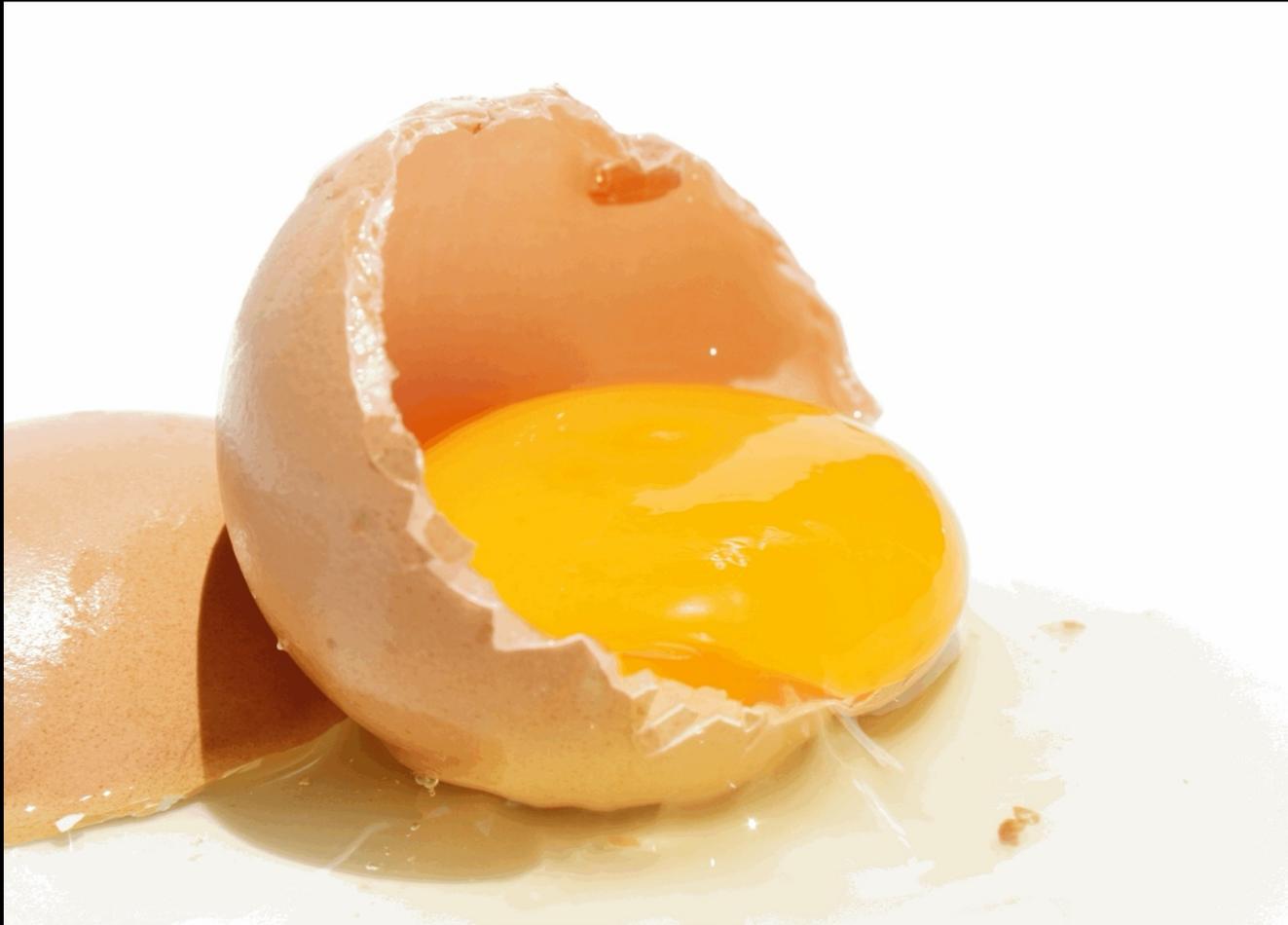


# Tomographie de la Terre

L2 - 2023

Qu'y-a-t-il à l'intérieur ?



