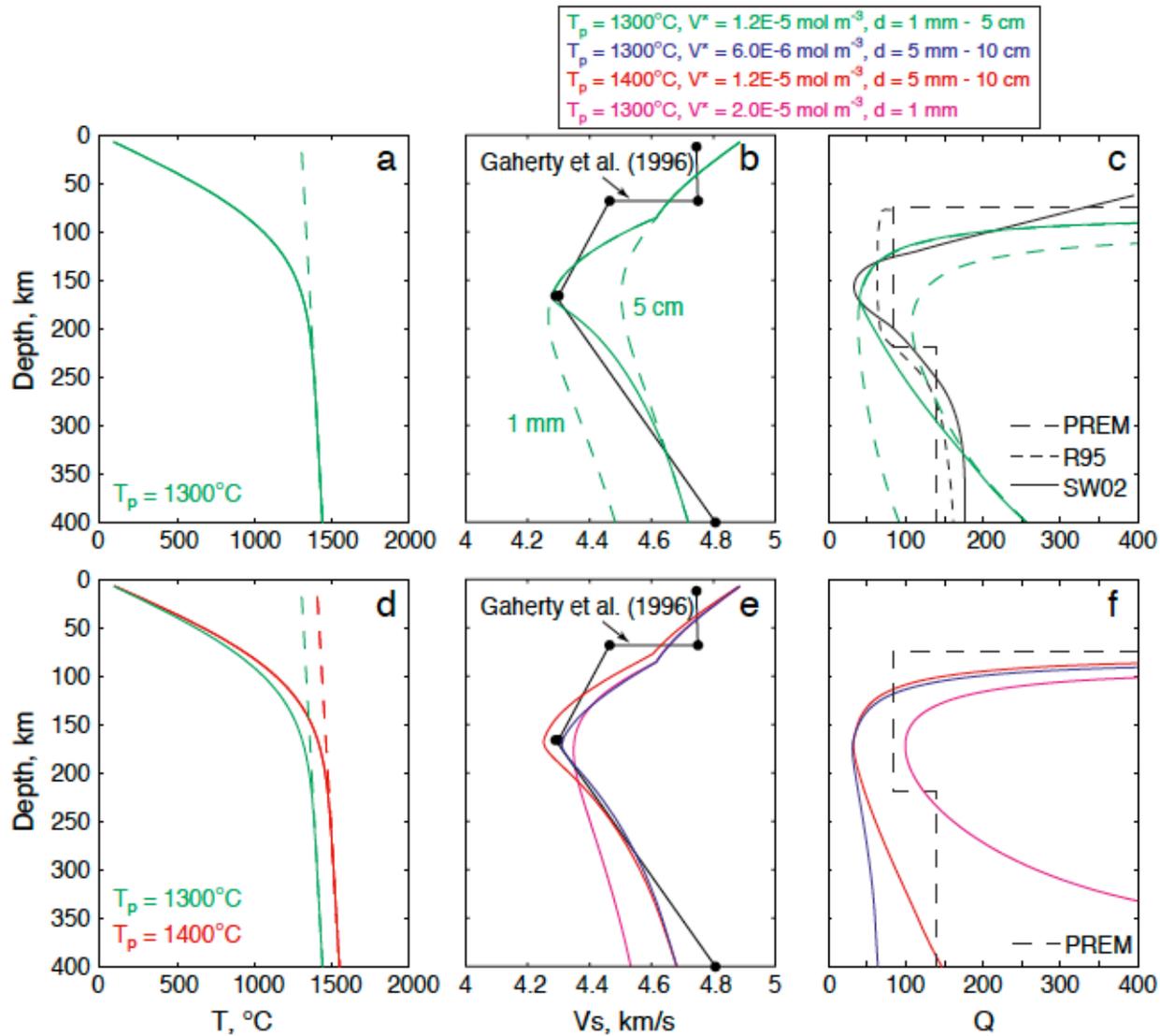


- Retour aux observations sismiques (et magnéto-telluriques):
 - Présence d'eau dans l'asthénosphère océanique?
 - Présence de fusion partielle loin des rides?

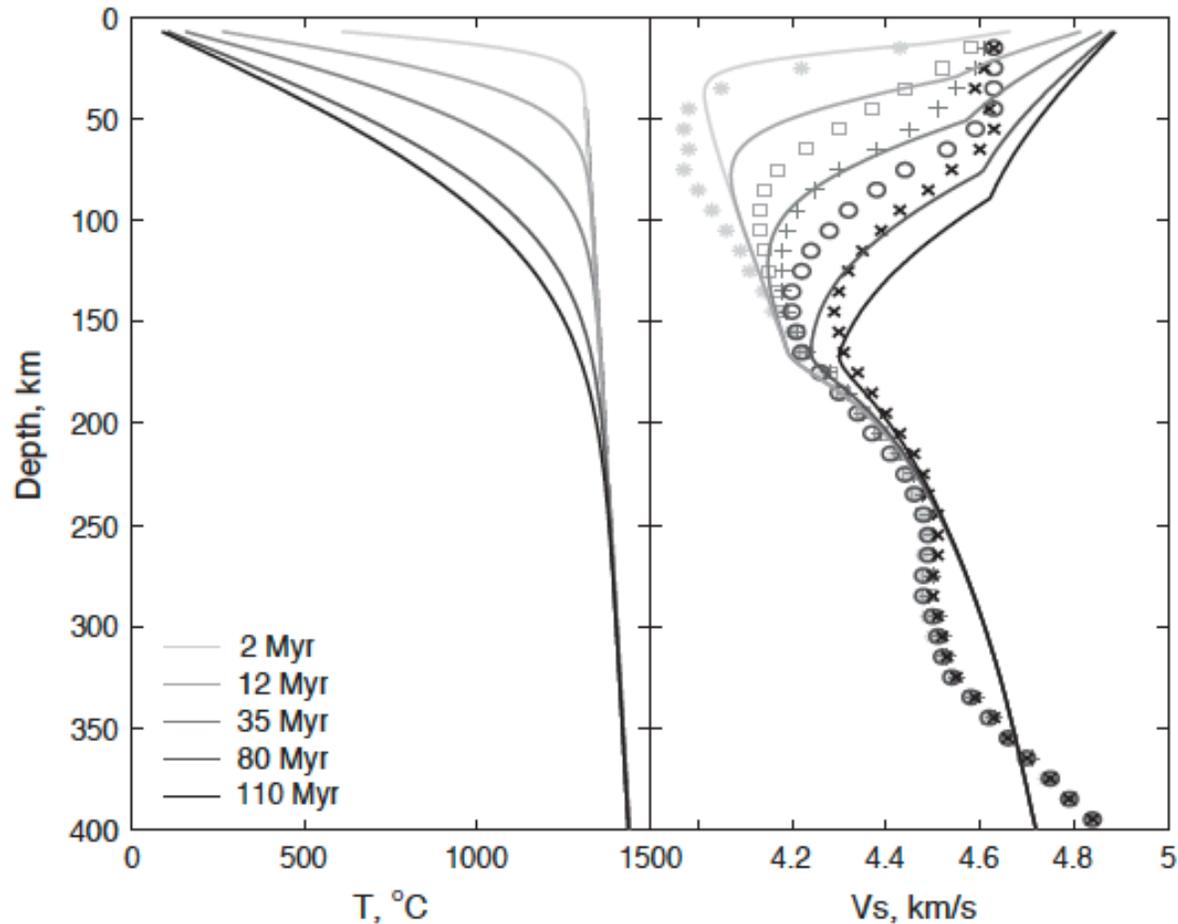
Mesures de vitesses sismiques et facteur de qualité en laboratoire: confrontation avec les modèles sismiques

