

# Colloque associé au cours:



COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

CHAIRE DE PHYSIQUE DE L'INTÉRIEUR  
DE LA TERRE

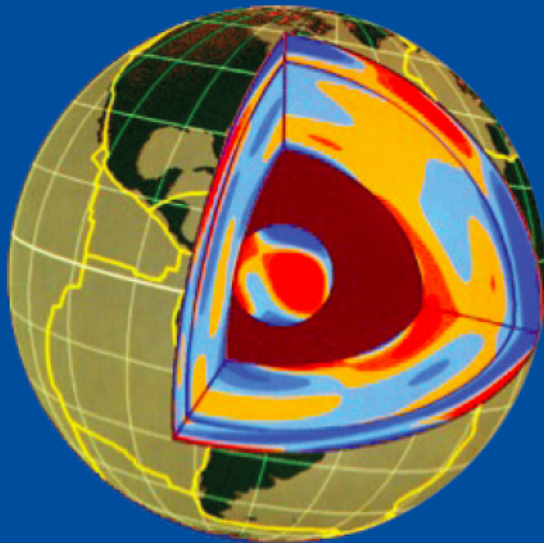
Année académique 2016-2017

Pr Barbara ROMANOWICZ

## Flow in the deep Earth

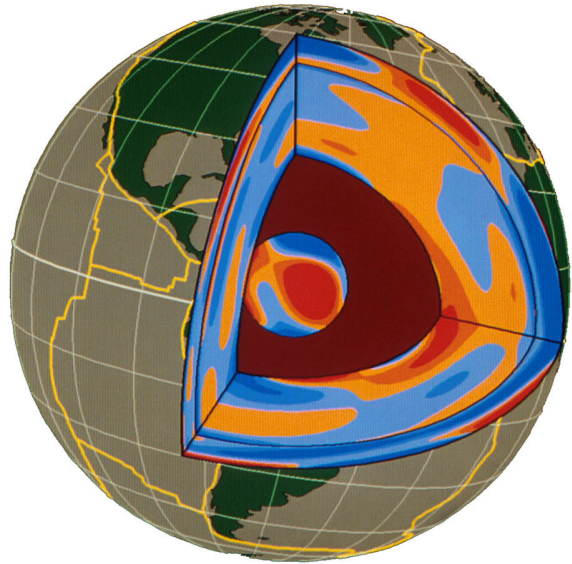
**Colloque en anglais - Workshop in English  
organisé avec Patrick Cordier, Université de Lille**

Jeudi 1<sup>er</sup> et vendredi 2 décembre 2016  
Amphithéâtre Maurice Halbwachs



Entrée libre:

<http://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/colloque.htm>



# Anisotropie sismique et écoulement dans le manteau terrestre

## 6- La zone de transition et le manteau inférieur - 2e partie

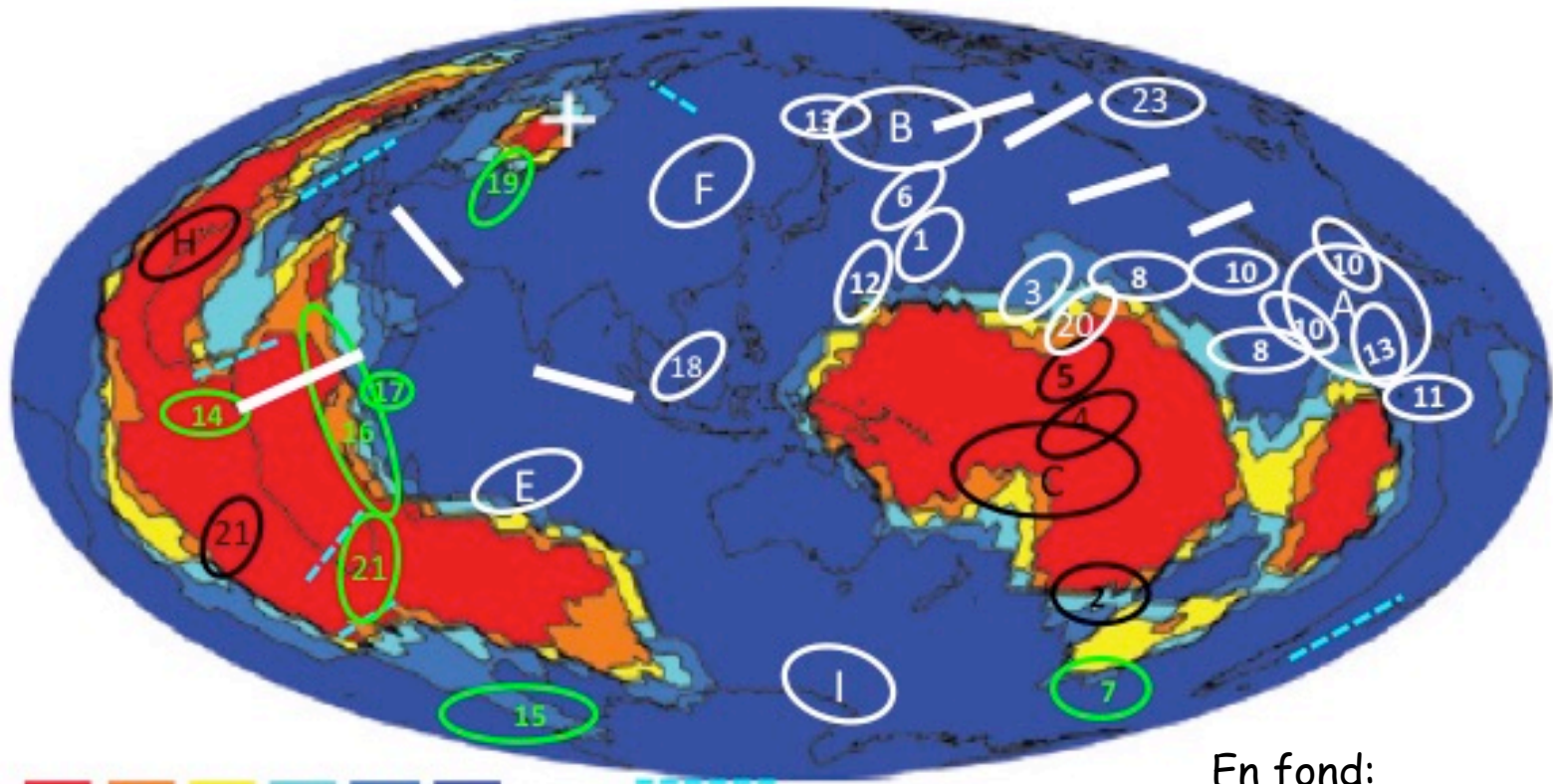
Barbara Romanowicz

*Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre*

*Collège de France*

22 Novembre 2016

# Anisotropie dans la zone D''

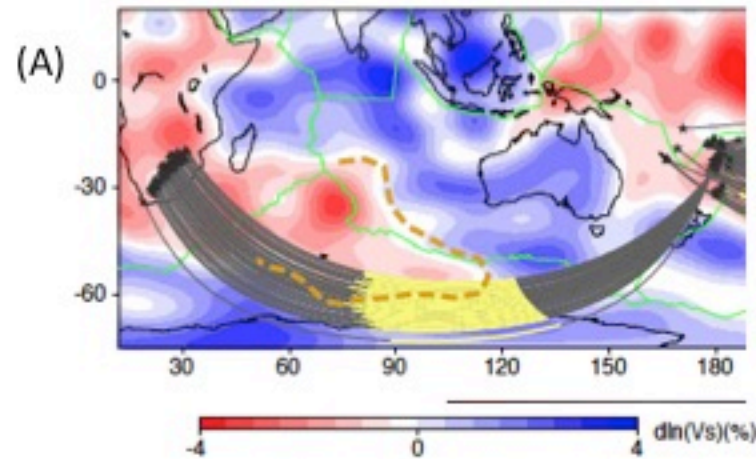


Ellipses blanches:  $V_{sh} > V_{sv}$   
Ellipses vertes: variations latérales rapides de l'anisotropie  
Ellipses noires et -----  
:  $V_{sv} > V_{sh}$  ou pas de splitting

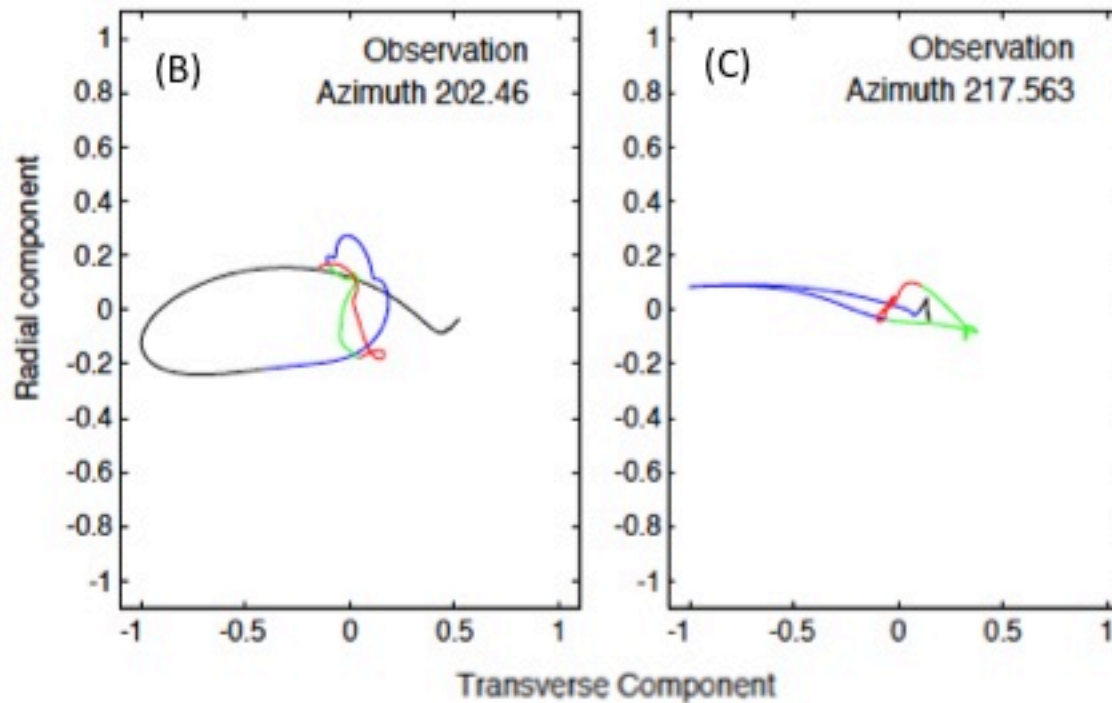
En fond:  
Zones de  $V_s$  isotrope  
inférieure à la moyenne  
globale (rouge) ou  
supérieure à la moyenne  
Globale (bleu)

Ondes S  
diffractées

Distances:  
116-125°



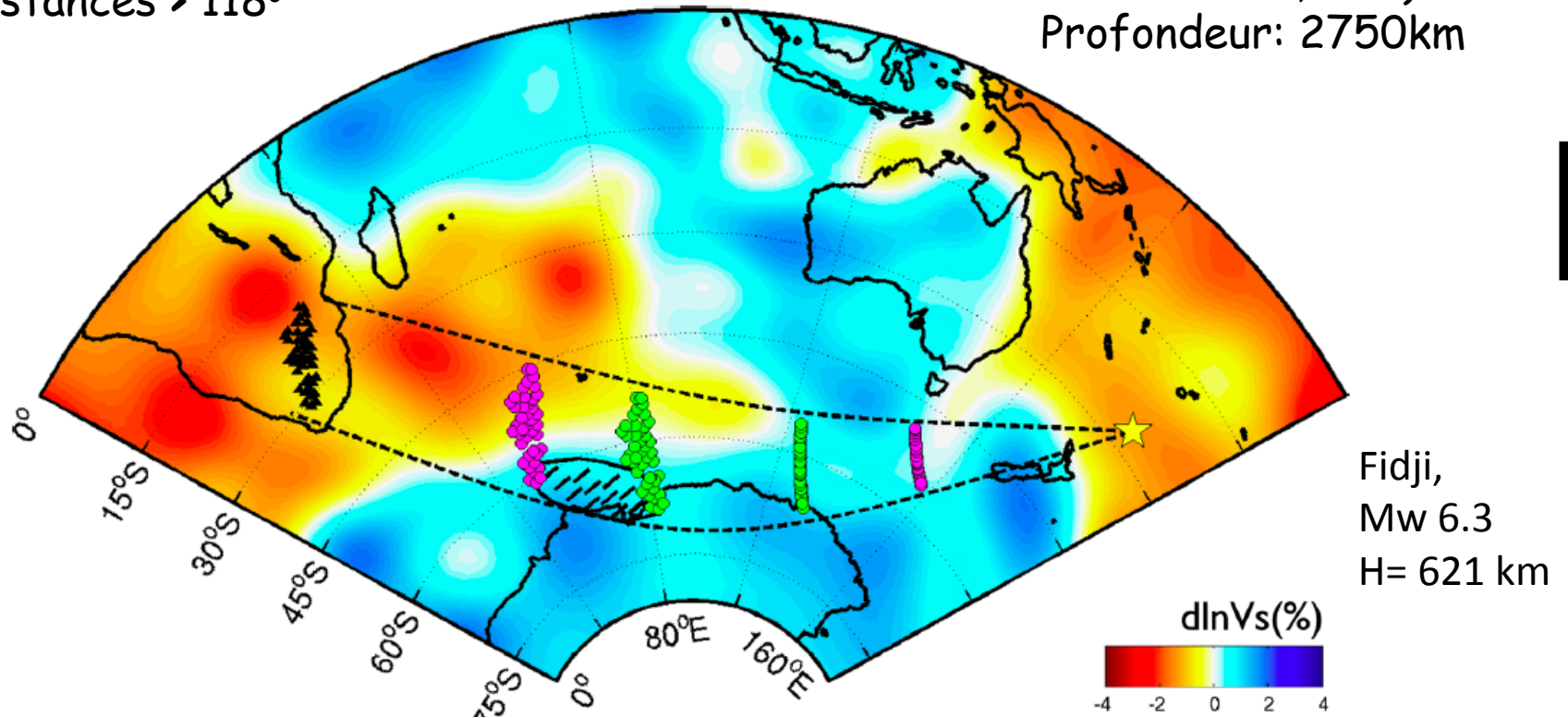
Background:  
Modèle tomographique  
SAW24B16 (Mégnin  
and Romanowicz, 2000)  
Profondeur = 2800 km



# Ondes S diffractées

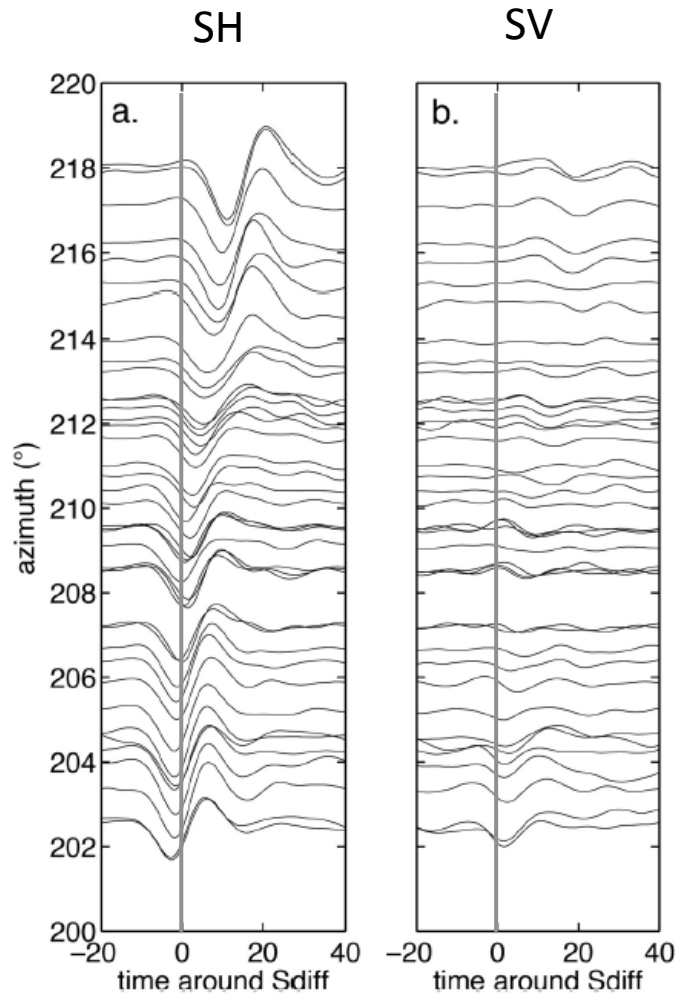
Distances  $> 118^\circ$

Modèle tomographique:  
SAW24B16 (Mégnin  
and Romanowicz, 2000)  
Profondeur: 2750km

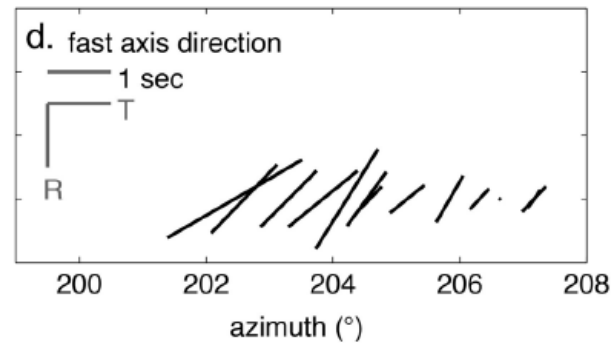
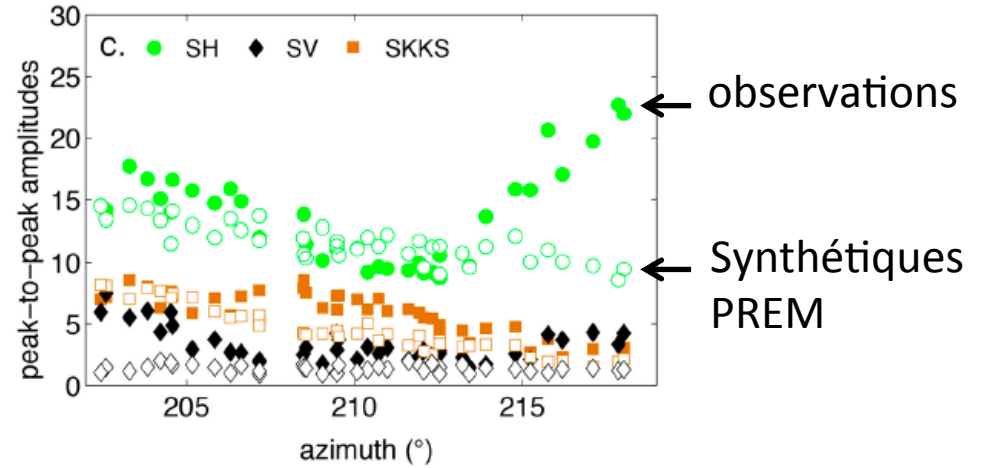


Points roses: points d'arrivée de l'onde Sdiff 150 km au dessus de la CMB  
Points verts: points d'arrivée de l'onde Sdiff à la CMB

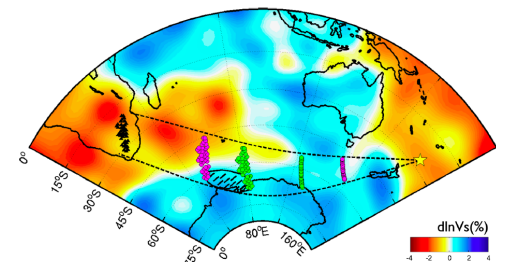
# Données Sdiff filtrées entre 15 et 100 s



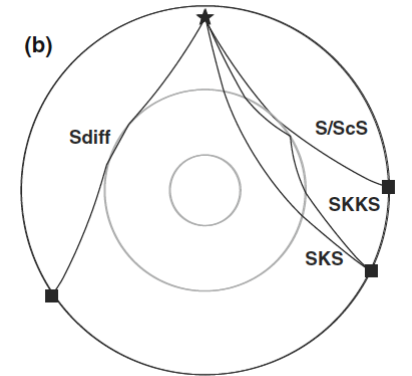
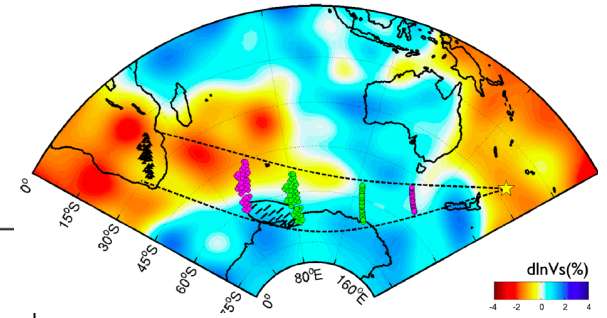
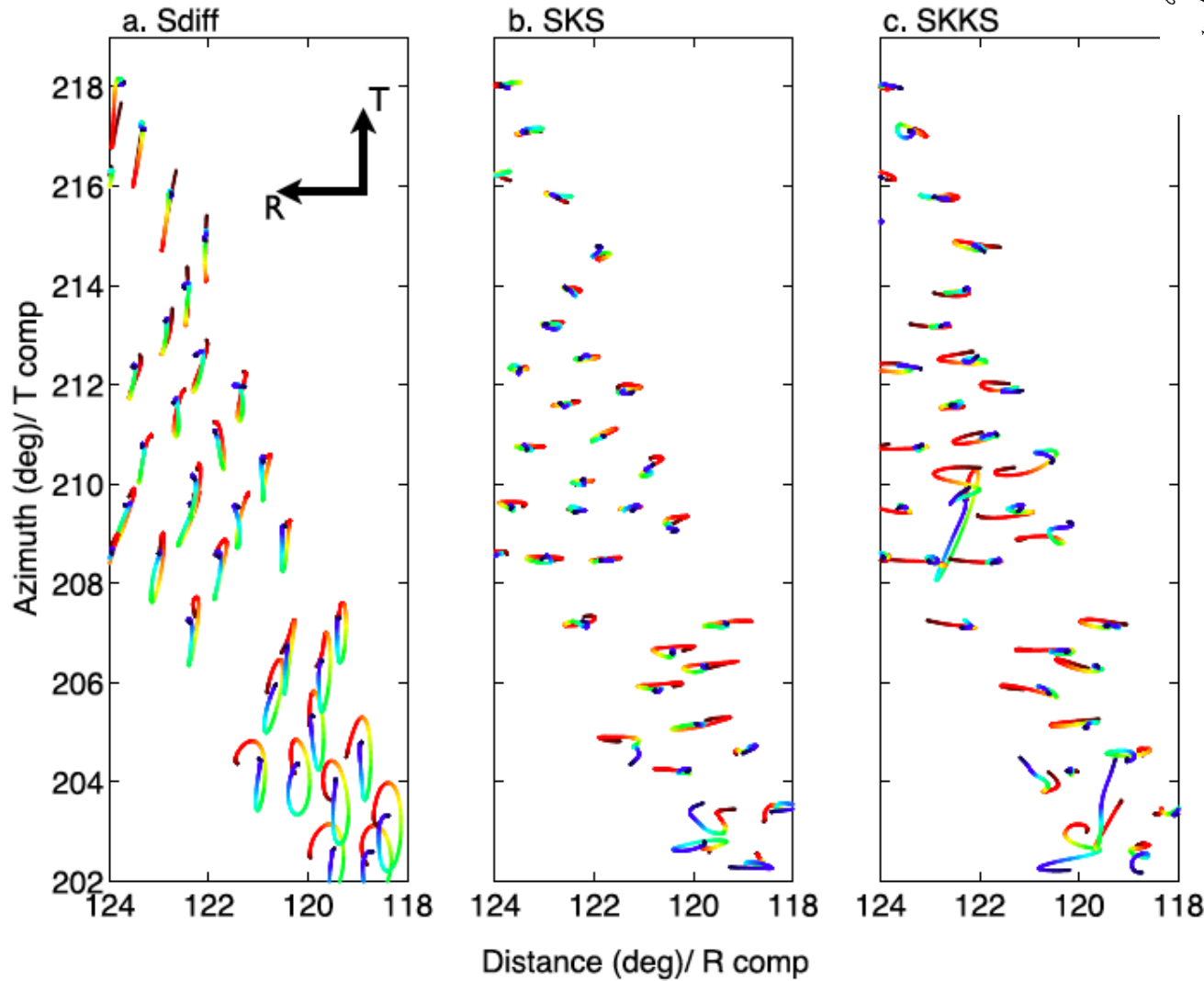
## Amplitude Peak-to-peak



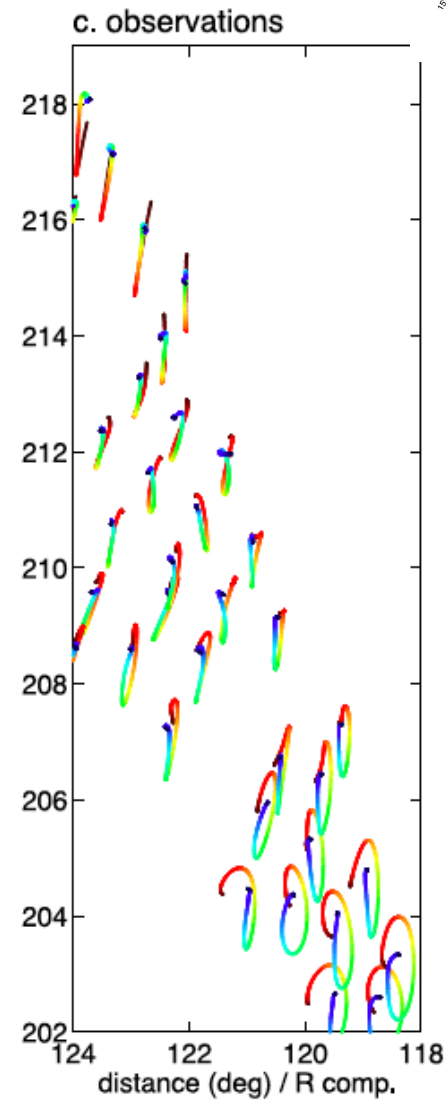
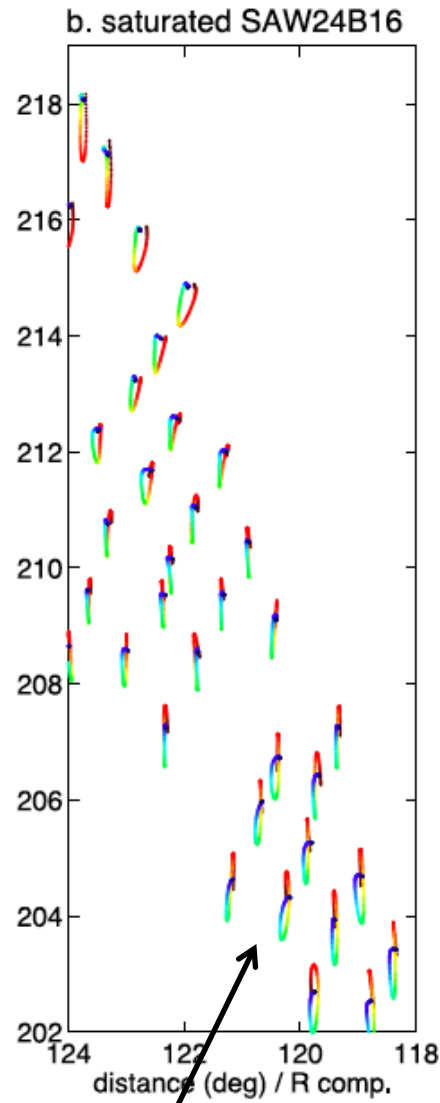
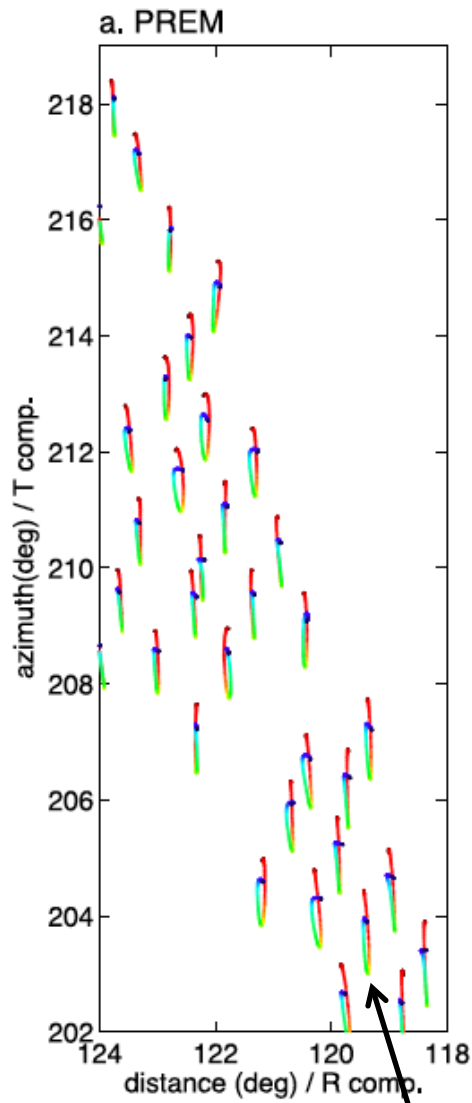
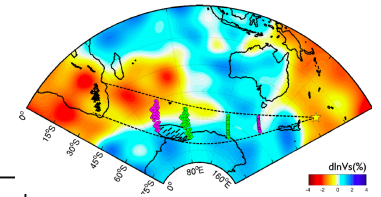
L'amplitude du splitting décroît fortement avec l'azimuth



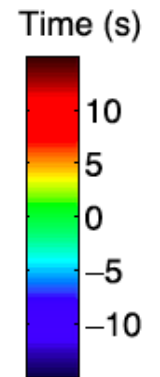
Mouvement des particules: pas de corrélation entre les observations sur SKS/SKKS et sur Sdiff



