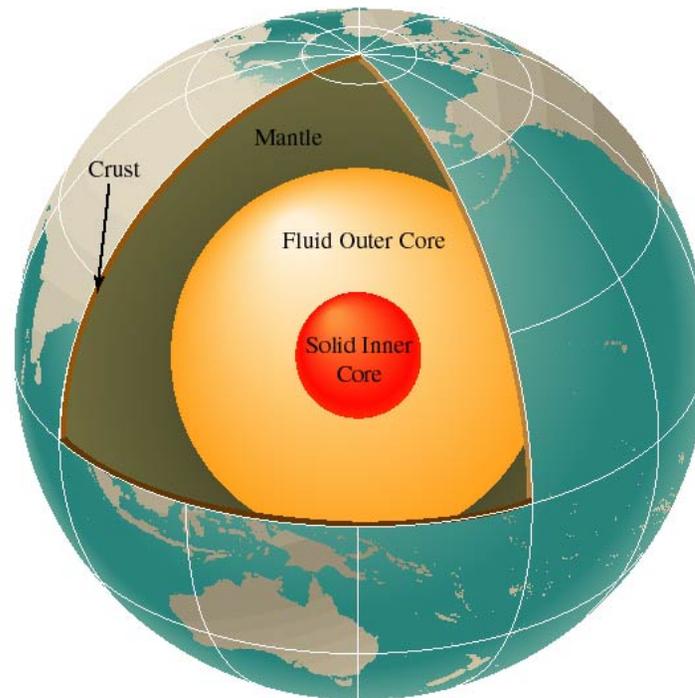


Le noyau de la terre:

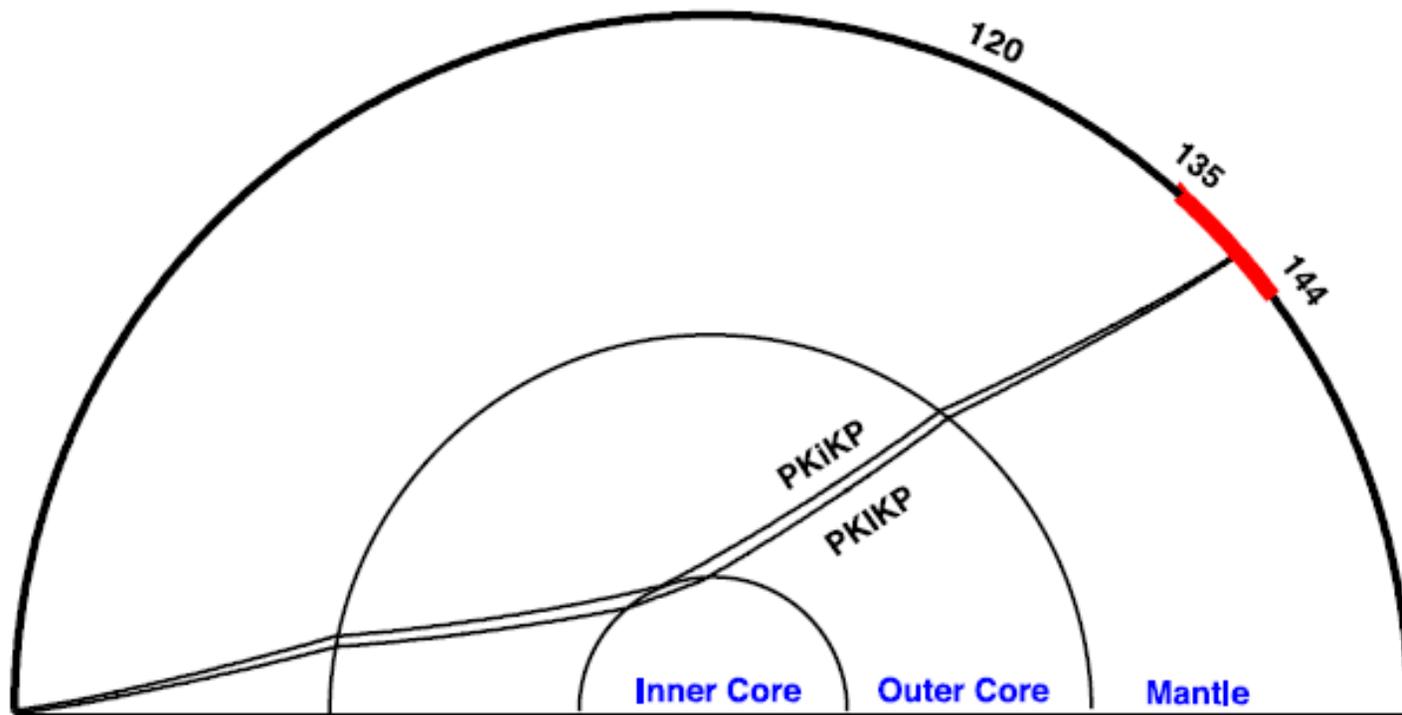
6- Structure sismique du noyau liquide

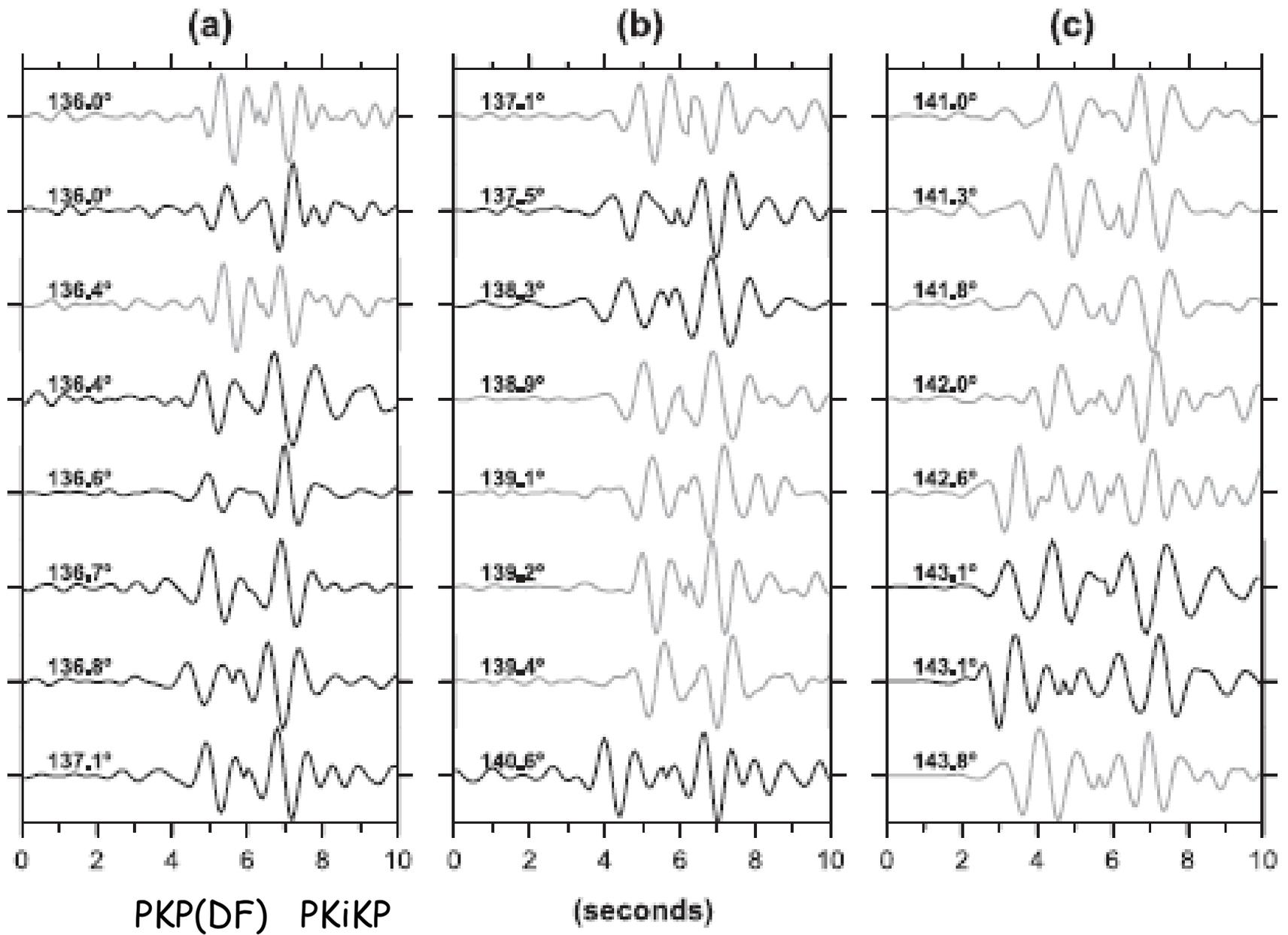
Minéralogie du noyau



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

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

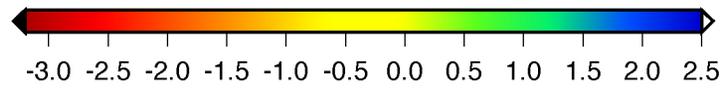
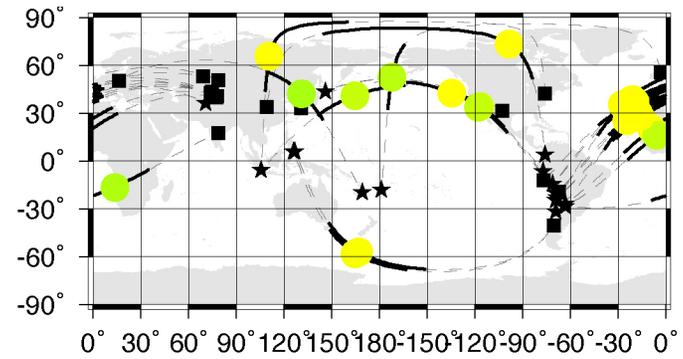
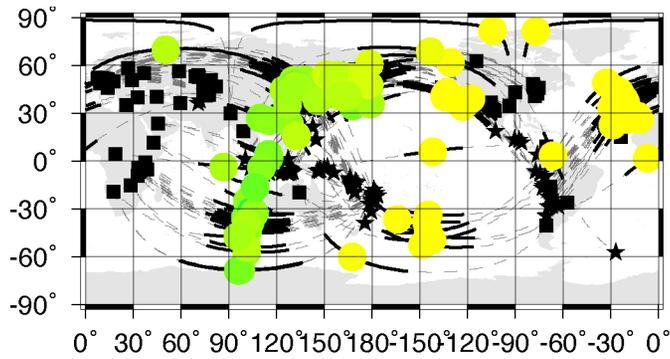




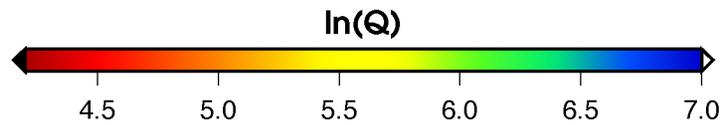
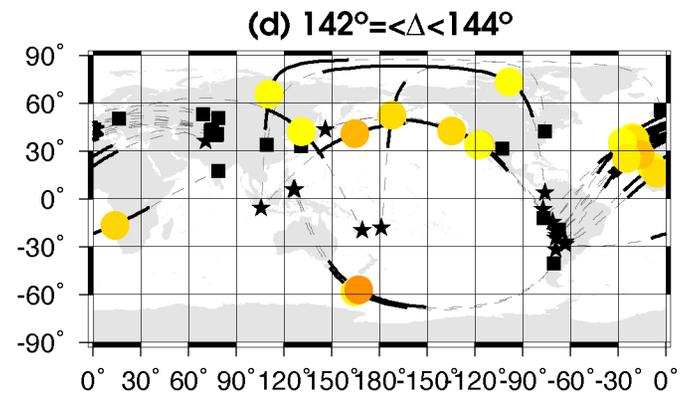
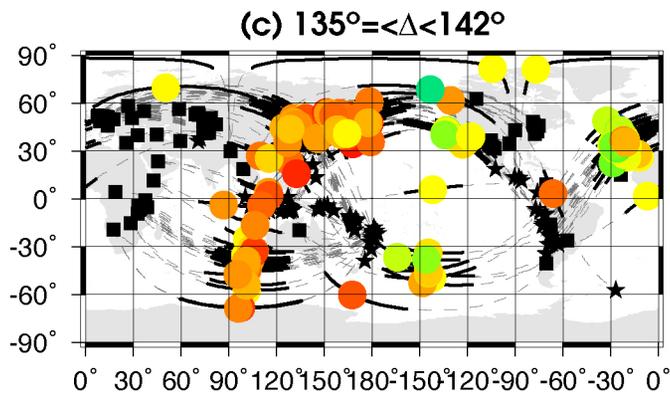
Data narrow band filtered around 1 Hz

Cao and Romanowicz, 2004

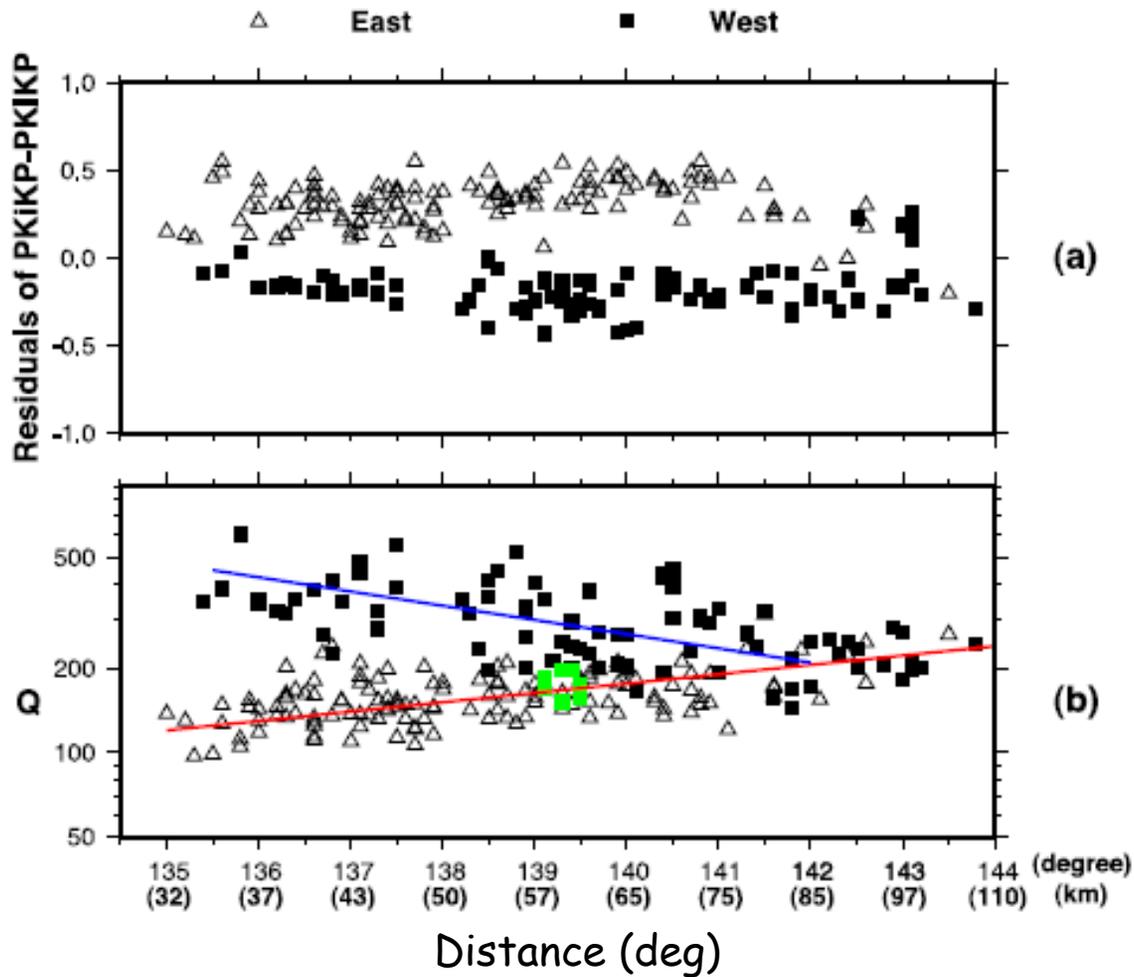
Temps de
parcours
différentiels



Atténuation
différentielle

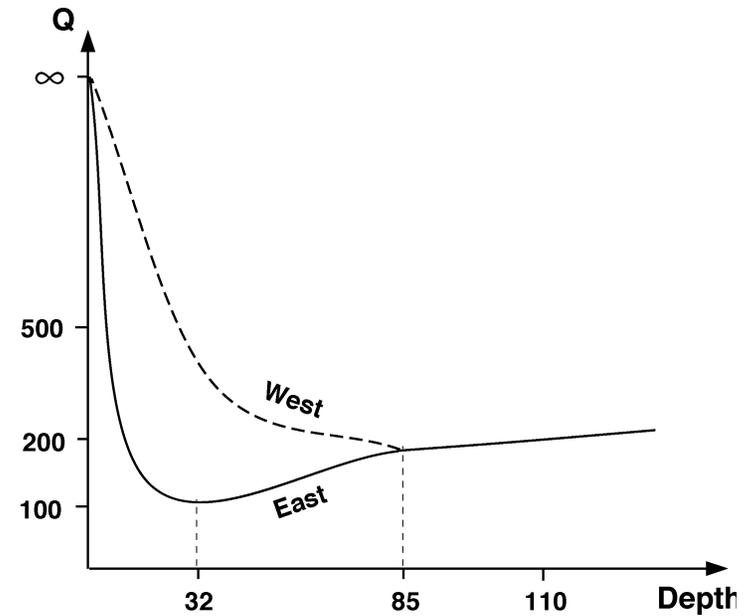


Mushy zone at the top of the inner core



(a)

(b)



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

Cao and Romanowicz, 2004

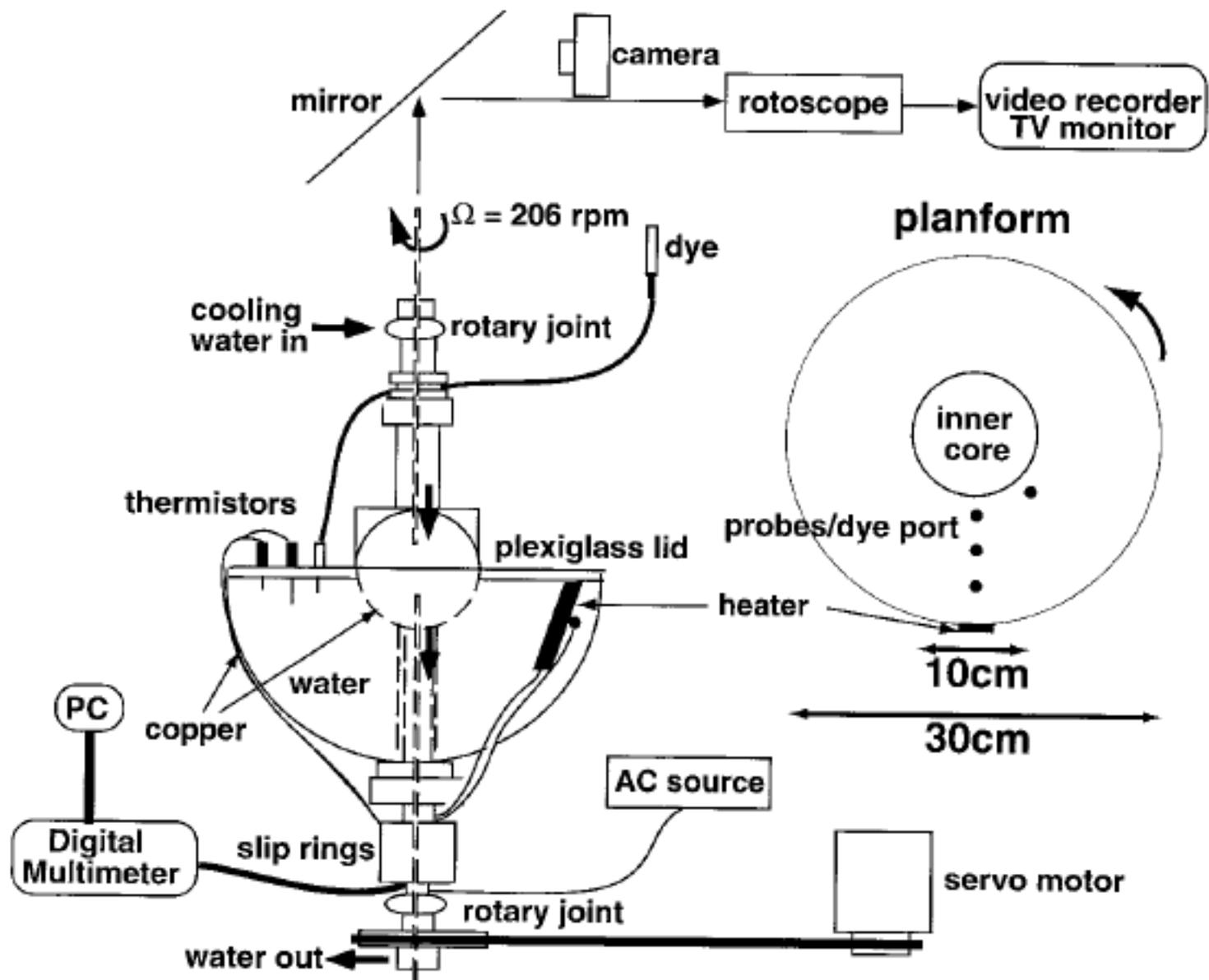
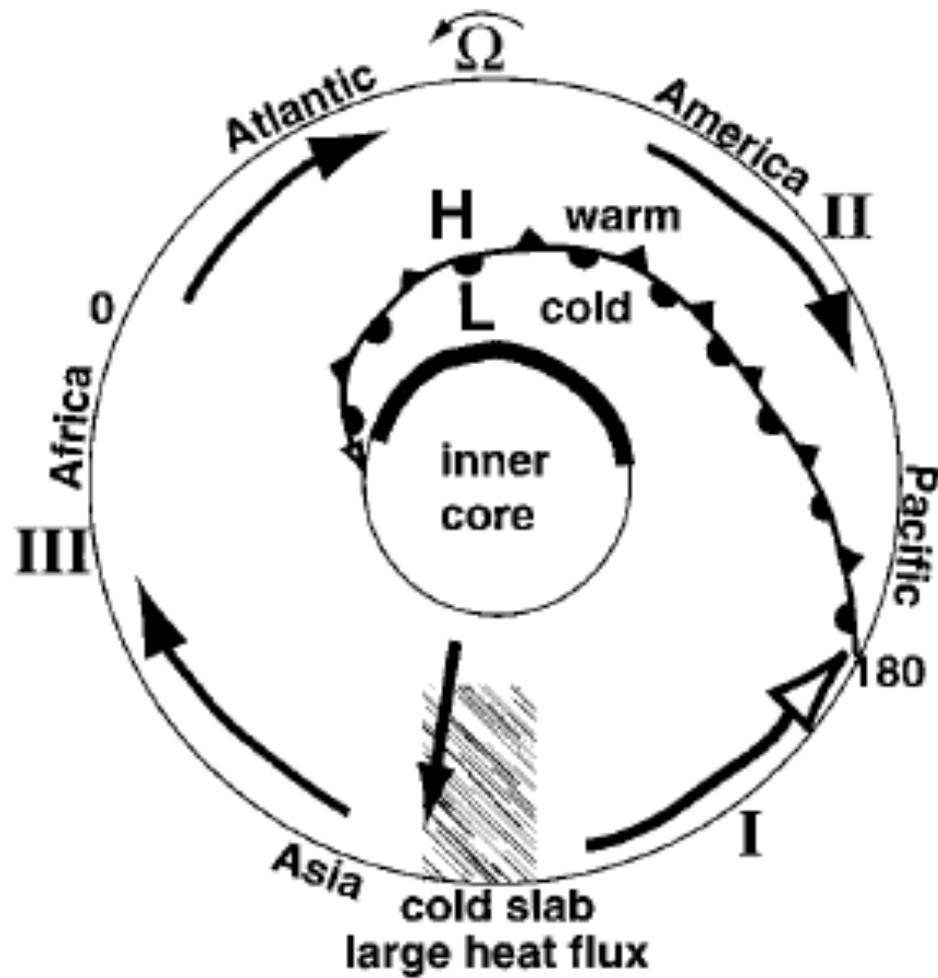


Fig. 1. Diagram of the experimental apparatus.

