

Anisotropie sismique et écoulement dans le manteau terrestre

3- Le manteau supérieur 2e partie

Barbara Romanowicz

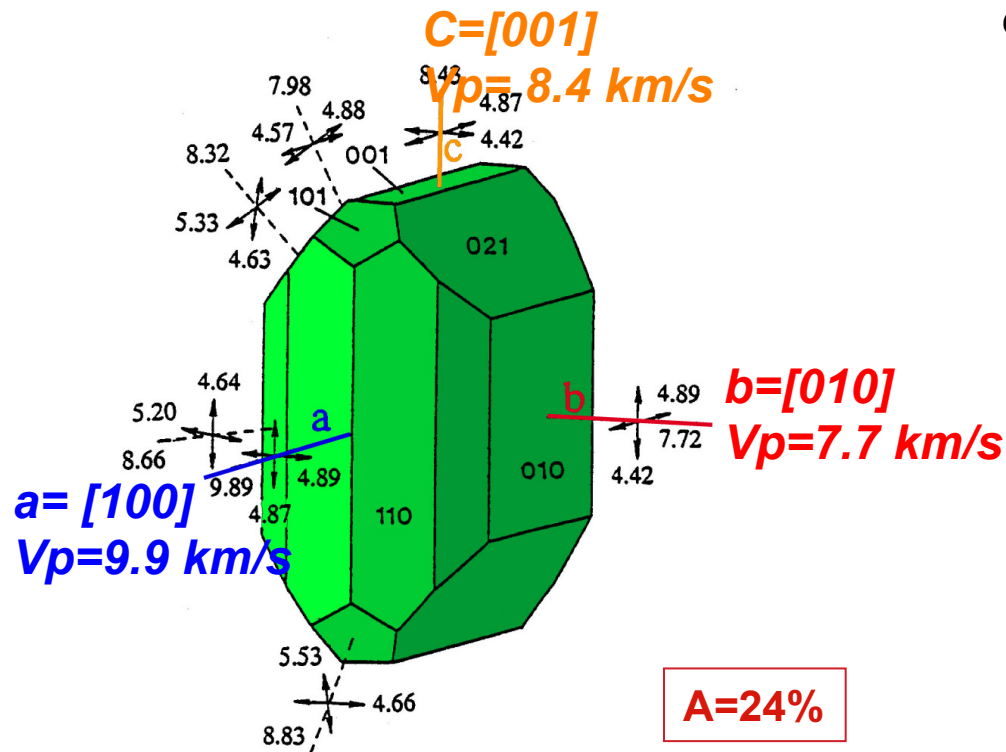
Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre

Collège de France

25 Octobre 2016

Anisotropie intrinsèque de l'olivine

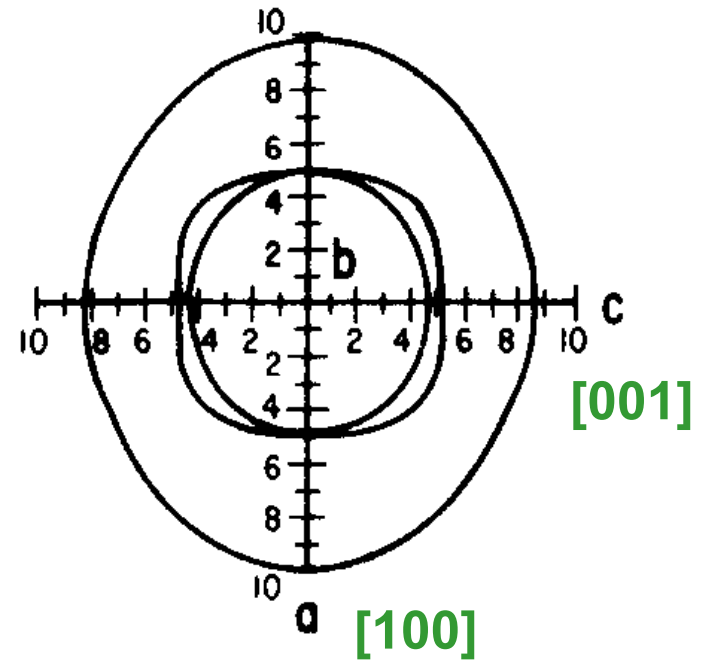
Olivine (60% du manteau supérieur)



A=24%

Kumazawa & Anderson JGR (1969)

Vitesses des ondes P et S dans le référentiel du cristal



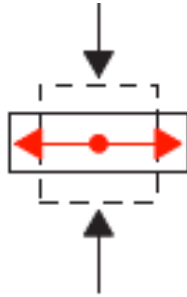
OLIVINE

Nicolas & Christensen, AGU, 1987

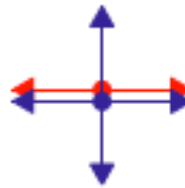
Déformation de l'olivine sèche - résultats expérimentaux

En rouge:
Grand axe
de l'ellipse de
déformation

Compression uniaxiale

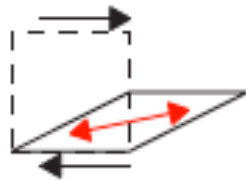


Slow axis
b-axis

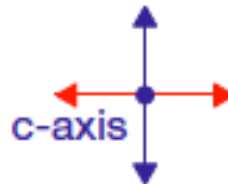


a-axis
c-axis fast plane

Cisaillement simple de
grande ampleur



Slow plane
b-axis



a-axis fast axis

Cisaillement simple de
petite ampleur

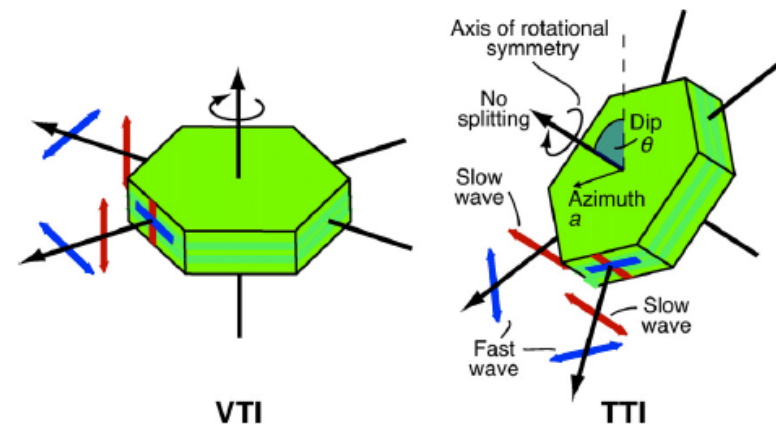


b-axis
Slow plane



a-axis fast axis

- En combinant les observations d'anisotropie radiale (L,N) i.e. VTI (Vertical Transverse Isotropy)
 - Ondes de Love et de Rayleigh
- ..et celles d'anisotropie azimuthale
 - Ondes de Rayleigh (principalement)
- Tilted transverse Isotropy (TTI) → tomographie vectorielle (Montagner and Nataf, 1988)
 - Sous l'hypothèse de l'anisotropie hexagonale

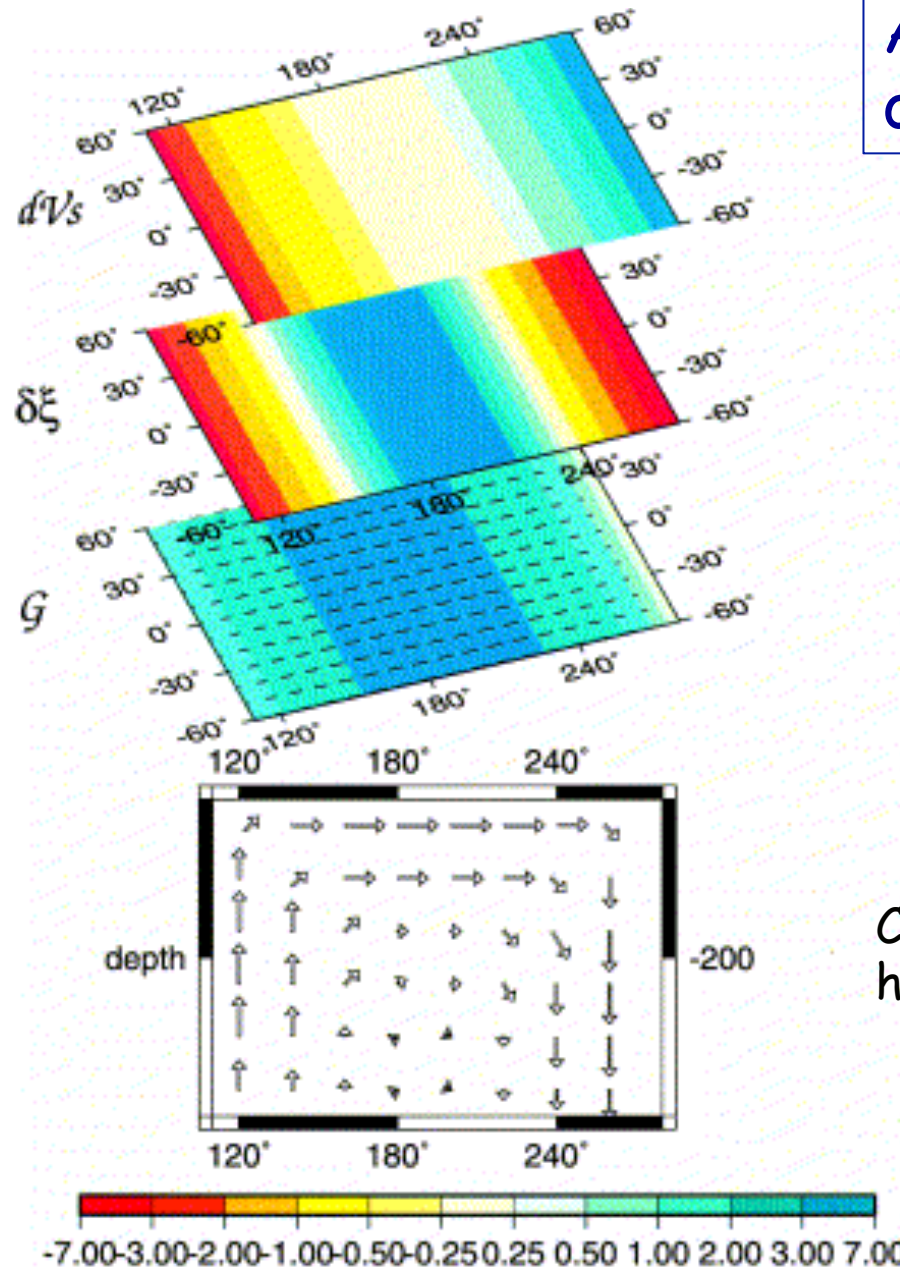


Variations isotropes de la vitesse de cisaillement

Anisotropie radiale

Anisotropie azimuthale

Anisotropie et ondes de surface



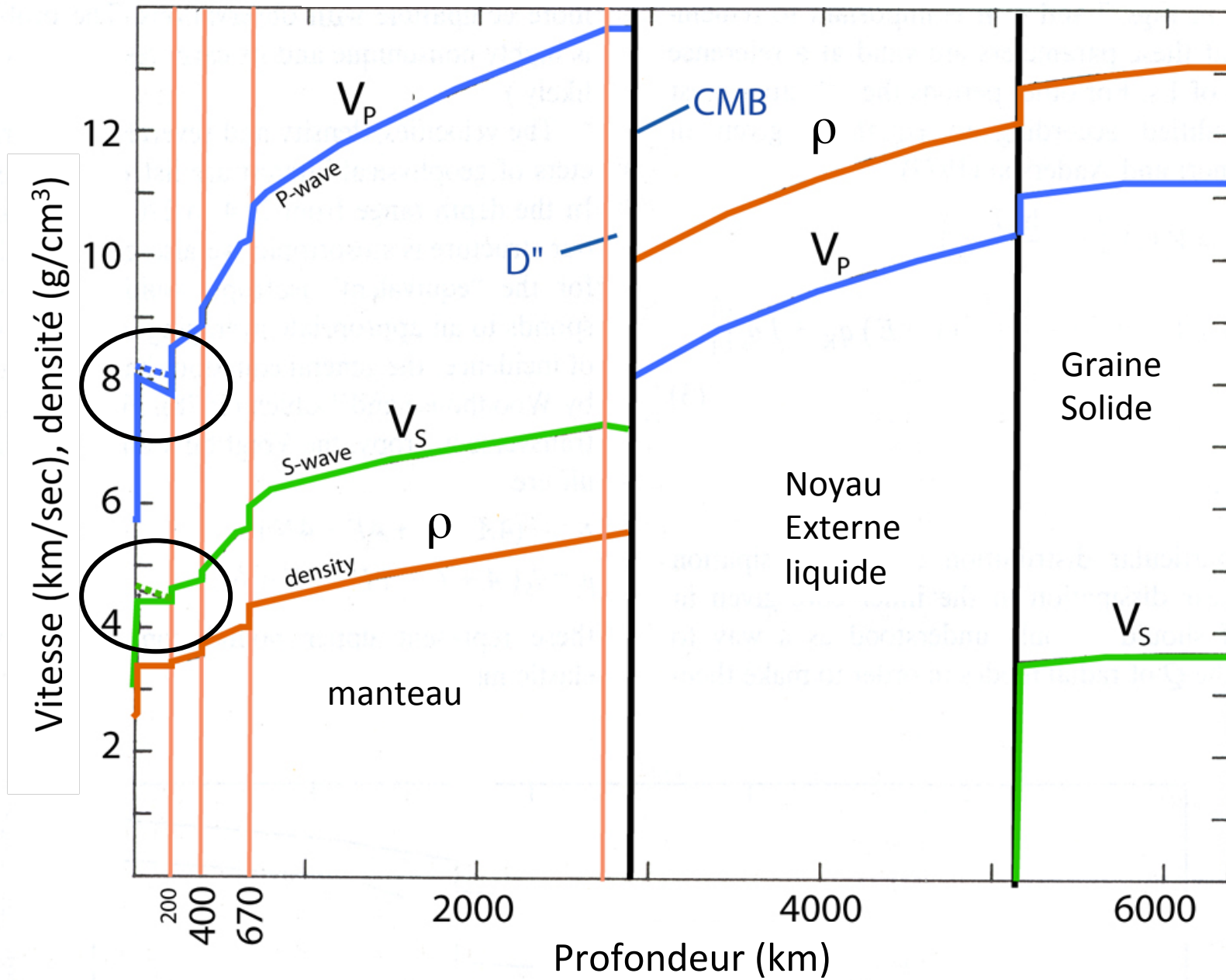
$$\xi = (V_{sh}/V_{sv})^2$$

Cellule de convection hypothétique

Anisotropie radiale (VTI)

Anisotropie de polarisation des
ondes de surface

Modèle de référence "1D" de la Terre – PREM



"PREM", Dziewonski and Anderson (1981)

- Formulation "classique" de la tomographie des ondes de surface:
3 étapes

- 1) Mesure des courbes de dispersion (vitesse de phase ou de groupe) en fonction de la période (typiquement entre 20 et 200 s) sur les trajets reliant une source (S) et une station (R)
- 2) Inversion tomographique à chaque période pour obtenir des cartes géographiques de dispersion en fonction de la période

- $$\frac{\delta C}{C_0}(\omega, SR) = -\frac{\omega}{C_0} \int_S^R \frac{\delta C(s)}{C_0} ds$$
- phase: $\varphi = \frac{\omega X}{C}$

- 3) En tout point du globe, inversion de la courbe de dispersion reconstituée (au moyen des "noyaux de sensibilité") pour obtenir la variation en profondeur des différents paramètres.

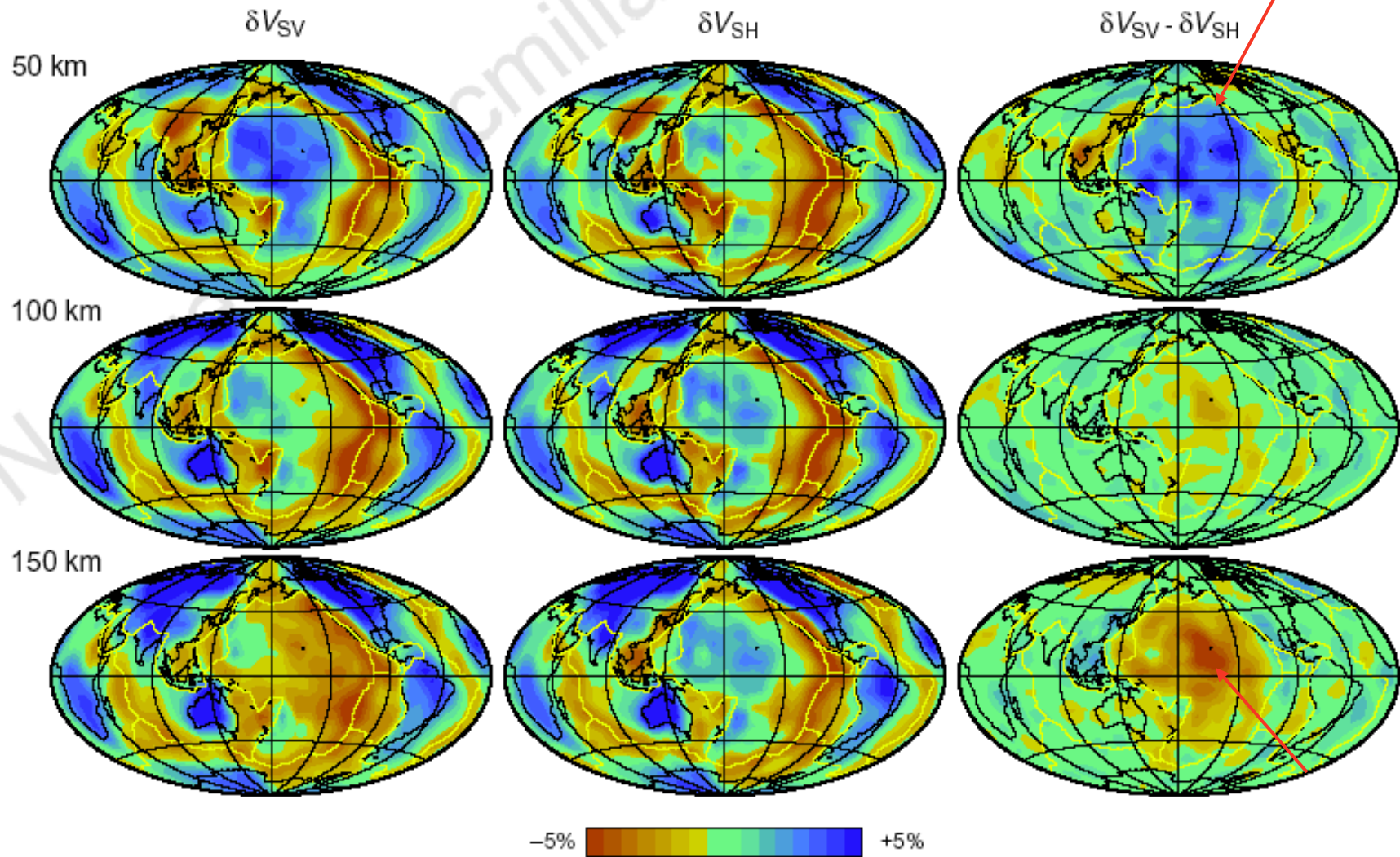
$$v(\vec{x}, \psi) = \alpha_0(z) + \alpha_1(z) \cos(2\psi) + \alpha_2(z) \sin(2\psi) + \alpha_3(z) \cos(4\psi) + \alpha_4(z) \sin(4\psi)$$

$$\vec{x} = (lat, lon, z)$$

$$\frac{\delta C(lat, lon, \omega)}{C_0} = \int_0^a K(\omega, z) \frac{\delta v}{v_0}(lat, lon, z) dz$$

