

Colloque associé au cours:



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

CHAIRE DE PHYSIQUE DE L'INTÉRIEUR
DE LA TERRE

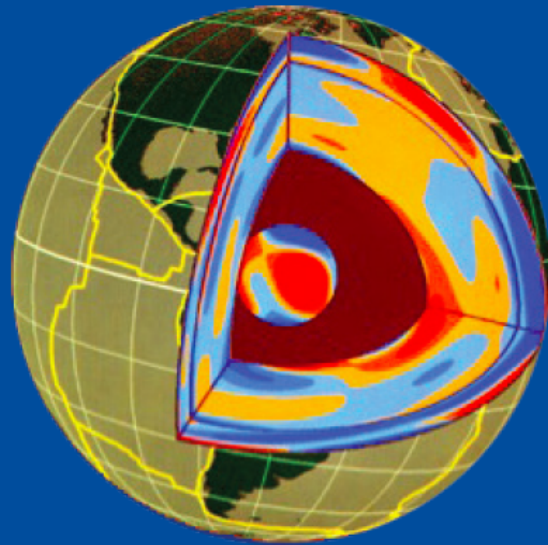
Année académique 2016-2017

Pr Barbara ROMANOWICZ

Flow in the deep Earth

**Colloque en anglais - Workshop in English
organisé avec Patrick Cordier, Université de Lille**

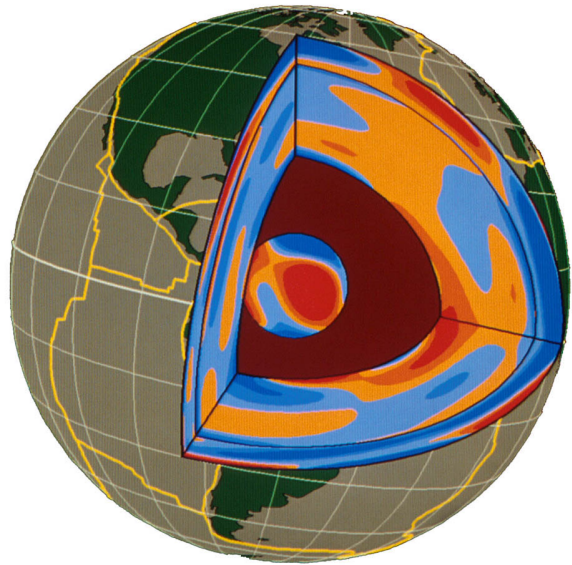
Jeudi 1^{er} et vendredi 2 décembre 2016
Amphithéâtre Maurice Halbwachs



De 9h à 18 h

Entrée libre, mais inscription souhaitable:

<http://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/colloque.htm>



Anisotropie sismique et écoulement dans le manteau terrestre

5- La zone de transition et le manteau inférieur - 1e partie

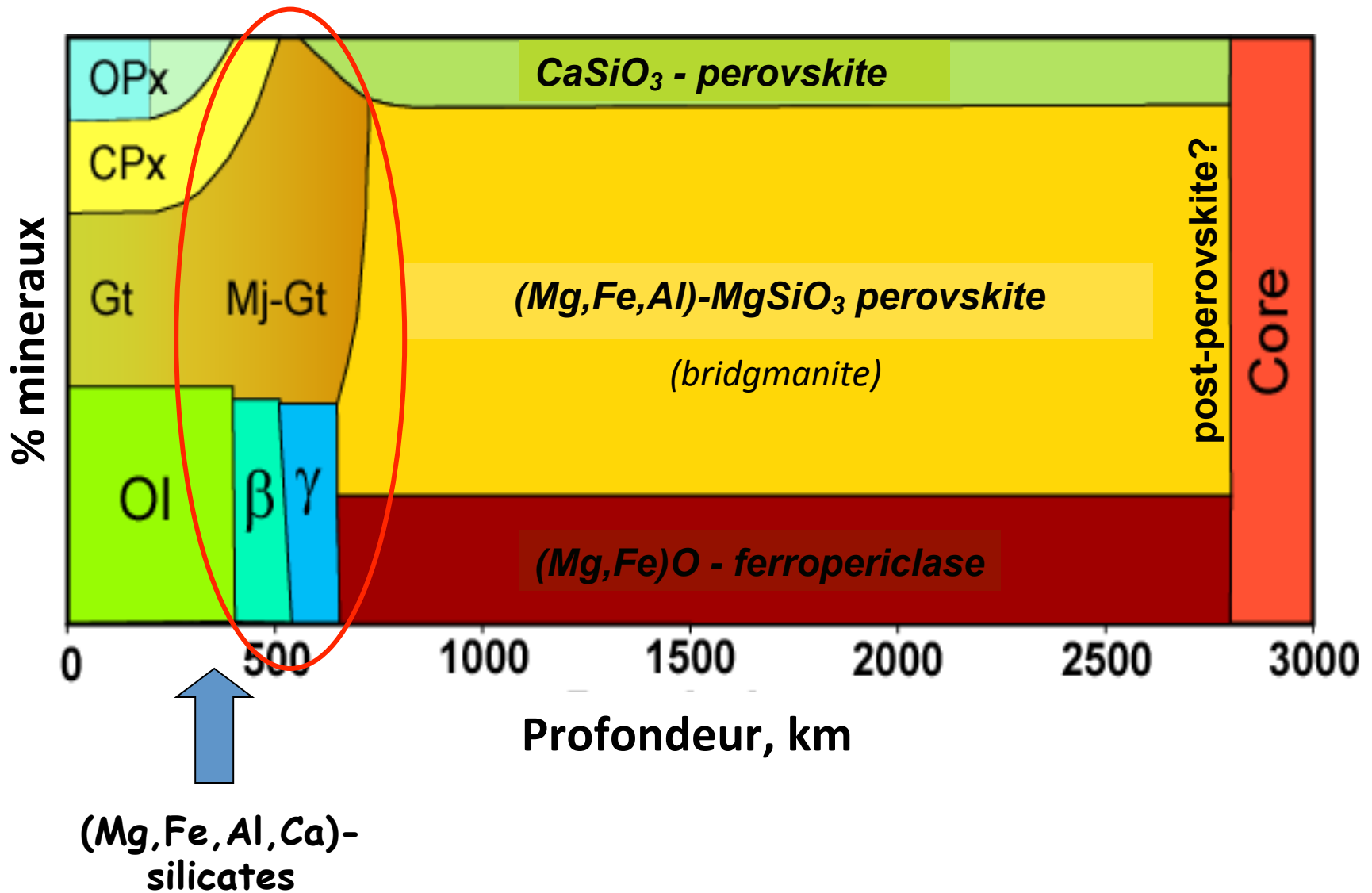
Barbara Romanowicz

Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre

Collège de France

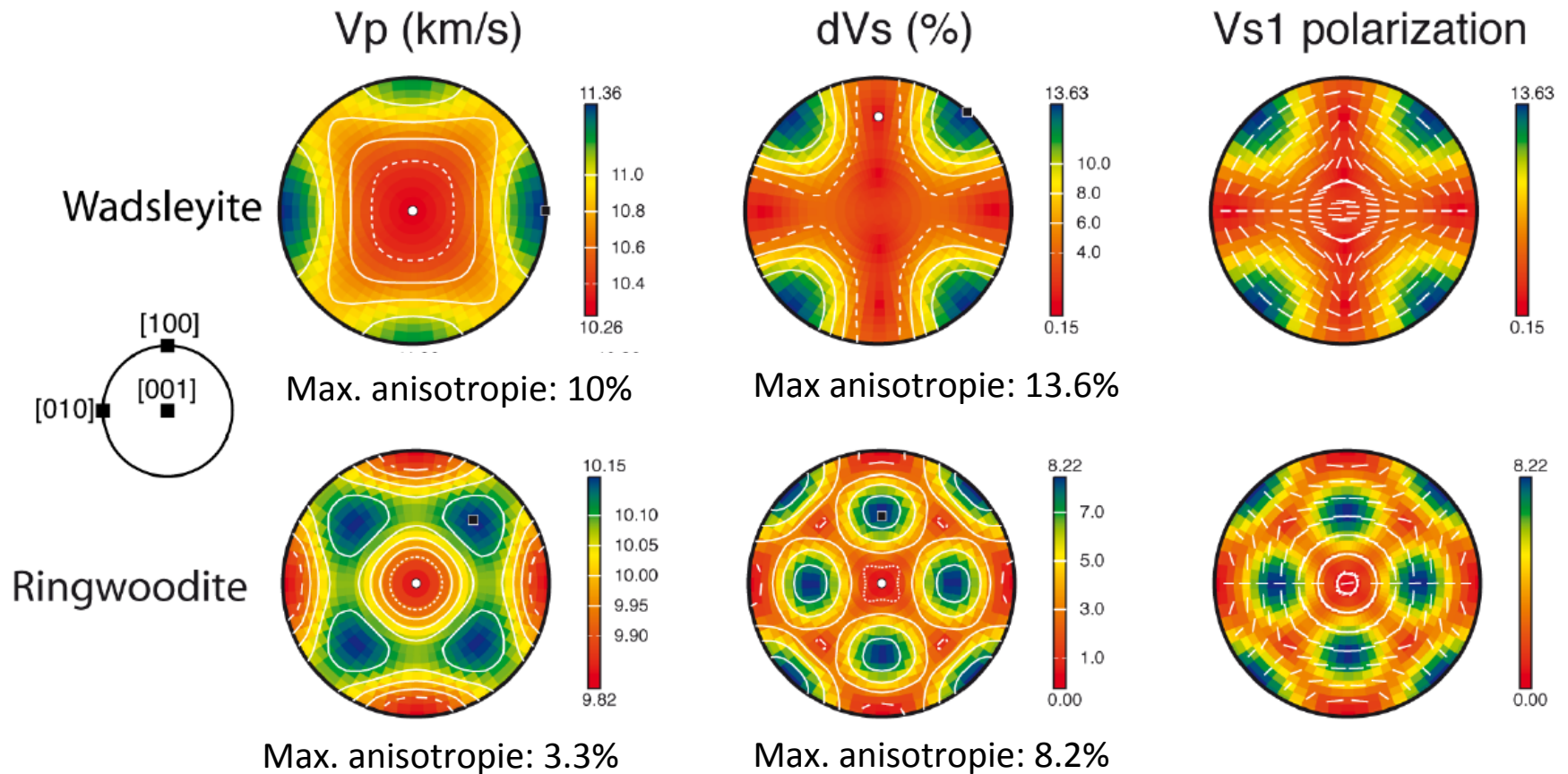
22 Novembre 2016

Minéraux du manteau de la Terre



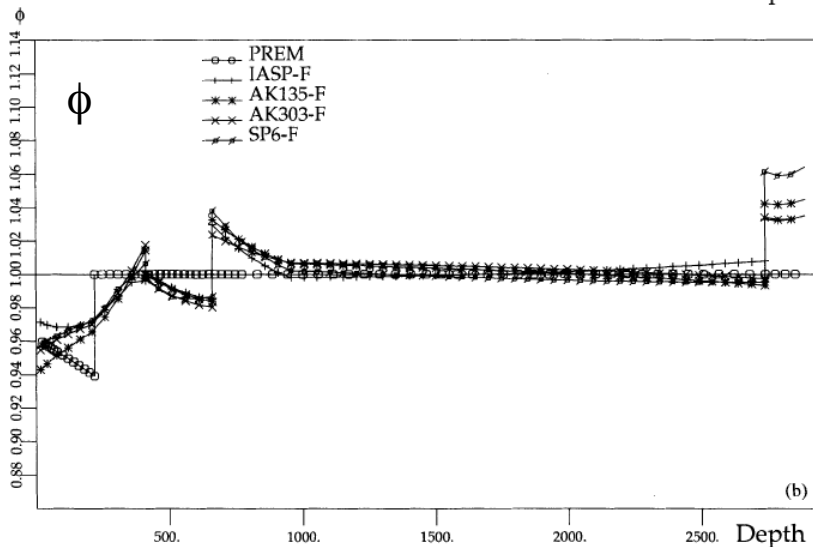
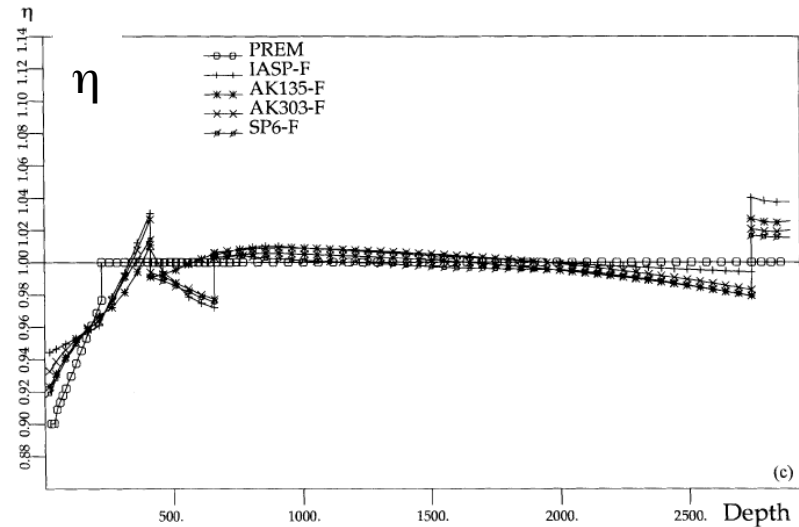
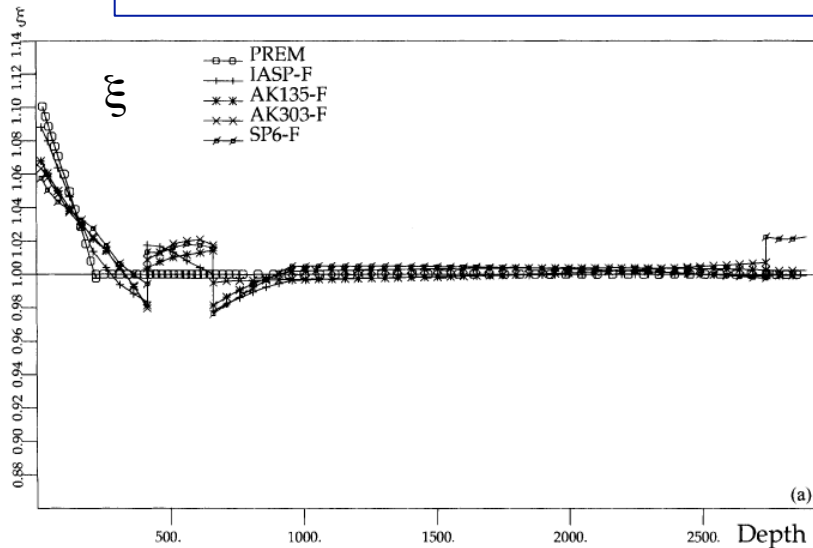
Courtesy of S. Sinogeikin

La zone de transition (410-670 km)



=> Prédiction : l'anisotropie diminue avec la profondeur

Inversion conjointe des ondes de volume P et S et des modes propres pour un modèle "1D" de l'anisotropie radiale dans le manteau terrestre



*Sont aussi inversés:
le facteur de qualité
(Q), et la densité*

$$V_S^2 = \frac{2V_{SV}^2 + V_{SH}^2}{3}$$

$$V_P^2 = \frac{V_{PV}^2 + 4V_{PH}^2}{5}$$

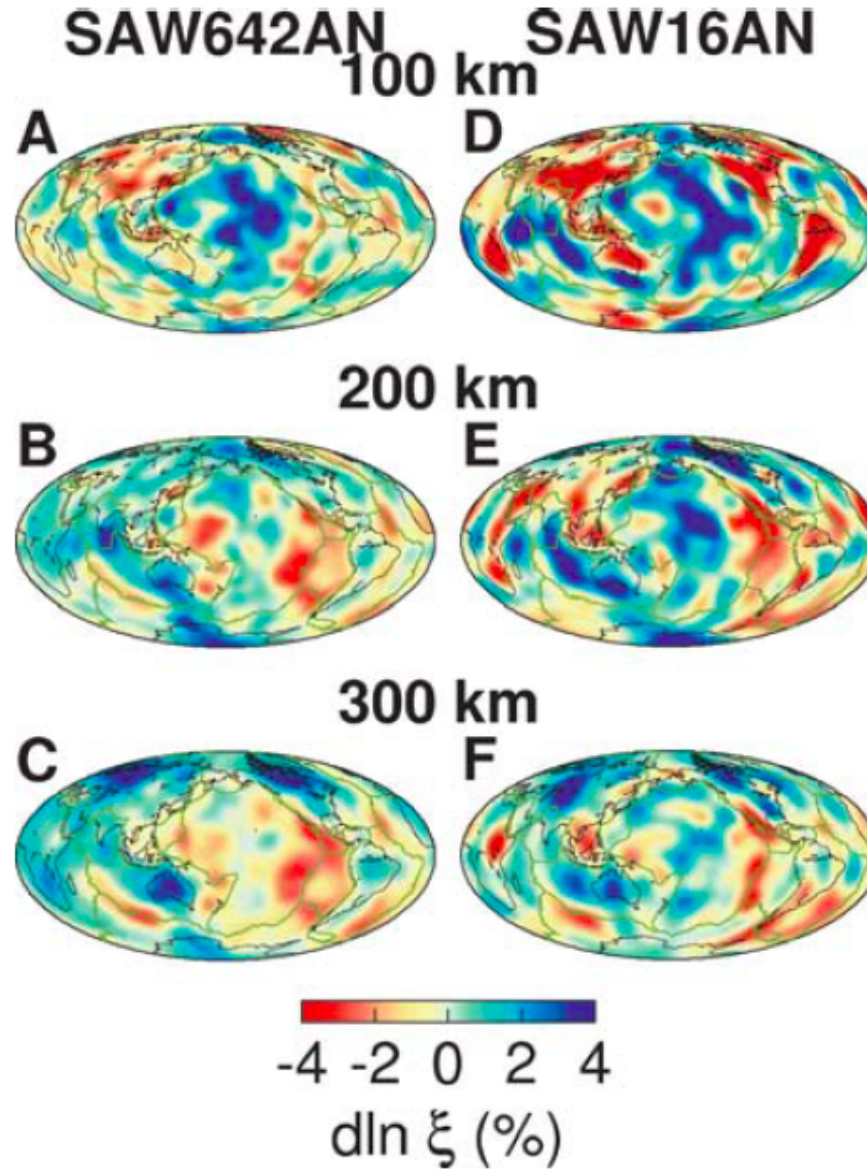
$$\xi = \frac{V_{SH}^2}{V_{SV}^2}$$

$$\phi = \frac{V_{PV}^2}{V_{PH}^2}$$

$$\eta = \frac{F}{(A - 2L)}$$

Modèles tomographiques avec anisotropie radiale

$$\xi = (V_{SH}/V_{SV})^2$$



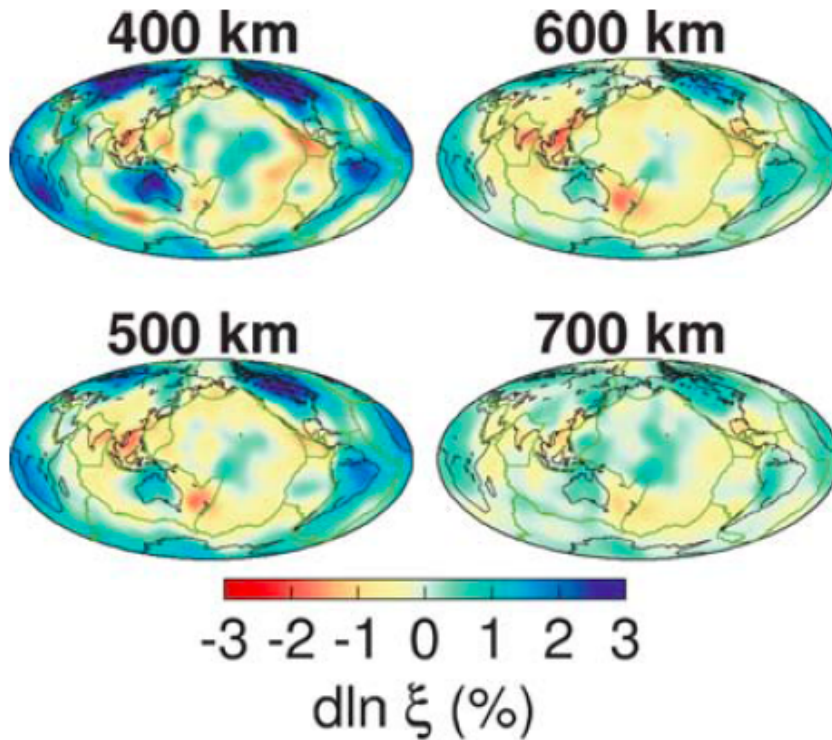
Manteau Supérieur

Inversion des formes d'ondes de surface et de volume

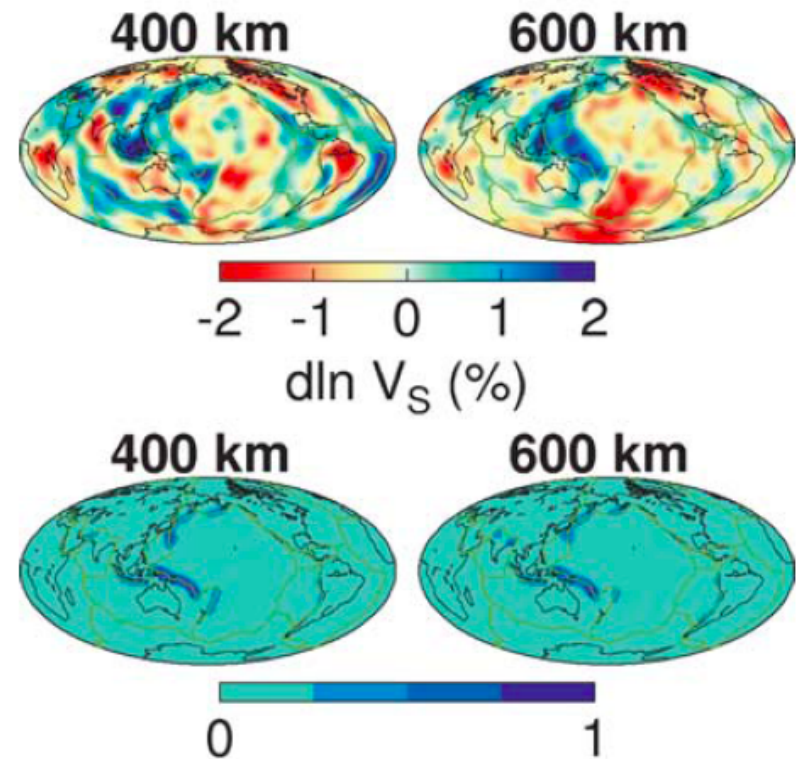
$$d\ln \xi = d\xi/\xi \text{ (par rapport à PREM)}$$