# Un modèle isotrope ne convient pas!

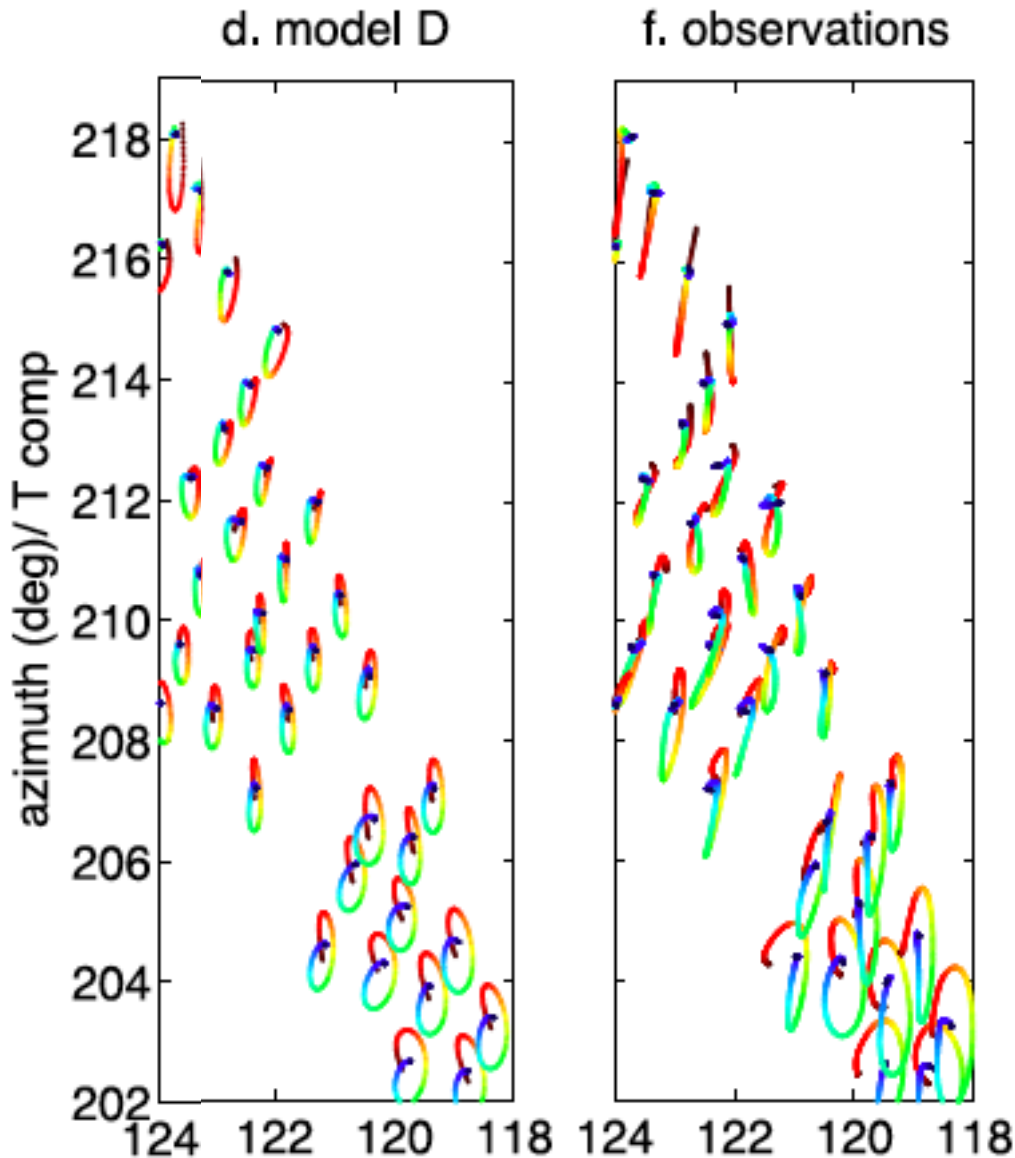


Pas d'énergie en SV

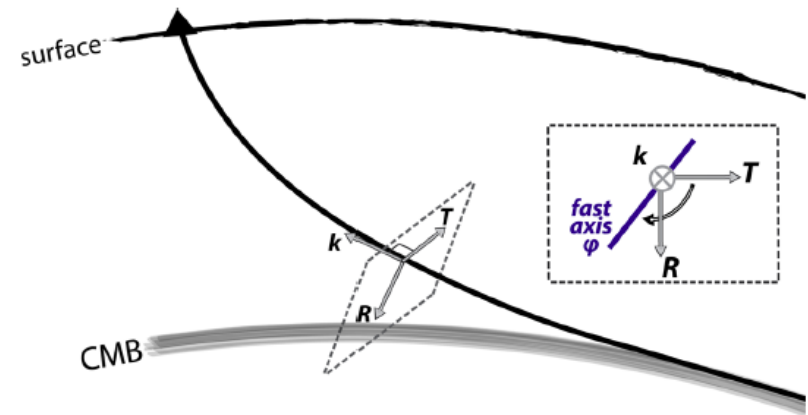




## Modèle d'anisotropie proposé:



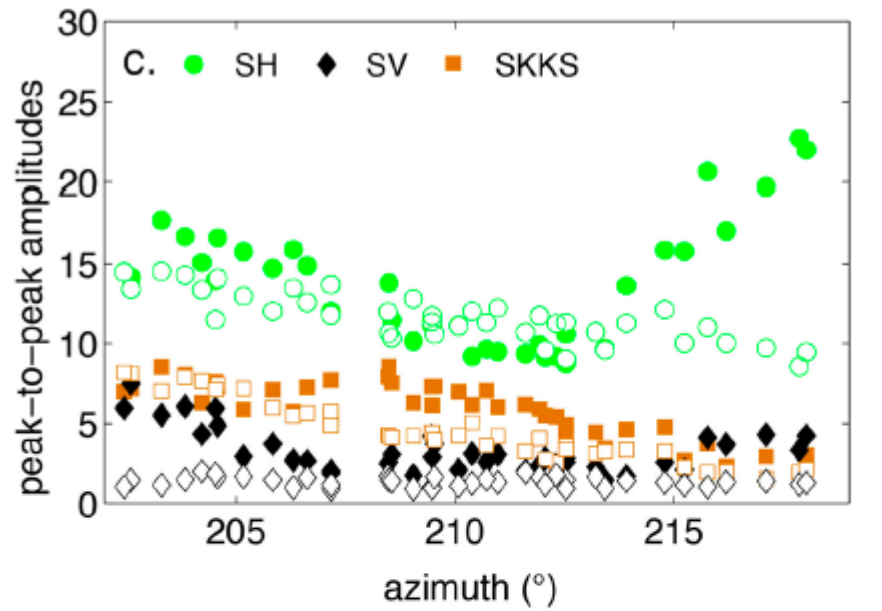
Définition du référentiel (R,T, k) dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation



### Modèle D:

- > Axe rapide dans un plan incliné de  $30^\circ$  par rapport à la verticale et de  $-45^\circ$  ( $\pm 20^\circ$ ) par rapport à l'axe T
- > Anisotropie de 4% sur 370 km d'épaisseur
- > trade-off entre intensité et épaisseur de la couche anisotrope

## Données



## Predictions du modèle "préféré"

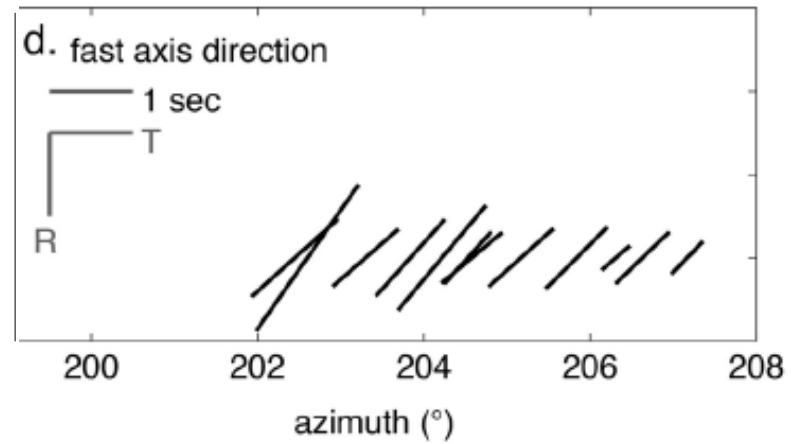
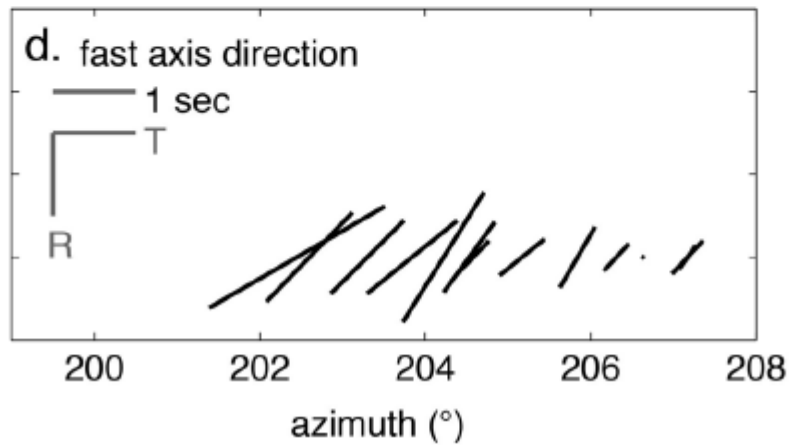
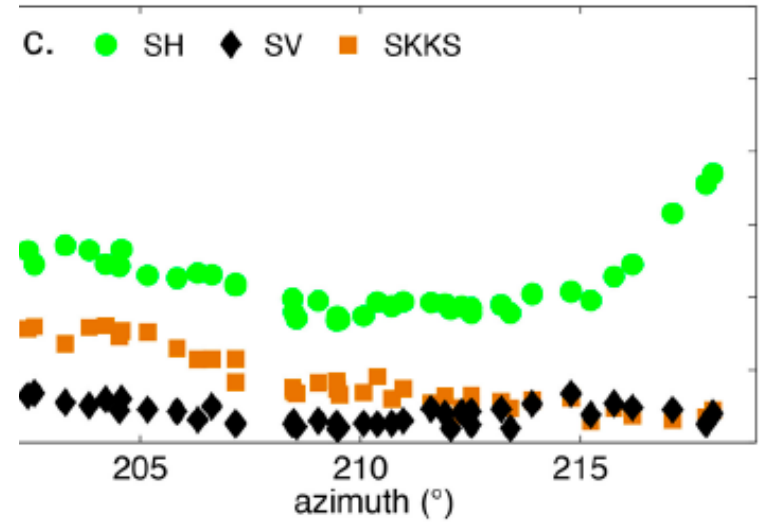
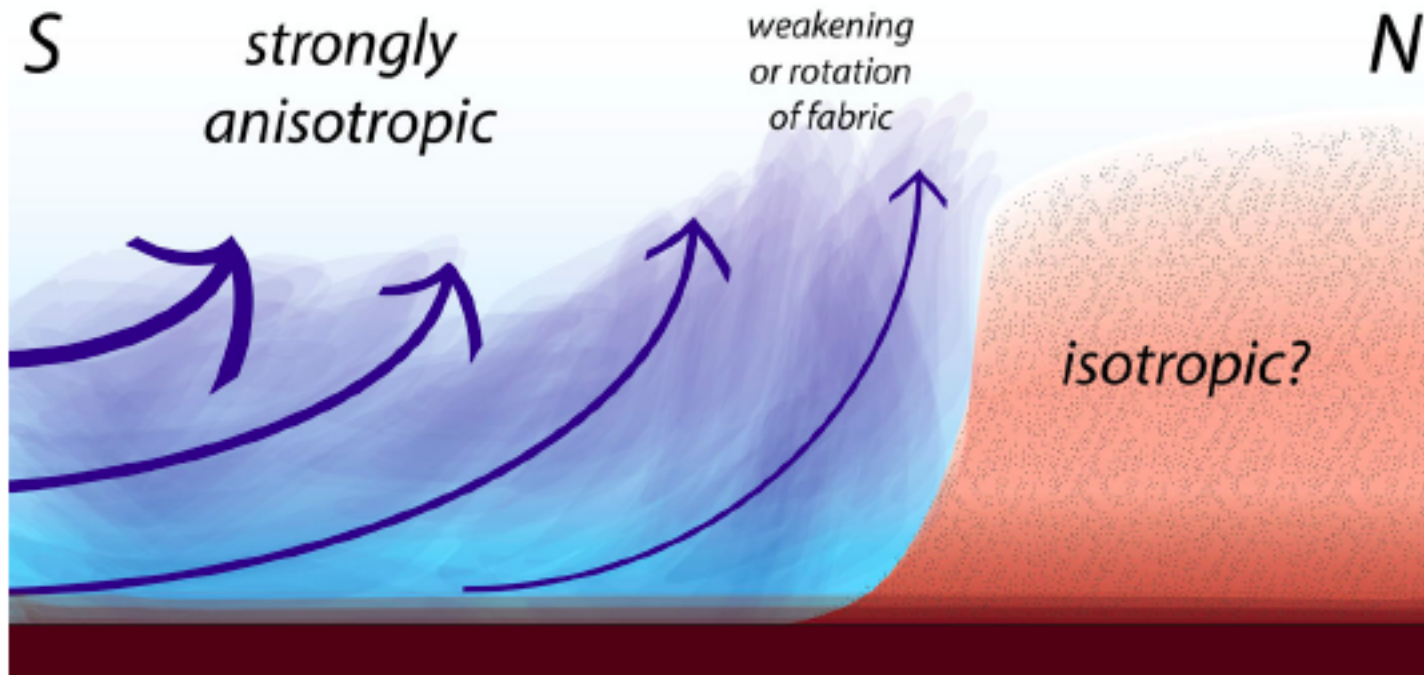
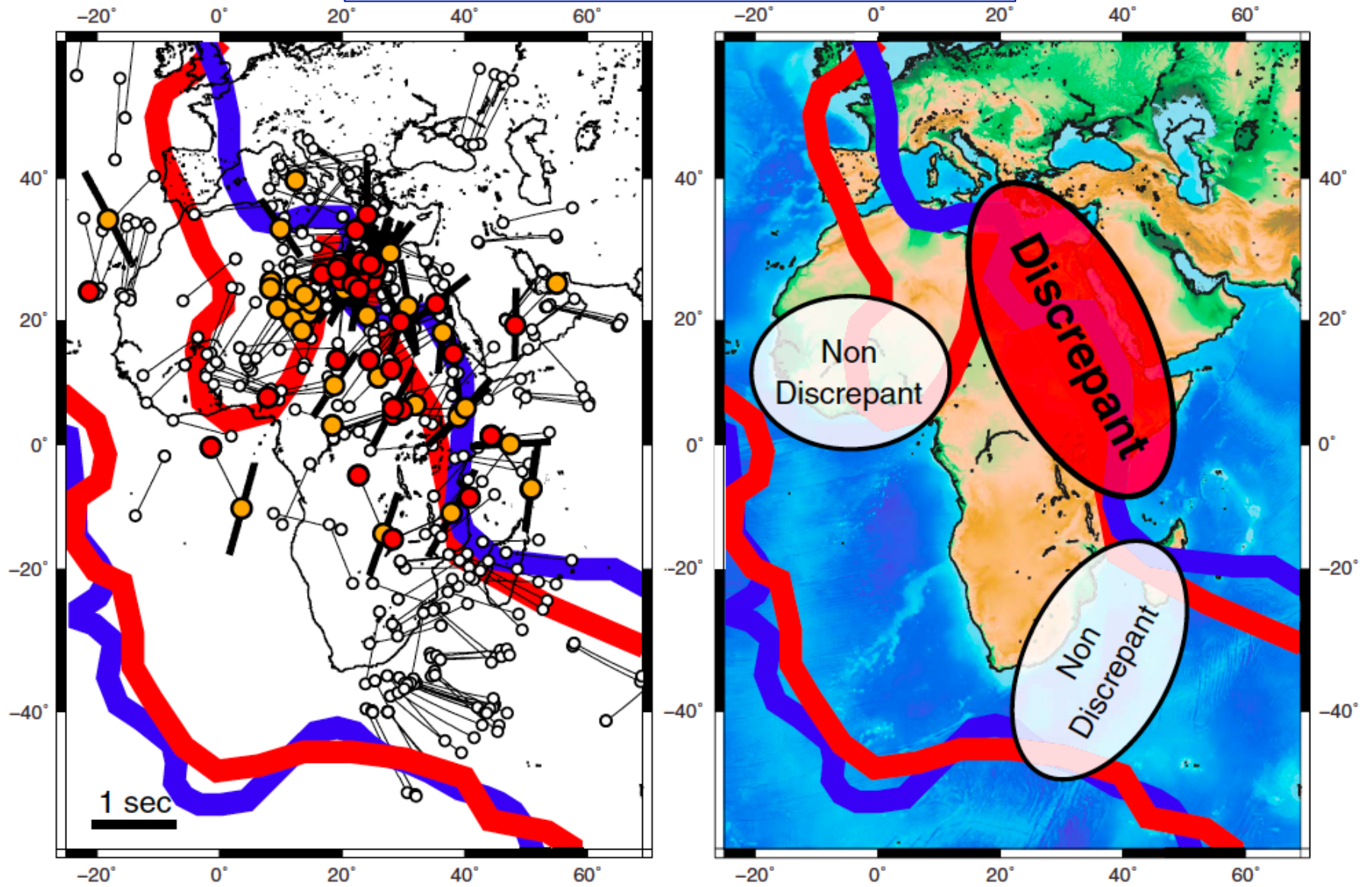


Schéma illustrant l'écoulement qui pourrait donner lieu à l'anisotropie observée

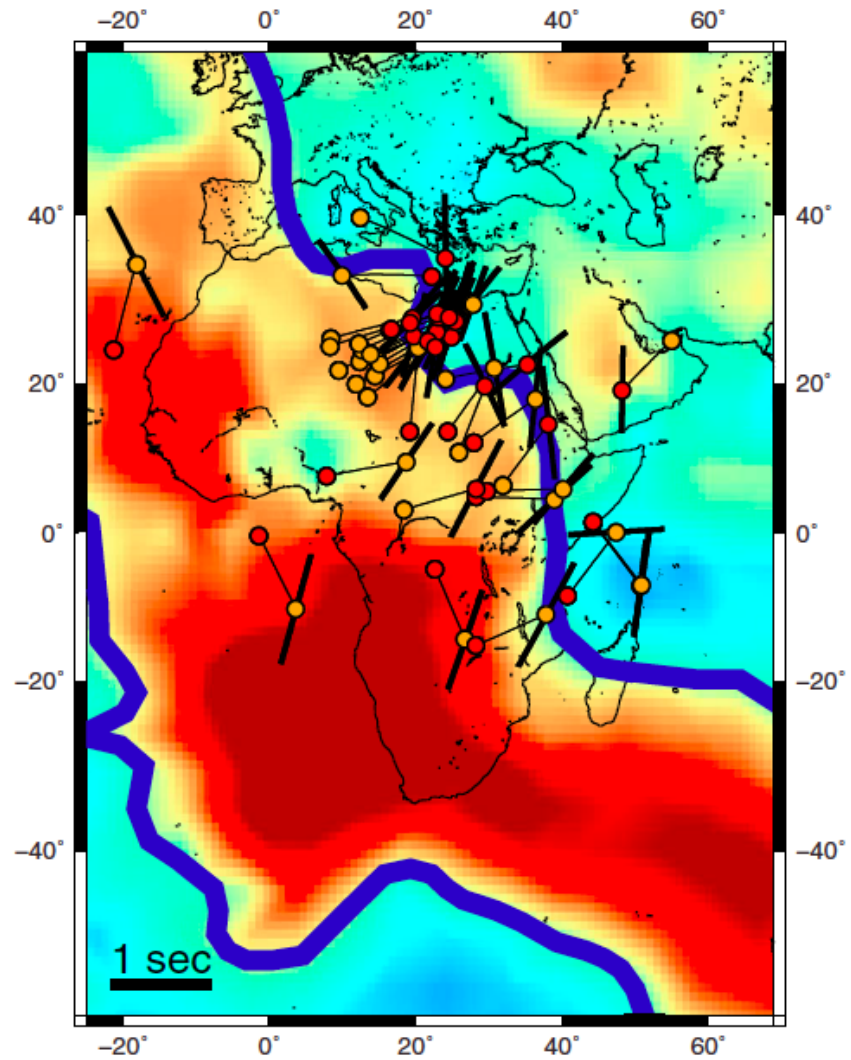
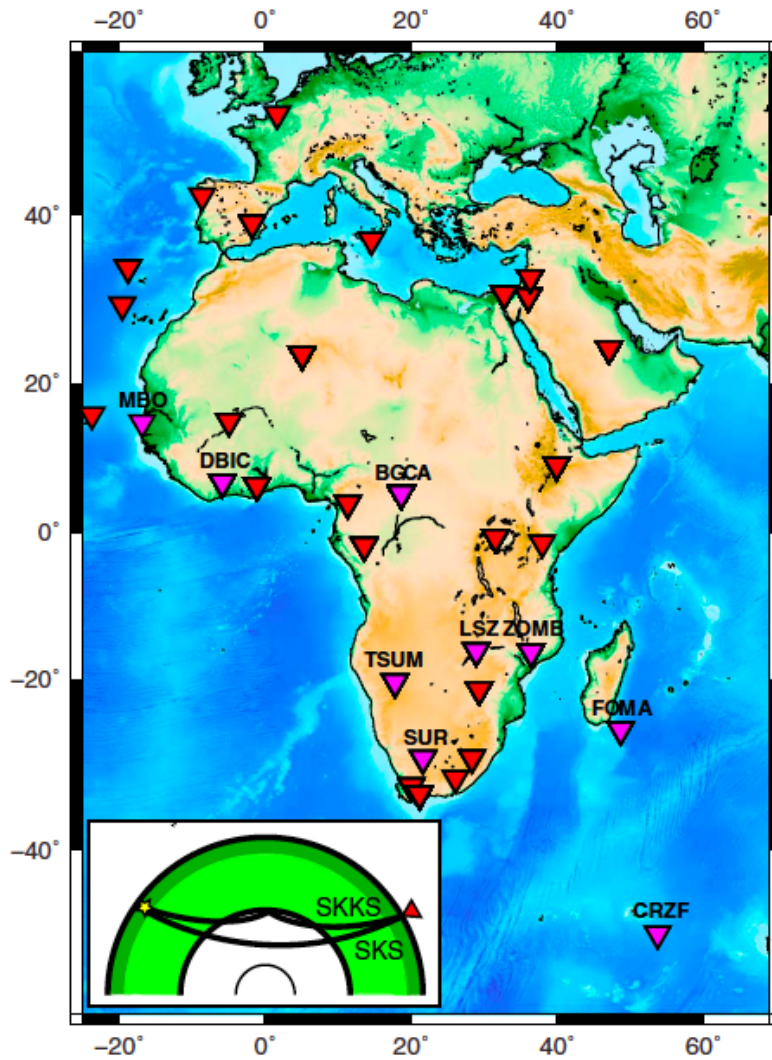


# Splitting différentiel SKS/ SKKS

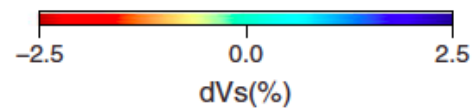


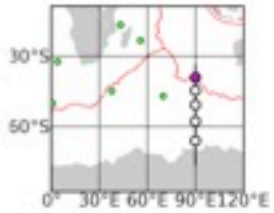
*Lynner and Long, 2014, GRL*

GyPSum tomography  
Model (Simmons et al., 2012)  
- 2700 km depth

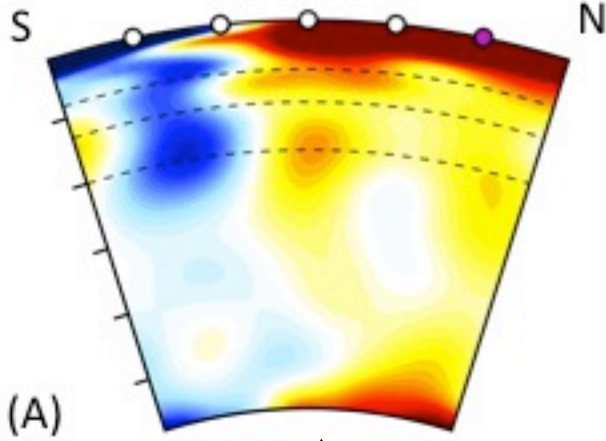


*Lynner and Long, 2014, GRL*

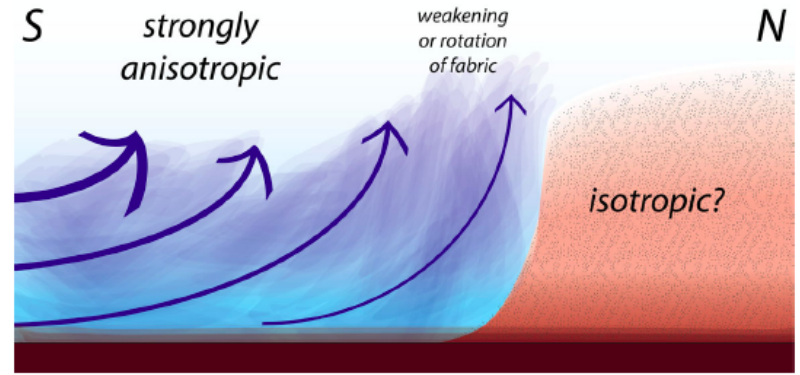




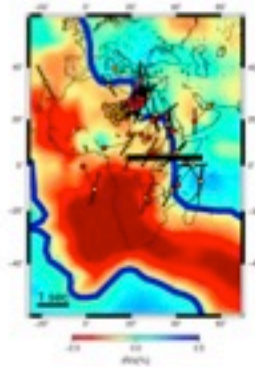
Bord sud de la LLSVP d'Afrique



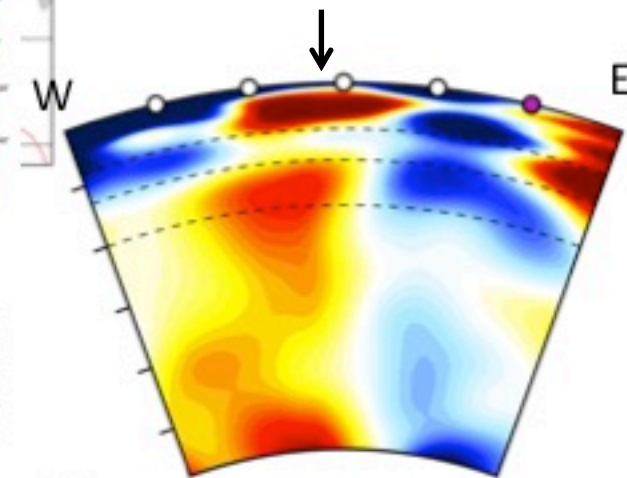
(A)



Cottaar and Romanowicz, 2013

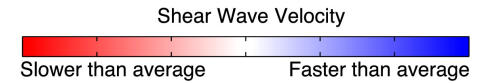
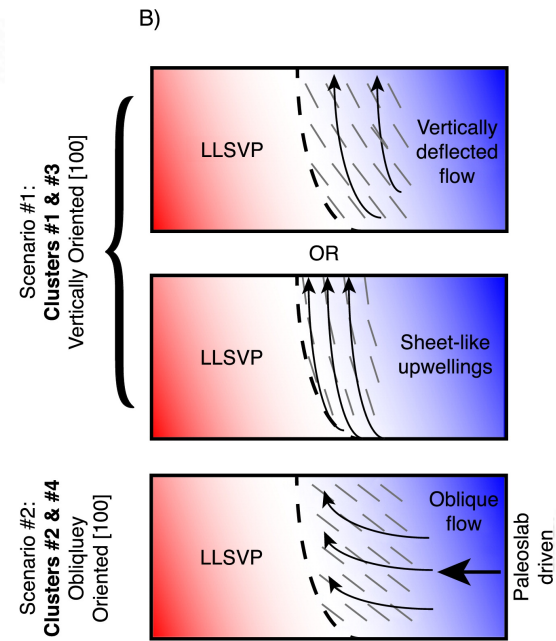


Modèle tomographique Vs SEMUCB\_WM1



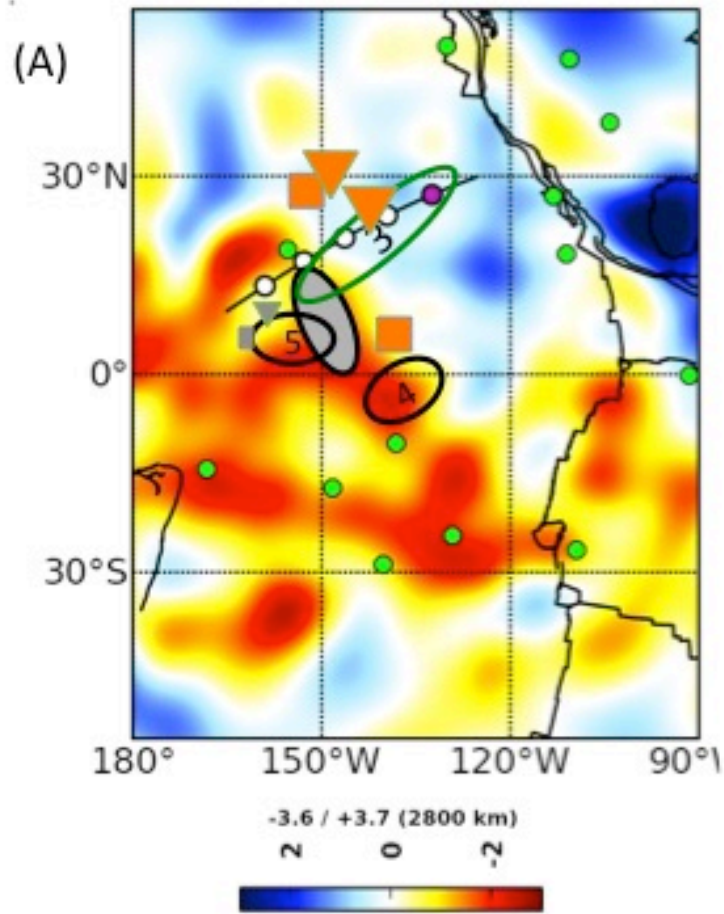
(B)