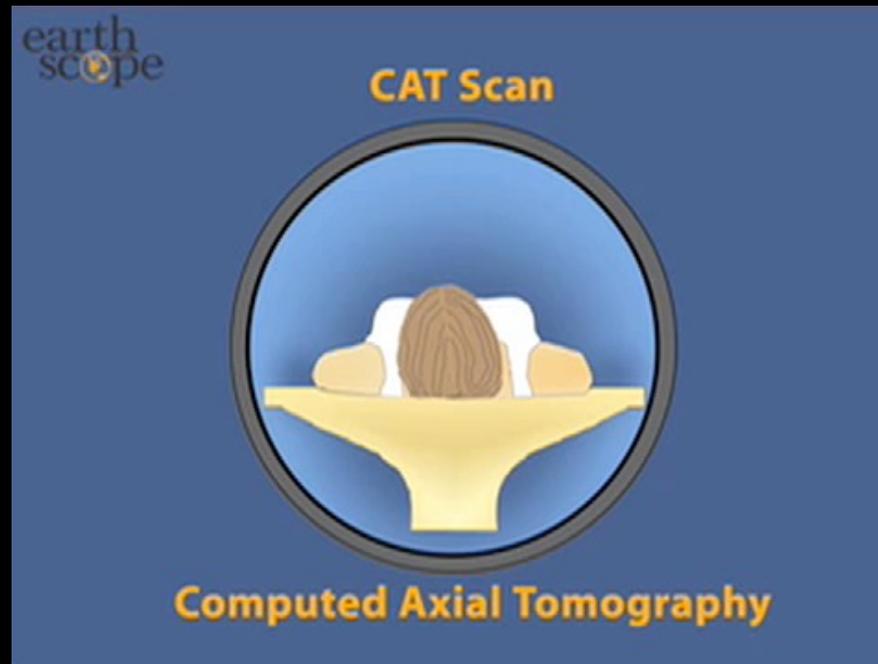


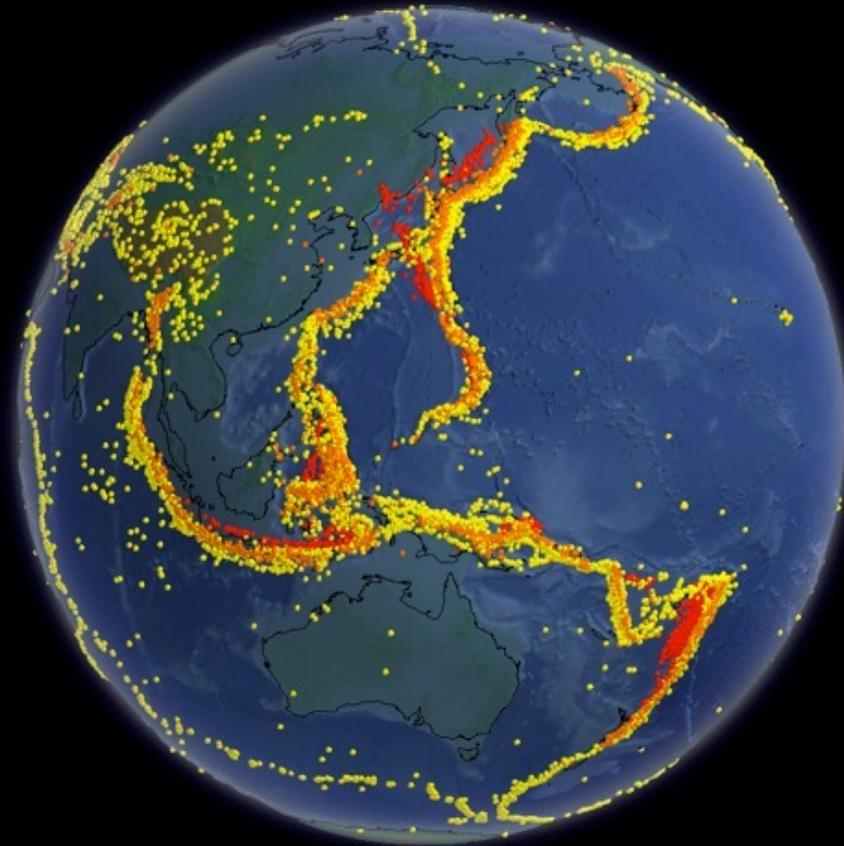
... Et là dedans ?





# Comment ça marche ?

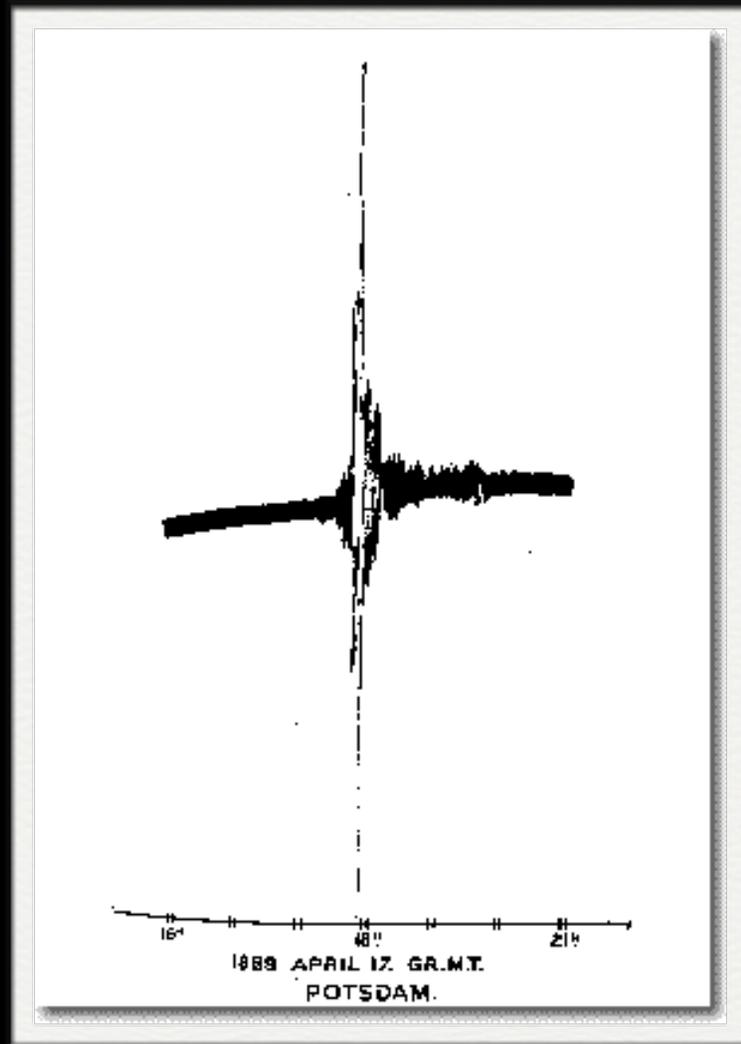




Quelle(s) source(s) pour ausculter la  
Terre?

# 17 Avril 1889

Premier enregistrement d'un séisme lointain à Potsdam par E. von Rebeur-Pacshwitz (Nature, 1889).  
Le séisme a eu lieu au Japon (magnitude ~5.8)



Les ondes sismiques se propagent dans la Terre et permettent son auscultation!