Anisotropie radiale dans la zone de transition

Anisotropie radiale

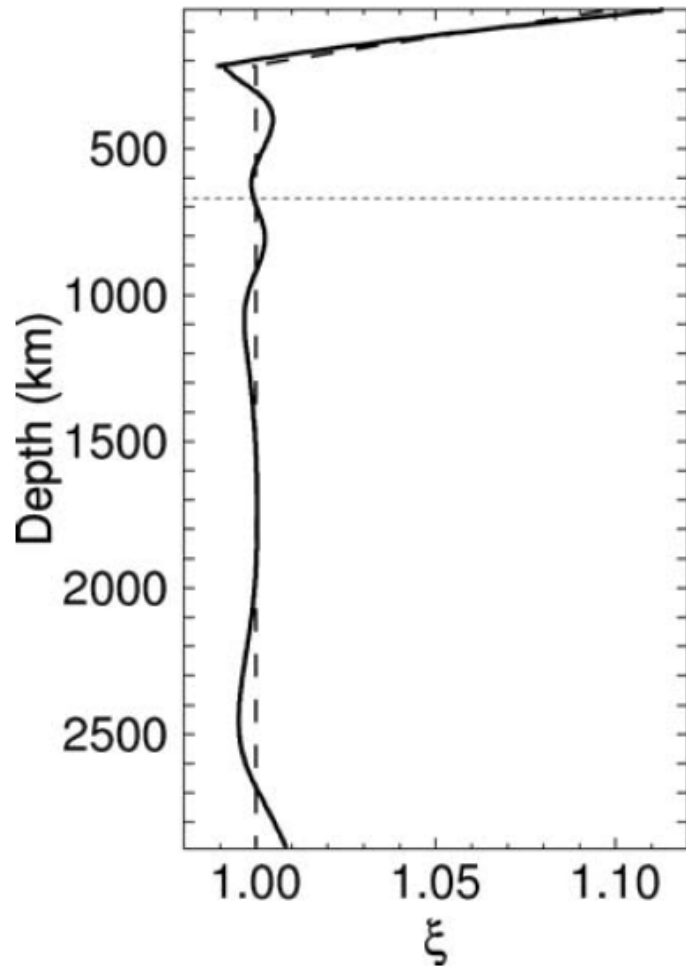


Vs isotrope

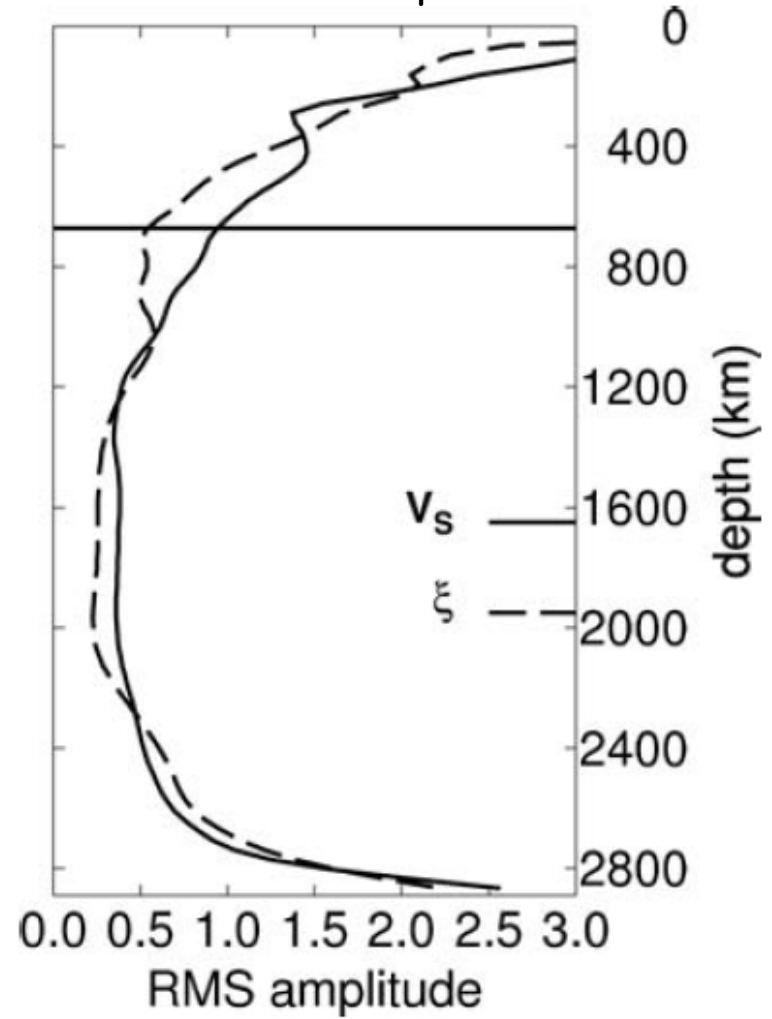


Modèle de subduction
de Lithgow Bertelloni et
Richards (1998)=
densité normalisée

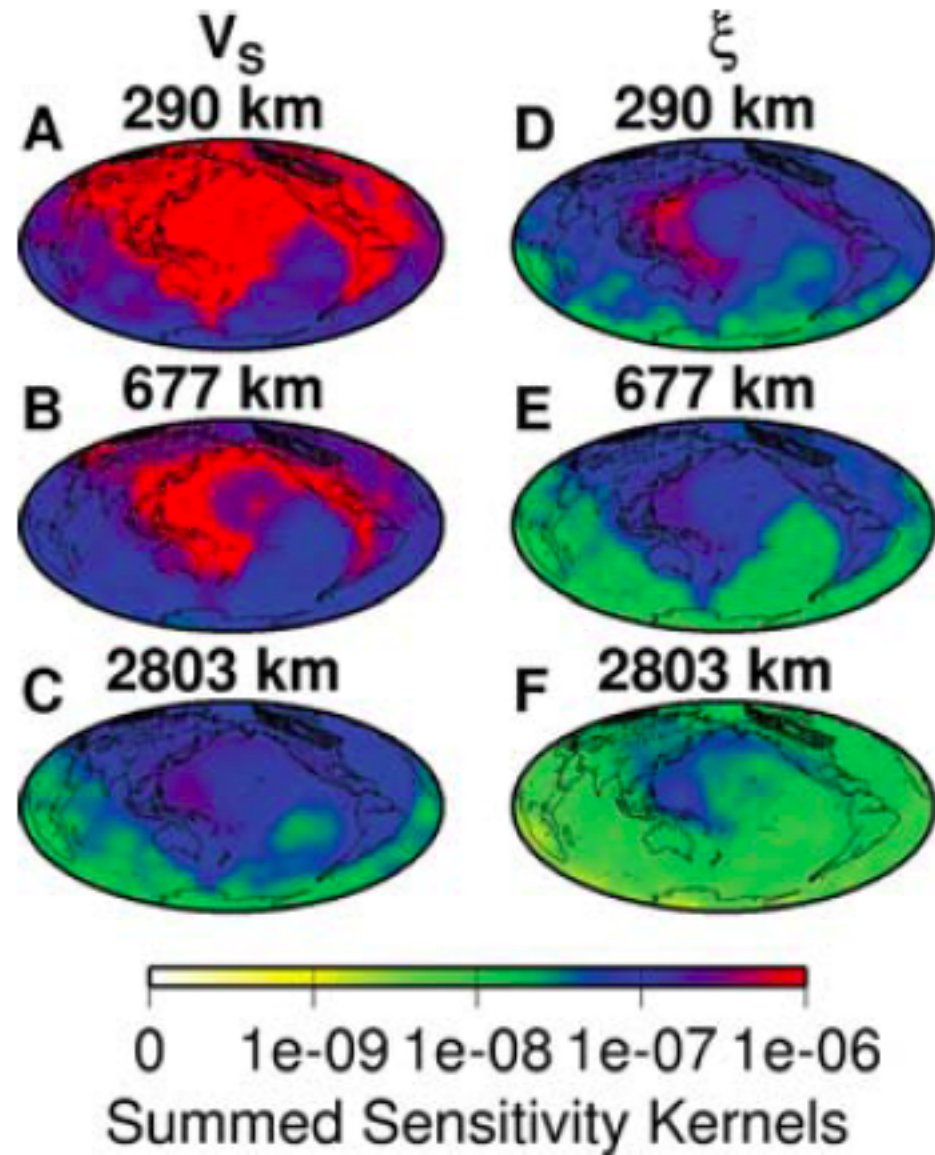
Anisotropie radiale moyenne en fonction de la profondeur



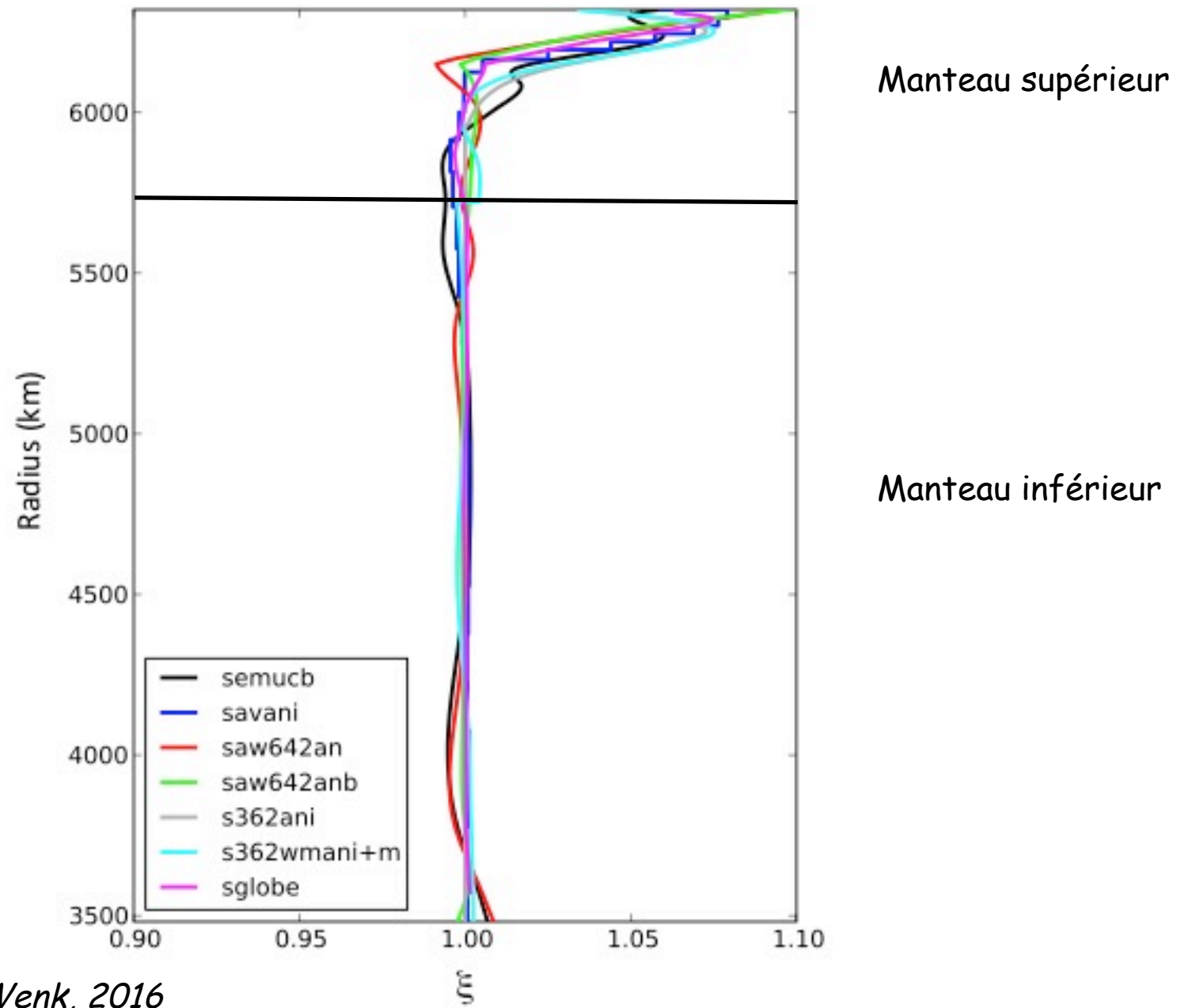
Amplitude rms des variations latérales en fonction de la profondeur



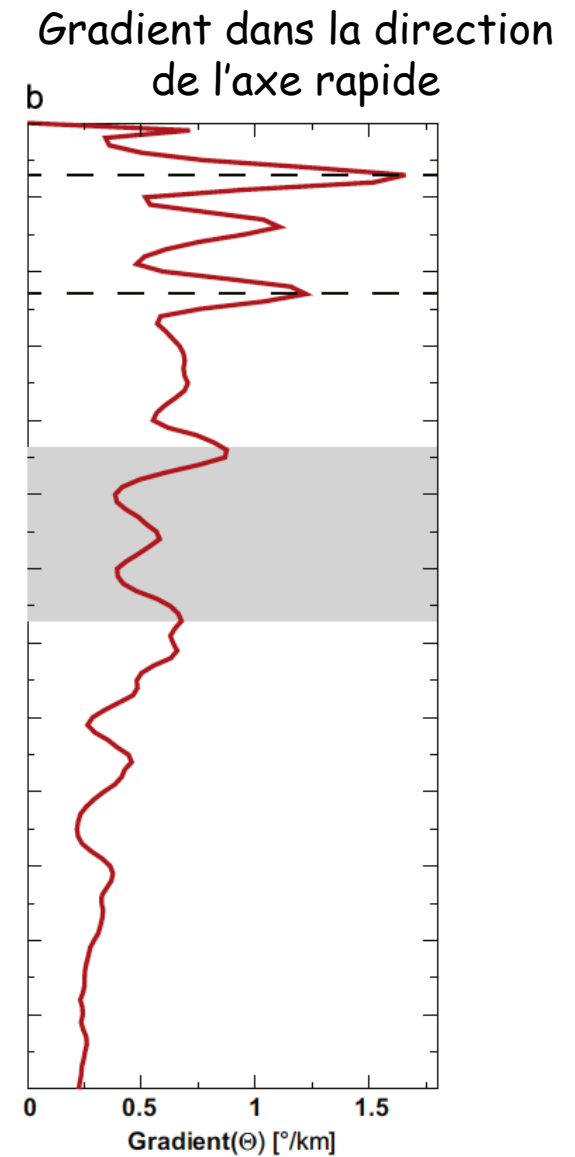
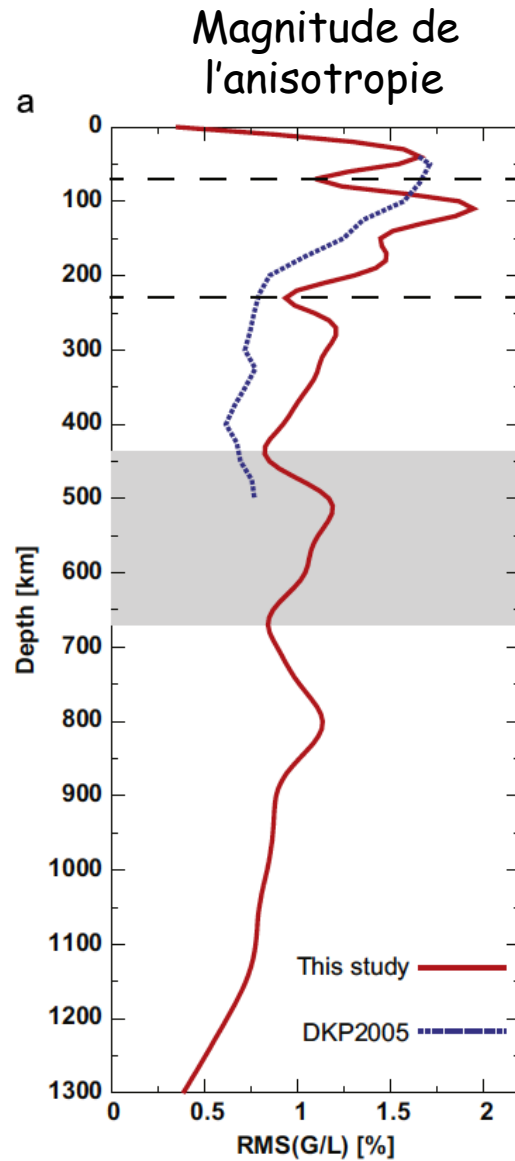
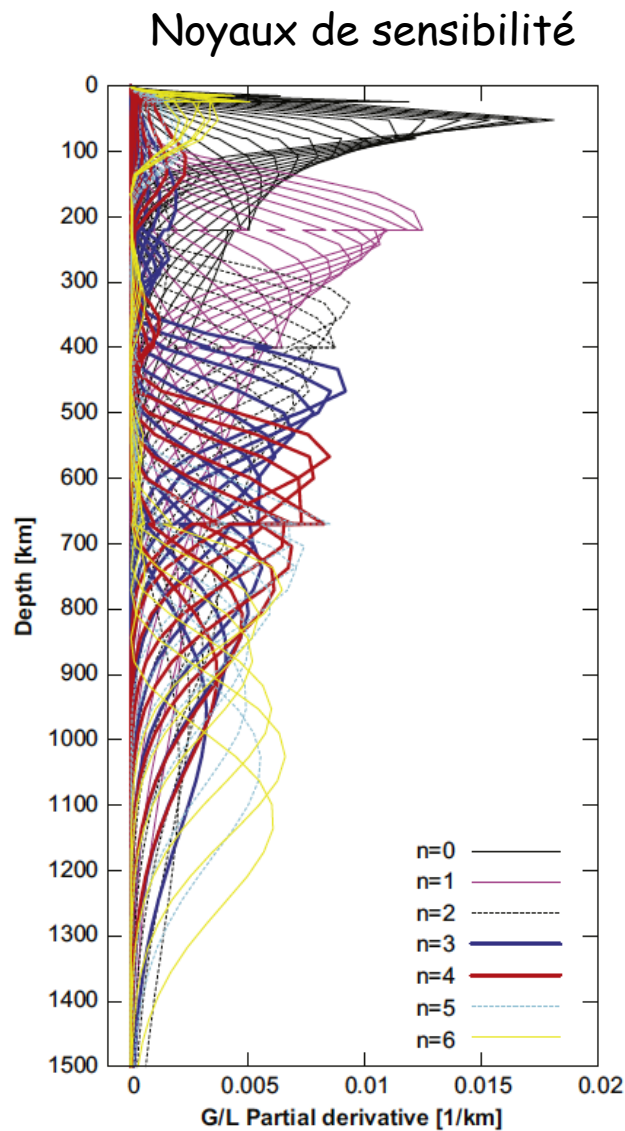
Couverture obtenue à différentes profondeurs par l'ensemble des données de forme d'onde globales



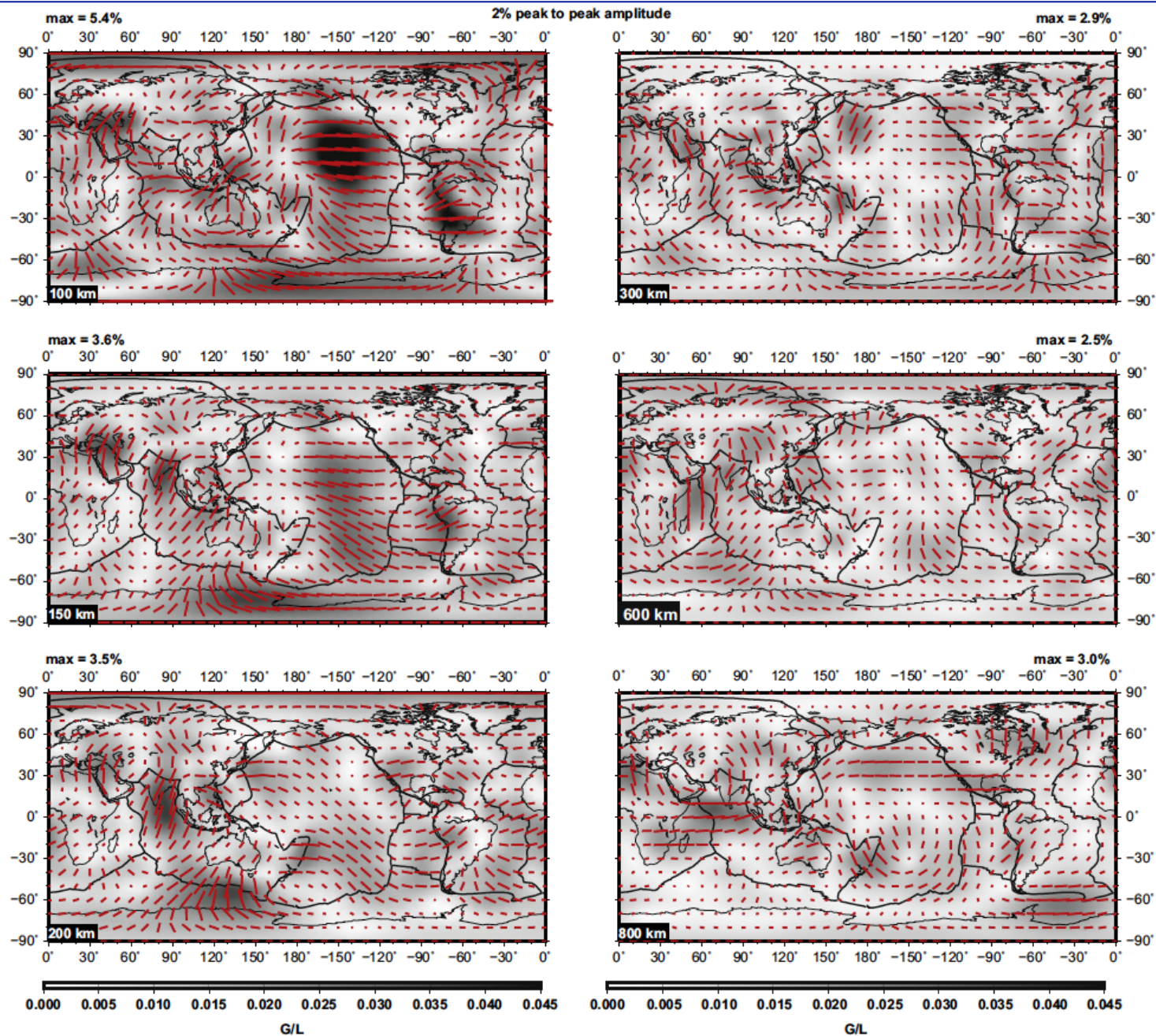
Variation avec la profondeur du paramètre d'anisotropie radiale $\xi = (V_{sh}/V_{sv})^2$
Moyennes globales



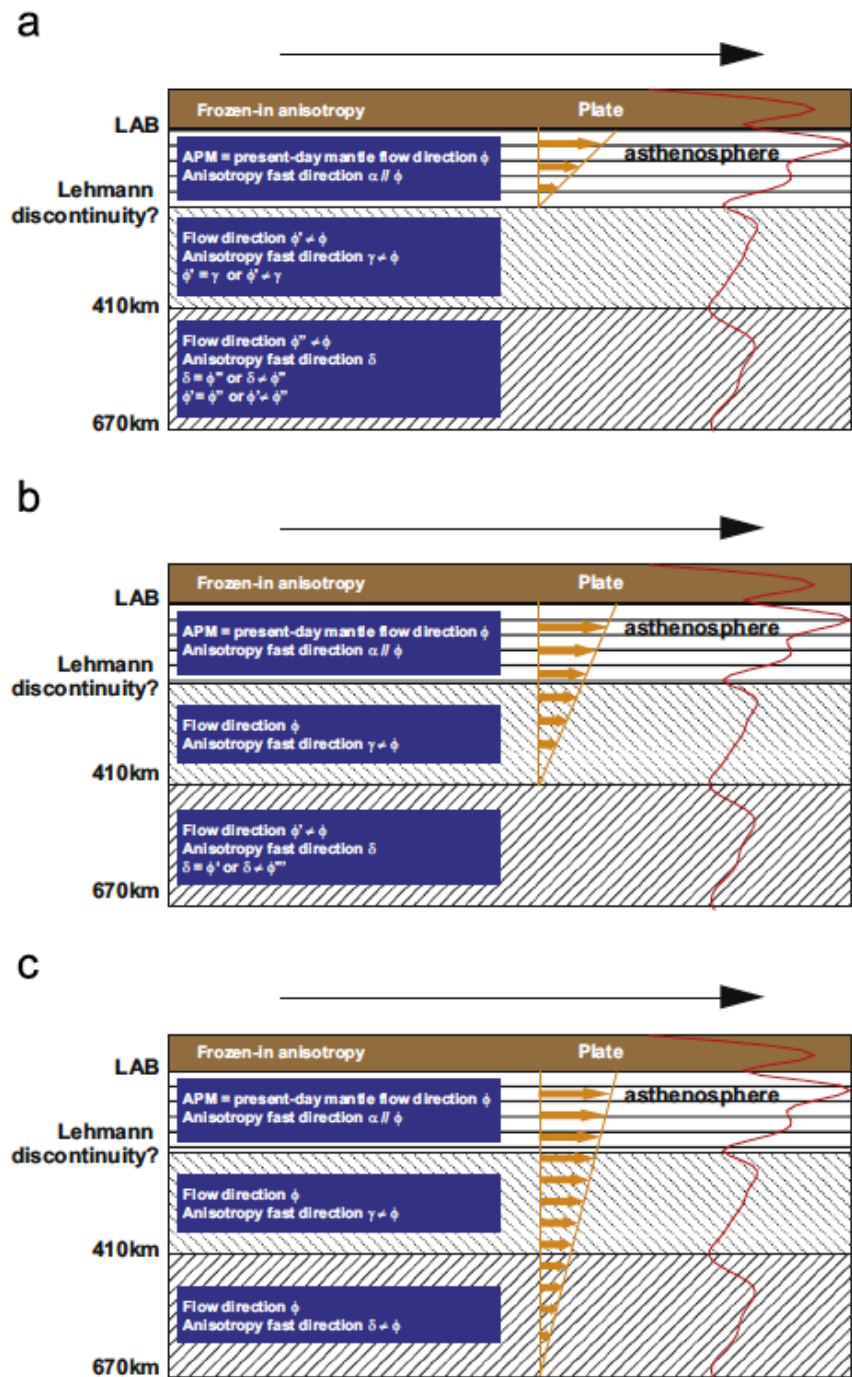
Anisotropie azimuthale dans la zone de transition: ondes de surface Mode fondamental + harmoniques