Bord Est de la LLSVP d'Afrique



Ford et al., 2015

# Centre du Pacifique



**Predominantly  $V_{sh} > V_{sv}$ :**

**(C) Ritsema et al, 1998:**

- $V_{sh} > V_{sv}$
- $V_{sv} > V_{sh}$

**(20) Fouch et al., 2001:**

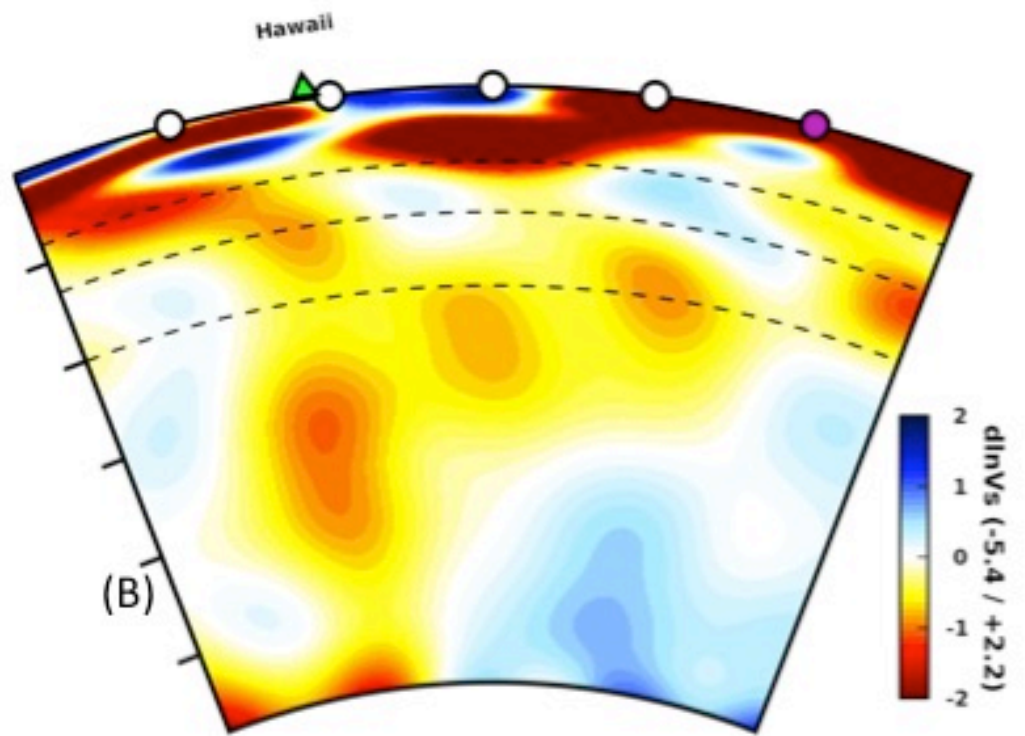
- ▼  $V_{sh} > V_{sv}$
- ▼  $V_{sv} > V_{sh}$

**(3) Vinnik et al., 1998:  $V_{sh} > V_{sv}$**

**Predominantly  $V_{sv} > V_{sh}$  or tilted:**

- (4)** Pulliam and Sen, 1998
- (5)** Russell et al., 1998

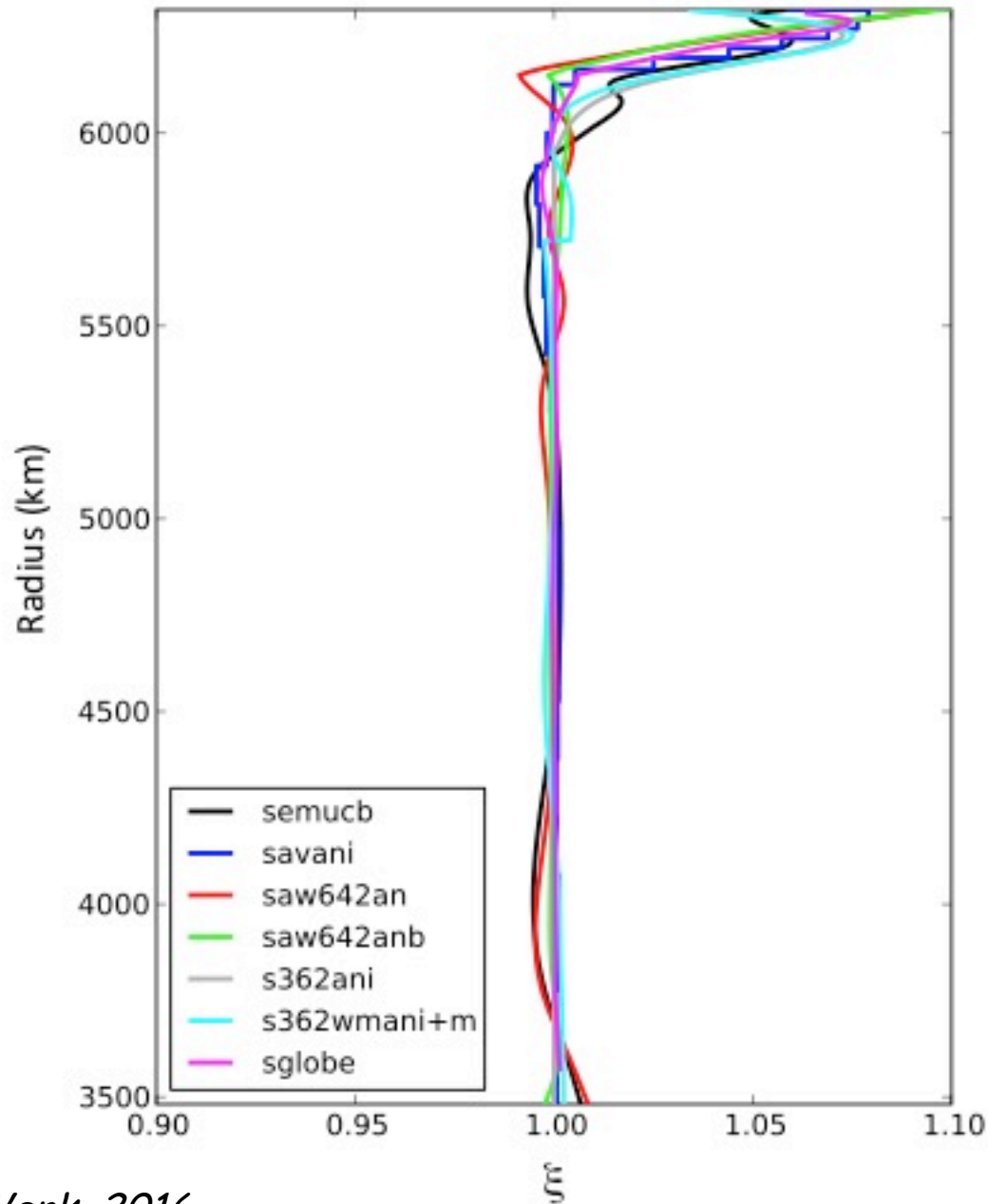
○ **(22)** Kawai and Geller, 2010



Etudes globales de l'anisotropie  
sismique dans le manteau entier?

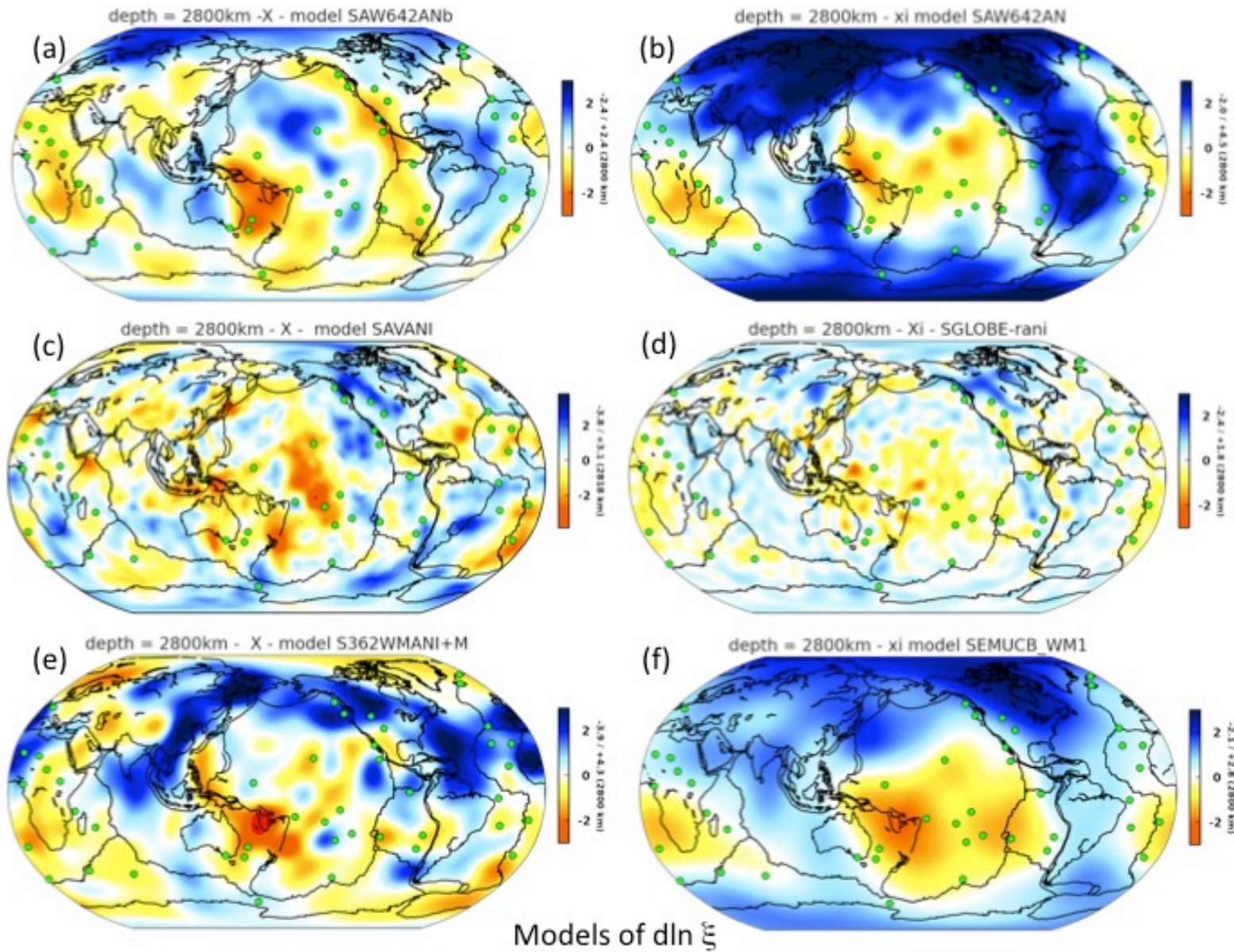


# Profils moyens du paramètre anisotrope $\xi$



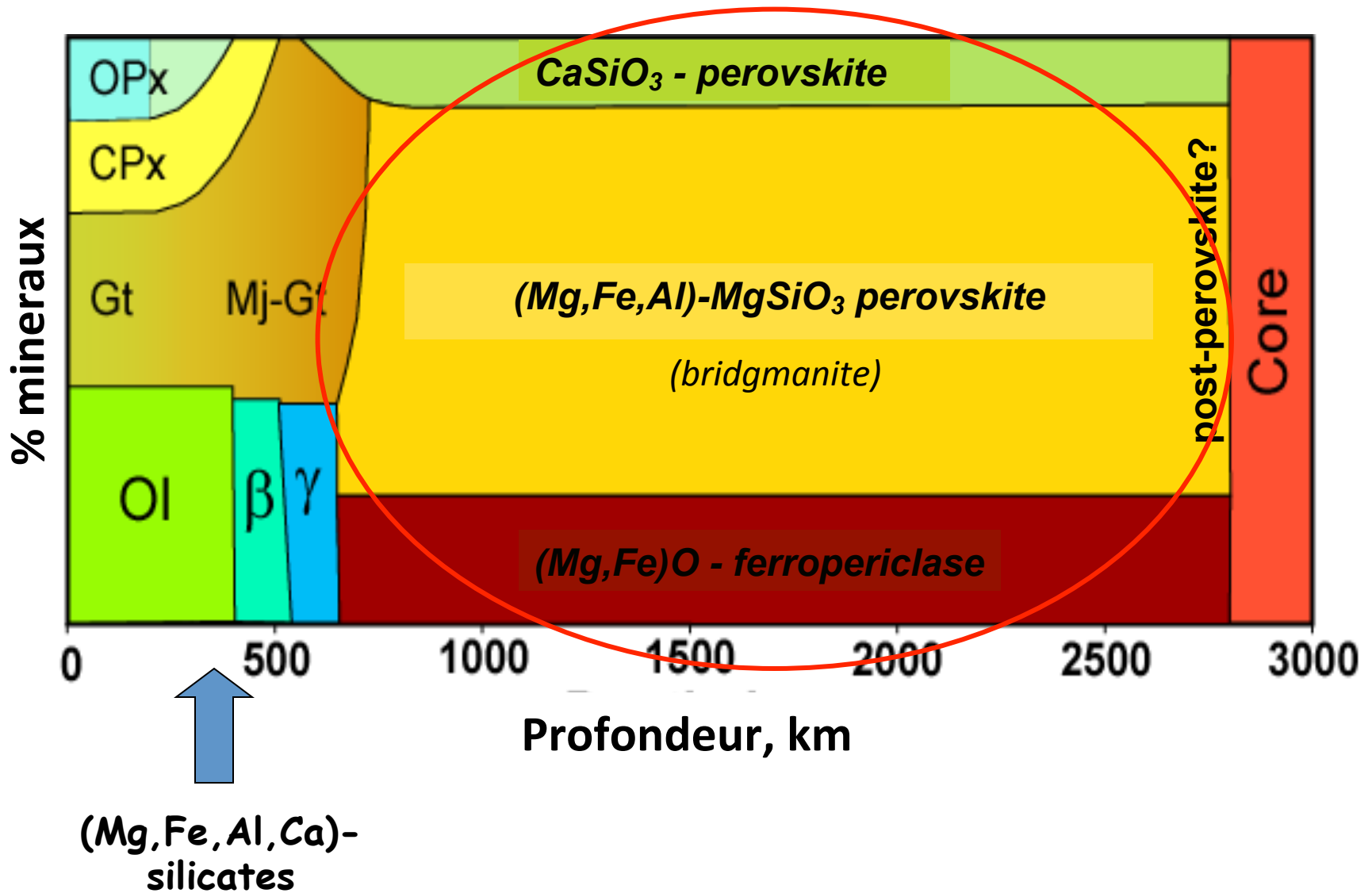
Tomographie  
des ondes S:  
Anisotropie  
radiale

# Comparaison de modèles globaux de $\xi$ à 2800 km de profondeur



- Pour avancer, on devra combiner l'information obtenue par la sismologie avec les modèles géodynamiques et les connaissances en physique des matériaux
  - Modèle de circulation du manteau -> champ des déformations
  - Physique des matériaux: propriétés élastiques et systèmes de glissement des minéraux du manteau inférieur -> anisotropie sismique locale
  - Intégration sur les trajets des ondes sismiques -> comparaison avec les observations

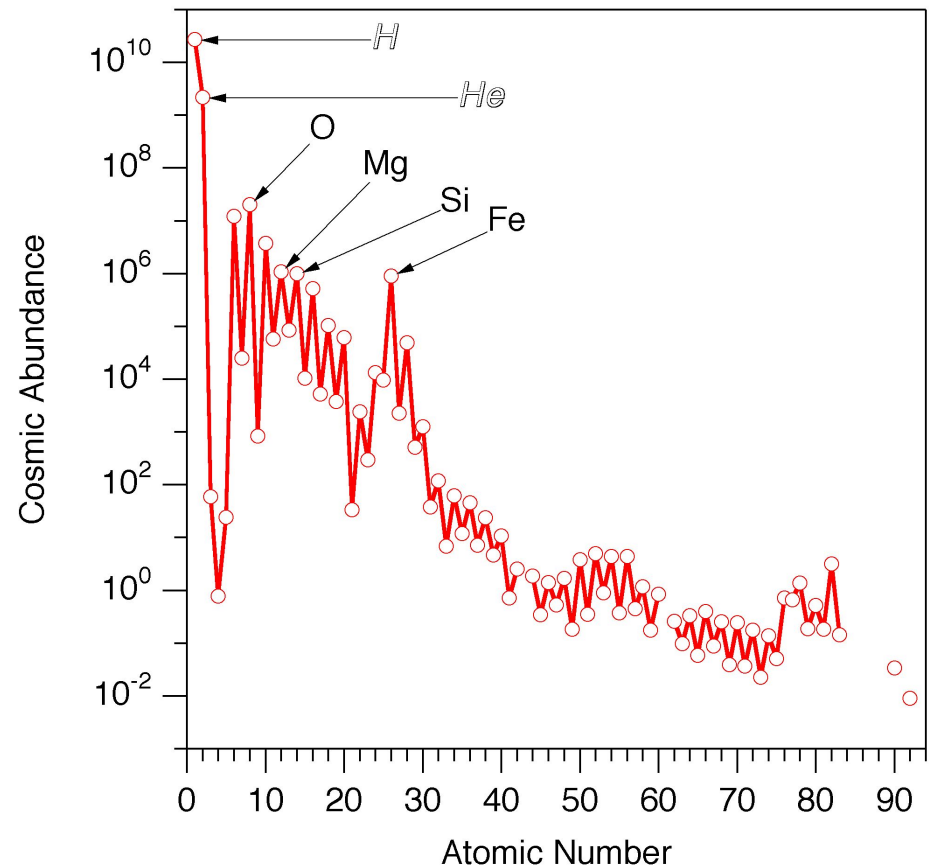
# Minéraux du manteau de la Terre



Courtesy of S. Sinogeikin

# Composition de l'intérieur de la Terre

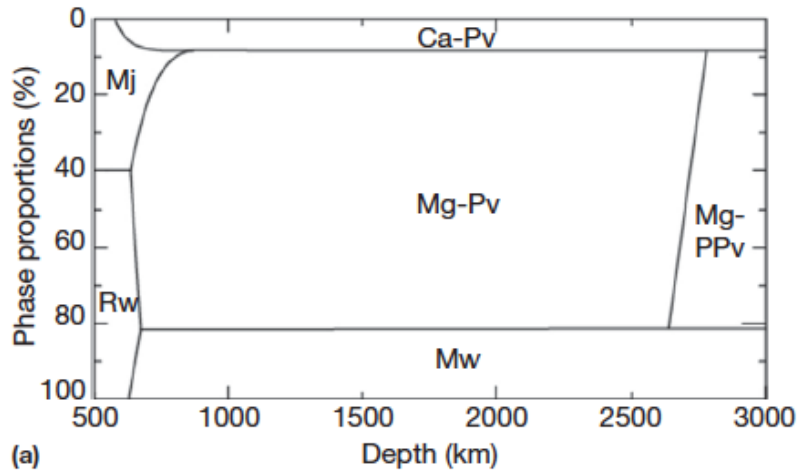
- Système principal  $Mg_2SiO_4 \rightarrow MgO, MgSiO_3$
- Addition de Fe, Al, Ca et  $H_2O$  en quantités non négligeables ajoute de la complexité
  - $CaSiO_3$  perovskite de calcium
  - $SiO_2$  stishovite (avec différentes structures cristallines)
  - $Al_2O_3$  (corindon)
  - Fe
  - Alumino-silicates hydratés
- Transition de spin du Fer (Badro et al., 2003) vers le milieu du manteau inférieur



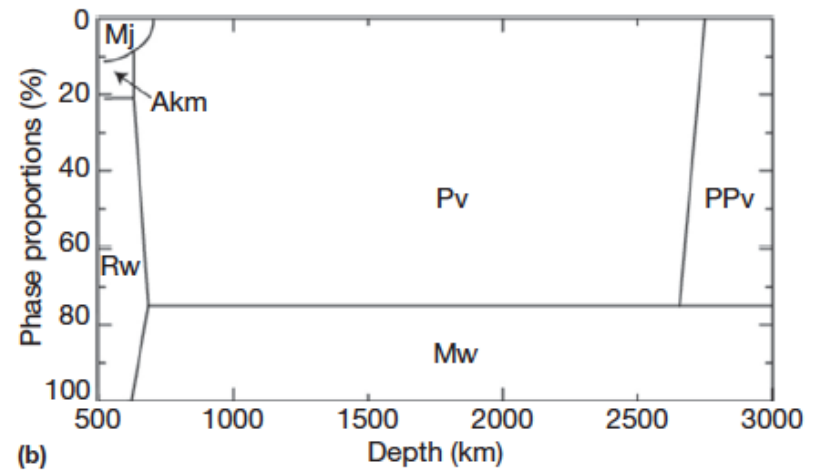
Les propriétés élastiques et anisotropies du manteau inférieur sont dominées par celles de la bridgmanite, ferropériclase, postperovskite et perovskite de calcium

# Complexité introduite par les hétérogénéités de composition

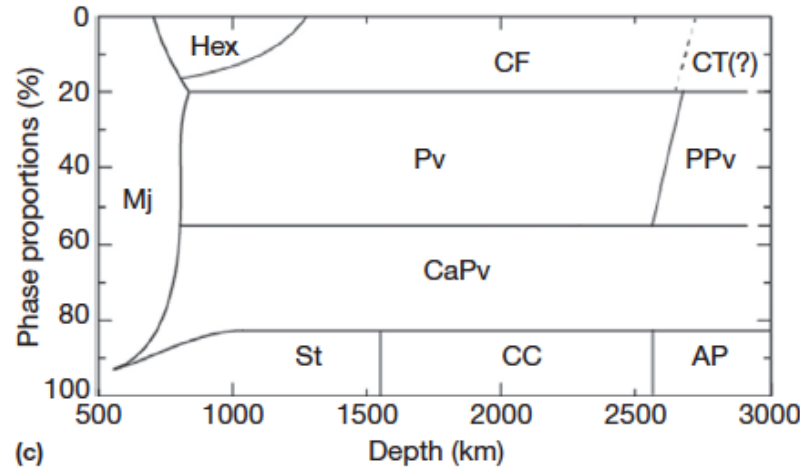
Pyrolite



Harzburgite

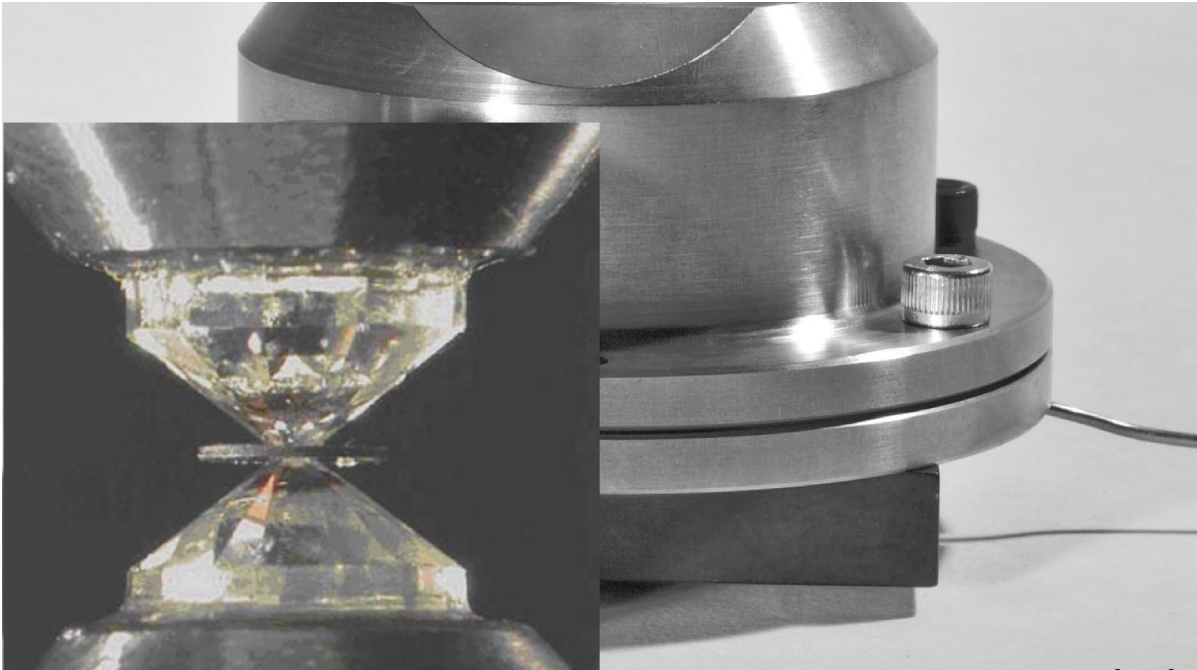


T=2300K  
 Pression: 20 - 135 GPa

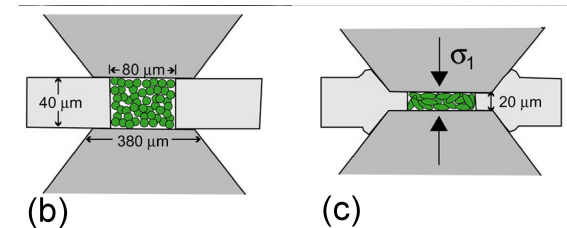


MORB  
 (Mid-Ocean Ridge Basalt)

# Etude expérimentale des propriétés des matériaux aux pressions du manteau profond (et jusqu'à 500 GPa): presse à enclumes de diamant: DAC



- Echantillons:  $\sim 30 \mu\text{m}$  de diamètre
- - déformation en compression
  - l'évolution de la texture peut être suivie in situ par la transmission de rayons X en géométrie de diffraction radiale.
- + chauffage laser (-> 6000 K)



-> Texture importante observée dans les 3 phases principales de la D'' (travaux des groupes de Wenk et Merkel)

-> Inconvénients: échantillons très petits, déformation uniquement en compression, vitesses de déformation difficiles à contrôler

# Propriétés élastiques déterminées expérimentalement par diffusion Brillouin

- Diffusion inélastique de la lumière par les ondes acoustiques du milieu ( $\nu$   $10^7$ - $10^{12}$   $s^{-1}$ )
  - Illumination de l'échantillon par faisceau laser
  - Lumière diffusée à une fréquence légèrement différente par les mouvements des atomes du milieu
  - Combiné avec la DAC
  - Utilisé sur de très petits échantillons
  - Méthode de choix pour les matériaux du manteau profond
  - Permet de déterminer le tenseur élastique complet (et plus...)

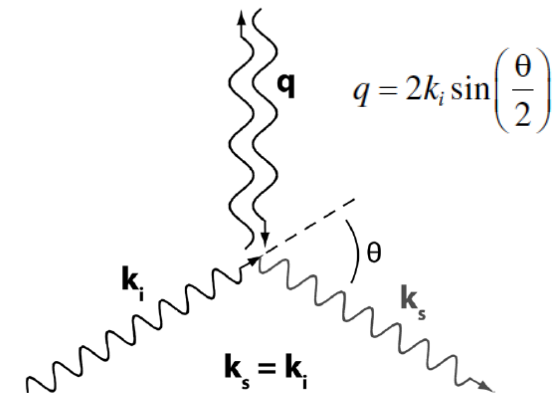
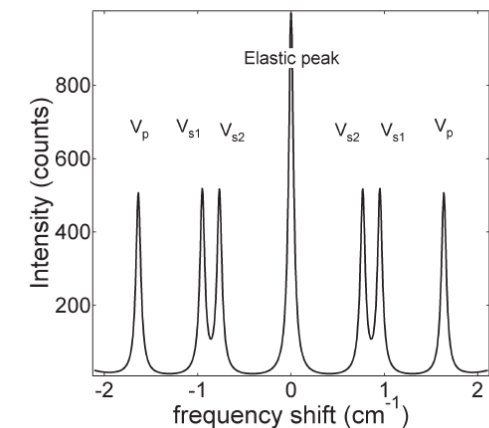
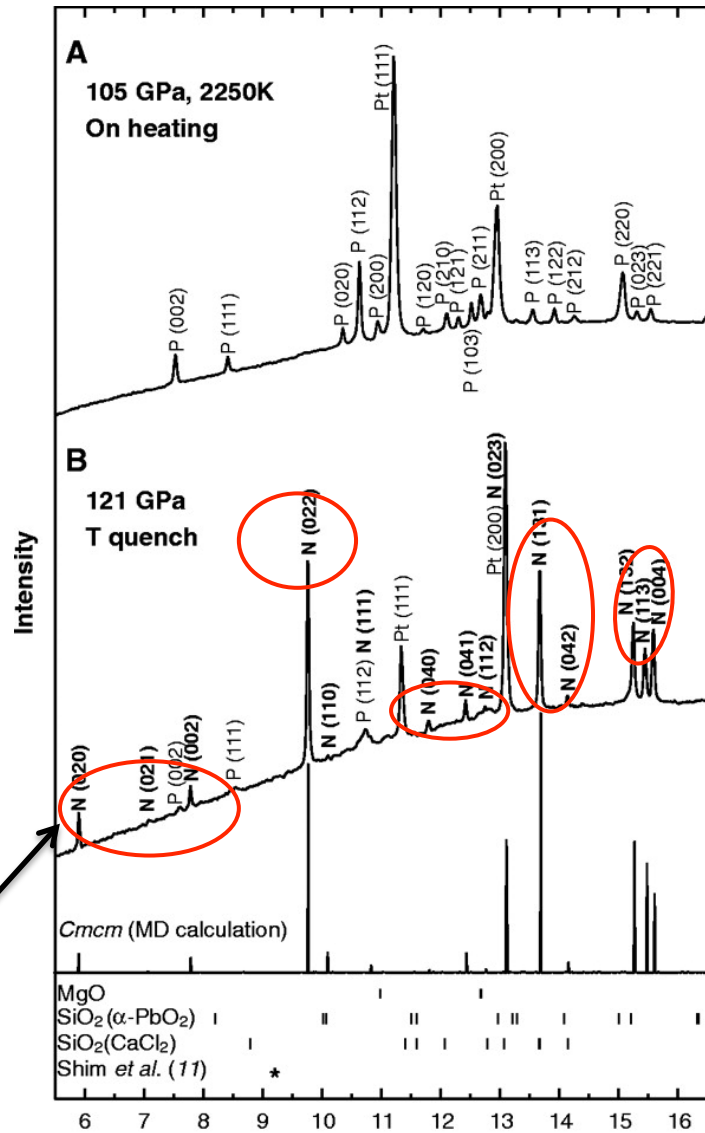


Figure 1. Schematic diagram of the geometry of Brillouin scattering. Symbols are explained in the text.