# La Terre sismologique...

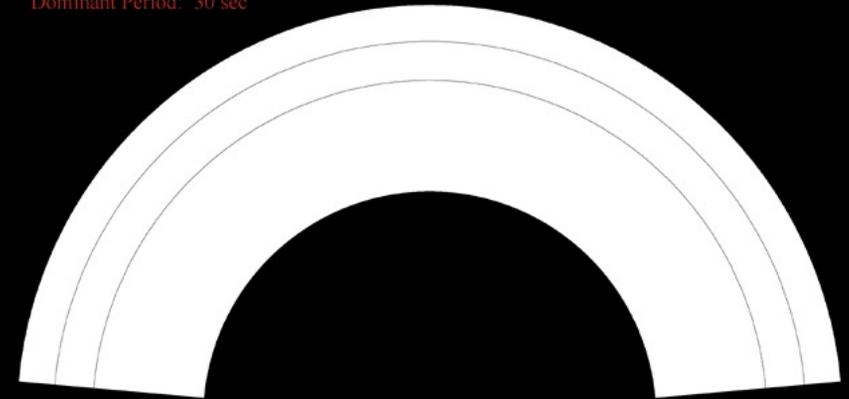
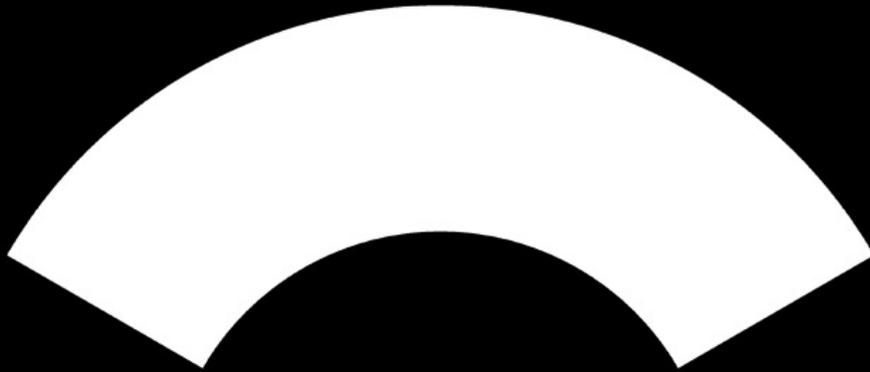
## Homogeneous Earth Model

Source Depth: 0 km  
T<sub>dom</sub>: 30 sec  
V<sub>s</sub>: 2.0 km/sec

ASU LMU

Homogeneous Velocity Model  
with High Velocity Layer  
Source Depth: 0 km  
Dominant Period: 30 sec

ASU  
LMU



5 (sec)

[M. Thorne, E. Garnero, G. Jahnke, and H. Igel - 2005]

5 (sec)

[M. Thorne, E. Garnero, G. Jahnke, and H. Igel - 2005]

Terre homogène

1 couche + rapide

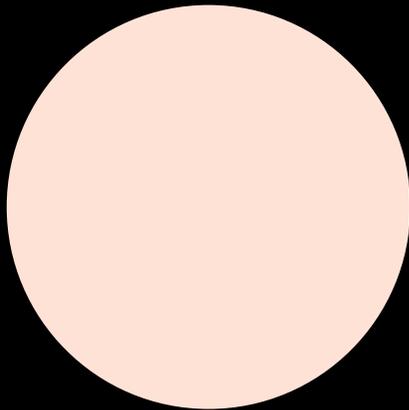
Arrivée des ondes dépend de la structure du globe !

with courtesy of M. Thorne, Utah

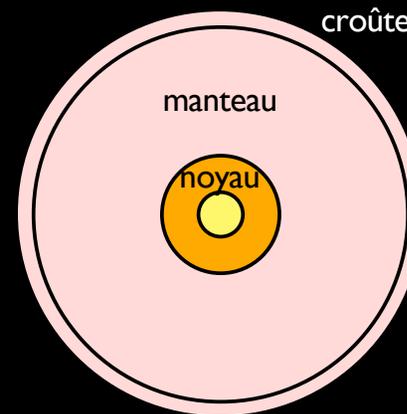
# La Terre sismologique...

~1910-1960

Terre  
homogène



Terre  
radiale



# La Terre sismologique...



## 1906-1912, le Noyau

Richard Dixon Oldham: Les ondes S traversent une région centrale plus lente car elles mettent plus de temps à traverser la Terre. Discontinuité vers 3800 km

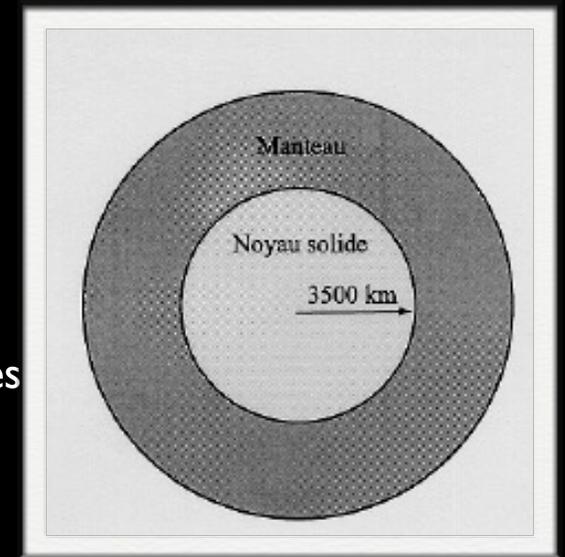


Beno Gutenberg: Discontinuité d'Oldham (noyau) à 2900 km.

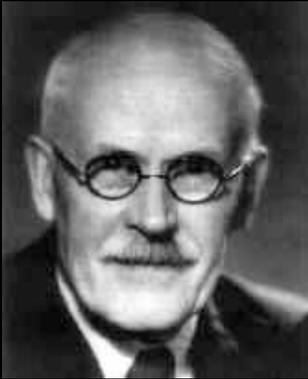


## 1909, le Manteau

Andrija Mohorovičić: Accroissement des vitesses sismiques vers 50 km sous la Croatie et partout ailleurs ~30 - 60 km : Discontinuité croûte - manteau ou MOHO

