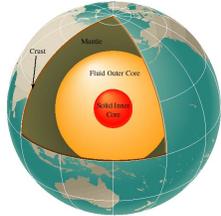


## Le noyau de la terre: 2- CMB et ICB

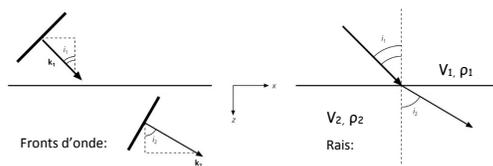


Barbara Romanowicz - Cours 2011  
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre  
Collège de France  
17 Octobre 2011

## Quelques rappels sur les lois de propagation des ondes de volume dans les milieux stratifiés

### Réfraction sismique

#### I) Géométrie plane



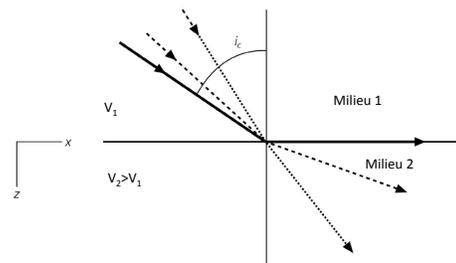
La direction de propagation change à l'interface entre deux milieux de propriétés élastiques (vitesses) différentes. C'est la loi de Descartes bien connue en optique:

$$\sin i_1 / \sin i_2 = v_1 / v_2.$$

Paramètre du rai est une constante:

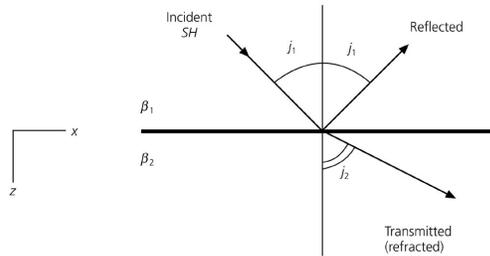
$$p = \frac{\sin i}{v}$$

### L'angle critique

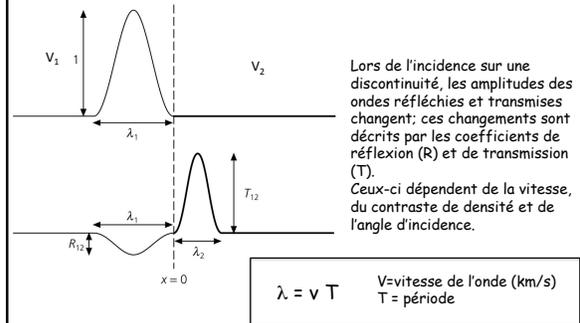


Lorsque l'angle d'émergence dans le milieu 2 est égal à 90 degrés, on dit que l'angle d'incidence dans le milieu 1 est "critique".  
Au delà de l'angle critique, le rai est totalement réfléchi (plus de transmission)

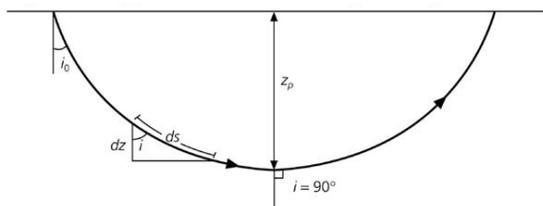
Ondes incidentes, réfléchies, et réfractées



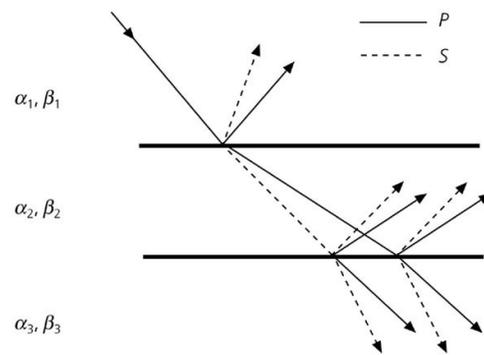
Coefficients de réflexion et de transmission

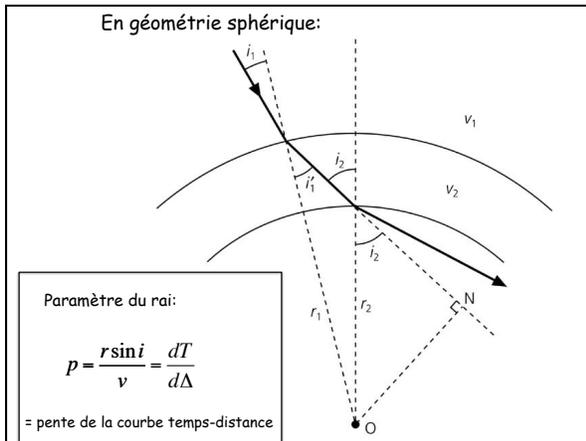


Rais sismiques dans un modèle où la vitesse croît de façon continue avec la profondeur



