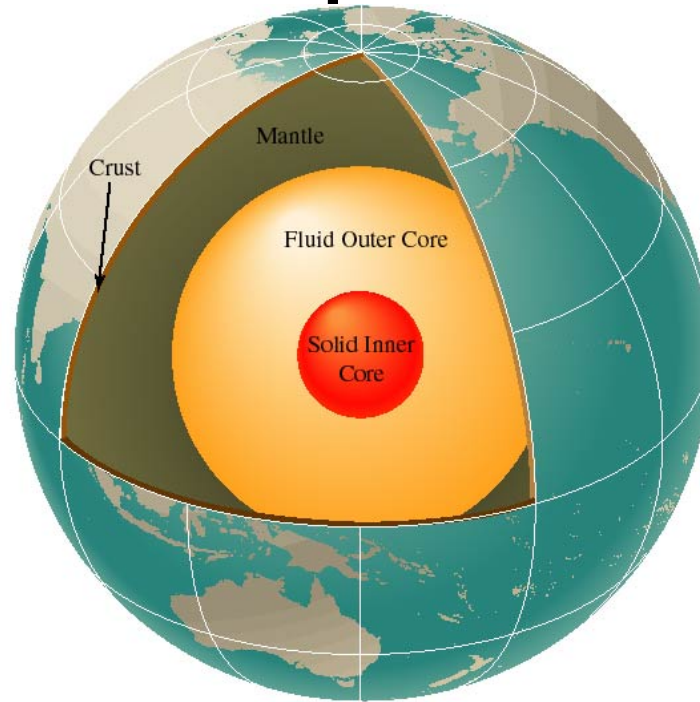


Le noyau de la terre:

5- Anisotropie de la graine- 2eme partie



Barbara Romanowicz - Cours 2011
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre
Collège de France
7 Novembre 2011

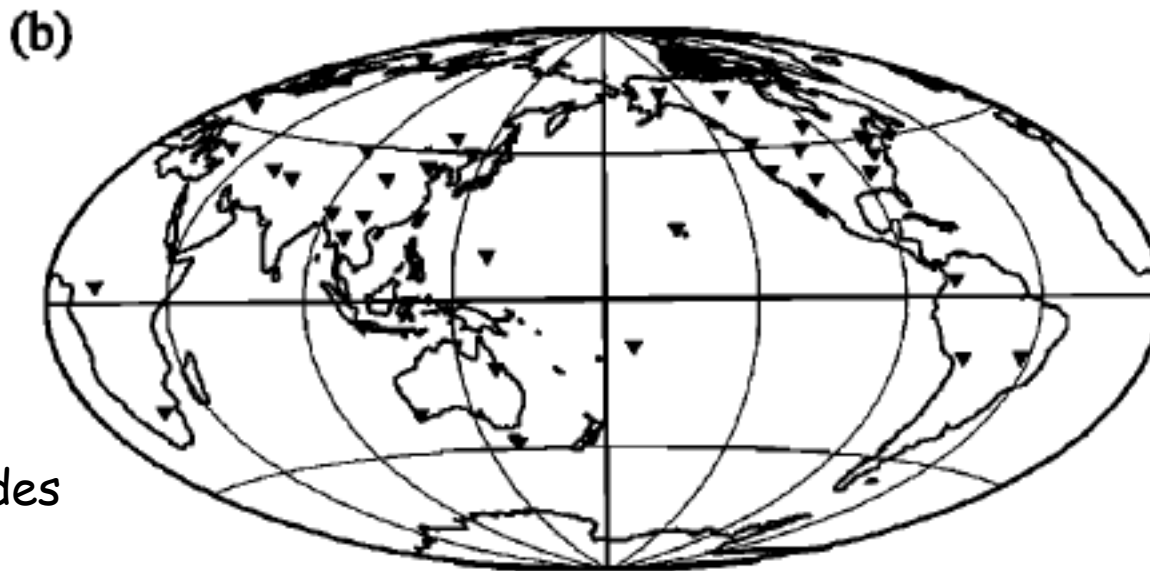
Anisotropie sismique dans la graine

- Découverte:
 - Morelli and Dziewonski (1986)
 - PKP(DF) , bulletins de l'ISC
 - Amplitude de l' anisotropie $\delta V_p/V_p \sim 1\%$
 - Woodhouse et al. (1986)
 - Splitting anormal des modes du noyau
 - Amplitude de l'anisotropie diminue avec la profondeur
- Depuis:
 - PKP(DF) sur données large bande: Anisotropie jusqu'au centre de la graine (Creager, 1992; Vinnik et al. 1994); $\delta V_p/V_p \sim 3-3.5\%$ (aussi: Shearer, 1994)
 - Les modes propres préfèrent une anisotropie concentrée près de la surface

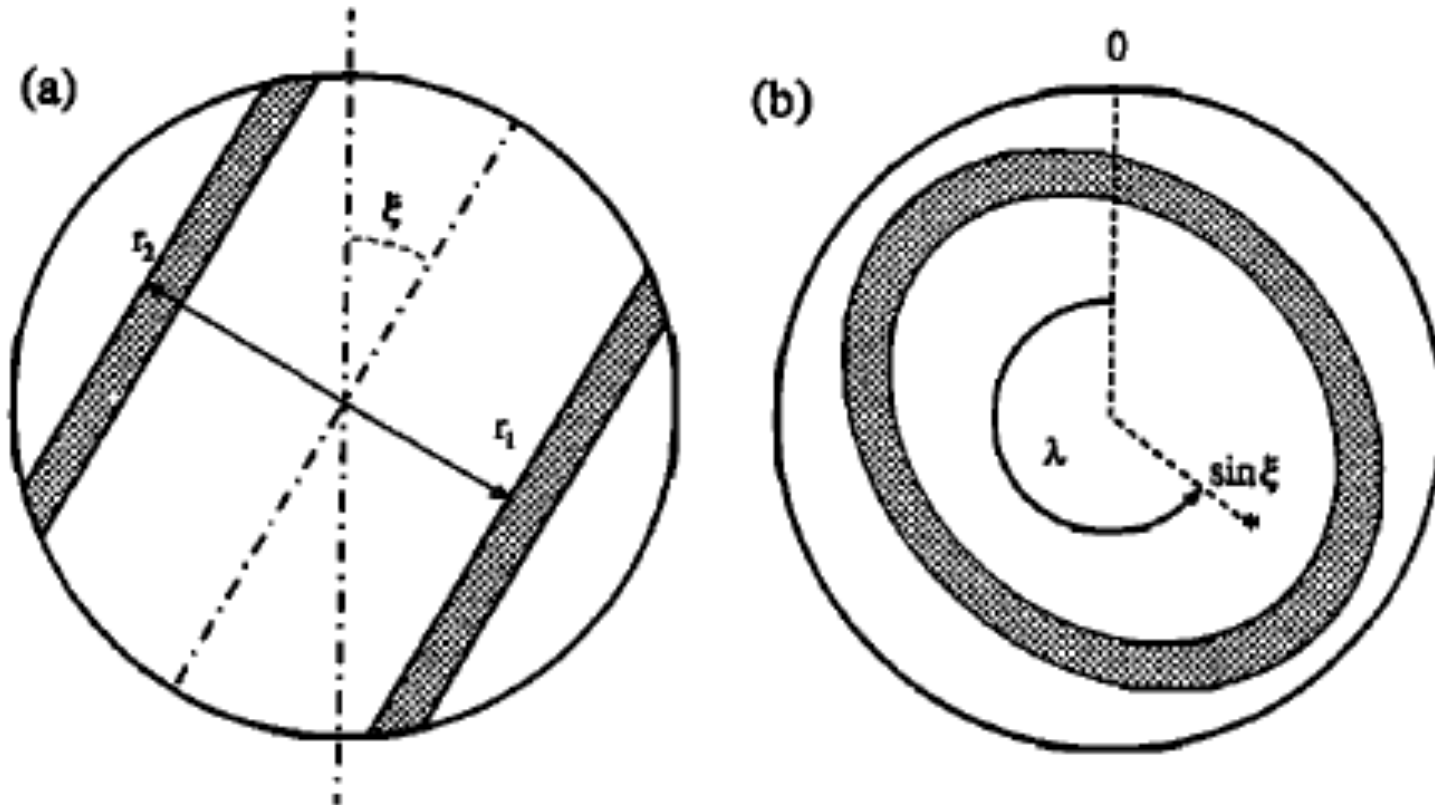
2335 ISC
stations

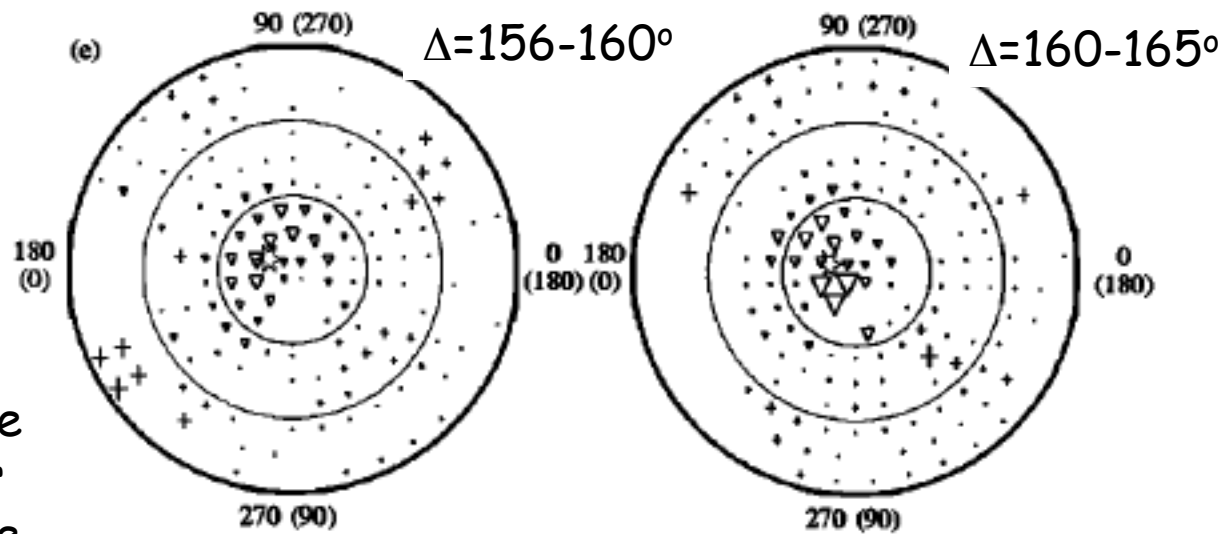


45 digital
broadband
Stations
Poor coverage
At high latitudes

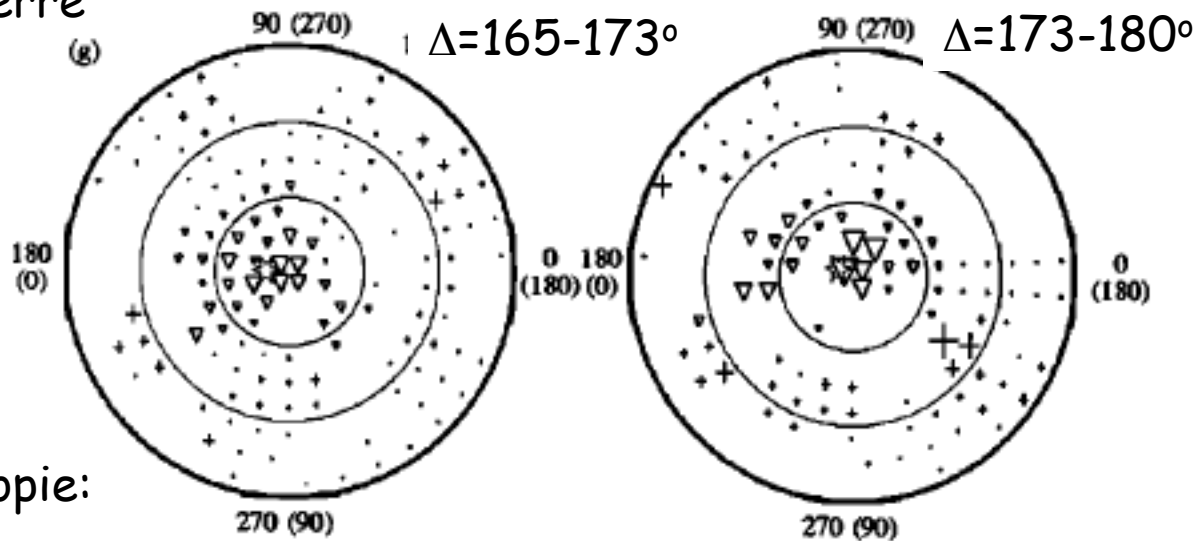


Moyennage en fonction de l'angle ξ par rapport à l'axe de rotation de la terre, et de la longitude du point bas du rai PKP(DF)





L'axe de symétrie
serait incliné par
rapport à l'axe de
rotation de la terre



Axe de l'anisotropie:

Lat: 79.5° N

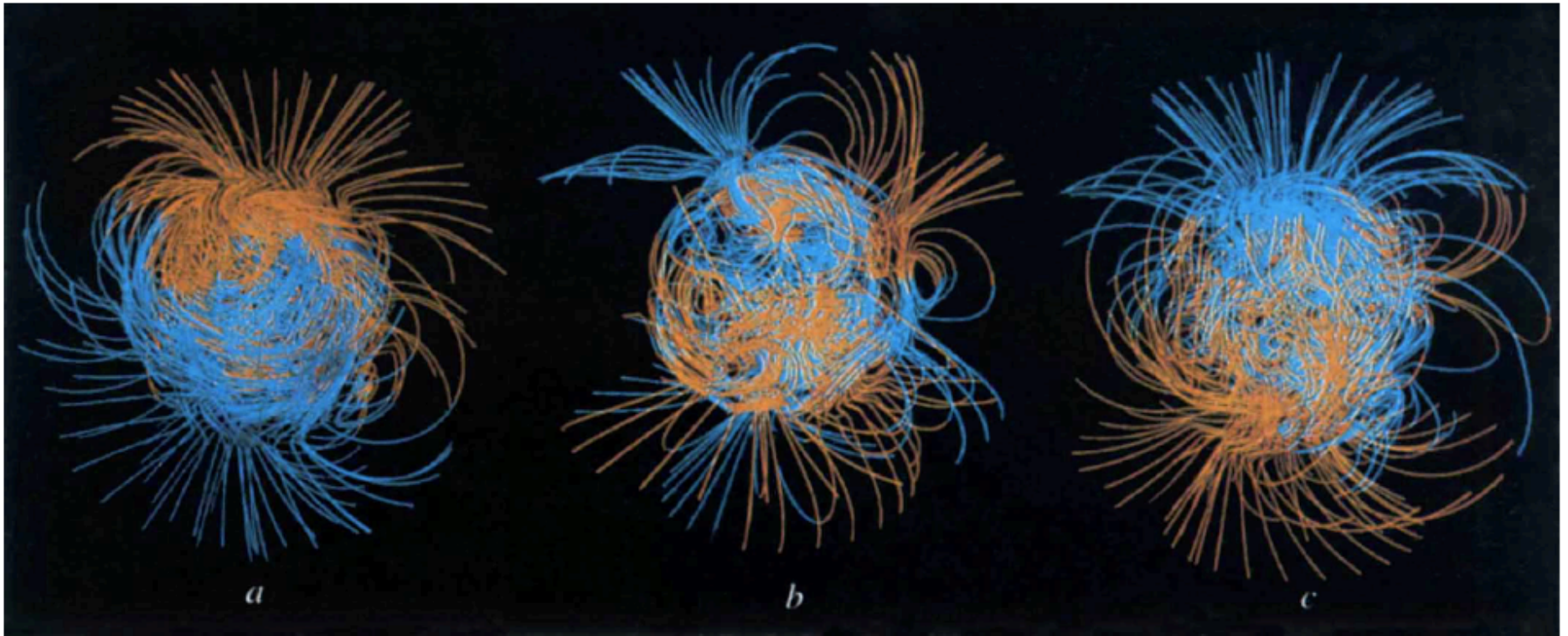
Long: 160° E

-3S ▽ ▽ ▽ ▽ + + + + +3S

- *Glatzmaier and Roberts, 1995:*
 - Modèle numérique de la dynamo en 3 dimensions (self-consistent)
 - Capable de maintenir un champ magnétique interne pendant plus de 40,000 ans
 - Observent pour la première fois une inversion du champ magnétique
 - Le modèle prédit une rotation différentielle de la graine de plusieurs 10^{-9} rad/s ~ 1 deg/an.

Lignes de champ magnétique

- sortantes (bleu); entrantes (jaune)



9000 ans avant
l'inversion du champ

Pendant l'inversion

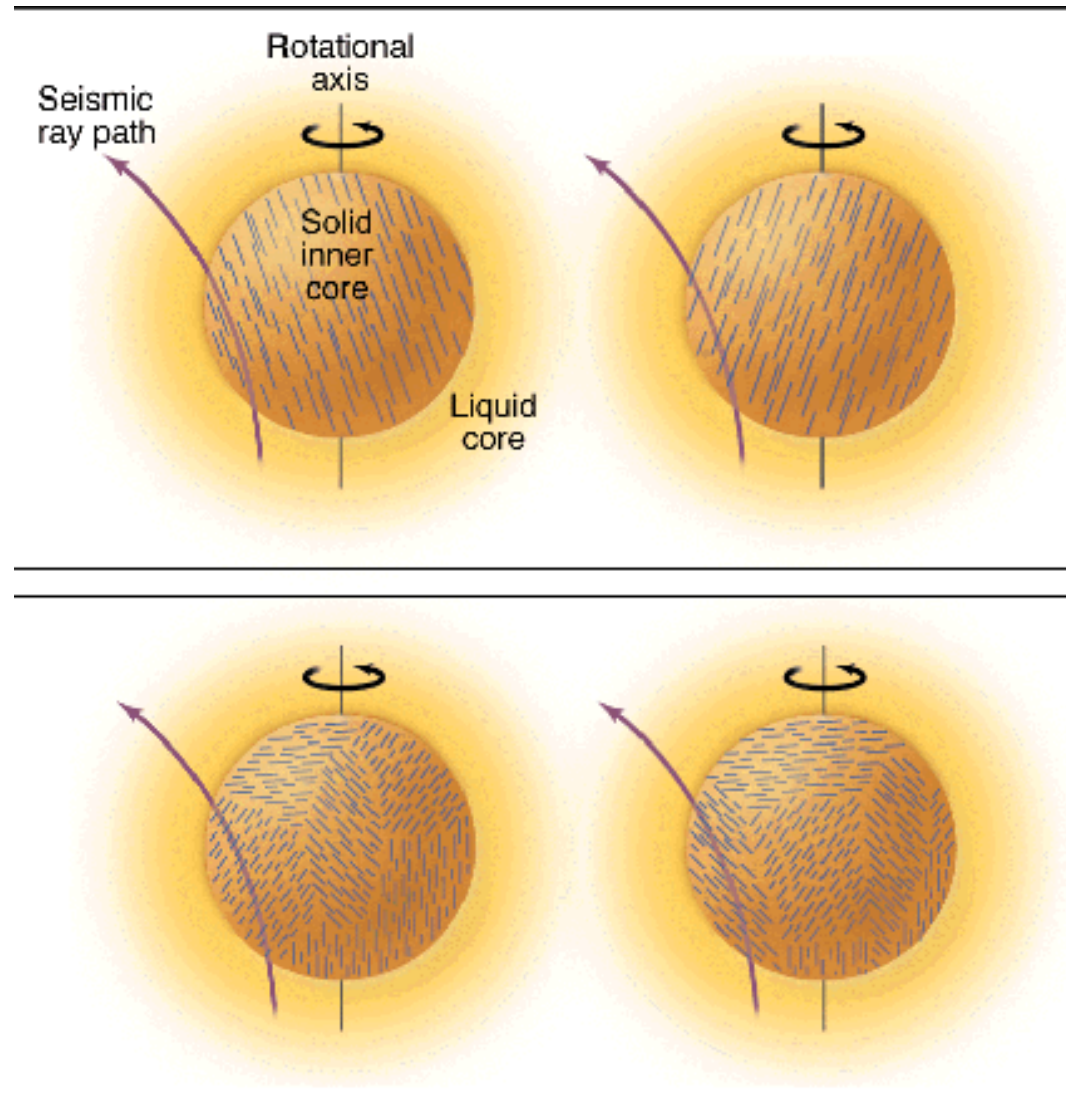
Après l'inversion

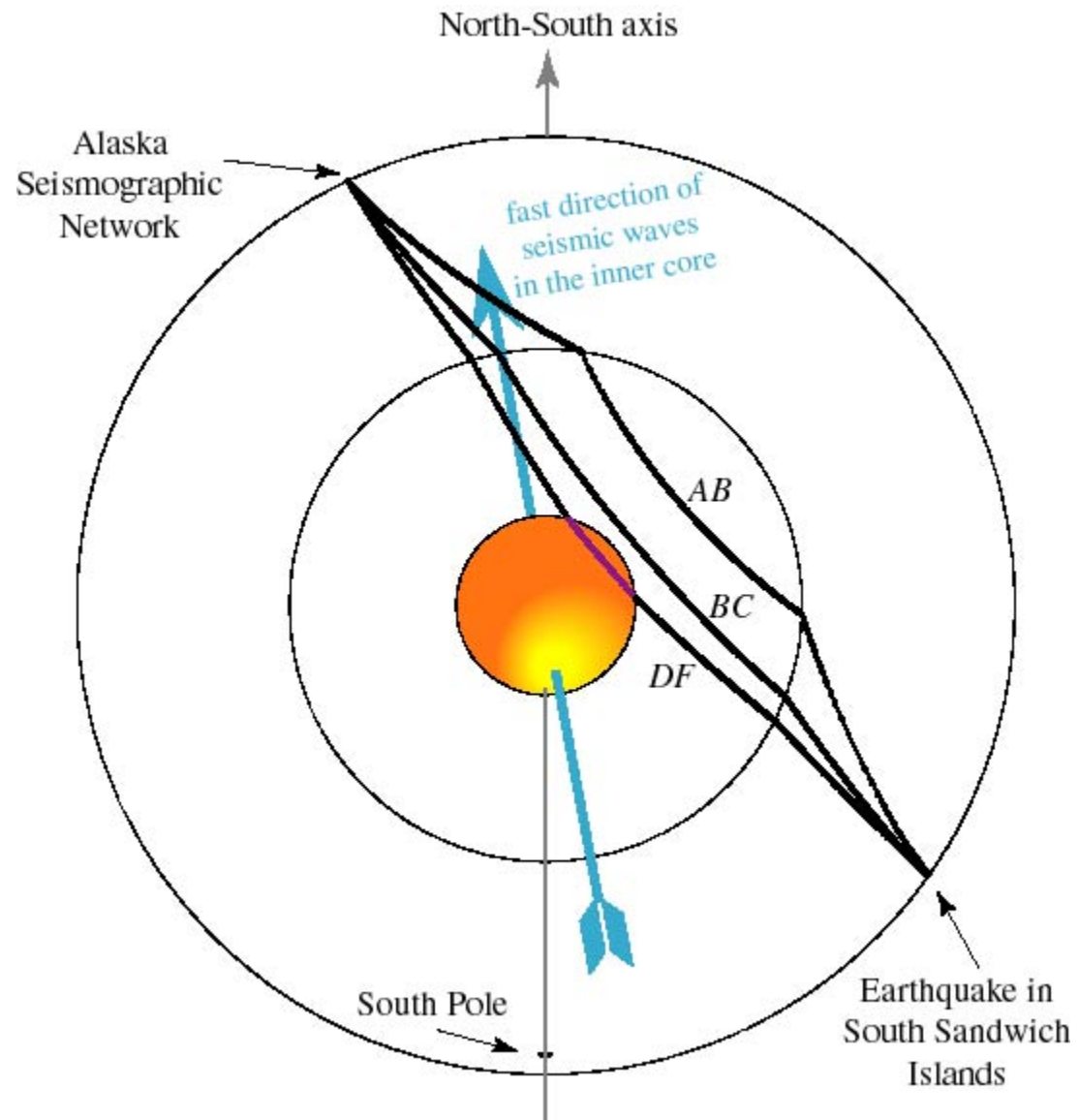
Glatzmaier and Roberts, 1995

Rotation différentielle de la graine

- Song and Richards (1996):
- Motivation: Glatzmaier and Roberts (1995)
- Idée: exploiter la présence d'anisotropie dans la graine et l'inclinaison de l'axe par rapport à l'axe de rotation de la terre
- COL (Alaska):
 - 14 ans d'enregistrements digitaux de qualité (1982-96)
 - +18 ans d'enregistrements analogiques WWSSN (1964-82)
 - Trajets des Iles South Sandwich vers COL : très sensibles à l'anisotropie (faible inclinaison du rai par rapport à l'axe de rotation)

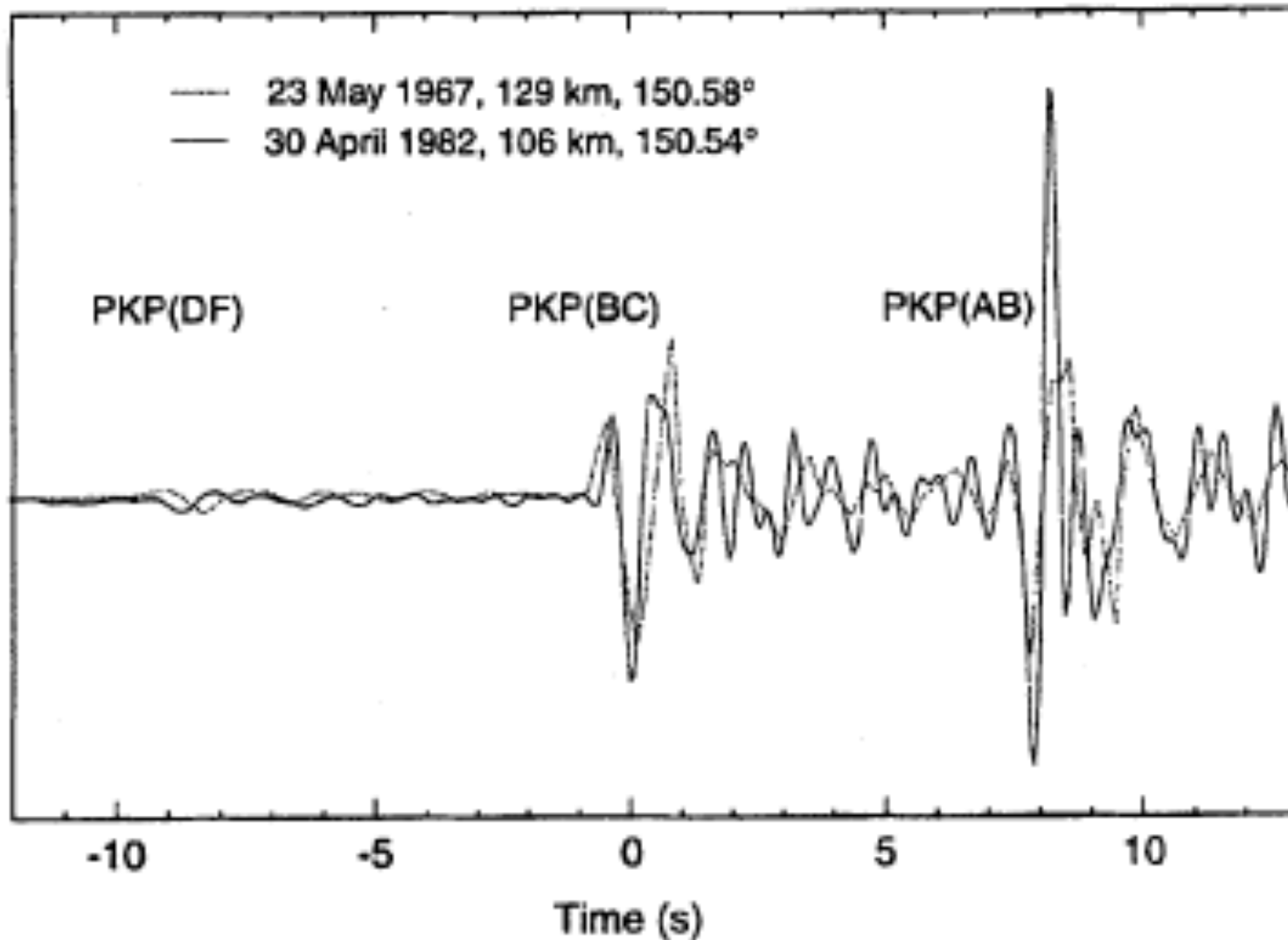
Rotation différentielle de la graine: principe de détection





