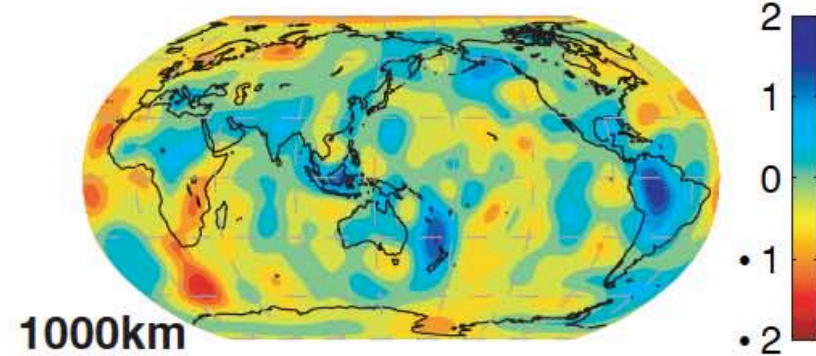
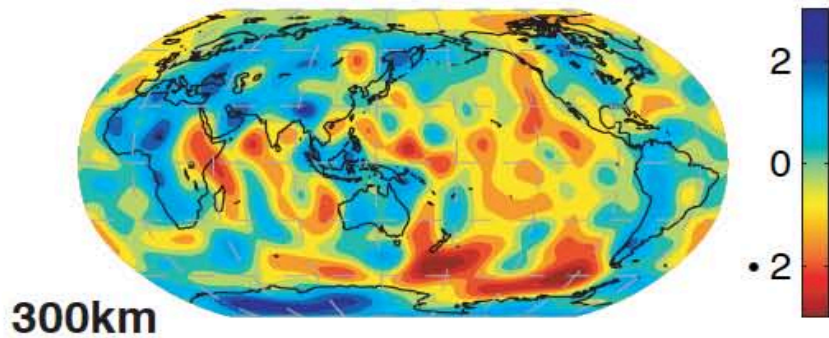
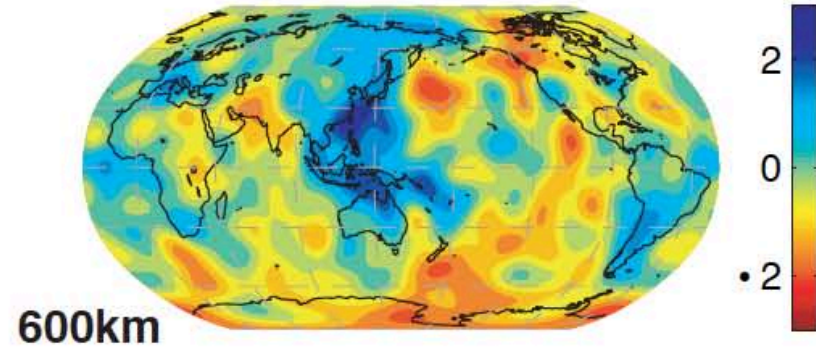
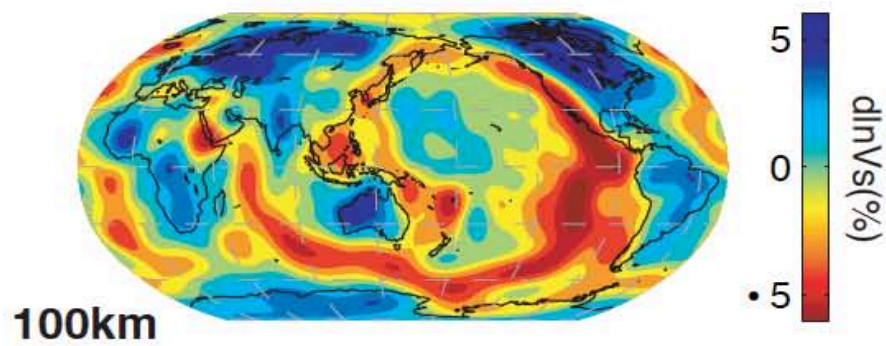


# Structure et dynamique du manteau profond de la terre

## 3- Les super-panaches ou LLSVP

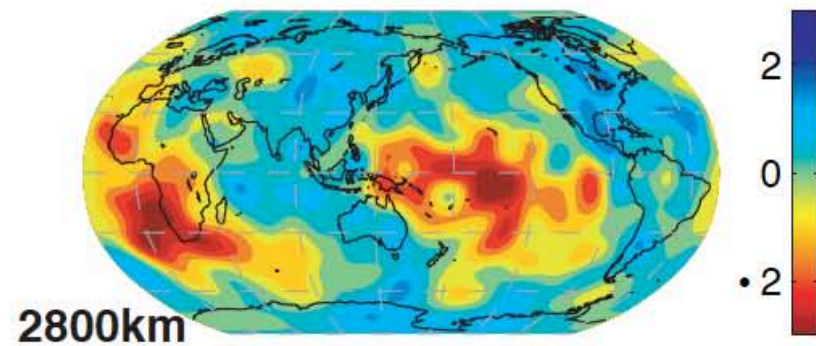
Barbara Romanowicz - Cours 2012  
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre  
Collège de France  
15 Octobre 2012

# Coupes horizontales à travers le manteau

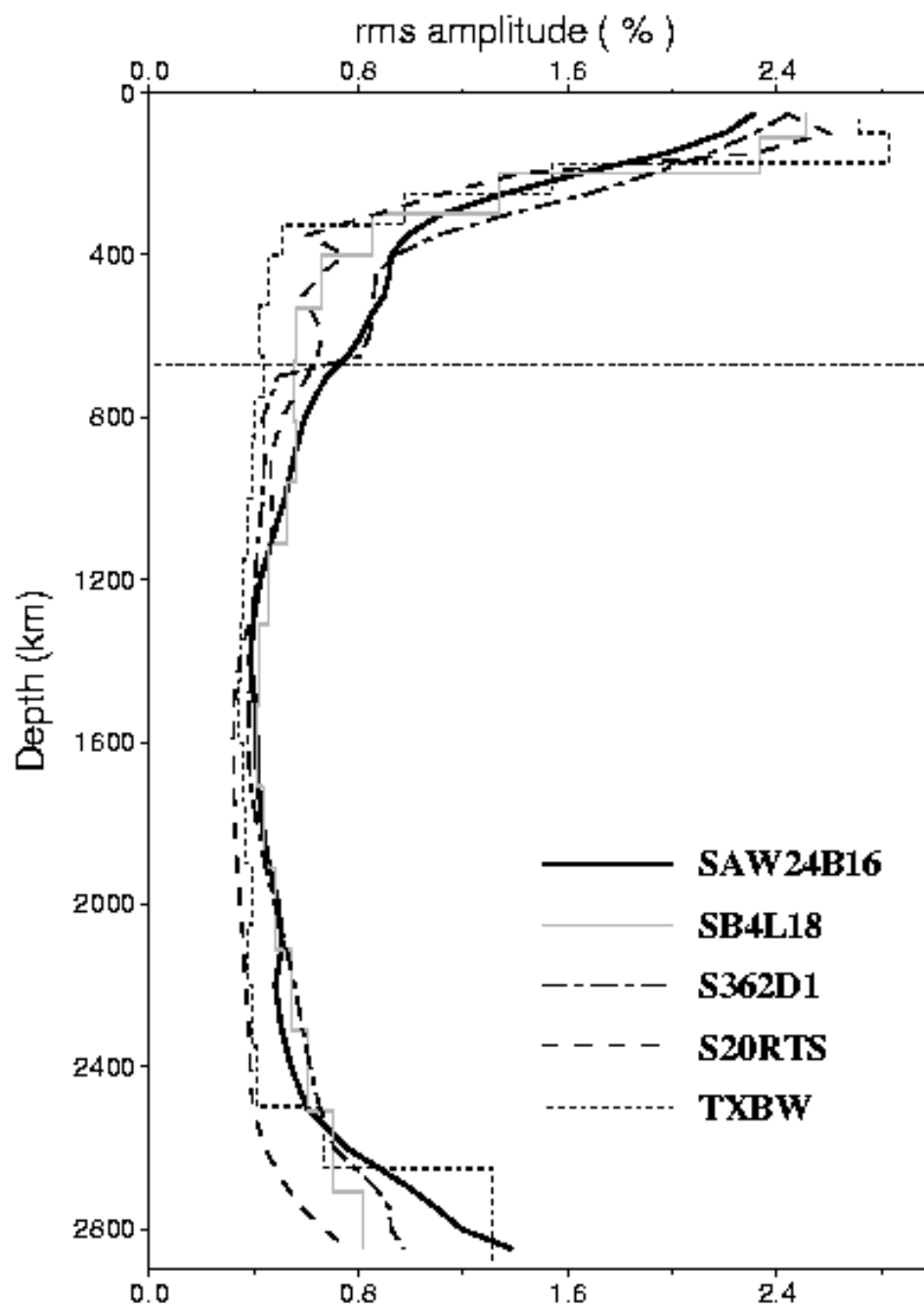


Bleu = rapide ~ froid

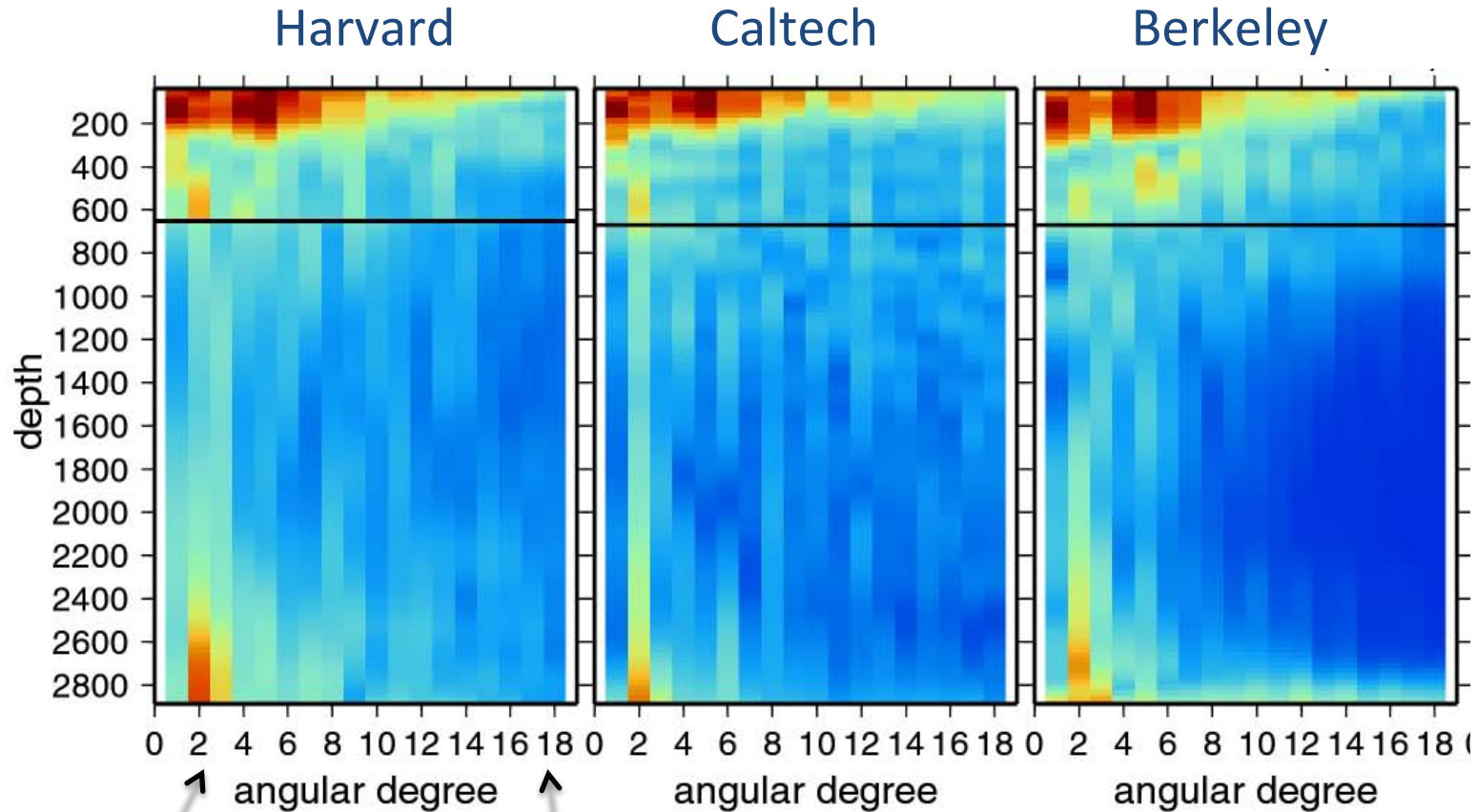
Rouge = lent ~ chaud



Amplitude rms  
des variations  
latérales des  
vitesses  
d'ondes S en  
fonction de la  
profondeur



# Spectre de puissance de 3 modèles

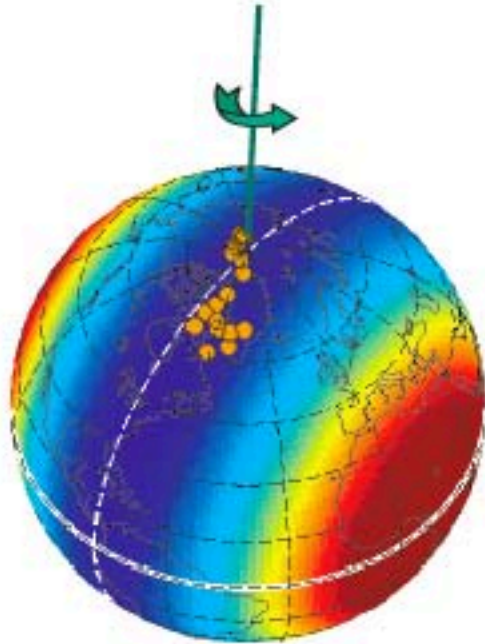


Grandes longueurs  
d'onde

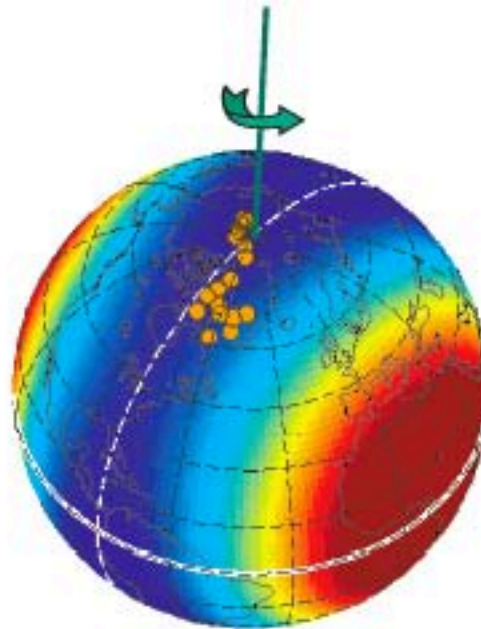
Courtes longueurs  
d'onde

# Composante de la structure en "Degré 2"

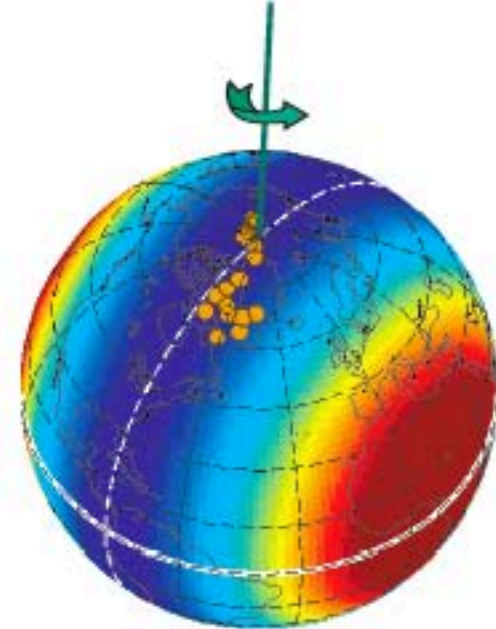
S362ANI



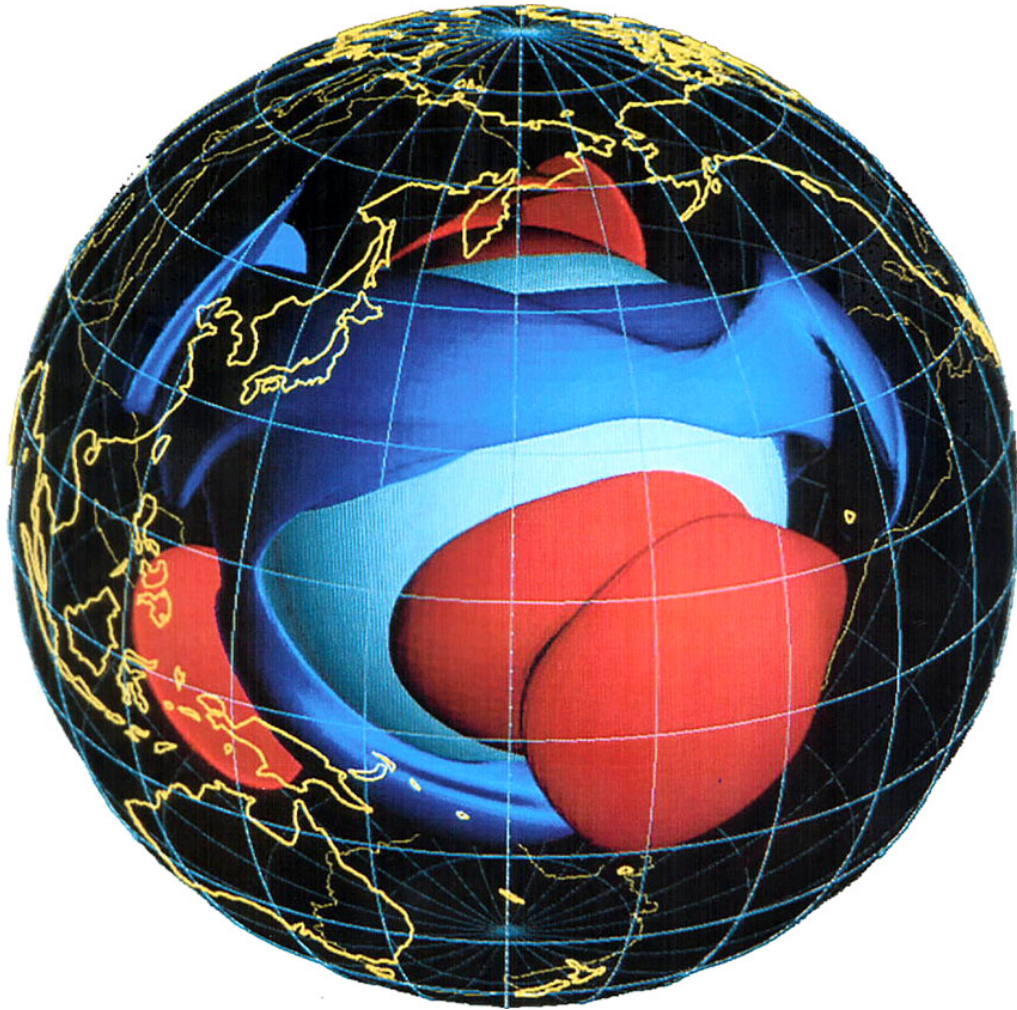
SAW24B16



S20RTS

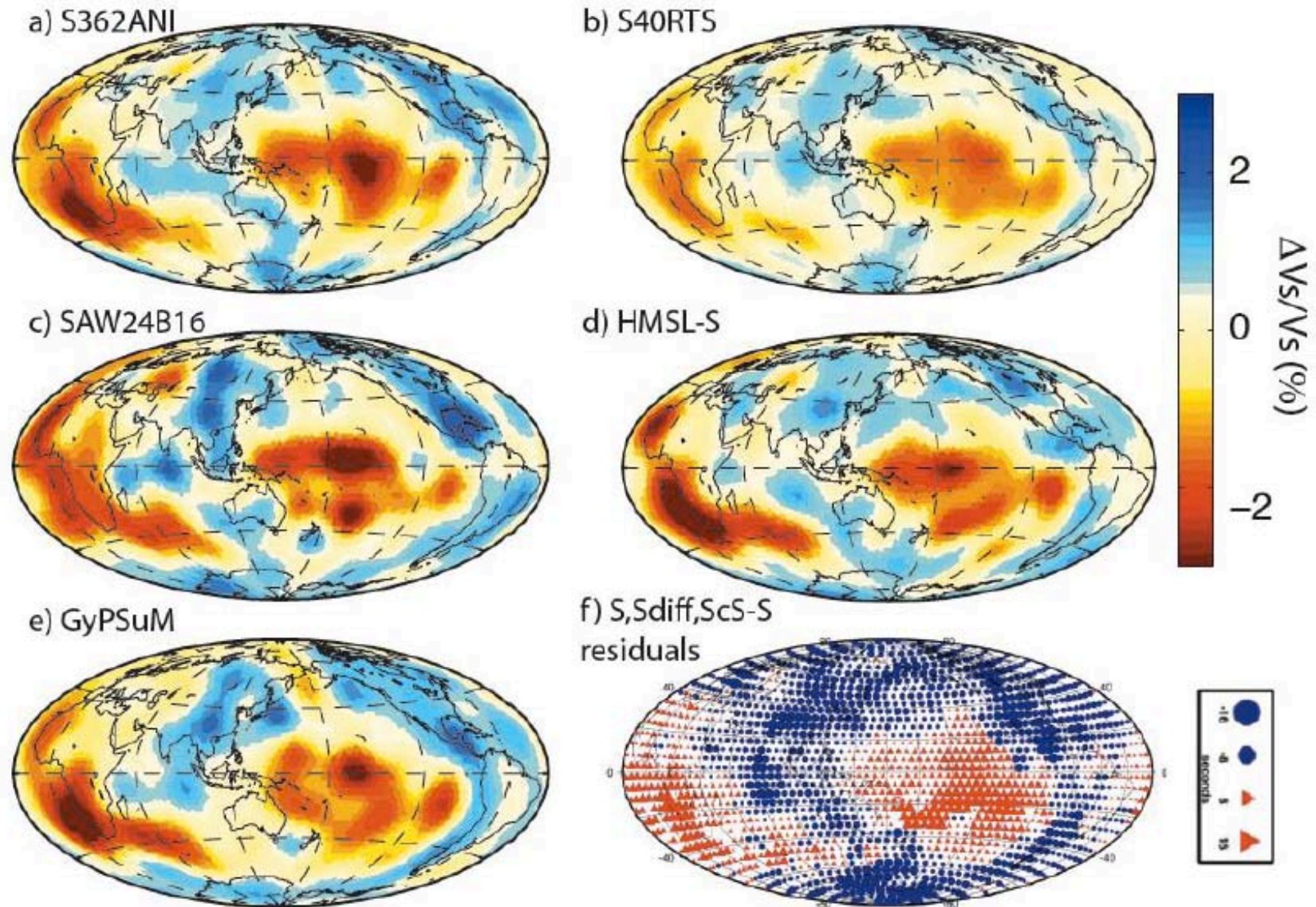


● Paleo-pole locations (Besse and Courtillot, 2002)