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

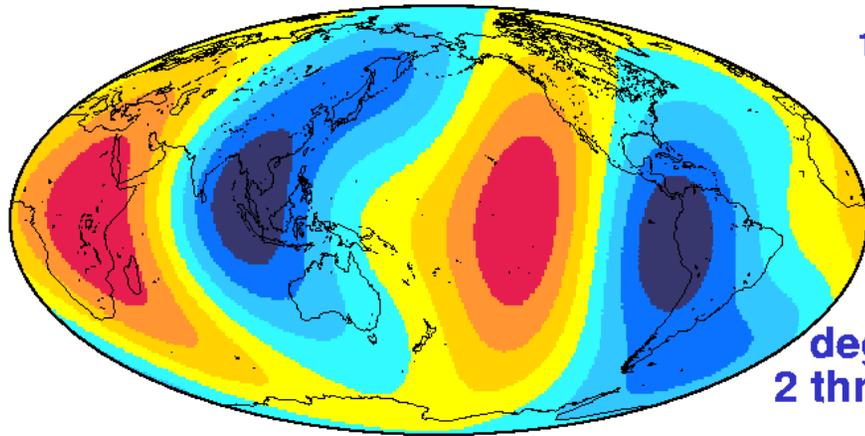
projection équatoriale

Sumita and Olson, 1999

even-degree normal mode splitting function

Generalized Spectral Fitting Estimate

$1S_4$



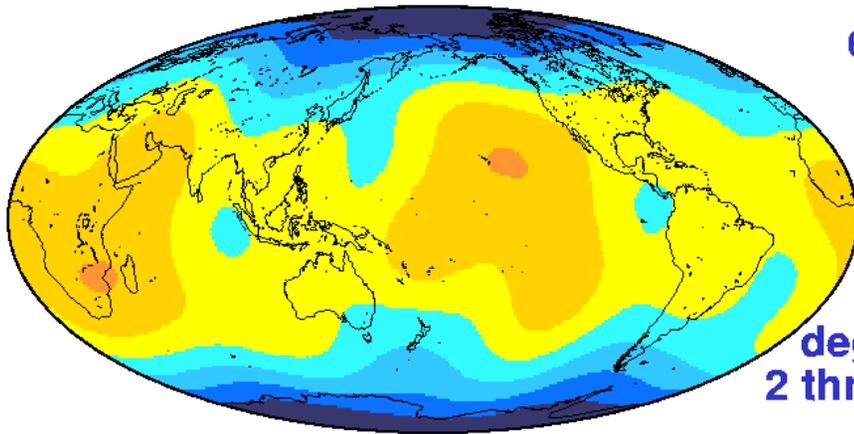
degrees
2 through 4



even-degree normal mode splitting function

Generalized Spectral Fitting Estimate

$6S_3$



degrees
2 through 6

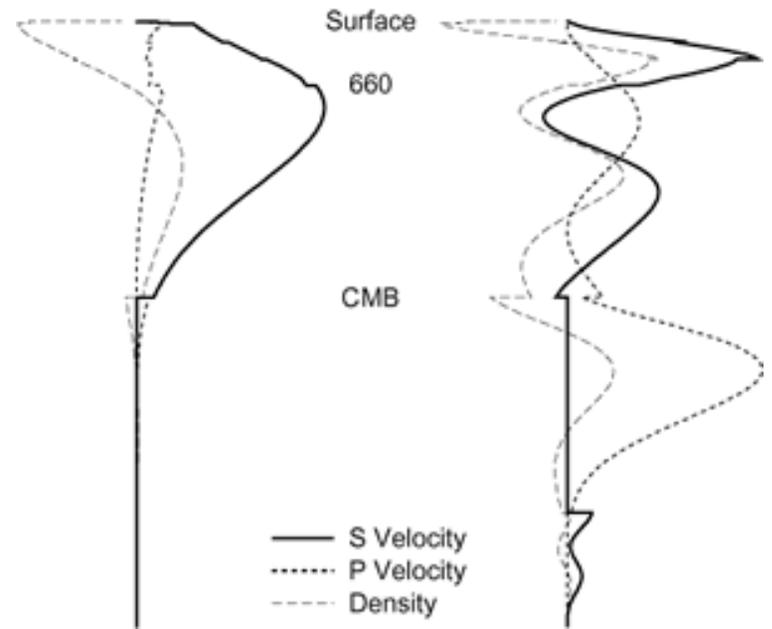


Mantle mode



$1S_4$

$6S_3$



Core mode



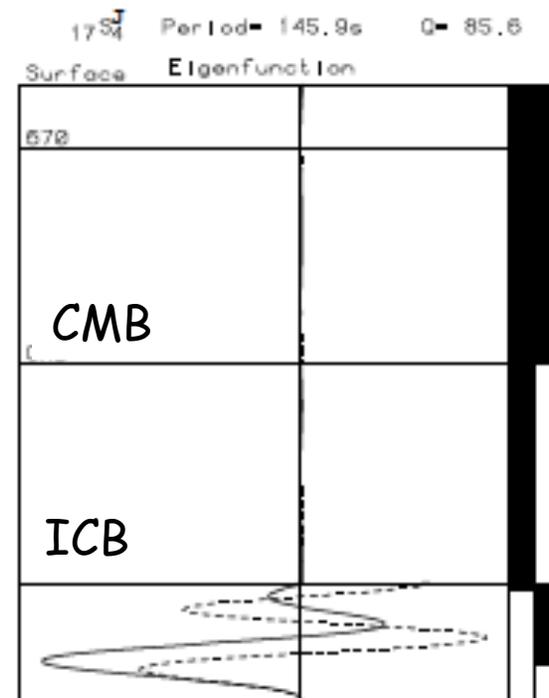
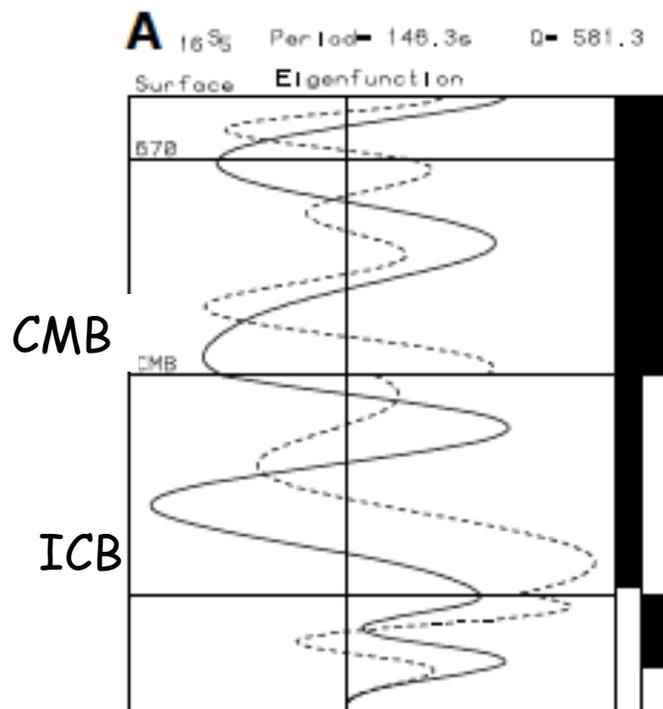
Anisotropie "hémisphérique" vue par les modes propres

$${}_{16}S_5$$

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

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

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

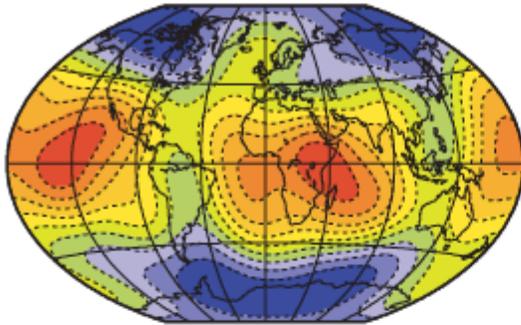


Fonctions propres radiales:

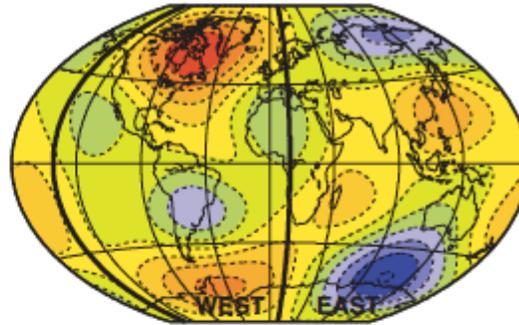
_____ : U - - - - - : V

Deuss et al., 2010

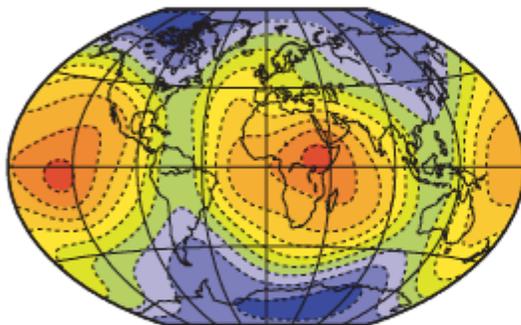
A Observed self-coupled splitting function
 ${}_{16}S_5, s=2,4,6$



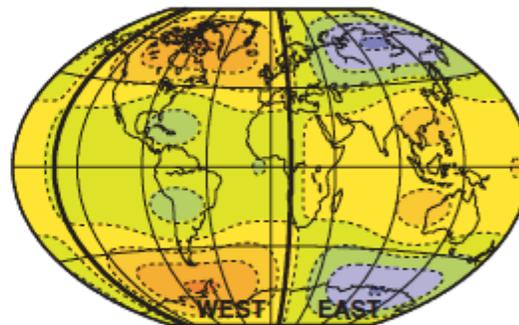
D Observed cross-coupled splitting function
 ${}_{16}S_5-{}_{17}S_4^J, s=1,3,5$



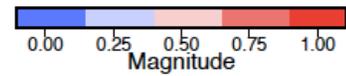
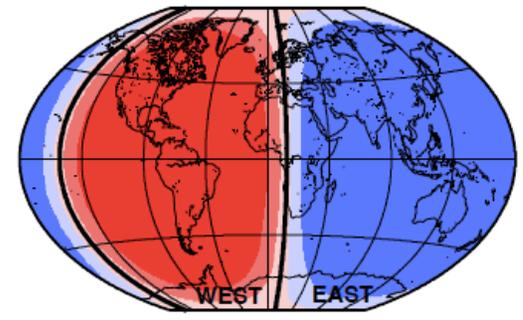
C Predicted self-coupled splitting for inner core
 ${}_{16}S_5, s=2,4,6$



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

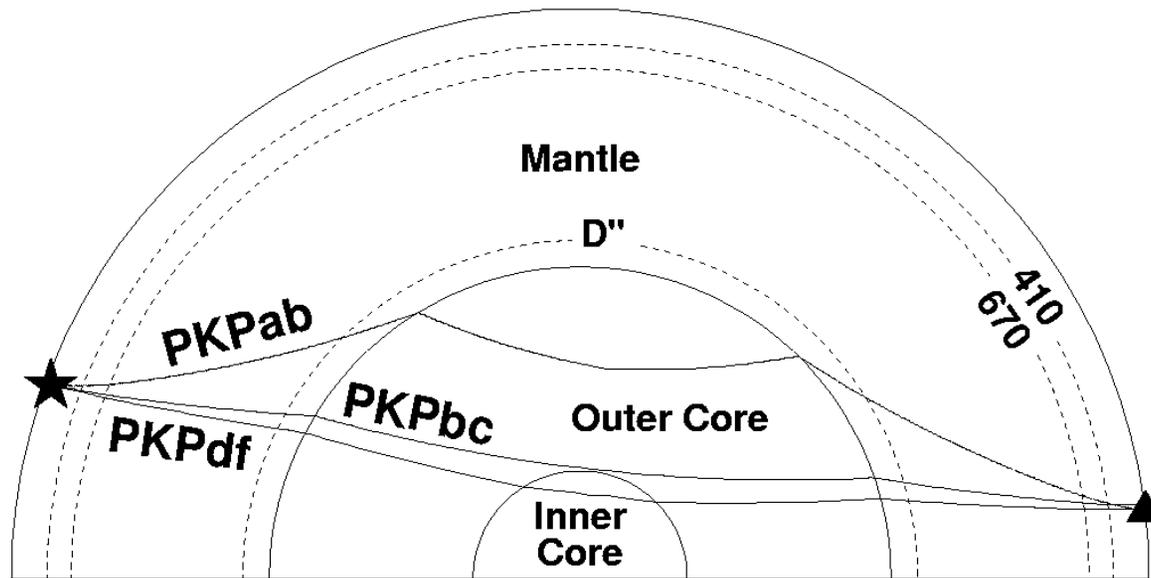


B Anisotropy model magnitude



Deuss et al., 2010

Phases du noyau

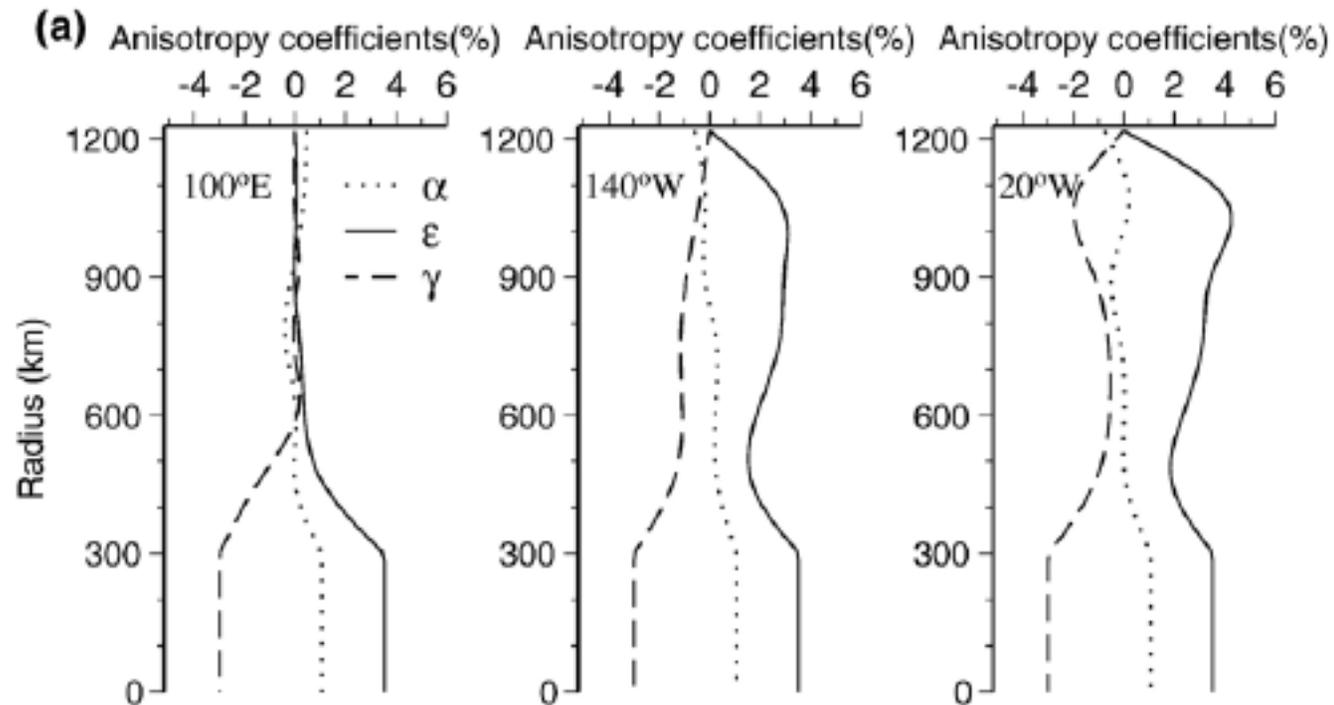


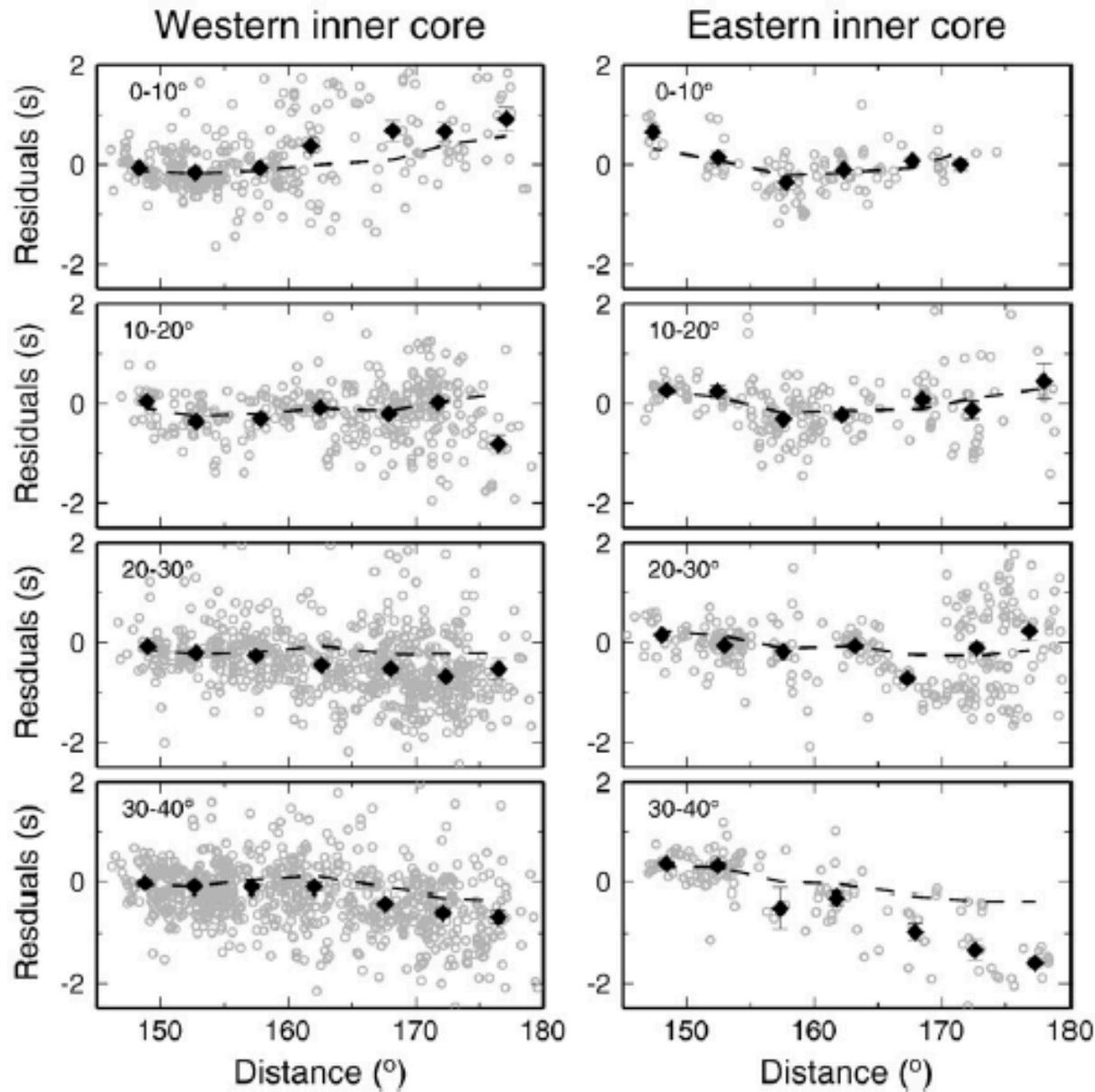
Modèle tri-dimensionnel de l'anisotropie de la graine

- Collection globale de données de temps diff. PKP(BC)-PKP(DF) et PKP(AB)-PKP(DF)
- Paramétrisation
 - Partie centrale ($r < 300$ km):
 - anisotropie uniforme
 - Partie externe:
 - En profondeur: 7 fonctions splines
 - En longitude: 3 fonctions splines (pour tenir compte de la structure hémisphérique)
 - Pas de variation en latitude
- Inversion pour les 3 paramètres de l'anisotropie (*Sun and Song, 2008*):

$$\frac{\delta v}{v} = \alpha + \epsilon \cos^2 \xi + \gamma \sin^2 2\xi,$$

Profils de Vp à 3 longitudes:



