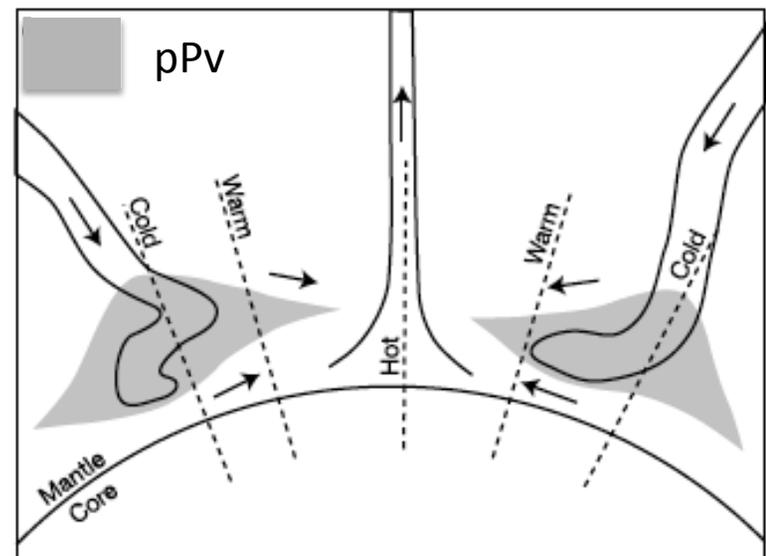
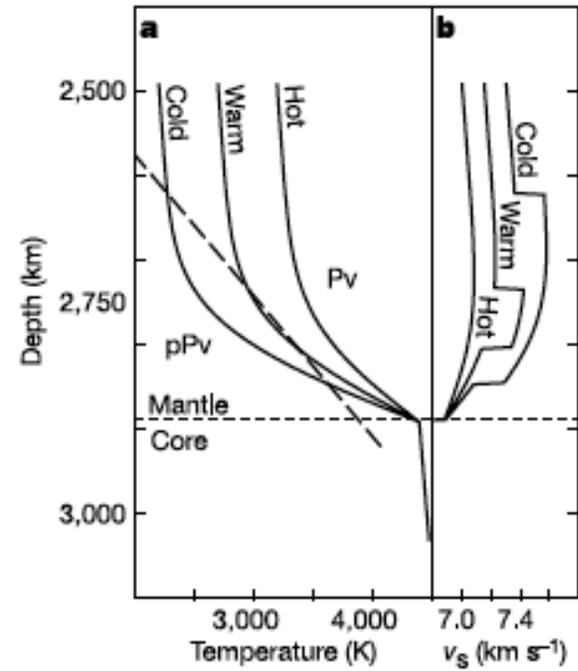
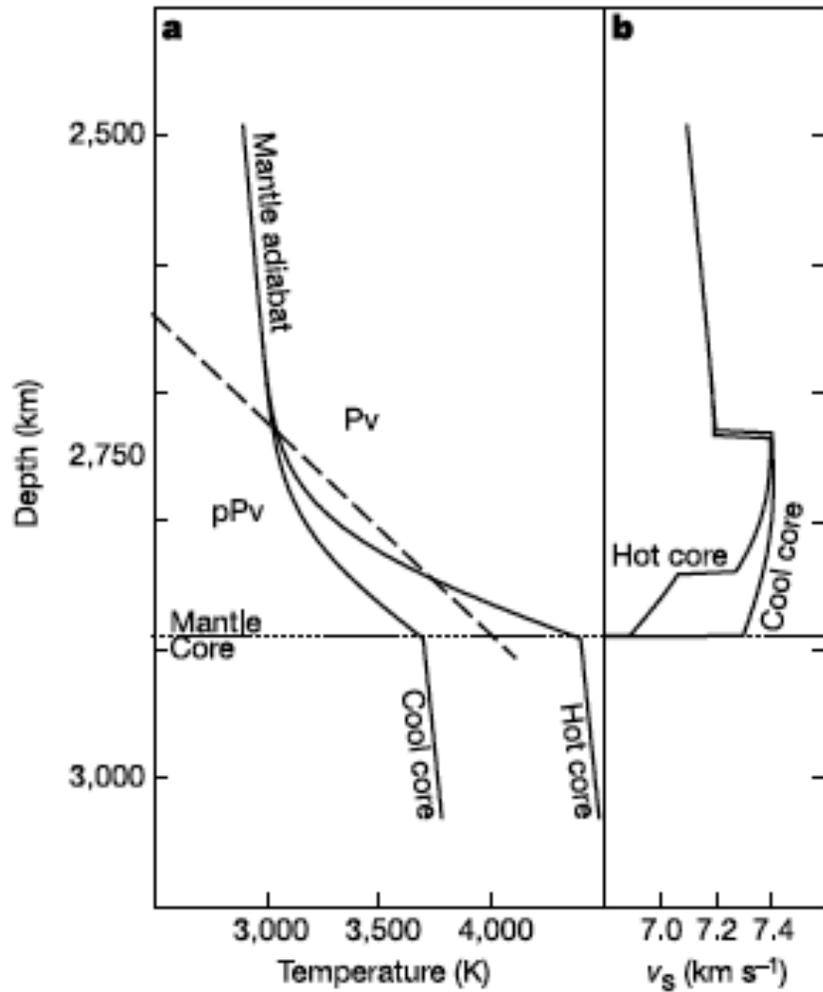


# Structure et dynamique du manteau profond de la terre

## 4- Structure fine à la base du manteau

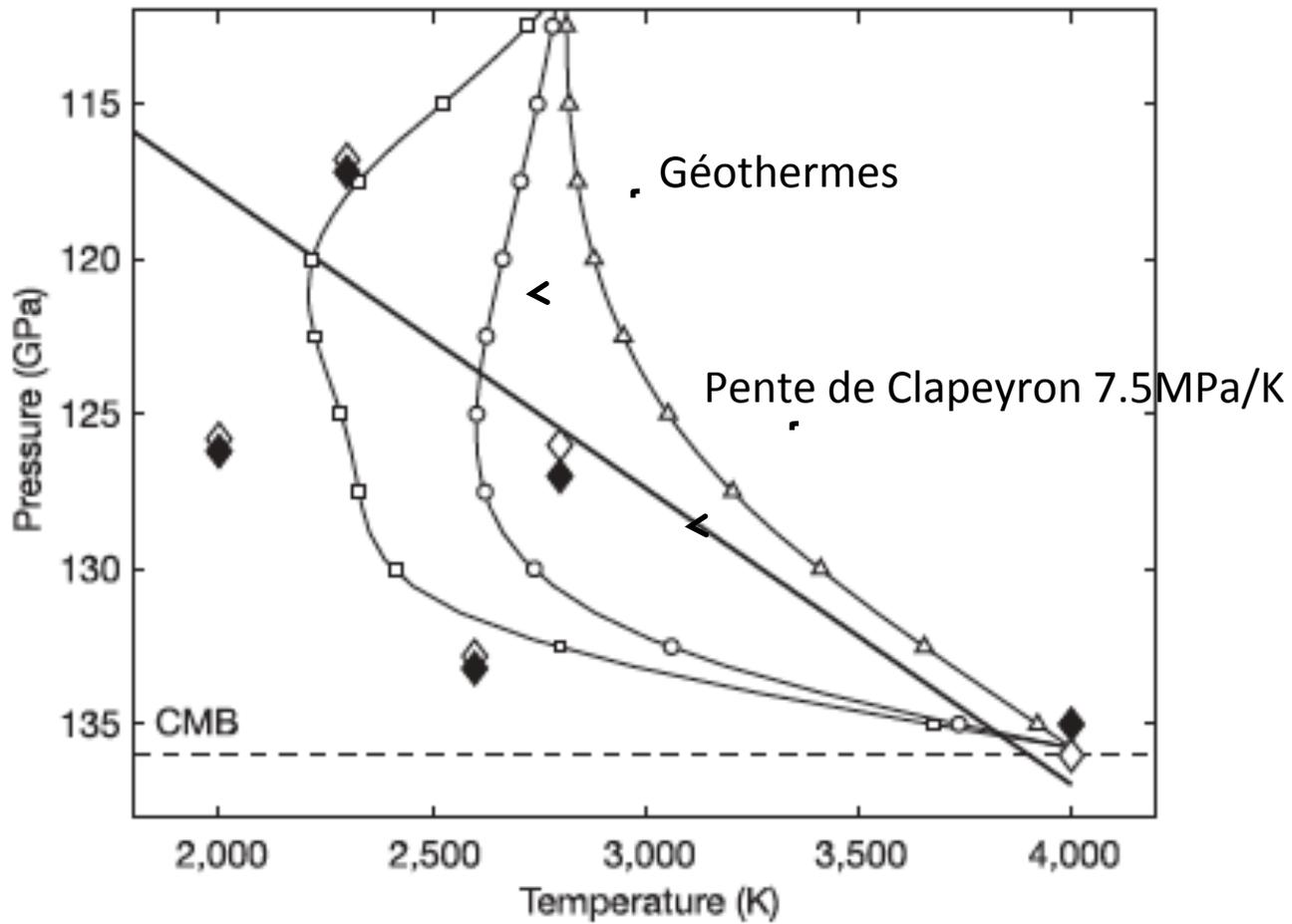
Barbara Romanowicz - Cours 2012  
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre  
Collège de France  
22 Octobre 2012



"Double transition" Pv  $\rightarrow$  pPv

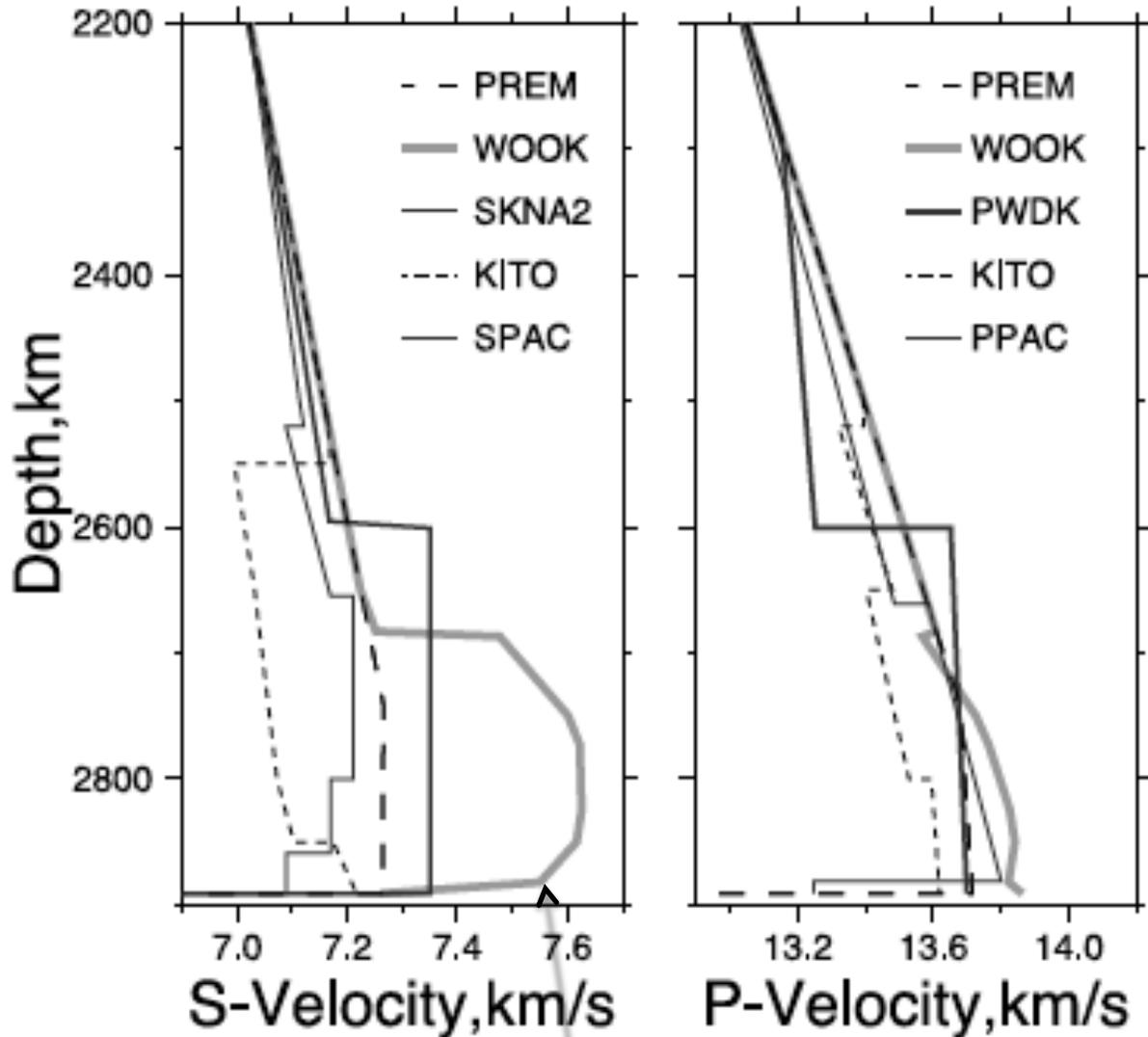
*Hernlund et al., 2005, Nature*

- Double transition  $P_v \rightarrow pP_v \rightarrow P_v$  permet d'estimer les variations latérales de température dans les régions où est observée la discontinuité sismique (*Hernlund et al., 2005*)
  - > variations latérales de 1300-1700K
  - > ne peut être dû seulement aux variations de T
  - > présence d'hétérogénéités chimiques (lithosphère des plaques au fond du manteau?)



Calcul théorique de l'élasticité pour la PV et la pPV suivant 3 géothermes possibles

*Wookey et al., 2005*



pPv se transforme à nouveau en Pv

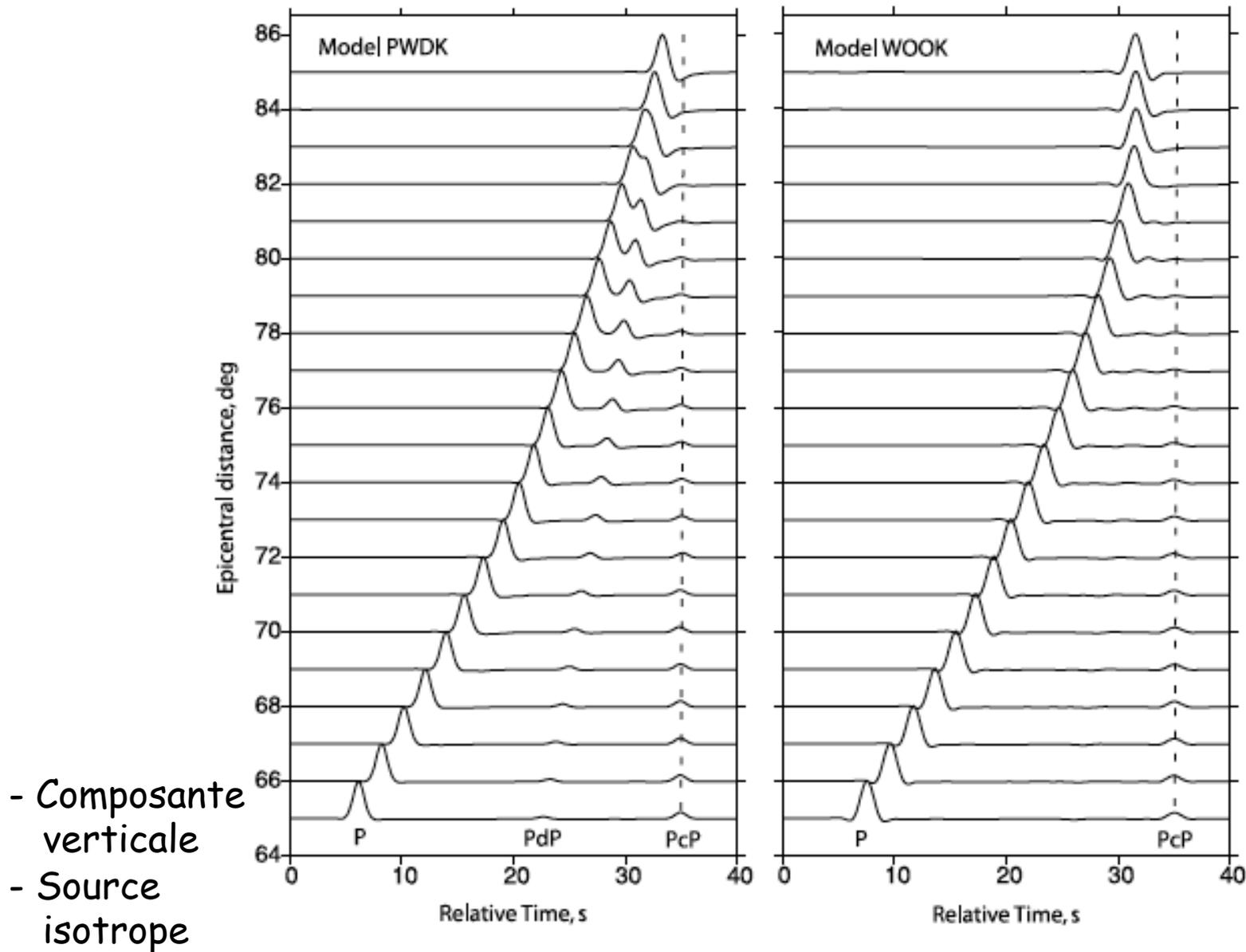
WOOK:  
Modèle basé sur  
calculs théoriques  
d'élasticité à hautes  
P et T pour Mg-pPv  
(Wookey et al., 2005)