Lithosphère
océanique à
100 Ma

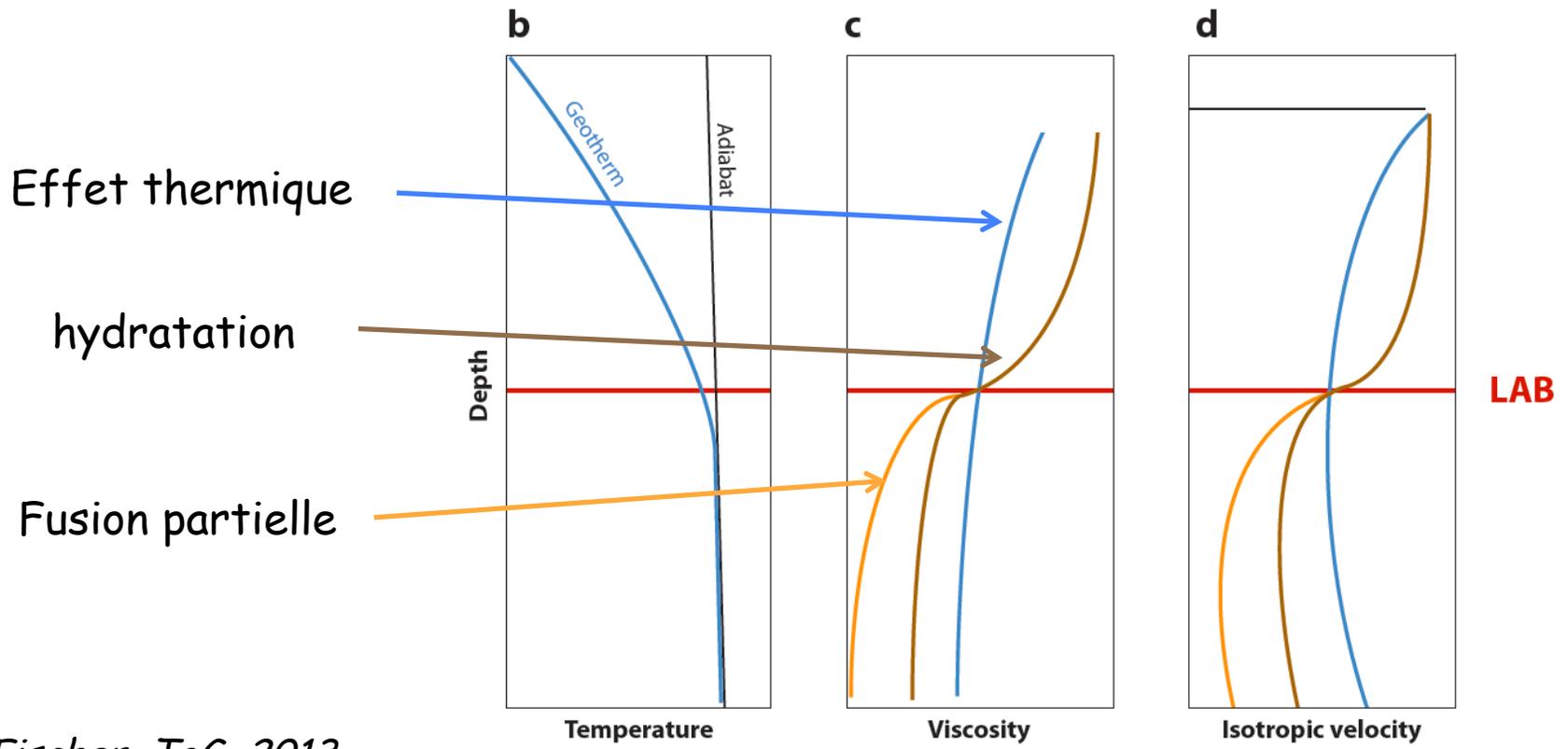
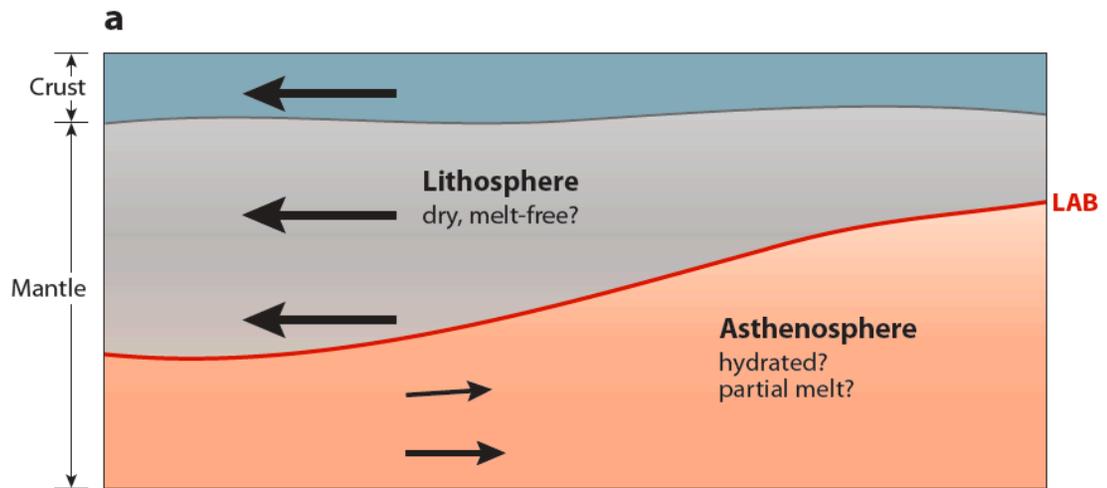
Olivine
sèche



Olivine polycristalline en l'absence de fusion partielle

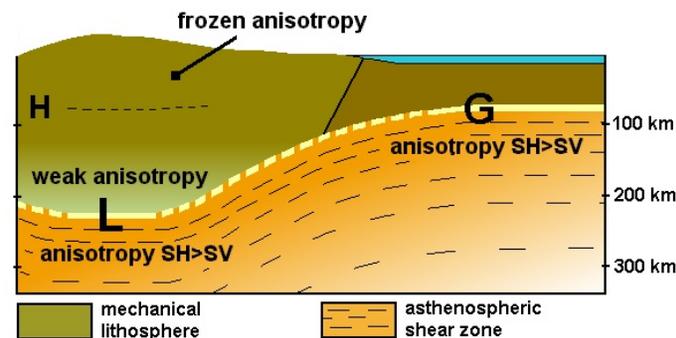


- > *Symboles*: modèles sismiques de Nishimura and Forsyth (1988)
- > *Lignes continues*: profils de vitesse calculés pour les géothermes correspondants