Song and Richards, 1995

Doublets sismiques

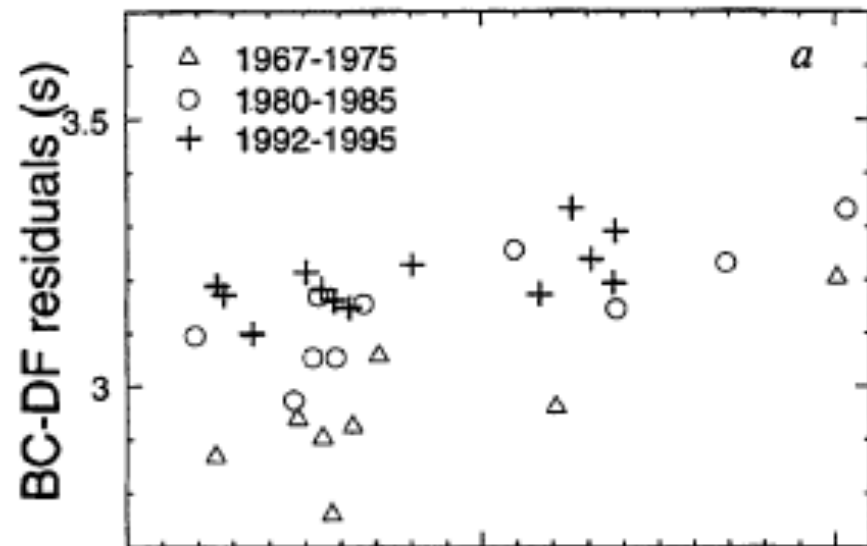


Si distance de 50 km entre les sources $\rightarrow \Delta t \sim 0.3$ s en 28 ans
Écart observé ~ 0.4 s en 15 ans

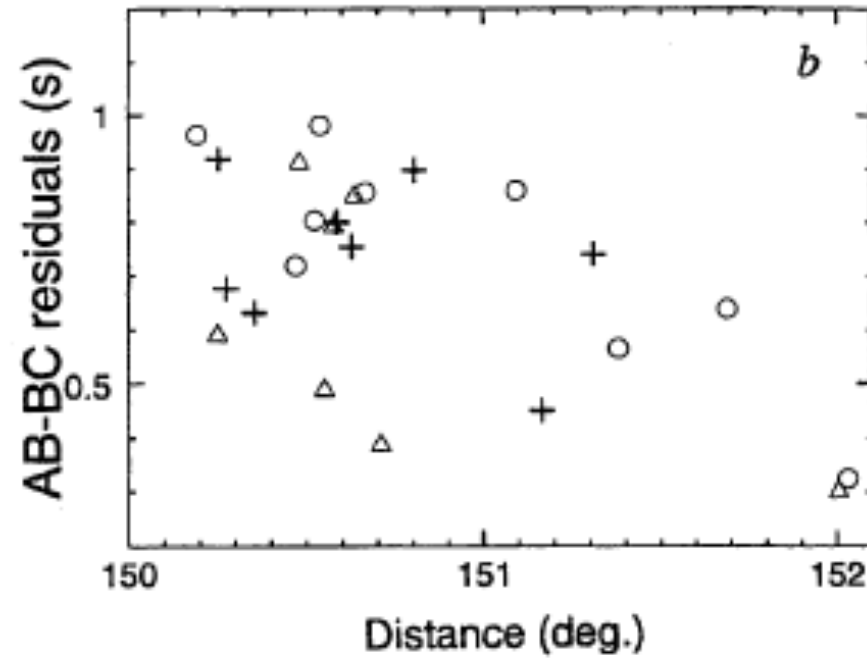
Song and Richards, Nature, 1996

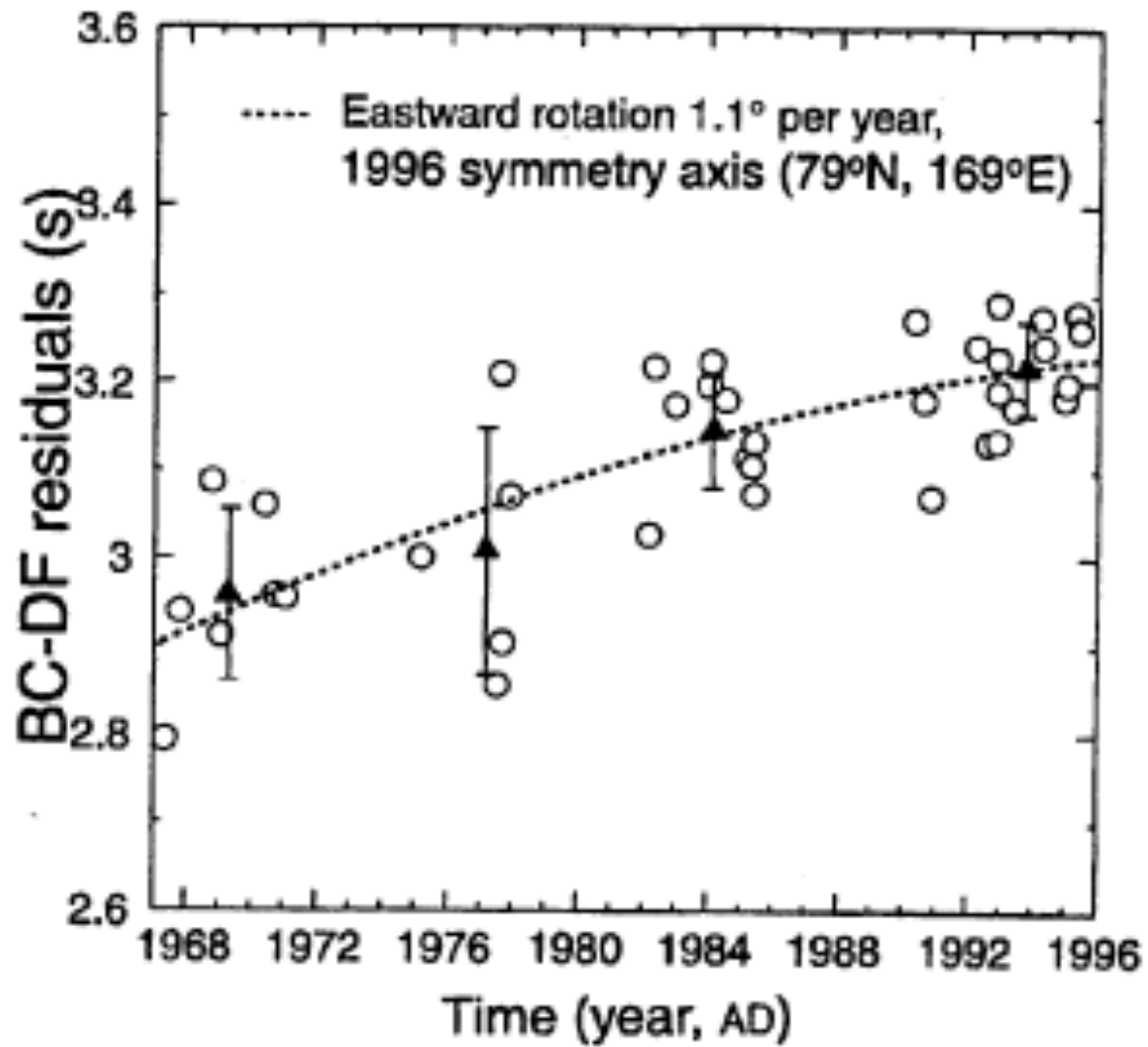
Station COL

BC-DF



AB-BC





Song and Richards, Nature, 1996

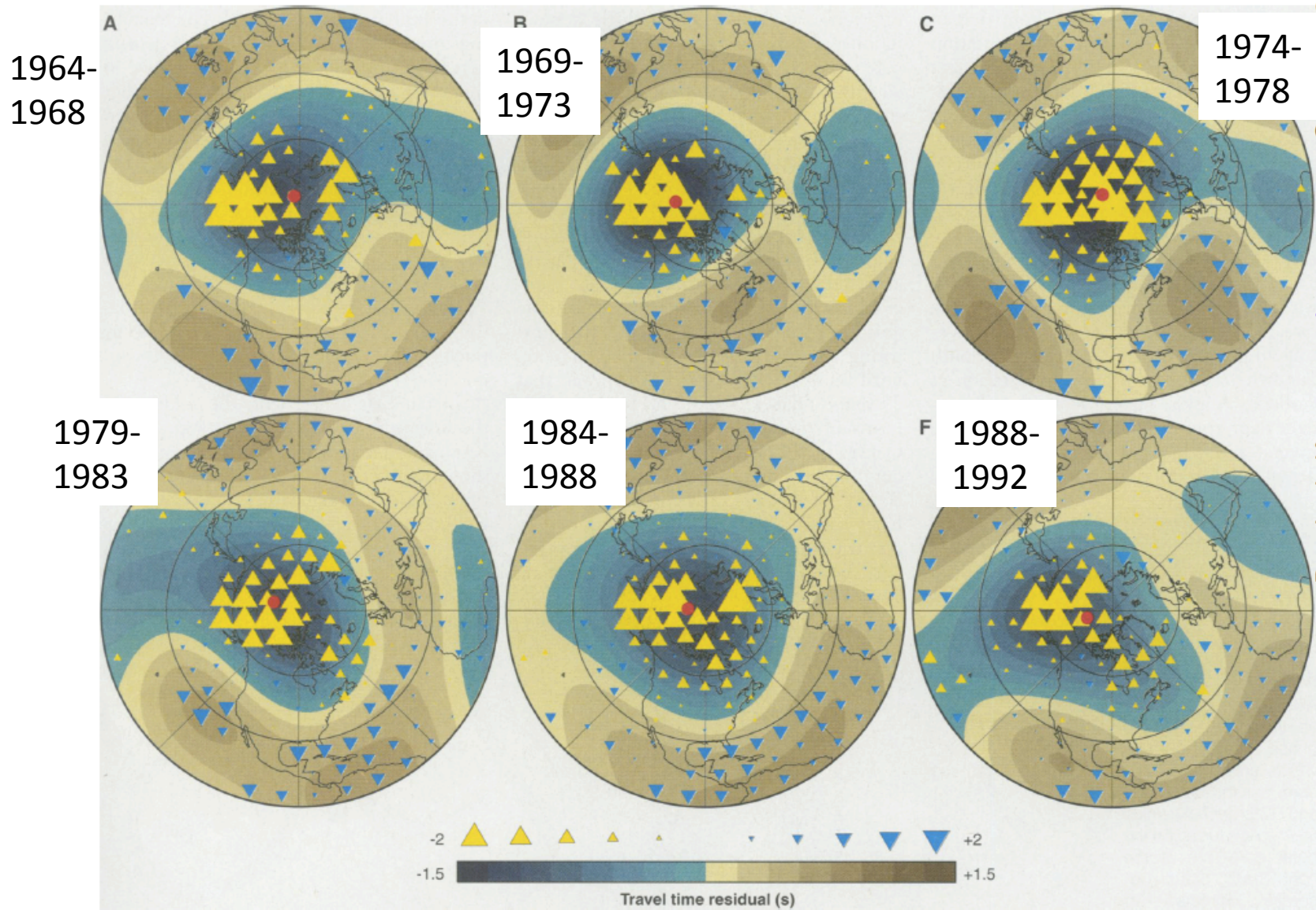
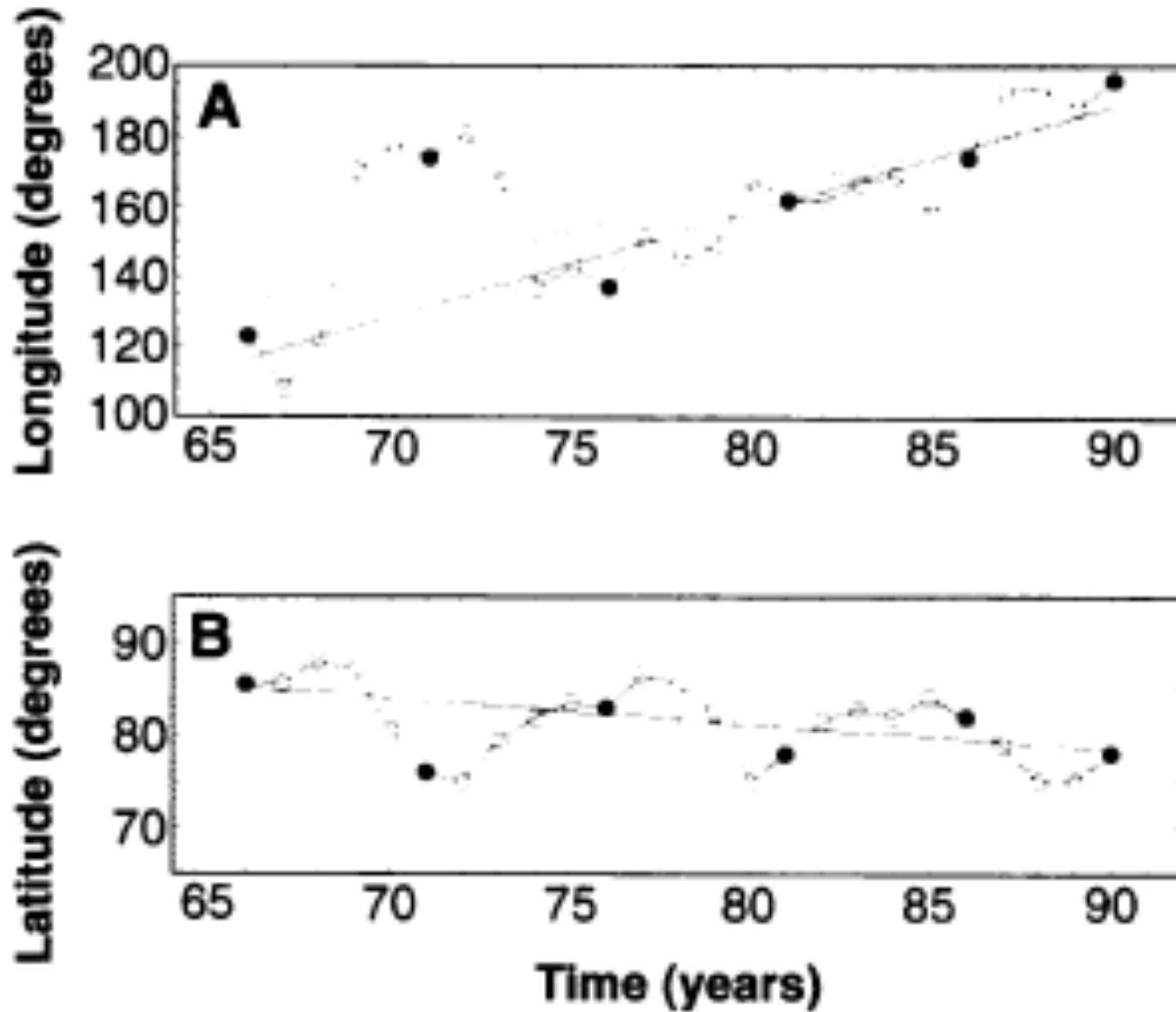


Fig. 2. Travel time residuals obtained from the GAD procedure for the 1964-1968 period (A) correspond to the center, the two inner circles correspond to 2000 km and

Color contours: best fitting spherical harmonics
Up to degree 4

Su, Dziewonski, Jeanloz, 1996, Science

Orientation de l'axe de symétrie en fonction du temps



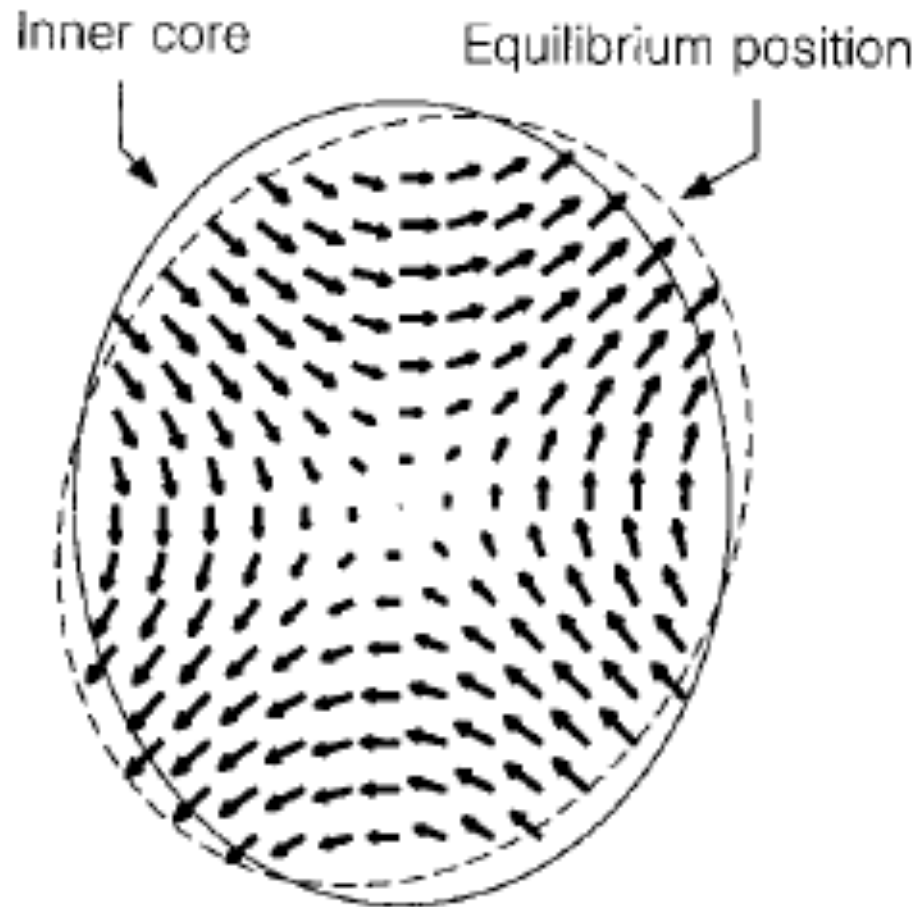
Rotation différentielle: 3deg/an vers l'Est

Su et al., 1996

- La rotation différentielle de la graine est-elle possible (Buffett, 1997)?
- Anomalies de masse dans le manteau induisent des perturbations du champ de gravité qui déforment les equipotentiels dans la terre entière:
 - $\sim 100\text{m}$ de variation radiale de l'equipotentielle de gravité en haut de la graine
- En moyenne, la surface de solidification est une surface equipotentielle (équilibre hydrostatique et thermodynamique)
 - Toute rotation de la graine hors de l'équilibre entraîne une force de rappel importante qui tend à immobiliser la graine ($\sim 10^{21}$ Nm comparé à la force électromagnétique exercée par la dynamo: $\sim 10^{19}$ Nm)
 - => graine couplée par gravitation au manteau

- Rotation différentielle n'est possible que si la graine peut se déformer au cours de celle-ci (Buffett, 1997):
 - => estimation de la viscosité de la graine:
 $\eta \sim 3 \times 10^{16} \text{ Pa s}$
 - ou $2 \times 10^{14} \text{ Pa s}$ si la déformation est limitée à une couche de 100 km sous l'ICB

Champ de vitesses induit par une déformation de la graine par rapport à sa position d'équilibre (composante de degré 2)



Section equatoriale
Cas isovisqueux

Buffett, 1997

– Autres estimations:

- à partir du facteur de qualité des ondes de cisaillement ($Q_\mu = 85$ dans PREM): : $\eta \sim 10^{15} \text{Pa s}$ (minimum)

– Faible viscosité implique une taille de grains faible $\sim 5 \text{ mm}$

- Importance des contraintes de déformation (empêchent les grains de croître)
- Déformation ne favorise pas l'alignement des cristaux de fer Hcp dans la direction de l'axe de rotation
- Il faut trouver une autre cause pour l'anisotropie dans la graine (Buffett, 1997)

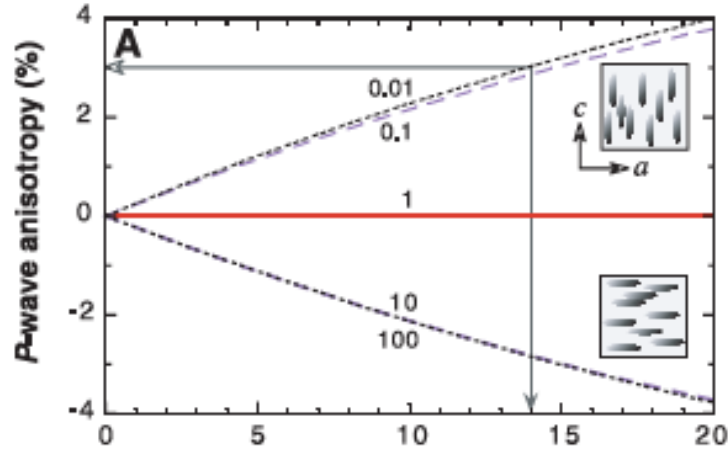
Autre cause possible d'anisotropie dans la graine

- Singh et al. (2000):
 - Théorie effective pour milieux composites:
 - 3-10% d'inclusions fluides ellipsoïdales alignées dans le plan équatorial et de viscosité $\sim 100 \text{ kg/m/s}$, expliquent les observations sismiques: atténuation forte, vitesses S faibles, anisotropie en P
 - Source des inclusions fluides: dendrites, éléments légers

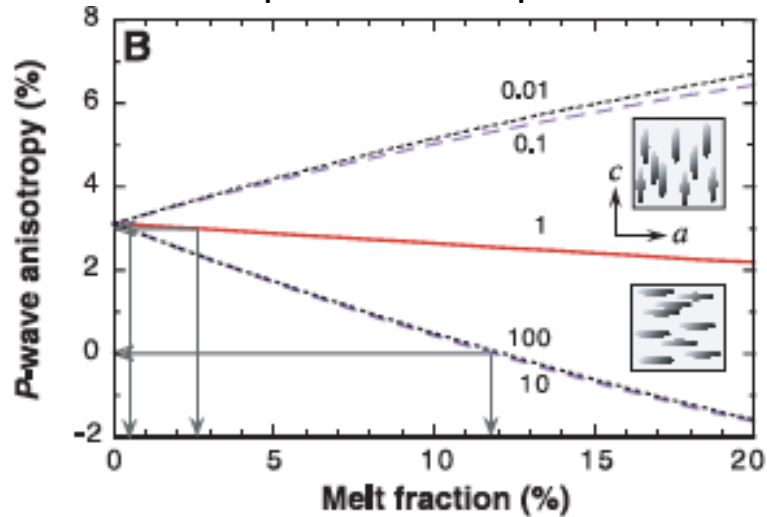
Forme des inclusions fluides:

$$x^2 / a^2 + y^2 / a^2 + z^2 / c^2 = 1$$

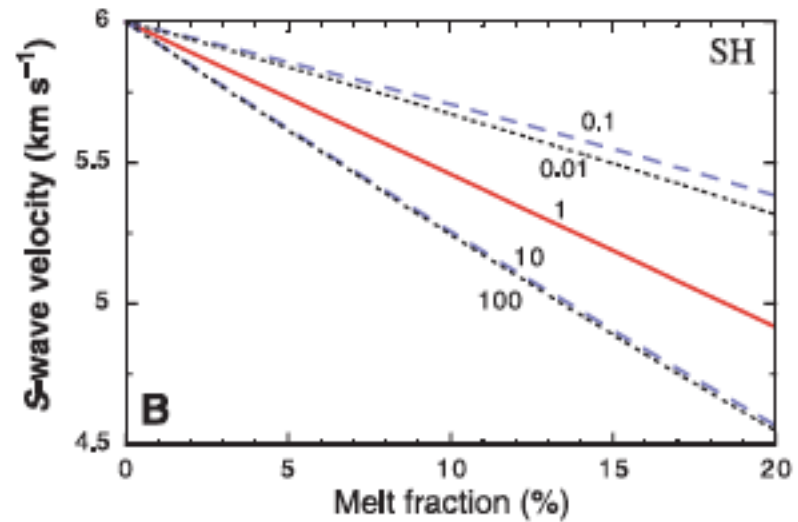
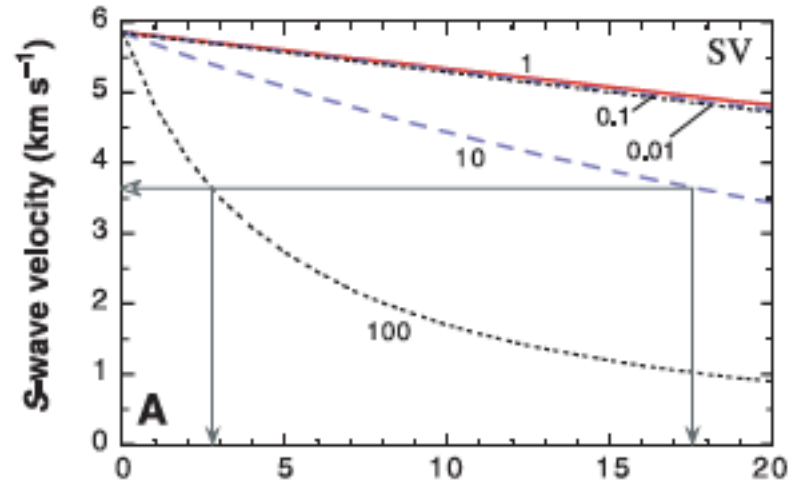
Modèle de départ isotrope



Modèle de départ anisotrope



Etude en fonction du rapport a/c

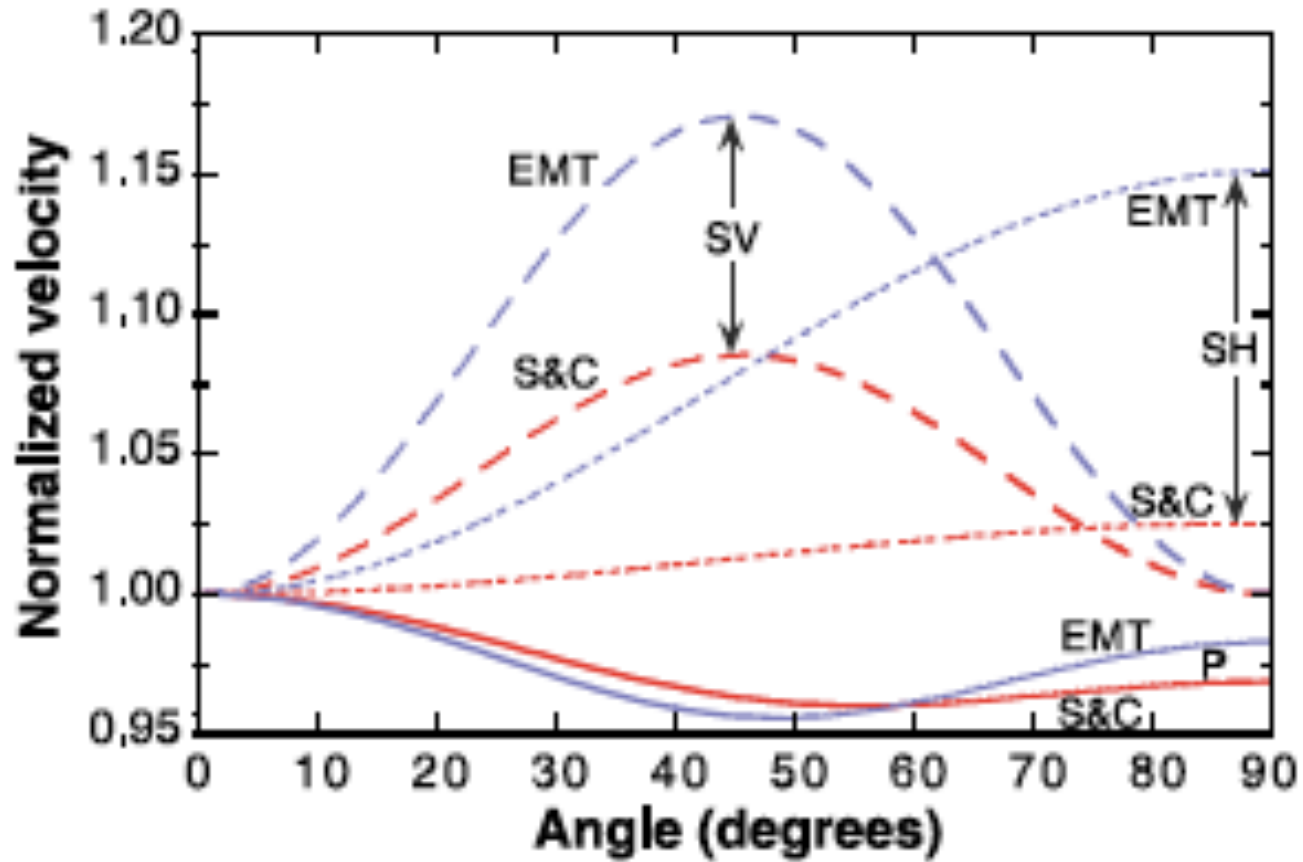


=> a/c > 1

Flèches: valeurs en accord avec les observations sismiques

Singh et al., 2000

5% melt fraction --- $a/c = 10$



EMT: effective medium theory
S&C: Stixrude and Cohen (1995)