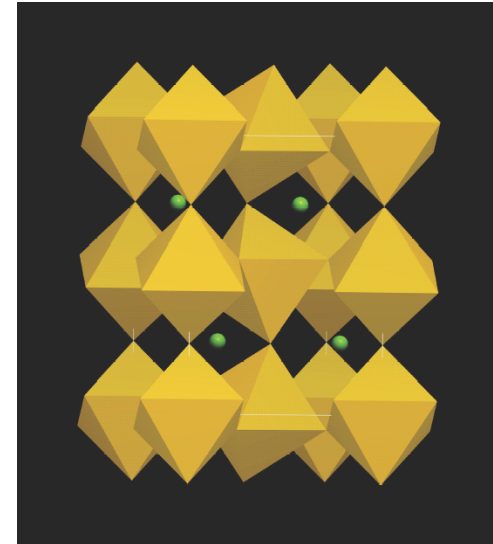




Découverte de la transition perovskite (Pv) → post-perovskite (pPv)  
 aux conditions de T et P correspondant à la base du manteau  
 (120 GPa, 2500°C)



MgSiO<sub>3</sub> perovskite



MgSiO<sub>3</sub> post-perovskite

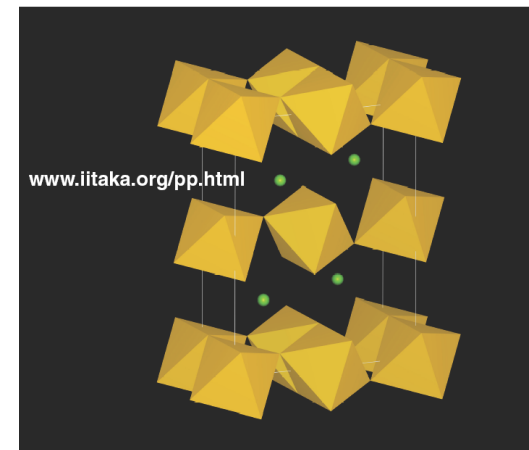
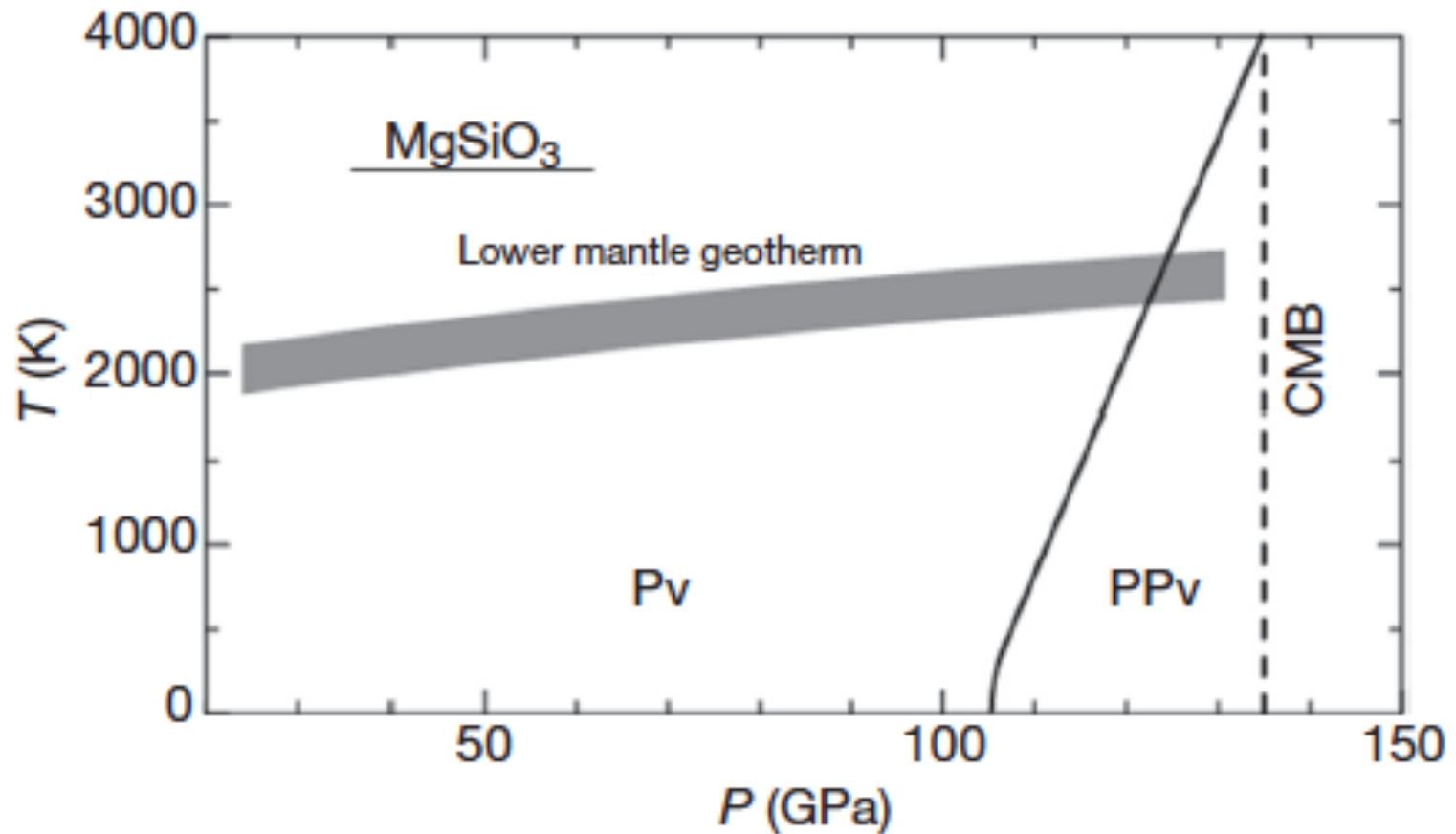
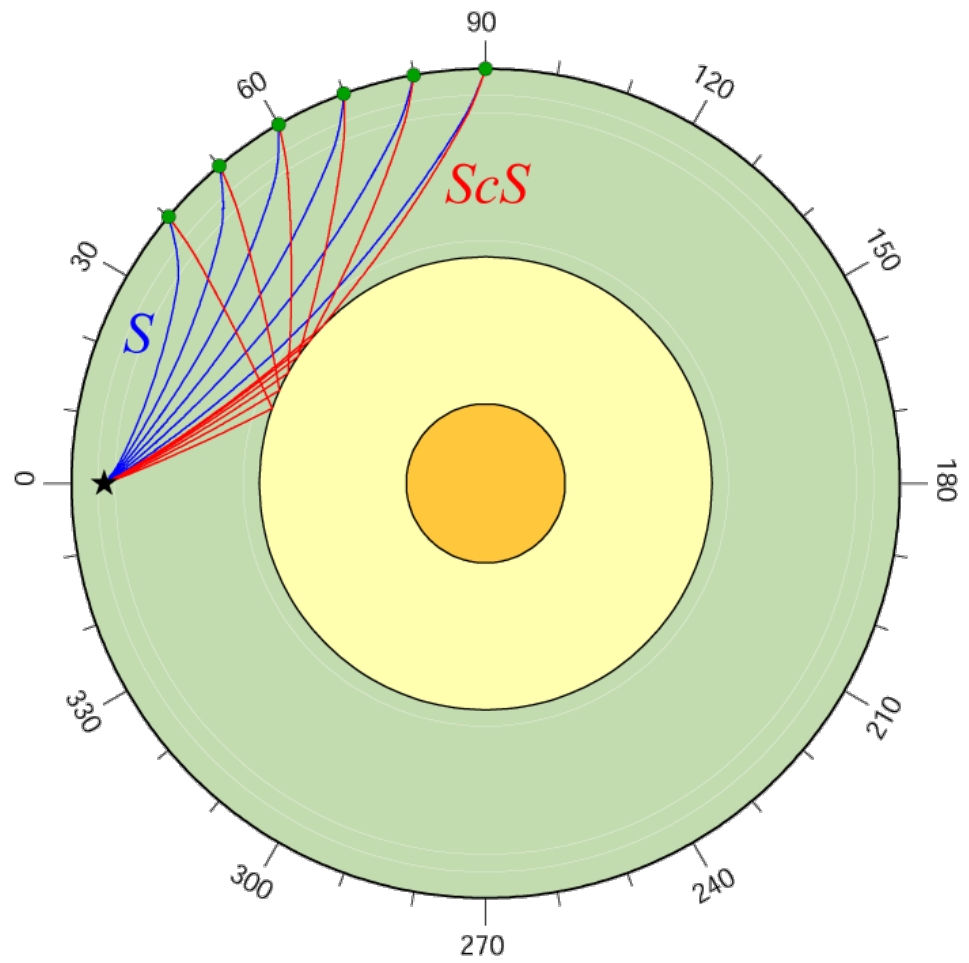
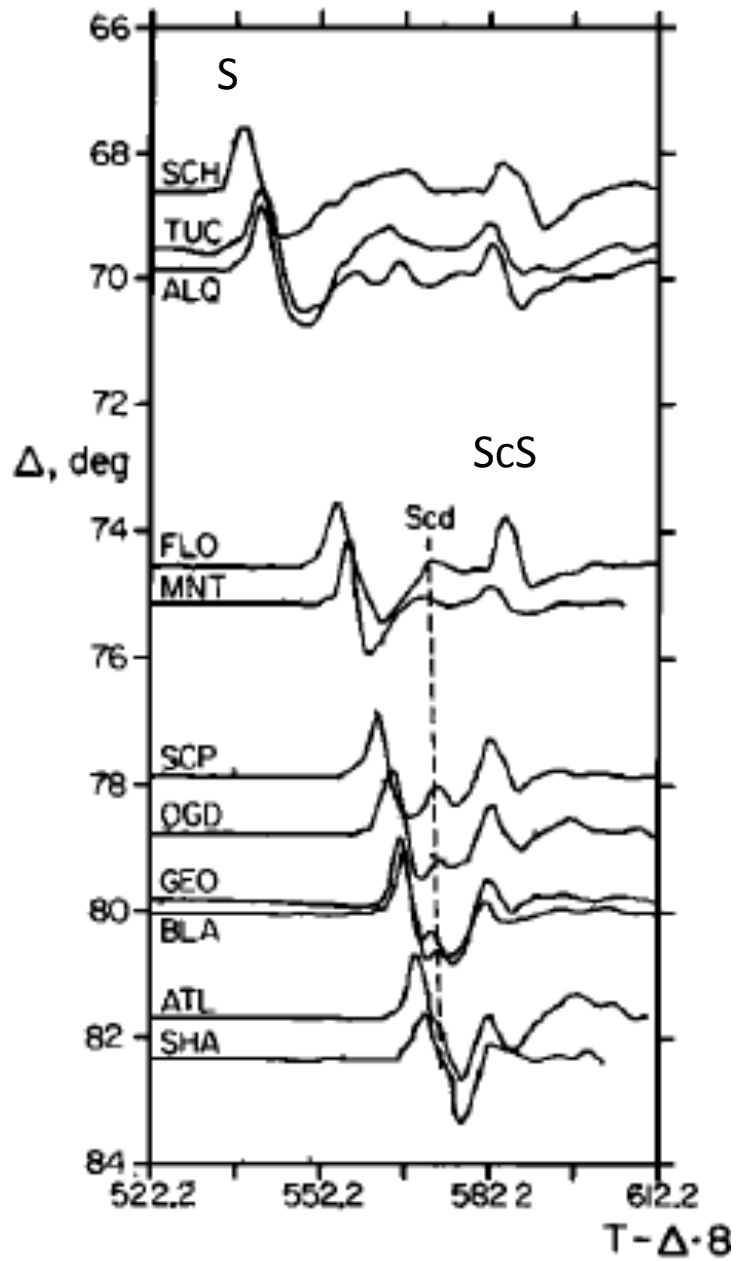


Diagramme de phase pour  $\text{MgSiO}_3$  dans le manteau inférieur basé sur les expériences LHDAC de Murakami et al. (2004) et les calculs ab-initio de Tsuchiya et al. (2004)

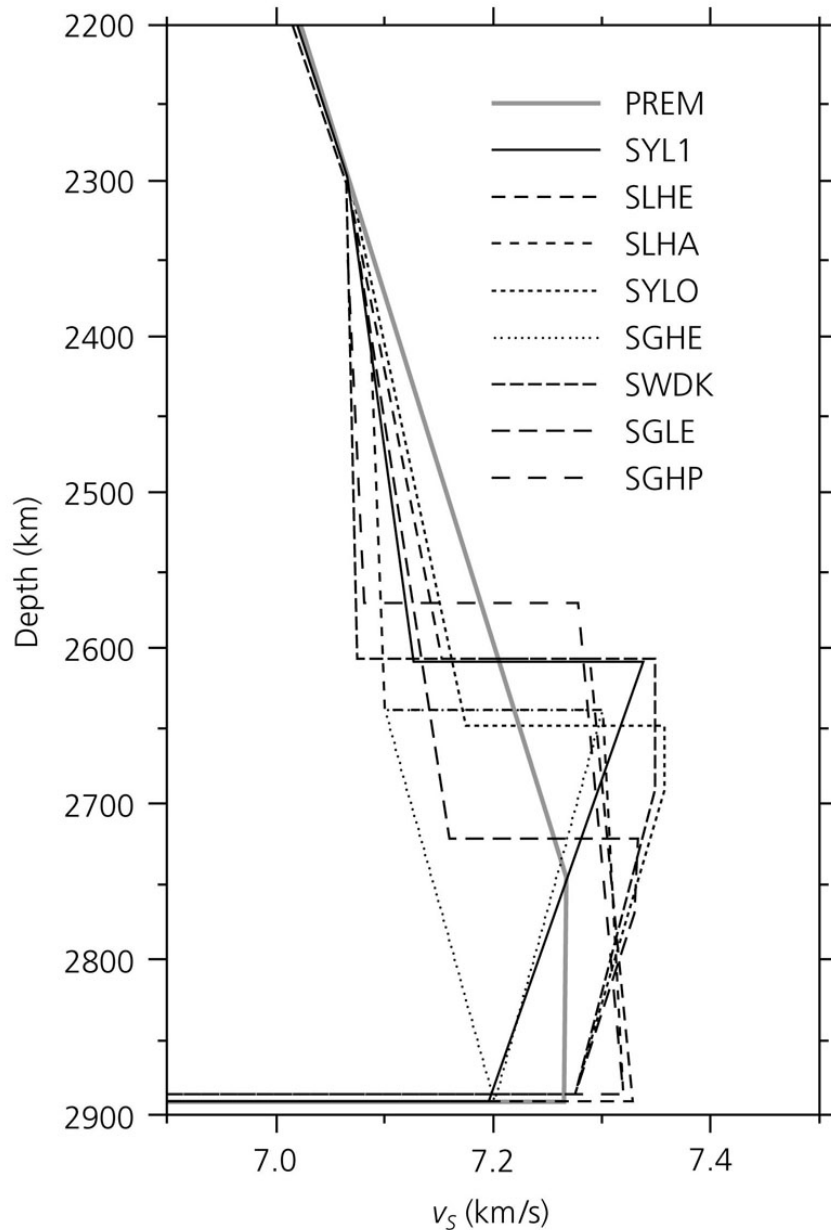


*Irifune and Tsuchiya (2015)*

# "Precurseurs" aux ondes ScS



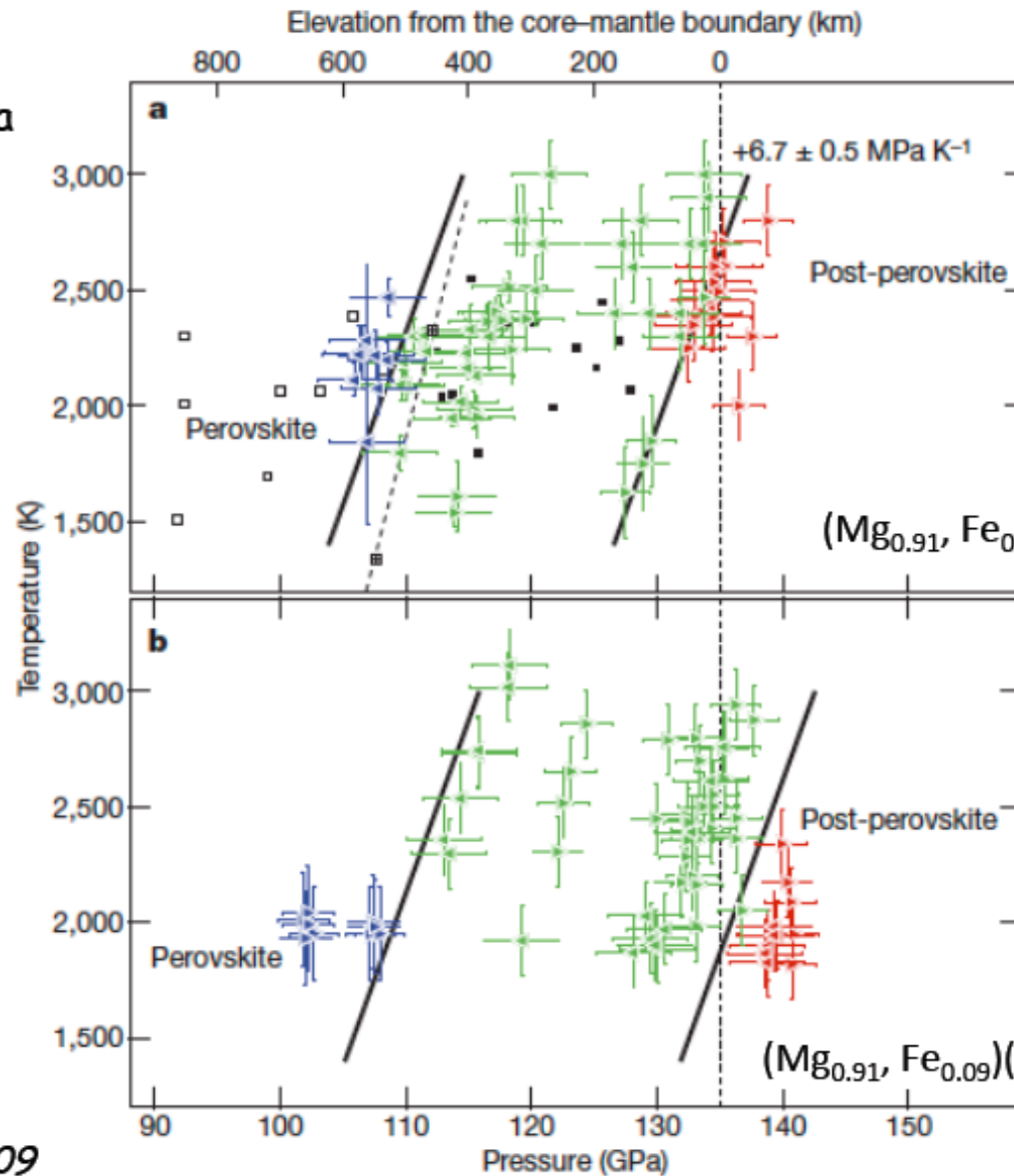
# La base du manteau terrestre



Le manteau inférieur dans son ensemble est sans doute de composition assez homogène, et le profil des vitesses sismiques et de la densité en fonction de la profondeur correspond bien à ce à quoi on s'attend avec l'augmentation de la pression.

Dans les derniers 200-300 km du manteau, le gradient change et on observe dans certaines régions une discontinuité en  $V_s$ , attribuée récemment à la transition de phase  $P_v \rightarrow pP_v$ .

Epaisseur de la  
Transition  
Pv → pPv



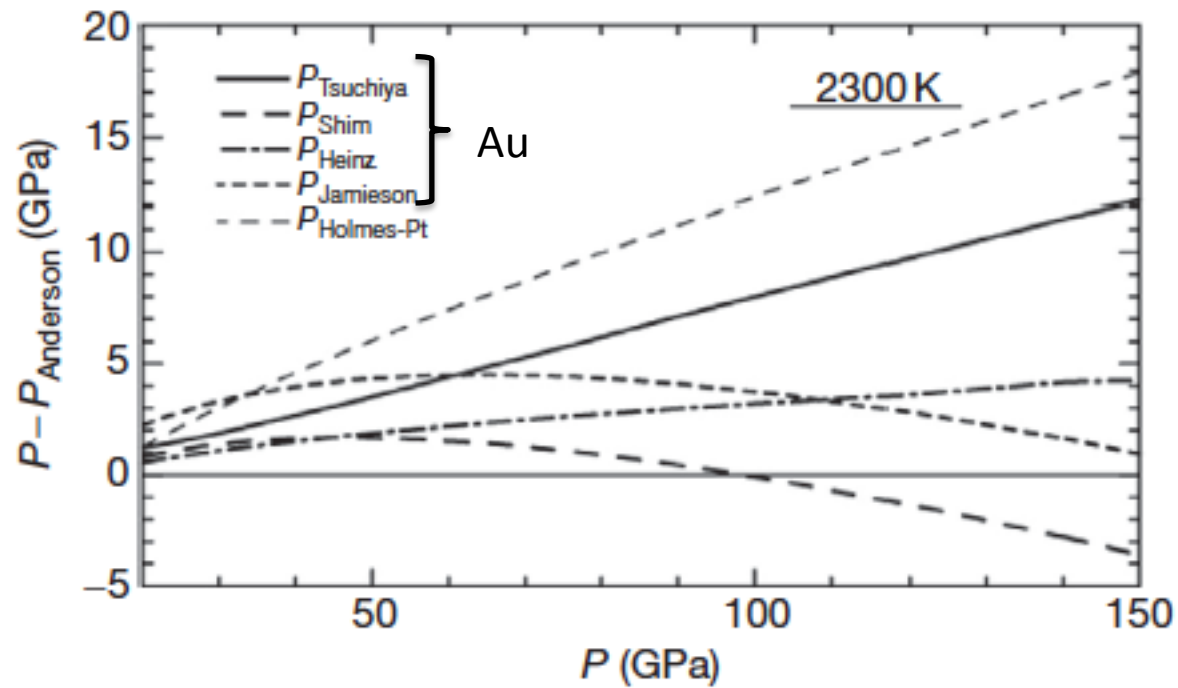
LHDAC

chauffage  
pdt 1-2 h  
plus long  
que dans les  
études  
Précédentes

Calibration  
Pression: Au

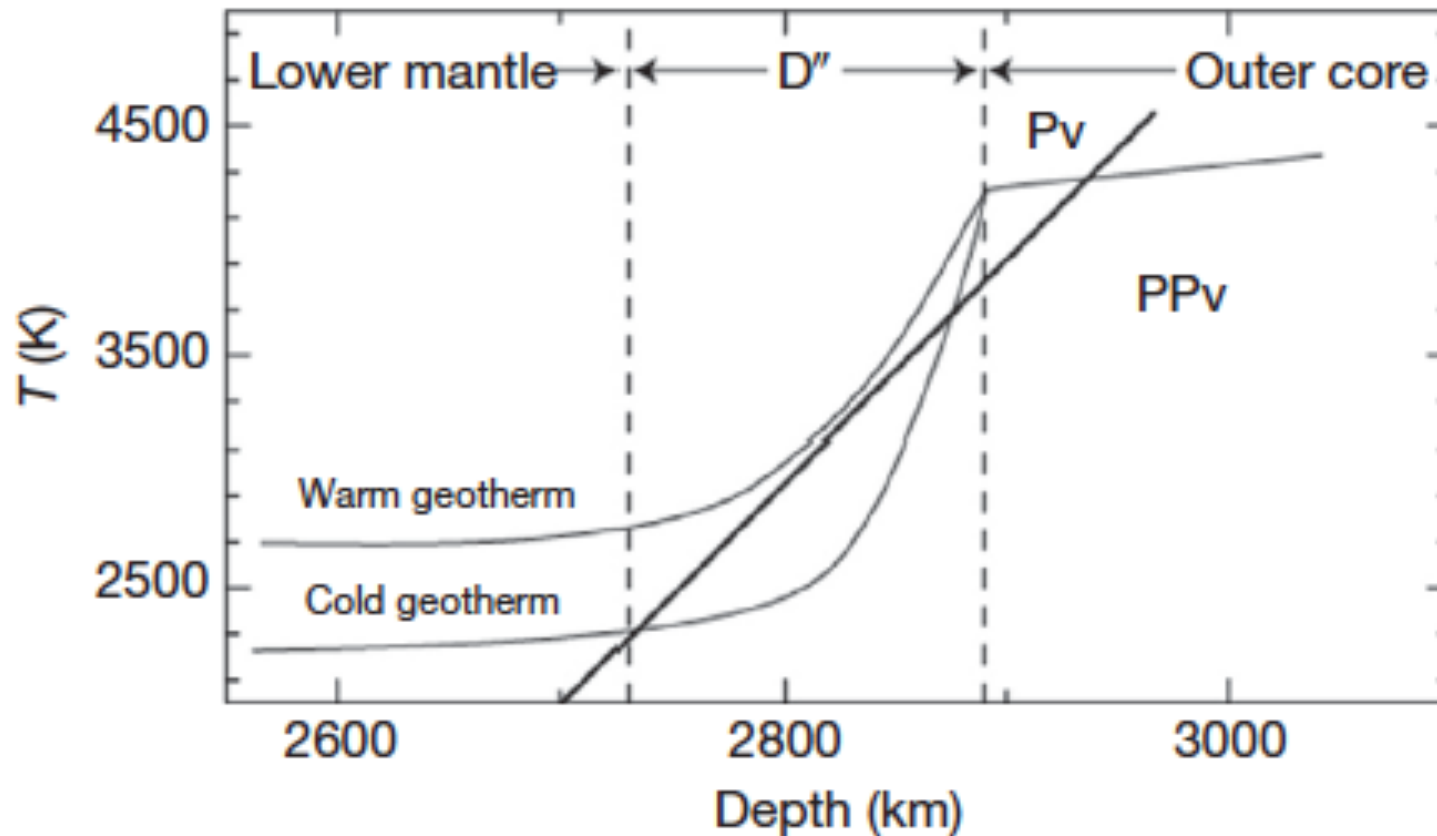
Catalli et al., 2009

Différences entre les pressions calculées à partir de différentes équations d'état pour l'or (Au) et le platine (Pt), par rapport à l'échelle d'Anderson (1989)



-> Incertitudes sur la pression mesurée -> 15-20 GPa

La pPv n'existe peut-être que dans les régions froides de la D''

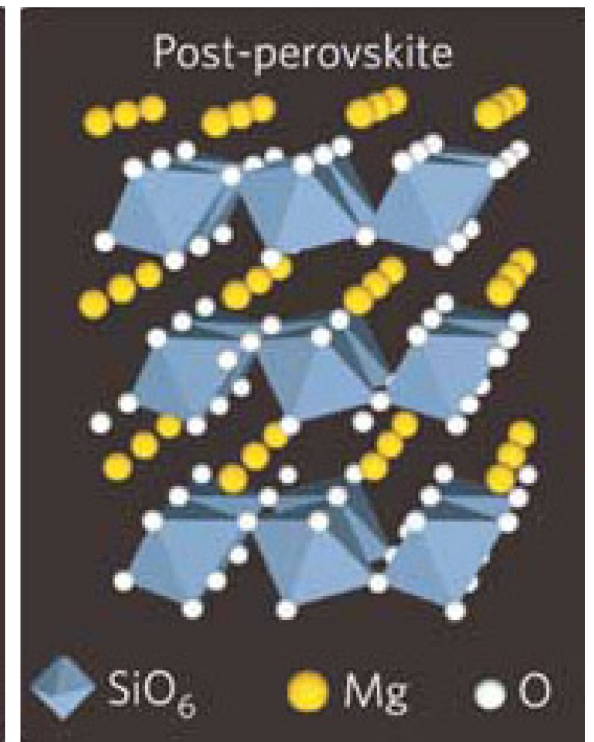
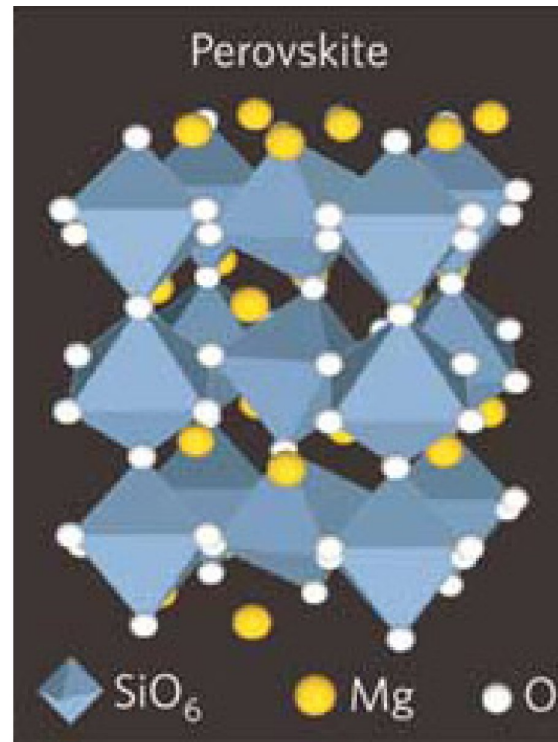
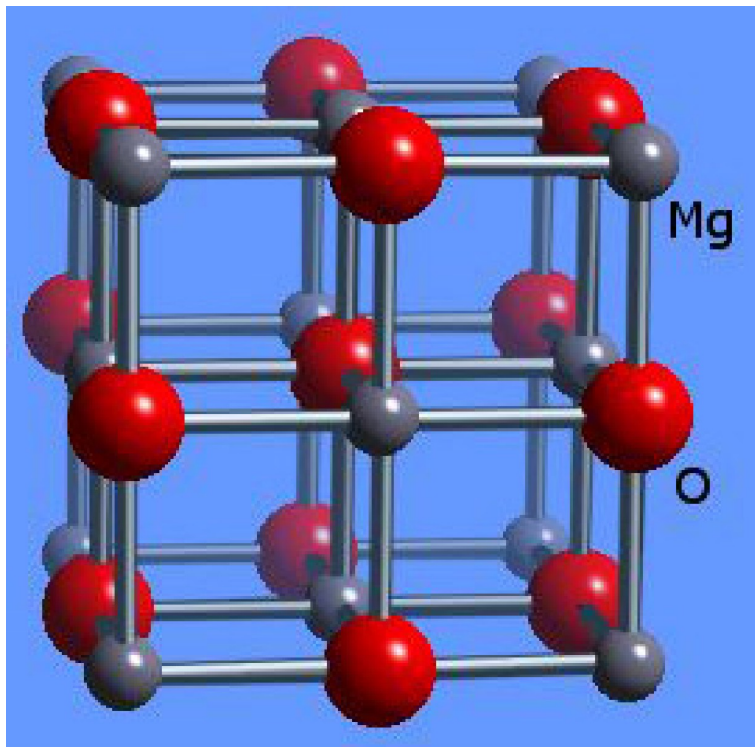


*Mais:  
Incertitudes sur la pression de la transition Pv→pPv  
et sur la pente de Clapeyron*

*Hernlund et al., Nature, 2005*

Periclase: structure  
Cubique (cf NaCl)

Bridgmanite et post-perovskite:  
Structure orthorombique



(a)

(b)

(c)

