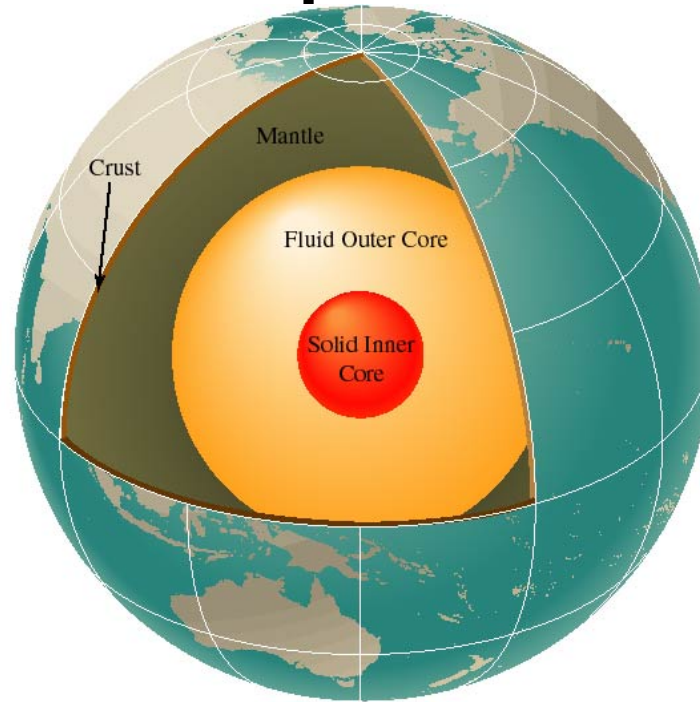


# Le noyau de la terre:

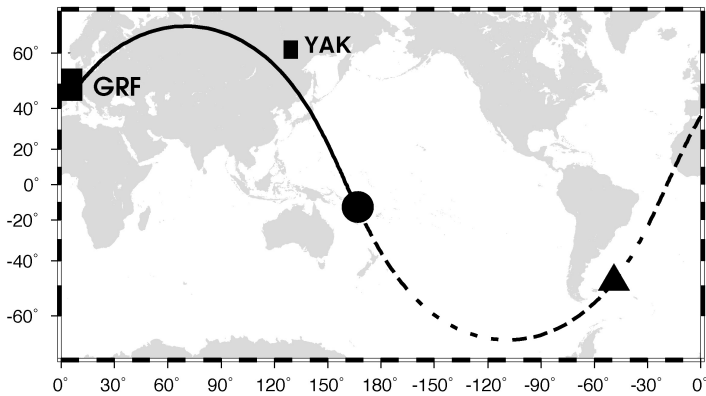
## 4- Anisotropie de la graine- 1ere partie



Barbara Romanowicz - Cours 2011  
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre  
Collège de France  
31 Octobre 2011

# Observations de PKJKP: fin

- Courtes périodes ( $\sim 10\text{Hz}$ ) : Julian et al. 1972 (réseau LASA)
- 0.1-0.5 Hz: Okal and Cansi, 1998- réseau CEA en France
- Longue période:
  - Deuss et al. (2000) réseau global
  - Comparaison de modèle à graine et à noyau complètement liquide pour identifier PKJKP
  - Désavantages:
    - Nombreuses phases perturbatrices
    - Amplification de phases de type P du noyau
    - Anisotropie S



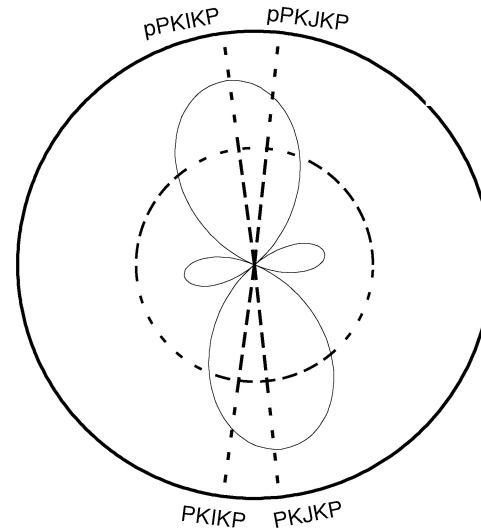
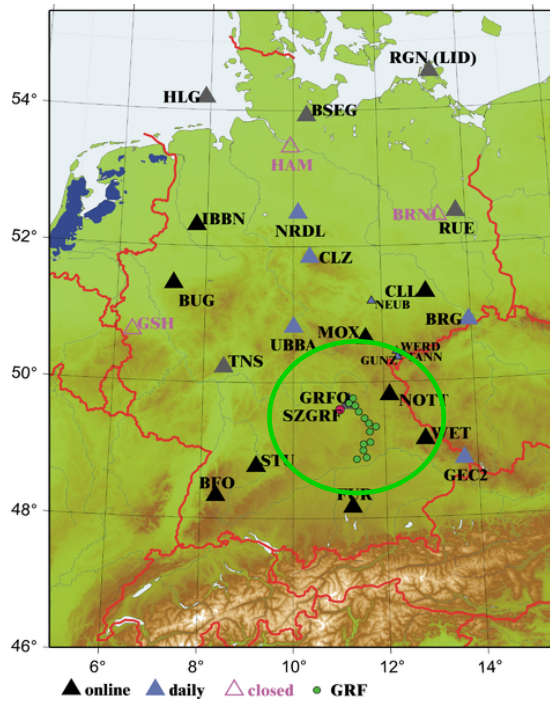
4e étude:

Santa Cruz Islands

Feb. 06, 1999

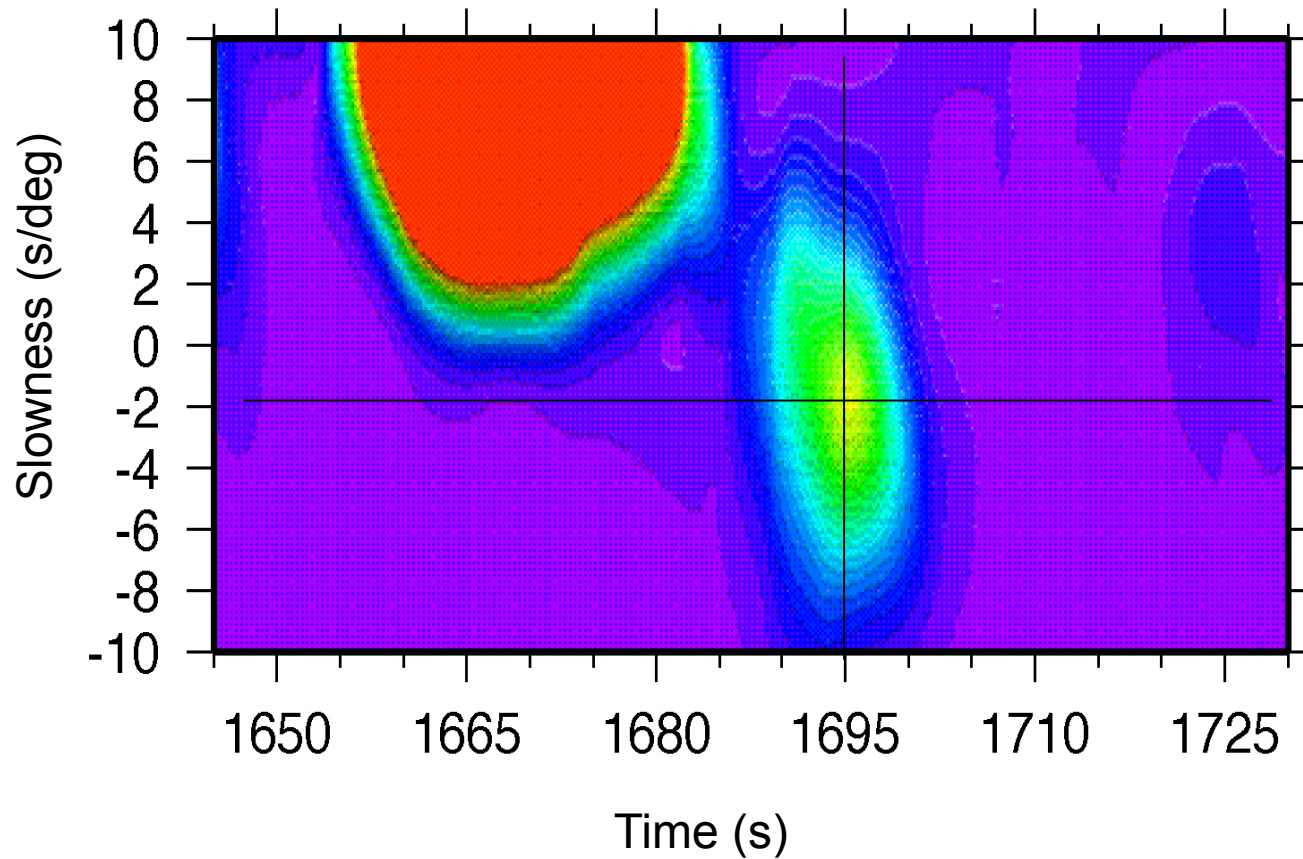
Mw = 7.3, depth = 76 km,  $\Delta = 138^\circ$

Une source sismique  
exceptionnelle



Cao et al., 2005

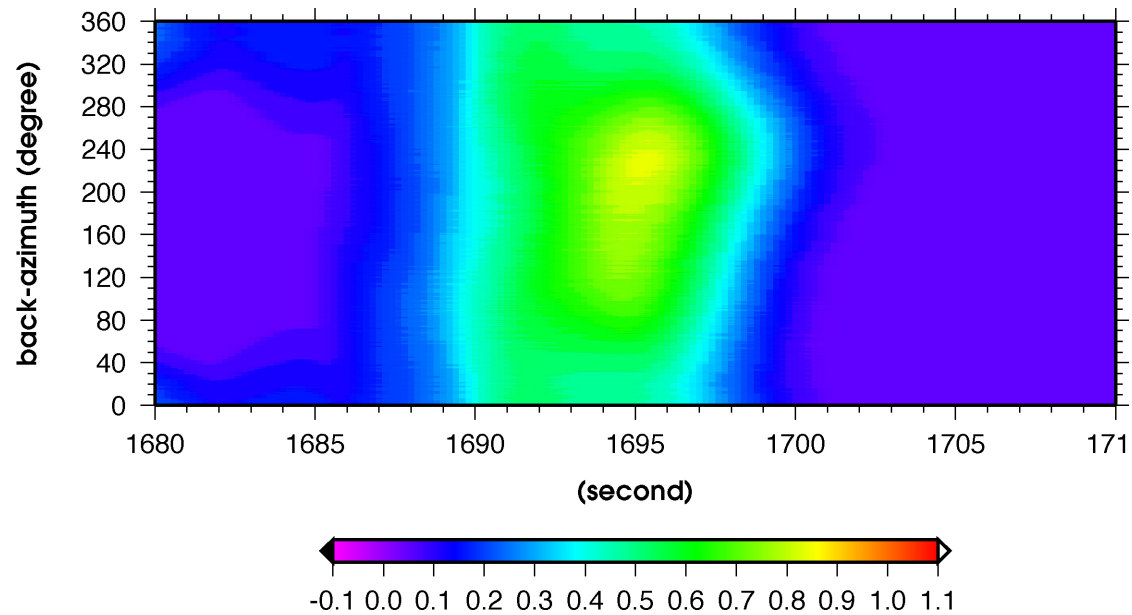
*Phase weighted stack: PWS (Schimmel and Paulssen, 1997)*



*Cao, Takeuchi, Romanowicz., 2005, Science*

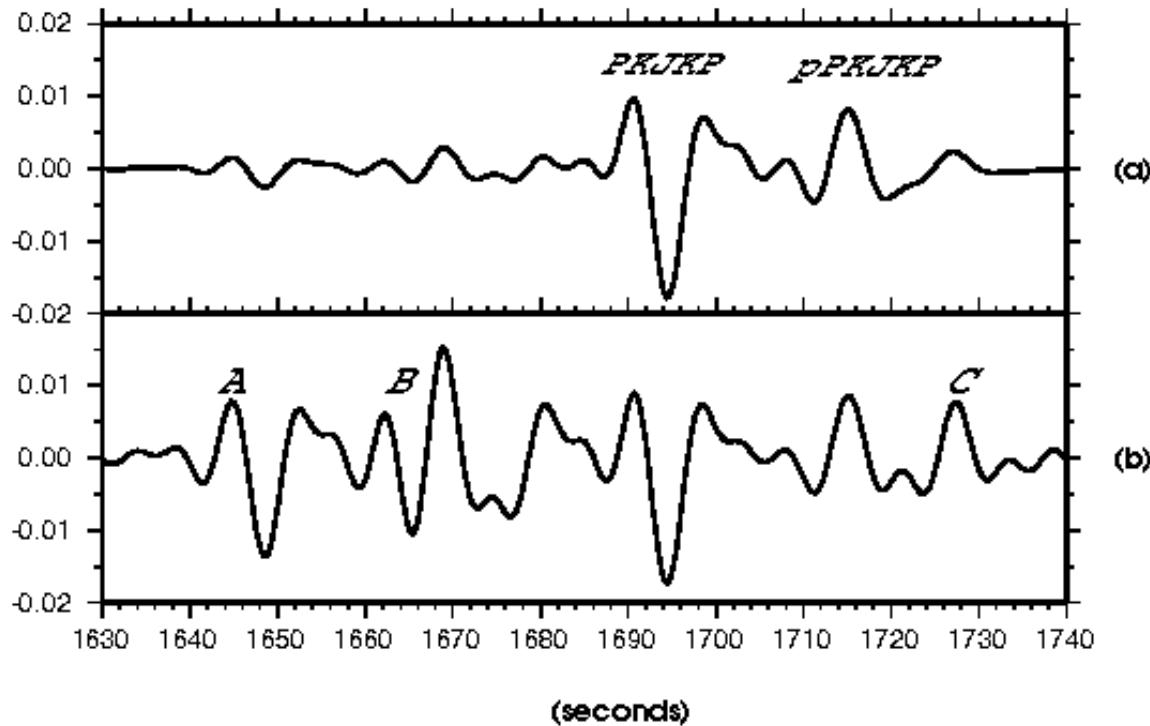


# Back-azimuth de la phase "cible"



Estimated back-azimuth is  $\sim 223^\circ$   
Expected back-azimuth is  $218^\circ$

# Sismogrammes synthétiques différentiels Pour une graine 'Pseudo-liquide'

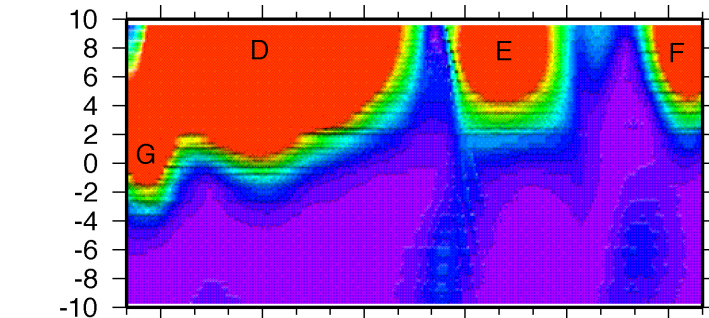


*V<sub>s</sub> = 8% less  
than in PREM*

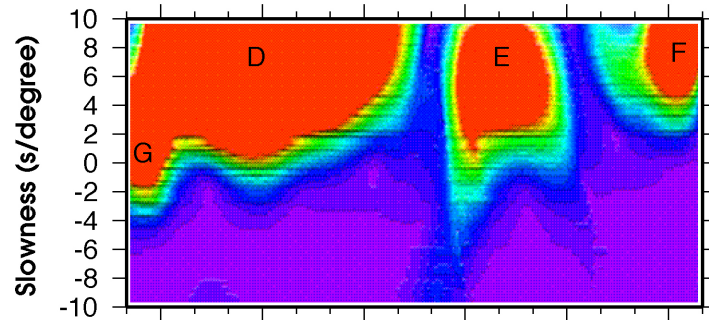
*V<sub>s</sub> = 0 km/s  
(Deuss et al., 2000)*

**A:** *P<sub>c</sub>PPKIKP*      **B:** *pP<sub>c</sub>PPKIKP+sP<sub>c</sub>PPKIKP*      **C:** *PKKPdf*

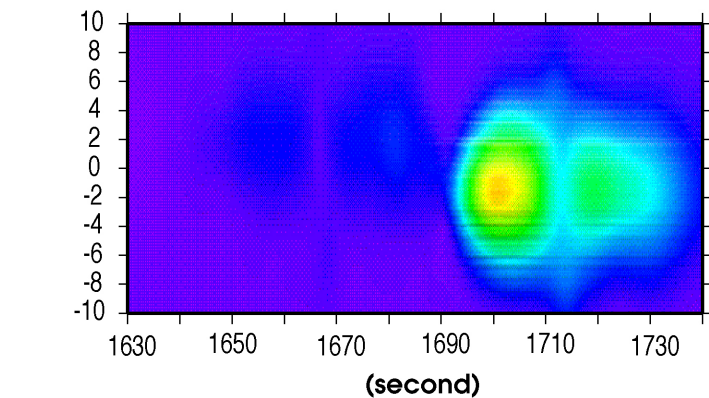
# Vespagrammes Synthétiques



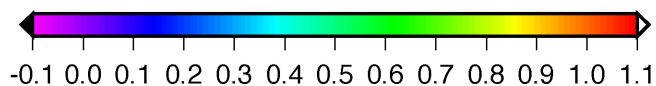
(A) Pour la graine 'pseudo-liquide'



