

Structure et dynamique du manteau profond de la terre

5- Structure fine à la base du manteau - ULVZ

Barbara Romanowicz - Cours 2012
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre
Collège de France
29 Octobre 2012

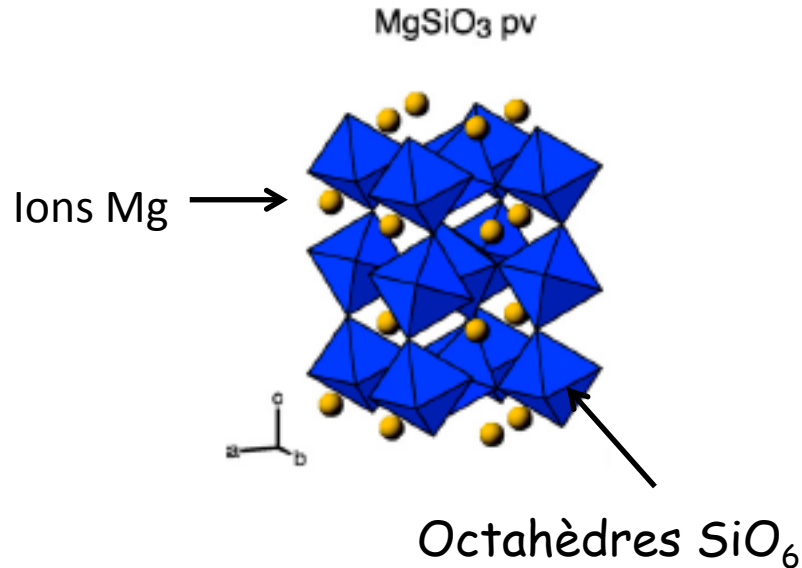
Anisotropie dans la D'' : LPO?

- Pour interpréter l'anisotropie en termes de LPO on doit connaître:
 - 1- La structure cristalline et le tenseur d'élasticité des composants de la D'' au niveau microscopique
 - 2 -Les systèmes de glissement préférentiels dans cette structure
 - 3 -Le champ de déformation auquel sont soumis ces matériaux (-> dynamique)

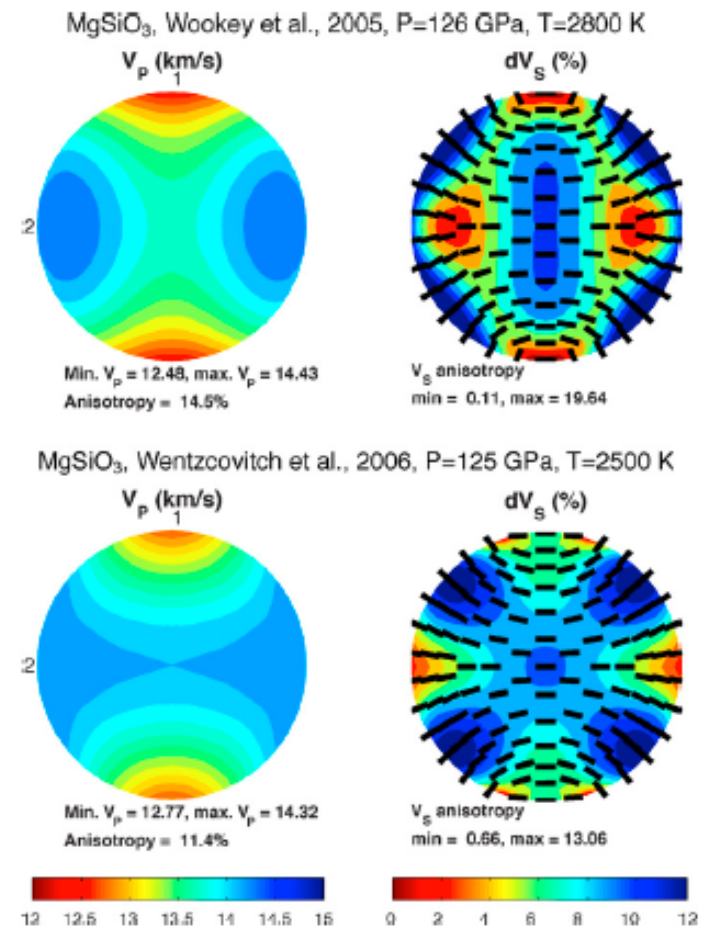
1-Structure cristalline et propriétés élastiques des composants de la D''

- Perovskite (MgSiO_3 avec 10% Fe et quelques % Al) - phase la plus abondante dans le manteau inférieur

- Structure orthorhombique (9 const. élastiques)



Propriétés élastiques calculées ab initio

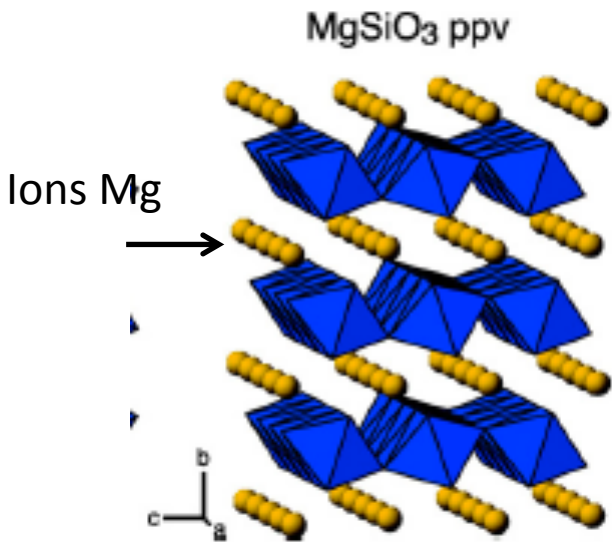


Nowacki et al., 2011

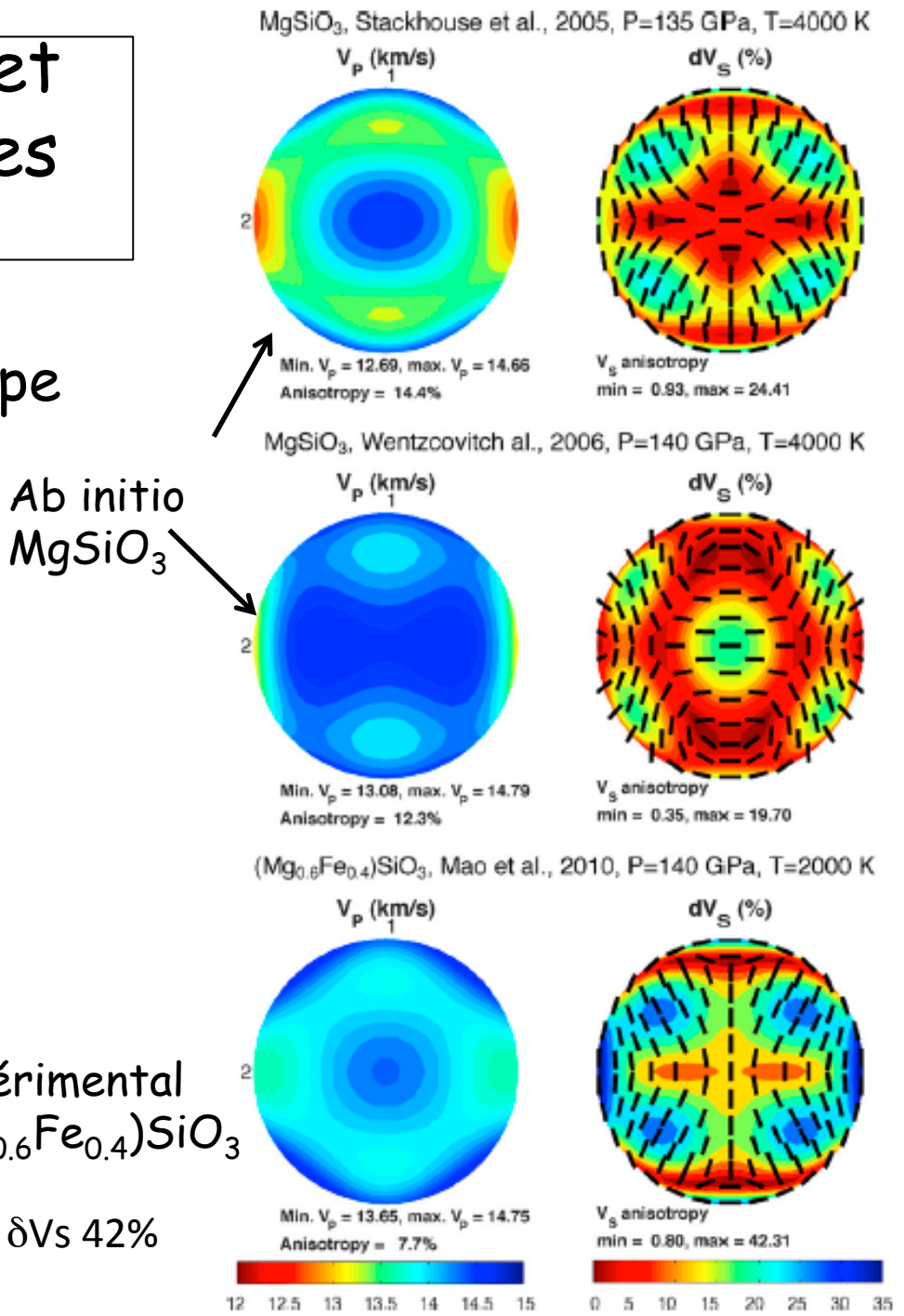
Max δV_s 13-20%

1-Structure cristalline et propriétés élastiques des composants de la D''

Post-Perovskite: plus anisotrope que Pv

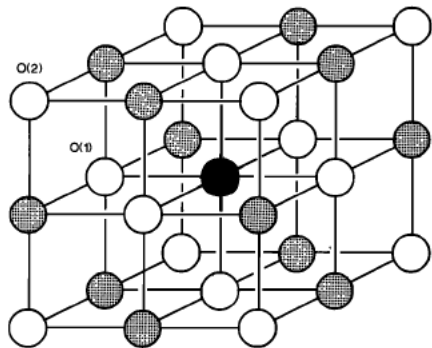


Nowacki et al., 2011

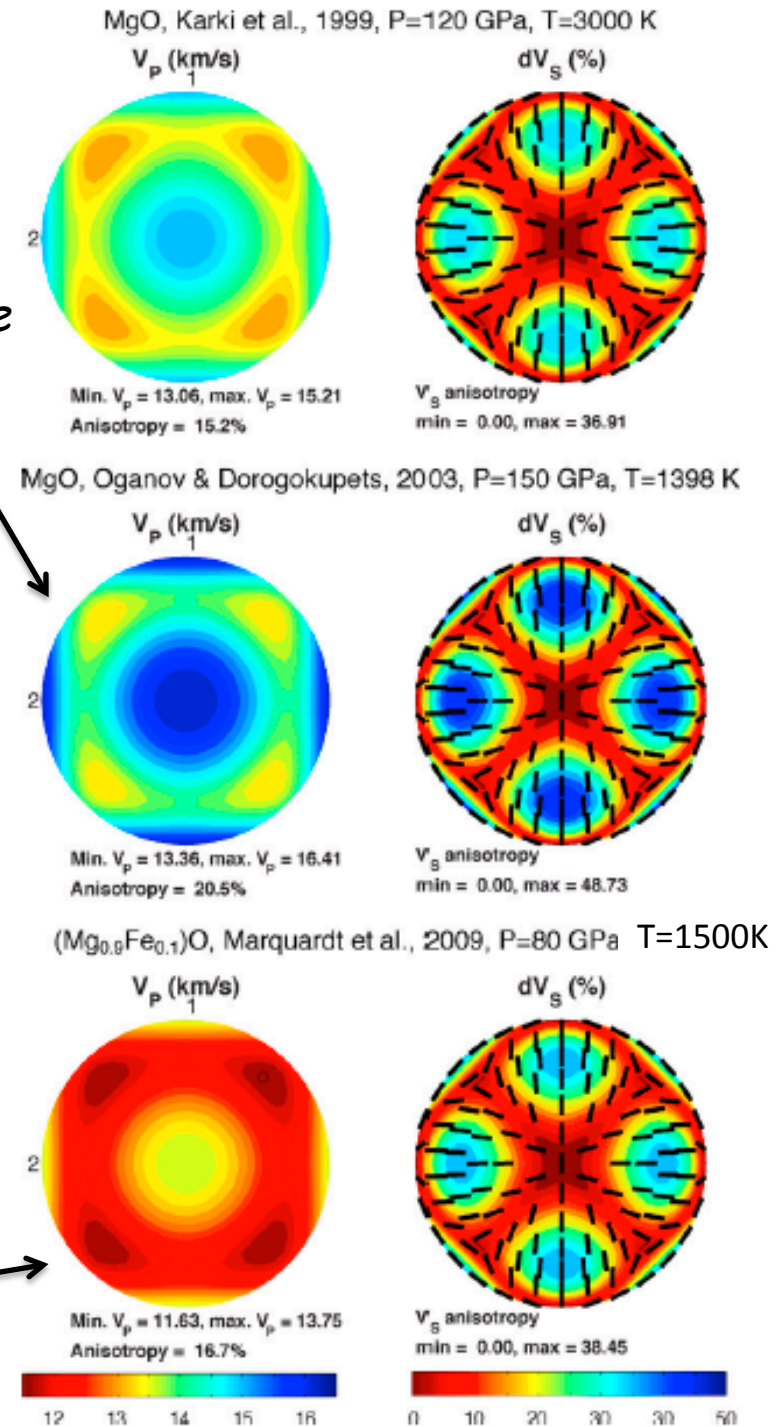


- Ferropericlase ($Mg_{0.9},Fe_{0.1}$)O (fpc)

- Structure cubique (3 constantes élastiques)
- Effet du fer peu établi:
 - Partition entre fpc et pv/ppv
 - Effet de l'état de spin
- Anisotropie en S >35%

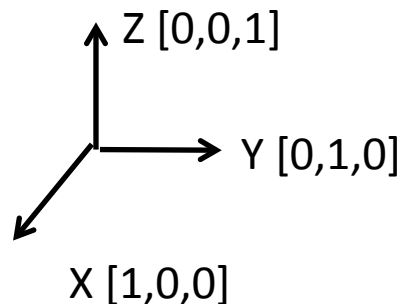


théorique



Expérimental

- Systèmes de glissement dans la perovskite:
 - $[0\ 1\ 0](1\ 0\ 0)$ plan de glissement dominant dans les conditions du manteau inférieur (Mainprice et al., 2008).
 - Pour un alignement à 100%:
 - δV_s max $\sim 2\%$ = très faible anisotropie macroscopique



Systemes de glissement dans la pPV

Table 2

Summary of inferred slip systems in MgSiO₃ post-perovskite and structural analogues from deformation experiments using the diamond-anvil cell (DAC), laser-heated diamond-anvil cell (LHDAC), Kawai-type and deformation-DIA (D-DIA) apparatuses.

Study	Method	P (GPa)	T (K)	Differential stress (GPa)	Dominant slip system ^a	Remarks
(Mg,Fe)SiO₃						
Merkel et al. (2007)	LHDAC	147–157	1800	7–9	(100) or (110)	Mg# = 0.9; opx starting material
Miyagi et al. (2010)	LHDAC	148–185	3500	5–10	[100](001) or [010](001)	Mg# = 1.0; glass starting material
Mao et al. (2010)	LHDAC	140	2000	^b	{100} or {110}	Mg# = 0.6; opx starting material
CaIrO₃						
Yamazaki et al. (2006)	Kawai	1	1173		[100](010)	$\gamma = 0.4$ – 1^c
Walte et al. (2007)	D-DIA	3	1000	^b	[100](010)	$\gamma = 0.8$ – 1
Niwa et al. (2007)	DAC	0–6	300	^b	(010)	
Miyagi et al. (2008)	D-DIA	2–6	300–1300	–2 to 2	[100](010)	
Walte et al. (2009)	D-DIA	1–3	1300	^b	[100](010)	$\gamma = 0.5$ – 1
MgGeO₃						
Merkel et al. (2006)	LHDAC	104–124	1600	3–8	(100) or (110)	opx starting material
Kubo et al. (2008)	LHDAC	83–99	1600	0.1–1	(010)	opx starting material
Okada et al. (2010)	LHDAC	78–110	300	1–3	(001)	4 runs; opx and pv starting material
MnGeO₃						
Hirose et al. (2010)	LHDAC	77–111	2000	2–10	(001)	opx starting material

^a Where no slip vector is given in the study, only the slip plane is shown.