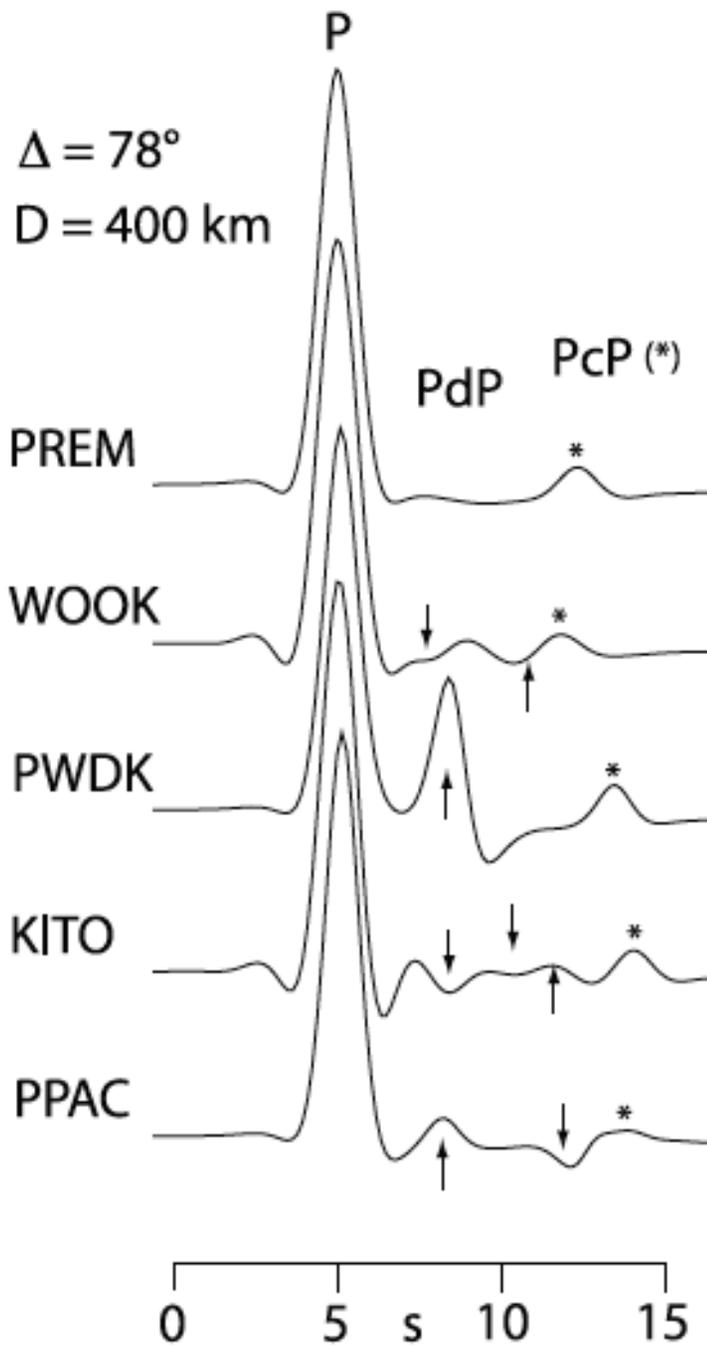
PWDK  
Eurasie du Nord,  
Alaska

KITO:  
Pacifique ouest

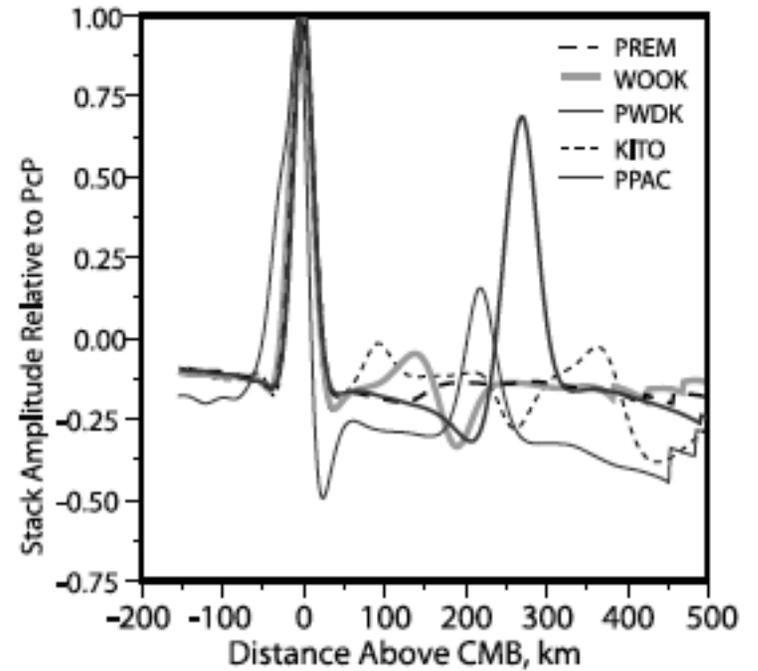
SPAC/PPAC  
Centre Pacifique

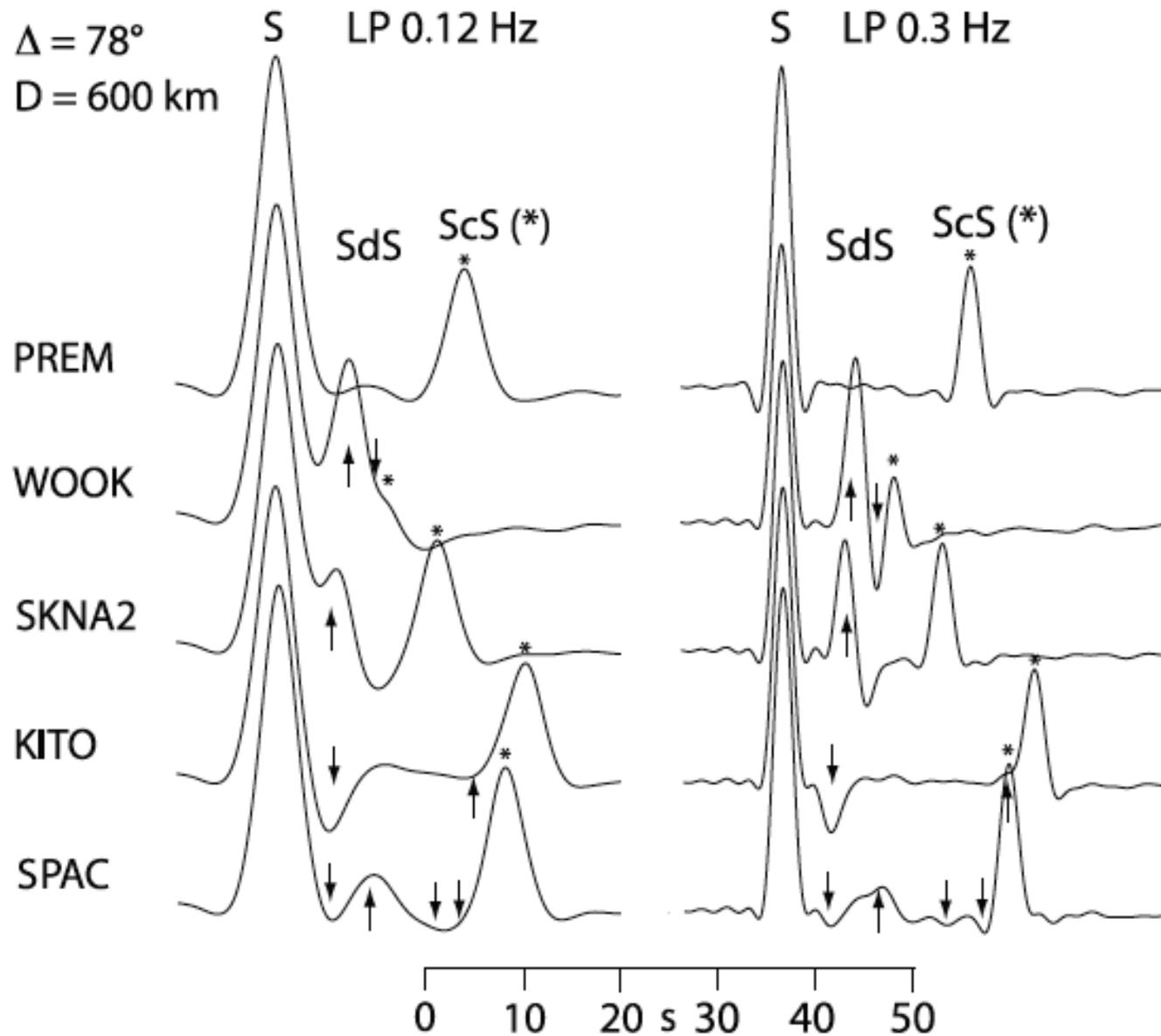
# Sismogrammes synthétiques 1D calculés pour P par la méthode de réflectivité





Double array stacks  $\Delta 65-75^\circ$



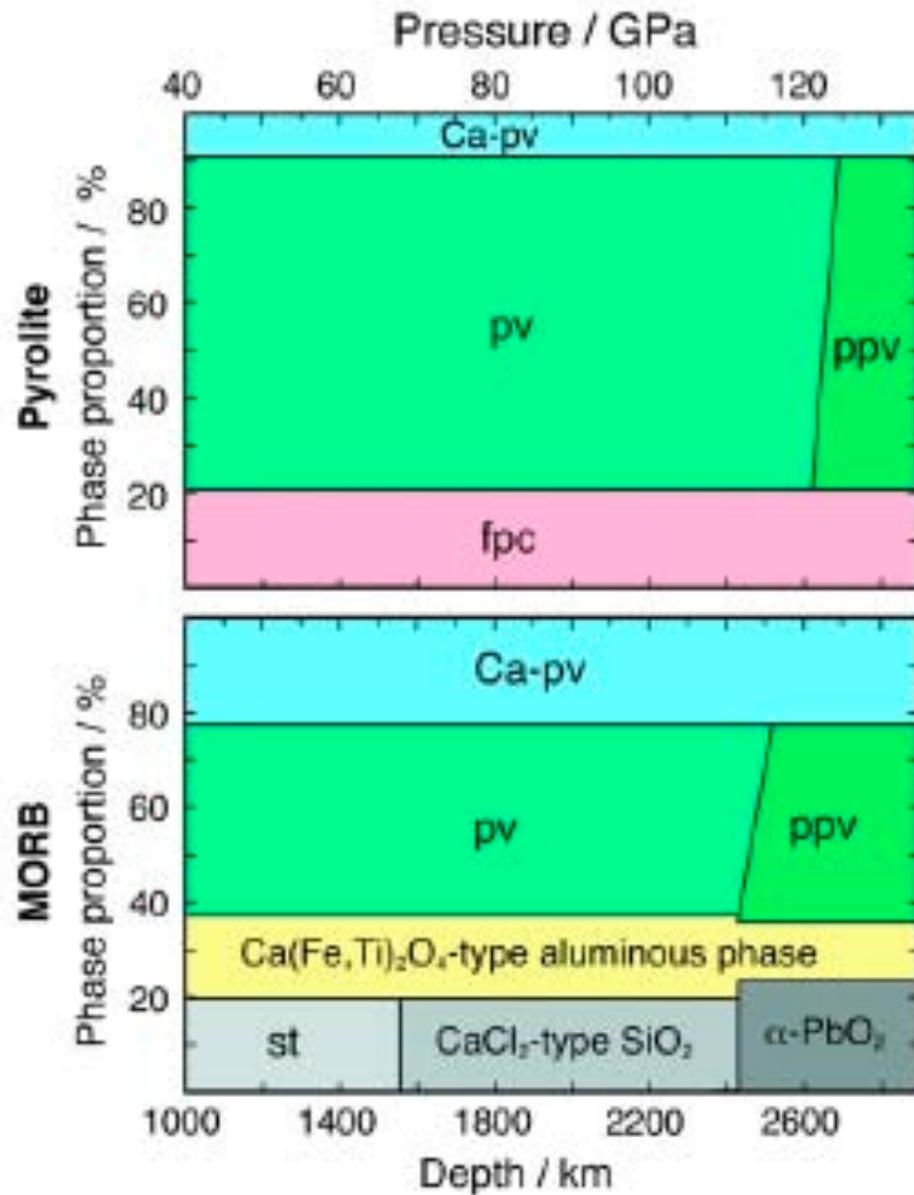


Variations de composition non incluses dans WOOK

WOOK: vitesses S élevées: phases très rapprochées

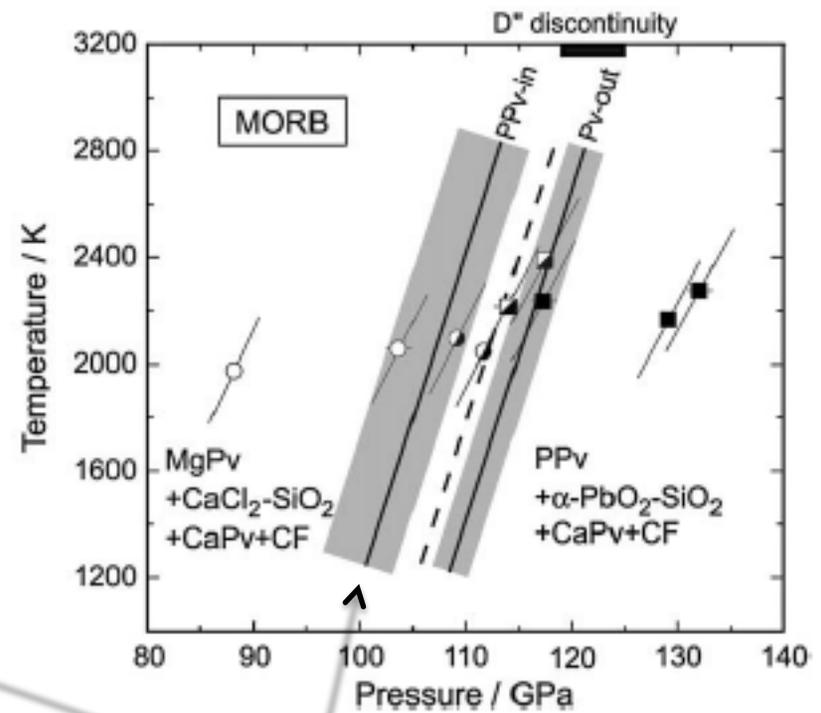
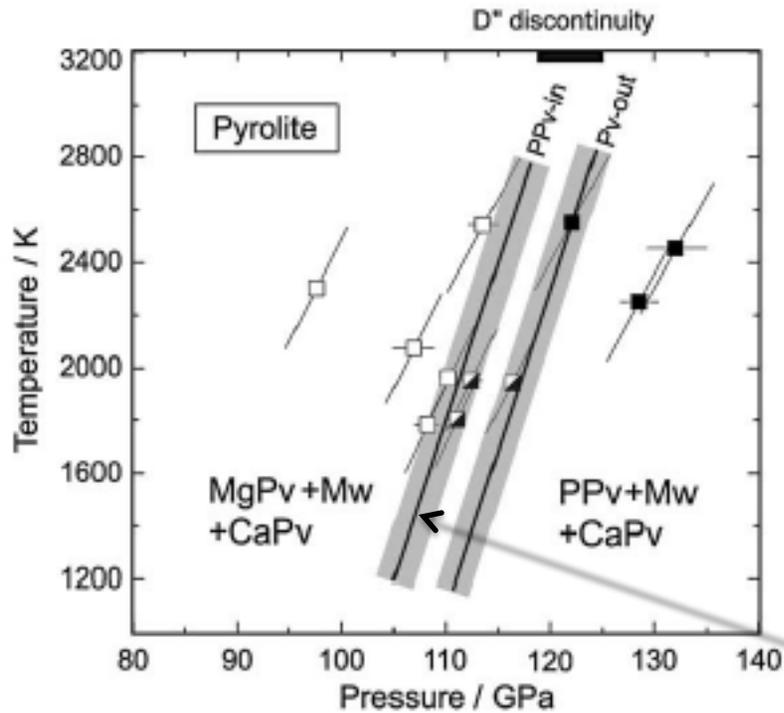
*Lay and Garnero, 2007*

- Premiers résultats sur Pv->pPv
  - incertitude de 10-15 GPa sur la pression de la transition, incertitudes de 10% sur la température
- Introduction de Al, Fe:
  - réduit le contraste des vitesses entre la Pv et la pPv (Caracas and Cohen, 2005)
  - conduit à un  $\Delta V_s < 0$  dans MORB (Tsuchiya and Tsuchiya, 2006), mais  $\Delta V_s > 0$  dans la pyrolite
- Largeur de la transition (zone de coexistence de Pv et pPv) est également plus grande en présence d'Al (Akber-Knutson and Bukowinski, 2005)



*Nowacki et al., 2011*

## Compositions minéralogiques plus réalistes

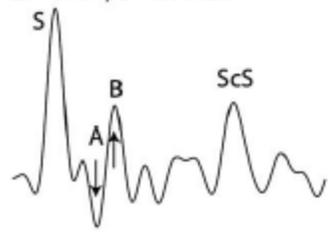


$dP/dT \sim 8 \text{ MPa/K}$   
 Épaisseur  $\sim 5 \text{ MPa} \Rightarrow$   
 plus large qu'estimations sismologiques

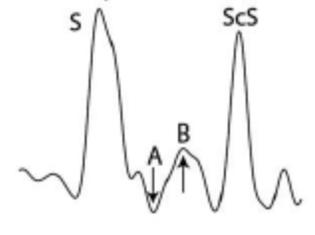
Transition à P plus faible que dans la pyrolite

Expériences: LHDAC  
 Calibration de la pression: Au  
 Diffraction rayons X

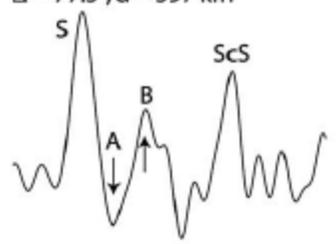
TOV July 27, 2003  
 $\Delta = 77.7^\circ, d = 211 \text{ km}$



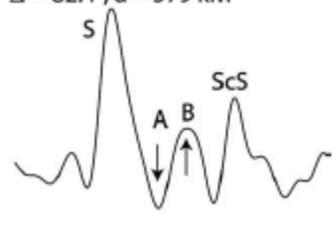
ORV Jan. 4, 2003  
 $\Delta = 79.5^\circ, d = 378 \text{ km}$



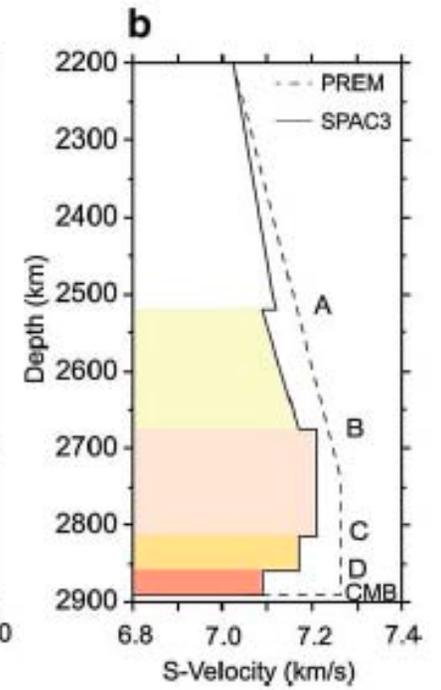
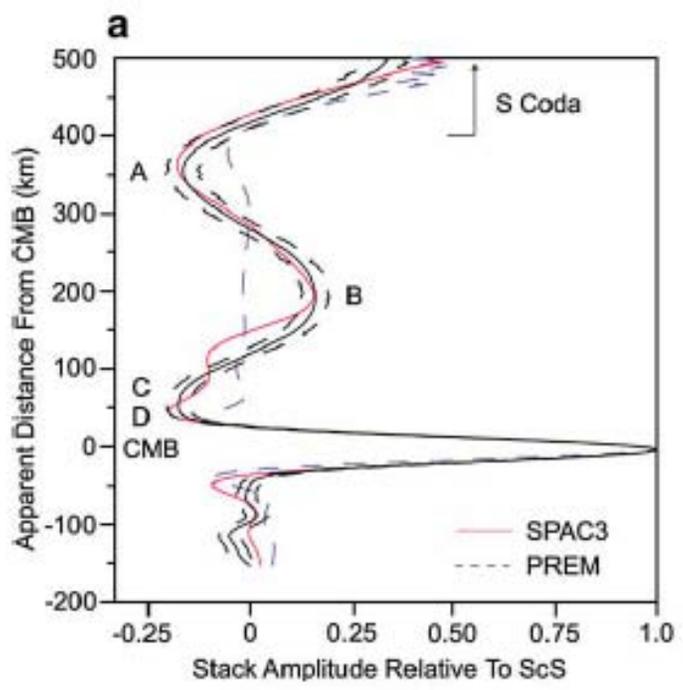
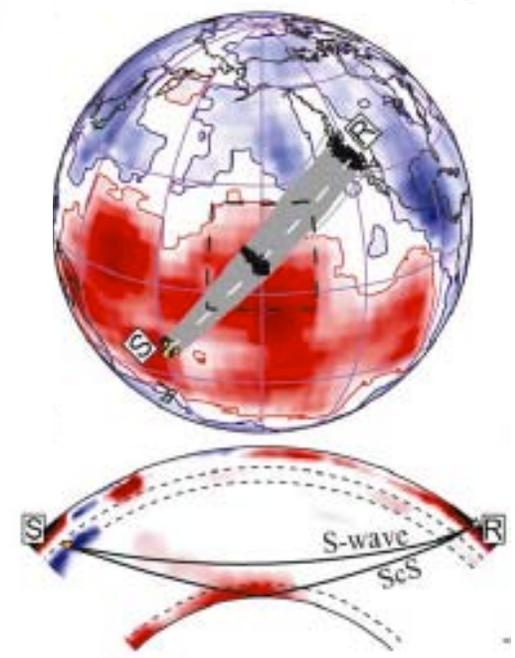
MUR Feb. 2, 2006  
 $\Delta = 77.5^\circ, d = 597 \text{ km}$