Ondes converties





Géométrie  
plane ou sphérique

$$X = 2 \int_0^z \frac{cp}{\sqrt{1-c^2 p^2}} dz \qquad \Delta = 2 \int_{r_1}^{r_0} \frac{cp}{r \sqrt{r^2 - c^2 p^2}} dr$$

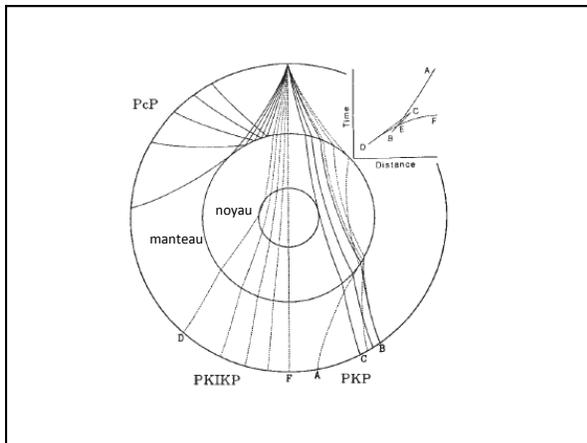
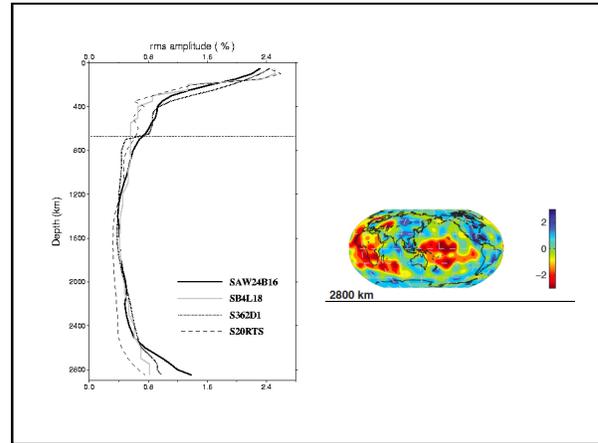
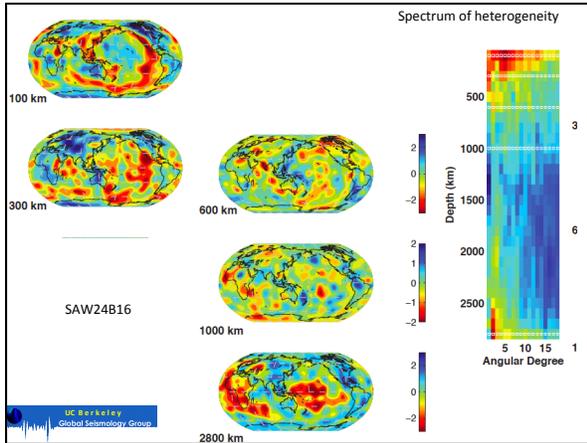
$$T = 2 \int_0^z \frac{dz}{c^2 \sqrt{1/c^2 - p^2}} \qquad T = 2 \int_{r_1}^{r_0} \frac{r^2 dr}{c^2 r \sqrt{r^2 / c^2 - p^2}}$$

$$T = pX + 2 \int_0^z \sqrt{1/c^2(z) - p^2} dz \qquad T = p\Delta + 2 \int_{r_0}^{r_1} \frac{\sqrt{r^2 / c^2(z) - p^2}}{r^2} dr$$

C= vitesse; X, Δ = distance, T temps de parcours, p paramètre du rai

- ### CMB et ICB
- **CMB:**
    - Rayon
    - Ellipticité, Topographie
  - **ICB:**
    - Rayon, Ellipticité
    - Contraste de densité