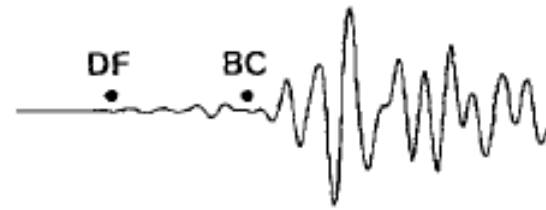
Conclusions

- 3-10% d'inclusions fluides de viscosité 100 Pa s avec $a/c=10$ expliquent les données d'anisotropie en P, de vitesses S faibles, et d'atténuation faible
- Valable pour la partie externe de la graine (données de modes et BC-DF)
- => Prédissent une anisotropie en S forte, de l'ordre de 20%
- Inclusions pourraient être dues aux éléments légers présents dans la graine sous forme liquide
 - Par exemple: température de fusion du soufre est bien inférieure à celle du fer
 - Alignement dans le plan équatorial pourrait être dû à la rotation de la terre
 - Diminution de la viscosité de la graine pourrait favoriser la convection dans celle-ci
- Problèmes:
 - Supposent une anisotropie sous-jacente avec alignement des cristaux de fer Hcp
 - Prédications en contradiction avec les observations d'anisotropie en atténuation

Trajets
polaires



Trajets
équatoriaux



1994 07 25
S.Sandwich \rightarrow NRIL
 $\Delta=149.7^\circ$ $h=100$ km
 $\Theta = 23.7^\circ$



1993 03 20
S.Sandwich \rightarrow NRIL
 $\Delta=149.6^\circ$ $h=116$ km
 $\Theta = 23.9^\circ$



1995 01 03
Drake Passage \rightarrow ARU
 $\Delta=150.4^\circ$ $h=33$ km
 $\Theta = 30.0^\circ$

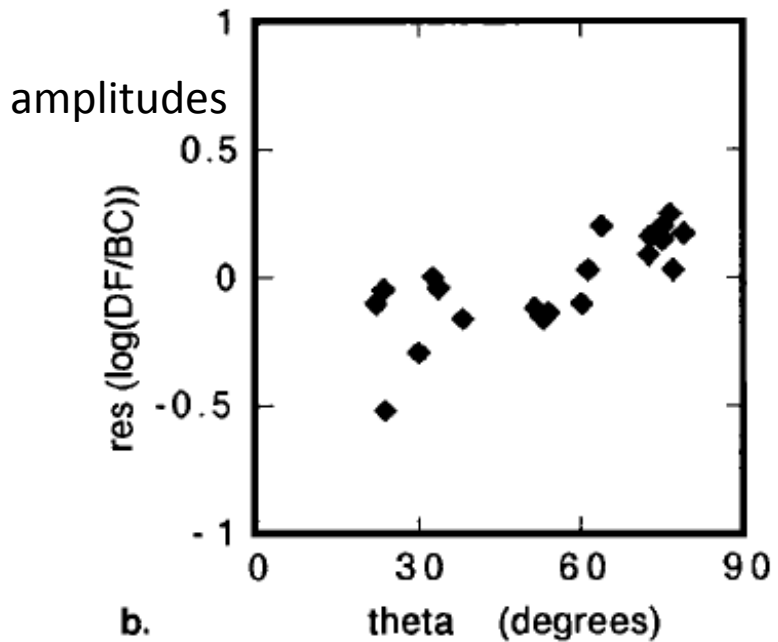
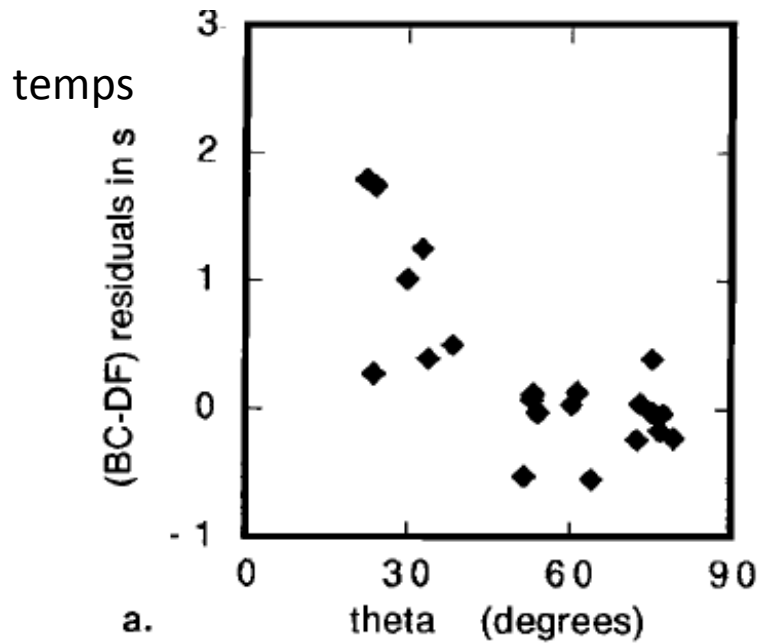


1995 01 03
Drake Passage \rightarrow AAK
 $\Delta=150.9^\circ$ $h=33$ km
 $\Theta = 38.3^\circ$

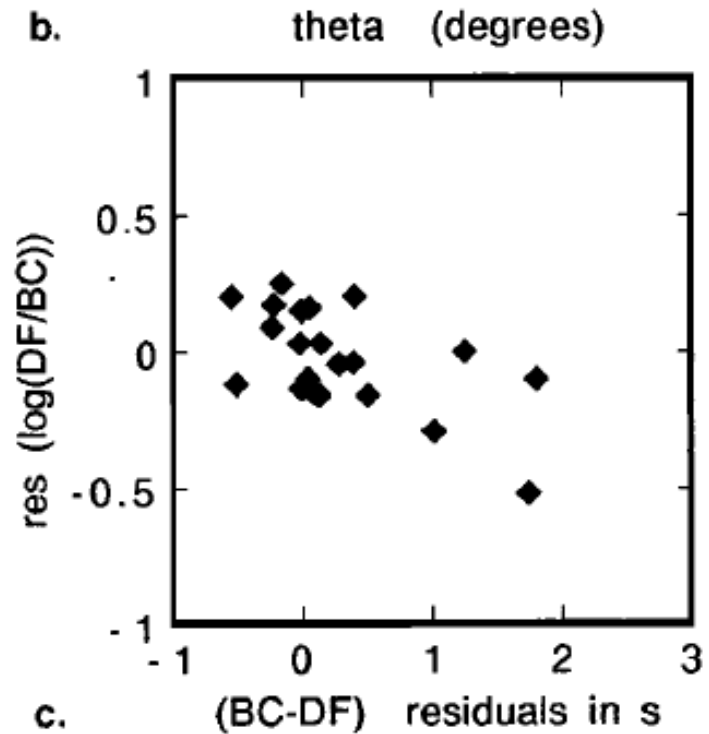


1990 10 17
Peru-Brazil \rightarrow HYB
 $\Delta=149.6^\circ$ $h=599$ km
 $\Theta = 75.4^\circ$

*Souriau and
Romanowicz, 1997*



Temps différentiels BC-DF
Et rapports d'amplitude
Sous l'Afrique

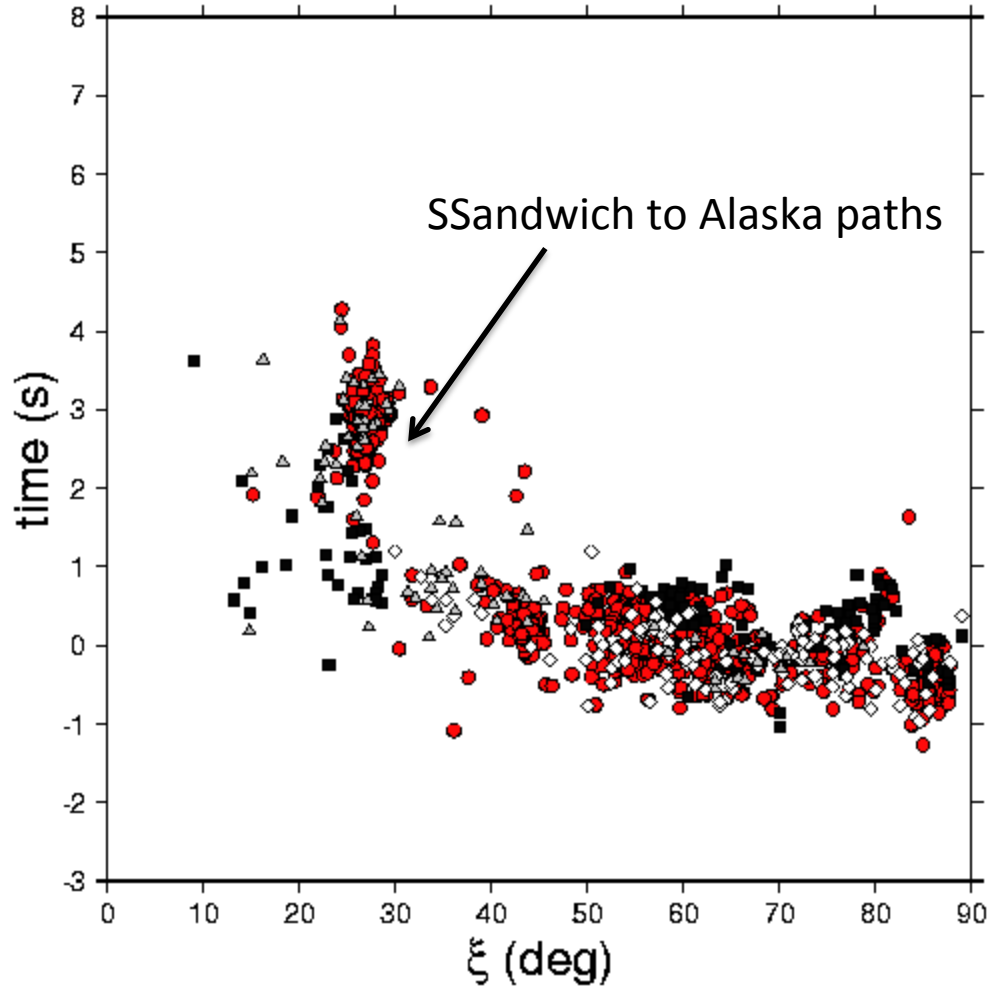


- Souriau and Romanowicz (1997): Cause de l'anisotropie en atténuation dans les minéraux:
 - Inclusions fluides:
 - vitesses faibles corrélées avec les atténuations fortes
 - Anisotropie intrinsèque des cristaux:
 - Vitesses faibles corrélées avec atténuations faibles (en accord avec les observations)
- Attention à transposer aux conditions de la graine

Rotation différentielle de la graine (2)

- Premières détections s'appuient sur l'inclinaison de l'axe de symétrie de l'anisotropie par rapport à l'axe de rotation
- Souriau et al. (1997) montrent que cette inclinaison est illusoire.
 - Variations dans le temps dues aux erreurs de mesure et aux erreurs dans la localisation des sources
 - Trajet SSandwich -> Alaska compliqué: fortes hétérogénéités dans le manteau (zones de subduction dans les deux régions)

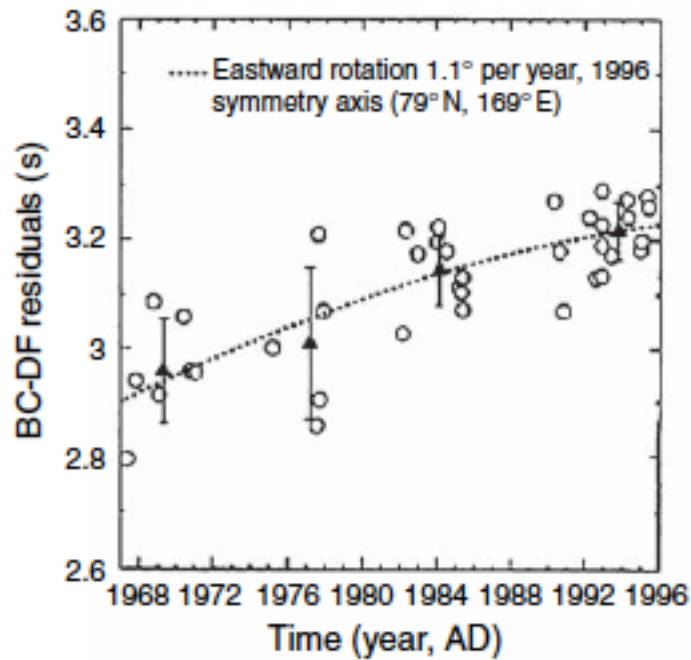
PKP(BC-DF) residuals



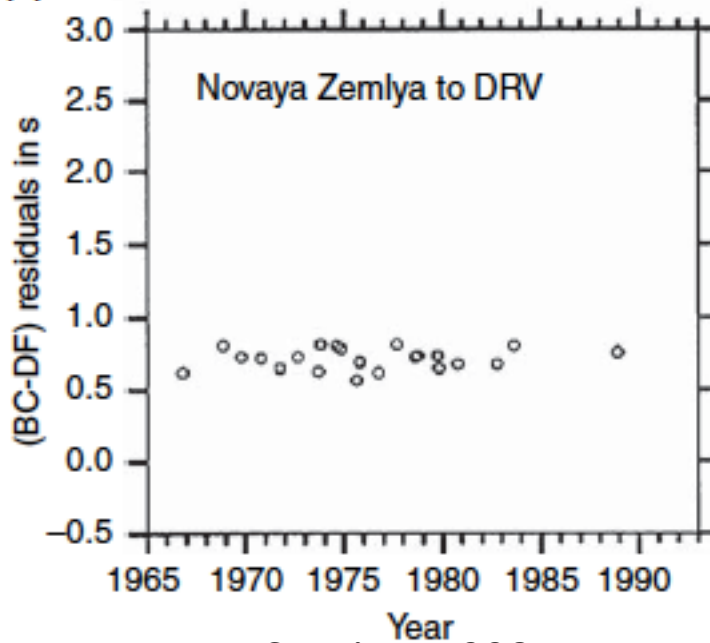
Reference model: ak135 (after Engdahl's relocation and ellipticity correction)

- Creager's and McSweeney's dataset (N=777)
- Tanaka's dataset (N=163)
- ◇ Souriau's dataset (N=138)
- △ Tkalčić's dataset (N=79)

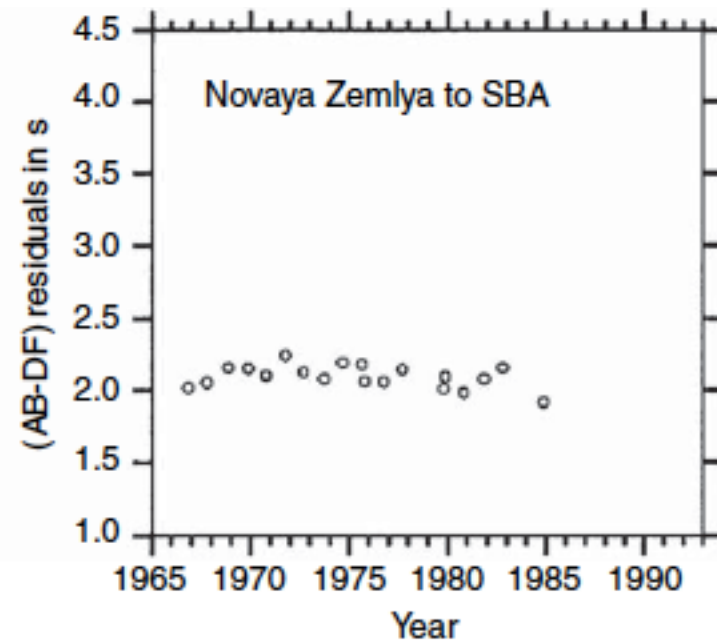
Tkalčić and Romanowicz, 2002



Song and Richards, 1996

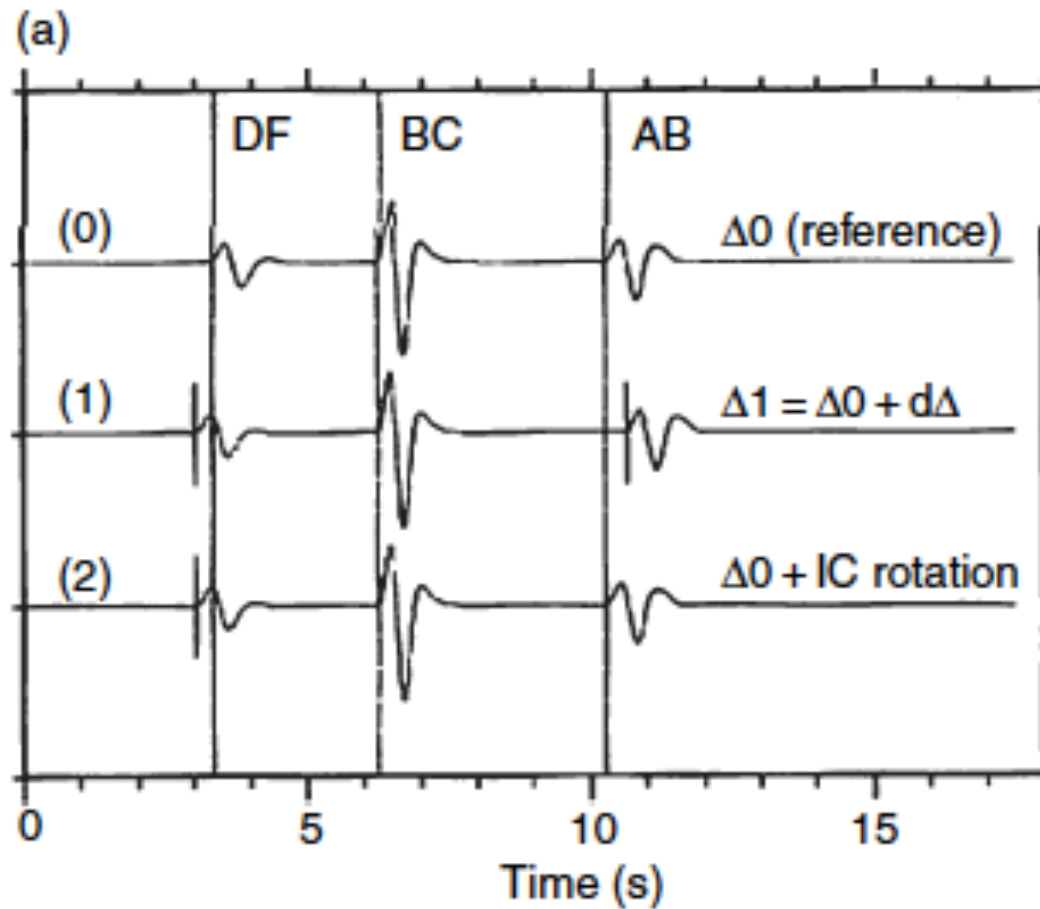


Souriau, 1998

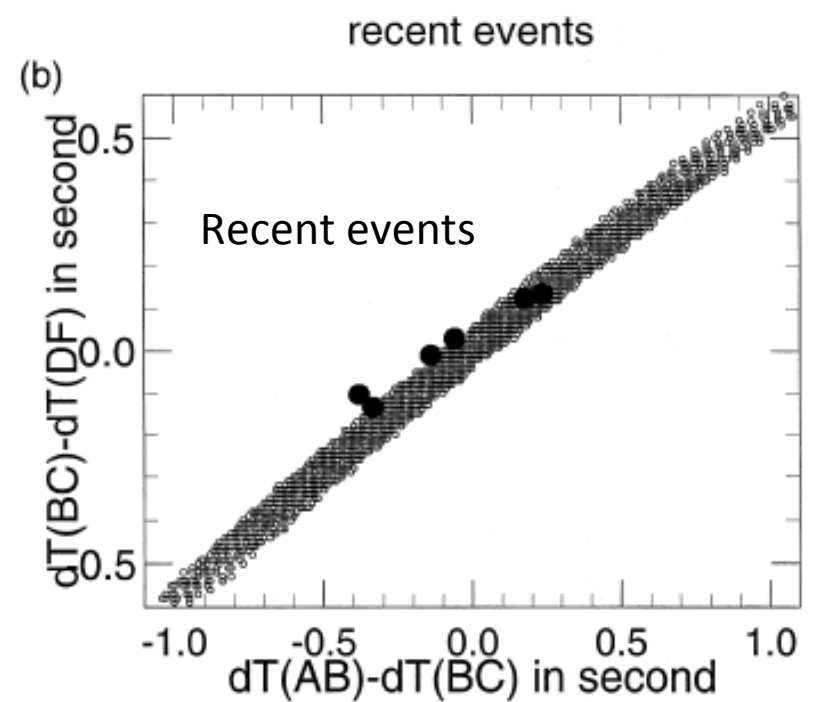
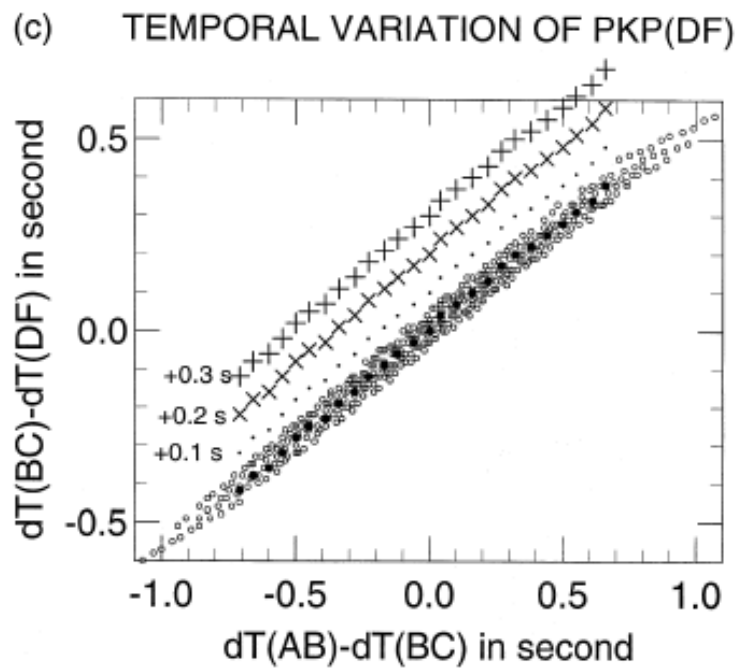
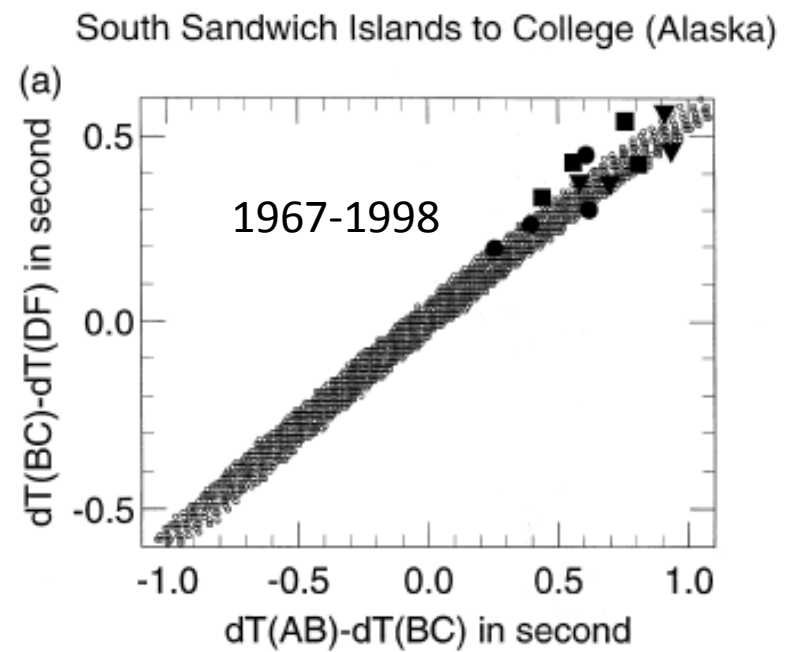
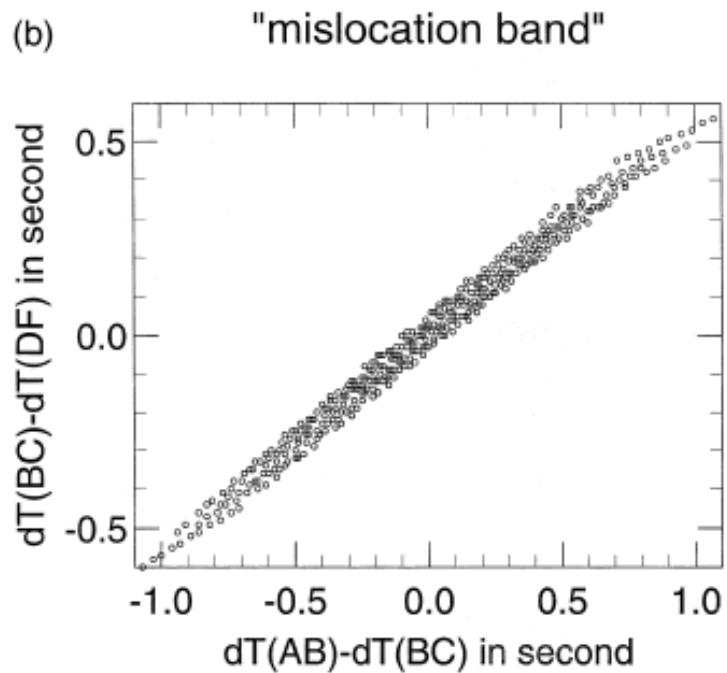


Li and Richards, 2003

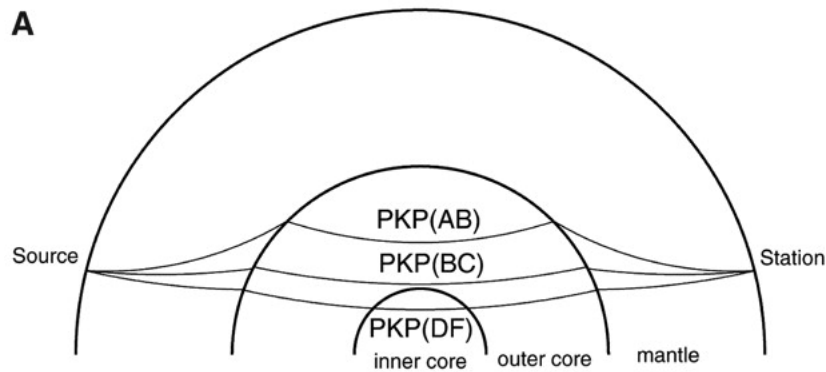
Méthode des "doublets de séismes"



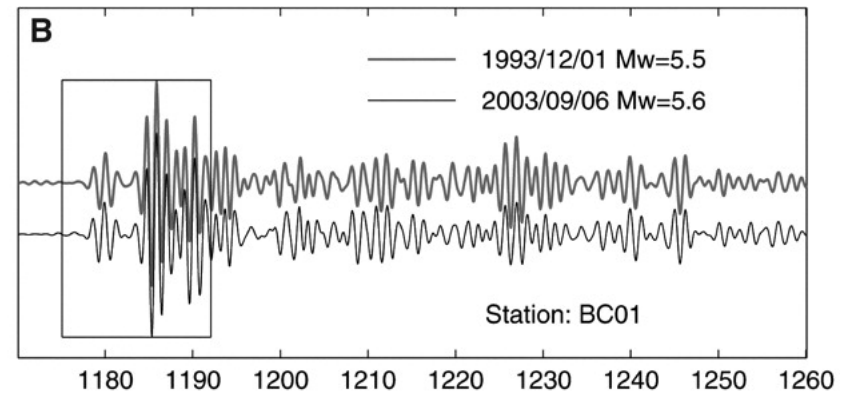
D'après Souriau, 2007



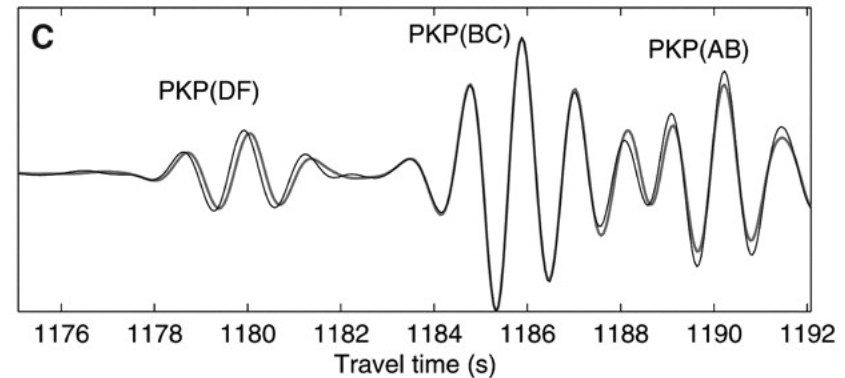
Exceptional South Sandwich Islands Earthquake Doublet