GSC Jan. 2, 2006  
 $\Delta = 82.4^\circ, d = 579 \text{ km}$



25 s



*Ohta et al., 2008*

Interprétation:

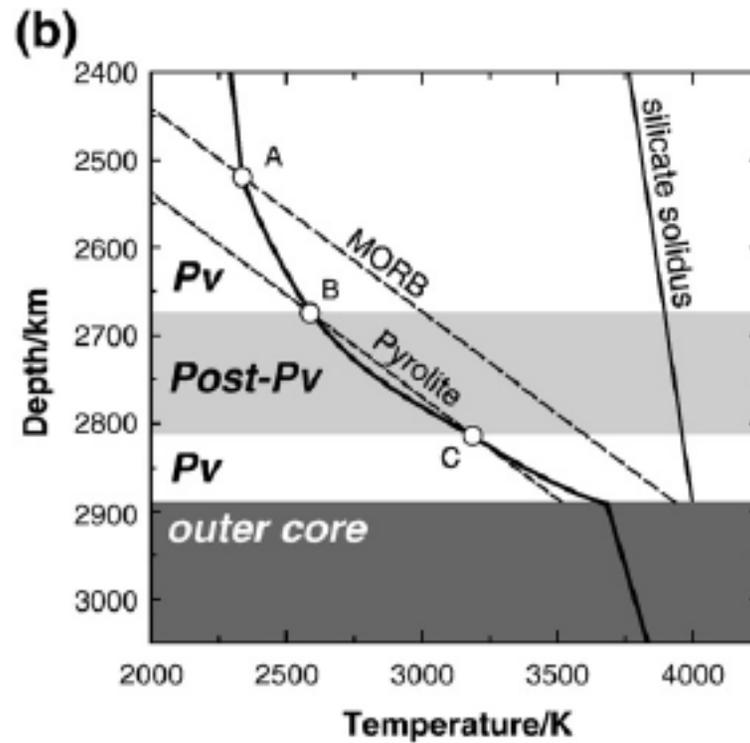
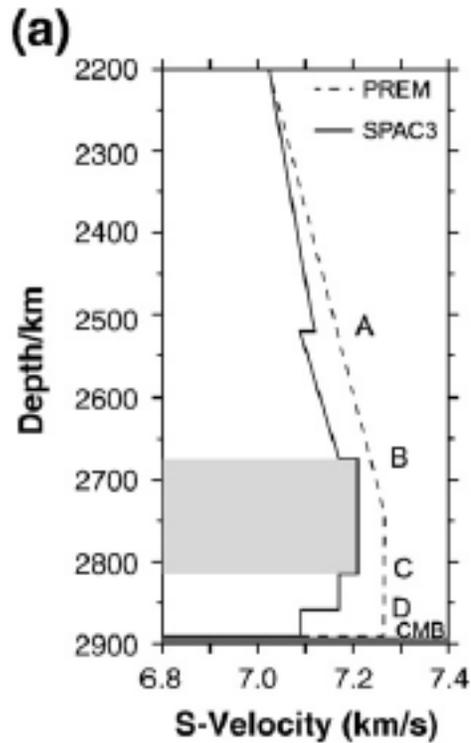
Entassement de mélange pyrolite/MORB dans la D'':

A = transition Pv→pPv dans MORB

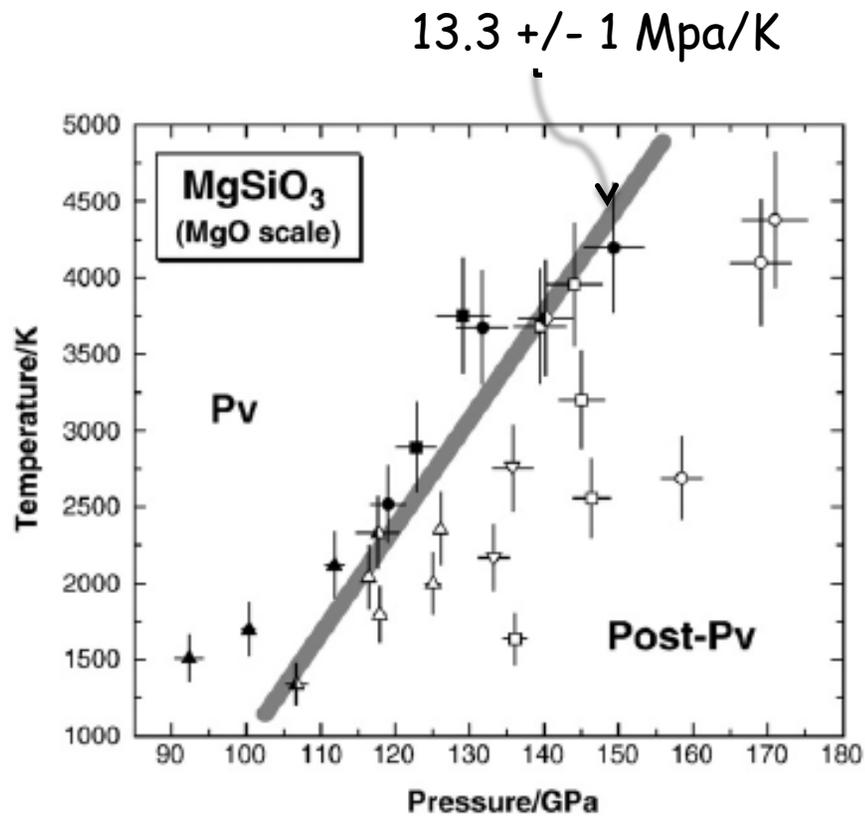
B = transition Pv→pPV dans la pyrolite

C = transition pPV→Pv dans la pyrolite (haute température)

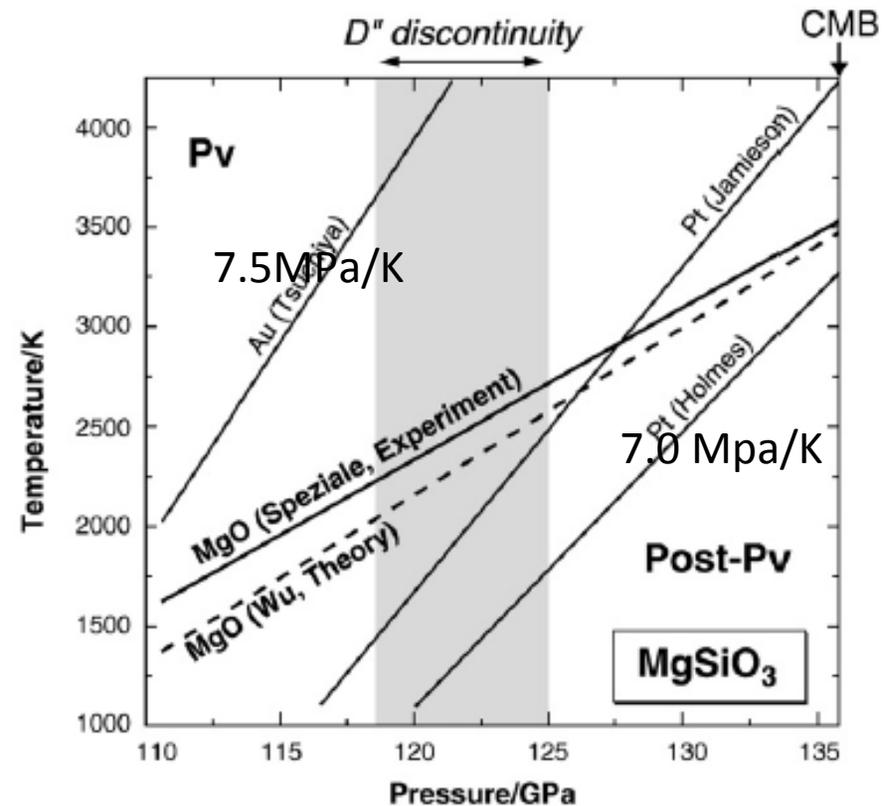
D = fusion partielle



# Nouvelles déterminations de la pente de Clapeyron



## Comparison avec études précédentes



LHDAC

Calibration de pression: MgO

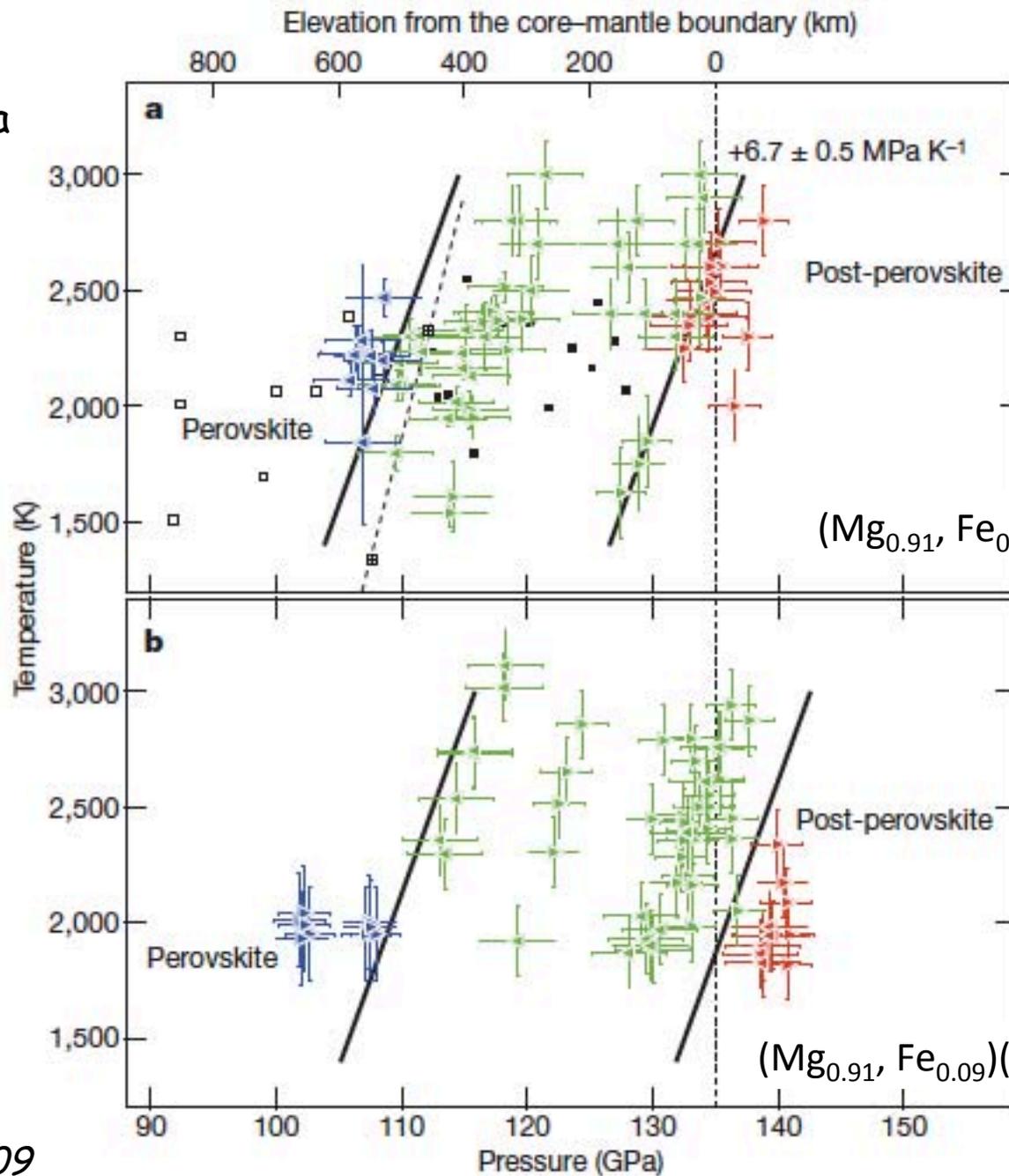
XRD

Intervalle de température plus large → mesures de  $dP/dT$  plus précises

$T_{\text{cmb}} \sim 3700\text{K}$  → plus faible flux de chaleur du noyau  $\sim 6.6 \text{ TW}$

*Tateno et al., 2009*

Epaisseur de la  
Transition  
Pv → pPv



LHDAC

chauffage  
pdt 1-2 h  
plus long  
que dans les  
études  
Précédentes

Calibration  
Pression: Au

- **Conséquences** (*Catalli et al., 2009*):
  - Si la discontinuité de la D'' correspond à la transition de phase Pv→pPv, cela implique une composition différente de la pyrolite dans les régions où la discontinuité est observée
    - Rapport Mg/Si plus fort:
      - proportion de (Fe, Mg)O plus grande que dans la pyrolite
      - Implique aussi une profondeur de transition plus grande (pourrait ne pas exister dans le manteau)
      - mais incertitudes sur la calibration de la pression
    - Moins d'Al

- Andrault et al. (2010) combinent LH-DAC avec analyse in situ XRD et spectroscopie par absorption rayons X (XANES) à l'ESRF, Grenoble
- Composition des échantillons rocheux du manteau:

**Table 1**

Composition of the starting materials (in atoms per formula units).

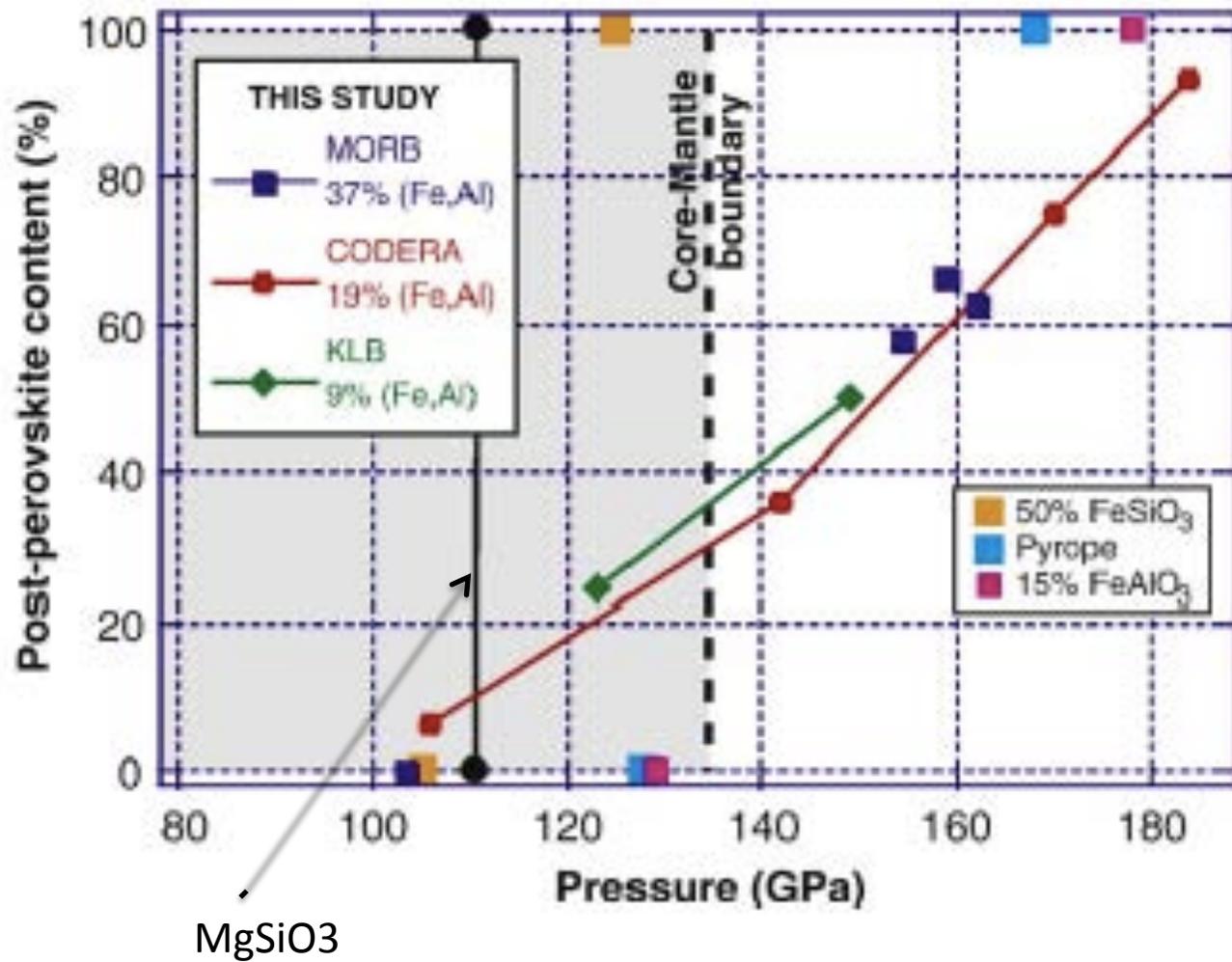
	KLB	Codera	MORB
Mg	0.835	0.701	0.502
Ca	0.015	0.005	-
Fe	0.094	0.194	0.368
Si	0.955	0.925	0.760
Al	0.101	0.175	0.370

USA

Italie

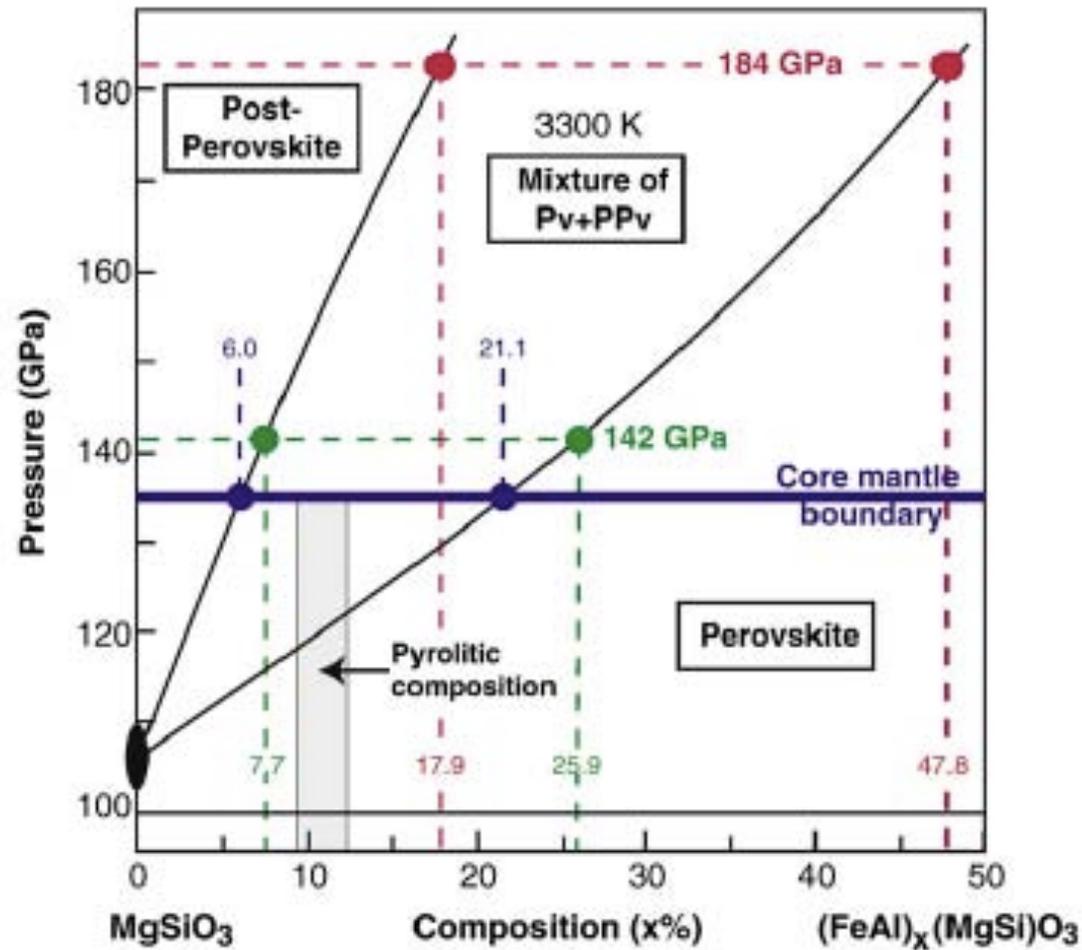
synthétique

Xenolithes naturels



Températures: 3150-3600K

*Andrault et al., 2010*

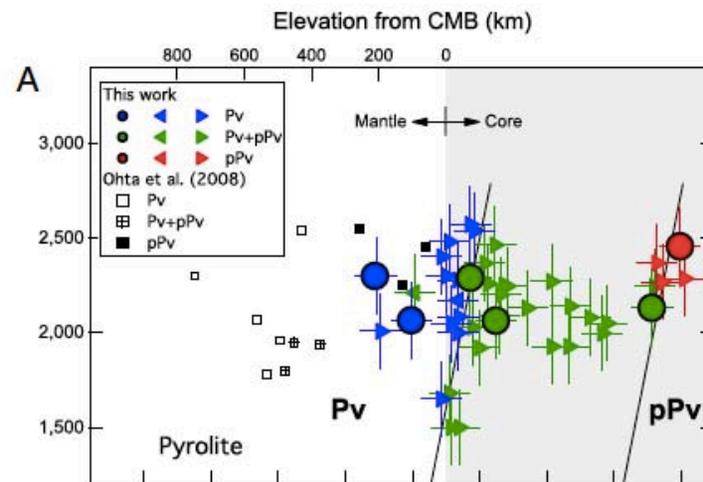


-> Pour une composition pyrolitique typique, Pv+pPv coexistent à la base du manteau jusqu' à la pression de 135GPa