- ### CMB
- **Discontinuité la plus importante dans la terre:**
    - Saut de densité de 4.3 g/cm<sup>3</sup>, 1.5 fois plus que le saut de densité à la surface.
  - **Rôle important dans la dynamique:**
    - Topographie -> viscosité du noyau externe
    - Couplage noyau manteau depend de la topographie (longueur d'onde et taille)
    - Topographie induite par la dynamique du manteau
  - **Zone D'' tres hetérogène au dessus de la CMB - degré 2 très fort + courtes longueurs d'onde**
  - **Existence possible de structure "anormale" côté noyau externe**



### Rayon du noyau

- Gutenberg (1913) -  $R_{cmb} = 3471$  km  
- Distance de diffraction des ondes P
- Jeffreys (1939) propose d'utiliser les ondes réfléchies sur la CMB  
- (PcP) -  $R_{cmb} = 3473 \pm 4.2$  km  
- Puis avec ScS:  $R_{cmb} = 3473.1 \pm 2.5$  km  
- Il faut connaître la structure radiale en vitesse du manteau
- Taggart and Engdahl (1968) ajoutent des corrections de station:  
-  $R_{cmb} = 3477 \pm 2.0$  km

Hales and Roberts (1970)

Temps différentiels ( $T_{PcP} - T_P$ ) ou ( $T_{ScS} - T_S$ )

$R_{cmb} = 3489.92 \pm 4.66$  km et  $3486.10 \pm 4.59$  km  
(suivant le modèle du manteau utilisé)

On choisit une valeur de départ du rayon de la CMB:  $r_1$   
On mesure les temps de propagation  $T_i^o$  des phases ScS et PcP  
à une série de distances  $\Delta_i$   
On calcule les dérivées partielles:

$$K_i = \partial T_i / \partial r$$

Et les temps théoriques  $T_i^c$ , dans le modèle avec rayon  $r_1$

$$T_i^o - T_i^c = K_i \delta r$$

On résout alors un problème de minimisation de résidus pour obtenir la perturbation du rayon  $\delta r$

$$\sum_{i=1}^{i=N} [(T_i^o - T_i^c) - K_i \delta r] = \min$$

Les résidus dépendent:

- de la source,
- des hétérogénéités latérales du manteau
- de la topographie de la CMB

## Modes propres

- Modes propres de la terre - fréquences centrales des modes, moyennées sur un grand nombre de grands cercles  $\rightarrow$  terre moyenne précise (après le séisme du Chili de 1960, M9.6)

- Nécessité d'obtenir une solution qui satisfasse aussi les mesures de temps de propagation des ondes de volume avec une distribution raisonnable de densité en fonction de la profondeur  $\rightarrow$  équation d'Adams Williamson

- Rayon 3463-3483 km avec seulement le mode fondamental

### Equation d'Adams Williamson:

- Relation entre vitesses sismiques et densité dans l'intérieur de la terre en supposant une loi de compression adiabatique et une terre:
- à symétrie sphérique, de composition homogène, et en équilibre hydrostatique

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r)g(r) \quad g = \text{accélération de la gravité}$$

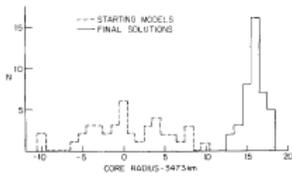
$$\Phi(r) = v_p^2 - \frac{4}{3}v_s^2 = \frac{K}{\rho}$$

$$K = V \frac{dP}{dV} = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad (\text{Par définition})$$

D'où:

$$\frac{d\rho}{dr} = -\frac{g(r)\rho(r)}{\Phi(r)}$$

- Pour faire mieux il faut inclure des modes harmoniques -> mesures faites par Dziewonski et Gilbert ~1972



From Dziewonski and Haddon, 1974

- Dziewonski and Haddon (1974):
  - $R_{CMB} = 3485 \pm 3$  km.
- Valeur moderne:
  - PREM : 3480 km
  - AK135 : 3479.5 km

### Ellipticité de la CMB

- Ellipticité dynamique à partir des nutations:
  - 300-500m d'excès d'ellipticité par rapport à la forme hydrostatique
- A partir des données sismologiques:
  - $P_cP$ , PKP
  - Inversion simultanée pour topographie de la CMB et structure latérale dans la  $D''$ .
  - Ajouter PKKP sensible principalement à la topographie CMB, pas  $D''$ . Difficile à observer.
  - Modes propres: structure d'ordre pair seulement et trade-offs avec la structure du manteau.