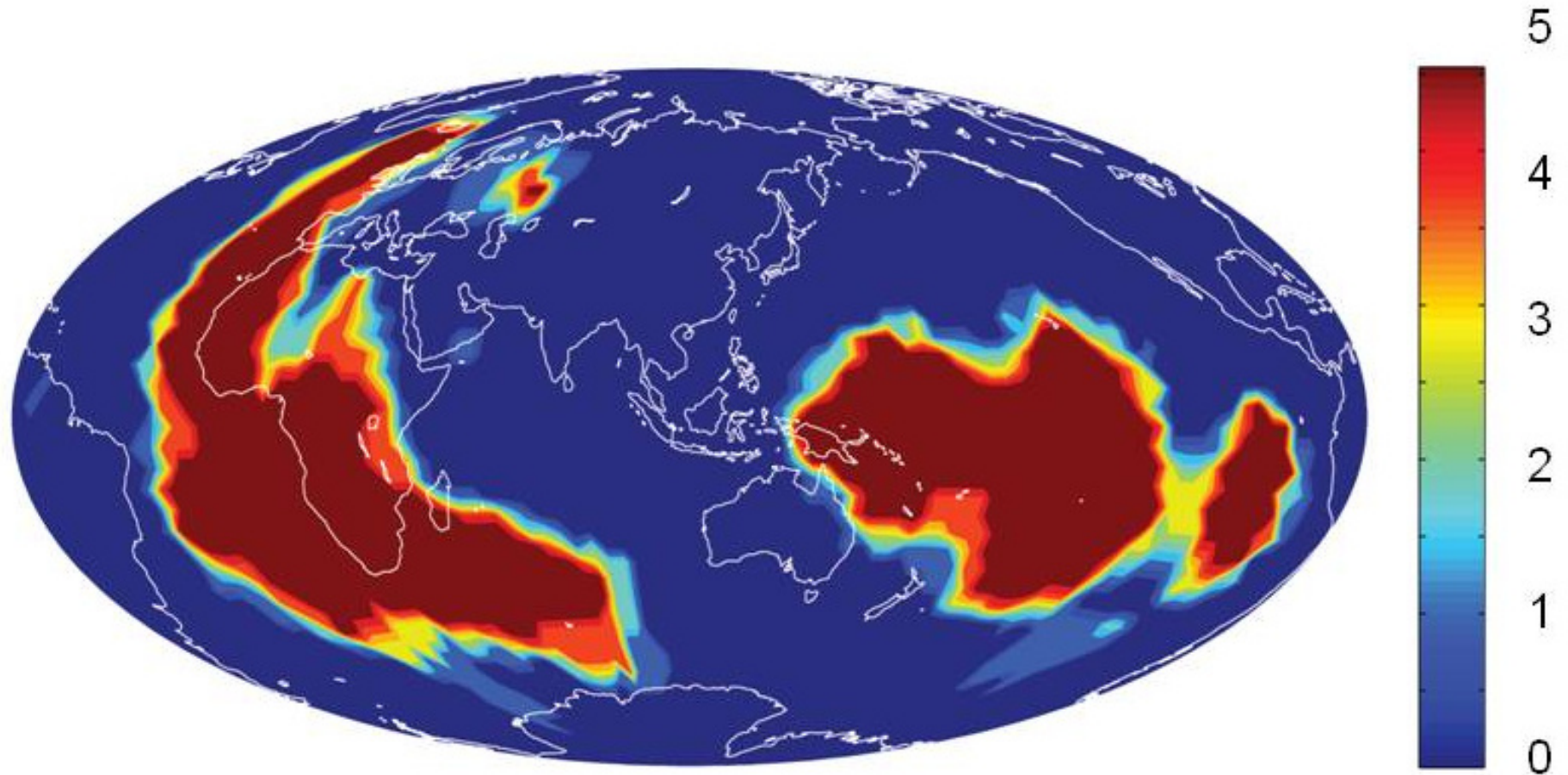


Méga-panache  
du  
Pacifique  
et  
anneau de vitesses  
rapides qui l'entoure

# Vs à la profondeur 2800 km



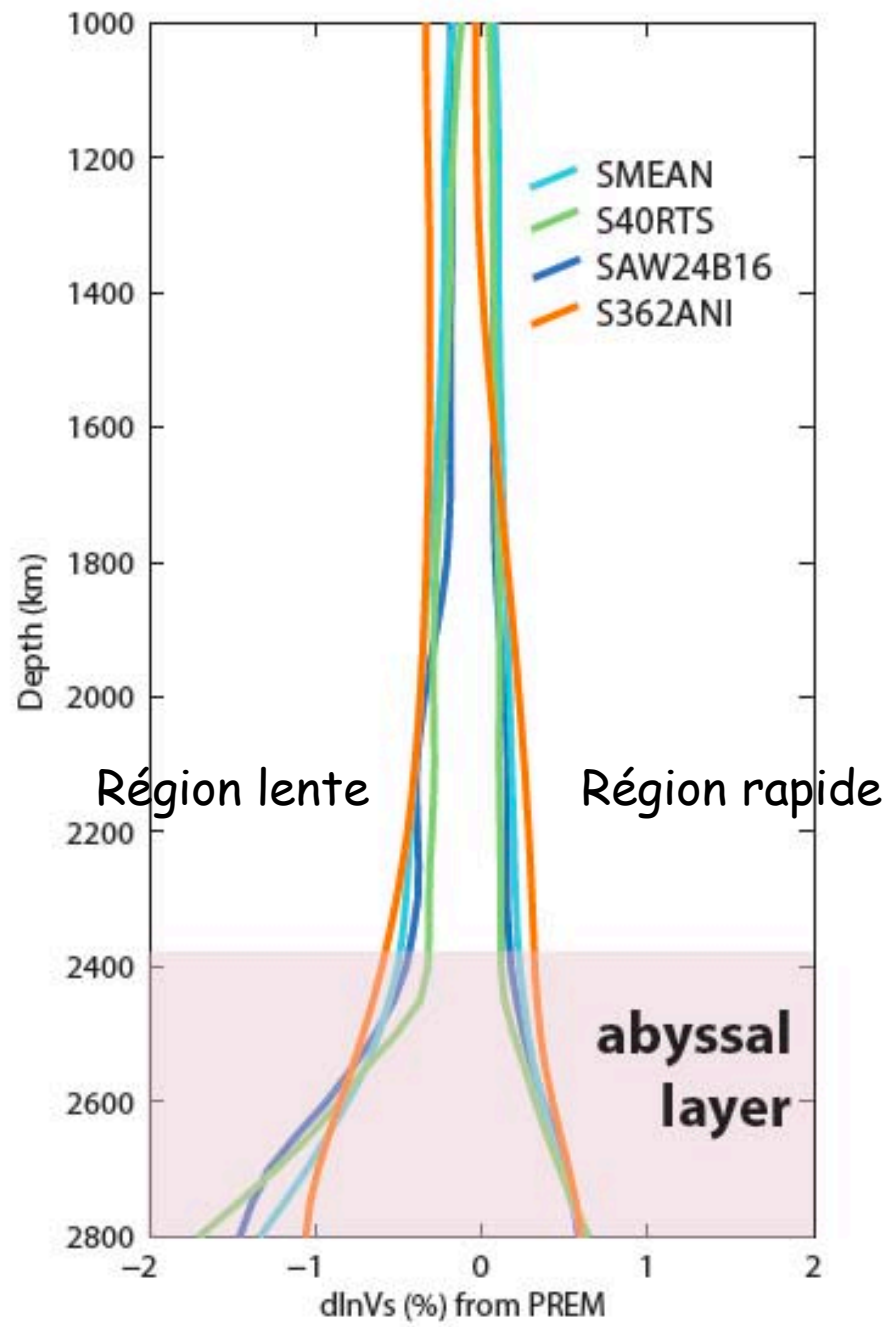
## 5 Vs Tomographic global models



*Lekic et al., 2012*

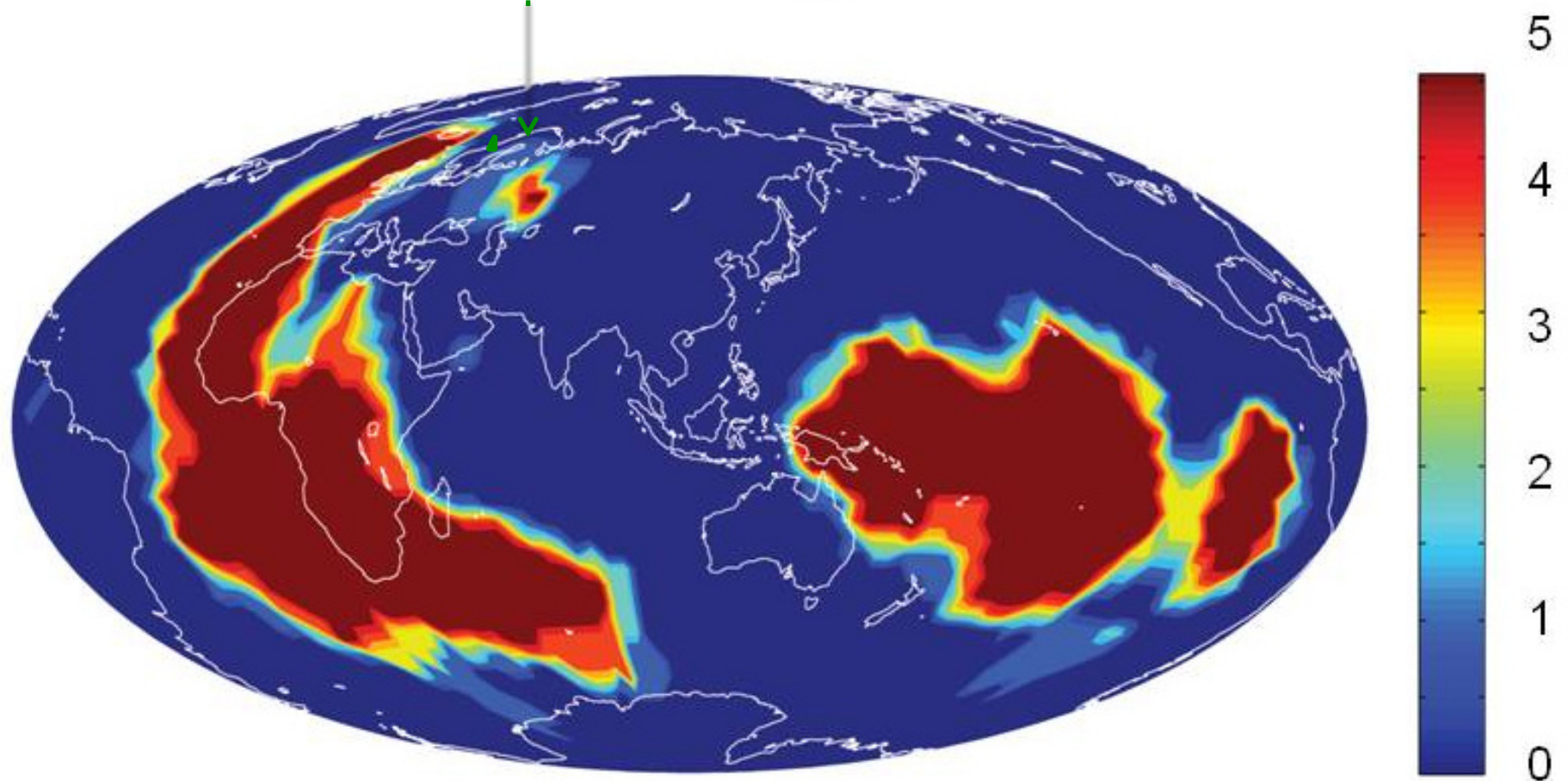


Profils de vitesse  
à la base du manteau

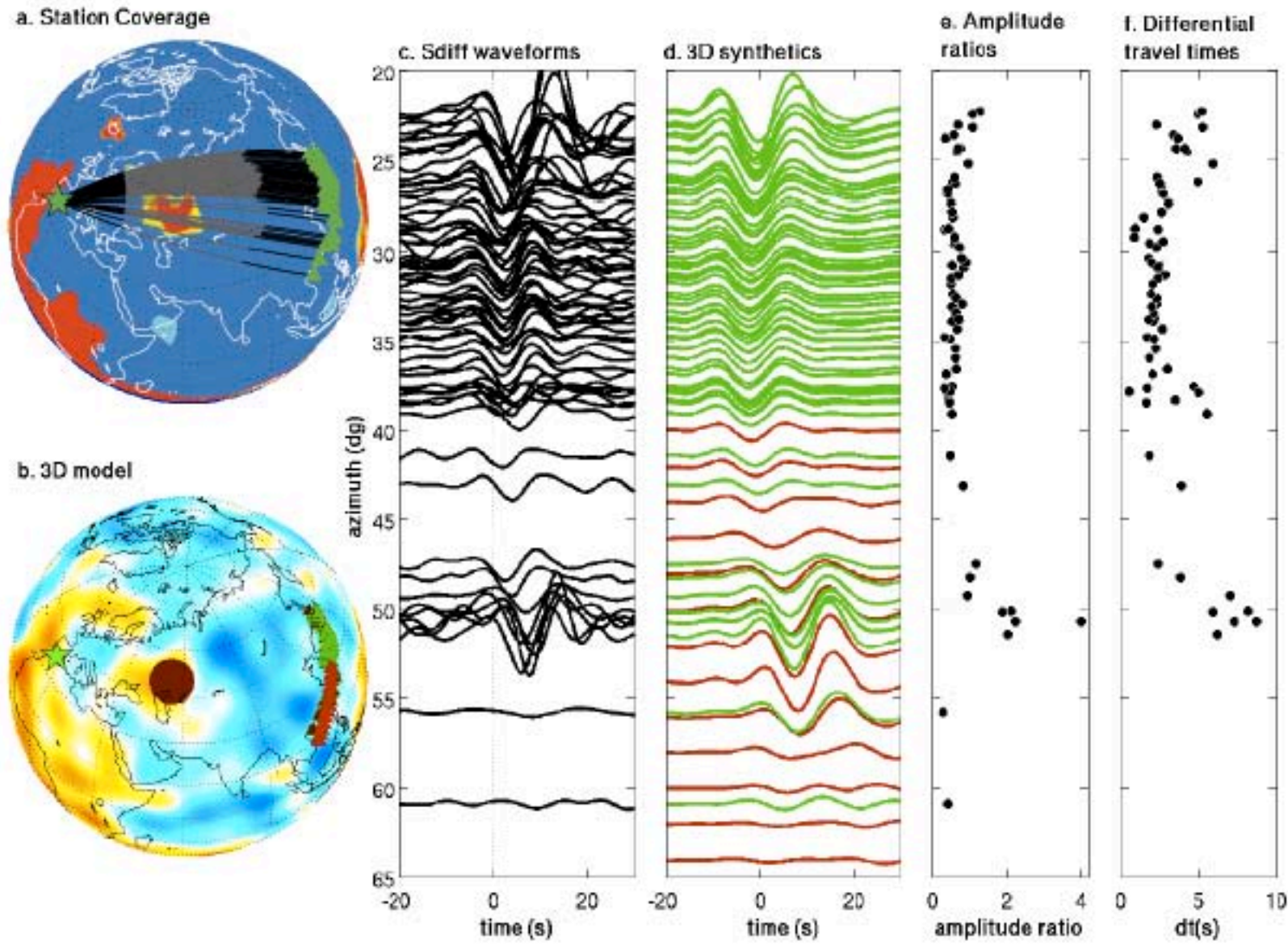


## 5 modèles globaux tomographiques S

Anomalie de Perm - proche du lieu d'éruption des trappes de Sibérie



# Effets de l'anomalie de Perm sur la forme d'onde des ondes diffractées



Lekic et al., 2012

# Caractéristiques sismiques des méga-panaches sous le Pacifique et l'Afrique

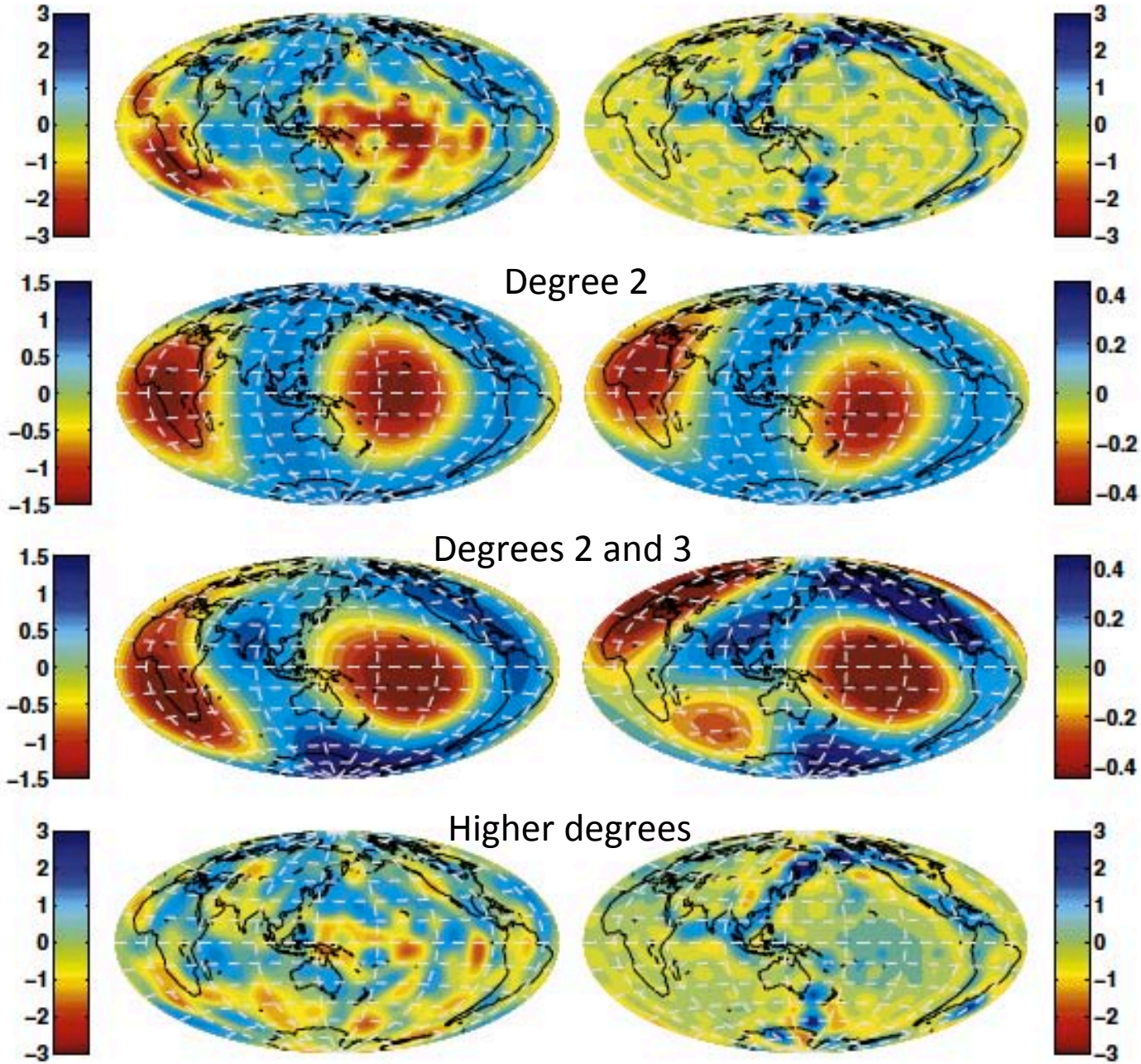
- Relation avec la structure du manteau supérieur
- Bords abrupts
- Anticorrélation de la vitesse  $V_\phi$  et de la vitesse  $V_S$  (*Su and Dziewonski, 1997; Masters et al., 2000*)
- Anticorrélation possible de la densité et de la vitesse des ondes  $S$  (*Ishii and Tromp, 2000, Trampert et al., 2004*)
- Discontinuité de la  $D''$  et transition de phase  $pPv$
- Anisotropie
- ULVZ's

# Caractéristiques sismiques des méga-panaches sous le Pacifique et l'Afrique

- Relation avec la structure du manteau supérieur
- Bords abrupts
- Anticorrélation de la vitesse  $V_p$  et de la vitesse  $V_s$   
(*Su and Dziewonski, 1997; Masters et al., 2000*)
- Anticorrélation possible de la densité et de la vitesse des ondes  $S$  (*Ishii and Tromp, 2000, Trampert et al., 2004*)
- Discontinuité de la  $D''$  et transition de phase  $pPv$
- Anisotropie
- ULVZ's