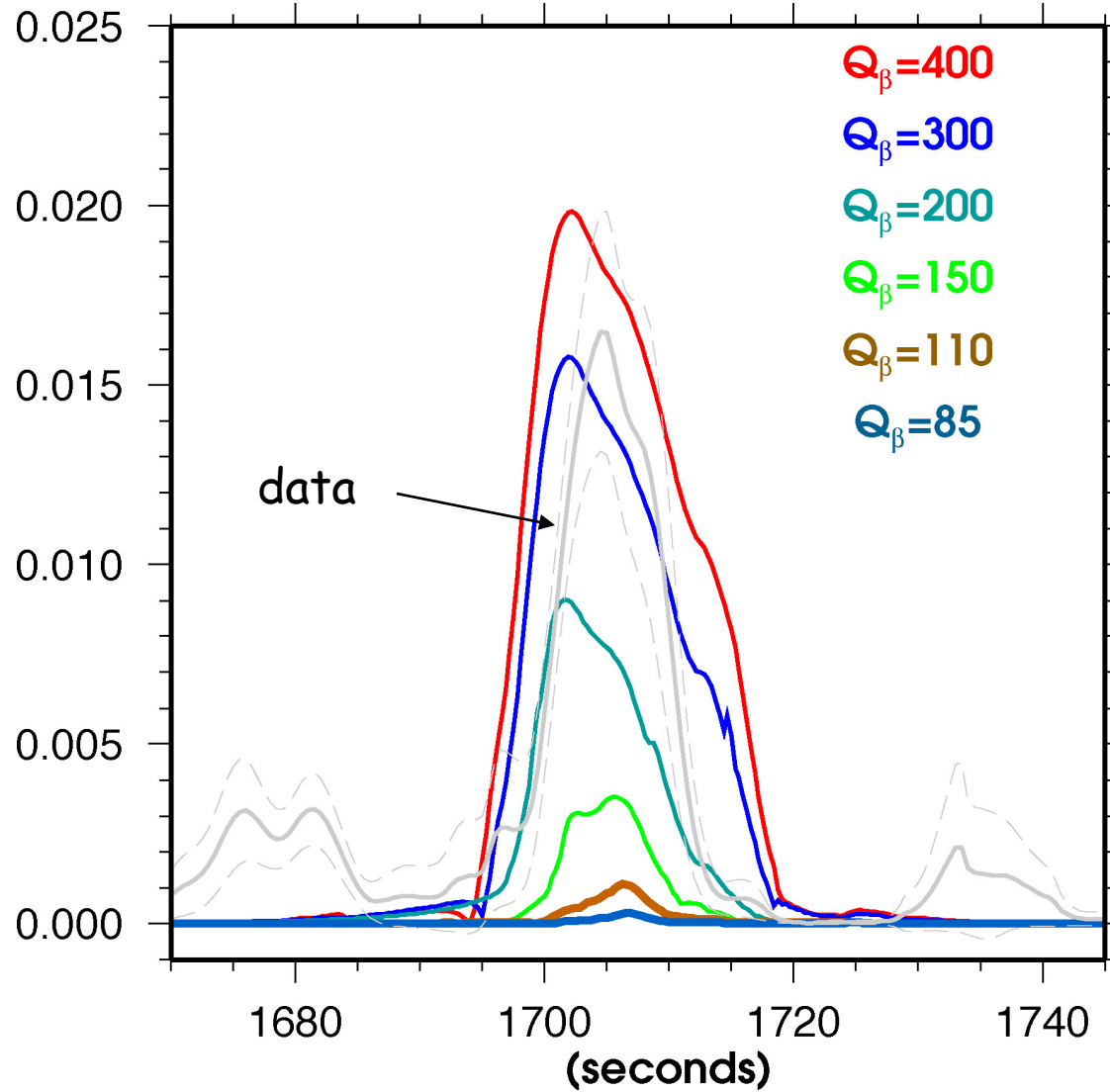
(B) Pour la graine solide ( $Q_\beta = 300$ )



(C) Pour les sismogrammes différentiels  
*(amplifié 40 fois)*

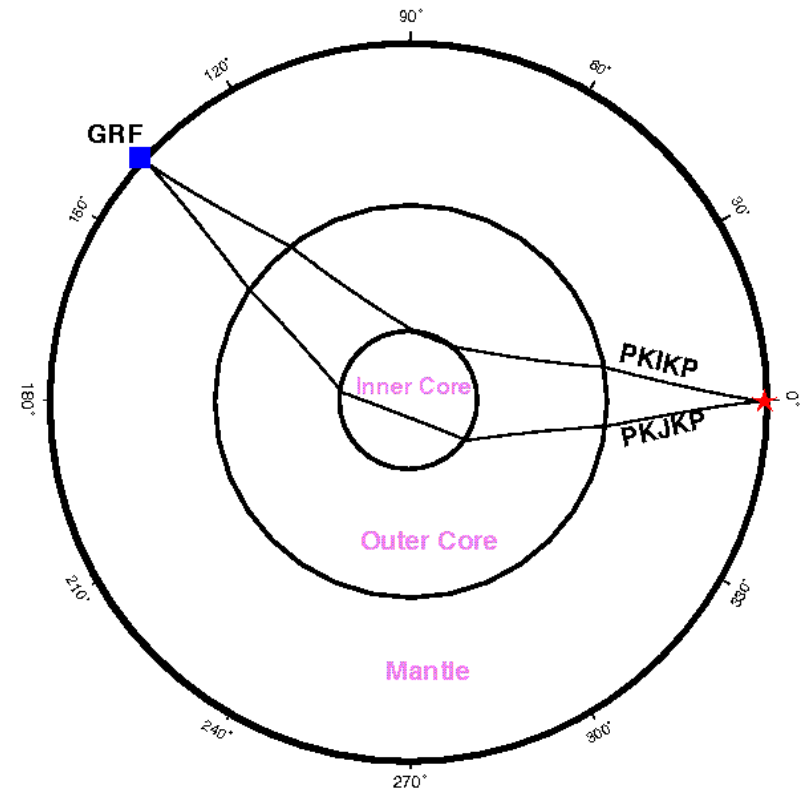


# Modélisation de l'enveloppe de PKJKP



# Conclusions PKJKP

- La phase PKJKP observée arrive  $\sim 9$  s avant celle prédite par le modèle PREM
  - >  $V_s$  augmente avec la profondeur dans la graine
    - > Anisotropie en  $V_s$ ?
- Le  $Q_\beta$  estimé par PKJKP est un peu plus grand ( $\sim 315 \pm 150$ ) que celui obtenu par les oscillations propres ( $\sim 85$ , PREM)
  - >  $Q_\beta$  augmente avec la profondeur, comme  $Q_\alpha$

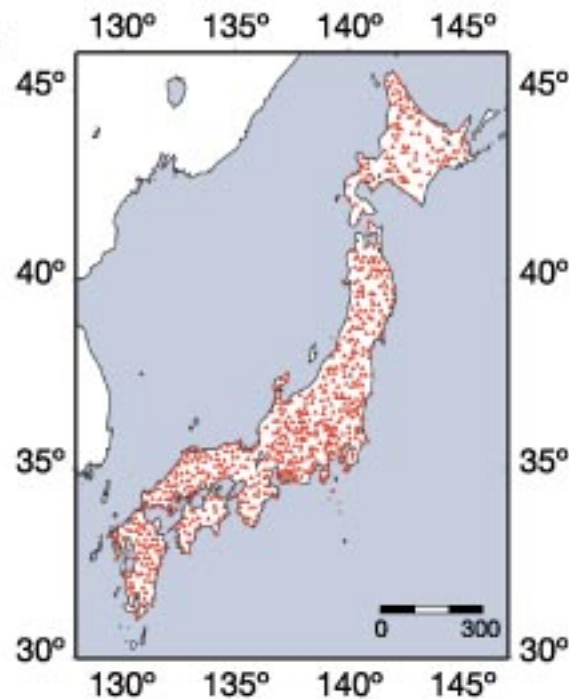


# Rebondissements plus récents

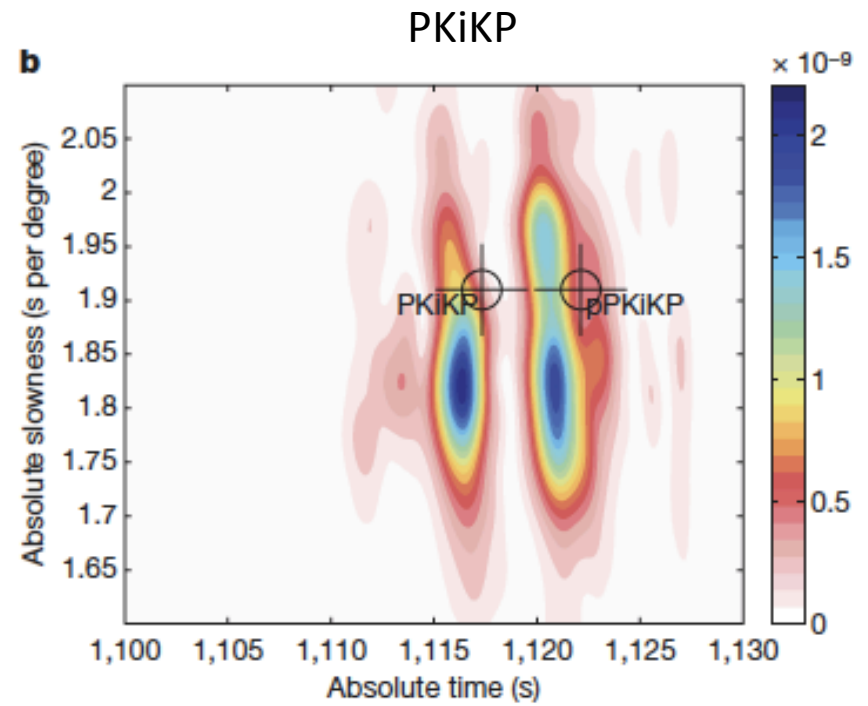
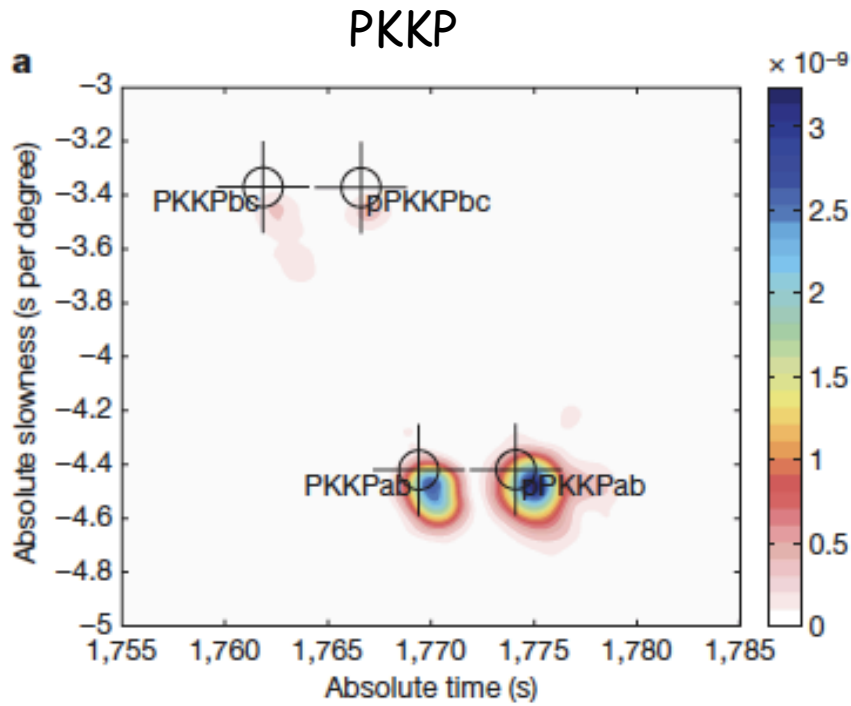
- Wookey et al. (2008)
  - Observation à haute fréquence (0.3Hz) sur le réseau japonais Hi-net