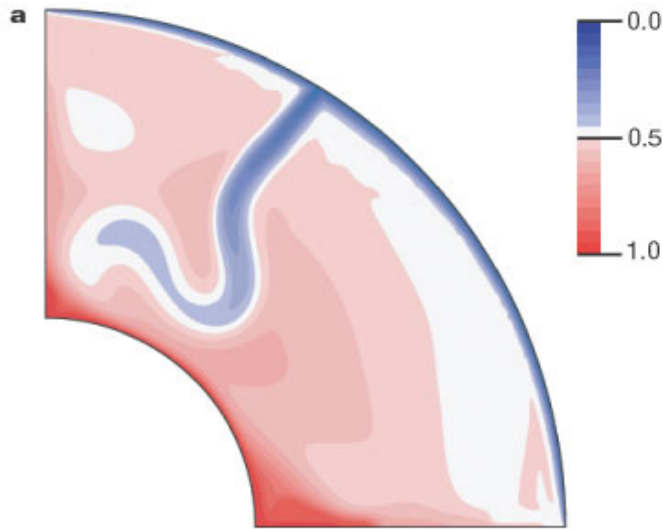
^b Not stated.

^c Shear strain γ as stated in the study.

3- Déformation dans la D''

- Hypothèse simple:
 - Écoulement horizontal dans la D''
 - On prédit $V_{sh} > V_{sv}$ partout, ce qui n'est pas tout à fait en accord avec les observations
- Etape suivante: déformation due à une plaque qui s'écrase sur la CMB

Champ de température



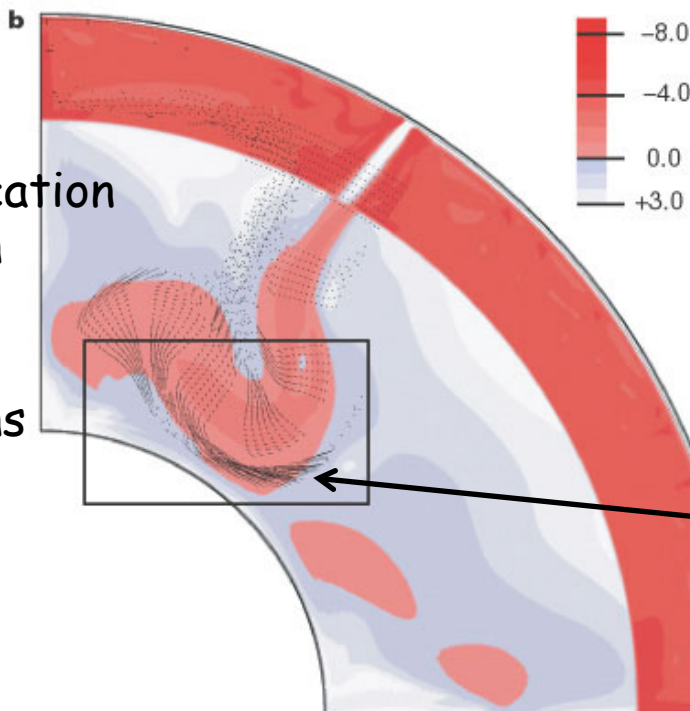
Développement de la texture due à la déformation à l'état solide dans un manteau de composition homogène:

->l'anisotropie est due à une déformation importante (100-200%) dans un champ de contraintes élevé

- Régime de dislocation dans un champ dominé par la diffusion

Déformation:
l=rapport de fluage par dislocation et par diffusion

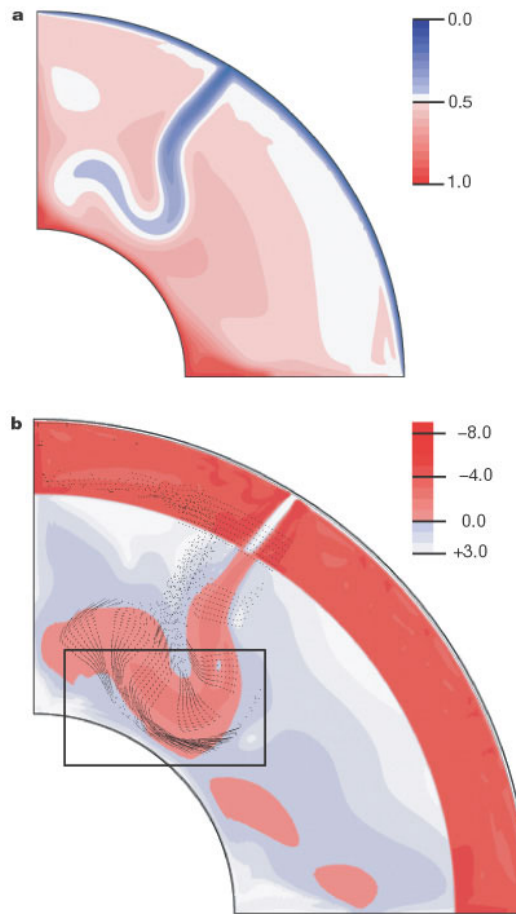
- traceurs de déformation dans les régions de dislocation



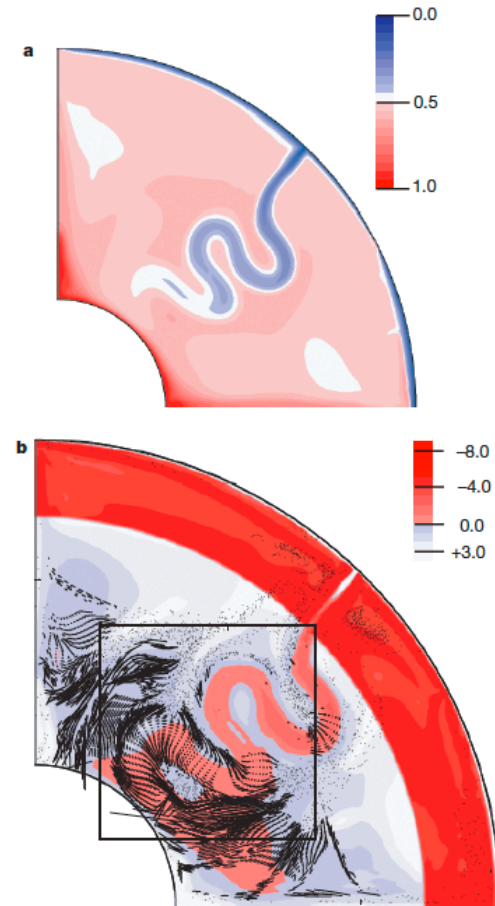
Déformation latérale importante à la base du manteau

Viscosité dépend de la température

McNamara et al., 2002



Cas 1: Chauffage par le bas



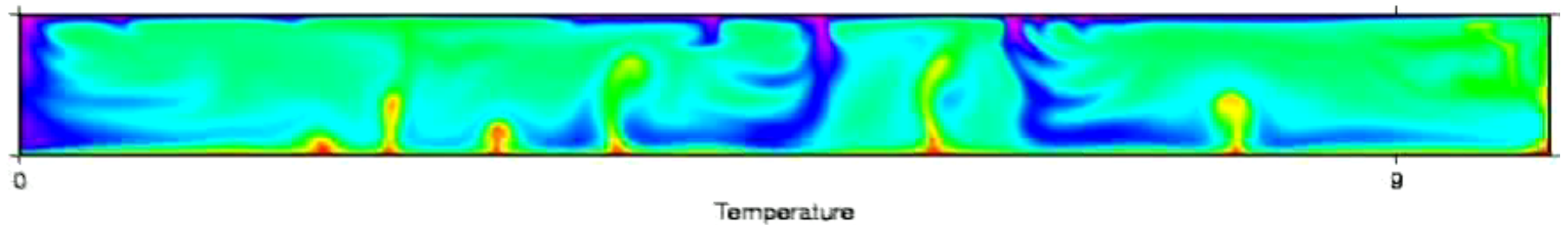
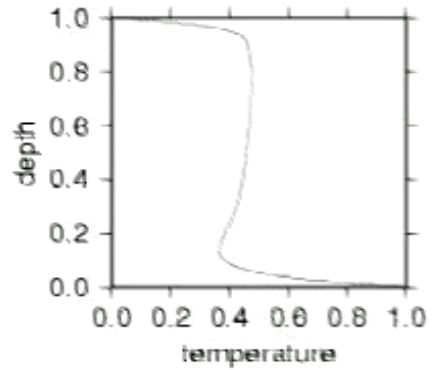
Cas 2: Chauffage par le bas et interne

- Compatible avec les prédictions sur $(Mg,Fe)O$ $V_{sh} > V_{sv}$ dans un champ de cisaillement horizontal (phase plus déformable que la Pv)
- La déformation évolue avec le temps: les observations d'anisotropie sismique seraient représentatives de la déformation actuelle (et non passée)

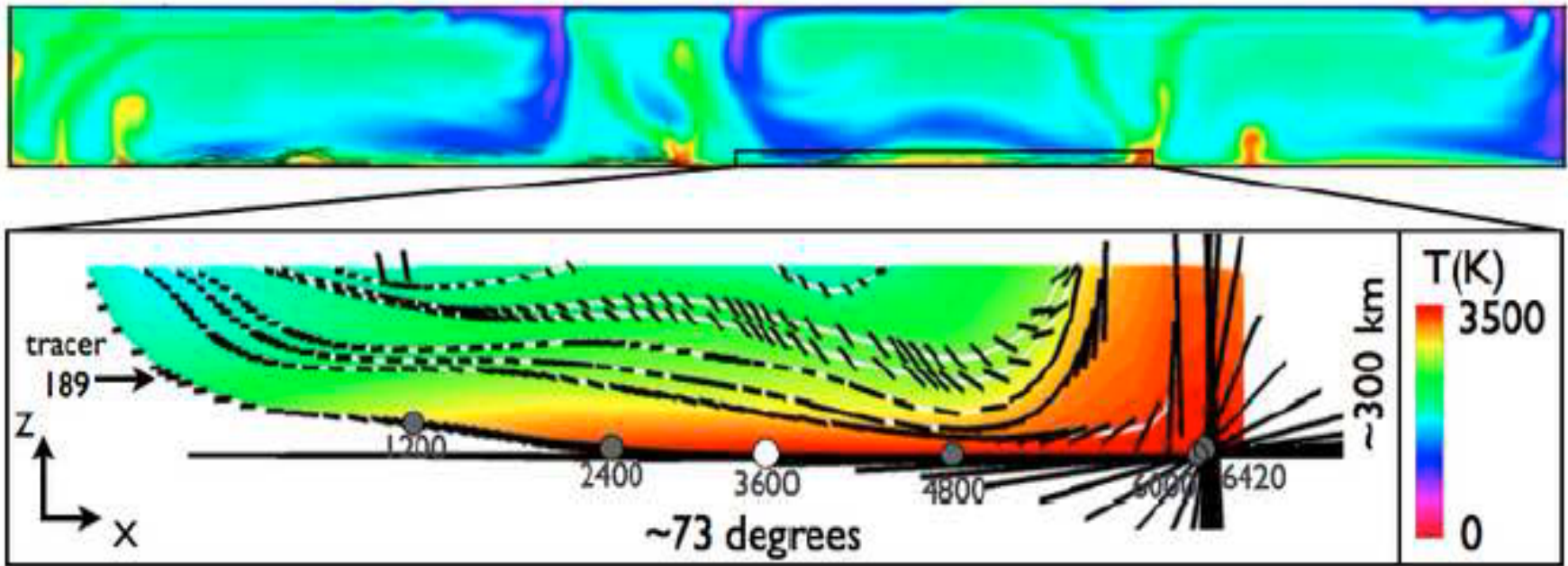
De la plasticité polycristalline à l'anisotropie sismique: une procédure à plusieurs étapes.

- Modèle géodynamique → champ de déformation macroscopique
- -> Calcul du développement de texture (LPO) dans un minéral polycristallin (VPSC)
 - Théorie des milieux effectifs - Visco Plastic Self Consistent modeling
- -> texture calculée pour différentes combinaisons de phases minéralogiques et systèmes de glissement
- -> tenseur élastique anisotrope en chaque point du modèle
- -> Modélisation numérique des formes d'ondes sismiques

Viscosité $\eta(T)$ et saut à la discontinuité de 660 km
Calcul avec le code "CITCOM" en 2D



Geodynamic model (temperature field) from A. McNamara



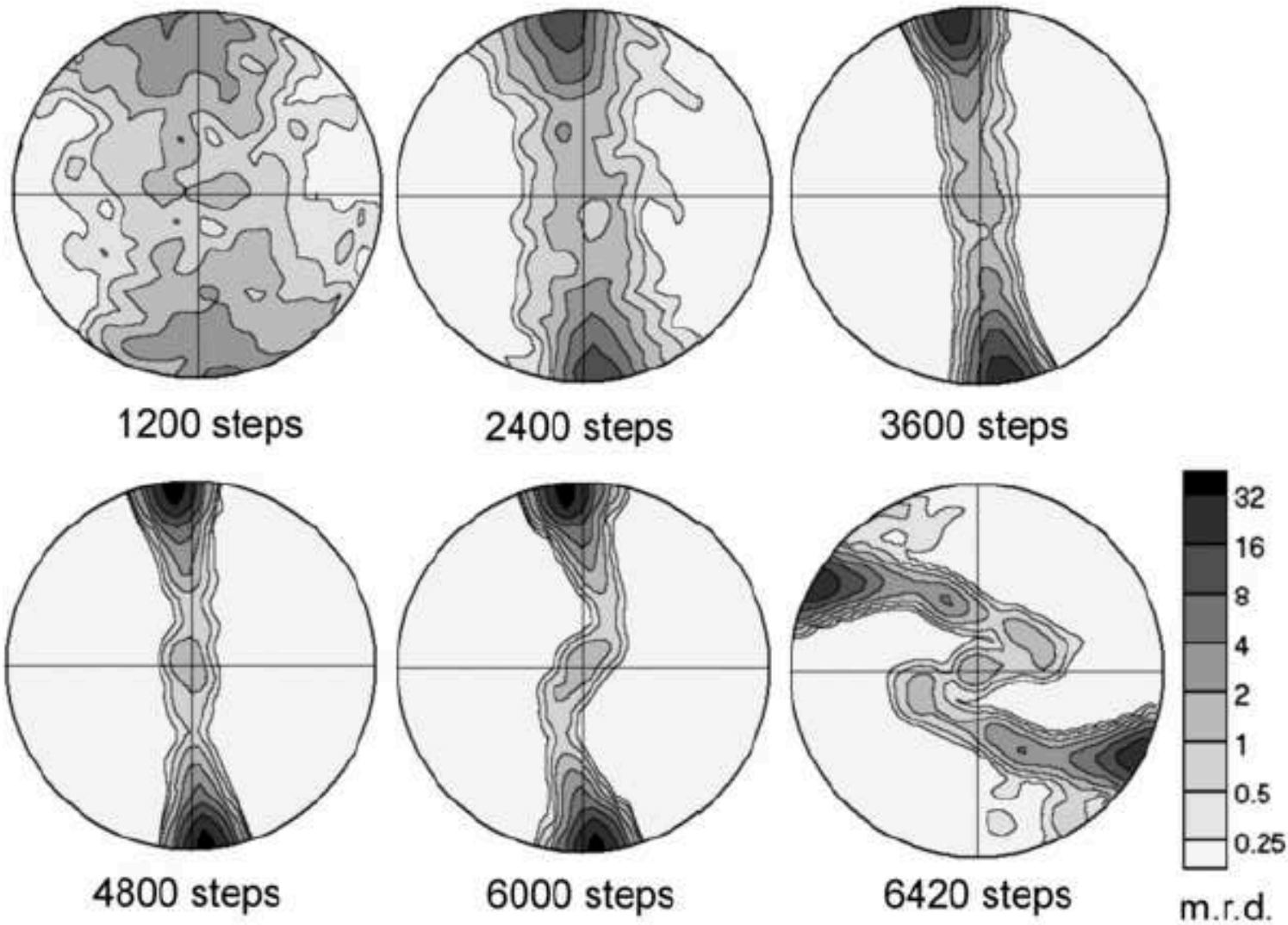
Interpolated temperature and strain field