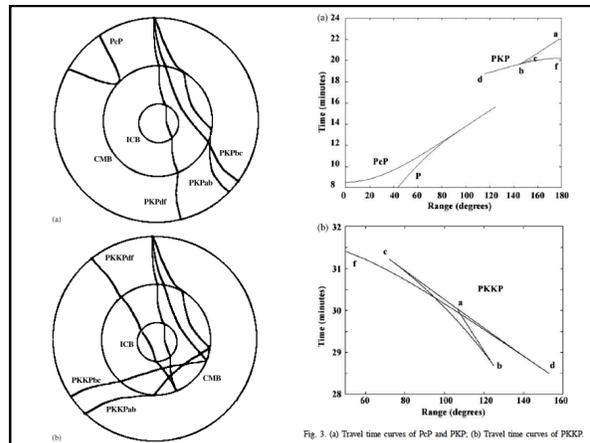


Fig. 3. (a) Travel time curves of  $P_cP$  and PKP. (b) Travel time curves of PKKP

### Topographie de la CMB

- Par sismologie:
  - PcP,PKP,PKKP
- Topographie "dynamique" à partir du géoïde et de la tomographie du manteau
  - $\delta v/v \rightarrow \delta \rho/\rho$
  - + modèle radial de viscosité

### Topographie de la CMB(sismo)

- 4 a 10 km de topographie à grande longueur d'onde ( $\lambda > 4000$  km).
  - Modèles obtenus très différents.
  - Régions non échantillonnées.
- Difficultés pour résoudre les trade-offs avec la structure dans la D''
- Contaminations :
  - Incertitudes sur la source
  - hétérogénéités du manteau
- Courtes longueurs d'onde aussi mais sans doute de faible amplitude:  $\Delta h \sim 300$  m à  $\lambda \sim 10$  km

1) Ondes réfléchies:

$$\delta t = -\frac{2\delta r}{r}(\eta^2 - p^2)^{1/2}$$

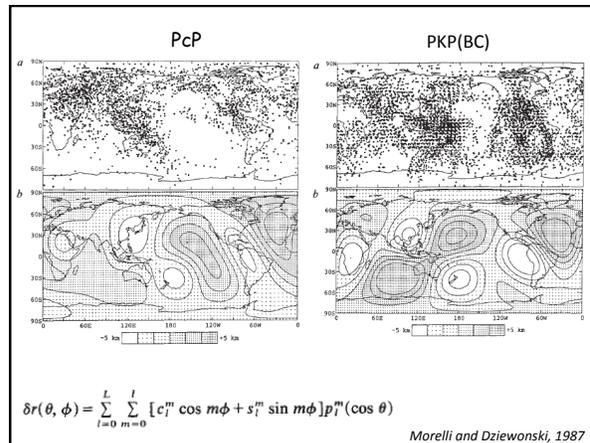
*e.g. Morelli and Dziewonski, 1987*

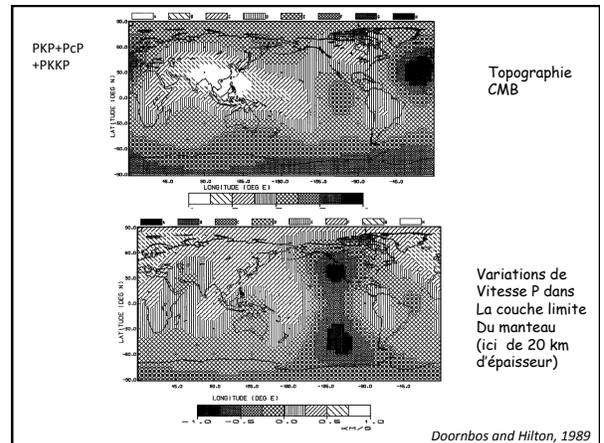
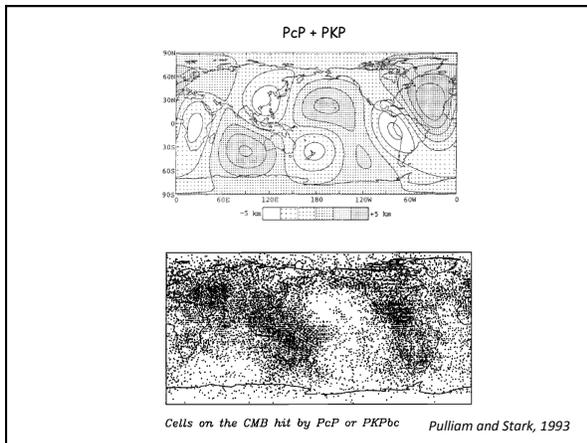
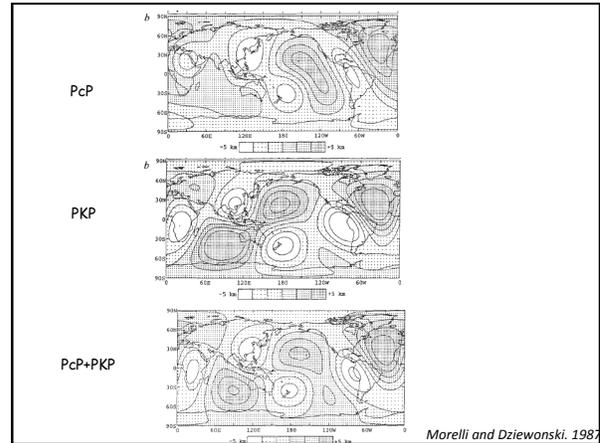
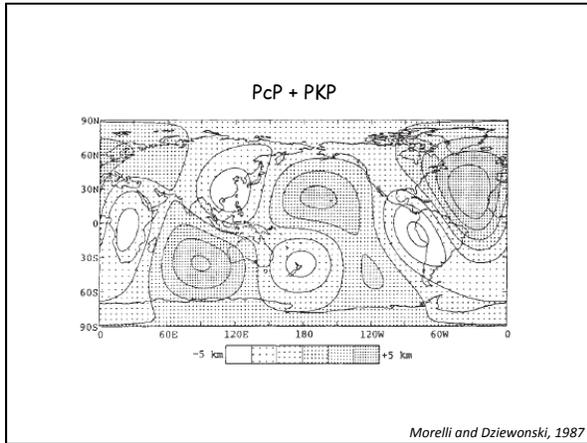
$$\eta = r / v(r)$$