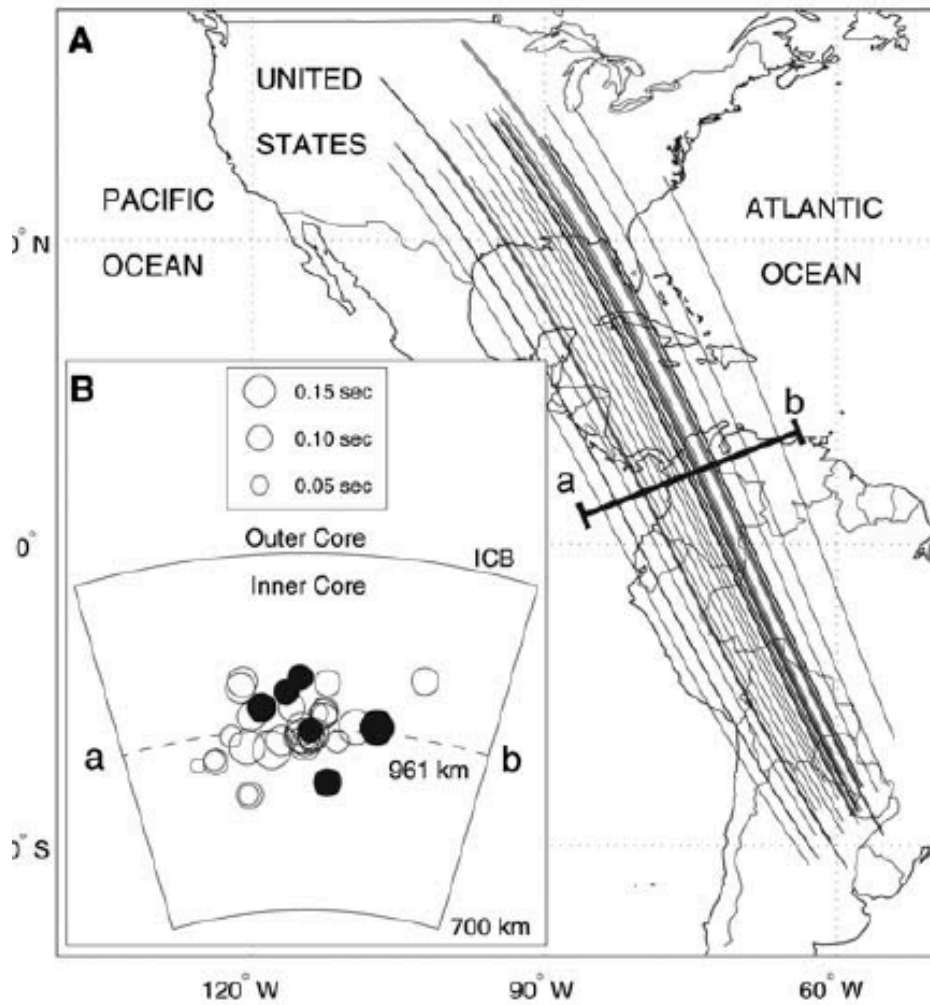
Hypocenter separation:
100 m vertically
<1 km horizontally



Paths to Alaska

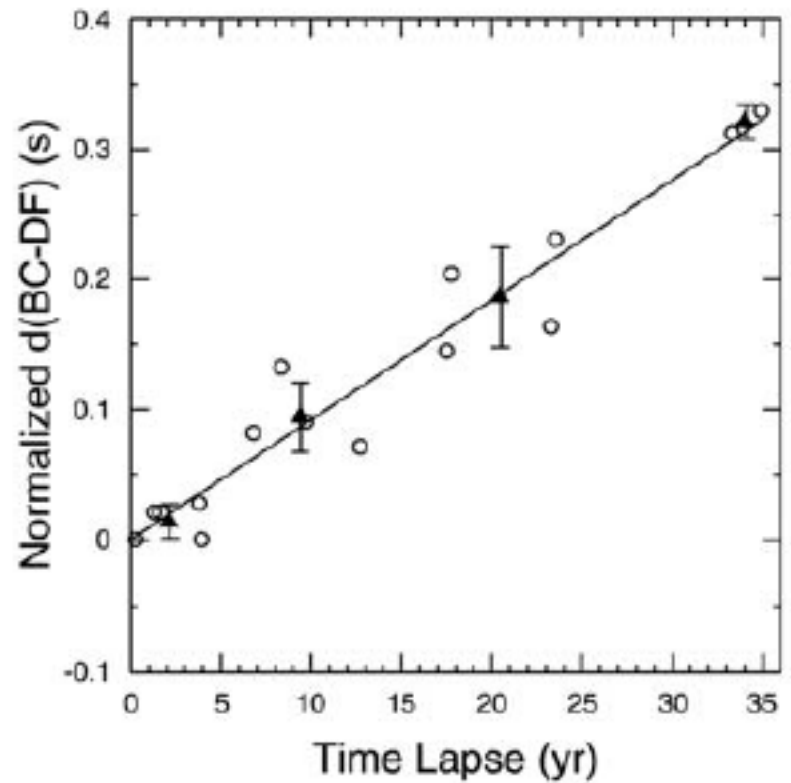


Zhang et al., 2005, Science



- Paths to arrays in Alaska
- Paths to single station

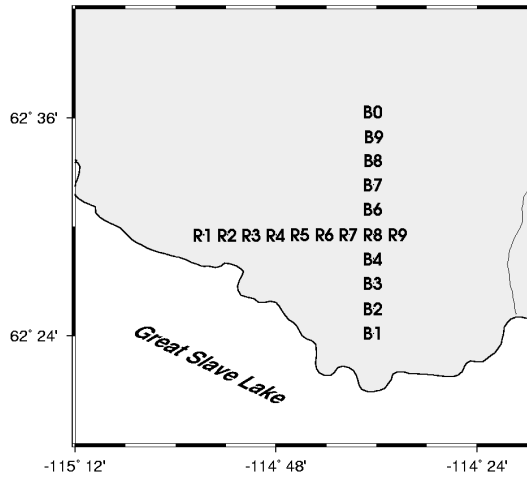
Temporal change of BC-DF times



⇒ Rotation de la graine de 0.3-0.5 deg/an
 ⇒ (plus vite que le manteau)

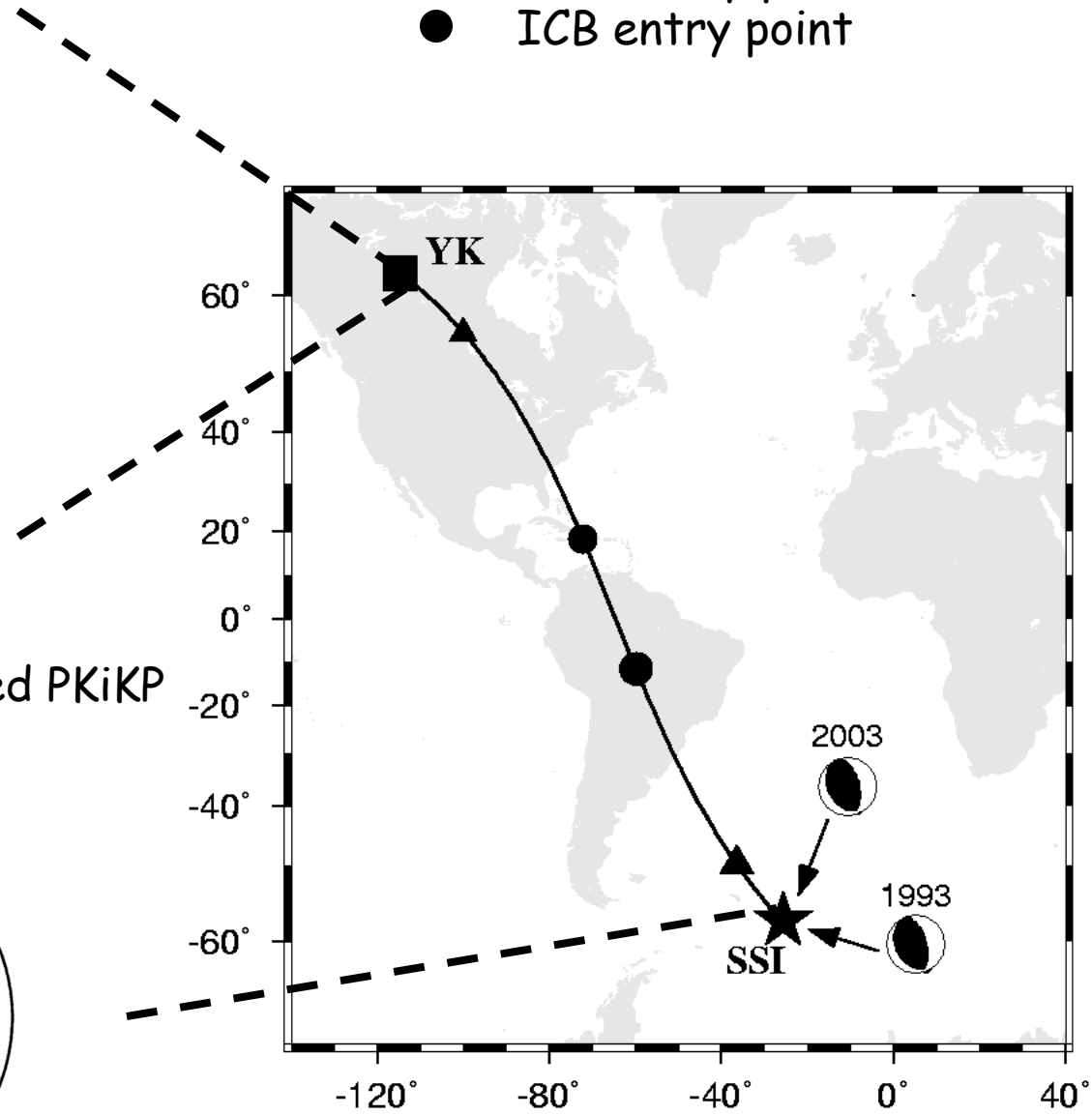
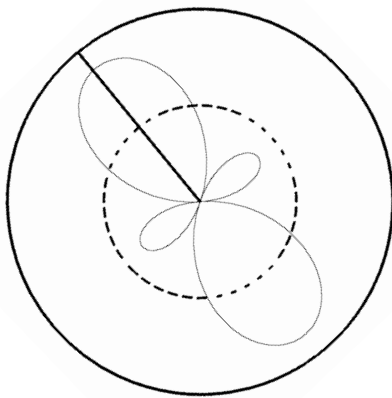
Zhang et al., 2005

Yellowknife array



- ▲ CMB entry point of PKiKP
- ICB entry point

Distance: 137.8°
 Post-critically reflected PKiKP

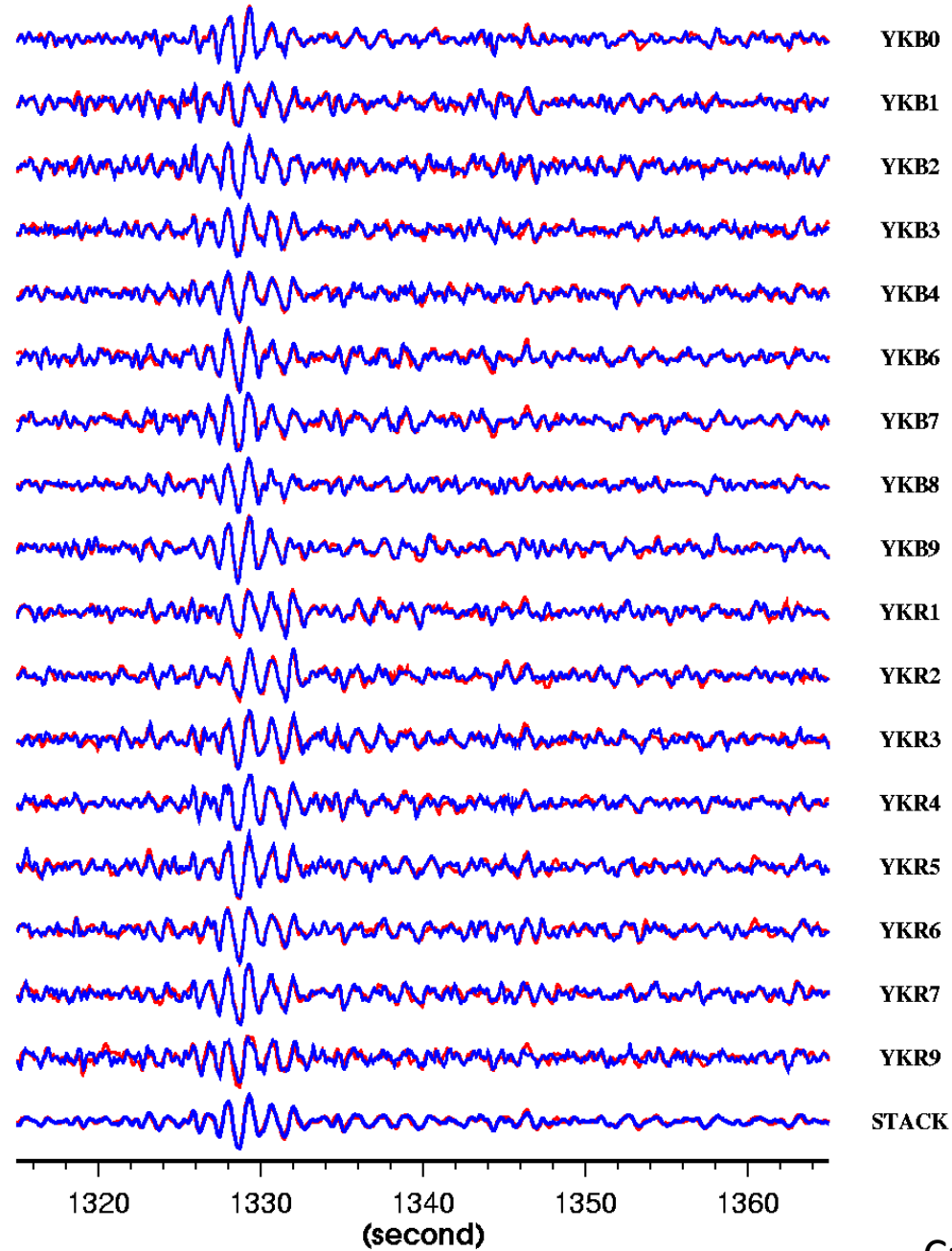


PP

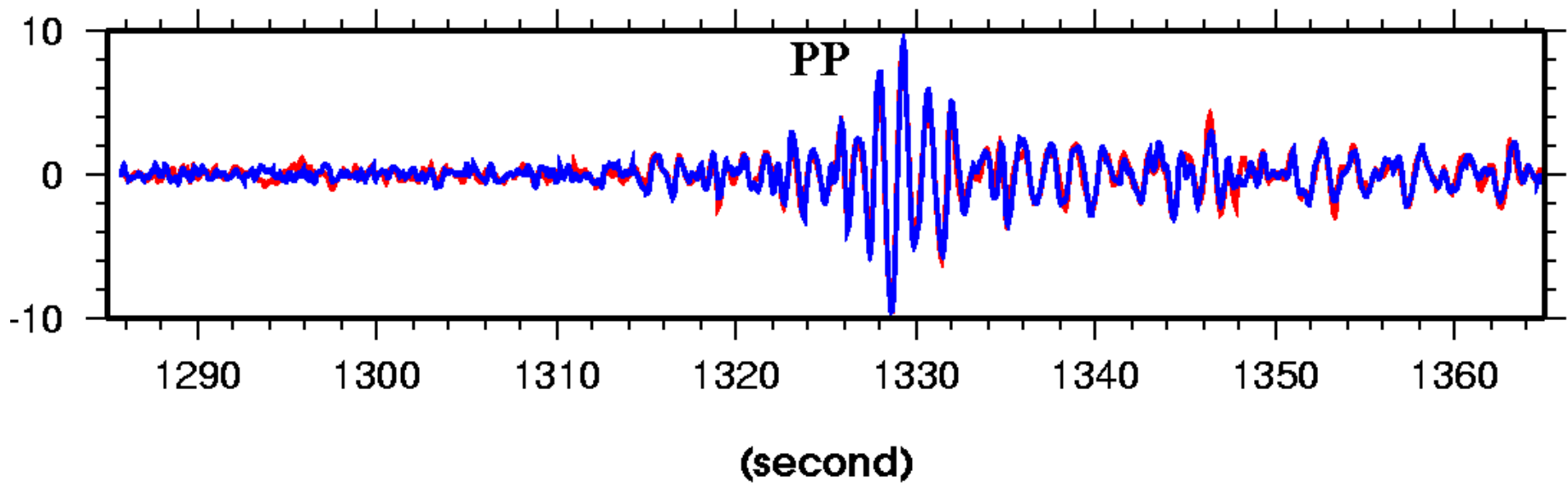
Bleu: 1993

Rouge : 2003

Cross-correlation
 $r > 0,97$



Stacked raw doublet PP waveforms at YKW

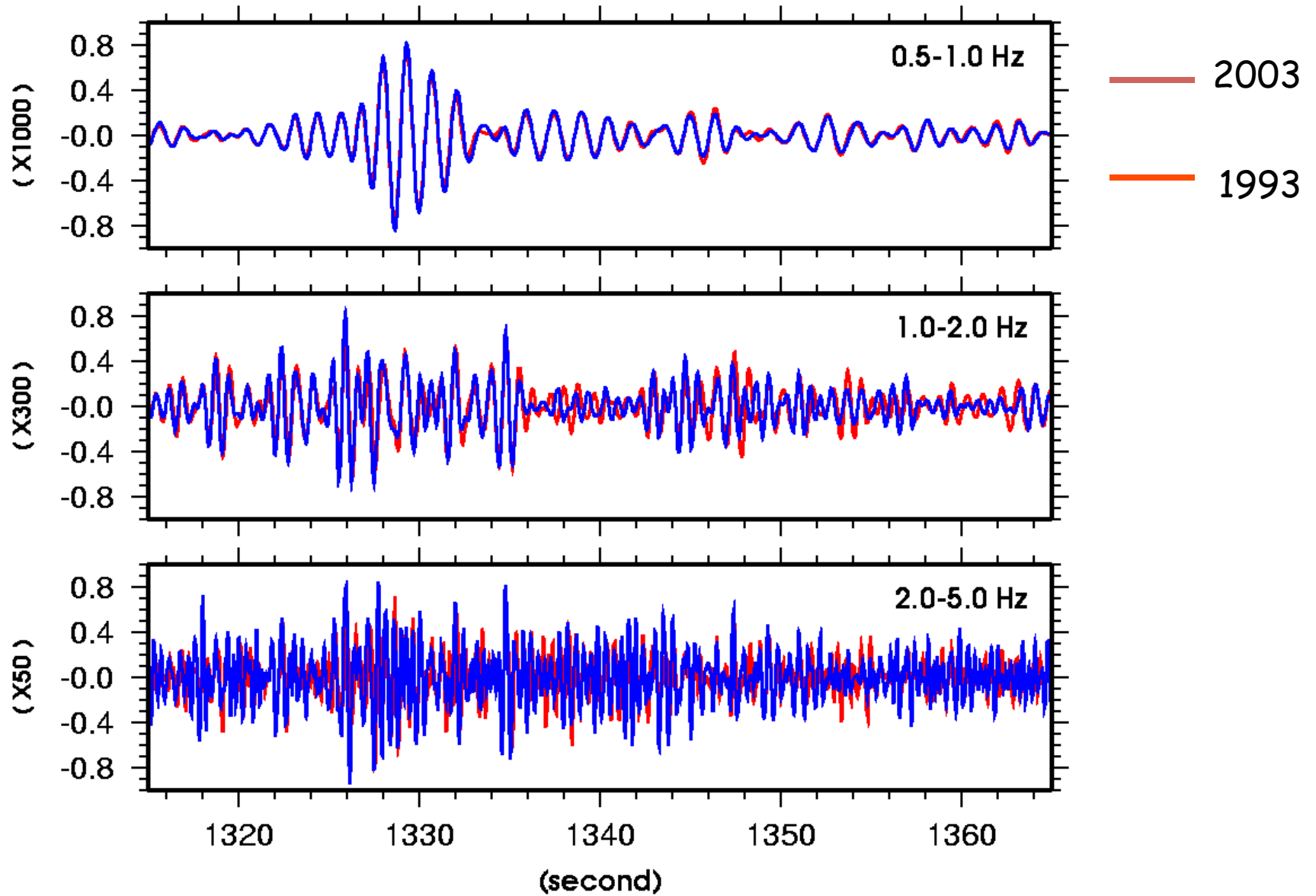


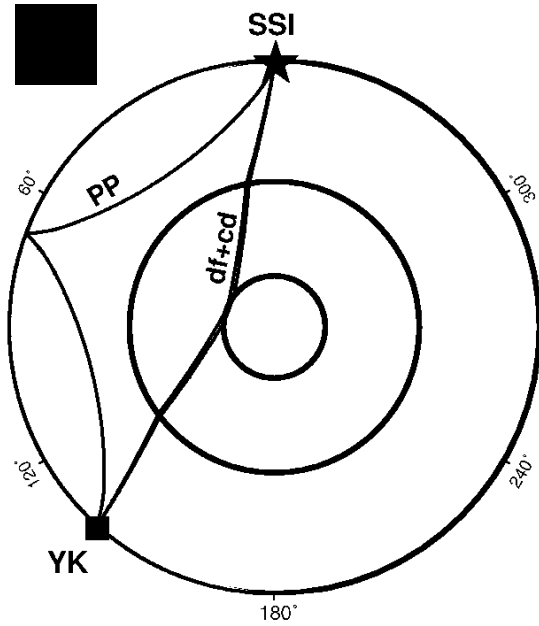
— 2003 event ($M_w = 5.6$)

— 1993 event ($M_w = 5.5$)

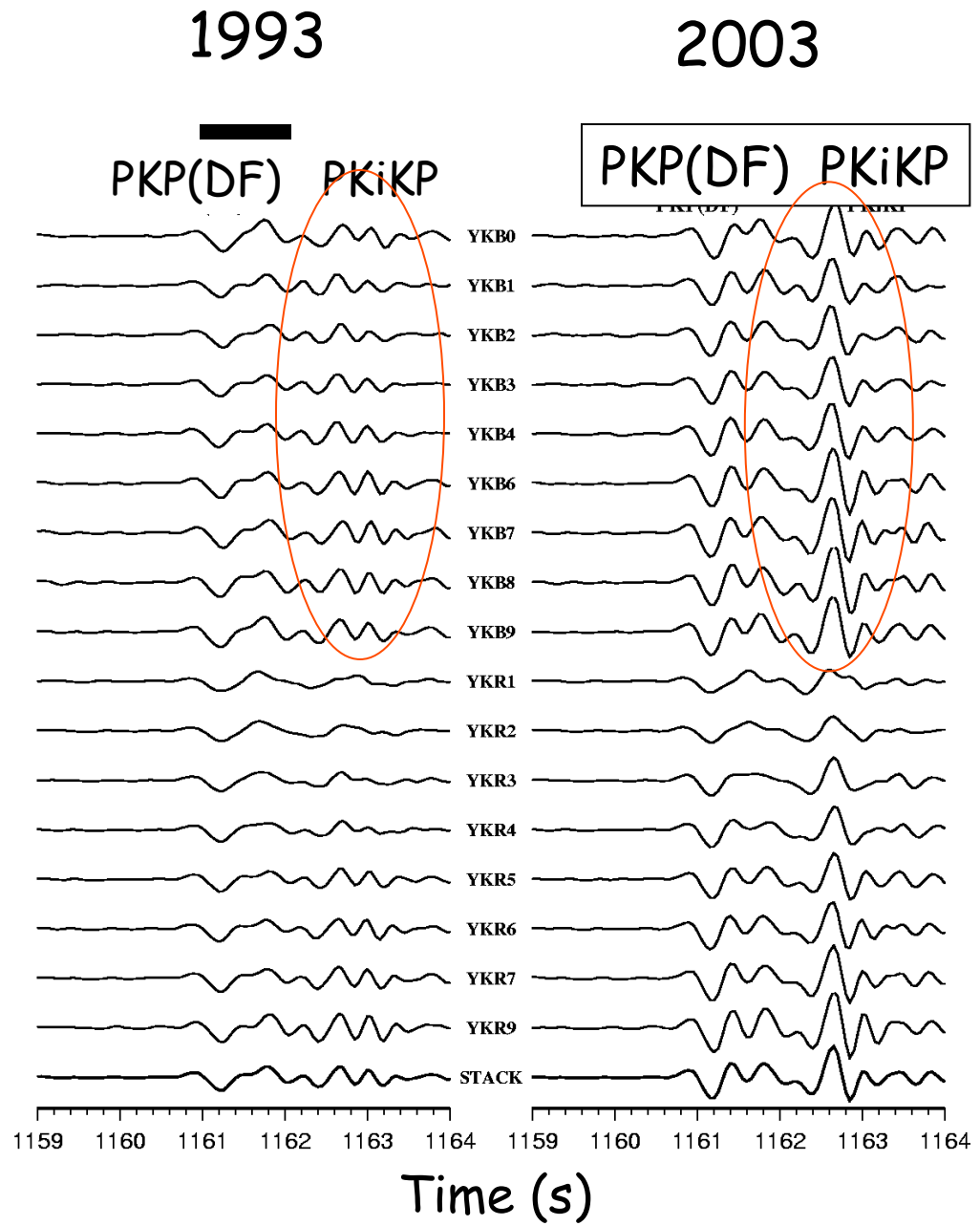
Stacked filtered doublet waveforms at Yellowknife