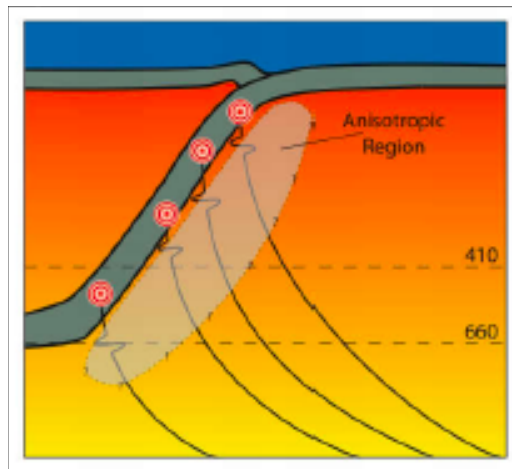
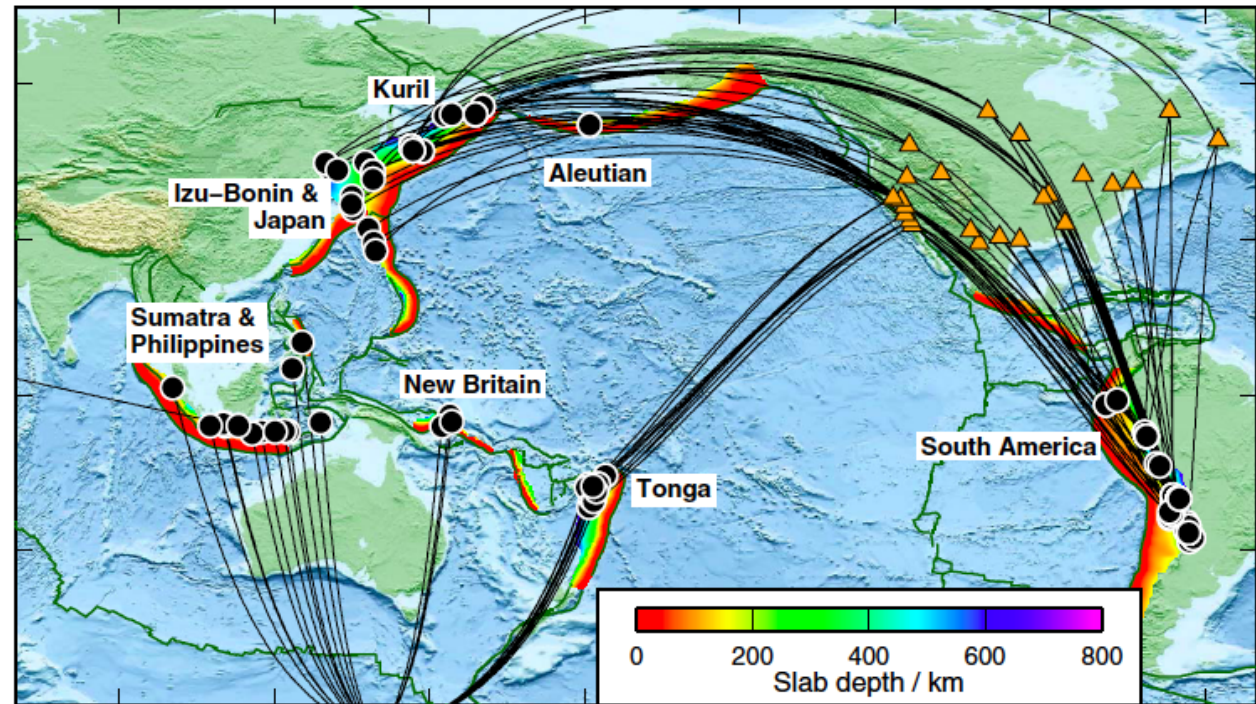
Anisotropie azimuthale dans le manteau supérieur et la zone de transition



Interprétations proposées



Anisotropie dans/autour des plaques de subduction
- dans la zone de transition du manteau:
Splitting des ondes S

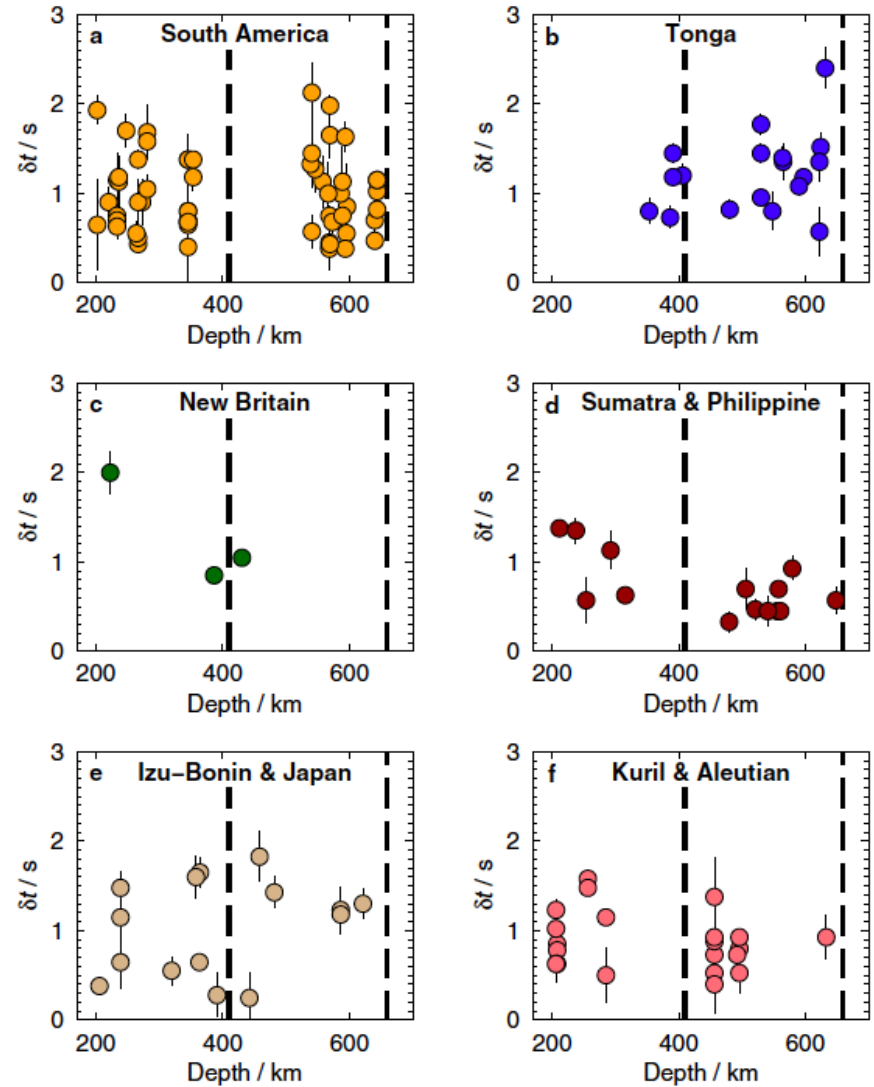
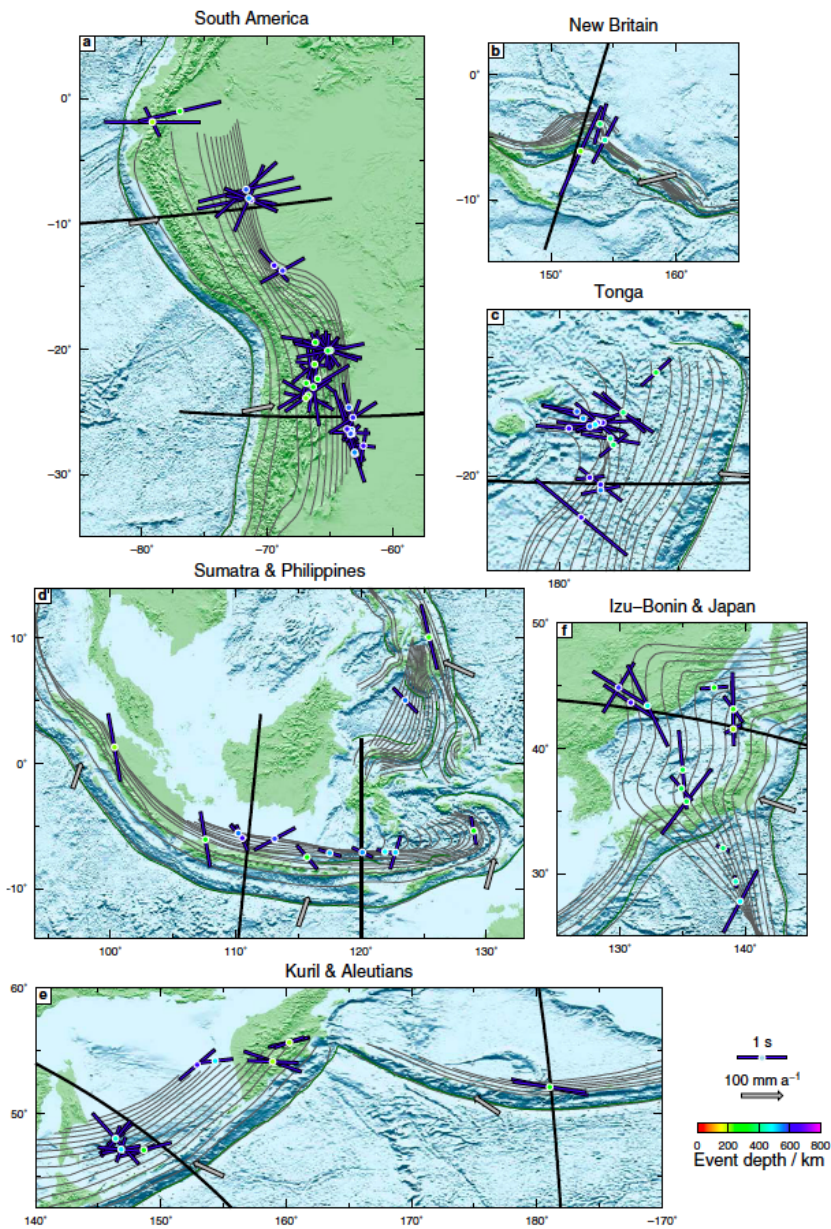


Séismes de profondeur > 200 km

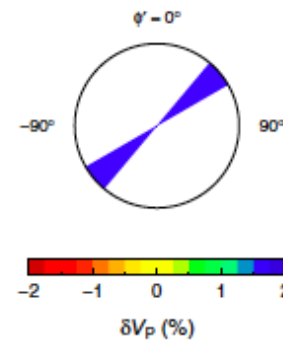
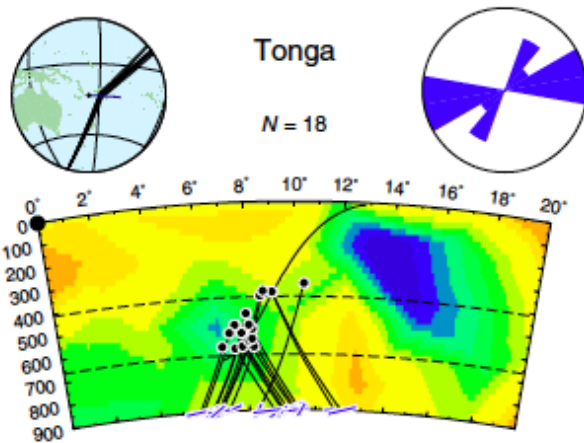
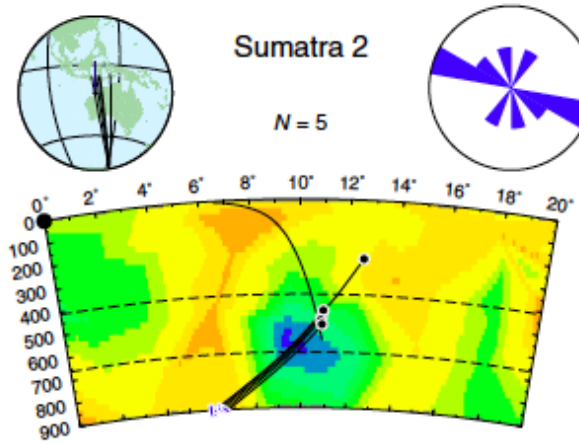
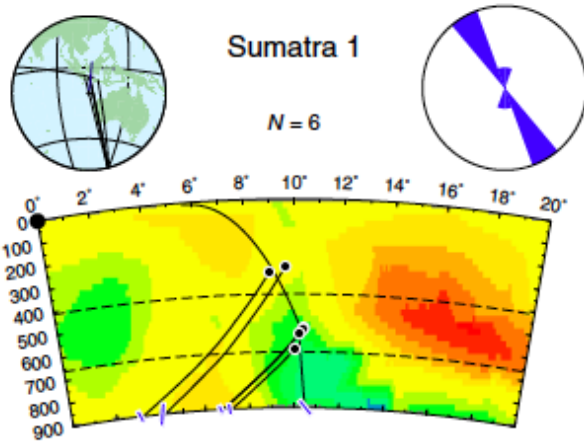
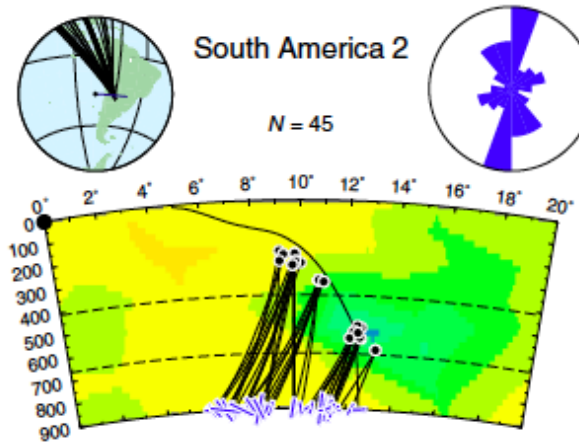
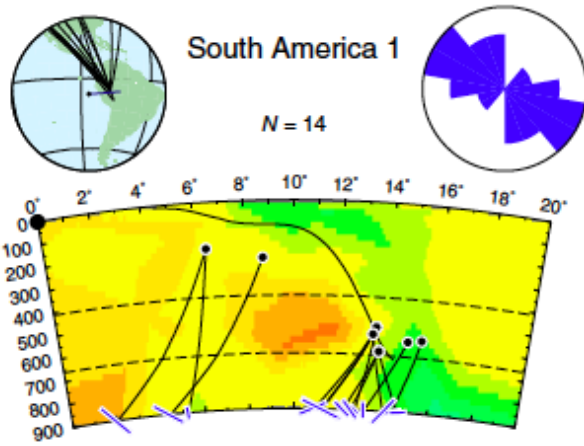
Ondes S telesismiques

Nowacki et al., G-Cubed, 2015

Splitting en fonction de la profondeur du séisme



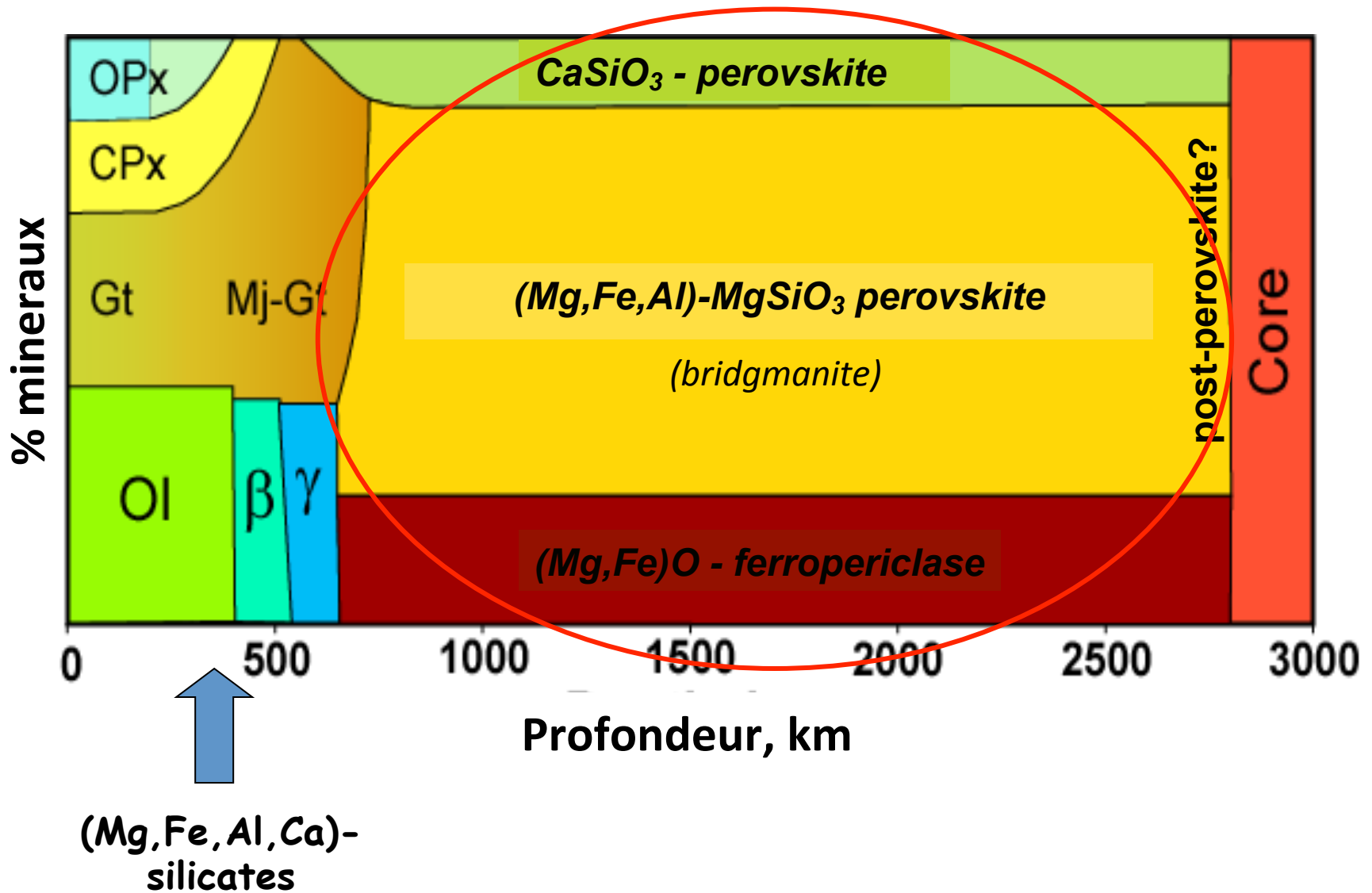
Moyenne globale de splitting:
~ 1s



Propose une origine dans la plaque:
Phases hydratées?

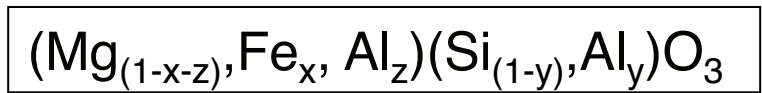
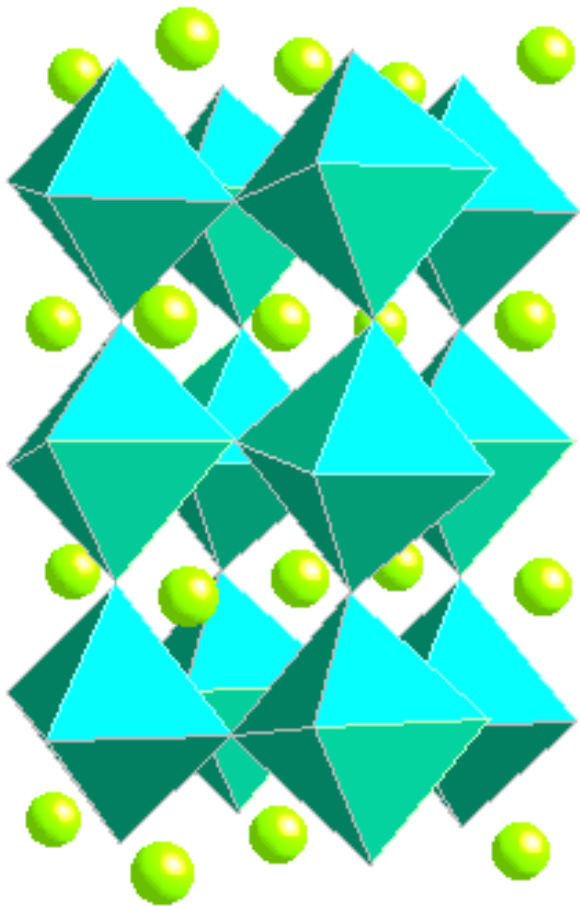
Le manteau inférieur..