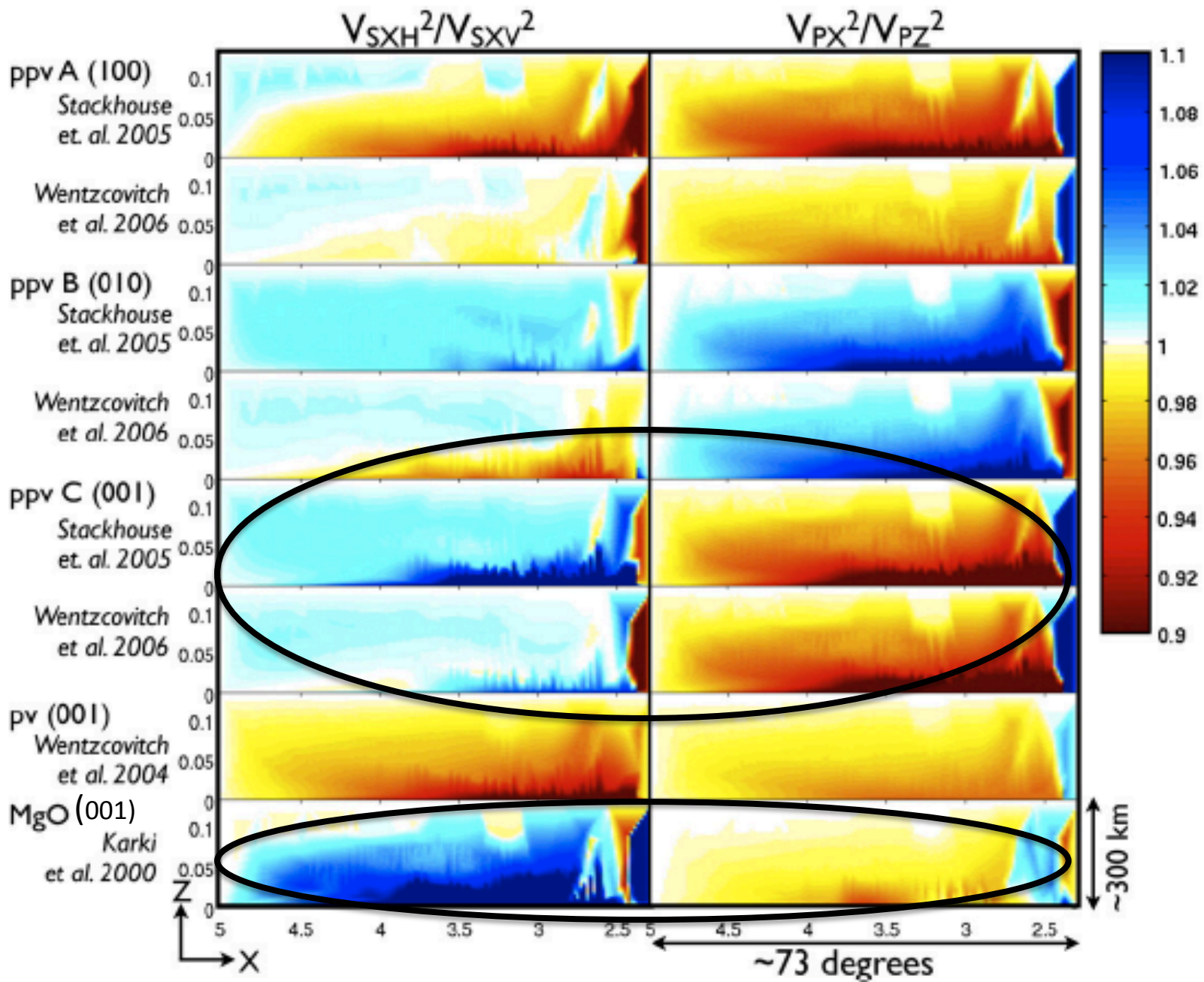
Traceurs de déformation lagrangiens

— orientation de l'axe principal de l'ellipse de déformation

Wenk, Cottaar et al., 2011

Postperovskite texture development (VPSC)
001 pole figures along streamline 189





Pure Mg composition (no Fe)!

Wenk, Cottar et al., EPSL, 2011

Perspectives...

- Calculs faits en 2D -> 3D
- Composition homogène -> différences chimiques dans les LLSVP
 - Influence du fer sur les systèmes de glissement
 - Connu pour fpc (*Antonangeli et al., 2011*) mais pas pour Pv et pPv
- Mieux caractériser les propriétés de la pPv

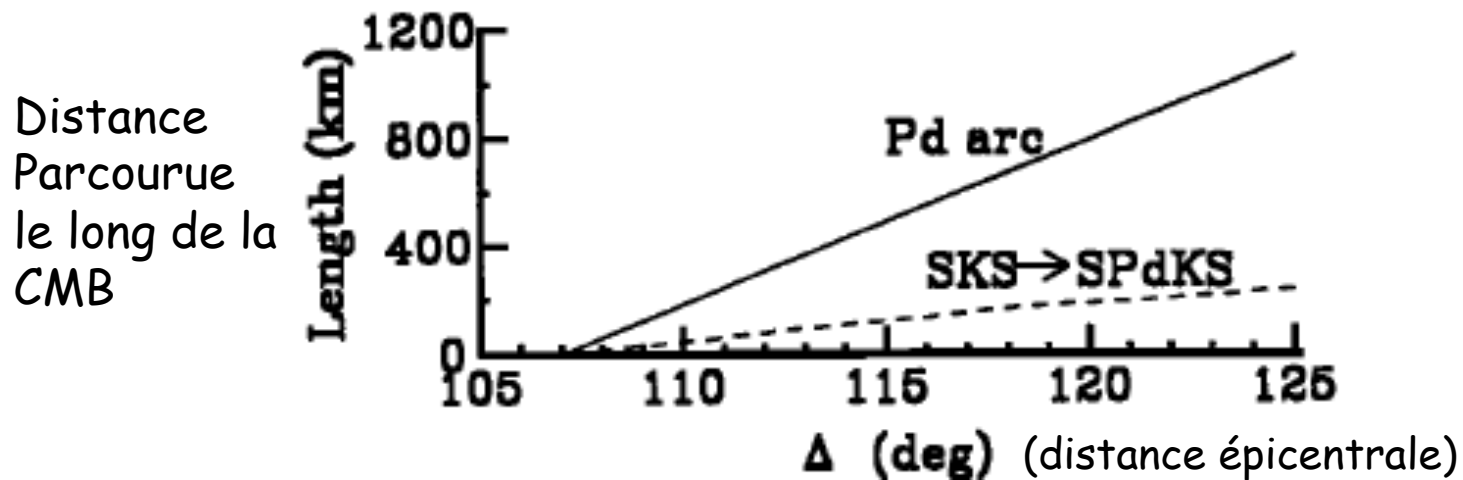
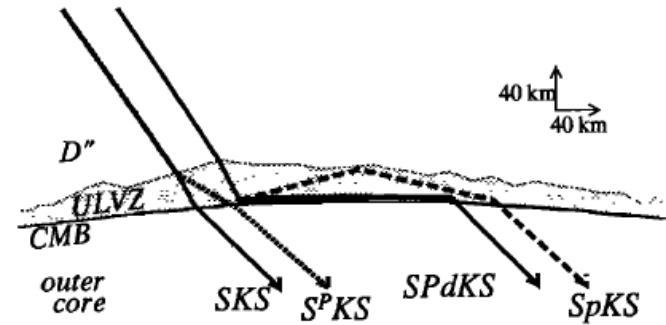
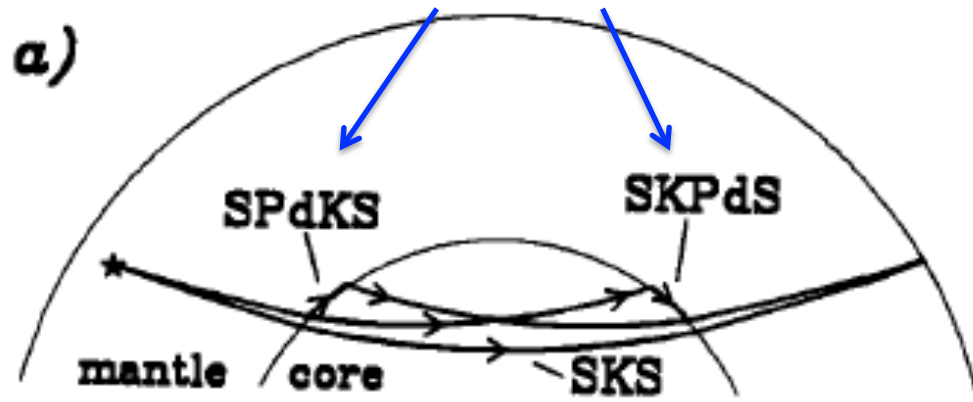
Structure fine du manteau (fin):

ULVZ = Ultra Low Velocity Zone(s)

"ULVZ" - Ultra low velocity zones

- Découvertes il y a 20 ans (Garnero et al., 1993, Garnero and Helmberger, 1995)
- Les anomalies de vitesse lentes à la base du manteau (dans les LLSVP) sont typiquement de l'ordre de 2-3%
même si elles sont sous estimées -> <~5%
- ULVZ = zones de faible extension géographique où la vitesses des ondes P est inférieure à celle du PREM d'au moins 10%, et peut-être jusqu'à 30%

Deux branches



$\Delta = 107^\circ$: Angle d'incidence critique pour ScP

Couplage entre SKS et P_d le long de la CMB \rightarrow SP_dKS

\rightarrow diminution de l'amplitude de l'onde SKS au profit de SP_dKS

Garnero et al., 1993

Seismes profonds d>500 km

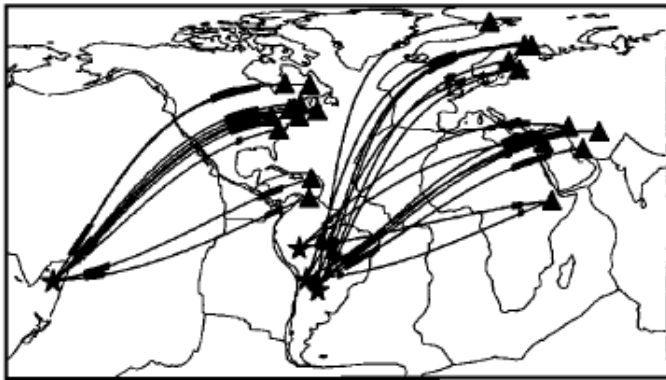


Fig. 2. Great-circle paths between events (stars) and stations (triangles). The thicker line segments represent the P diffraction zones.

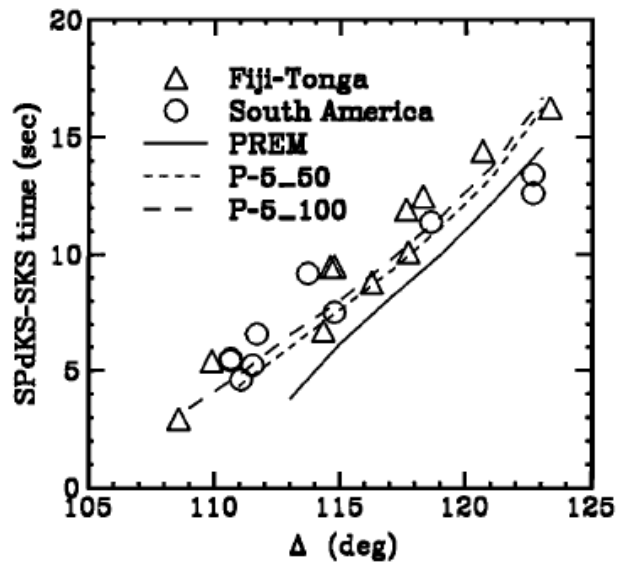
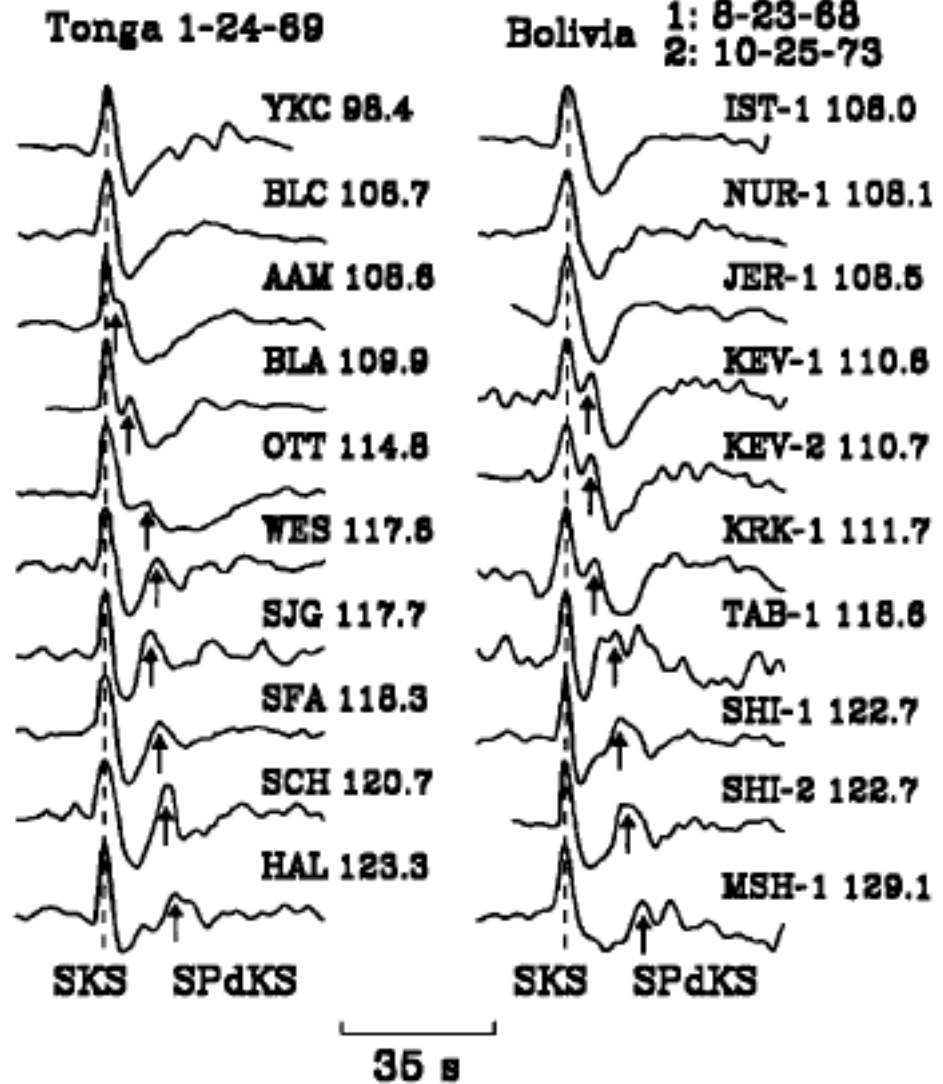


Fig. 5. Peak to peak differential travel times of SP_dKS-SKS for the data (symbols) and the synthetics (lines).