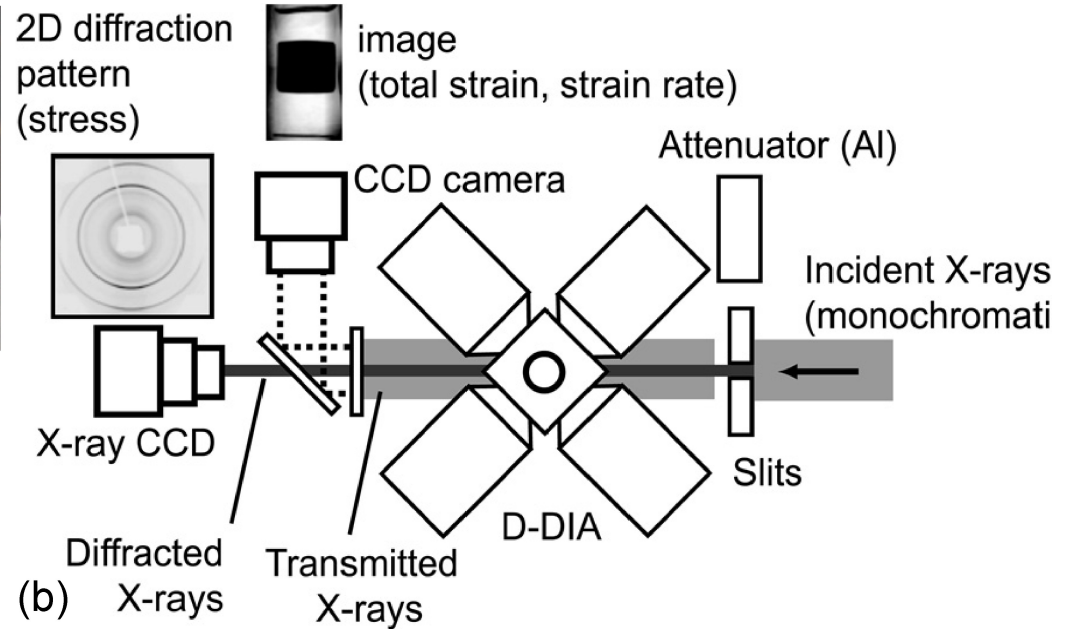
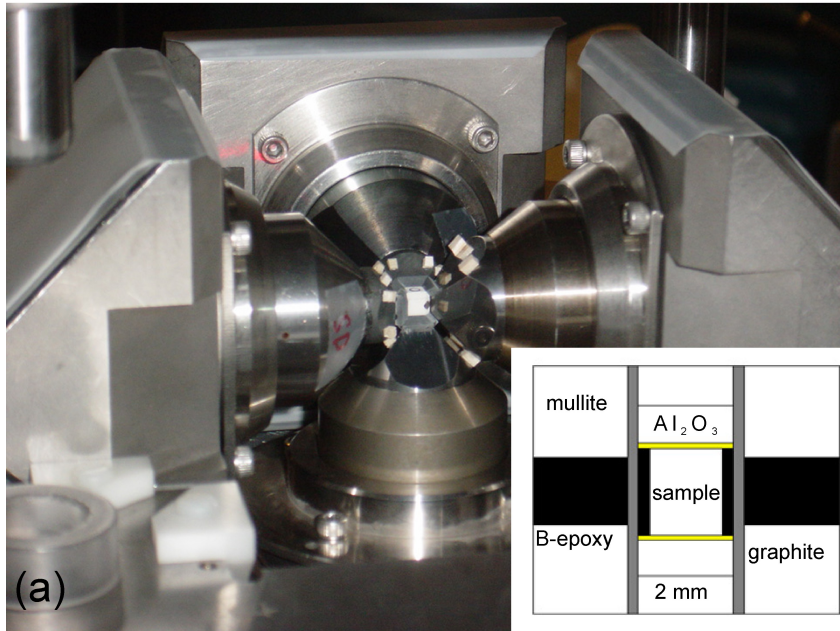
L'addition de Fe, Al, Ca and H<sub>2</sub>O introduit  
de la complexité



# Etude de la déformation aux conditions du manteau inférieur profond

- -> atteindre simultanément 100-140 GPa et 3000K
- -> contrôler les contraintes et les déformations
- -> contrôler la vitesse de déformation
  
- Mesures sur la bridgmanite et le ferro-periclasite plus faciles que sur la pPv
  
- Mesures sur des matériaux analogues: Germanium
  - ( $\text{MgGeO}_3$  -> pPv à  $\sim 80\text{GPa}$ ,  $\sim 2100\text{K}$ ), mais contraintes fortes (15GPa) (Miyagi et al., 2011)
  - Wang et al. (2013) ( $\text{CaGeO}_3 + \text{MgO}$ ) - 10GPa, 600-1200K
  
- Mesures à haute P mais basse T (Marquardt et al., 2015; Merkel et al., 2002, 2003)
  - mais mécanismes de déformation dépendent de la température et de la vitesse de déformation

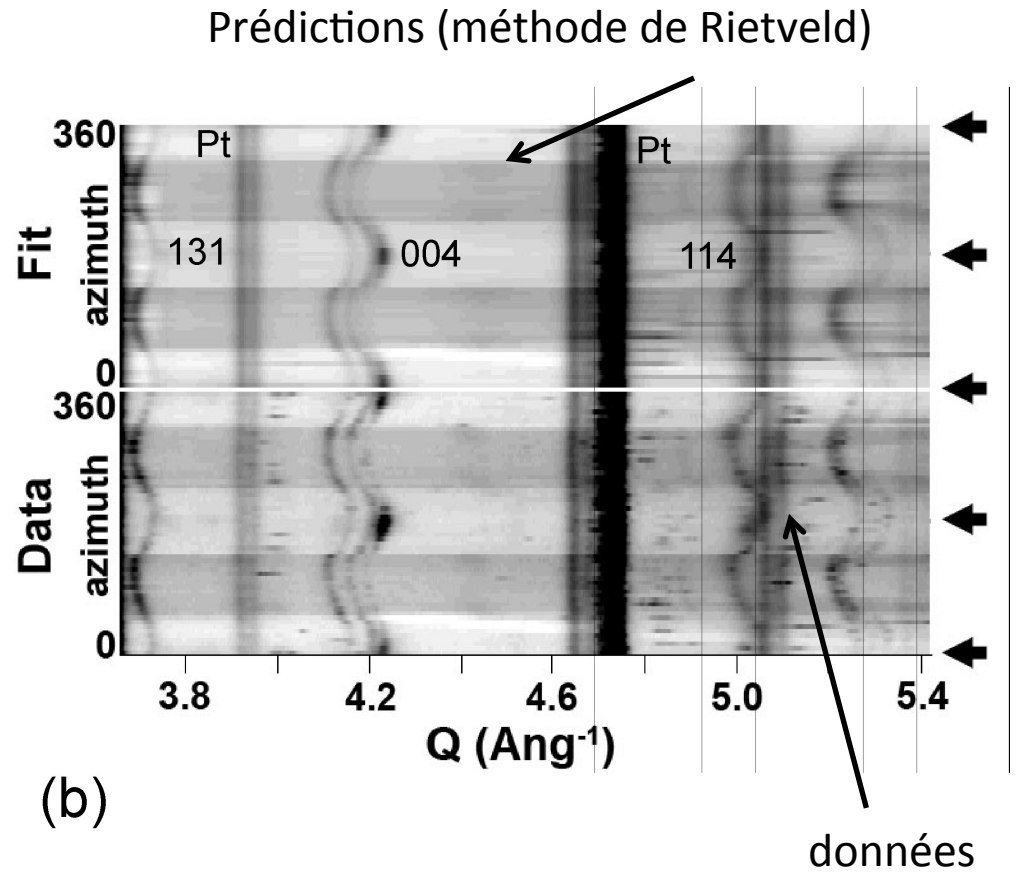
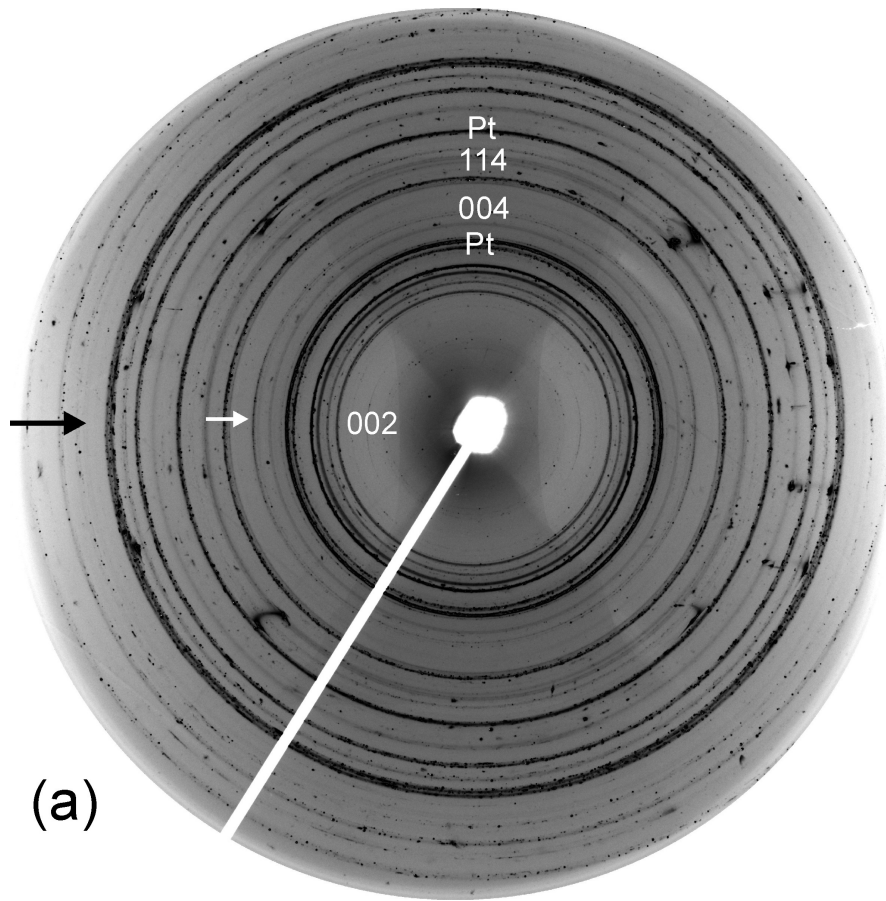
# Mesure de la déformation à très hautes pressions: D-DIA



3 paires de pistons octohedraux; chauffage interne → 20 Gpa  
Echantillons de ~1 mm de diamètre

Kawai-type: - enclumes de polycristaux de diamant compactés, avec inclusion de Co and Si,  
- en forme de cube de plus de 10 mm de côté → 100 GPa

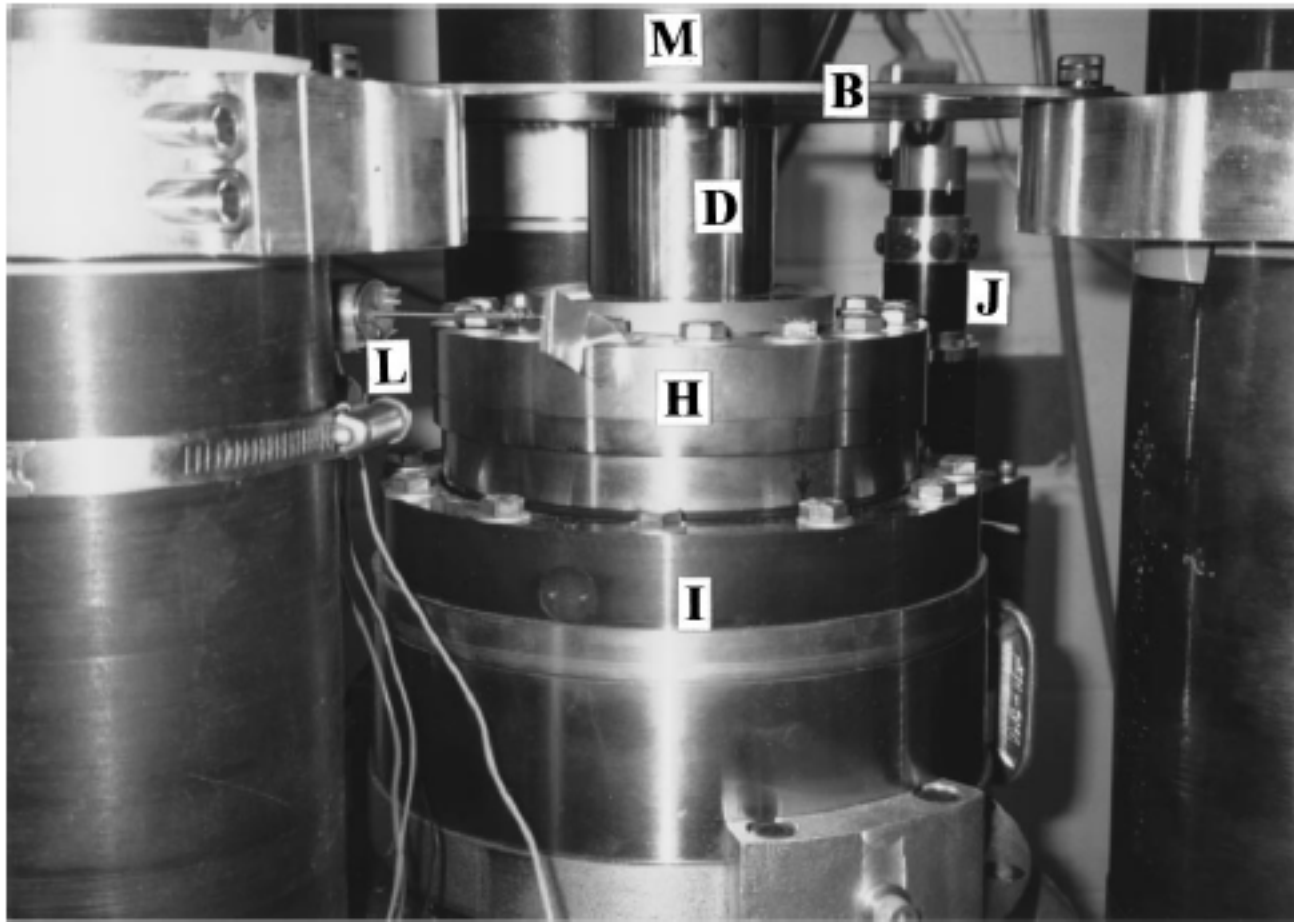
Image CCD de diffraction de rayons X sur la post-perovskite  $MgSiO_3$  obtenue "in situ" (DAC)



$P = 150 \text{ GPa}$

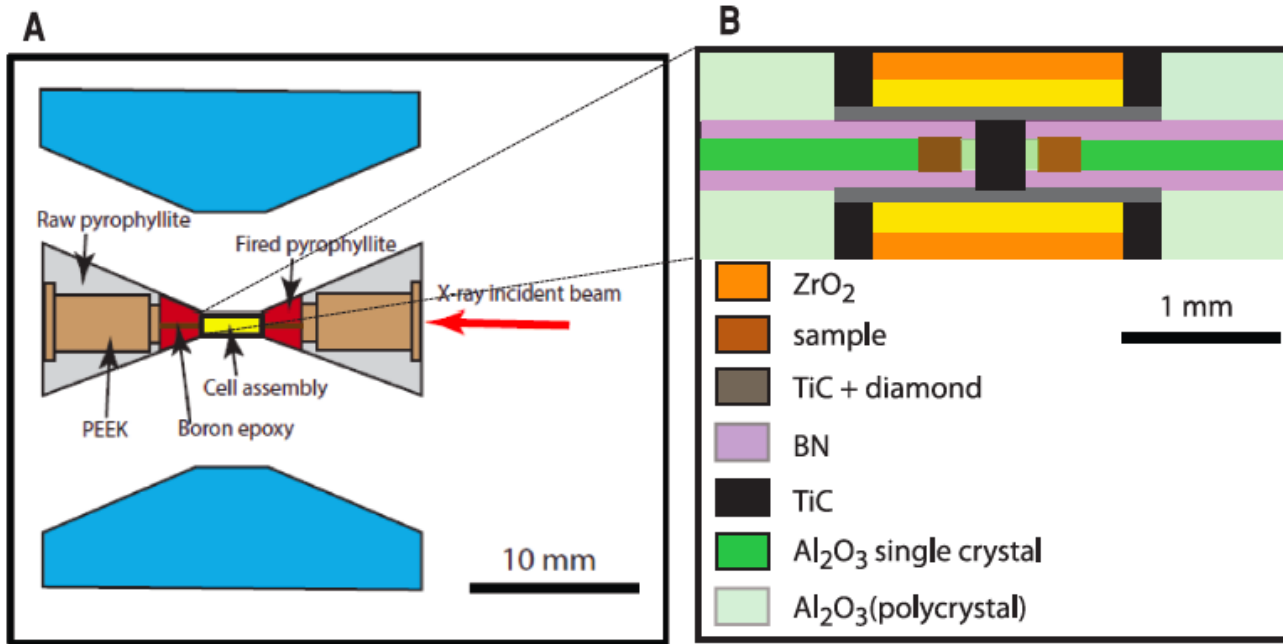
-> Information sur les phases présentes, la structure cristalline, la densité, les propriétés élastiques et l'orientation préférentielle des cristaux

## Systeme de Drickhamer (Rotational Drickhamer Apparatus - RDA)



D: enclumes - celle du haut est fixe (D,B,M), celle du bas est connectée à une pièce tournante (H, I) activée par un moteur (J) -> permet d'atteindre des déformations en torsion importantes (Yamazaki and Karato, 2001:  $\gamma$  de 4-6 à 15GPa)

Mesures expérimentales dans RDA  
 Aux conditions du haut du manteau inférieur:  
 $P = 24-27.5 \text{ Gpa}$ ;  $T=2000-2150 \text{ K}$

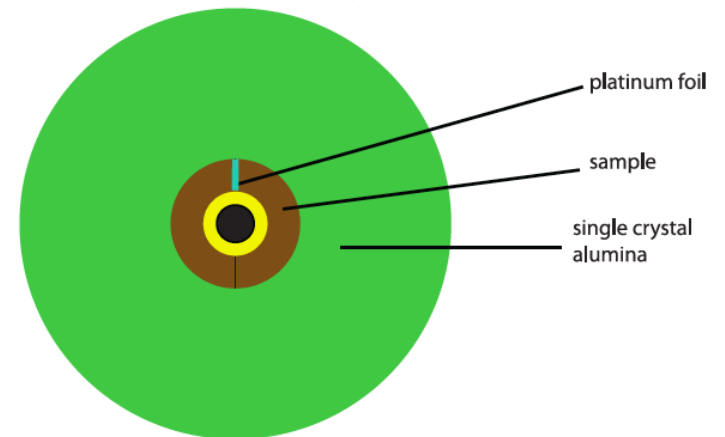


PEEK= Polyetheretherketone

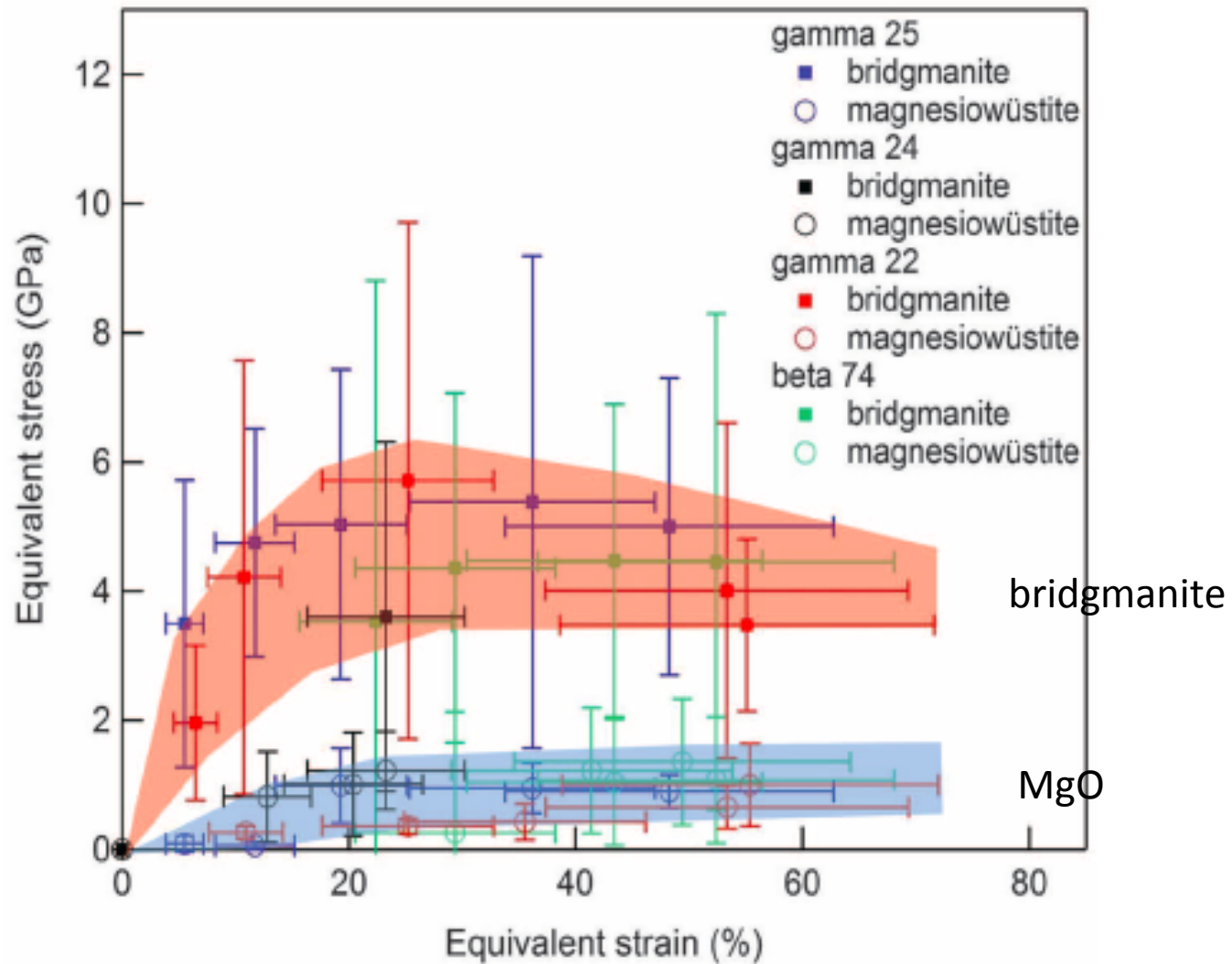
Bridgmanite+Magnesiowustite

$$\dot{\epsilon} \sim 3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

Top view of the cell assembly

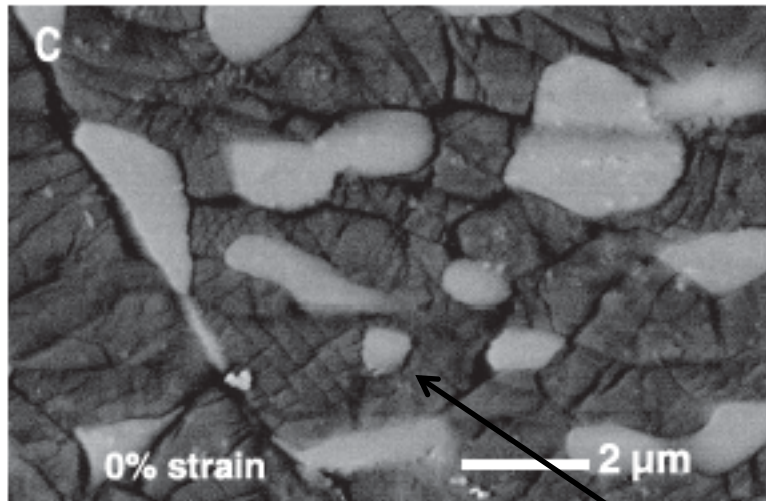


## Estimation de la contrainte à partir des pics de diffraction (110) et (112)

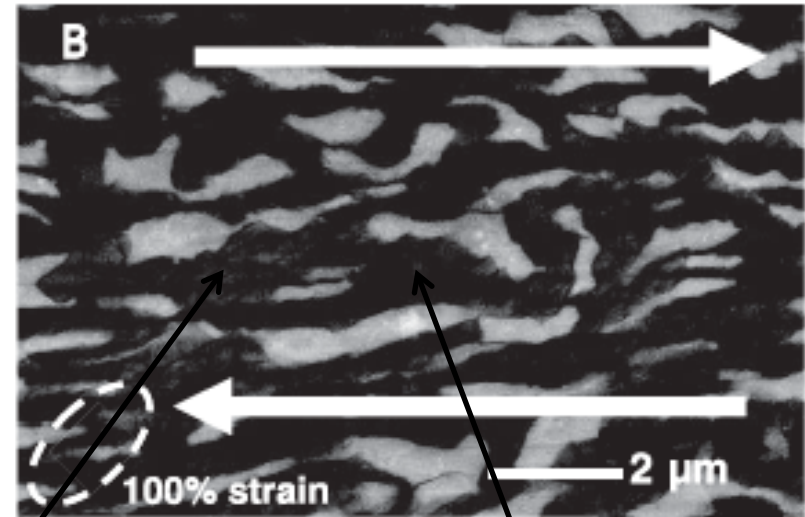


=> Le (Mg,Fe)O est plus déformable que la bridgmanite

Echantillon non déformé



échantillon déformé jusqu'à 100%  
(back-scattered electronic image)



bridgmanite

Magnesiowustite  
(grains isolés))

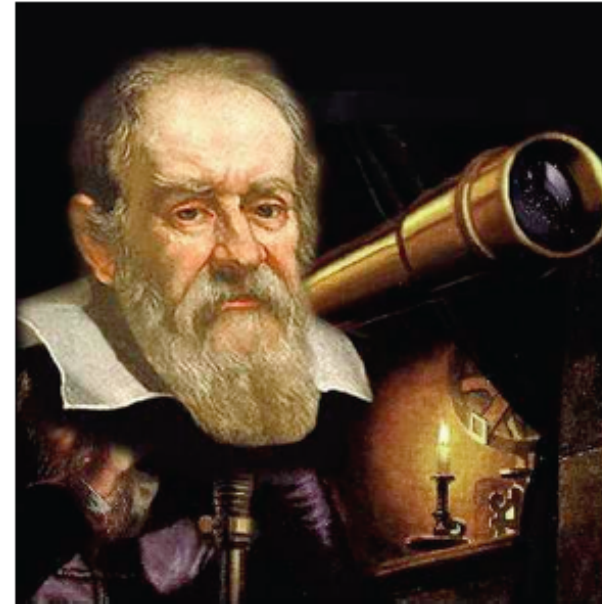
=> Grands contrastes de propriétés de déformation peut entraîner une localisation du cisaillement, ce qui pourrait limiter la déformation aux couches limites pour la convection mantellique et très peu de déformation dans l'ensemble du manteau inférieur

=> Déformations atteintes encore faibles pour bien caractériser le processus

*Girard et al., 2016, Science*



Galileo Galilei (Leyden 1638)



$$\dot{\epsilon} = 10^{-16} \text{ s}^{-1}$$

$$\epsilon = 10^{-6} = 0.0001\% \text{ in 4 centuries}$$

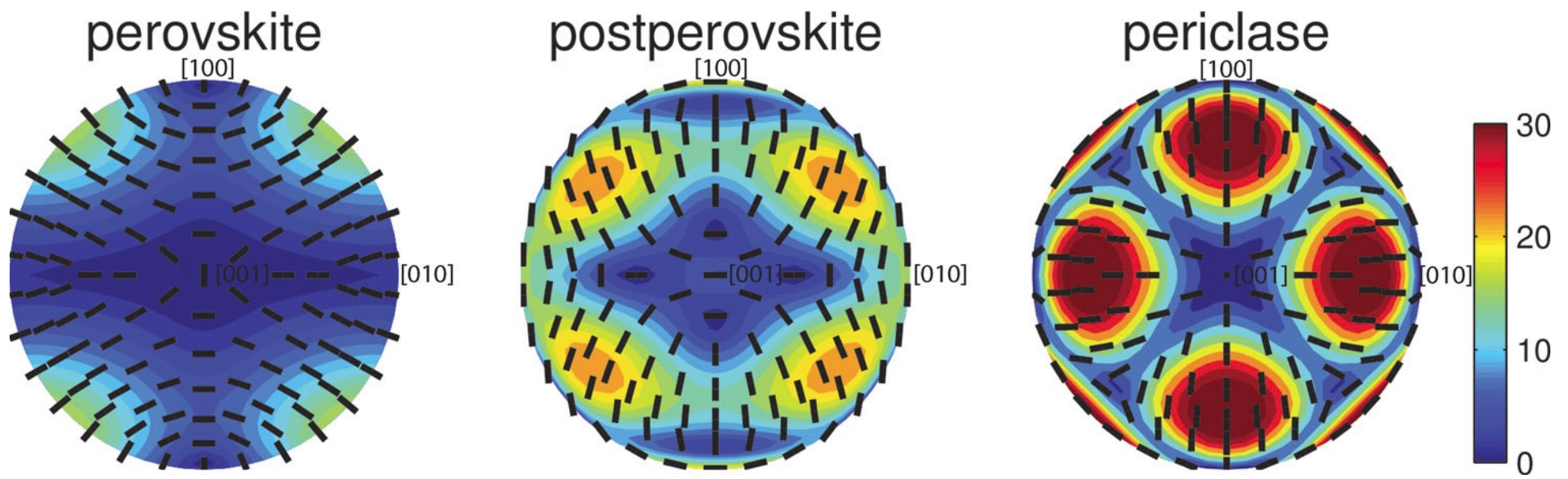
100 nm shortening for a 10 cm sample....



