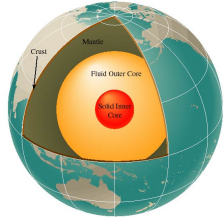
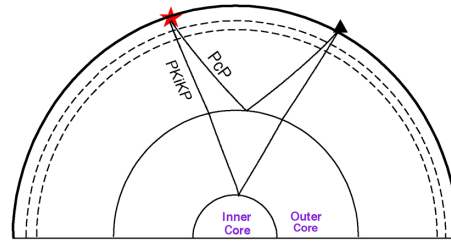


### Le noyau de la terre: 3- ICB et PKJKP

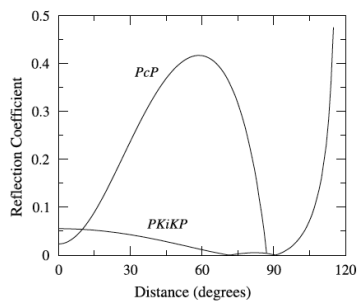


Barbara Romanowicz - Cours 2011  
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre  
Collège de France  
24 Octobre 2011

### Ondes réfléchies sur la CMB et l'ICB

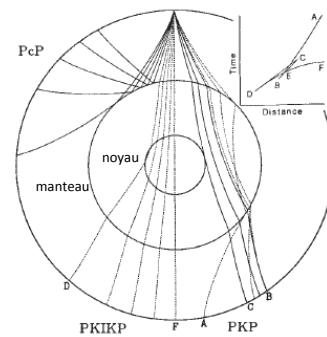


### Coefficients de réflexion à la CMB et à l'ICB



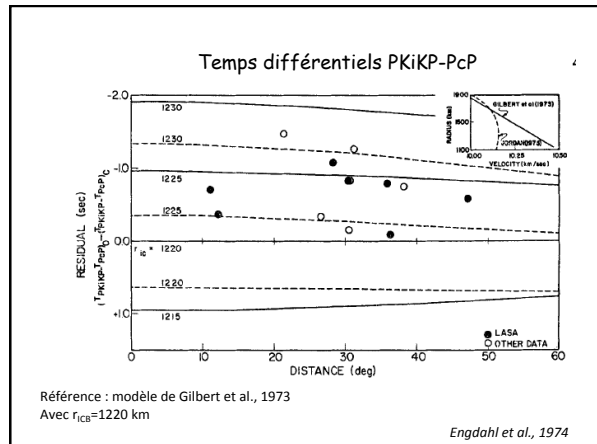
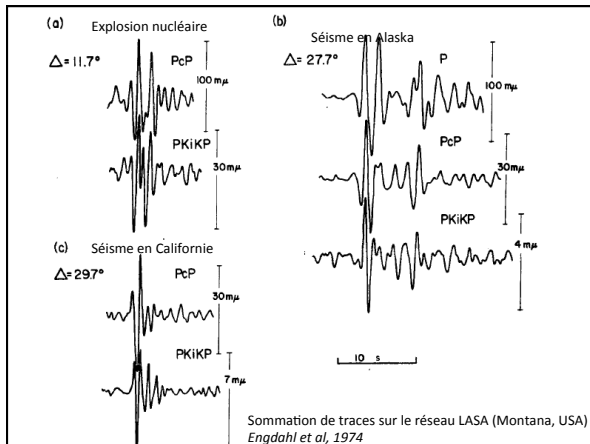
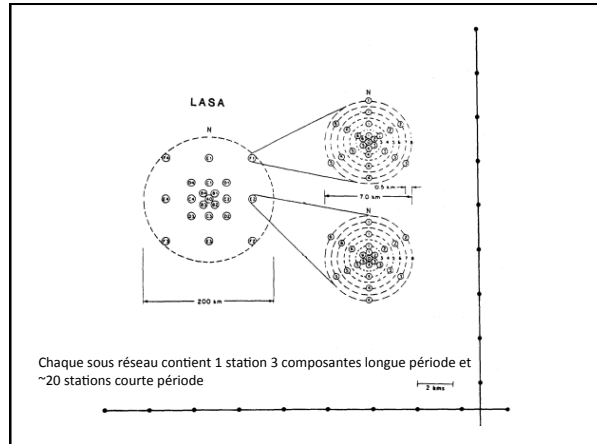
Modèle: PREM, h=0km