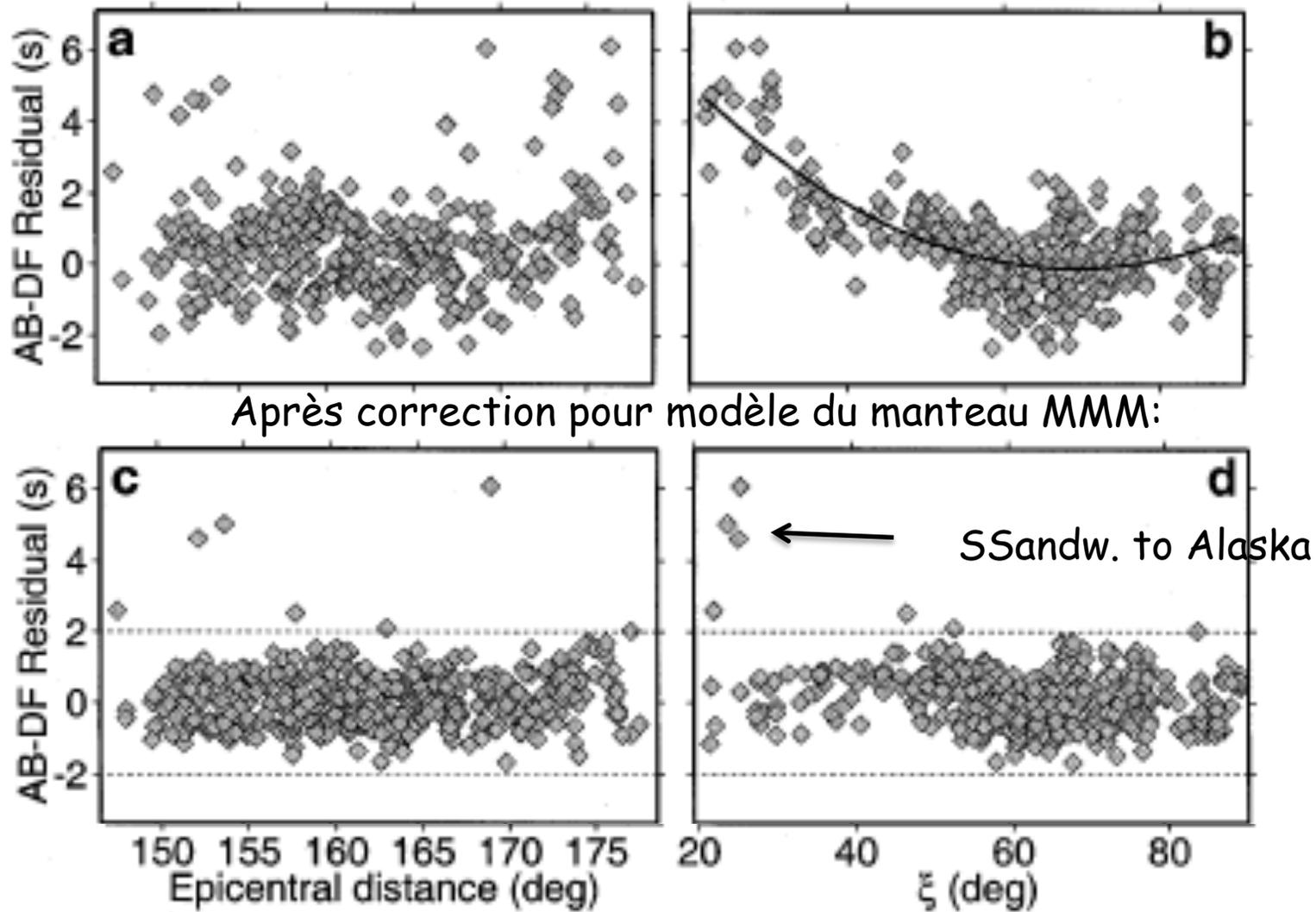


--- · Prédictions
du modèle
3D

Rangement en fonction de l'angle φ du rai par rapport
au plan equatorial

Sun and Song, 2008

Données brutes AB-DF

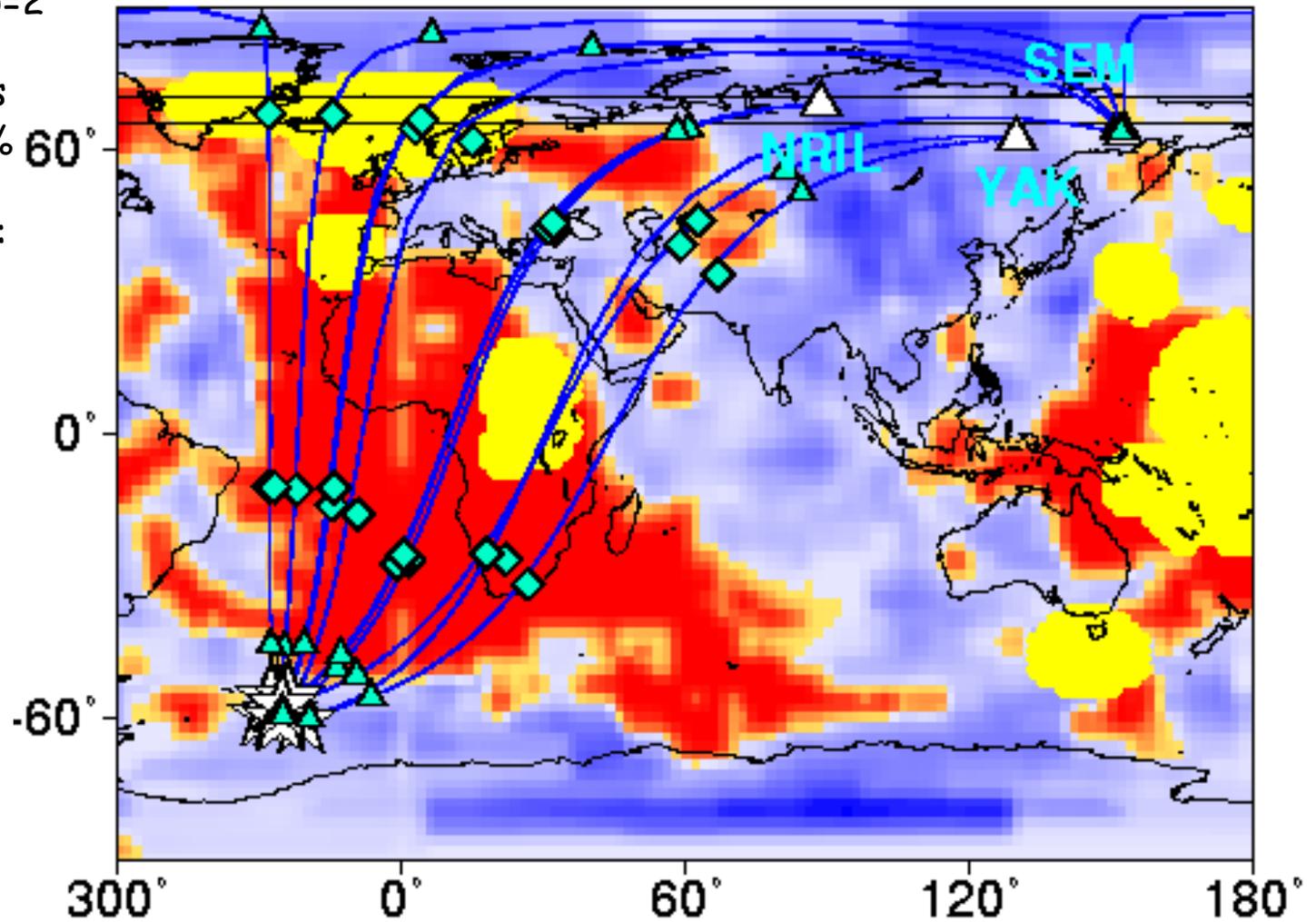


Modèle MMM:

1) Convertir modèle S (Grand, 1999)
en P avec $d\ln V_s/d\ln V_p=2$

2) Saturer les régions
Lentes à: $\Delta V_p/V_p= 2\%$

3) Ajouter les ULVZs:
 $\Delta V_p/V_p=-10\%$



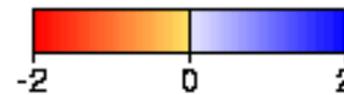
ULVZ



DF entry point into core



AB entry point into core



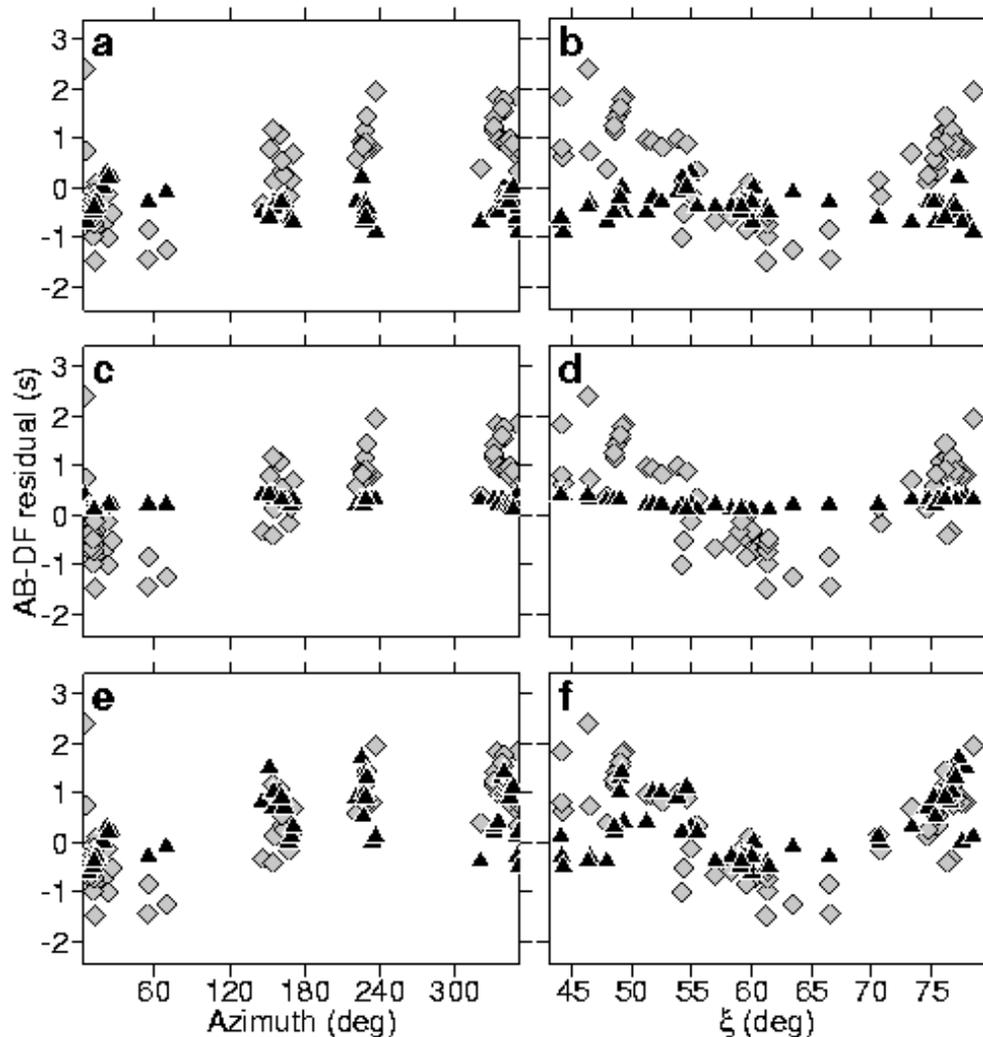
P-velocity anomaly (%)

Bréger et al., EPSL, 2000

Modèle tomographique
de Grand (1999)

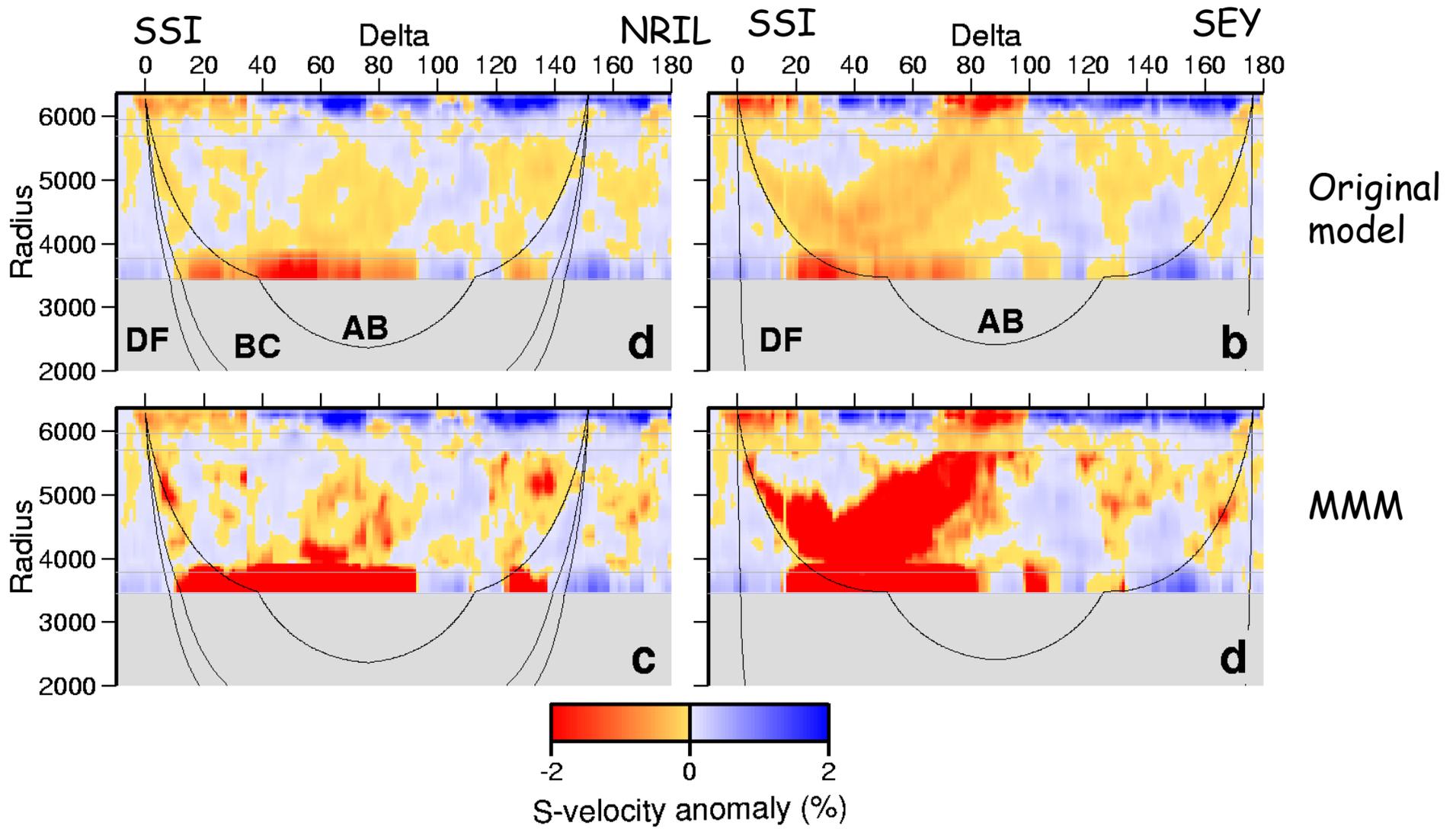
Modèle d'anisotropie
de Creager (1999)

Modèle MMM



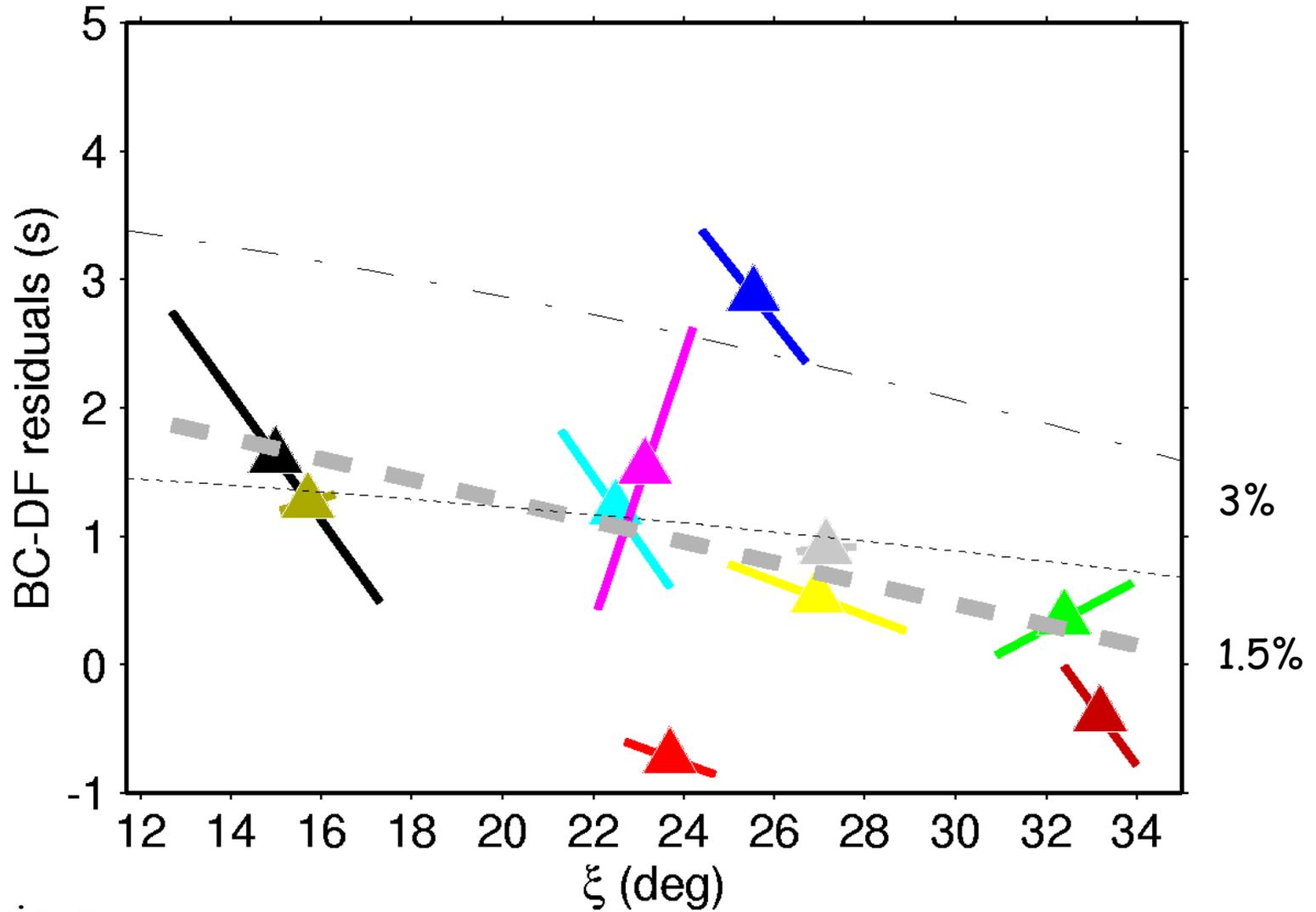
◇ Données des séismes des
Iles SSandwich

▲ Prédiction de modèles



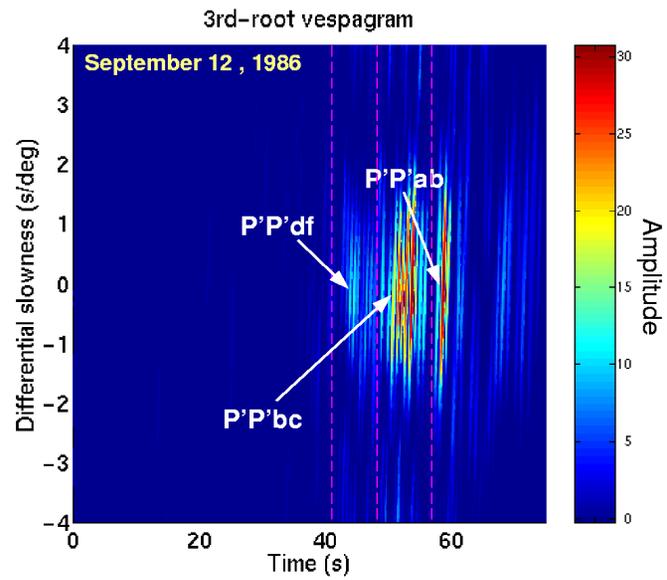
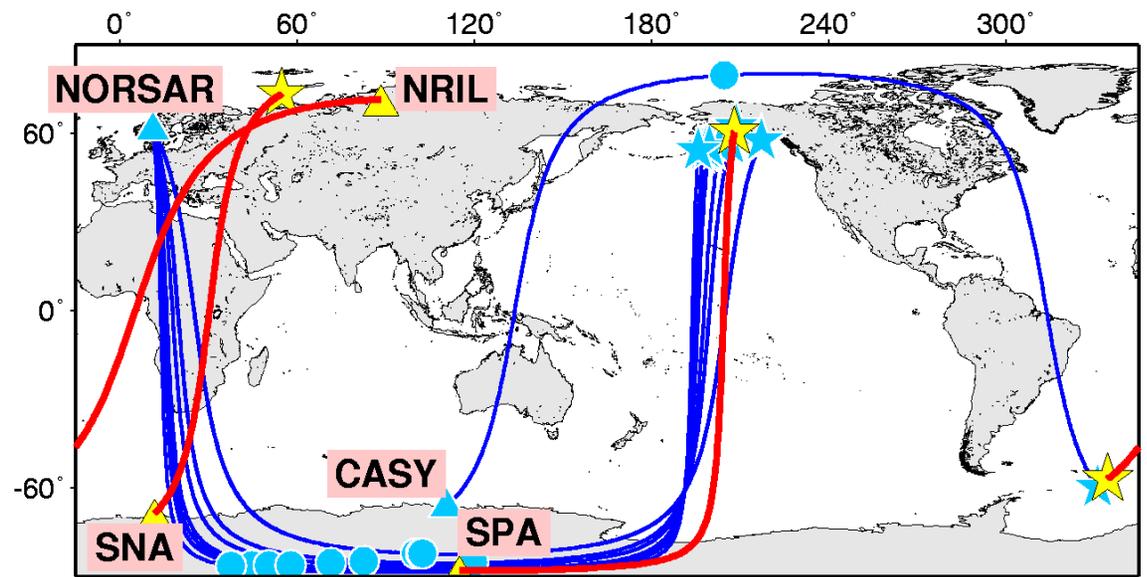
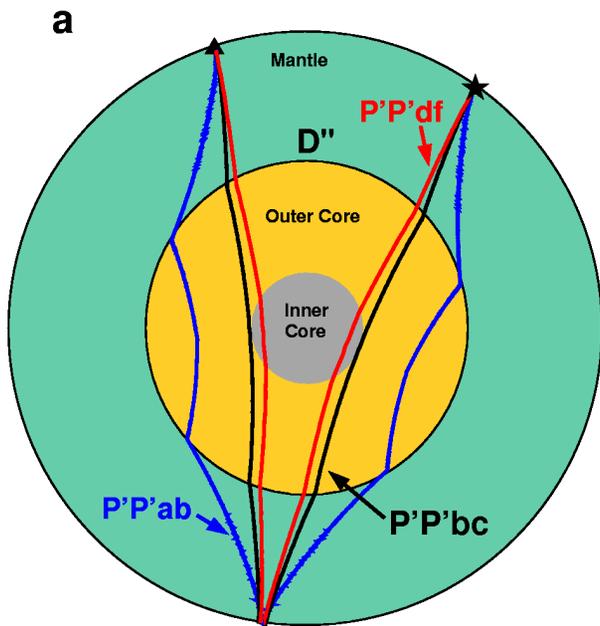
P