Minéraux du manteau de la Terre



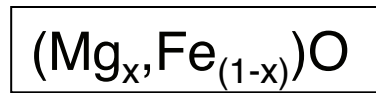
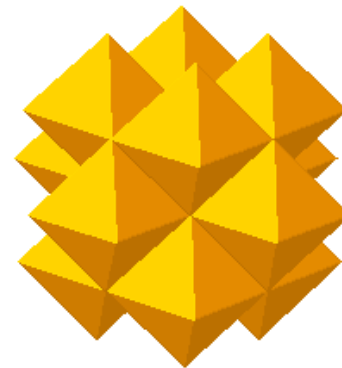
Courtesy of S. Sinogeikin

Minéraux du manteau inférieur



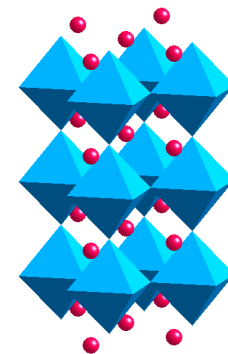
Mg/Fe perovskite

+



oxide

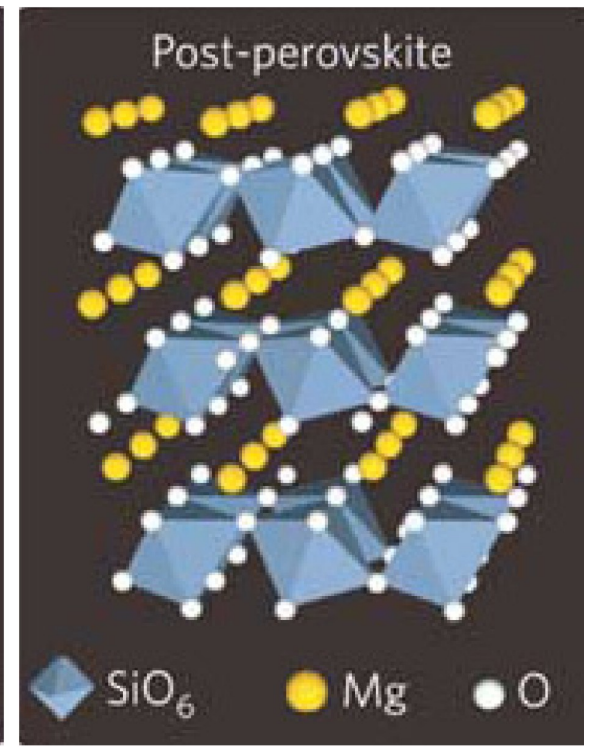
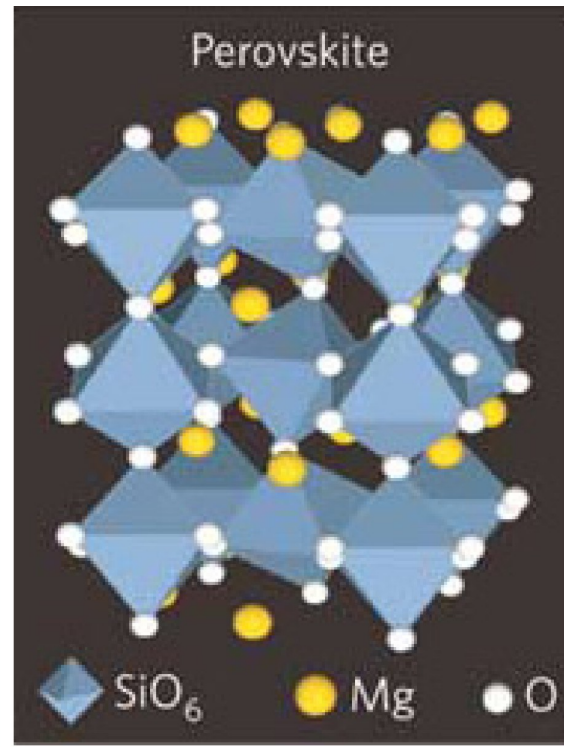
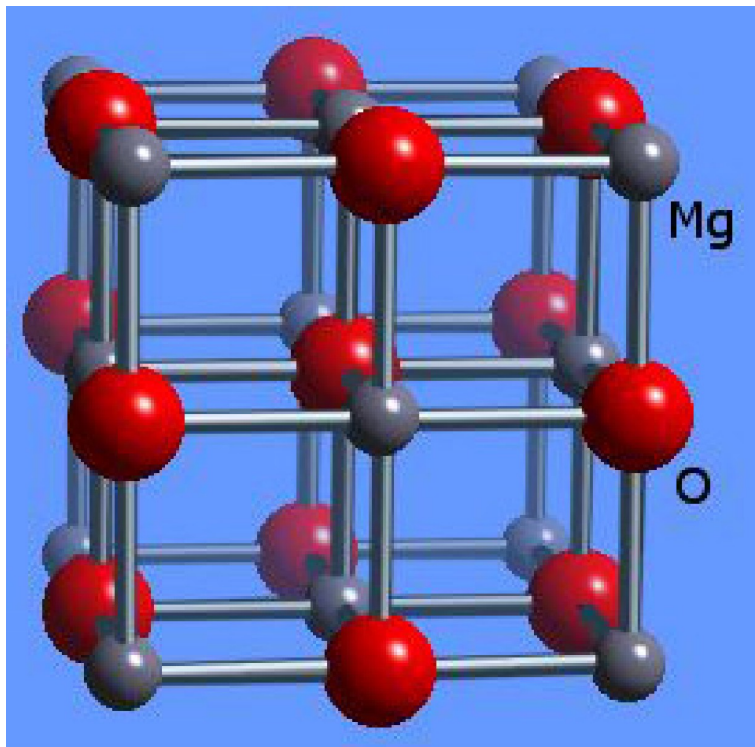
+



Ca- perovskite

Periclase: structure
Cubique (cf NaCl)

Bridgmanite et post-perovskite:
Structure orthorombique

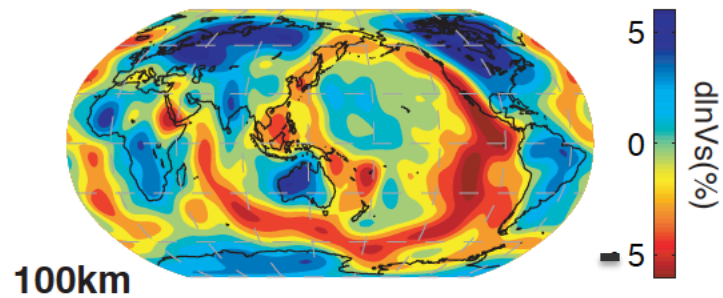


(a)

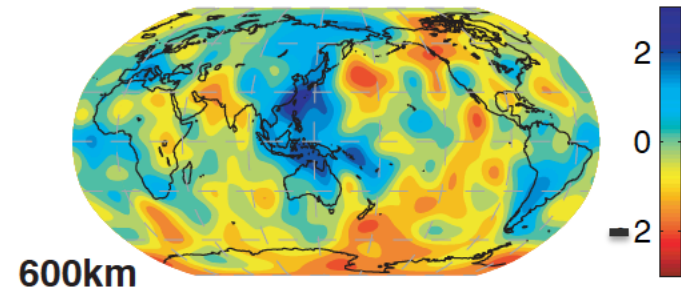
(b)

(c)

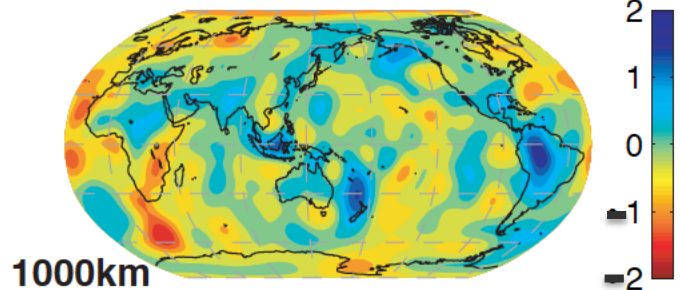
L'addition de Fe, Al, Ca and H₂O introduit
de la complexité



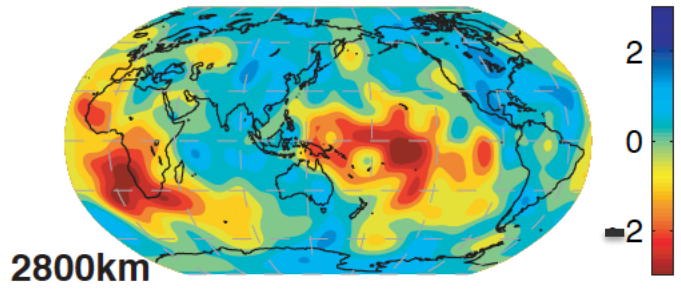
Heterosphere



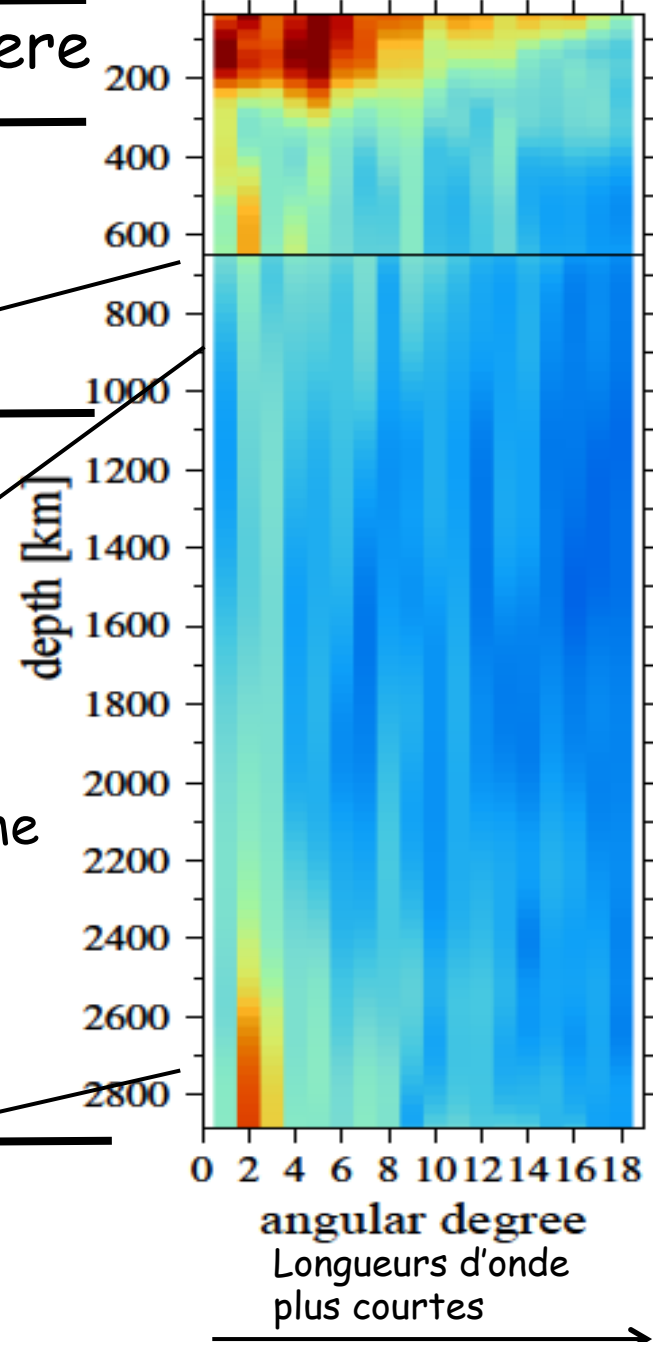
ETZ



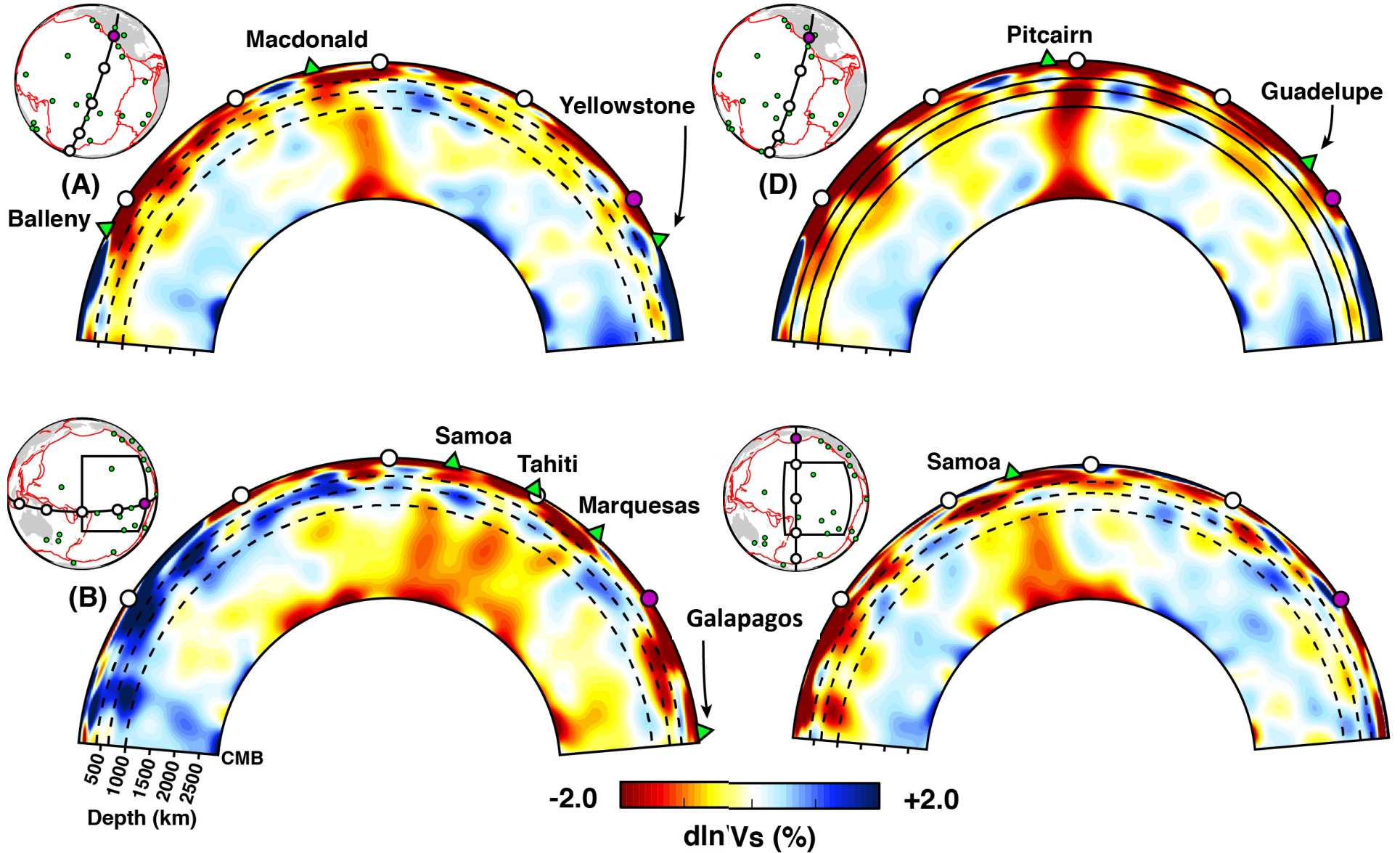
Super-Plume Region

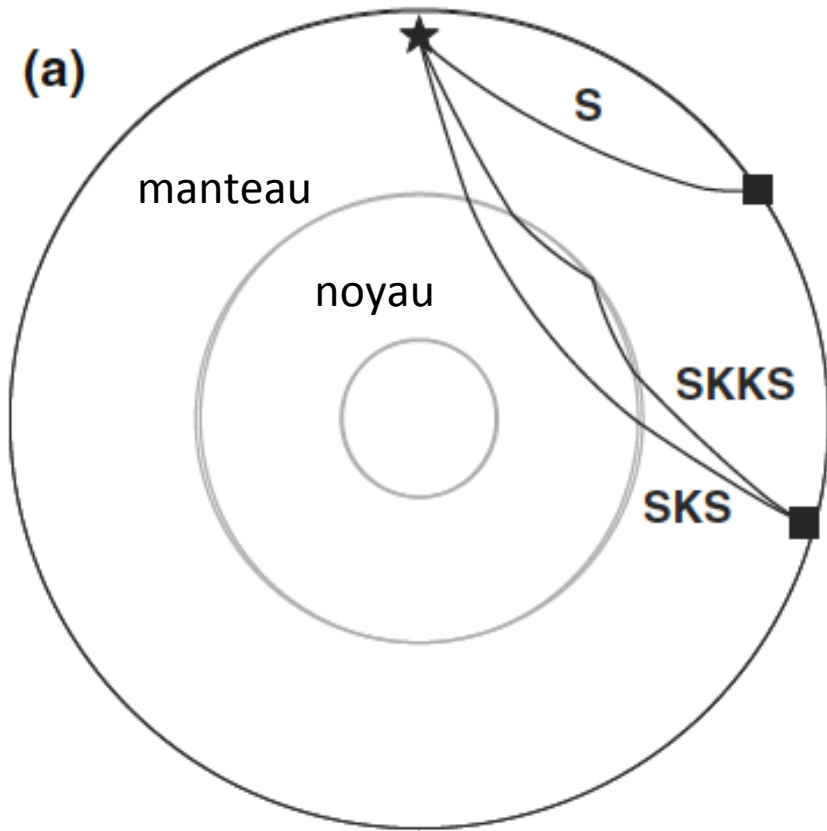


Spectrum of heterogeneity



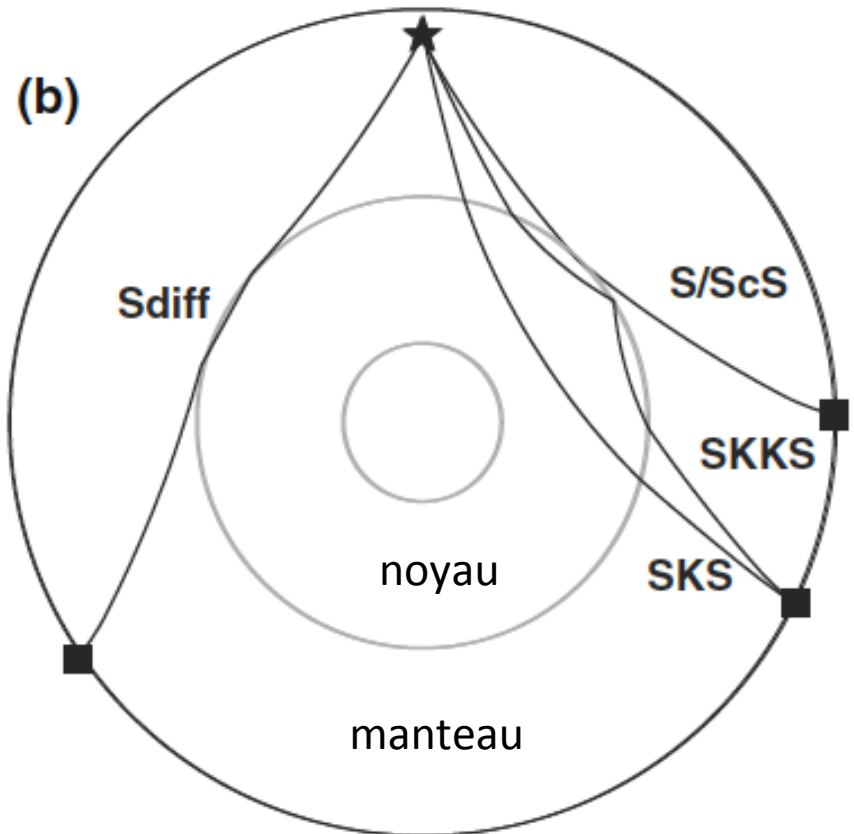
SEMUCB_WM1



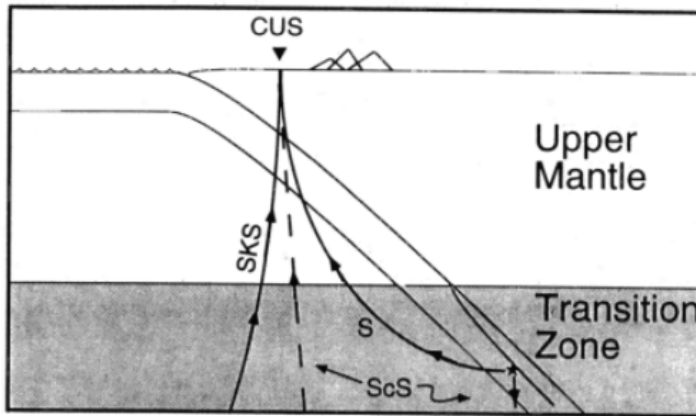


Phases télésismiques utilisées pour l'étude de l'anisotropie dans le manteau supérieur

Phases télésismiques utilisées pour l'étude de l'anisotropie dans le manteau inférieur



Pas d'anisotropie notable dans le manteau inférieur (D" exclu)



- Séismes profonds (Amérique du Sud et Japon,
- Observations à une station au dessus d'une zone de subduction:
 - S et ScS pour le même séisme dans la région
 - SKS à la même station
 - -> au plus 0.2 s accumulé dans le manteau inférieur

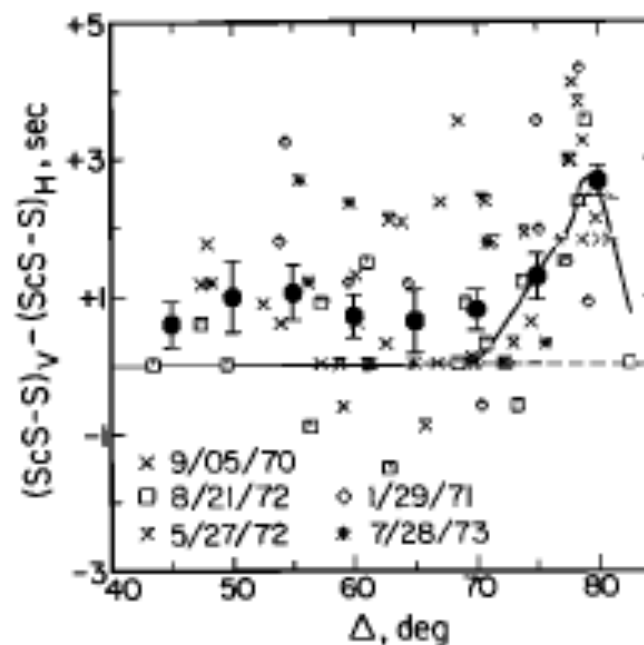
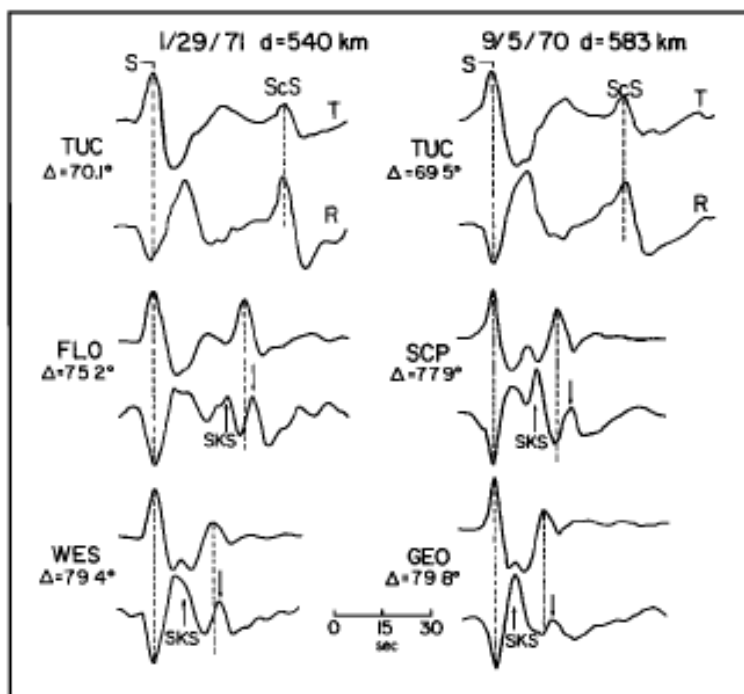
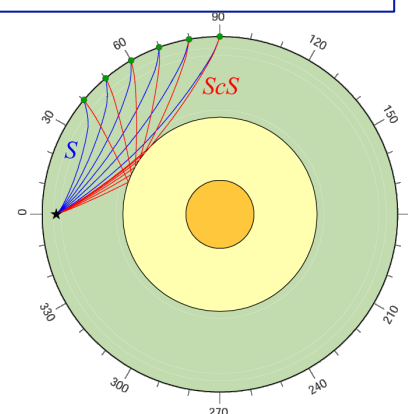
station	(lat, lon)	$\phi(^{\circ})$	δt (s)	phase	ref	depth
KTJ	(36.28 137.33)	-2 \pm 13	0.95 \pm 0.65	S	1	280
KTJ		14 \pm 8	0.70 \pm 0.20	S	1	268
KTJ		7 \pm 6	0.90 \pm 0.20	ScS	1	611
GNZ/ASO	(36.65 139.41)	5 \pm 35	0.25 \pm 0.05	S	1,4	154
GNZ/ASO		10 \pm 35	0.25 \pm 0.05	S	1,4	166
GNZ/ASO		15 \pm 35	0.35 \pm 0.05	ScS	1,4	611
CUS	(-13.56 -71.88)	-66 \pm 6	0.95 \pm 0.20	S	1,2	613
CUS		-55 \pm 4	1.20 \pm 0.20	S	1,2	600
CUS		-66 \pm 14	0.80 \pm 0.20	S	1,2	628
CUS		-74 \pm 13	0.85 \pm 0.30	SKS	1	---
NNA	(-11.99 -76.84)	-59 \pm 3	1.20 \pm 0.20	S	1,2	601
NNA		-70 \pm 5	1.25 \pm 0.20	SKS	2,3	---