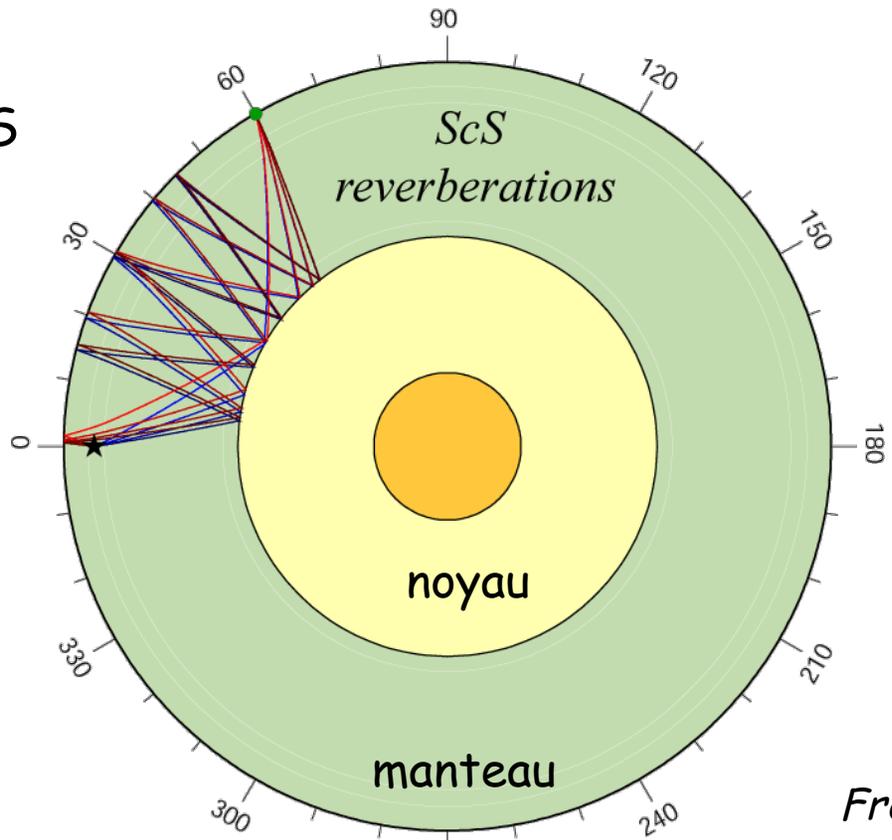


Stratification dans le manteau supérieur sous les océans (et les continents):

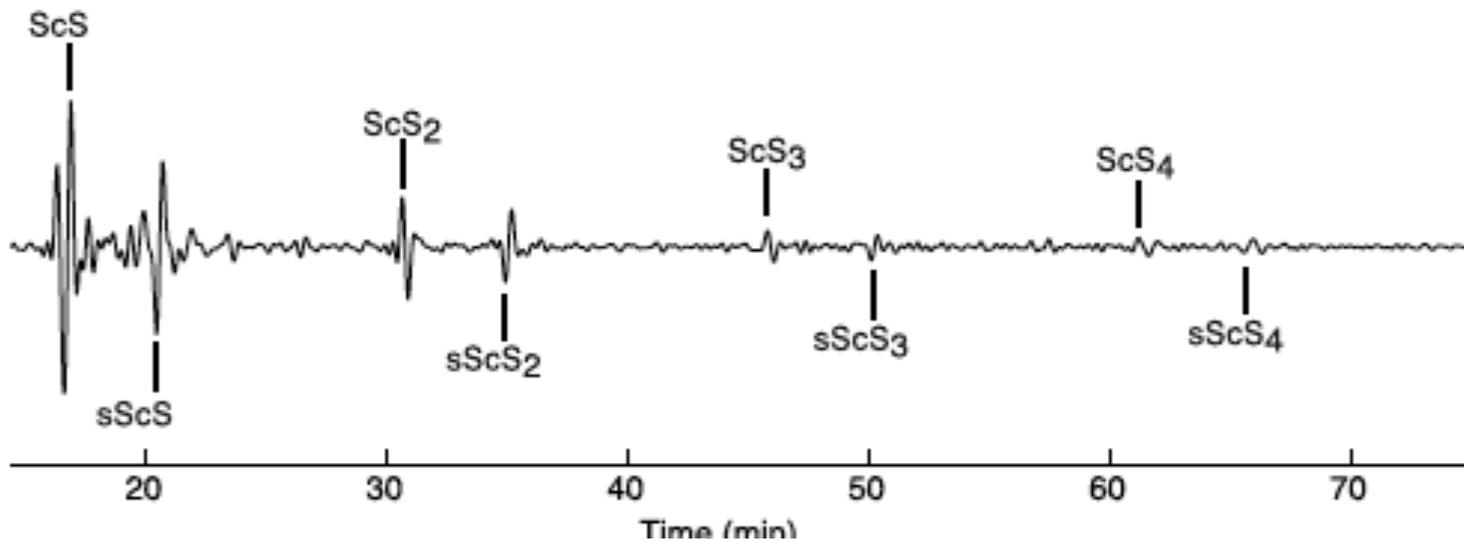
-> ondes de volume réfléchies et converties sur les discontinuités de structure



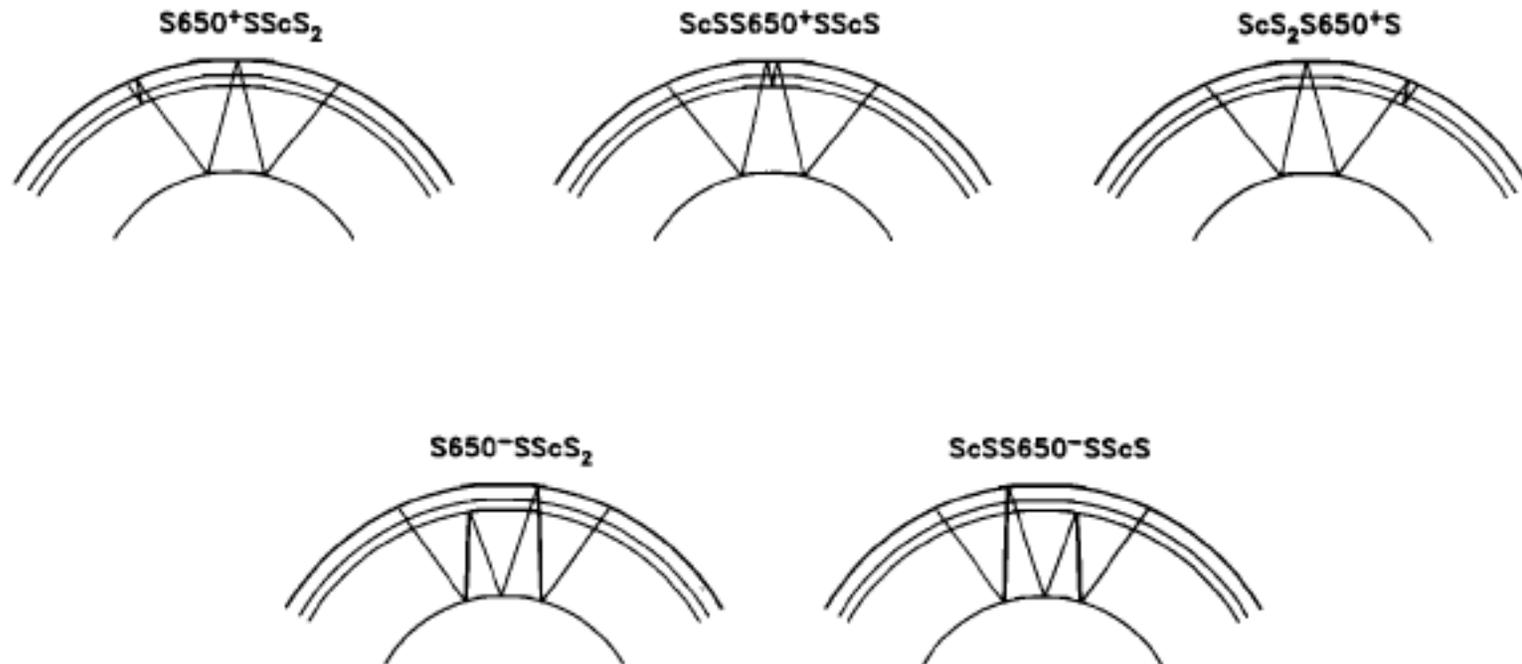
1 - Ondes ScS multiples



From Ed Garnero's website



Ondes ScS "multiples"