Résidus PKP(BC-DF) - données ISC-stations Hautes latitudes

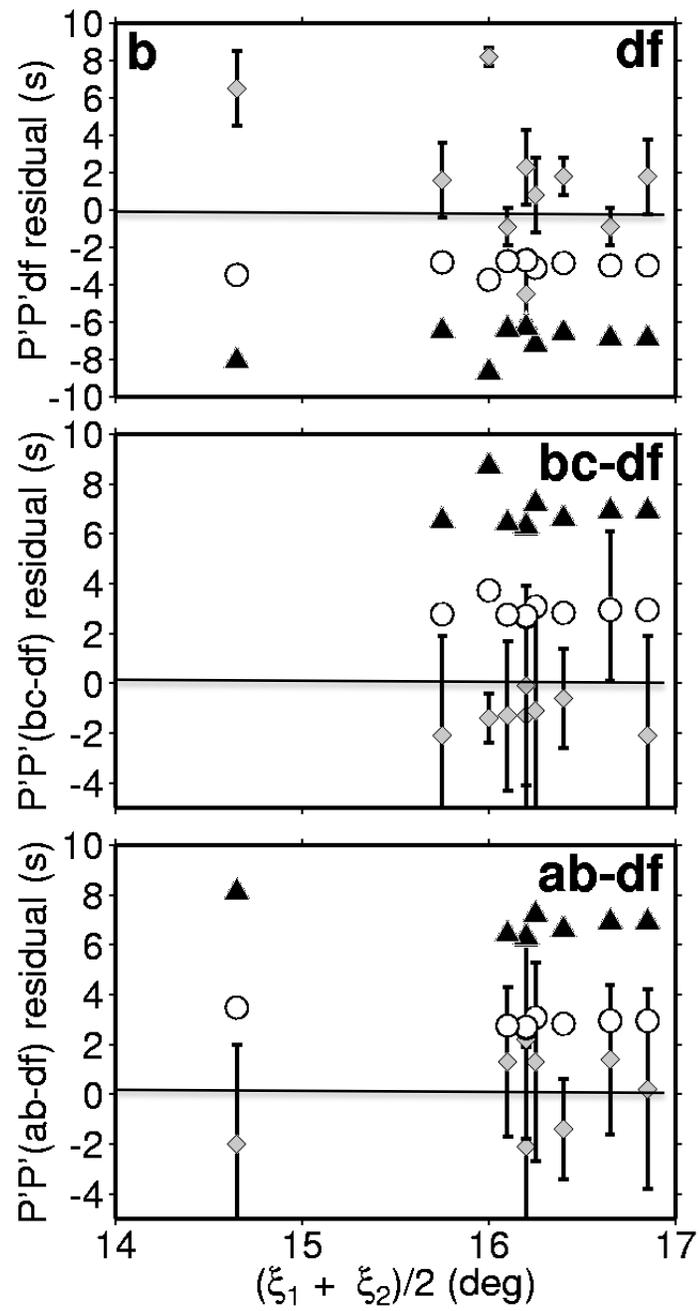


Lignes grises:
Prédictions modèles anisotropes:

Bréger et al., 1999



Bréger et al., 2002



○ 1% anisotropy

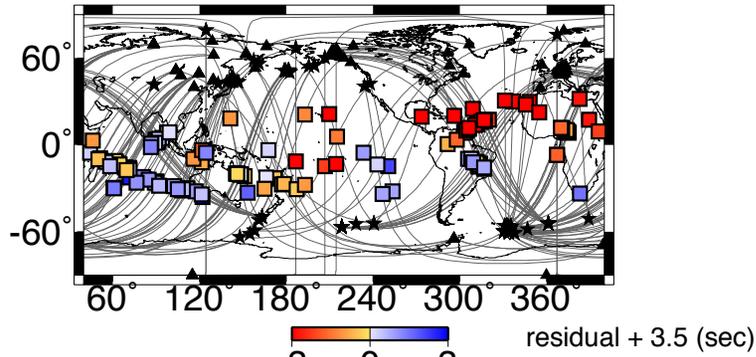
▲ 3% anisotropy

◇ data

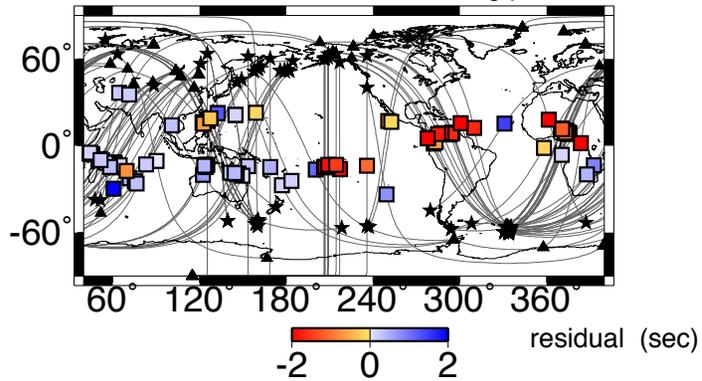
Bréger et al., 2002

Polar paths only $\xi < 40$ degrees

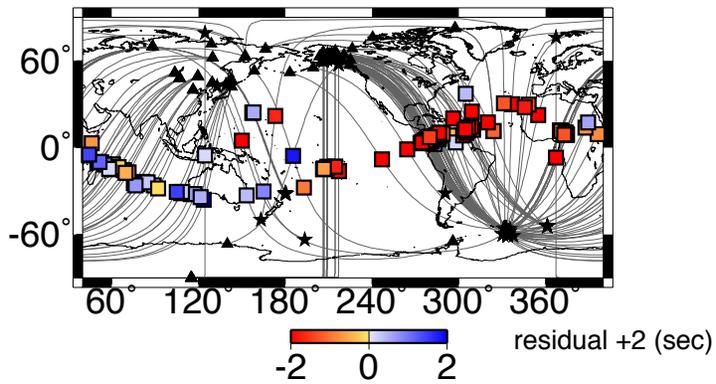
DF-AB residual at DF bottoming point



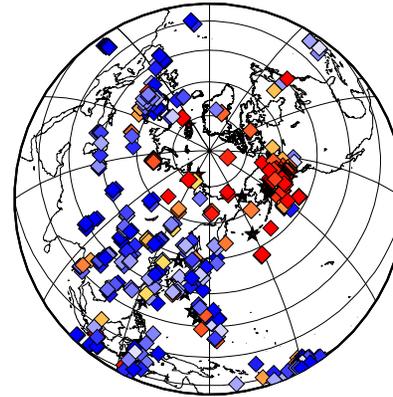
DF-BC residual at DF bottoming point



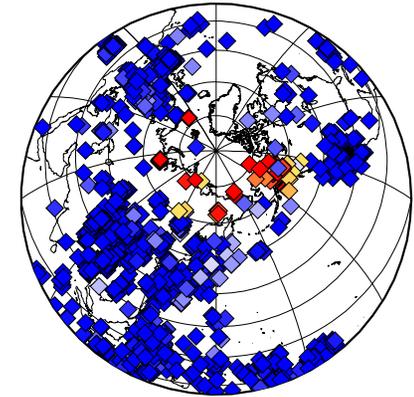
abs DF residual at DF bottoming point



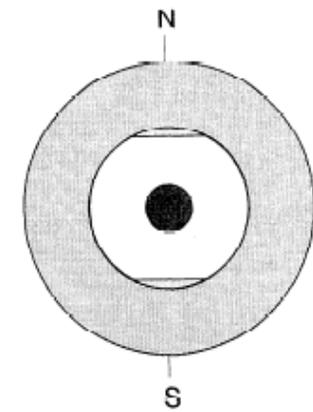
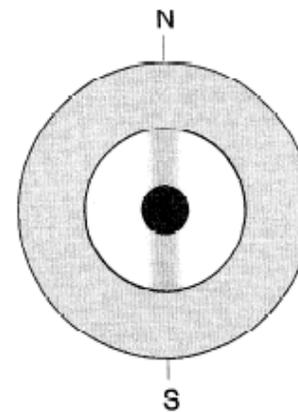
-2 0 2
DF residual +2 (sec)



-2 0 2
DF-AB residual +2.5 (sec)



Residuals plotted at ray entry point into the core



Residuals plotted at ray bottoming point

Romanowicz et al., 2006

L'écoulement dans le noyau liquide est influencé par la rotation de la terre:
La vorticité s'aligne avec l'axe de rotation (théorème de Proudman-Taylor:  coulement quasi-2D
La graine solide divise le noyau liquide en 3 régions:
-l'extérieur du cylindre tangent
-  l'intérieur:
les parties nord et sud

Bien observé experimentalement
Et dans les simulations numériques

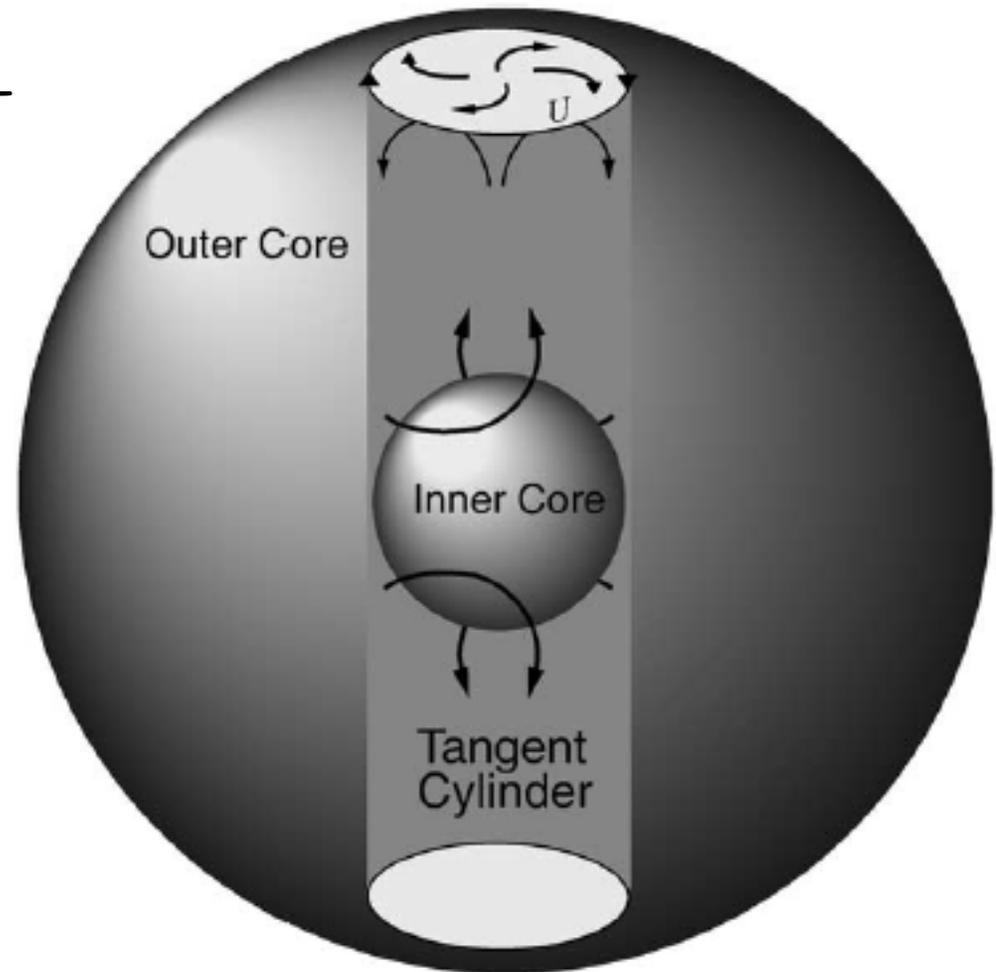
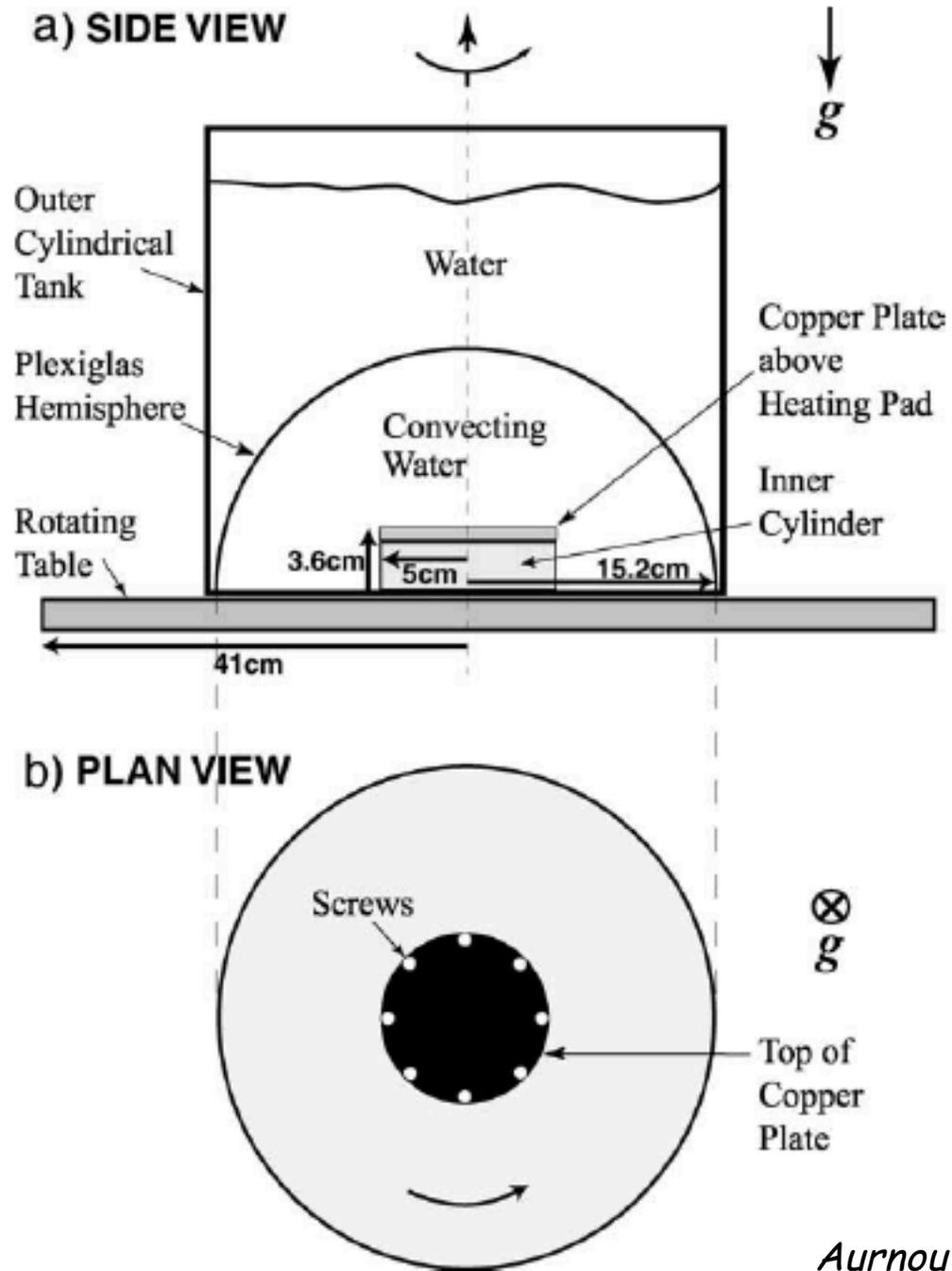
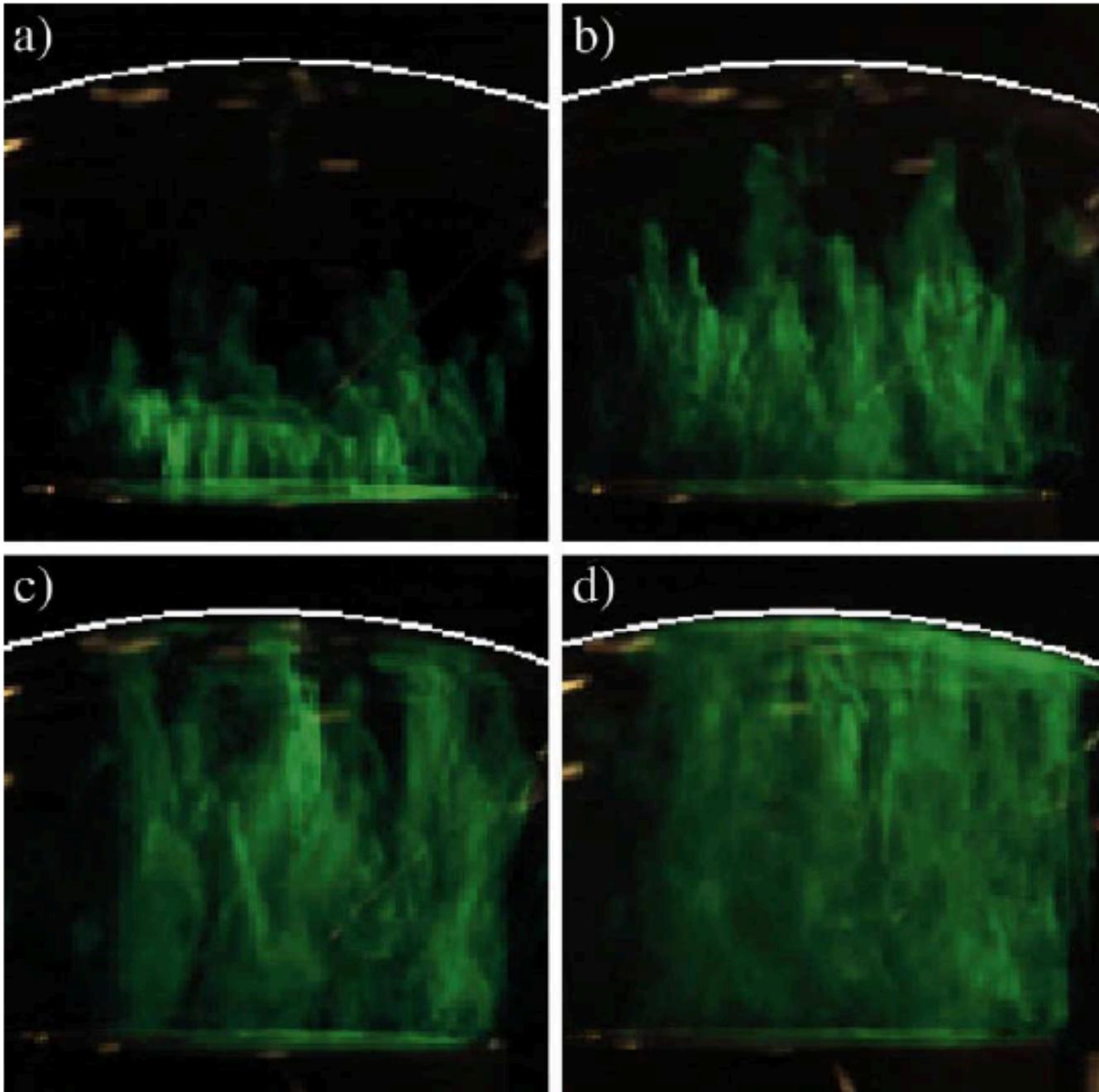


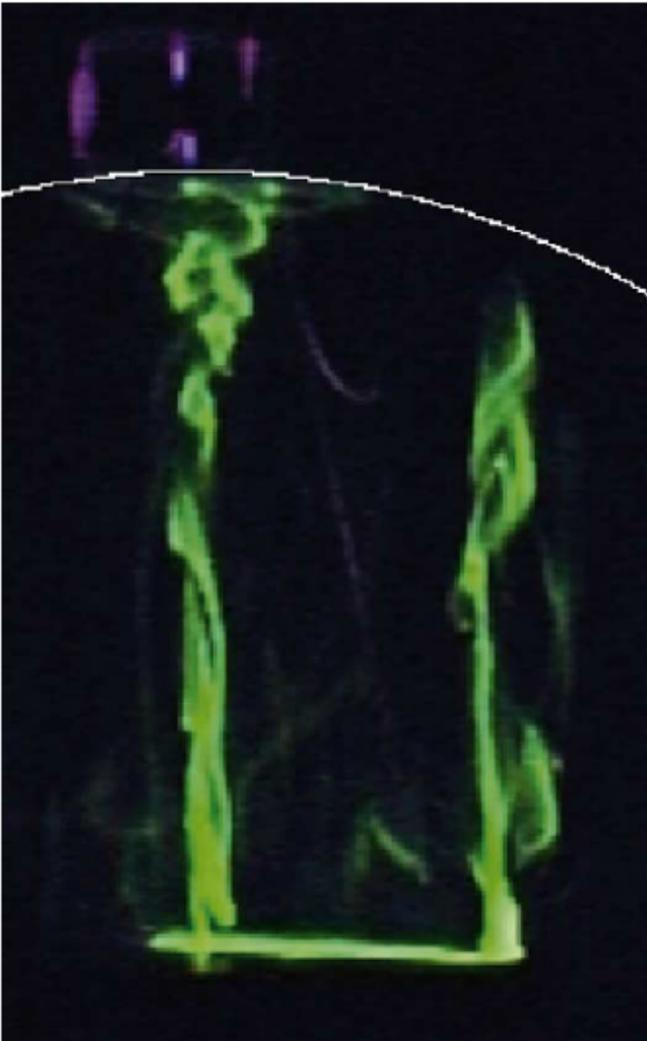
Fig. 1. Schematic of the Earth's core tangent cylinder region, including polar vortex associated with an azimuthal thermal wind.