S model Depth=2800 km

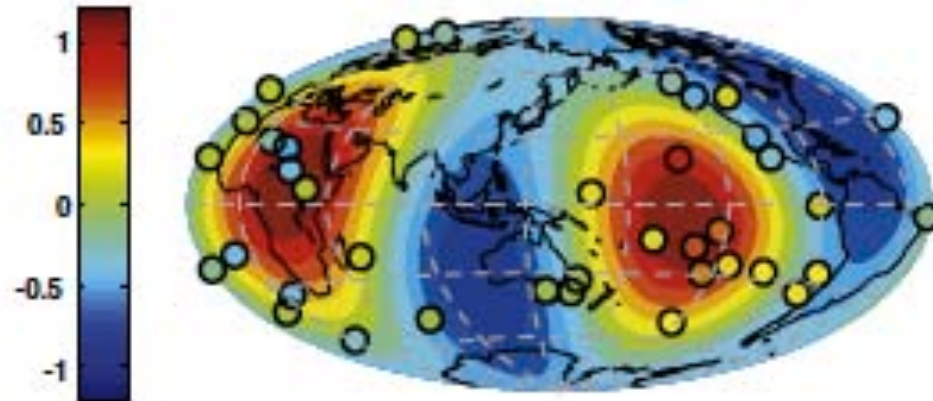
Integrated slab model



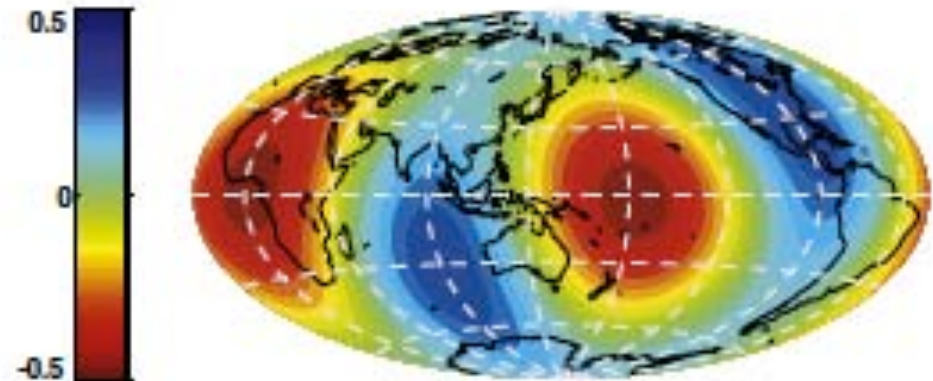
*Dziewonski  
et al., 2010*

# Structure en degré 2

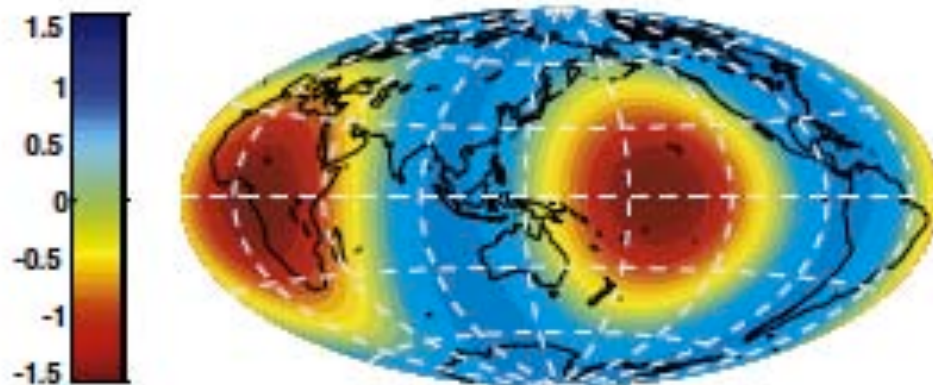
Distribution  
des points chauds



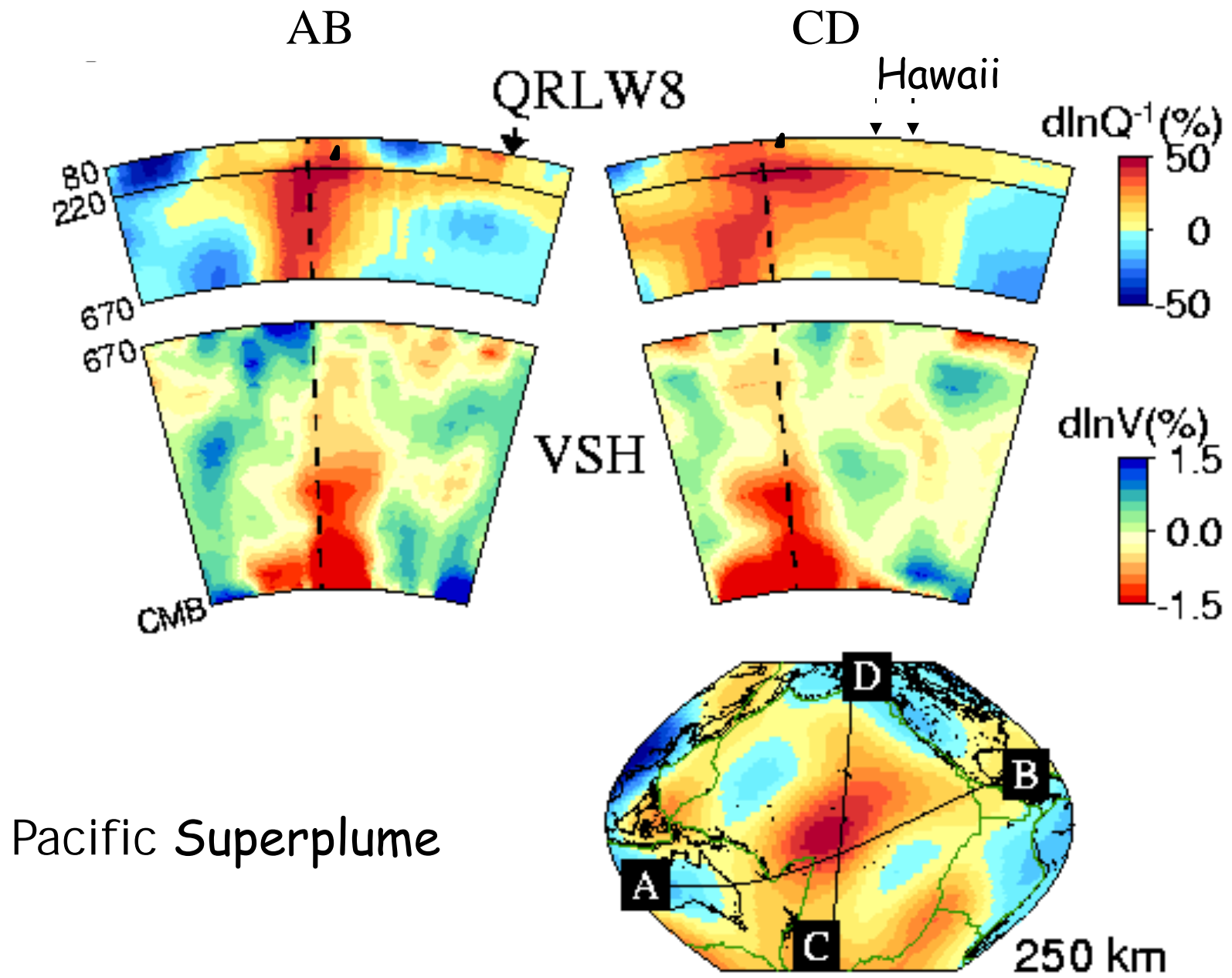
Attenuation des ondes S  
à 600km de profondeur  
QRLW8  
(Gung and Romanowicz, 2004)



Vitesse des ondes S  
à 2800 km- S362ANI  
Kustowski et al., 2008



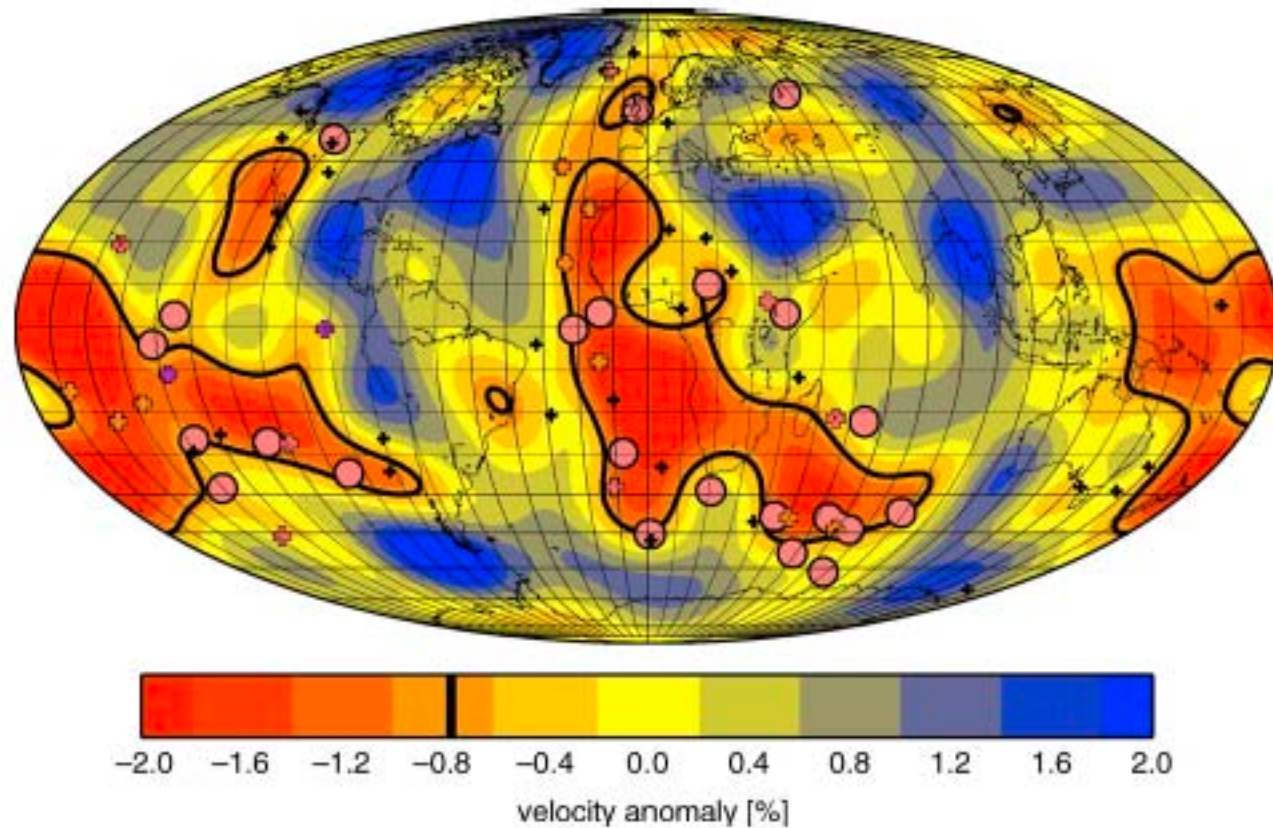
*Dziewonski et al., 2010*



Pacific Superplume



# Correlation avec les trapps volcaniques et les points chauds



Modèle tomographique dans la D'': Kuo et al. (2000)

- Trapps volcaniques
- + points chauds

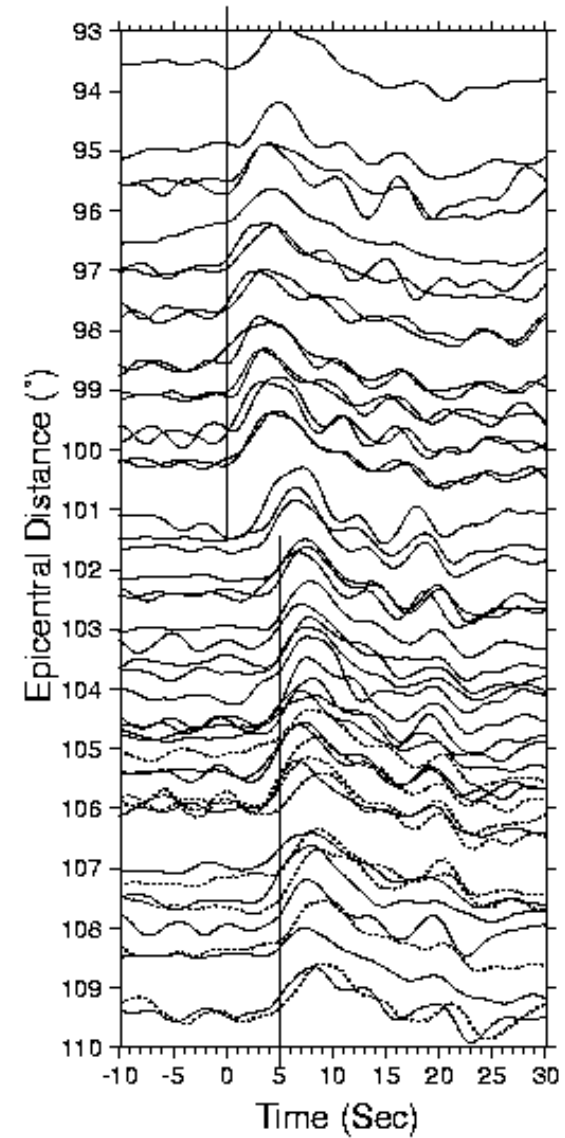
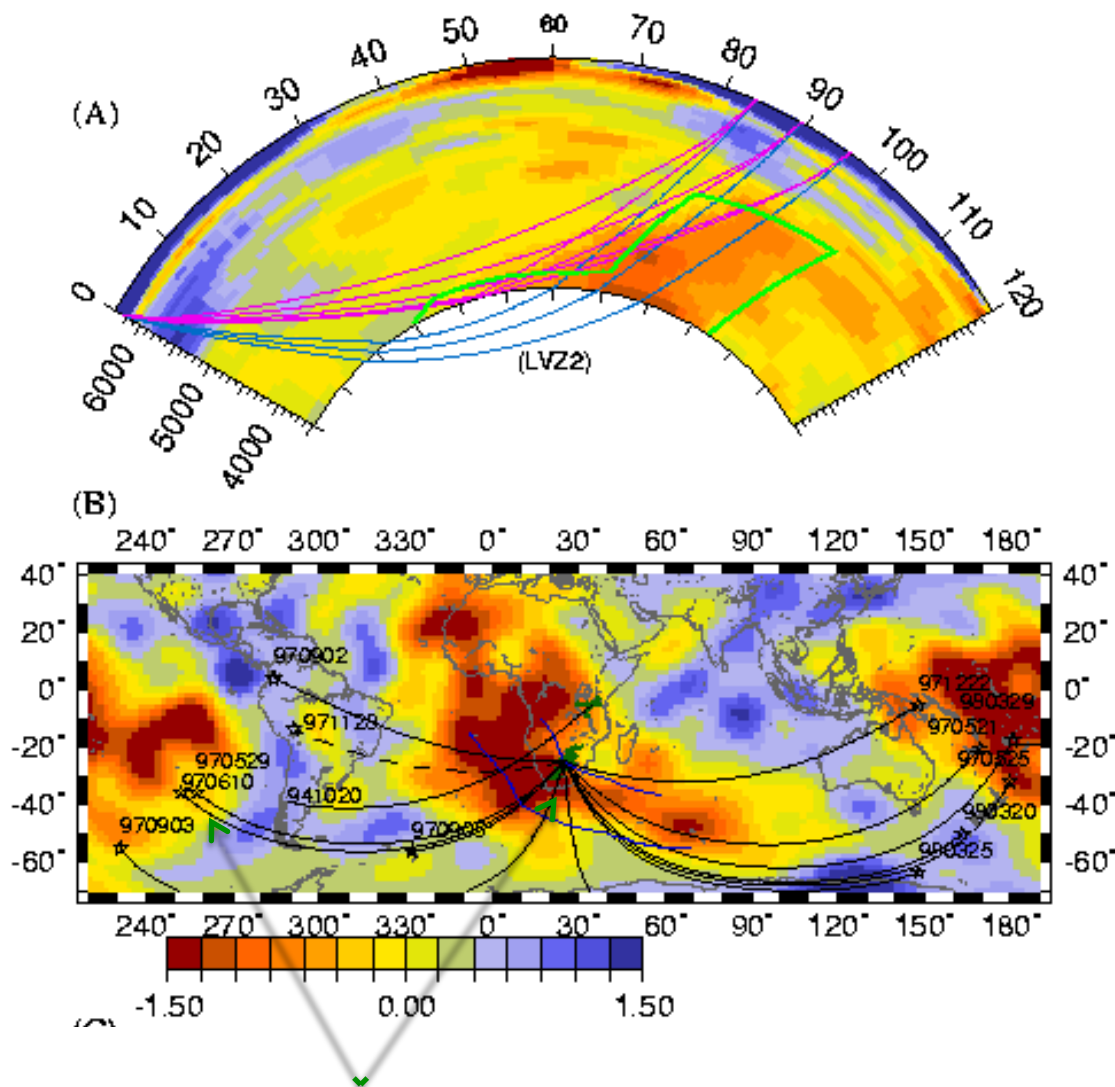
*Burke et al., 2008*

# Caractéristiques sismiques des méga-panaches sous le Pacifique et l'Afrique

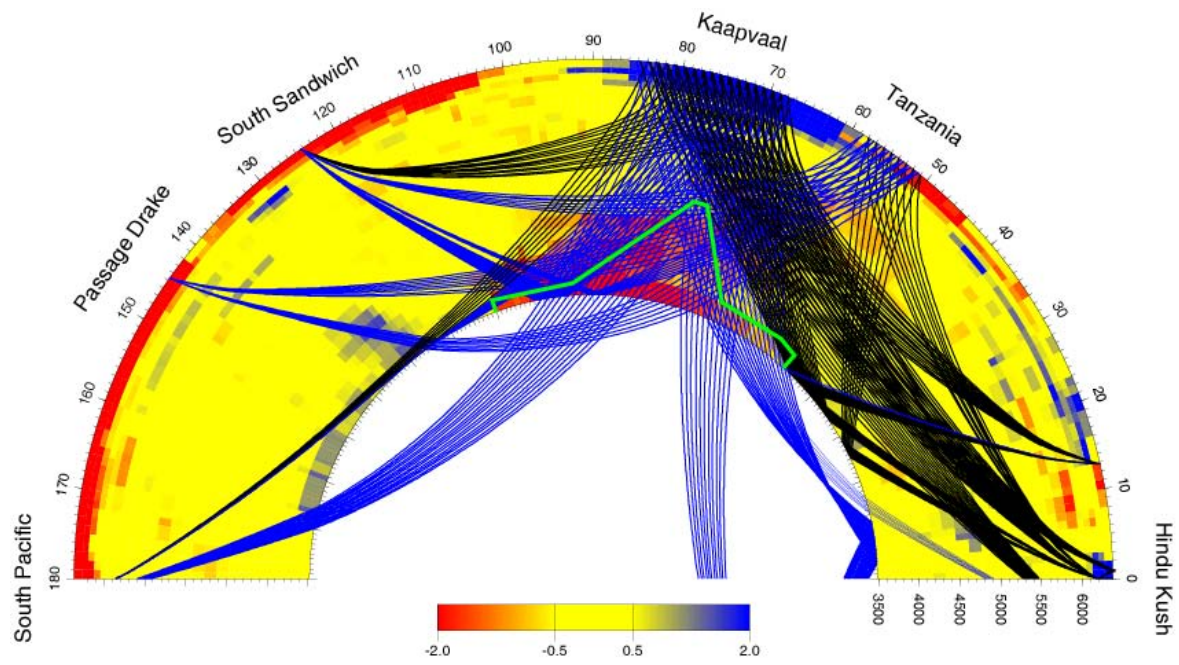
- Relation avec la structure du manteau supérieur
- Bords abrupts
- Anticorrélation de la vitesse  $V_p$  et de la vitesse  $V_s$   
(*Su and Dziewonski, 1997; Masters et al., 2000*)
- Anticorrélation possible de la densité et de la vitesse des ondes  $S$  (*Ishii and Tromp, 2000, Trampert et al., 2004*)
- Discontinuité de la  $D''$  et transition de phase  $pPv$
- Anisotropie
- ULVZ's