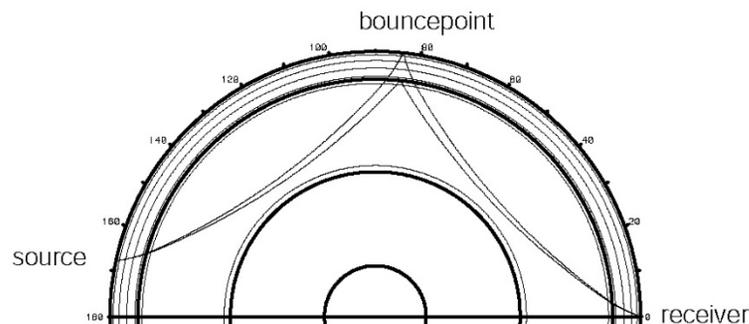


*Revenaugh and
Jordan, 1989,
1991*

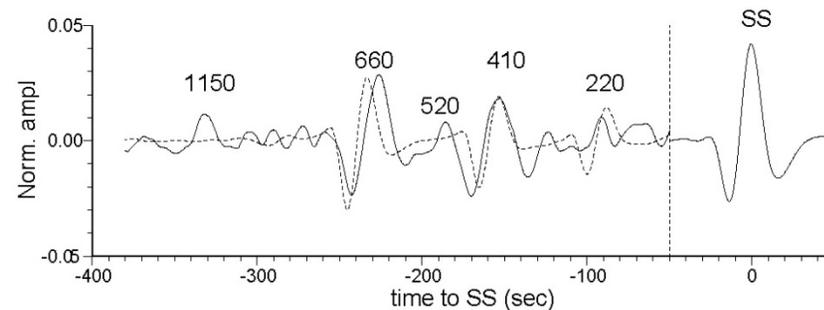
- * Ondes réfléchies
- * Échantillonnent les océans et les continents

2- Précurseurs aux ondes SS et PP

SS and PP-precursors

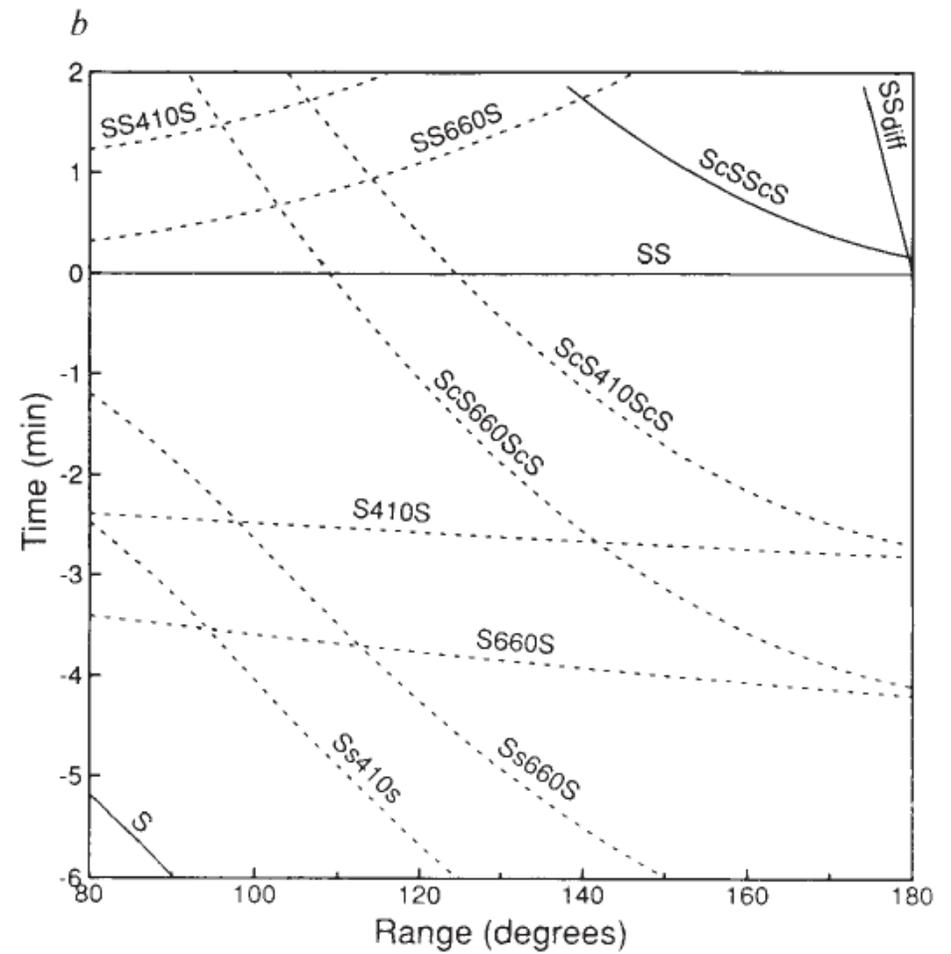
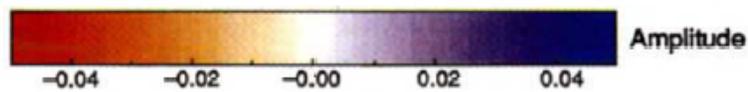
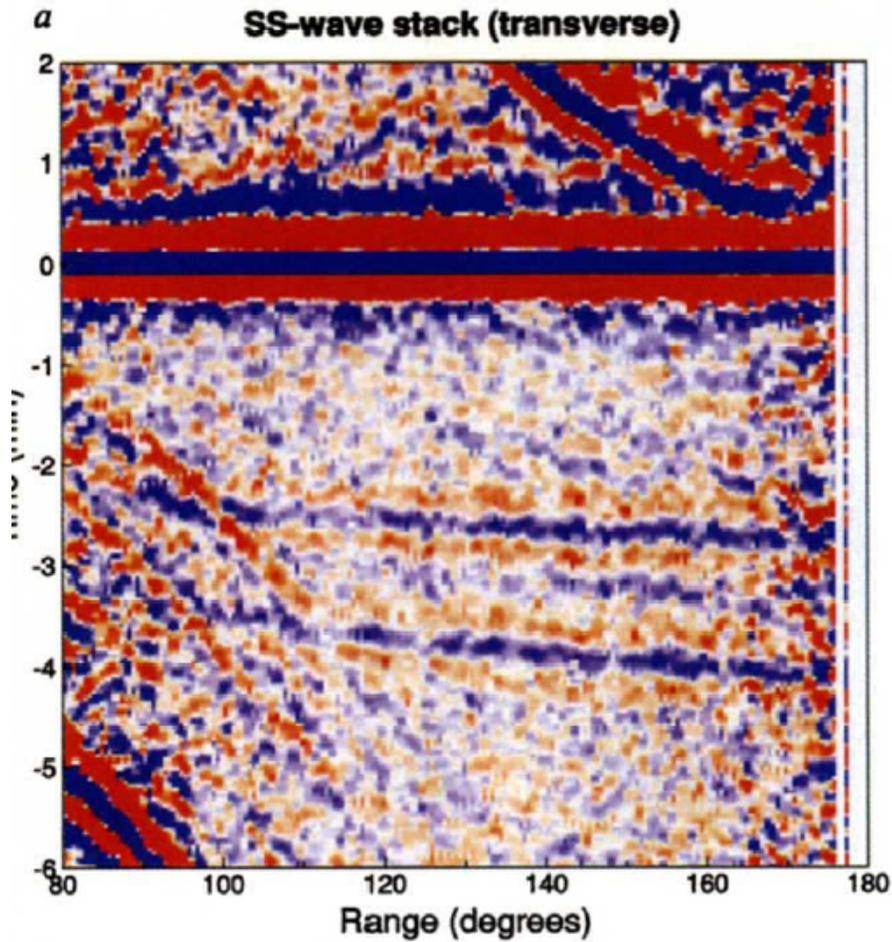


Detection of mantle discontinuities



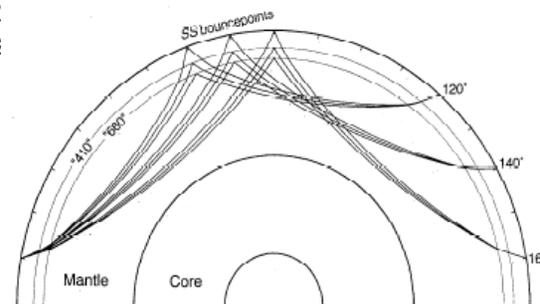
- * Ondes réfléchies
- * Échantillonnent les océans et les continents