Koper et al., 2003



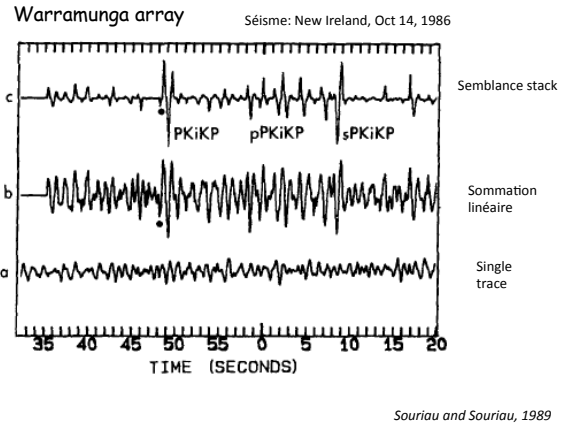
## Rayon de la graine

- 1) Temps de propagation des ondes PKP(DF) (1940...)
- Nécessite une bonne connaissance de la structure moyenne en  $V_p$  du manteau et du noyau liquide
- Mesure précise possible lorsqu'on a eu les premiers bons modèles radiaux de structure élastique basés sur la somme de (e.g. Gilbert et al., 1973) :
  - Fréquences de modes propres +
  - Temps de propagation des ondes du manteau et du noyau
  - Masse et moment d'inertie
- Avec l'hypothèse d'une connaissance précise du rayon de la CMB, Engdahl et al. (1974), mesures de  $t(PKiKP-PcP)$  :
  - $R_{icb} = 1220-1230$  km
  - L'ICB est une discontinuité de premier ordre
- PREM: 1221.5 km
- AK135: 1217.5 km



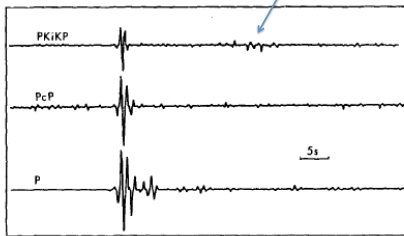
### Ellipticité de la graine -

- Jusque là seules quelques données de PKiKP/PcP, toutes à relativement hautes latitudes.
- Souriau and Souriau, 1989:
  - utilisent le réseau de Warramunga (Australie) pour estimer l'ellipticité et le rayon moyen de l'ICB.
- Temps différentiels PKiKP-PcP
  - Séismes avec radiation forte vers le bas
  - Distances (20-45°) < distance critique (PKiKP) de 110°
  - PKiKP ~1Hz (caché dans la coda de phases du manteau (ScS, SS))
  - Sommation de traces



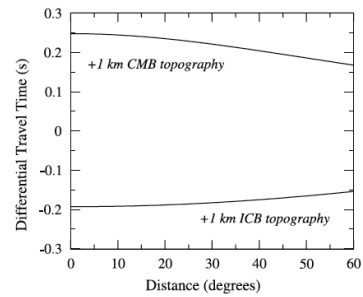
Loyalty, August 23, 1981

Stratification sous l'ICB?

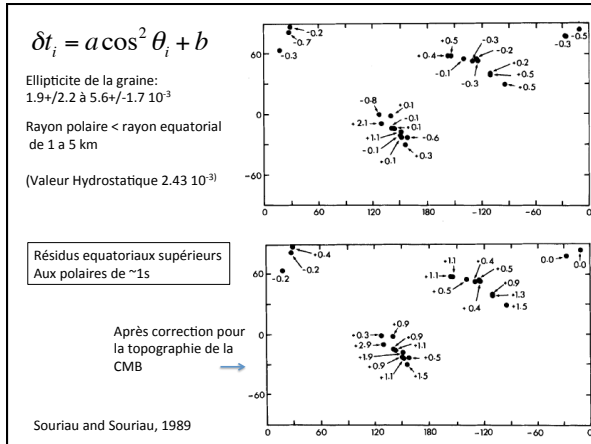


Souriau and Souriau, 1989

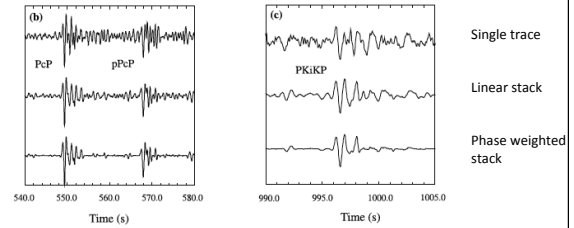
### Noyaux de sensibilité à la topographie



Koper et al., 2003

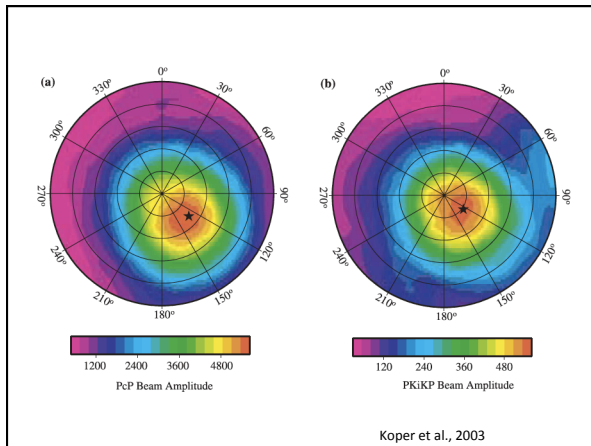


Plus récemment:  
 Données de réseaux régionaux de l'IMS et sommation de traces  
 302 mesures de temps différentiels PKiKP-PcP



Exemple pour le réseau PDAR (IMS - Pinedale, Wyoming, USA)  
 Source à 32.3 deg; mb 5.3