# Bord abrupt du méga-panache africain

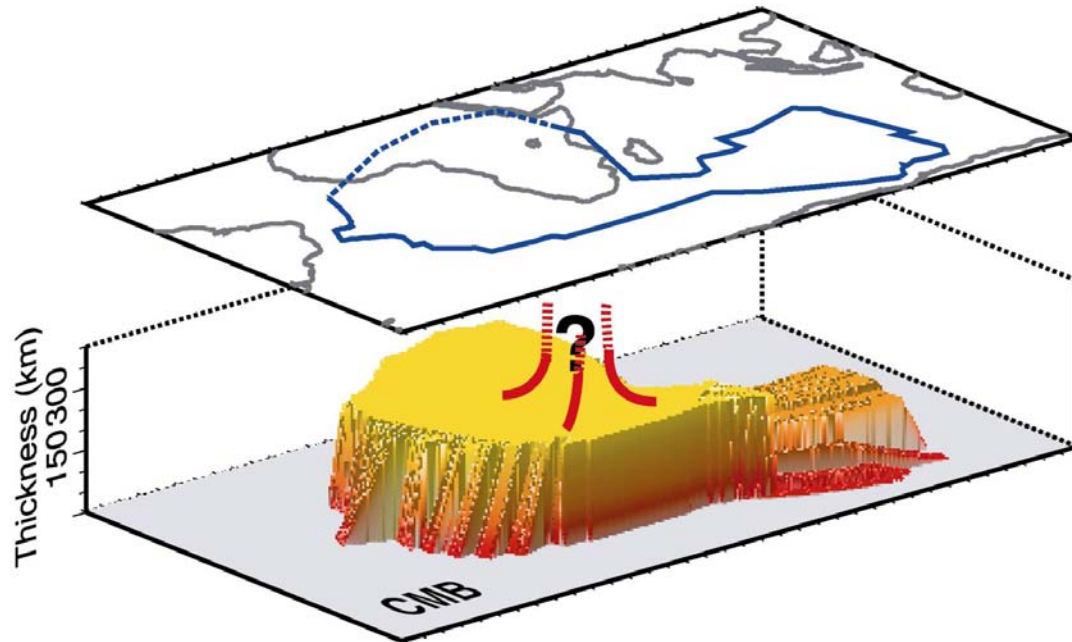
970529, aligned on IASP91



Ni et al., 2003

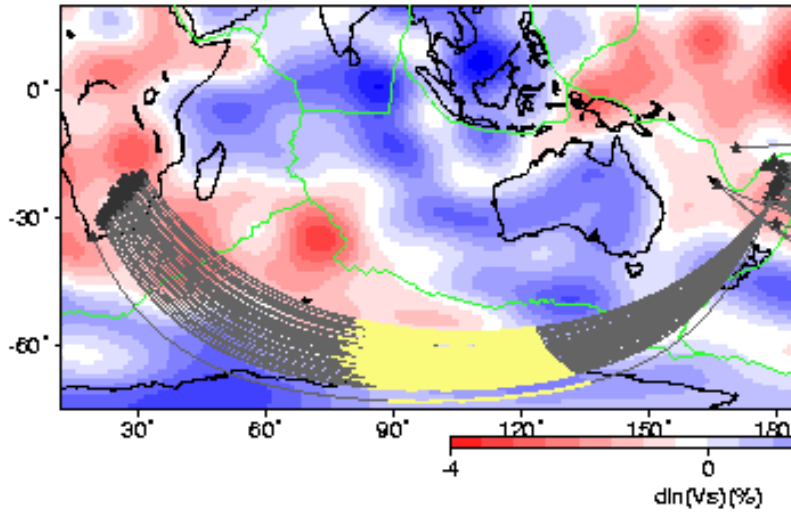


$d \ln V_s \sim$   
 $-3 \rightarrow -12\%$

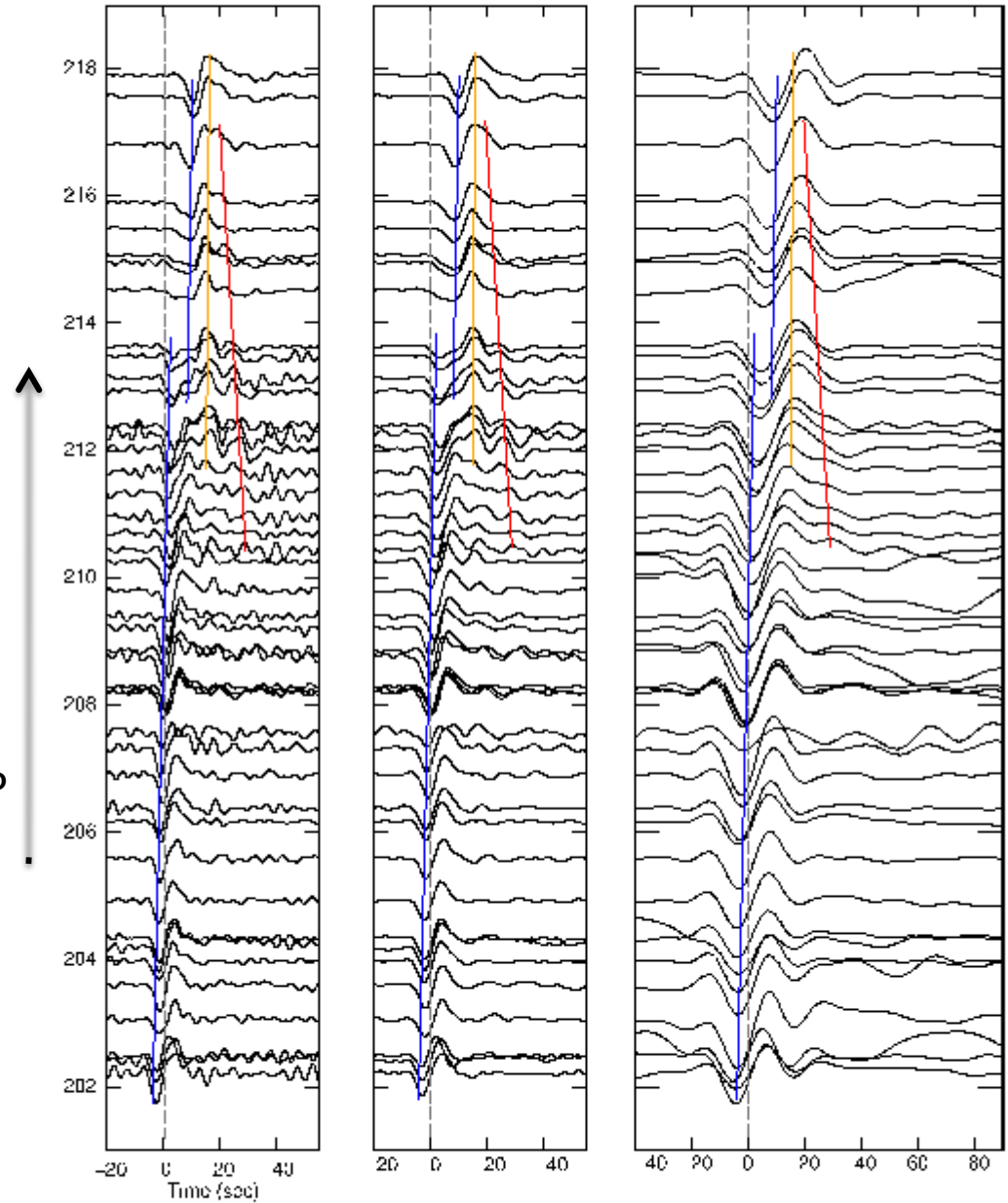


*Ni et al., 2003*

# Trajets dans l'océan indien - Sdiff



Into the LLSVP



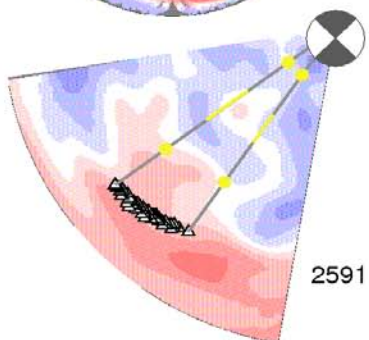
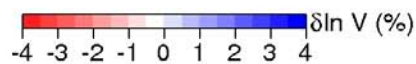
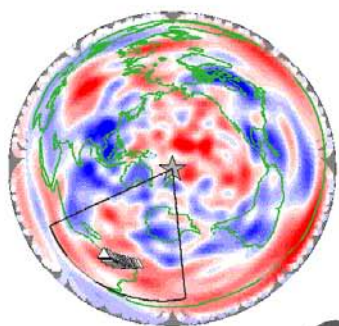
To et al, EPSL, 2005

Corner frequencies: 2sec,

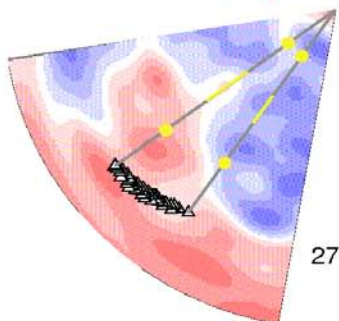
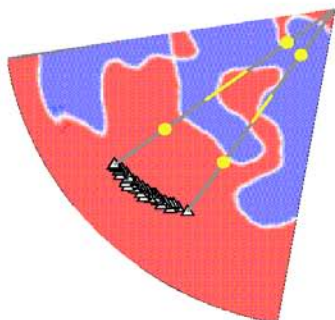
5sec,

18 sec

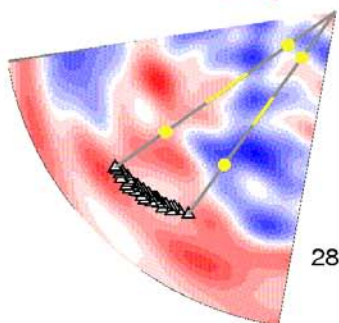
To et al., EPSL, 2005



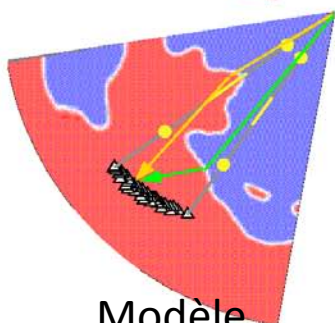
2591 km



2741 km



2891 km



Modèle tomographique

Modèle modifié

Distance Azimuth

124.0	217.9
124.5	217.6
124.2	216.9
123.4	216.8
122.5	216.0
124.1	215.9
122.9	215.5
125.1	215.1
124.3	215.0
122.1	214.5
122.5	213.6
123.8	213.5
125.2	213.1
122.9	212.9
125.6	212.4
122.2	212.3
123.6	212.0
121.4	211.7
122.7	211.3
123.9	211.0
121.9	210.7
123.4	210.4
121.1	210.3
122.3	209.8
123.8	209.4
122.5	209.3
121.4	209.2
122.8	208.9
120.5	208.8
124.0	208.3
123.1	208.2
121.8	208.2
120.9	207.6
120.3	207.3
119.5	207.0
122.4	206.9
120.5	206.4
119.9	206.2
120.7	205.6
119.9	204.9
119.0	204.3
121.2	204.3
120.3	204.0
119.4	203.6
118.4	203.1
117.6	202.5
119.9	202.5
118.8	202.2
116.5	199.1

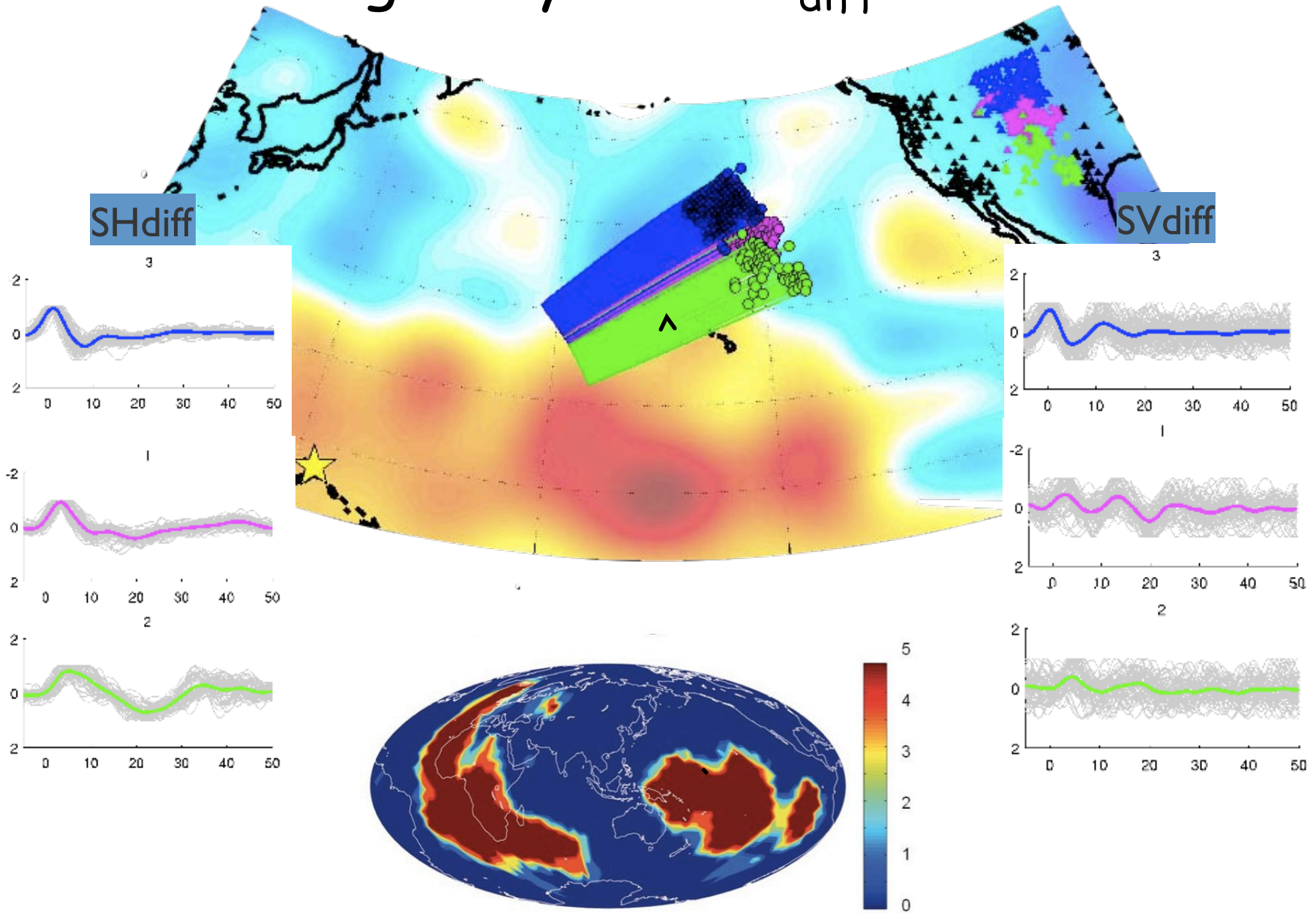
Modèle tomographique

Modèle modifié

Time(sec)

Time(sec)

# Clustering analysis of $S_{diff}$ waveforms



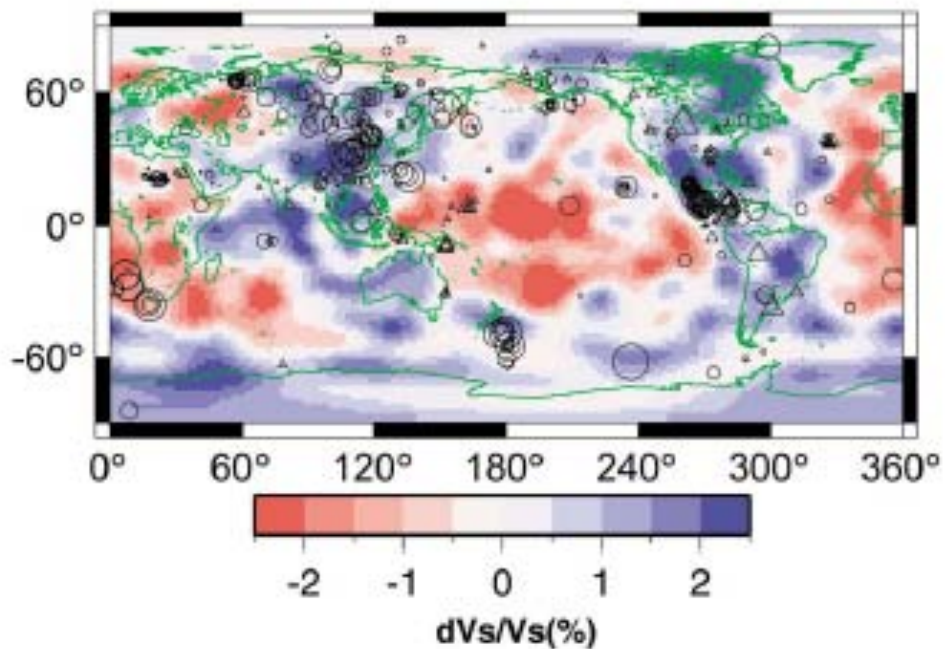
# Caractéristiques sismiques des méga-panaches sous le Pacifique et l'Afrique

- Relation avec la structure du manteau supérieur
- Bords abrupts
- Anticorrélation de la vitesse  $V_p$  et de la vitesse  $V_s$   
(*Su and Dziewonski, 1997; Masters et al., 2000*)
- Anticorrélation possible de la densité et de la vitesse des ondes  $S$  (*Ishii and Tromp, 2000, Trampert et al., 2004*)
- Discontinuité de la  $D''$  et transition de phase  $pPv$
- Anisotropie
- ULVZ's