Global Transverse Component Stacks



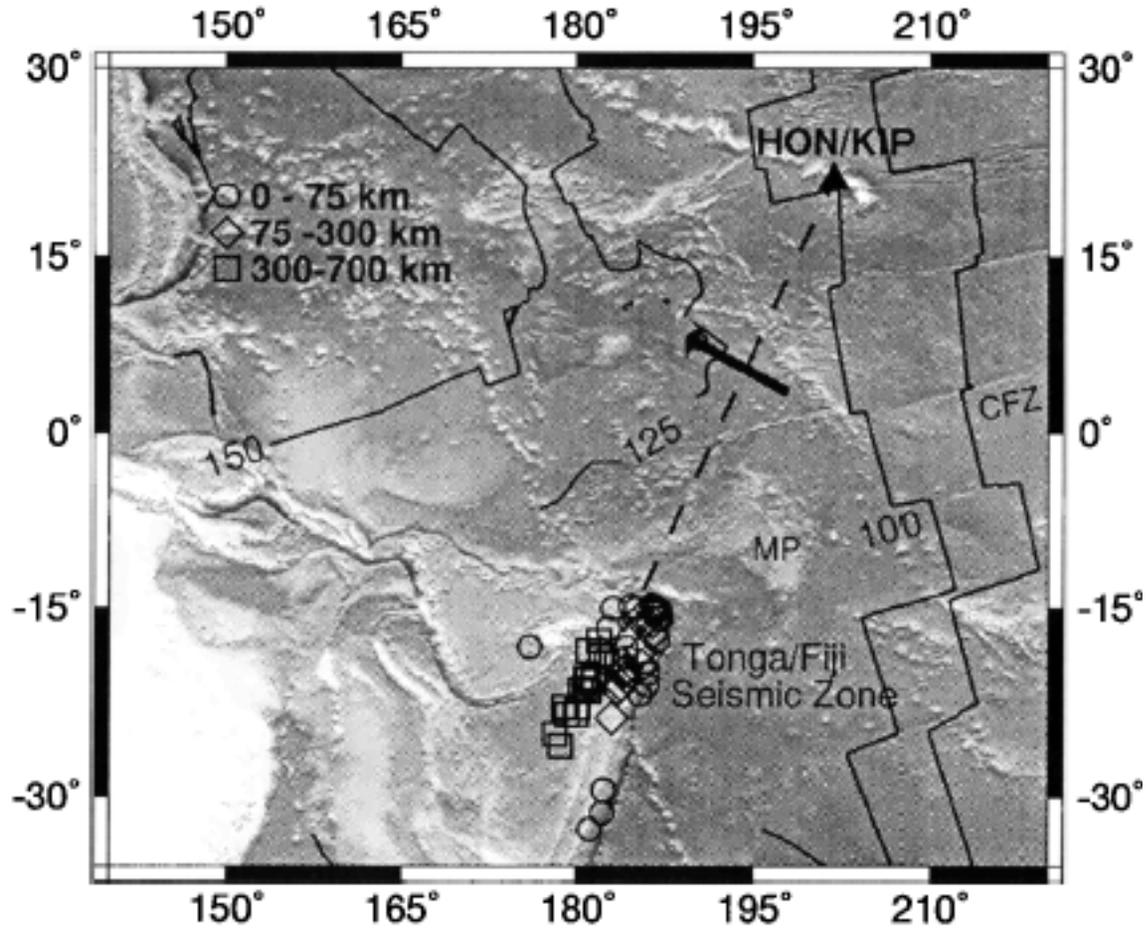
with (b) travel-t
upper-mantle dis
in blue, negative