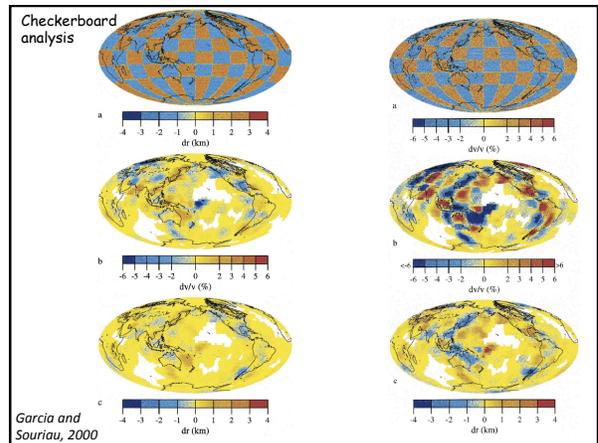
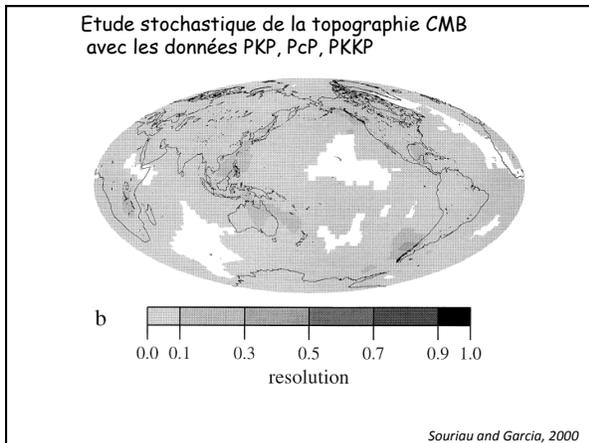
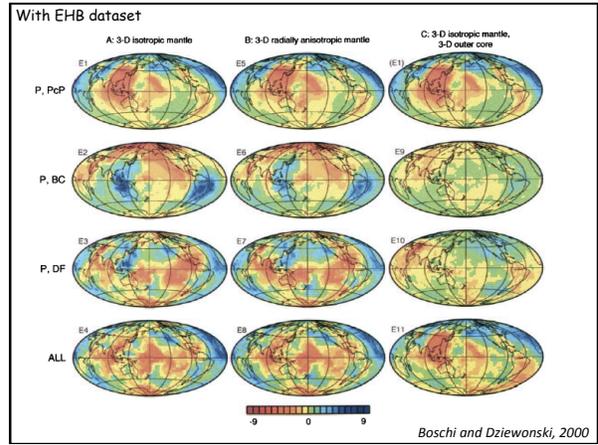
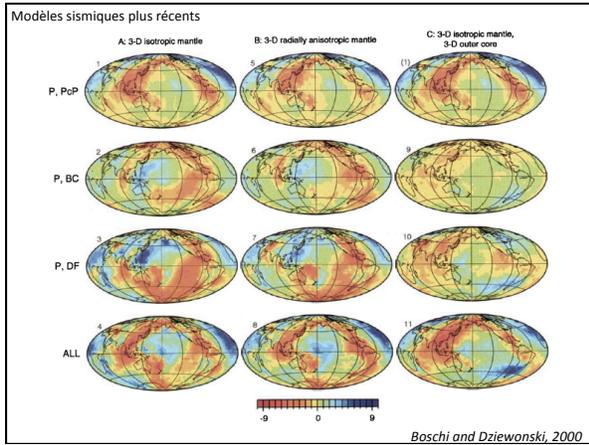
2) Ondes transmises:

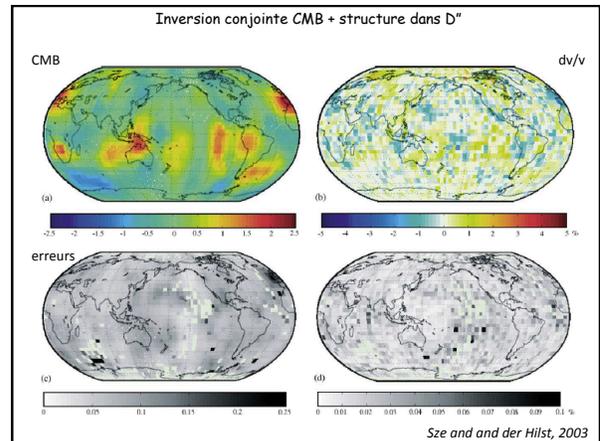
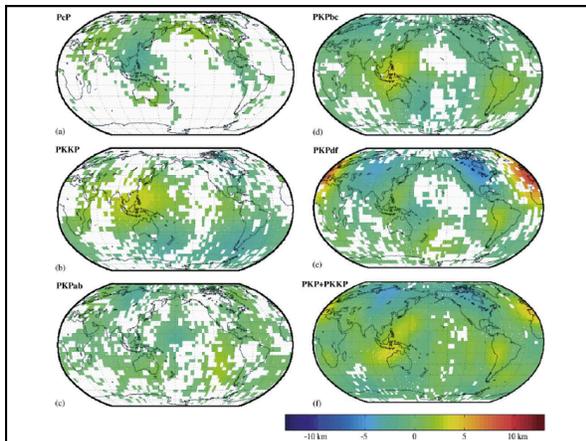
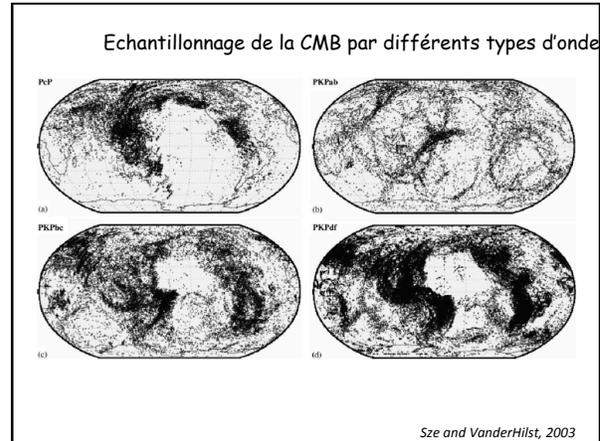
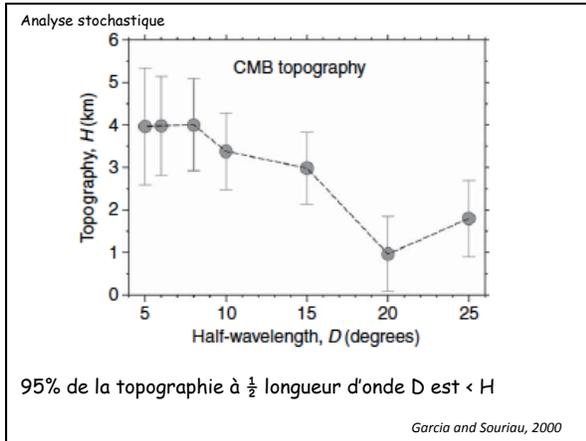
$$\delta t = -\frac{\delta r}{r}[(\eta_1^2 - p^2)^{1/2} - (\eta_2^2 - p^2)^{1/2}]$$