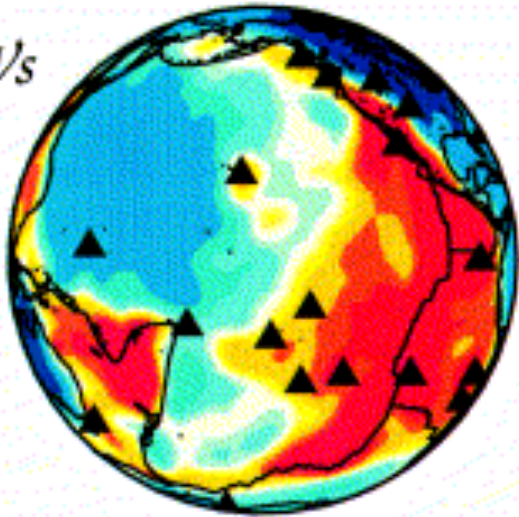
Ondes de surface: Love (SH) & Rayleigh (SV)

- Anisotropie de polarization



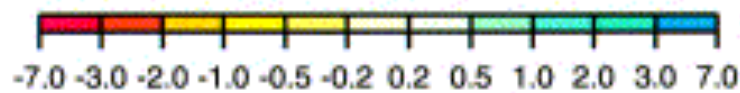
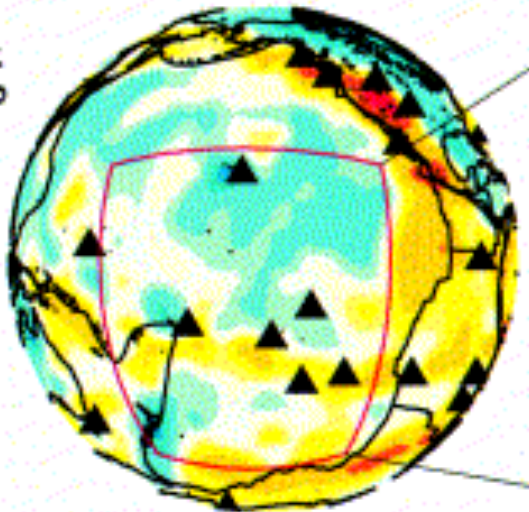
a

dV_s



Profondeur = 150 km

$\delta\xi$

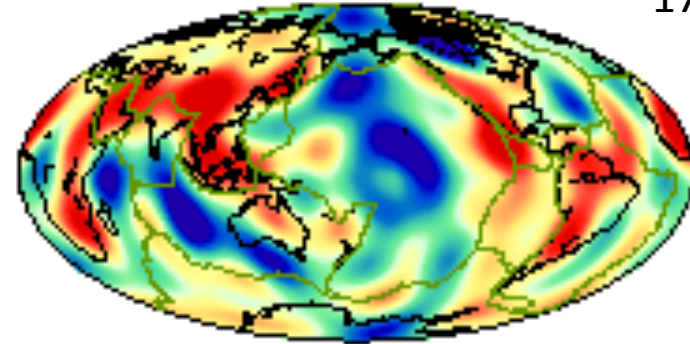


Montagner, EPSL, 2002

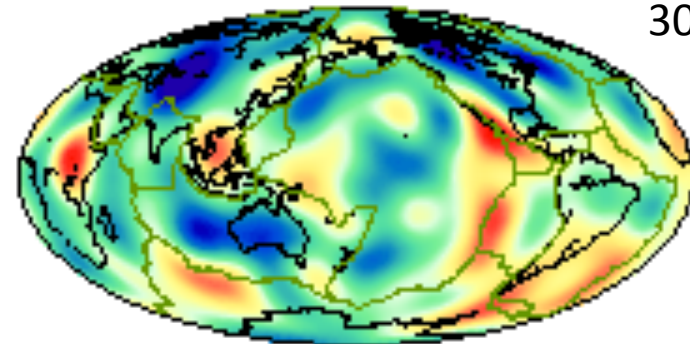
L'anisotropie moyenne du modèle PREM a été soustraite

$$d \ln \xi = d\xi / \xi$$

175 km

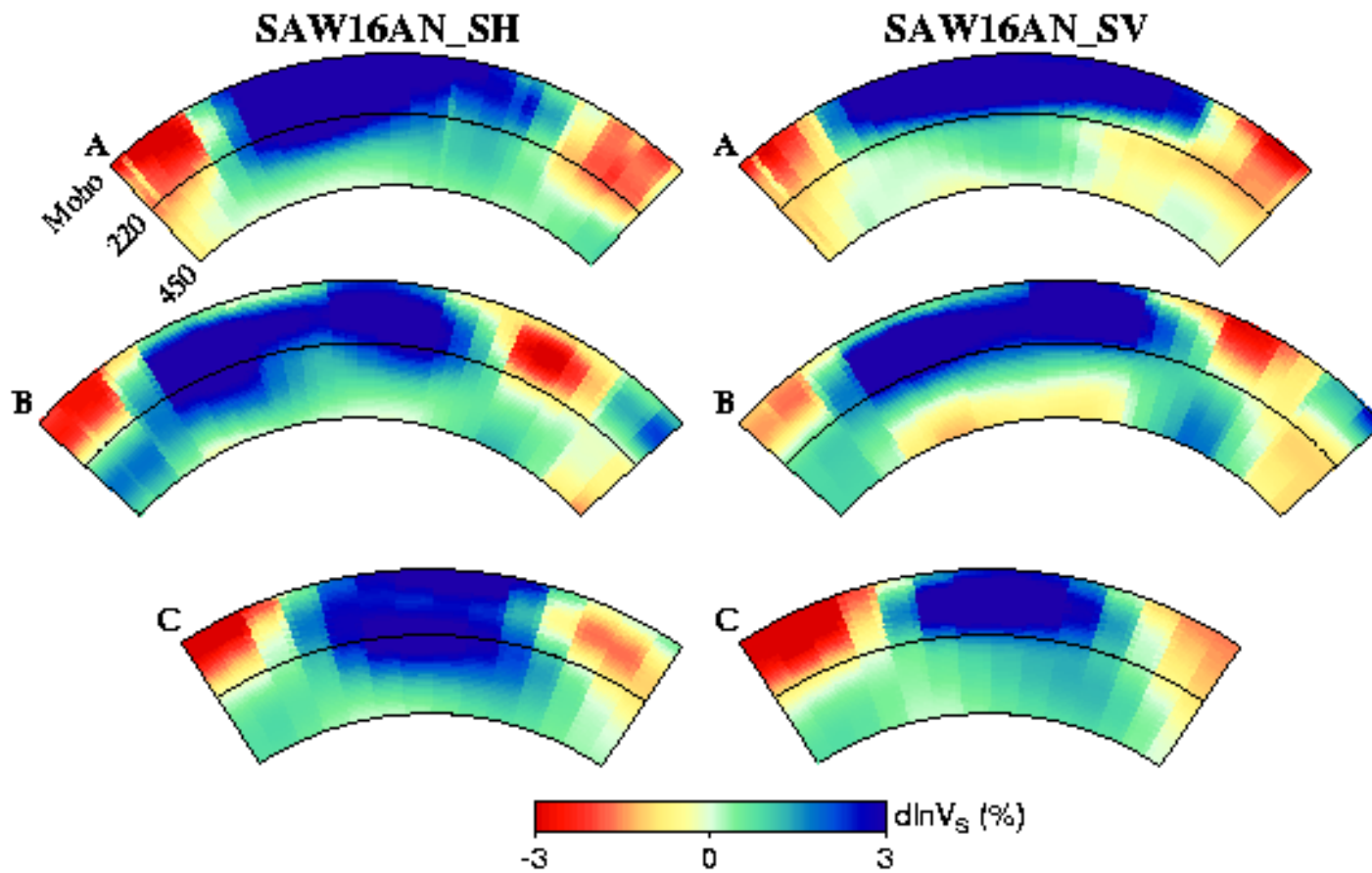
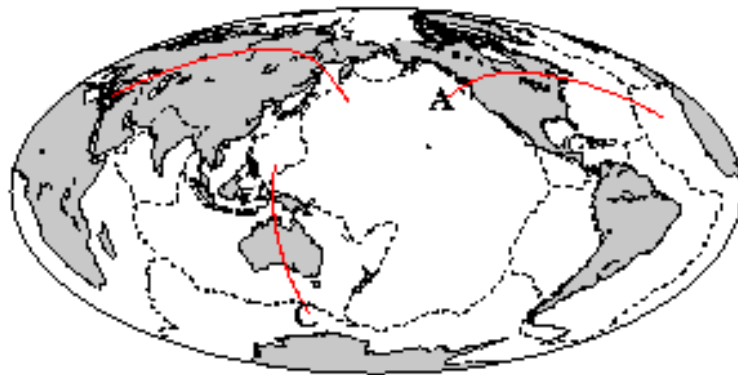


300 km



Gung, Panning and Romanowicz, 2003

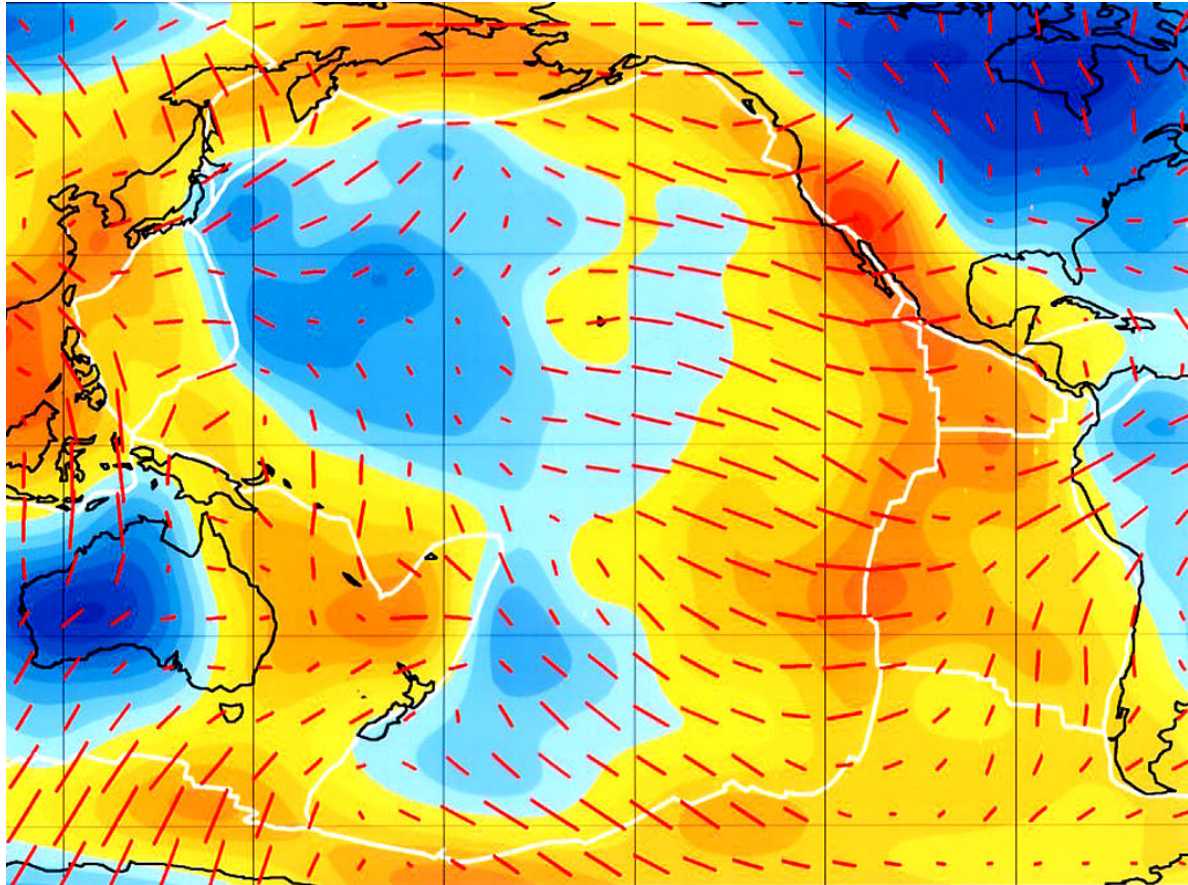
$$\xi = \left(\frac{V_{SH}}{V_{SV}} \right)^2$$



Gung, Panning and Romanowicz, Nature, 2003

Anisotropie azimuthale des ondes de surface

Anisotropie azimuthale des ondes de Rayleigh

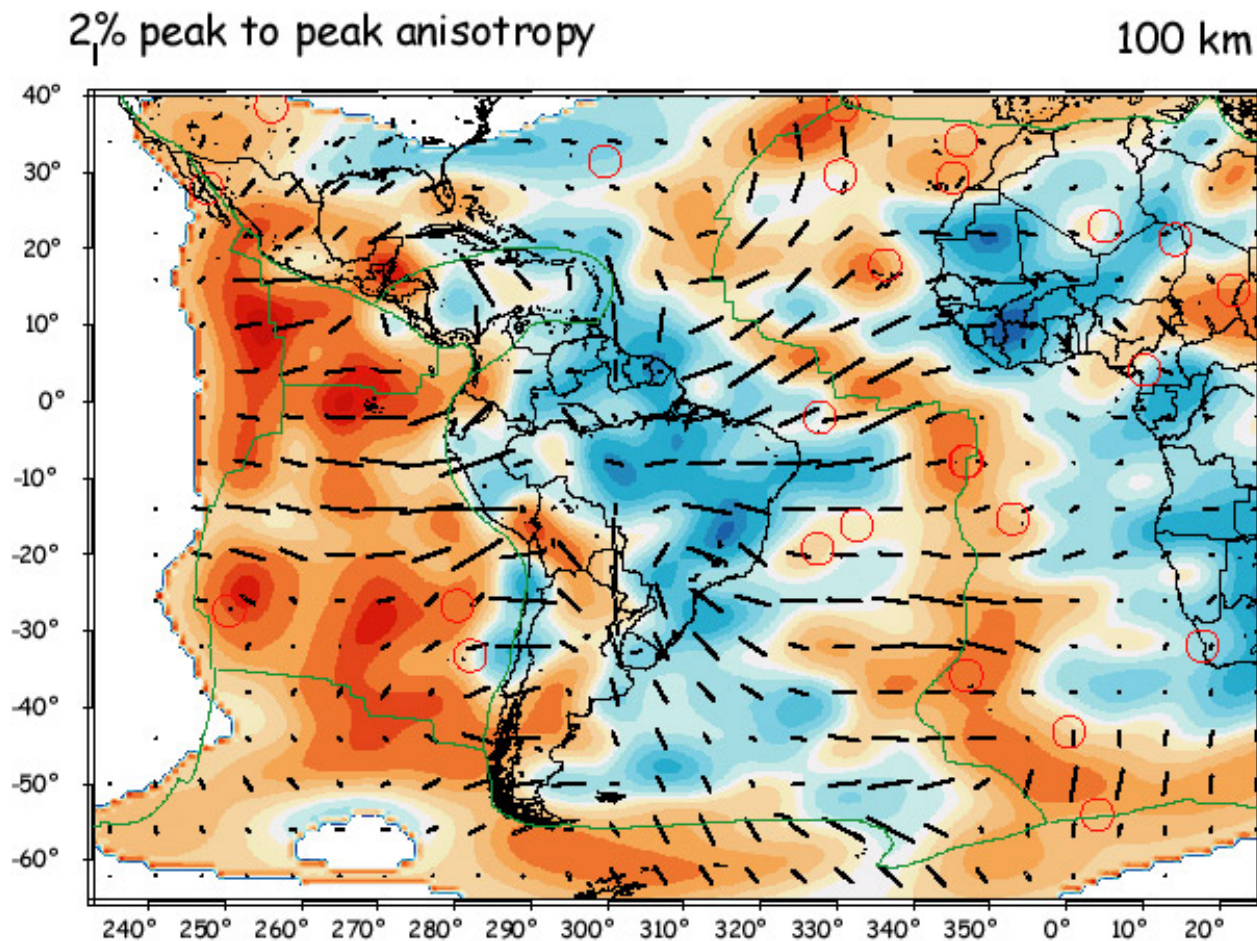


Période = 60 s

Dispersion des ondes de Rayleigh de période 60 s (profondeur de
Sensibilité maximale: ~80-100 km.

En fond: variations laterales des vitesses isotropes.