Mozambique  
Mw=7.0  
Prof.= 14 km  
22 Fev 2006

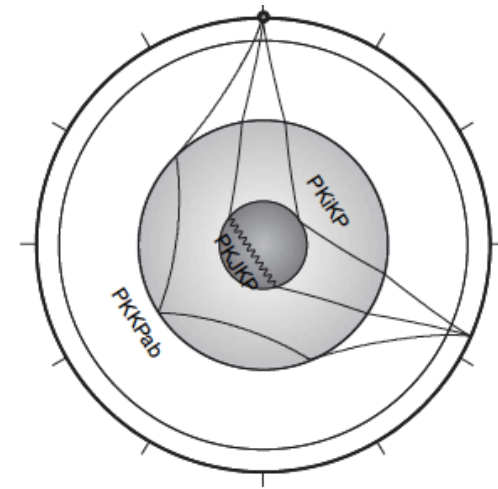
$\Delta=114^\circ$



~700 stations



 Predictions dans le modèle AK135

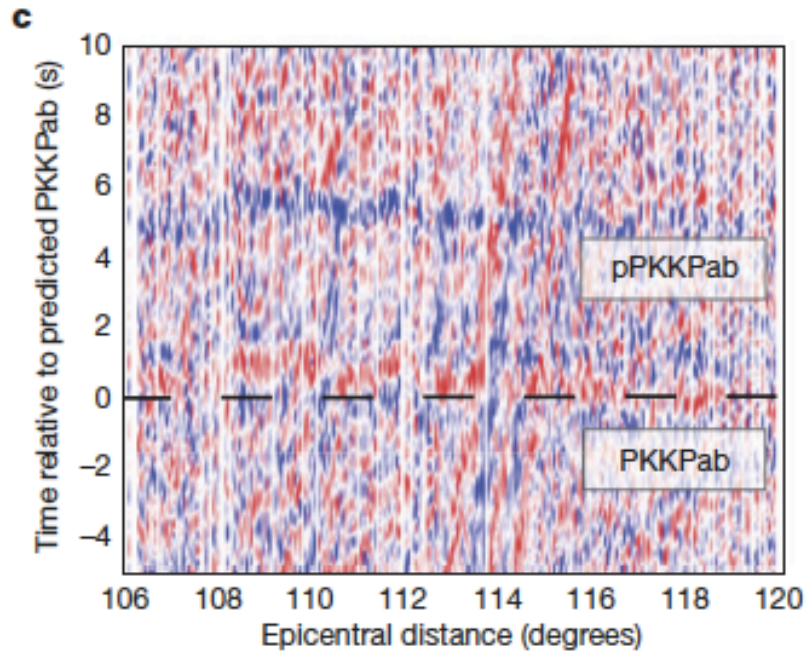


*Wookey et al., 2008*

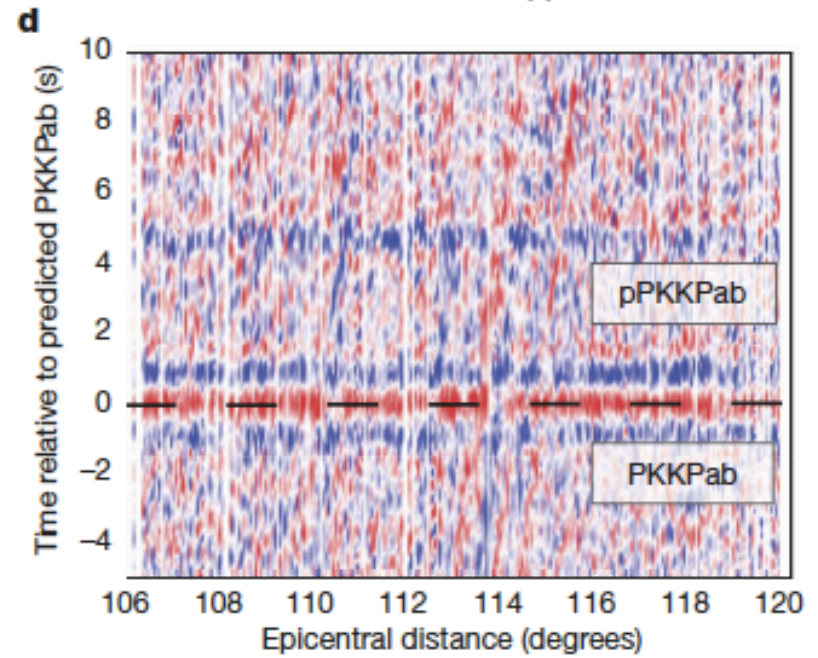


# PKKPab

Avant corrections de station



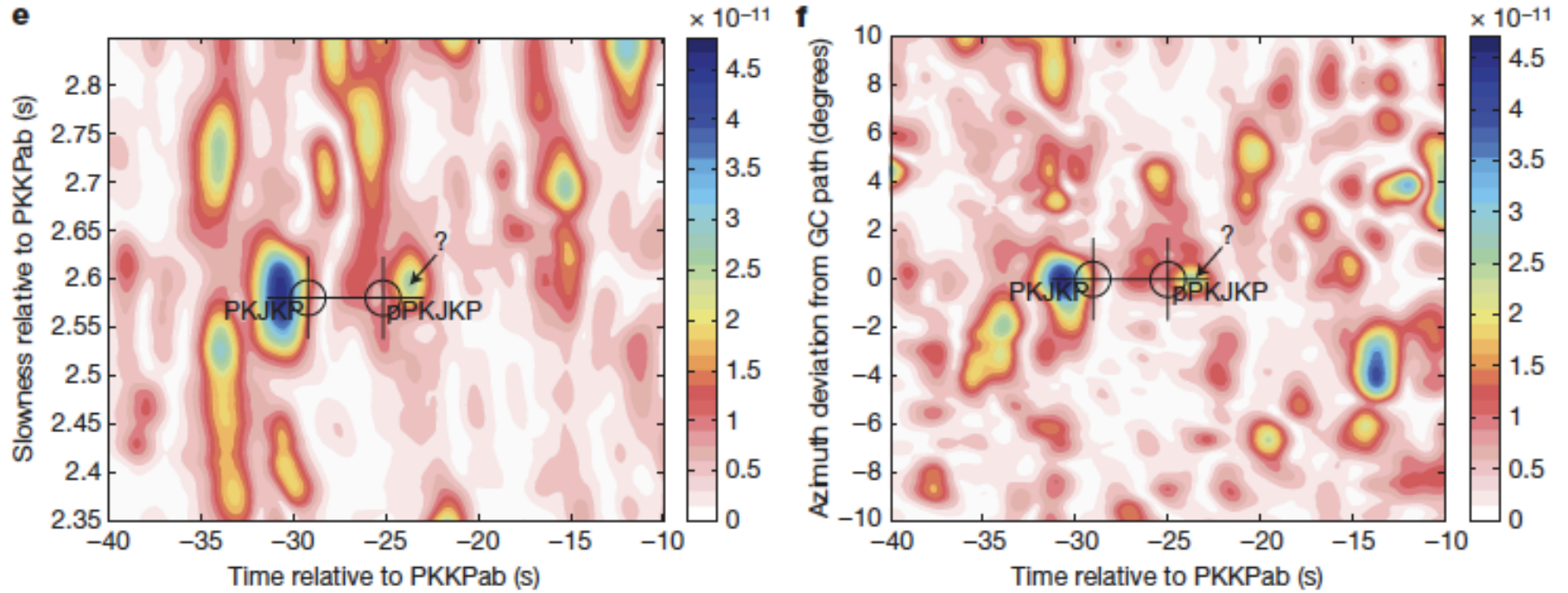
Après corrections de station



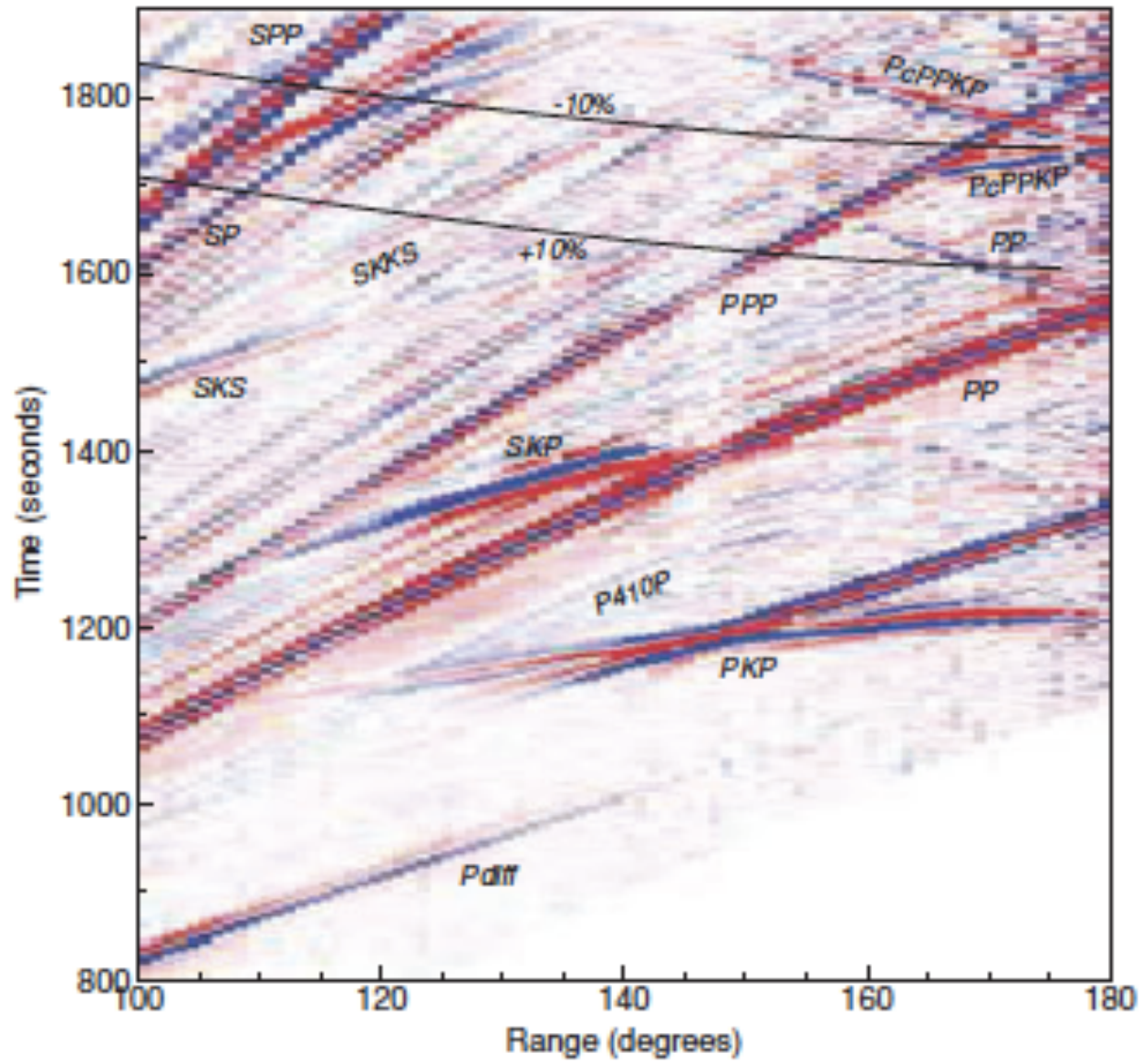
# PKJKP

Lenteur/temps

Azimuth/temps



Données globales - 9000 sismogrammes - phase de référence PP



Périodes >17s

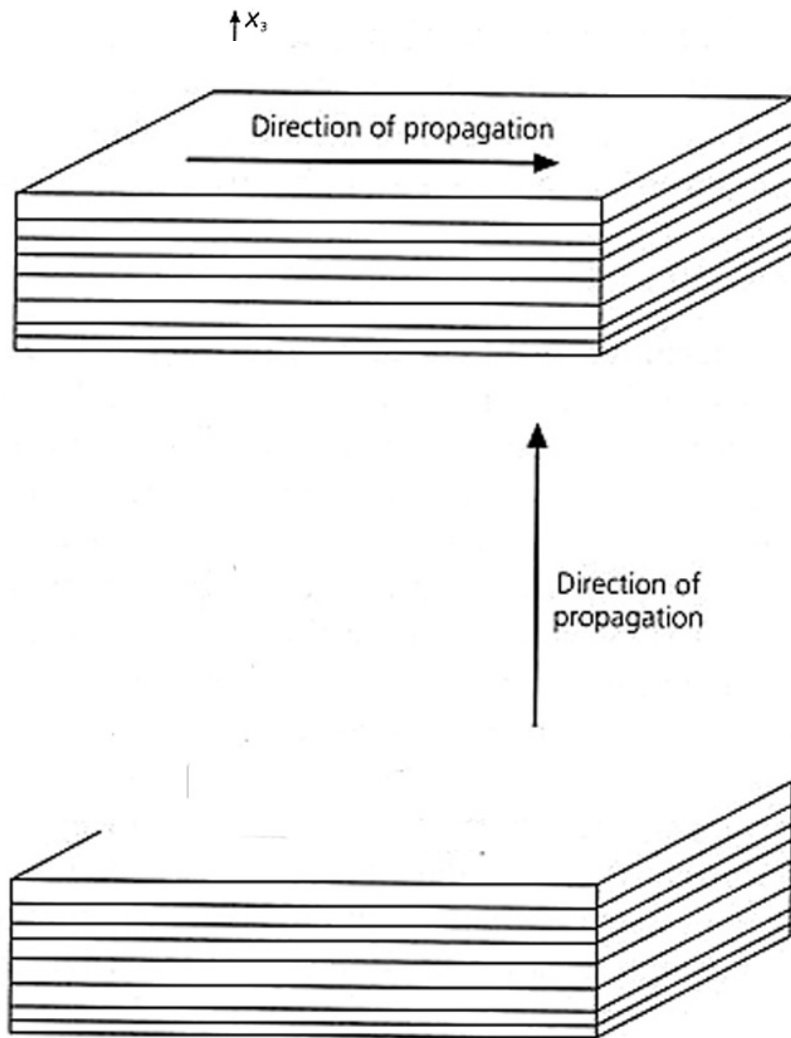
*Shearer et al., 2010*

Anisotropie dans la graine

# Anisotropie sismique

- La structure est dite anisotrope si les ondes se propagent à des vitesses différentes dans des directions différentes.
- L'anisotropie sismique provient principalement de deux causes:
  - SPO (shape-Preferred Orientation)
  - LPO (lattice-preferred orientation)

# Shape Preferred Orientation



*Par exemple::*

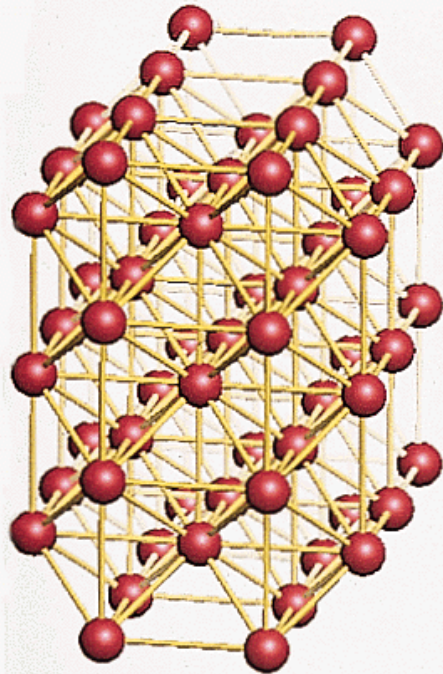
Lorsque l'on est en présence de couches fines alternées de différentes propriétés élastiques:

- La vitesse des ondes sera plus lente pour une direction de propagation perpendiculaire aux couches que pour une direction parallèle à celles-ci

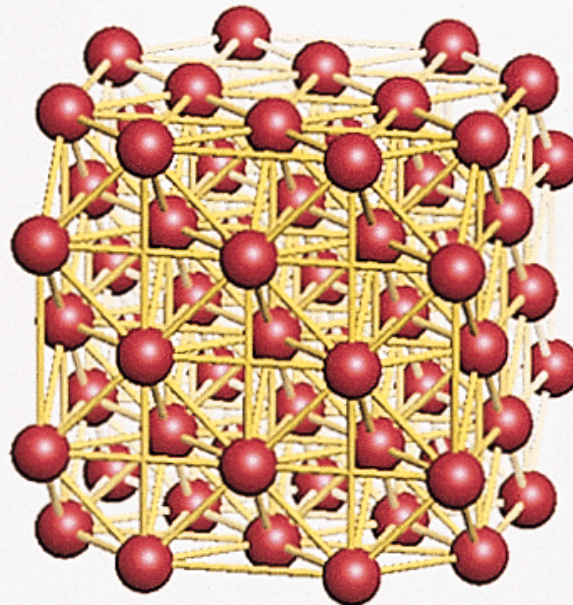


LPO: Lattice Preferred Orientation:  
e.g. structure du fer

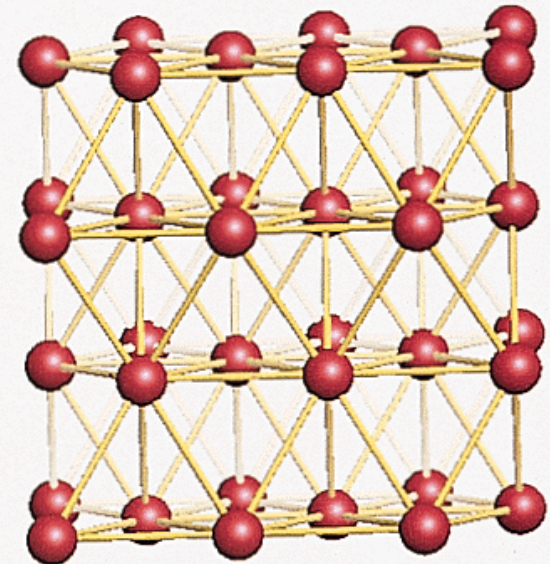
**bcc**



**fcc**

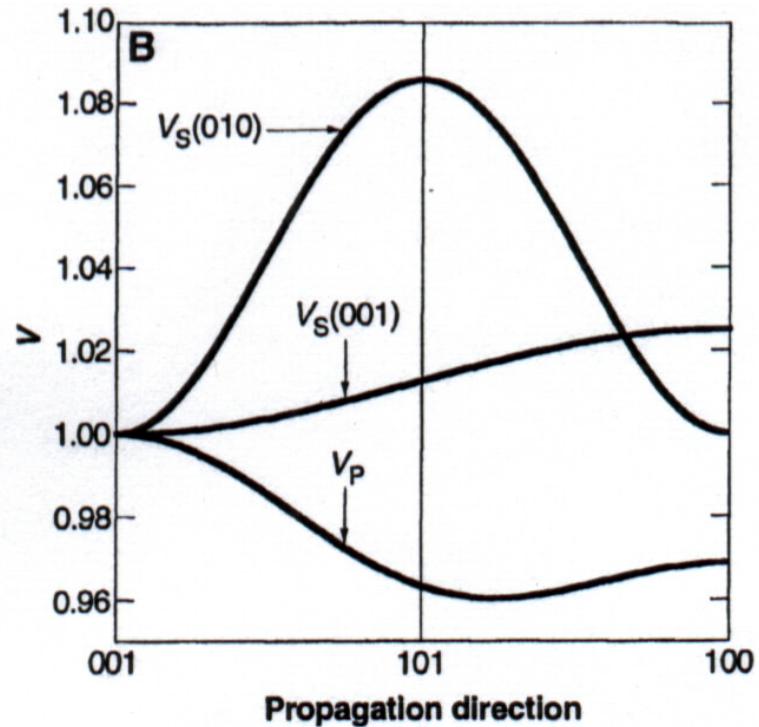


**hcp**





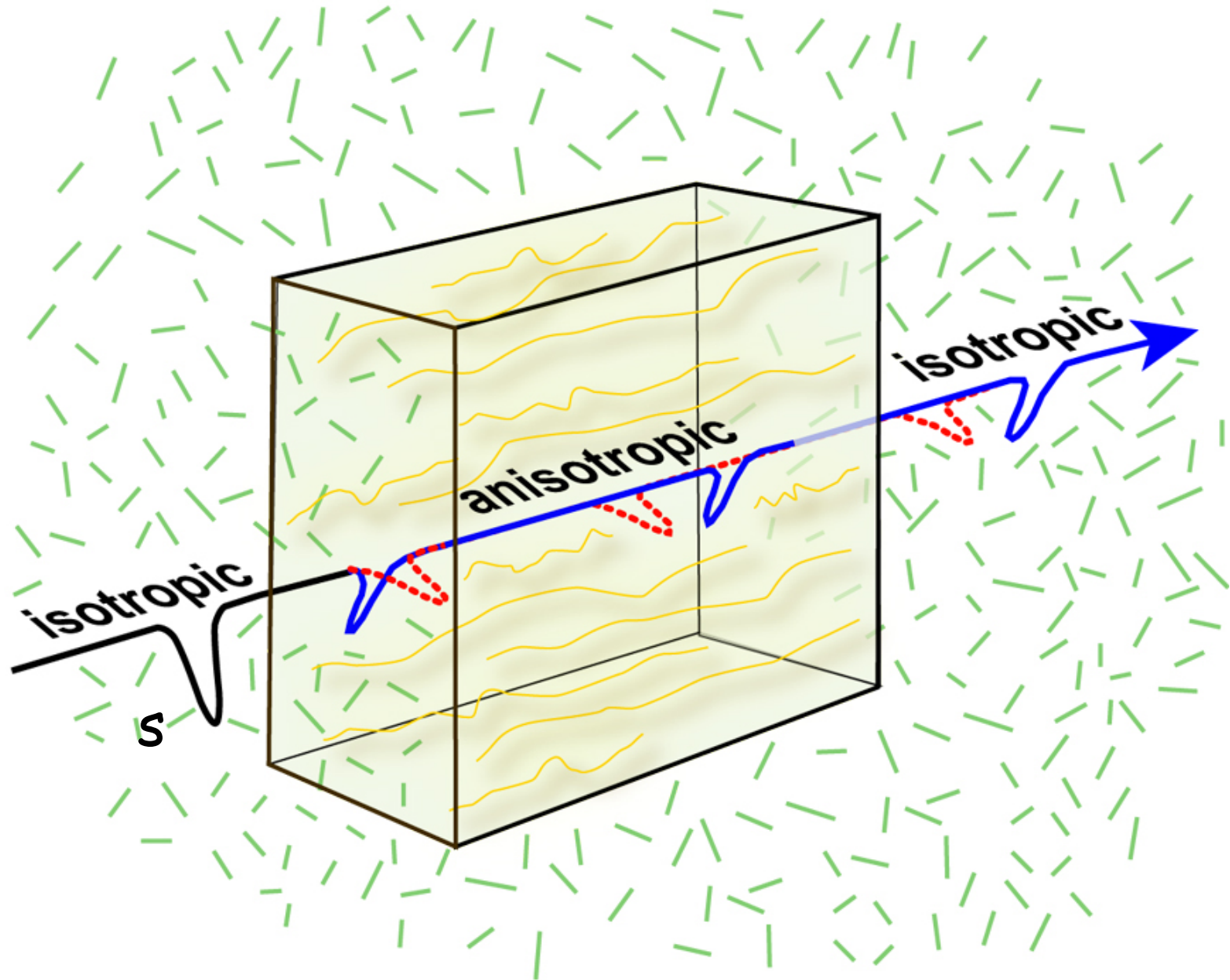
# Anisotropie dans la graine



Fer Hcp

(Stixrude and Cohen, 1995)  
Calculs "ab initio"

# Shear wave splitting in anisotropic media



(After Crampin, 1981)

# Elasticité: relation linéaire entre les contraintes et les déformations

- De manière générale:

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

- Où  $C_{ijkl}$  est le tenseur élastique
- 21 éléments indépendants
- Si les propriétés sont indépendantes de la direction, on dit que le matériau est isotrope – alors il ya seulement deux éléments indépendants dans le tenseur élastique, les paramètres de Lamé,  $\lambda$  and  $\mu$

Cas isotrope:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}$$

$\mu$  = module de cisaillement

$$\kappa = \lambda + \frac{4}{3}\mu \quad \text{Module de compression}$$

$$V_P = \alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

$$V_S = \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

# Anisotropie radiale (ou transversale)

Le tenseur élastique comprend  
5 éléments indépendants:  
 $A, C, F, L, N$  (Love, 1911)

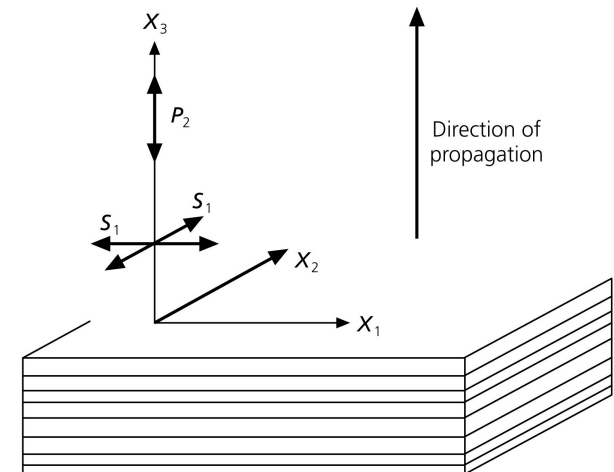
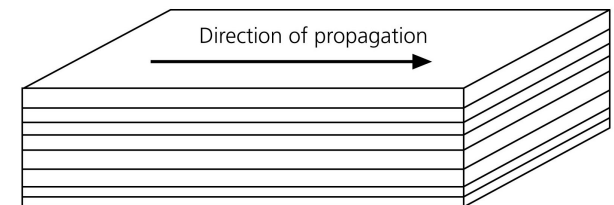
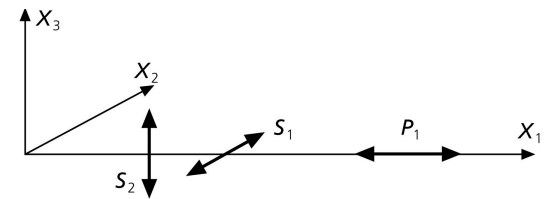
$$L = \rho V_{sv}^2$$