lines) and
are shown
.05 of the

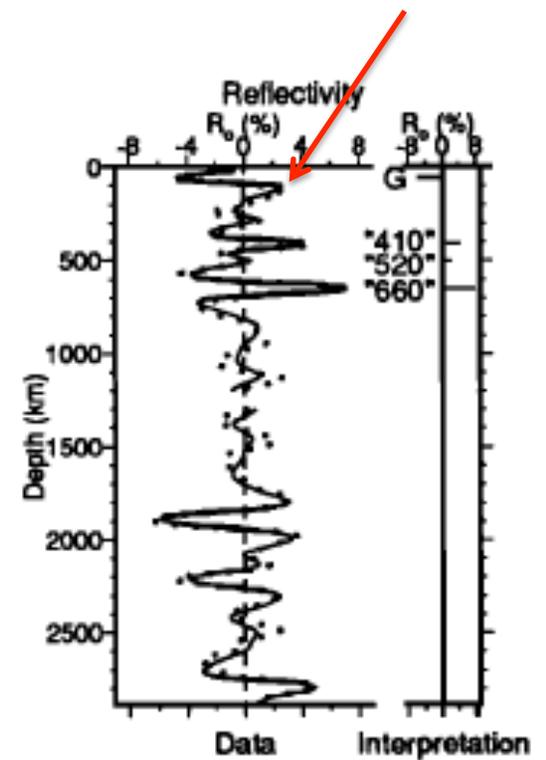


Shearer, 1991

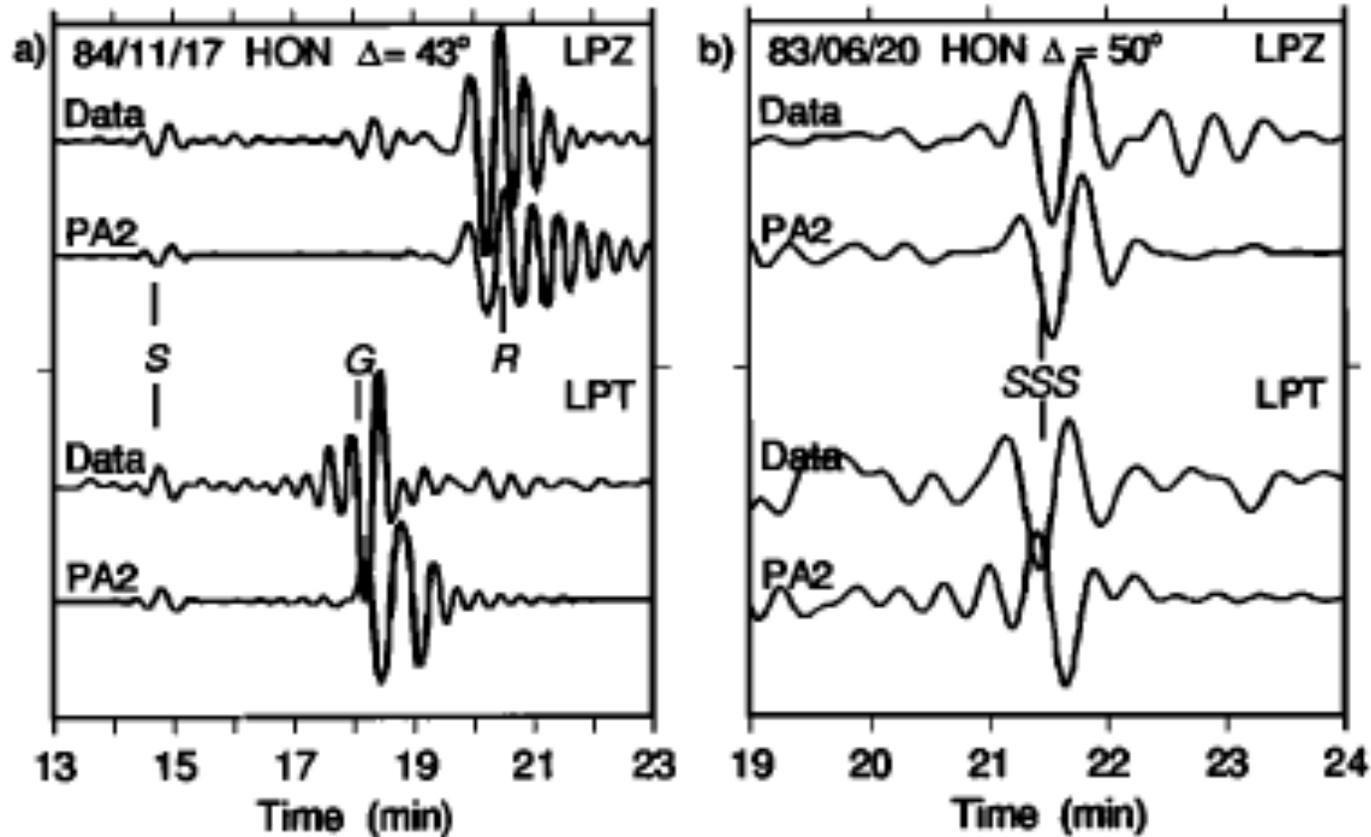
Ondes ScS_n sous l'océan Pacifique



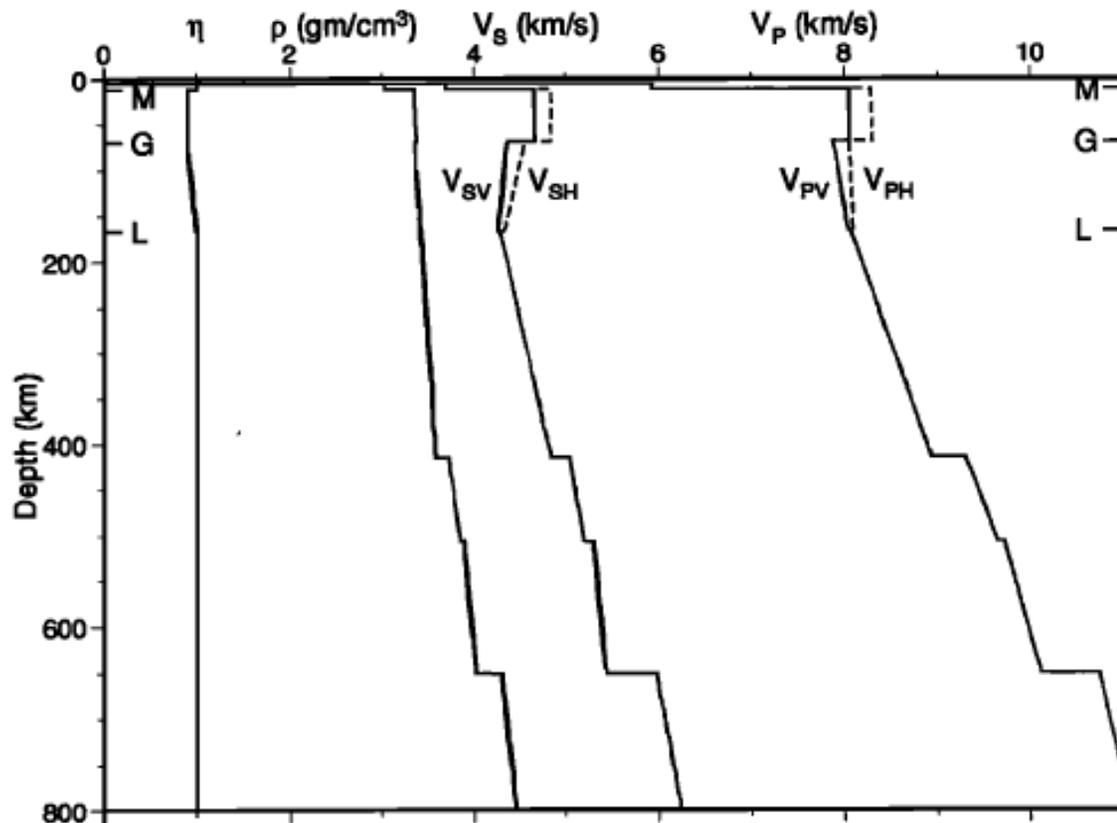
Discontinuité de Gutenberg



En ajoutant les formes d'onde de surface et S-multiples:
-> Présence d'anisotropie de polarisation:



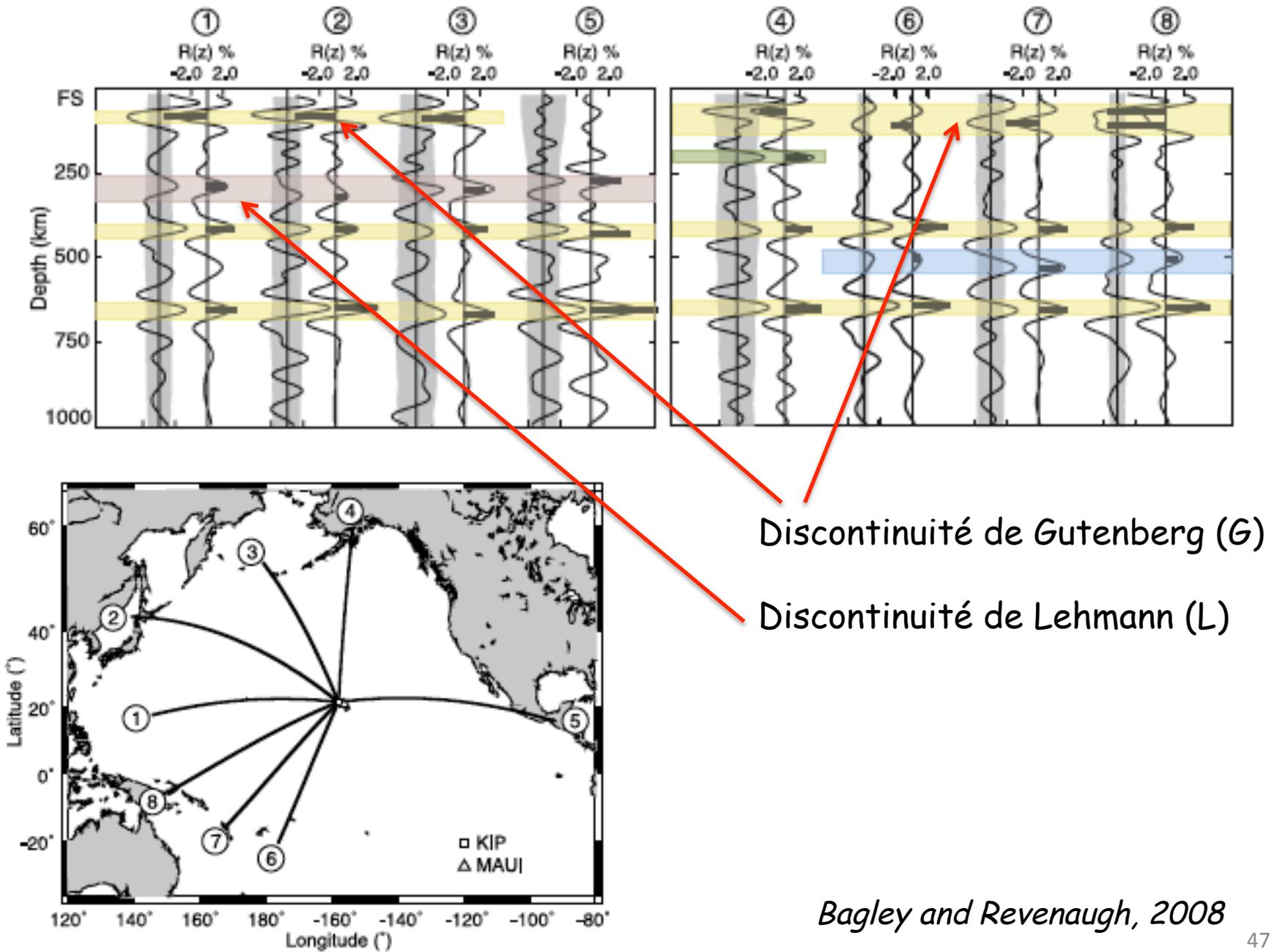
PA2 est un modèle construit à partir de la dispersion des ondes de Rayleigh (R): n'explique pas celle des ondes de Love (G)