Anisotropie sismique dans la zone D'':

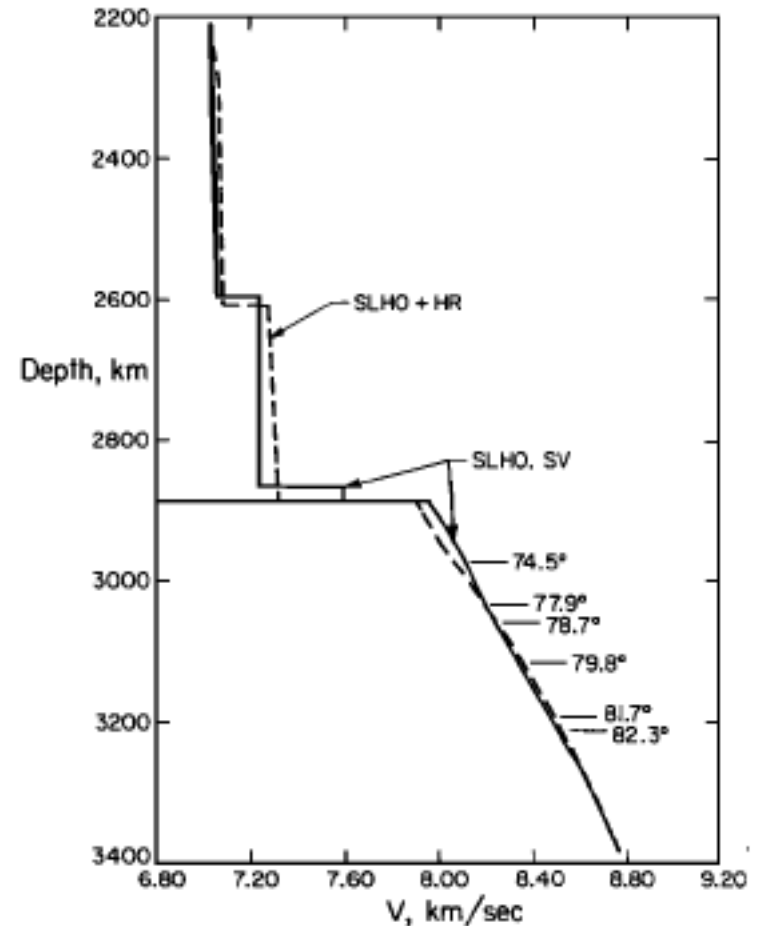
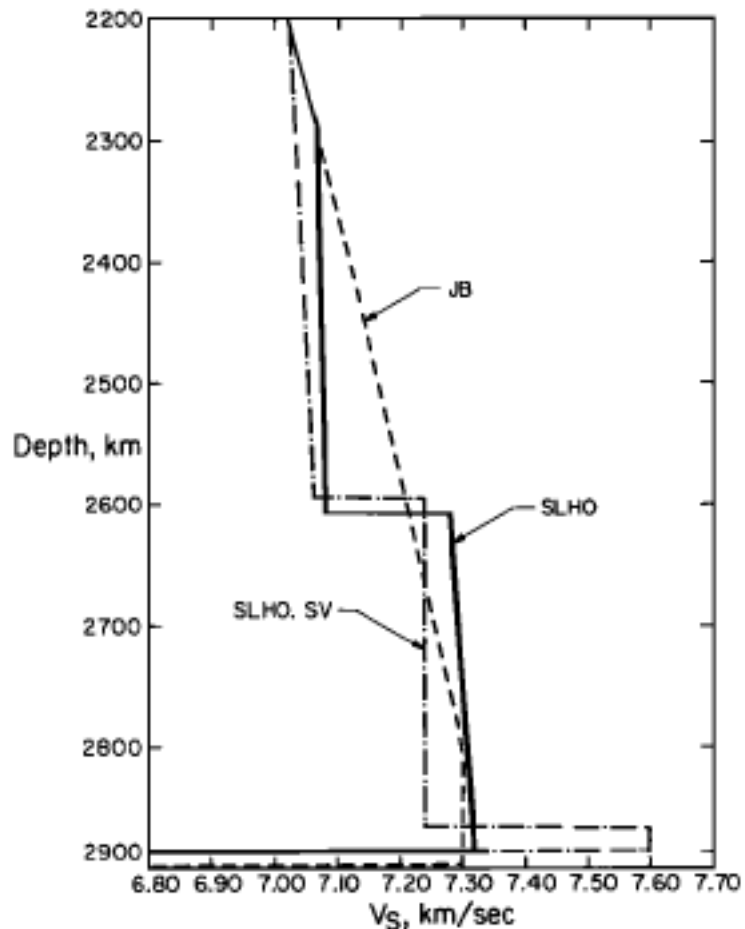
Méthodologie doit s'affranchir
des effets de l'anisotropie dans le
manteau supérieur

Observations de temps différentiels entre ScS_H et ScS_V

Séismes profonds dans la mer d'Okhotsk observés
en Amérique du Nord



Lay and Helmberger, 1983

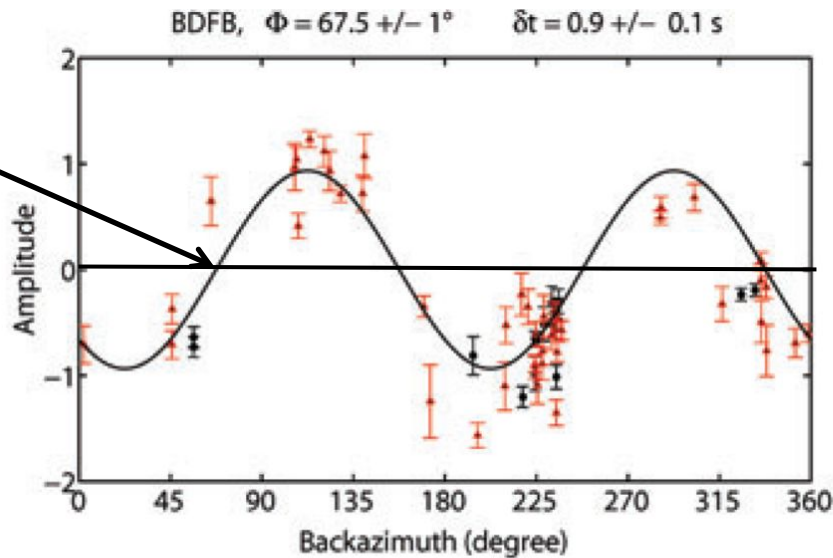


- JB: modèle de référence de Jeffreys-Bullen
- SLHO: modèle régional qui satisfait les amplitudes relatives ScS/S
- SLHO,SV: satisfait également les temps différentiels $(ScS-S)_{SV} - (ScS-S)_{SH}$

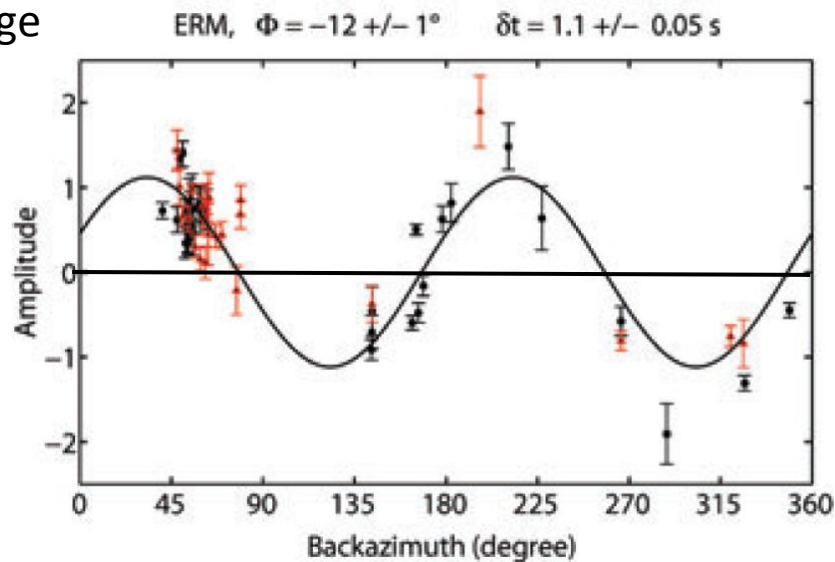
Ajustement du modèle P dans le noyau externe

Mesures de splitting de SKS en fonction de l'azimuth

Axe rapide



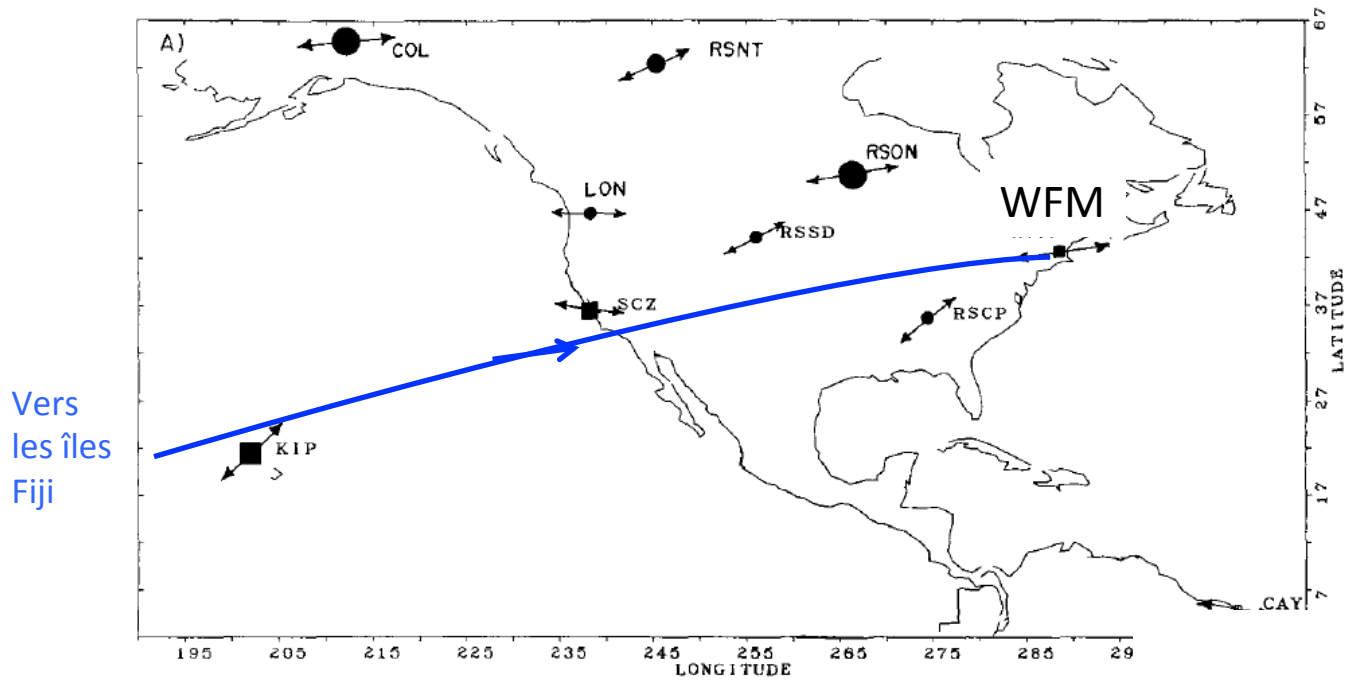
SKS=noir
SKKS = rouge



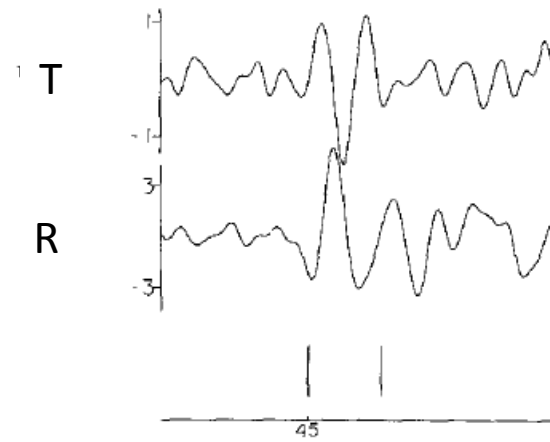
Pas de splitting observé
dans la direction de l'axe rapide
et dans la direction orthogonale

Exemples; Montellier et Chevrot, 2010

Splitting des ondes SKS -> anisotropie azimuthale dans le manteau supérieur



Vers les îles Fiji

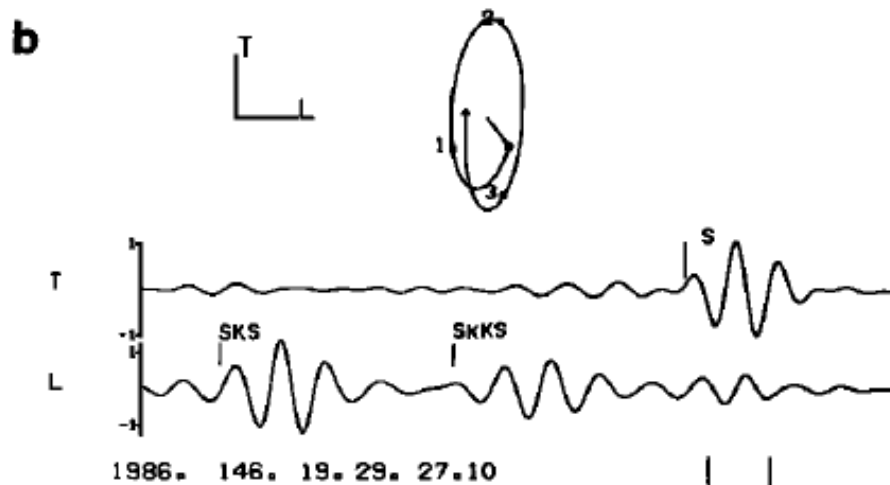
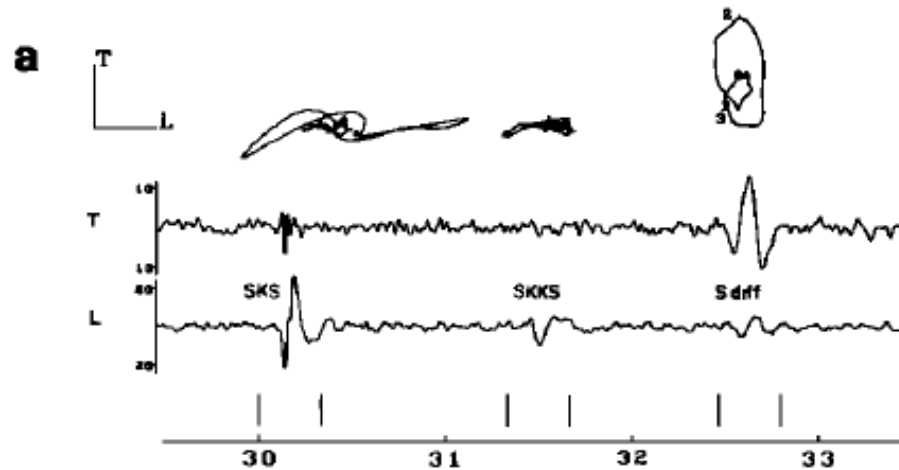


1986 259 18 44 30 00

WFM Event 5 baz = 322.4

WFM - Baz 322.4

Observations de séismes des îles Fiji à la station WFM - distance $\sim 117^\circ$



Temps en minutes

Observation d'énergie sur la composante SV de Sdiff
 - Parfois retardé par rapport à SH d'un quart de période:
 mvt particulière elliptique

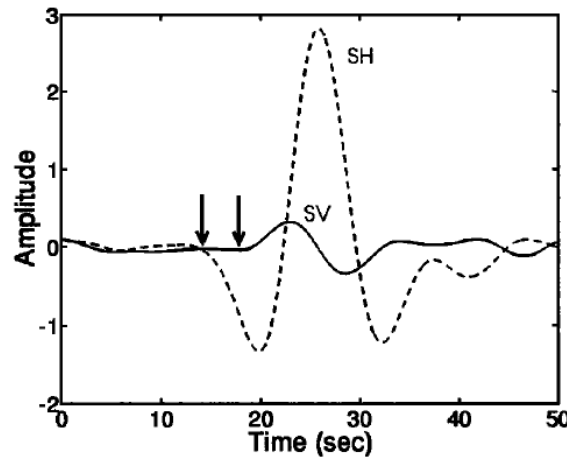
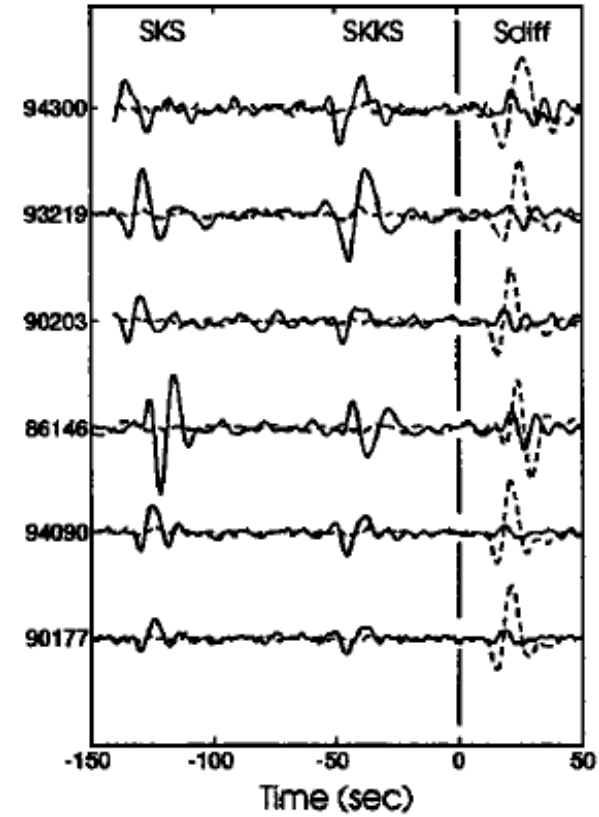
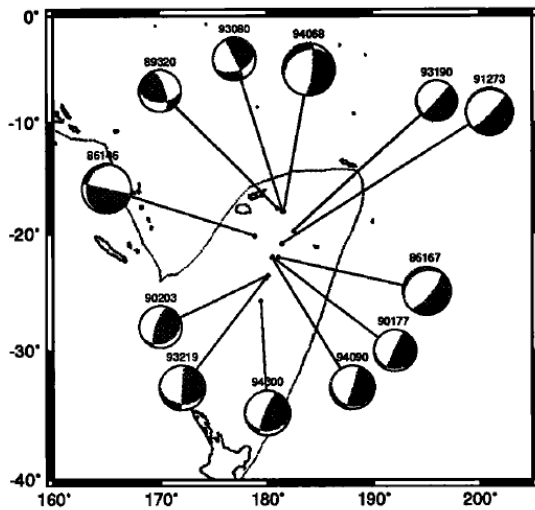
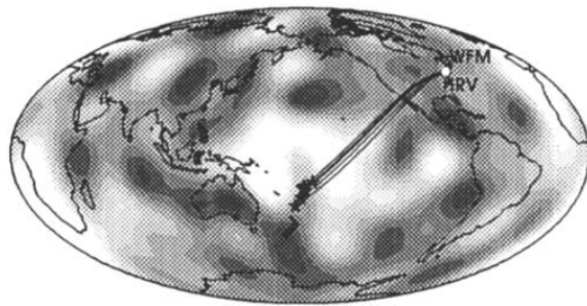
⇒ Origine à la base du manteau

⇒ SV s'atténue rapidement avec la distance dans un modèle moyen type PREM

⇒ Il faut une zone de gradient de vitesse négatif (pour avoir plus d'amplitude dans la SV à ces distances, mais cela n'explique pas:
 ⇒ Les différences entre SH et SV
 ⇒ + dépendance en fréquence

⇒ Proposent la présence d'anisotropie azimuthale: couplage SH, SV

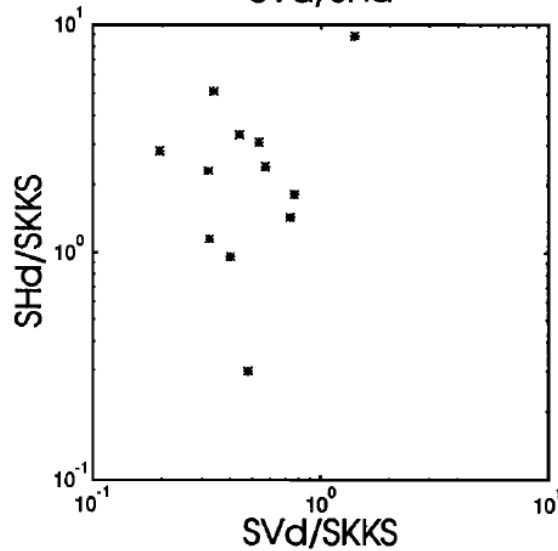
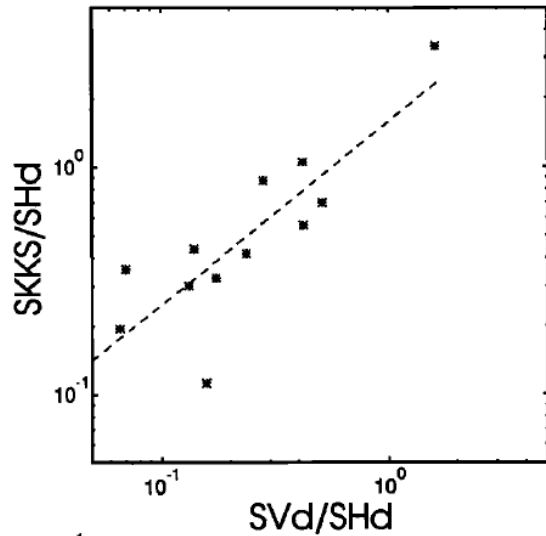
Distances
114- 121°



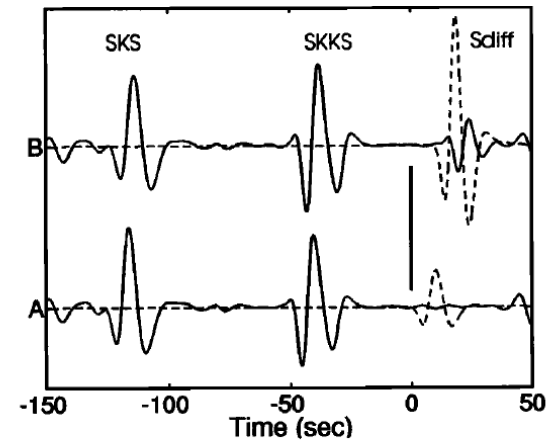
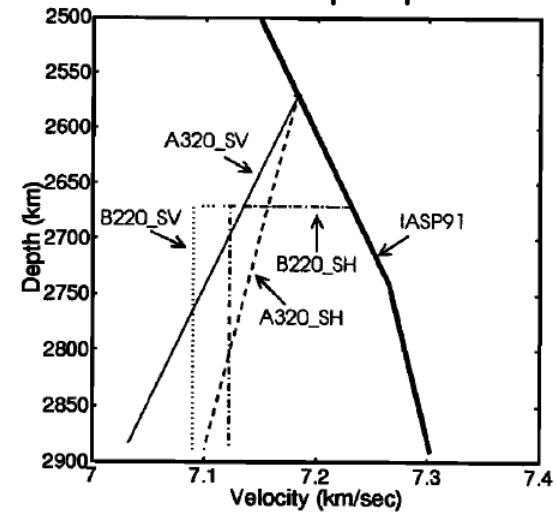
Stack des données
de 12 séismes