PP



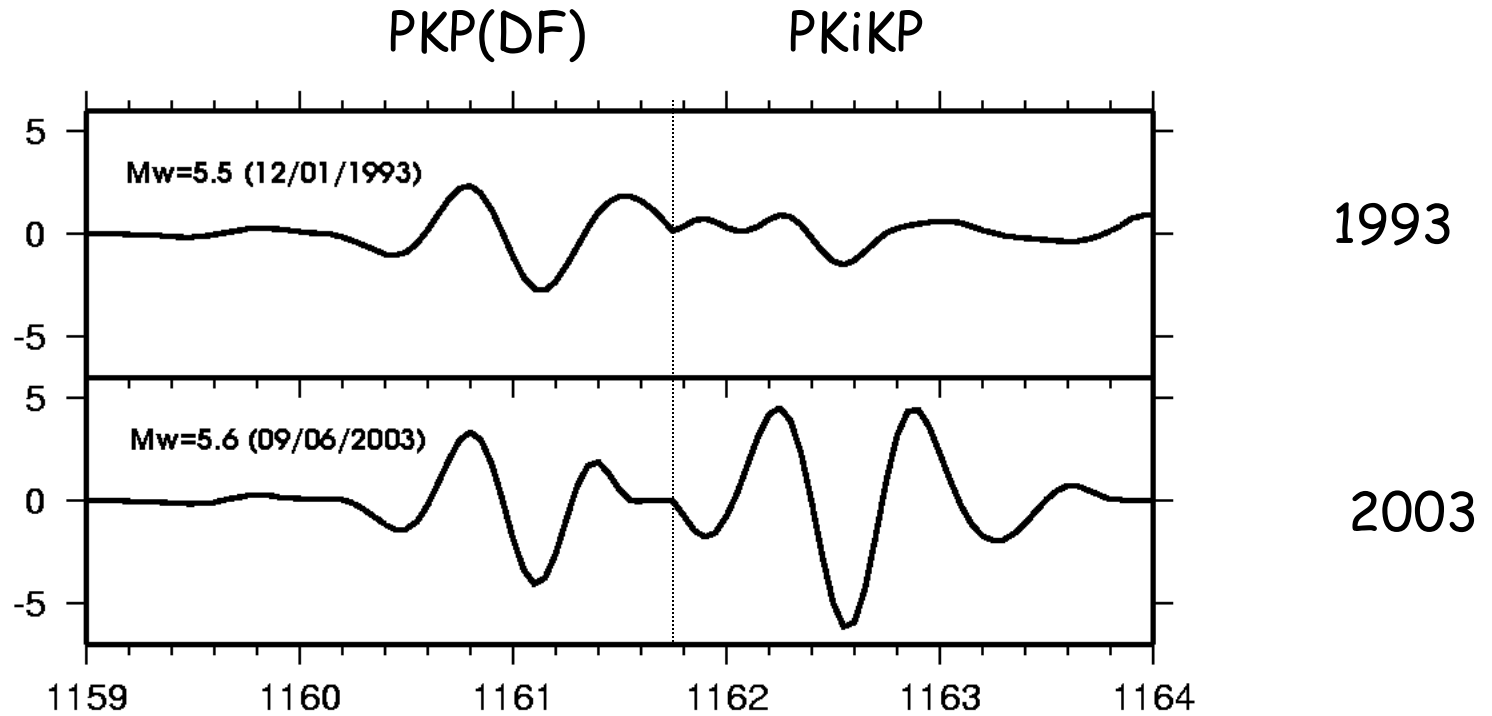


$$\Delta = 137.8^\circ$$



Filtered: 1-2 Hz

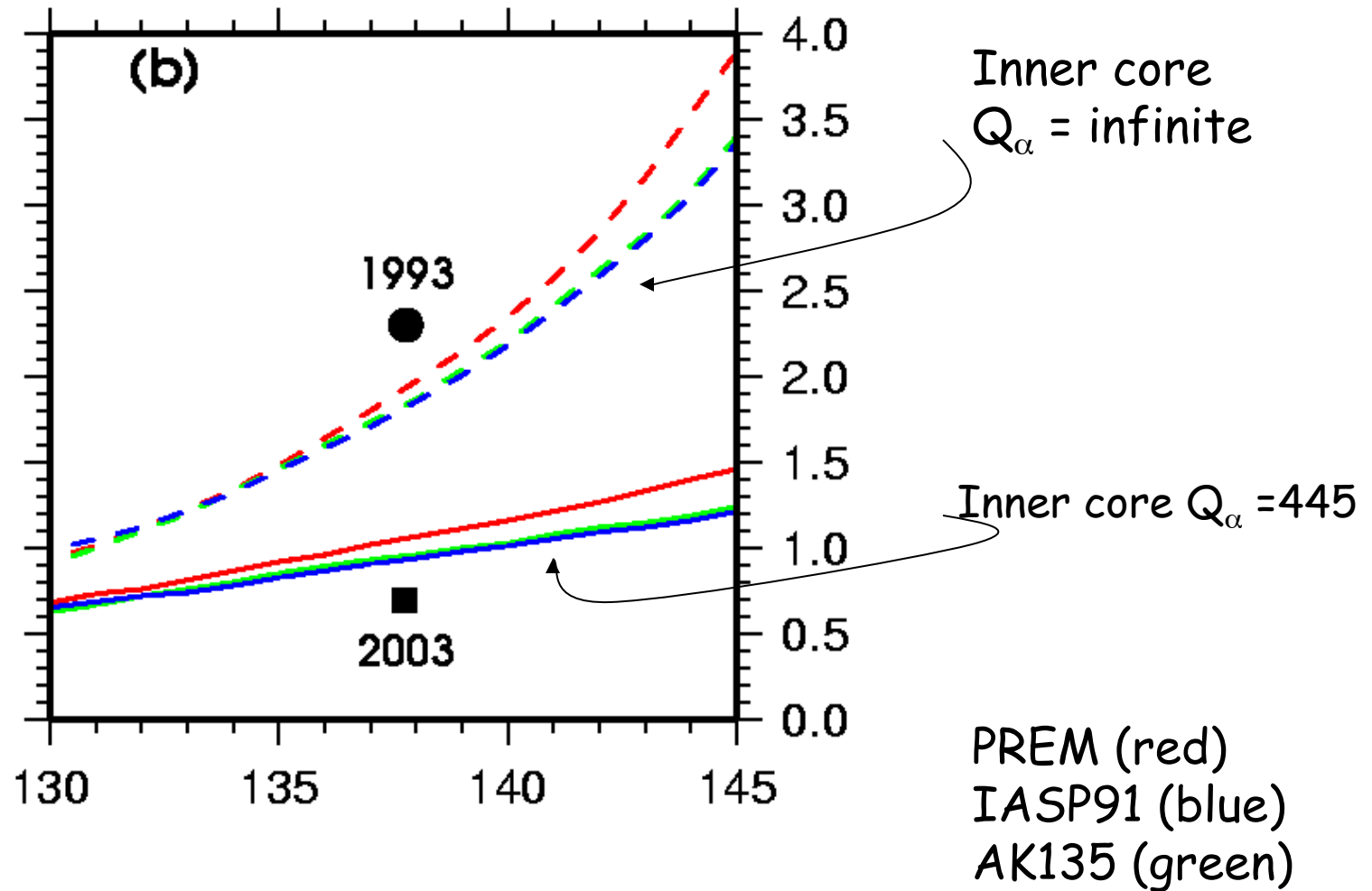
traces sommées



$PKP(DF)/PKiKP = 2.3$ in 1993
 $= 0.7$ in 2003

$PKiKP(2003)/PKiKP(1993)$
 $= 7.2$

Theoretical PKP(DF)/PKiKP amplitude ratios



= > The 1993 amplitudes are anomalous

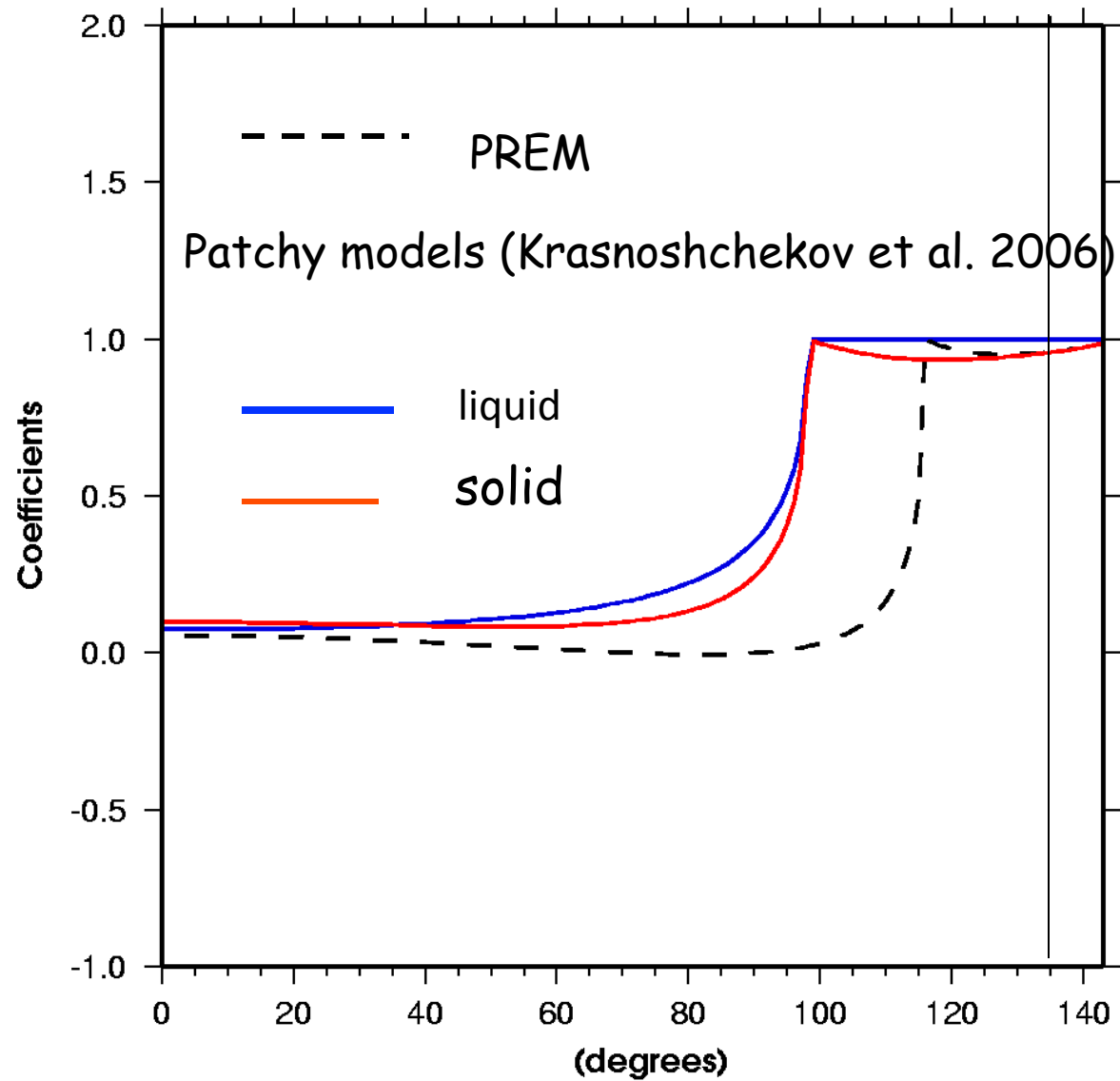
Causes possibles des variations d'amplitude

- Variation de la fonction temporelle de la source
- Perturbation par un événement local
- trajets de PKIKP et PKiKP très proches dans le manteau
- Phases cachées?

Résultats

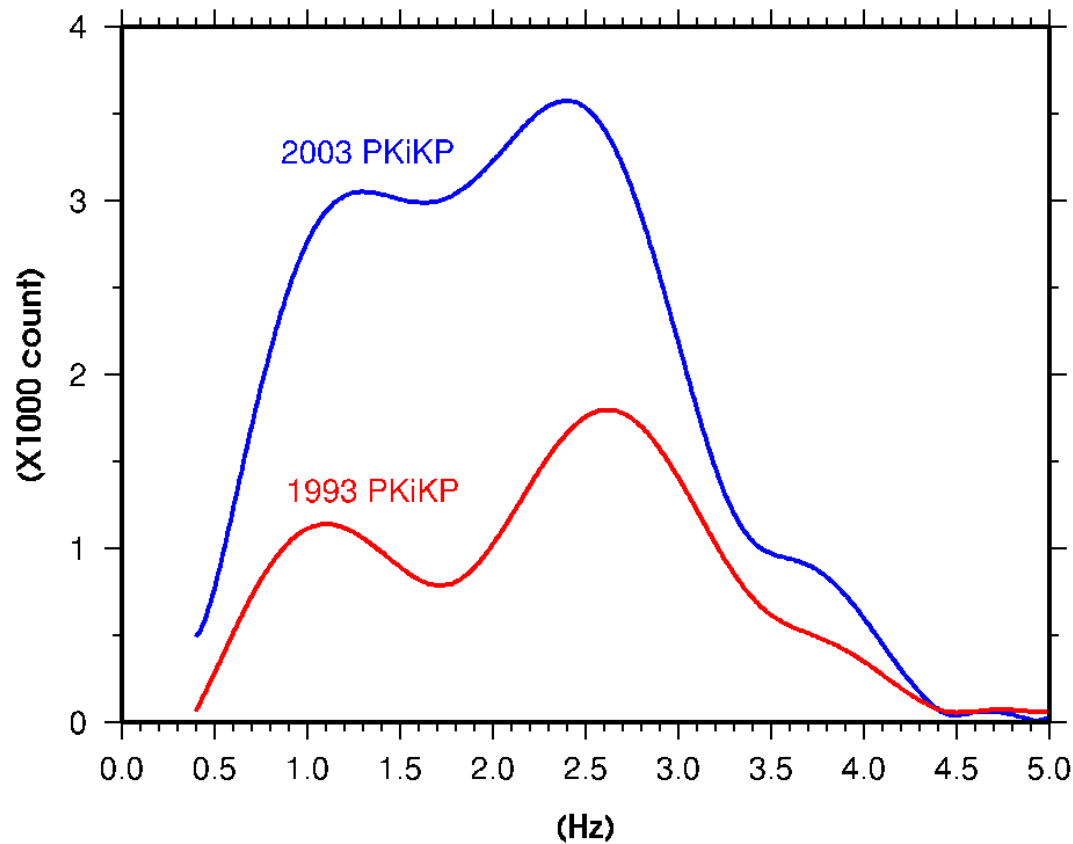
- Pas de déviation du trajet sur le grand cercle
- Temps différentiels entre PKP and PKiKP sont très petits:
 - 0.05 s pour PKiKP
 - 0.1 s pour PKP(DF)
- Variations en amplitude très grandes
- L'anomalie est principalement dans la phase PKiKP pour le séisme de 1993
- => La cause des amplitudes anormales est une perte d'énergie due à une hétérogénéité située près du point de réflexion sur l'ICB de la phase PKiKP pour le séisme de 1993
 - Zones atténuantes
 - >Topographie de l'ICB

PKiKP reflection coefficient at the ICB



$\Delta = 137.8^\circ$

Topographie sur l' ICB



Pas d'anomalie de temps

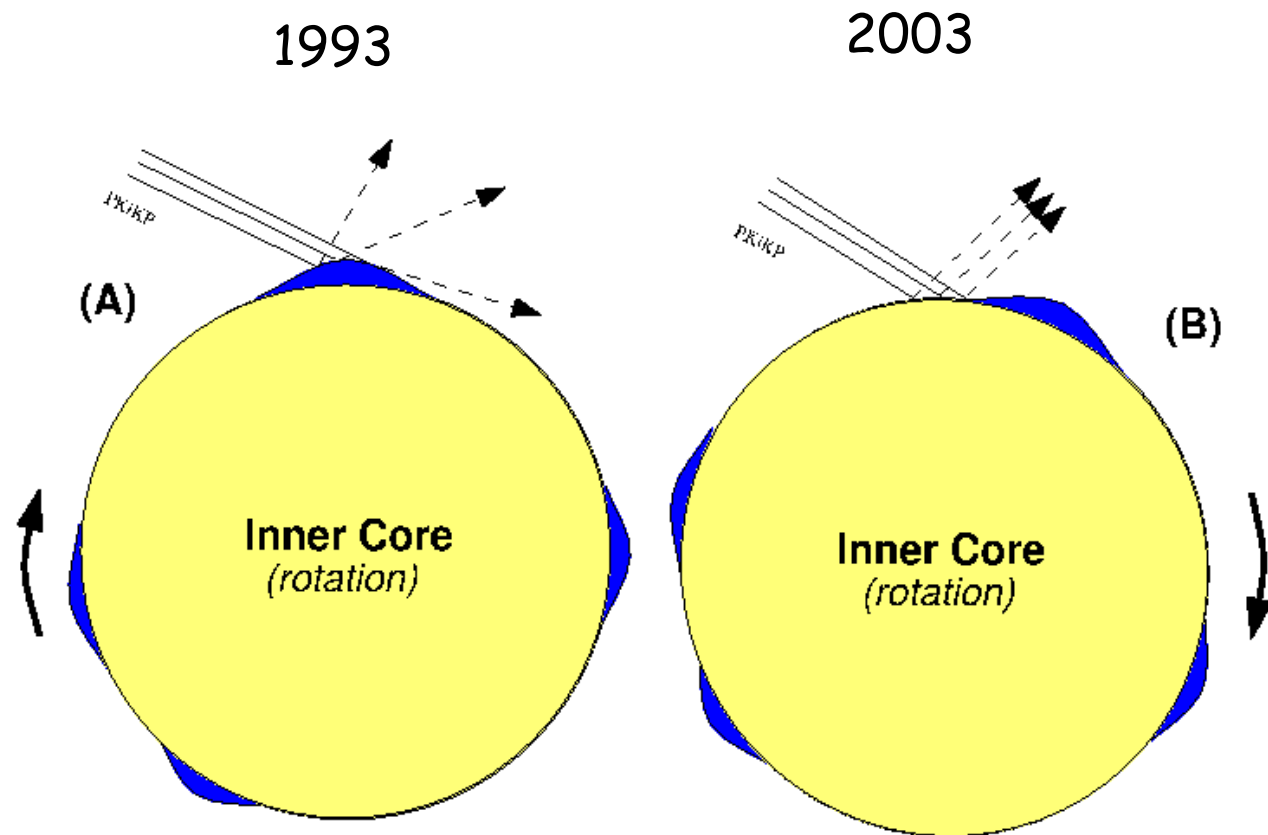
Forte topographie exclue

Amplitude réduite surtout
Dans le domaine de fréquence:
1-2 Hz

⇒ Longueur d'onde horizontale:
⇒ ~10 km

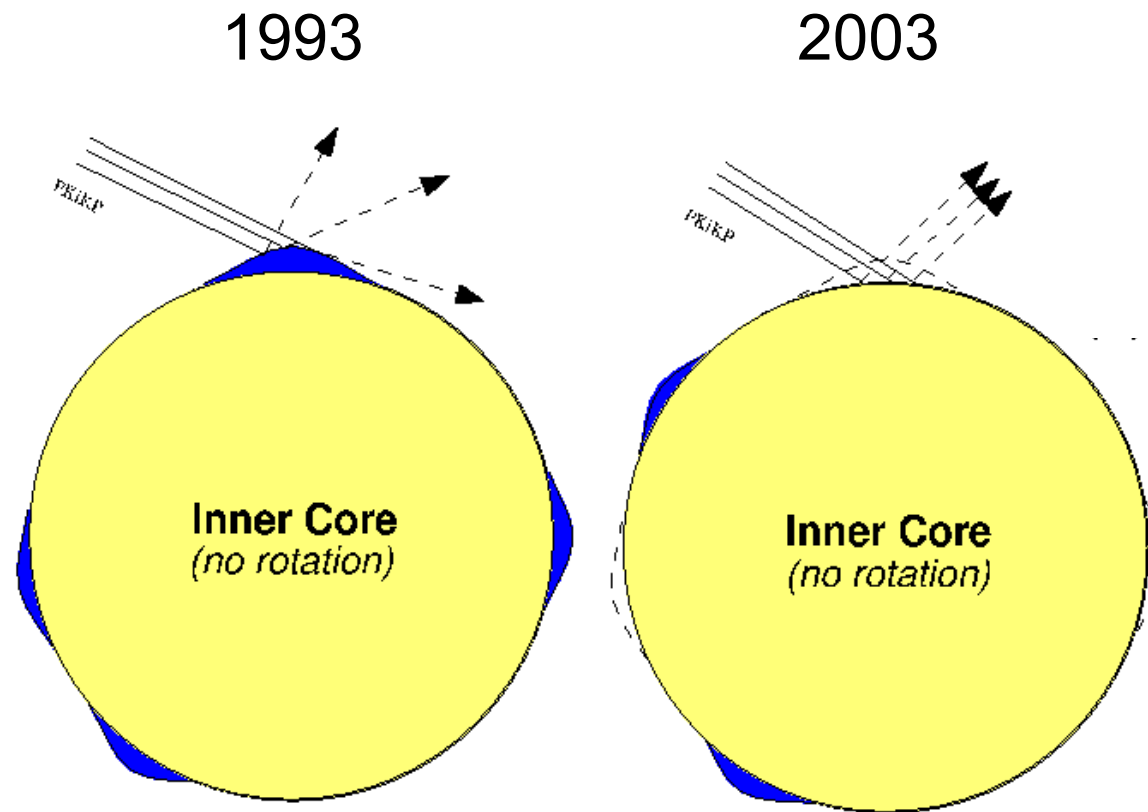
⇒ Aspect ratio of 0.02
⇒ Hauteur de la topographie:
300-500m suffit à produire
des anomalies d'amplitudes
d'un facteur 2.

Scenario 1: ICB topography rotates with inner core



Width ~ 10 km
Height < 0.5 km

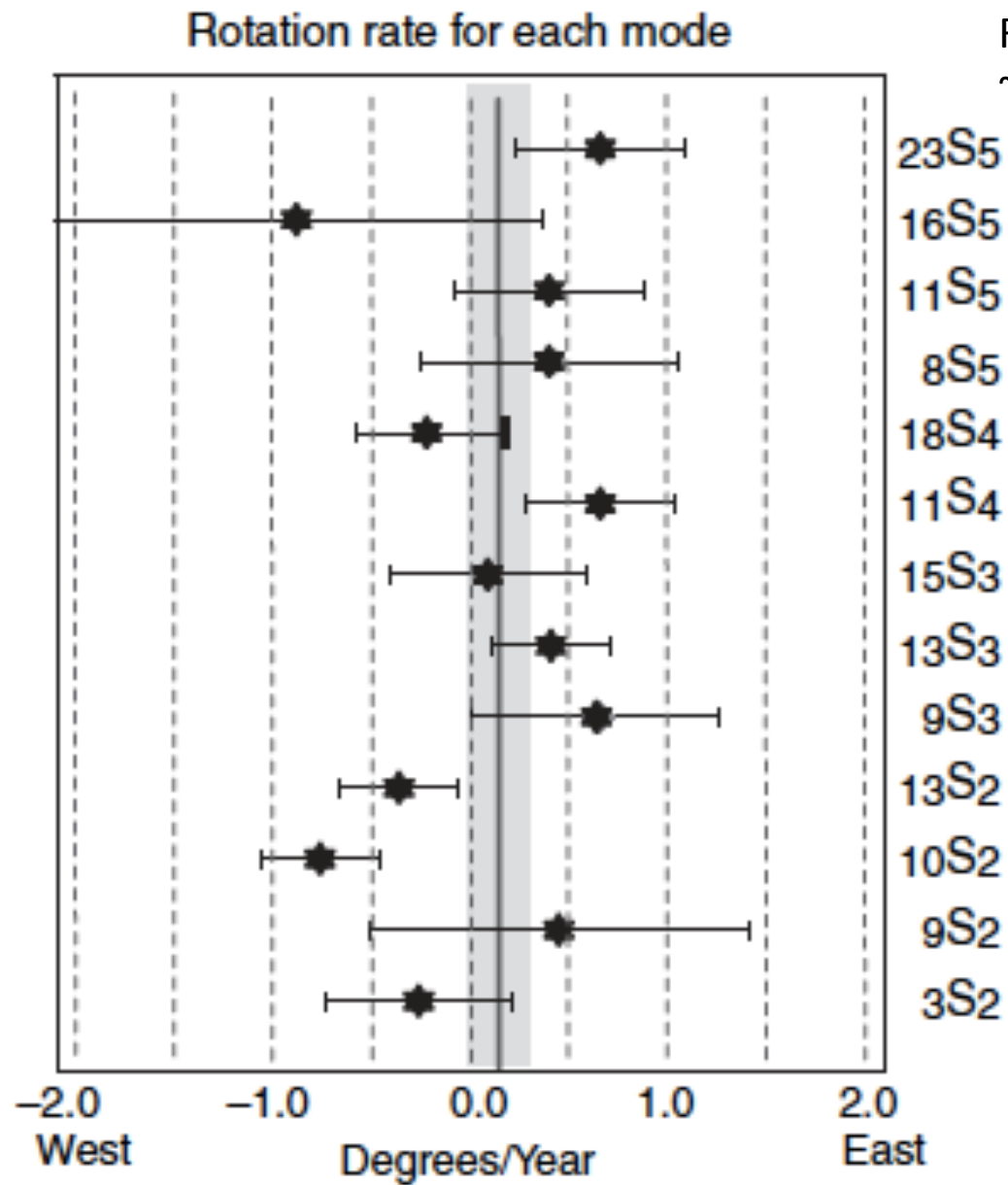
Scenario 2: time-variable topography (no rotation)



Conclusions

- Variations sur 10 ans des amplitudes de l'onde PKiKP indiquent des variations avec le temps à l'ICB
 - Topographie de l'ICB de longueur d'onde $\sim 10\text{km}$ et hauteur $\sim 500\text{m}$, compatible avec une rotation différentielle de la graine de $0.12\text{-}15^\circ/\text{an}$
 - Si la topographie varie avec le temps: Contraintes sur la viscosité de la graine. $< 10^{16}\text{ Pa s}$
- *Also Accounts for:*
 - variability in PKP(DF) coda (Zhang et al. 2005)
 - PKiKP coda observations (Koper et al. 2003; Poupinet and Kennett, 2004)
 - PKiKP amplitude variability at subcritical distances (Krasnoshchekov et al., 2005)
 - Changes in the envelope of PKiKP on decadal time scales (Vidale and Earle, 2005)

En utilisant les
Modes propres



Rotation de la graine
~0.13 deg/an

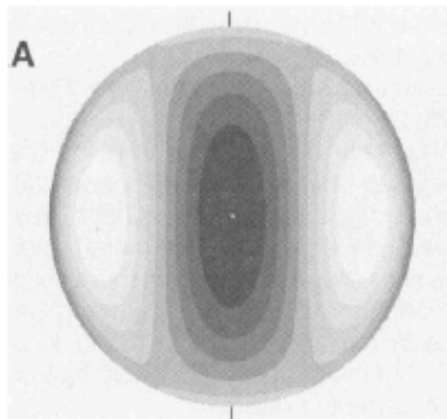
Table 3 Summary of the main results about inner core rotation. Rotation rate positive to the East (inner core faster than mantle)

Reference	Method	Observation	Rotation rate
Souriau, 1989	PKiKP-PcP, Tuamotu to Australia	0.2 s in 10 yr	Probable rotation
Song and Richards, 1996	BC-DF (tilt of anisotropy axis) SSI to COL, Alaska	0.3 s in 30 yr	1.1° yr ⁻¹ (0.4 to 1.8° yr ⁻¹)
	Tonga to GRF, Germany	~0	No interpretation
	Kermadec to Norway	-0.2 s in 10 yr	
Su <i>et al.</i> , 1996	DF, worldwide (drift of pole of anisotropy axis)	0.3 s in 32 yr large uncertainties	~3° yr ⁻¹
Creager, 1997	BC-DF, SSI to COL (heterogeneities)	0.25 s in 30 yr	0.2–0.3° yr ⁻¹ preferred (0.05 to 0.31° yr ⁻¹)
Souriau, 1998	BC-DF, NZ to DRV, Antarctica	~0.0 s in 23 yr	0° yr ⁻¹
Ovtchinnikov <i>et al.</i> , 1998	BC-DF, NZ to NVL, Antarctica	0.3 s in 28 yr	0.4 to 1.8° yr ⁻¹
Sharrock and Woodhouse, 1998	Splitting of normal modes	-0.0053 ± 0.0034 s yr ⁻¹	Westward rotation
Laske and Masters, 1999	Splitting of normal modes	-0.7 to 0.8° yr ⁻¹	0
Song and Li, 2000	BC-DF, Alaska to SPA	0.6 s in 37 yr	0.6° yr ⁻¹
Souriau and Poupinet, 2000	BC-DF and polar DF, worldwide	32 yr	-1 to 1° yr ⁻¹
Vidale <i>et al.</i> , 2000	Inner core scatterers, NZ to Montana	0.1 s in 3 yr	0.15° yr ⁻¹
Poupinet <i>et al.</i> , 2000	Doublets of core phases, SSI to COL	<0.1 s in 30 yr	<0.2° yr ⁻¹
Song, 2000	BC-DF pairs, SSI to Alaska	~0.45 s in 40 yr	0.3 to 1.1° yr ⁻¹
Collier and Helfrich, 2001	BC-DF, S. Pacific to UK	15 yr	0.42 ± 0.22 to 0.66 ± 0.24° yr ⁻¹ (marginally detectable) No monotonic variation 0.0 (<0.2° yr ⁻¹)
Isse and Nakanishi, 2002	BC-DF records at SYO, Antarctica	28 yr	
Xu and Song, 2003	BC-DF, SSI to Beijing network	30 yr	0.41 ± 0.12° yr ⁻¹
Li and Richards, 2003	BC-DF, NZ to Antarctica	24 yr -0.0035 to -0.024 s yr ⁻¹	Differential rotation (not specified)
Laske and Masters, 2003	Splitting of normal modes	20 yrs	0.13 ± 0.11° yr ⁻¹
Zhang <i>et al.</i> , 2005	Doublets, SSI to Alaska	35 yr	0.3 to 0.5° yr ⁻¹
Vidale and Earle, 2005	Inner core scatterers, Tuamotu to NORSAR	11 yr	0.05 to 0.10° yr ⁻¹

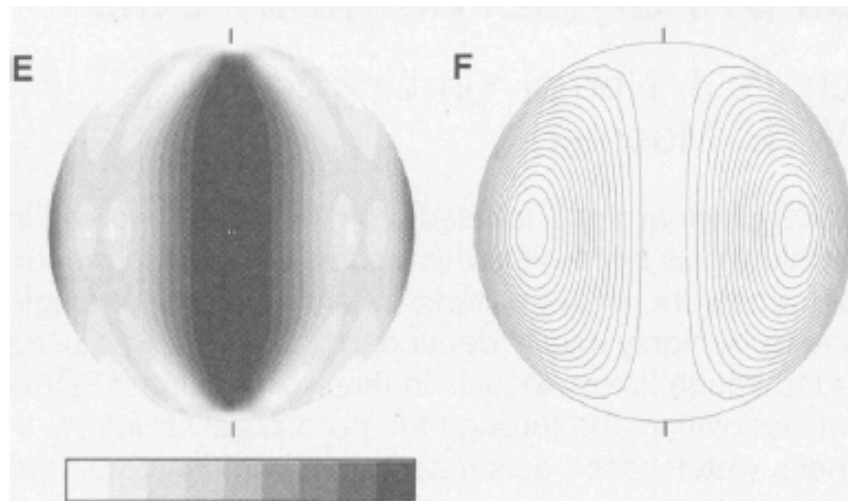
BC-DF: differential travel time PKP(BC)-PKP(DF), SSI: South Sandwich Island, NZ = Novaya Zemlya.