Modèle PA5: saut de vitesse de 6% à la discontinuité G
sur moins de 30km d'épaisseur
profondeur de G : 60 km - moins que la couche limite thermique ~ 100 km

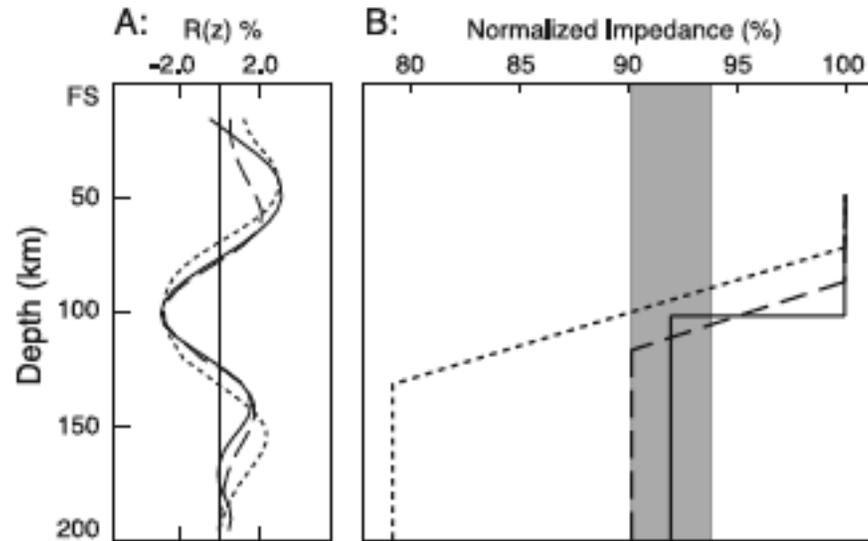
Interprétation proposée pour la discontinuité G : front d'hydratation mis en place au moment de la formation de la plaque à la ride est-pacifique.

Ondes ScS_n multiples...



Bagley and Revenaugh, 2008

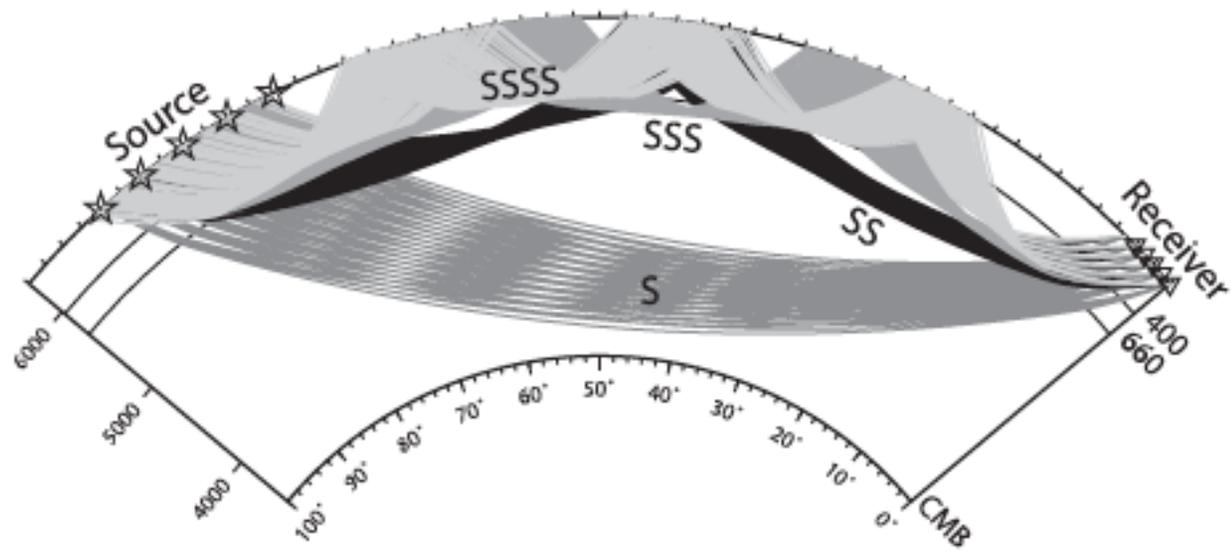
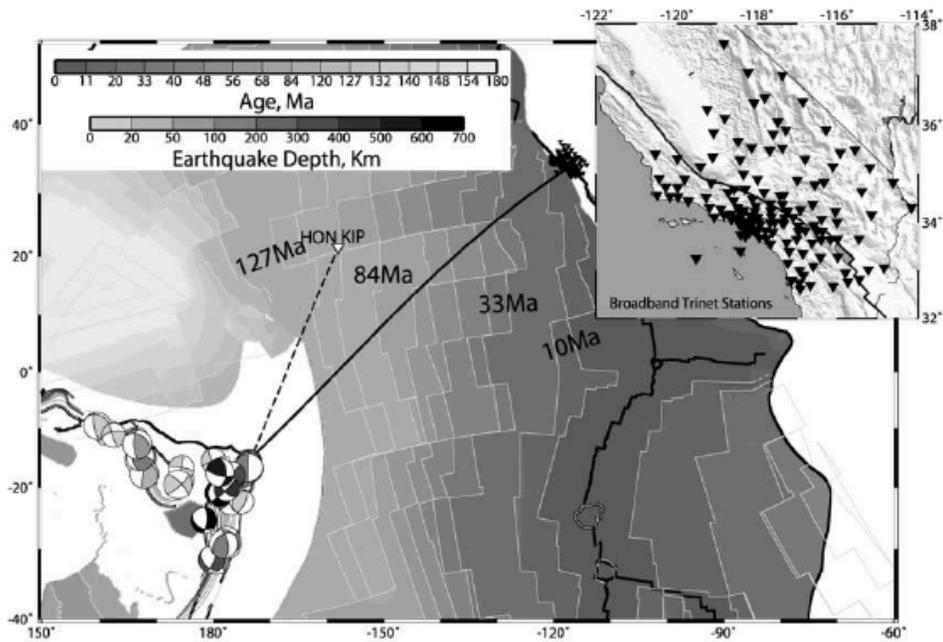
Quel est le saut de vitesse à la discontinuité G ?
Et sur quelle épaisseur se produit il?