Vinnik et al, 1995, GRL

Pas de couplage
 $SH/SV \Rightarrow$
 Anisotropie radiale



Modèles proposés

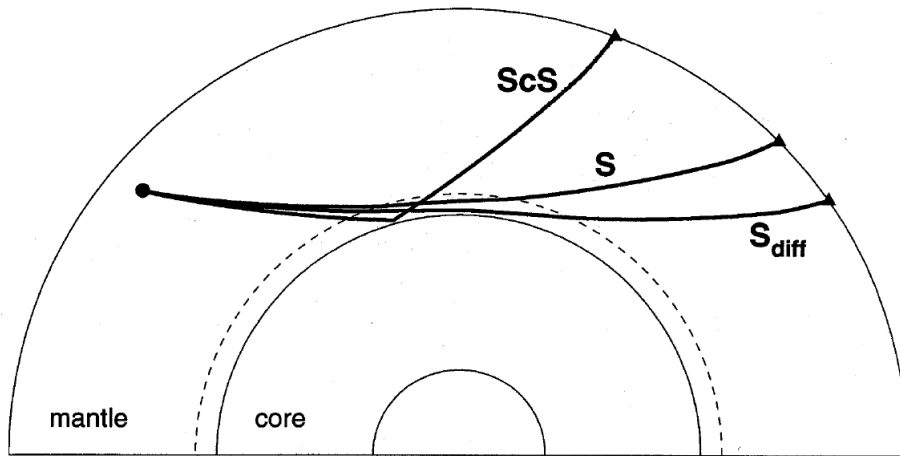


A: modèle isotrope IASP91

B: modèle A320

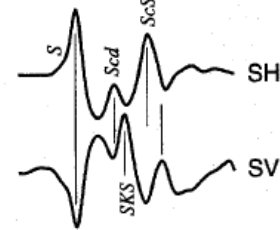
— SV

---- SH



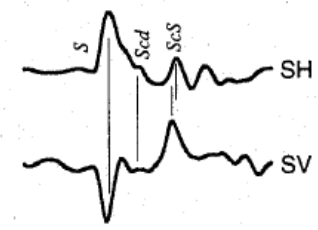
Vsh > Vsv

(a) ScS: SCP(WW) 77.9

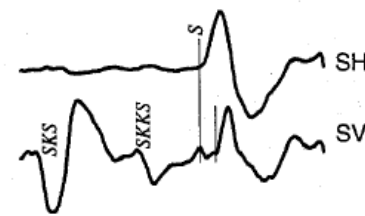


Vsv > Vsh

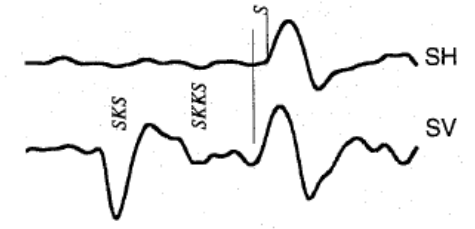
(b) ScS: WDC(BB) 79.9



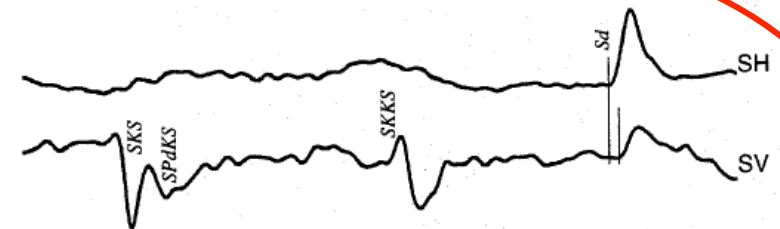
(c) S: BLA(WW) 95.7



(d) S: HKT(BB) 96.0

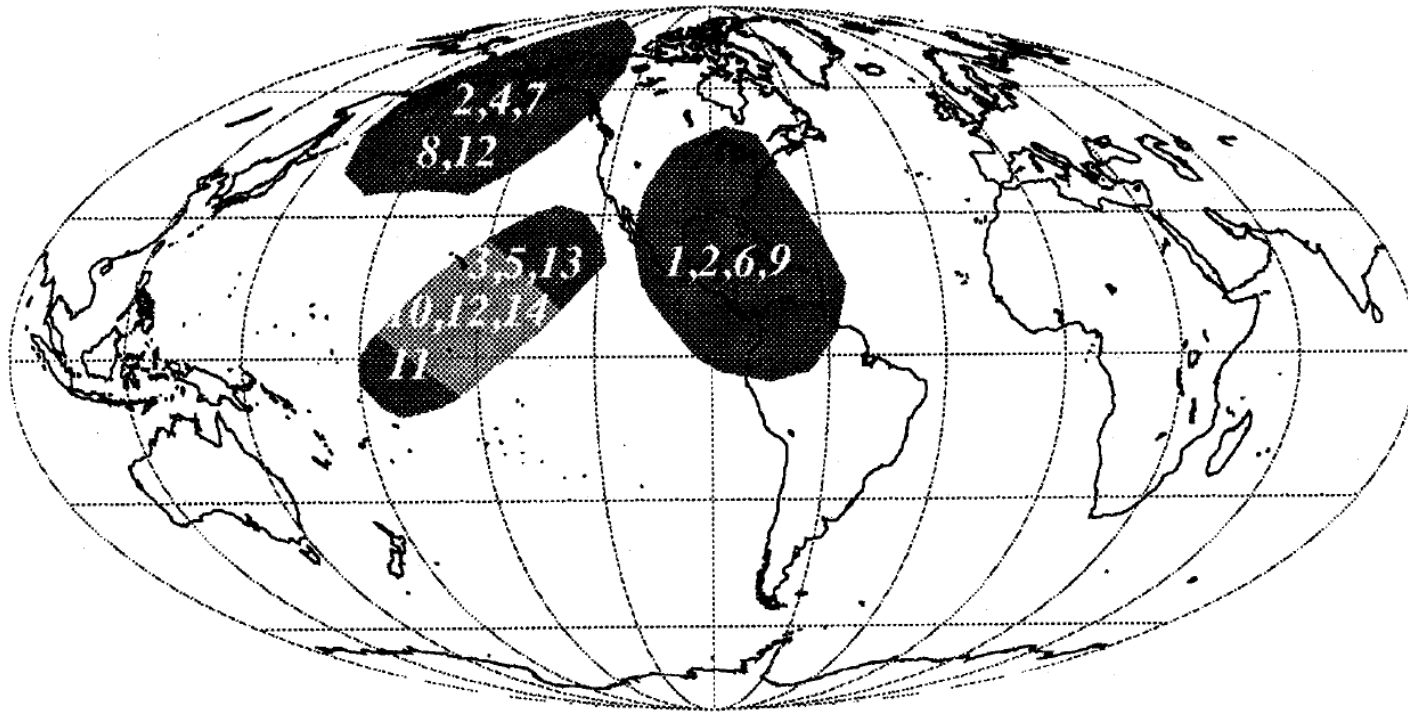


(e) Sd: LSCT(BB) 116.3



40 sec

Retard:
3.3 sec



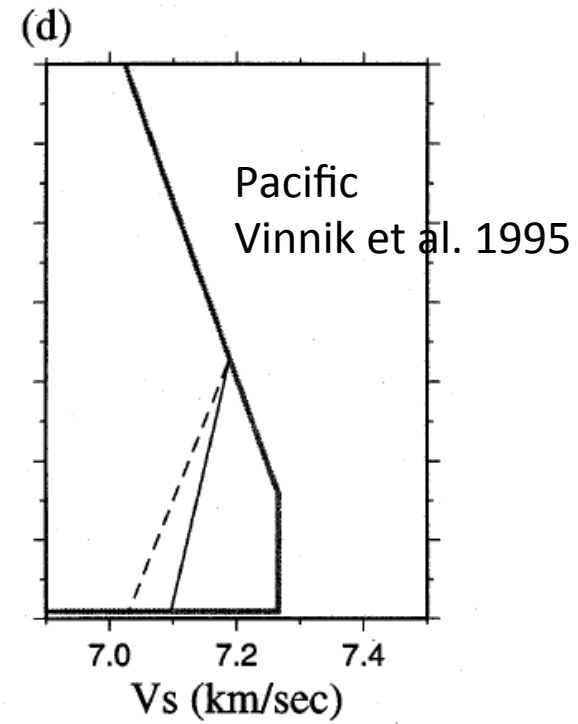
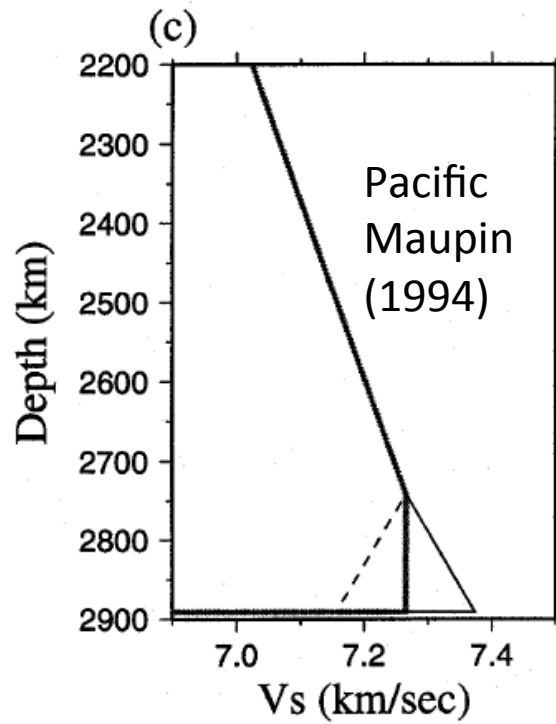
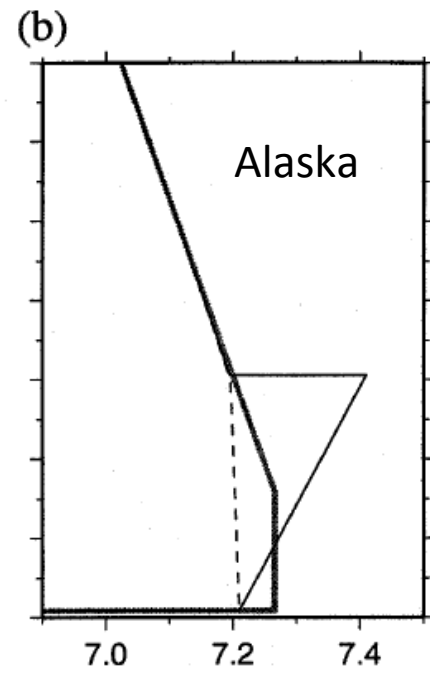
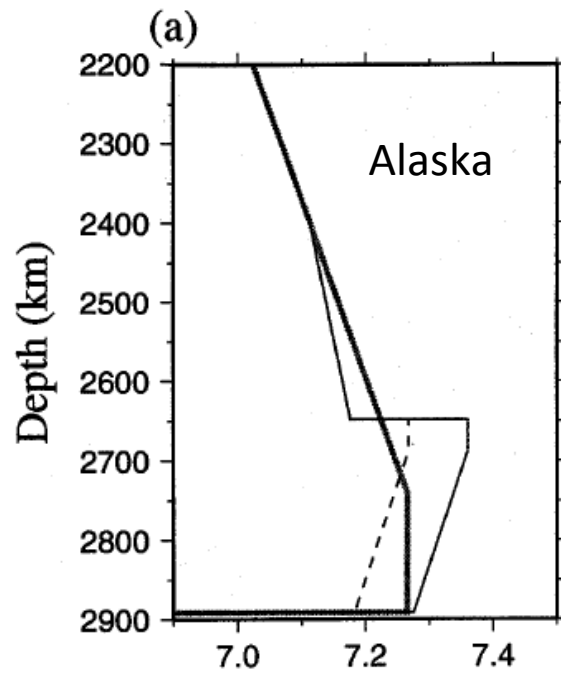
- Alaska et Amérique centrale: $SH > SV$
- Centre du Pacifique: $SV > SH$ (grisé) ou anisotropie azimuthale

Lay et al., 1998

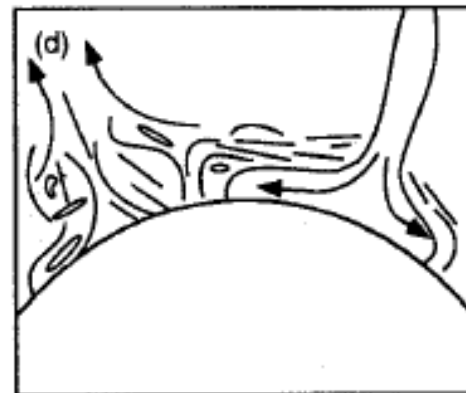
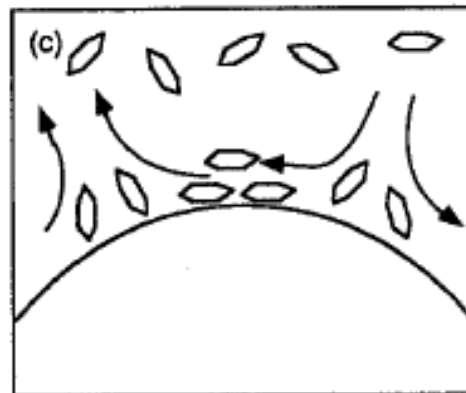
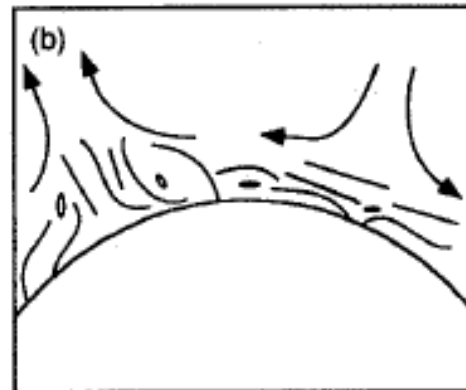
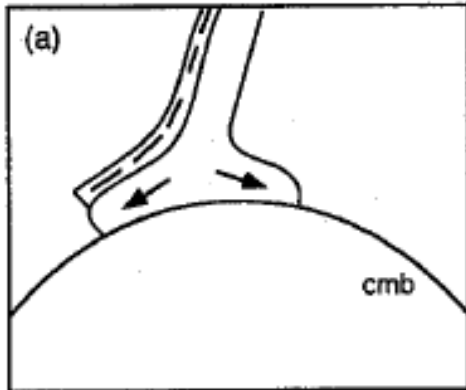
Table 1. Observations of Shear Velocity Anisotropy in D''

No.	Reference	S Phases Used	Sense of Splitting
1	Mitchell and Helmberger [1973]	ScS	Vsh>Vsv
2	Lay and Helmberger [1983b]	ScS	Vsh>Vsv
3	Vinnik et al. [1989]	Sdiff	Azimuthal
4	Lay and Young [1991]	ScS, S	Vsh>Vsv
5	Vinnik et al. [1995]	Sdiff	Vsh>Vsv
6	Kendall and Silver [1996]	S	Vsh>Vsv
7	Matzel et al. [1996]	S	Vsh>Vsv
8	Garnero and Lay [1997]	ScS, S, Sdiff	Vsh>Vsv
9	Ding and Helmberger [1997]	ScS	Vsh>Vsv
10	Pulliam and Sen [1998]	S	Vsv>Vsh
11	Vinnik et al. [1998]	Sdiff	Vsh>Vsv
12	Kendall and Silver [1998]	S, Sdiff	Vsh>Vsv/None
13	Ritsema et al. [1998]	Sdiff	Vsh>=<Vsv
14	Russell et al. [1998]	ScS	Vsh>=<Vsv

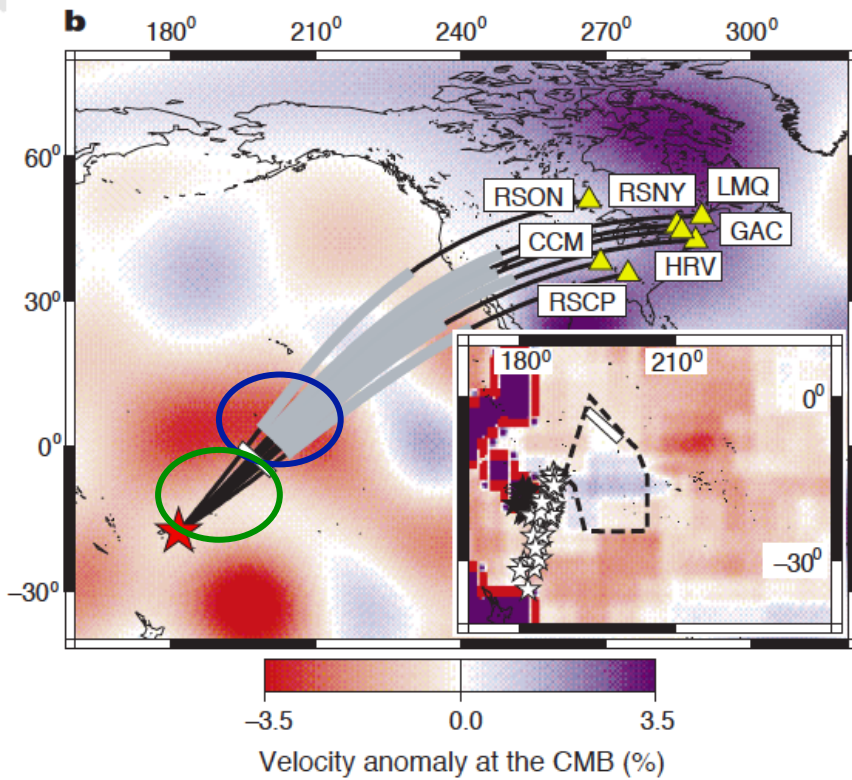
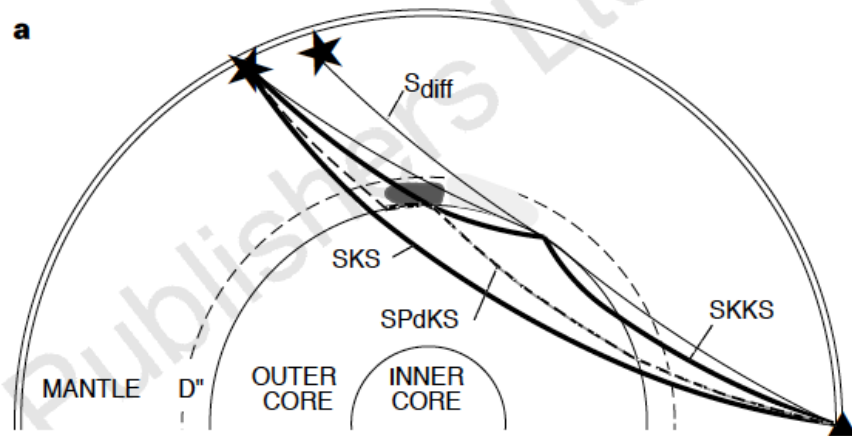
— PREM
 — V_{sh}
 - - - V_{sv}



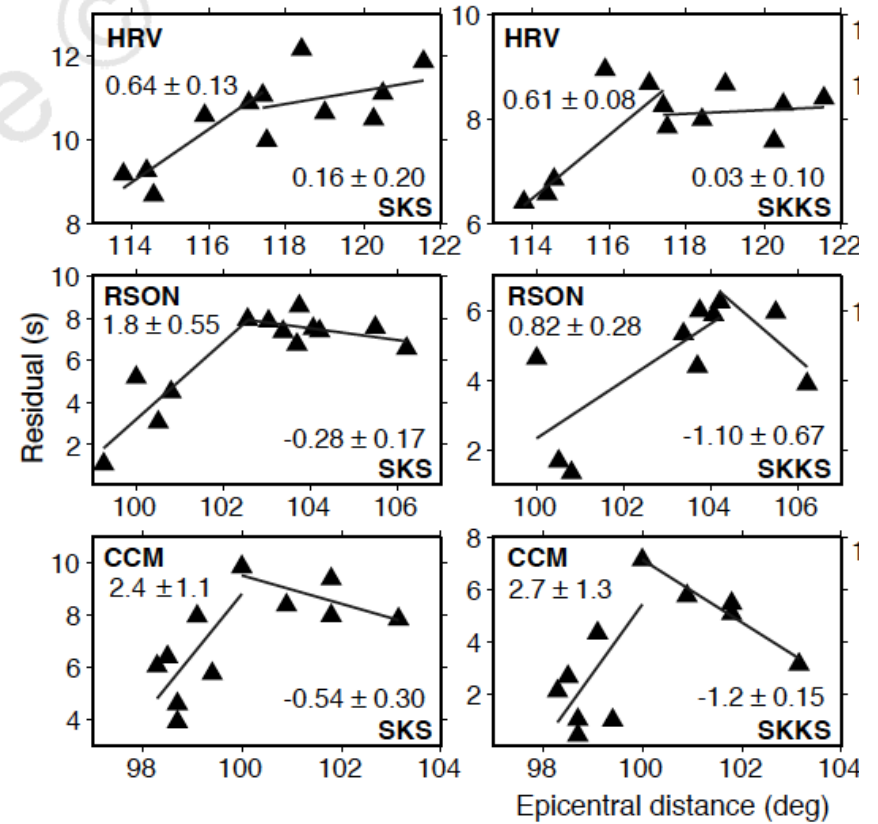
Interprétations possibles de la présence d'anisotropie dans la D''



- a) Plaques de subduction gardent leur texture anisotrope
- b) Fusion partielle dans la couche limite thermique, entraînée par la convection
- c) CPO dans les minéraux du manteau inférieur => alignements dans une zone de cisaillement forte
- d) Heterogeneités chimiques déformées différemment dans les régions de plaques et dans les panaches

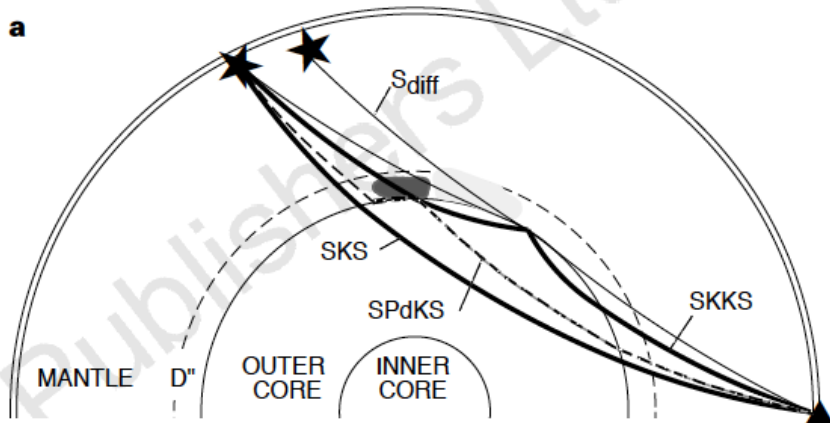


Résidus de temps différentiels Sd_H -SKS ou Sd_H -SKKS, par rapport à PREM

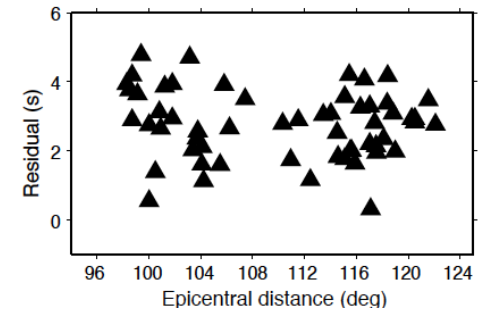


La barre blanche indique la position géographique du changement de pente:
 -> réduction de la vitesse V_s de $\sim 10\%$ par rapport au PREM