Anisotropie et l'hétérogénéité de la graine:

- Variations avec la profondeur
- Variations hémisphériques



Modèle axisymétrique :
 Splitting des modes propres
 + temps de propagation PKP(DF)
 (bulletins de l'ISC)



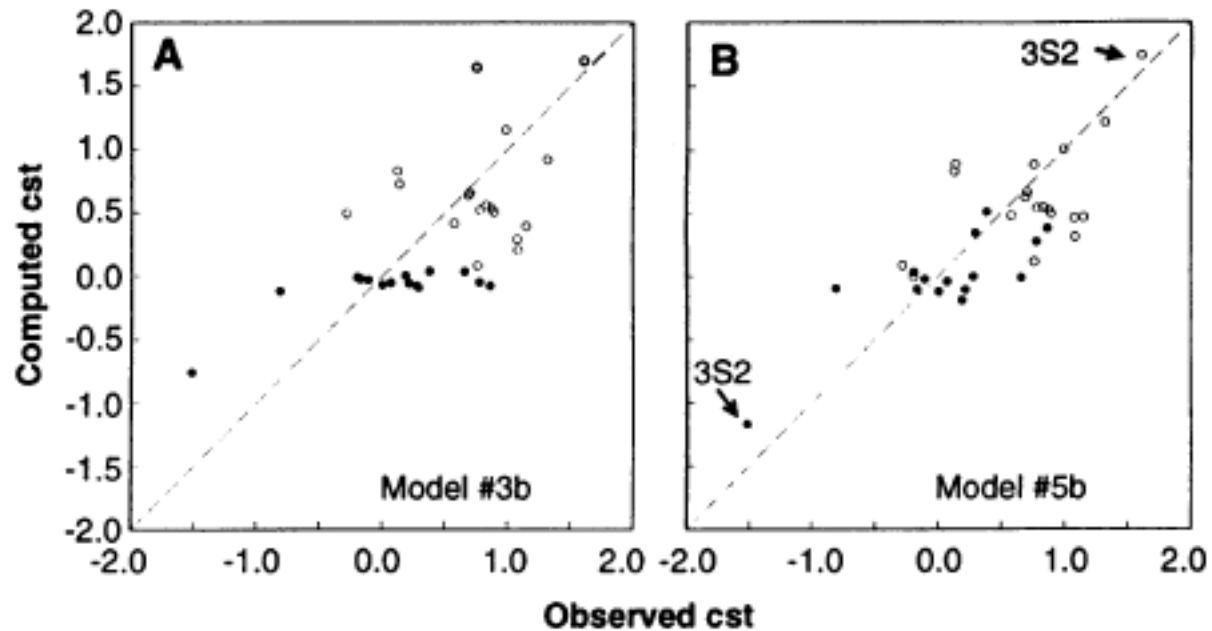
Prédictions pour
 Un modèle de
 Convection de
 degree 1

Romanowicz et
 al., 1996

0

4%

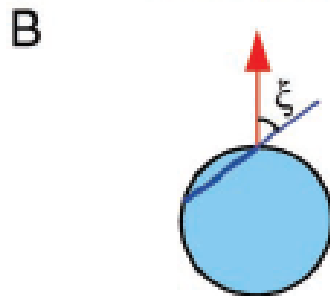
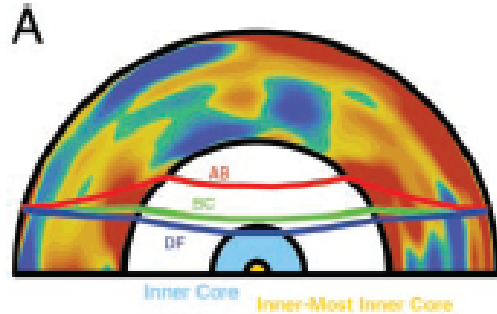
Splitting observé/calculé: termes C_{20} et C_{40}



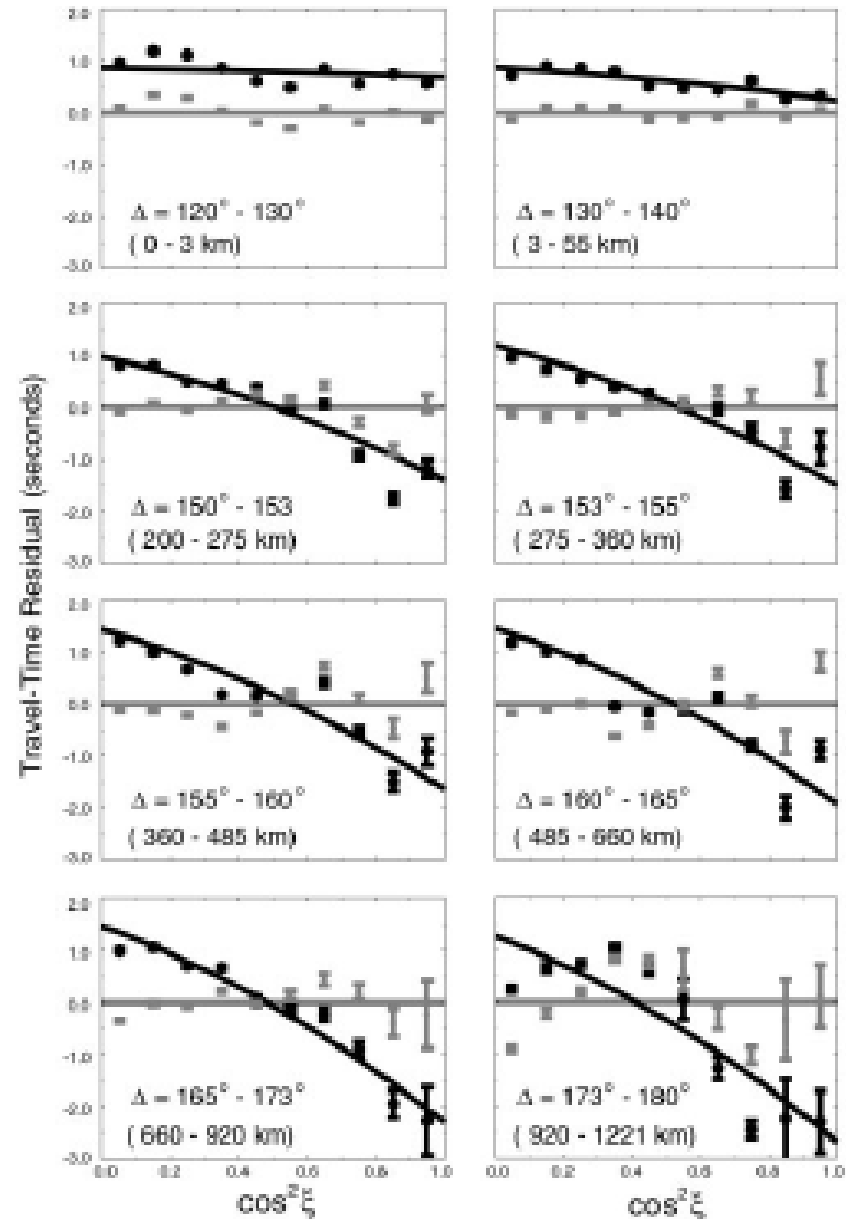
Model 3 b
Radially varying
anisotropy

Model 5 b
Axisymmetric
anisotropy

Innermost Inner Core ?



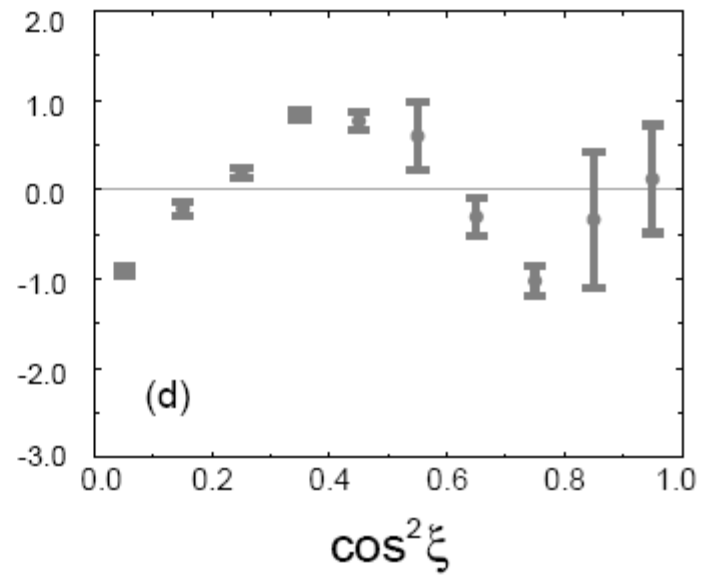
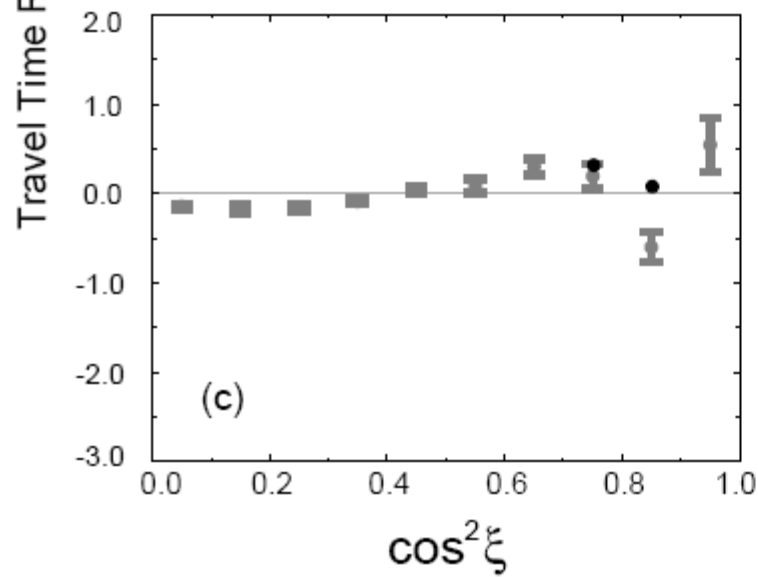
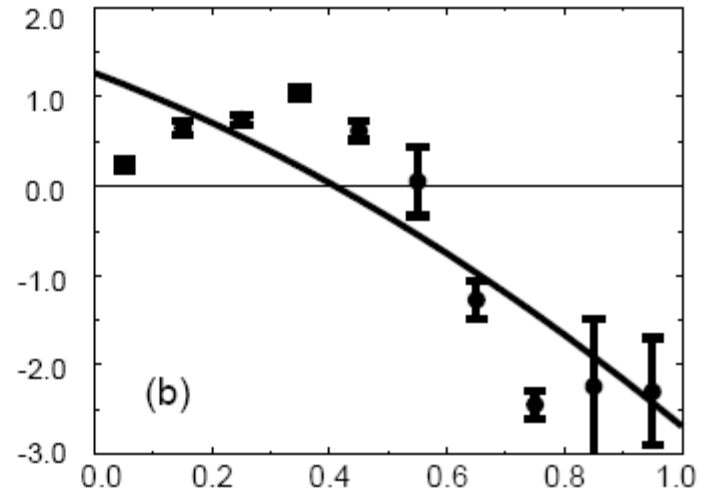
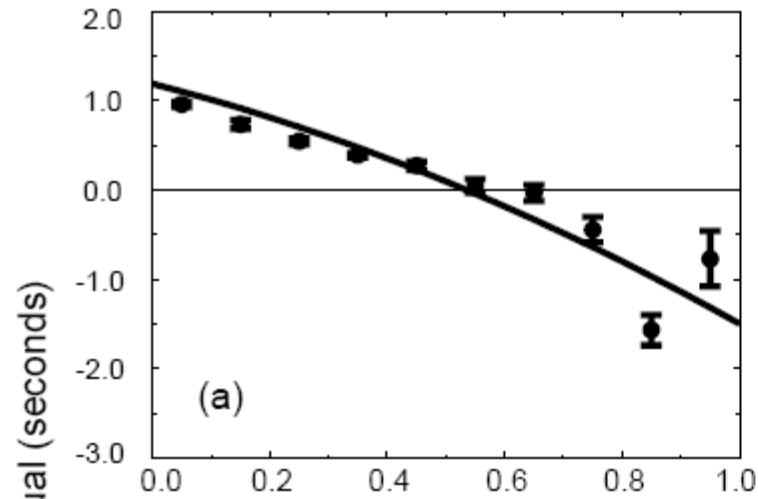
- observations
- Prédictions pour
Modèle d'anisotropie
Constant avec la profondeur



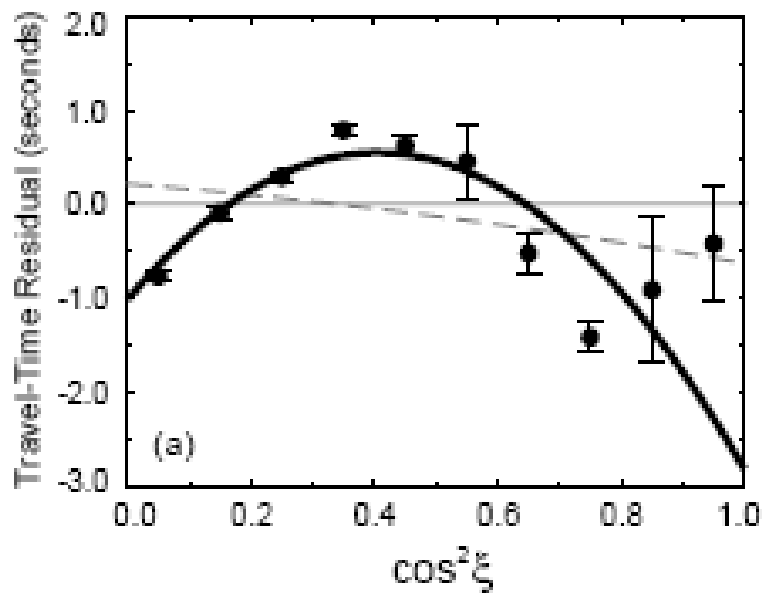
Distance:

153-155°

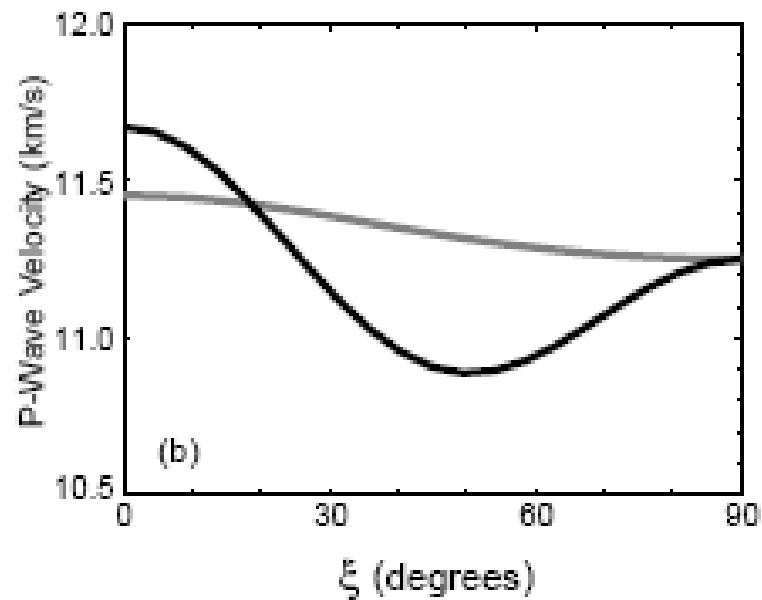
173-180°



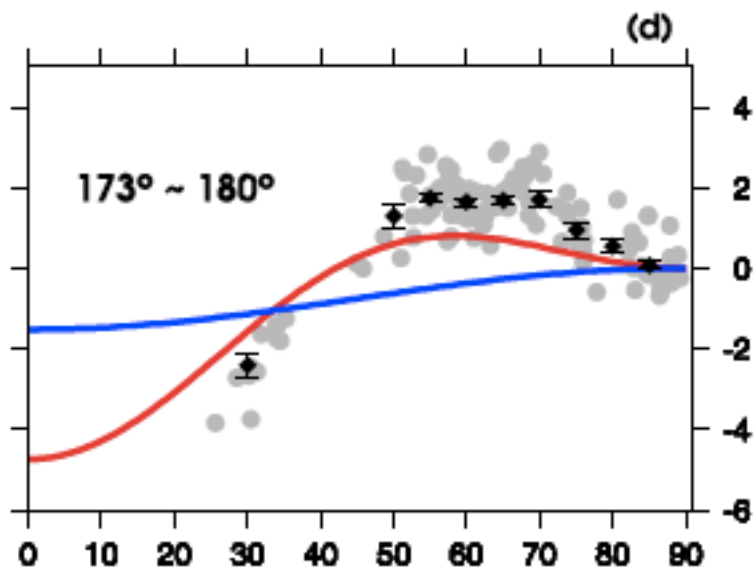
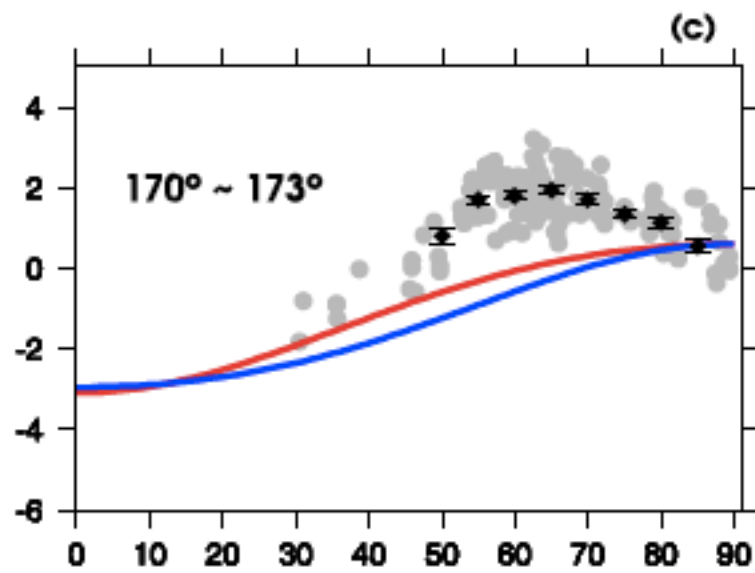
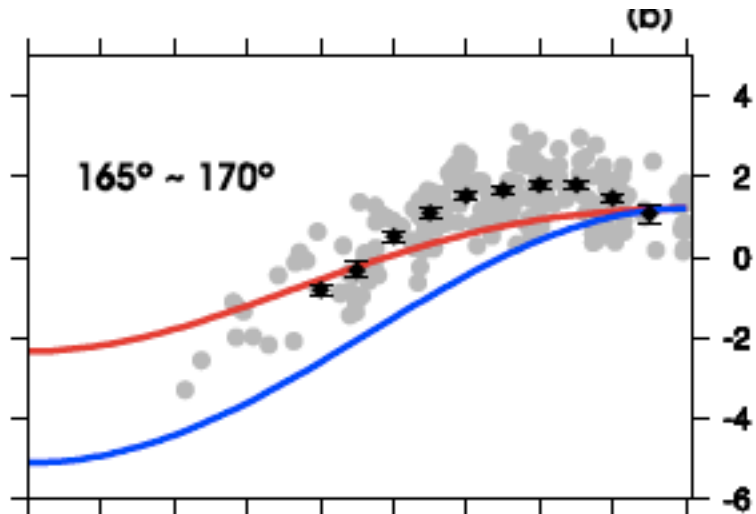
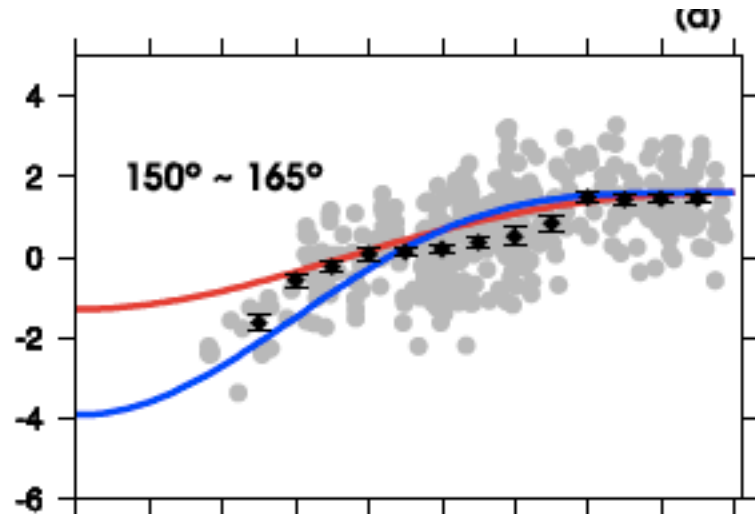
PKP(DF) Travel time data
(Antipodal)



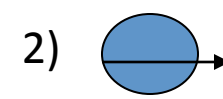
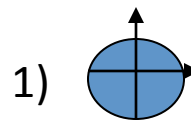
P-velocity



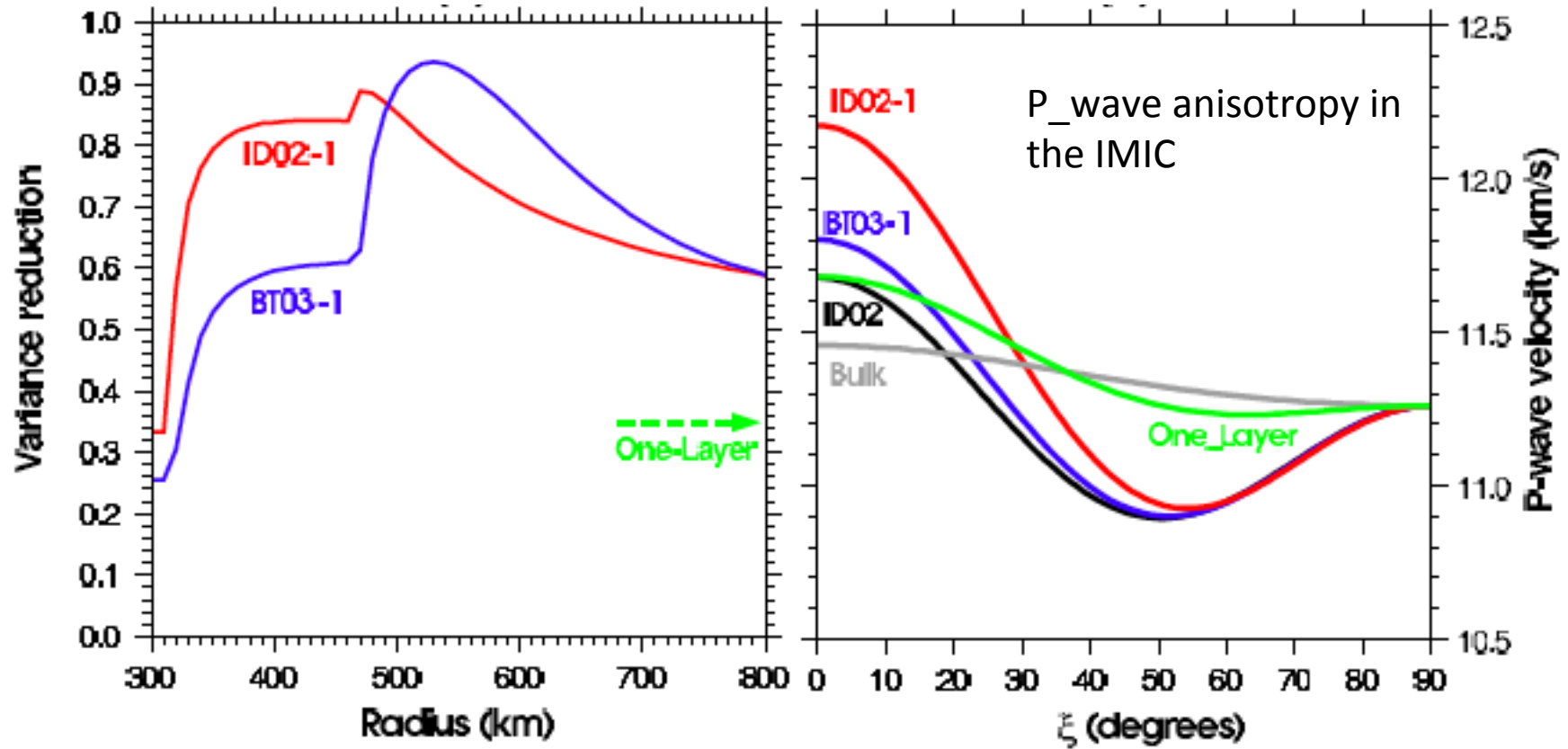
————— IMIC
————— R > 300 km



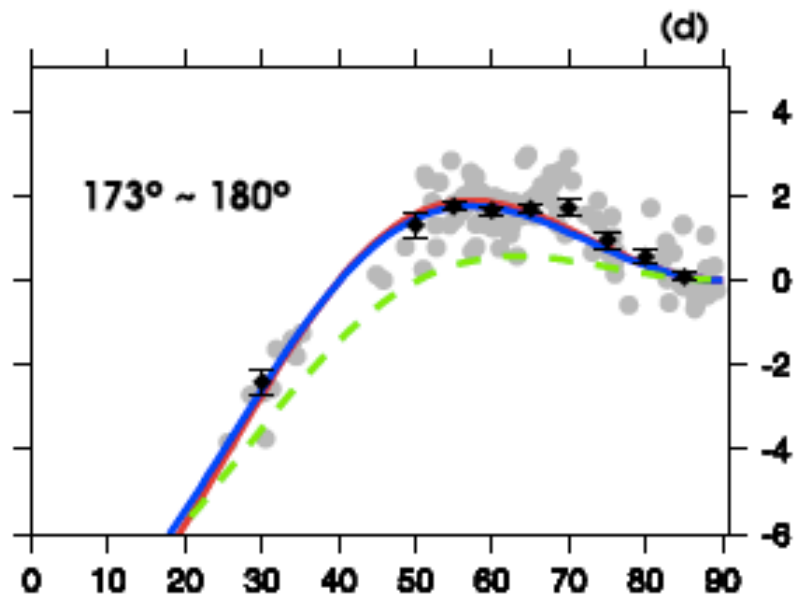
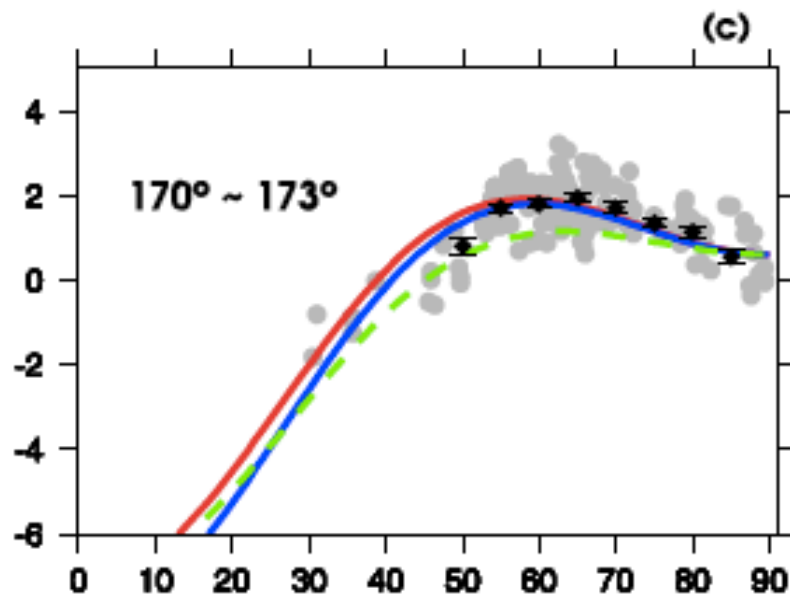
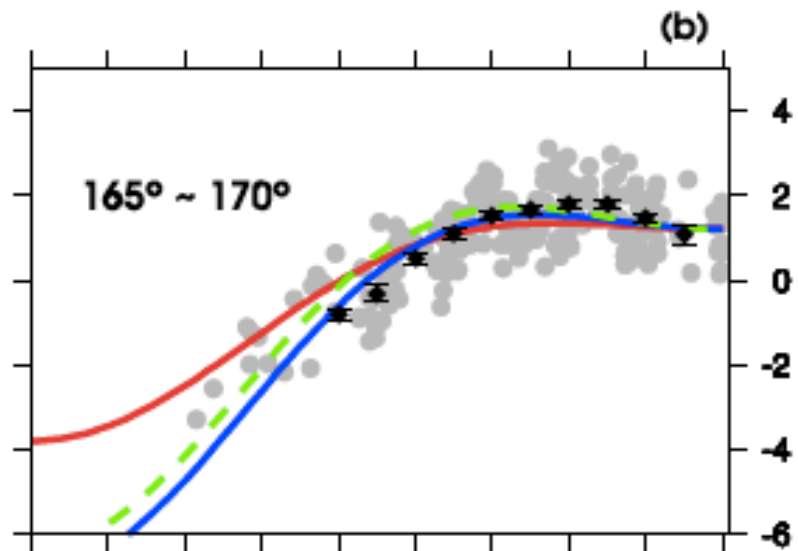
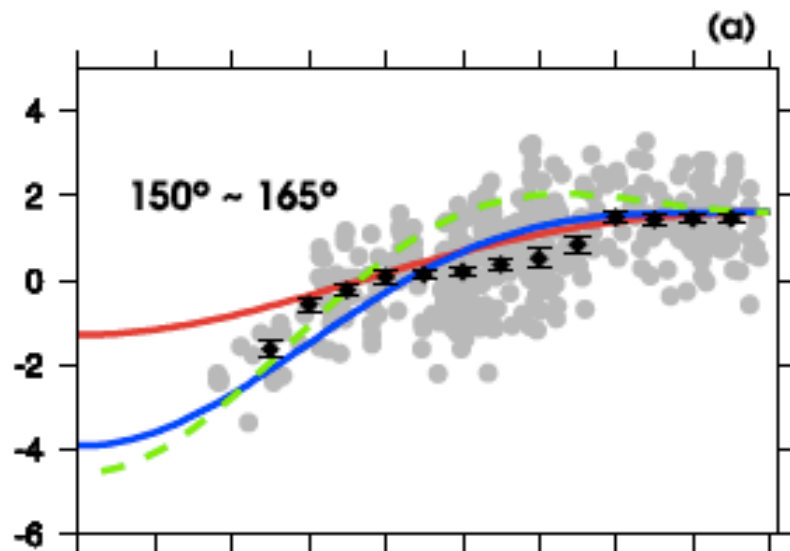
 1 - Ishii and Dziewonski, 2003
 2 - Béghin and Trampert, 2003