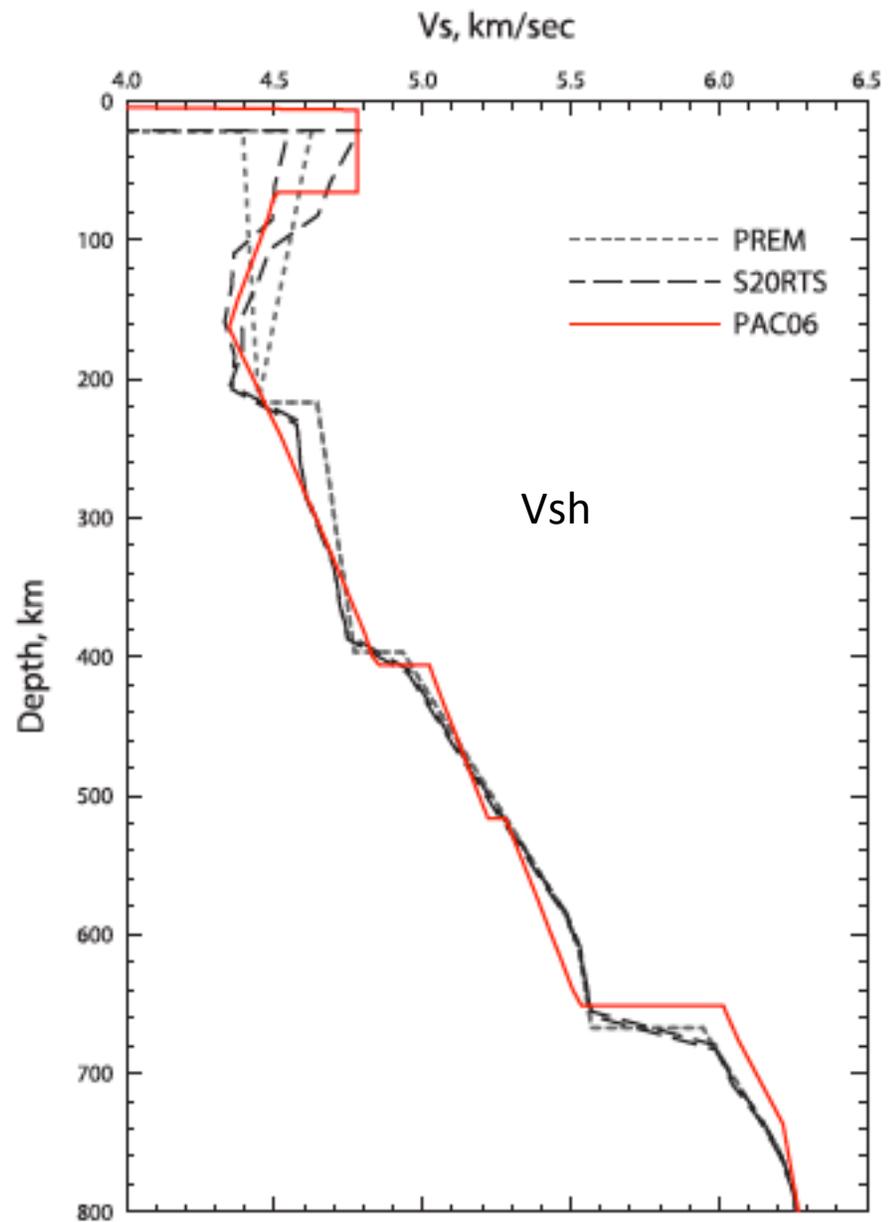
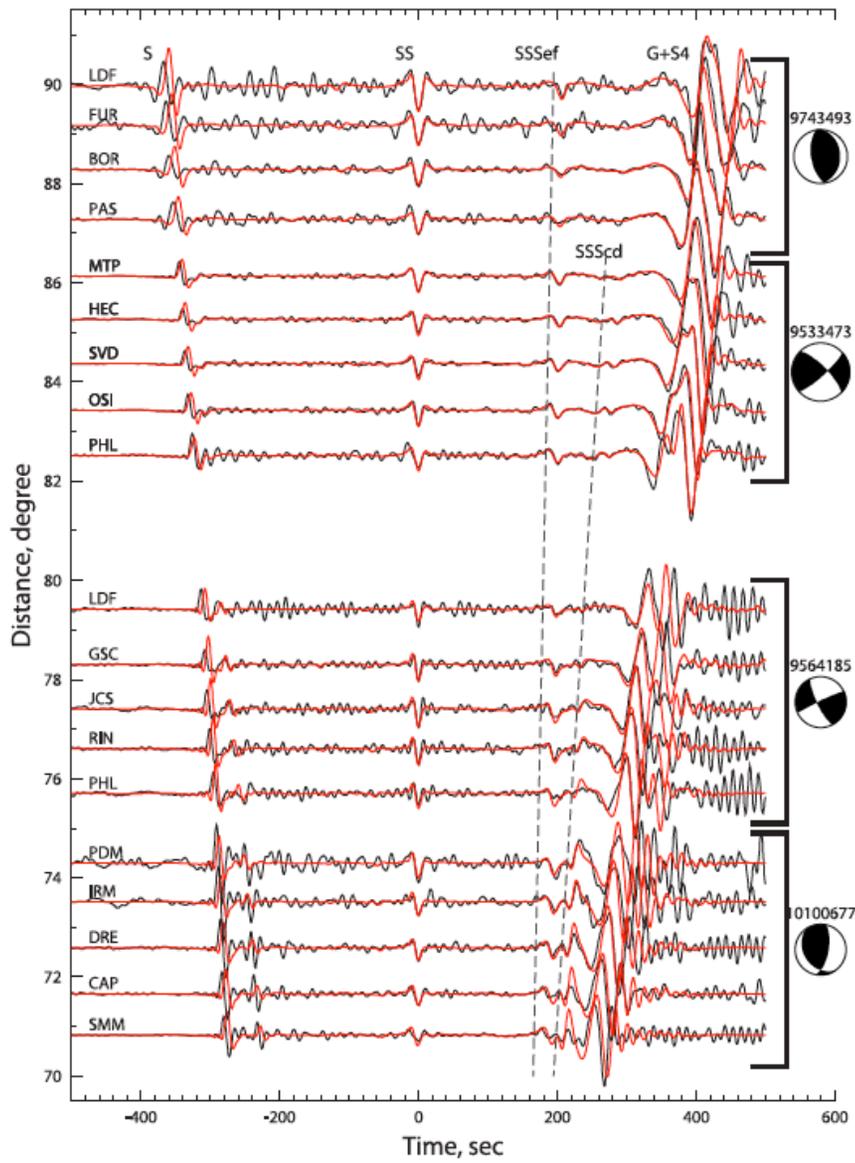


Profil de réflectivité

Impédance = $\rho \times \beta$

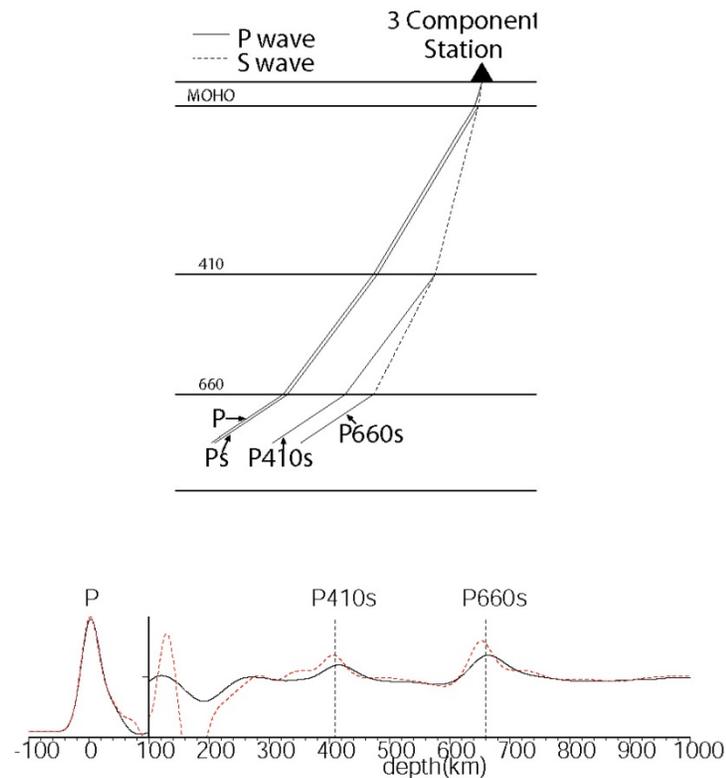
-> saut d'impédance de 8-10%





3- Ondes converties Ps et Sp

Fonctions "récepteur"



- Ondes converties sous les stations
- Echantillonnent surtout les continents