Enregistrements sur la composante radiale alignés sur l'onde SKS - Amplitude normalisée
 Tonga → Amérique du Nord
 Bolivie → Europe et Eurasie

Sismogrammes synthétiques calculés par la méthode de réflectivité

Profondeur de la source:
560 km

Modèles testés:
 $d\ln V_p$ 5% à la CMB

Raccord linéaire au PREM
50 ou 100 km au dessus
de la CMB

La phase SPdKS est affectée
principalement par la vitesse
à la base du manteau.

L'épaisseur de la zone lente doit
être étudiée sur des observations
"large bande"

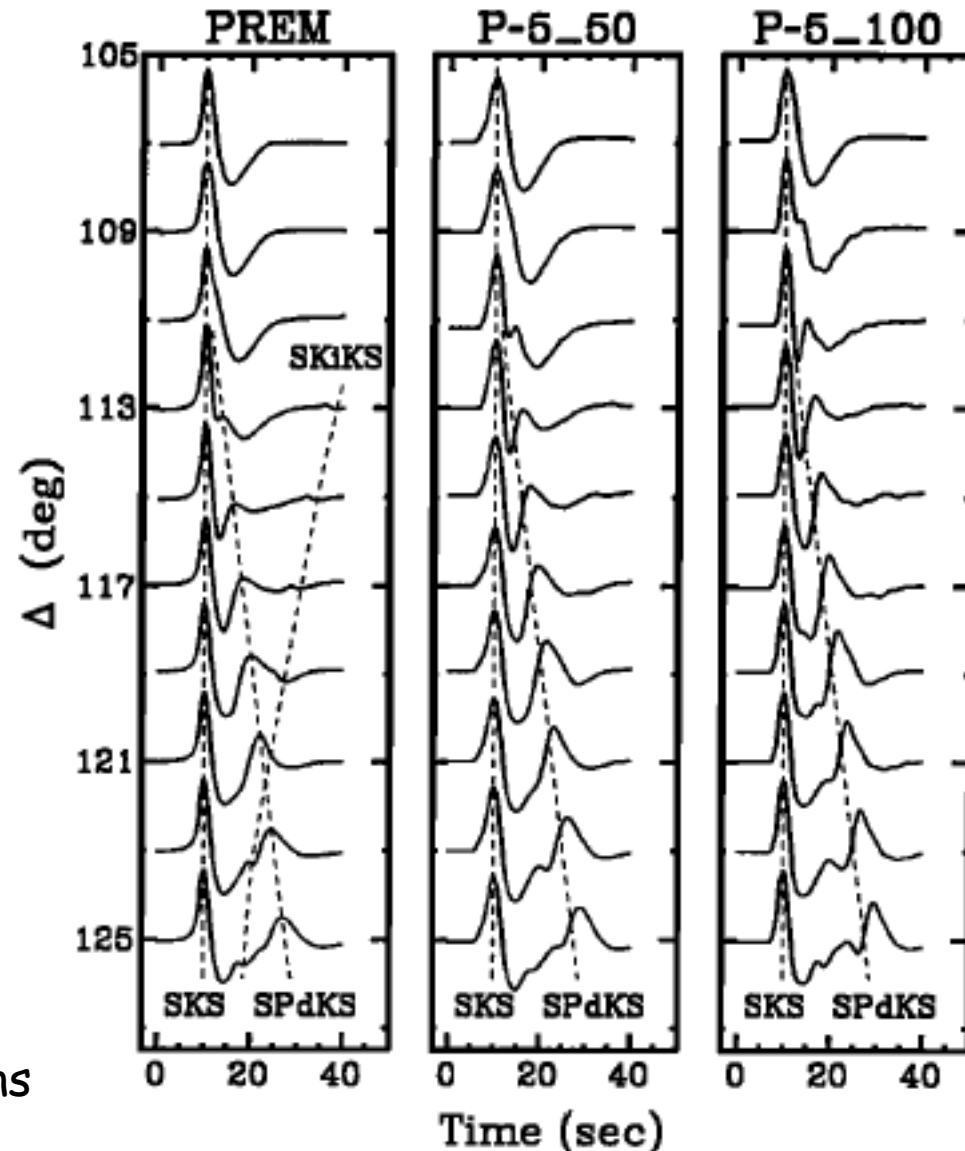
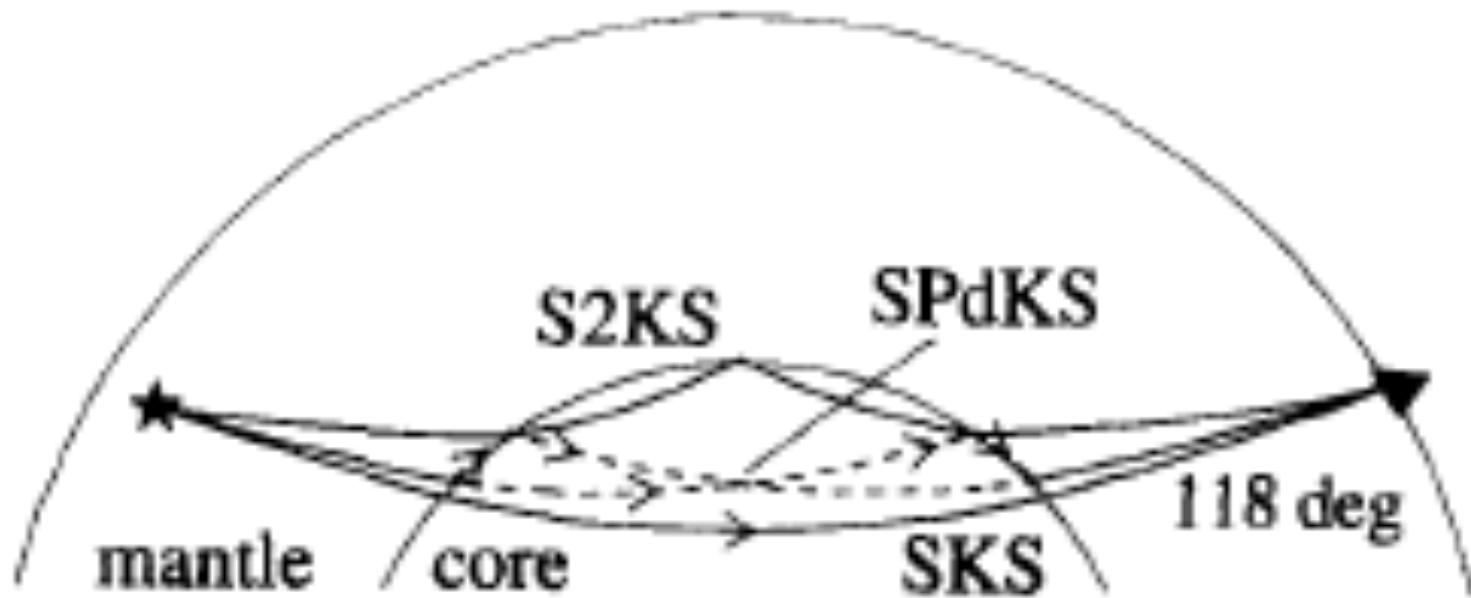
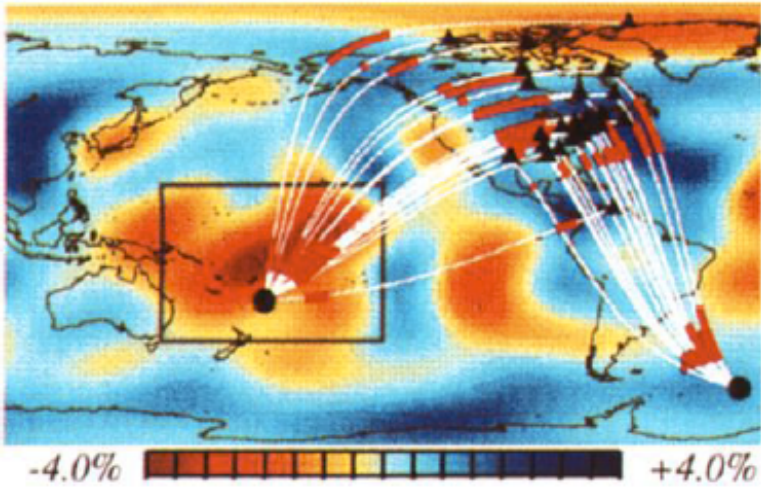


Fig. 4. PREM LP WWSSN synthetics of SKS and SP_dKS (and SKiKS) for models tested in this study.

Autres observations suggérant la présence de vitesses anormalement lentes à la base du manteau:
temps de parcours SKS-S2KS, et SV_{diff}

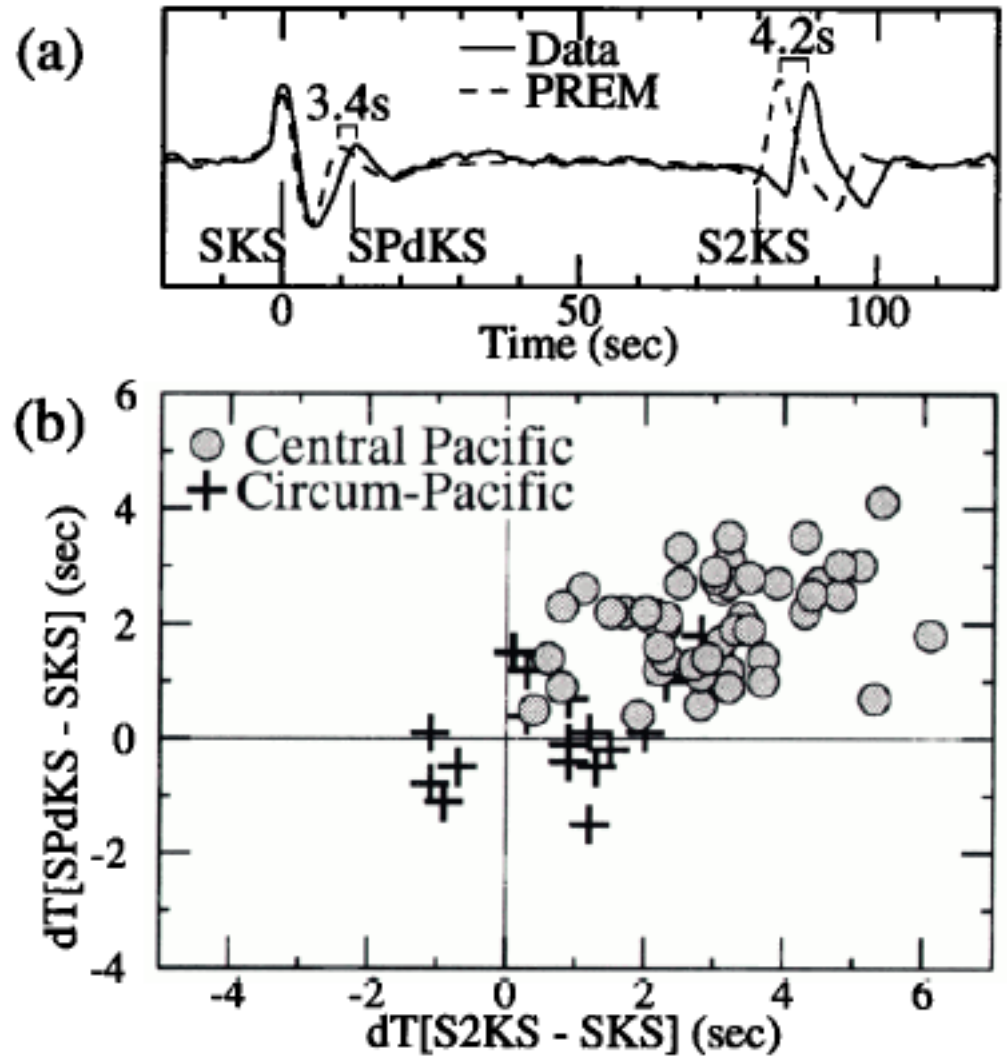


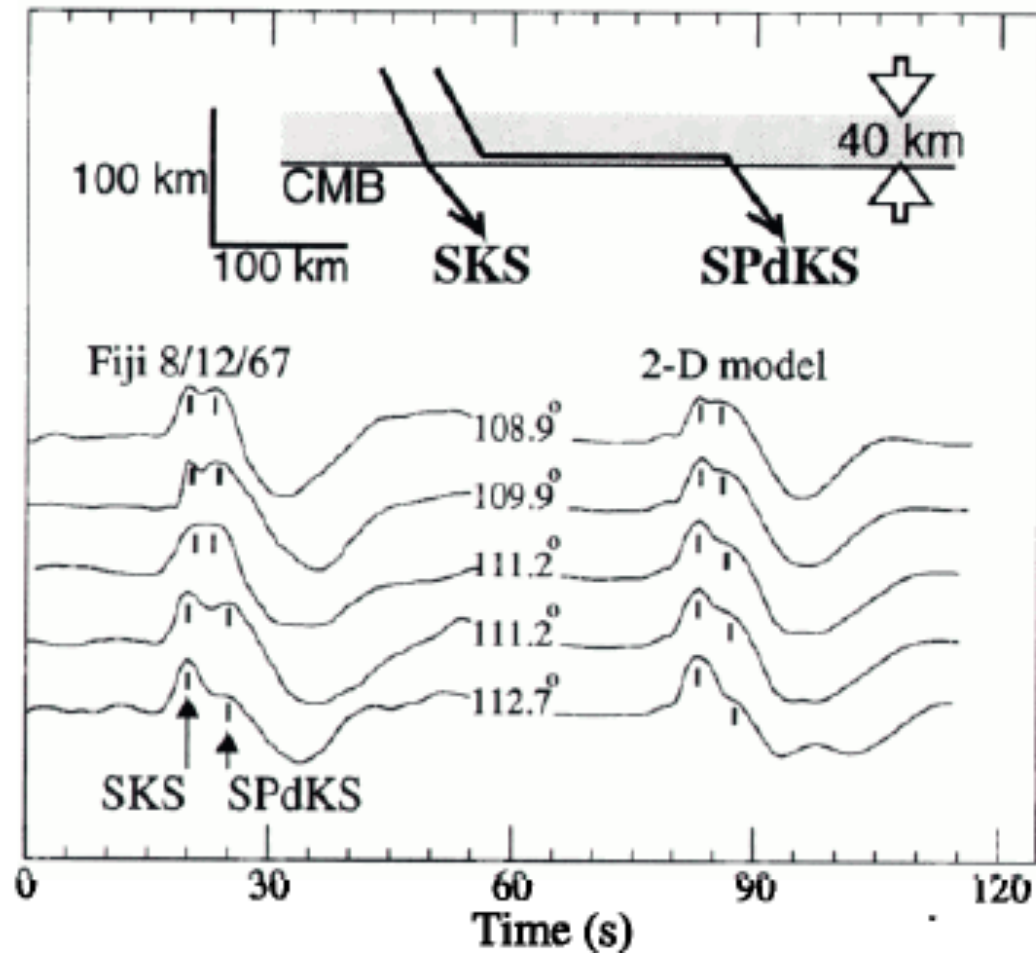


Modèle tomographique SKS12WM13,
(Liu and Dziewonski, 1994)

24 séismes profonds

Exemple:





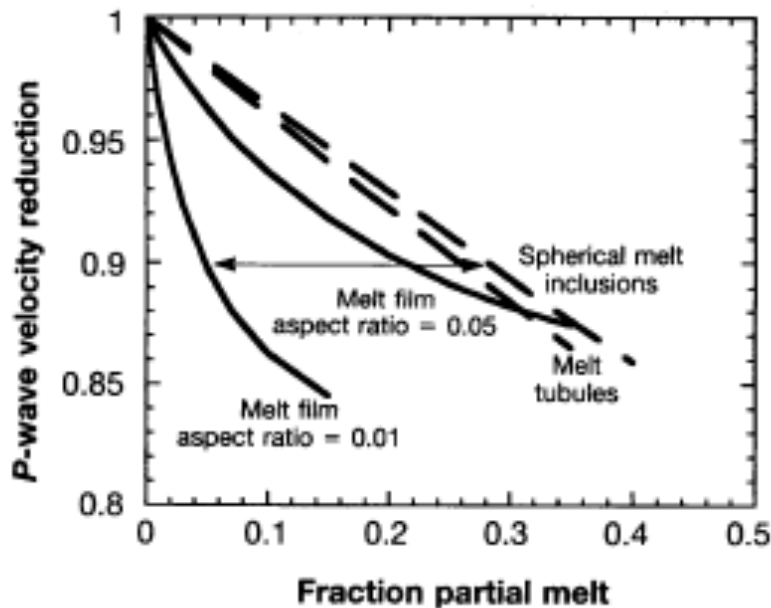
10% réduction en V_p
Épaisseur de 40 km

Interprétation proposée:

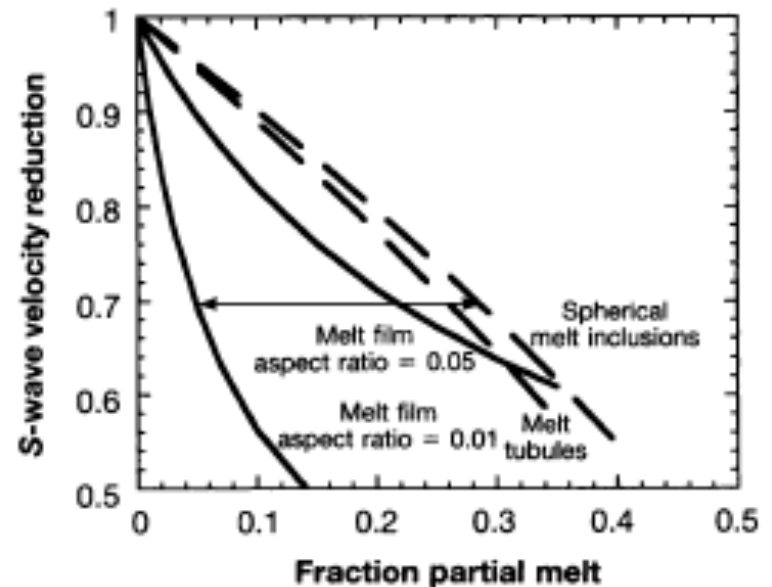
-> présence de fusion partielle

-> silicate en fusion, ou fluide riche en fer

5-30% fusion avec un rapport de forme de 0.01

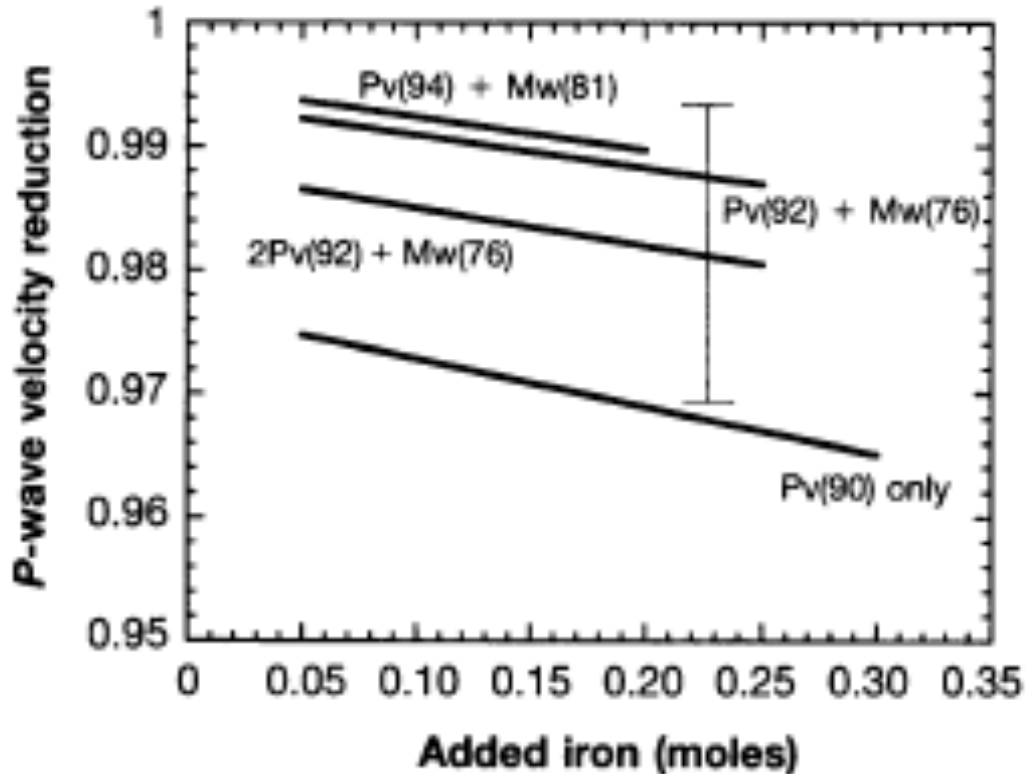


Réduction de la vitesse des ondes P
En fonction du pourcentage de fusion



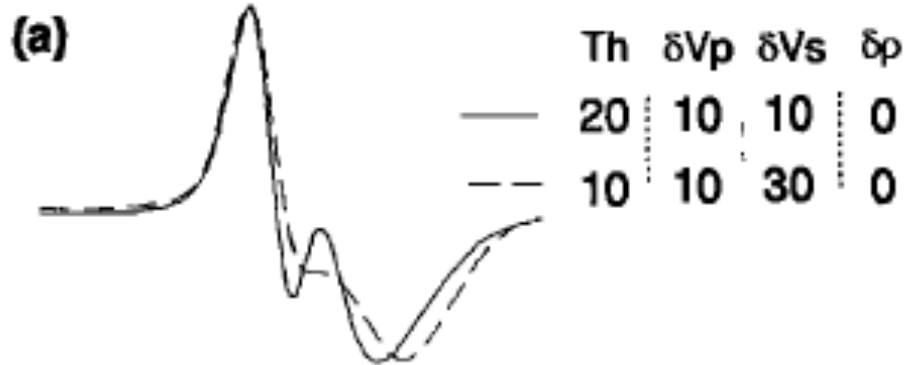
Prédiction: 30% de réduction
en vitesse S
(avec 10% de réduction en P)

Autre interprétation possible: hétérogénéité à l'état solide:
-> présence d'un alliage métallique riche en fer

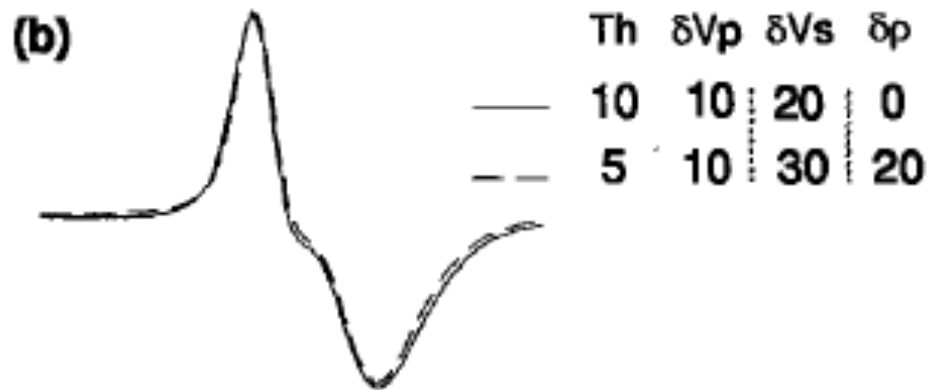


Barre d'erreur représente l'incertitude sur les propriétés élastiques de FeO, FeSi et SiO₂. En supposant les propriétés élastiques de Pv connues et indépendantes de la composition.

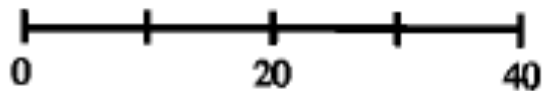
Trade offs



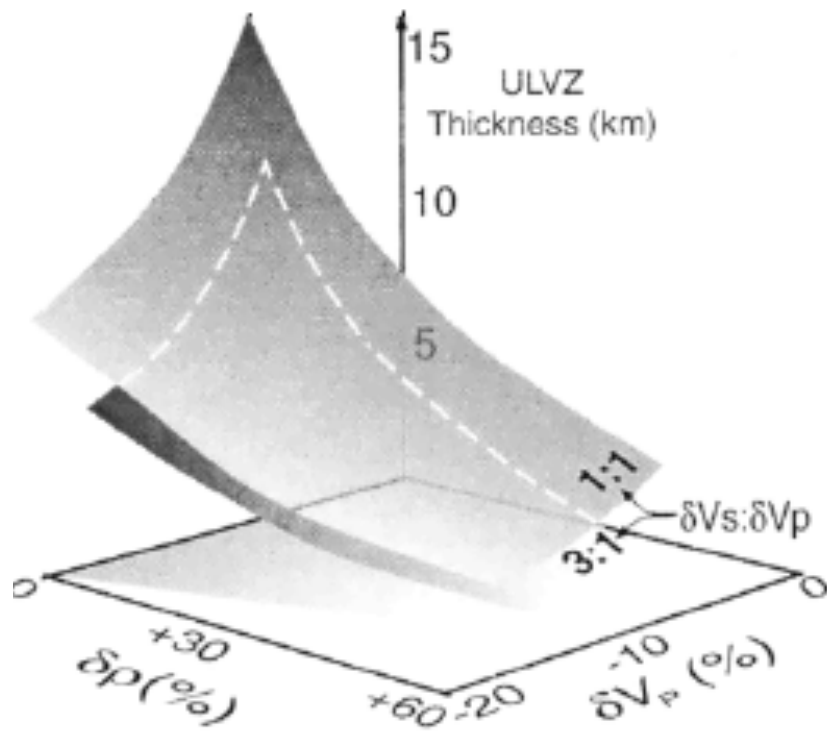
Épaisseurs plus grandes avec réductions de vitesse plus faibles ne marchent pas



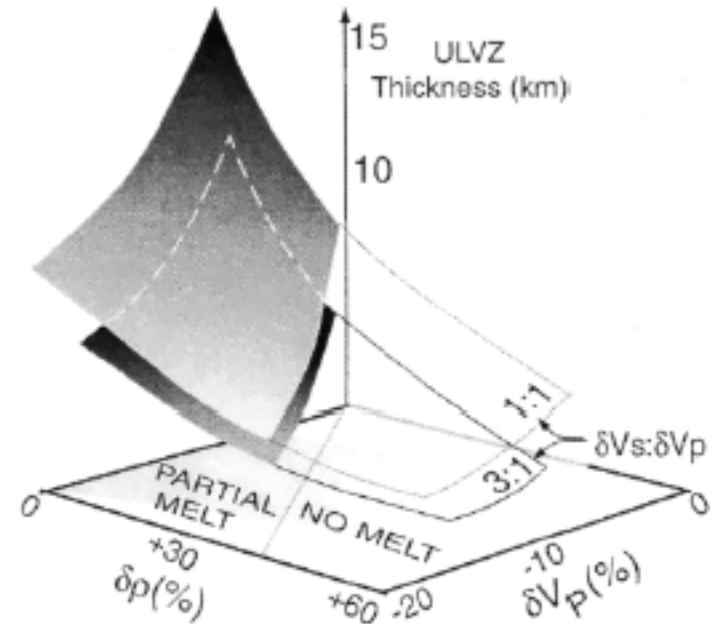
Si on rajoute une augmentation de densité, on peut admettre des épaisseurs encore plus faibles



Trade-off δV_p , δV_s , $\delta \rho$ dans la modélisation des SPdKS (cas de données Fiji)



Interprétation possible en termes de fusion partielle limite les Valeurs acceptables pour $\delta \rho$



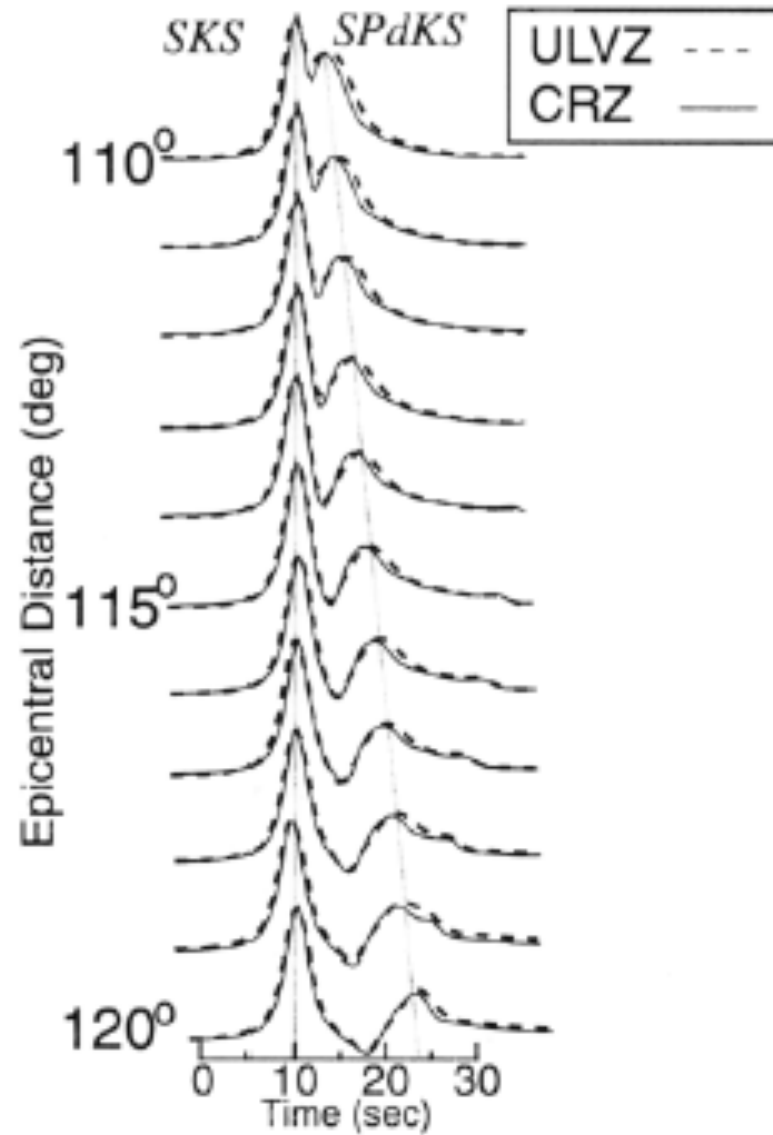
ULVZ:

$\delta V_p = -10\%$

$\delta V_s = -30\%$

$\delta \rho = 0$

$\Delta h = 5 \text{ km}$



(Core Rigidity Zone)

CRZ:

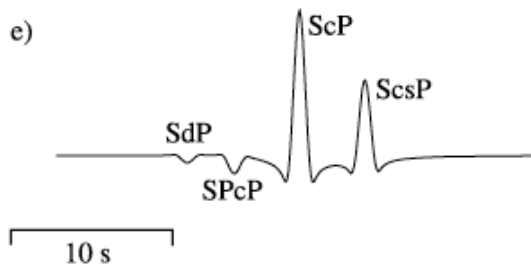
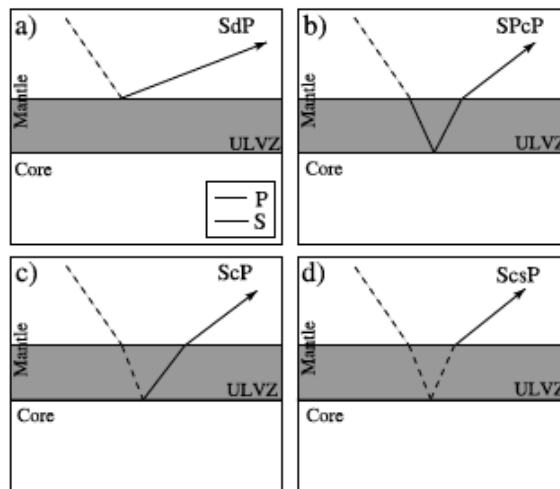
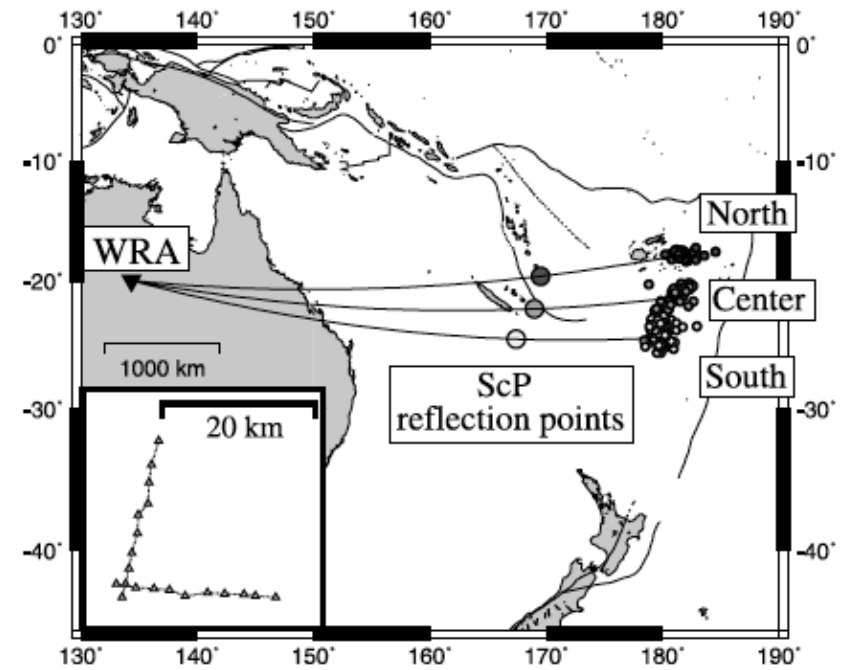
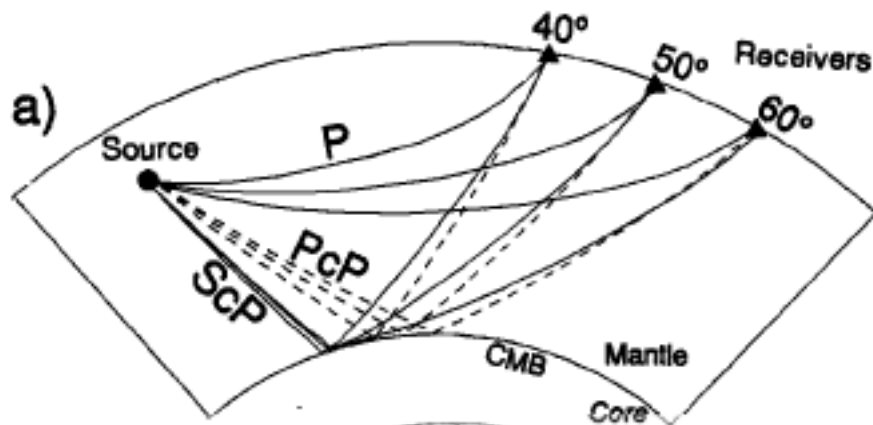
$V_p = 8 \text{ km/s}$

$V_s = 3 \text{ km/s}$

$\rho = 9.6 \text{ Mg/m}^3$

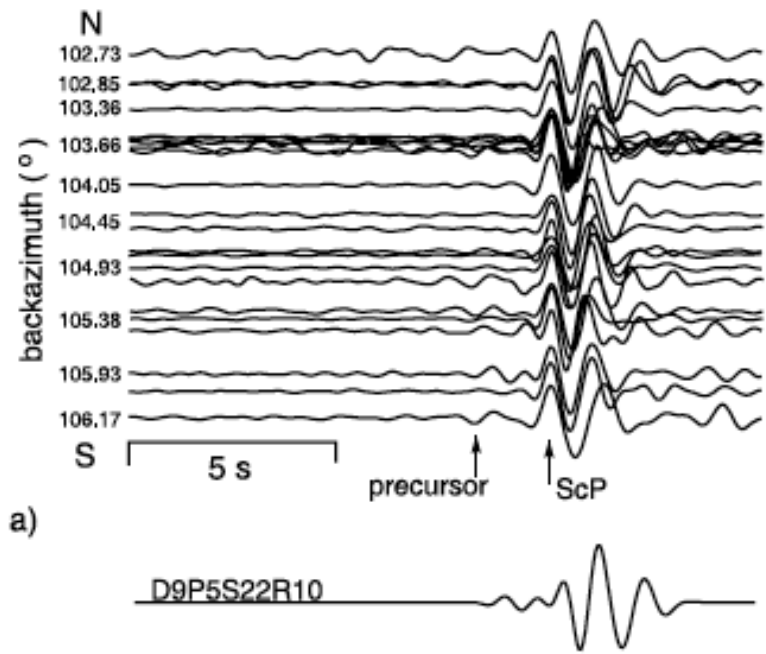
$h = 1.5 \text{ km}$

Warramunga array...



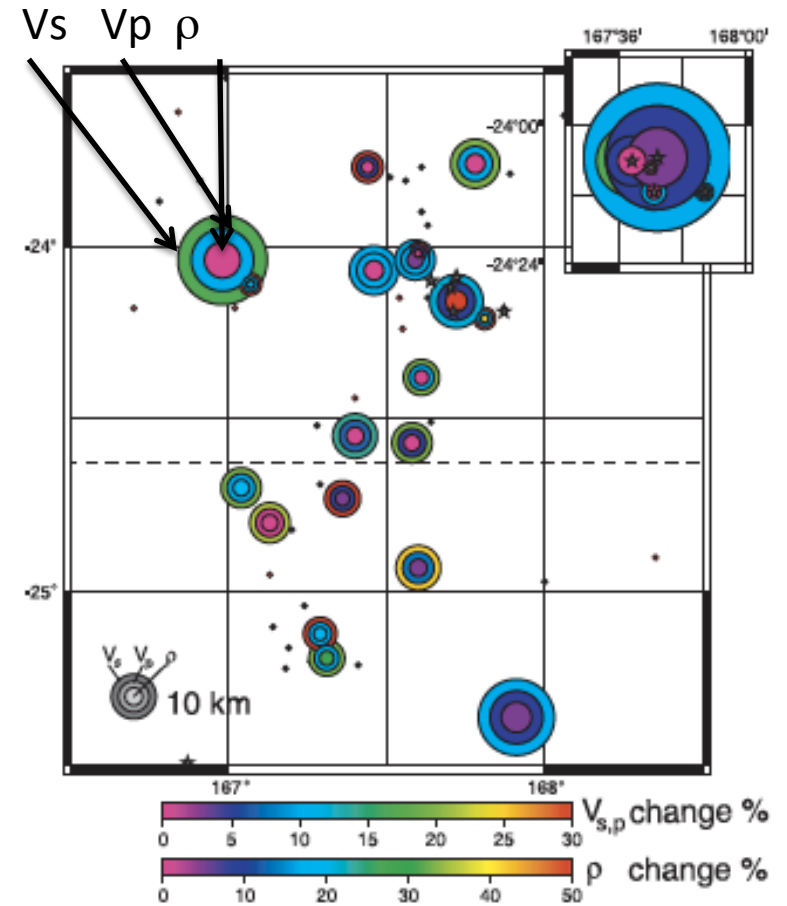
Modélisation de la forme d'onde avec
La méthode des faisceaux gaussiens.

Calculent ~100 modèles pour chaque
Séisme après alignement et sommation
De traces



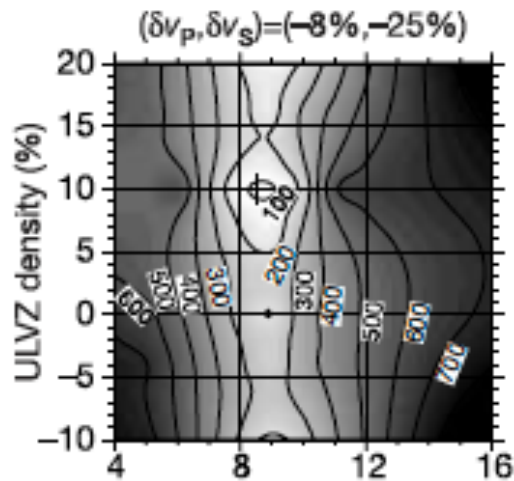
$d\ln V_p$ 5%
 $d\ln V_s$ 22%
 $d\ln \rho$ 10%

Variations latérales importantes sur des distances de 10 km:

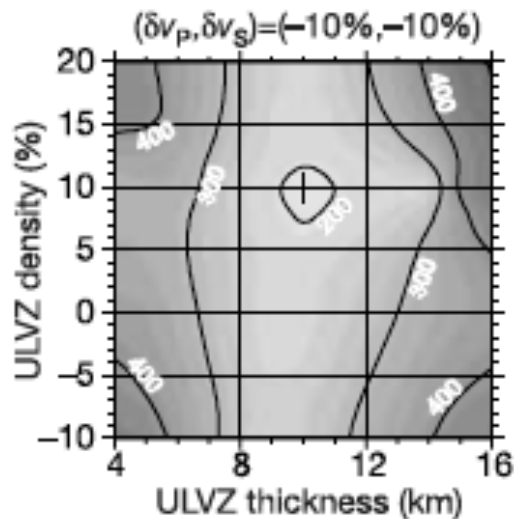


Epaisseur: 5-20 km
 Réduction V_p 0-10%
 Réduction V_s 10-30%
 Augmentation de ρ jusqu'à 50%

Rost and Revenaugh, 2003



-> Rapport dV_s/dV_p : 25:8 proche de l'estimation pour le cas de fusion partielle avec 5-30% (volumique) de liquide

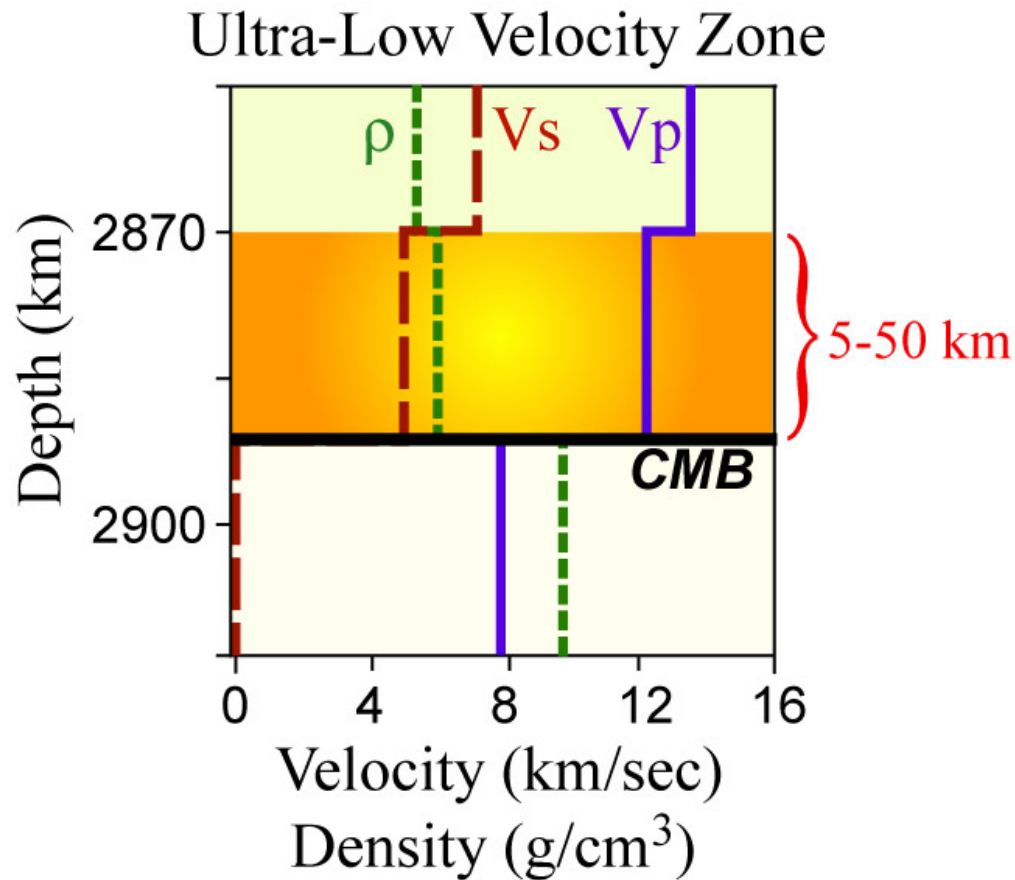


-> Augmentation de densité de 10%

⇒ Cela ne peut être seulement un effet Thermique

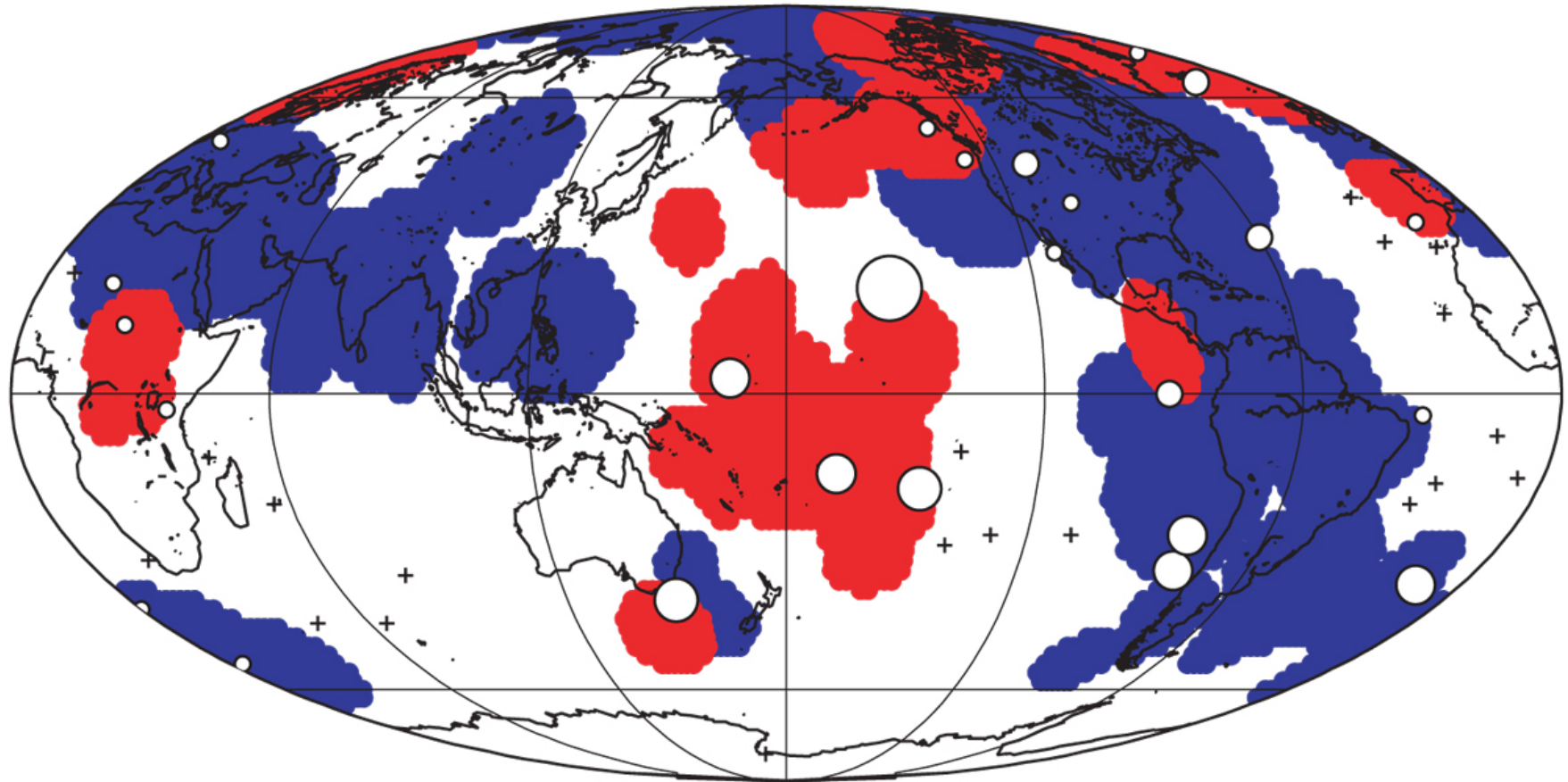
-> proportion de fer plus grande dans la partie liquide?