Koper et al., 2003

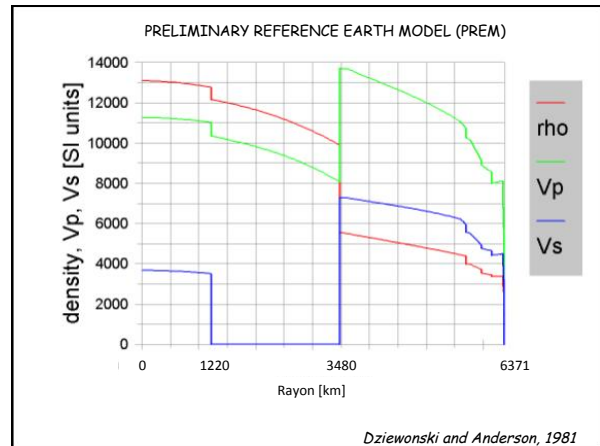


### Conclusions (Koper et al., 2003):

- La plupart des anomalies s'expliquent par l'ellipticité et les variations latérales dans le manteau.
- Topographie de la CMB < 3 km
  - Maintenu dynamiquement par la structure dans la D'' (et non le manteau entier)
  - Ondulations de 200 km de la D'' => 2.5 km de topographie, compatible avec les estimations
- En l'absence de topographies:
  - hétérogénéités dans le noyau externe de  $\sim 0.5-1\%$

## Conclusions sur la graine

- Observation de PKiKP à incidence quasi-verticale → épaisseur de l'ICB < 5 km.
- Absence d'observations PKiKP vérifiées entre 60 and 90° de distance, est en accord avec une épaisseur de l'ICB de moins de 3 km. *Koper et al., 2003*
- Topographie de l'ICB doit être faible:
  - Point de fusion du fer
  - Faible viscosité de la graine ( $10^{13}$ - $10^{19}$  Pa-s)



## Contraintes sur le saut de densité à l'ICB

- Le saut de densité à l'ICB ( $\Delta\rho_{ic}$ ) est une contrainte importante sur la dynamique et l'histoire du noyau et de la graine.
  - Énergie gravitationnelle libérée pendant la croissance de la graine → moteur de la dynamo
    - Saut plus grand ⇒ dynamo maintenue avec une vitesse de croissance de la graine plus lente
  - → densité de la graine → composition

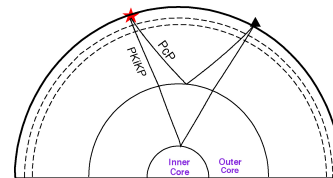
## Saut de densité à l'ICB

- Deux types de données sismologiques sensibles à  $\Delta\rho_{ic}$  ont été étudiées:
  - Fréquences de modes propres sensibles au noyau
  - amplitudes de phases réfléchies (PKiKP/PcP) à courte distance
- Premières estimations:
  - Modes propres  $\Delta\rho_{ic} = 0.6 \text{ Mg/m}^3$  (PREM)
  - Ondes de volume  $\Delta\rho_{ic} = 1.8 \text{ Mg/m}^3$  (e.g. Bolt and Qamar, 1970)

## Saut de densité à l'ICB

- Par les modes propres (*Dziewonski and Anderson, 1981*):  
 $\Delta\rho_{ic}$  (PREM) =  $0.6 \text{ g/cm}^3$  (PREM)=3.5 km/s
- Par le rapport d'amplitude PKiKP/PcP:  
 $\Delta\rho_{ic} = 1.6 \text{ g/cm}^3$  (*Souriau and Souriau, 1989*)  
 $\Delta\rho_{ic} = 1.0 \text{ g/cm}^3$  (*Shearer and Masters, 1990*).
- Réévaluation récente des données de modes propres (*Masters and Gubbins, 2003*)  $\sim 0.82 \text{ g/cm}^3$
- Nouvelles mesures de rapports d'amplitude PKiKP/PcP (*Cao and Romanowicz, 2004*)  $\sim 0.85 \text{ g/cm}^3$

## Rapport d'amplitude PKiKP/PcP



- Il dépend principalement des facteurs suivants:
  - Coefficient de réflexion à la CMB
  - Coefficient de réflexion à l'ICB
  - Facteur de qualité (Q) dans le noyau externe
  - Dispersion géométrique

## Facteur de qualité Q

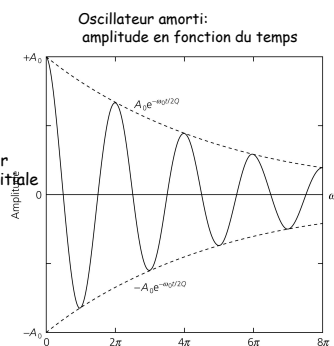
$$A(t) = A_0 e^{-\omega_0 t / 2Q}$$

L'amplitude décroît à une valeur égale à  $1/e \sim 1/3$  de la valeur initiale Après le temps de relaxation:

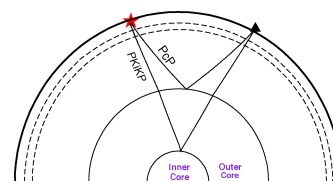
$$t_{1/e} = 2Q / \omega_0$$

où

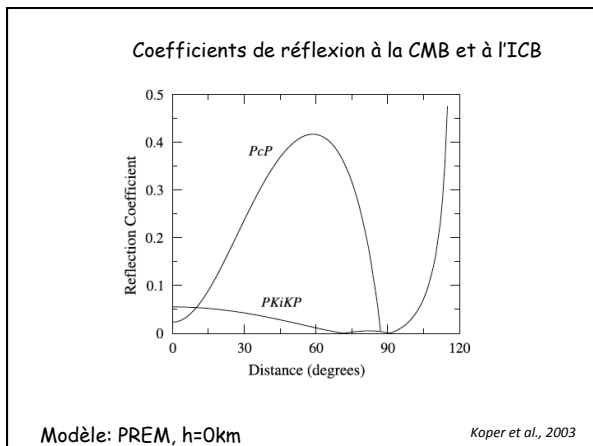
$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$



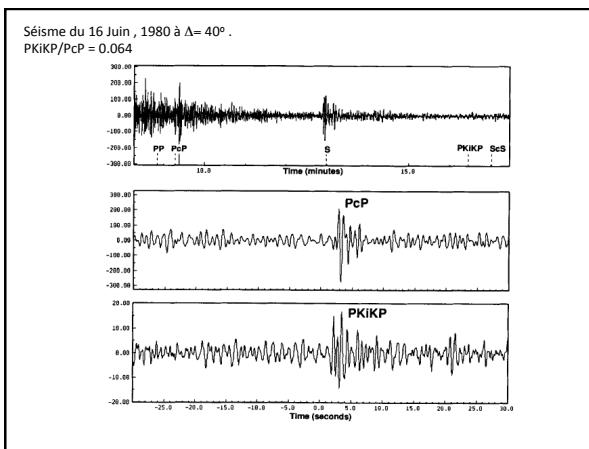
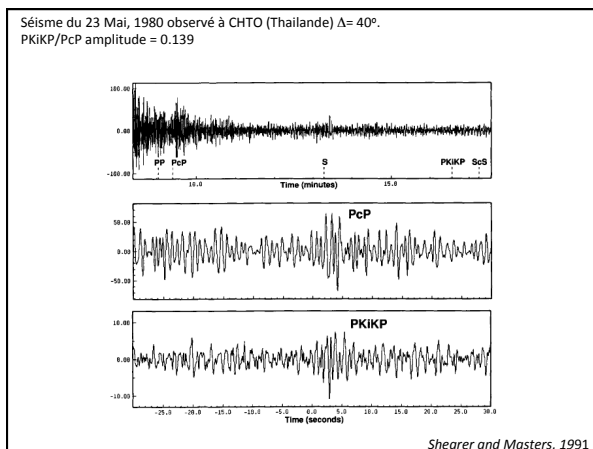
## Coefficient de réflexion à l'ICB

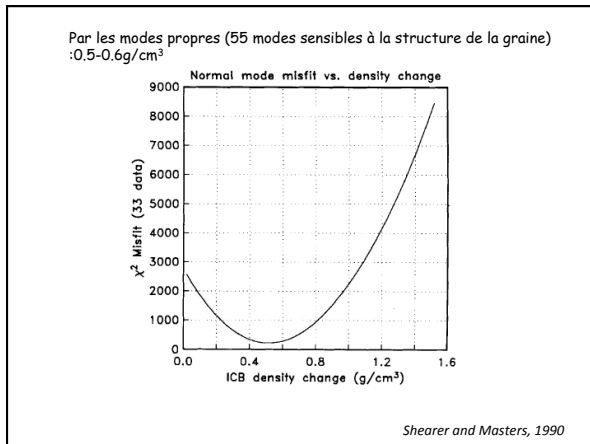
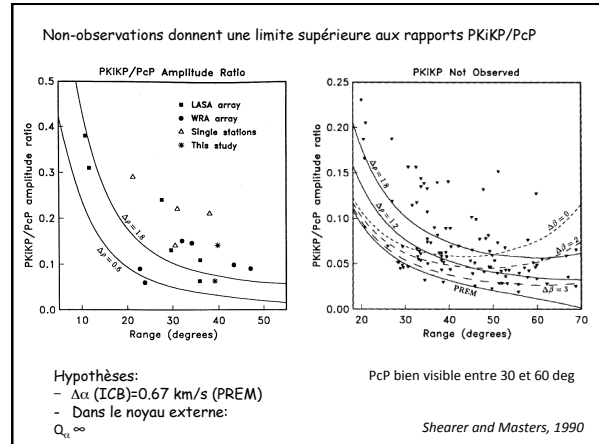
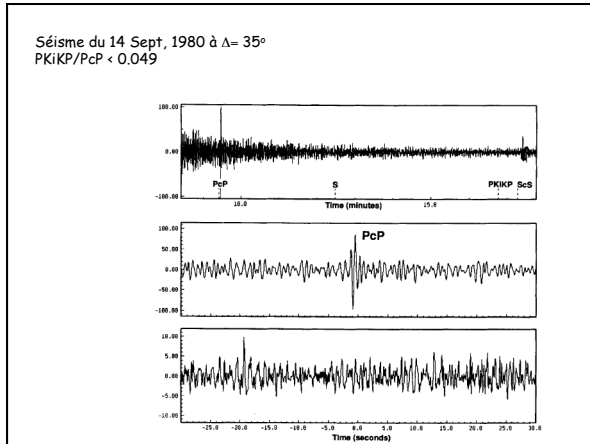