Aurnou et al., 2003, EPSL

Vue de côté, peu
Après le début de la
convection:
Panaches hélicoidaux



Convection en panaches hélicoidaux vue du haut:
Peu d'échanges de matière entre l'intérieur et
l'extérieur

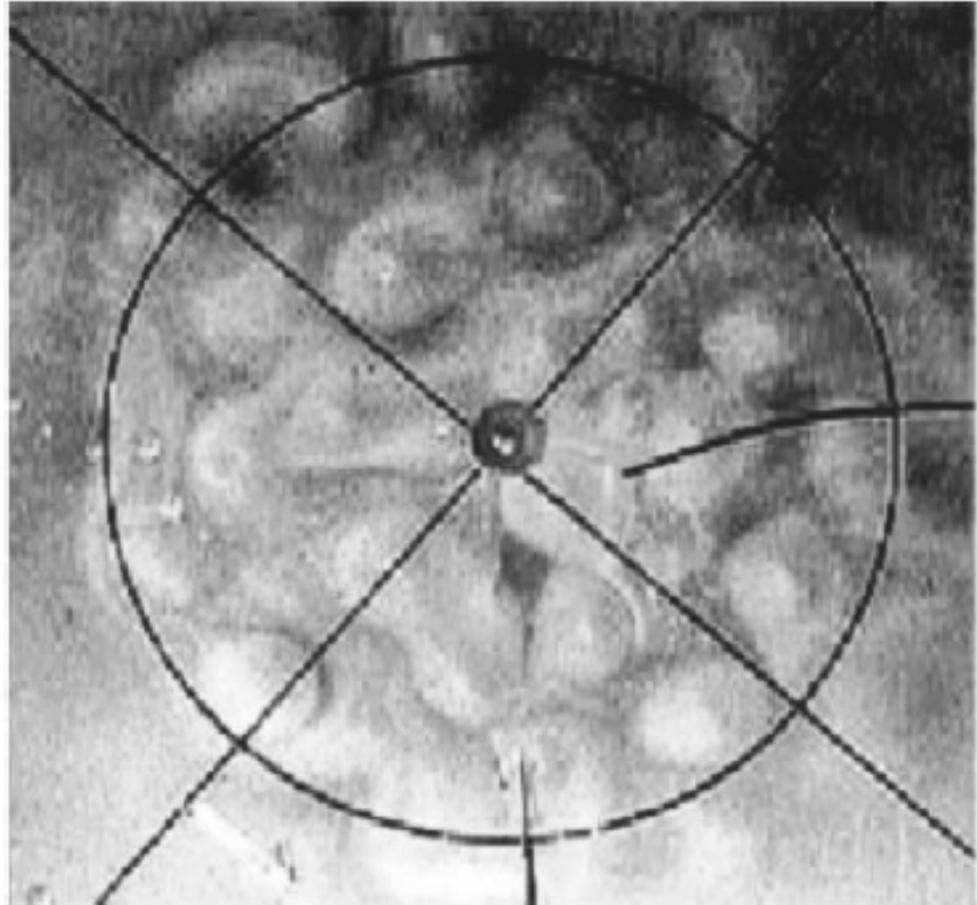
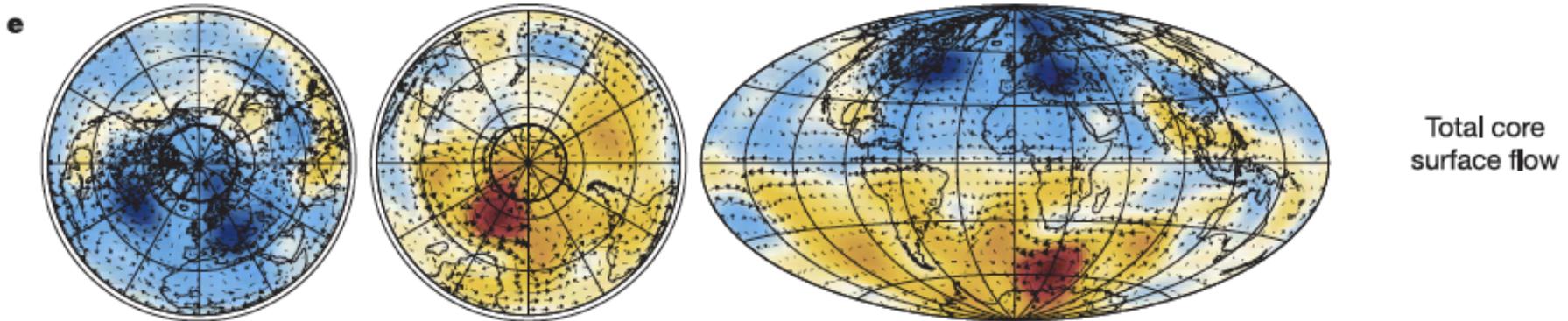


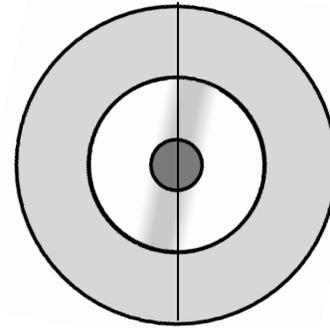
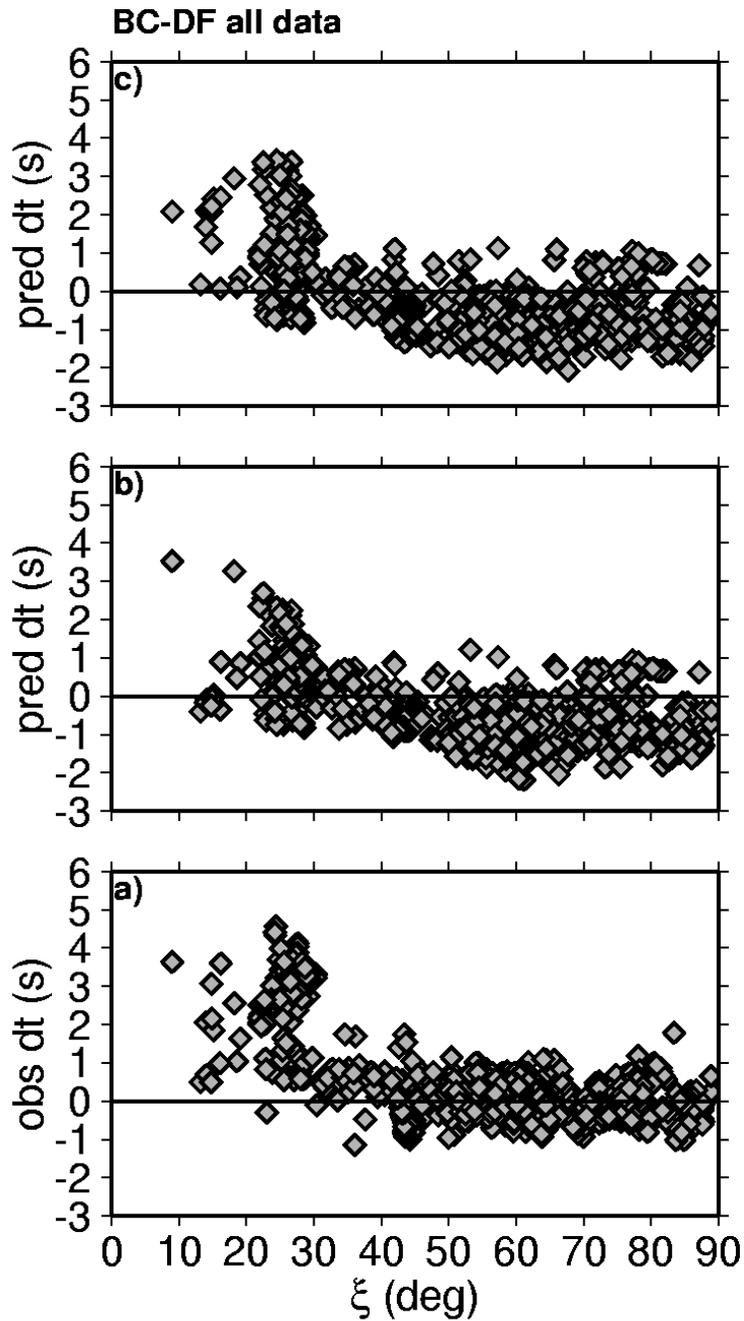
Fig. 9. Plan view image of helical plume convection
($Ra = 1.11 \times 10^9$; $Ek = 2.20 \times 10^{-5}$).

Aurnou et al., 2003, EPSL

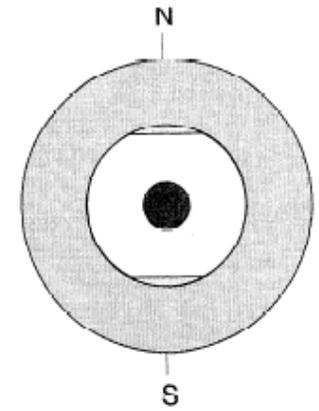
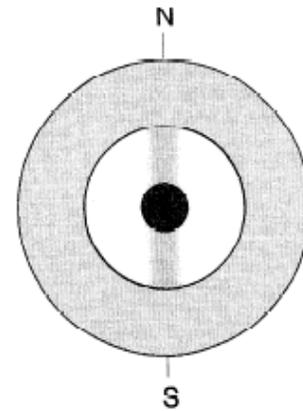
Ecoulement à la surface du noyau liquide déduit des données géomagnétiques
(satellites: Oersted, Magsat)



Modèle dhétérogénéité dans le "cylindre tangent": $\Delta V_p/V_p \sim$

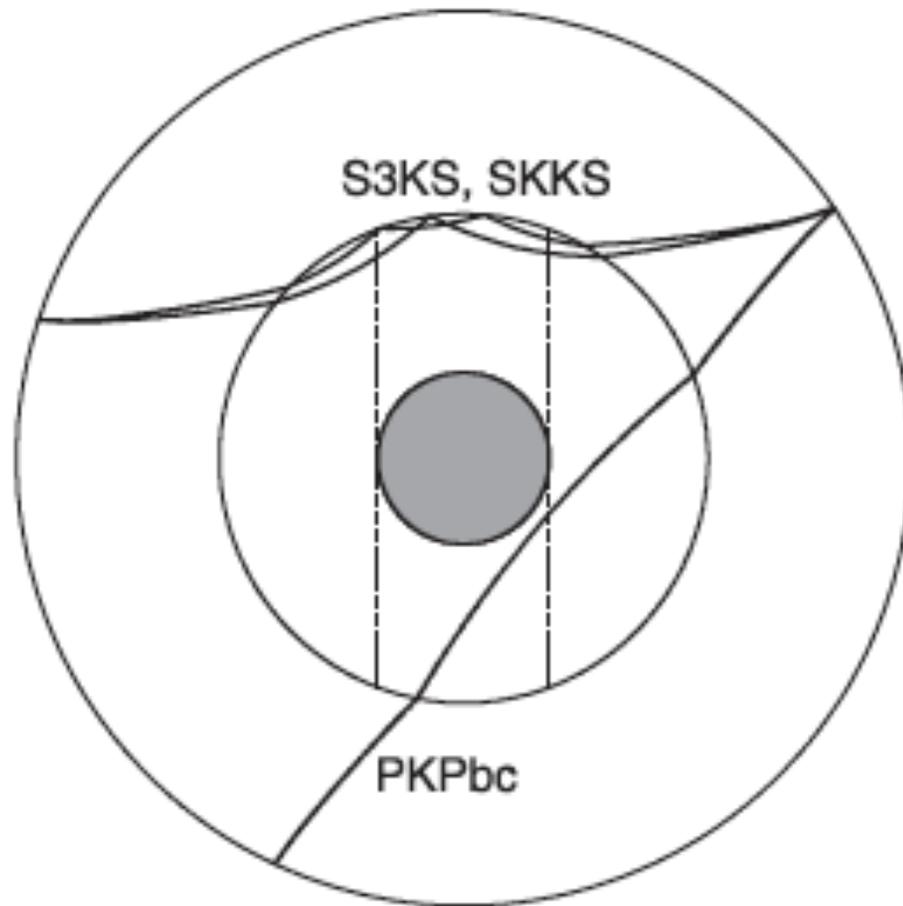


Axe: lat: 75°N,
Long: 110°E

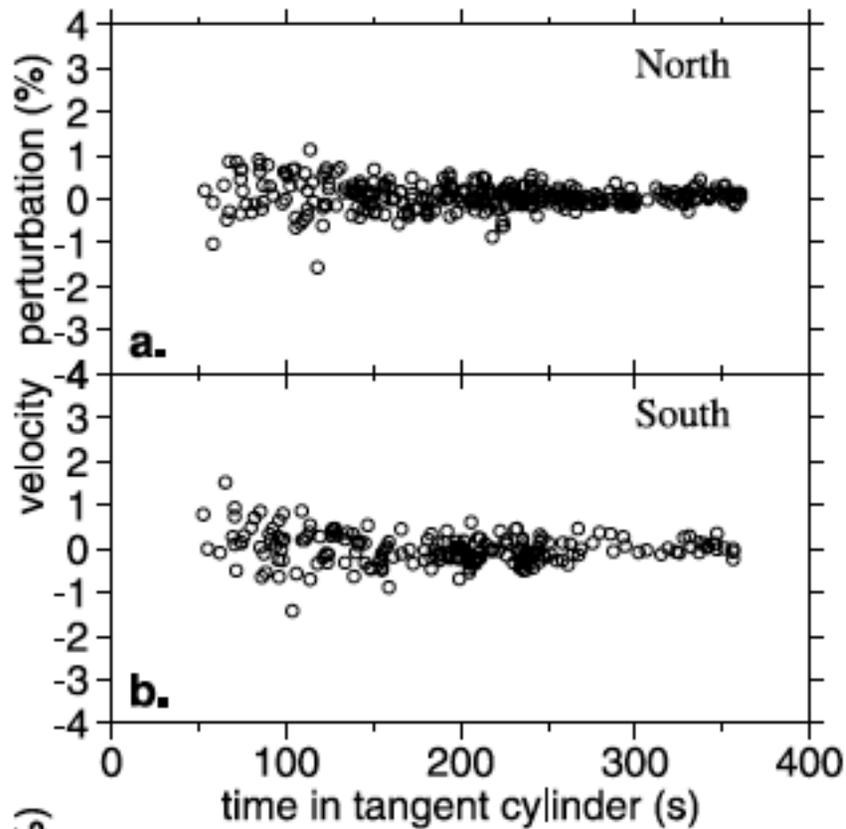


Observed BC-DF residuals

Test du modèle avec structure dans le cylindre tangent

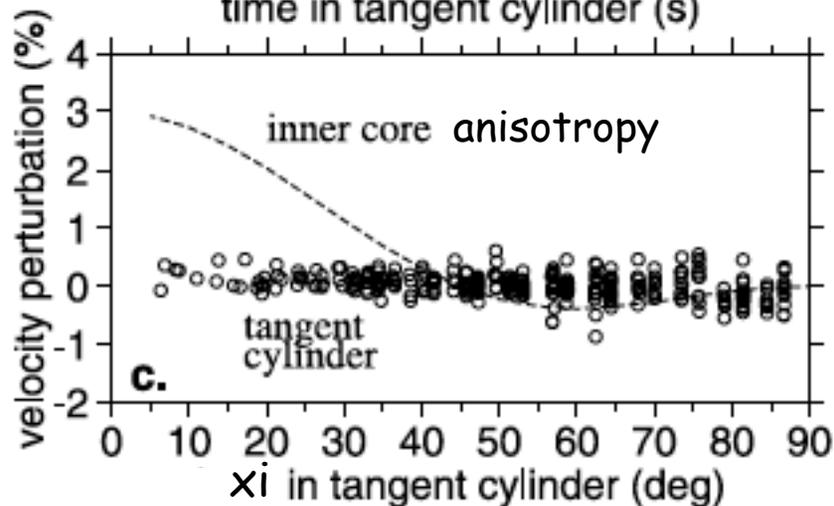


Anomalies de vitesse
 dans le cylindre
 tangent pour PKP(BC):
 Séparé en partie nord
 Et sud



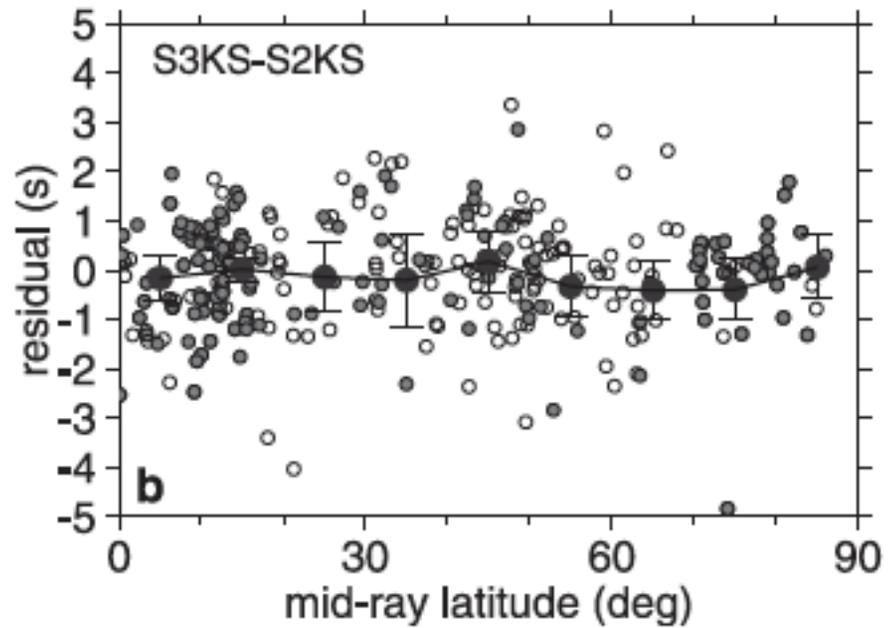
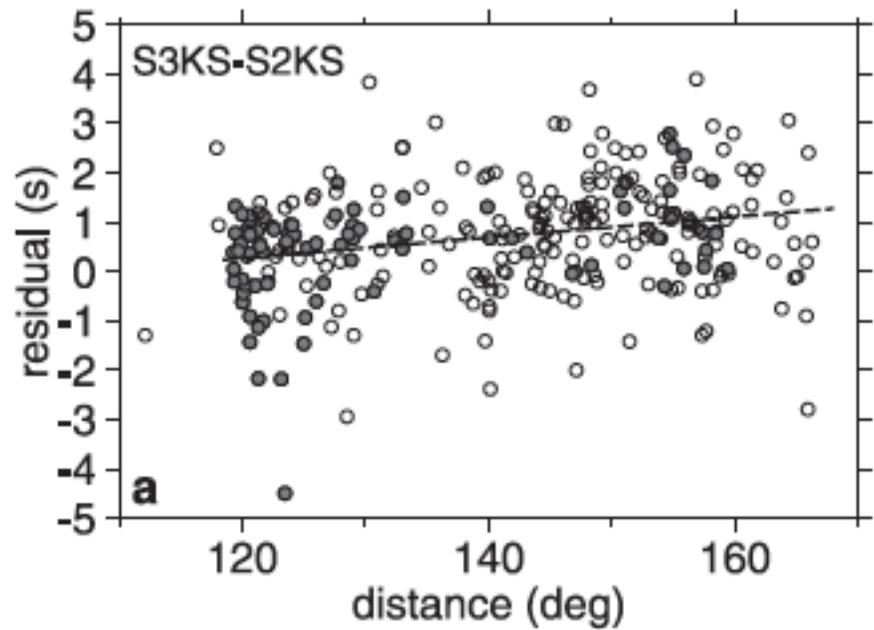
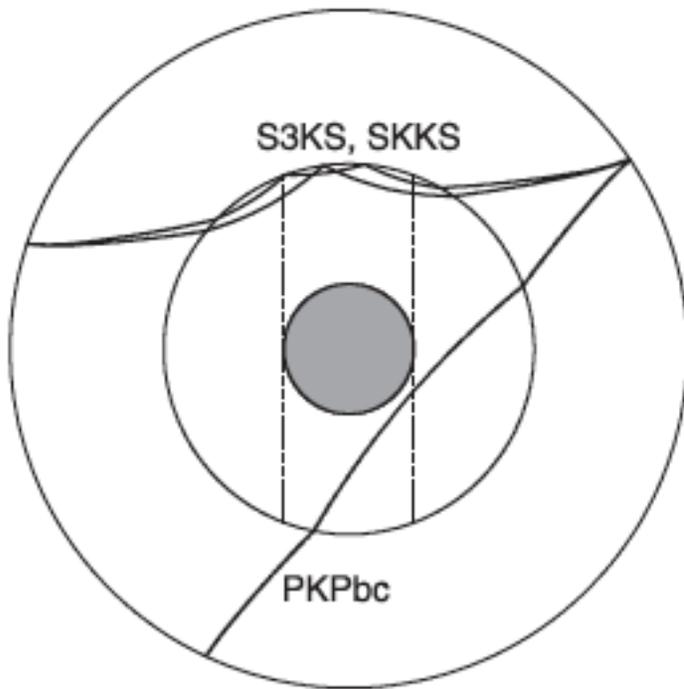
Pas de corrélation!

 Anisotropie
 pouvant
 expliquer les
 données PKP(DF)



Pas d'anisotropie
 détectée dans le
 cylindre tangent

Souriau, 2003



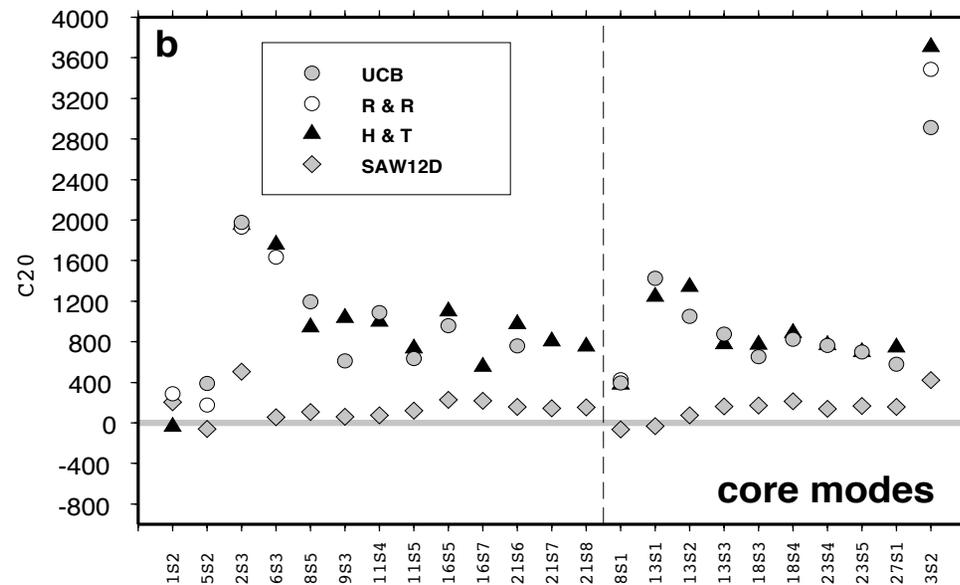
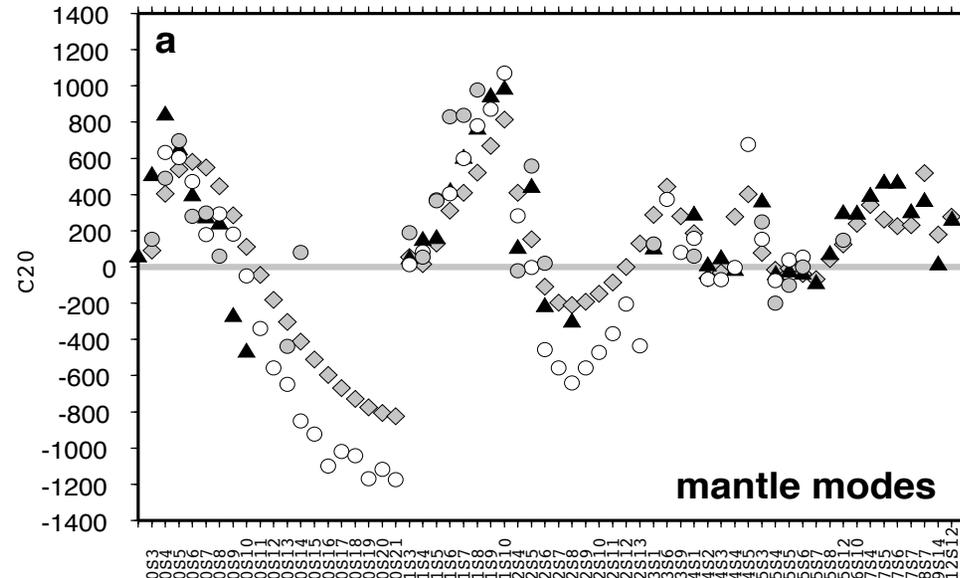
Splitting en C20:

◆ Prédiction pour modèle du manteau SAW12D (Li and Romanowicz, 1996)

Trois classes de modes:

- Modes du manteau
- Modes du noyau liquide
- Modes de la graine

C20 data spheroidal modes



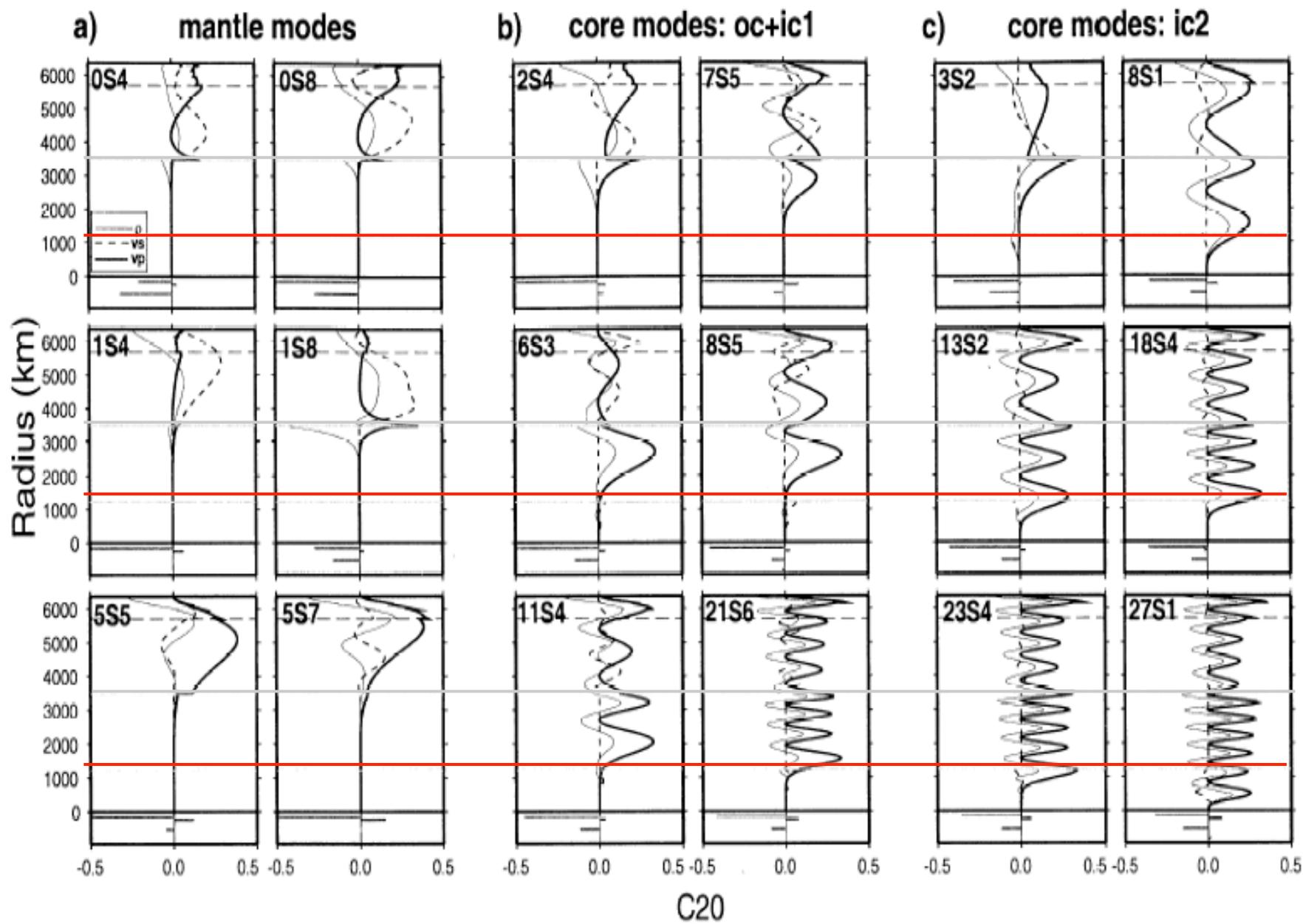


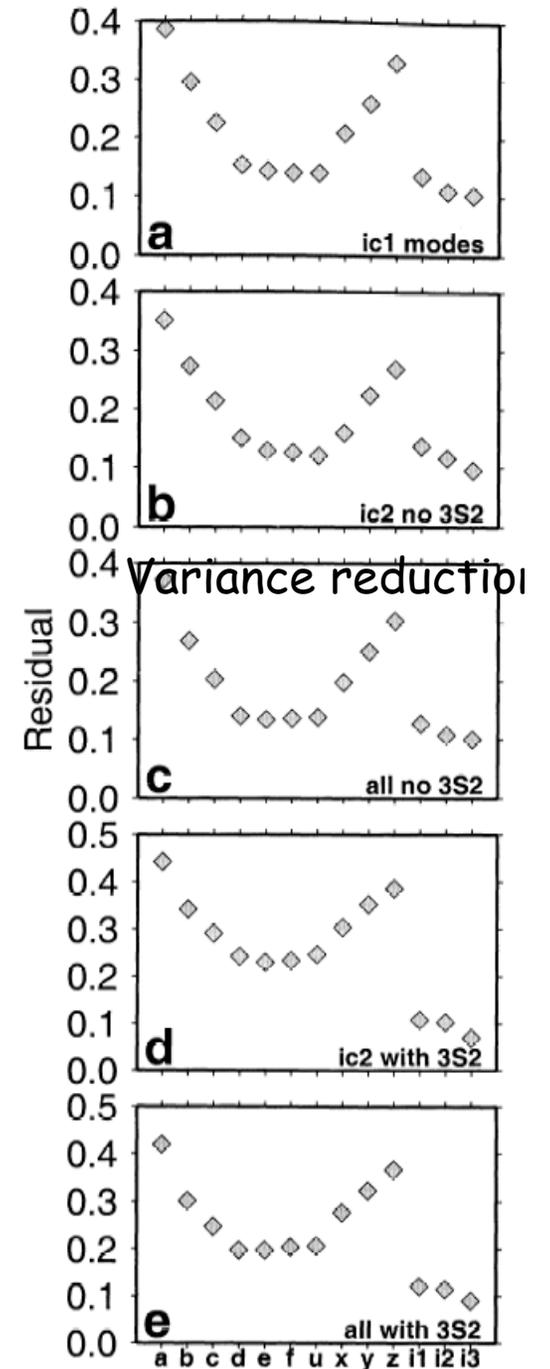
Table 2. Nomenclature of Models Considered in This Study.

Model Index	Mantle	Outer Core	Inner Core	Number of Parameters in the Core
a	yes	no	no	0
b	yes	1 layer: 2891-3200 km	no	2
c	yes	1 layer: 2891-3500 km	no	2
d	yes	1 layer: 2891-4000 km	no	2
e	yes	1 layer: 2891-4500 km	no	2
f	yes	1 layer: 2891-5100 km	no	2
u	yes	4 layers: 2891-3500 km 3500-4000 km 4000-4500 km 4500-5100 km	no	8
v	yes	6 layers: 2891-3191 km 3191-3491 km 3491-3891 km 3891-4291 km 4291-4691 km 4691-5150 km	no	12
x	yes	1 layer: 3500-5100 km	no	2
y	yes	1 layer: 4000-5100 km	no	2
z	yes	1 layer: 4500-5100 km	no	2
i1	yes	no	anisotropy ^a	3
i2	yes	no	anisotropy ^b	15
i3	yes	no	anisotropy ^c	44

^aConstant transverse isotropy.

^bDepth dependent transverse isotropy.

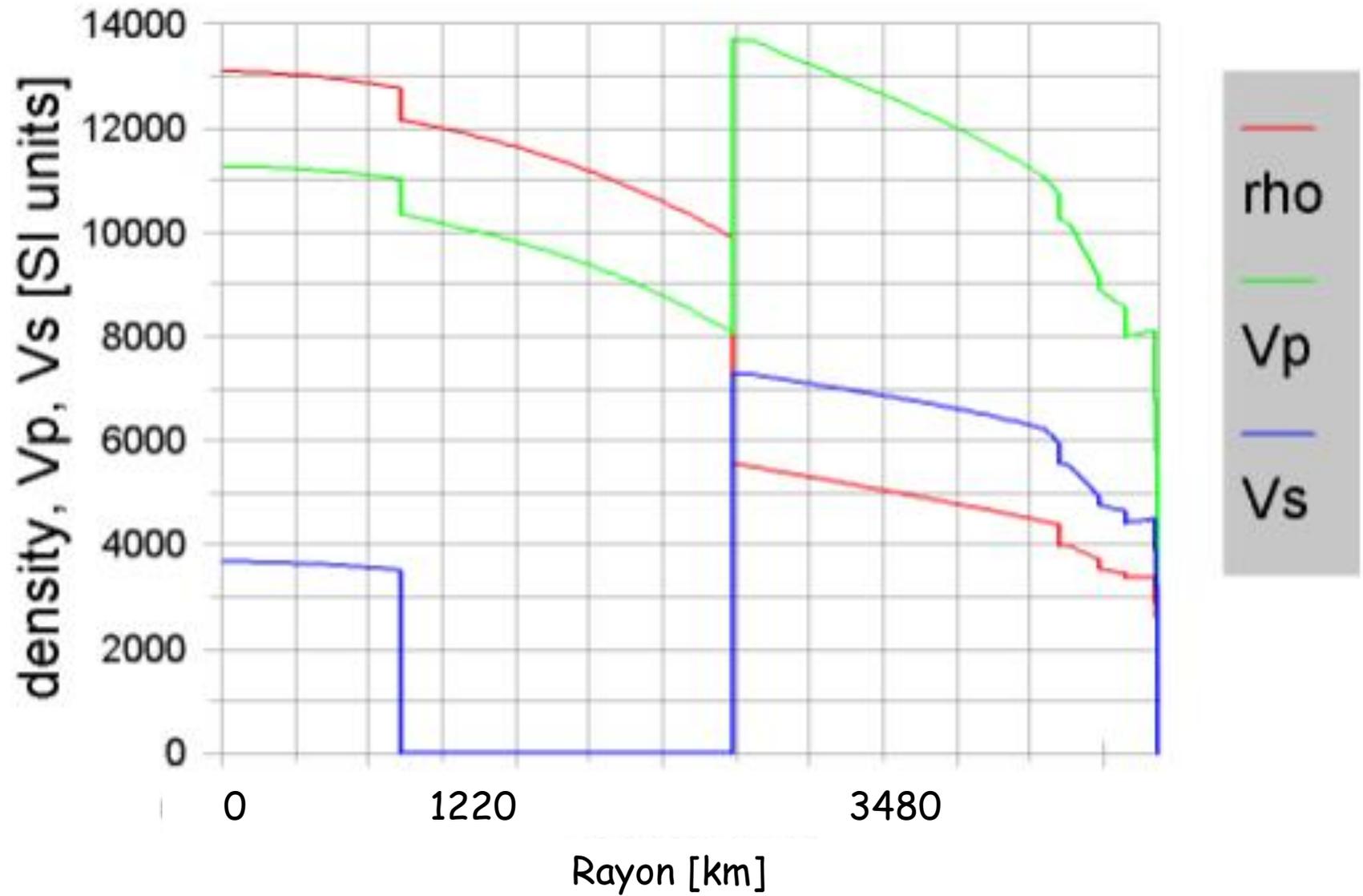
^cGeneral axisymmetric anisotropy.



Le noyau liquide

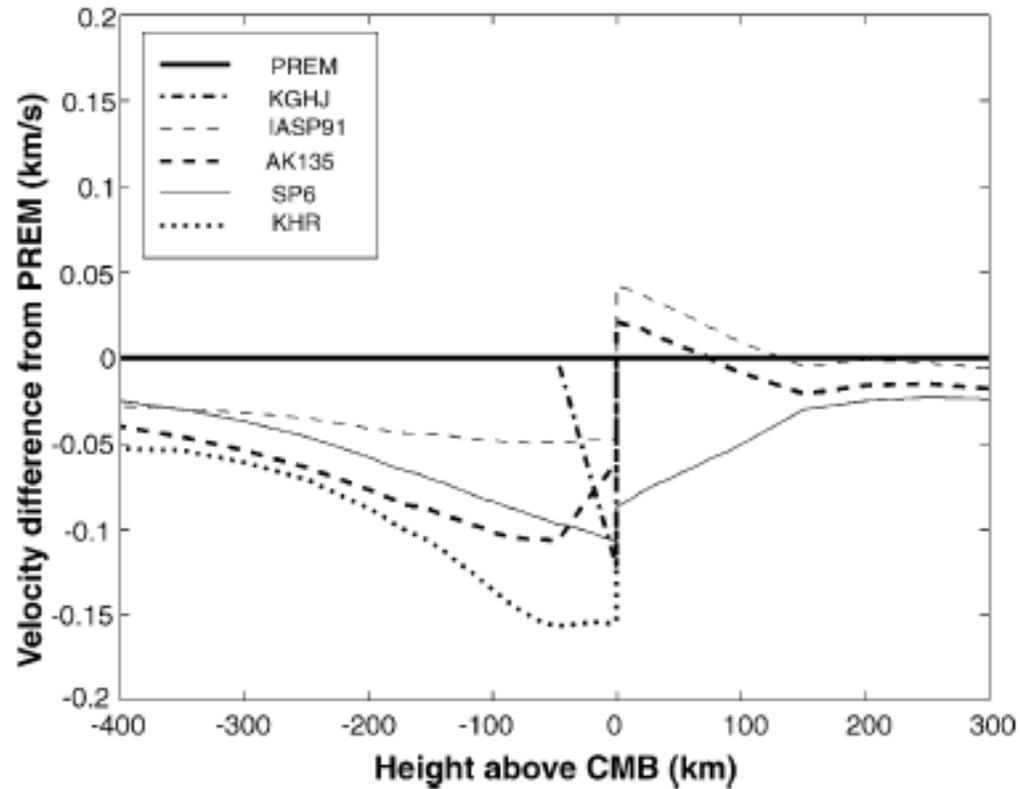
- Faible stratification (e.g. profil du modèle) sauf peut-être près de la CMB et de l' ICB
 - Couche "éponge" juste au dessus de l'ICB
 - Gradient de vitesses faible dans les derniers 100-150 km du noyau liquide
 - Sert de guide pour les ondes diffractées autour de l'ICB (peu atténuées)
 - Sans doute une couche limite diffusive due à la convection chimique
 - Rigidité non nulle est possible dans cette couche (Mochizuki and Ohminato, 1989)
 - Variations hémisphériques (Yu et al., 2005): croissance asymétrique de la graine?
 - Couche de rigidité non nulle juste sous la CMB:
 - Difficile à étudier car non échantillonnée par les ondes PKP
 - Les ondes SmKS sont affectées par la structure du
 - Plusieurs études indiquent des vitesses un peu plus lentes (alliage de fer enrichi d'éléments légers?)
 - Les ondes PnKP ne l'exigent pas.
 - Couche très fine (quelques centaines de mètres avec $\mu \sim 0.6-0.8$ km/s pour expliquer les observations de nutation (Buffett et al., 2001),
- Variations latérales dans le noyau liquide peu probables
 - viscosité proche de celle de l'eau $\sim 6 \times 10^{-3}$ Pa-s
 - Reste la question du cylindre tangent ou des calottes polaires favorisées par la rotation de la terre.

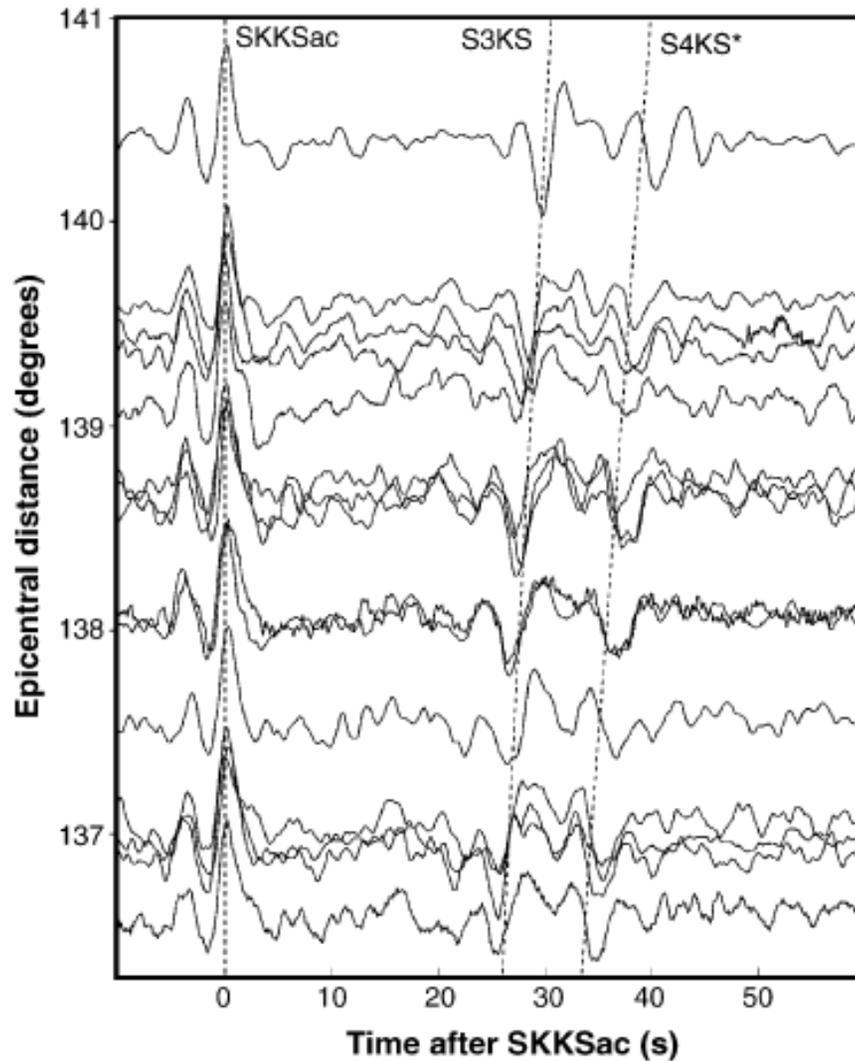
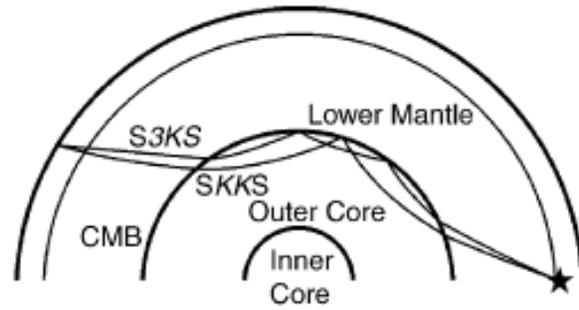
PRELIMINARY REFERENCE EARTH MODEL (PREM)



Dziewonski and Anderson, 1981

Couche limite en haut du noyau?





Couche fine de 12km,
de vitesses plus rapide
que PREM améliorent
la réduction de variance

Eaton and Kendall, 2006

Minéralogie du noyau

Les grandes questions

- Propriétés du fer pur
 - Point de fusion du fer: donne la limite supérieure pour la température de l'ICB
 - Jusqu'en 1980: incertitude de 5000K à la pression de l'ICB (320 GPa): basées sur des extrapolations depuis les pressions faibles (20GPa).
- Structure cristalline du fer à hautes P et T
 - propriétés élastiques et anisotropie, rhéologie
- Quels sont les éléments légers dans le noyau et dans la graine?
 - Quelle est leur influence sur le point de fusion, les propriétés élastiques et l'anisotropie dans la graine
- Quels sont les effets du nickel ?

ELASTICITY AND CONSTITUTION OF THE EARTH'S INTERIOR*

BY FRANCIS BIRCH

Harvard University, Cambridge, Massachusetts

(Received January 18, 1952)

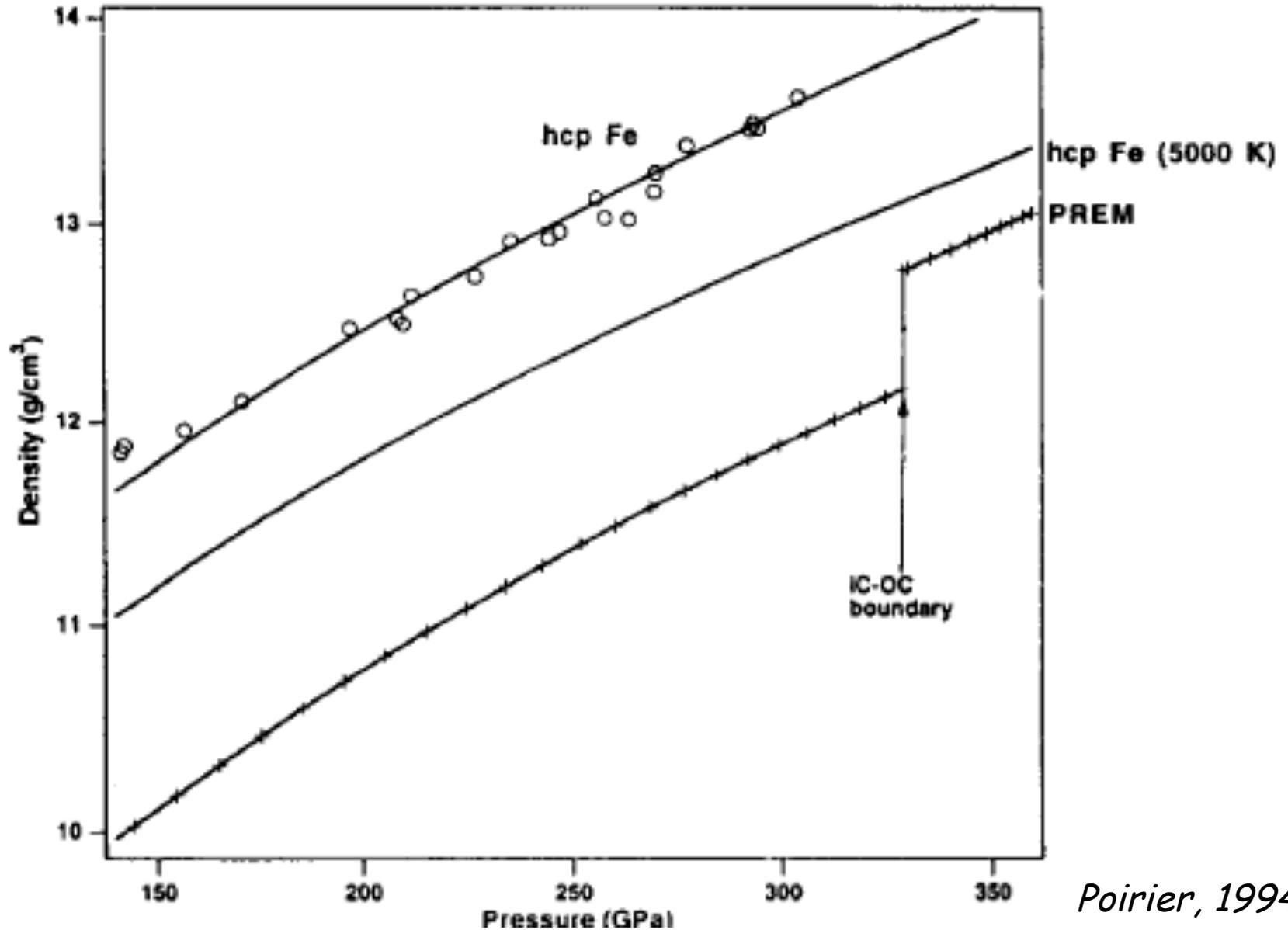
→ Examine les modèles sismiques de Jeffreys et Bullen dont il extrait le « paramètre sismique » :

$$\Phi = K/\rho$$

→ Noyau externe constitué principalement de fer avec une petite fraction d'éléments légers (C? Si?)

- Confirmation Birch: 1961, 1964 - Densité du noyau externe inférieure de 10% à celle du fer pur aux pressions et températures du noyau, et le paramètre sismique est plus élevé que celui du fer
 - Éléments légers: O, Si, S.