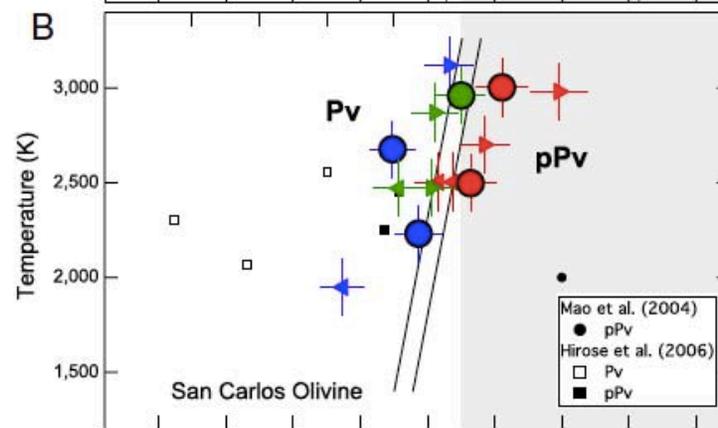
-> pPv appauvri en Fe par rapport à Pv

*Andrault et al., 2010*

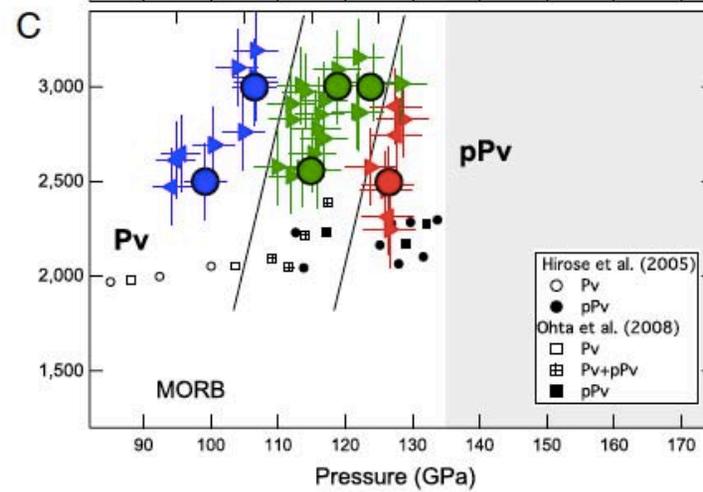
Pyrolite



Olivine de San Carlos

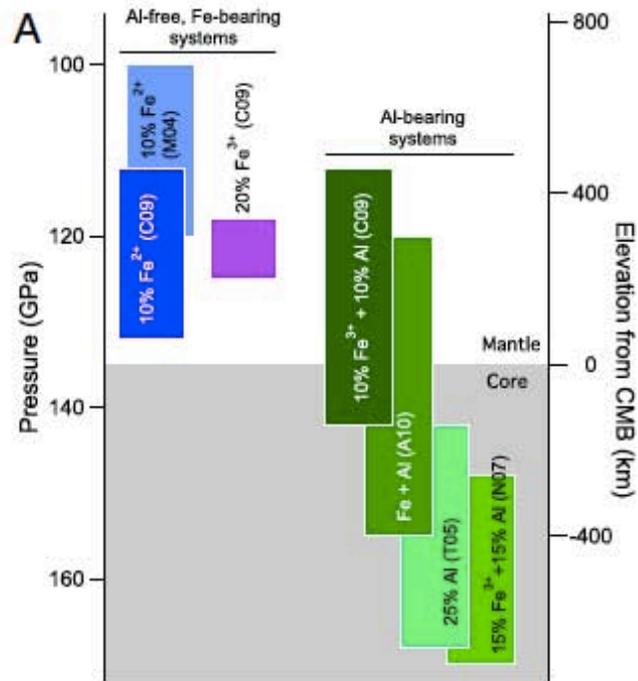


MORB



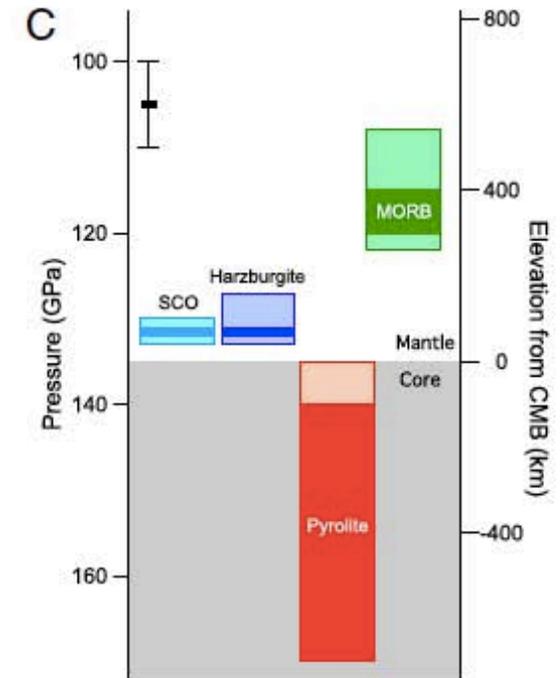
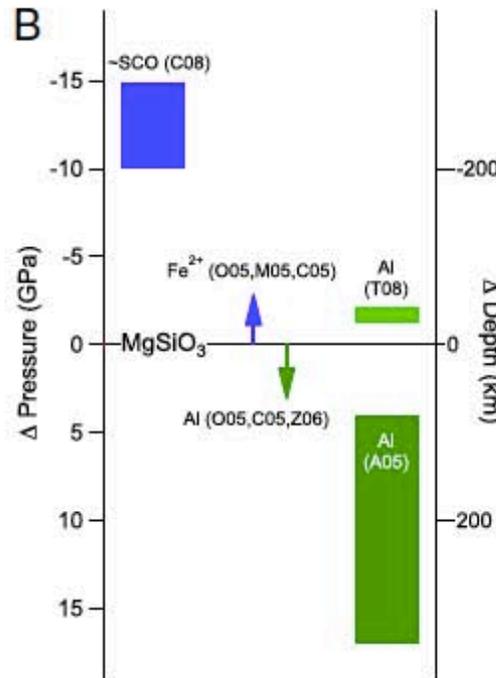
*Grocholski et al., 2012  
PNAS*

## Résultats expérimentaux



Systèmes binaires

## Résultats théoriques



Systèmes multi-composants

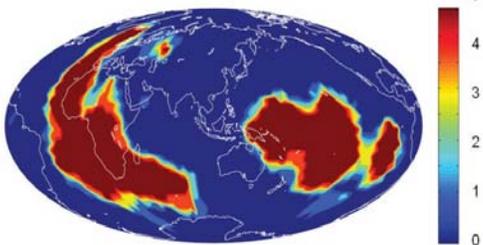
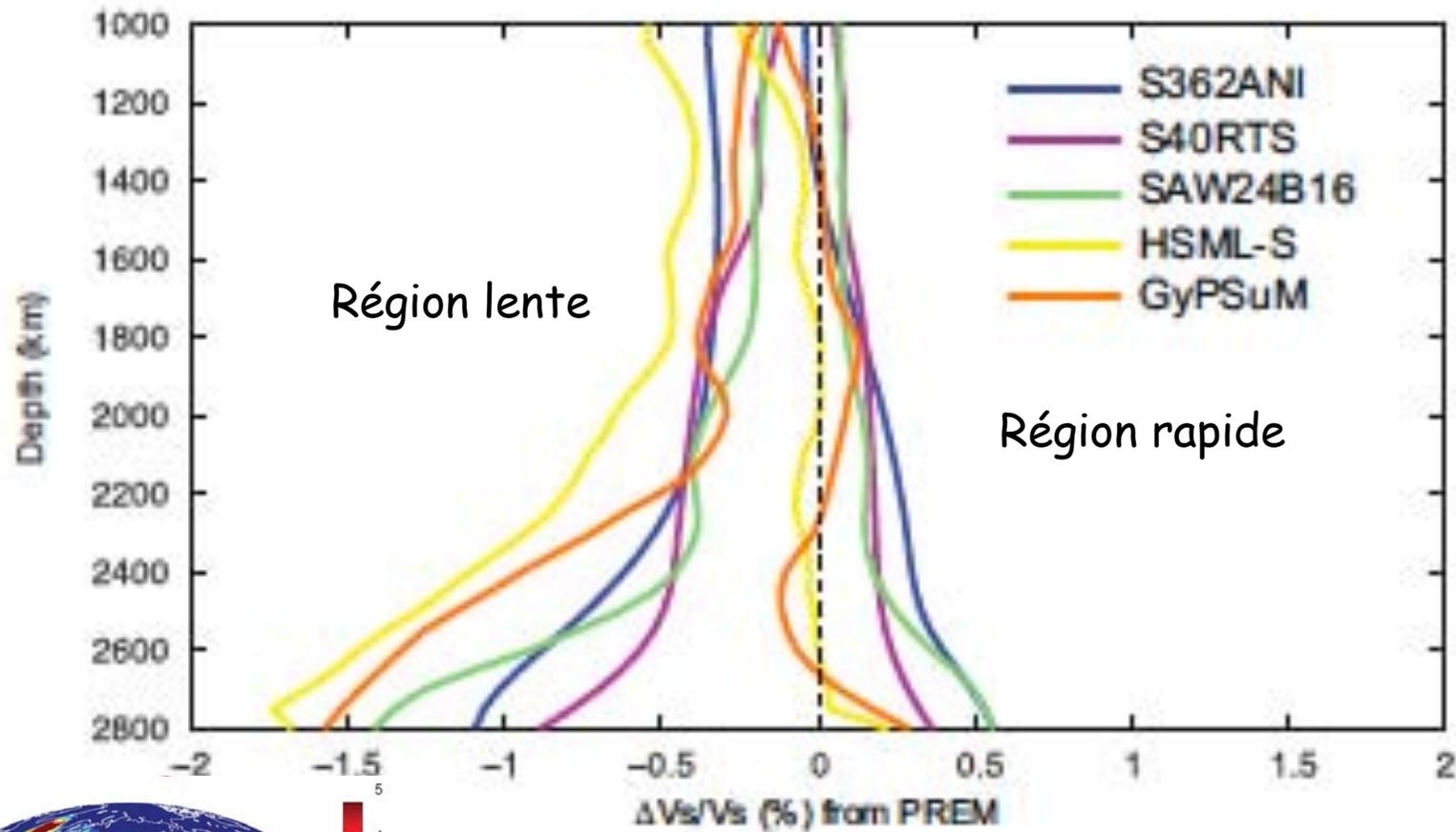
-> La transition Pv→pPv ne se produit pas - ou n'est pas détectable dans le manteau pyrolitique

-> Mais peut exister dans les régions du manteau riches en matériau différencié issu de la subduction (eg. MORB et harzburgite)

# Conclusions

- De grandes incertitudes subsistent sur la pression de la transition Pv→pPv, sur l'épaisseur de la discontinuité et sur la pente de Clapeyron (7-14 MPa/K)
- Importance de la composition (i.e. pyrolite ou MORB) et de la proportion  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  (préférence pour la perovskite ou le ferropériclase)
- Si la discontinuité sismique correspond à cette transition, les régions où elle est observée pourraient être enrichies en MORB
  - En accord avec l'observation de la discontinuité dans les régions de vitesses  $V_s$  rapides (anneau autour du Pacifique)

# Profils de vitesse à la base du manteau



# Anisotropie dans le manteau profond

- Dans un milieu anisotrope les ondes sismiques se propagent avec des vitesses différentes dans des directions différentes
- Les causes principales de l'anisotropie sismique sont:
  - *Anisotropie intrinsèque*: LPO lattice preferred orientation (anisotropie cristalline)
    - Dans un écoulement, les cristaux anisotropes s'alignent dans une direction particulière, donnant lieu à de l'anisotropie à l'échelle macroscopique
  - *Anisotropie extrinsèque*: SPO - shape preferred orientation
    - Par exemple - un empilement de couches de propriétés élastiques différentes
    - ou des inclusions fluides orientées

- ◆ Dans un milieu isotrope élastique, les contraintes ( $\sigma_{ij}$ ) sont liées aux déformations ( $\varepsilon_{ij}$ ) par une relation linéaire (loi de Hooke)

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \text{module de cisaillement} \\ \kappa = \lambda + \frac{4}{3}\mu \\ \text{module de compressibilité} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_P = \alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \\ V_S = \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{array} \right.$$

- ◆ Cas général: milieu anisotrope

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

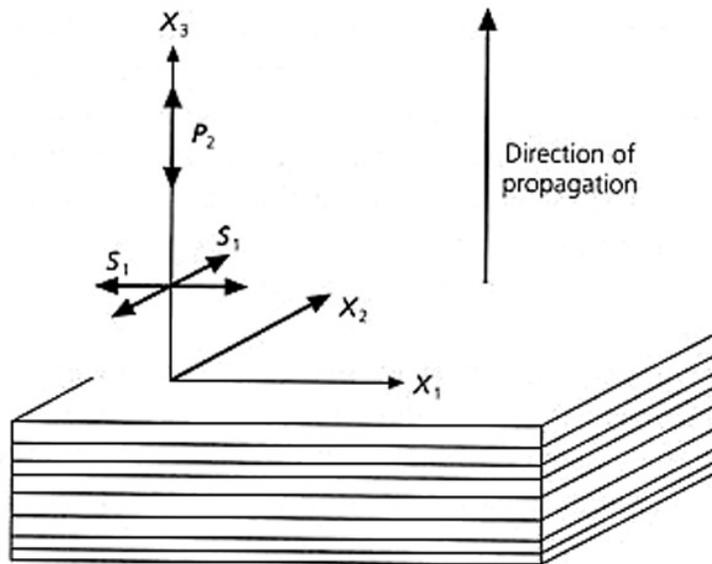
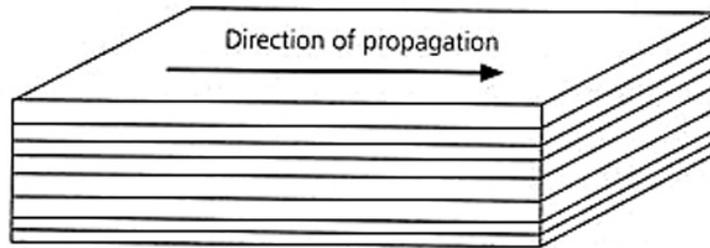
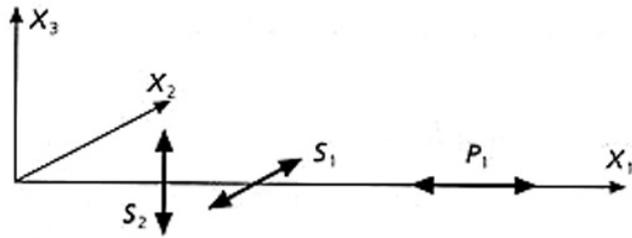
$C_{ijkl}$ :  
Jusqu'à 21 éléments indépendants

- On détermine la vitesse de propagation  $v_n$  dans une direction particulière définie par la normale au front d'onde:  $n = (n_1, n_2, n_3)$  en résolvant l'équation de Christoffel:

$$\det | c_{ijkl} n_i n_j - \rho v_n^2 \delta_{il} | = 0$$

Les trois valeurs propres de ce système donnent les vitesses  $V_p$  et  $V_{S1}, V_{S2}$  dans la direction donnée