Anisotropie azimuthale des ondes de Rayleigh

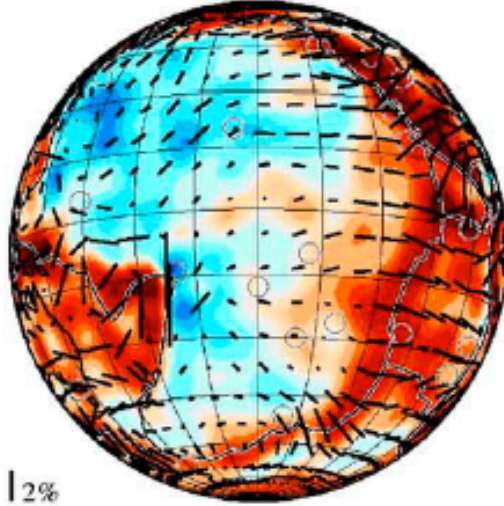


Heinz et al. 2003

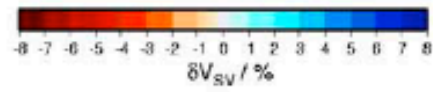
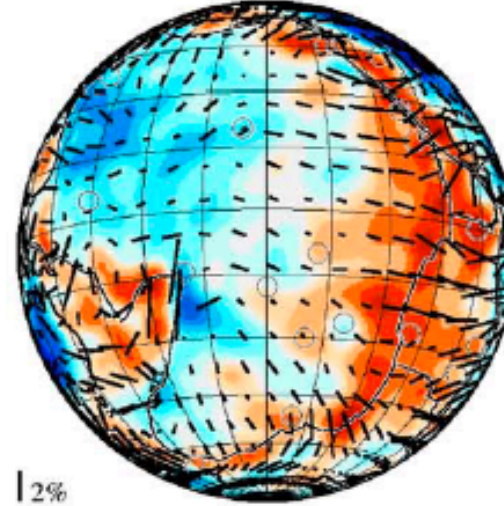
En fond: variations de la vitesse de cisaillement isotrope
Barres: direction de l'axe rapide et intensité de l'anisotropie

$$v(\vec{x}, \psi) = \alpha_0 + \alpha_1 \cos(2\psi) + \alpha_2 \sin(2\psi) + \alpha_3 \cos(4\psi) + \alpha_4 \sin(4\psi)$$

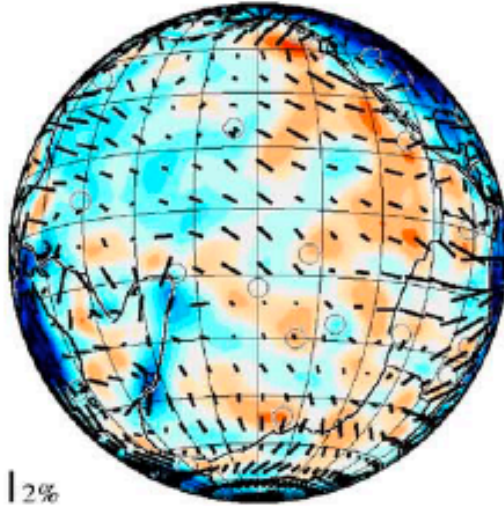
(a) 50 km



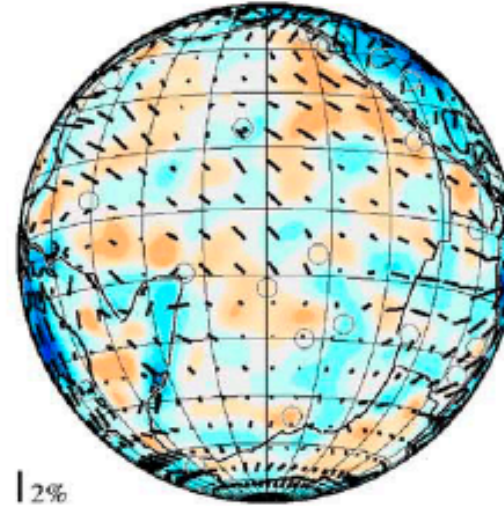
(b) 100 km



(c) 150 km

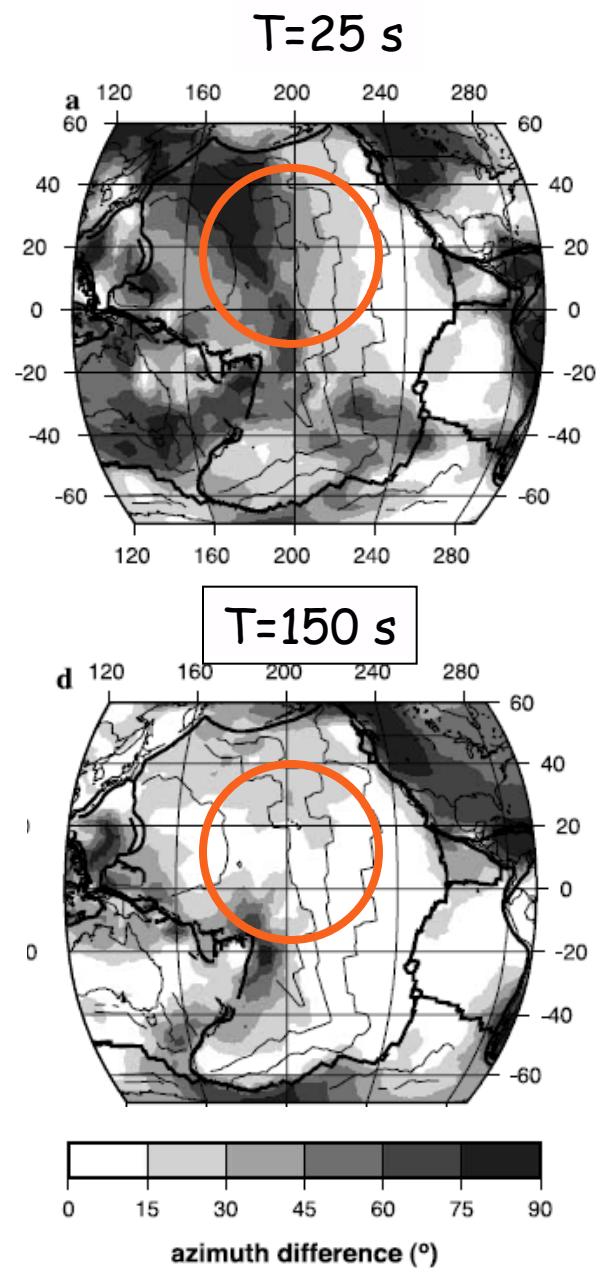


(d) 200 km

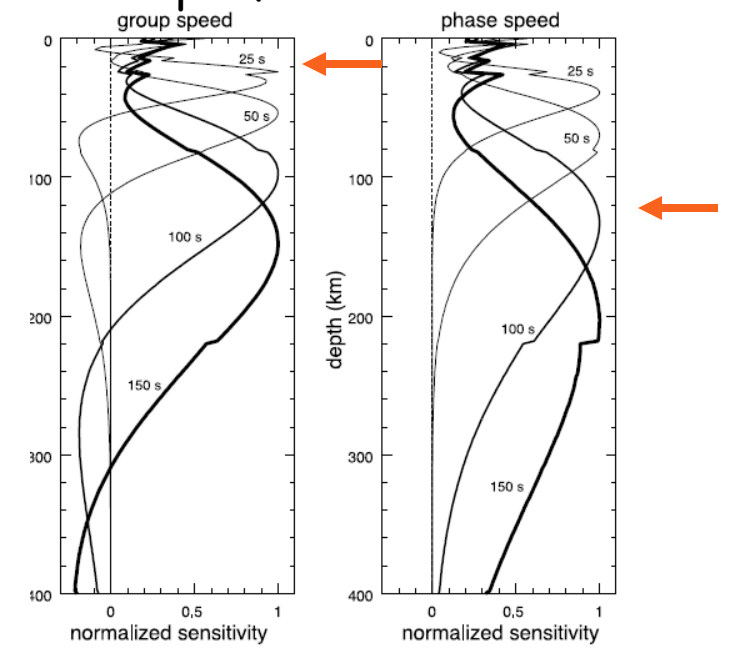


Anisotropie azimuthale : Différence entre la direction de l'axe rapide et la direction du mvt absolu de la plaque Pacifique

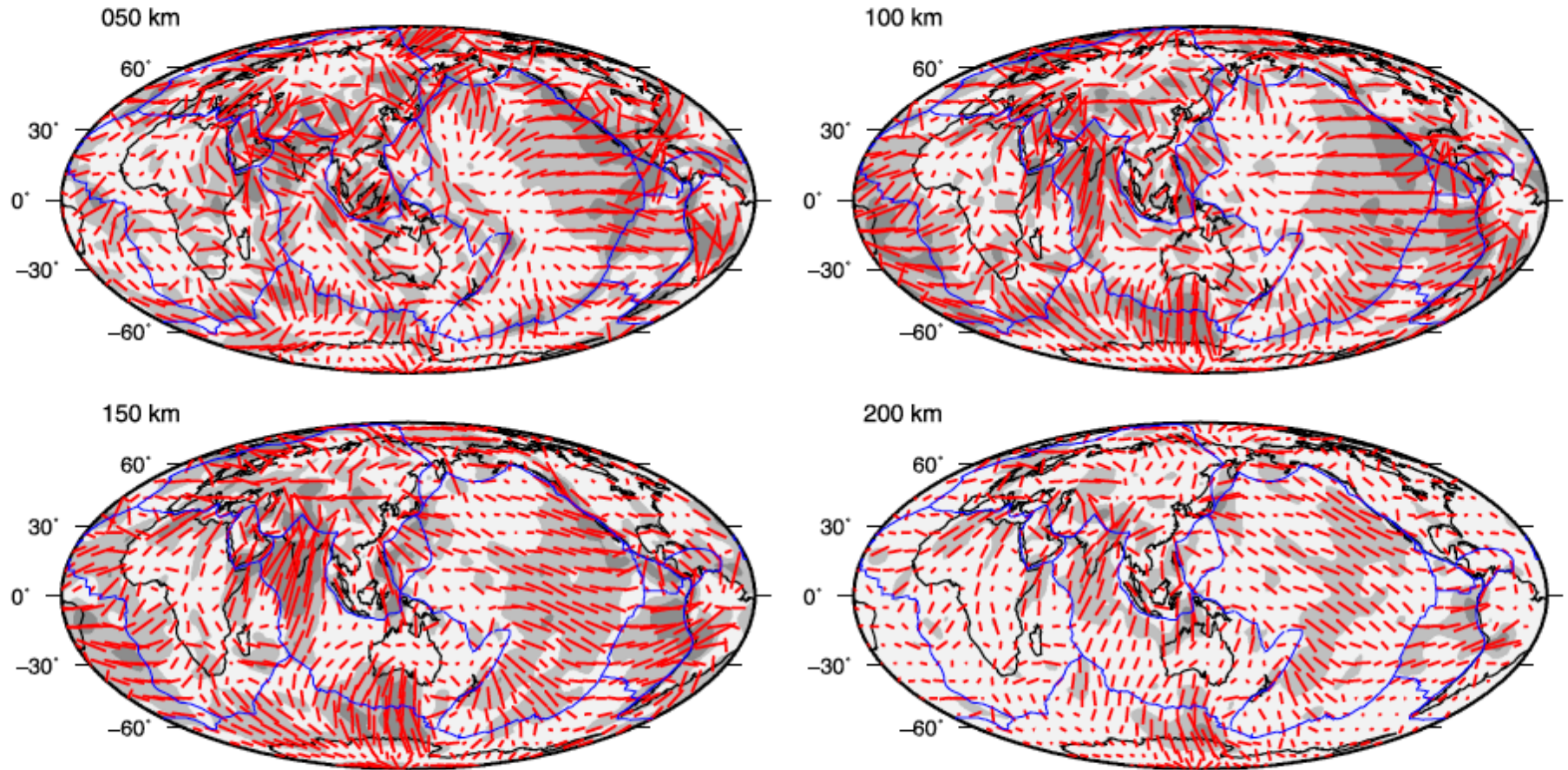
Bassin Pacifique
Dispersion des ondes de Rayleigh



Noyaux de sensibilité en profondeur

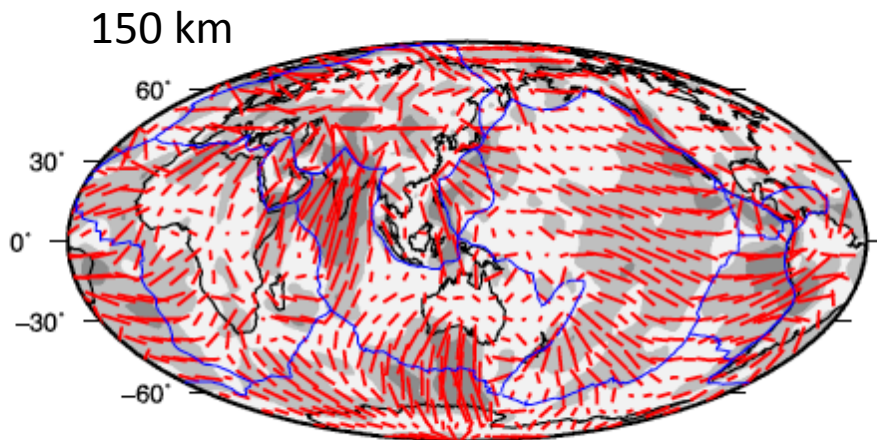
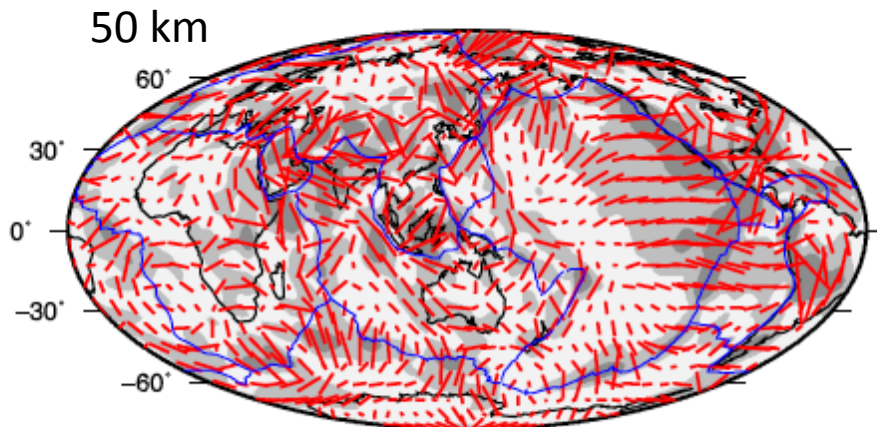


| 4% peak to peak anisotropy

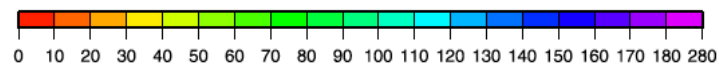
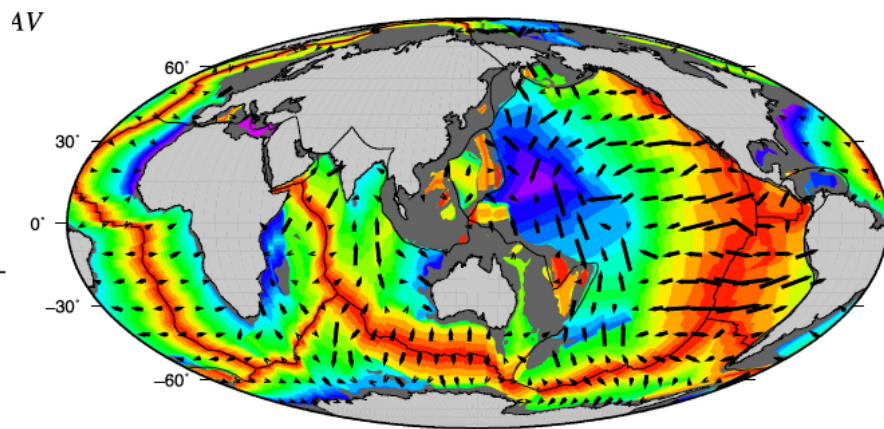