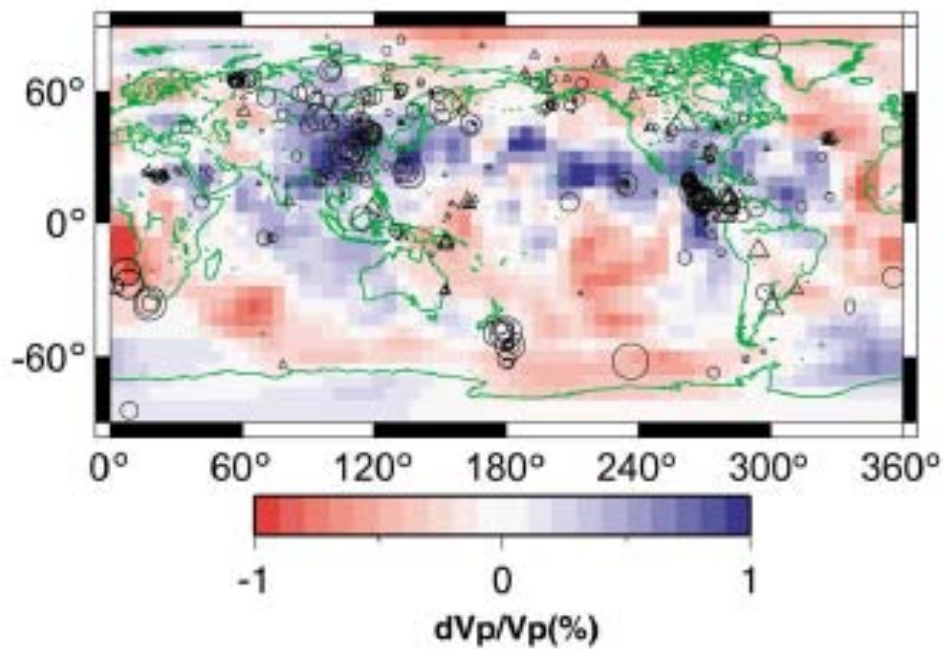
Profondeur = 2800 km

Modèle Vs



S velocity

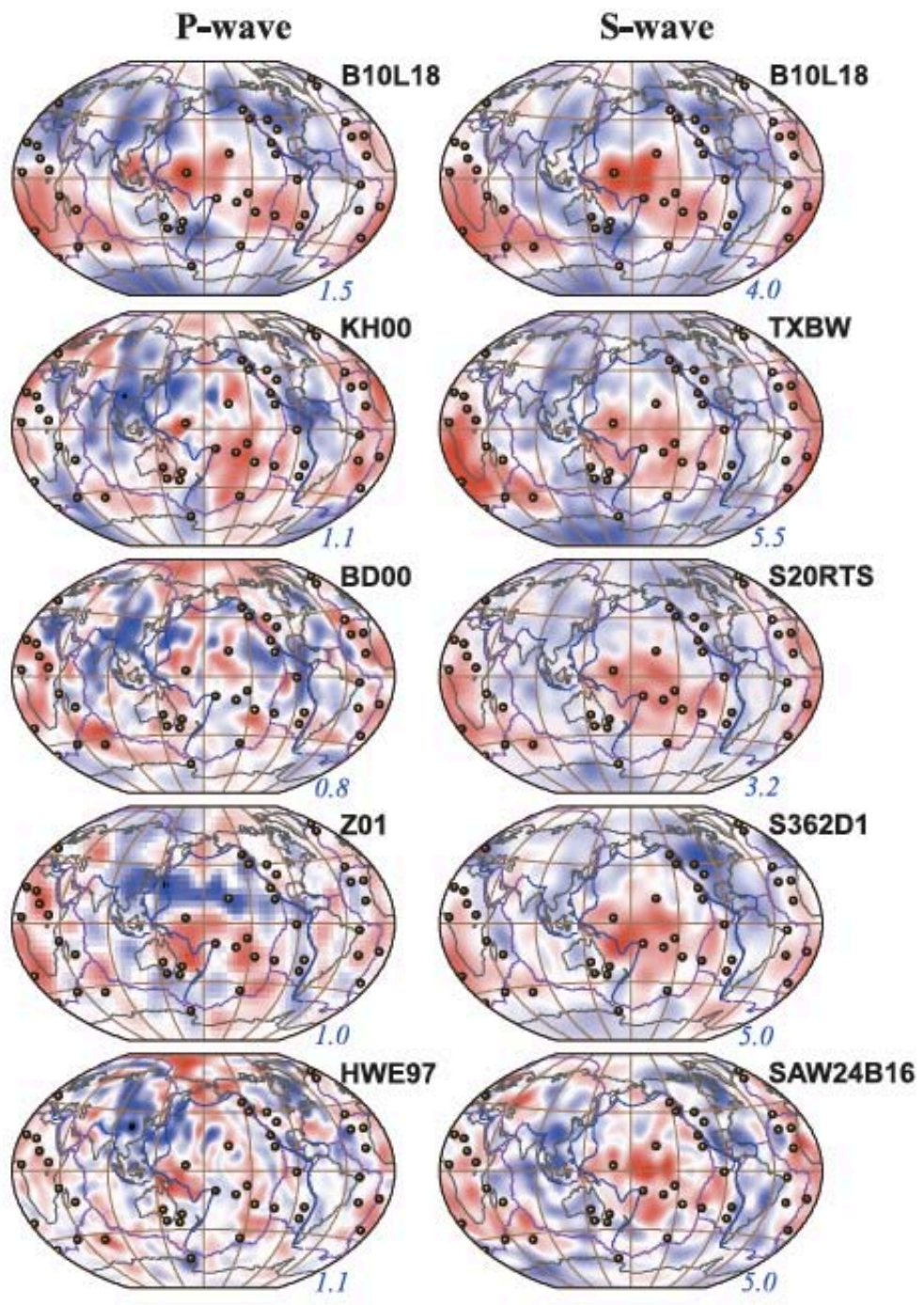
Modèle Vp



P velocity

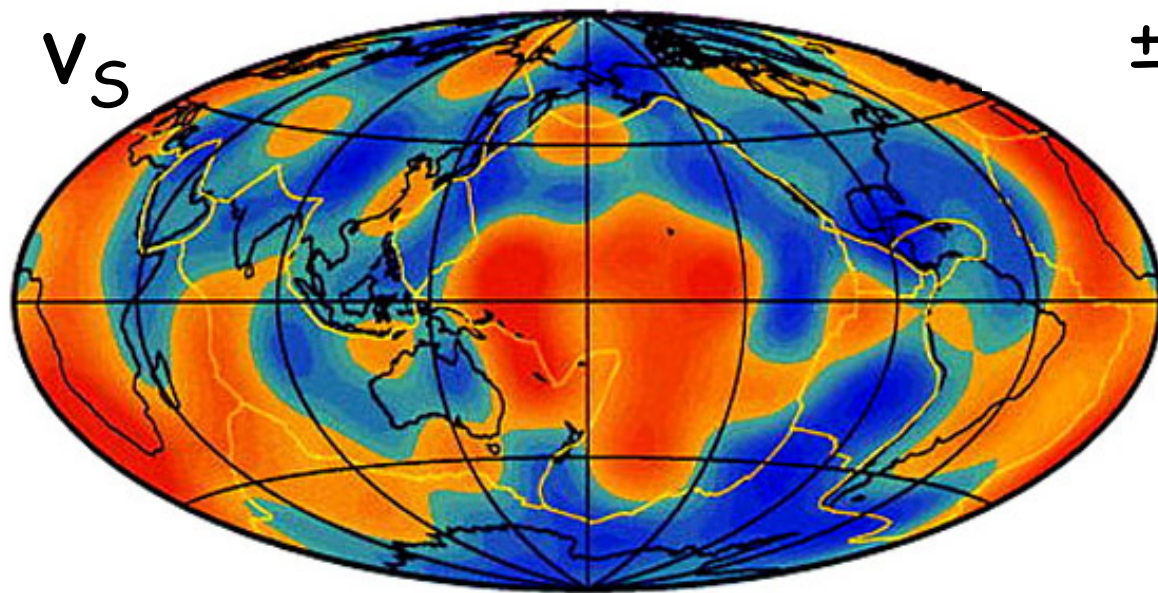
*Tkalcic et al., 2002*

Depth = 2800 km

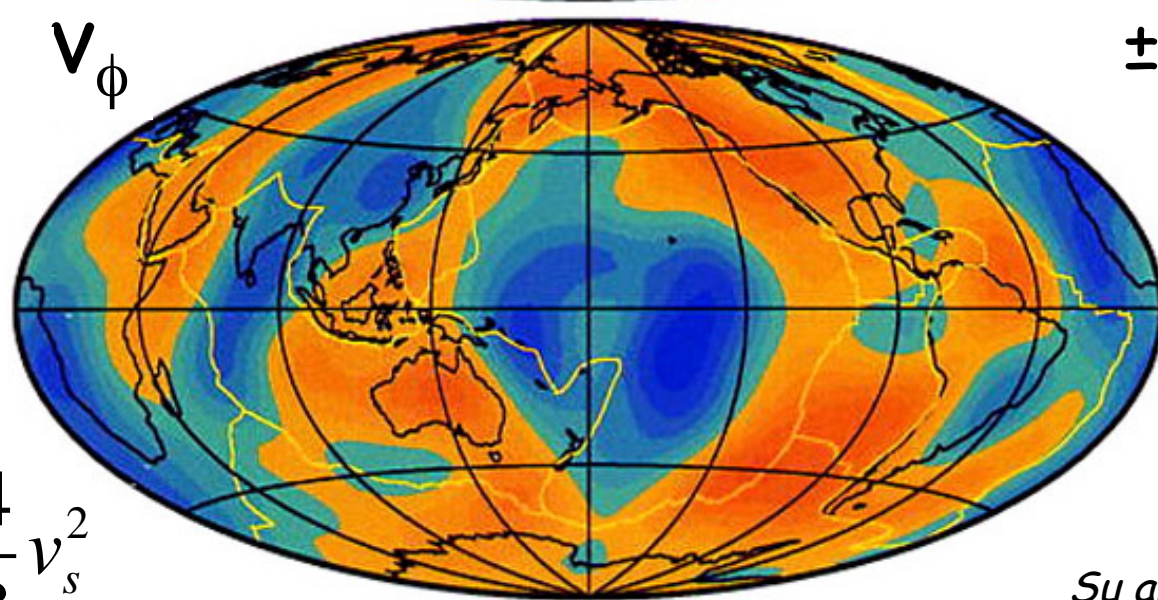


Lay and  
Garnero, 2007

# Shear and bulk velocity at 2800 km



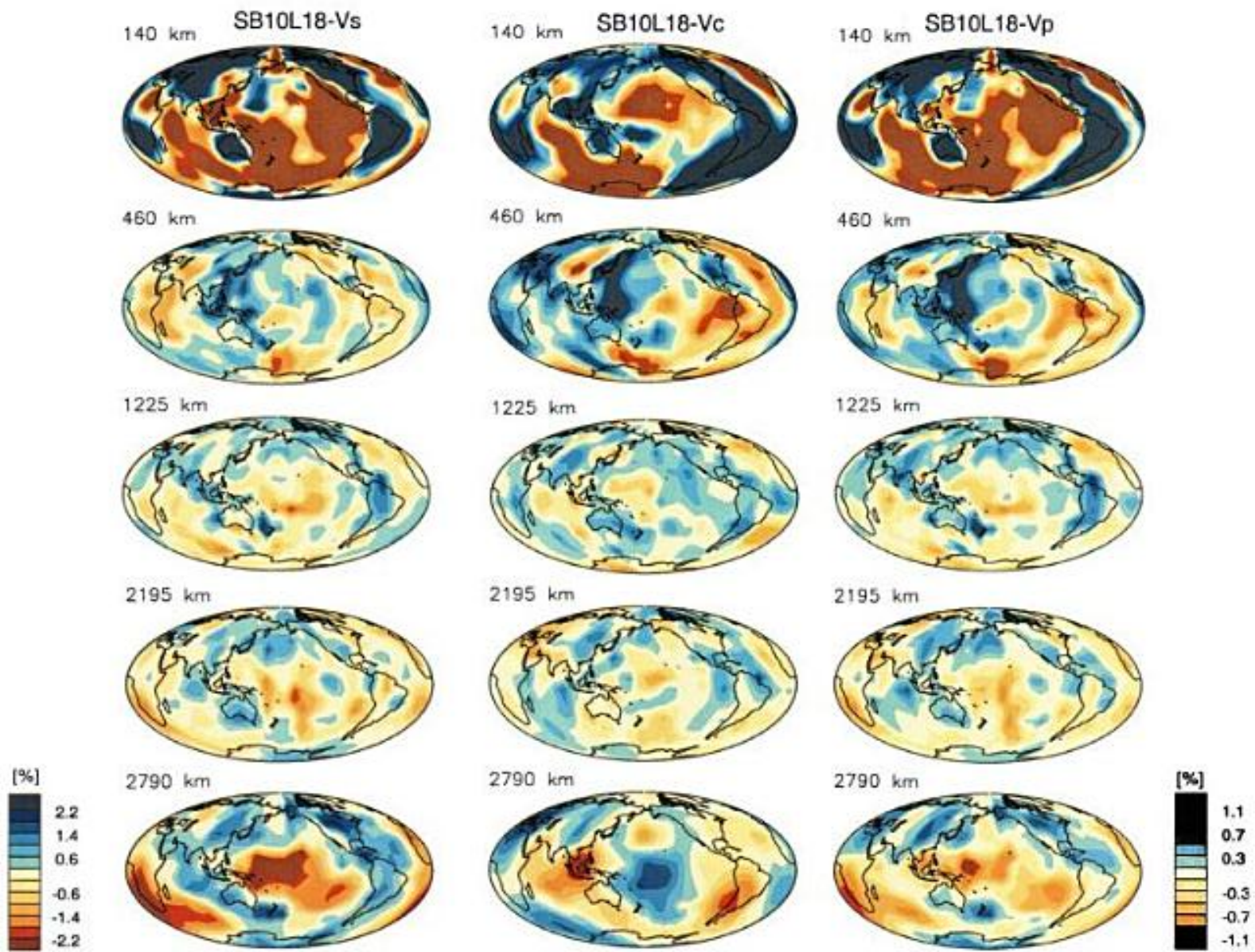
$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$



$$v_\phi = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$$v_\phi^2 = v_p^2 - \frac{4}{3}v_s^2$$

*Su and Dziewonski, 1997*



$V_s$

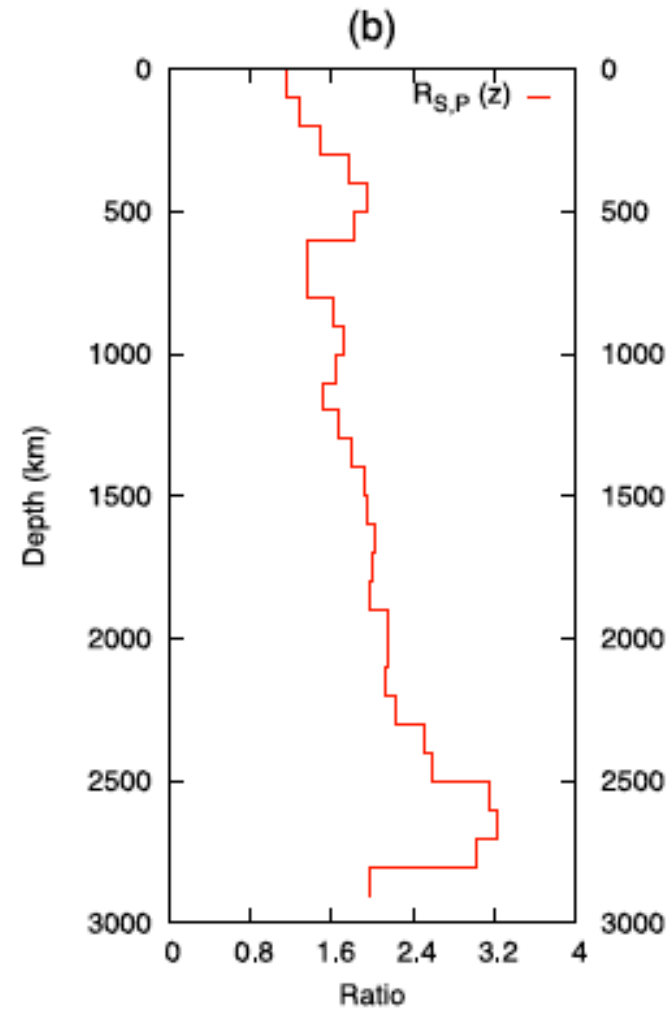
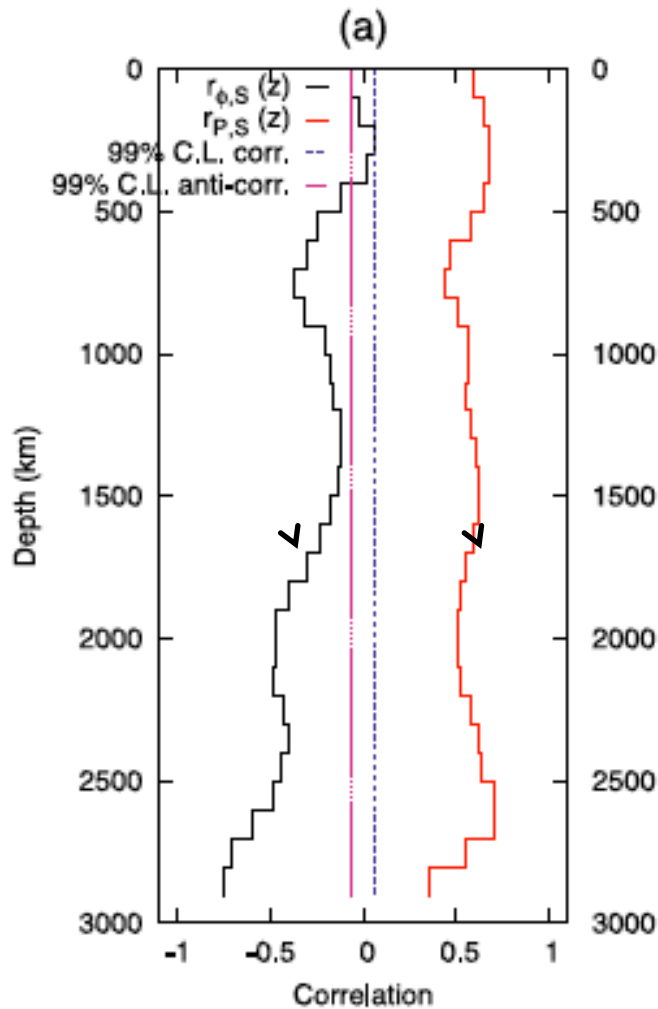
$V_\phi$

$V_p$

Masters et al., 2000

Coefficients de corrélation  
 $V_\phi/V_S$  et  $V_p/V_s$

$$R_{S,P}(z) = \frac{d \ln V_S}{d \ln V_P} = \frac{\delta V_S / V_S}{\delta V_P / V_P}$$

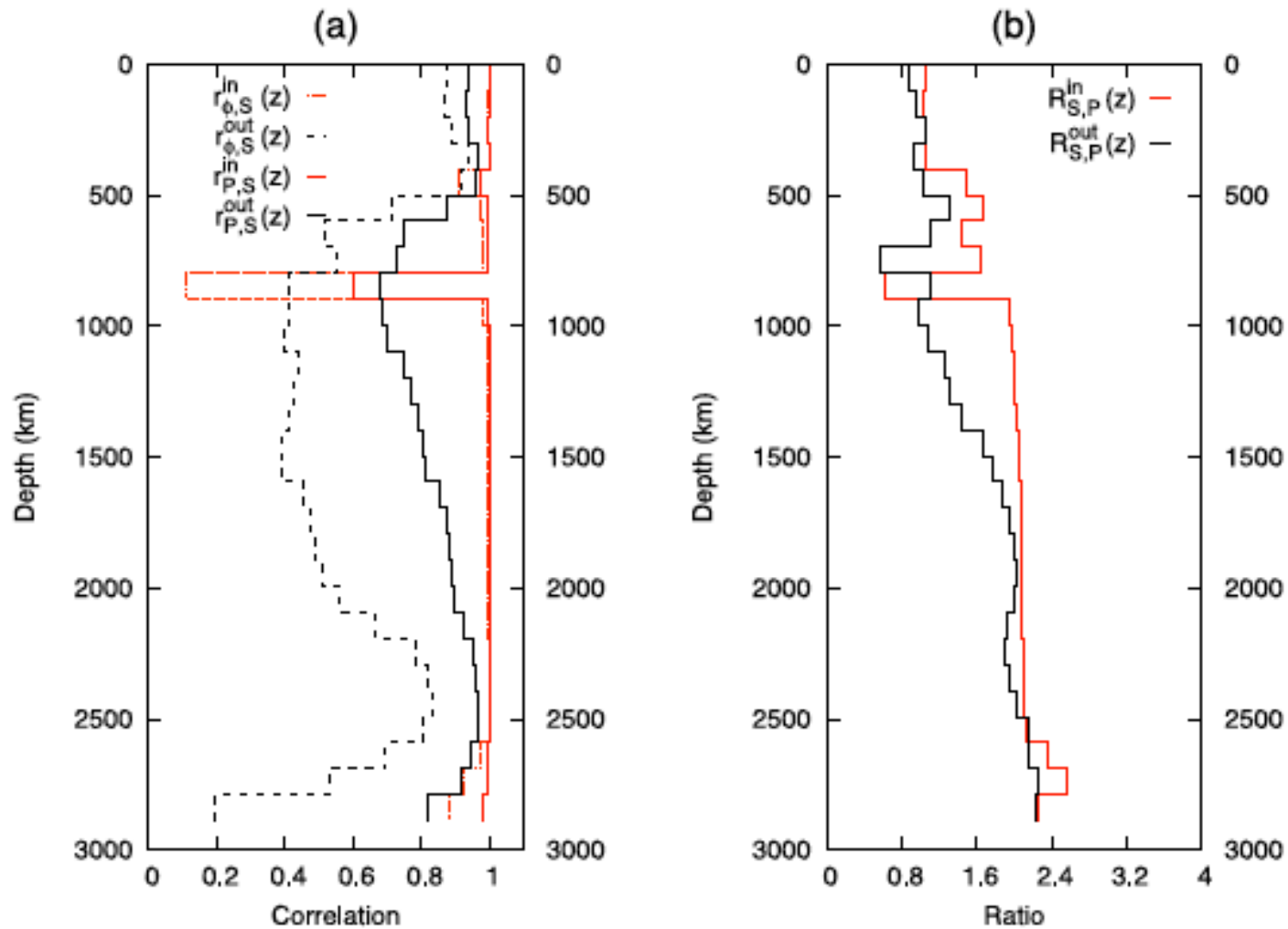


Modèles sismiques P et S

*De la Morra et al., 2011*

Coefficients de corrélation  
 $V_\phi/V_S$  et  $V_p/V_S$

$$R_{S,P}(z) = \frac{d \ln V_S}{d \ln V_P} = \frac{\delta V_S / V_S}{\delta V_P / V_P}$$

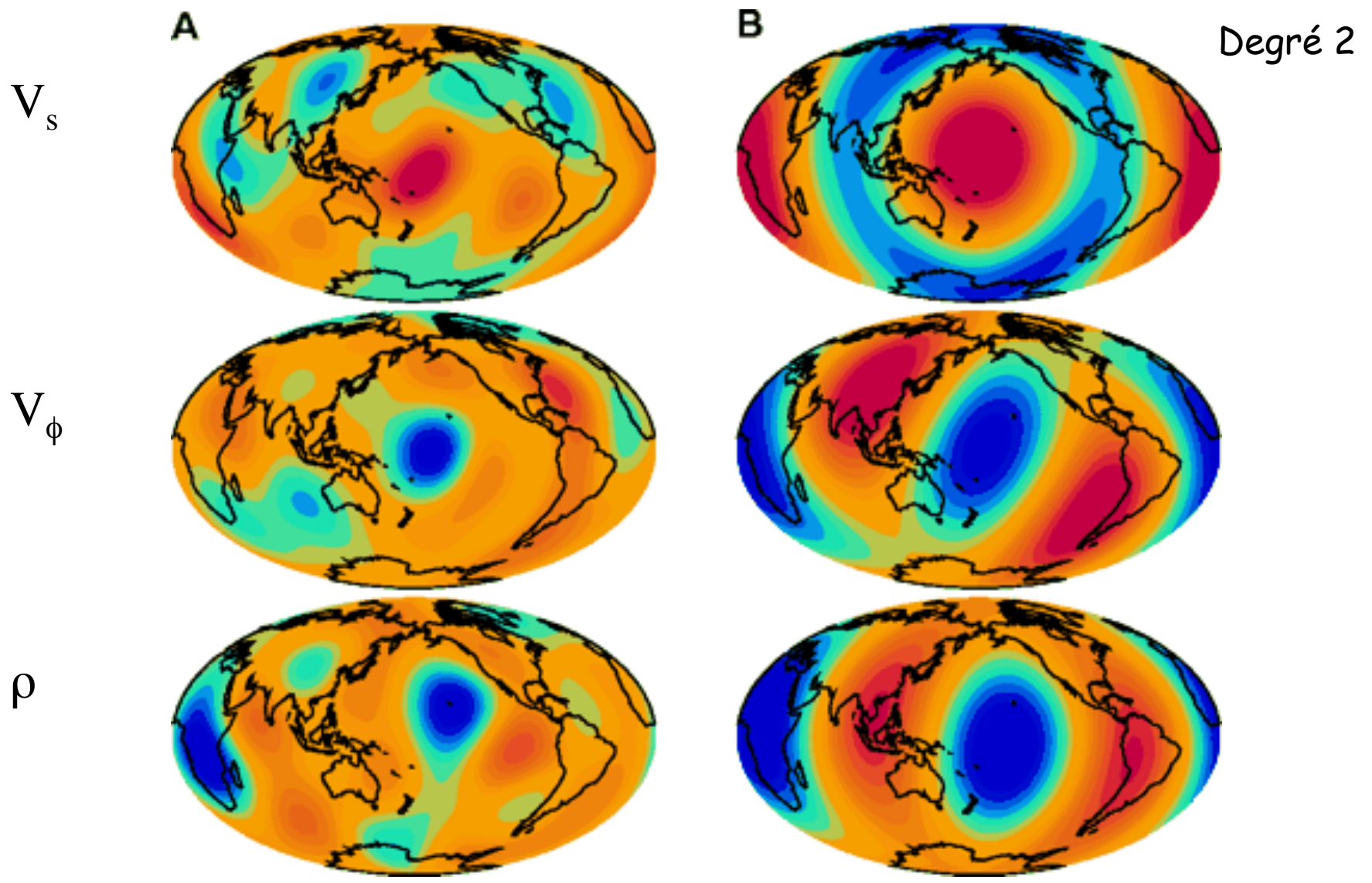


▫ Modèles géodynamiques thermiques

*De la Morra et al., 2011*

# Caractéristiques sismiques des méga-panaches sous le Pacifique et l'Afrique

- Relation avec la structure du manteau supérieur
- Bords abrupts
- Anticorrélation de la vitesse  $V_p$  et de la vitesse  $V_s$   
(*Su and Dziewonski, 1997; Masters et al., 2000*)
- Anticorrélation possible de la densité et de la vitesse des ondes S (*Ishii and Tromp, 2000, Trampert et al., 2004*)
- Discontinuité de la D'' et transition de phase pPv
- Anisotropie
- ULVZ's