# Anisotropie extrinsèque (SPO)



⇒ *Anisotropie radiale*  
 5 éléments indépendants  
 du tenseur élastique:  
 A, C, F, L, N (Love, 1911)

$$L = \rho V_{sv}^2$$

$$N = \rho V_{sh}^2$$

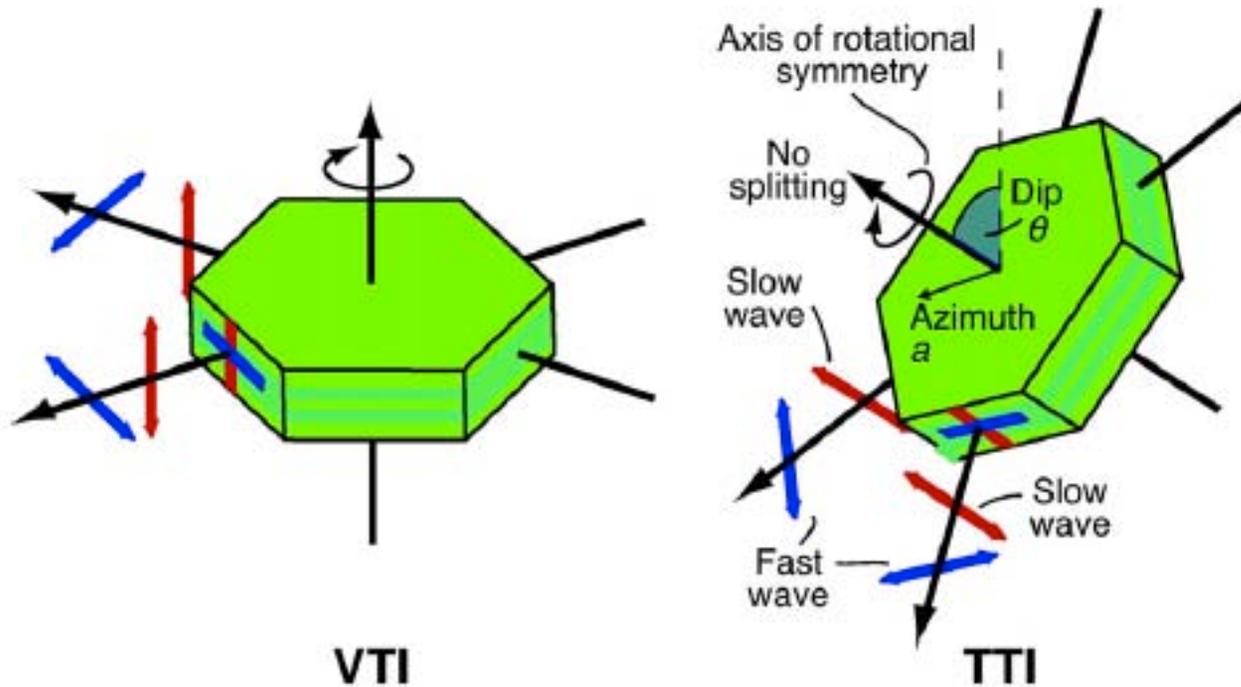
$$C = \rho V_{pv}^2$$

$$A = \rho V_{ph}^2$$

$$\eta = F/(A-2L)$$

L'axe de symétrie peut être incliné ⇒ 2 paramètres de plus

Anisotropie radiale = isotropie transversale



VTI

TTI

Axe de symétrie  
vertical

Axe de symétrie  
incliné

# LPO: exemple -anisotropie de l'olivine

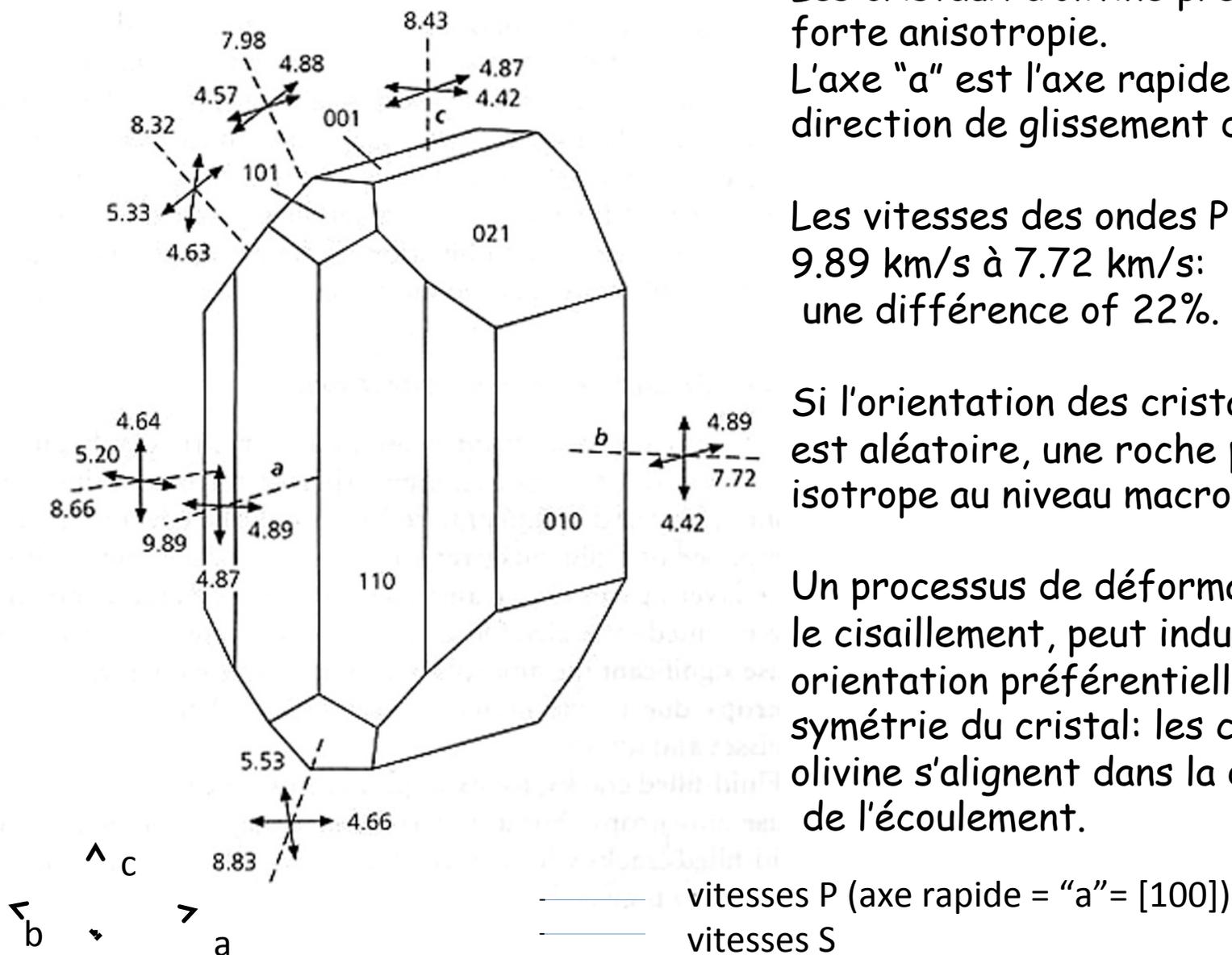
Les cristaux d'olivine présentent une forte anisotropie.

L'axe "a" est l'axe rapide, c'est aussi la direction de glissement dominante

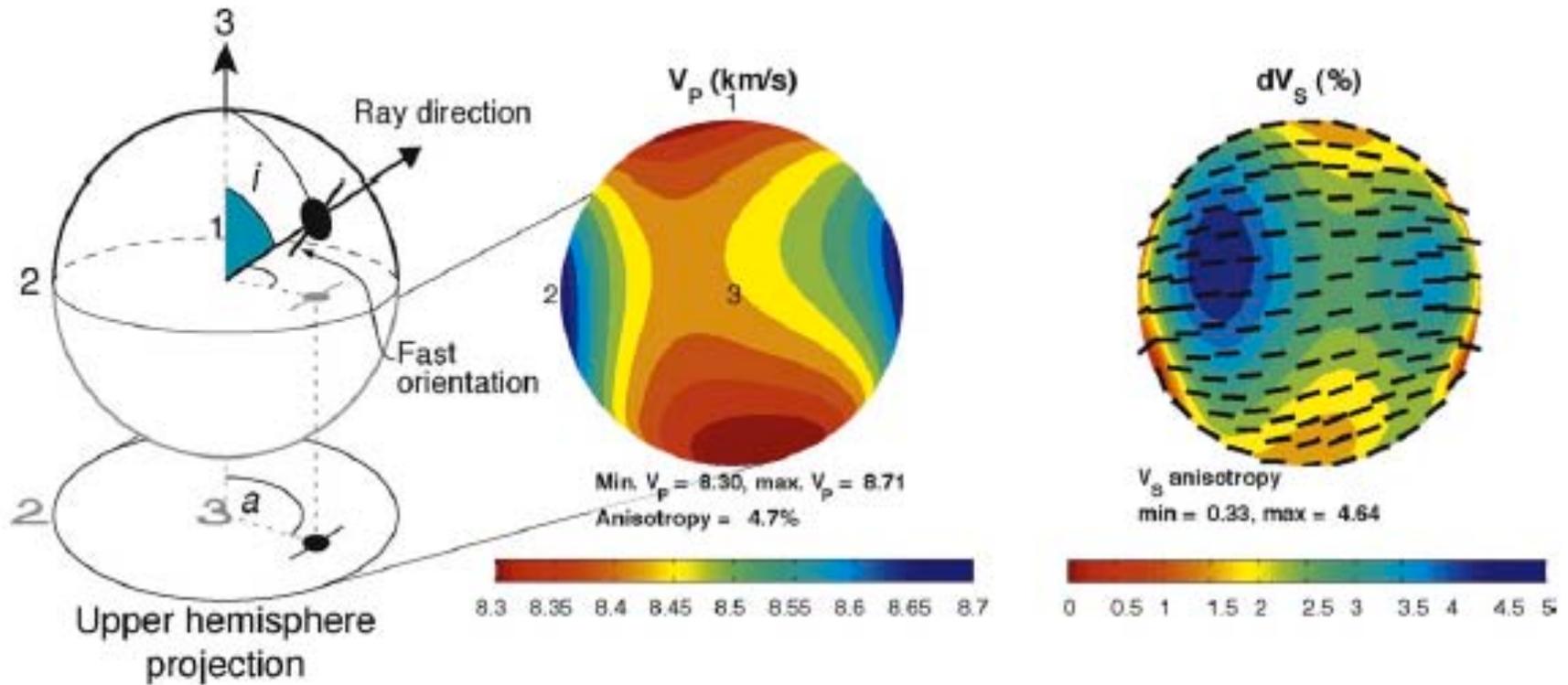
Les vitesses des ondes P varient de 9.89 km/s à 7.72 km/s:  
une différence de 22%.

Si l'orientation des cristaux individuels est aléatoire, une roche peut être isotrope au niveau macroscopique.

Un processus de déformation, tel que le cisaillement, peut induire une orientation préférentielle des axes de symétrie du cristal: les cristaux d'olivine s'alignent dans la direction de l'écoulement.



## Visualisation du tenseur élastique



Référentiel cartésien 1,2,3  
Péridotite mantellique  
Axe probable de la déformation: 1

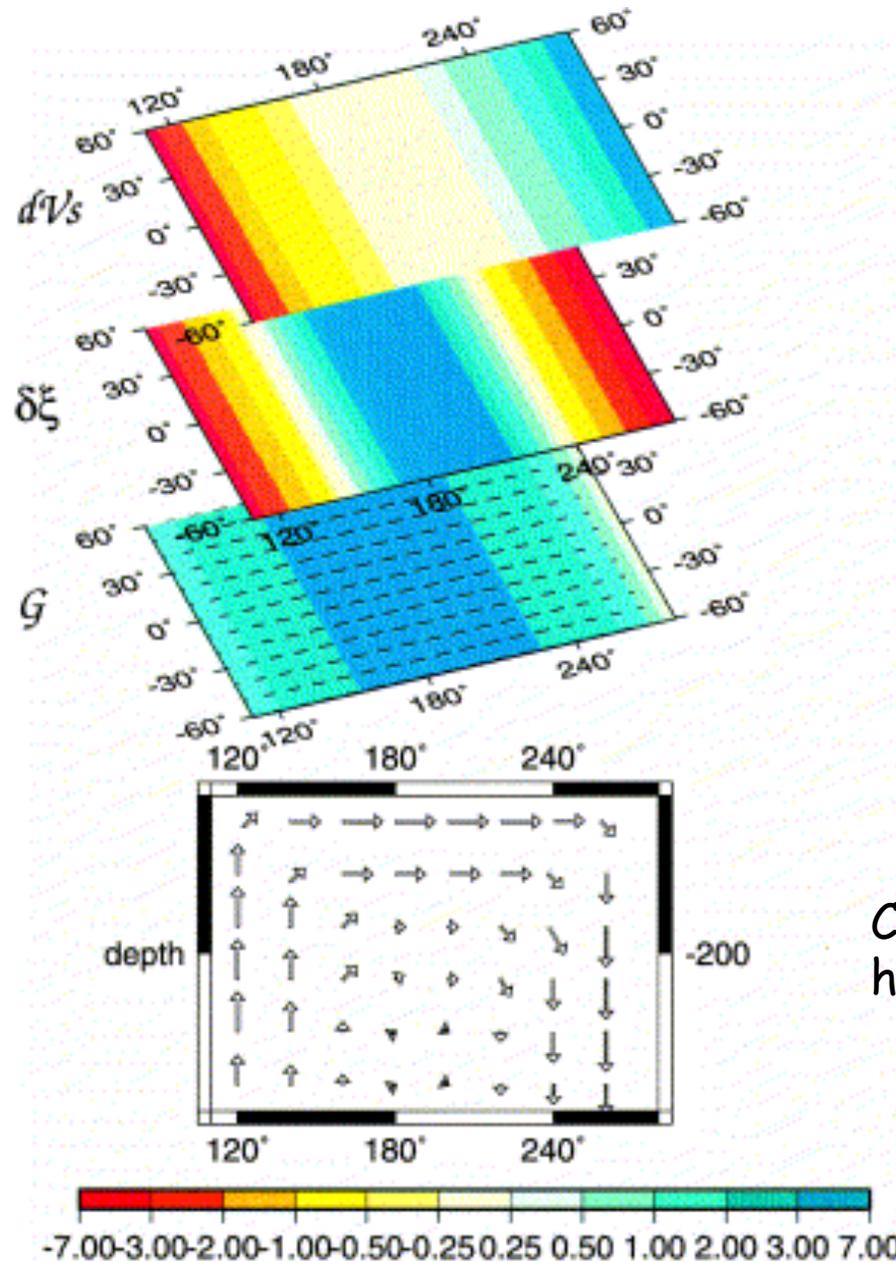
*Nowacki et al., 2011*

- Anisotropie radiale (A,C,F,L,N)
- Anisotropie azimuthale:
  - La vitesse dépend de la direction de propagation dans le plan horizontal

$$V = a + b \cos 2\psi + c \sin 2\psi + d \cos 4\psi + e \sin 4\psi$$

Où  $\psi$  est l'azimuth compté à partir de la direction Nord

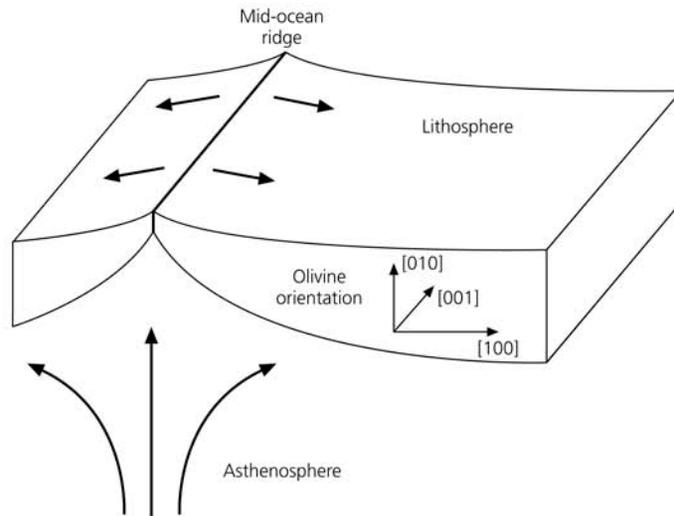
$a, b, c, d, e$  sont des combinaisons linéaires des éléments du tenseur élastique  $C_{ijkl}$



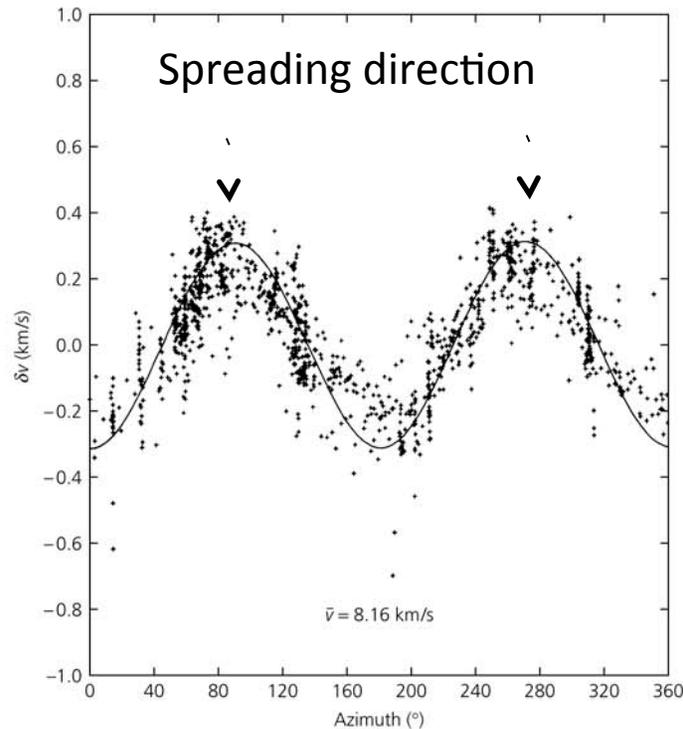
$$\xi = (V_{SH}/V_{SV})^2$$

Cellule de convection  
hypothétique

## Anisotropie dans le manteau supérieur



La variation avec l'azimuth des vitesses sismiques est en accord avec l'idée de la présence d'anisotropie LPO due à l'alignement des cristaux d'olivine dans la lithosphère due au cisaillement provoqué par le mouvement des plaques.

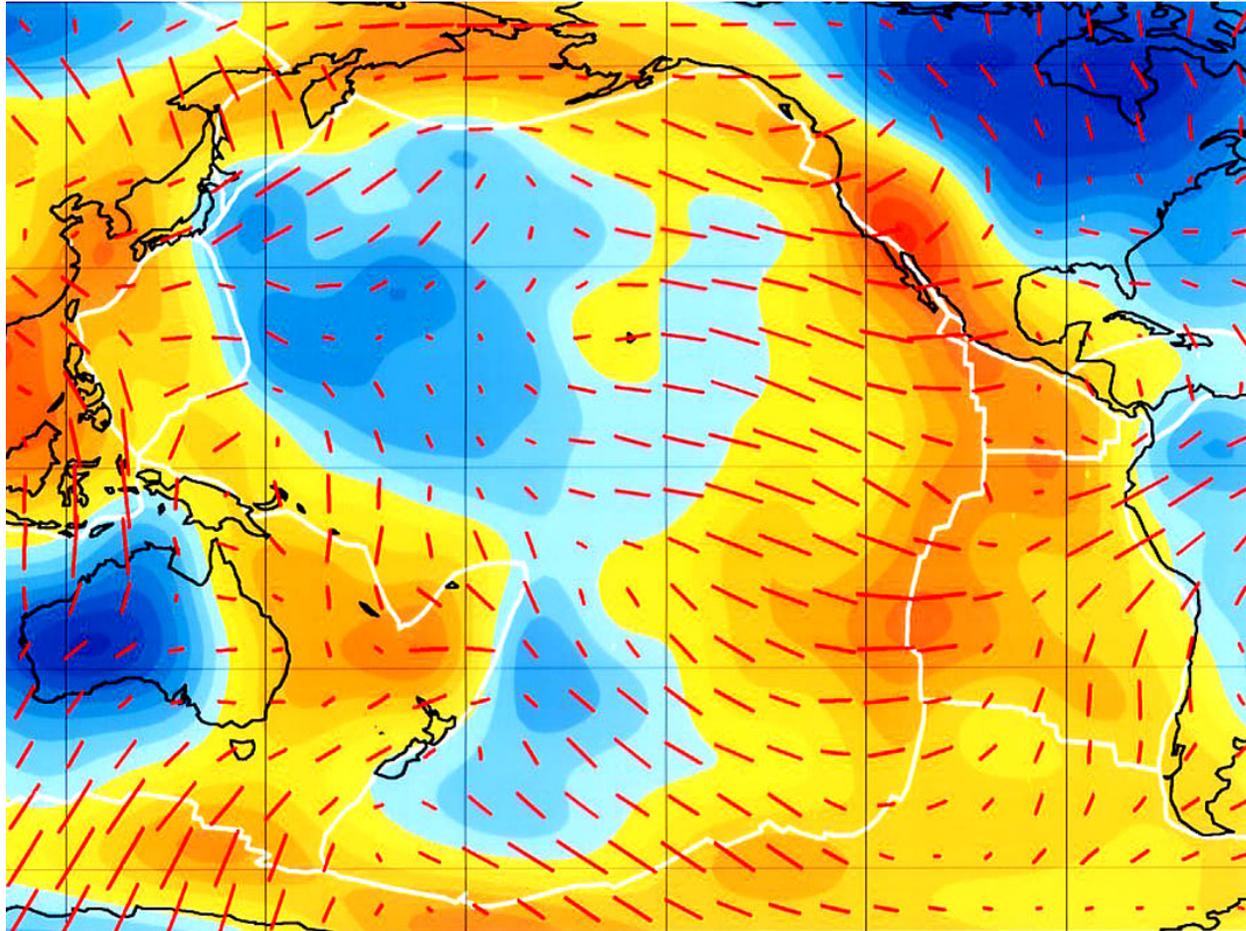


La direction rapide de l'olivine: [100] s'aligne avec la direction de la plaque

Vitesses  $P_n$  à Hawaii

$P_n$  est une onde P qui se propage juste sous le Moho (limite croûte/manteau)