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

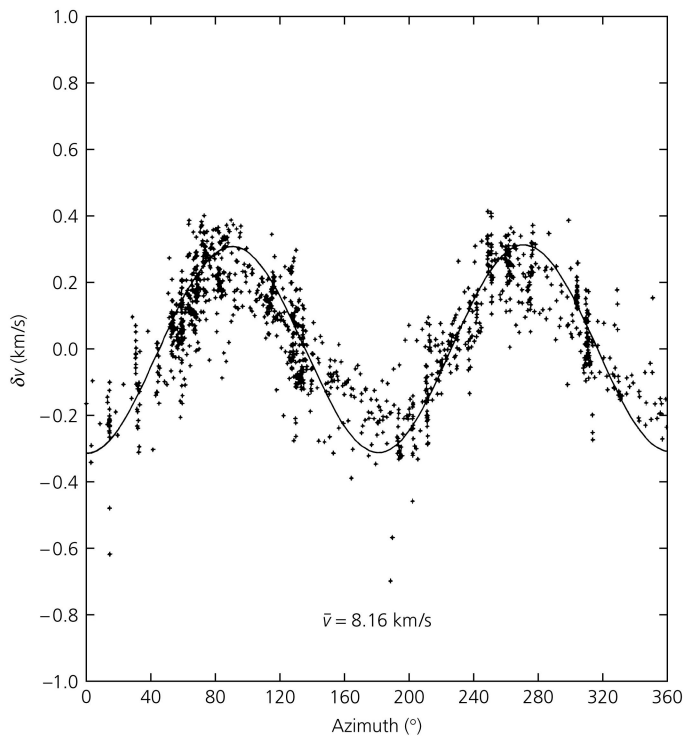
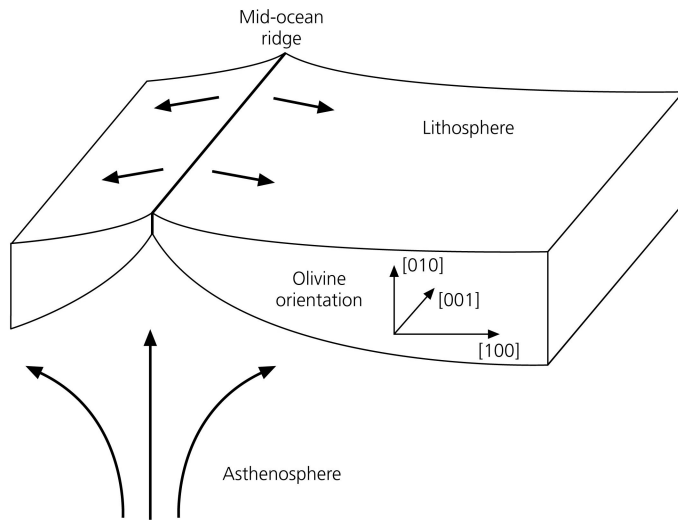
$$C = \rho V_{pv}^2$$

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

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

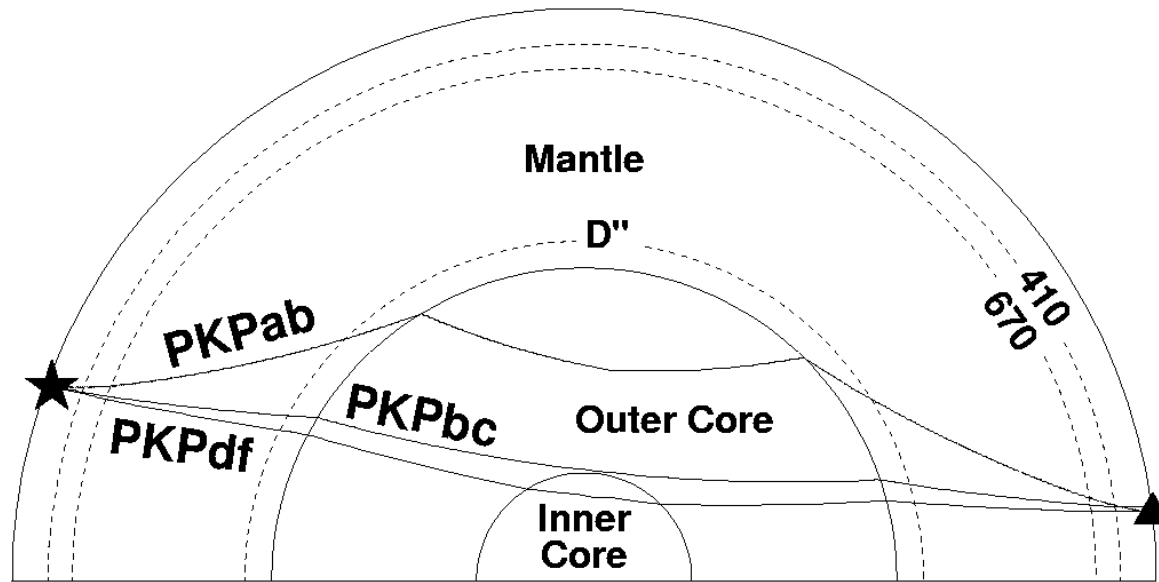


# Anisotropie azimuthale



La dépendance azimuthale des vitesses sismiques près des rides médio-océaniques confirme l'idée qu'il y a de l'anisotropie LPO dans la lithosphère océanique associée à la déformation en cisaillement due au mouvement des plaques tectoniques.

PKP= Ondes réfractées dans le noyau

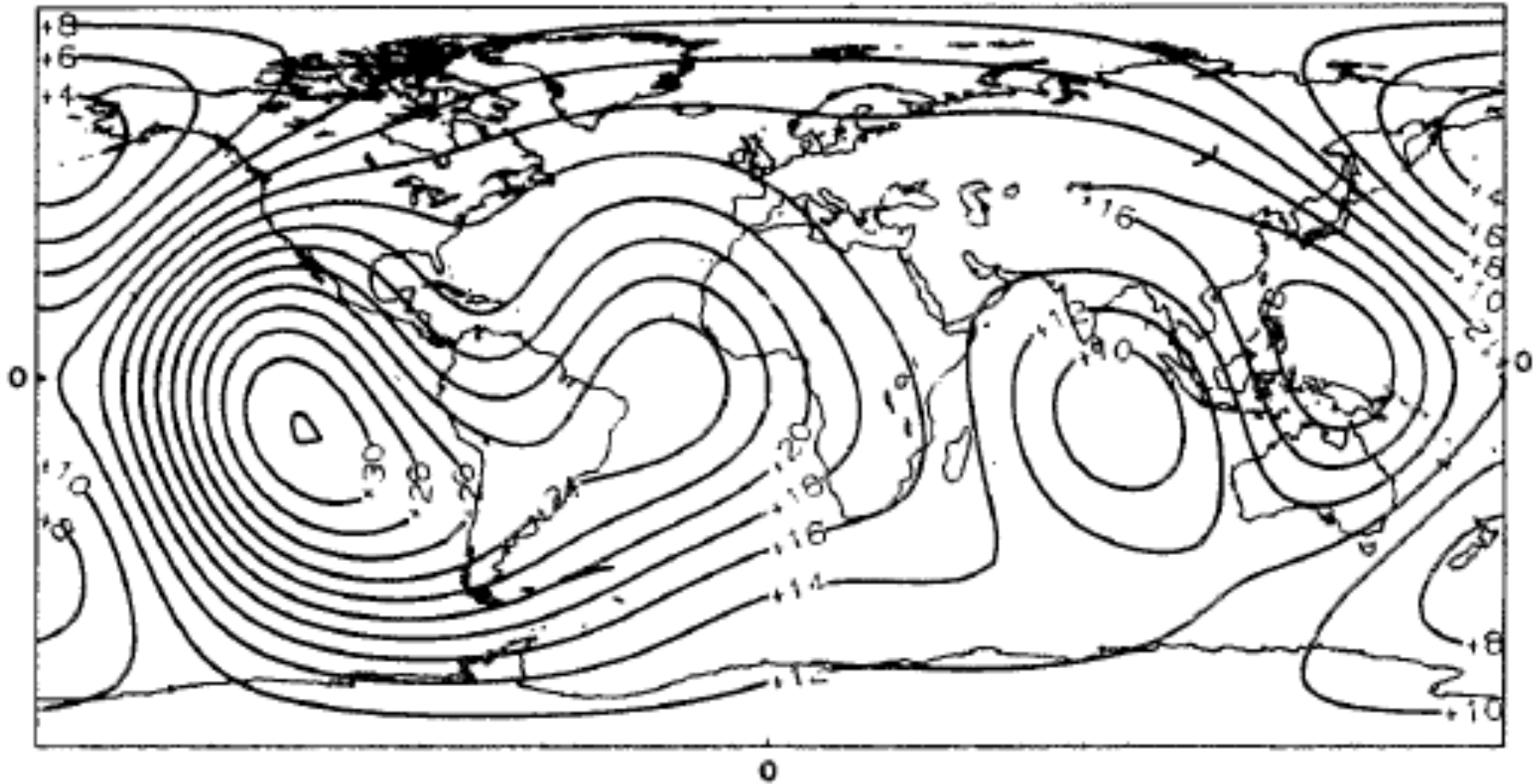




# Premières indications de structure asphérique au voisinage de la graine

- Poupinet, Pillet, Souriau (1983, *Nature*):
  - Variation avec la latitude des temps de propagation de l'onde PKIKP (PKP(DF)) :
    - Données de bulletins de l'International Seismological Centre (ISC)
    - Corrigées des effets du manteau en utilisant les "anomalies de station" obtenues par les ondes P.
  - Temps plus courts sur les trajets polaires que les trajets équatoriaux (différence de 2 s)
  - Interprété en termes de variations latérales de la vitesse des ondes P au voisinage de l'ICB ou..
  - d'ellipticité de la graine (allongée le long de l'axe de rotation)

Résidus de temps de propagation PKIKP  
- développement en harmoniques sphériques jusqu'au degré 4



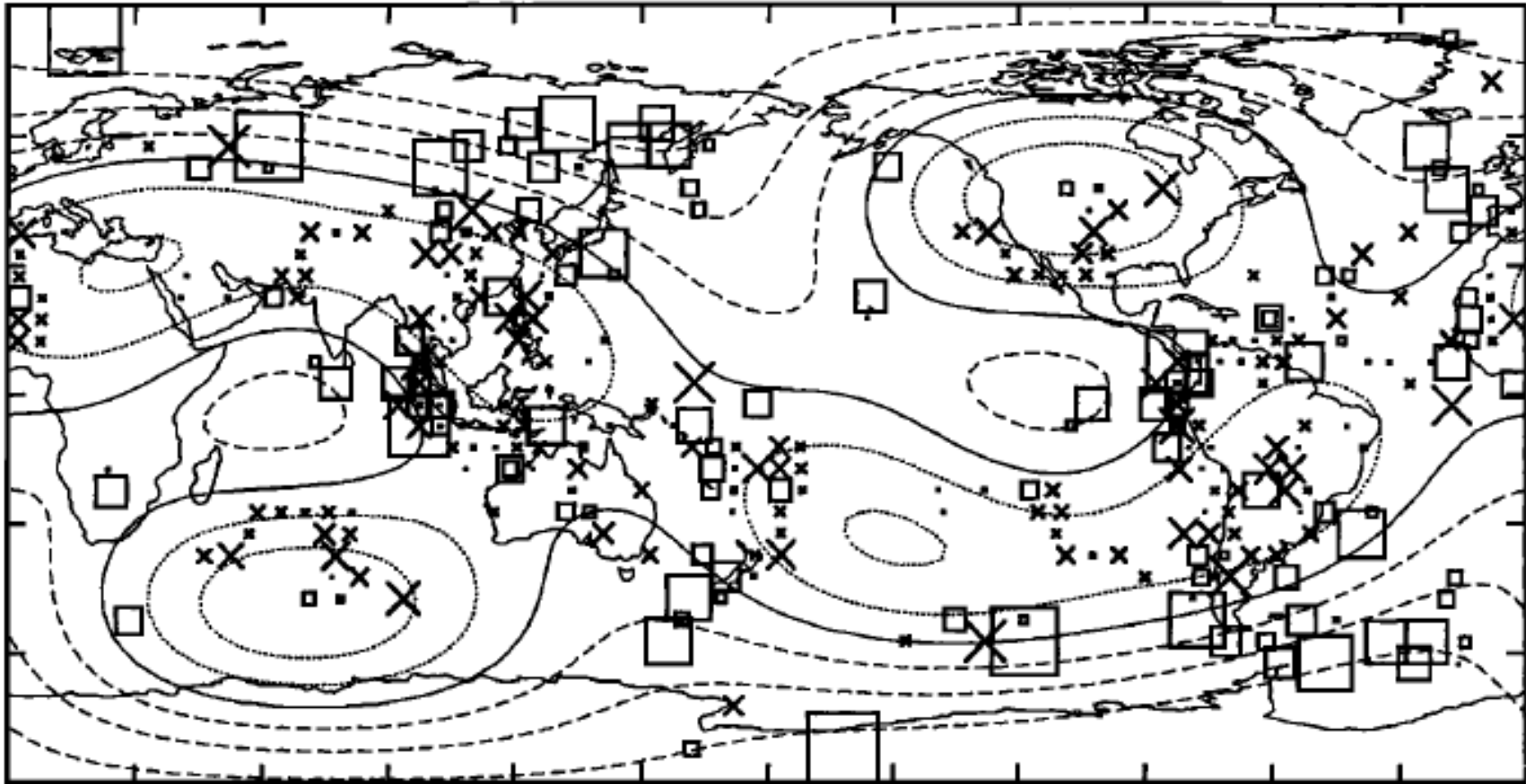
Valeurs en 10èmes de seconde: 2 s de différence entre les trajets polaires et équatoriaux.

*Poupinet et al., 1983, Nature*

# Anisotropie dans la graine

- Morelli and Dziewonski (1986)
  - Temps de parcours des ondes PKIKP
- Woodhouse, Giardini and Li (1986)
  - “Splitting” (séparation des raies) des modes propres de la terre

$$PKIKP \Delta = 170^\circ - 180^\circ$$



Plotted at the source and receiver locations  
Degree 4 expansion

□ -2 s      X +2 s

*Morelli and Dziewonski, 1986*

# Interpretations possibles:

- Effet plus important pour les distances antipodales:
  - Hétérogénéités dans la partie centrale de la graine (0-400 km de rayon):
    - Exclu: doivent s'annuler au centre de la graine
    - Structure non réaliste parce que trop complexe
    - N'explique pas les observations de modes
  - Hétérogénéités dans la partie superficielle de la graine:
    - Un modèle unique ne permet pas d'expliquer les données à des distances différentes.

- Anisotropie dans la graine:

- modèle d'anisotropie radiale (cylindrique) avec axe de symétrie parallèle à l'axe de rotation de la terre - (A,C,F,L,N)

- Une différence de vitesses de 1% entre trajets polaires et équatoriaux explique une différence de temps de propagation de ~2.2 s

$$\rho V_p^2(\xi) = A \sin^4 \xi + C \cos^4 \xi + 2(2L + F) \sin^2 \xi \cos^2 \xi$$

(Dans le cas isotrope, on aurait:  $A=C=2L+F$ )

- Ne peuvent distinguer une variation avec la profondeur d'un modèle constant dans la graine

- Anisotropie comme "petite perturbation" par rapport à un modèle de référence isotrope:

$$C = (1 + 2\varepsilon)A$$

$$2L + F = (1 + \sigma)\sqrt{AC}$$

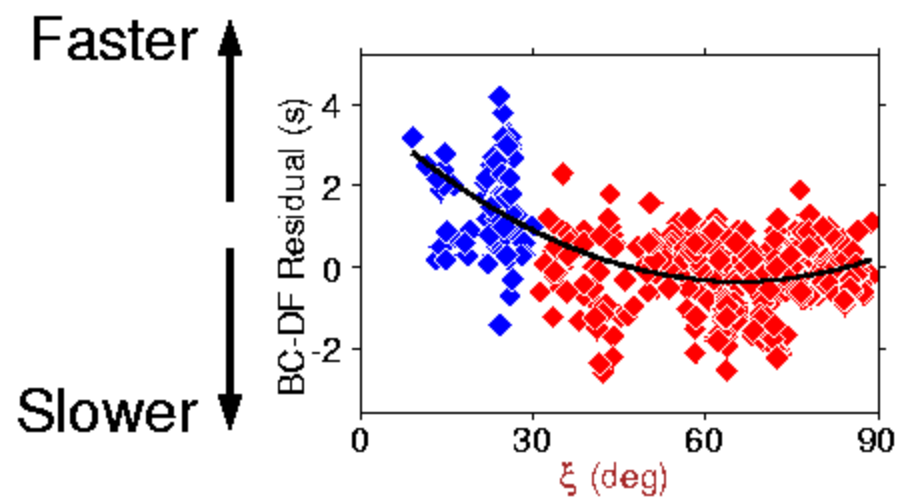
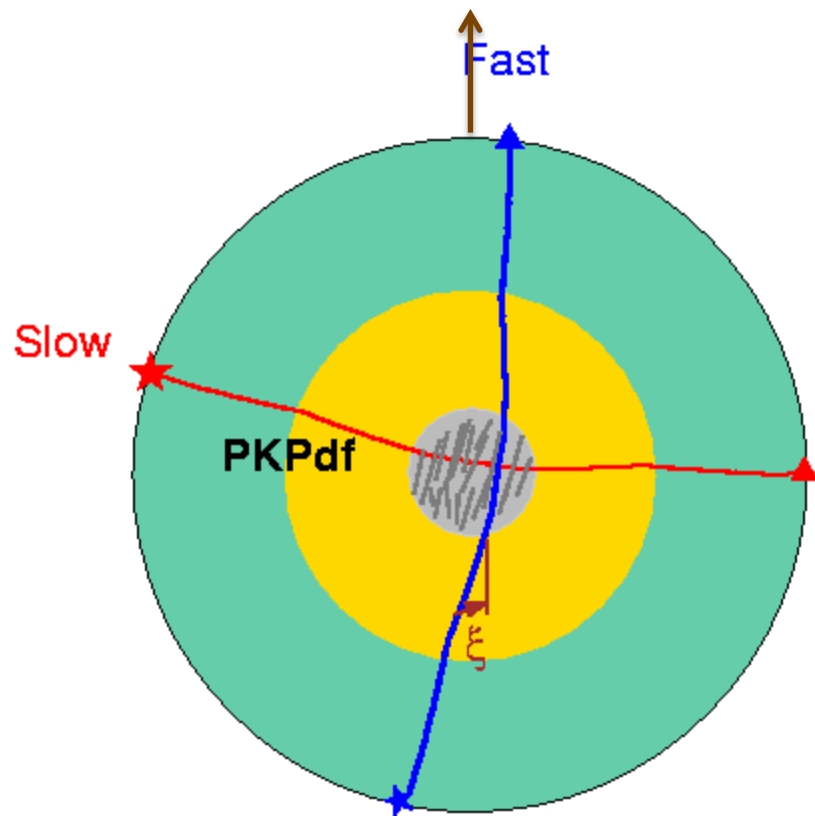
- D'où:

$$V_p = V_{peq} (1 + \varepsilon \cos^2 \xi + \sigma \cos^2 \xi \sin^2 \xi)$$

- Avec:

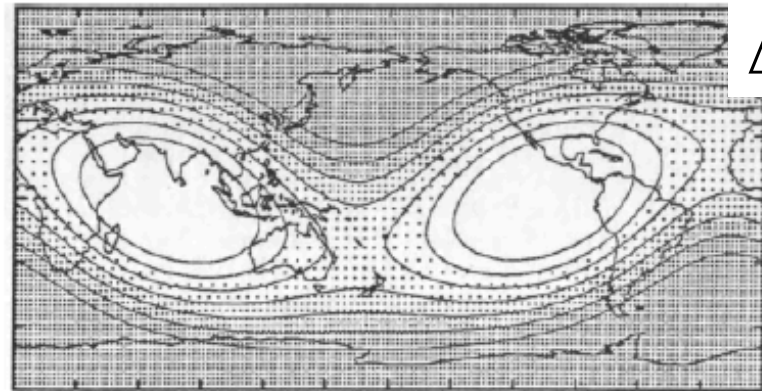
$$V_{peq} = \sqrt{A / \rho}$$



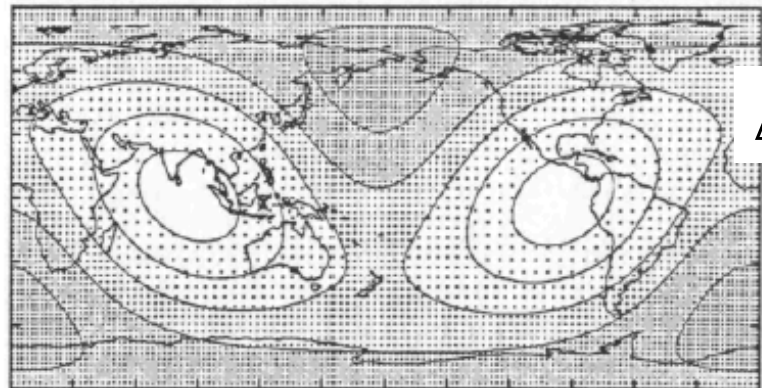


# Hétérogénéité dans la partie Supérieure de la graine

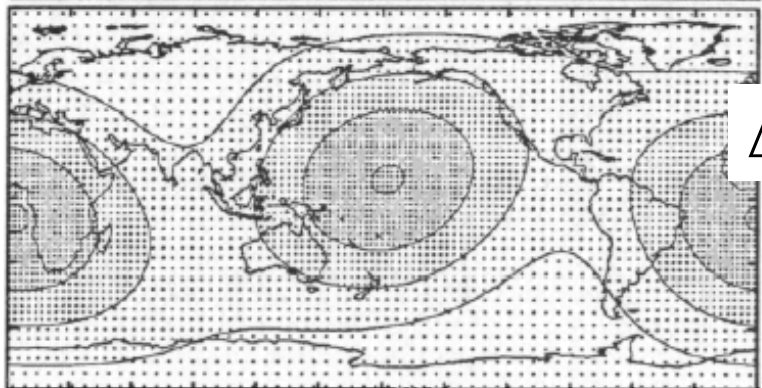
# Après correction pour l'anisotropie dans la graine



$\Delta=170-180^\circ$

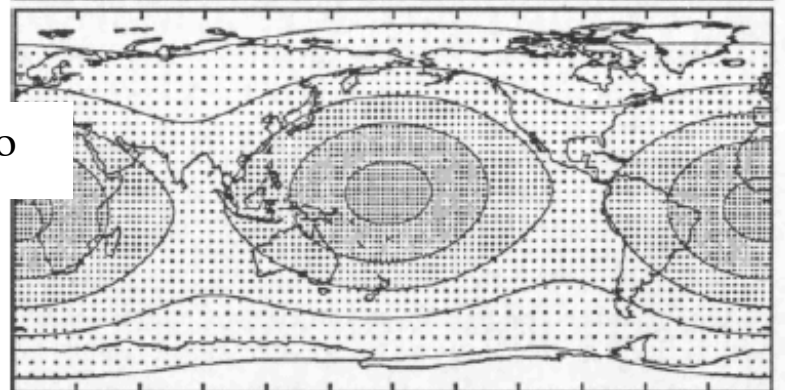
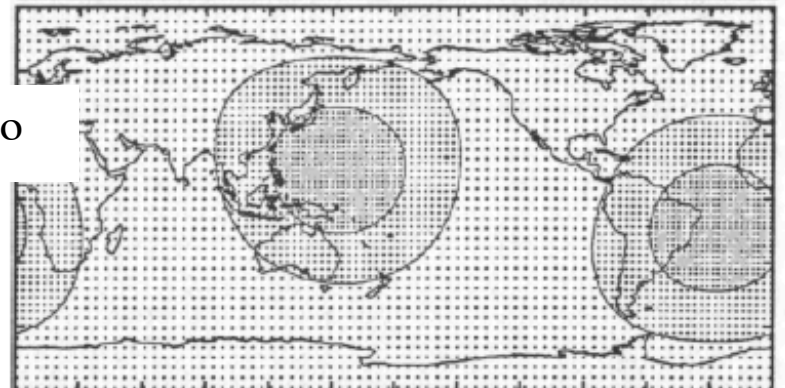
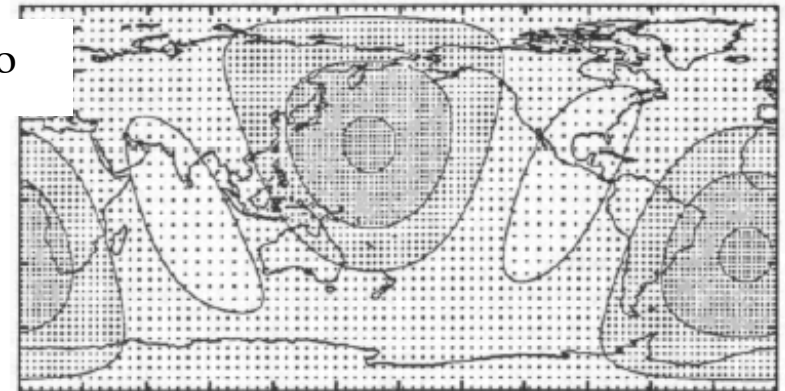


$\Delta=155-170^\circ$



$\Delta=120-135^\circ$

-0.15km/s  +0.15km/s



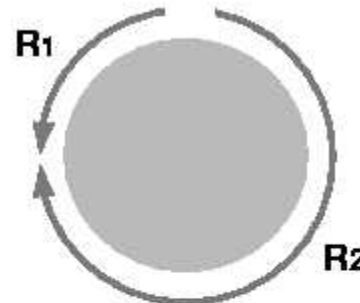
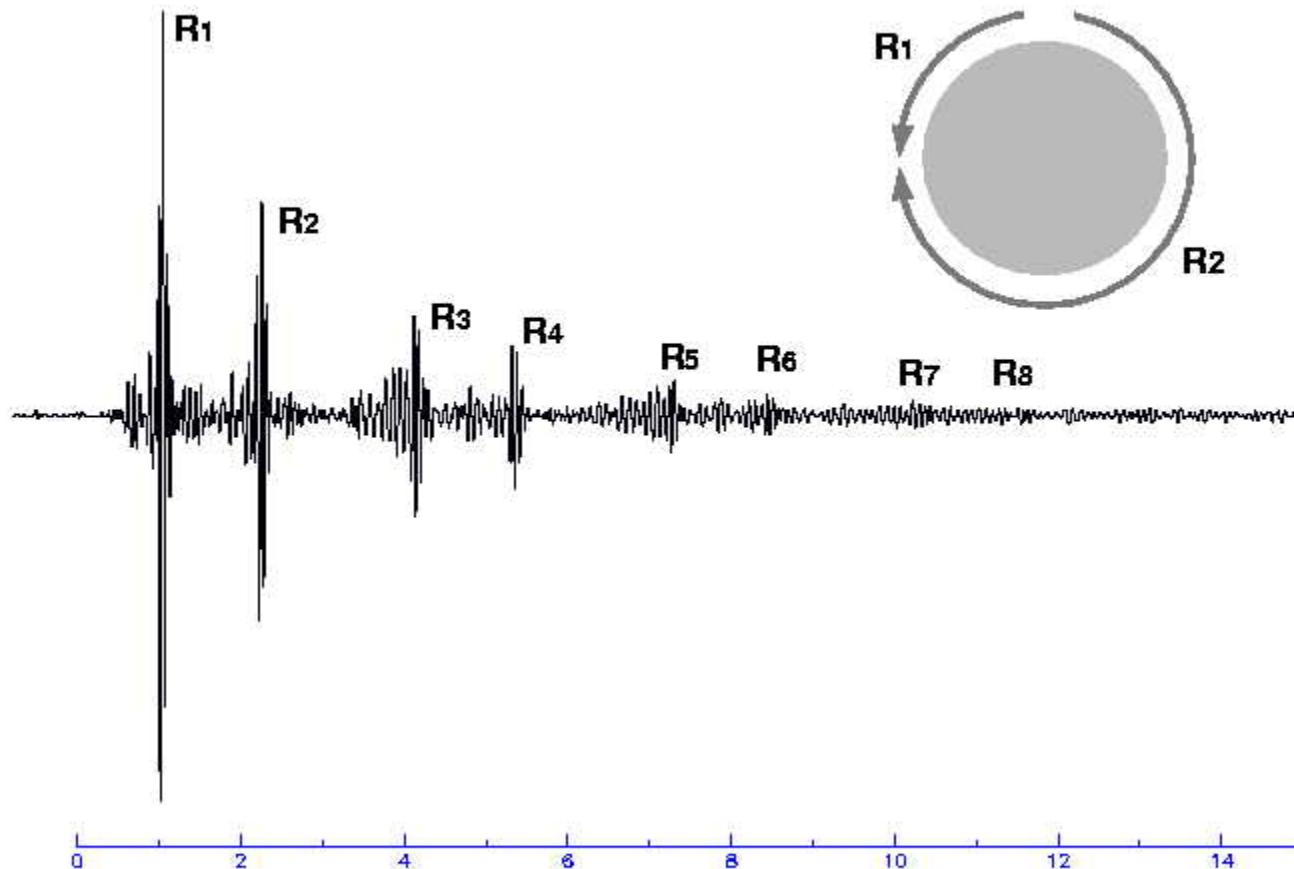
-0.15km/s  +0.15km/s

# Modes propres et structure

# Modes propres et structure

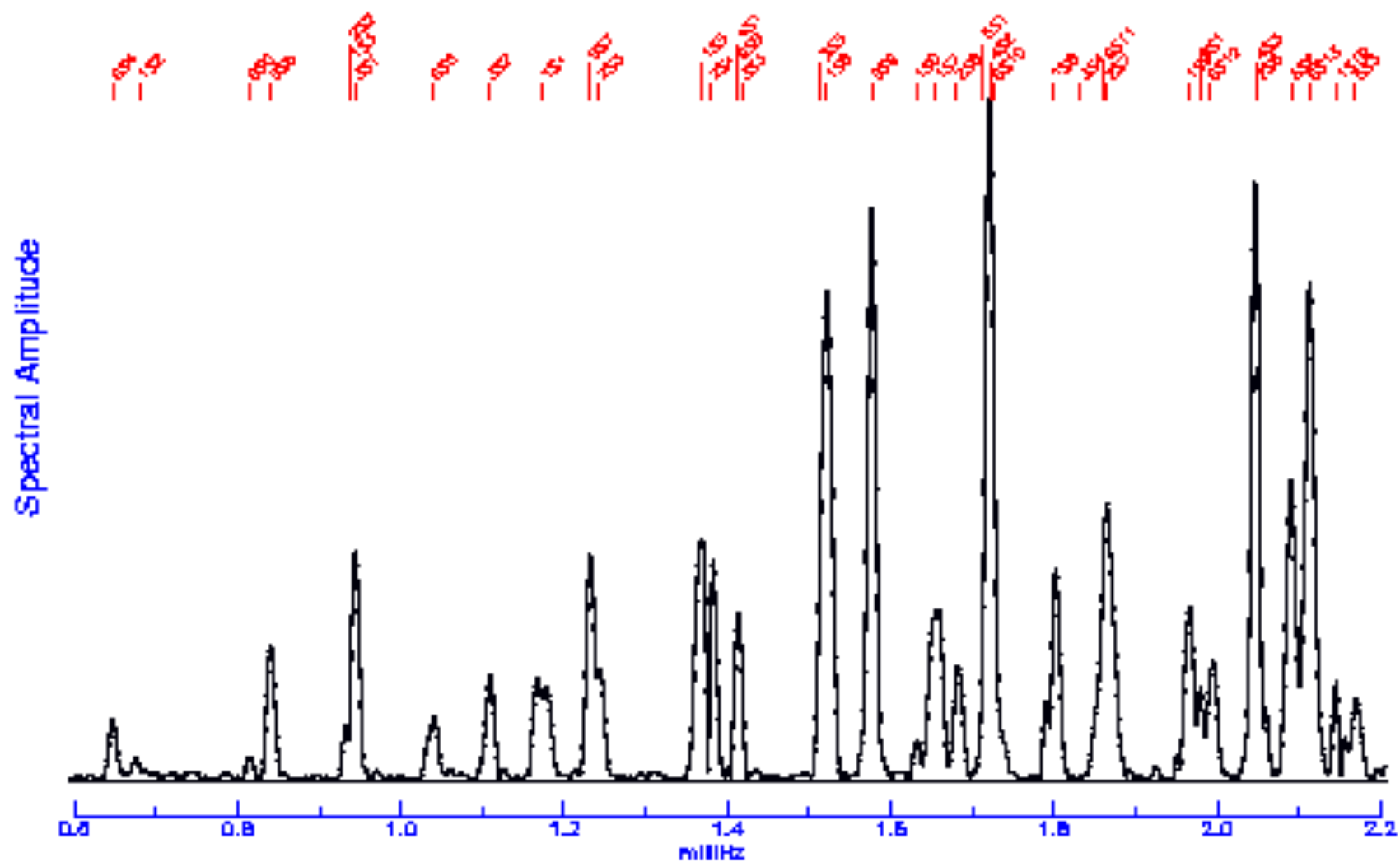
station: CMB  
channel: LHZ

1996/07/11 21:46:39.7 h=15.0km  $\Delta=109.7^\circ$   $\phi=32.3^\circ$   
Burma-China Border Region Mw=6.8