- Il dépend principalement des facteurs suivants:
  - Saut en vitesse S à l'ICB
  - Saut en vitesse P à l'ICB
  - Saut en densité à l'ICB



- ### Shearer and Masters (1990)
- 5 ans de données globales 1980-84:
    - sur 900 sismogrammes de bonne qualité, seulement 2 observations "probables" de PKiKP entre 20 et 90° de distance épicentrale
  - En général, PKiKP non observée:
    - Limite maximum sur le rapport d'amplitude PKiKP/PcP sur 100 paires source-station:
      - $\Delta\rho_{ic} \leq 1.0 \text{ g/cm}^3$ ;  $\Delta\beta_{ic} \geq 2.5 \text{ km/s}$





Analyse des fréquences centrales des modes propres de la terre (Masters And Gubbins, 2003)

- Soit un modèle élastique de référence:  $(V_p(r), V_s(r), \rho(r))$
- Dans ce modèle, l'ensemble des modes  $\{K\}$  est associé aux fréquences  $\{\omega_k^c\}$
- Les fréquences mesurées sont:  $\{\omega_k^o\}$
- On cherche à ajuster le modèle en déterminant les perturbations  $(\delta V_p, \delta V_s, \delta \rho)$  qui permettent d'expliquer les différences  $\delta \omega_k = \omega_k^o - \omega_k^c$
- Théorie des perturbations relie ces quantités par l'intermédiaire de "noyaux de sensibilité" :



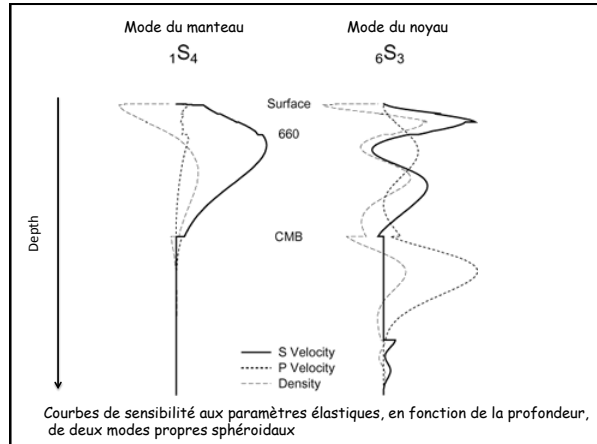
$$\frac{\delta\omega_k \pm \sigma_k}{\omega_k} = \int_0^a \left[ K_k(r) \frac{\delta V_p}{V_p}(r) + M_k(r) \frac{\delta V_s}{V_s}(r) + R_k(r) \frac{\delta \rho}{\rho}(r) \right] dr + \sum_j A_{jk} \delta h_j$$

$\left. \begin{matrix} K_k \\ M_k \\ R_k \end{matrix} \right\}$  Noyaux volumétriques  
 $A_{jk}$  Noyaux de discontinuités

On doit résoudre un problème inverse (linéarisé):

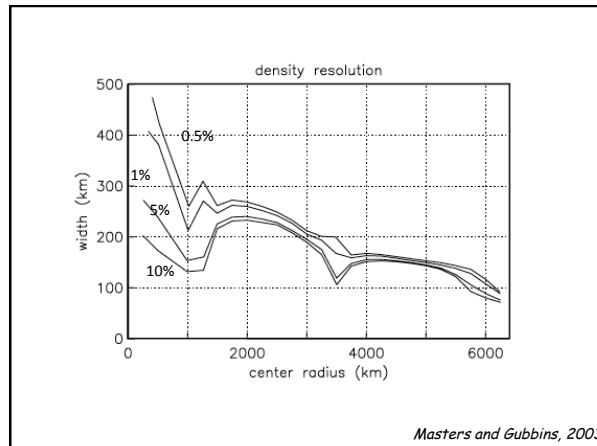
$$\bar{d} = A\bar{x} \quad A: \text{matrice } N \times M, N \text{ nombre de données, } M \text{ nombre de paramètres du modèle}$$