# Une alternative: calculs ab-initio

- But: résoudre les équations fondamentales de la mécanique quantique avec le moins d'approximations possible
- DFT (density functional theory; Hohenberg and Kohn, 1964; Kohn and Sham 1965): Hamiltoniens de systèmes avec grand nombre d'électrons
  - Permet de traiter un tel système comme un système à un seul électron, les autres étant traités dans le cadre d'un "fond adiabatique" en séparant la partie des électrons isolés de celle de l'interaction entre électrons (LDA - local density approximation et améliorations successives)
  - -> prédit la stabilité et certaines propriétés physiques de matériaux du manteau aux P et T du manteau inférieur avec des incertitudes comparables à celles des expériences en laboratoire
  - Par exemple: découverte simultanée des théoriciens de la pPv  $\text{MgSiO}_3$  (Oganov and Ono, 2004; Tsuchiya et al., 2004; Iitaka et al., 2004)
  - Méthodes plus sophistiquées pour traiter les systèmes avec Fe
  - Extension aux températures élevées grâce à la thermodynamique des phonons
    - Calcul des équations d'état  $\rho = f(T,P)$  et autres propriétés aux conditions du manteau entier
  - Difficultés pour déterminer les plans de glissement préférentiels

# Propriétés élastiques des minéraux aux conditions P,T du manteau très profond (3000K, 125GPa)



Splitting des ondes S (m/s)

	$\rho$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{55}$	$C_{66}$
Periclase	5.07	1154.0	265.5	265.5	1154.0	265.5	1154.0	198.0	198.0	198.0
Bridgmanite	5.25	860.0	535.5	437.0	1067.5	467.5	1053.0	294.0	249.5	284.5
Ppv	5.35	1220.0	474.0	359.0	899.0	493.0	1176.0	273.0	245.0	376.0

Calculs théoriques: Wentzcovitch et al., 2004; Karki et al. 2000; Stackhouse et al., 2005

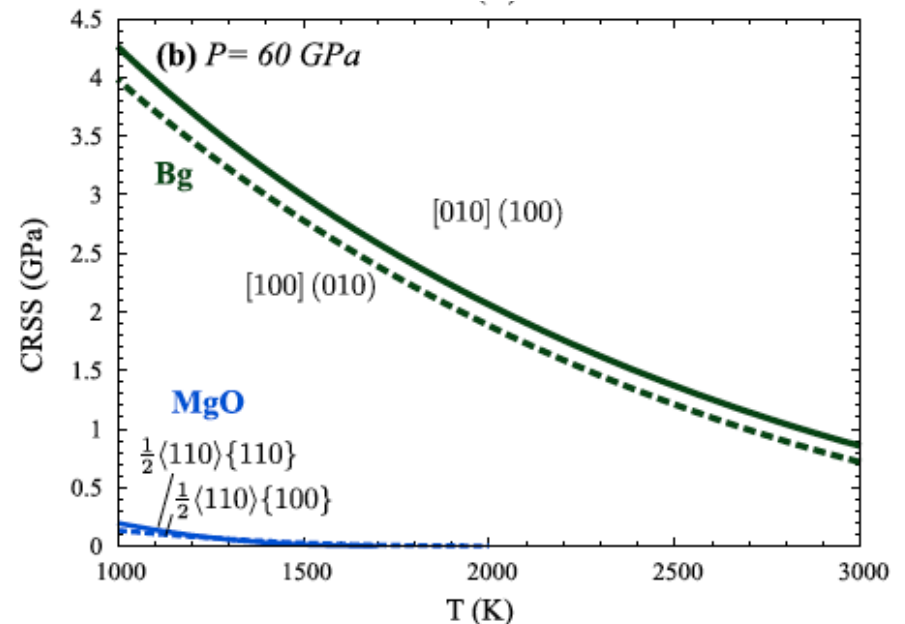
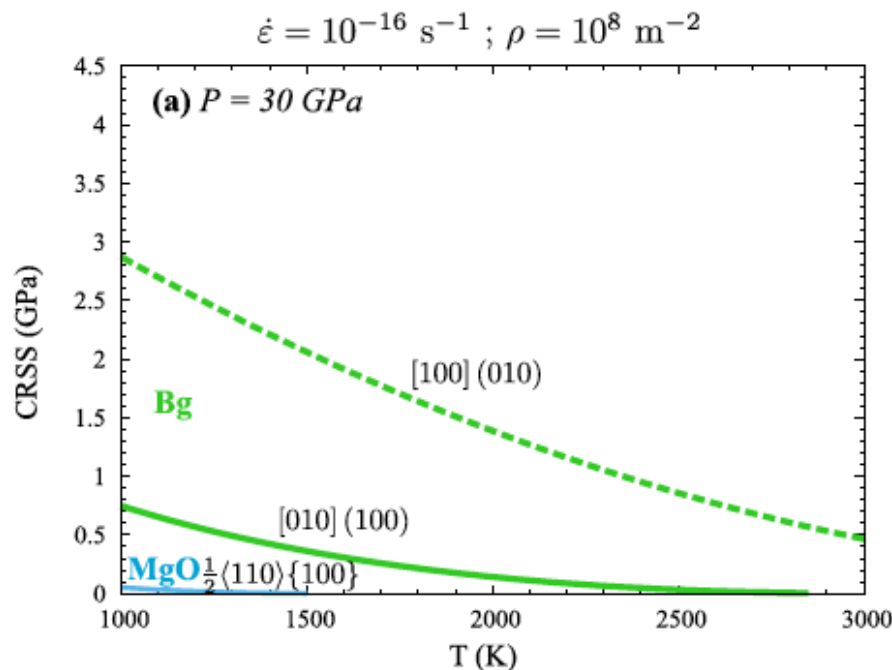
# Une nouvelle approche...

- Calcul de la contrainte de Peierls (Carrez et al., 2007, Nature) suivant les caractéristiques des liaisons atomiques
  - contrainte nécessaire pour déplacer une dislocation d'une unité dans un plan atomique : dépend de la distance entre les plans et de la taille de la dislocation
  - = énergie d'activation pour déplacer une dislocation unique dans un cristal parfait
- Permet d'estimer l'activité des différents systèmes de glissement pour une grande plage de conditions de P, T et de vitesses de glissement
  - La résistance à la déformation de la bridgmanite croît rapidement avec la pression → (facteur 20 entre bridgmanite et periclase à 60 Gpa)
  - L'inverse se produit pour la pPv

Propriétés mécaniques des minéraux du manteau très profond:  
Développement de texture par glissement de dislocations dans  
la bridgmanite  $\text{MgSiO}_3$

Systèmes de glissement préférentiels obtenus par calcul ( e.g. Ferré et al., 2007):  
[100](010) et [010](100)

Calcul des "surfaces  $\gamma$ " (generalized stacking faults) en 3D à partir de potentiels inter-atomiques

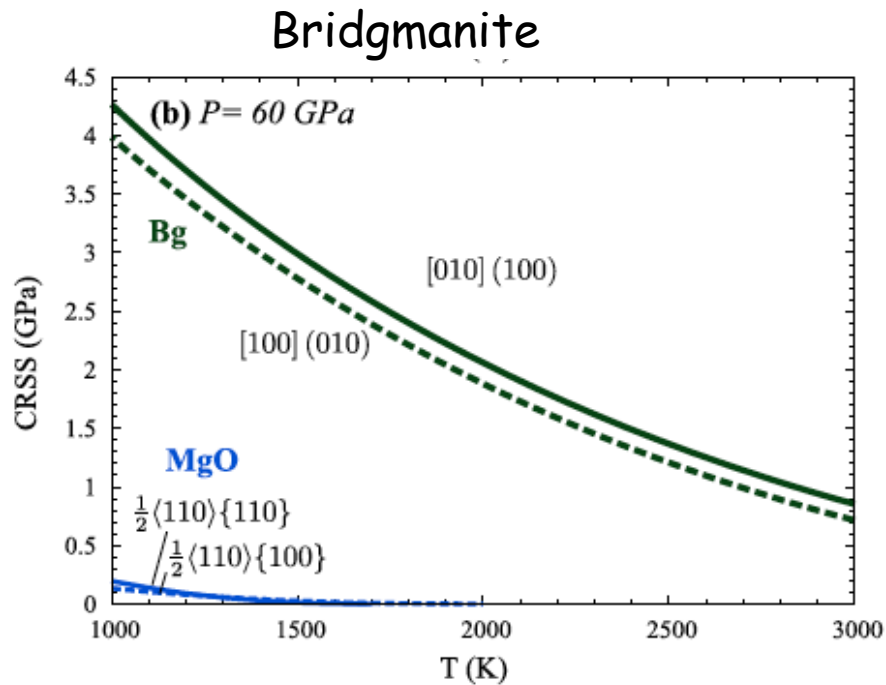


-> La bridgmanite et le periclase sont des phases très peu déformables aux conditions du manteau inférieur

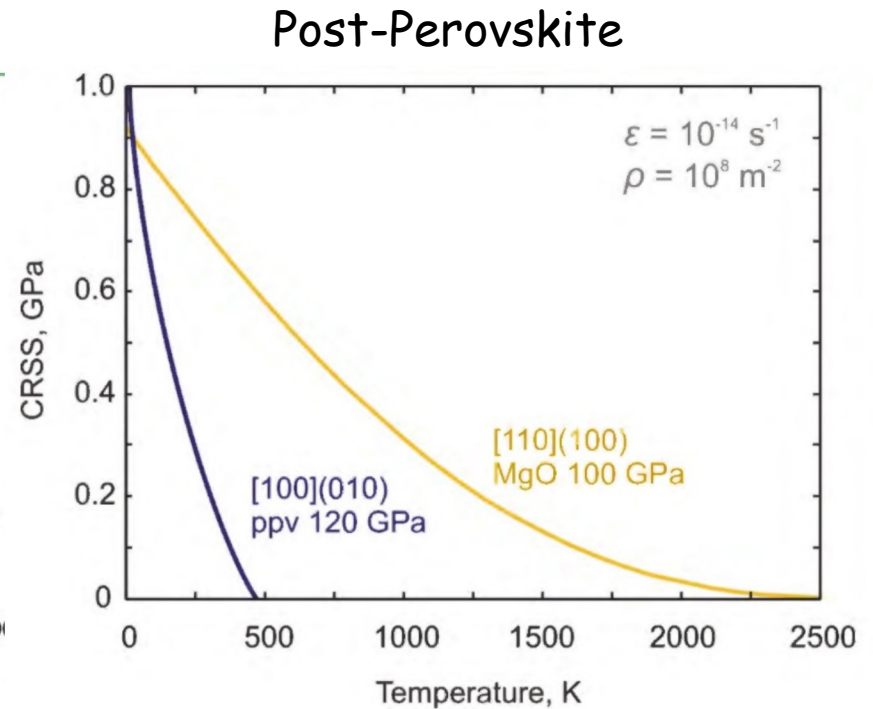
Kraych et al., 2016, EPSL

Pour le periclase: Amodeo et al., 2012

Propriétés mécaniques des minéraux du manteau très profond:  
 Développement de texture par glissement de dislocations



*Kraych et al., 2016, EPSL*



*Gorayeva et al., 2016  
 Nature, Sci. Rep.*

- > La post-perovskite est très déformable-> viscosité très faible dans les parties de la D'' qui contiendraient de la pPv
- > Orientation préférentielle des cristaux le long de (010)
- > atténuation forte

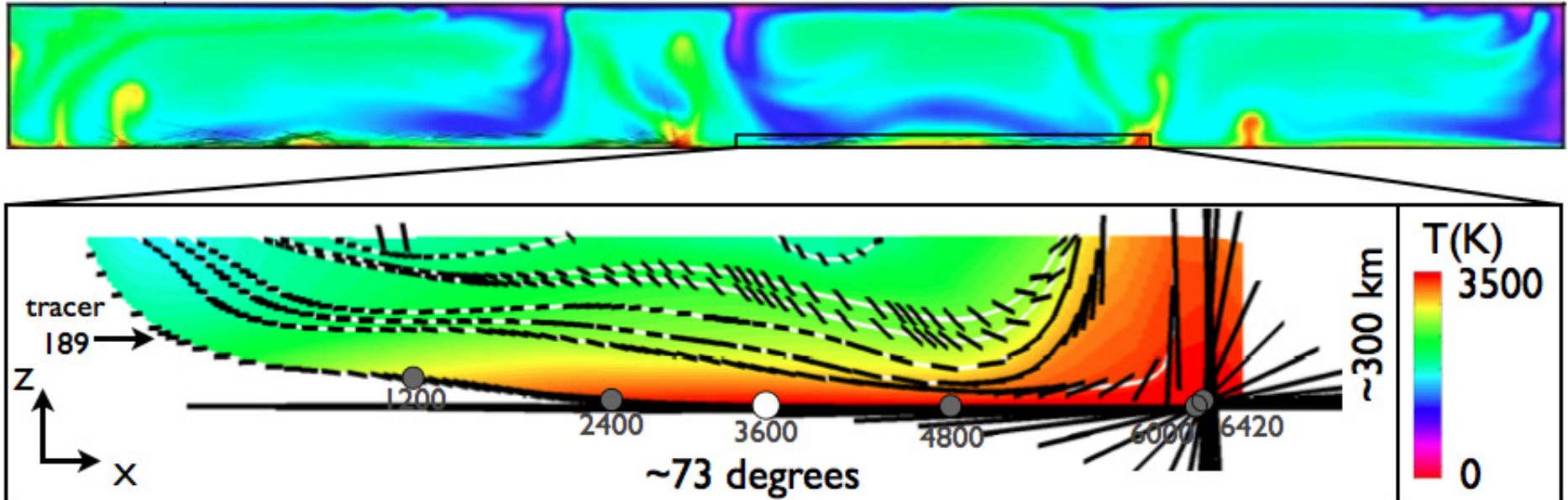
# Géodynamique, physique des matériaux et sismologie

- Deux approches:
  - 1) A partir d'un modèle géodynamique → calcul de la déformation puis introduction de modèles de micro-structure (CPO polycristallin, plans de glissements) pour prédire l'anisotropie sismique)
    - Viscosité isotrope et variant de manière continue (lisse)
    - Prediction regionale (region de plaque plongeante)
    - Wenk et al. (2012) en 2D; Cottaar et al. (2014) en 3D
  - 2) A partir d'un modèle de tomographie sismique globale, et d'un modèle de viscosité 1D, calcul d'un modèle d'écoulement instantané contraint par les observations du champ de gravité et des mouvements des plaques tectoniques  
--->-distribution globale de l'anisotropie sismique.
    - Walker et al. (2011); Nowacki et al. (2013)
- Dans les deux cas:
  - Suivi du trajet de particules
  - Développement de textures dans des agrégats polycristallins (500-1000 grains) par la méthode VPSC (Lebehnsohn and Tomé, 1993)
  - Calcul du tenseur élastique de l'agrégat en tout point du volume considéré
- But: comparer les prédictions d'anisotropie sismique pour les différents systèmes de glissement proposés pour la post-perovskite (pPv):
  - (100), (010), (001) (Merkel et al., 2004, 2007; Miyagi et al. 2010,2011)
  - Et aussi pour les autres minéraux du manteau inférieur (Pv, et (Mg,Fe)O

# 1er type de modélisation

- A partir d'un modèle géodynamique (Wenk et al., 2011; Cottar et al., 2014)
  - Suivi de traceurs
  - Elasticité, VPSC polycristallin
  - Plans de glissements préférentiels
  - > prédiction de l'anisotropie sismique

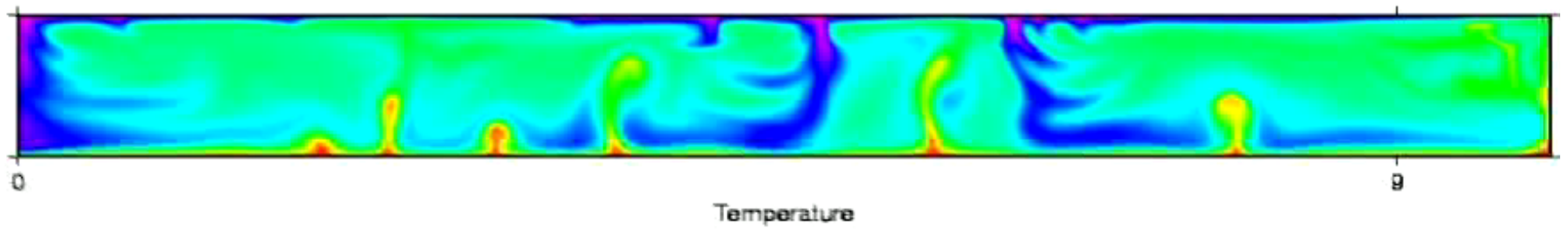
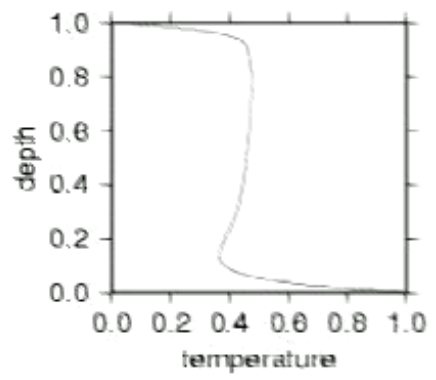
## Modèle 2D



En haut: température à un instant donné

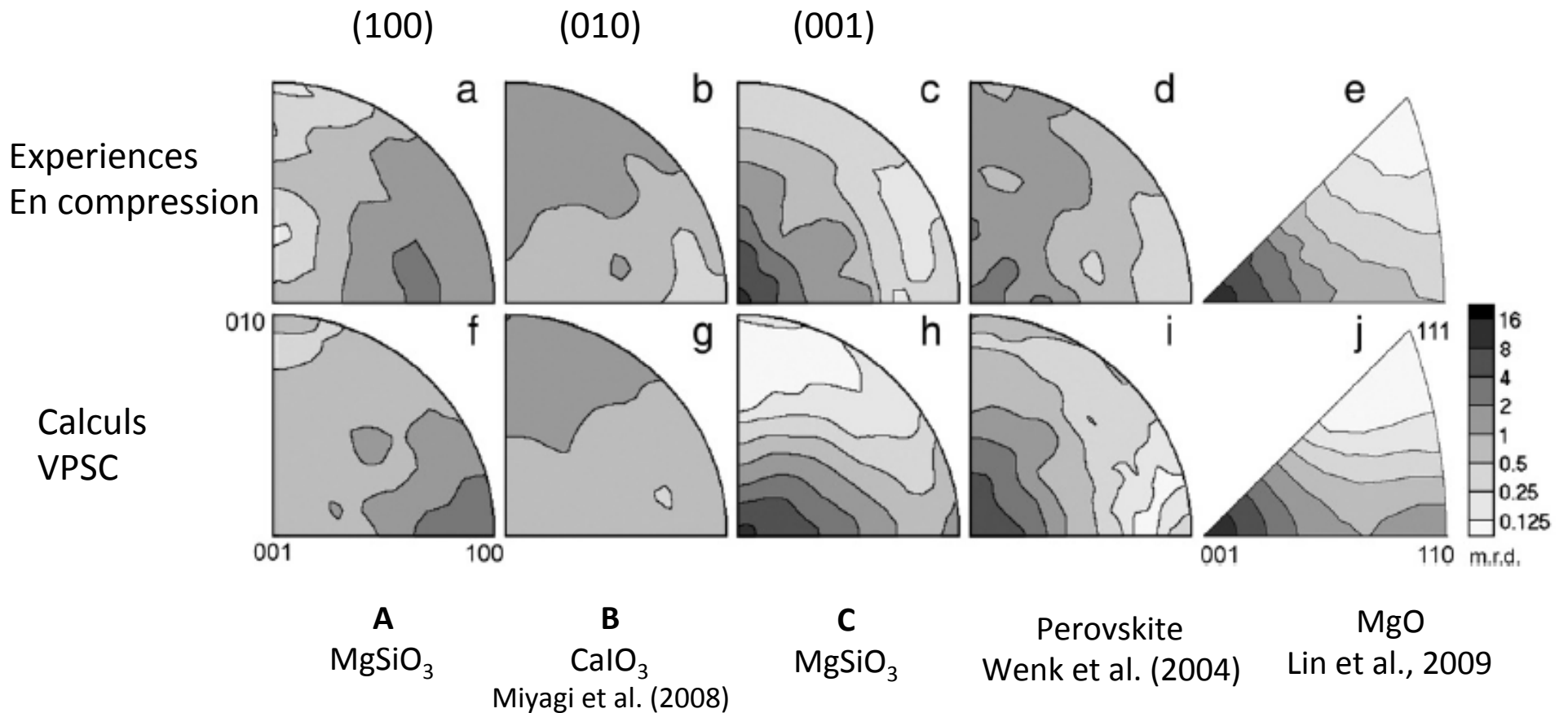
En bas: portion de l'espace agrandie montrant quelques particules et la direction de l'axe principal de l'ellipse de déformation à différents instants





# Glissements dominants à partir de résultats expérimentaux et calculs VPSC

Glissement dominant:



3 modèles différents de pPv

*Wenk et al., 2011 EPSL*

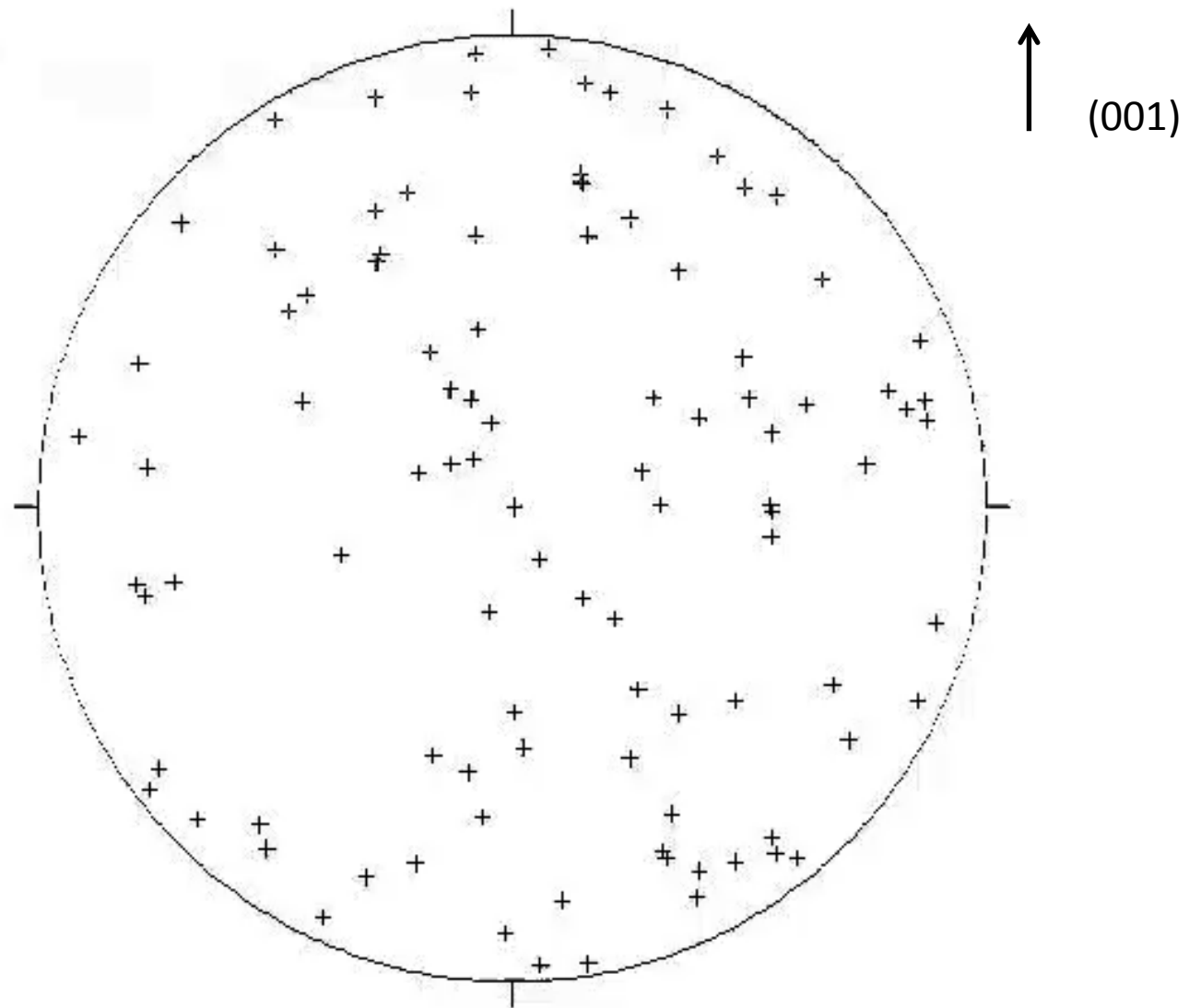
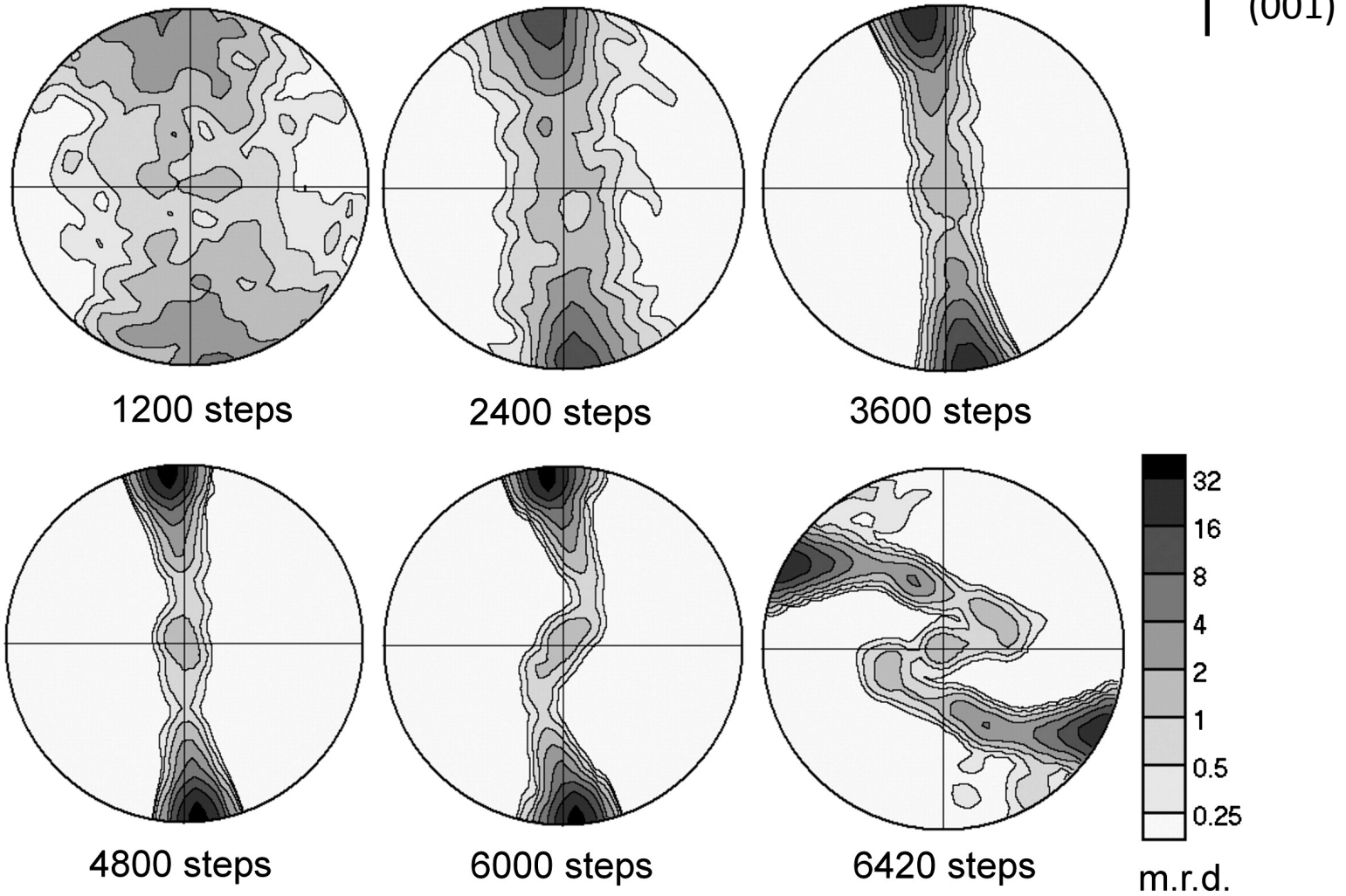


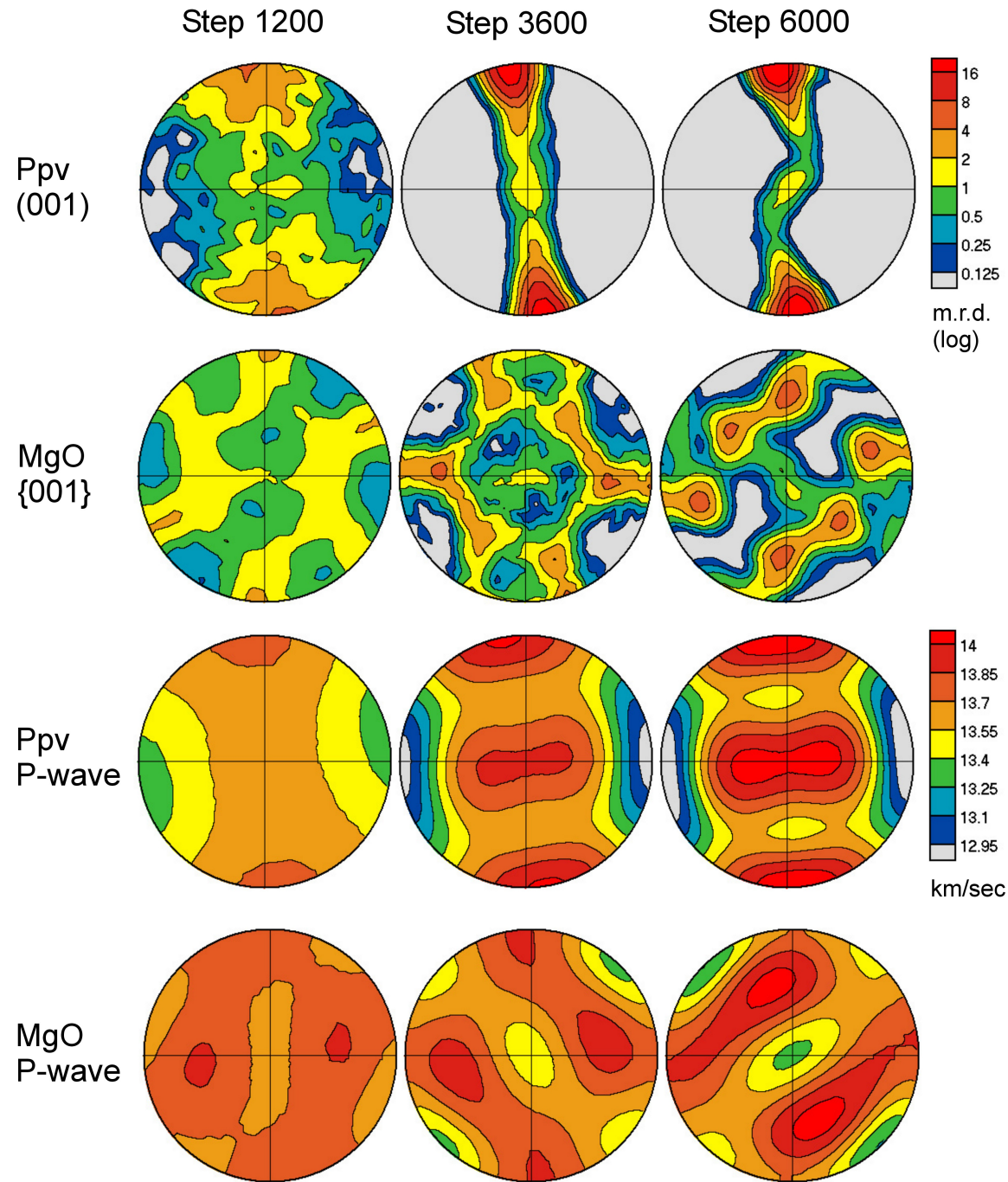
Figure polaire (001) pour 100 grains du modèle "C" de la pPV  
La limite noyau manteau est horizontale