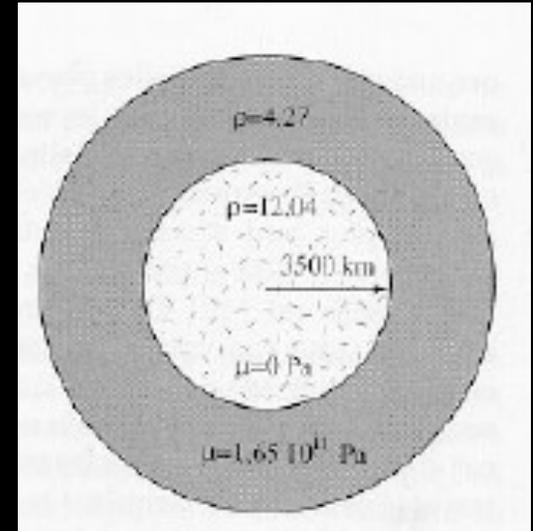


# La Terre sismologique...



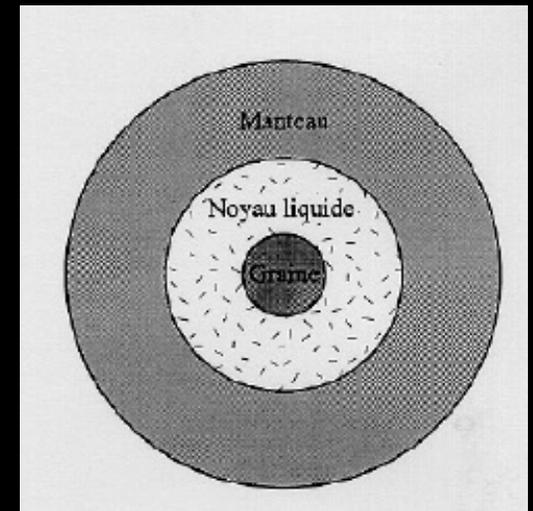
## 1926, le Noyau liquide!

Harold Jeffreys: prouve la fluidité du noyau métallique indirectement. La rigidité de la Terre observée (marées) est inférieure à celle déduite des ondes sismiques. Maintenant: [absence de transmission des ondes S](#)



## 1936, la Graine

Inge Lehmann: Nouvelles phases P qui traversent une discontinuité supplémentaire à l'intérieur du noyau.



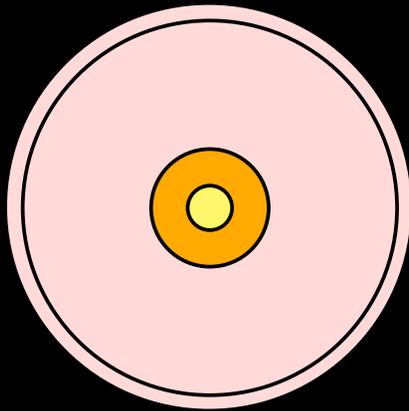
1938-1939: Gutenberg et Jeffreys fixent sa dimension entre 1200 et 1250 km (1221 km)

1940: Birch pense que la graine est solide

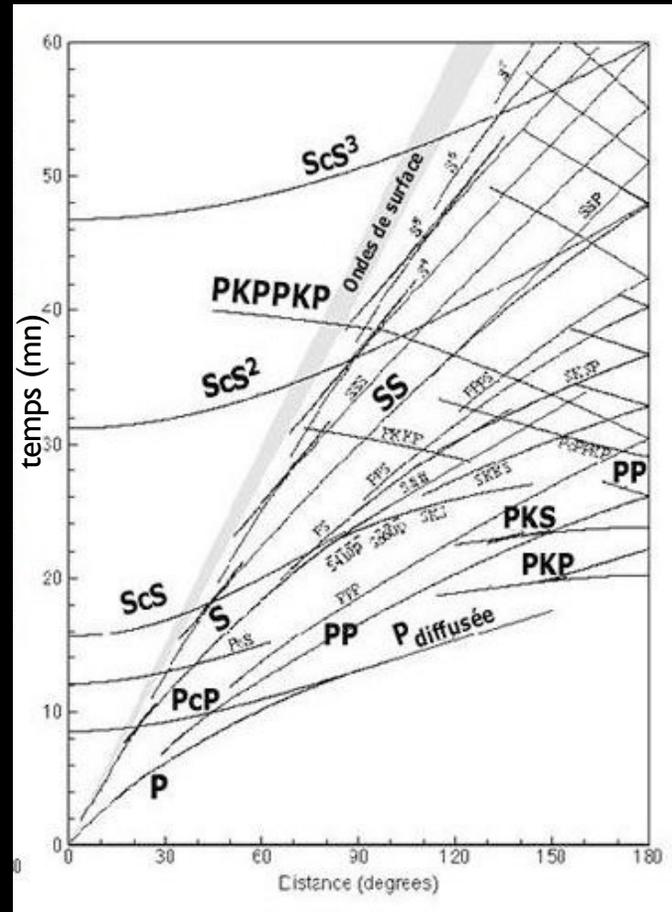
1960: confirmation par l'analyse des oscillations propres de la Terre.

# La Terre sismologique...

Terre radiale



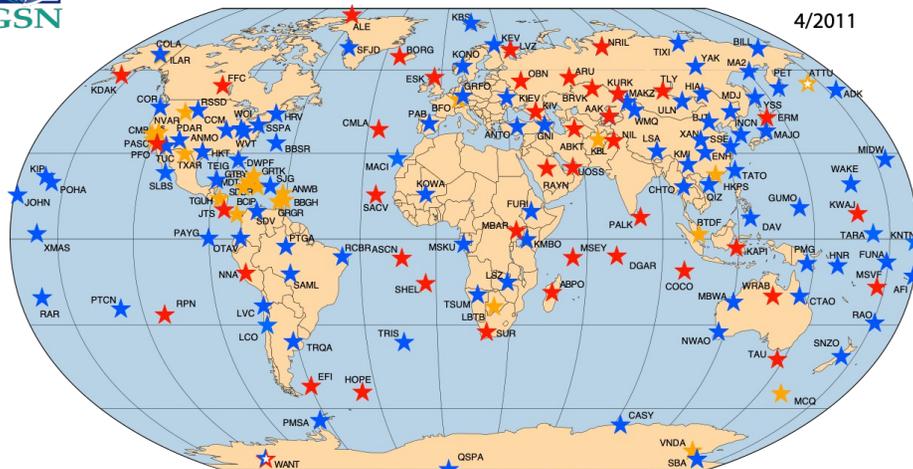
Modèle sismologique radial de la Terre obtenu grâce à l'étude des hodochrones