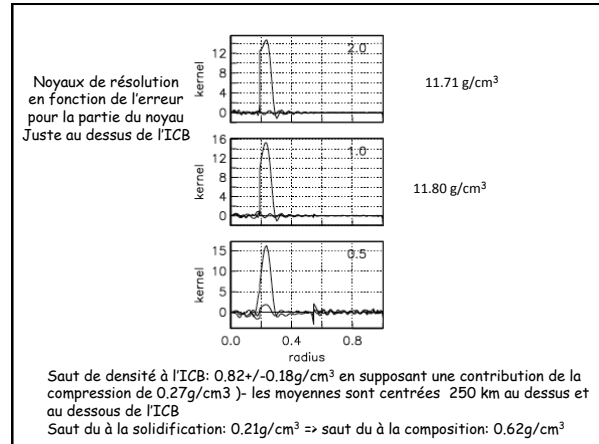
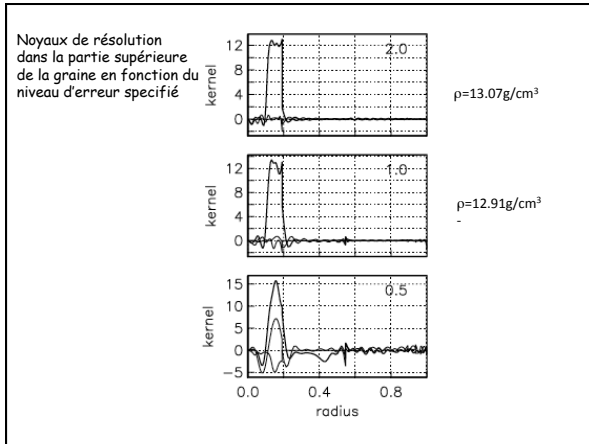
$$A^T A x = A^T d \quad x = (A^T A + \Theta I)^{-1} d$$



**Analyse de résolution (e.g. Backus and Gilbert, 1970):**

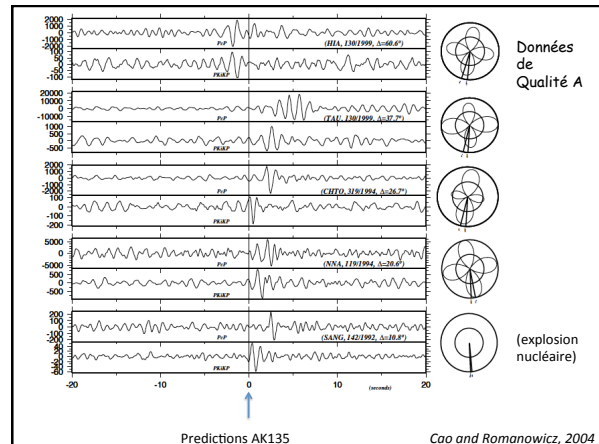
- A partir des données  $\omega_k$ , on construit une combinaison linéaire qui concentre la sensibilité dans une partie particulière de la terre:
  - On cherche des constantes  $a_k$  telles que:
 
$$\sum_k a_k \frac{\delta\omega_k}{\omega_k} = \int_0^a \left[ \mathcal{K}(r) \frac{\delta V_p}{V_p}(r) + \mathcal{M}(r) \frac{\delta V_s}{V_s}(r) + \mathcal{R}(r) \frac{\delta \rho}{\rho}(r) \right] dr + \sum_j A_j \delta h_j$$
  - Où:
 
$$\mathcal{K} = \sum_k a_k K_k, \mathcal{M} = \sum_k a_k M_k, \mathcal{R} = \sum_k a_k R_k, A_j = \sum_k a_k A_{jk}$$

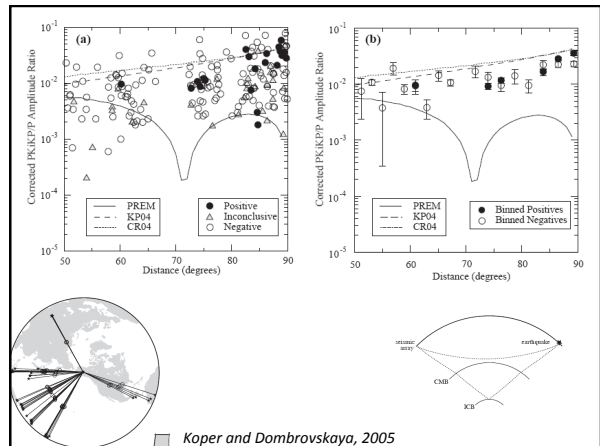
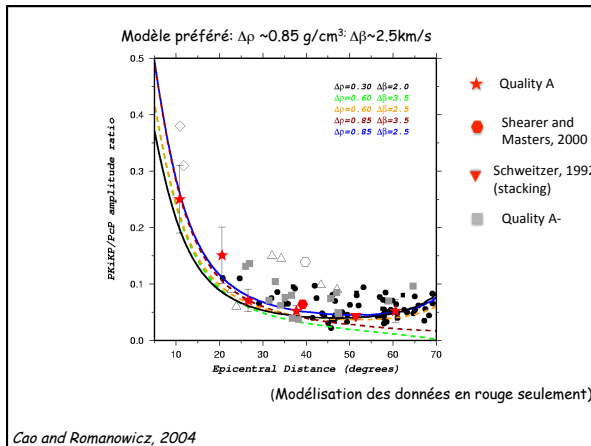
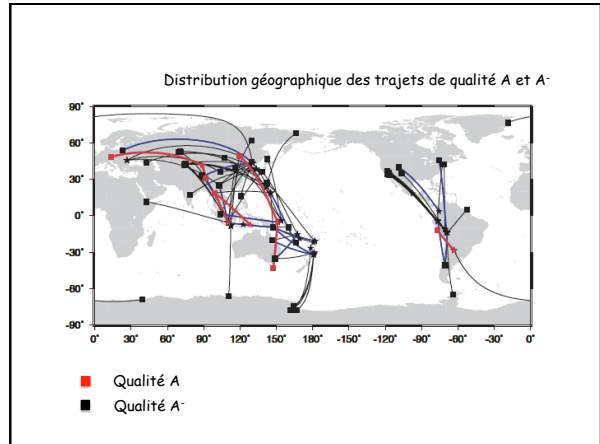
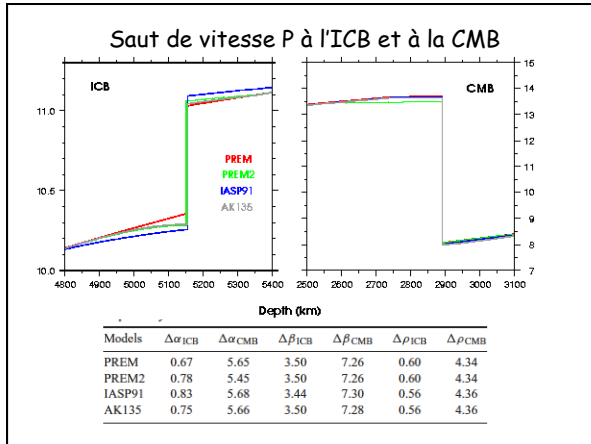