Particule 189= evolution de la texture au cours du temps pour la pPv type C

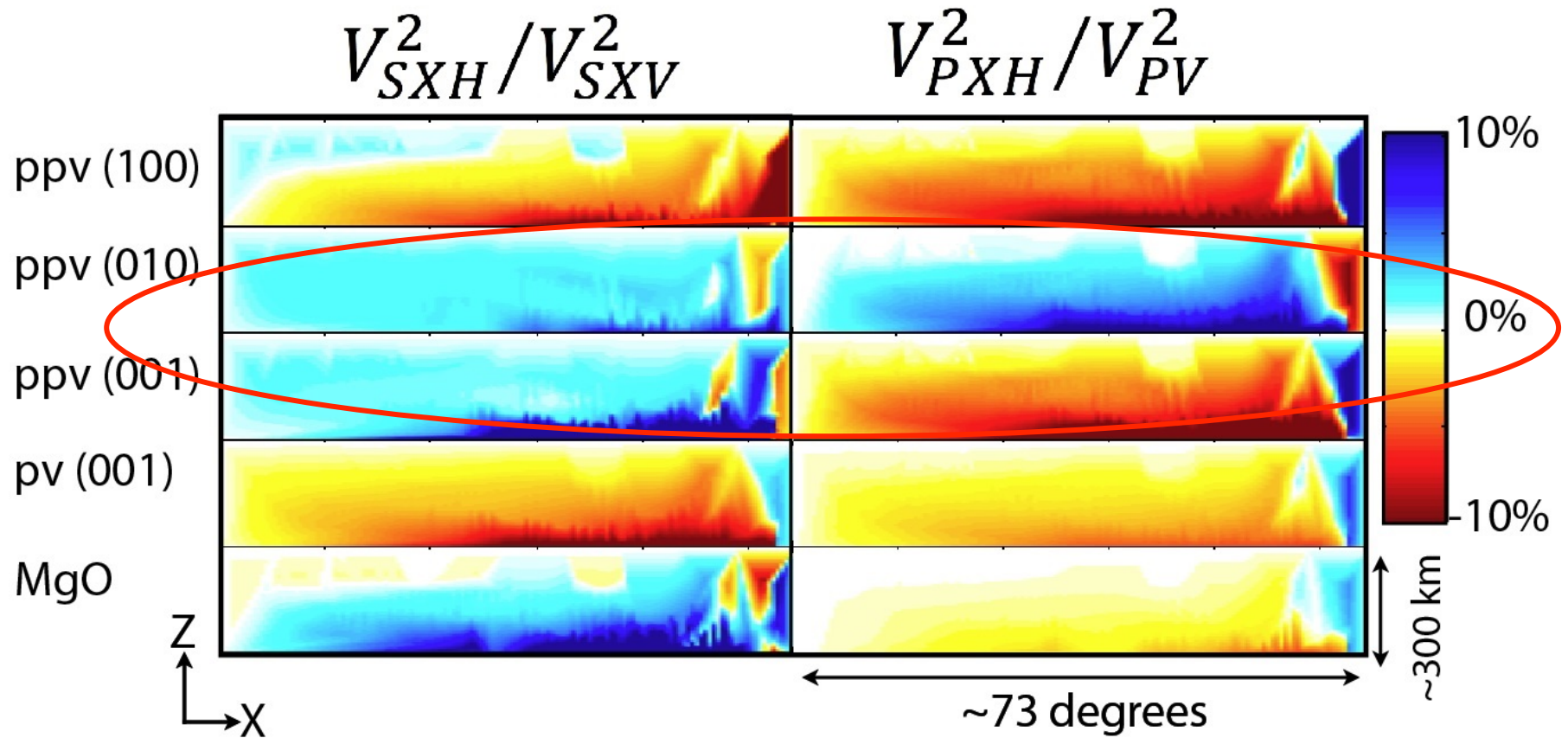
001 pole figures



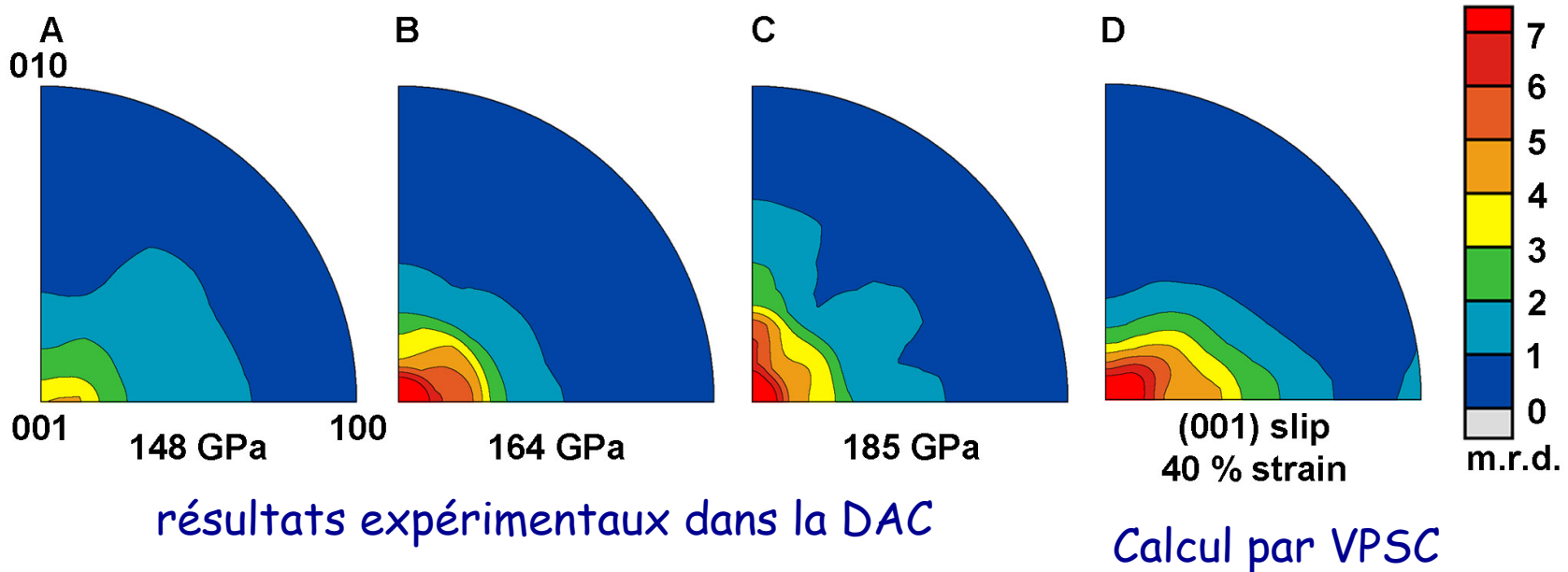
Particule  
189



Composante d'anisotropie radiale dans l'espace considéré



## Figures polaires inverses pour la pPv $\text{MgSiO}_3$ en fonction de la pression

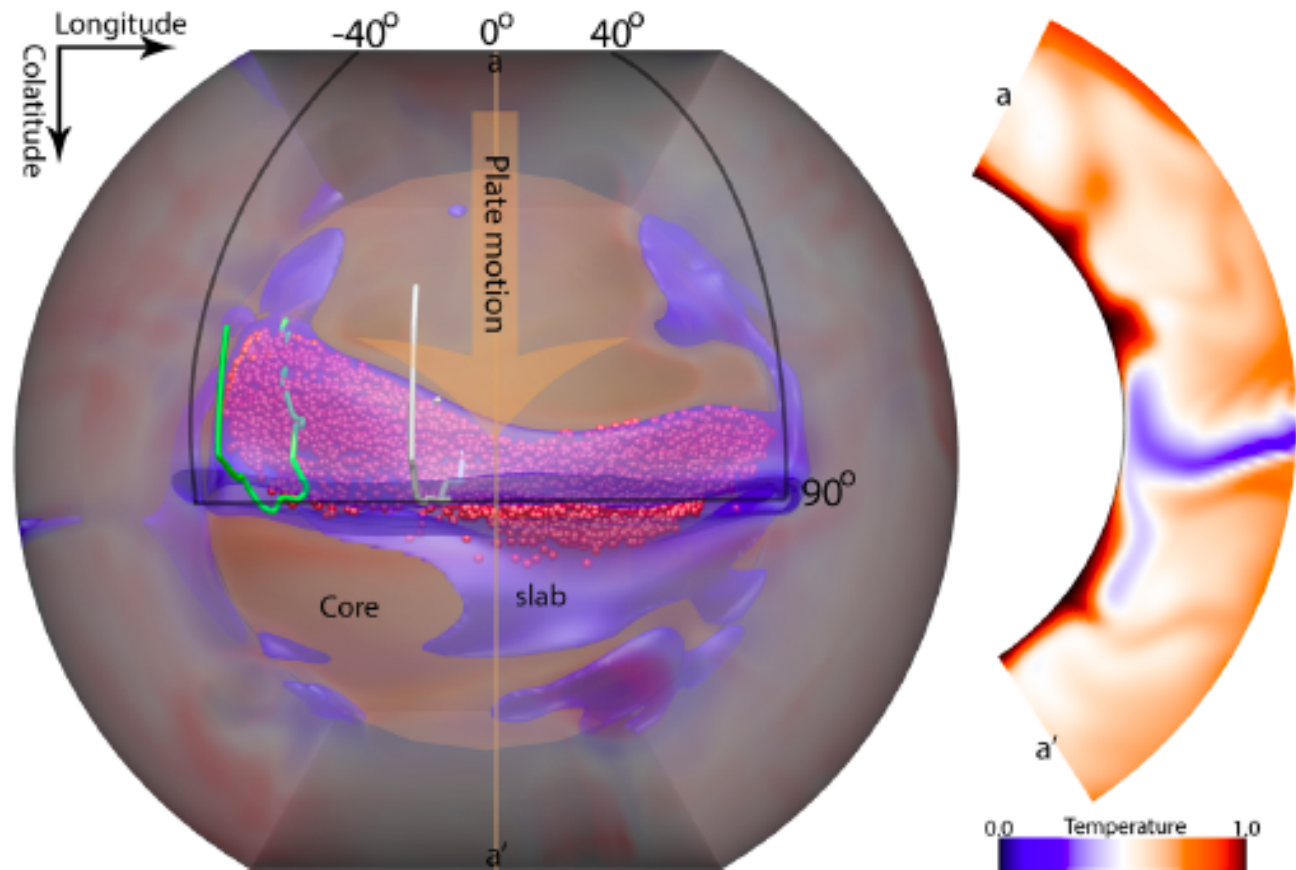


*Miyagi et al., 2010*

Développement d'un maximum suivant le plan (001)  
=> Système de glissement dominant pour pPv (001)[100]

A comparer aux résultats expérimentaux de Nisr et al. (2012) dans la pPv  $\text{MgGeO}_3$   
-> suggère les plans de glissement dominants {110} et (001)  
..et aux calculs de Goryaeva et al. [100](010)

# Simulation en 3D

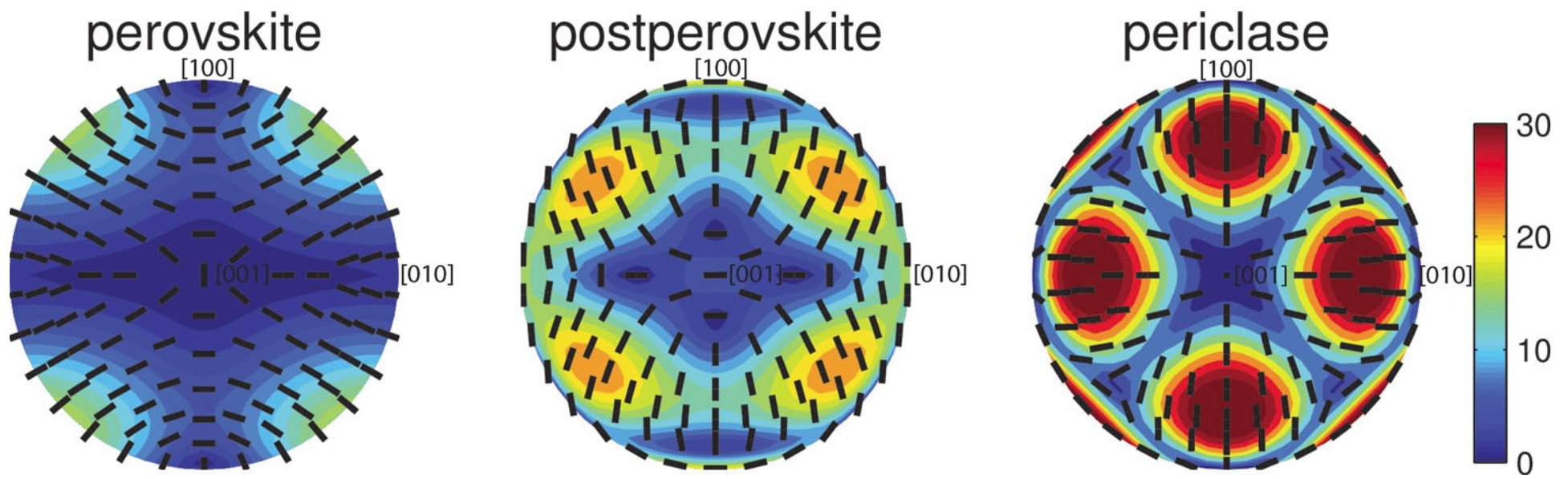


mélange: 75% Pv/pPv, 25% MgO  
Grains d'orientation aléatoire a 700 km de profondeur  
Elasticité: calculs ab-initio: 3000K, 125 GPa

*Cottaar, Li, McNamara, Romanowicz and Wenk, 2014, GJI*



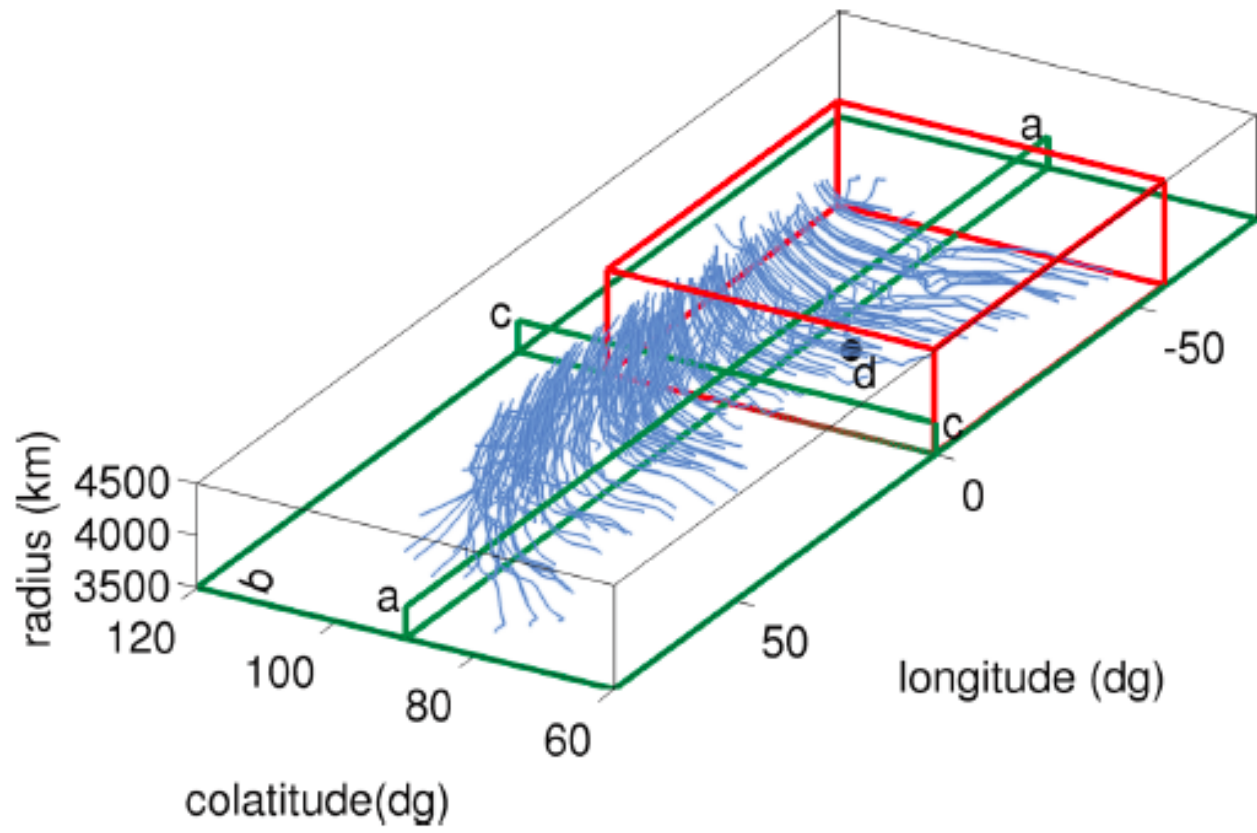
# Propriétés élastiques des minéraux aux conditions P,T du manteau très profond (3000K, 125GPa)



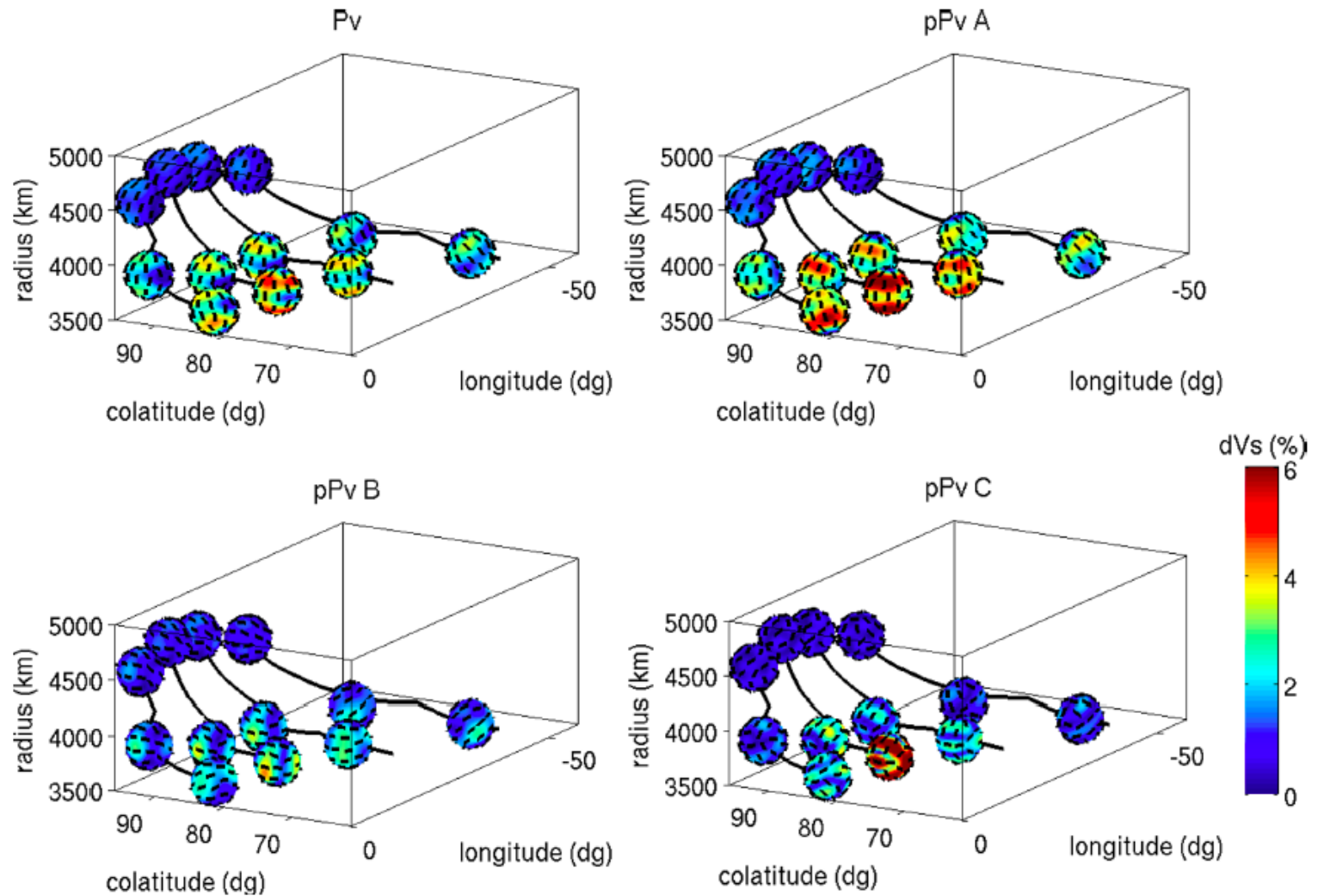
Splitting des ondes S (m/s)

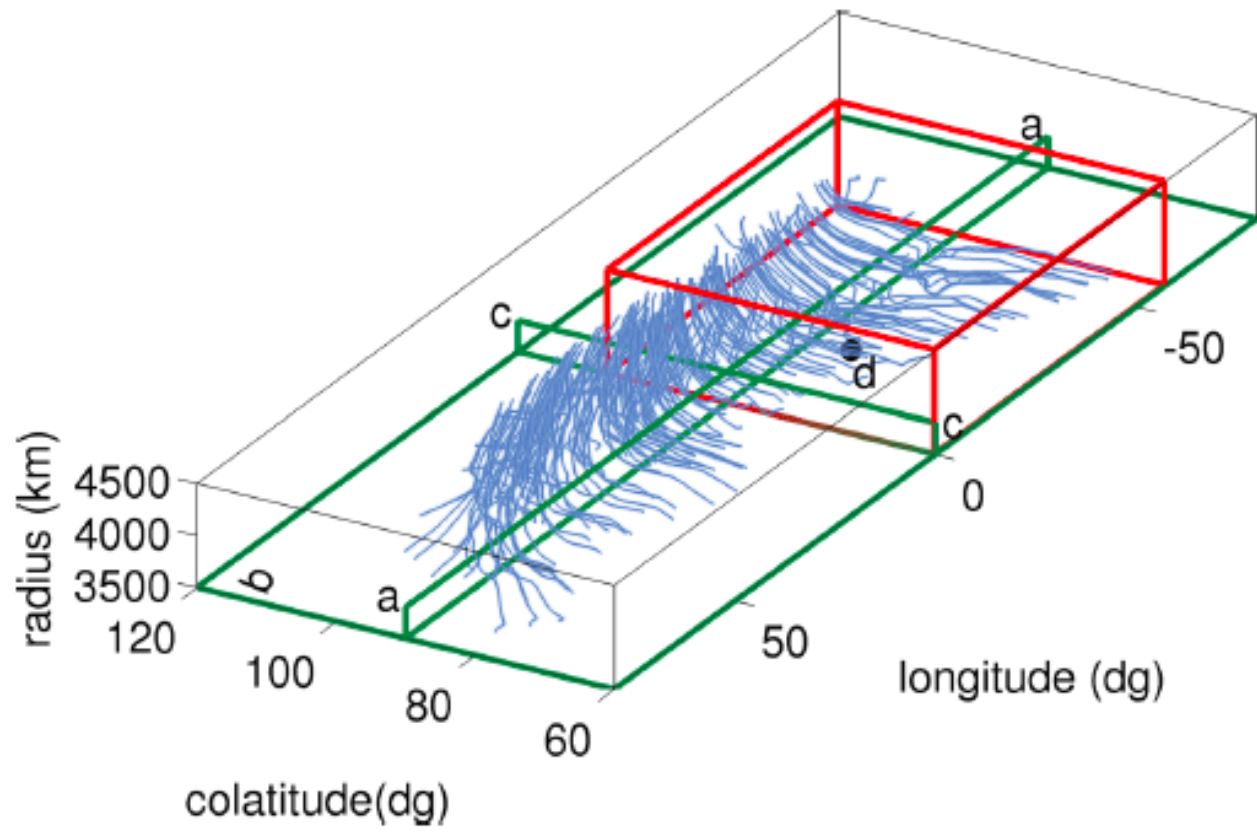
	$\rho$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{55}$	$C_{66}$
Periclase	5.07	1154.0	265.5	265.5	1154.0	265.5	1154.0	198.0	198.0	198.0
Bridgmanite	5.25	860.0	535.5	437.0	1067.5	467.5	1053.0	294.0	249.5	284.5
Ppv	5.35	1220.0	474.0	359.0	899.0	493.0	1176.0	273.0	245.0	376.0

Calculs théoriques: Wentzcovitch et al., 2004; Karki et al. 2000; Stackhouse et al., 2005