# La Terre sismologique...



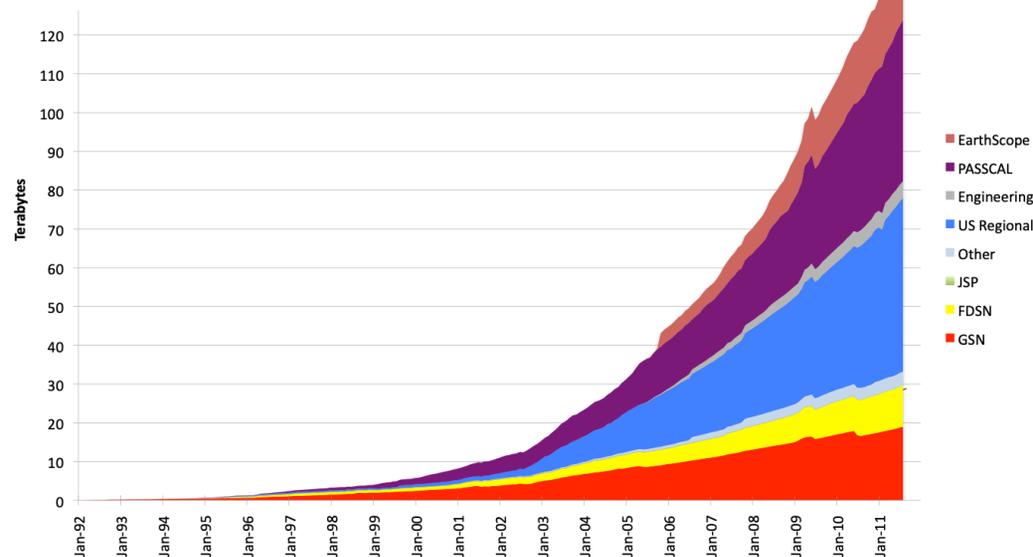
## GLOBAL SEISMOGRAPHIC NETWORK



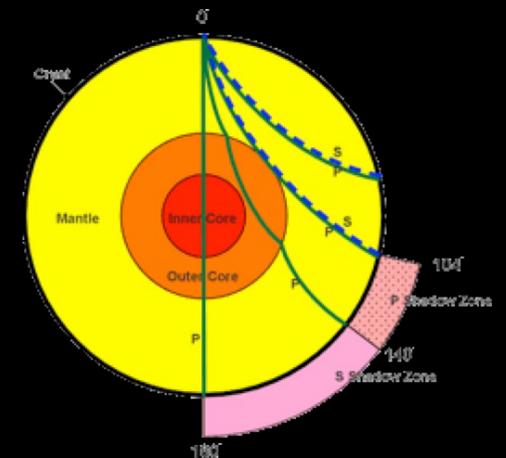
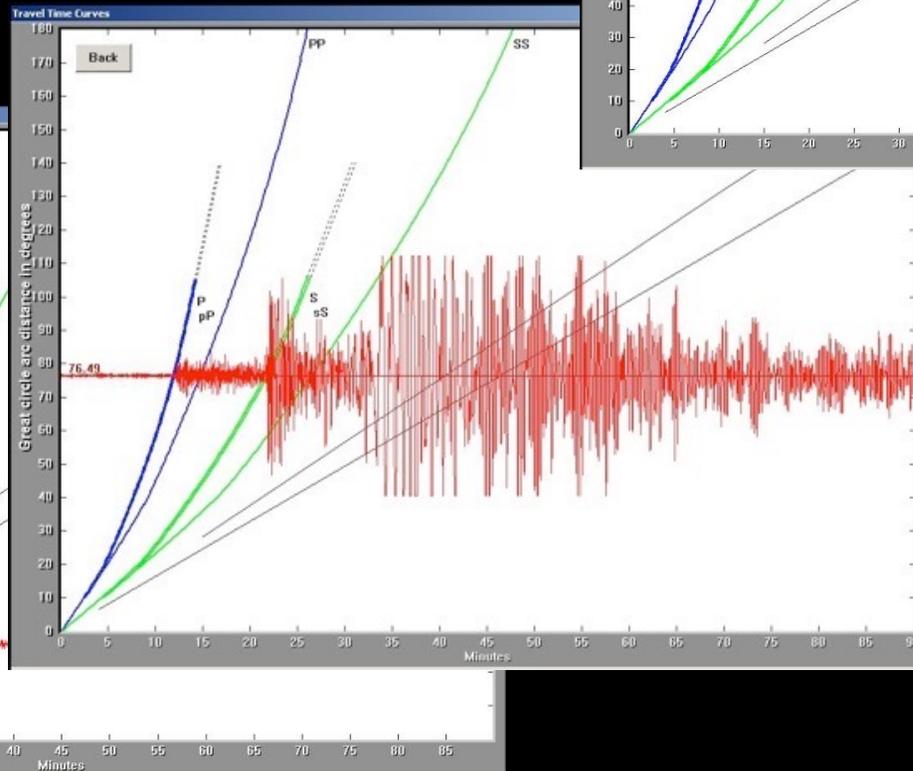
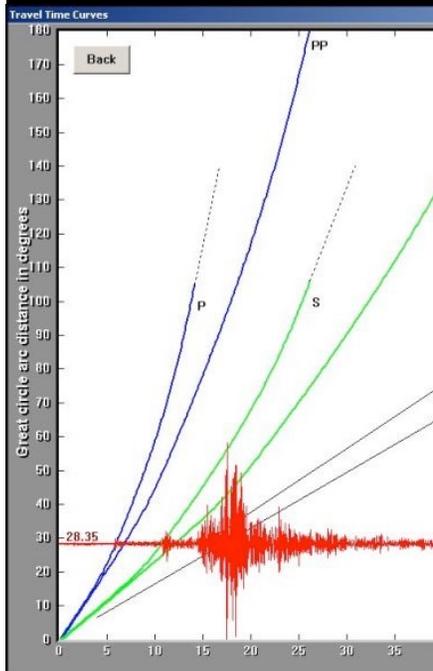
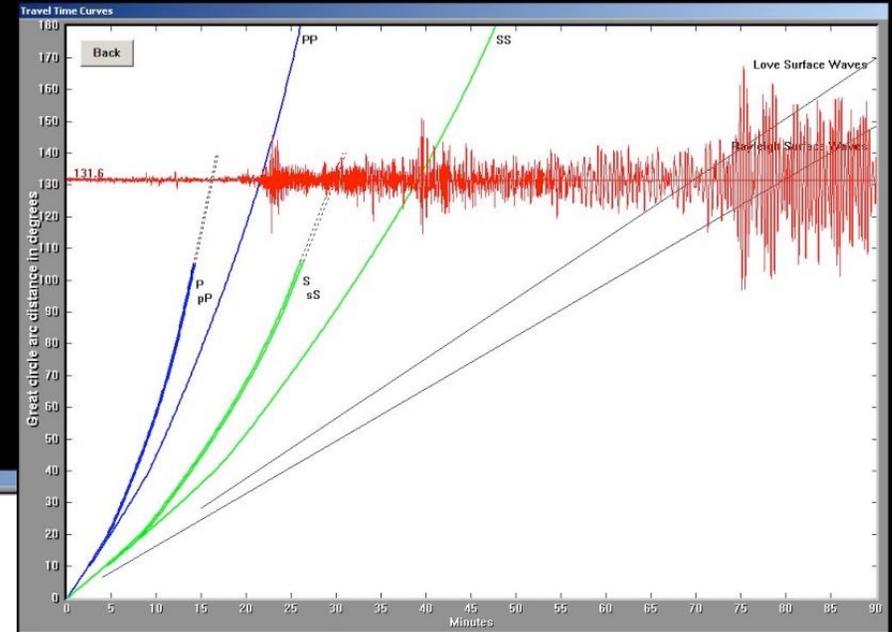
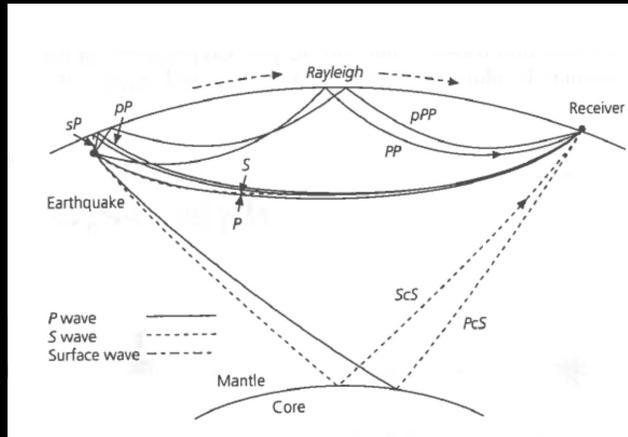
- ★ IRIS / IDA Stations
- ★ IRIS / USGS Stations
- ★ Affiliate Stations
- ★ Planned Stations