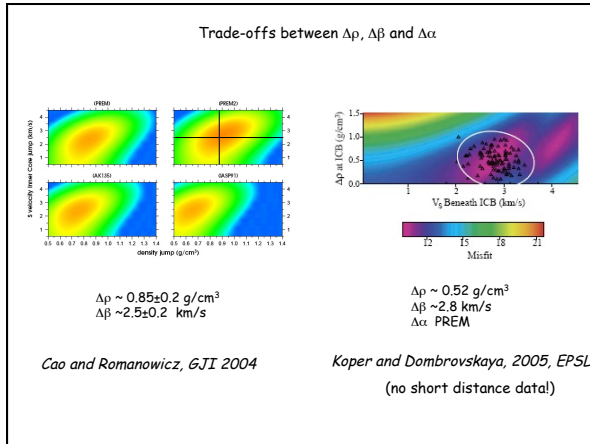


### Saut de densité à l'ICB

- Travaux récents: Ondes de volume:
  - Cao and Romanowicz (2004)
    - Données large-bande 1990-1999
    - Filtrage 0.7-3 Hz
    - 4500 sismogrammes  $\rightarrow$  79  $\rightarrow$  qualité A(5), A'(15), B(59)
    - Séismes de profondeur  $>100$  km
  - Koper and Dombrovskaya (2005)