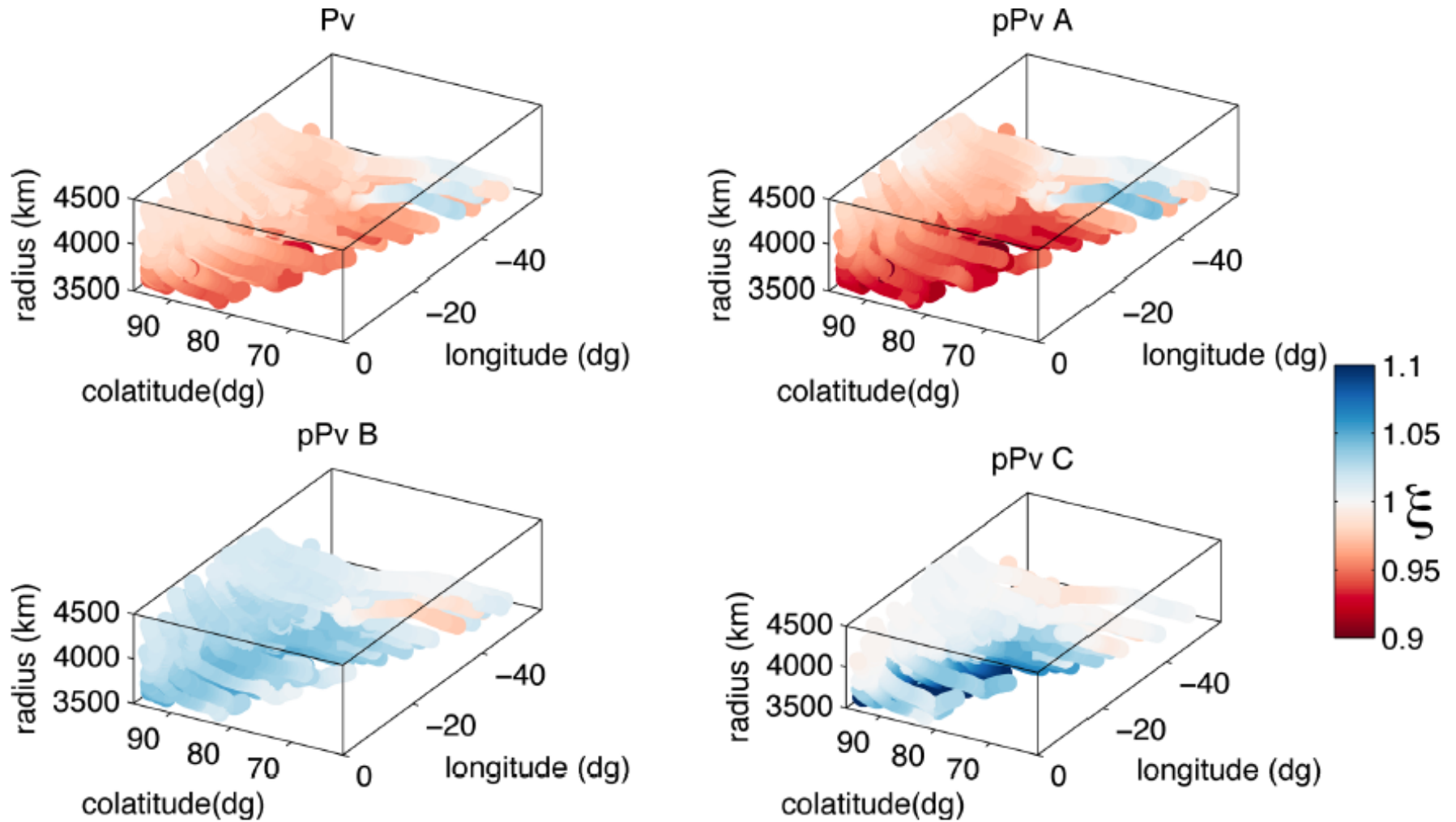


## Anisotropie en S pour plusieurs particules suivies

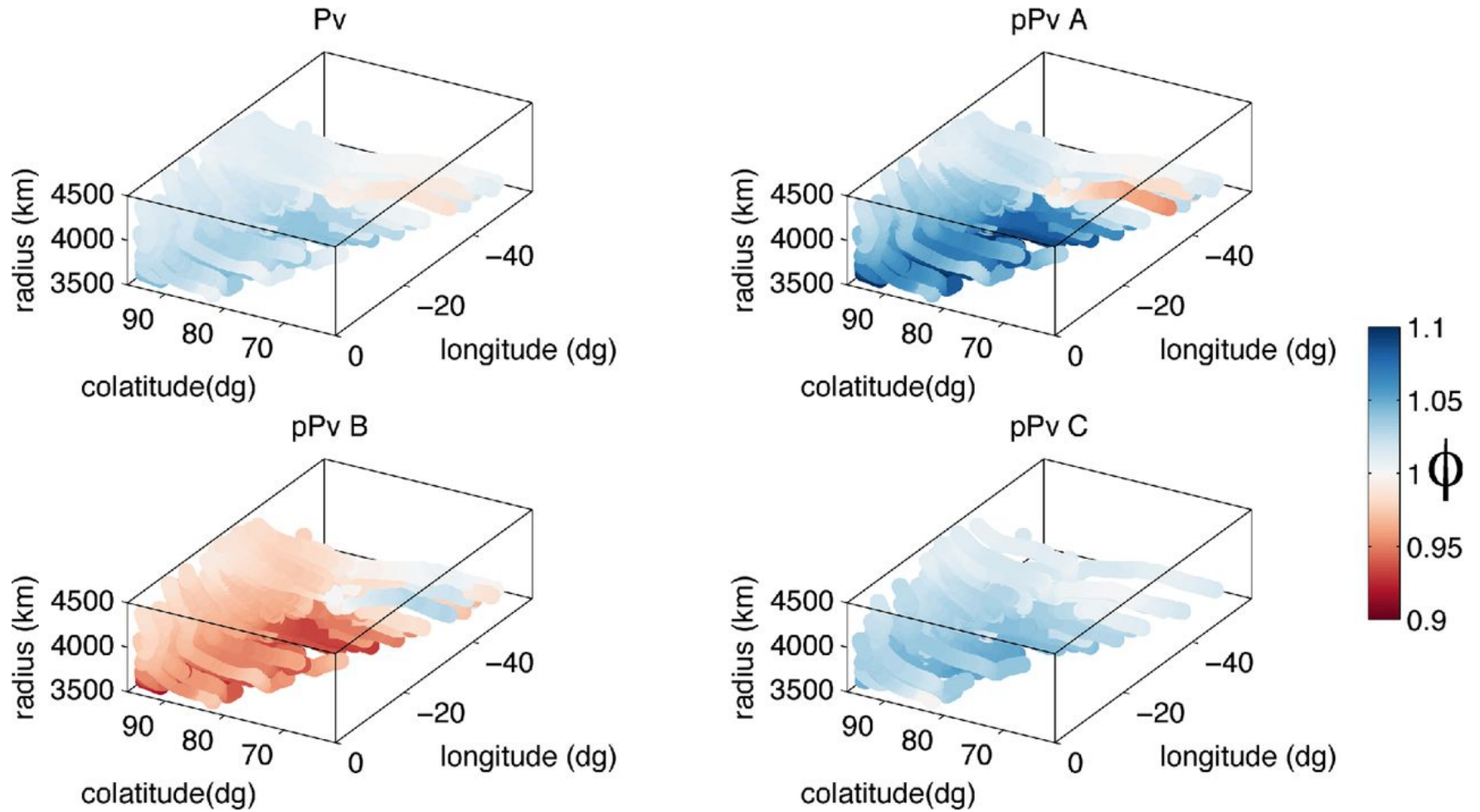




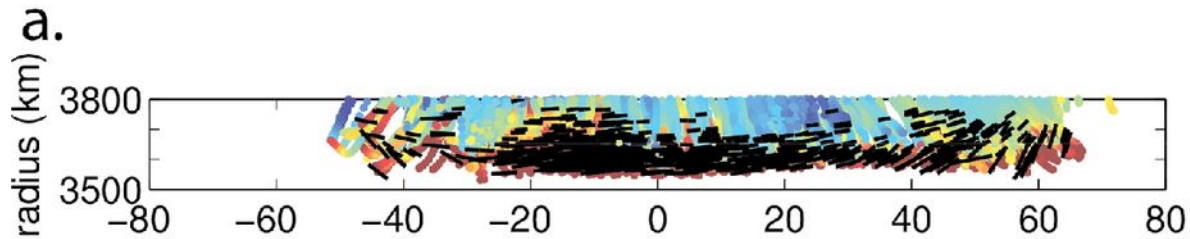
# Anisotropie radiale pour les ondes S



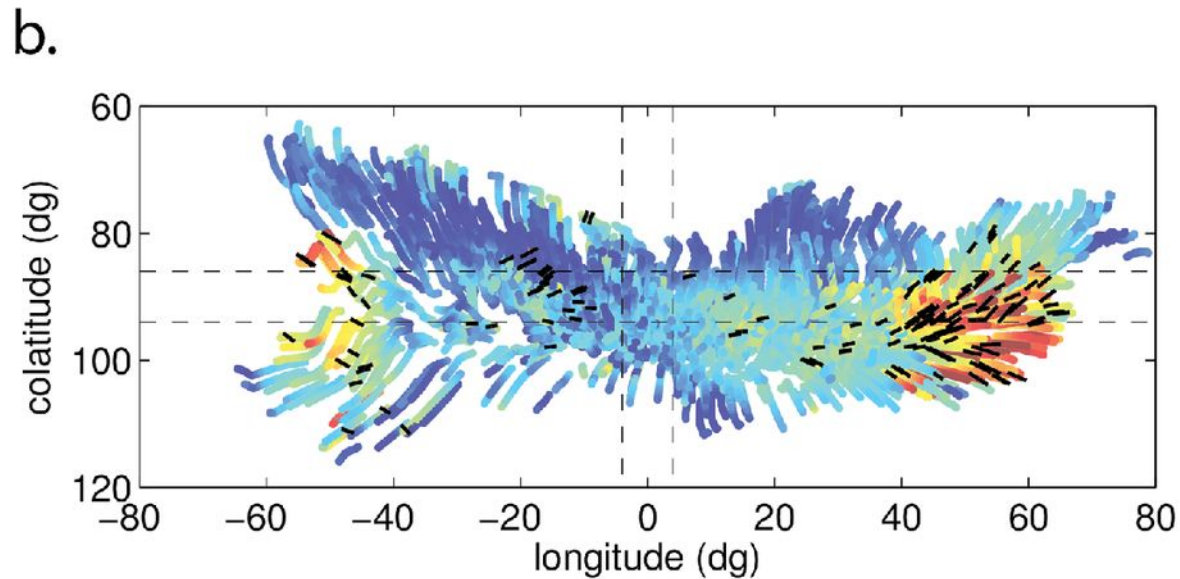
# Anisotropie radiale pour les ondes P



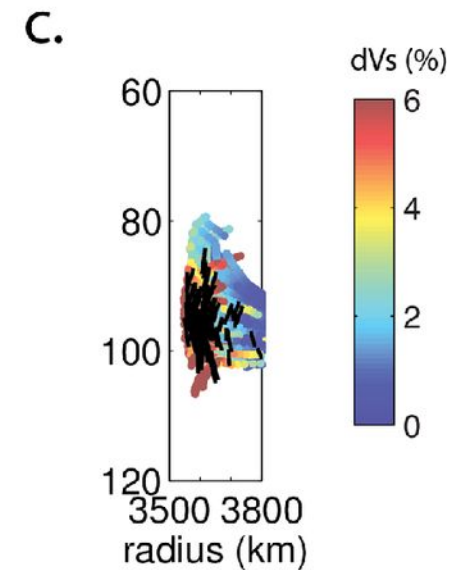
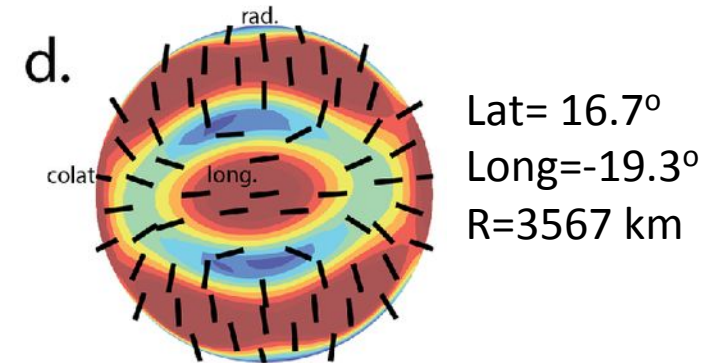
# Amplitude de l'anisotropie en S et direction de l'axe rapide - pPV type "C"



Vue depuis le Sud



Vue depuis le bas



Vue depuis l'Est

L'anisotropie azimuthale est importante  
aux bords de la plaque

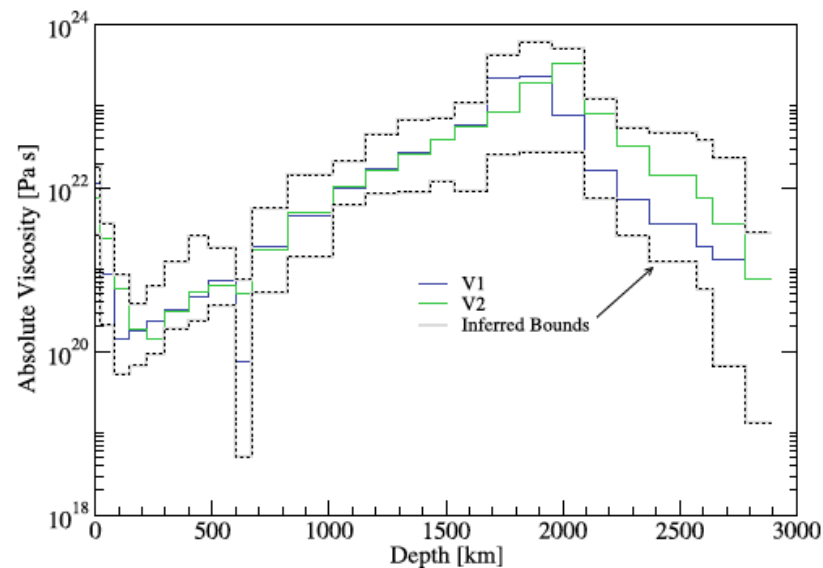
*Cottaar et al. , 2014, GJI*

- *Cottaar et al. (2014):*
- Modèles de pPv "B" (010) et "C" (001) prédisent une anisotropie radiale compatible avec les observations sismiques
- Modèle (001) est préféré car l'amplitude de l'anisotropie est plus forte, mieux en accord avec la sismologie que le modèle (010).
  - Présence d'anisotropie azimuthale avec axe fortement incliné compatible avec les résultats de Cottaar et al. (2013) sous l'Afrique du Sud.
  - Axe rapide horizontal dans la partie centrale de la plaque lorsqu'elle atteint la limite-noyau-manteau.
- Il faut des observations d'anisotropie sismique en P pour pouvoir trancher
- Nombreuses simplifications:
  - Pas de transition Pv→pPv
  - Système pur Mg (effet du Fe peut être important)
  - Modèle géodynamique simplifié (isochimique, paramètres physiques incertains, e.g. viscosité)

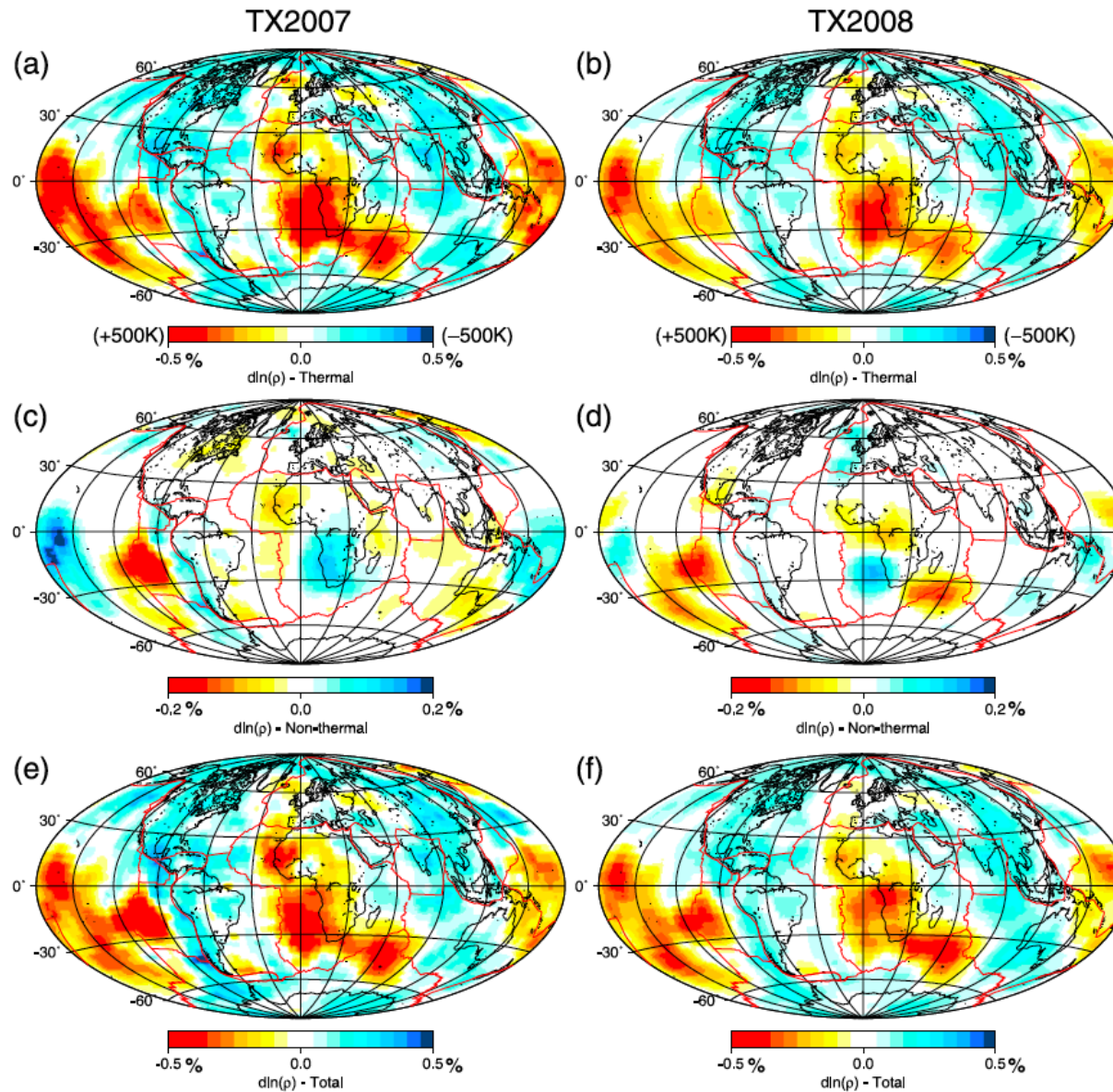


## 2e type de modélisation

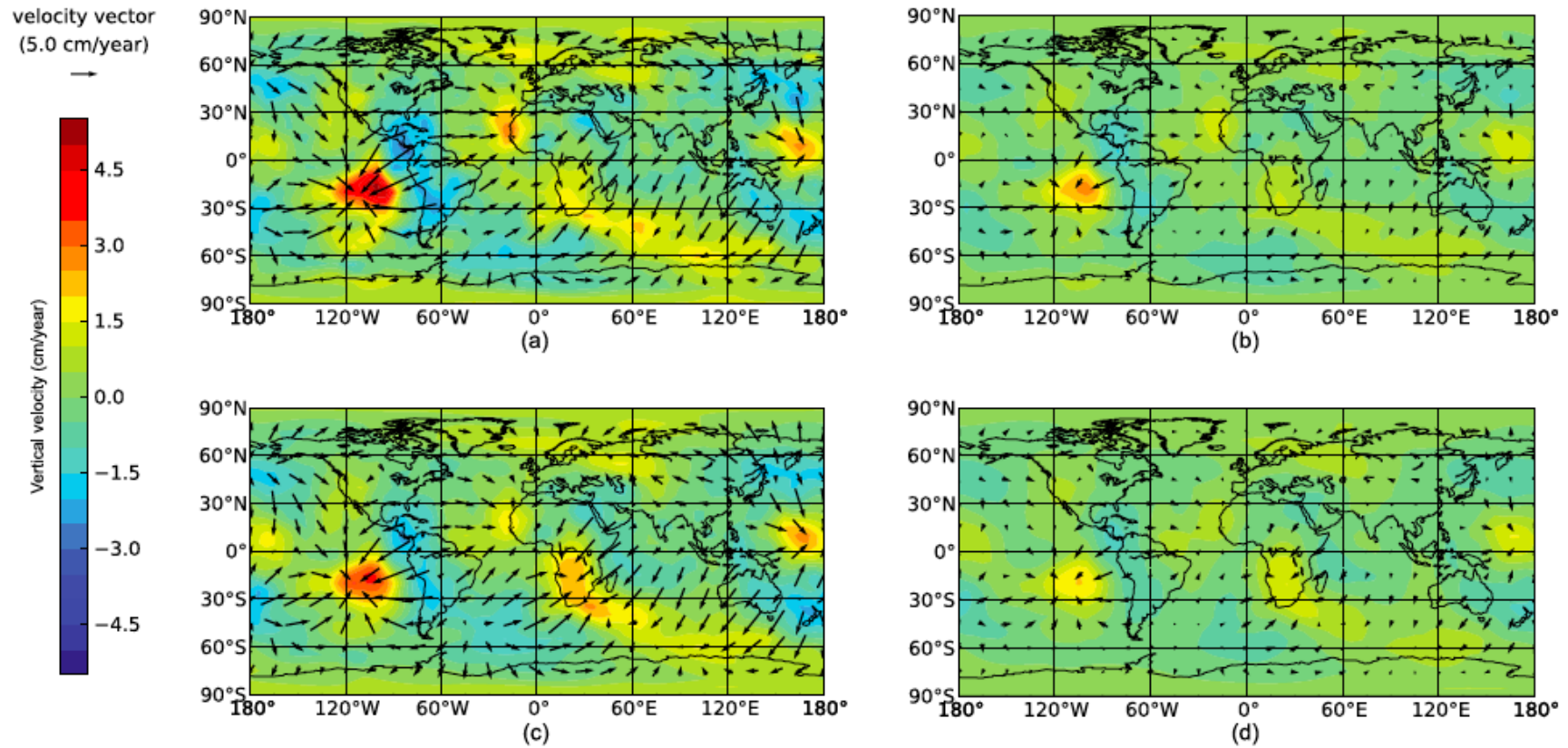
- Calcul d'un modèle d'écoulement instantané basé sur un modèle global de tomographie sismique (Walker et al., 2011)
  - Inclut l'information sur le champ de gravité et les vitesses des plaques en surface
  - Conversion de la tomographie ( $\delta V_s$ ) en densité ( $\delta\rho$ )
  - 2 Modèles de viscosité 1D (Mitrovica and Forte, 2004)
  - VPSC
  - Inclut la transition Pv- $\rightarrow$ pPv dans la D''



# Modèles tomographiques de Simmons et al. (2007, 2009) convertis en variations de densité



Ecoulement radial (couleur) et horizontal (fleches) obtenu  
150 km au dessus de la limite noyau-manteau  
Pour 4 modèles différents



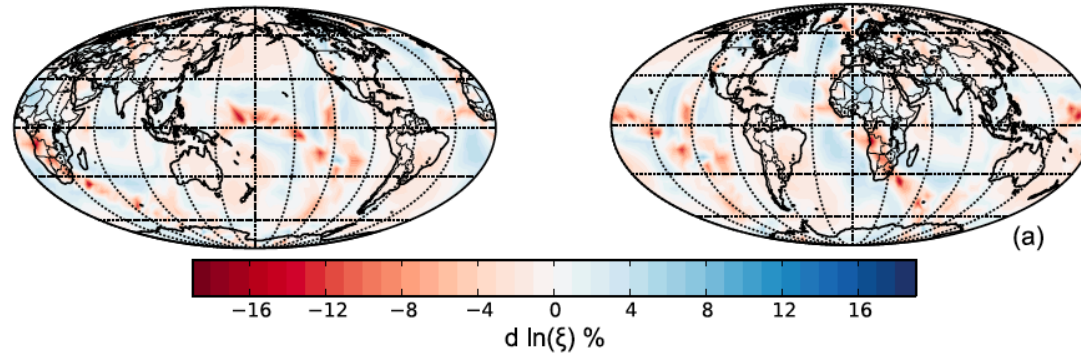
TX2007 (V1, V2)

TX2008 (V1, V2)

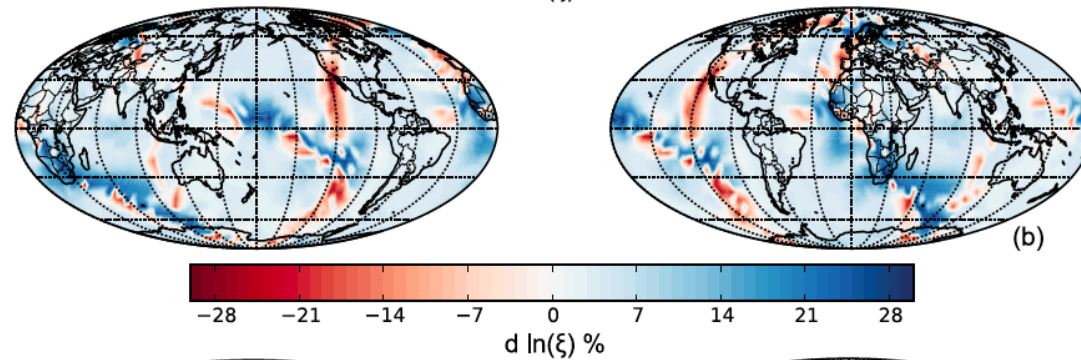
# Anisotropie radiale calculée dans le modèle TX2008.V1 75 km au dessus de la limite noyau-manteau

Plans de glissement  
Dominants pour pPv:

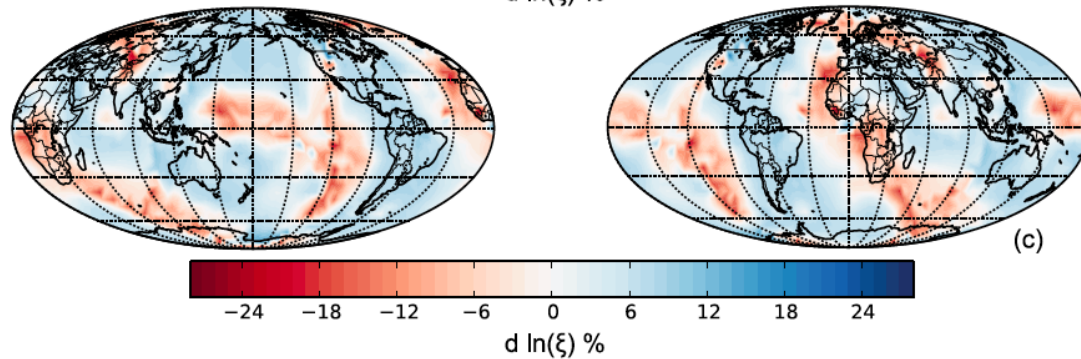
(010)



(001)

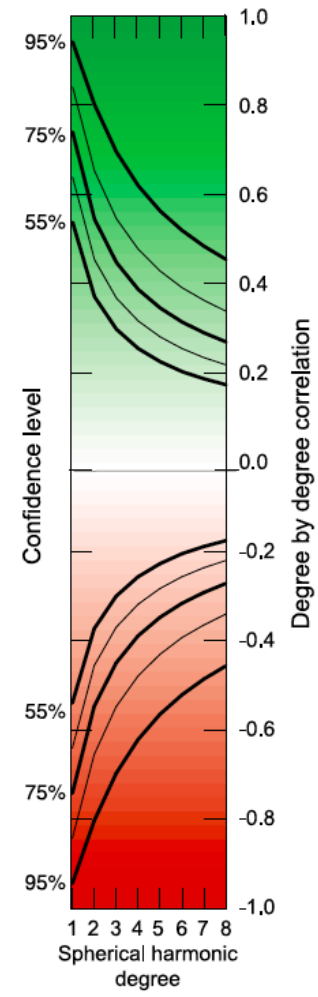
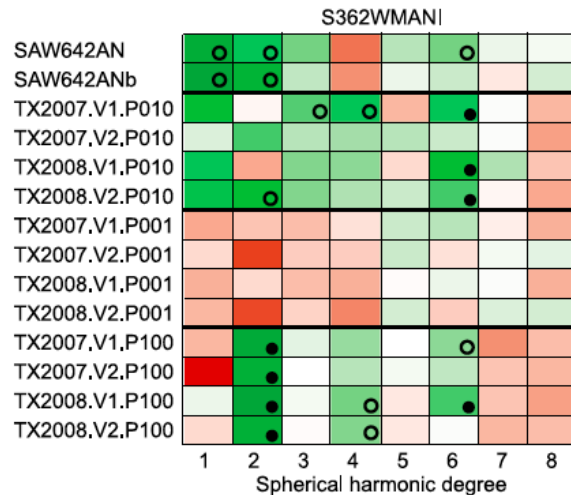
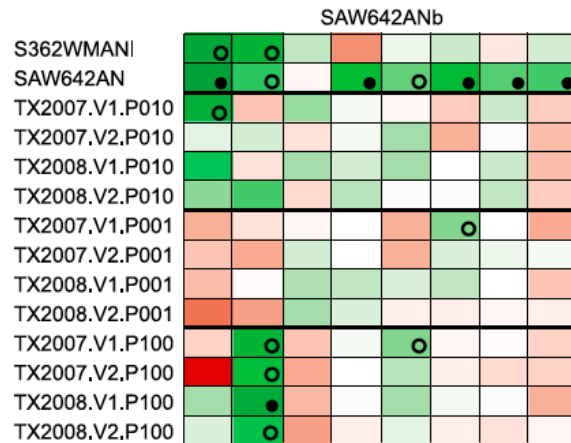
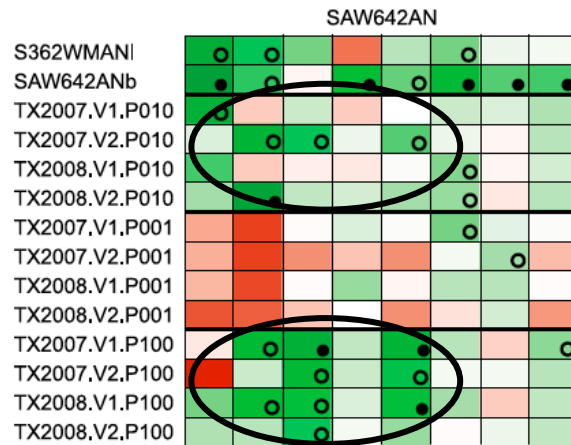


(100)



# Correlations avec modeles d'anisotropie sismique Globaux

à 75 km au Dessus de la CMB



- Positive correlation > 95% confidence
- Positive correlation > 75% confidence

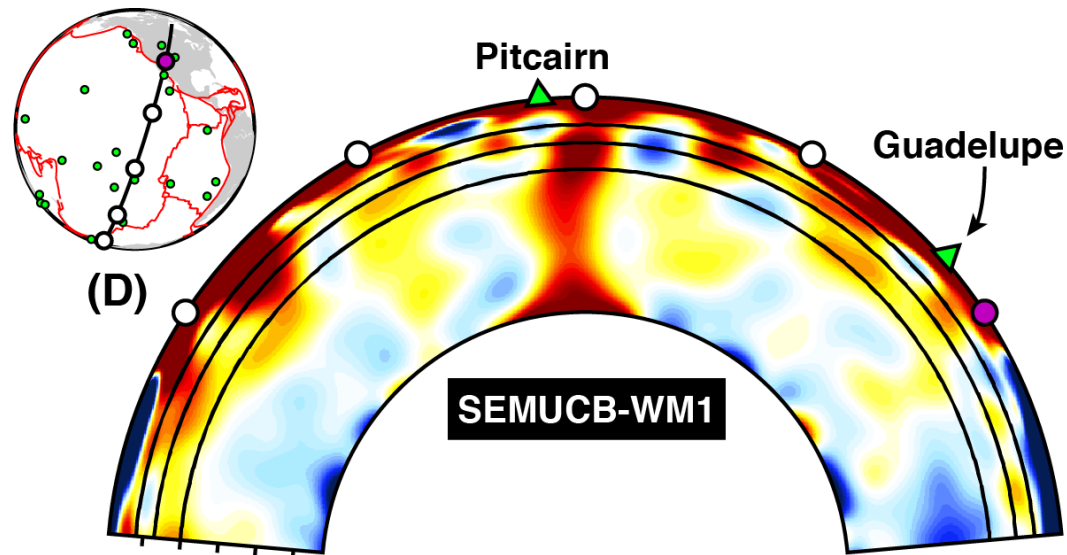
Corrélation dominée par les régions de  $d\ln(\xi) < 0$  dans les modèles tomographiques

# Perspectives

- Encore beaucoup d'incertitudes sur les processus qui gouvernent la dynamique du manteau inférieur et en particulier de la zone D''
- Progrès récents en physique des matériaux
  - Dans le domaine expérimental
  - Du point de vue de la théorie, qui permet d'atteindre des vitesses de déformation comparables à celles du manteau profond.
- => Perovskite très peu déformable, post-perovskite très molle aux conditions de P et T de la D''
  - ->l'anisotropie forte observée sismiquement dans les régions "froides" de la D'' pourrait être effectivement due à la présence de post-perovskite
  - -> Systèmes de glissement de la pPv?? (010) ou (001) ??

# Perspectives

- Manteau inférieur +/- isotrope en accord avec les observations sismologiques
- -> localisation de la déformation dans la D'' et éventuellement dans les panaches mantelliques



## Thursday, December 1st, 2016

**09h00** Introduction Barbara Romanowicz, *Collège de France*

### Session 1: Global mantle flow: then and now

Chair: Manuel Moreira, *IPG, Paris*

**09h05** Global reconstructions of Eocene mantle flow  
Peter Bunge, *University of Munich*

**09h40** Mantle thermodynamics and Convection: layering and stratification during thermal evolution  
Carolina Lithgow-Bertelloni, *University College London*

**10h15** Dynamic feedbacks between mantle flow and global tectonics  
Nicolas Coltice, *ENS Lyon and University Lyon 1*

**10h50** Coffee Break

### Session 2: Plumes and slabs: mostly slabs

Chair: Claudio Faccenna, *Universite Roma 3*

**11h20** Dynamic modelling of subducting slab interaction with transition zone  
Huw Davies, *Cardiff University*

**11h55** Slabs, plumes and their interaction: new insights from global anisotropy tomography  
Ana Ferreira, *University College London*

**12h30** Lunch

### Session 3: Plumes and slabs: mostly plumes

Chair: Angela Limare, *IPG, Paris*

**14h00** Intertwined evolution of piles, plumes and slabs in the deep mantle  
Anne Davaille, *University Paris Sud*

**14h35** The flow of viscous heterogeneities in mantle plumes  
Cinzia Farnetani, *IPG, Paris*

**15h10** The Fine Geochemical Structure of the Hawaiian Mantle Plume: relation to the Earth's Deep Mantle  
Dominique Weis, *University of British Columbia*

**15h45** Coffee Break

### Session 4: Upper mantle deformation

Chair: Sylvie Demouchy, *Universite de Montpellier*

**16h15** The influence of water on rheology and seismic properties of olivine  
Ulrich Faul, *MIT*

**16h50** Deformations associated with megaeearthquakes: rheology of the asthenosphere  
Luce Fleitout, *ENS, Paris*

**17h15** Poster Session

**Amphithéâtre Maurice Halbwachs**

11, place Marcelin-Berthelot, 75005 Paris

[http://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/p1251248012994203\\_content.htm](http://www.college-de-france.fr/site/barbara-romanowicz/p1251248012994203_content.htm)

## Friday December 2nd, 2016

### Session 5: Lower mantle deformation: constraints from mineral physics

Chair: Fabio Cammarano, *Università Roma 3*

**09h00** Experimental studies on plastic properties of minerals under the deep mantle conditions  
Shun Karato, *Yale University*

**09h35** What numerical modeling tells us about dislocation creep in Earth mantle  
Philippe Carrez, *University de Lille*

**10h10** Flow and anisotropy in the mantle: bridging the gap between the crystal and geodynamic scales  
Andrea Tommasi, *University de Montpellier*

**10h45** Coffee Break

### Session 6: Lower mantle deformation: constraints from seismology

Chair: Wim Spakman, *Utrecht University*

**11h15** Observations of dynamics in the lowermost mantle  
Sanne Cottaar, *University of Cambridge*

**11h50** 'Sharp sides' in mantle convection: seismic multipathing in thermal and thermochemical models  
Andy Nowacki, *University of Leeds*

**12h30** Lunch

### Session 7: Upper mantle: seismic observations

Chair: Valerie Maupin, *University of Oslo*

**14h00** Anisotropy in the upper mantle from surface waves  
Eric Debayle, *ENS, Lyon and University Lyon 1*

**14h35** Oceanic and continental plates as seen by seismic anisotropy  
Jean-Paul Montagner, *IPG, Paris*

**15h10** Coffee Break

### Session 8: Iron in the deep earth

Chair: Daniele Antonangeli, *CNRS, Sorbonne Universités*

**15h50** Iron flow in Earth's molten silicate proto-mantle  
Henri Samuel, *IRAP, Toulouse*

**16h25** Anisotropy and history of the Earth's inner core: forward models and input from mineralogy  
Sébastien Merkel, *University de Lille*

**17h00** Panel Discussion  
Edouard Kaminski, *IPG, Paris*  
Christine Thomas, *University of Muenster*  
Jeannot Trampert, *Univerty of Utrecht*  
James.Wookey, *University of Bristol*  
Alessandro.Forte, *University of Florida*

Alain PROCHIANZ

Administrateur du Collège de France