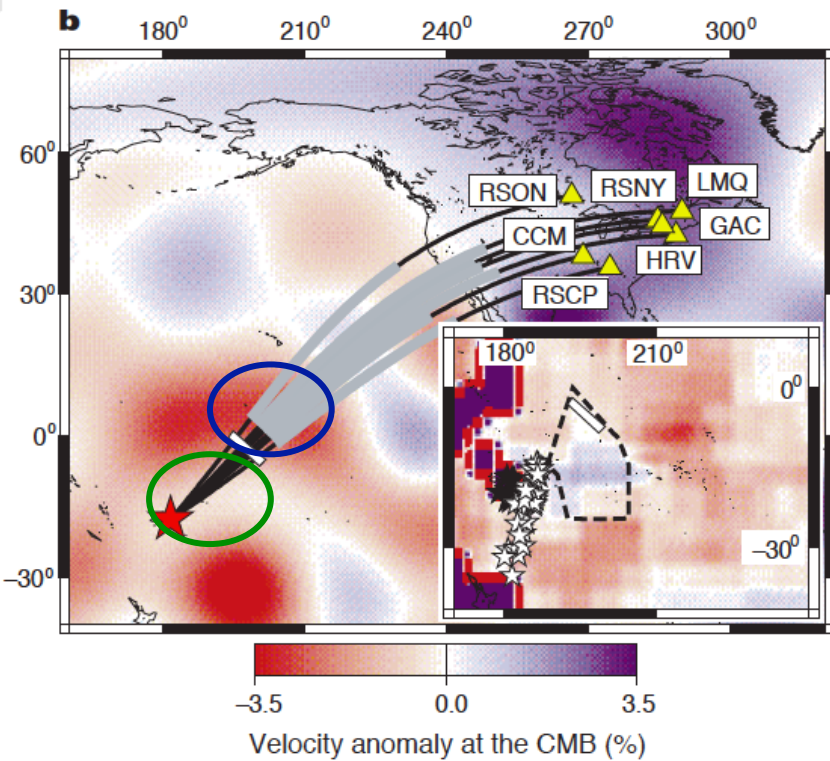
Vinnik, Bréger and Romanowicz, 1998



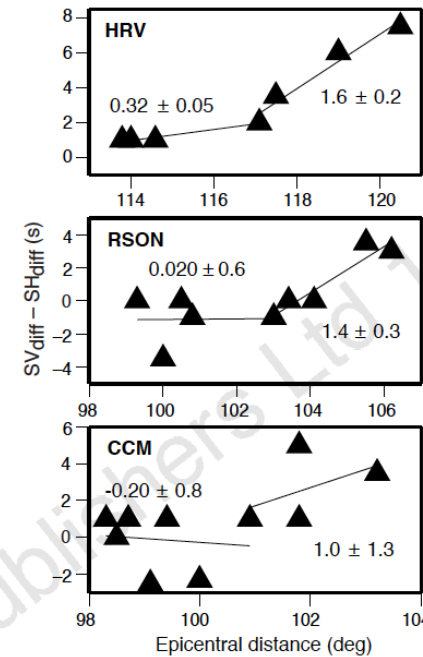
Résidus SKKS-SKS



⇒ Vitesse S_V anormalement faible du côté source

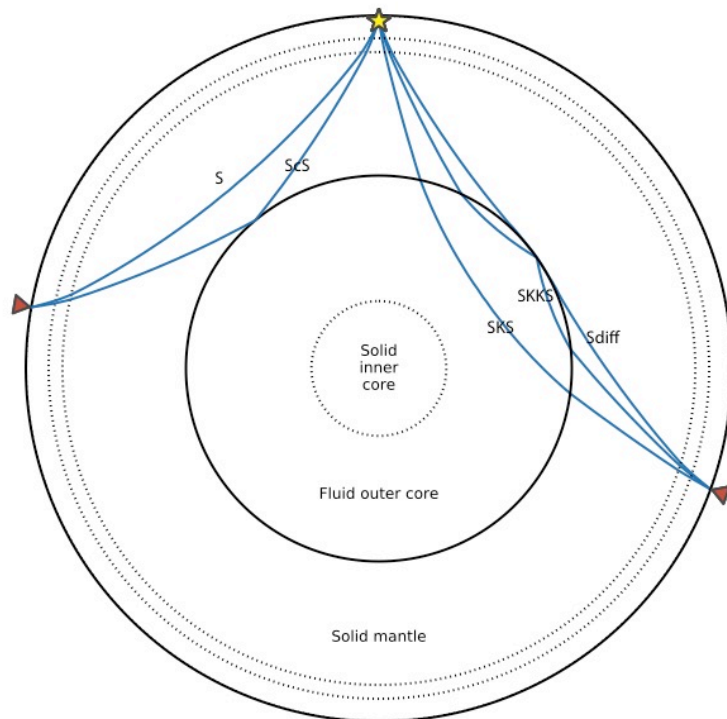


Résidus SVd-SHd



Anisotropie faible dans la région de V_{sh} "faible", et forte ~15% dans la région de V_s normale

Etudes plus récentes



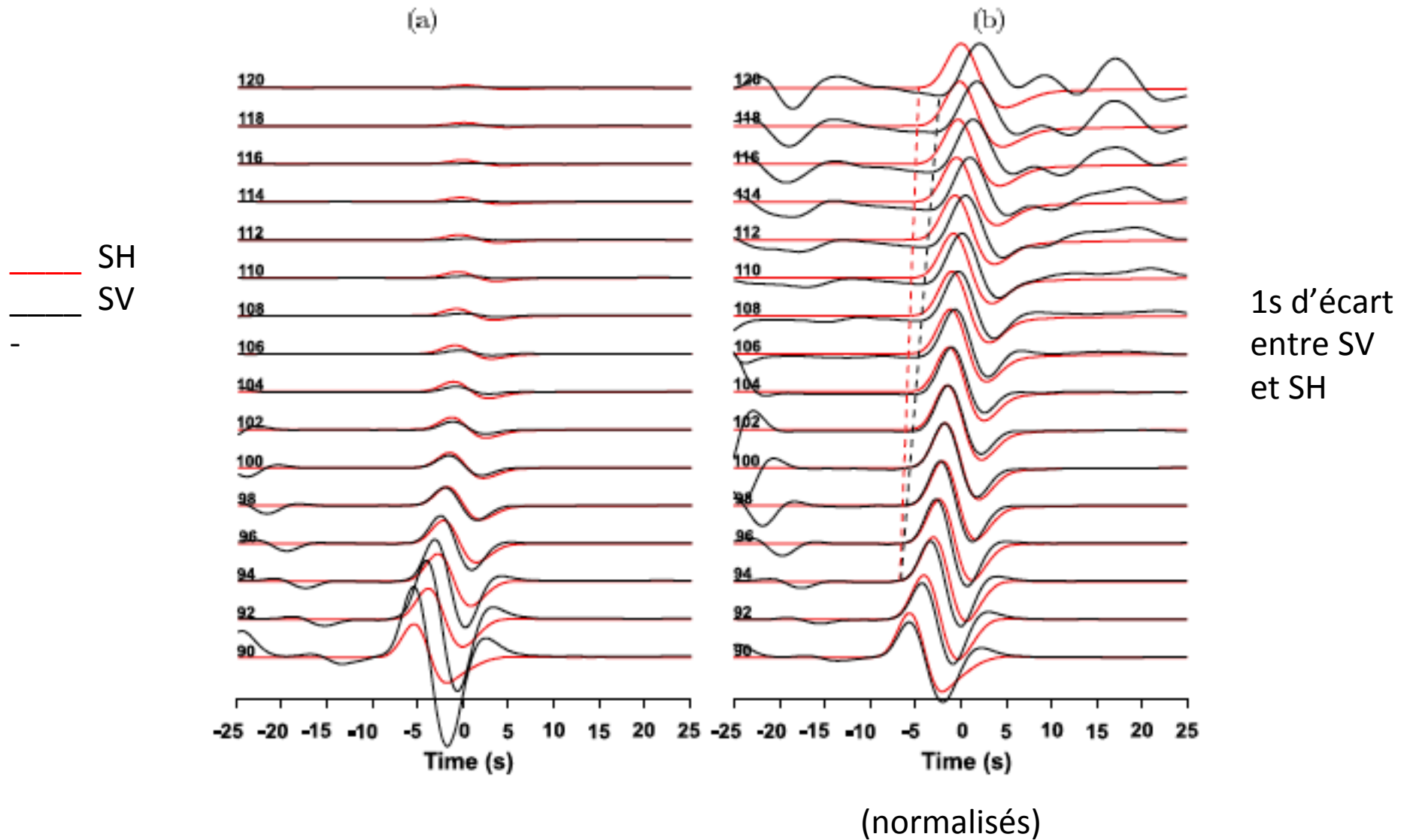
Comment s'affranchir des effets d'anisotropie du manteau supérieur?

- Méthode de Vinnik et al. (1989): peu de trajets s'y prêtent
- Corrections de l'anisotropie azimuthale obtenue par analyse de splitting de SKS et SKKS
- Mesures de splitting différentiel entre (ScS,S) ou entre (SKS,SKKS)

o Effets de distorsion des formes d'ondes dans un modèle hétérogène mais isotrope=> splitting apparent peut être dû à d'autres effets que l'anisotropie

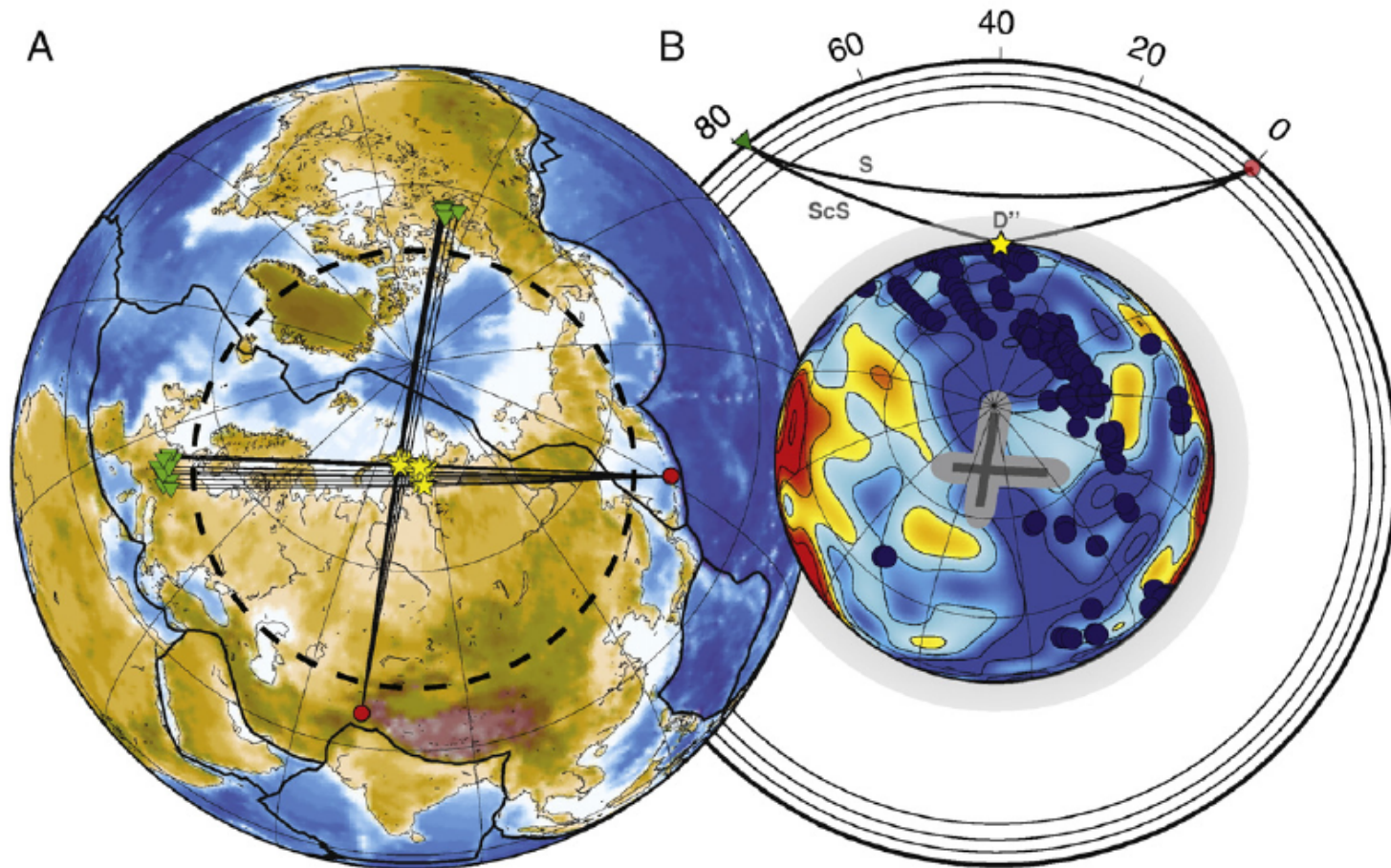
o Couverture azimuthale peu favorable

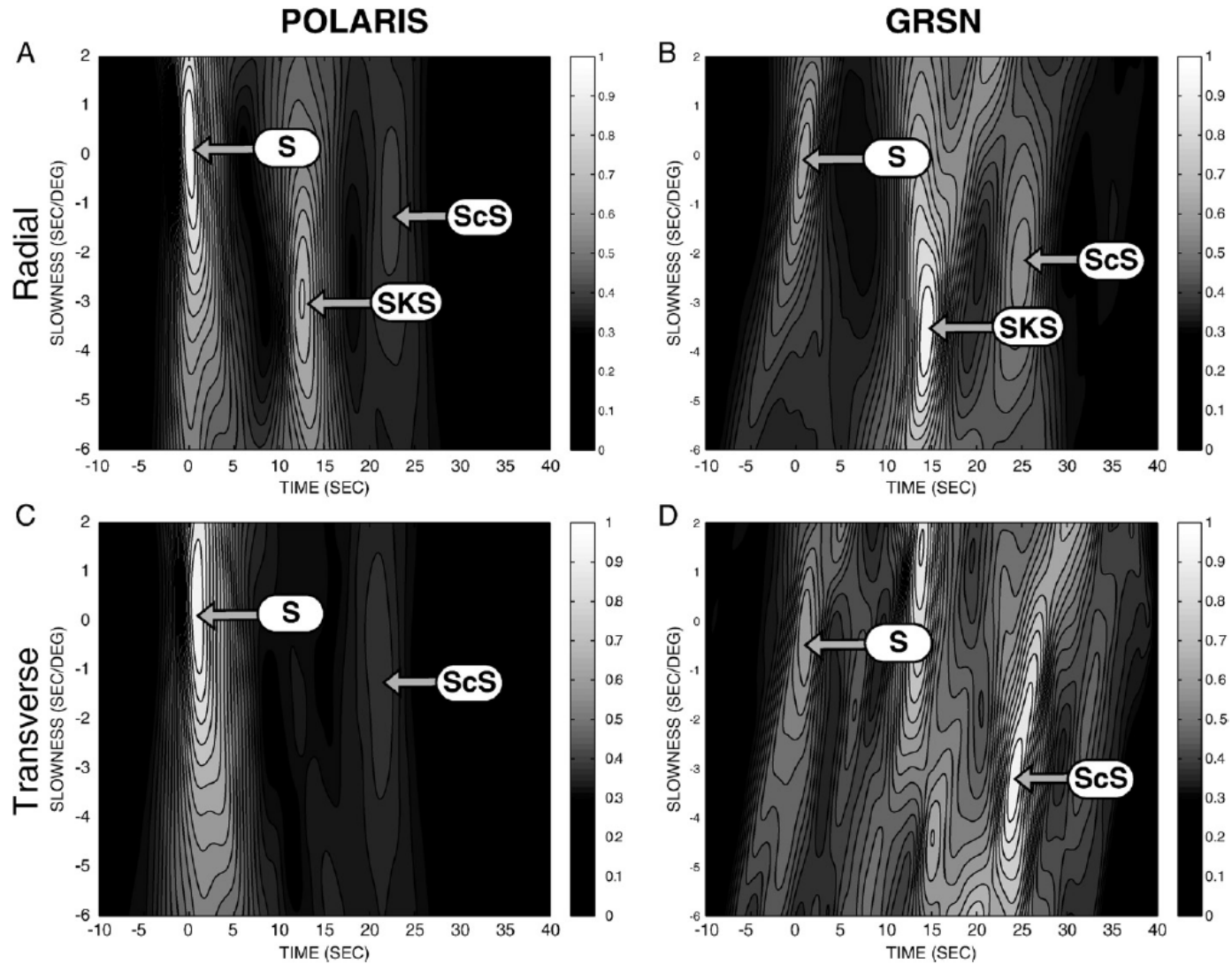
Sismogrammes synthétiques dans le modèle isotrope IASP91



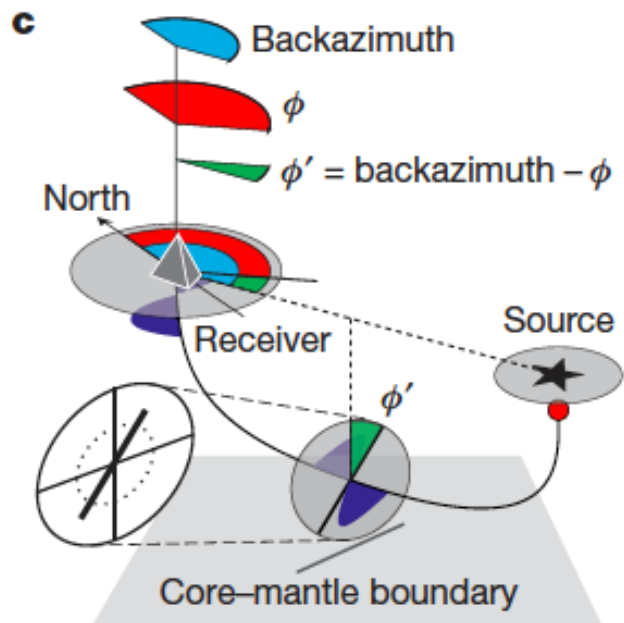
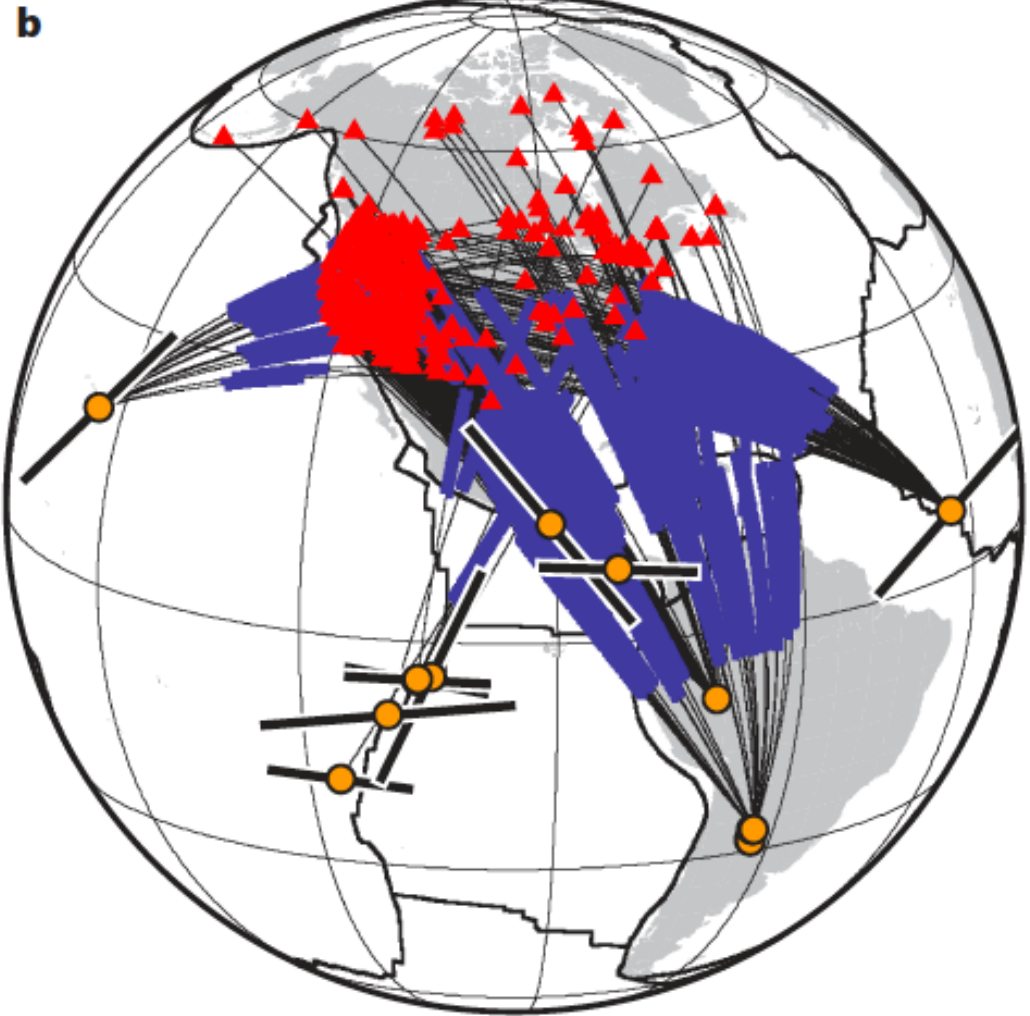
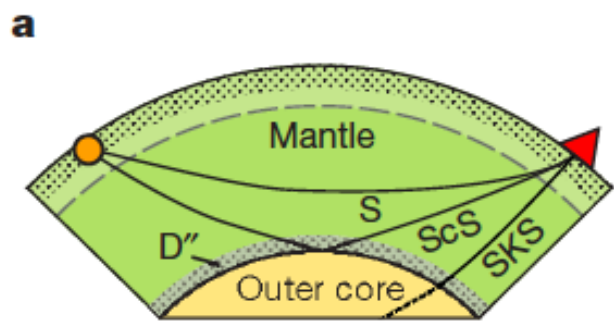
ScS, S corrigés pour l'anisotropie dans la région source

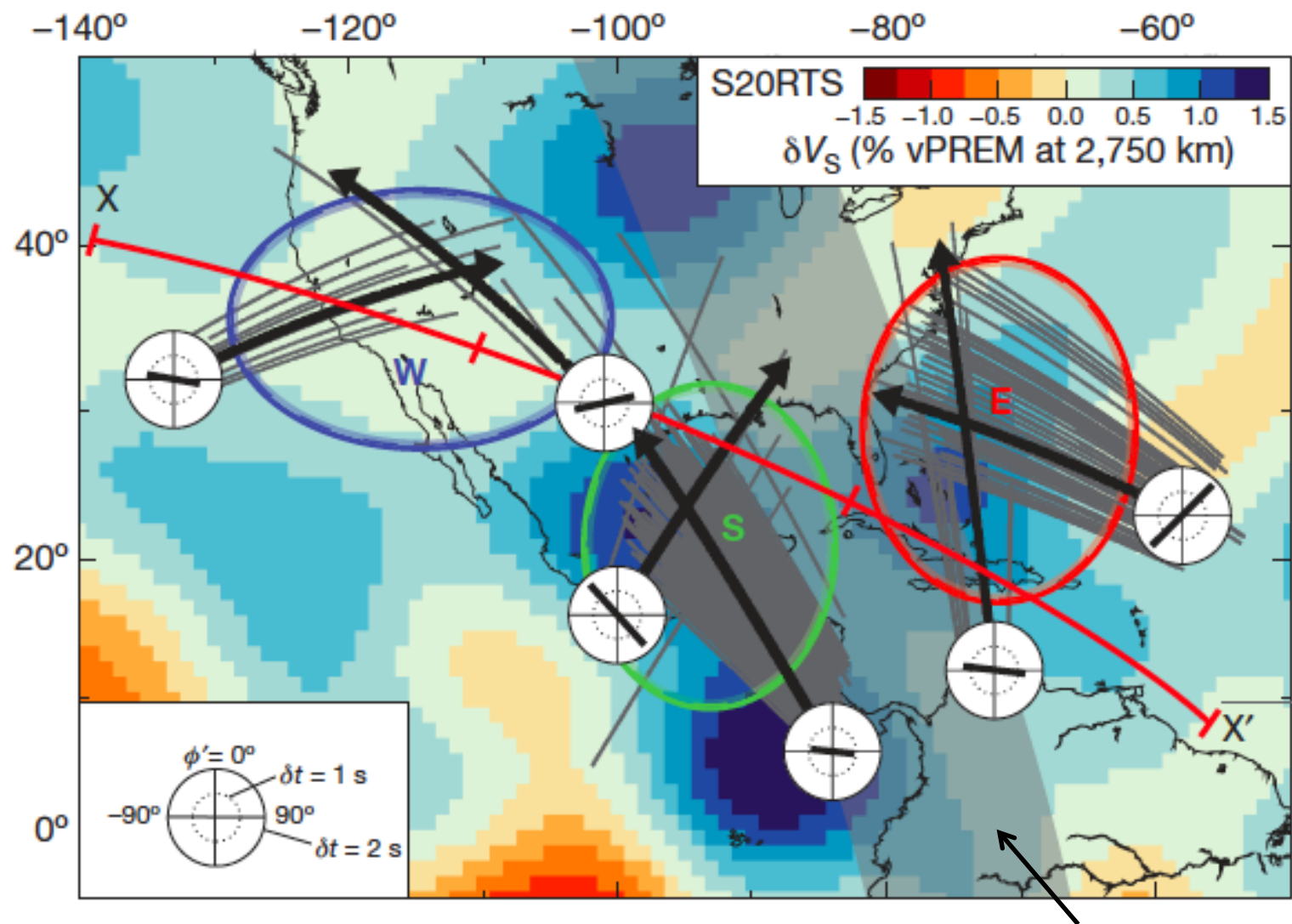
Analyse sur 2 réseaux en Amérique du Nord (Polaris) et en Europe (GRSN)