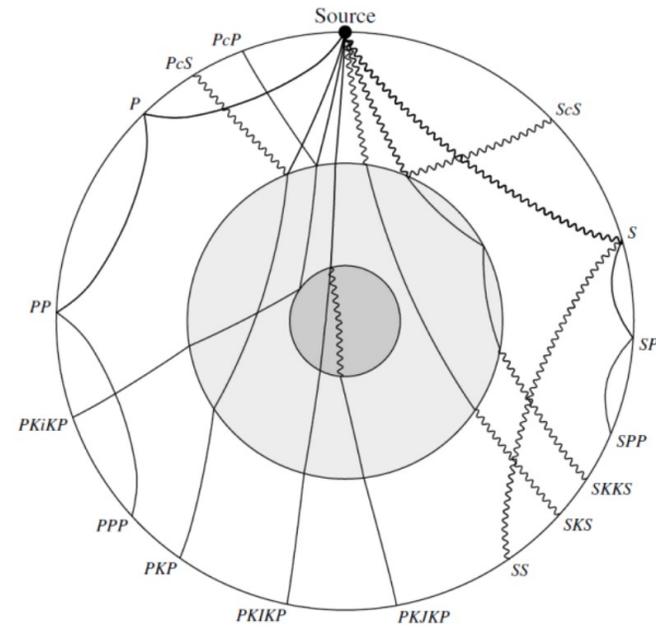
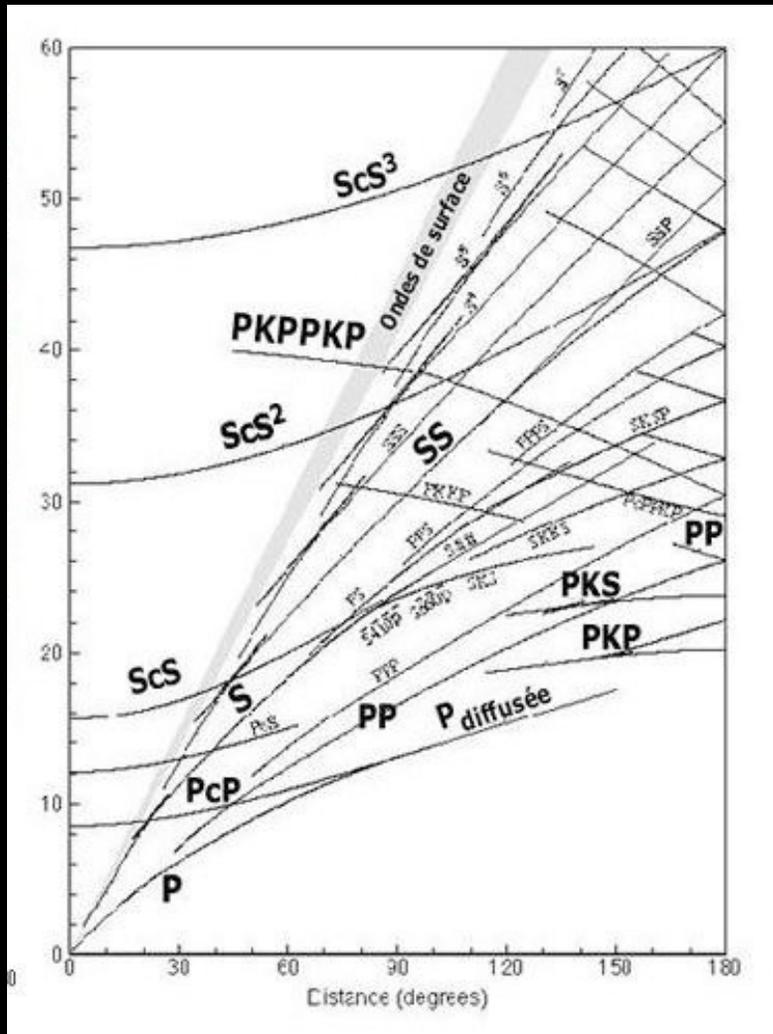