Profondeur = 2800 km

Modèle construit à partir de données de modes propres

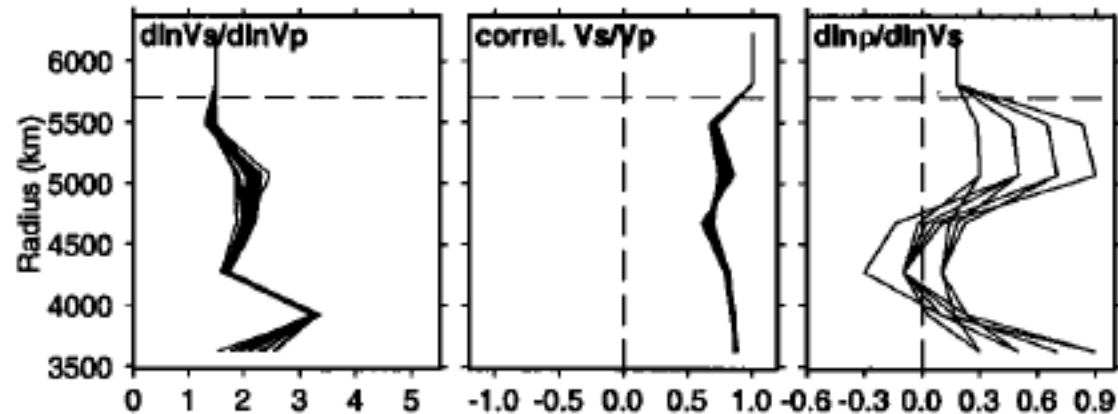
*Ishii and Tromp, 1999*



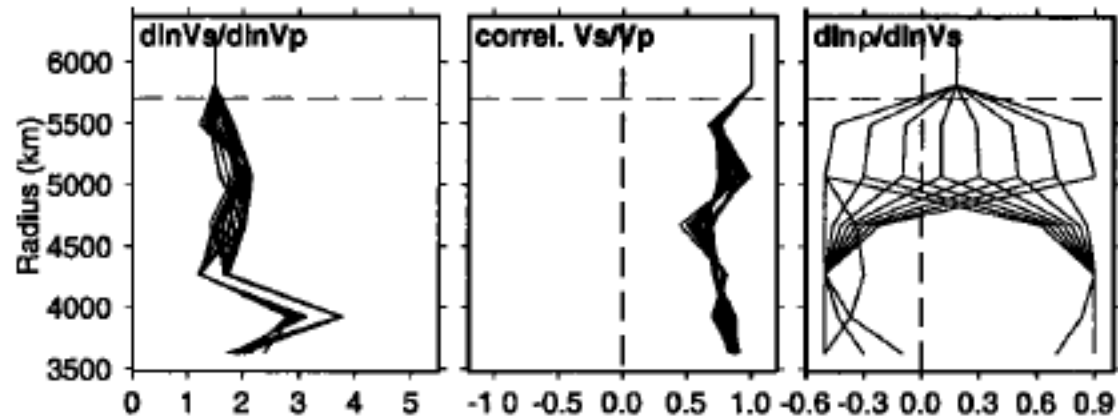
# Données de modes propres du manteau - degré 2 seulement

Exploration de l'espace des solutions possibles pour le rapport de densité

"Bons"  
modèles



"Mauvais"  
modèles

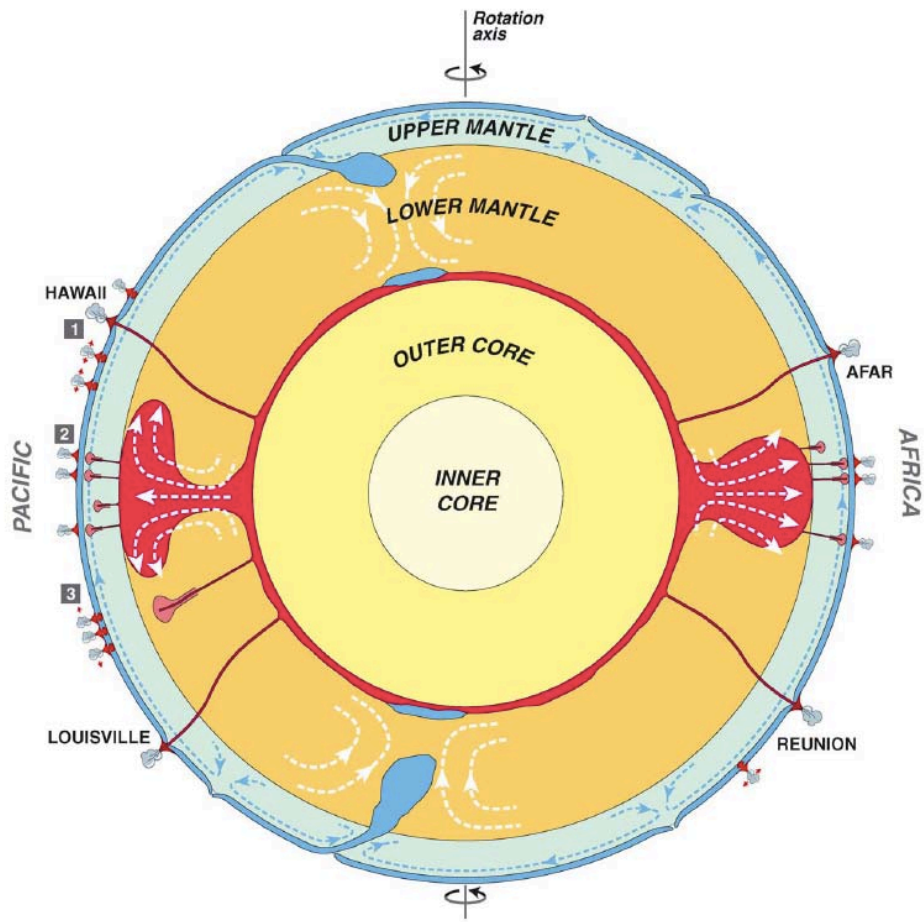


$R > 2.5$  dans le  
manteau profond

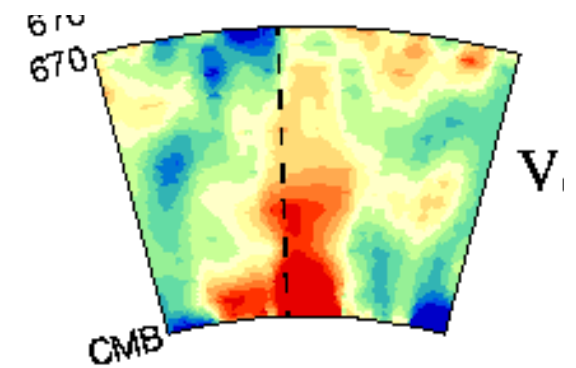
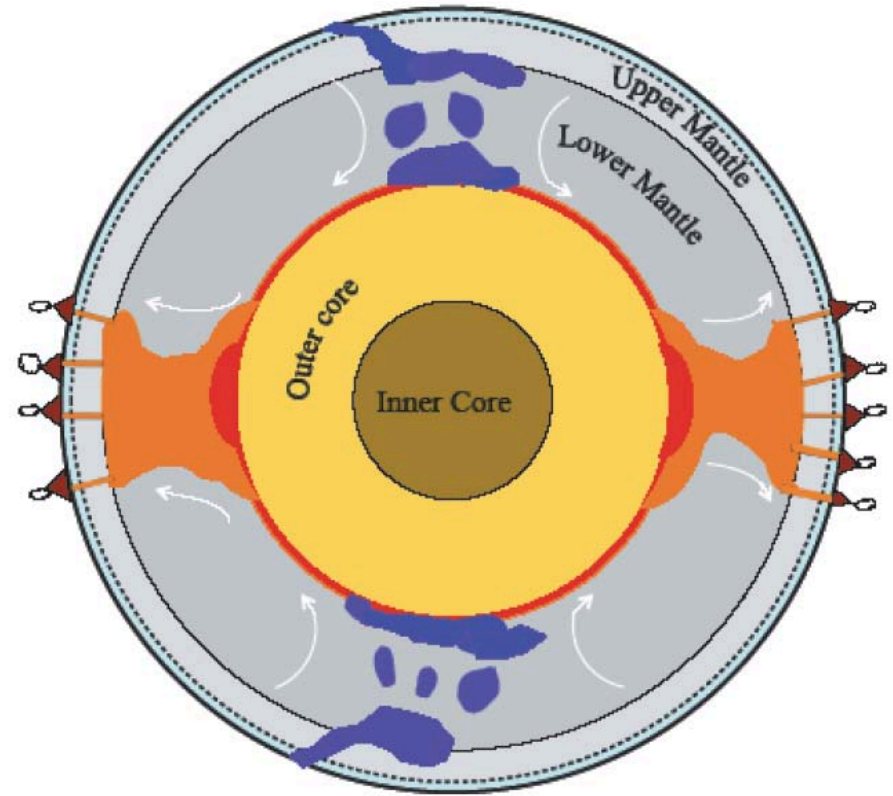
Rapport de densité  
moins bien contraint

# Origine des LLSVP\*\*

- Matériau primordial (réservoir géochimique)?
- Hétérogénéité introduite par les plaques tombées au fond du manteau?
- \*\*LLSVP= Large low S velocity provinces
- = méga-panaches



*Courtilot et al., 2003*

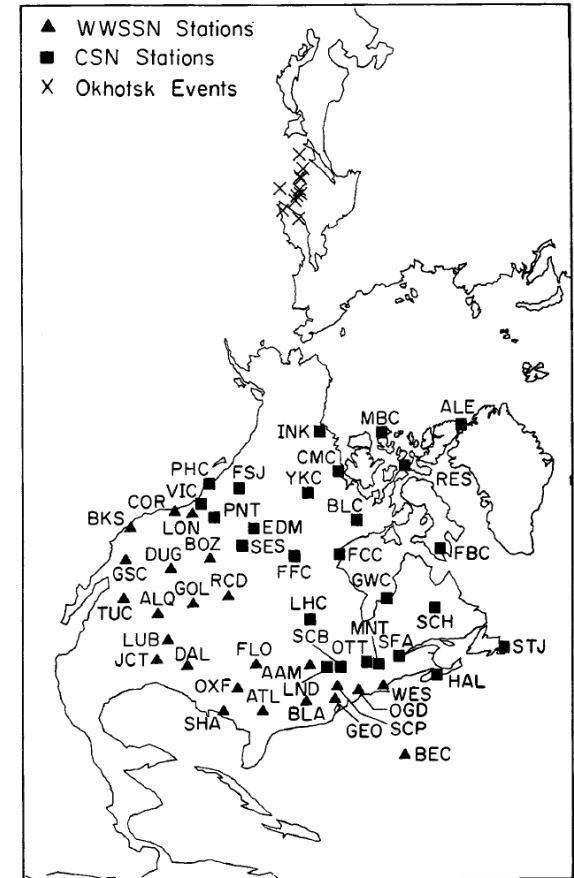
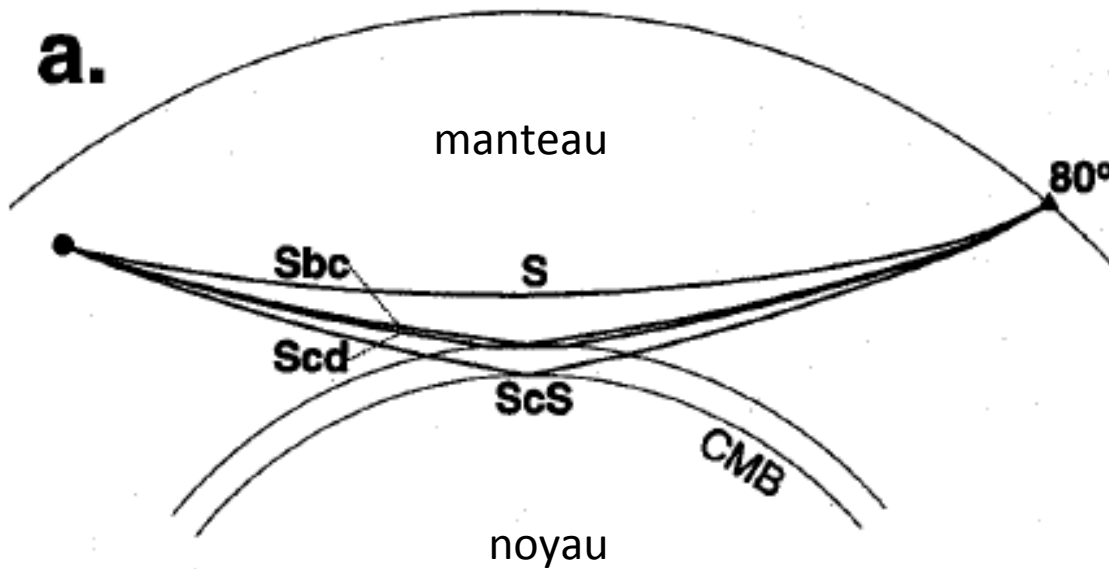


*Dziewonski, Lekic, Romanowicz, 2010*

# Caractéristiques sismiques des méga-panaches sous le Pacifique et l'Afrique

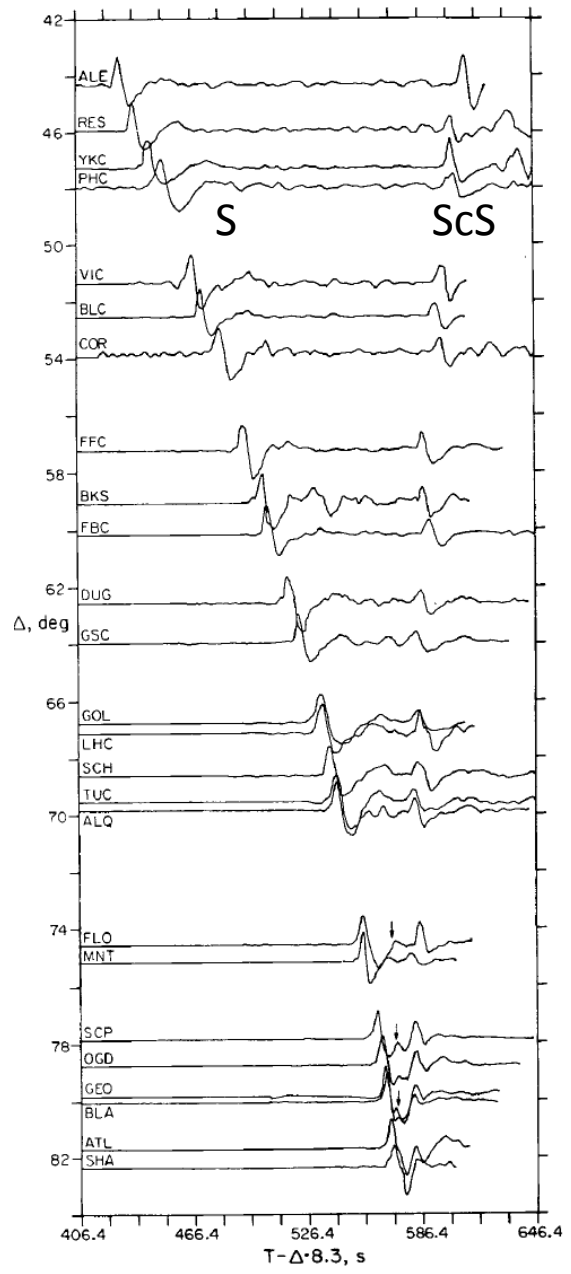
- Relation avec la structure du manteau supérieur
- Bords abrupts
- Anticorrélation de la vitesse  $V_p$  et de la vitesse  $V_s$   
(*Su and Dziewonski, 1997; Masters et al., 2000*)
- Anticorrélation possible de la densité et de la vitesse des ondes  $S$  (*Ishii and Tromp, 2000, Trampert et al., 2004*)
- Discontinuité de la  $D''$  et transition de phase  $pPv$
- Anisotropie
- ULVZ's

# Etude des précurseurs à l'onde ScS



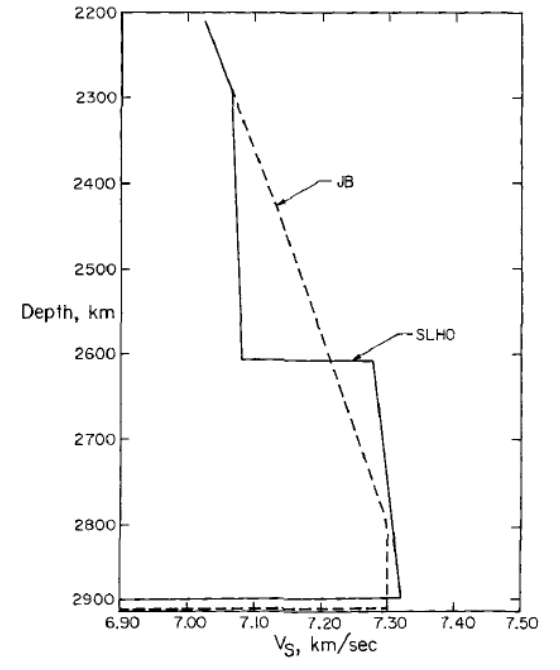
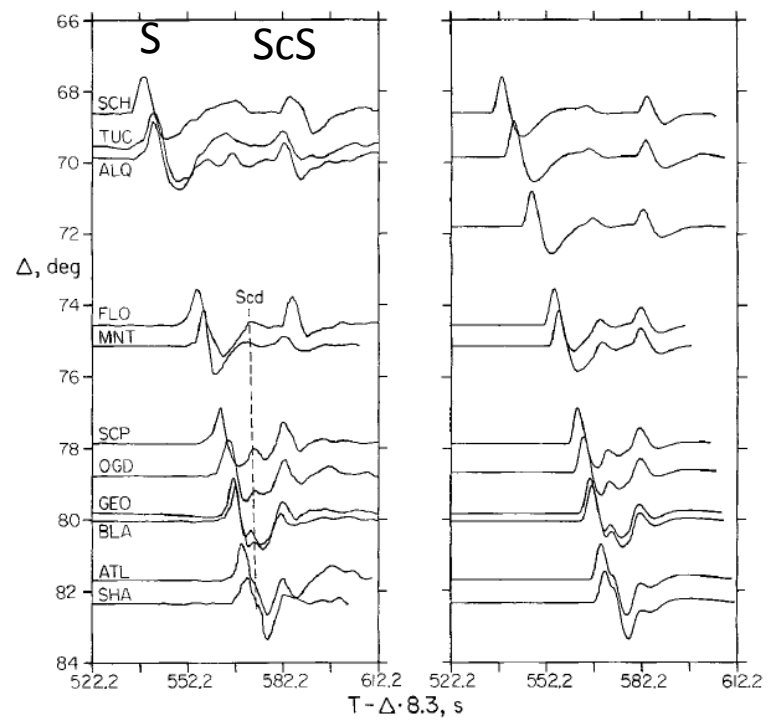
*Lay and Helmberger, 1983*