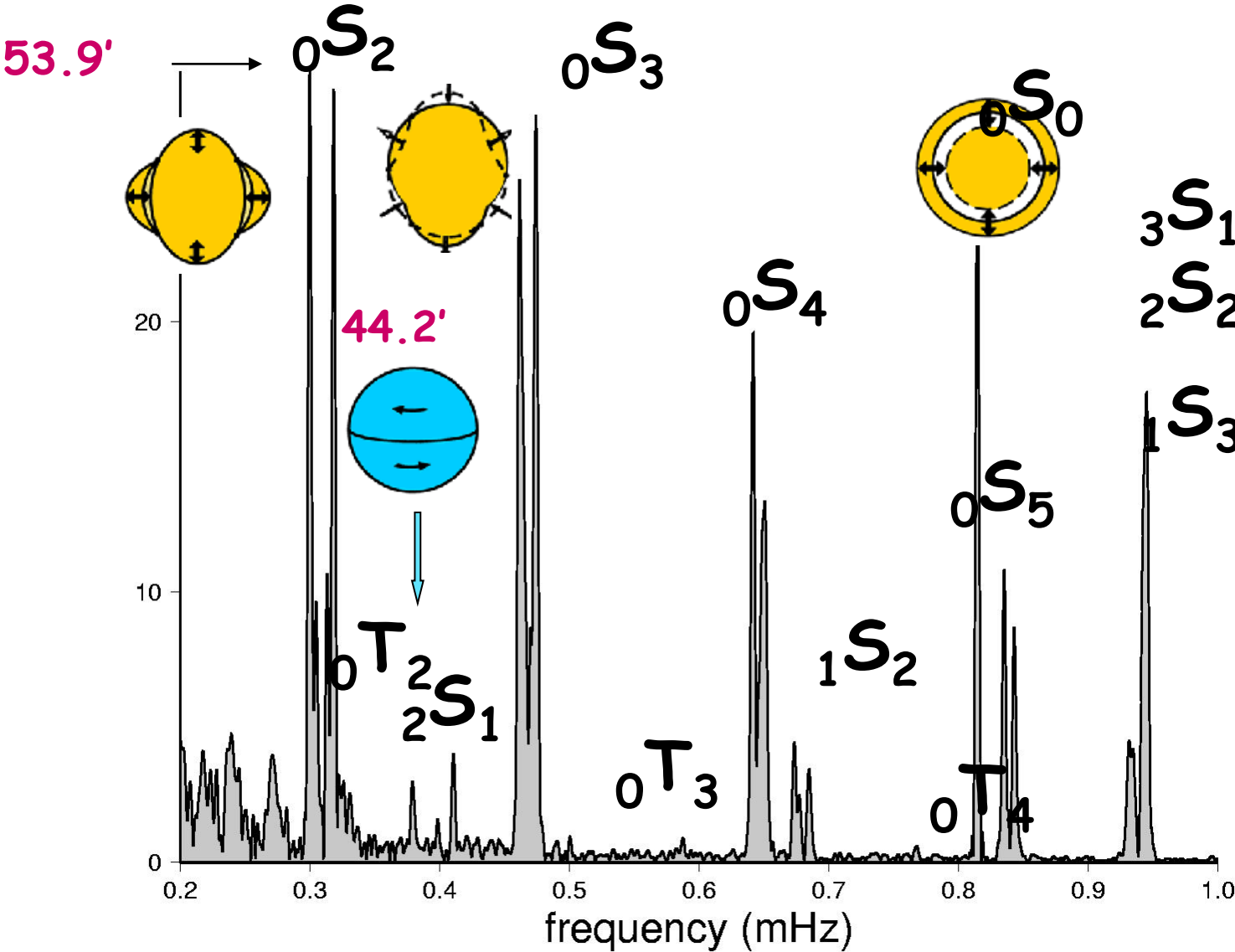
**HOURS**

Bolivia 06/09/94 Mw=8.2 h=647km station: BKS time window: 10.0-60.0 hrs

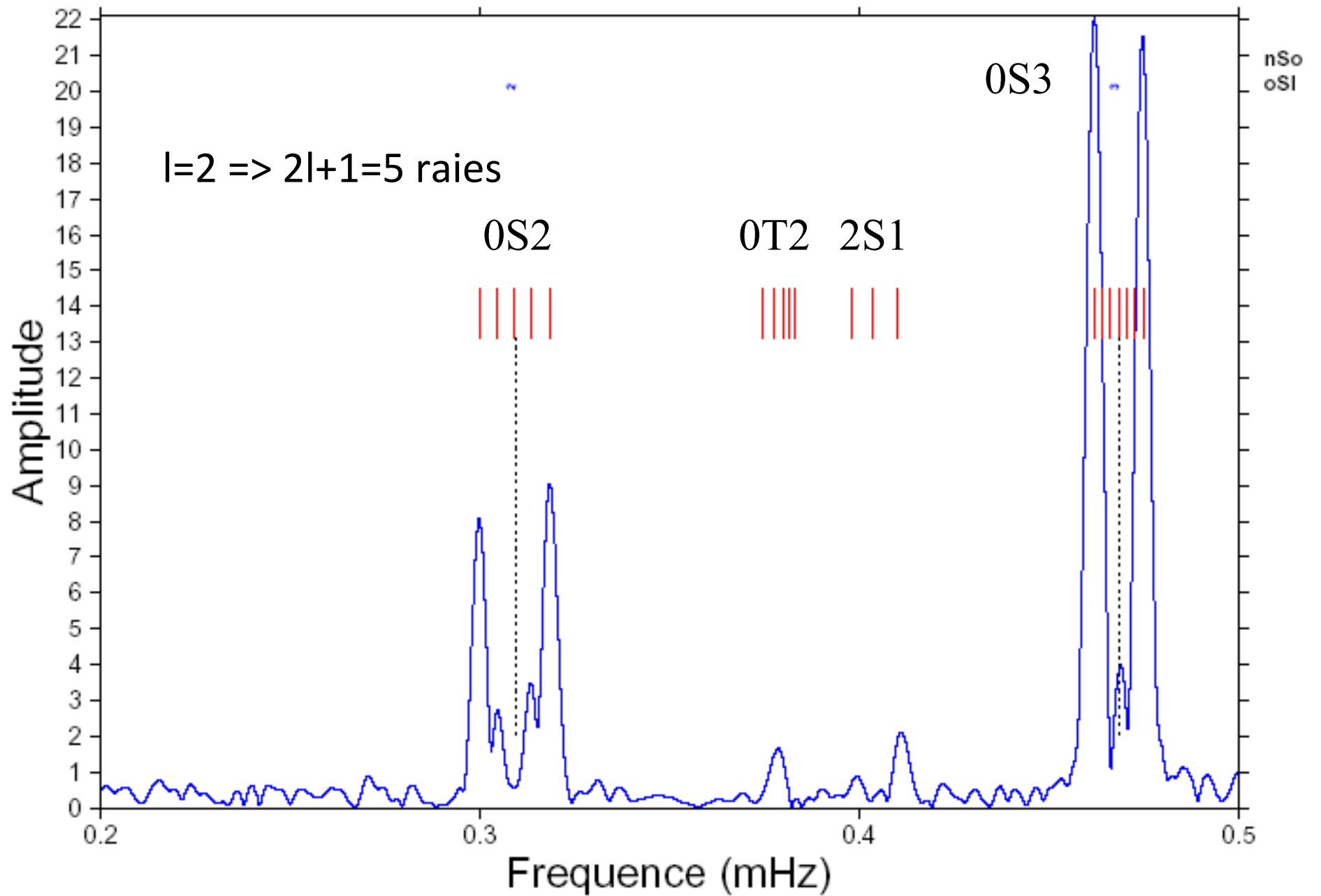


Sumatra 12/26/04 M ~9.3

20.9'  
 $\delta r = 0.05m$

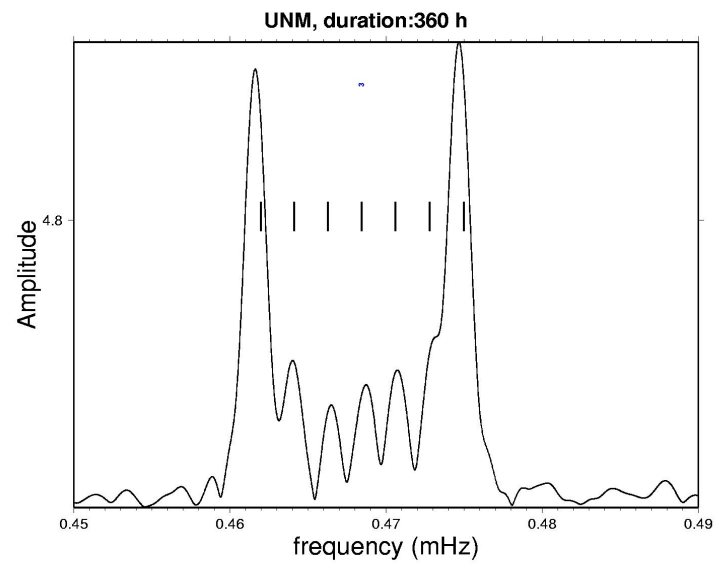
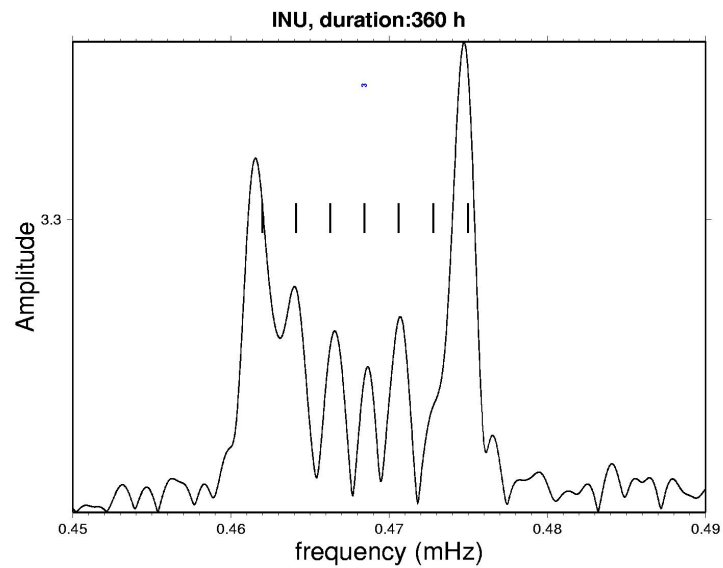
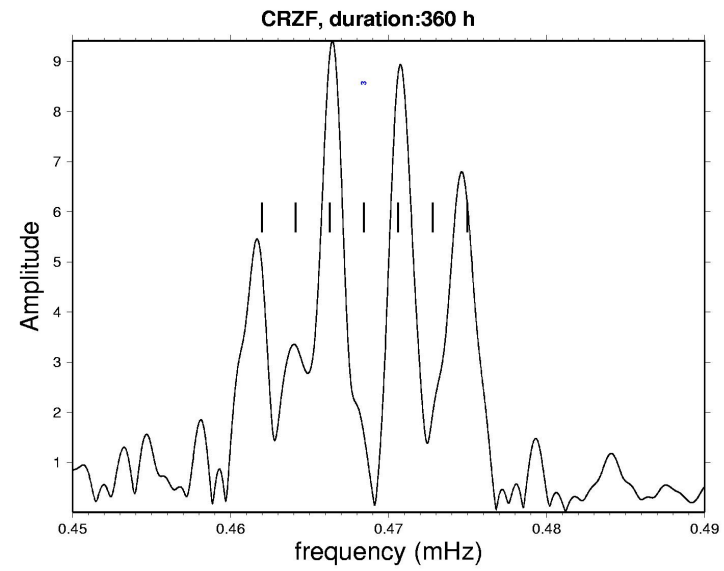
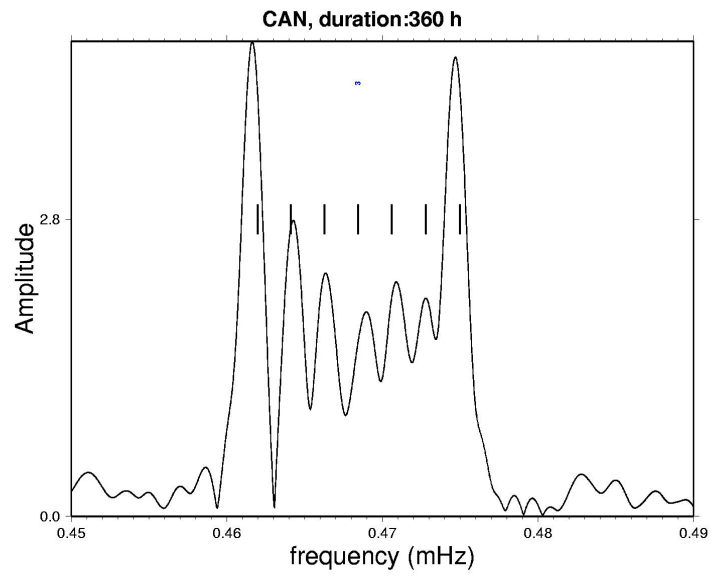


can360.11.vhz, nb d'heures:118 h



mode  ${}_0S_3$

7 singlets

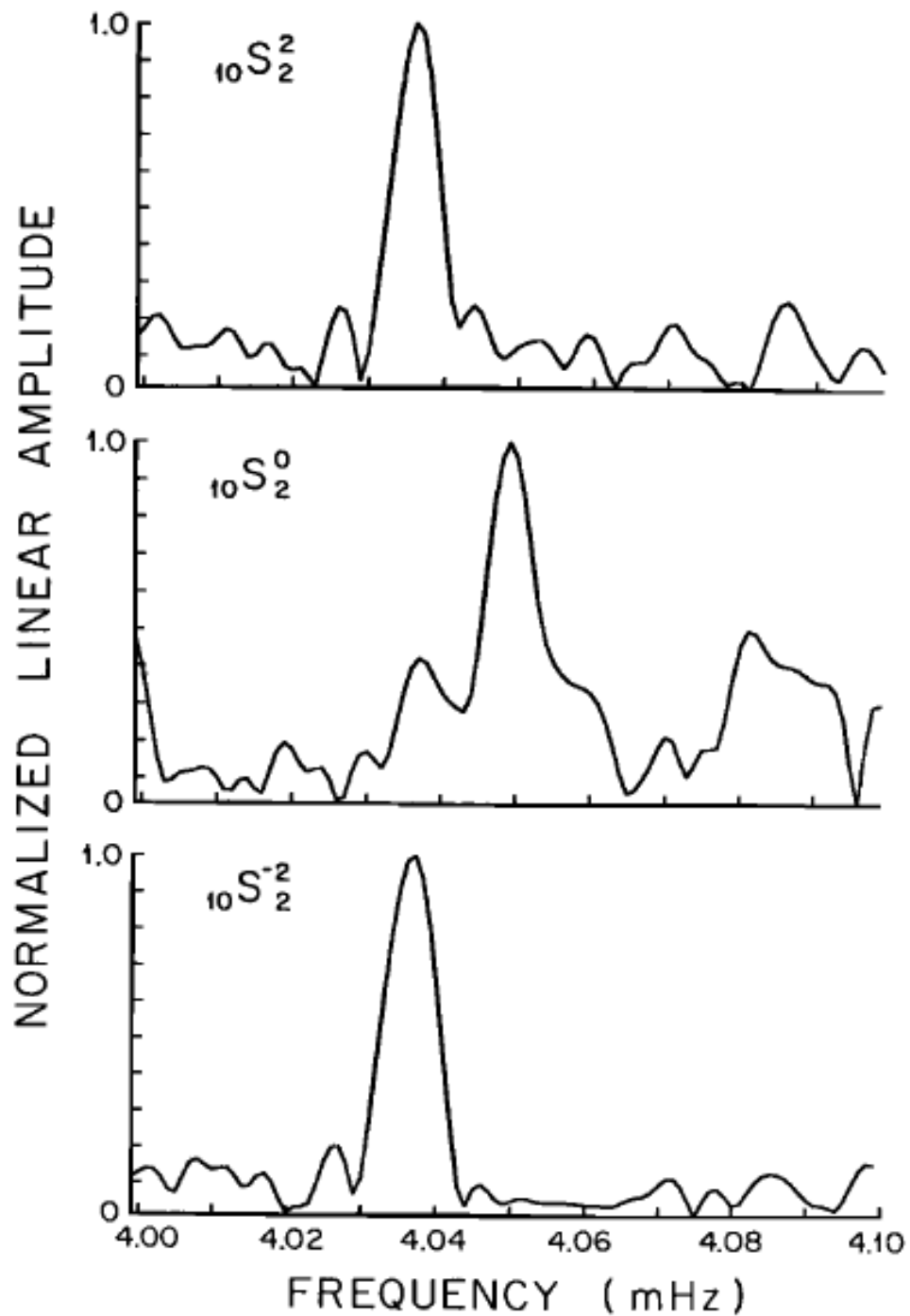


*G. Roult, comm.Person.*



$L=2 \Rightarrow$   
 $M=-2,-1,0,1,2$

Splitting 3 fois  
plus grand que  
Predictions par  
Ellipticite et  
rotation



Mode  $10S_2$   
sensible à  
la structure  
du noyau

*Masters and  
Gilbert, 1981*

# Splitting des modes propres

Théorie des perturbations au 1er ordre (multiplet isolé)  
Pour un mode d'ordre angulaire  $l$ :

$$u(t) = \text{Re} \left\{ \exp(i\omega t) r \cdot \exp(iHt) \cdot s \right\}$$

$$H_{mm'} = \omega_0 \sum_{s=0}^{s=2l} \sum_{t=-s}^{t=+s} \gamma_{ls}^{mm'} c_s^t \quad \text{Matrice de splitting} \\ (2l+1) \times (2l+1)$$

$\gamma$  Coefficient - exprime les lois de sélection

$$c_s^t = \sum_k \left\{ \int_0^a \sum_s \delta m_{st}^k P_k(r) M_s(r) r^2 dr \right\} + \sum_d \delta h_{st}^d H_s^d$$

# Fonctions de splitting

- On recombine les  $C_{st}$  en une fonction sur la sphère:

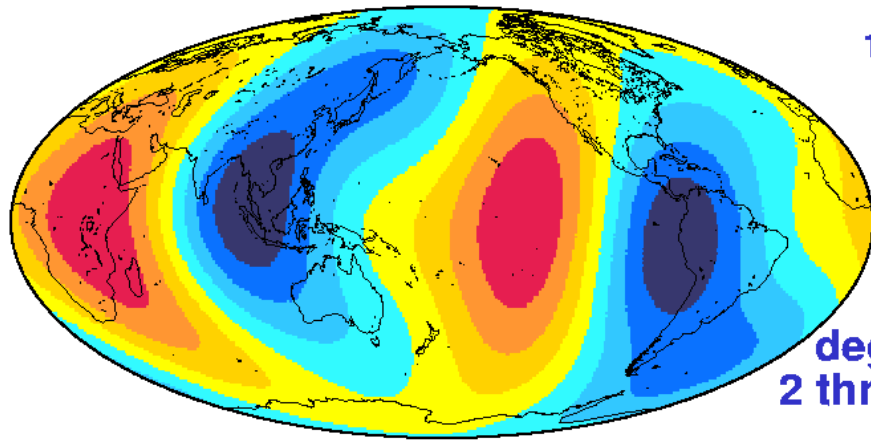
$$-\gamma(\theta, \phi) = \sum c_{st} Y^{st}(\theta, \phi)$$

Cette fonction montre en chaque point de la terre, l'effet intégré de la structure sur la profondeur, pondéré par les noyaux correspondant aux différents paramètres élastiques

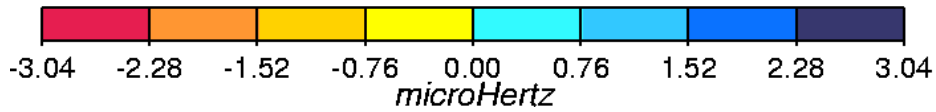
even-degree normal mode splitting function