Archive Size



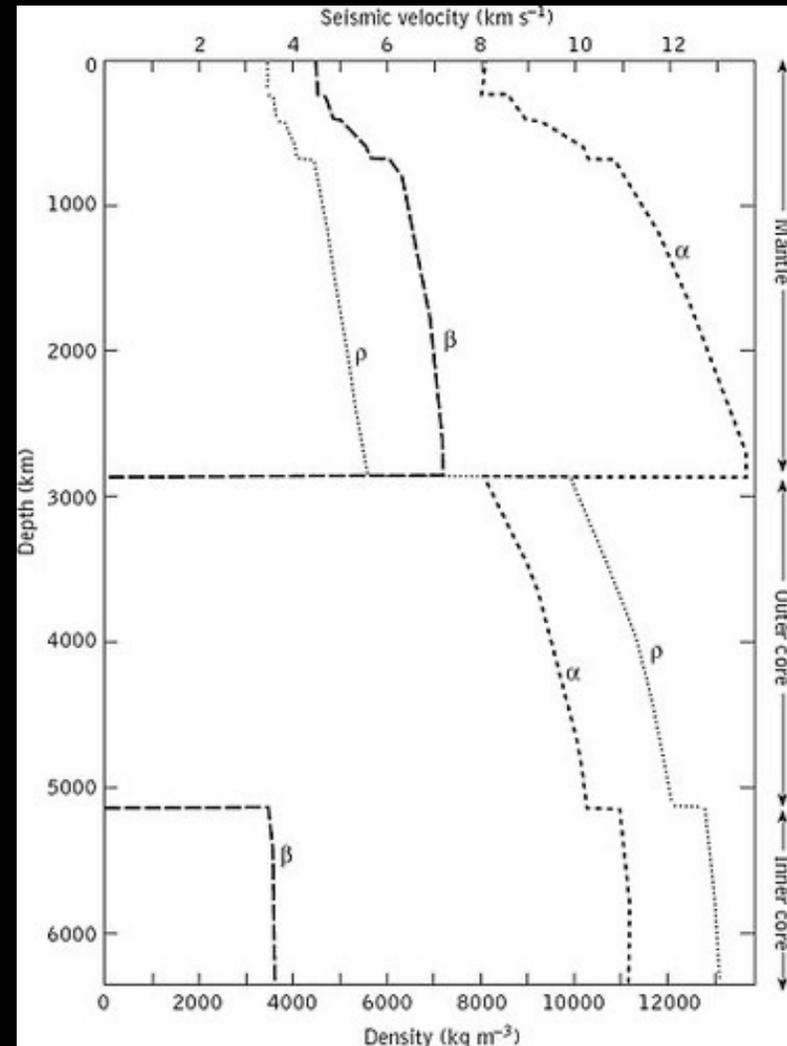
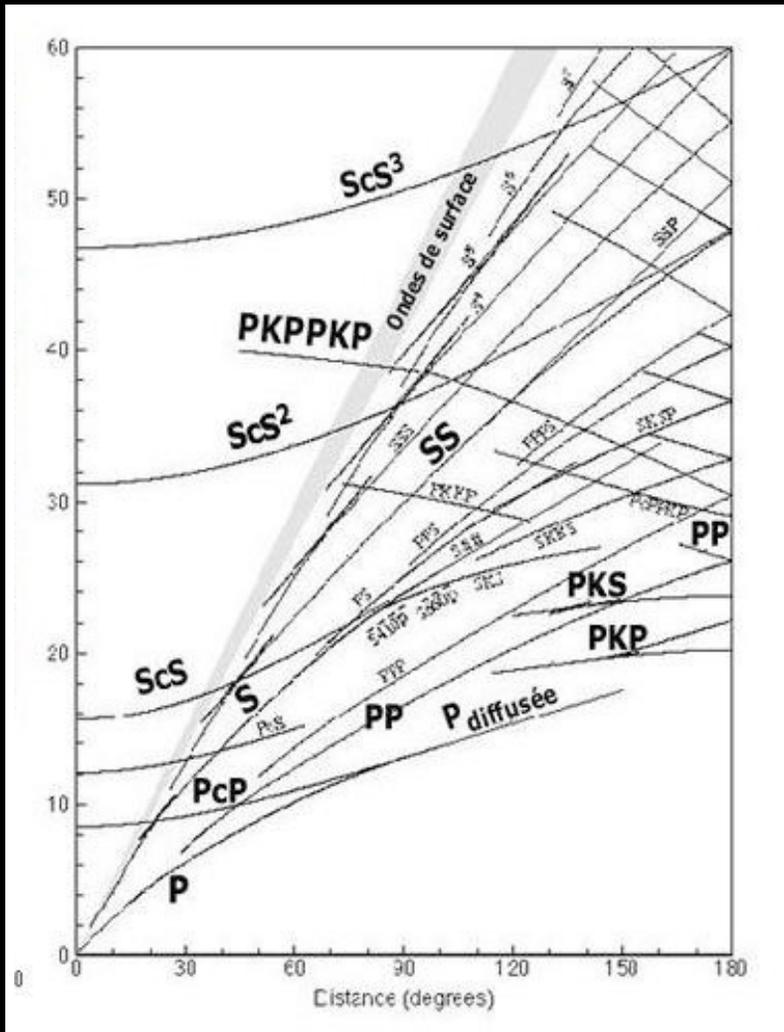
# Les hodochrones





| Name  | Description   |
|---|---|
| <i>P</i>  | Compressional wave  |
| <i>S</i>  | Shear wave  |
| <i>K</i>  | <i>P</i> wave through outer core                                      |
| <i>I</i>  | <i>P</i> wave through inner core                                      |
| <i>J</i>  | <i>S</i> wave through inner core                                      |
| <i>PP</i>                                       | <i>P</i> wave reflected at surface                                    |
| <i>PPP</i>                                      | <i>P</i> wave reflected at surface twice                              |
| <i>SP</i>                                       | <i>S</i> wave reflected at surface as <i>P</i> wave                   |
| <i>PS</i>                                       | <i>P</i> wave reflected at surface as <i>S</i> wave                   |
| <i>pP</i>                                       | <i>P</i> wave upgoing from focus, reflected at surface                |
| <i>sP</i>                                       | <i>S</i> wave upgoing from focus, converted to <i>P</i> at surface    |
| <i>c</i>  | Wave reflected at core-mantle boundary (e.g. <i>ScS</i> )             |
| <i>i</i>  | Wave reflected at inner core-outer core boundary (e.g. <i>PKiKP</i> ) |
| <i>P'</i>                                       | Abbreviation for <i>PKP</i>   |
| <i>P<sub>d</sub></i> or <i>P<sub>diff</sub></i> | <i>P</i> wave diffracted along core-mantle boundary                   |