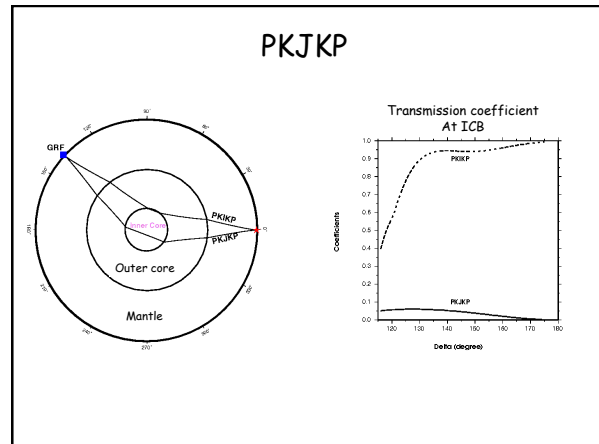


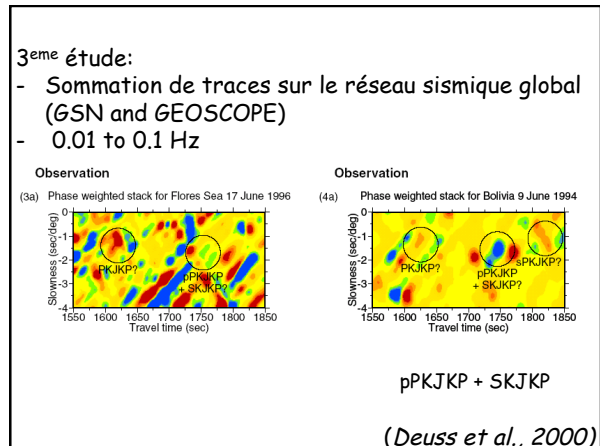
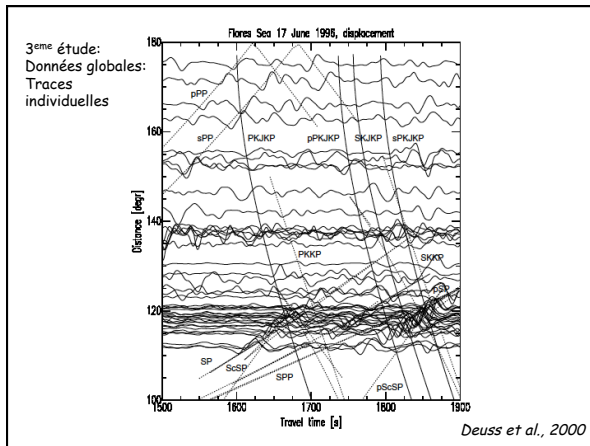
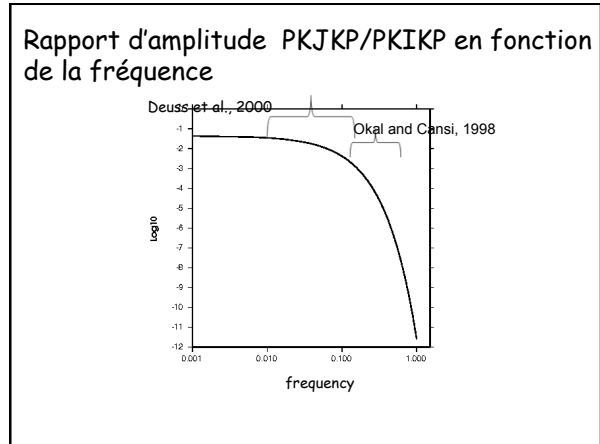
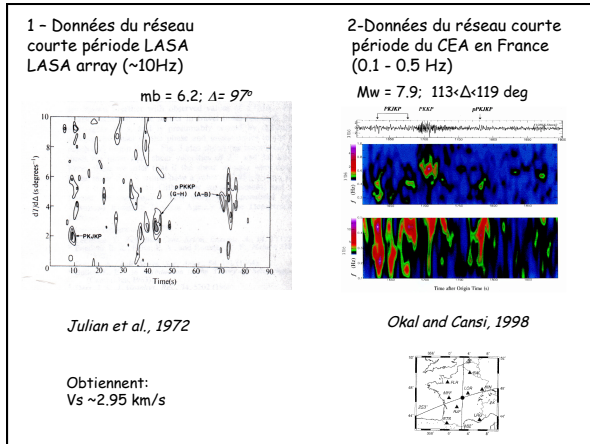
## Saut de densité à l'ICB

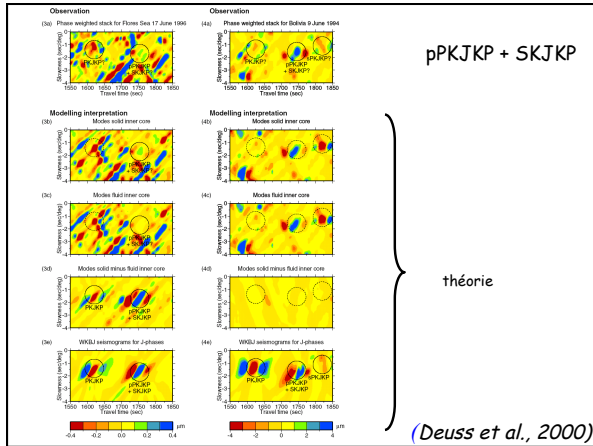
- **Travaux récents: Ondes de volume:**
  - Cao and Romanowicz (2004)
    - Données large-bande 1990-1999
    - Filtrage 0.7-3 Hz
    - 4500 sismogrammes  $\rightarrow$  79  $\rightarrow$  qualité A(5), A(15), B(59)
    - Séismes de profondeur  $> 100 \text{ km}$
    - Modèle préféré:  $\Delta\rho \sim 0.85 \text{ g/cm}^3$   $\Delta\beta \sim 2.5 \text{ km/s}$
  - Koper and Dombrovskaya (2006)
    - Modèle préféré:  $\Delta\rho \sim 0.52 \text{ g/cm}^3$   $\Delta\beta \sim 2.8 \text{ km/s}$
- **Travaux récents: modes propres**
  - Masters and Gubbins (2003)
    - $\Delta\rho \sim 0.82 \pm 0.18 \text{ g/cm}^3$
- **Conclusion:**
  - $\Delta\beta < 3.5 \text{ km/s}$  en haut de la graine: gradient de vitesse?
  - $\Delta\rho \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$ : un peu plus fort que PREM ( $0.6 \text{ g/cm}^3$ )

## Solidité de la graine

- Découverte de la graine: *Lehmann, 1936*
- *Birch (1940)* suggère qu'elle est solide-  
(solidification du fer)
- *Bullen (1950, 1951)* propose l'existence de la phase PKJKP
- Solidité confirmée par les observations de modes propres (*Dziewonski and Gilbert, 1971*)







### Désavantages des stacks globaux

- Interférences avec de nombreuses phases du manteau
  - --> nécessité d'introduire les différences entre stacks pour un modèle avec une graine solide, et un autre avec une graine liquide (Deuss et al. 2000)
- Ceci produit une amplification artificielle des phases de compression dans le modèle à graine liquide
- Anisotropie de la graine (pourrait être de 5% ou plus en S, mais inconnue)