amplitude "Peak to peak" de l'anisotropie azimuthale

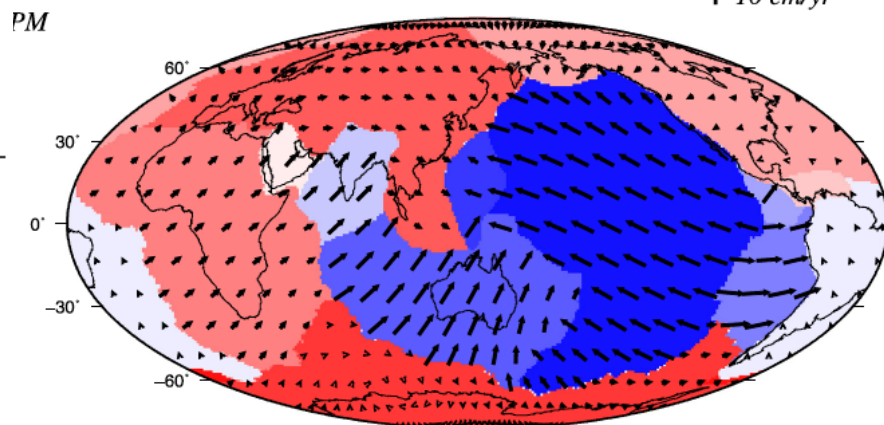
Anisotropie azimuthale | 4% peak



Directions absolues de plaques fossiles

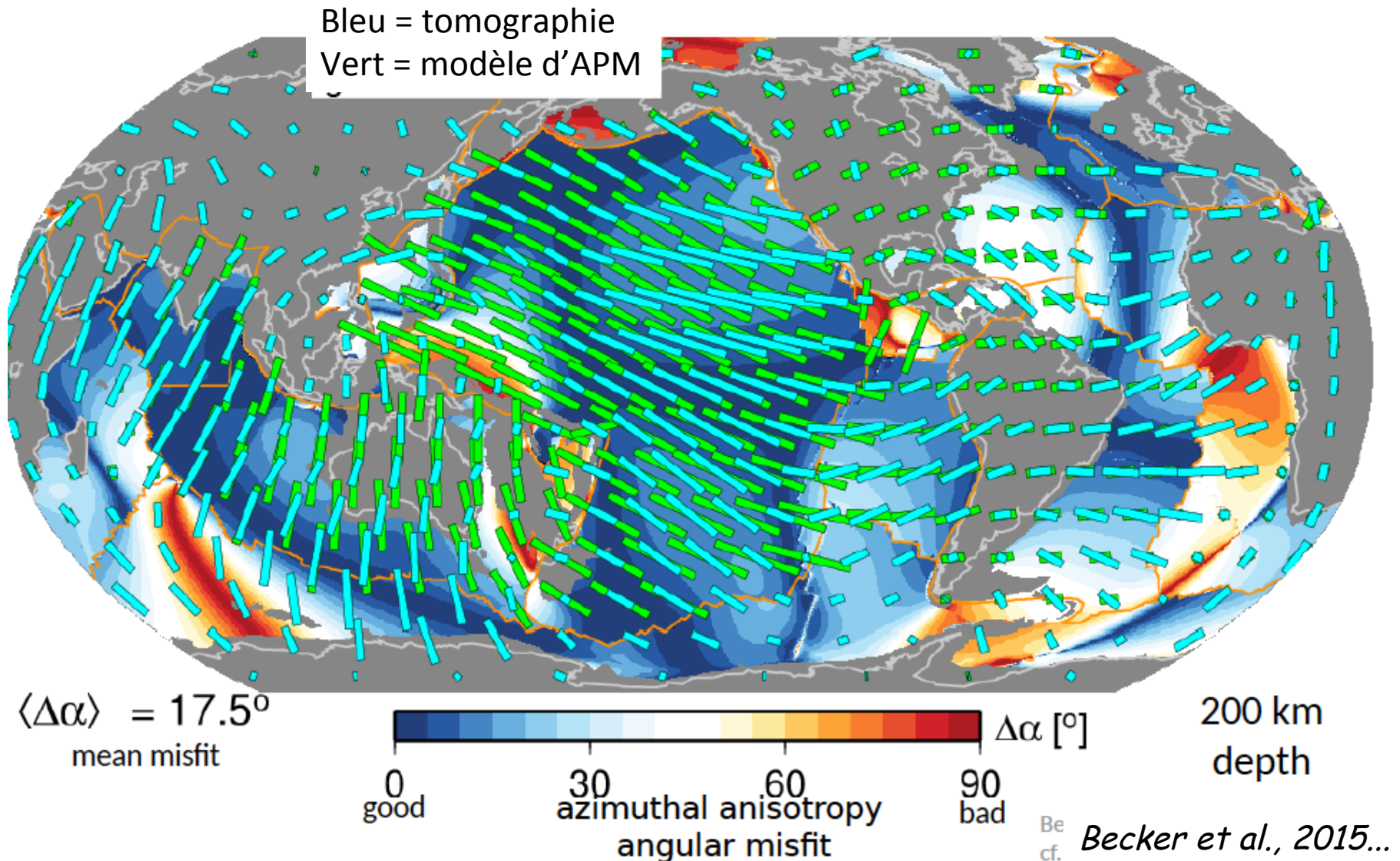


| 10 cm/yr

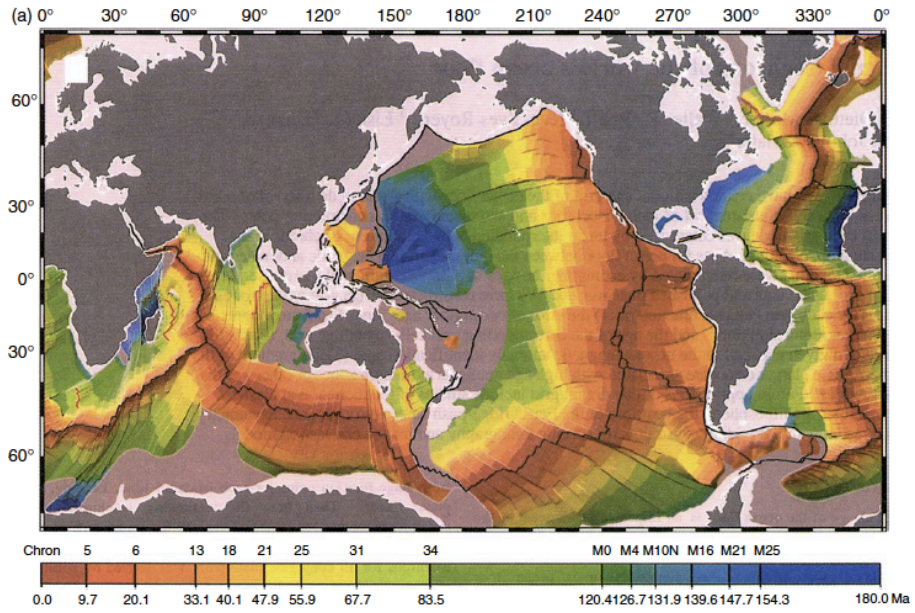


Directions absolues de plaques actuelles

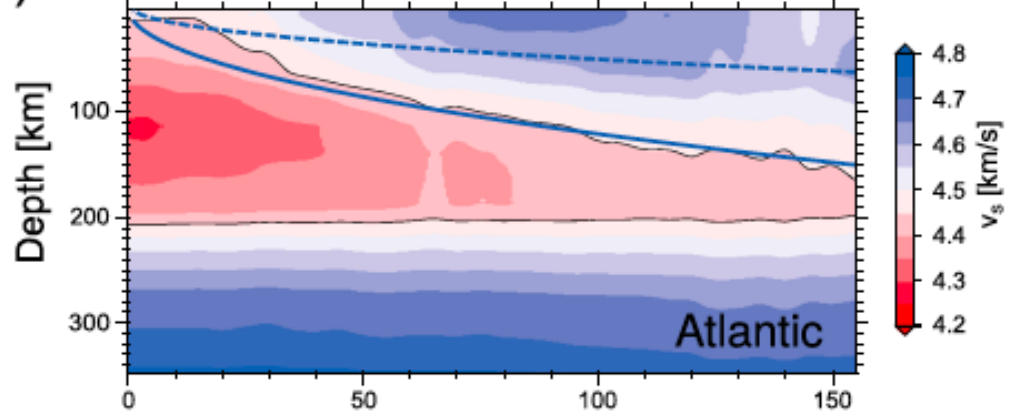
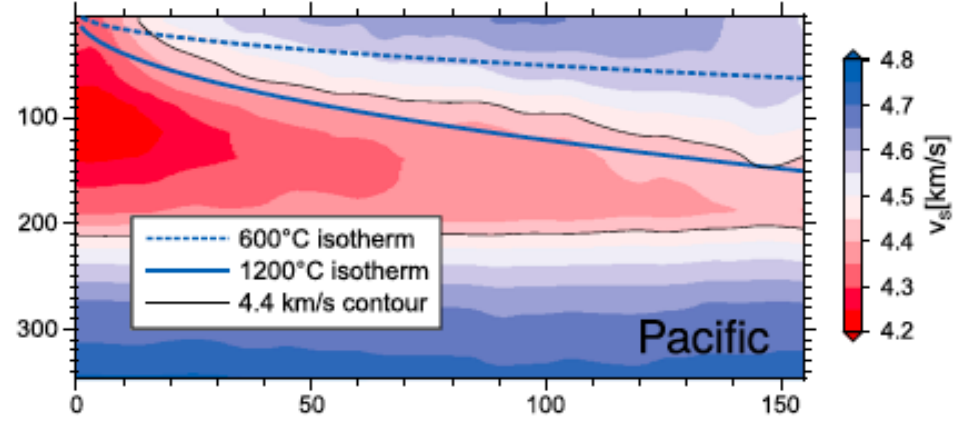
L'anisotropie azimuthale observée par les ondes de surface à 200 km de profondeur coincide presque parfaitement avec la direction absolue du mouvement des plaques (APM) dans les océans



Age des fonds océaniques



Vs isotrope



Auer et al., 2015

Profondeur de la limite lithosphère-asthénosphère (LAB)
mesurée par différents paramètres à partir des ondes de surface

Ocean Pacifique

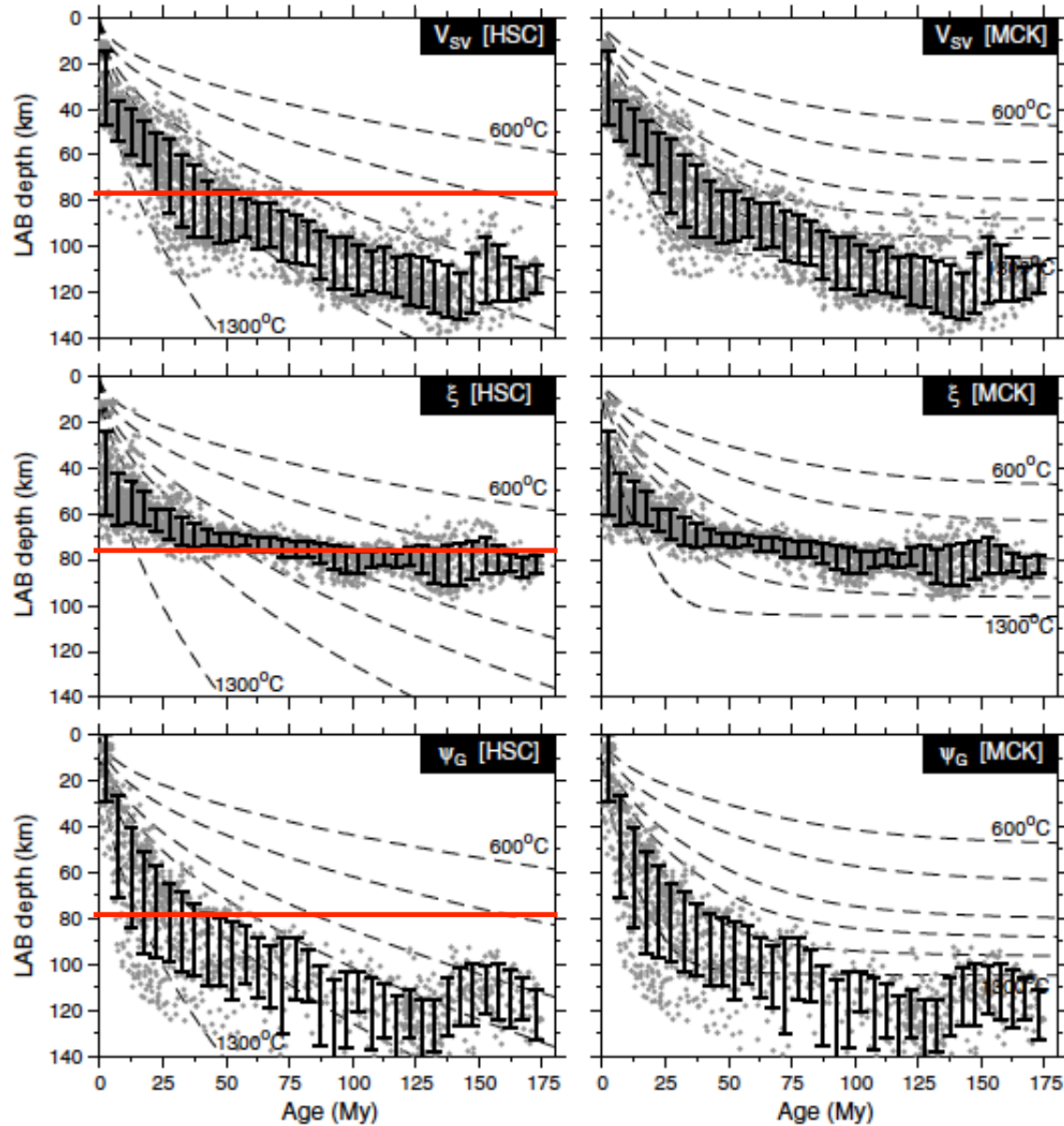
V_{SV}

Anisotropie
de polarisation

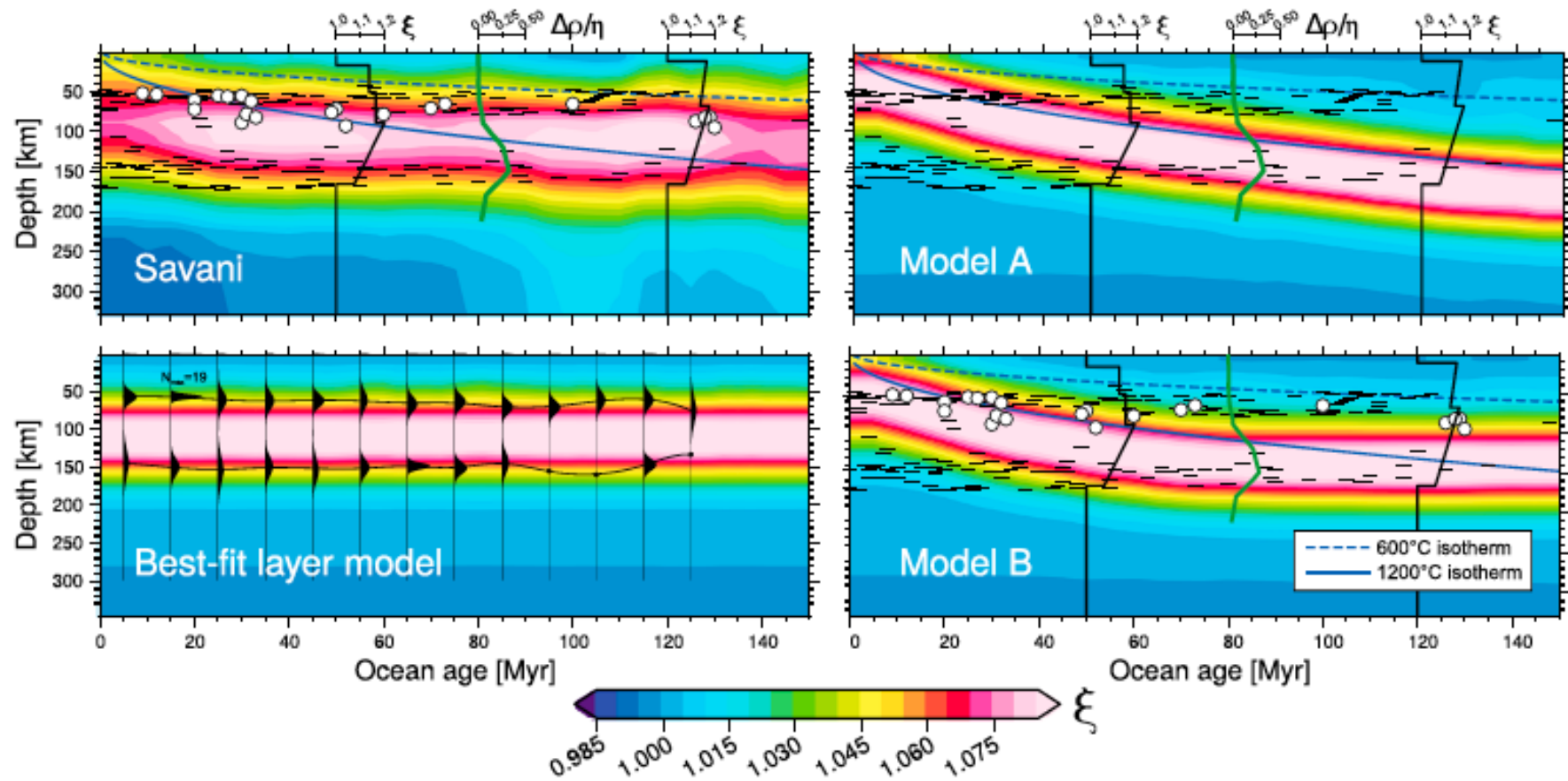
$$\epsilon = \left(\frac{V_{SH}}{V_{SV}} \right)^2$$

Anisotropie
azimuthale

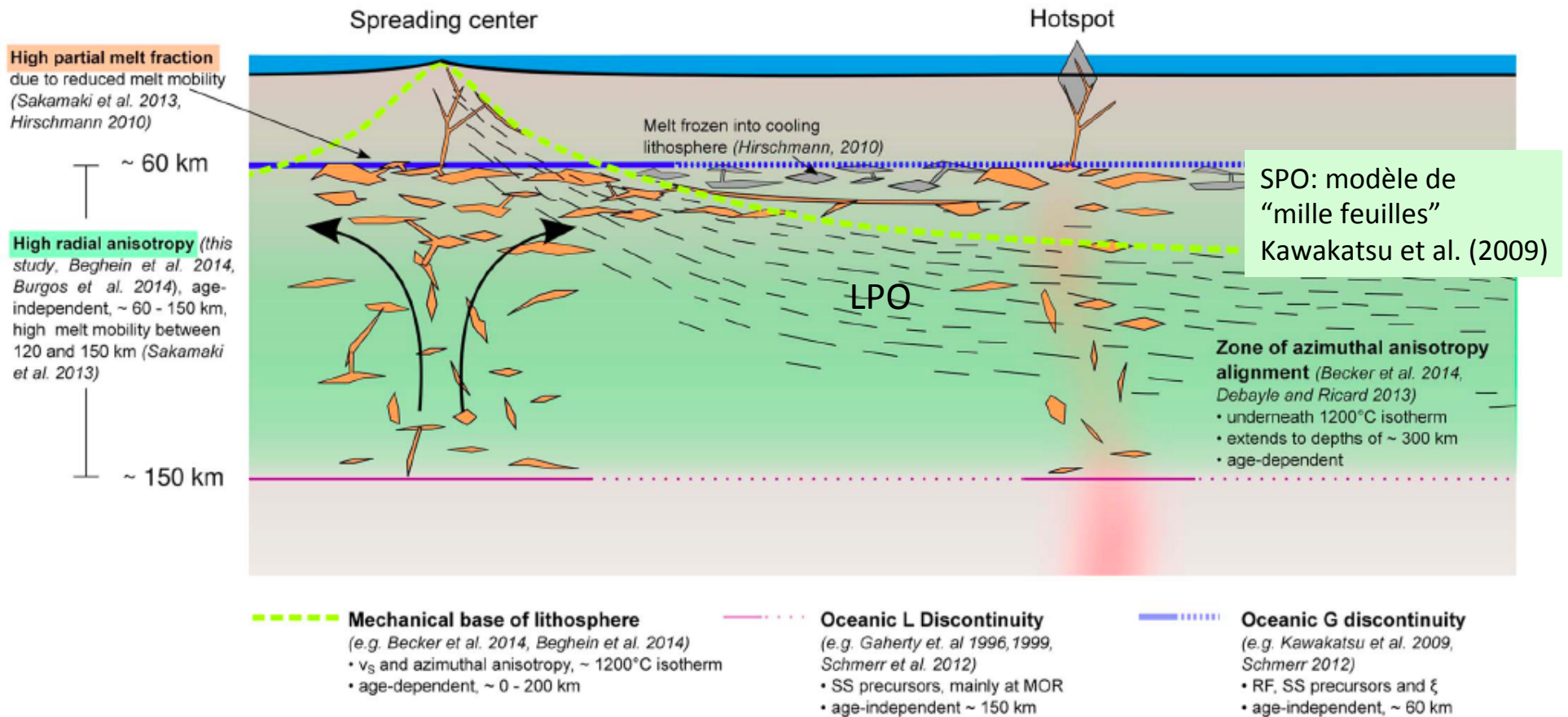
Ψ_G



Modèle sismique: ξ

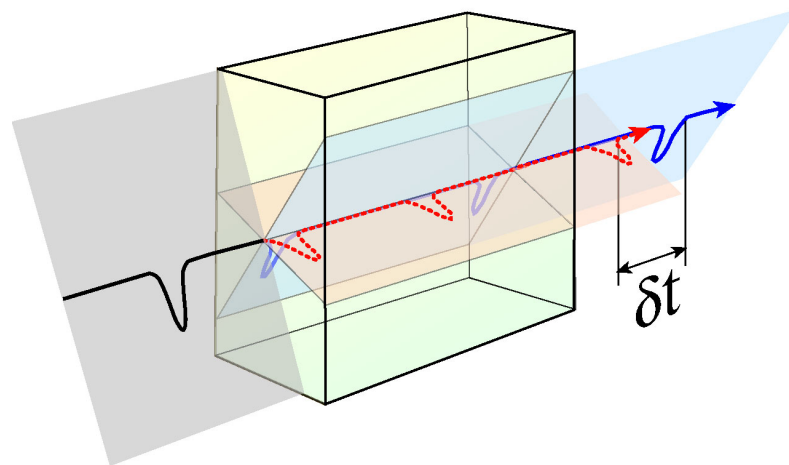


Un modèle possible.....