# Sea of Okhotsk, 1970, h=583 km



observed

Model predictions

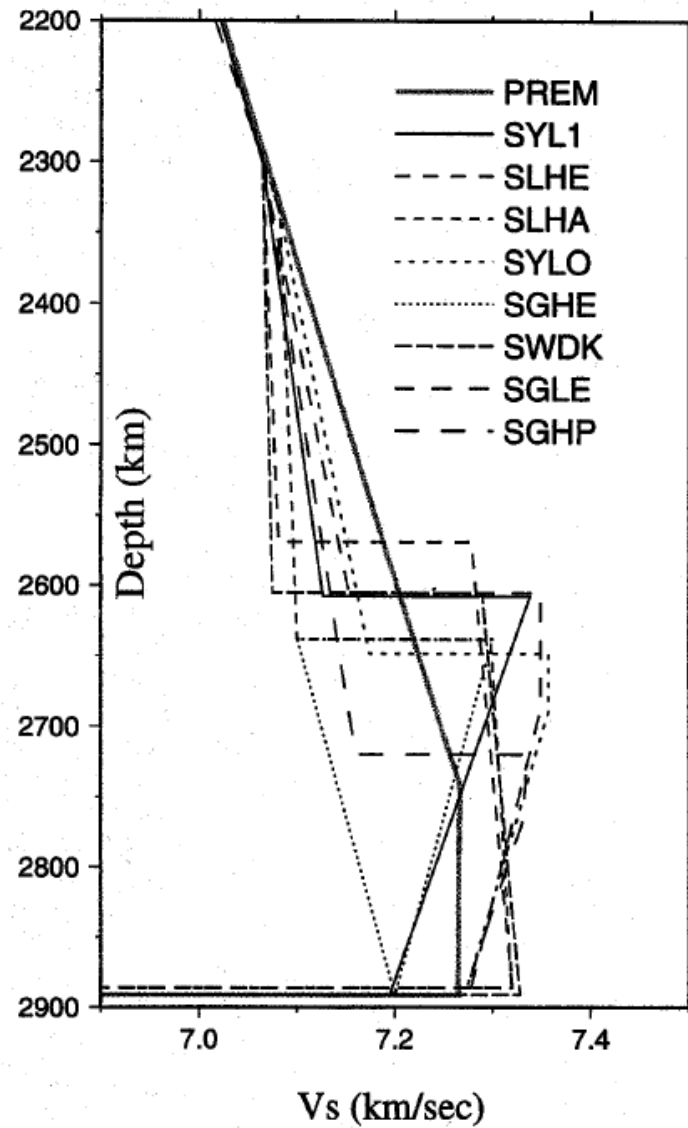


JB = Modèle de référence de Jeffreys Bullen

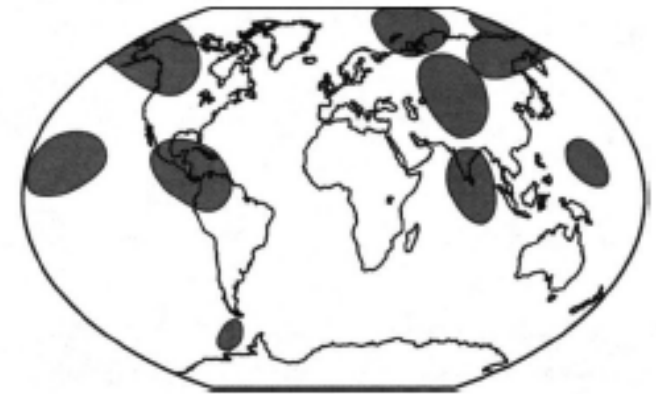
- Saut en vitesse  $V_s$   
de 2.5-3%

- Environ 250 km au  
dessus de la CMB

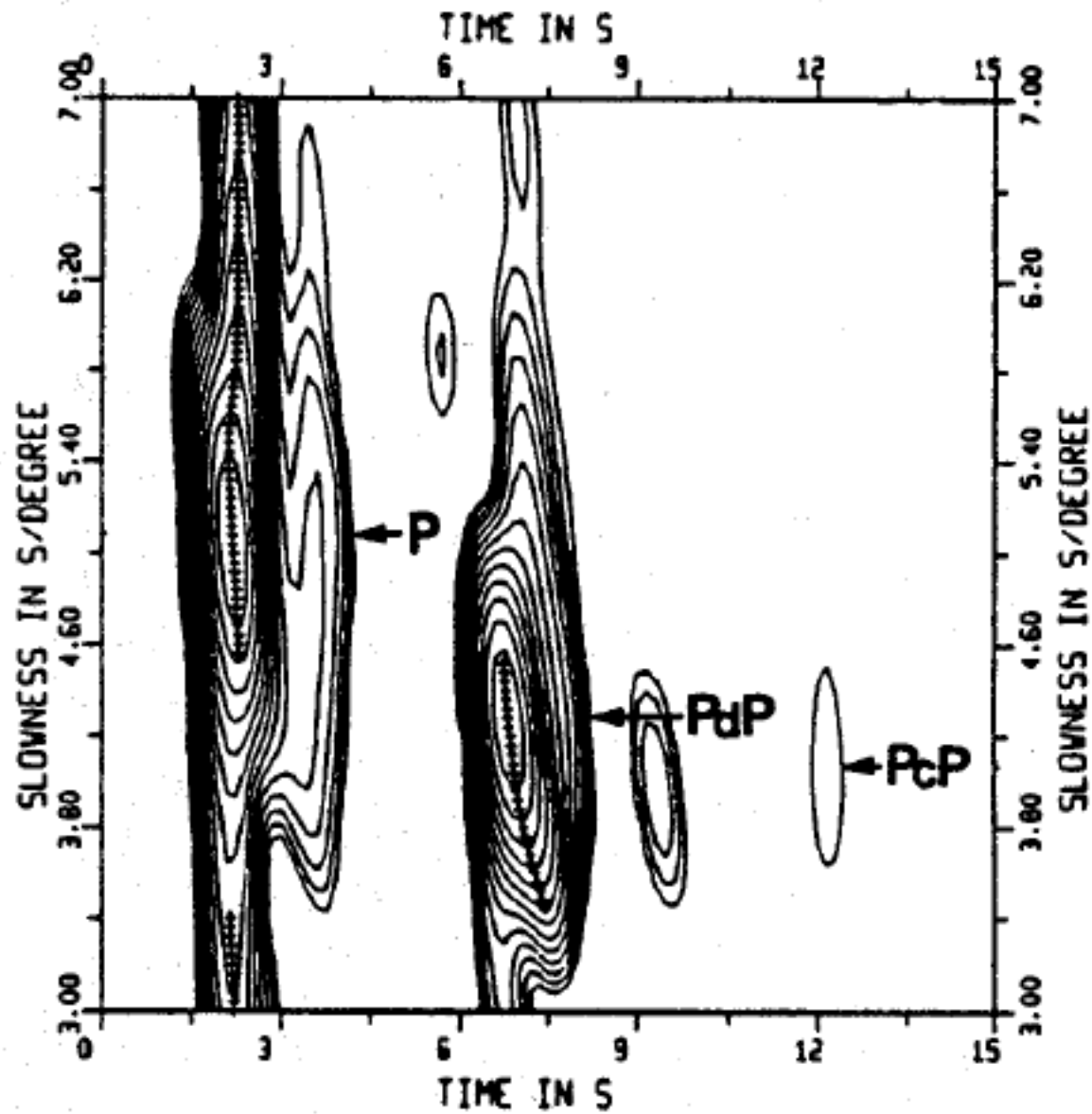
- Variations latérales  
importantes



(b) Regional  $D'$  discontinuity detections



*Wyession et al., 1998*

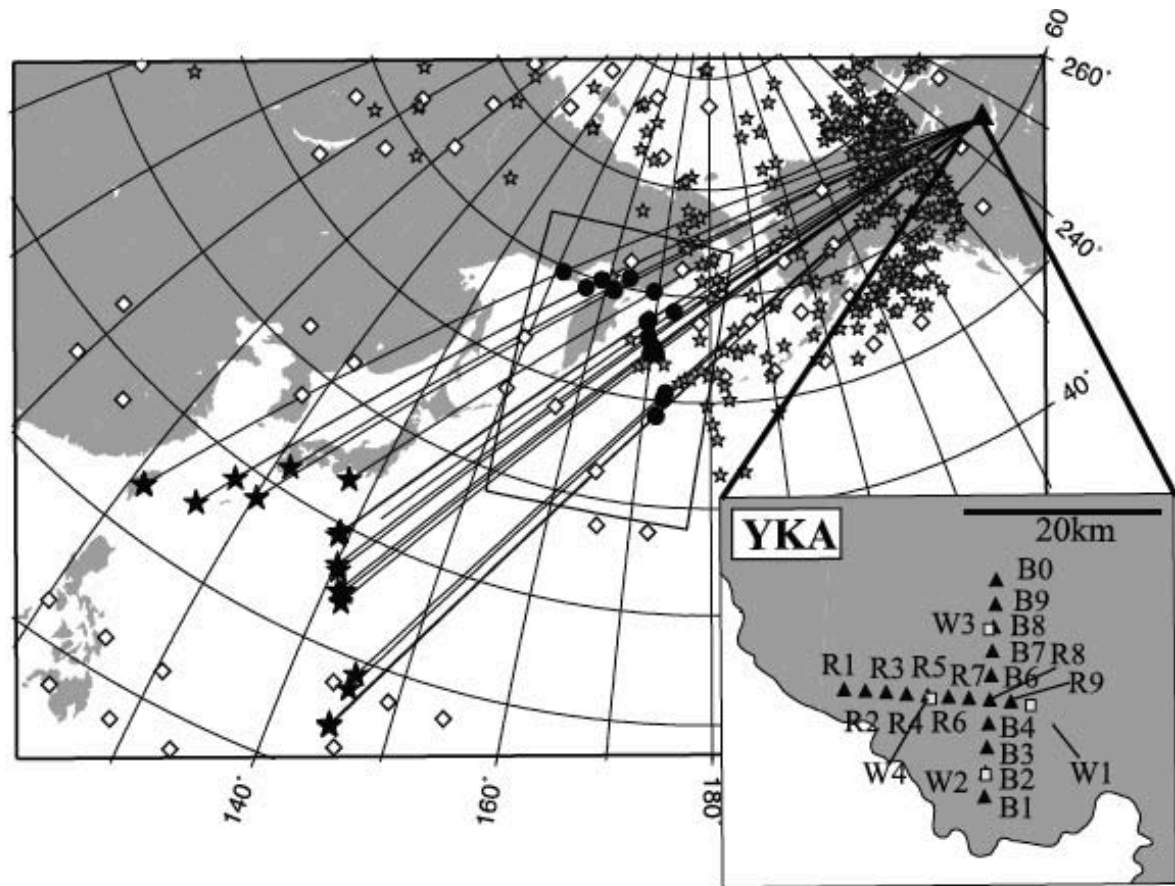
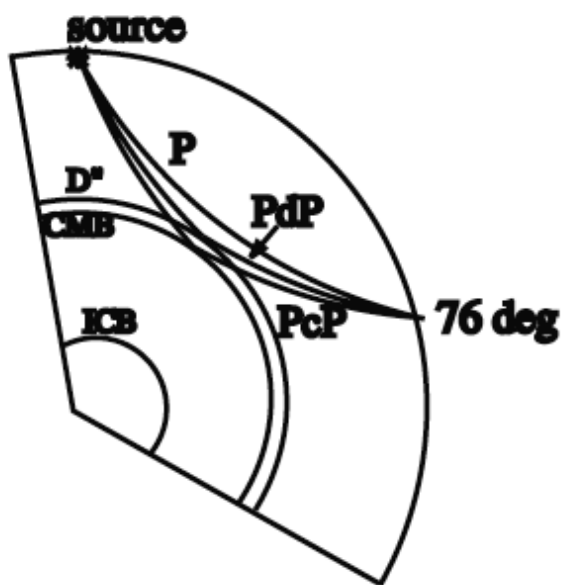


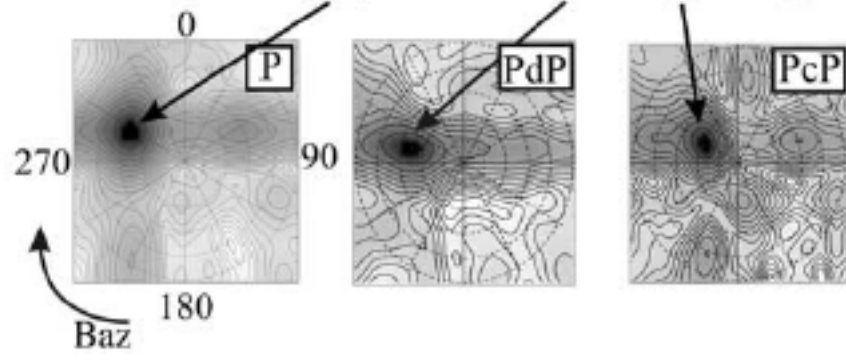
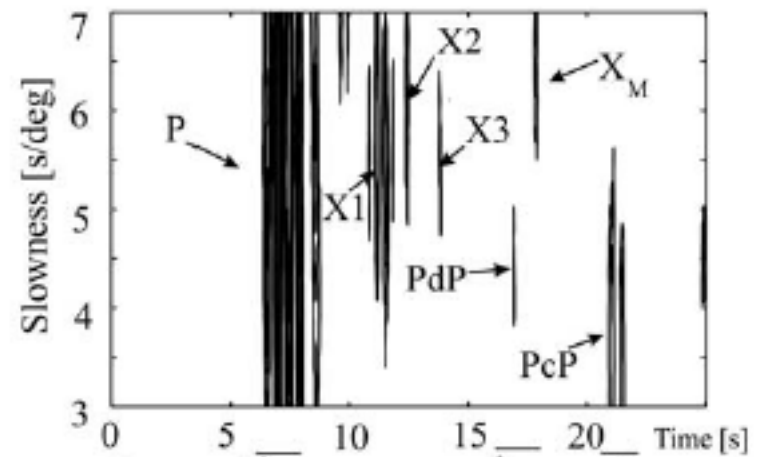
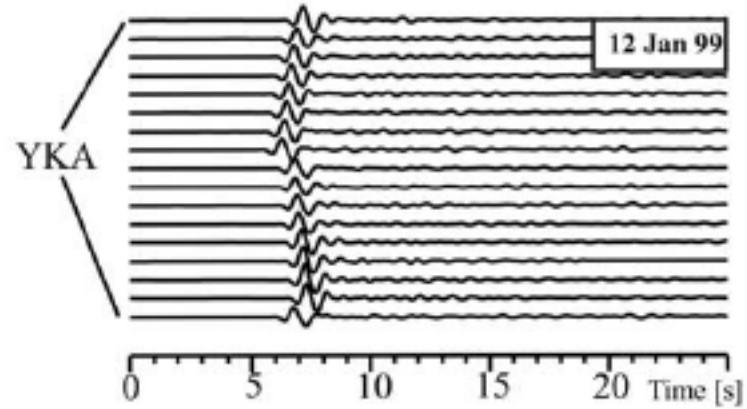
Saut de vitesse  $P < 1\%$   
 moins clair en général

*Weber et al., 1996*



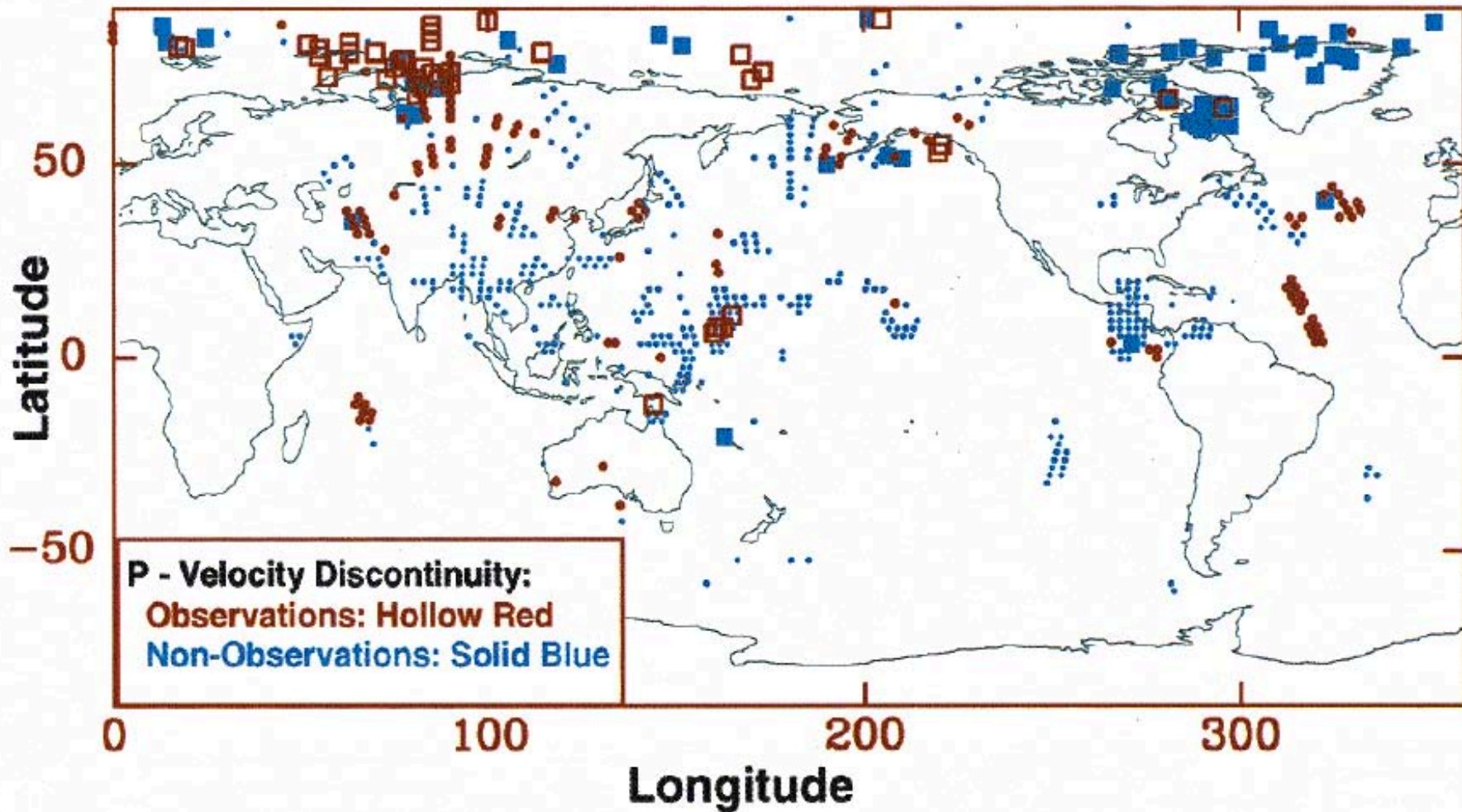
Distances 68-72°





f/k analysis  
Backazim  
296 deg

## Observations de précurseurs de PcP

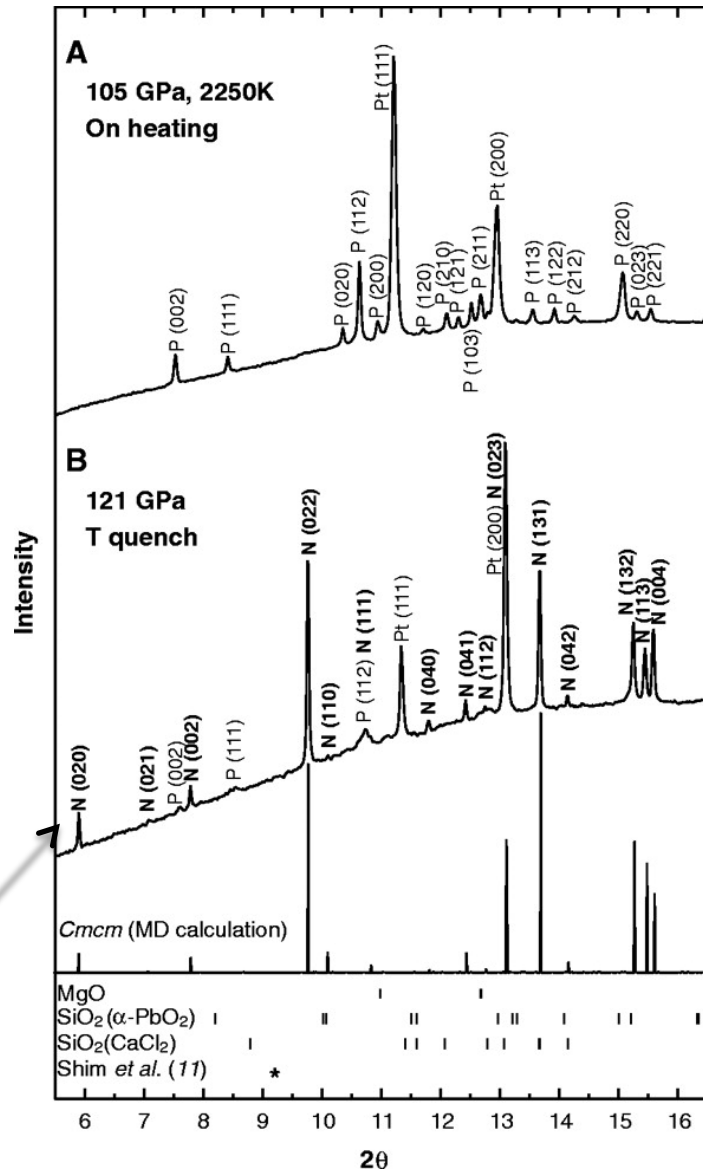


PcP difficile à observer => on utilise plutôt P comme phase de référence  
Faible séparation en temps des phases P < 10 s (vitesses plus élevées que S)

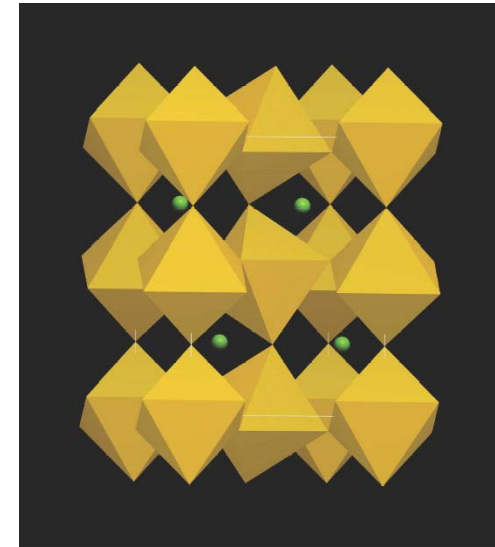
# Discontinuité de la D''

- Observée plus clairement en  $V_s$  ( $\sim 3\%$ ) qu'en  $V_p$  ( $< 1\%$ )
- Profondeur  $\sim 250$  km au dessus de la CMB (150-300 km)
- Epaisseur de la transition: moins de 70 km
- Corrélation entre les obs. S et P est faible
- Saut possible de densité à partir du saut d'impédance ( $\rho \times V_s$ )
  - Ondes  $ScS_n$ :  $\Delta\rho \sim 1.7\%$  en supposant  $\Delta V_s = 2.75\%$  (Revenaugh and Jordan, 1991)

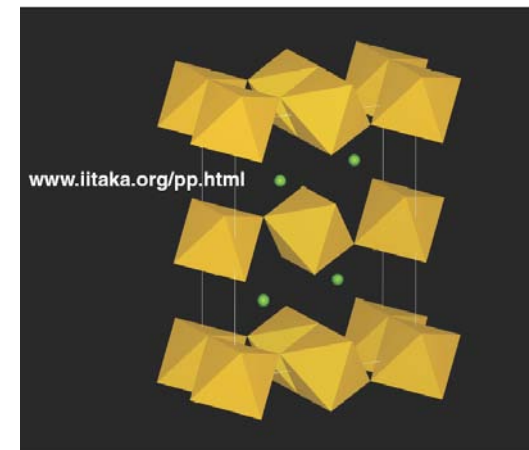
2004: Découverte de la post-perovskite aux conditions de T and P correspondant à la base du manteau (120 GPa, 2500°C)