# Anisotropie des ondes de surface



Axe rapide de l'anisotropie

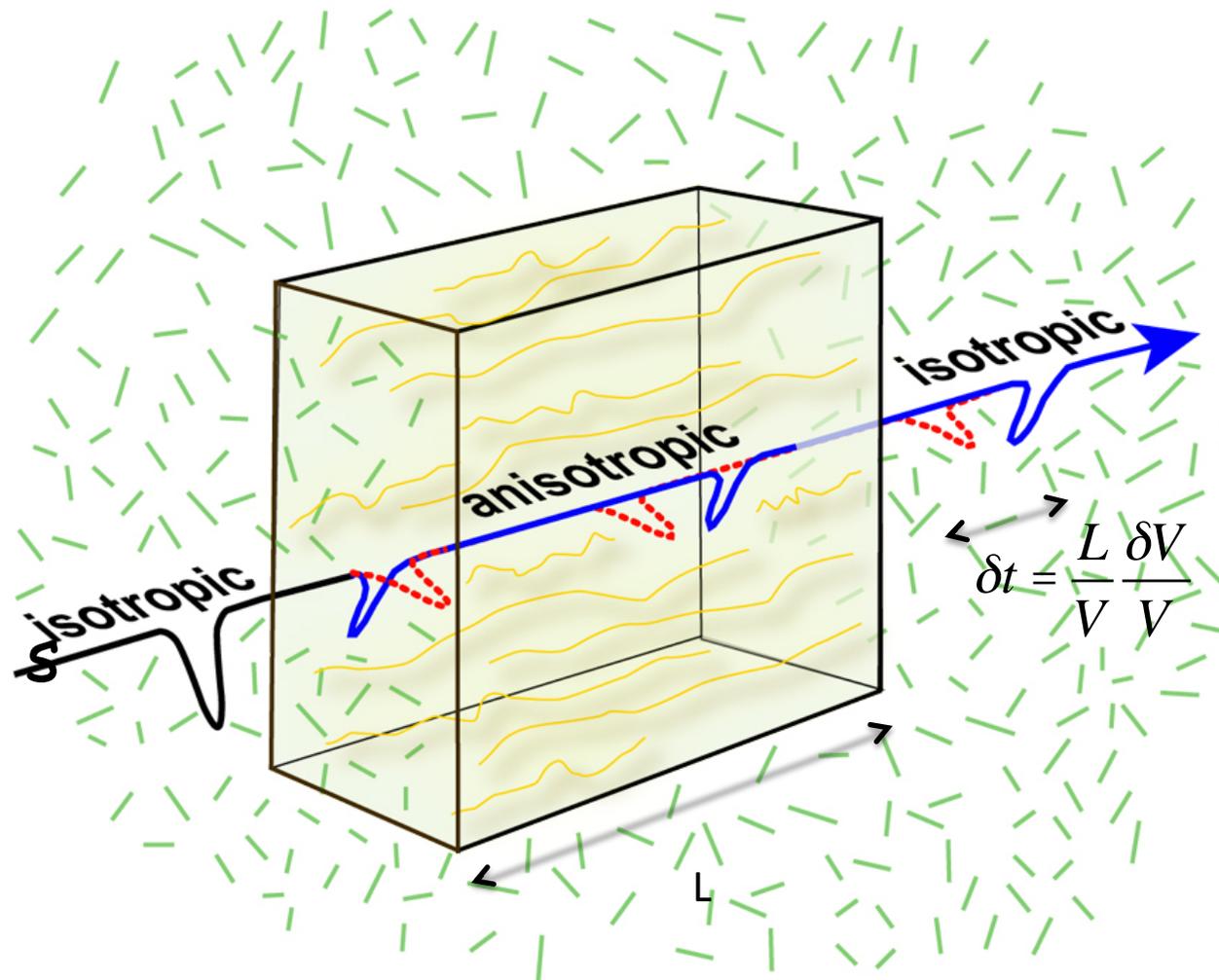
Ondes de Rayleigh à  $T = 60$  s (sensibles aux profondeurs de 80-100 km).

En fond: *Orange*: vitesses lentes, *bleu*, vitesses rapides.

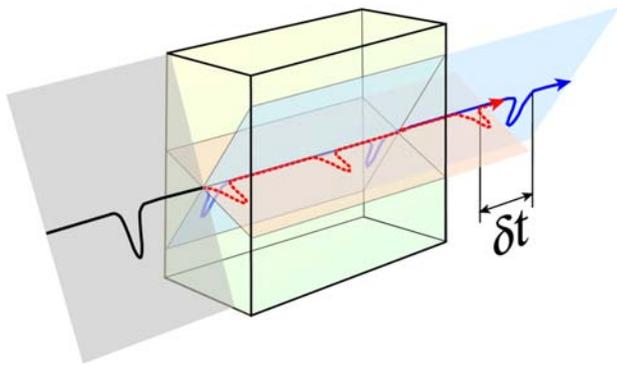
*Ekstrom et al., 1997*

# Anisotropie des ondes de volume

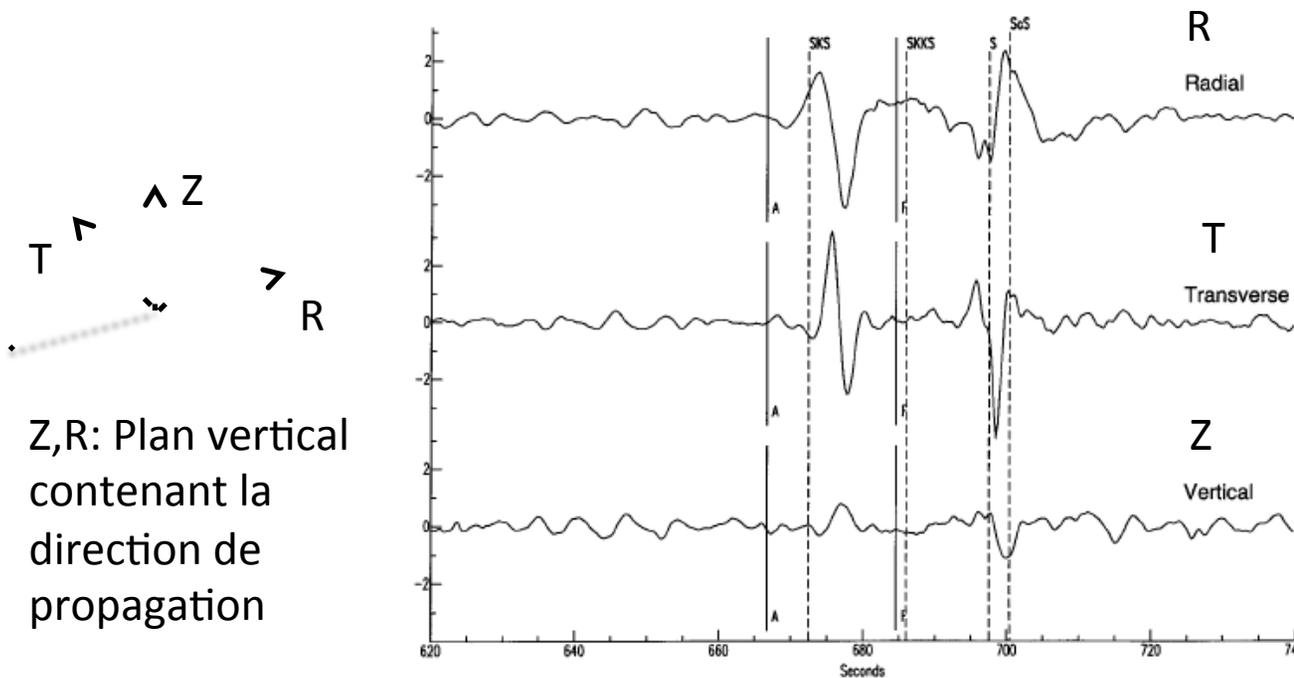
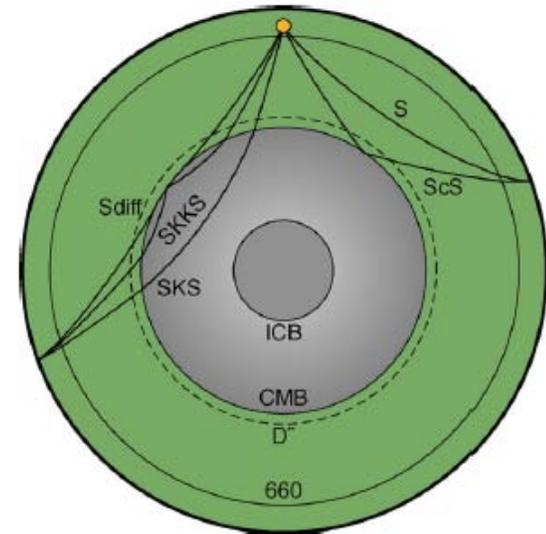
Biréfringence des ondes S dans un milieu anisotrope ("splitting")



(After Crampin, 1981)



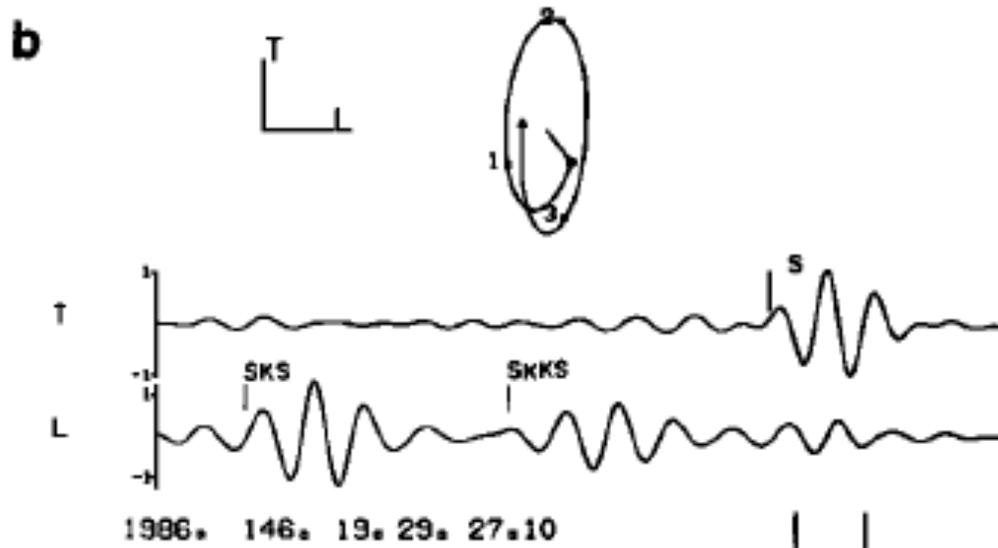
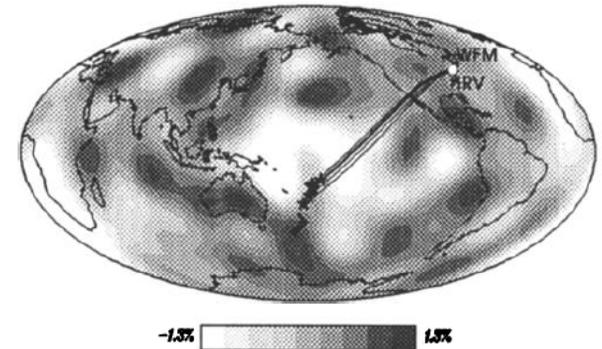
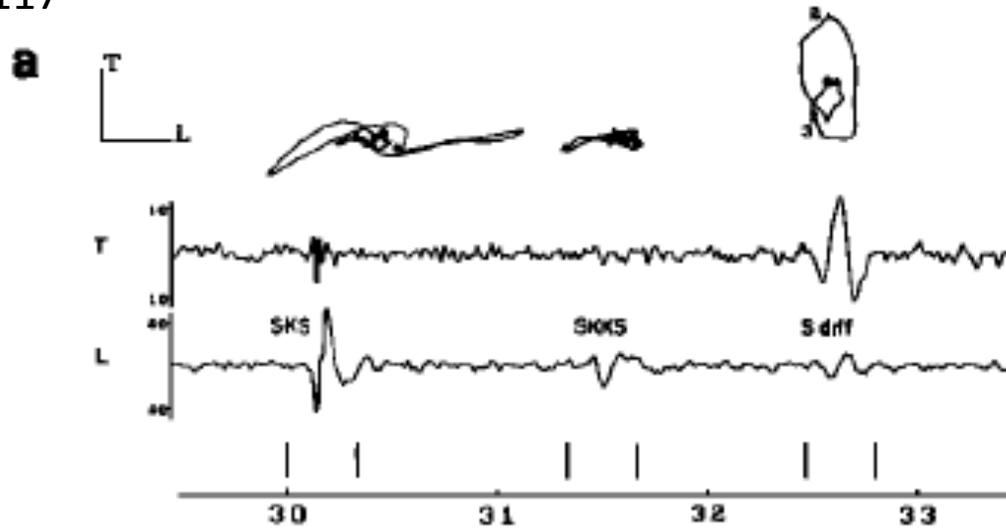
## Splitting des ondes SKS: anisotropie dans le manteau supérieur



$\hat{T}$   $\hat{Z}$   
 $\hat{R}$   
 Z,R: Plan vertical  
 contenant la  
 direction de  
 propagation

Dans un milieu  
 isotrope, SKS  
 devrait être polarisée  
 en "SV", et observée  
 uniquement sur la  
 composante radiale  
 mais pas sur la  
 composante  
 transversale.

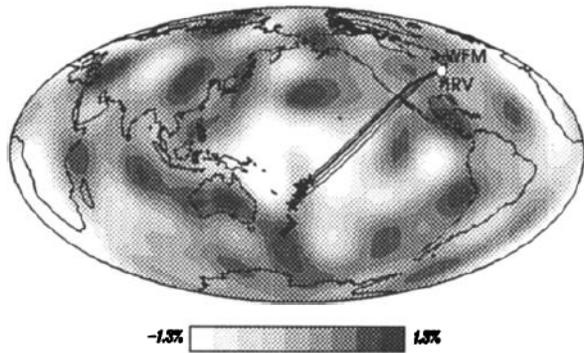
$\Delta=117^\circ$



Couche fine de vitesses  
Lentes dans la D''?  
Anisotropie transverse?

SV décalé de 3 s par rapport à SH: anisotropie azimuthale?

*Vinnik et al., 1989*

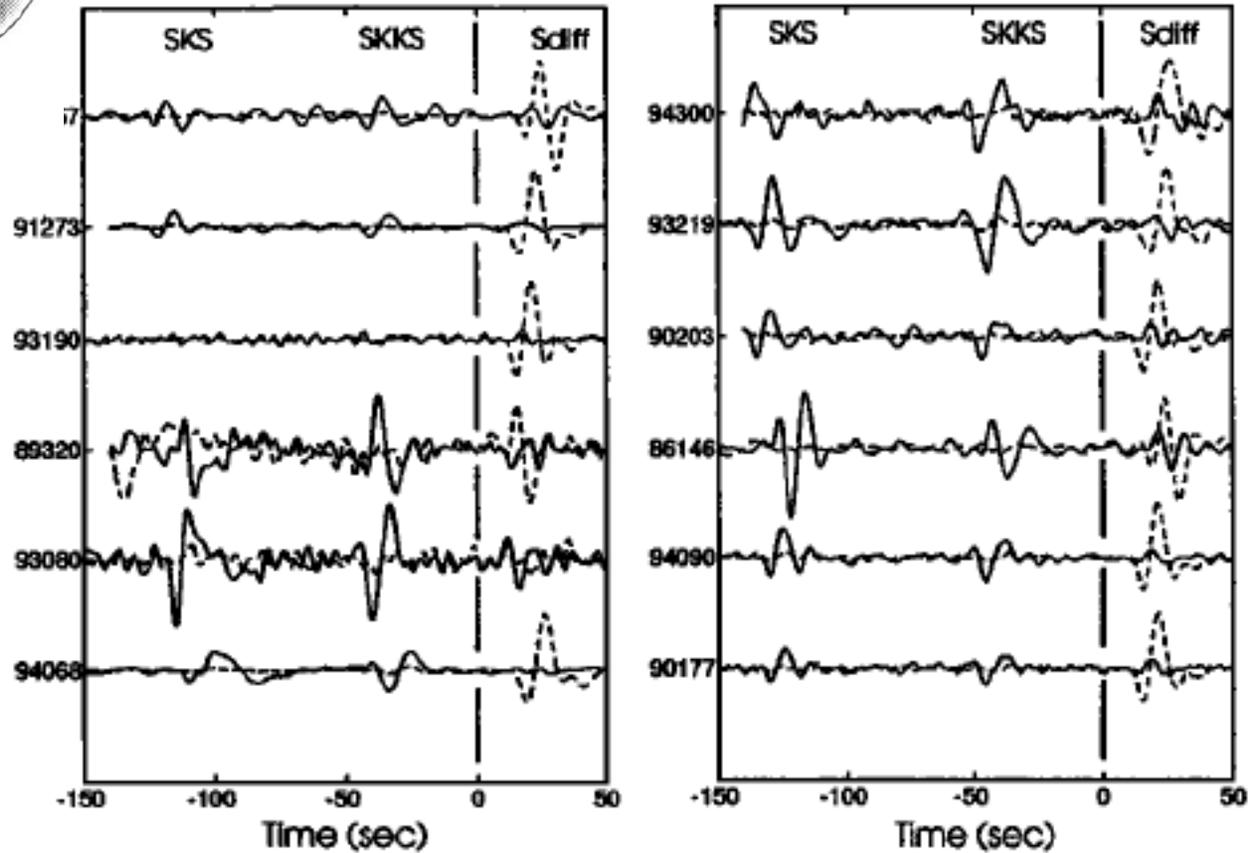


Couplage de  $SH_d$  et  $SV_d$  ou vitesses lentes à la base de la  $D''$ ?

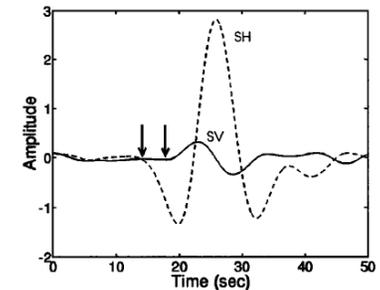
Corrélation de  $SV_d$  avec SKS ou SKKS?

ou..

Corrélation de  $SV_d$  avec  $SH_d$ ?