Hcp iron density versus pressure - comparison with PREM



From in situ measurements

Poirier, 1994
D'après Badding et al., 1991

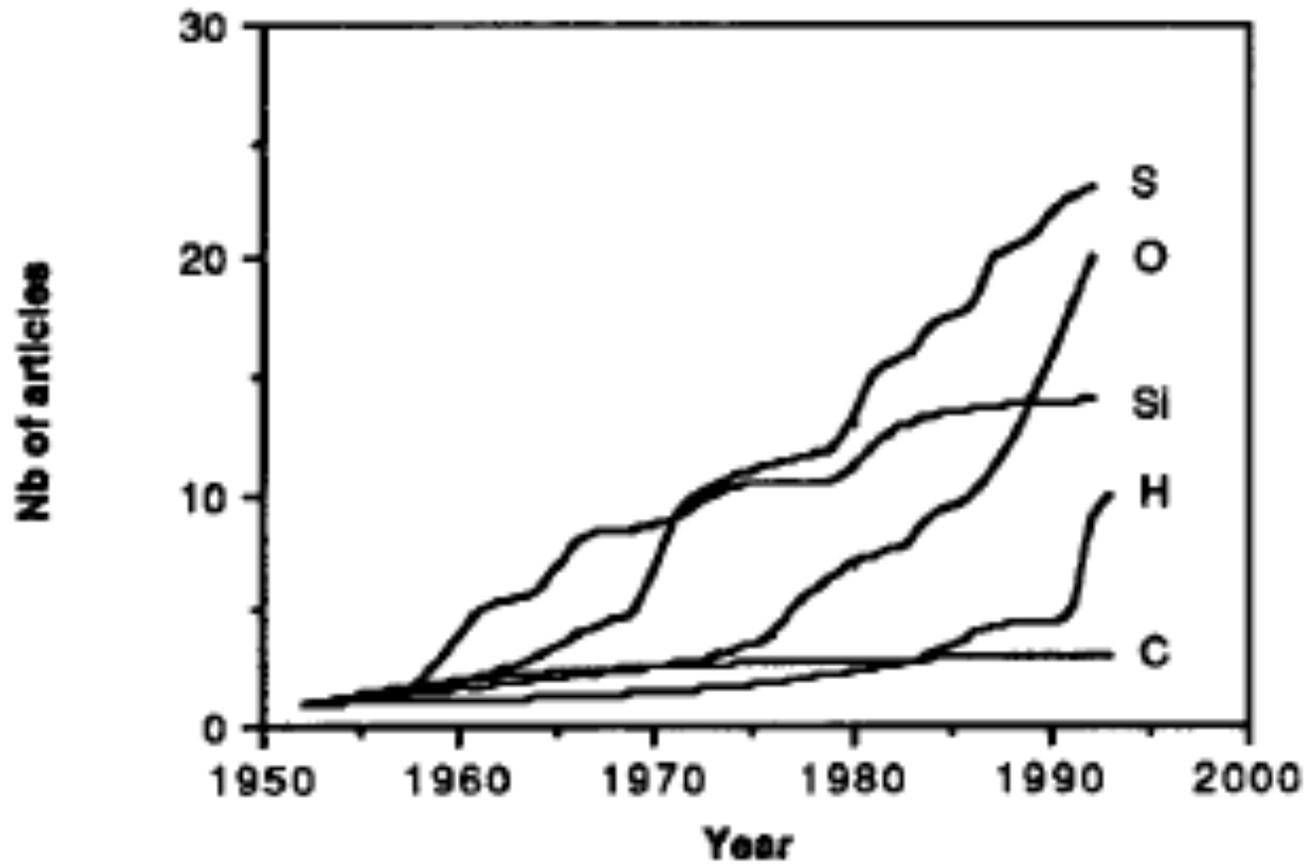
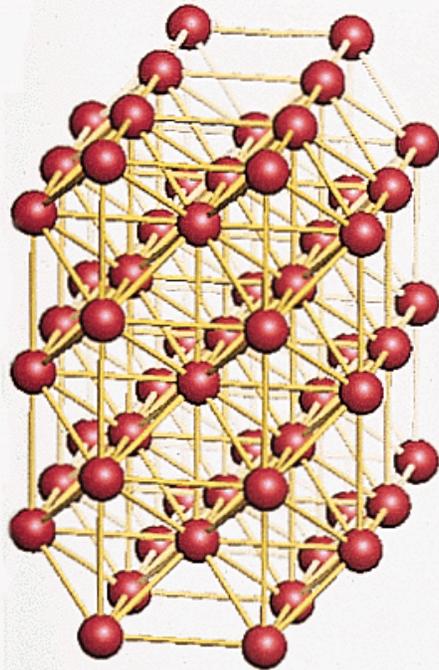


Fig. 2. Cumulative number of papers on light elements in the core, as a function of publication date.

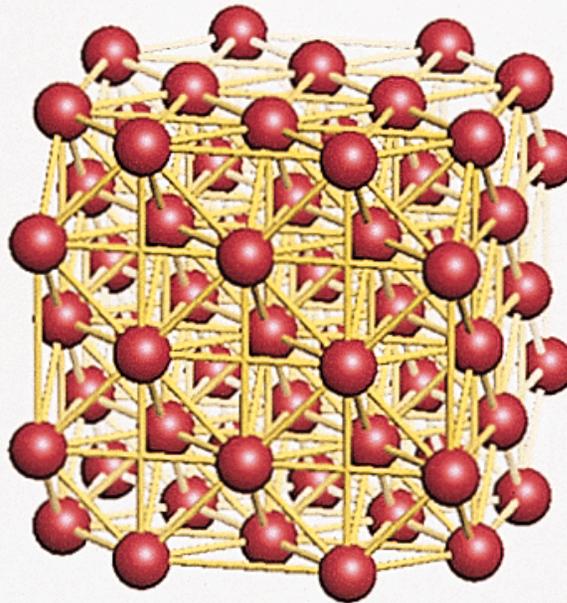
Les phases du fer - bien connues jusqu'à $P \sim 50 \text{ GPa}$

bcc



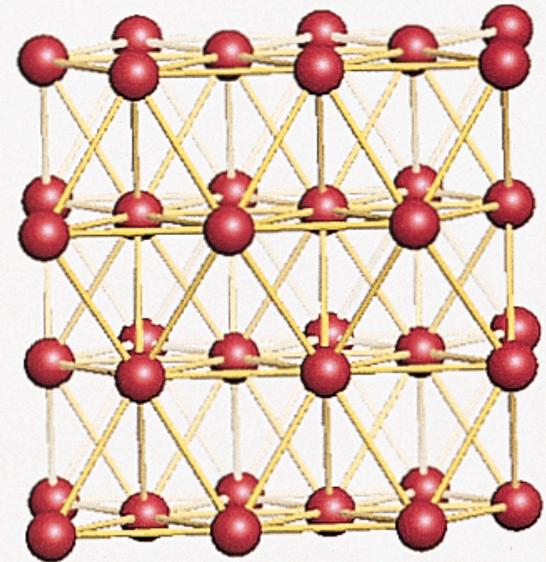
Stable à P et T ambiantes

fcc



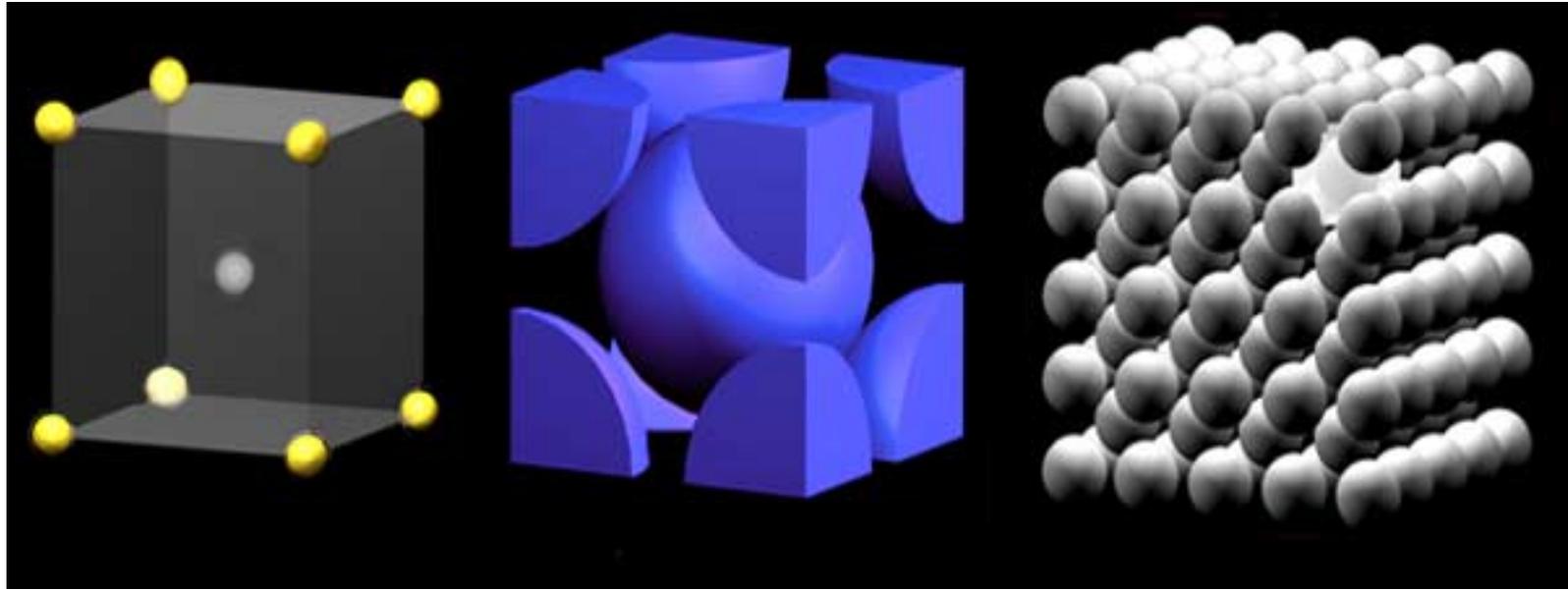
Stable à haute P et basse T

hcp

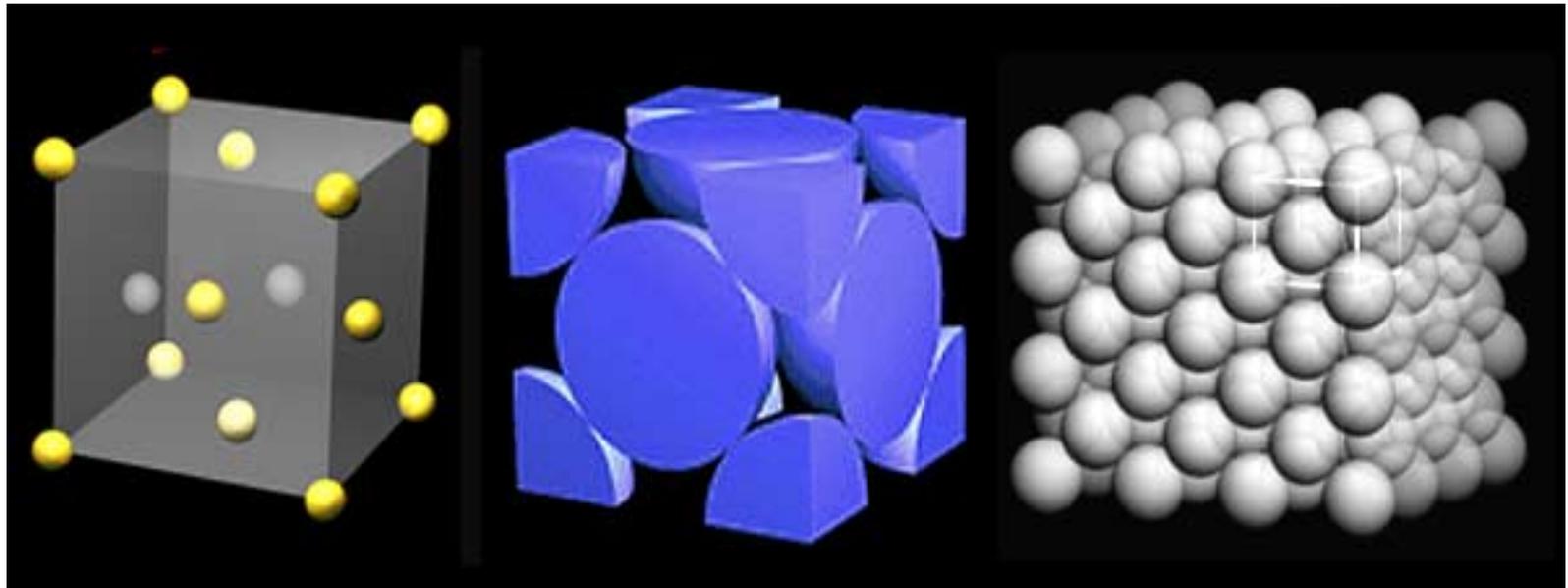


Stable à haute T et basse P

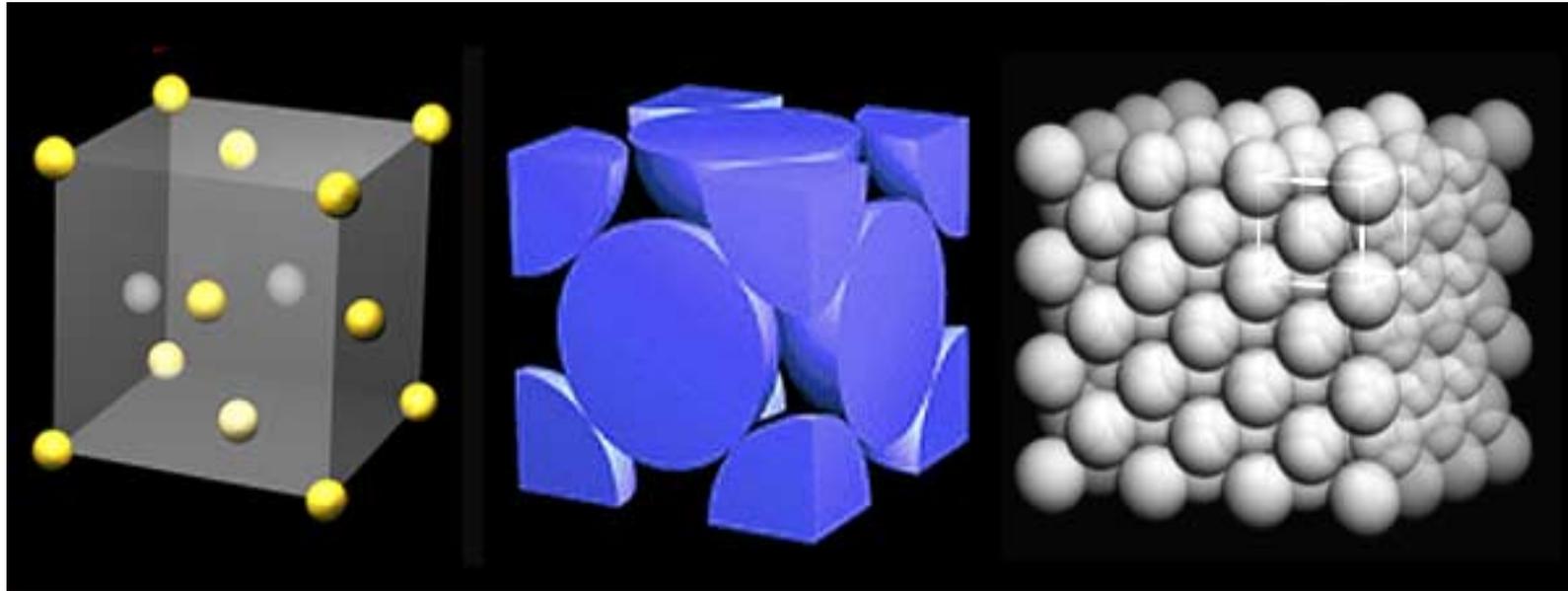
Structure BCC



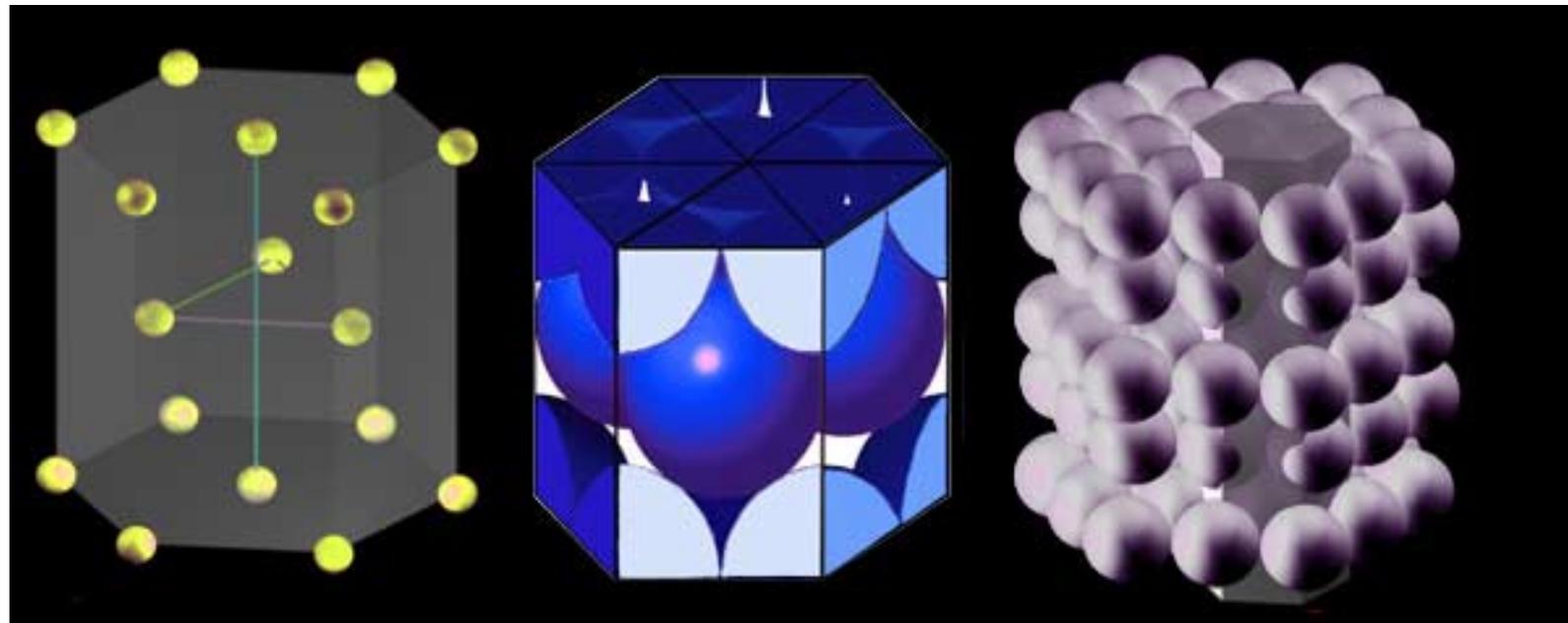
Structure FCC



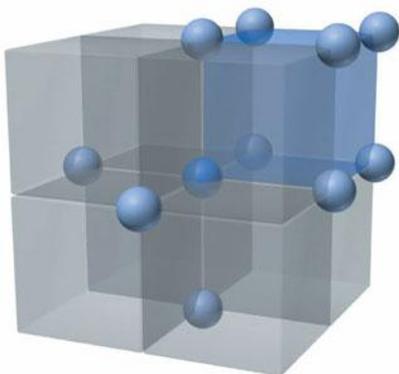
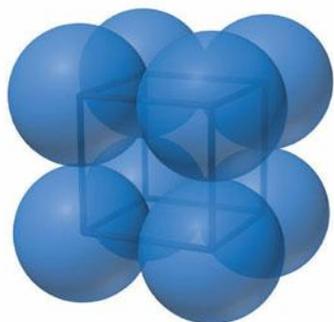
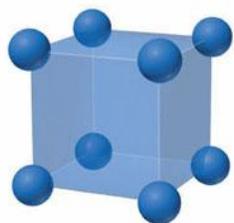
Structure FCC



Structure HCP



Simple cubic



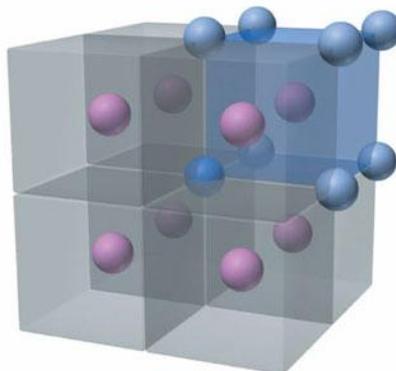
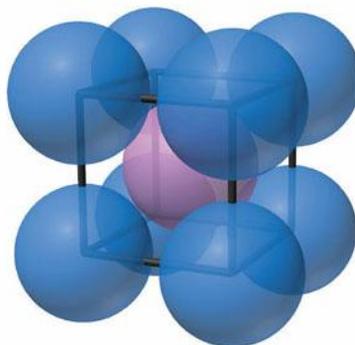
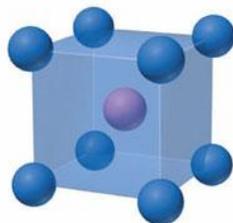
Coordination number = 6

$\frac{1}{8}$ atom
at 8 corners



Atoms/unit cell = $\frac{1}{8} \times 8 = 1$

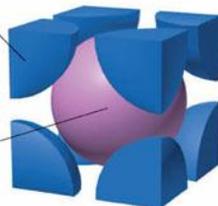
Body-centered cubic



Coordination number = 8

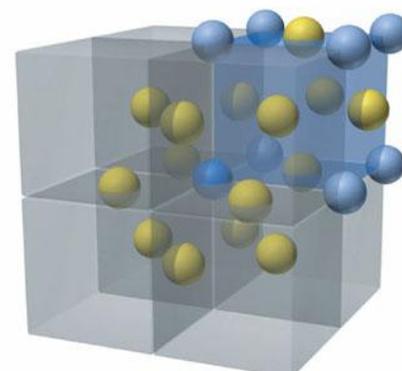
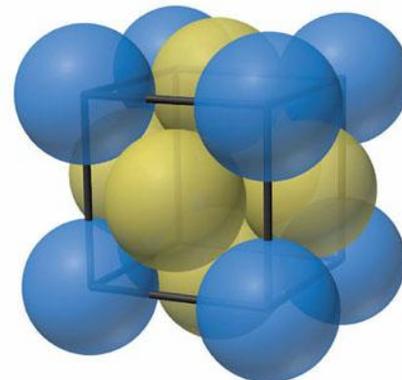
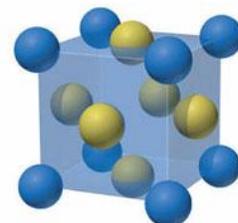
$\frac{1}{8}$ atom
at 8 corners