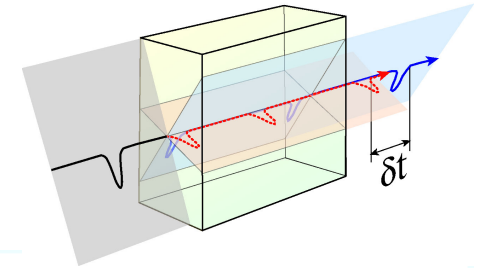


Auer et al., 2015, *Geophys. Res. Lett.*

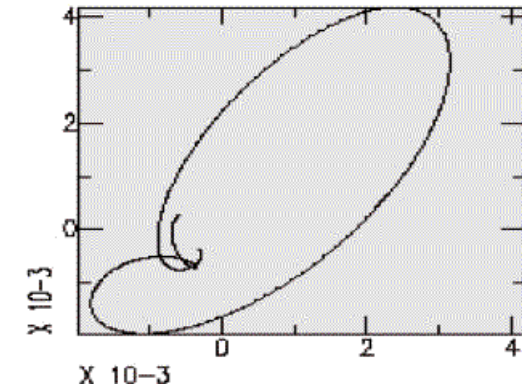
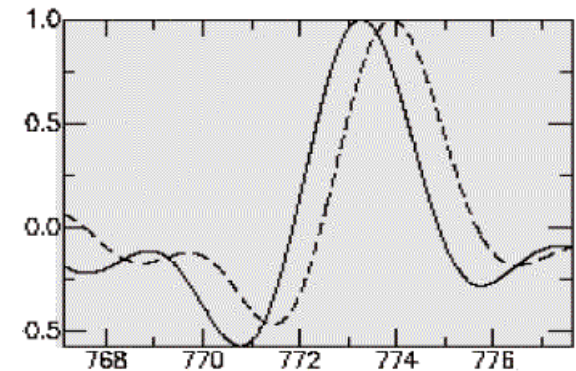
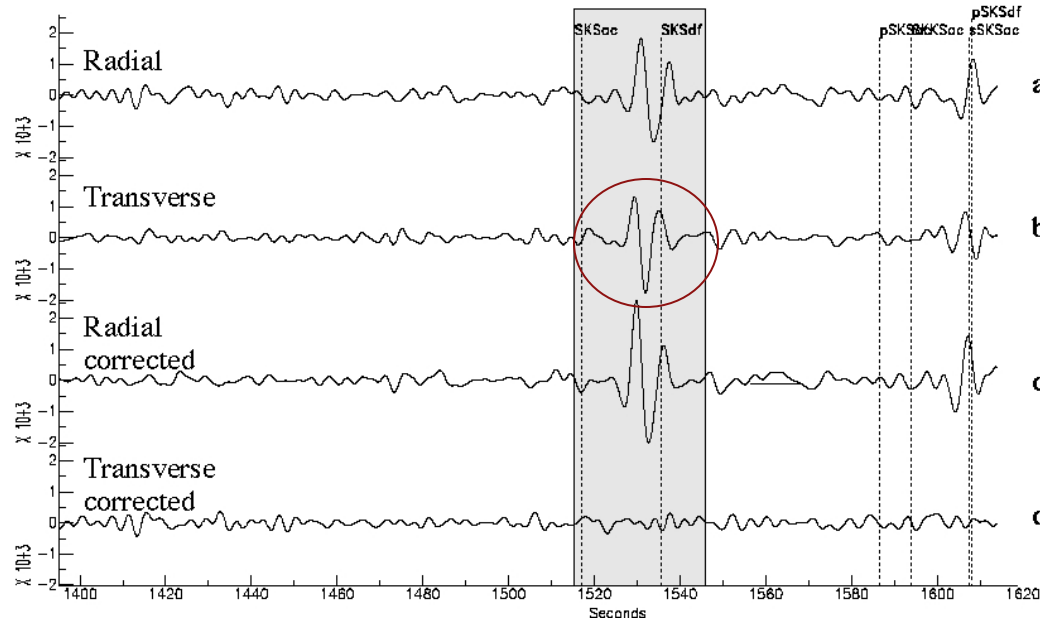
Ondes de volume: biréfringence des ondes SKS



Bi-refringence des ondes SKS



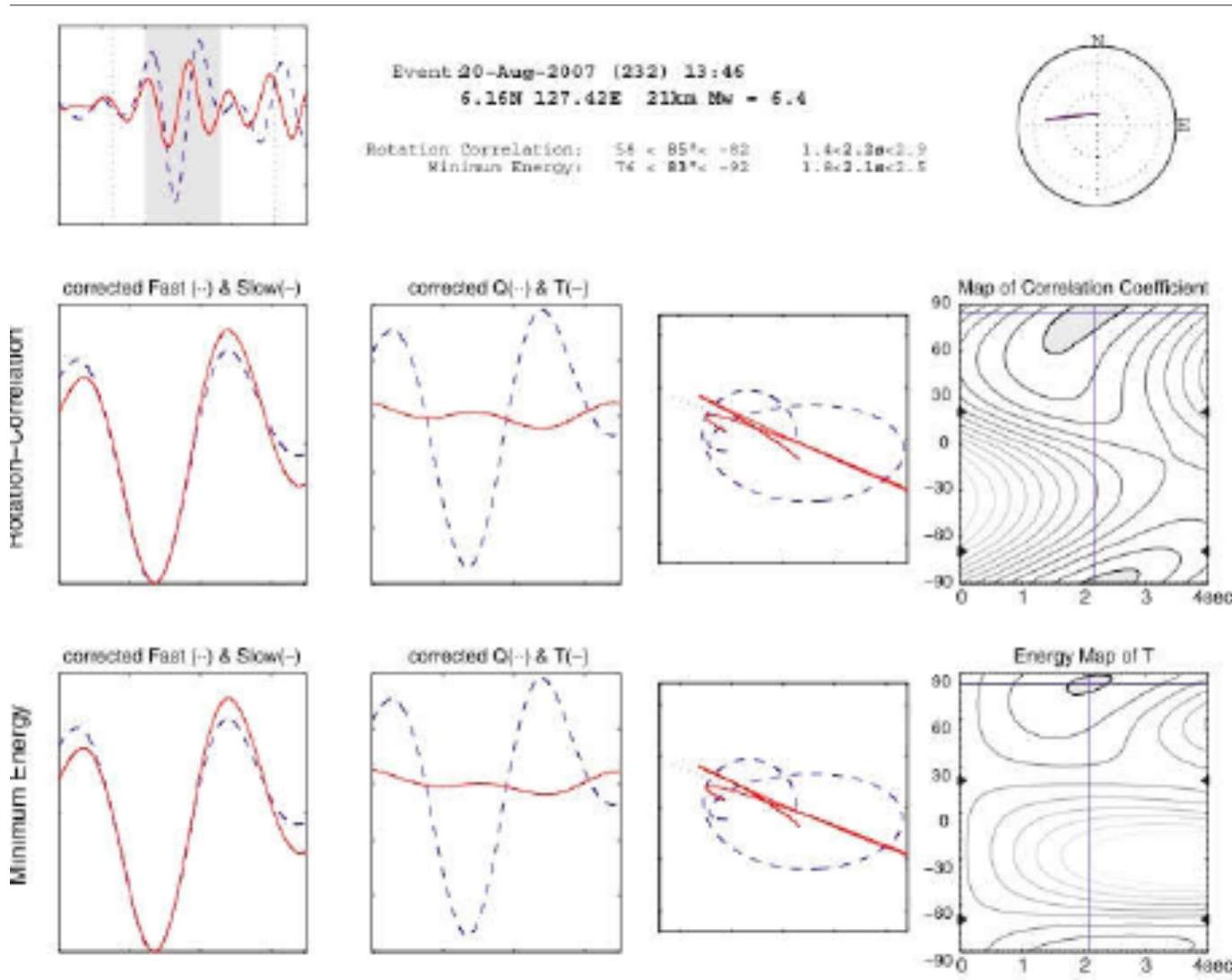
ATD, event 97245 Backaz N280°E, dist. 117°,
lat. 3.849°N, long. -75.749°E, depth 199 km.

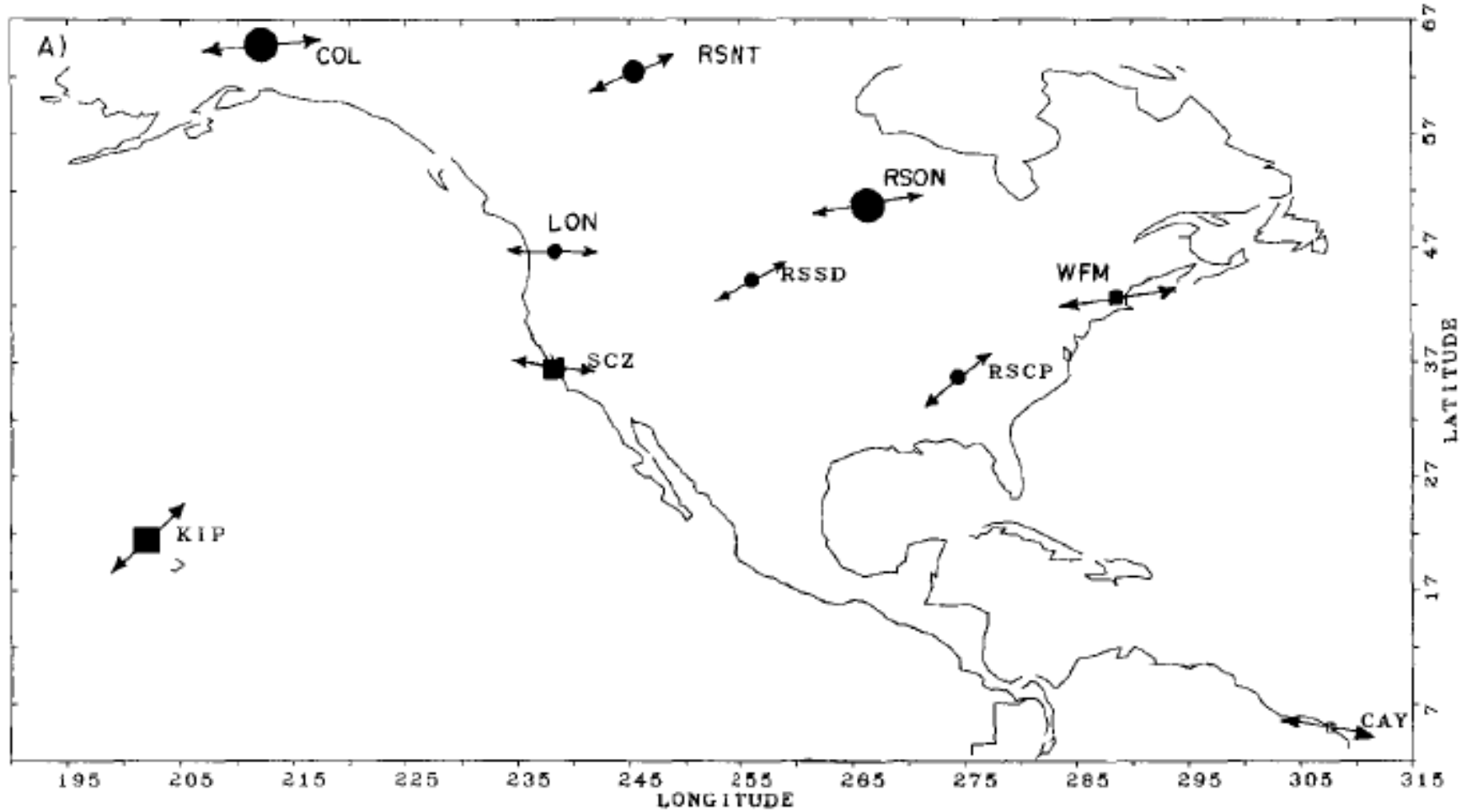


Caractéristiques d'un milieu anisotrope

- Energie sur la composante transversale
- Mouvement des particules elliptique
- Peuvent être corrigés en introduisant un modèle anisotrope approprié

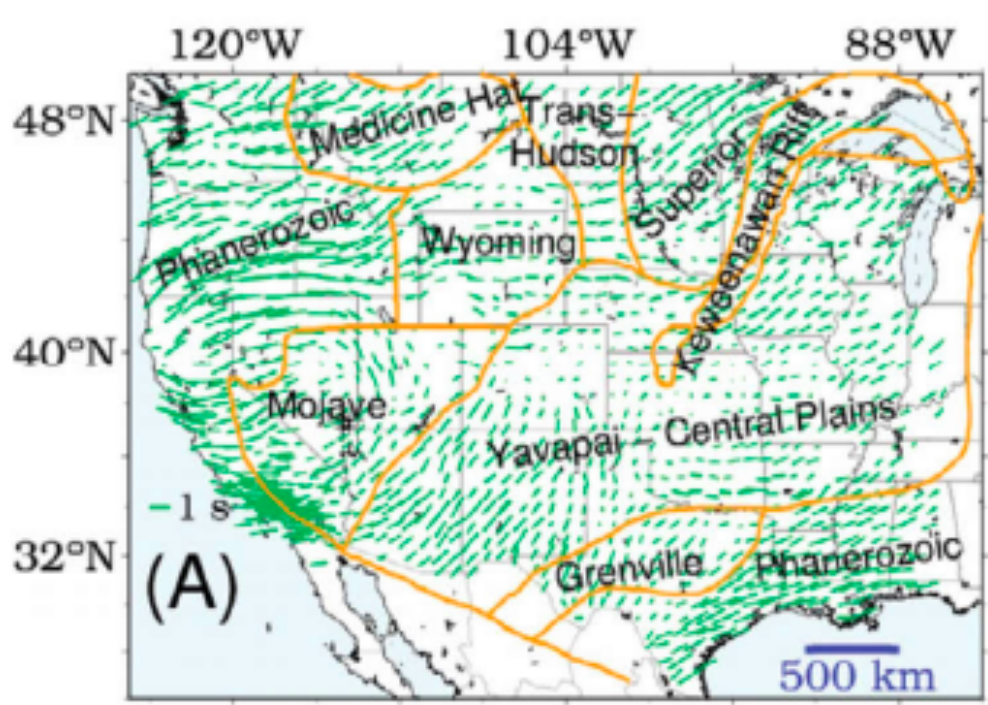
Exemple de mesure de l'anisotropie SKS



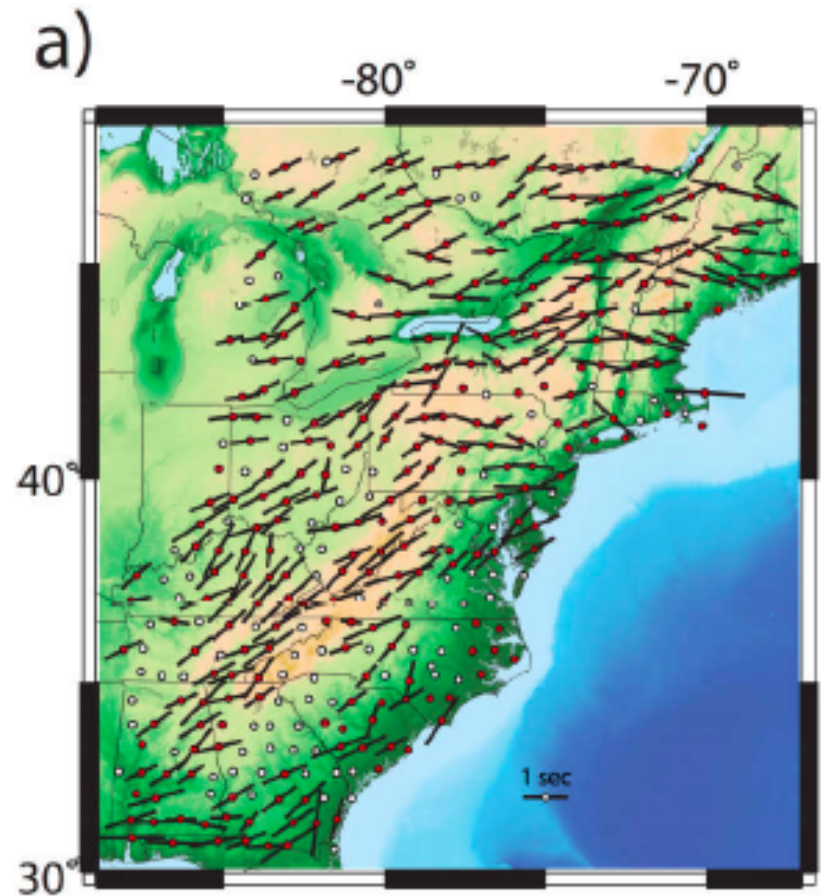


Vinnik, Farra and Romanowicz, BSSA, 1989

Données de splitting nombreuses sur le continent nord-Américain grâce au réseau USArray