Sommation de traces



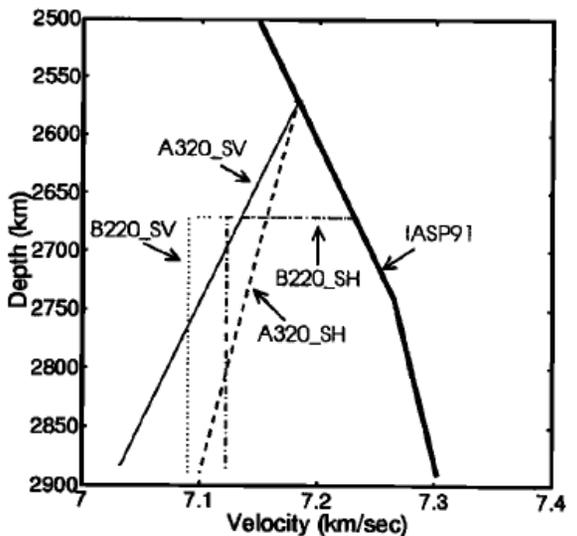
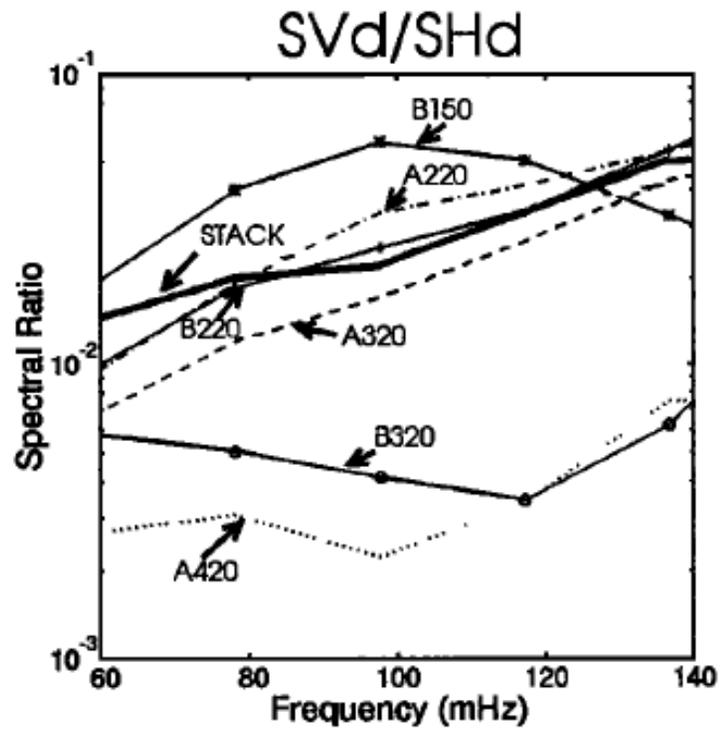
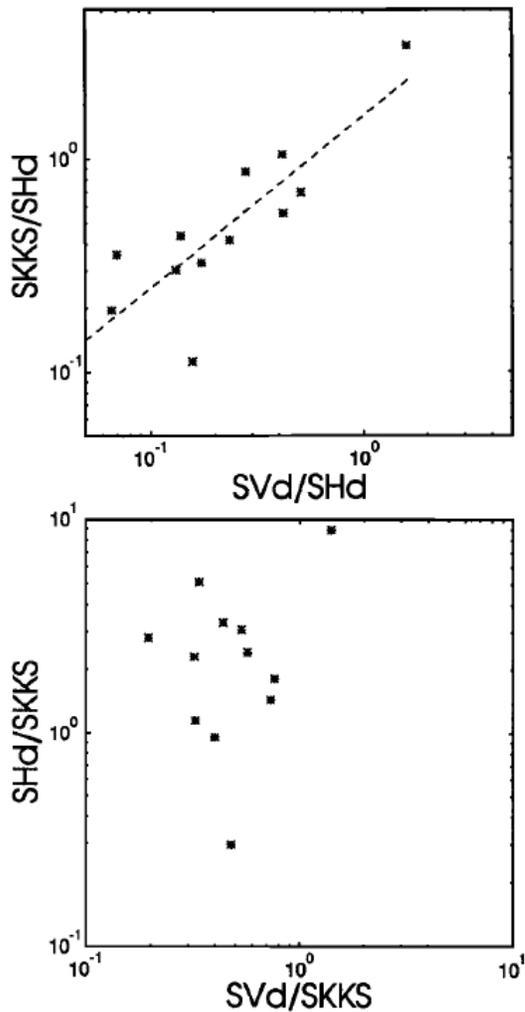


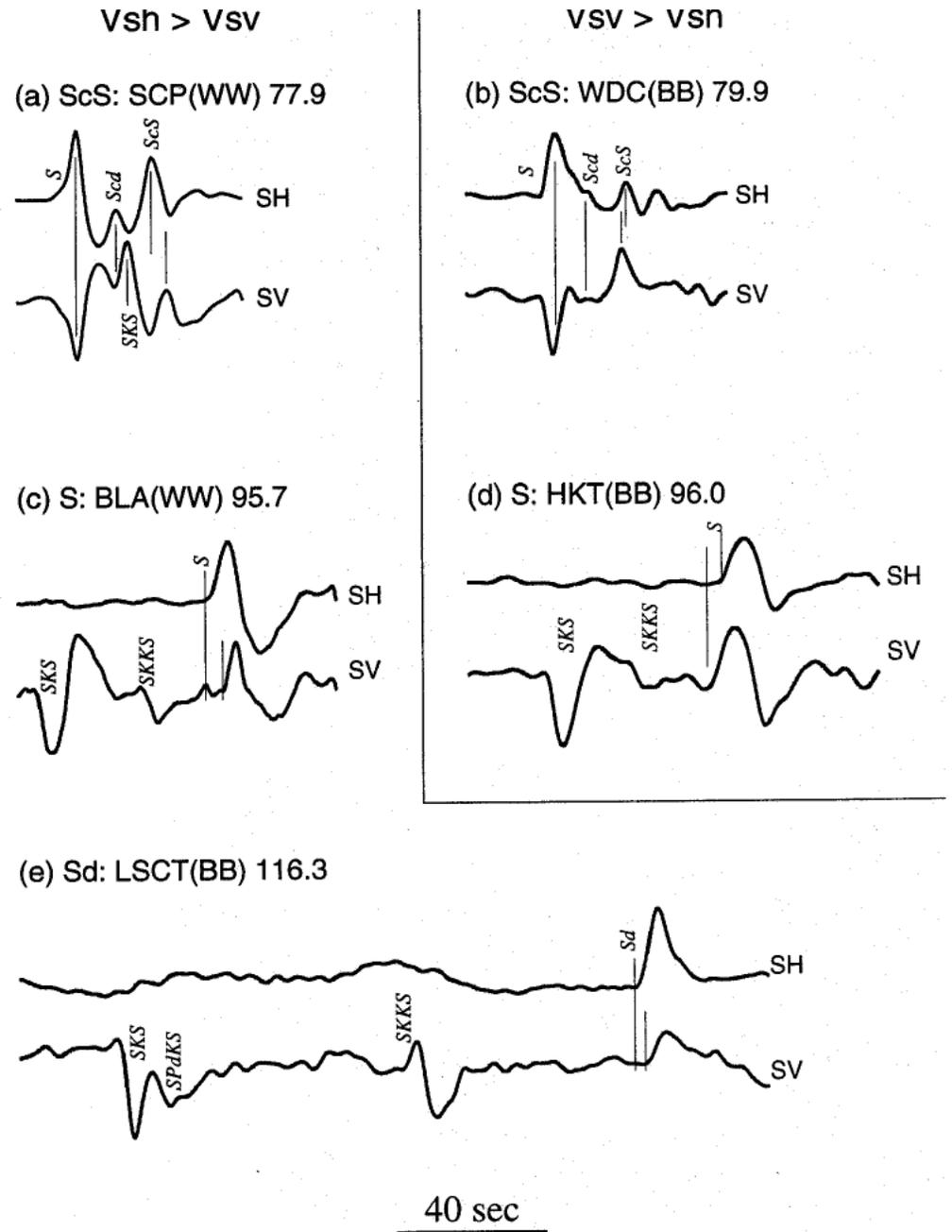
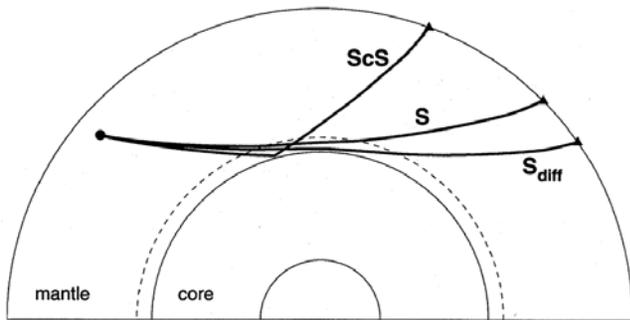
Figure 6. Examples of successful models.

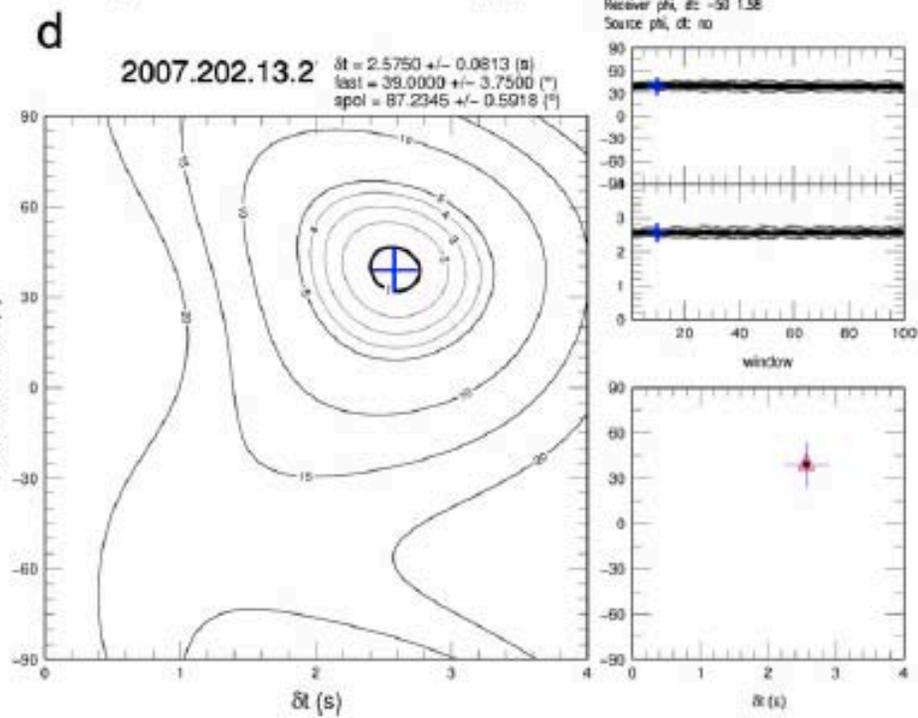
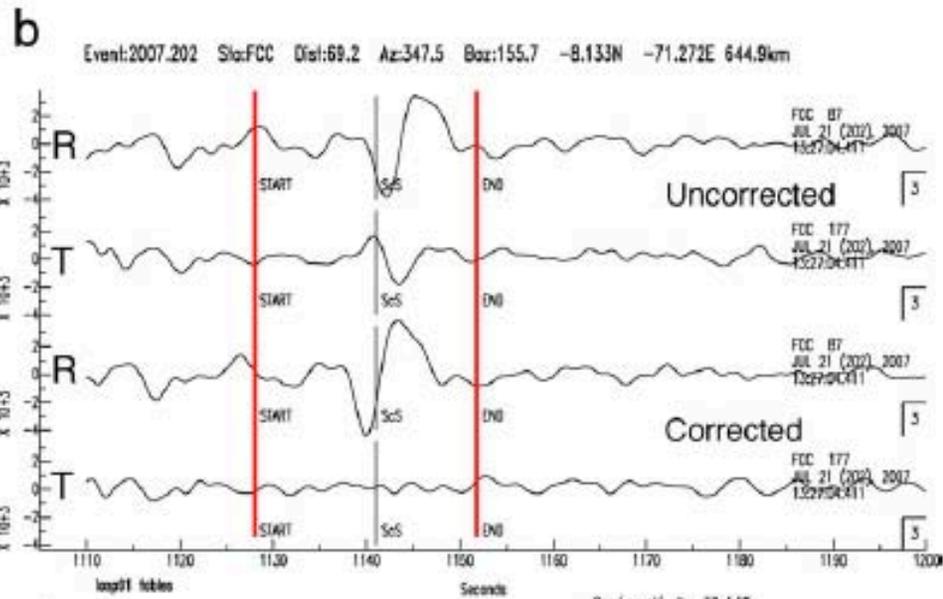
Anisotropie transverse pourrait être due à la moyenne d'anisotropies azimuthales de différentes directions

Maupin et al. (1994): anisotropie azimuthale

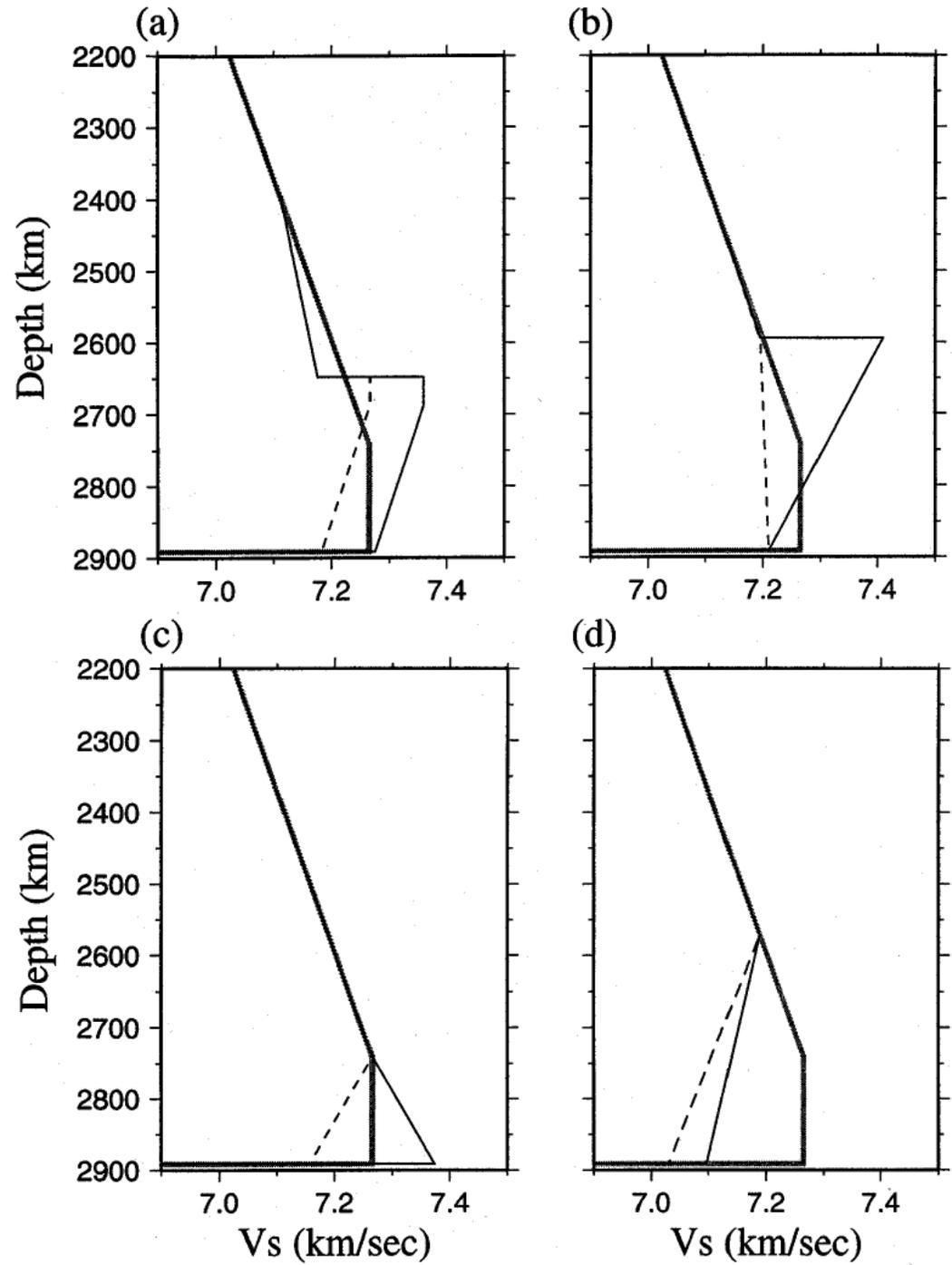
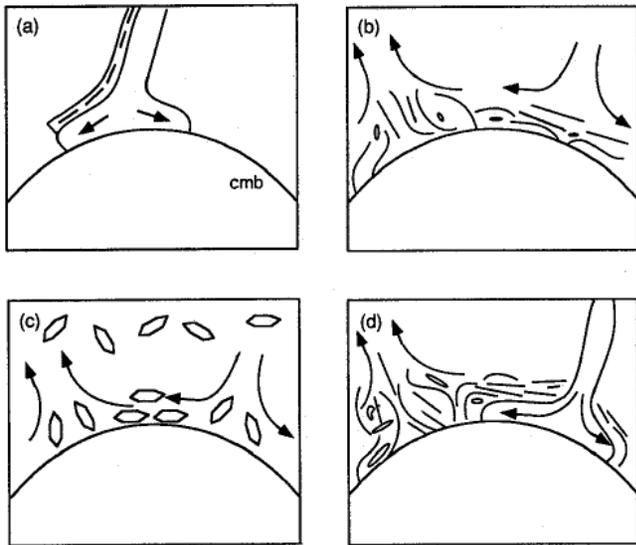
Vinnik et al., 1995

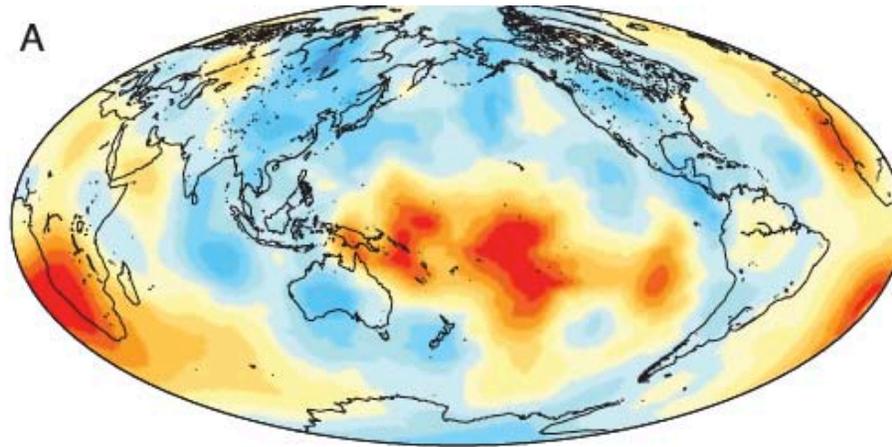
# Phases sismiques utilisées dans l'étude de l'anisotropie à la base du manteau



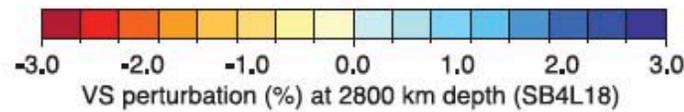


# Modèles d'anisotropie radiale proposés

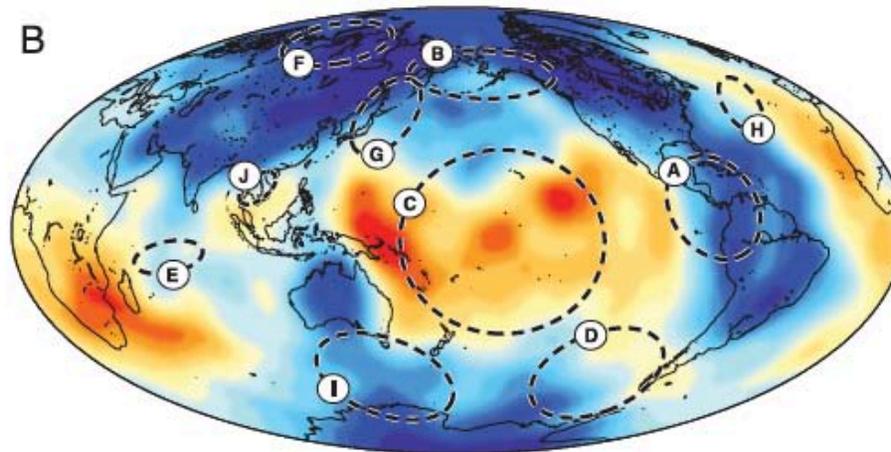




Tomographie globale  
Vs isotrope (Masters  
et al., 2000)



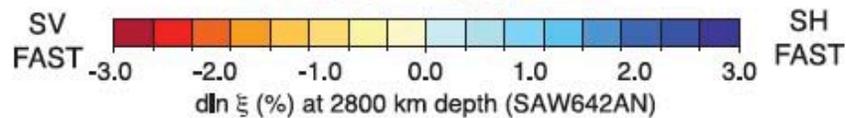
A-> J  
Observations  
locales



Tomographie globale  
d'anisotropie radiale  
(Panning and Romanowicz,  
2006)