Résultats: ultra-low velocity zones

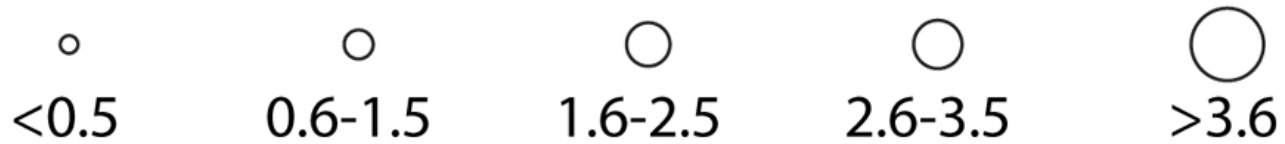


- Réduction en V_p et V_s importante:
 δV_p : jusqu' à -10%
 δV_s : jusqu' à -30%
- Augmentation de la densité importante
density :
 $\delta \rho \sim +10\%$
- Valeurs en accord avec fusion partielle
Des roches du manteau inférieur

Correlation des ULVZ avec les points chauds

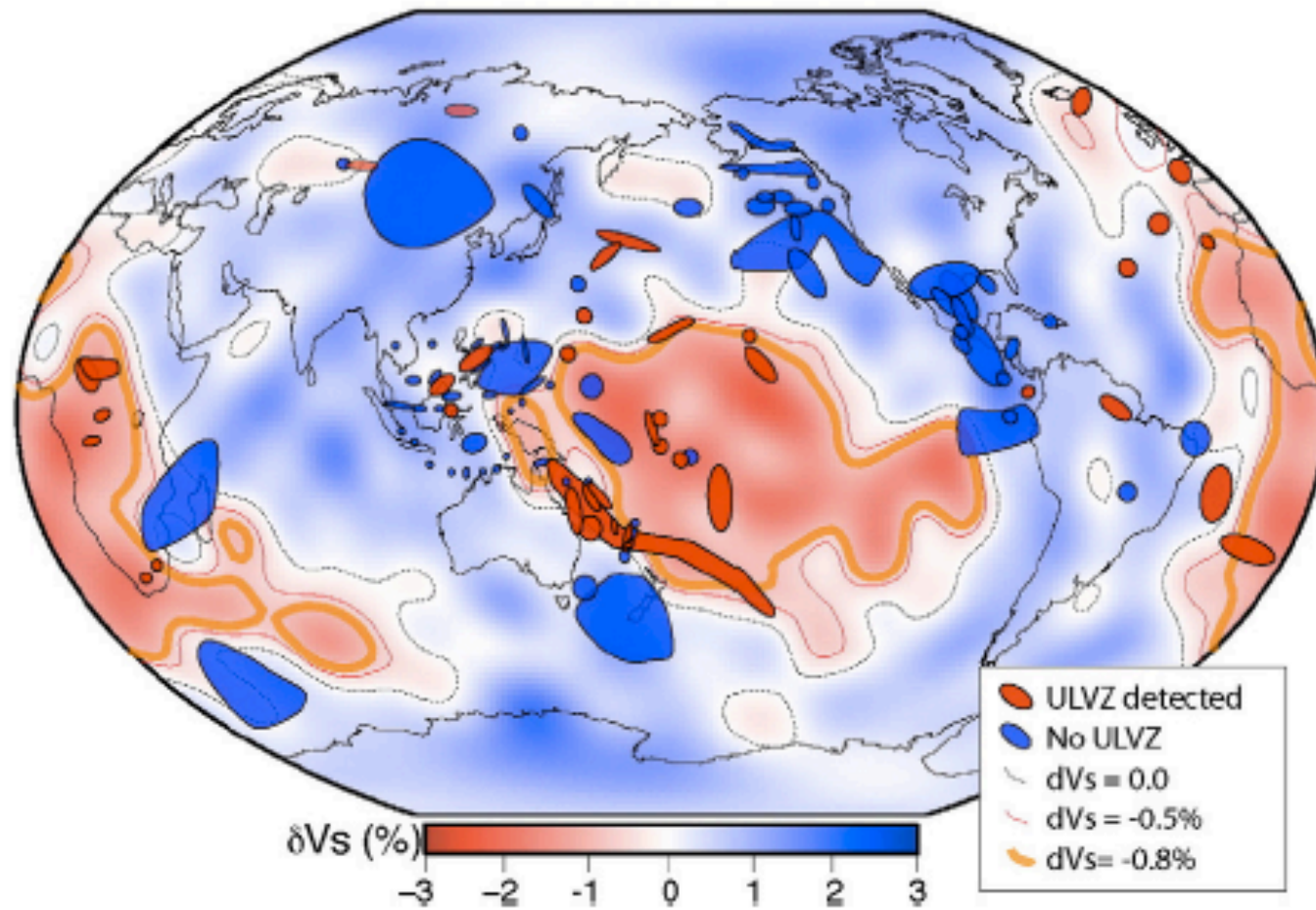


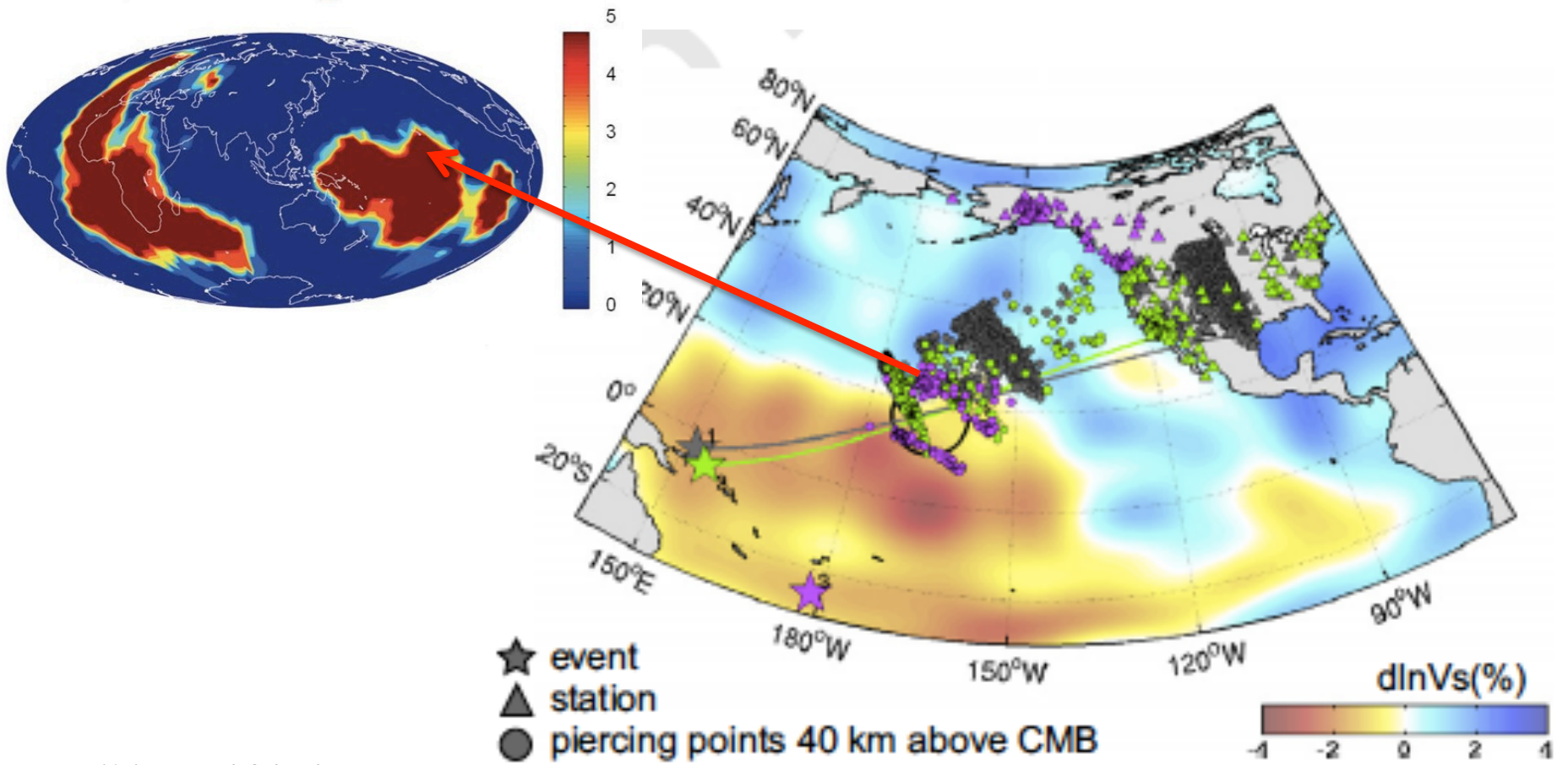
Hot spot flux (Mg/s)



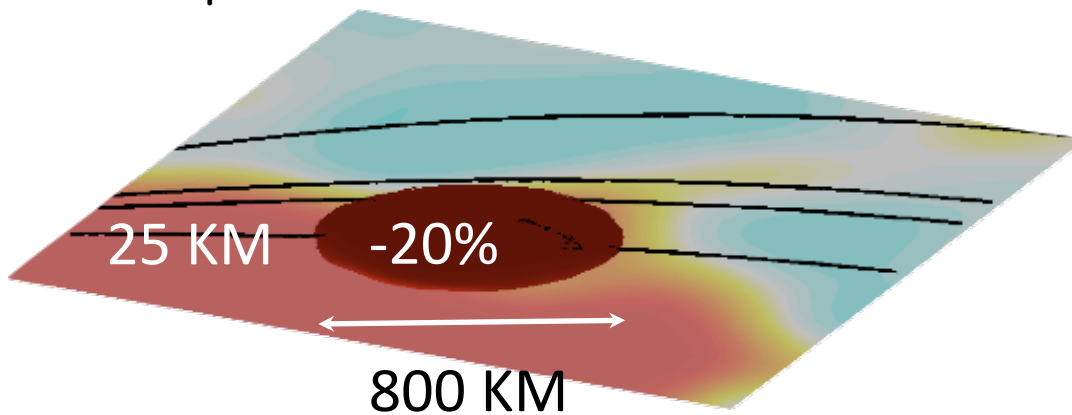
Williams et al., 1998

Distribution géographique des ULVZ





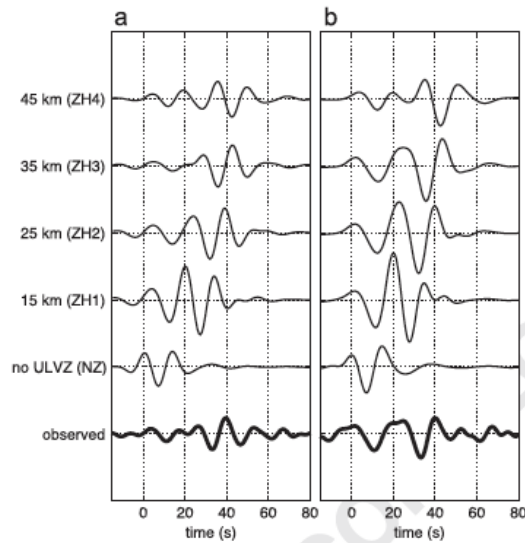
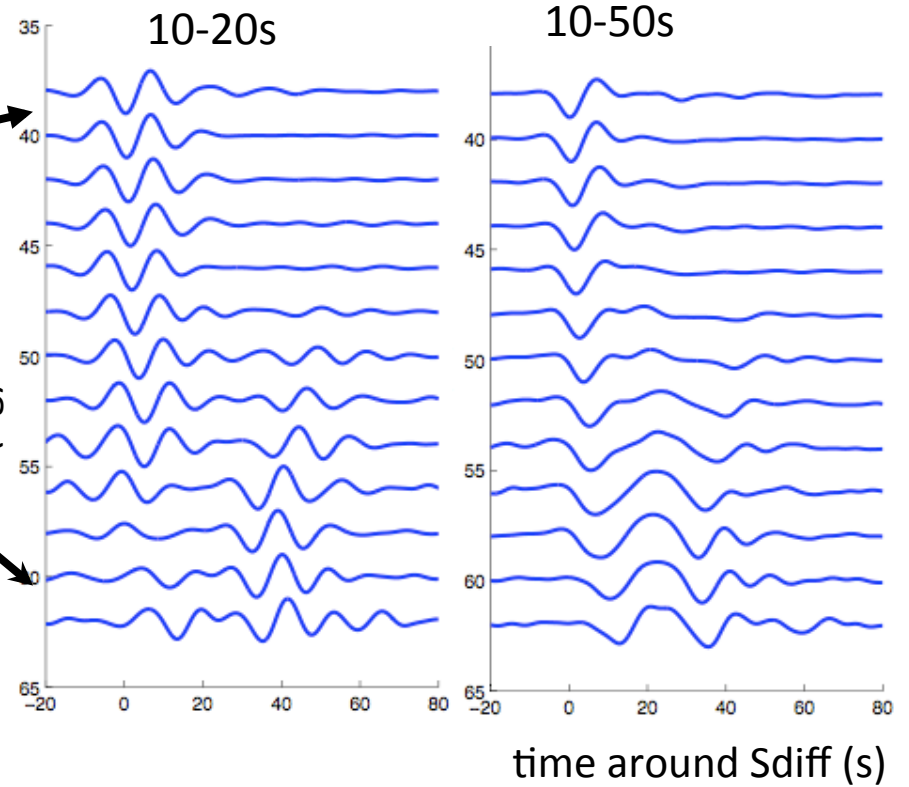
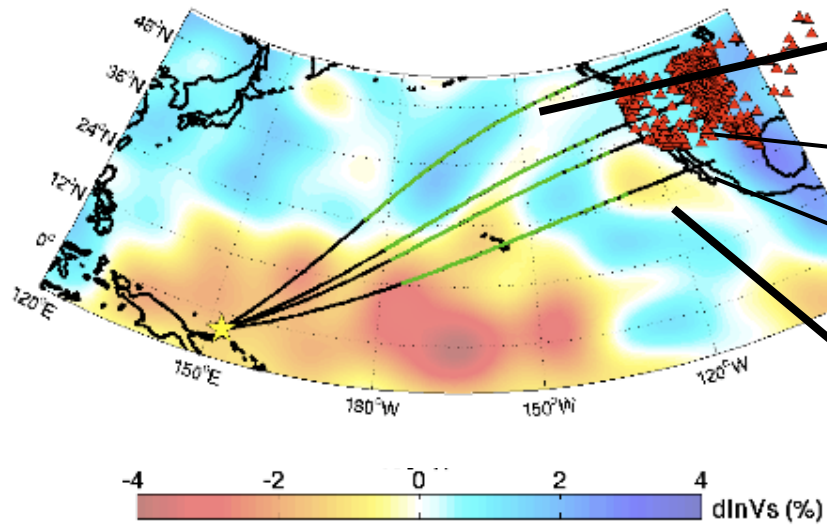
Modèle préféré:



Cottaar and Romanowicz, 2012

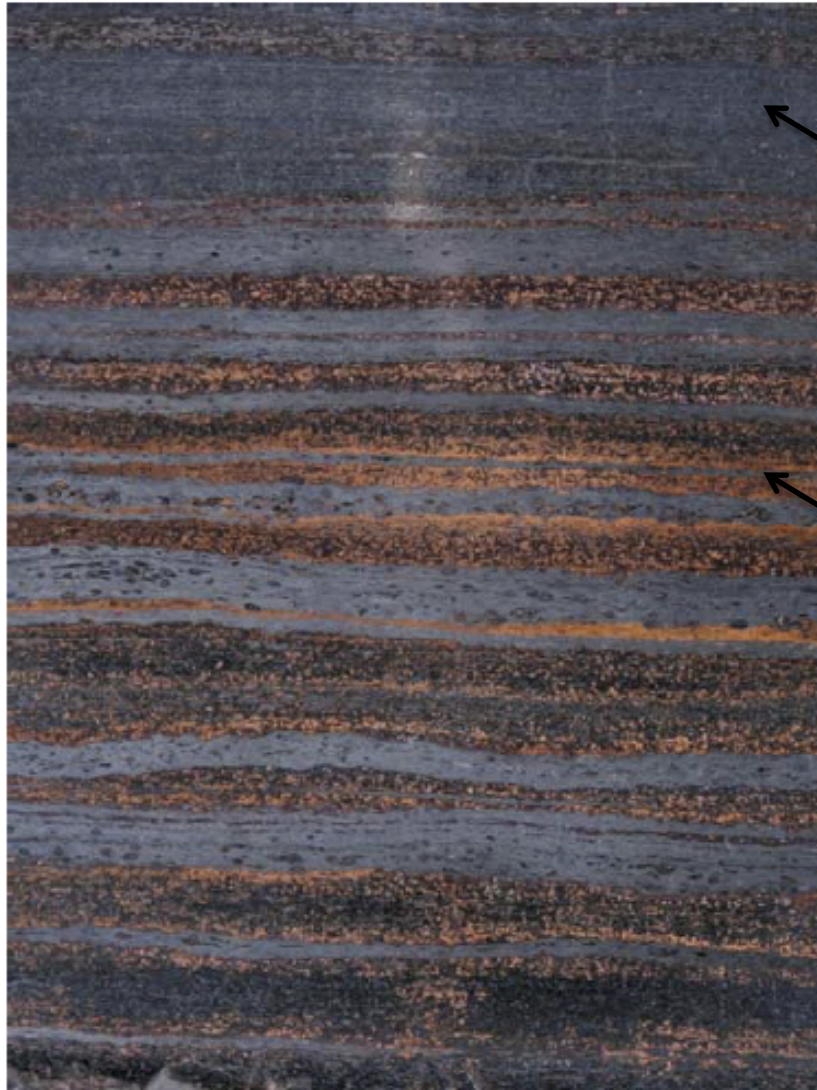
Ondes S_{diff}

SHdiff, 100-110 degrees



ULVZ: Interprétations

- Fusion partielle des composants du manteau (*Williams and Garnero, 1996*):
 - Incertitudes sur les températures à la base du manteau ne permettent pas d'exclure cette hypothèse
- Réaction avec le fer du noyau (*Manga and Jeanloz, 1996*)
 - Couche fine dense à la base du manteau
 - Mélange de produits solides et liquides
- Fusion des "banded iron formations" de l'Archéen arrivées dans la D" par subduction (*Dobson and Brodholt, 2005*)
 - Volume insuffisant?
- Couche de pPv riche en Fe à la base du manteau (*Mao et al., 2006*) sans fusion partielle



Banded Iron Formations

hématite

Sédiments
riches en
Si

Dépôt dans l'océan archéen
pendant une époque
d'intense oxidation de l'
archéen

Hammersley, Australie
Age: 2.5 Ga

Dobson and Brodholt, 2005

- Anomalie de densité permet peut-être de distinguer ces interprétations
 - Fusion partielle du manteau "ordinaire": densité du liquide et du solide de même composition sont similaires
 - Composition chimique différente: un plus grand écart de densité est possible
 - => conséquences sur la dynamique

- Hernlund and Tackley (2007):
 - Modèle dynamique des derniers 500 km au-dessus de la CMB (système ouvert)
 - Introduisent une plaque plongeante qui interagit avec la couche limite thermique au dessus de la CMB isotherme
 - Densités différentielles dues aux effets de la température et de la fusion partielle (chaleur latente...)
=> Écoulement
 - Conservation de la masse, énergie, moment cinétique, et fraction de matériau en fusion
 - Viscosité Newtonienne et $f(T)$
 - Loi décrivant la fraction de liquide qui peut être extraite du solide: "fertilité"
 - Bords latéraux périodiques, bas est isotherme et free-slip

Conditions pour nappes de fusion partielle à la base du manteau

- Hernlund and Tackley (2007):
 - Liquide doit être plus dense que le solide
 - Percolation du liquide vers le bas ne doit pas être possible -> sinon le liquide s'accumule dans une couche uniforme à la CMB
 - Constante de temps de la percolation contrôle la possibilité de rétention du produit de fusion partielle dans le solide.
 - Viscosité très grande du fluide
 - Topologie: Pas de connectivité du fluide
 - Difficile à justifier dans l'état actuel des connaissances

- Hypothèses plus probables:
 - Cristallisation d'un océan de magma primordial (Stixrude and Karki, 2004)
 - Variations de composition
- Courants de convection peuvent maintenir une région de fusion partielle (*Hernlund and Jellinek, 2010*)

ULVZ: fusion partielle ou état solide
avec enrichissement en fer?

- Fe liquide préfère (Mg, Fe)O plutôt que Pv et pPv (e.g. Murakami et al., 2005; Auzende et al., 2008)
- Etude des propriétés élastiques d'inclusions solides (Mg, Fe)O riches en Fe à haute pression
 - Wicks et al. (2010) → $P=121$ GPa, T ambiante
 - Très peu de ferropériclase riche en fer suffit pour déprimer significativement les vitesses élastiques
 - Ces phases sont aussi stabilisées dynamiquement par une plus forte densité
 - -> candidate possible pour la nature des ULVZ

Mesures expérimentales des vitesses élastiques de $(Mg_{0.16}Fe_{0.84})O$ par spectroscopie Mössbauer dans le synchrotron (scattering des rayons X anelastique)

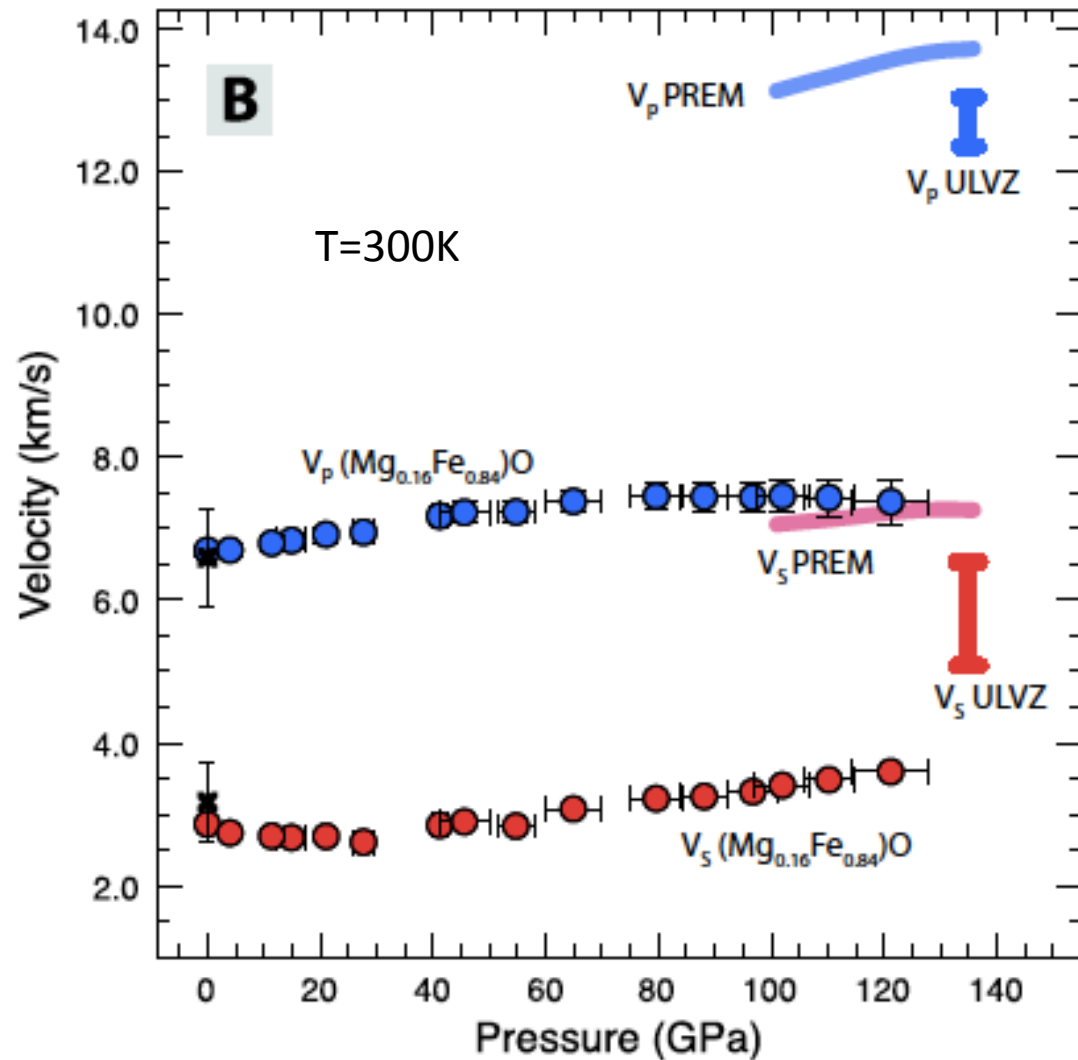
T 300K
P → 120 GPa

Mesure de la vitesse de Debye (V_D) dont on déduit les vitesses élastiques (milieu isotrope):

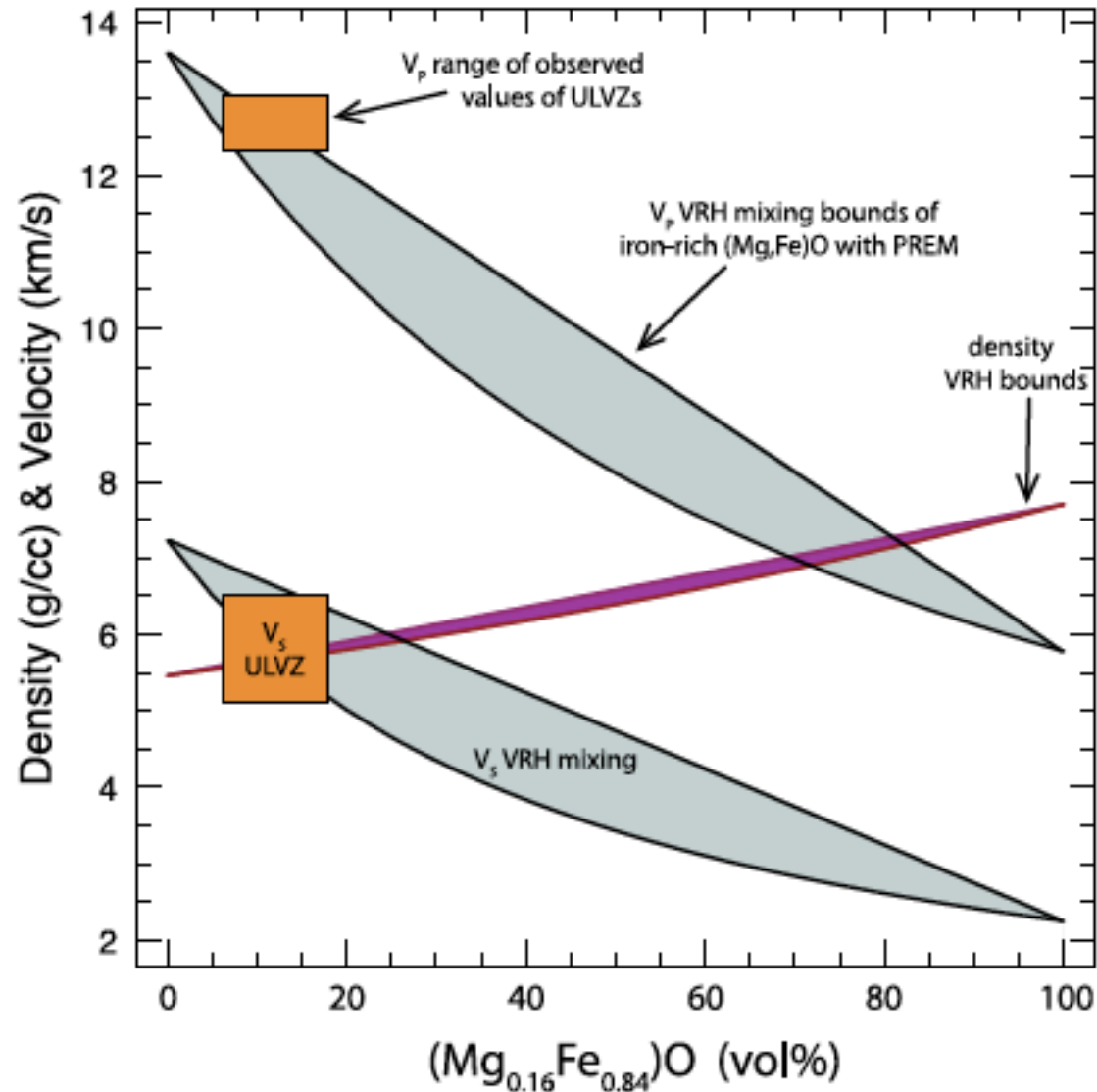
$$3/V_D^3 = (1/V_P)^3 + (2/V_S)^3$$

$$V_P^2 - (4/3)V_S^2 = K_{0S} / \rho$$

A plus haute T on s'attend à des vitesses plus basses



Proportion de 12% de $(\text{Mg}_{0.16}\text{Fe}_{0.84})\text{O}$ suffit pour expliquer les vitesses "observées" dans les ULVZ
- Pas besoin d'invoquer de la fusion partielle



- D'où vient le fer?
 - Ascension de fer liquide depuis le noyau sur des échelles spatiales de l'ordre du km (*Kanda and Stevenson, 2006*)
 - Résidu de cristallisation partielle d'un océan de magma primitif (*Labrosse et al., 2007*)
- Il faut continuer à étudier les réactions chimiques possibles entre le Fe liquide et les composants du manteau (production de FeSi, FeO etc..)

Nature des ULVZ: considérations dynamiques

- La convection dans le manteau profond est-elle assez vigoureuse pour maintenir dynamiquement des petites ULVZ plus denses que le manteau ambiant sans former de couche uniforme dense à la CMB?
- Comment éviter l'entraînement de petits volumes d'ULVZ et le mélange avec le manteau ambiant?
- Effet des plaques accumulées dans la D'' sur la forme et la position des LLSVP et donc celles des ULVZ?