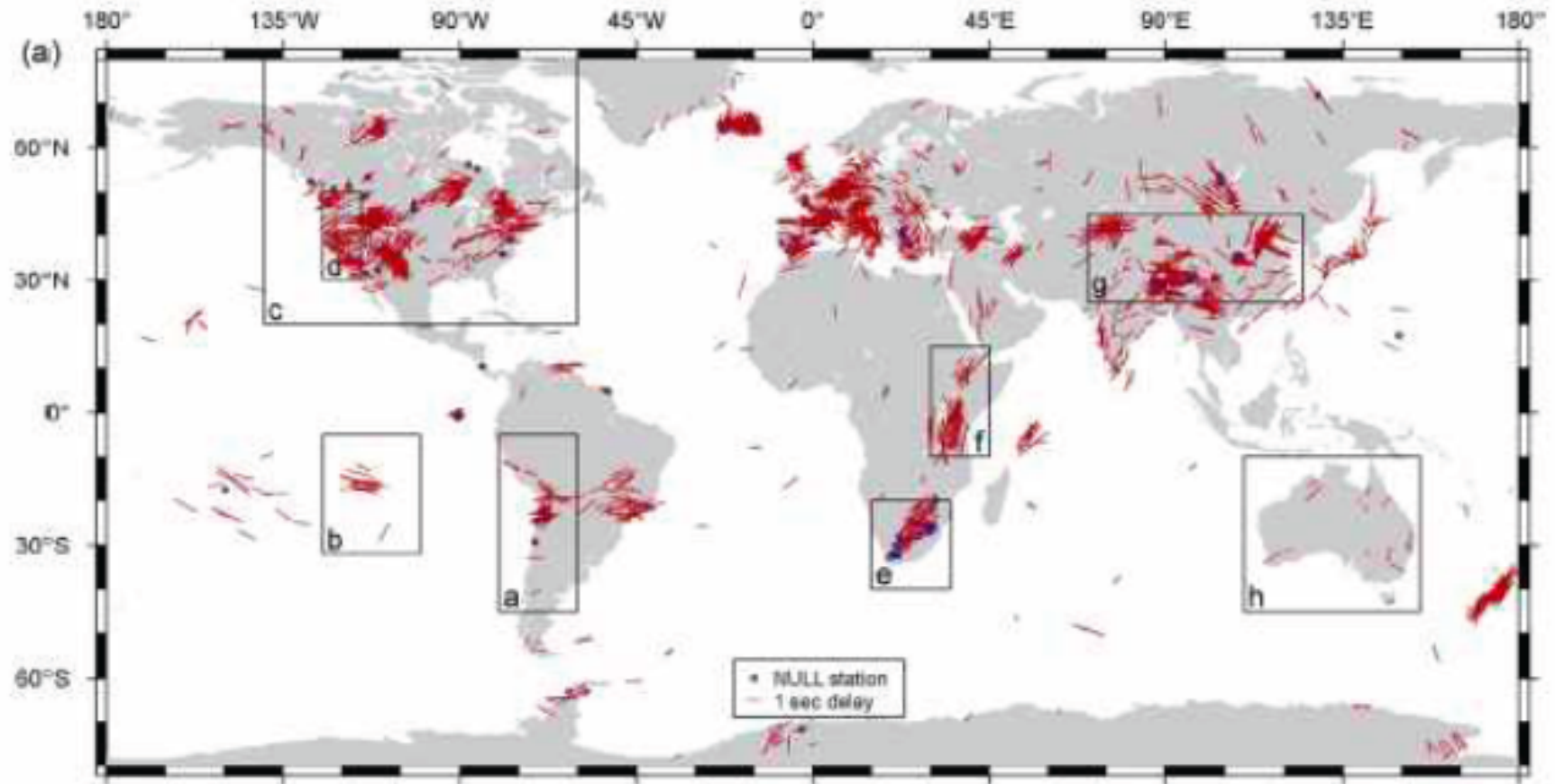


Hongsresawat et al., 2015



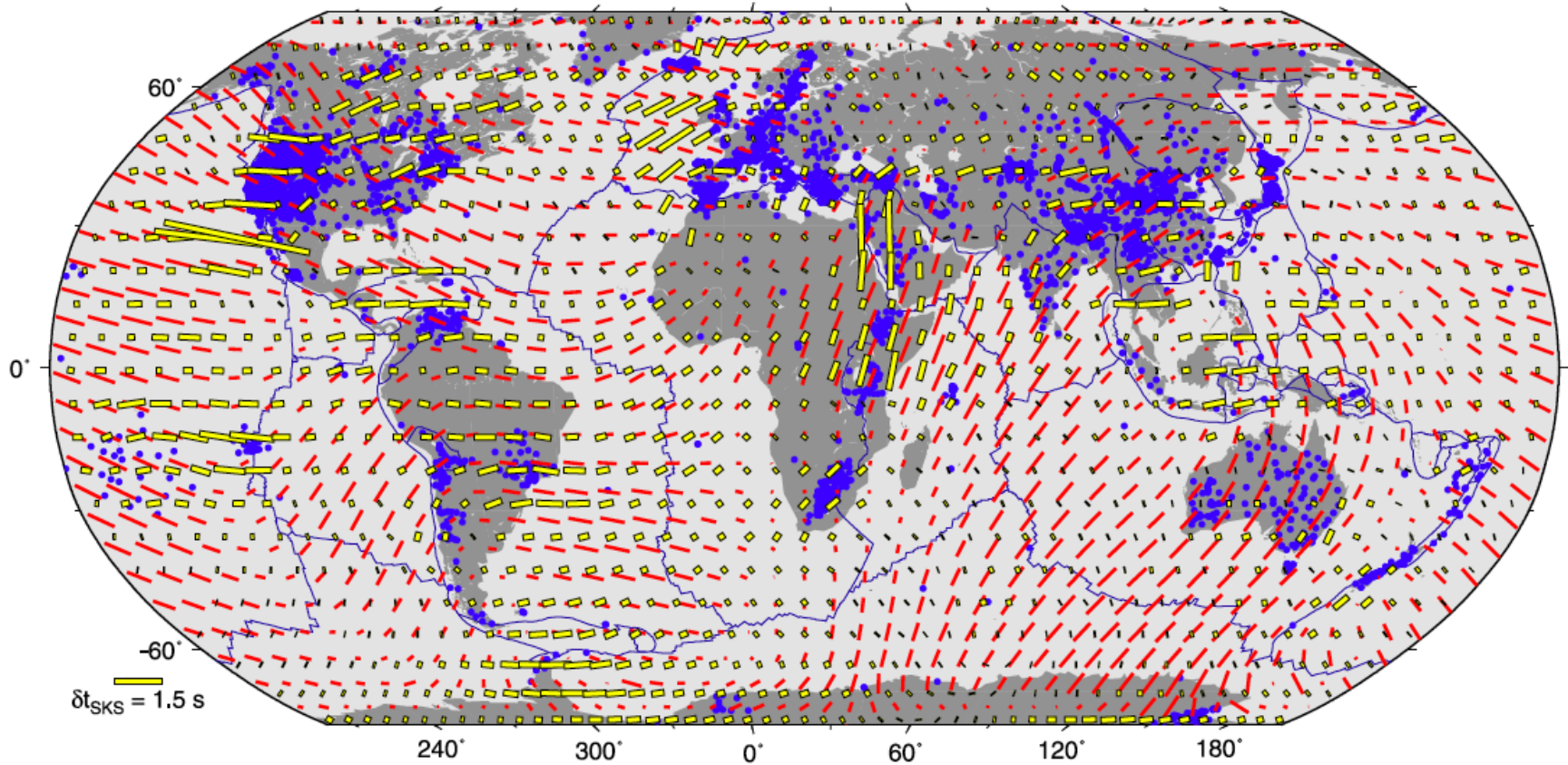
Long et al., 2016

Splitting des ondes SKS



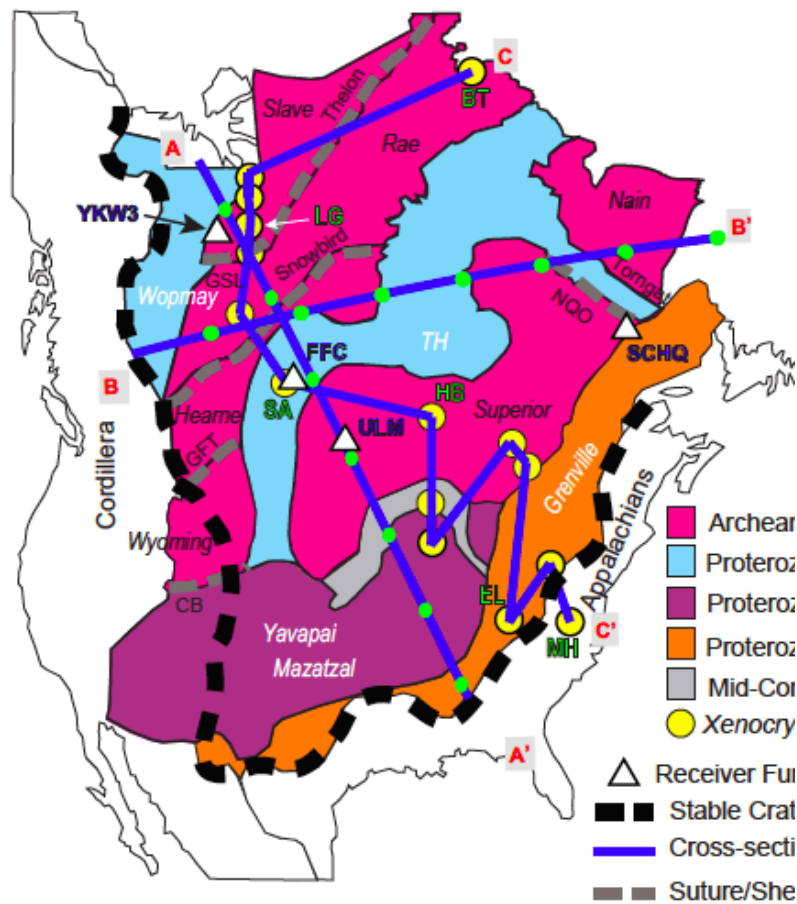
Base de données globale en 2012 (fig. T. Becker)

Anisotropie azimuthale: ondes de surface / SKS splitting



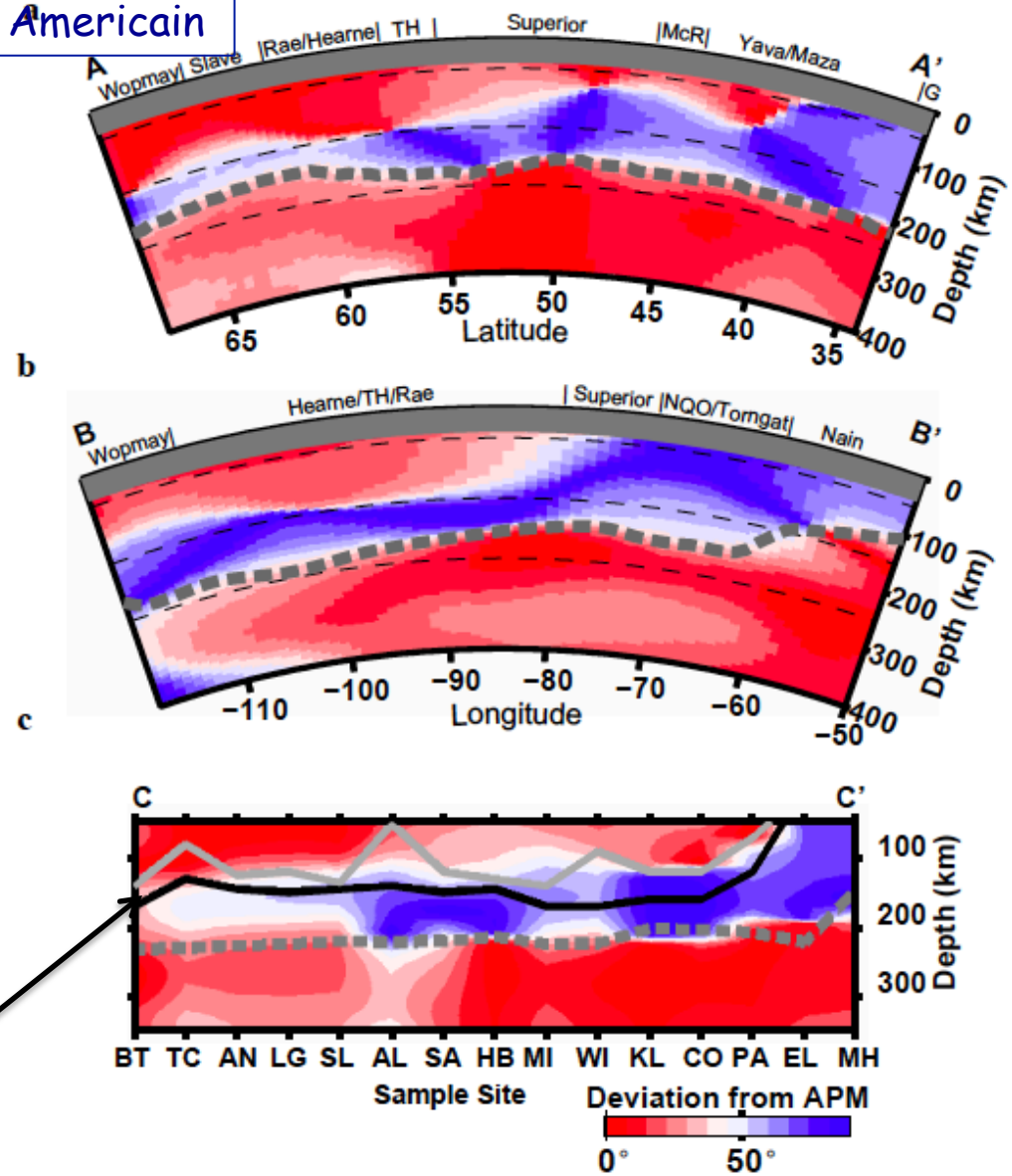
- Points de mesure de splitting SKS
- Distribution globale de l'anisotropie azimuthale deduite du splitting SKS
- Modèle d'anisotropie azimuthale par ondes de surface –Lebedev and vanderHilst (2008)

Inversion conjointe des ondes de surface et des données de splitting sur le continent nord Américain

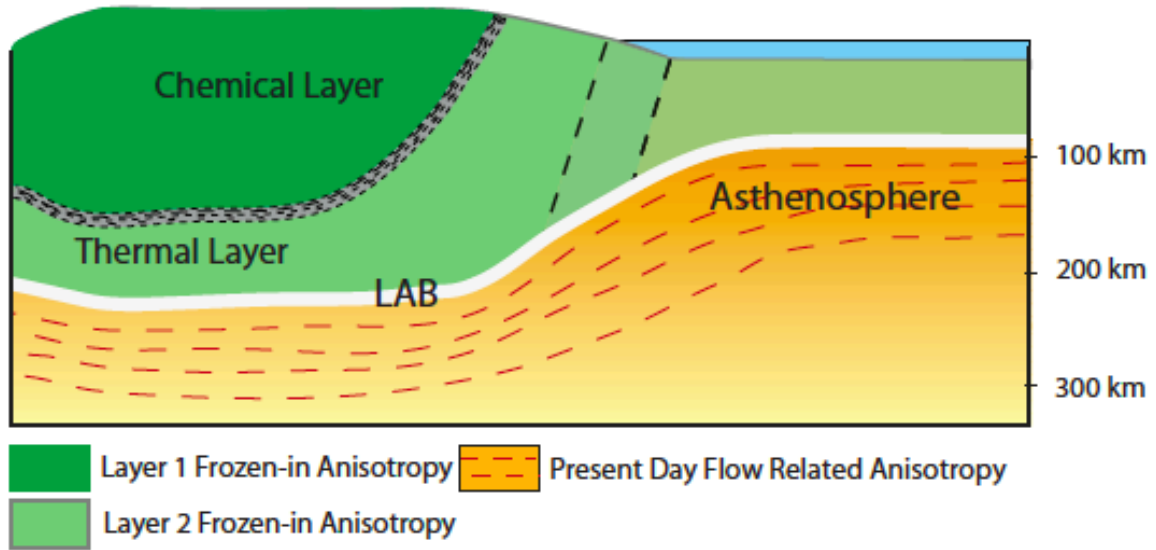


- Archean
- Proteroz:
- Proteroz:
- Proteroz:
- Mid-Cor
- Xenocry
- Receiver Fui
- Stable Crat
- Cross-secti
- Suture/She

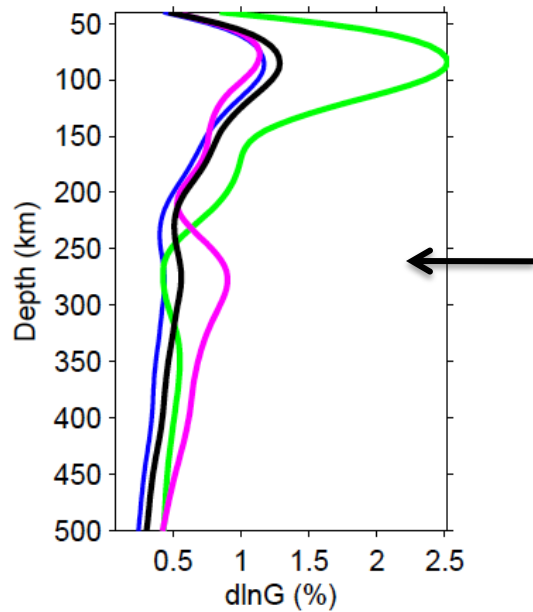
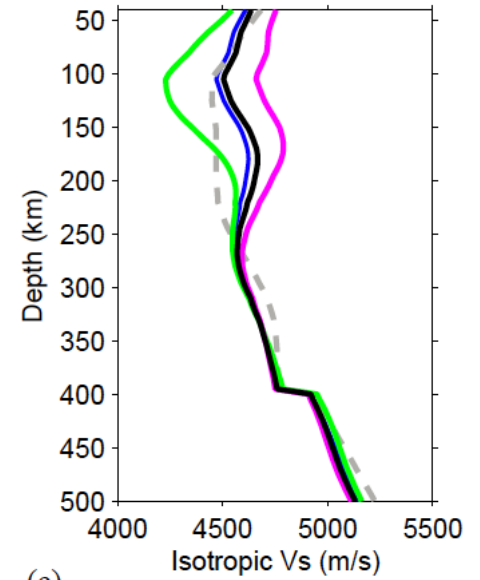
Continuous lines: % Fo (Mg)
 from
 Griffin et al. 2004
 Grey: Fo%93
 black: Fo%92