Cas simple d'incidence verticale:  $p=0$ :  
 $\delta r=1$  km  $\rightarrow \delta PcP=-0.146$ s  
 $\delta PKP=+0.051 \times 2=0.102$  s



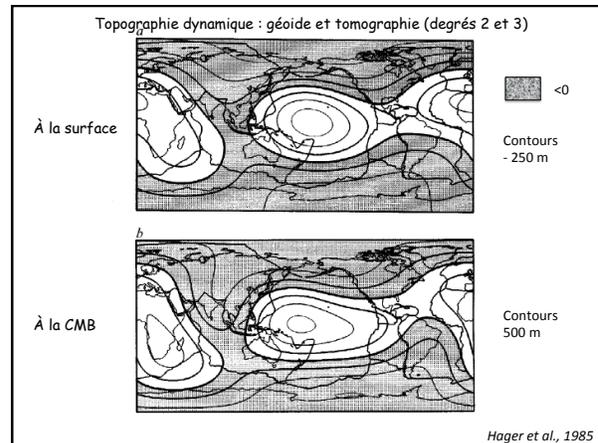
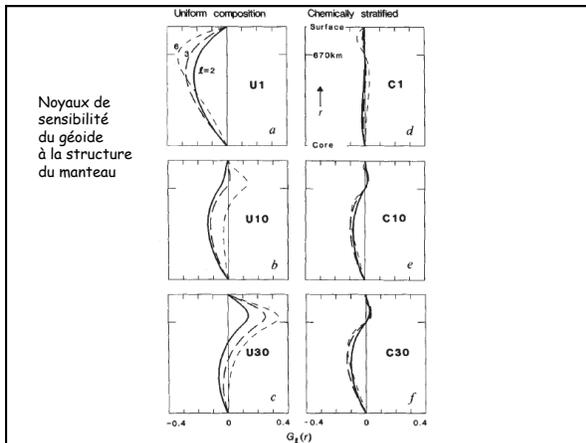
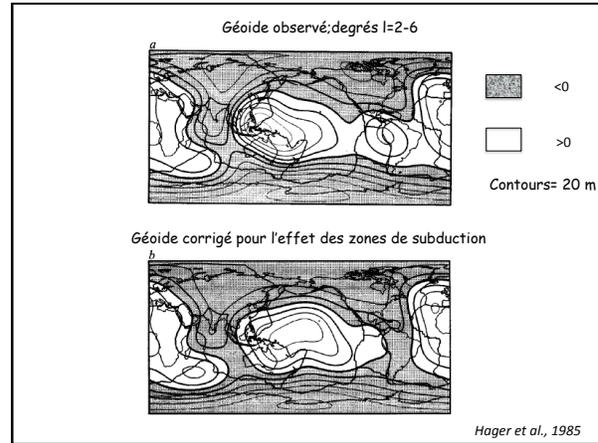




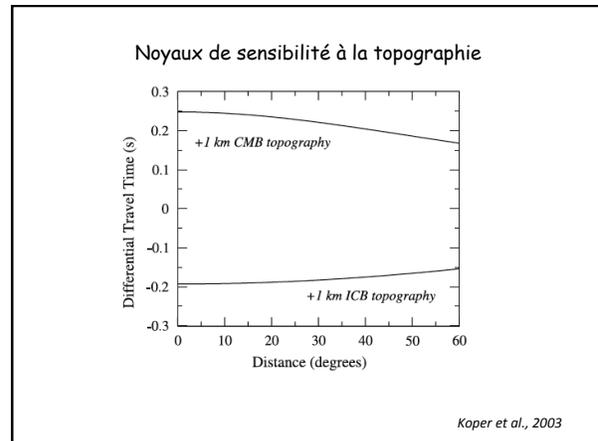
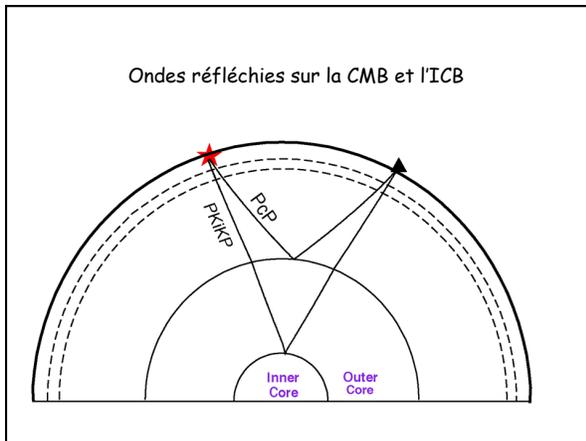
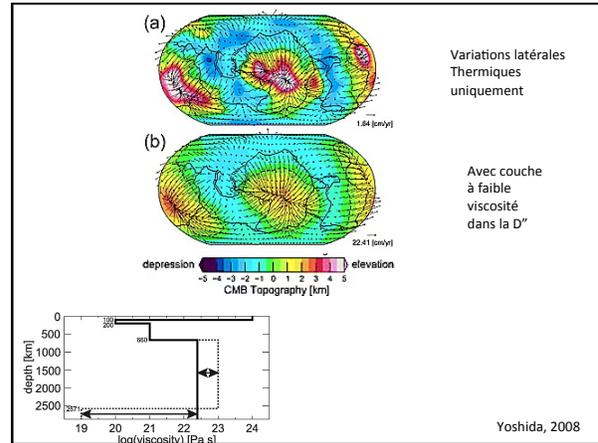