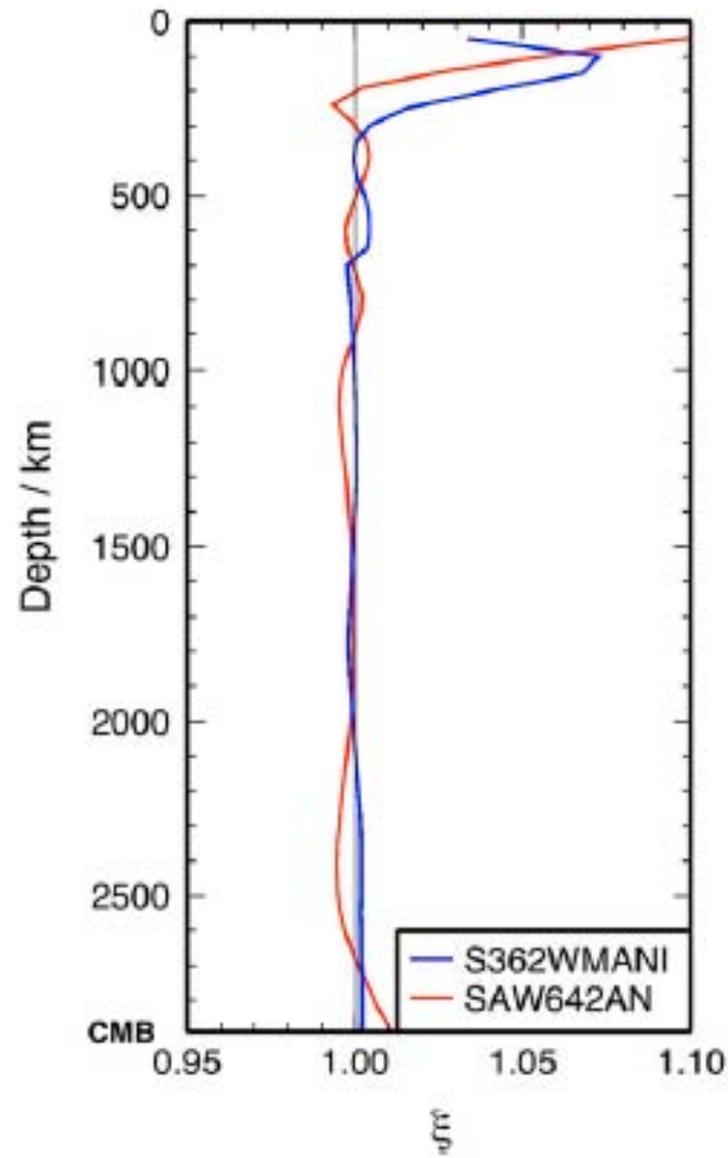
A,B,F,I,J SH>SV

C, G SV<SH ou  
variable



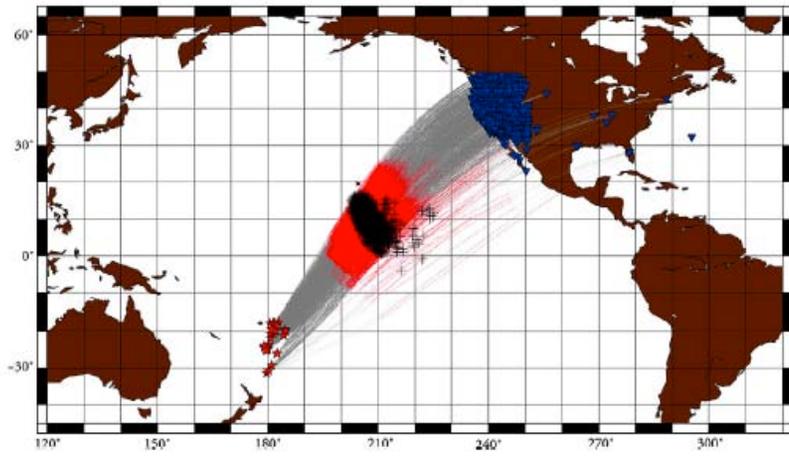
$$d \ln \xi = 2(V_{sh} - V_{sv}) / V_s$$

Wookey and Kendall, 2007



*Kustowski et al. 2008*  
*Panning and Romanowicz, 2006*

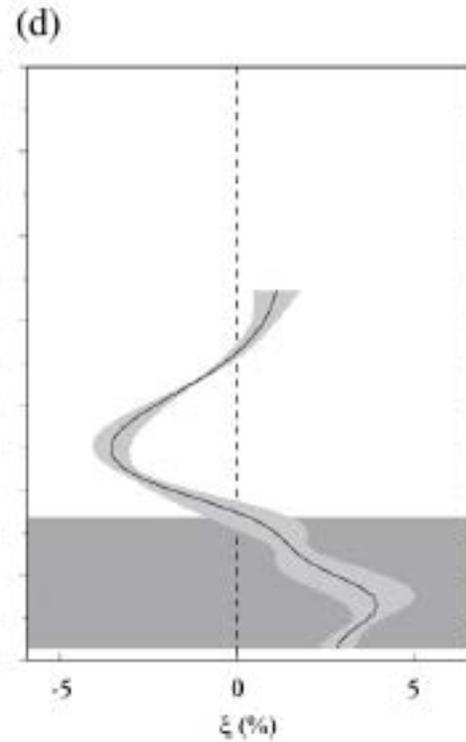
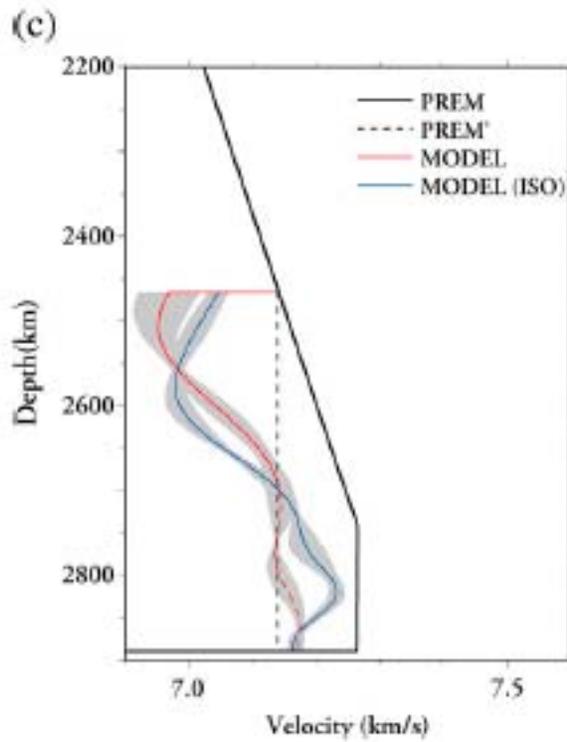
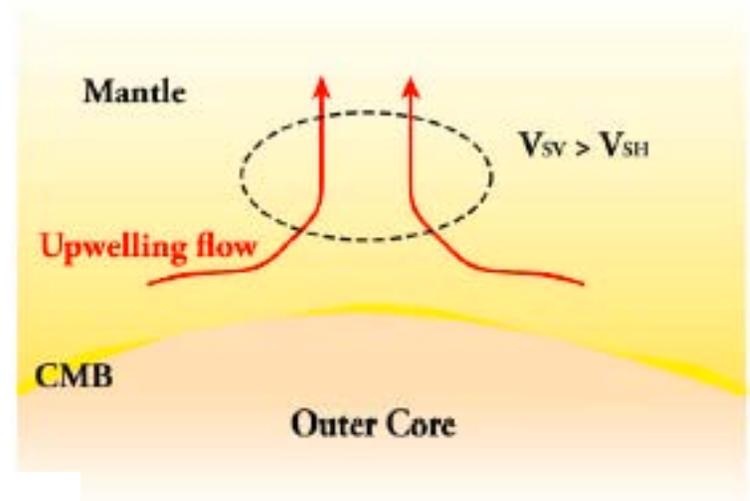
$\xi=1 \Rightarrow$  isotropie



Velocity (km/s)

$\xi$  (%)

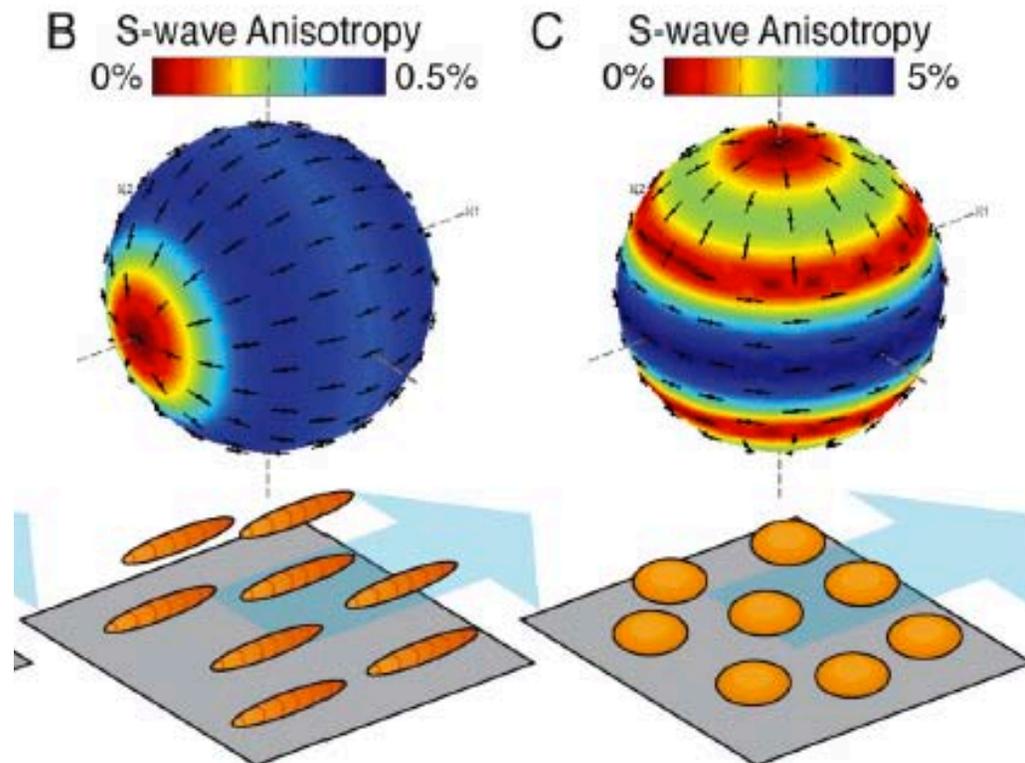
### Pacific Superplume?



- Anisotropie sismique observée dans la D'' mais pas dans le reste du manteau inférieur:
  - Différences fondamentales dans la composition et/ou le mode de déformation à la base du manteau
  - L'interprétation est limitée par le manque d'informations sur la composition, les propriétés physiques, le régime d'écoulement-> dislocations, diffusion ou inclusions fluides?

# Anisotropie dans la $D''$ : SPO?

- Empilement de couches de propriétés différentes
- Alignement préférentiel d'inclusions fluides  
Théorie des milieux effectifs  $\rightarrow$  tenseur élastique



Symétrie  
hexagonale  
(TTI –  
Anisotropie  
radiale  
inclinée

## Anisotropie dans la $D''$ : LPO?

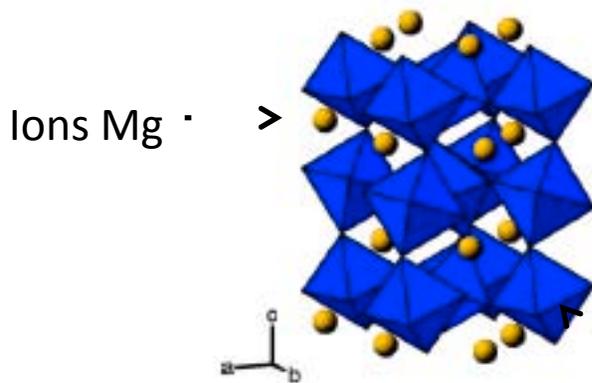
- Pour interpréter l'anisotropie en termes de LPO on doit connaître:
  - 1- La structure cristalline et l'élasticité des composants de la  $D''$  au niveau microscopique
  - 2 -Les systèmes de glissement au niveau macroscopique
  - 3 -Le champ de déformation auquel sont soumis ces matériaux (-> dynamique)

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

- Perovskite ( $\text{MgSiO}_3$  avec 10% Fe et quelques % Al) - phase la plus abondante dans le manteau inférieur

- Structure orthorhombique (9 const. élastiques)

$\text{MgSiO}_3$  pv

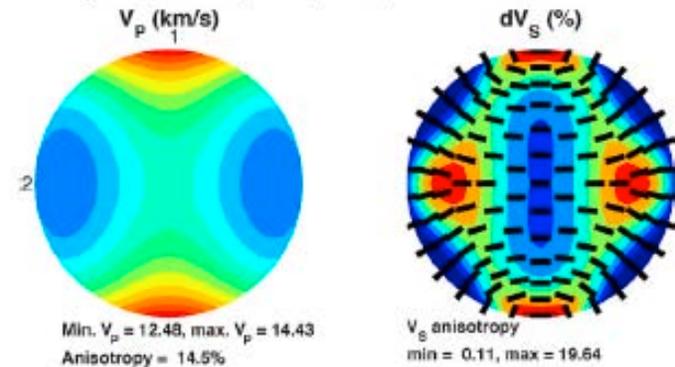


Octaèdres  $\text{SiO}_6$

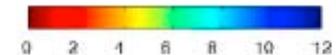
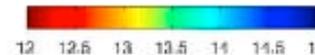
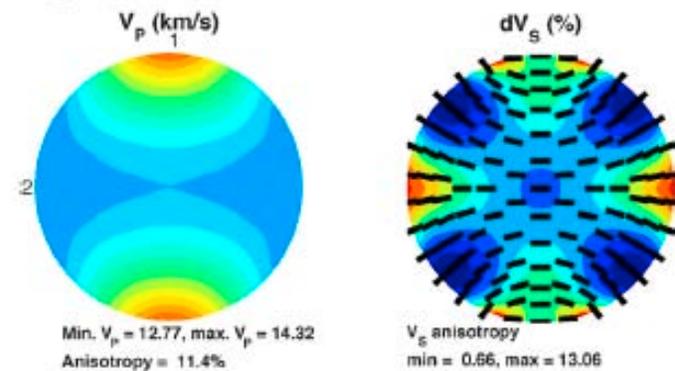
*Nowacki et al., 2011*

## Propriétés élastiques calculées ab initio

$\text{MgSiO}_3$ , Wookey et al., 2005,  $P=126$  GPa,  $T=2800$  K



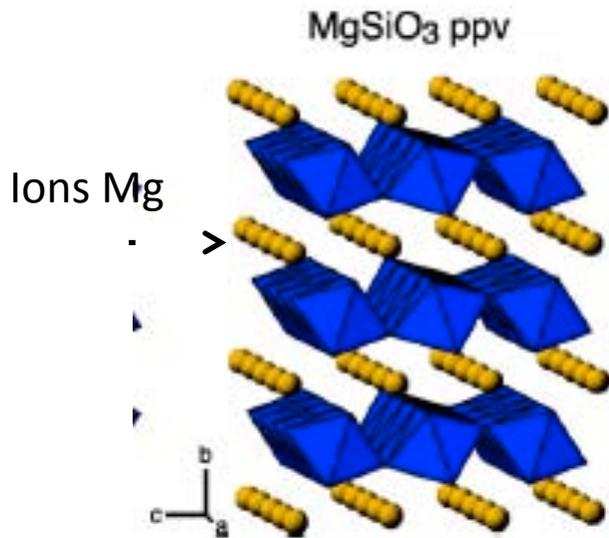
$\text{MgSiO}_3$ , Wentzcovitch et al., 2006,  $P=125$  GPa,  $T=2500$  K



Max  $\delta V_s$  13-20%

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

Post-Perovskite: plus anisotrope que Pv



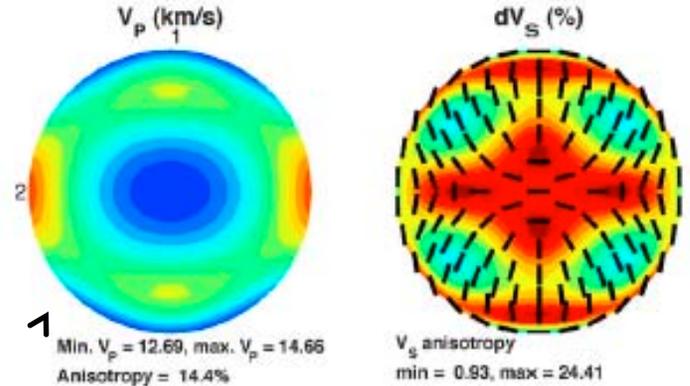
Ab initio MgSiO<sub>3</sub>

Expérimental (Mg<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.4</sub>)SiO<sub>3</sub>

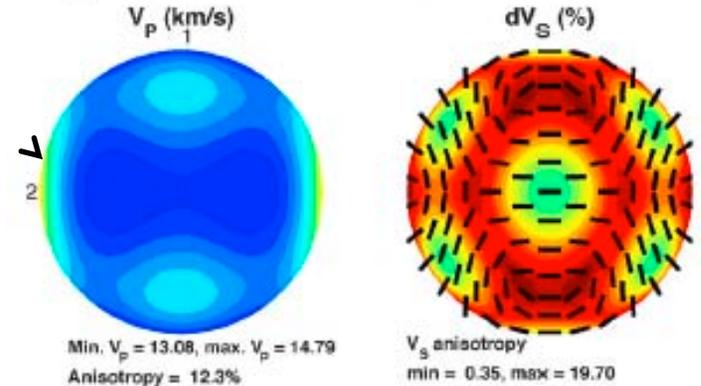
Max δVs 42%

Nowacki et al., 2011

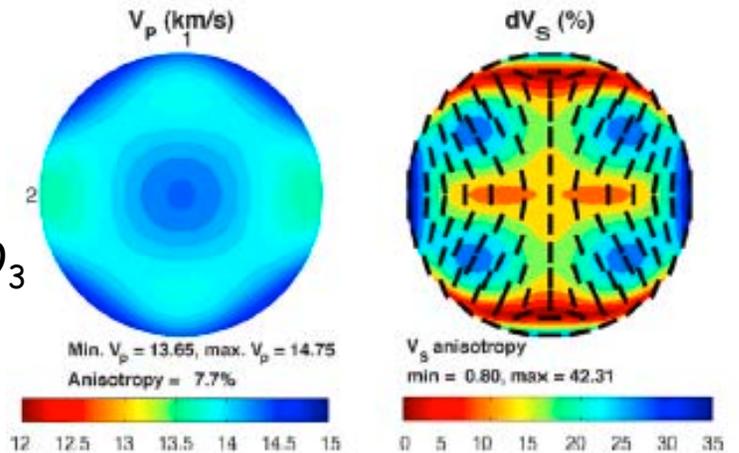
MgSiO<sub>3</sub>, Stackhouse et al., 2005, P=135 GPa, T=4000 K



MgSiO<sub>3</sub>, Wentzcovitch et al., 2006, P=140 GPa, T=4000 K

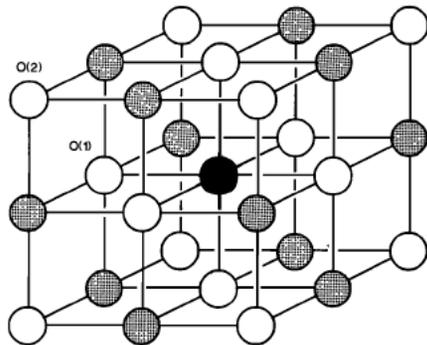


(Mg<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.4</sub>)SiO<sub>3</sub>, Mao et al., 2010, P=140 GPa, T=2000 K



- 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



Expérimental  
T=0°C