Inversion pour le rayon de l'IMIC



- 1 - Ishii and Dziewonski, 2003 in top layer
- 2 - Béghin and Trampert, 2003 in top layer



ξ

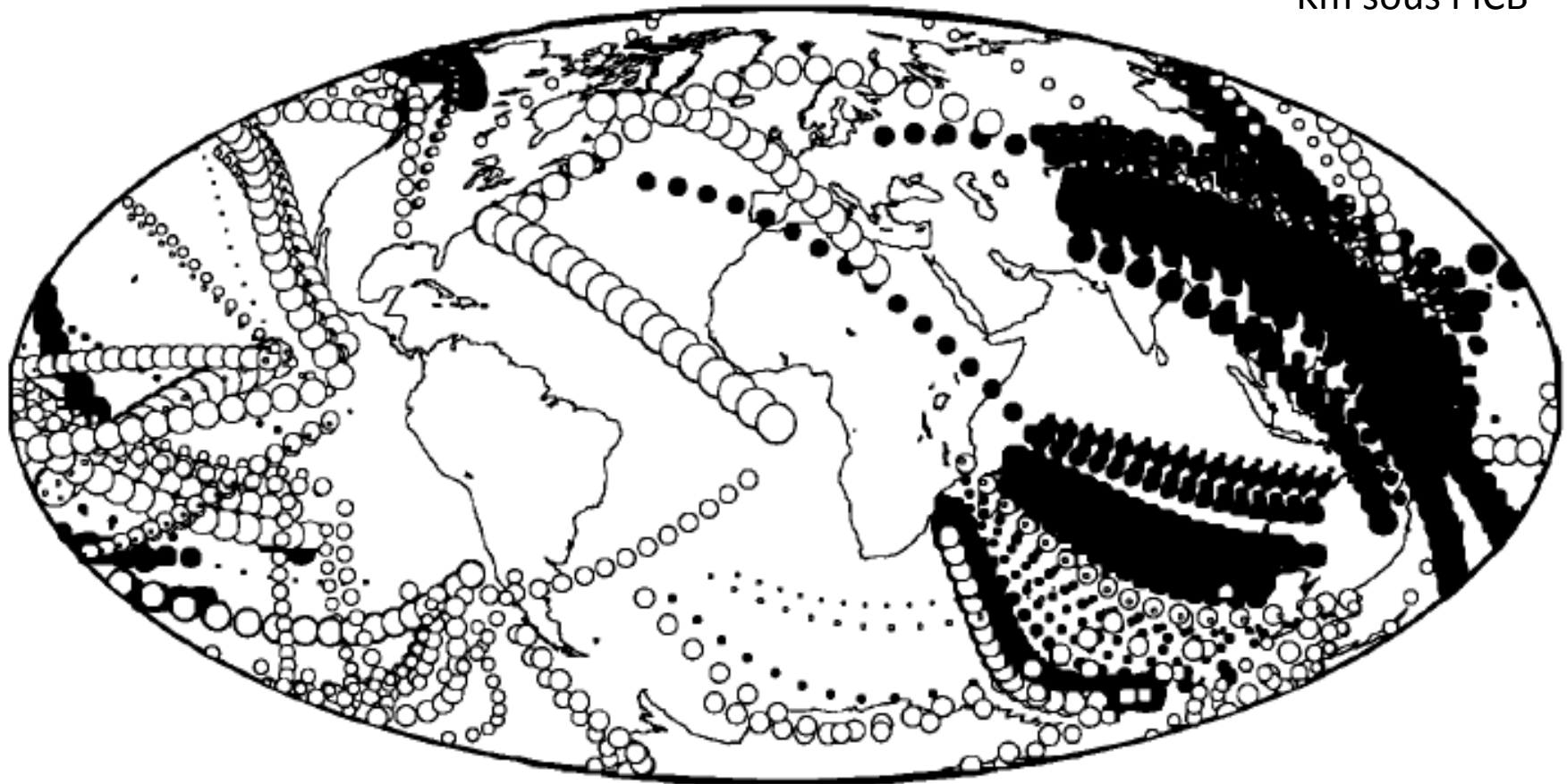
— constant anisotropy in top layer
— Allow depth variations in top layer

- - - Constant anisotropy

Structure hémisphérique
dans la graine

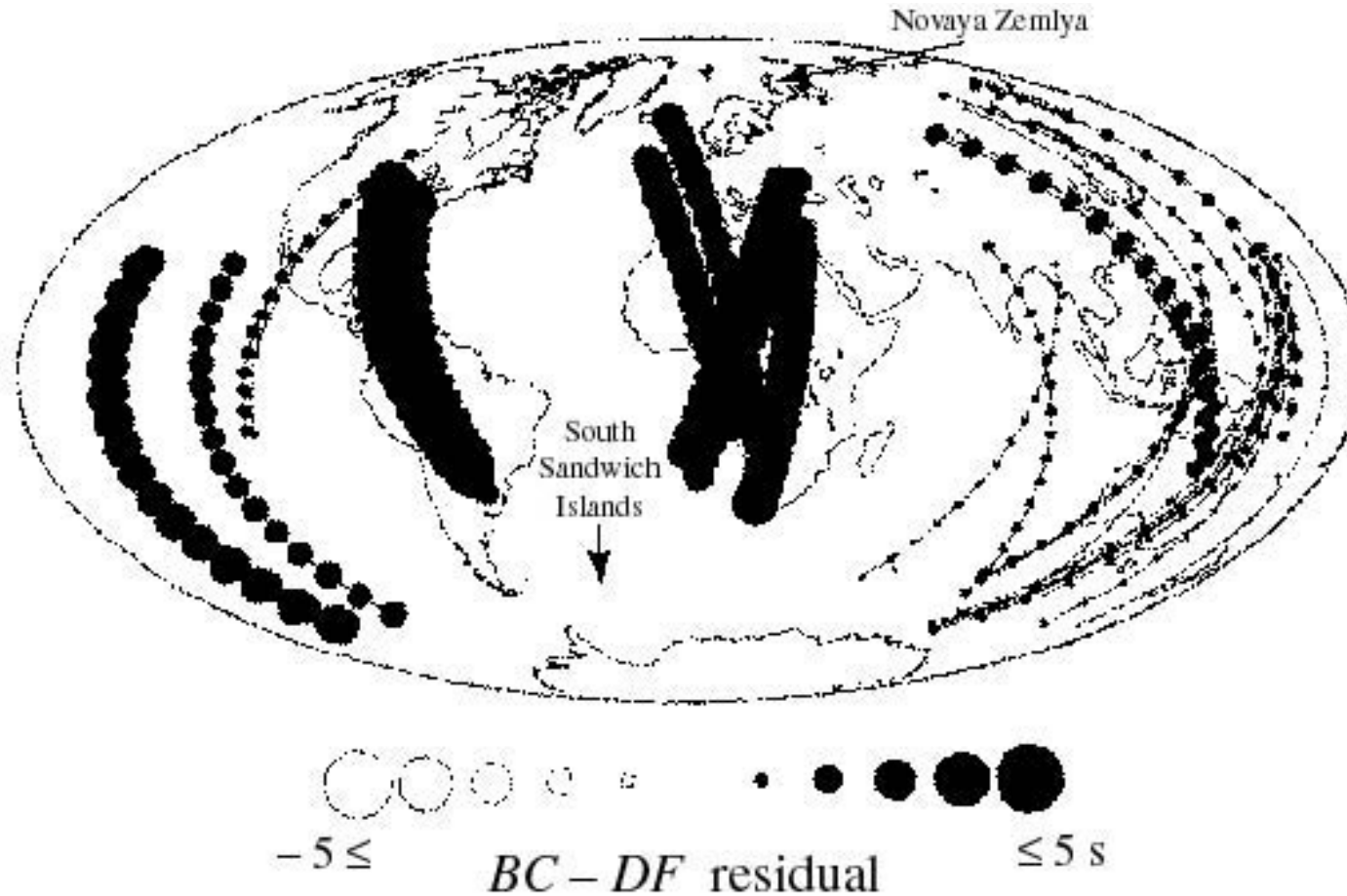
Trajets équatoriaux

$\xi > 45^\circ$
Point bas: 100-500
Km sous l'ICB



Tanaka and Hamaguchi, 1995

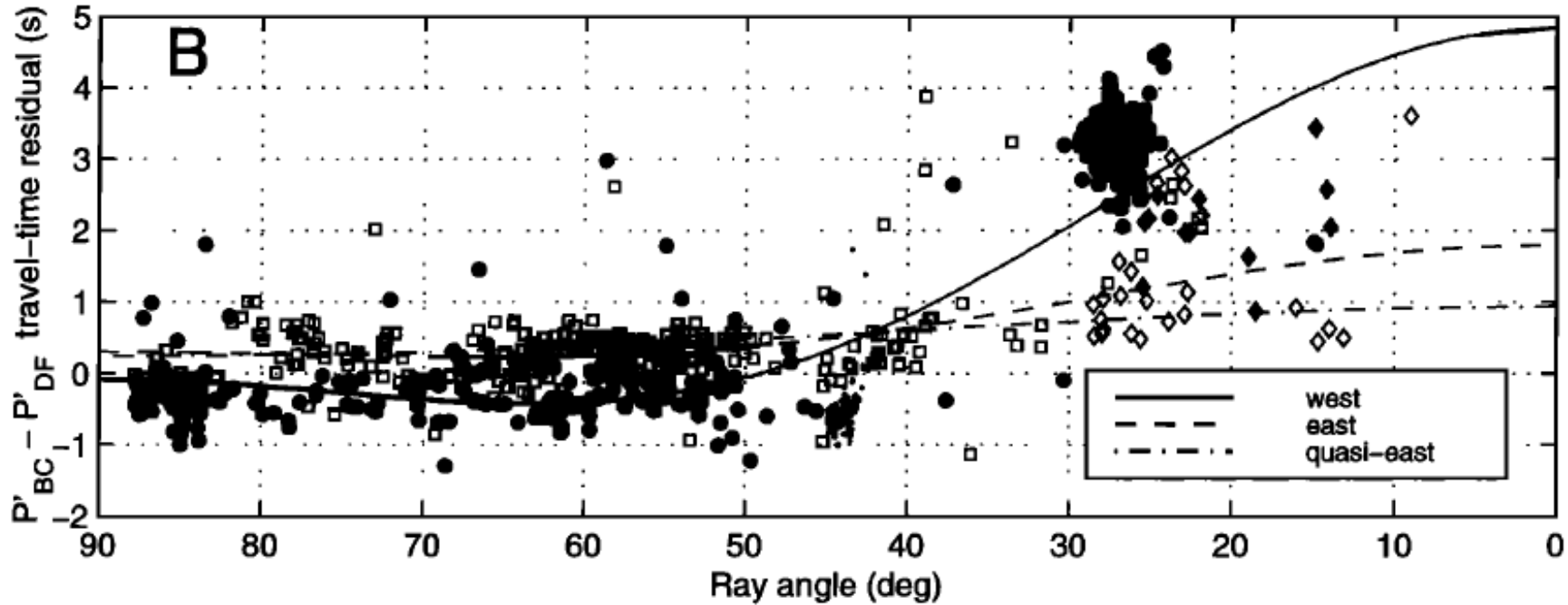
Trajets polaires



Hemispherical dependence of anisotropy

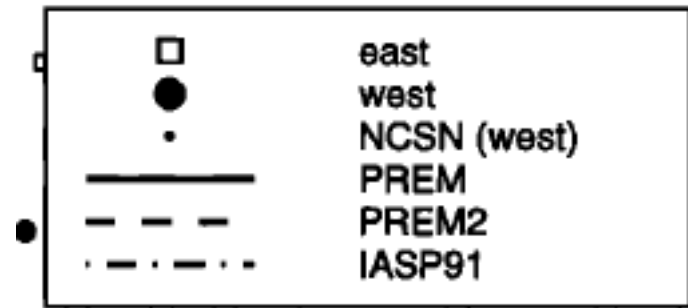
(Tanaka and Hamaguchi, 1995)

Résidus PKP(BC)-PKP(DF) en fonction de l'angle ξ



Residuals with respect to AK135

◇ Tanaka and Hamaguchi, 1997
 ◆



2-4% anisotropy in the western hemisphere
 0.5% anisotropy in the eastern hemisphere
 At shallow depth

Creager, 1999

Vitesse des ondes P en fonction de l'angle ξ et des paramètres élastiques:

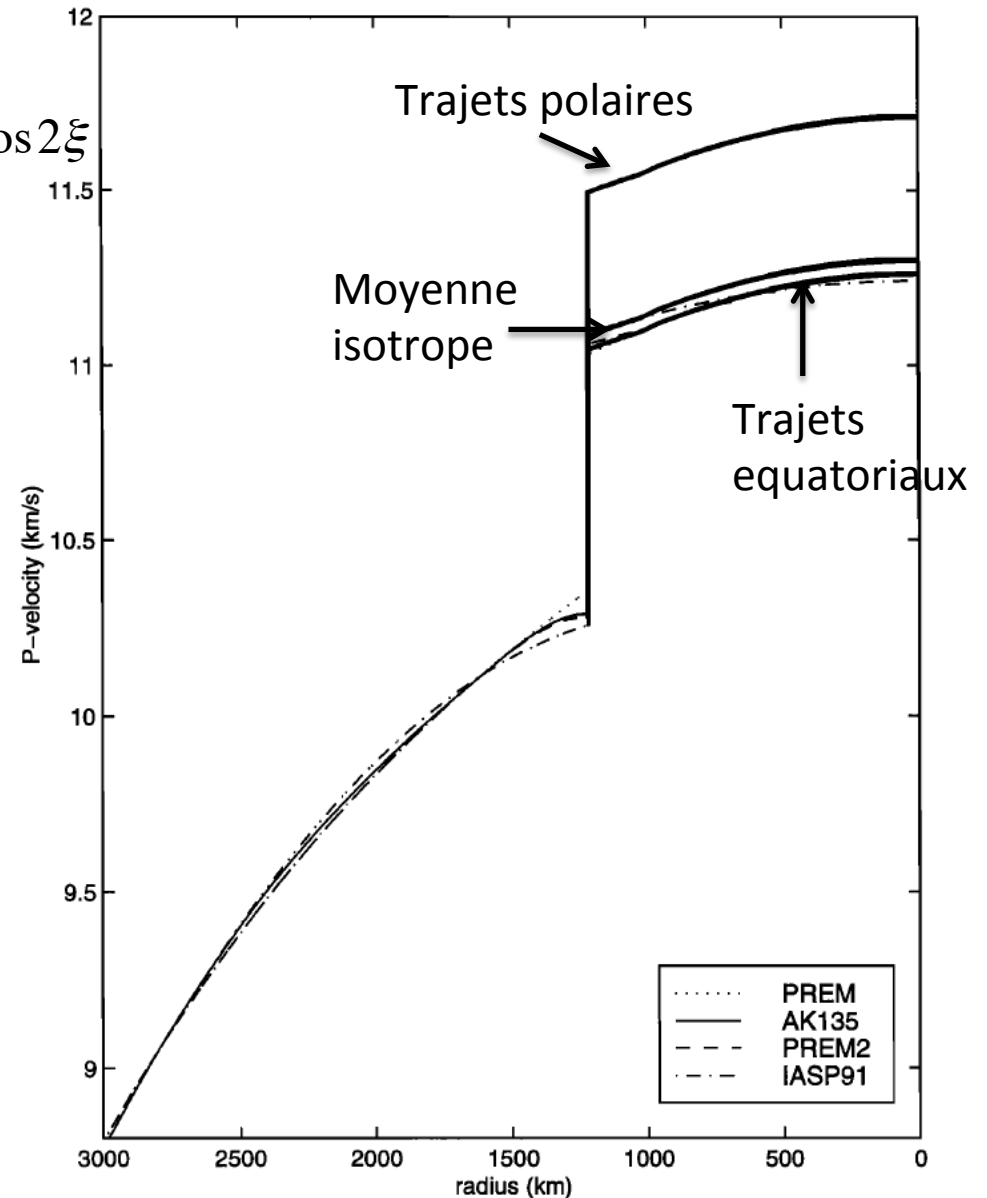
$$v_p^2 / \rho = 1/8(3A + 3C + 4L + 2F) + 1/2(C - A)\cos 2\xi + 1/8(A + C - 4L - 2F)\cos 4\xi$$

Moyenne isotrope selon Voigt:

$$\kappa + 4/3\mu = V_p^2 / \rho = (A + C + F + L) / 15$$

La moyenne isotrope (Voigt) est la même dans les deux hémisphères

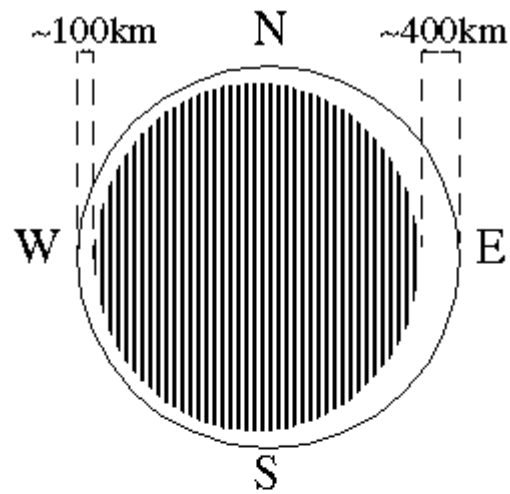
Anisotropie dans l'hémisphère Ouest



Creager, 1999

Données ISC
Analyse stochastique

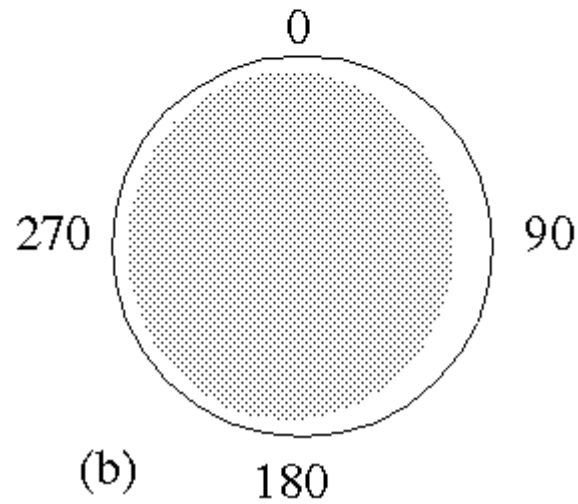
Vue polaire



Anisotropie cylindrique
uniforme de 3%

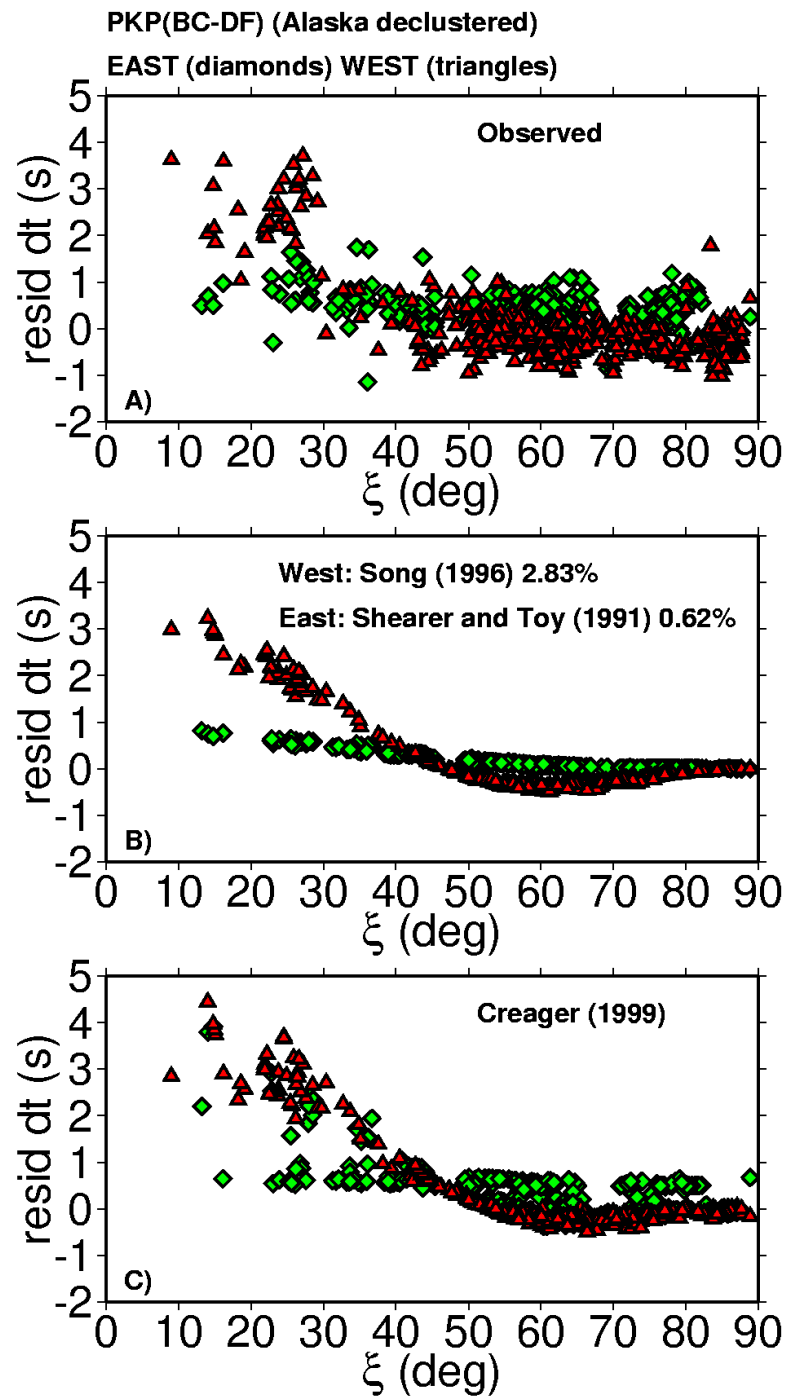
(a)

Vue équatoriale



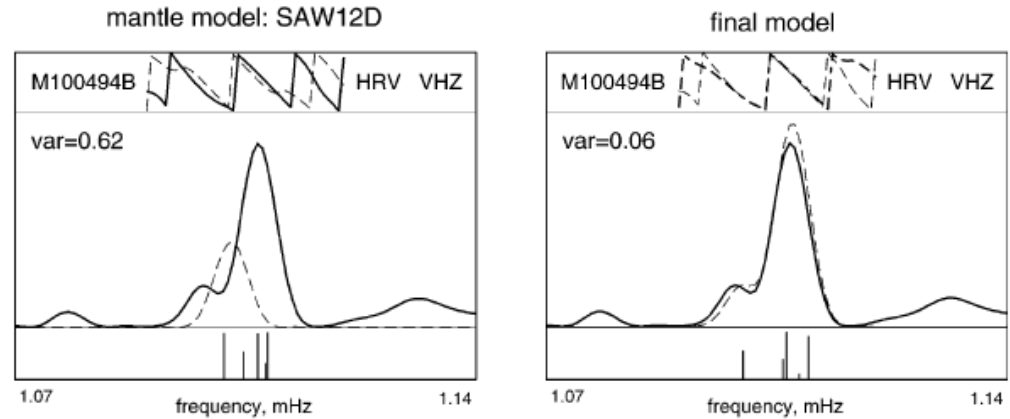
(b)

Garcia and Souriau, 2000

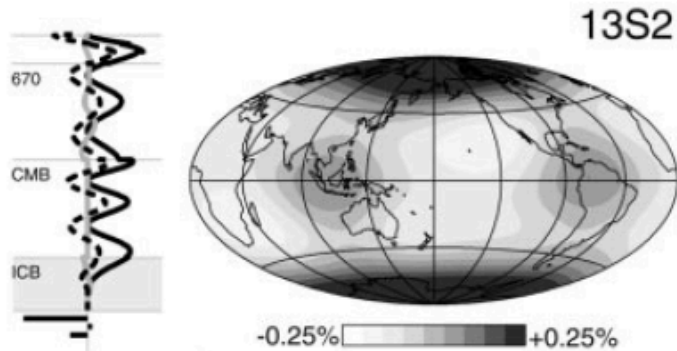
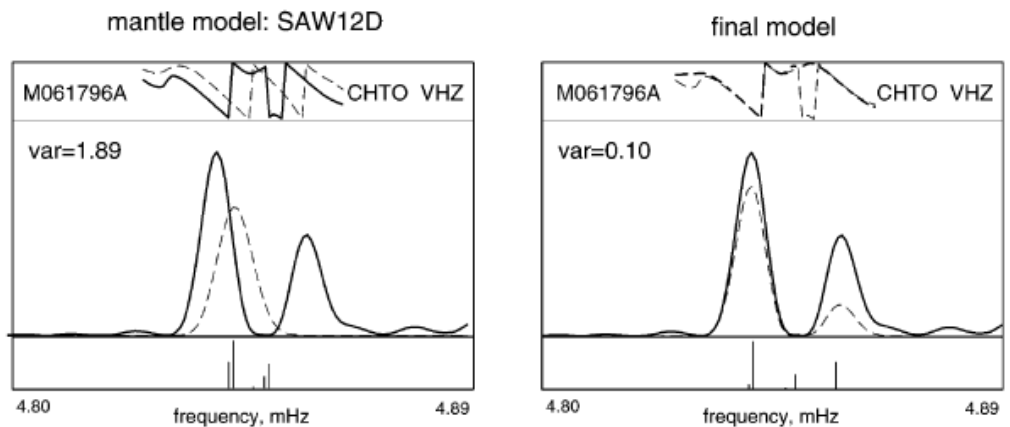