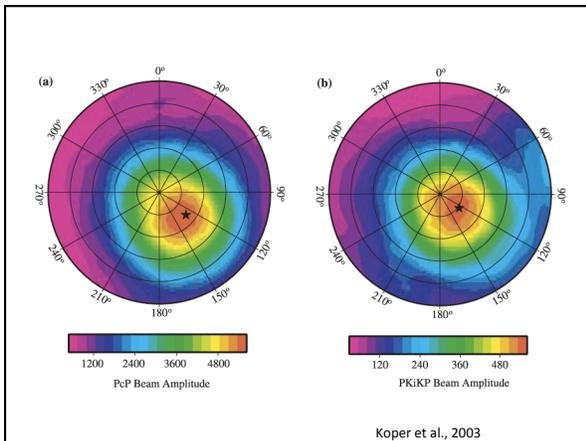
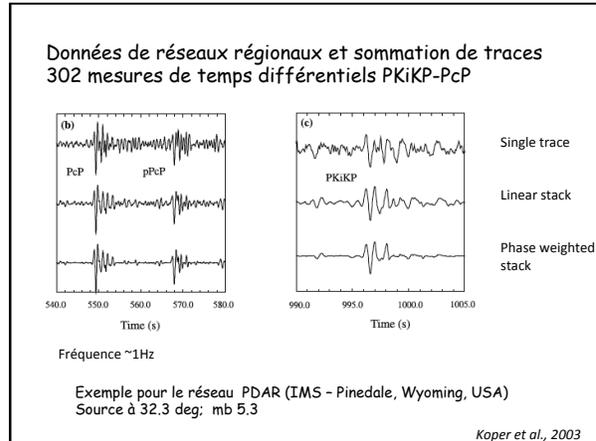
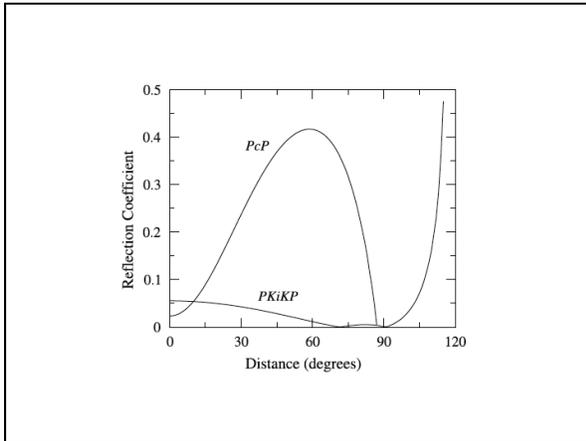
## Topographie dynamique

- Topographie "dynamique" à partir du géoïde et de la tomographie du manteau
  - $\delta v/v \rightarrow \delta \rho/\rho$
  - + modèle radial de viscosité
  - Formulation analytique
- Plus récemment: modèles numériques de circulation mantelliques (variations latérales de la viscosité)



- Modèles de topographie dynamique plus récents :
  - Topographie plus importante ~10 km (e.g. *Greff-Leffts and Legros, 1996*), sauf si (*Yoshida, 2008*) :
  - Variations latérales de viscosité dans le manteau
  - Super-panaches sont denses dans la D''
  - Zone de faible viscosité dans la D''





**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 ~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.