MgSiO<sub>3</sub> perovskite



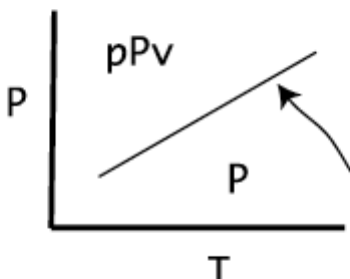
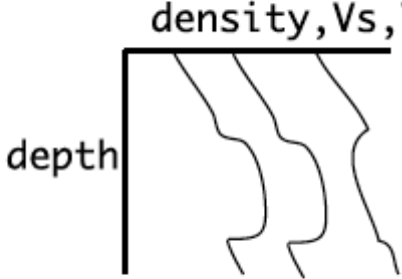
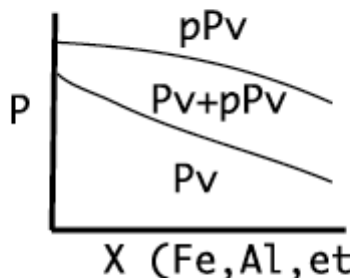
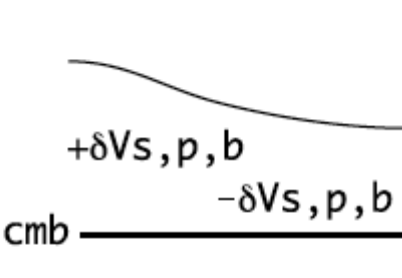
MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite



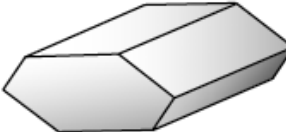
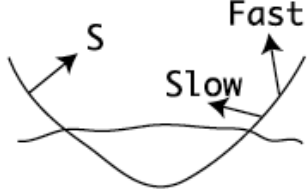
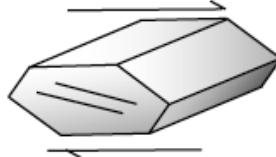
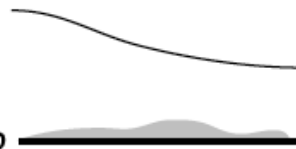
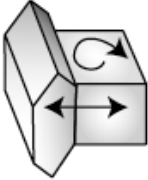
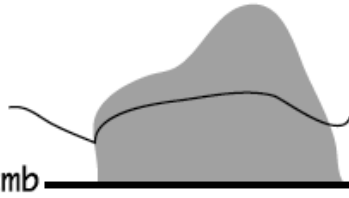
# Discontinuité de la D''

- Jusqu'en 2004: interprétations possibles:
  - Hétérogénéité chimique due aux plaques dans le manteau profond
  - Transition de phase - possible mais inconnue
- Découverte de la transition de phase dans la perovskite  $MgSiO_3$  :
  - Perovskite  $\rightarrow$  post-perovskite (Pv  $\rightarrow$  pPv)
- L'une des méthodes les plus précises pour réduire les incertitudes sur la structure thermique et chimique profonde est d'associer les phases de transition dans les minéraux les plus abondants du manteau, calibrées en laboratoire, avec les discontinuités sismiques
- La perovskite étant la phase minéralogique la plus abondante dans le manteau inférieur:
  - On peut désormais espérer relier les variations de profondeur avec des variations de température
  - Obtenir une meilleure estimation de la température et du flux de chaleur à la CMB

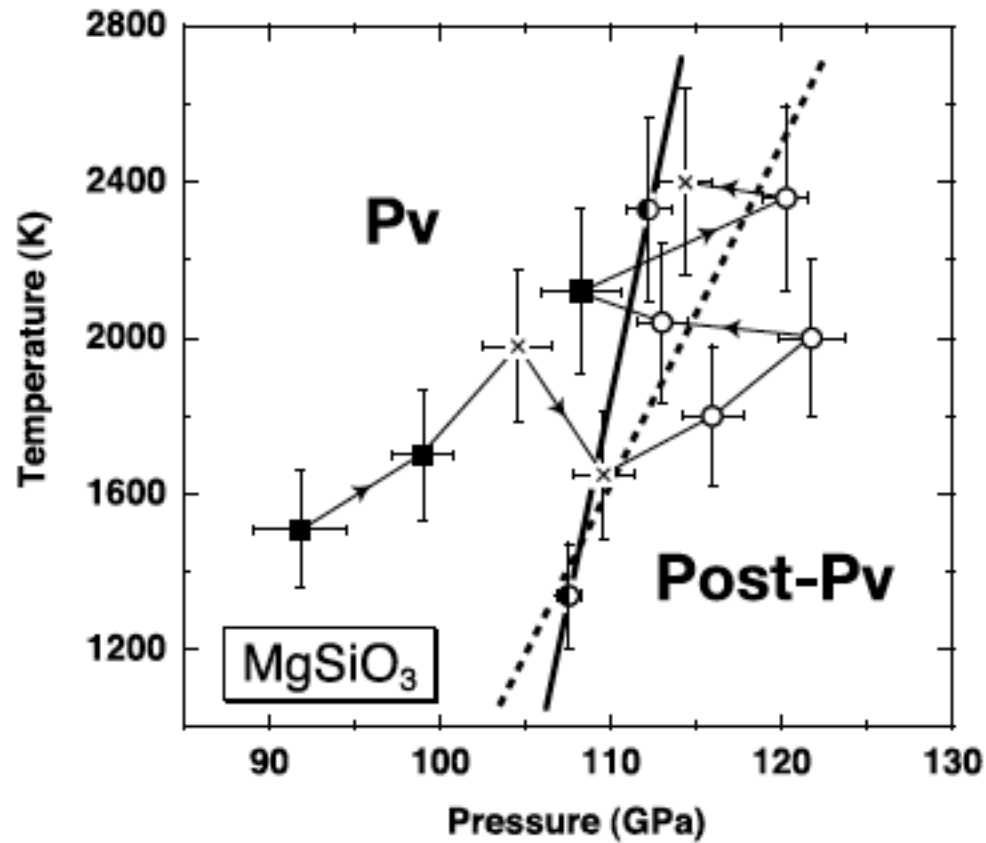
# Caractéristiques de la transition de phase

Mineral Physics	Seismology	
 <p>Fixed Composition <math>\delta\rho</math> Clapeyron Slope, <math>dP/dT</math></p>	 <p>density, <math>V_s, V_p</math> <math>\delta \ln \rho, \delta \ln V_s</math> <math>\delta \ln V_p</math> Sharpness Paired Discontinuities</p>	<p>Saut en vitesse</p>
 <p>Fixed T Transition Width</p>	 <p>Topography Relationship to Volumetric Velocity</p>	<p>Epaisseur de la Transition; Topographie</p>

# Caractéristiques de la transition de phase

 <p> <math>P_v, pP_v</math>  <math>C_{ijkl}</math>  <math>V_s(\theta, \phi), V_p(\theta, \phi)</math> </p>	 <p>             S              Fast              Slow              Shear Wave Splitting              Symmetry  <math>V_p(\text{direction})</math> </p> <p>cmb</p>	<p>Anisotropie Sismique</p>
 <p>Slip Planes</p>	 <p>Relationship to ULVZ</p> <p>cmb</p>	<p>Propriétés de déformation</p>
 <p>             Partitioning              Coefficients              Fe spin state         </p>	 <p>Relationship to LLSVP</p> <p>cmb</p>	<p>Relation avec les LLSVP?</p>



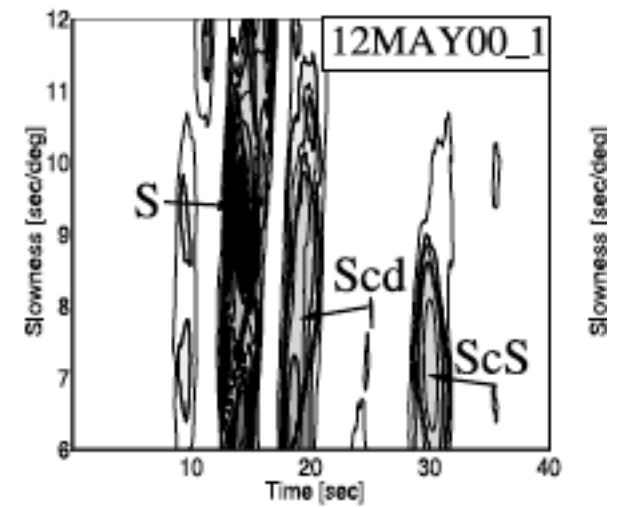
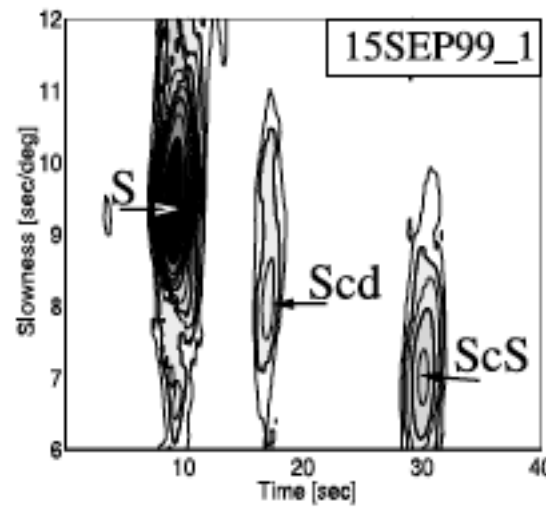
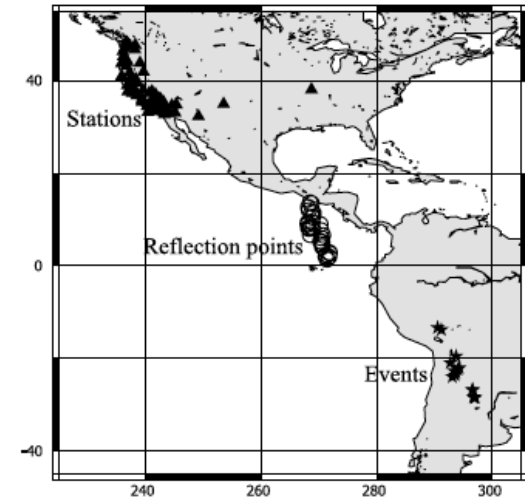
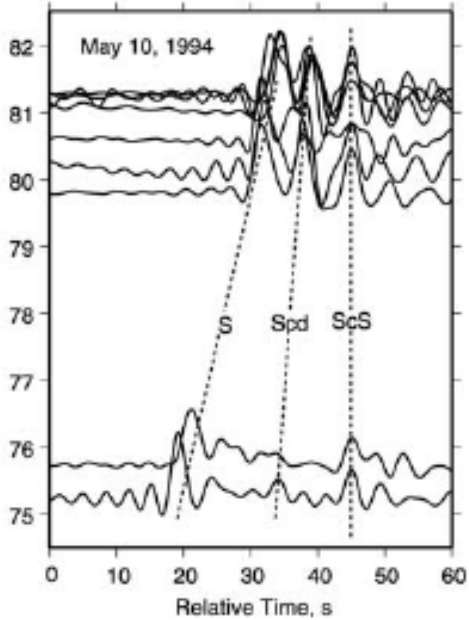
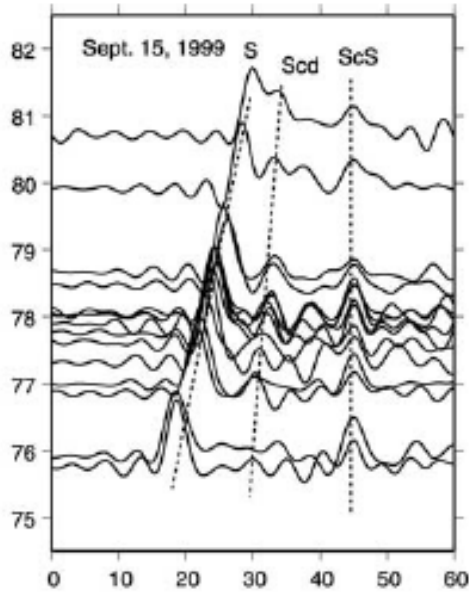


*Hirose  
et al.  
2005*

La transition Pv-pPv (MgSiO<sub>3</sub>) a une pente de Clapeyron positive, avec une augmentation de la vitesse S de ~1% et un faible changement dans la vitesse P

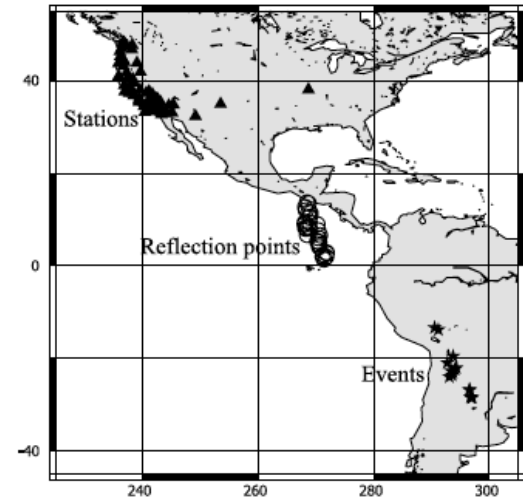
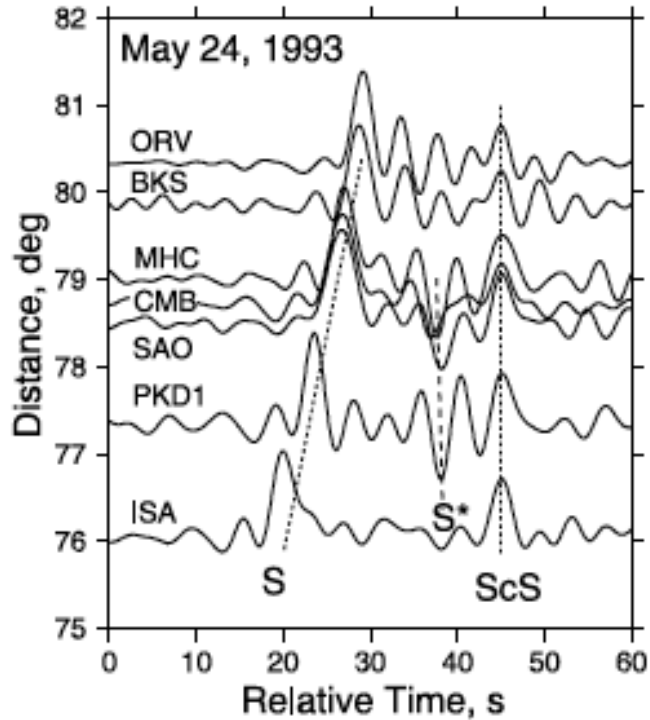
- Résultats des premiers travaux sur la pPv (2004-2005):
  - Augmentation du module de rigidité et de la densité
  - Diminution du module d'incompressibilité
  - Propriétés anisotropes et de déformation différentes de la Pv
  - Structure cristalline
  - Pente de Clapeyron
    - Théorie:  $\sim 7.5 \text{MPa/K}$  (Tsuchiya et al., 2004; Hirose and Fujita, 2005)
    - Laboratoire: pourrait être  $> 10 \text{MPa/K}$
- Ceci se traduit sismiquement par:
  - Augmentation Vs de 2-4%, beaucoup plus faible, voire négative en Vp, augmentation de densité de  $\sim 1-2\%$
  - Anisotropie sismique de caractère différent
- On s'attend à l'observer à profondeur plus grande dans les régions chaudes
  - Profondeur de la transition très incertaine
  - Certaines estimations la placent à de profondeurs du noyau (*Shim et al., 2004*)

Observation de précurseur de polarité positive (saut positif de vitesse)

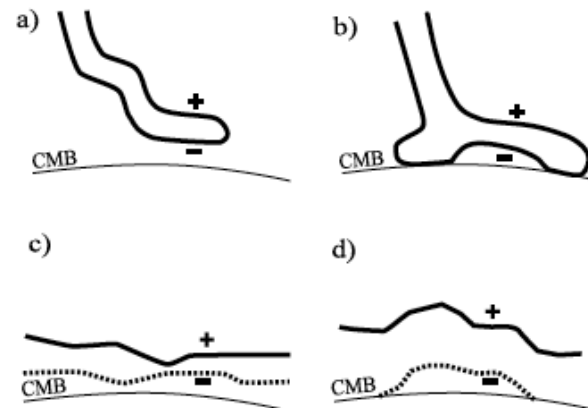


⇒ Topographie de la discontinuité et/ou  
⇒ Variations latérales importantes

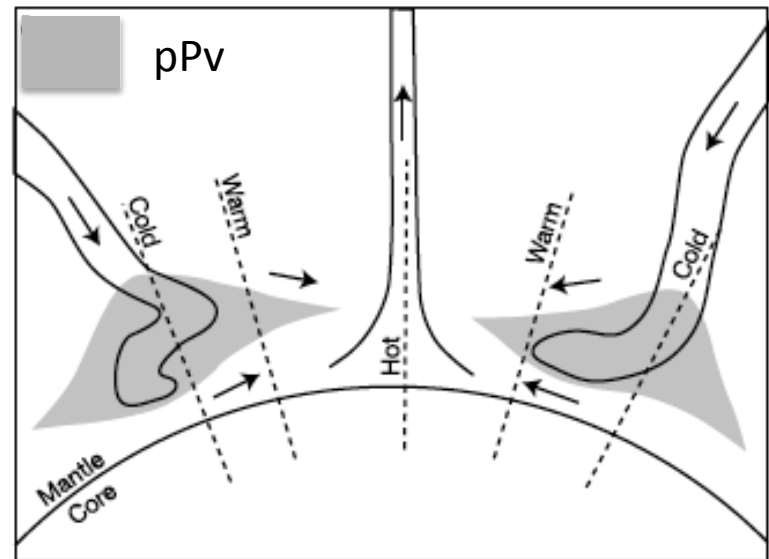
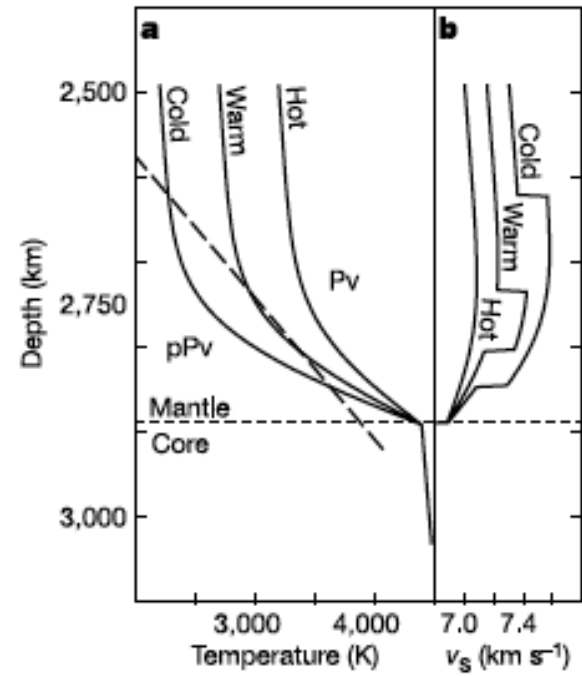
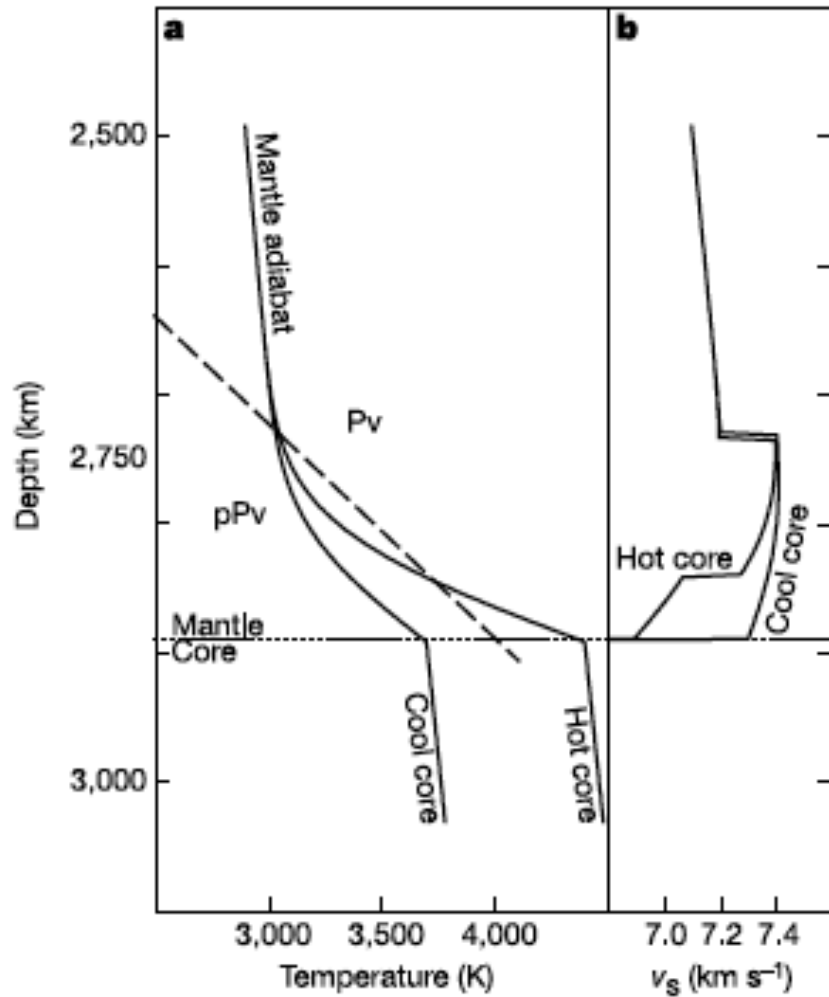
# Observation de précurseurs de polarité négative



## Interprétations possibles:



Ou bien effet des hétérogénéités latérales?



"Double transition" Pv→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?)