Splitting anormal des modes propres (25 modes): une couche isotrope d'épaisseur uniforme ne peut avoir plus de 100-200 km d'épaisseur

mode 3 S 2



mode 13 S 2

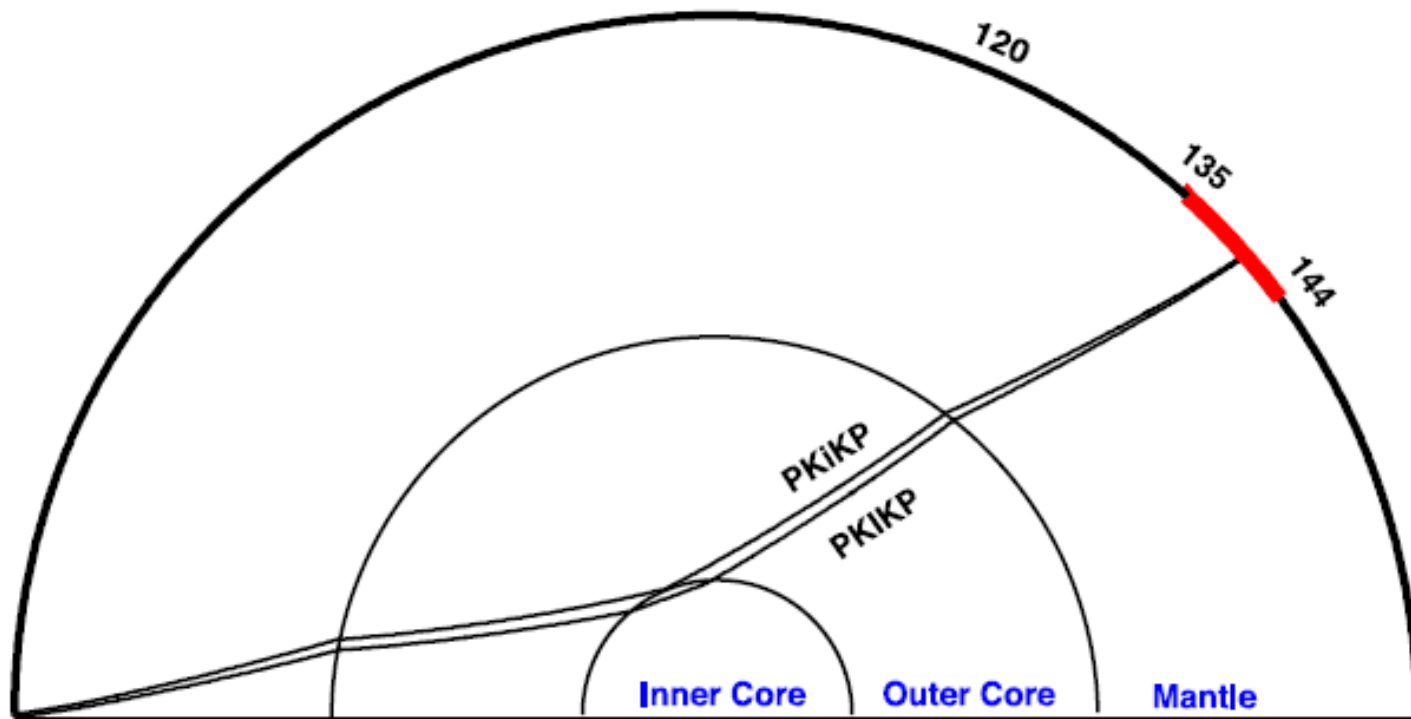


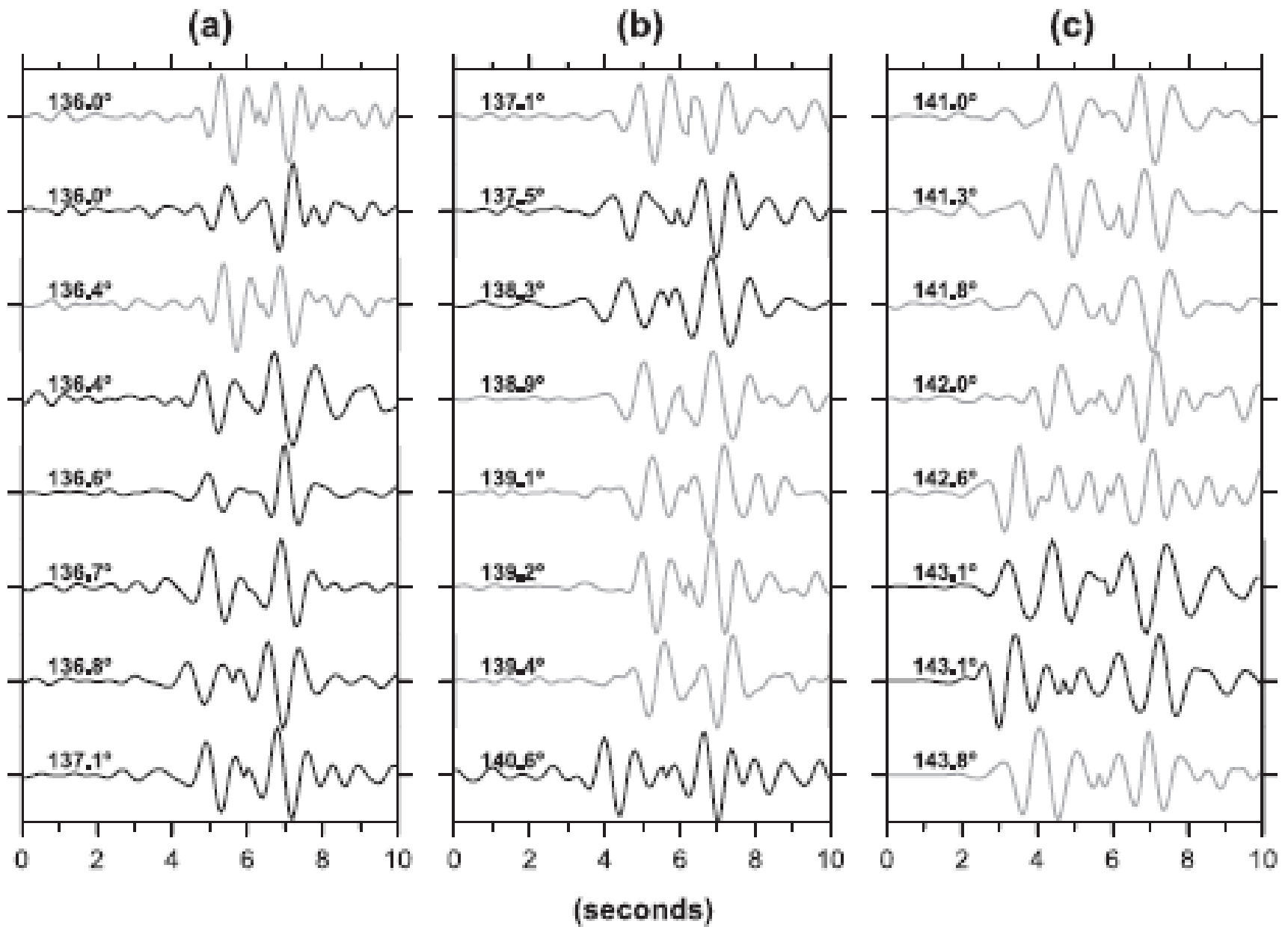
Durek and Romanowicz, 1999

Variance residuelle en fonction de l'épaisseur de la couche isotrope

Mode	Thickness of isotropic layer (km)			
	0	100	200	300
${}_3S_2$	0.36	0.36	0.38	0.42
${}_5S_2$	0.41	0.43	0.43	0.38
${}_5S_3$	0.20	0.20	0.20	0.20
${}_8S_1$	0.30	0.29	0.29	0.30
${}_8S_5$	0.43	0.45	0.46	0.47
${}_9S_2$	0.63	0.63	0.63	0.64
${}_9S_4$	0.39	0.47	0.70	0.94
${}_{11}S_4$	0.40	0.36	0.41	0.59
${}_{11}S_5$	0.31	0.32	0.36	0.45
${}_{13}S_1$	0.64	0.57	0.47	0.52
${}_{13}S_2$	0.44	0.41	0.36	0.34
${}_{13}S_3$	0.39	0.39	0.41	0.50
${}_{15}S_3$	0.85	0.89	0.90	0.95
${}_{16}S_5$	1.24	1.24	1.21	1.17
${}_{18}S_2$	0.84	1.06	1.11	0.84
${}_{18}S_3$	0.70	0.81	0.90	1.00
${}_{18}S_4$	0.54	0.56	0.56	0.58
${}_{22}S_1$	0.59	0.60	0.59	1.06
${}_{23}S_4$	0.61	0.59	0.58	0.58
${}_{23}S_5$	0.77	0.86	0.92	1.07
Total	0.55	0.57	0.59	0.65

PKIKP réfractée: pénètre dans la graine
PKiKP réfléchi sur l'ICB

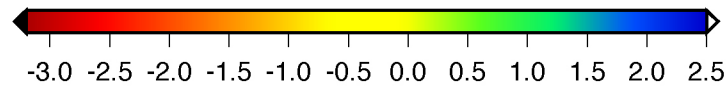
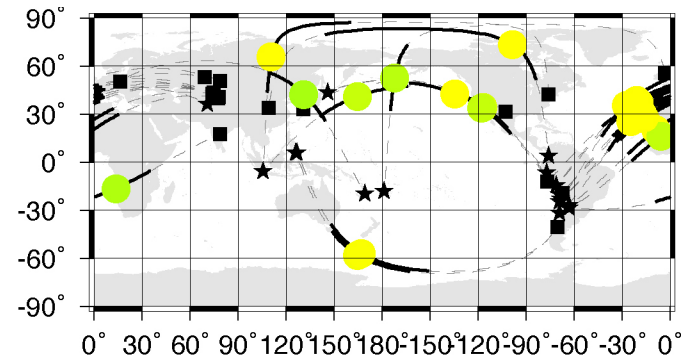
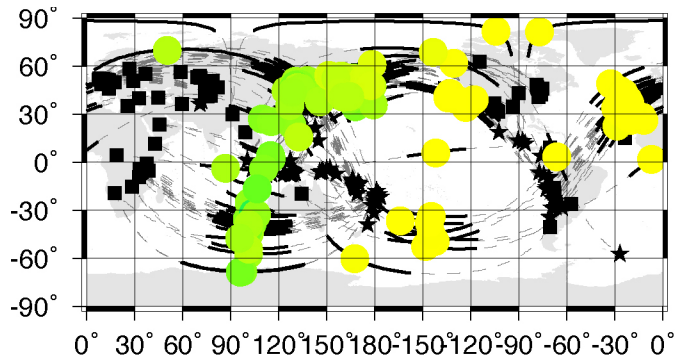




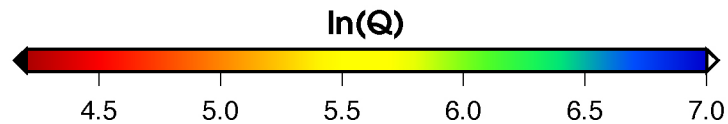
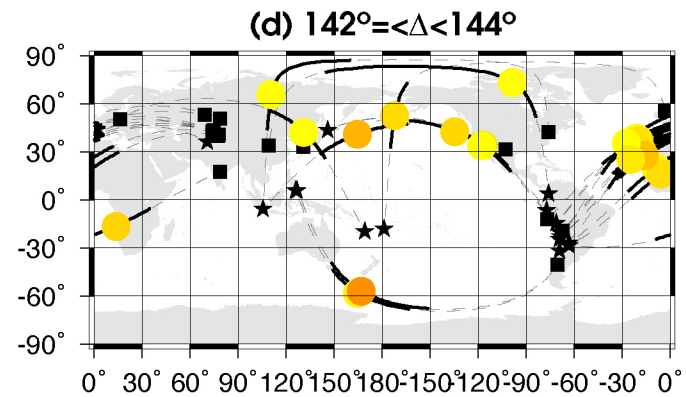
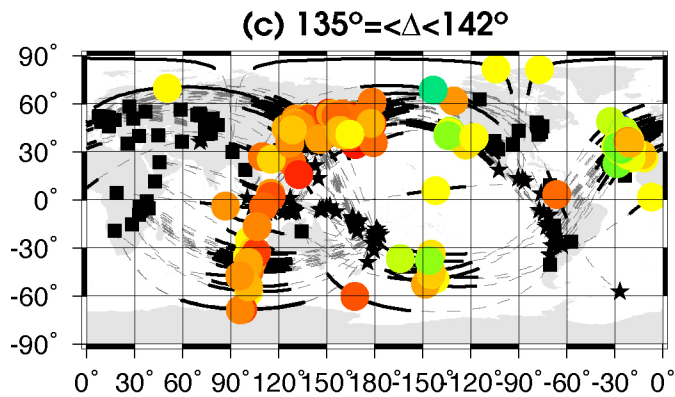
Data narrow band filtered around 1 Hz

Cao and Romanowicz, 2004

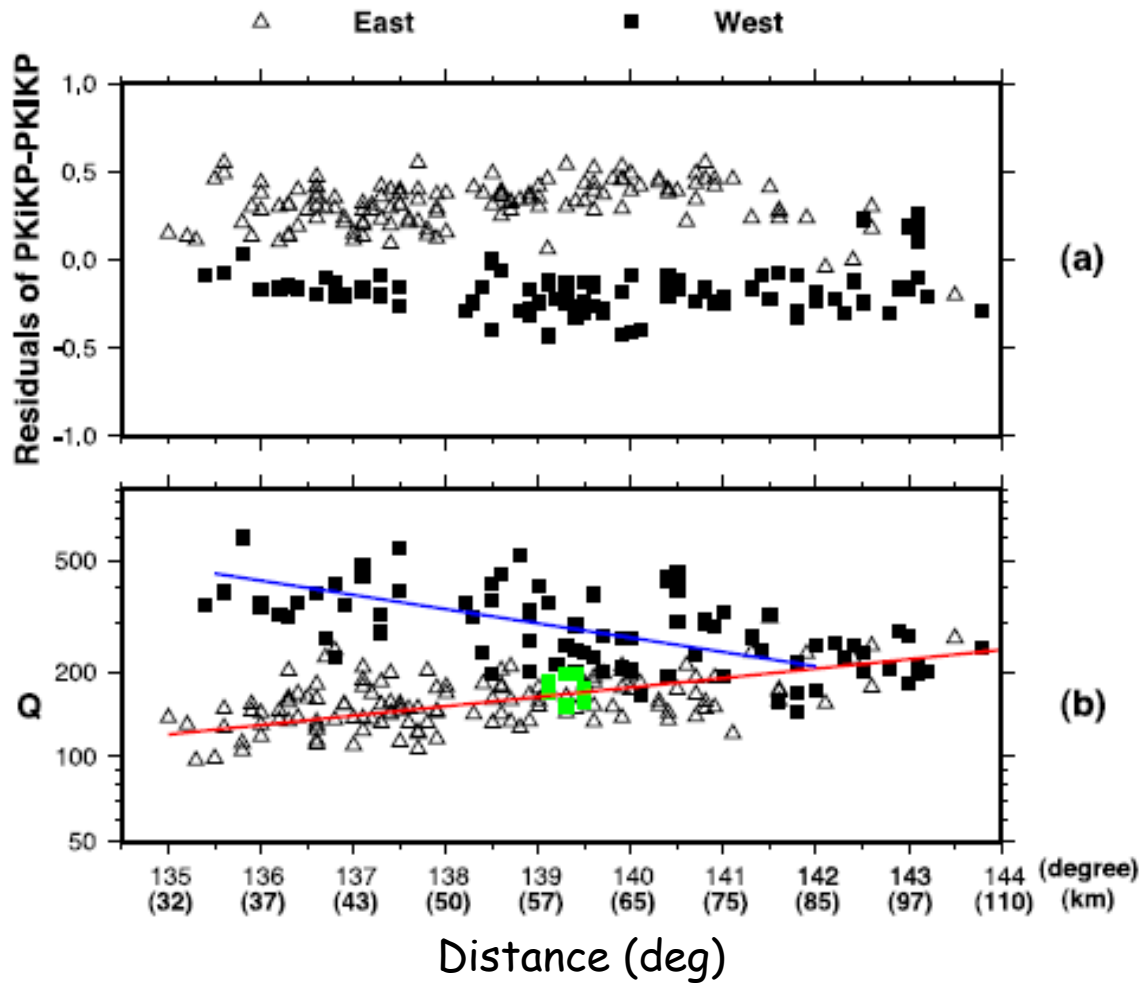
Temps de
parcours
différentiels



Atténuation
différentielle

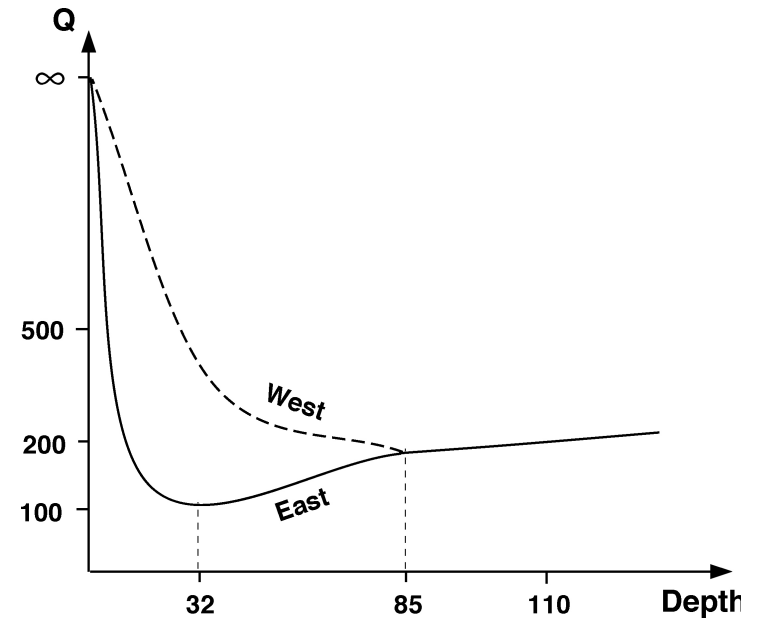


Mushy zone at the top of the inner core



(a)

(b)



Porosité décroît avec la Profondeur
Plus grande dans l'hémisphère Ouest (inclusions fluides Connectées):

Cao and Romanowicz, 2004

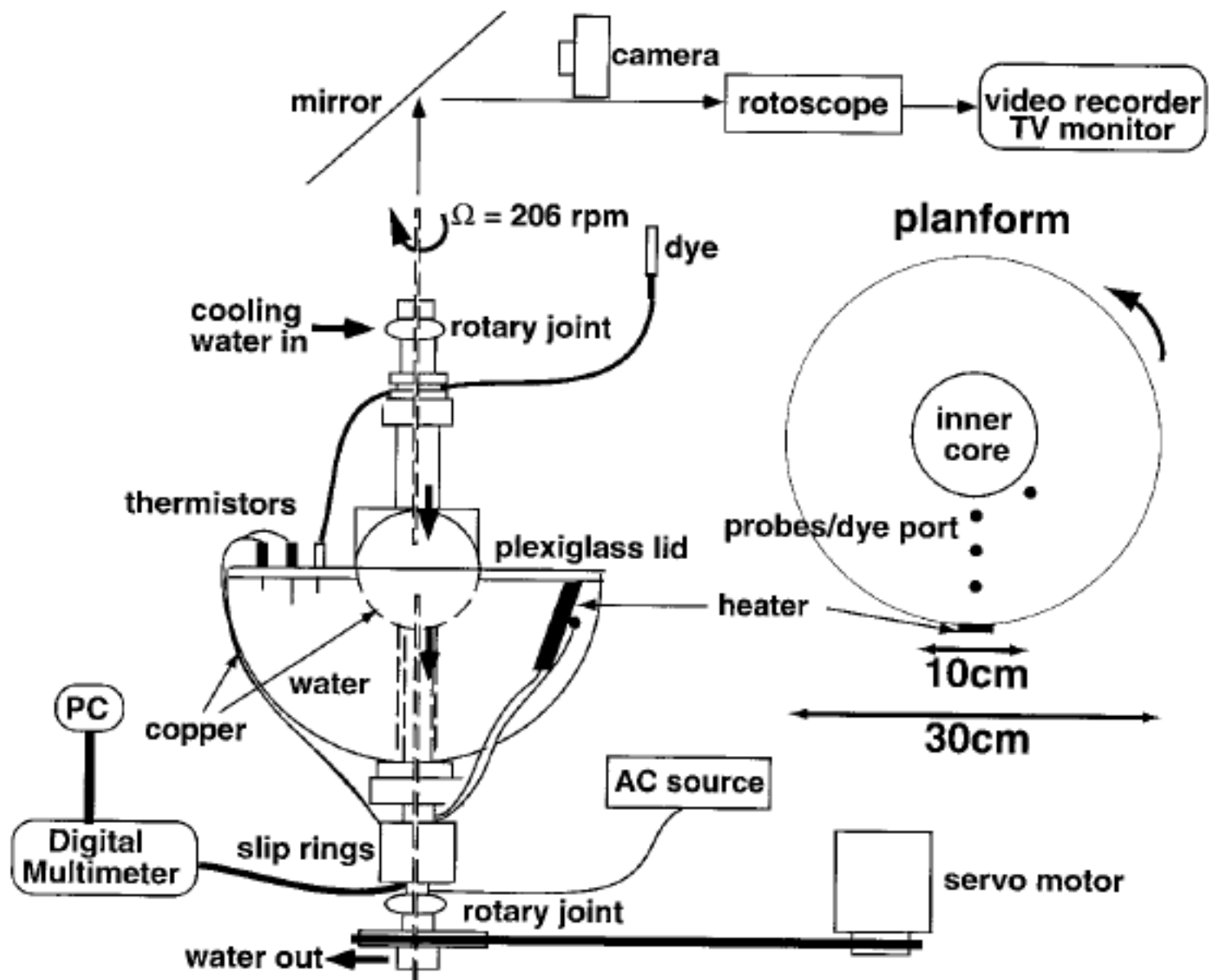
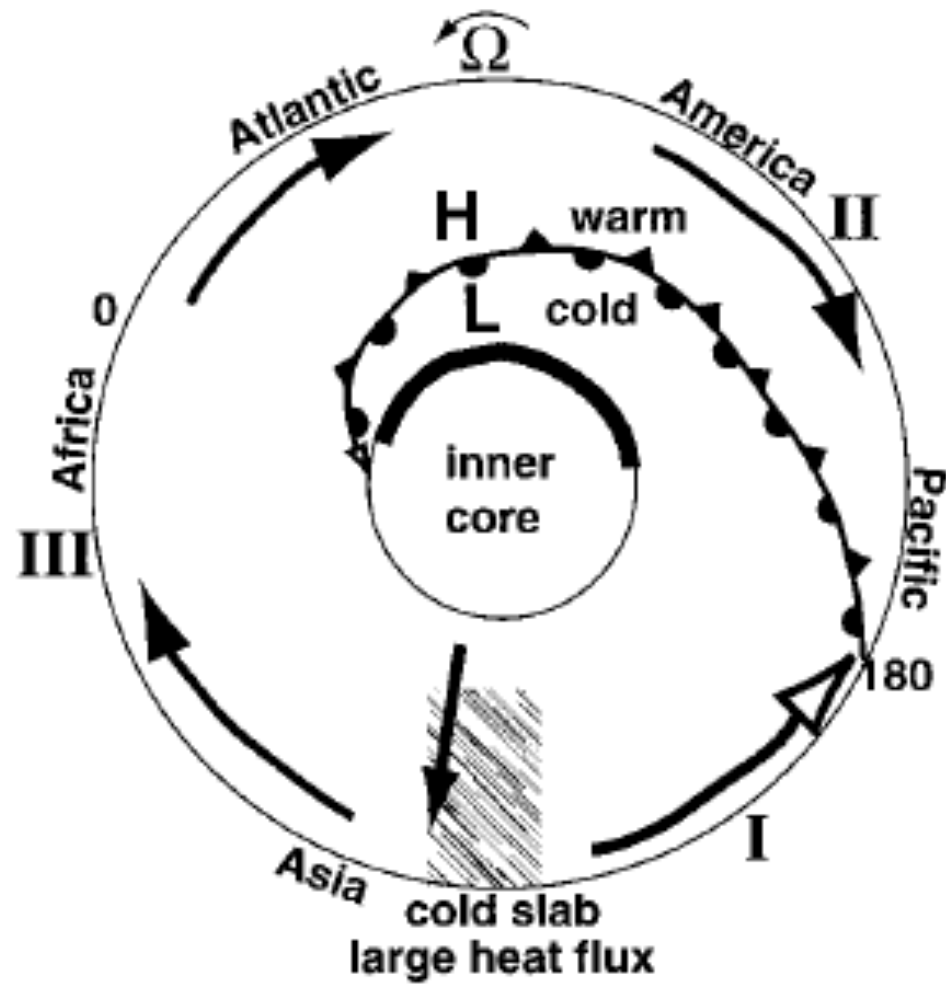


Fig. 1. Diagram of the experimental apparatus.

Sumita and Olson, 1999

La convection dans le noyau est contrôlée par les hétérogénéités à la base du manteau



$\Delta t \sim 10^{-4}$ à l'ICB

projection équatoriale

Sumita and Olson, 1999

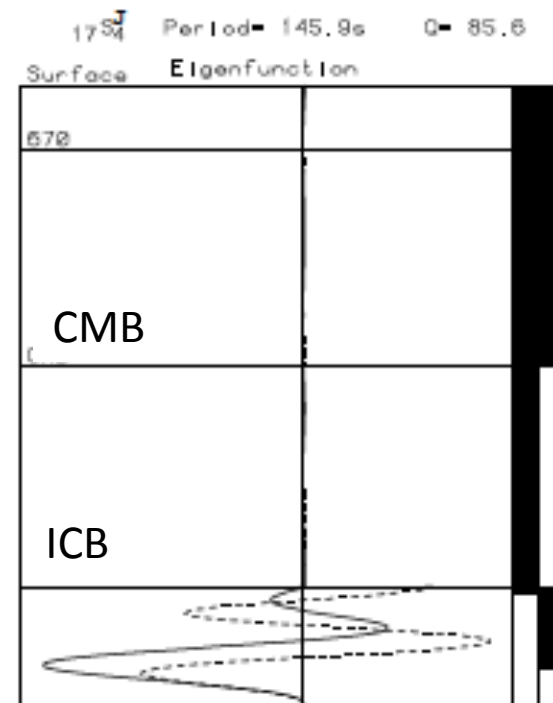
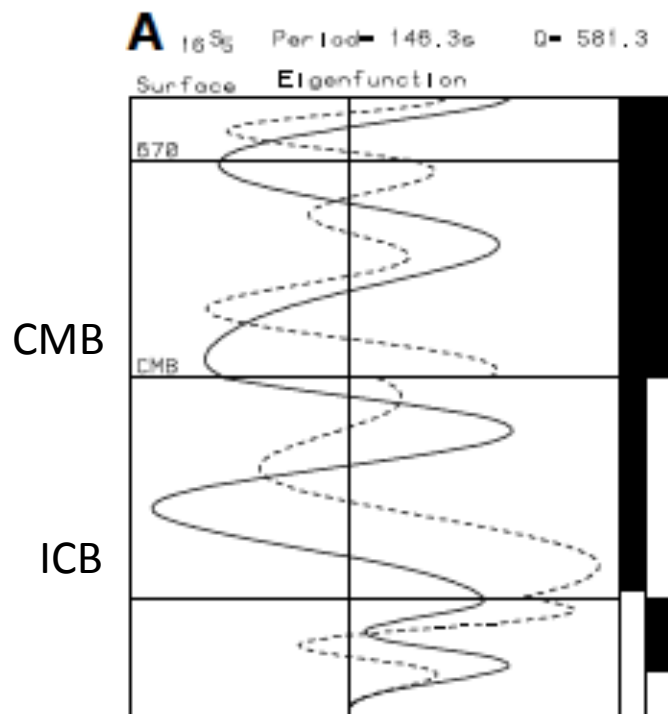
Anisotropie de degré 1 par les modes propres

$${}_{16}S_5$$

$$T=146.3 \text{ s}; Q = 581.3$$

$${}_{17}S_4^J$$

$$T=145.9 \text{ s}; Q = 85.6$$

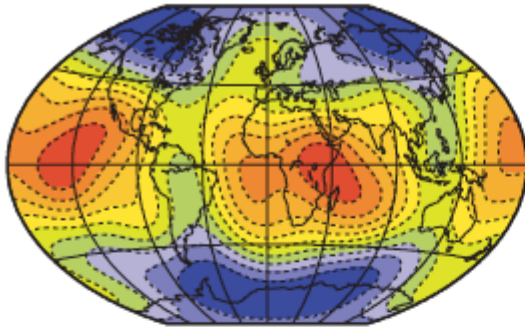


Fonctions propres radiales:

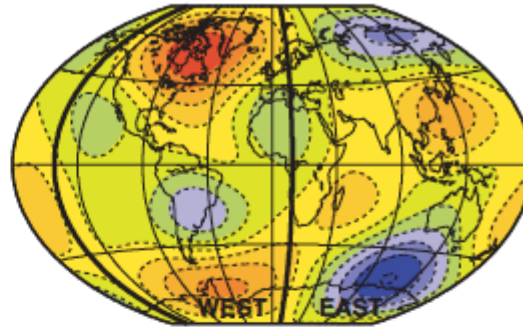
_____ : U - - - - - : V

Deuss et al., 2010

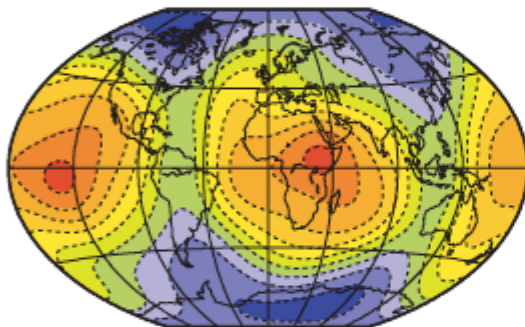
A Observed self-coupled splitting function
 ${}_{16}S_5, s=2,4,6$



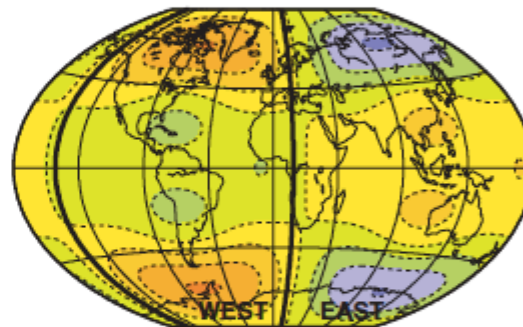
D Observed cross-coupled splitting function
 ${}_{16}S_5-{}_{17}S_4^J, s=1,3,5$



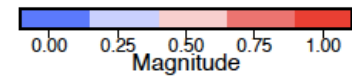
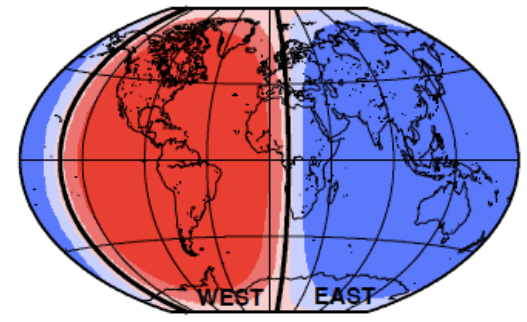
C Predicted self-coupled splitting for inner core
 ${}_{16}S_5, s=2,4,6$



E Predicted cross-coupled splitting for inner core
 ${}_{16}S_5-{}_{17}S_4^J, s=1,3,5$



B Anisotropy model magnitude



Deuss et al., 2010