1 atom
at center



Atoms/unit cell = $(\frac{1}{8} \times 8) + 1 = 2$

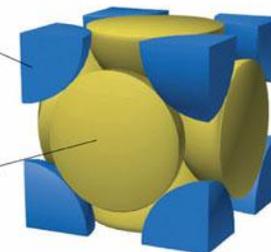
Face-centered cubic



Coordination number = 12

$\frac{1}{8}$ atom
at 8 corners

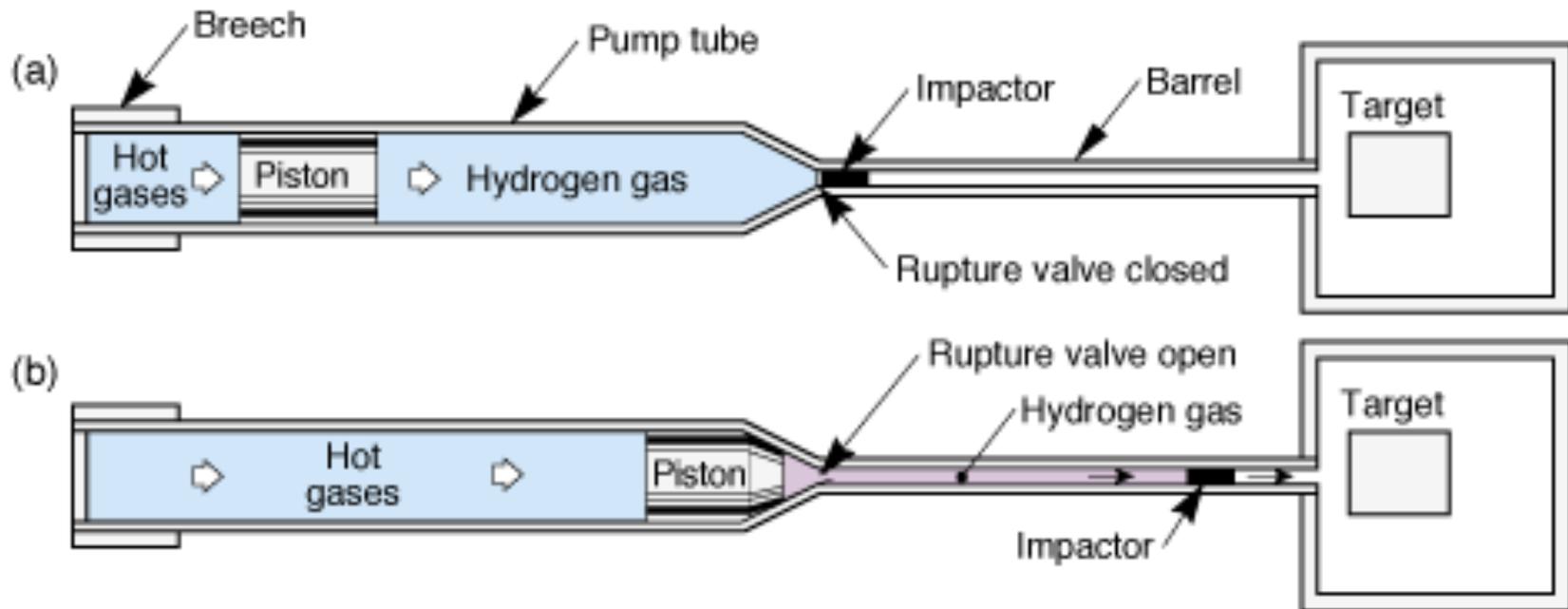
$\frac{1}{2}$ atom
at 6 faces



Atoms/unit cell = $(\frac{1}{8} \times 8) + (\frac{1}{2} \times 6) = 4$

Les approches expérimentales et théoriques

- Mesures dynamiques par ondes de choc et Hugoniot
- Mesures statiques dans l'enclume de diamant associé aux analyses par radiations synchrotron (diffraction ondes X).
- Calculs théoriques "ab initio"



Canon de LLNL

Mesure précise de la température de l'échantillon choqué reste difficile
 On suppose que les conditions d'équilibre sont atteintes
 On suppose que les contraintes sont hydrostatiques: vérifié à basse pression
 par comparaison avec les expériences statiques

- Expériences d'onde de choc:
 - Servent à déterminer l'équation d'état aux hautes pressions et températures ($\rho(T, P)$). On envoie un projectile à vitesse constante u_p sur un échantillon à des conditions initiales prédéterminées (ρ_0, T_0, P_0).
 - L'impact engendre une onde de choc qui se propage à une vitesse $u_s > u_p$
 - La compression due au choc porte l'échantillon à des conditions de T, P et ρ plus élevées, sur la "courbe Hugoniot" qui caractérise le matériau

On a les relations:

$$P - P_0 = \rho_0 u_p u_s$$

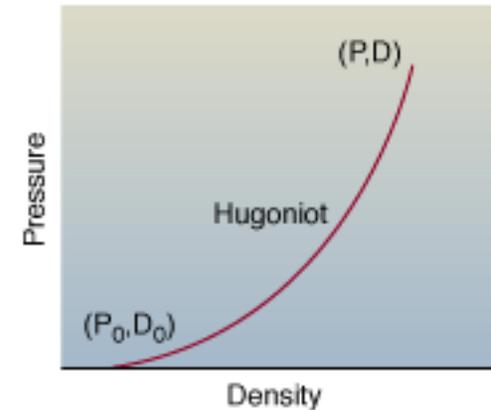
$$\rho / \rho_0 = u_s / (u_s - u_p)$$

L'énergie interne dans l'état final vérifie la loi de conservation:

$$H = E - E_0 + \frac{1}{2}(V - V_0)(P + P_0) = 0$$

C'est l'équation de Hugoniot

Si on mesure u_s et u_p on peut en déduire l'équation d'état...



Maintenant on peut aussi mesurer ainsi la conductivité électrique et thermique et la vitesse du son dans les échantillons, et les propriétés optiques.

Mesure de la température

Le long du hugoniot -

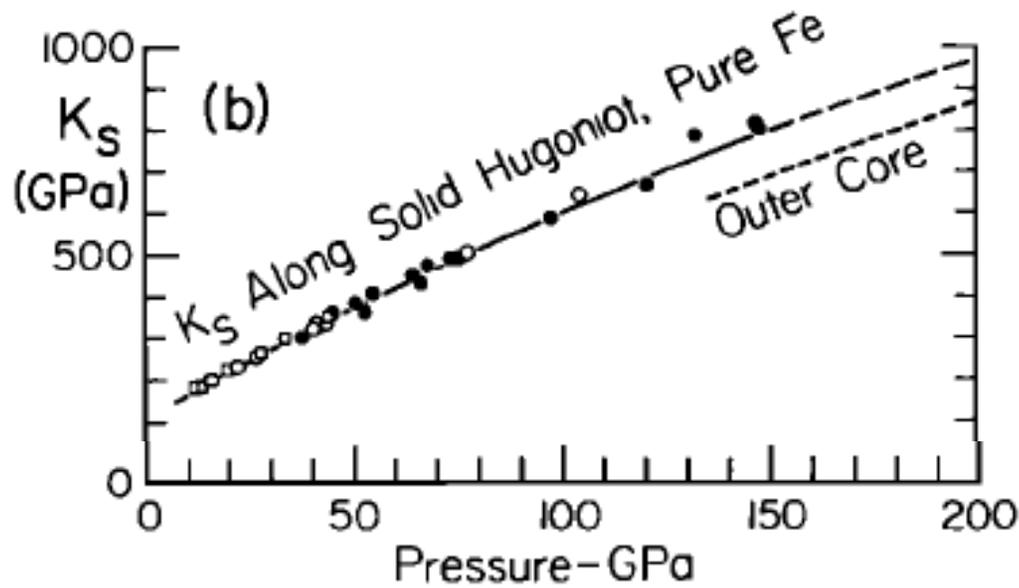
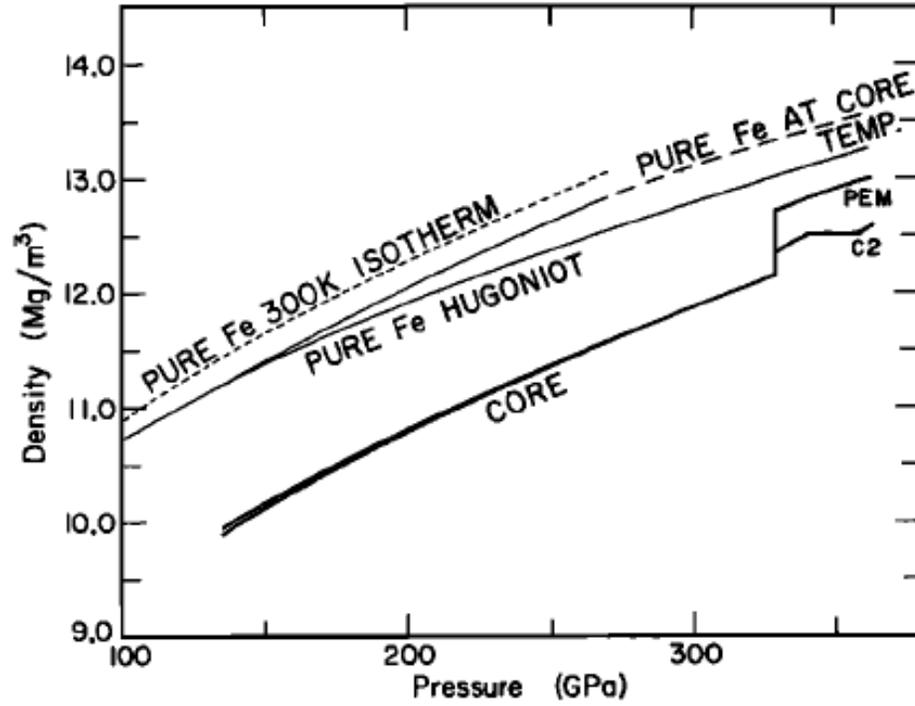
$$dT = -T \left(\frac{\gamma}{V} \right) dV + \frac{1}{2C_v} [(V_0 - V)dP + (P - P_0)dV]$$

Incertitudes sur γ et C_v

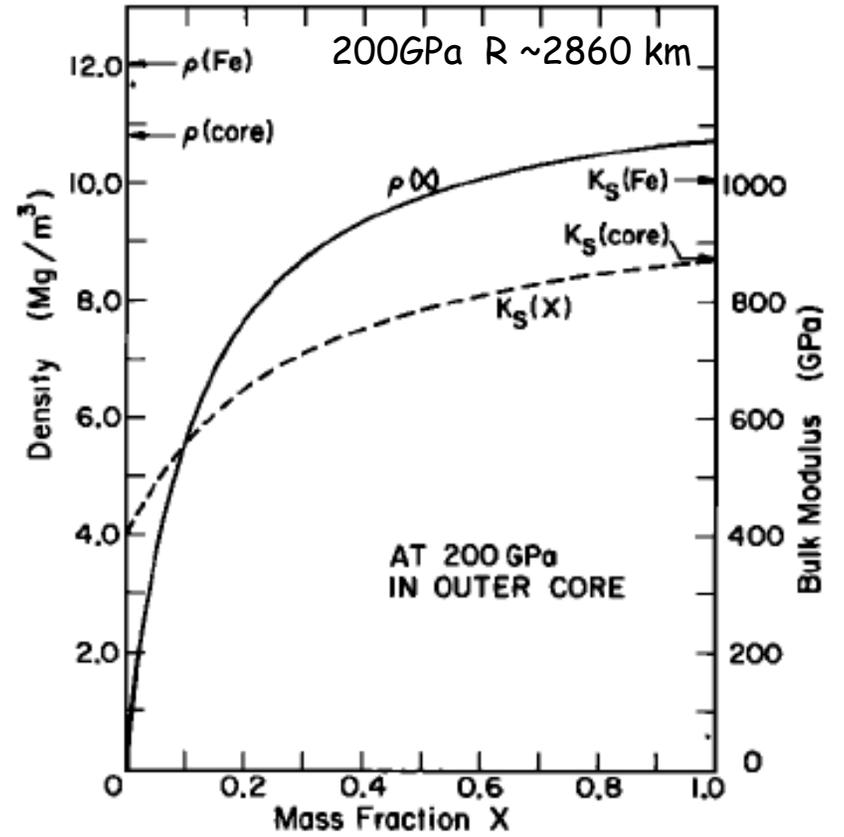
- Actuellement on mesure la température par la pyrométrie optique: mesure de la radiance de l'échantillon - calibration -> temp.
- Problème:
 - Mesures faites à travers une fenêtre faite d'un matériau résistant qui permet le passage de la lumière depuis l'échantillon jusqu'à un détecteur de fibres optiques. Mais la présence de la fenêtre à hautes P et T change l'état final de l'échantillon
 - Fenêtre en fluorure de lithium ou recherche actuelle: saphire (mais transparence dégradée à hautes pressions > 200 GPa)

- Expériences par ondes de choc:
 - Jeanloz (1979):
 - Obtient γ (paramètre de Gruneisen) et K_s (module de compressibilité adiabatique) et α (coef. d'expansion thermique) jusqu'à 150 GPa le long du Hugoniot
 - Densités, K_s et vitesse du son extrapolées et corrigées aux conditions du noyau:
 - $\Delta\rho/\rho = -10\%$ par rapport au fer pur
 - $\Delta K/K \sim -12\%$
 - Gradients dans le noyau externe en accord avec l'homogénéité chimique
 - ρ et K_s dans la graine sont compatibles avec ceux du Fe
- => ICB transition de phase et limite chimique

$$\gamma = V \left(\frac{\partial P}{\partial E} \right)_V$$



Contraintes sur:
 ρ et K_S d'éléments légers

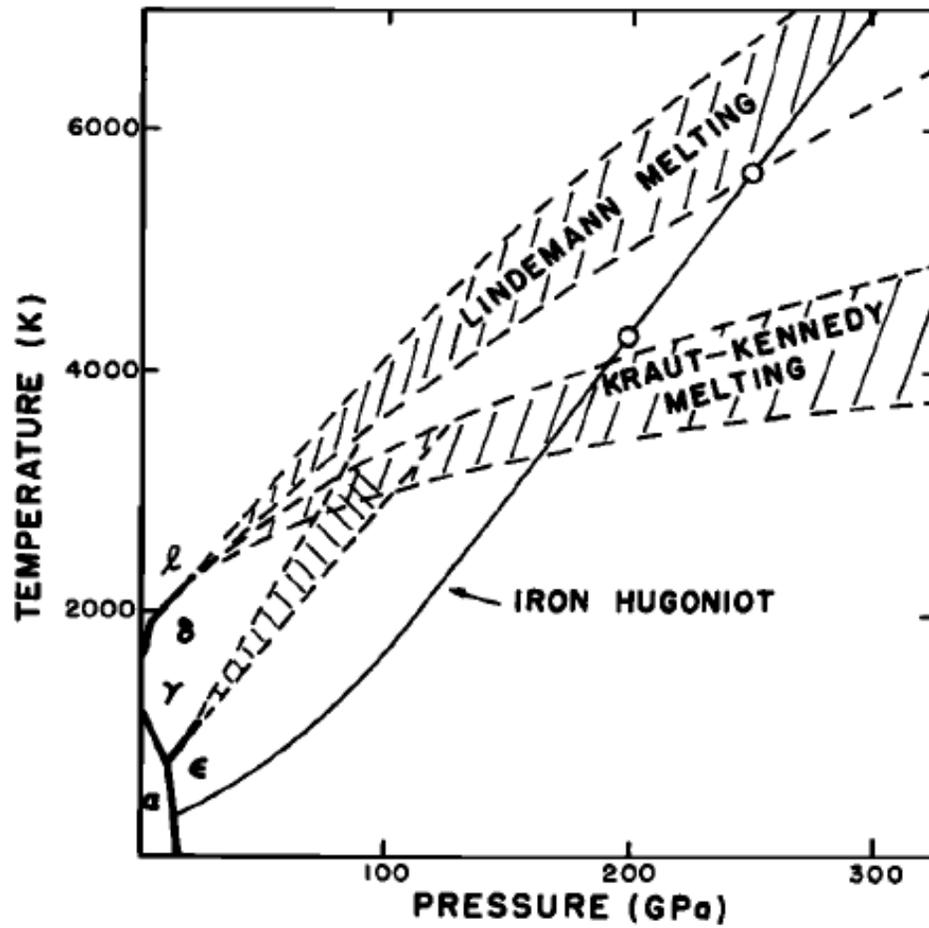


$$\rho_x = \frac{m_x}{\rho_{\text{core}}^{-1} + \rho_{\text{Fe}}^{-1} (m_x - 1)}$$

Jeanloz, 1979

Brown and McQueen, 1980: Température de fusion du fer

- Mesurent la vitesse du son dans un échantillon choqué jusqu'à 265 GPa
- Lors de la fusion, rigidité $\rightarrow 0$ et la vitesse de l'onde devient V_ϕ .
- On compare la vitesse mesurée à V_ϕ calculée et on dit qu'on a atteint la fusion si elles sont très proches
- Ils observent deux discontinuités en vitesse; la première est attribuée à l'époque à la transition de phase fer ϵ (hcp) à fer γ (fcc), la seconde à la fusion du fer ϵ
- \rightarrow Transition de phase à 200 GPa et 4400K
- Ont la pression de fusion: 240-260 GPa le long de l'Hugoniot,
 - On en déduit donc la température de fusion du fer à cette pression: 5500-6000 K

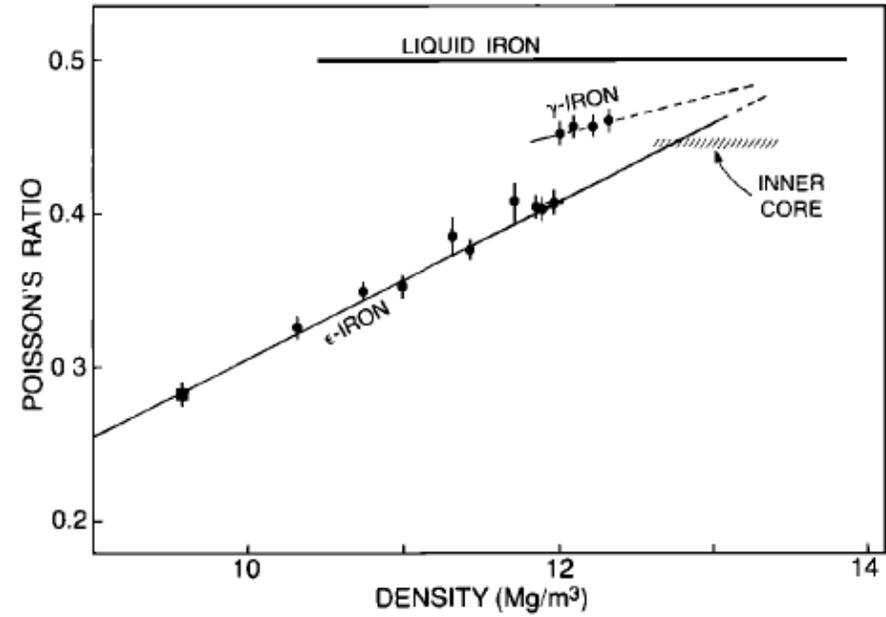
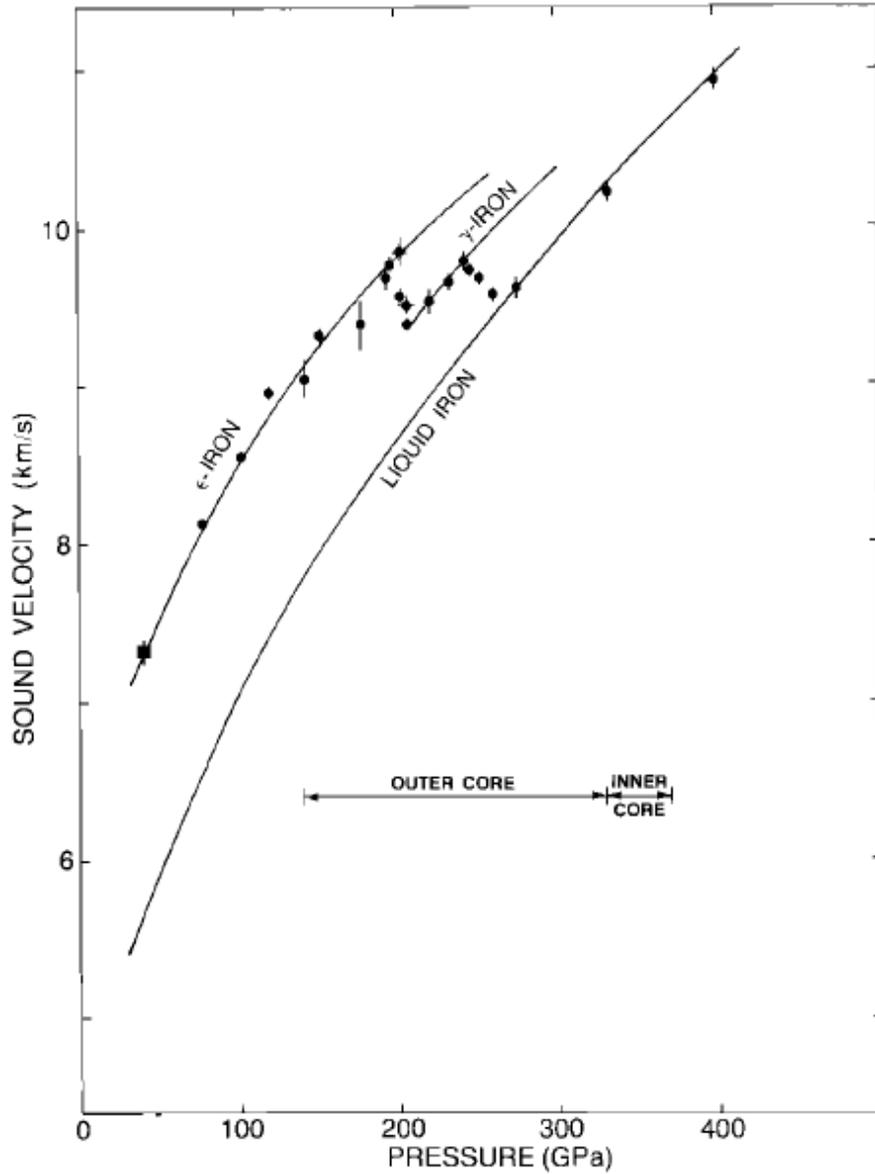


○ Transitions observées

Alpha - bcc
 Epsilon - hcp
 Gamma - fcc

Brown and McQueen, 1980

- Résultats précisés par Brown and McQueen (1986):
 - Ondes de choc: 77 GPa \rightarrow 400 GPa
 - Discontinuité de vitesse du son à 200 \pm 2 GPa: epsilon \rightarrow gamma (en fait epsilon \rightarrow bcc, Brown, 2001)
 - Seconde discontinuité: à 243 \pm 2 GPa: fusion du fer
 - -- Température de fusion entre 5000 et 5700 K
 - Extrapolation aux conditions du noyau (ICB):
 - 330 GPa; 5800 \pm 500 K



$$\left(\frac{V_p}{V_B}\right)^2 = 3 \frac{(1 - \sigma)}{(1 + \sigma)}$$

Brown and McQueen, 1986
le long du Hugoniot

Expériences utilisant les enclumes de diamant