Continent nord Américain



Vitesse Vs isotrope

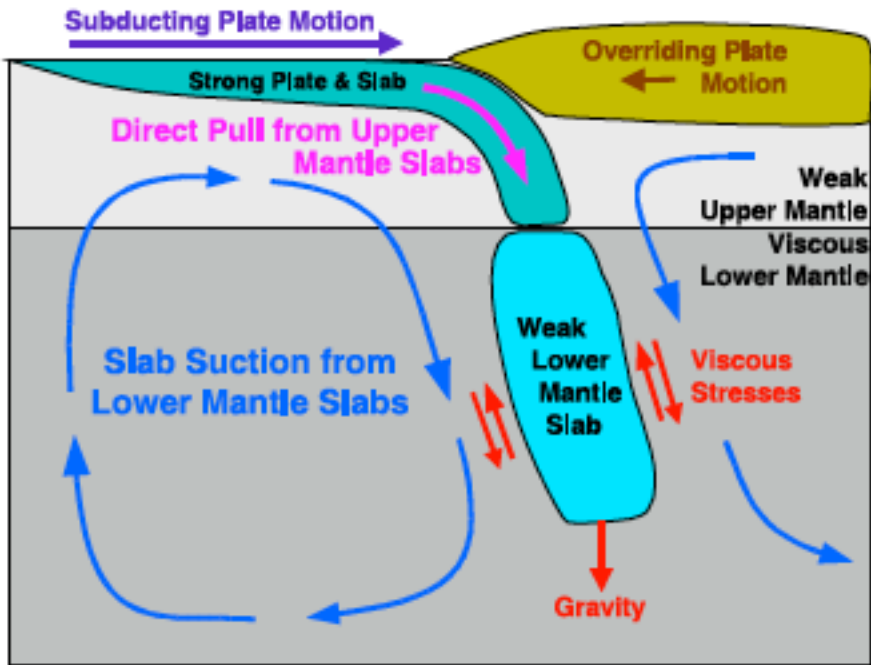


- 1D Reference
- Regional Mean
- WUS Mean
- Craton Mean
- Continent Mean

Anisotropie azimuthale

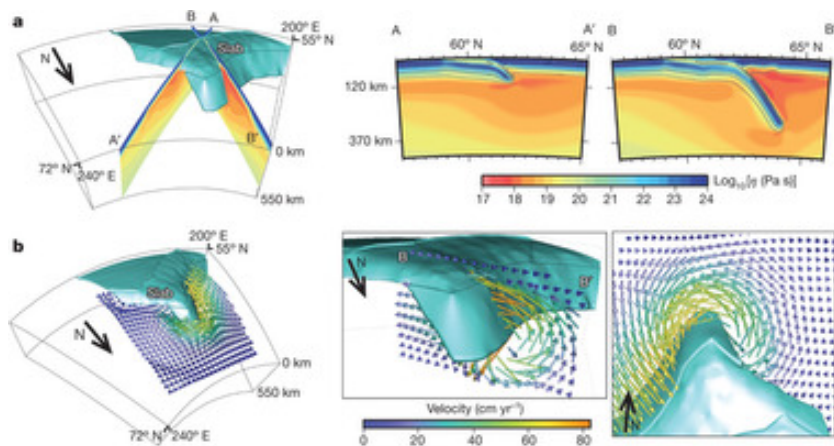
Anisotropie sismique dans les zones de subduction

- Splitting des ondes de volume:
SKS, S, ScS
- Variations azimuthales des ondes P

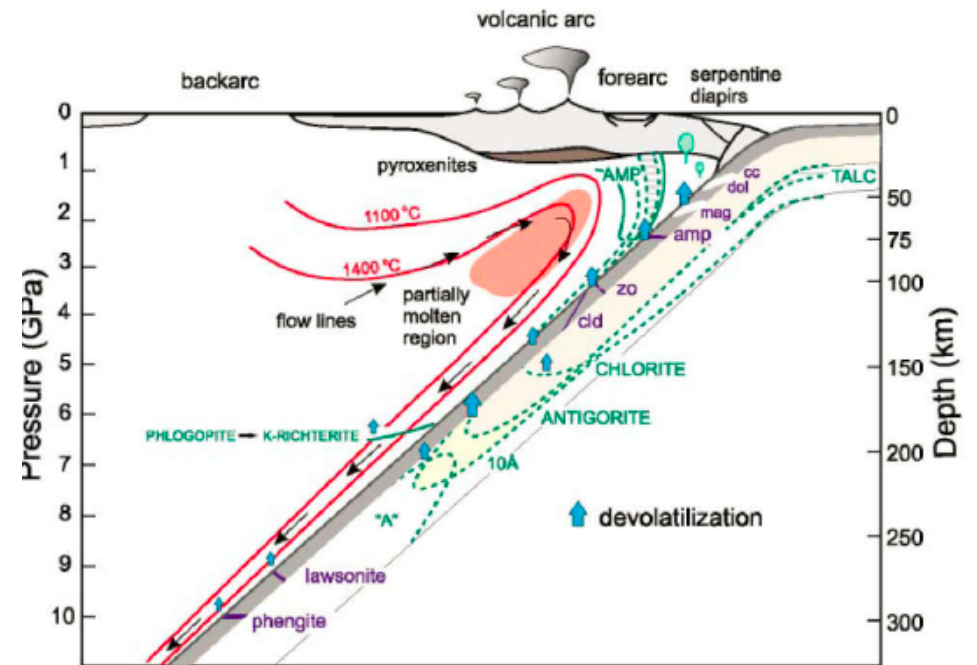


Conrad and Lithgow-Bertelloni, 2004

Anisotropie sismique et dynamique des zones de subduction

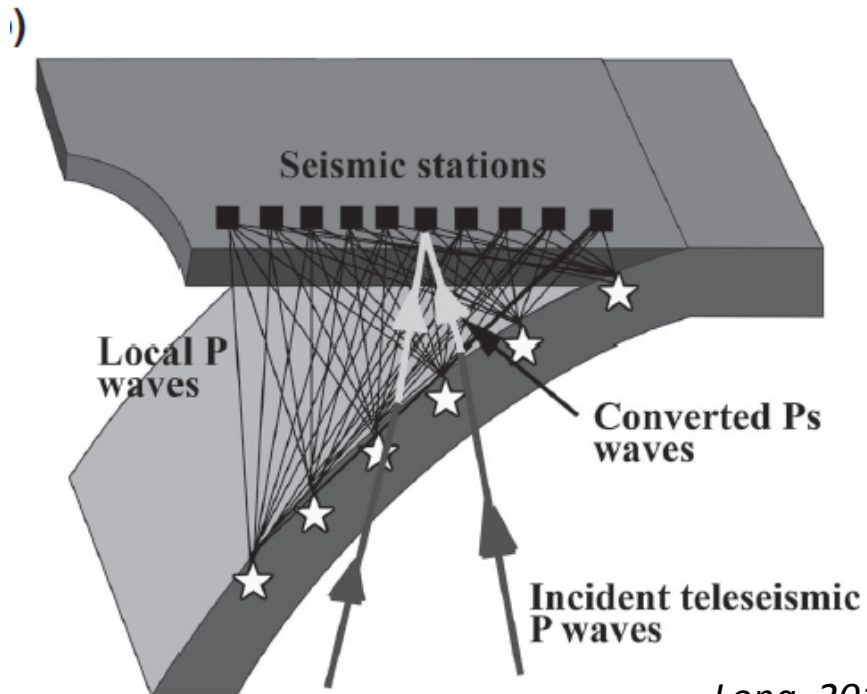
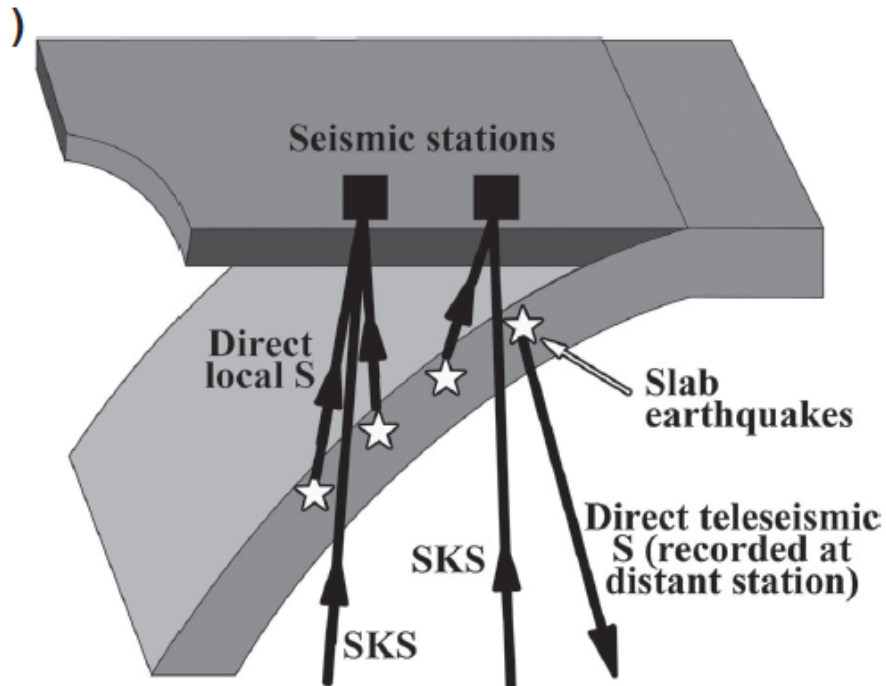


Jadamek and Billen, 2010

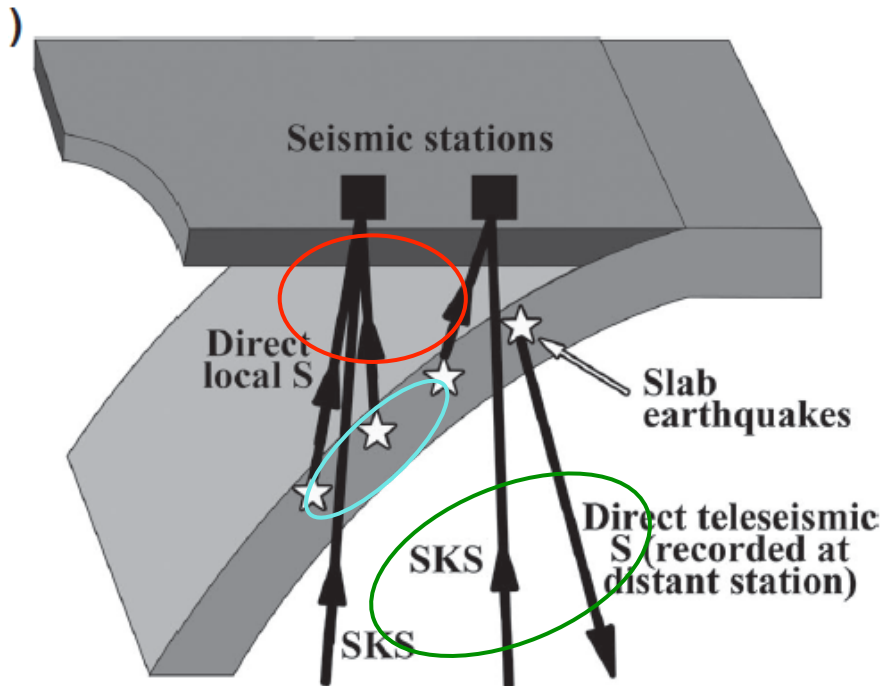


Poli and Schmidt, 2002

Méthodes d'observation sismologiques de l'anisotropie dans les zones de subduction

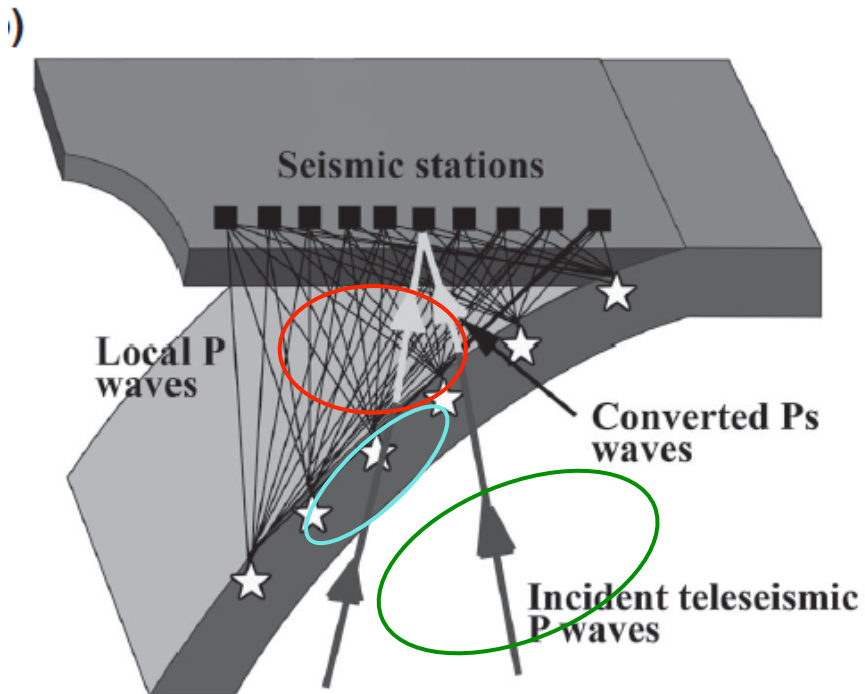


- Ondes S engendrées "localement"
- Ondes SKS télésismiques
- Ondes S télésismiques
- Ondes P locales et télésismiques
- Ondes converties Ps



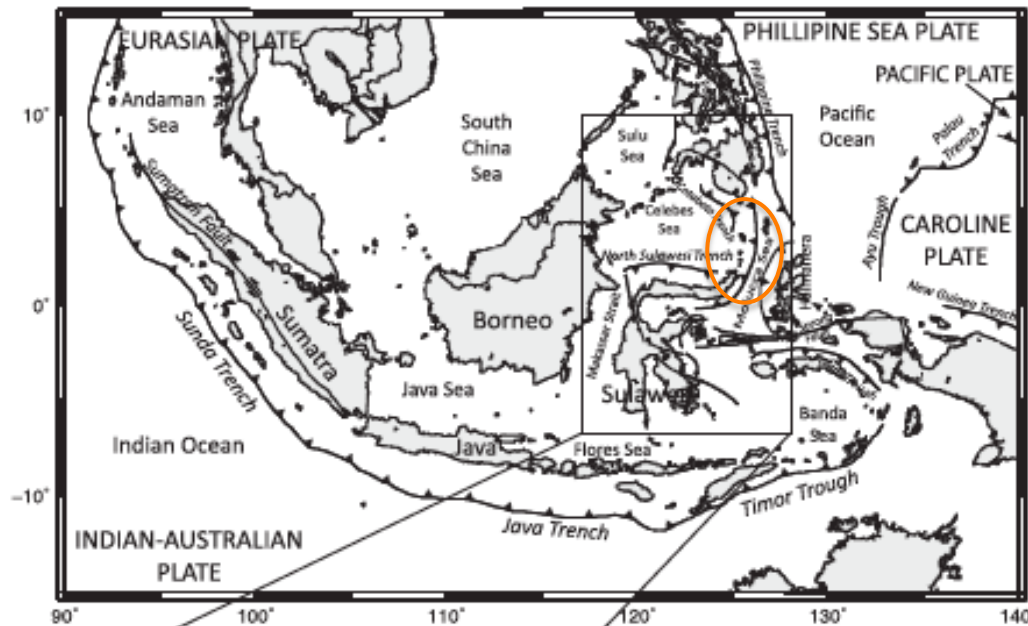
On distingue l'anisotropie dans:

- (1) La partie du manteau au dessus de la plaque plongeante
- (2) La plaque elle-même
- (3) Dans le manteau sous la plaque



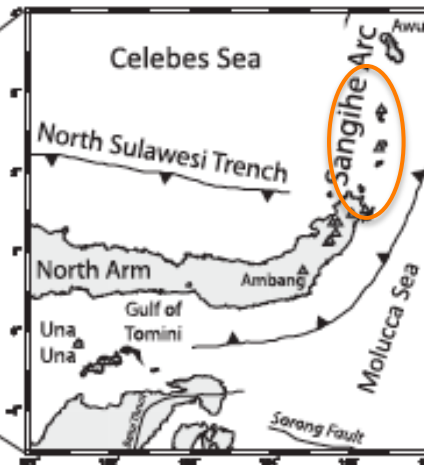
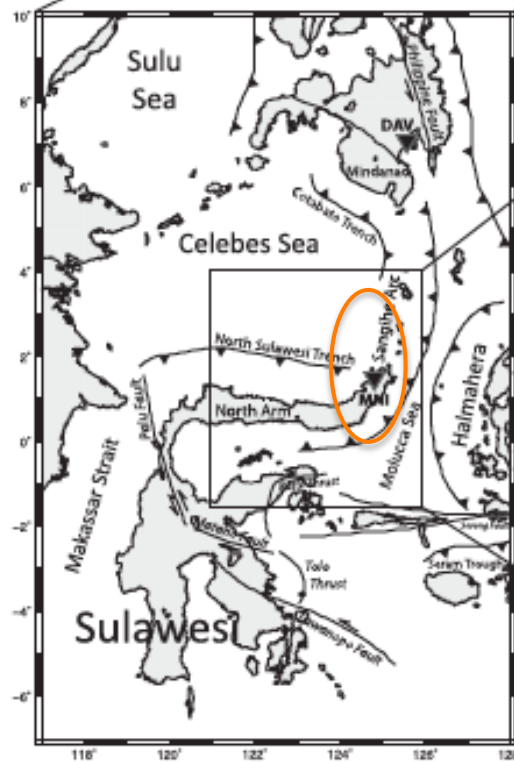
Un cas d'étude:

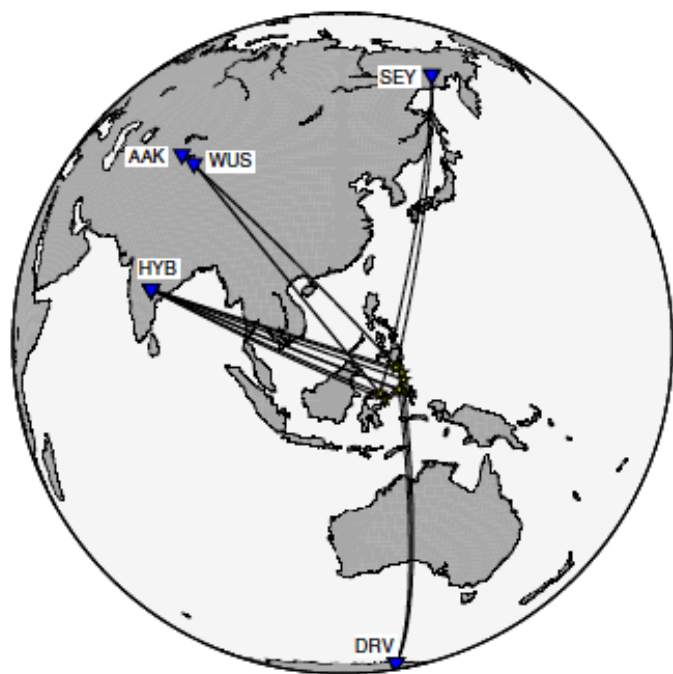
La zone de Subduction de Sangihe



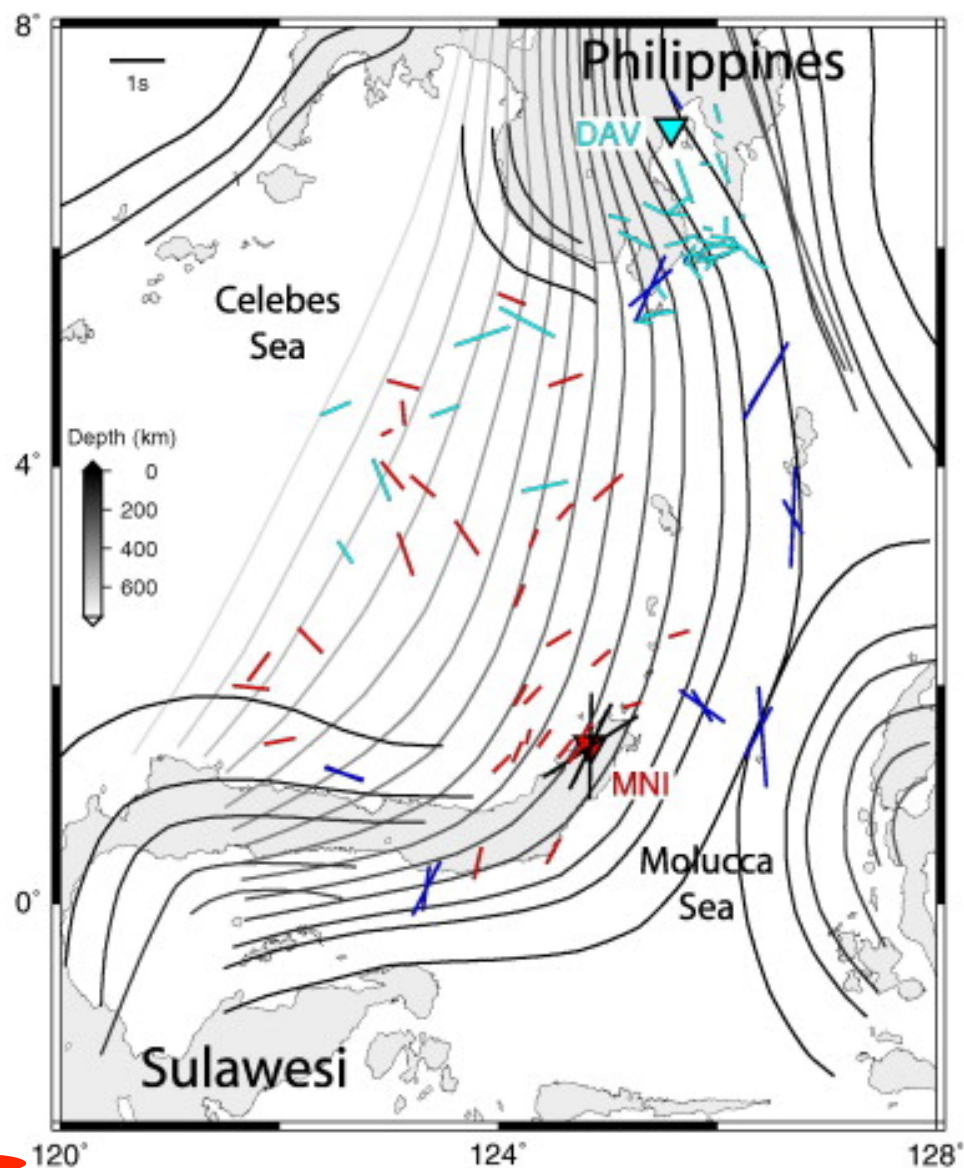
Données de splitting:

- 1) Ondes S locales
- 2) Ondes SKS
- 3) Ondes S telesismiques





Ondes S téléismiques

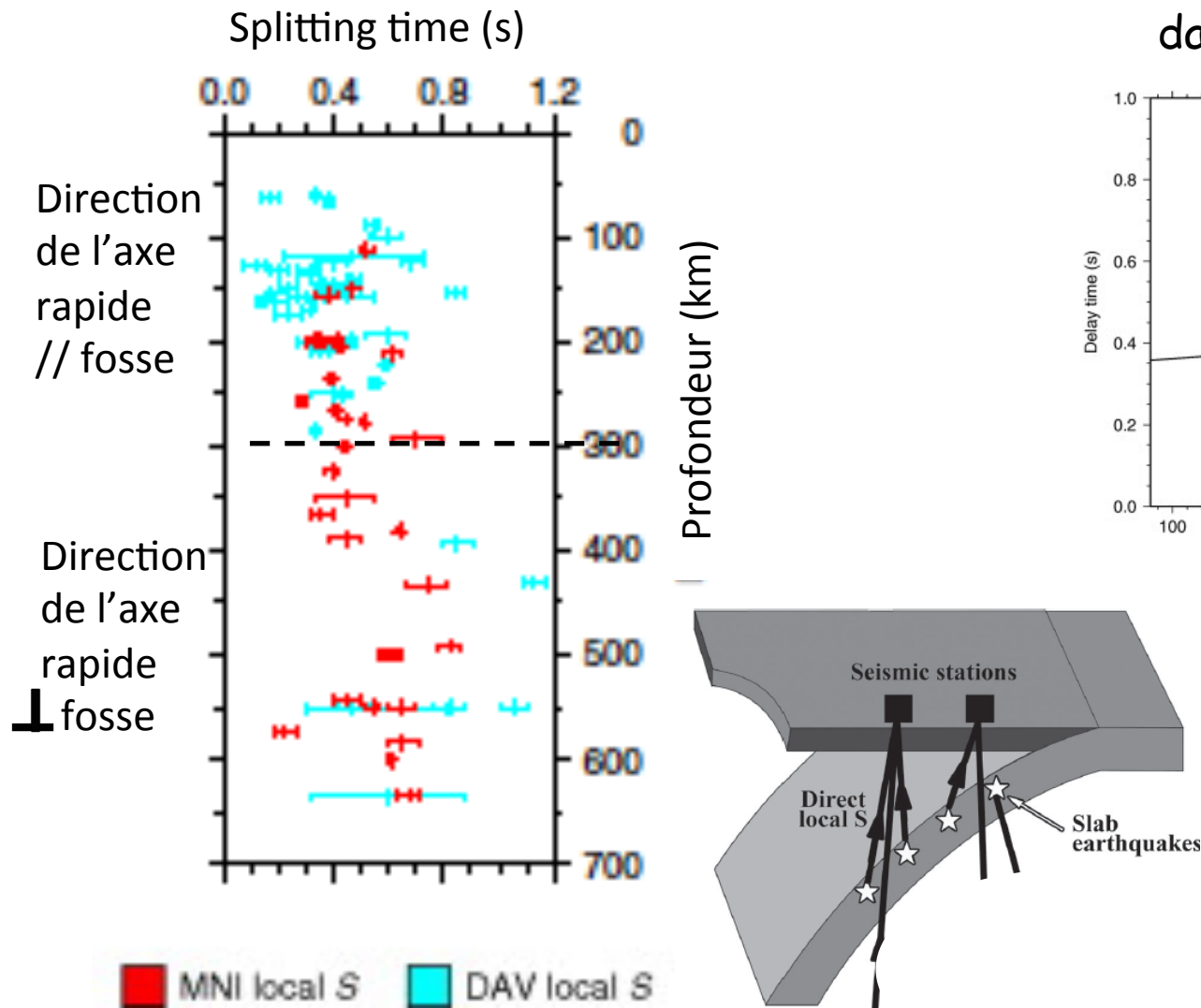


Ondes S locales (— , — , 120°
 et ondes SKS —
 Observées à la station MNI
 Ondes S telesismiques: —

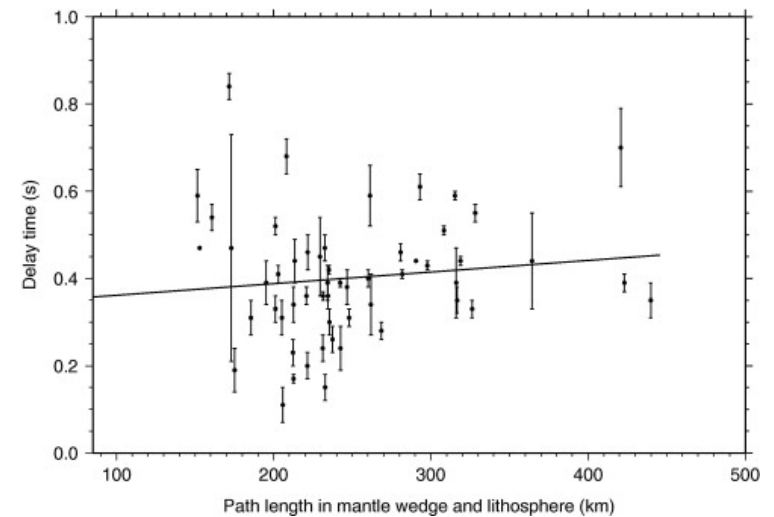
Ondes S locales:

*Pas de variations du splitting pour des profondeurs de source entre 110-380 km

*Pas de variations du splitting en fonction du temps passé par l'onde dans le coin mantellique

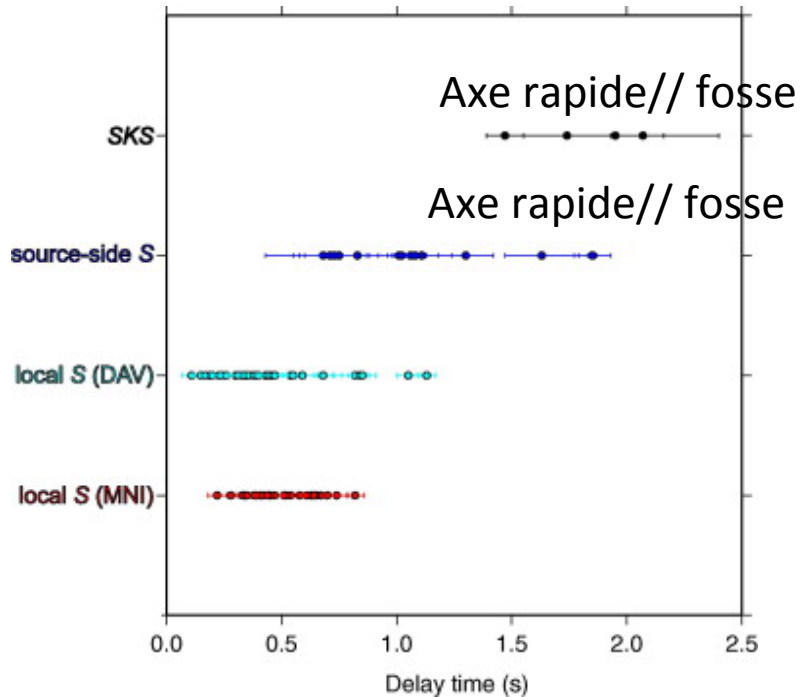


En fonction du temps passé dans le coin mantellique

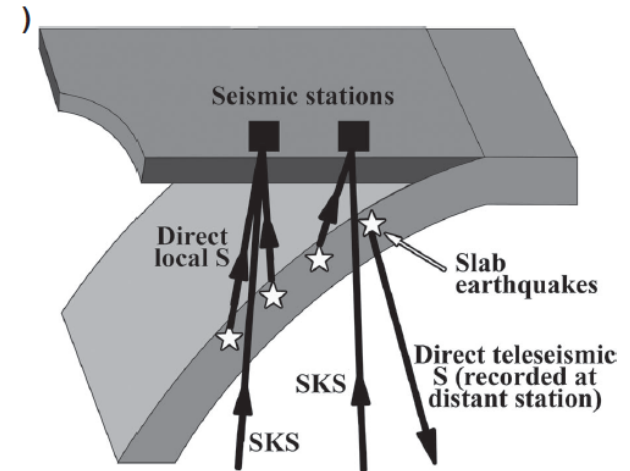


⇒ l'origine de l'anisotropie
 ⇒ doit être dans les
 ⇒ premiers 110 km de
 ⇒ profondeur
 ⇒ (lithosphère/crôte)

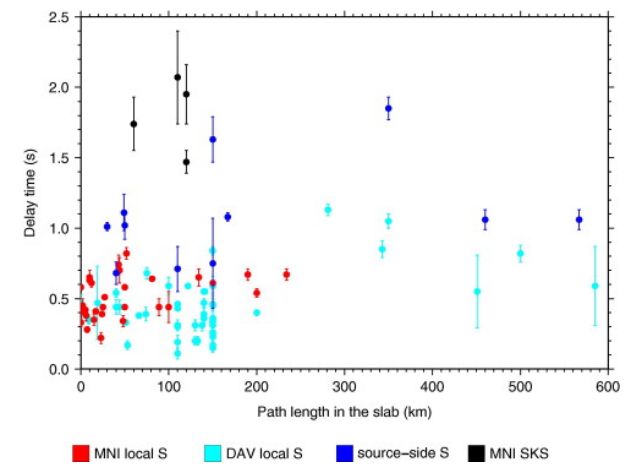
Ondes SKS et ondes S télésismiques

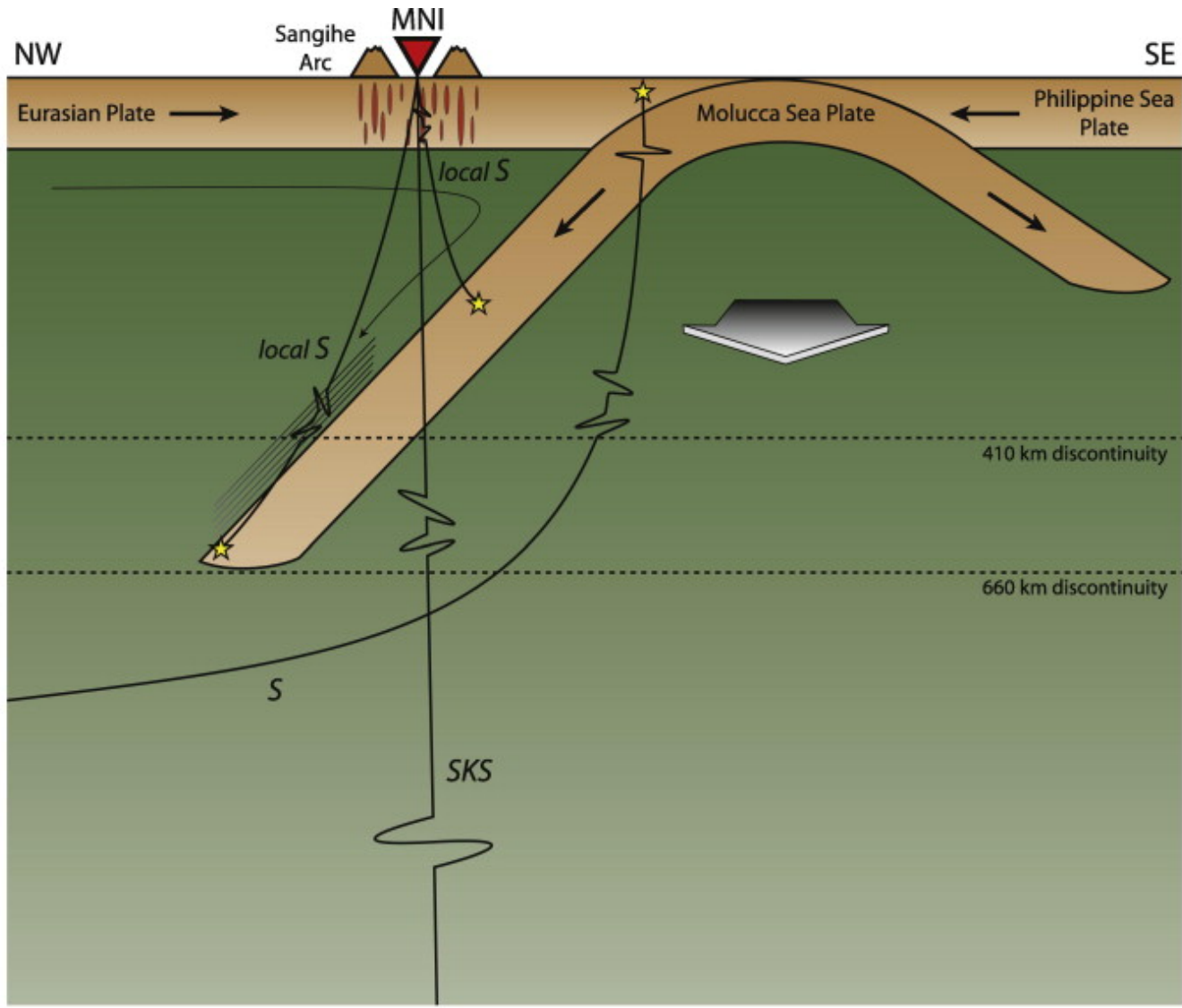


Les ondes SKS et les ondes S télésismiques traversent la même région anisotrope sous la plaque plongeante



Ecart de temps en fonction du temps passé par l'onde dans la plaque





Di Leo et al., 2012, PEPI