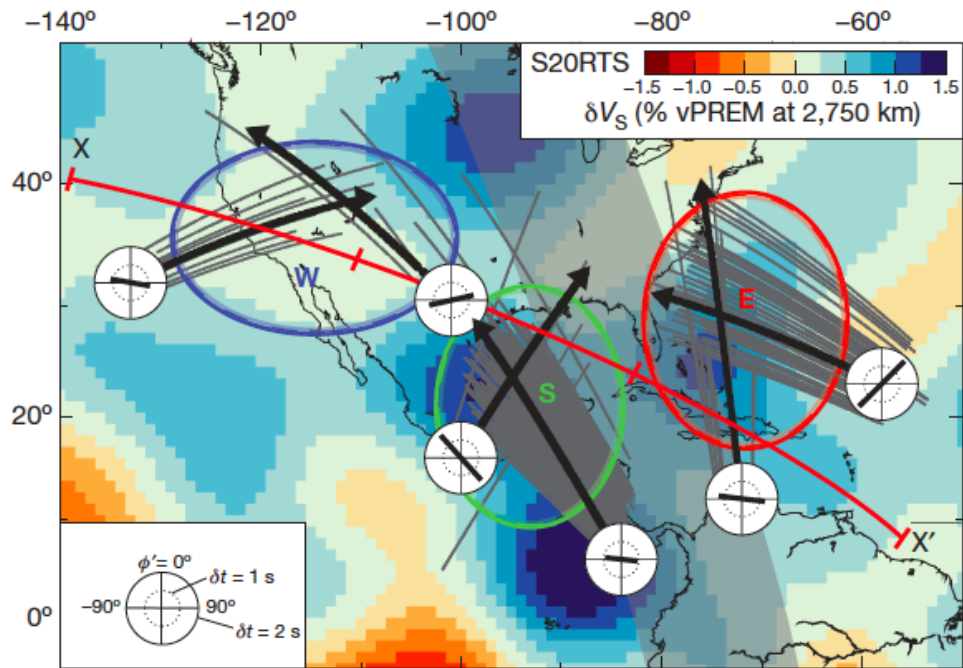
- Comparaison avec prédictions de différents modèles minéralogiques
- Axe de symétrie incliné



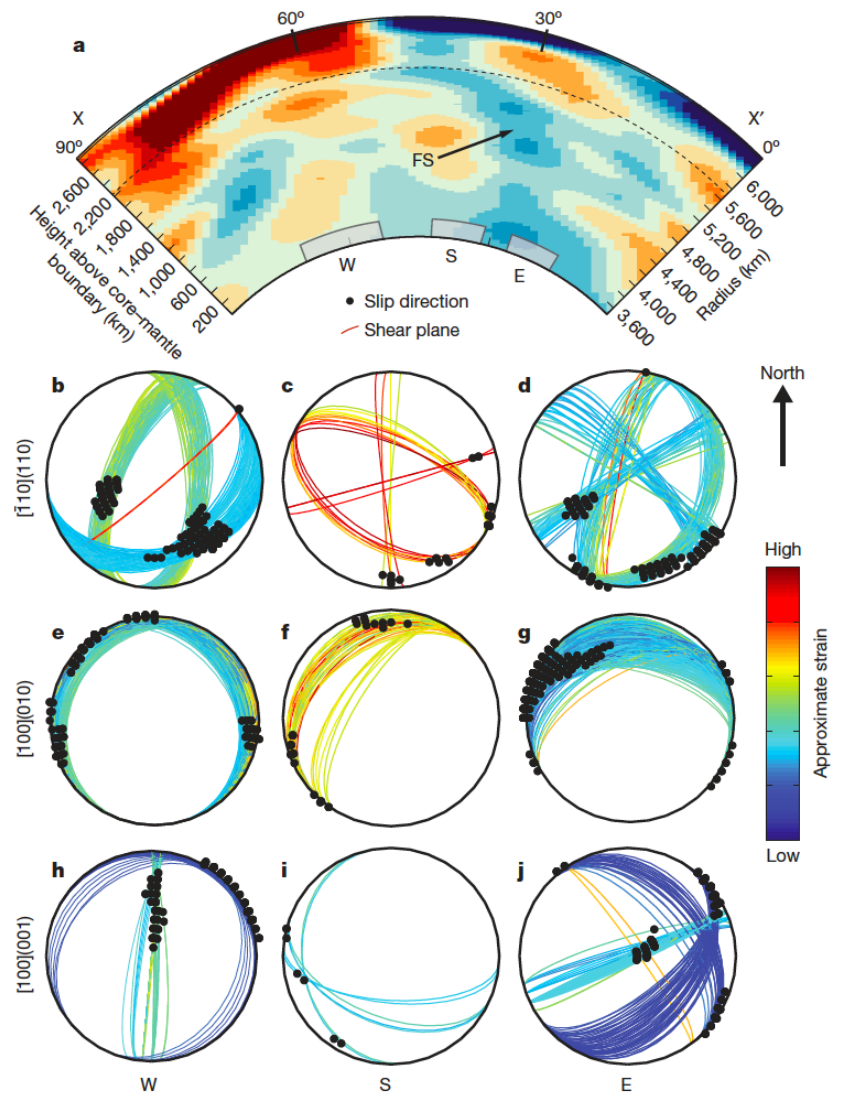


Nécessite de l'anisotropie azimuthale (1.5%)
Orientations de l'axe rapide quasi horizontal sauf dans la région S

Trace de la plaque Farallon à 2500 km de profondeur

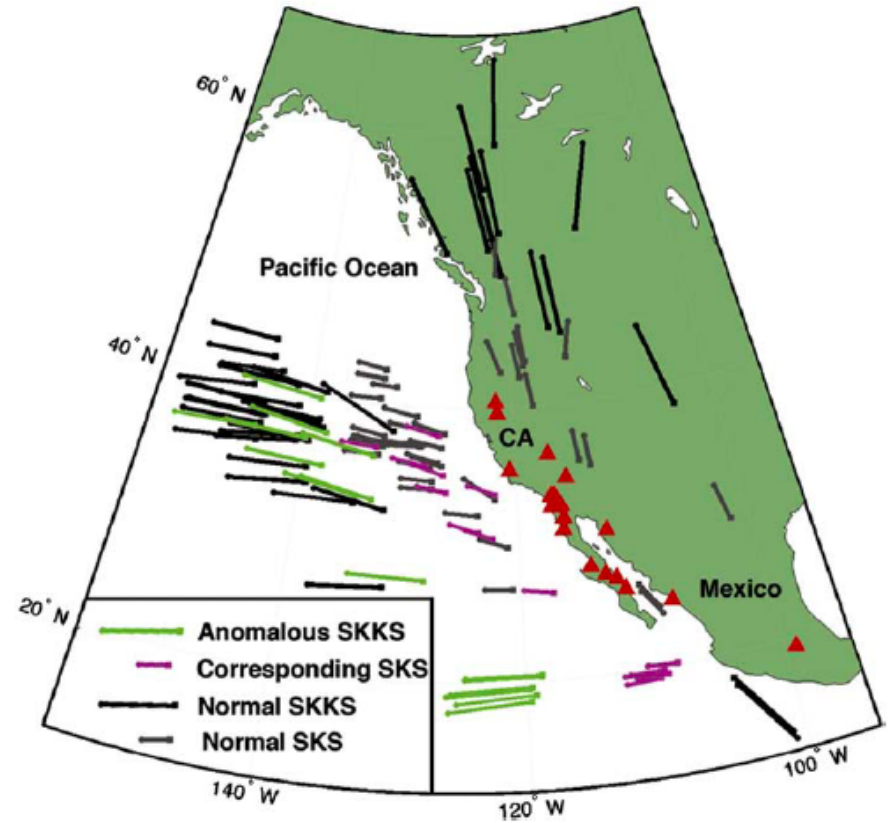
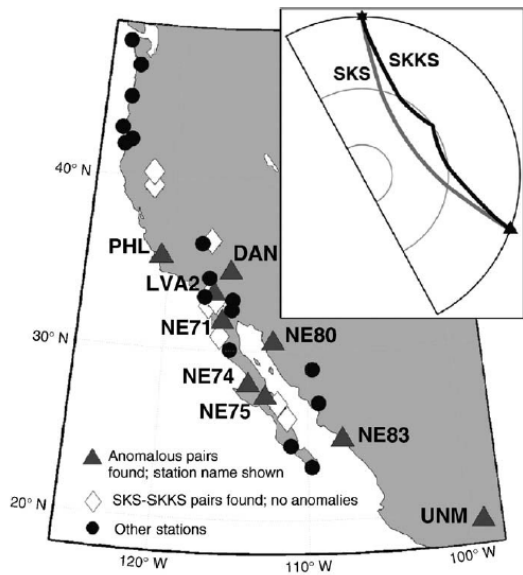
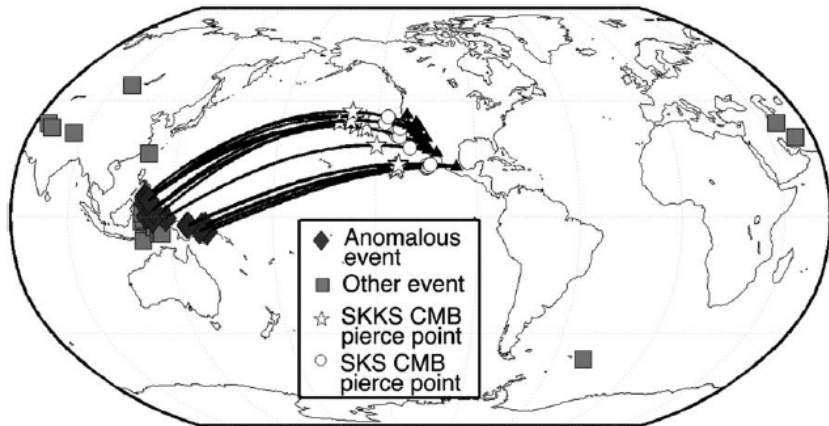


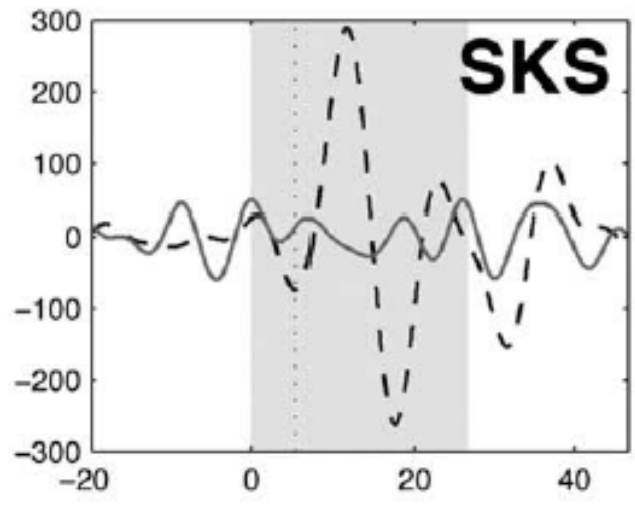
Interprétations...



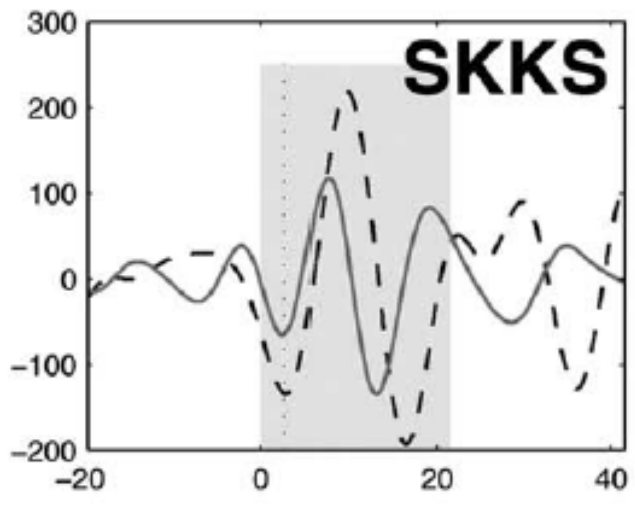
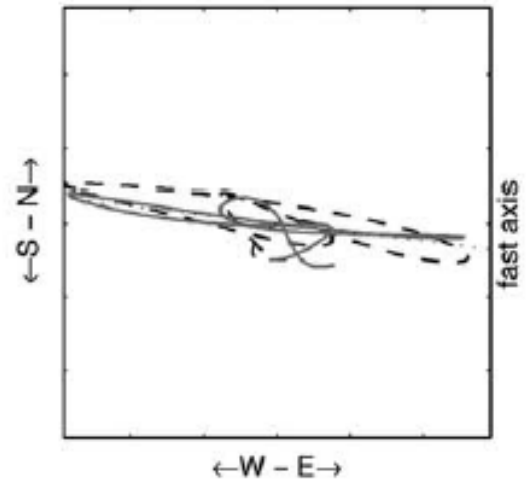
Nowacki et al., 2010, Nature

Splitting différentiel SKS-SKKS

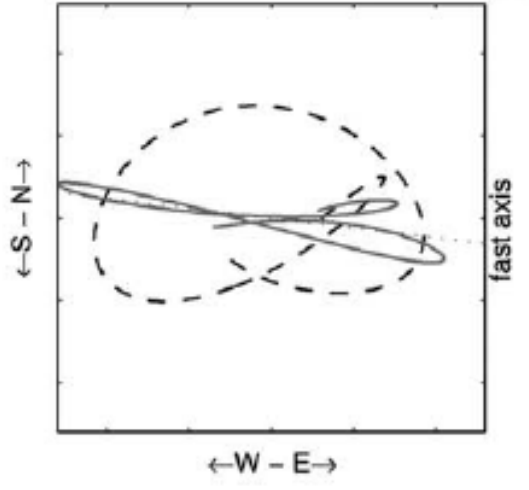




Particle motion before (··) & after (—)

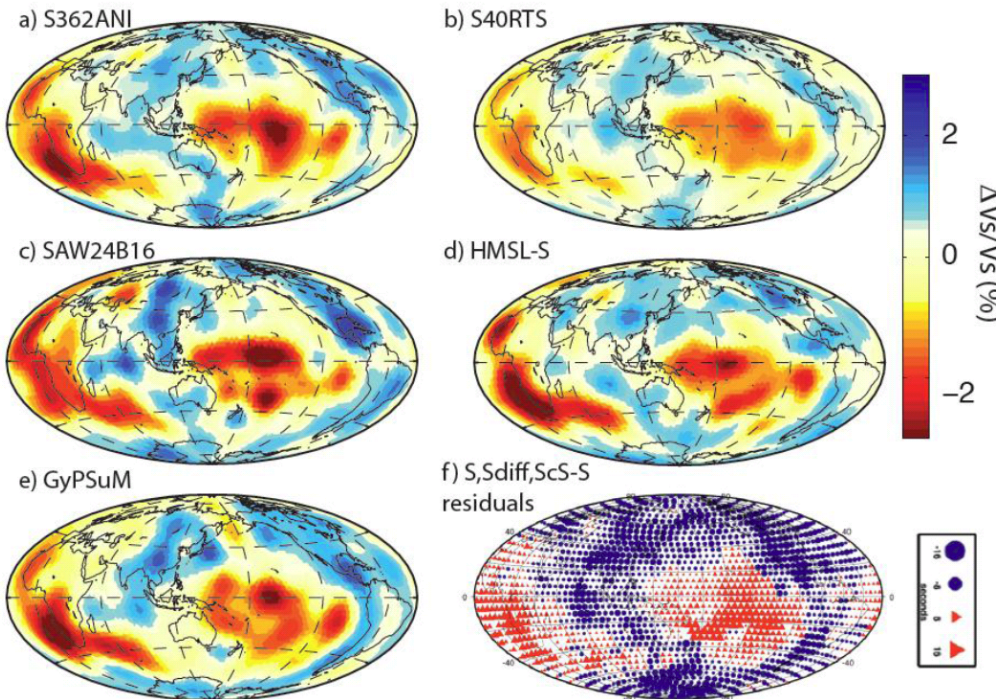


Particle motion before (··) & after (—)

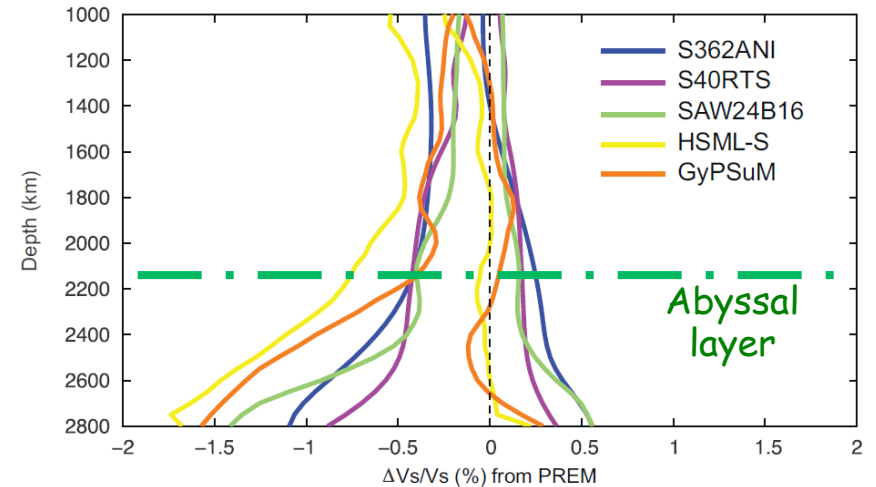


La zone D''

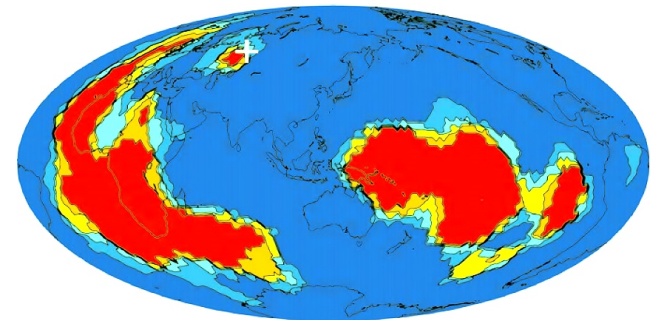
Modèles tomographiques:
profondeur = 2800 km



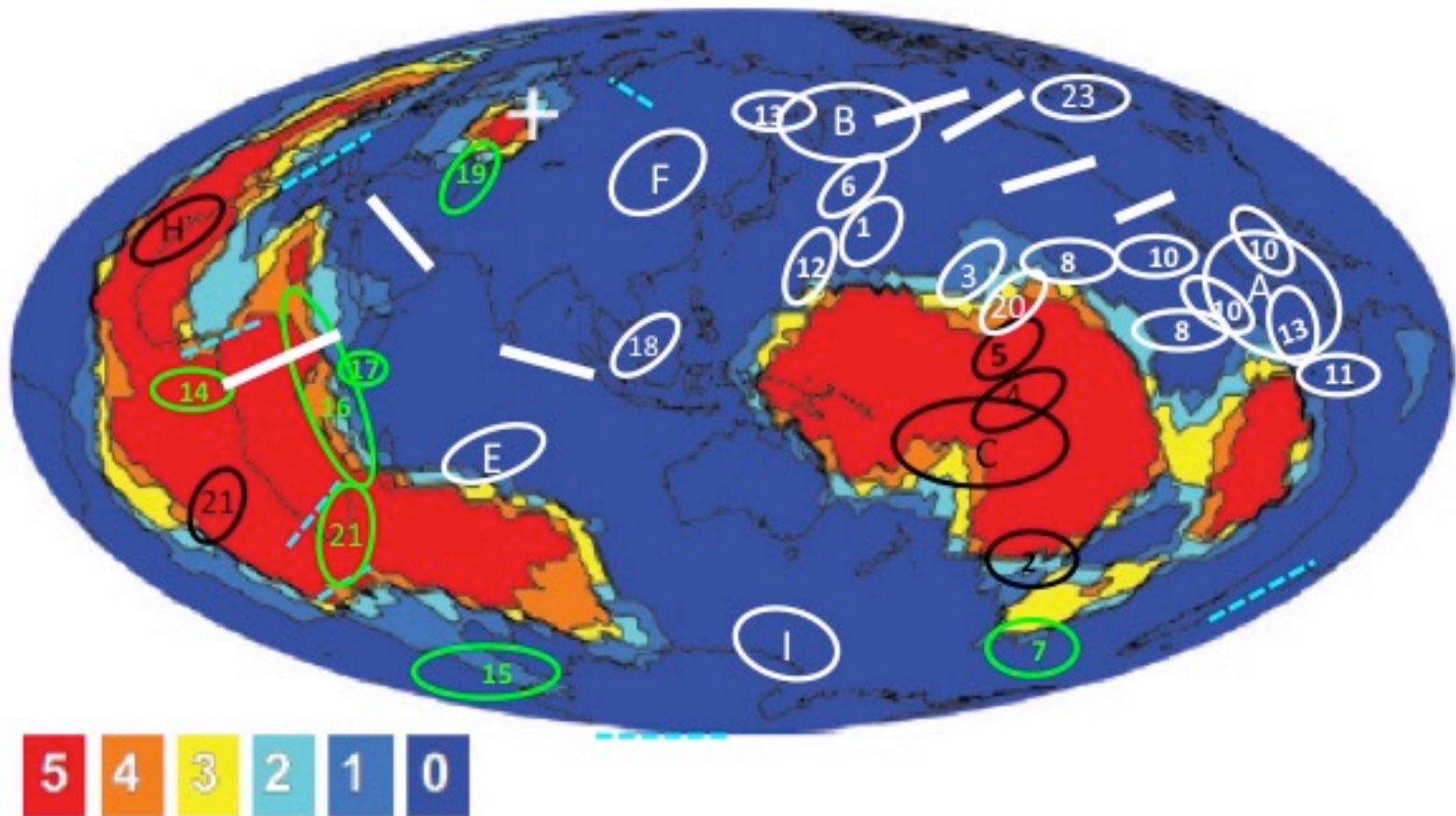
Profils moyens de vitesse dans les
régions lentes et rapides



Comparison de 5 modèles



Anisotropie dans la zone D''



Ellipses blanches: $V_{sh} > V_{sv}$

Ellipses vertes: variations latérales rapides de l'anisotropie

Ellipses noires et -----

: $V_{sv} > V_{sh}$ ou pas de splitting