*Generalized Spectral Fitting Estimate*

$1S_4$



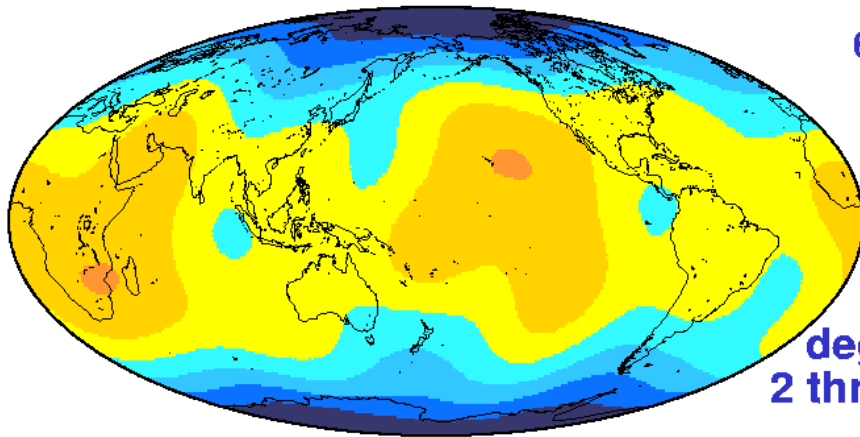
degrees  
2 through 4



even-degree normal mode splitting function

*Generalized Spectral Fitting Estimate*

$6S_3$



degrees  
2 through 6

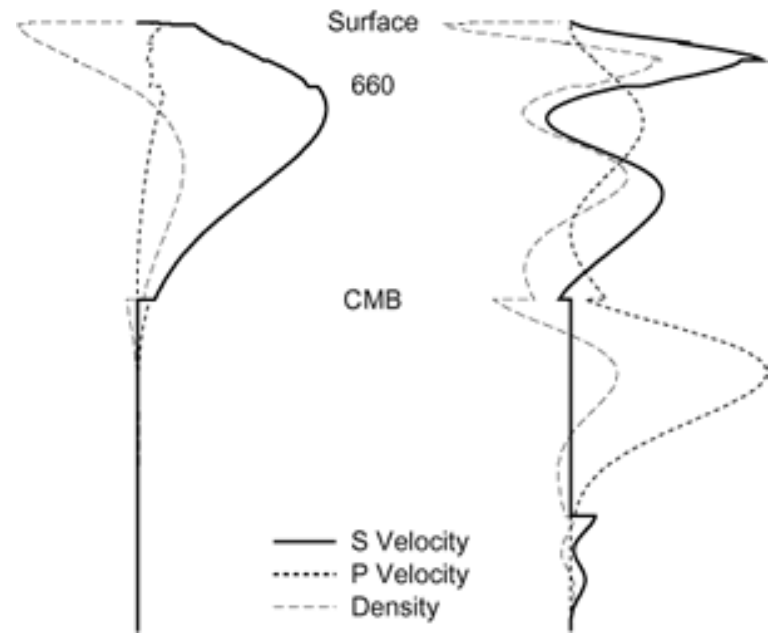


Mantle mode



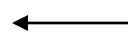
$1S_4$

$6S_3$

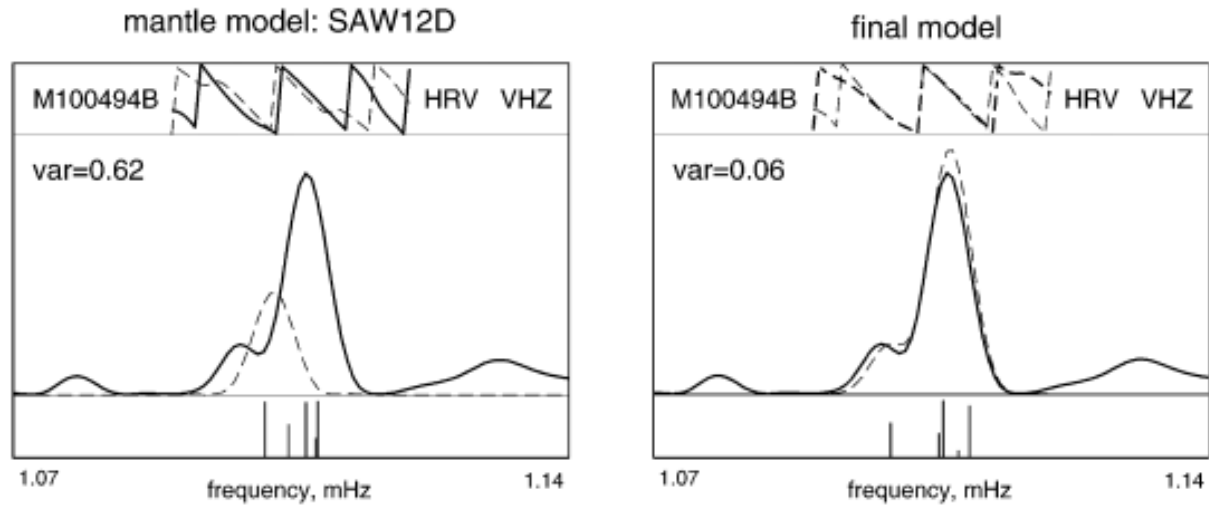


— S Velocity  
..... P Velocity  
- - - Density

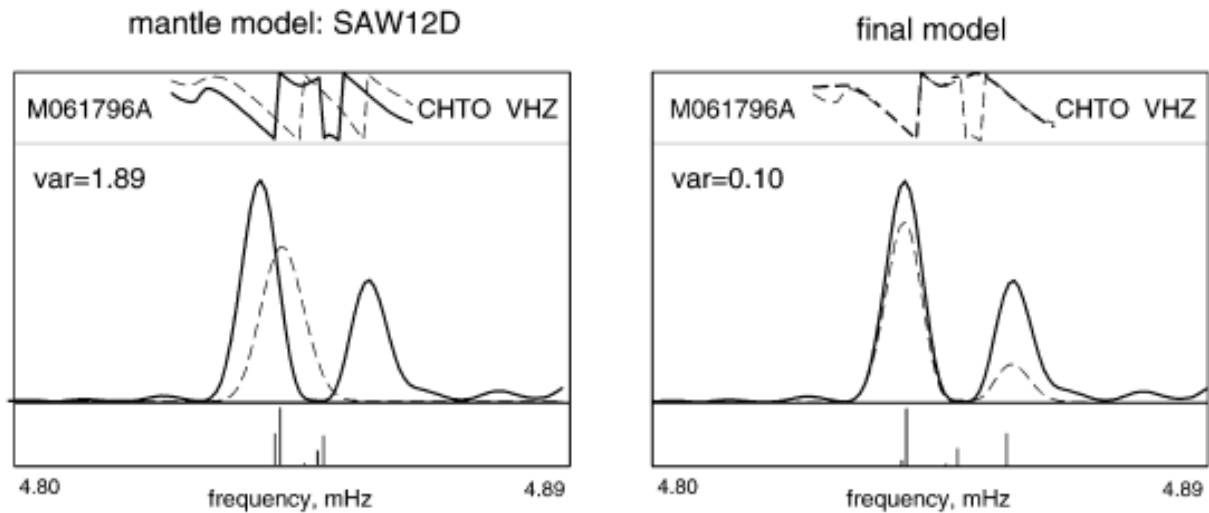
Core mode



### mode 3 S 2



### mode 13 S 2

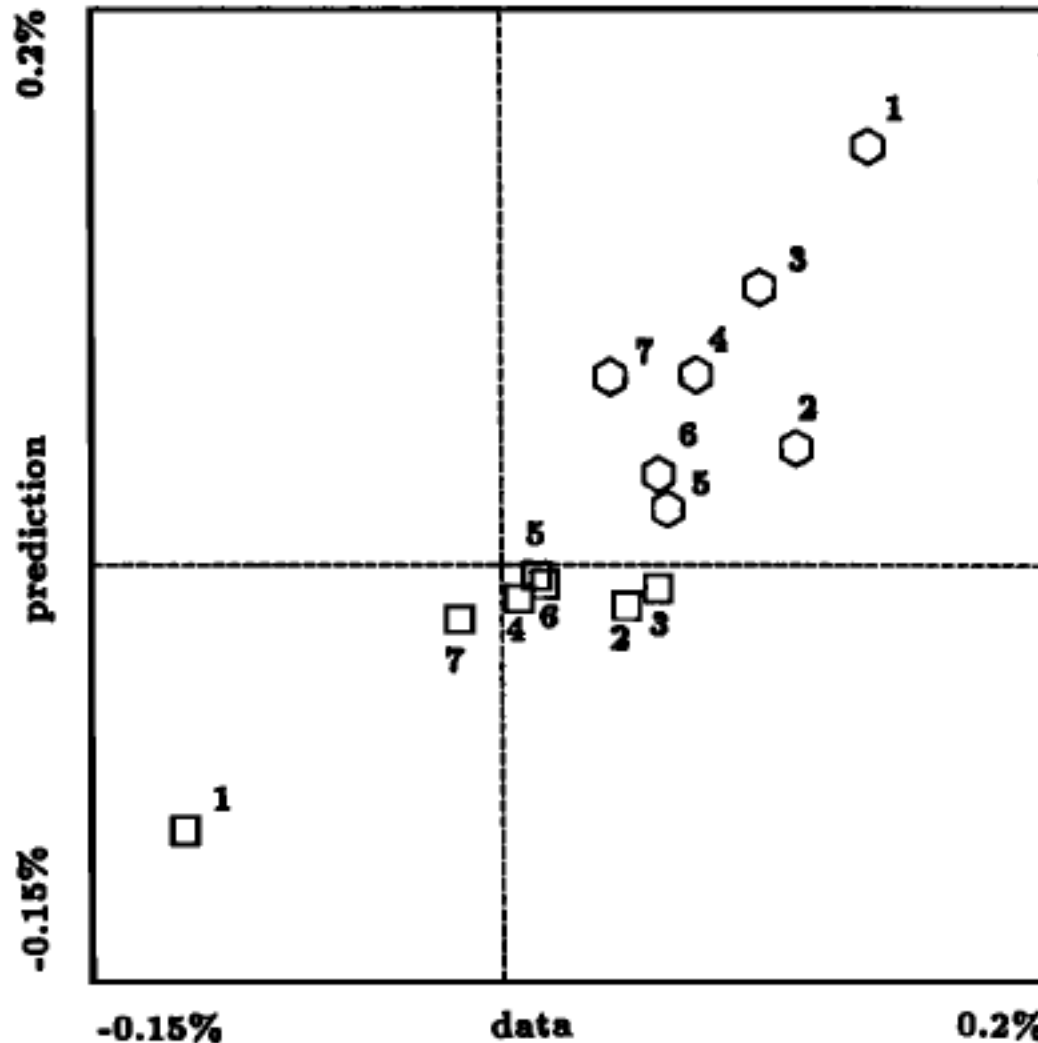


Anomalous splitting of core modes 3S2 and 13S2

# Splitting "anormal" des modes propres

- Ritzwoller et al. (1986)
  - Anomalie de densité de 0.3% dans le noyau externe en C20 et de 0.5% à la base du manteau
- Giardini et al. (1986)
  - Anomalies seulement dans le manteau conduisent à un C20 beaucoup trop grand pour expliquer les modes du manteau.
- Woodhouse et al. (1986) : L'hétérogénéité doit être dans la graine:
  - Mais implique une topographie de ~20km à l'ICB

# Splitting observé/calculé pour un ensemble de modes du noyau



Dépendance  
 Radiale de  
 L'anisotropie  
 En  $r^2$ :  
 Différences de  
 Temps de  
 Propagation PKIKP  
 Polaires/equatoriaux  
 Prédites par ce  
 Modèle:  $\sim 4$  s

are indicated by numerals: 1:  ${}_3S_2$ ; 2:  ${}_6S_3$ ; 3:  ${}_{13}S_2$ ; 4:  ${}_{13}S_3$ ; 5:  ${}_{11}S_5$ ; 6:  ${}_{11}S_4$ ; 7:  ${}_9S_3$ . Fig. 3a is for harmonic

*Woodhouse et al., 1986*

# Anisotropie dans la graine:

"it is plausible that the process of inner core crystalization, in the presence of fluid motions, electric currents and electromagnetic fields - all coupled to each other and to the Earth's rotation - could result in a systematic orientation of crystals and thus to bulk anisotropy bearing a relation to the Earth's rotation" (*Woodhouse et al., 1986*)

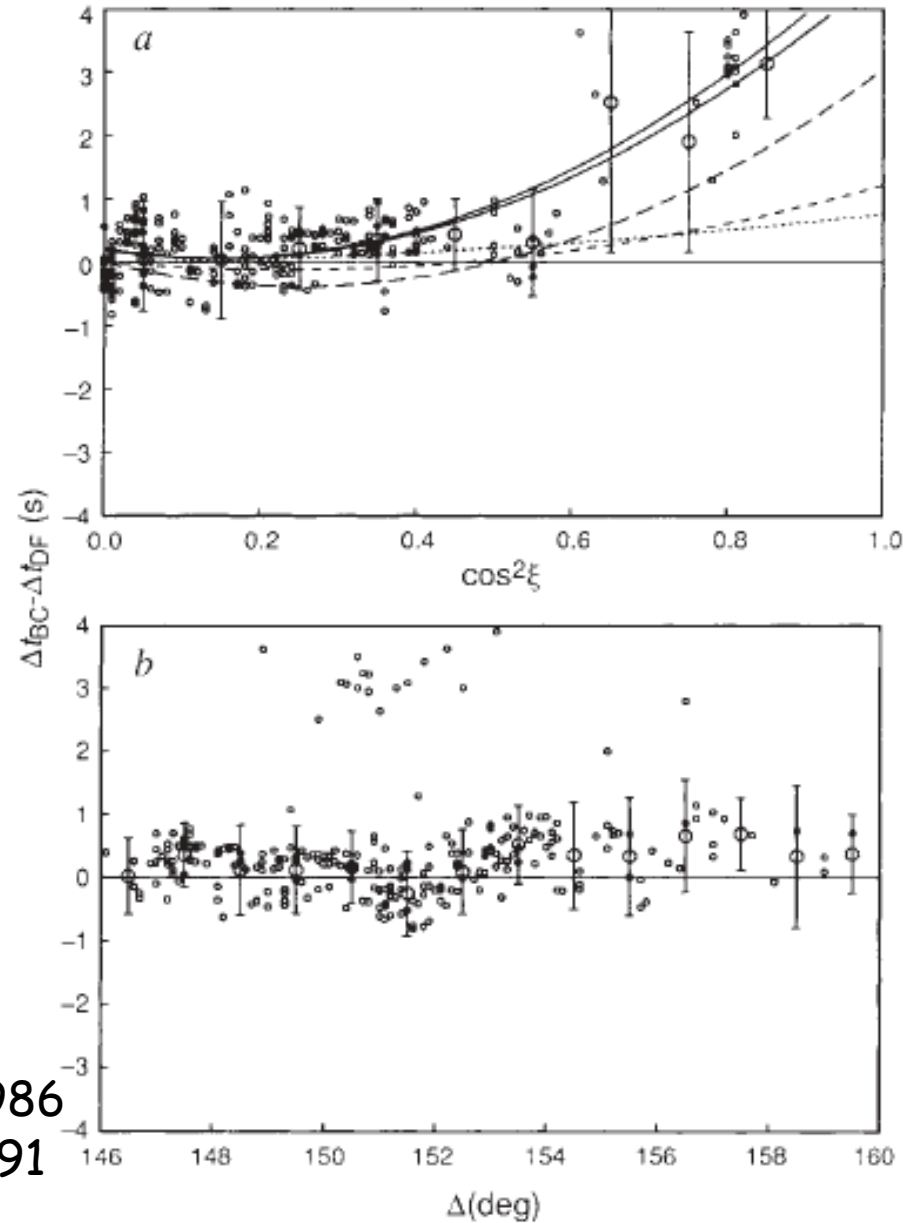


# Causes possibles de l'anisotropie dans la graine

- Convection dans la graine
  - Jeanloz and Wenk, 1988; Wenk et al., 2000
  - Sources de chaleur? (présence de K?)
- Croissance anisotrope de la graine (contraintes de déformation)
  - Yoshida et al., 1996
- Alignement des cristaux de fer au moment de la cristallisation en présence du champ magnétique (contraintes de Maxwell)
  - Karato, 1999; Buffett and Wenk, 2001.
- Texture acquise au moment de la cristallisation
  - Bergman, 1997

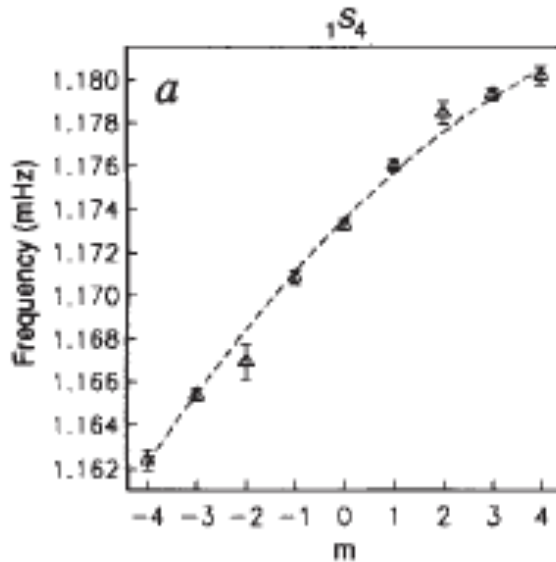
# 1 - Amplitude de l'anisotropie 3 fois plus grande que initialement

— Present study

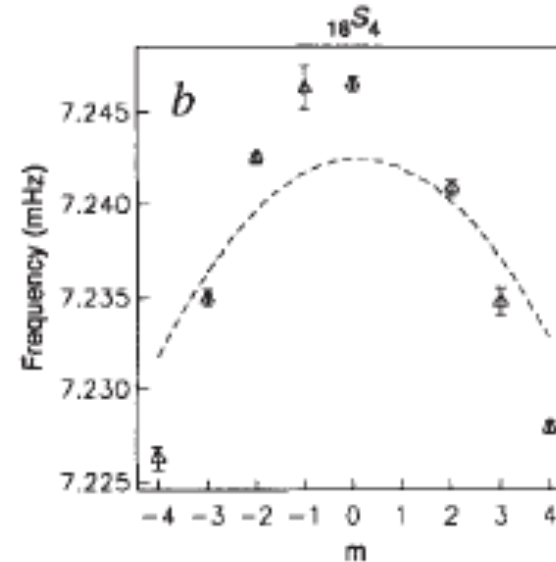


Lignes pointillées:  
Morelli and Dziewonski, 1986  
Shearer and Toy 1988, 1991

## Mode du manteau



## Mode du noyau

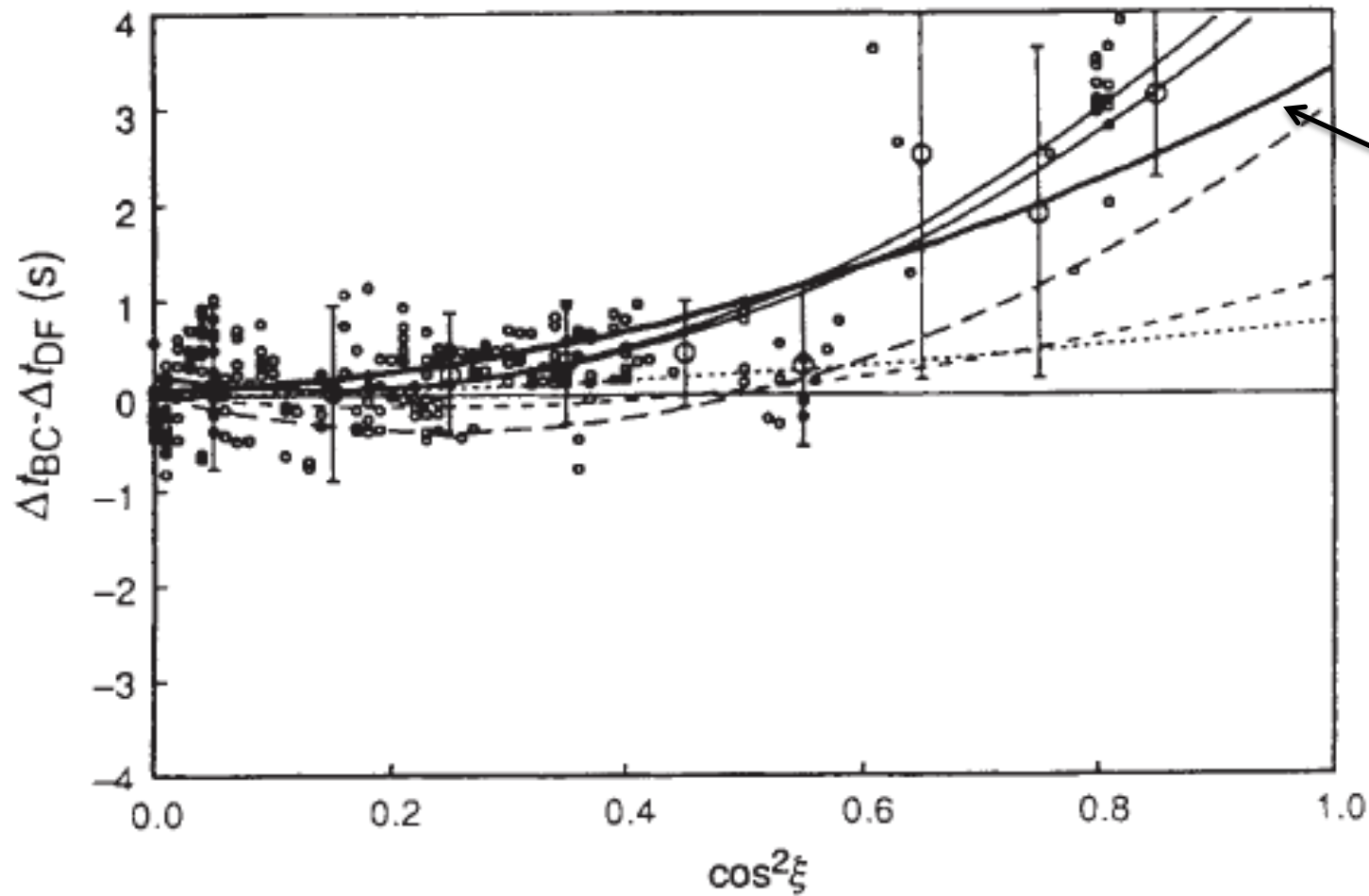


Forme du splitting du à l'ellipticité et la rotation:

$$\omega^m = \omega_c(1 + bm + cm^2)$$

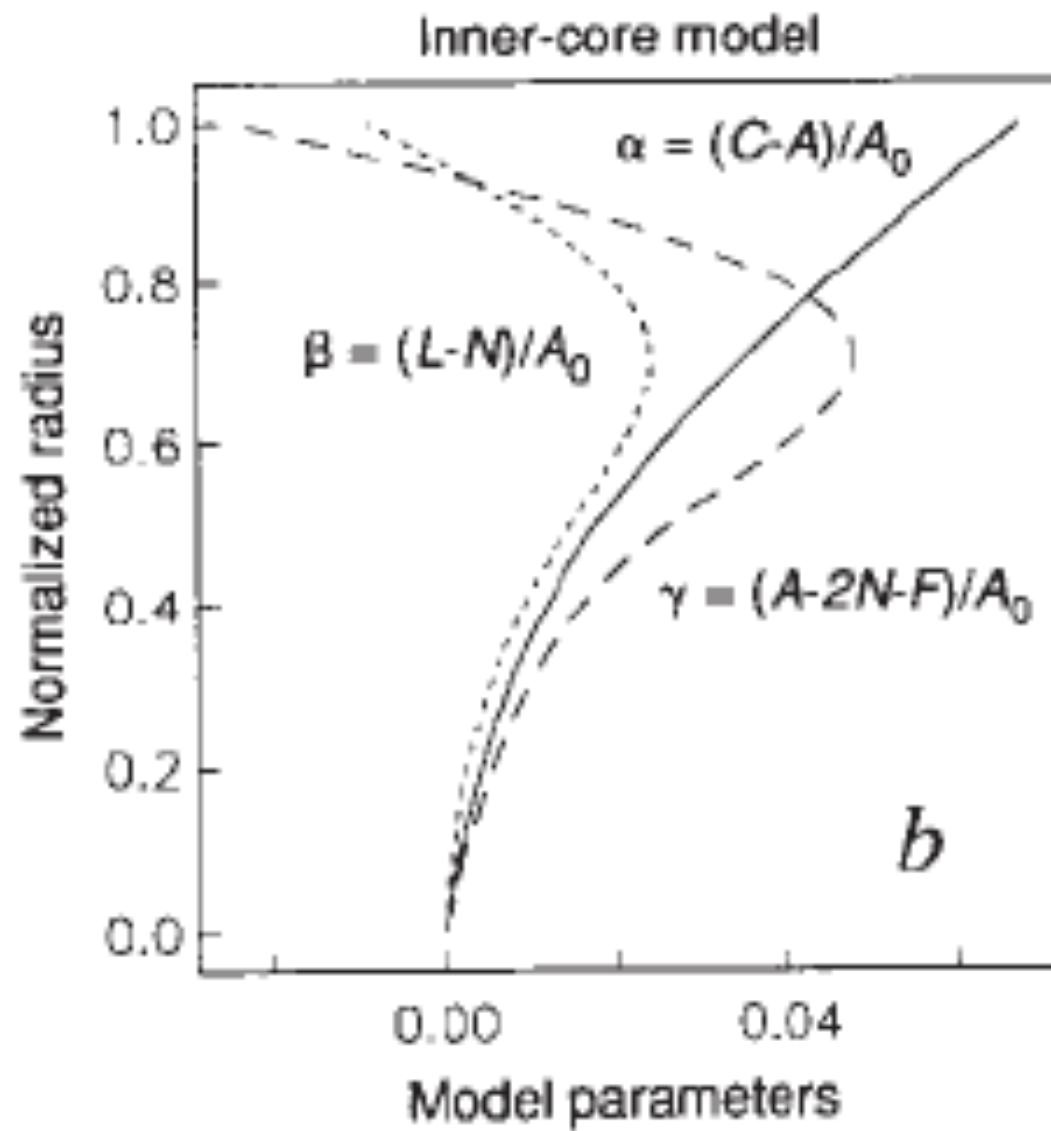
$b$  = effet de la rotation  
 $c$  = effet de l'ellipticité plus 2e ordre de la rotation

Où  $m$  est l'indice du "singlet"



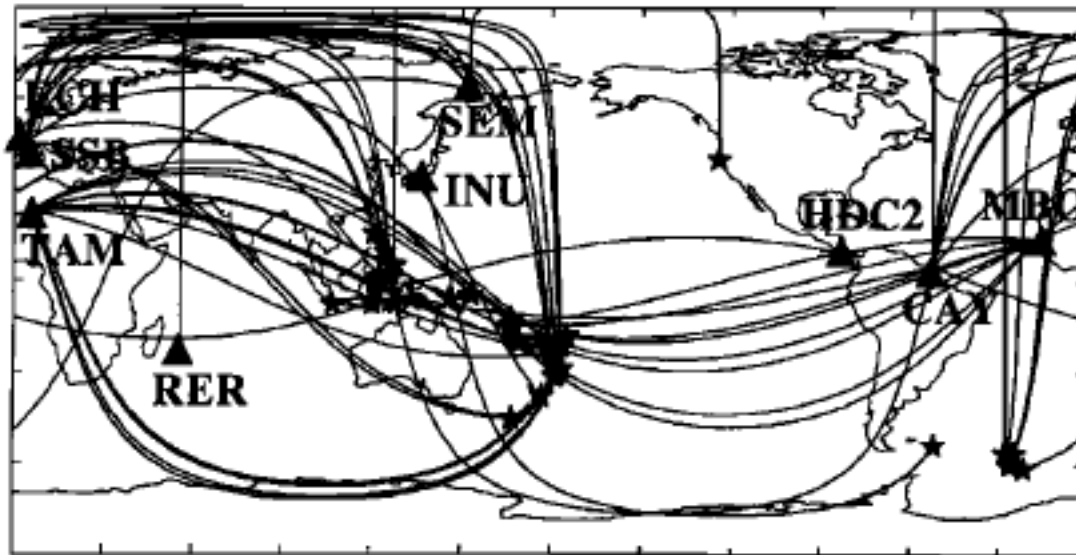
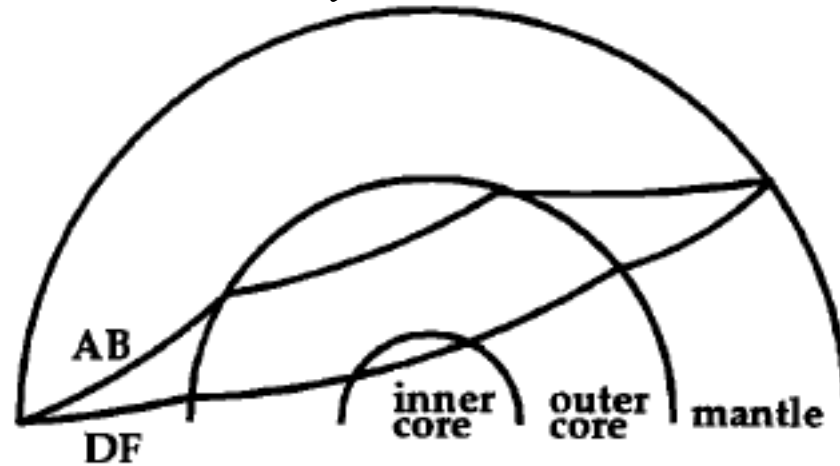
Tromp, 1993

Données de Creager (1992)  
Prédictions calculées à  $\Delta=150^\circ$ ,  
Profondeur de la source = 0 km

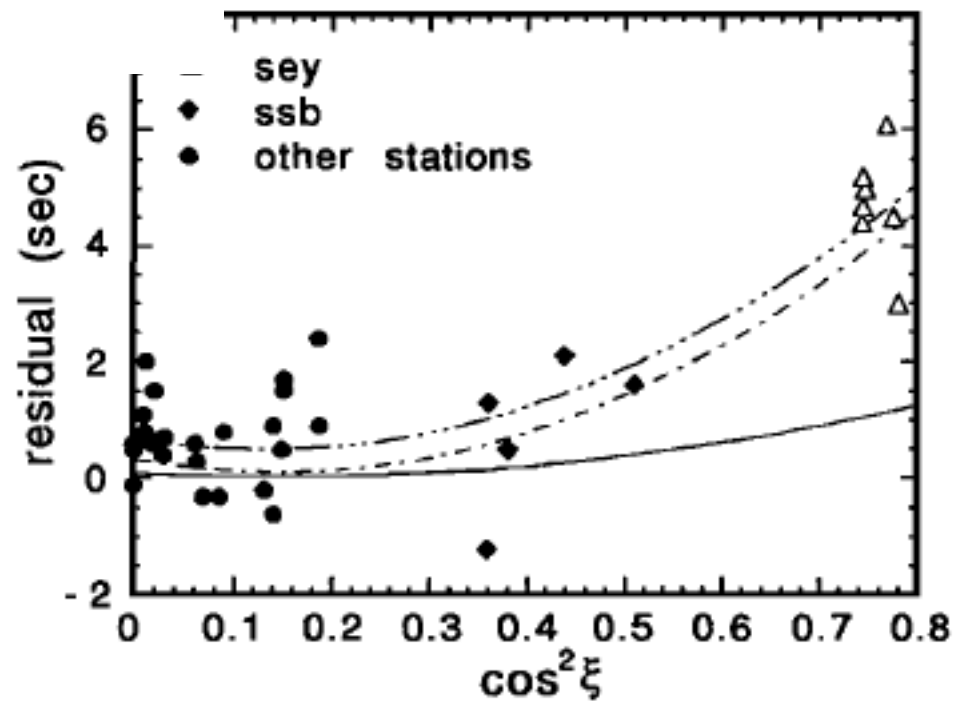
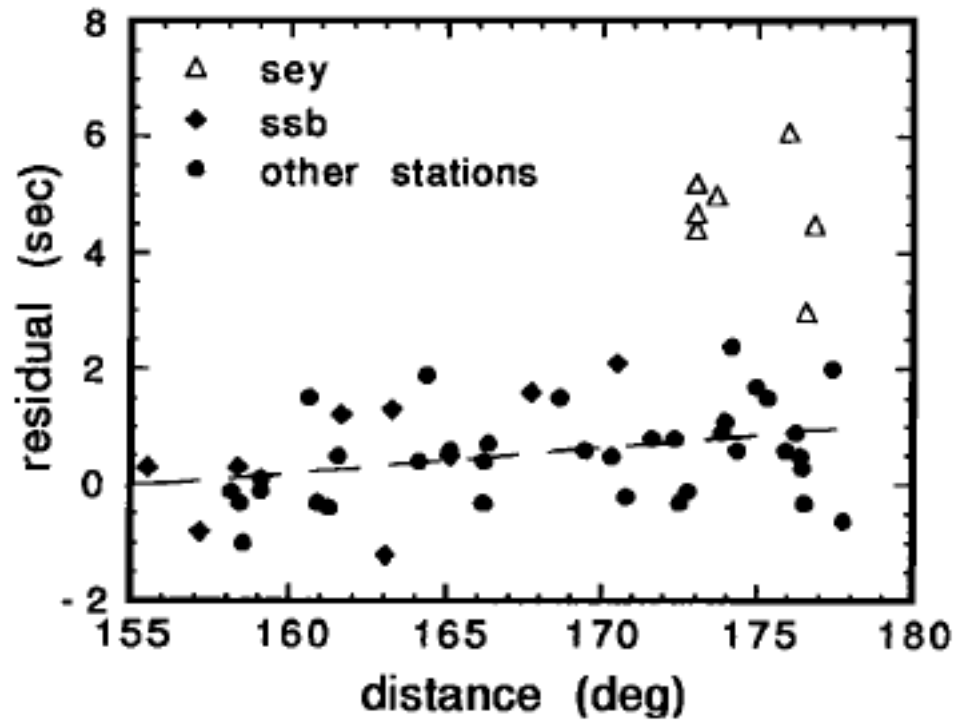


*Tromp, 1993*

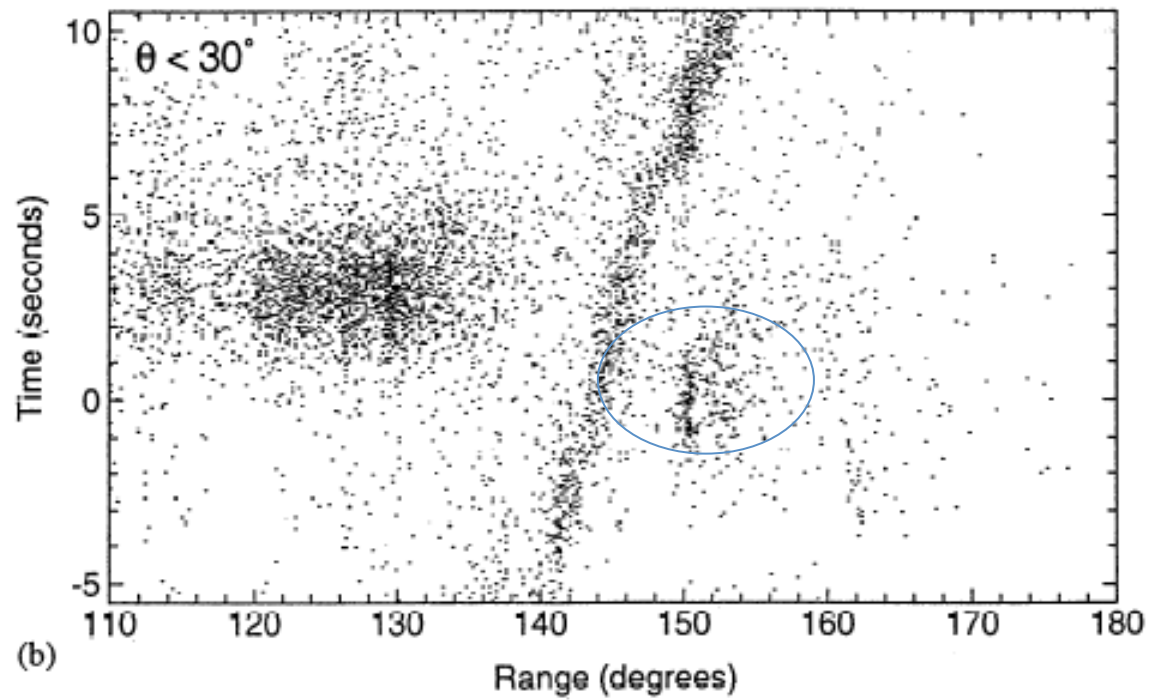
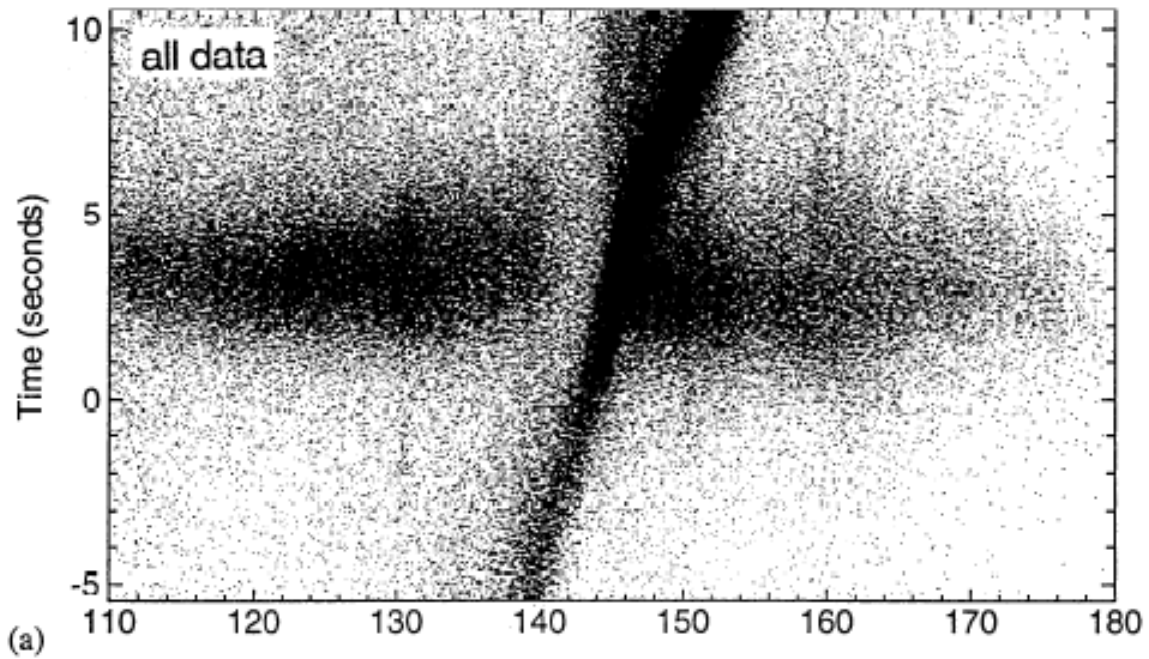
## 2-Anisotropie forte dans toute la graine: 3.5% (modèle constant)



Vinnik, Romanowicz  
And Bréger, 1994



Vinnik et al., 1994



Anomalies  
de l'ordre  
de 5 s:  
Anisotropie  
de  $\sim 3\%$  est  
nécessaire  
pour les  
expliquer

*Shearer,  
1994*