# Les hodochrones

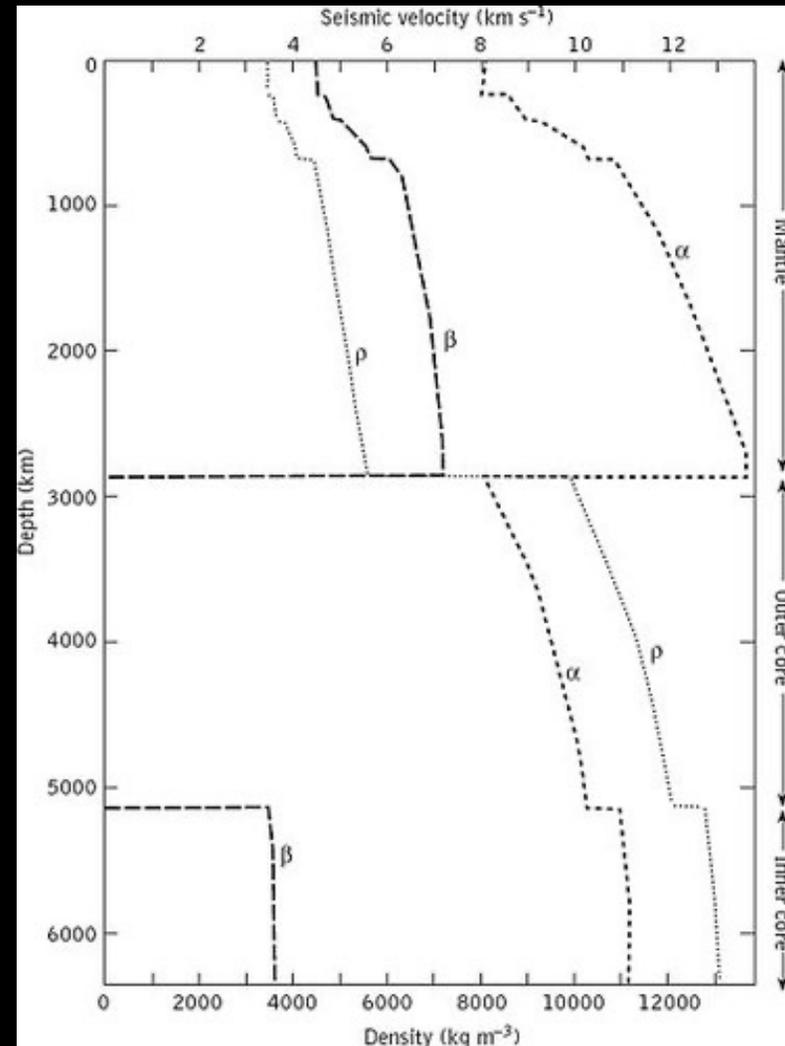


Modèle de Terre (vitesse, densité, anisotropie...) pour expliquer au mieux les données

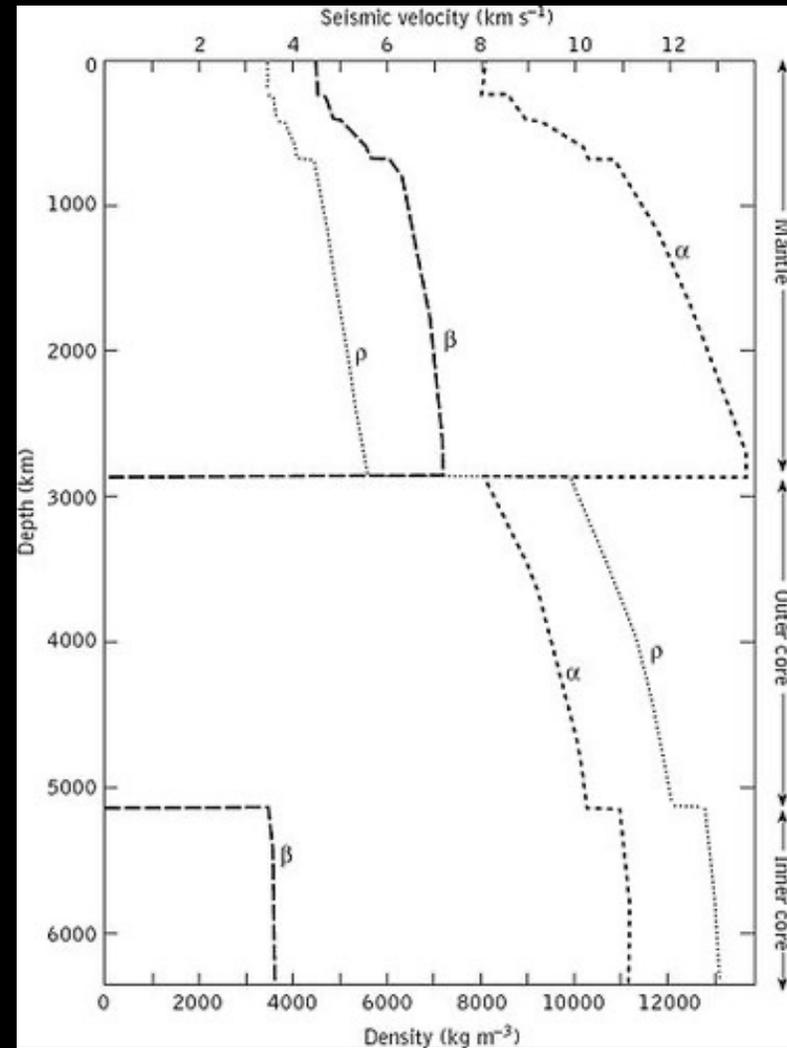
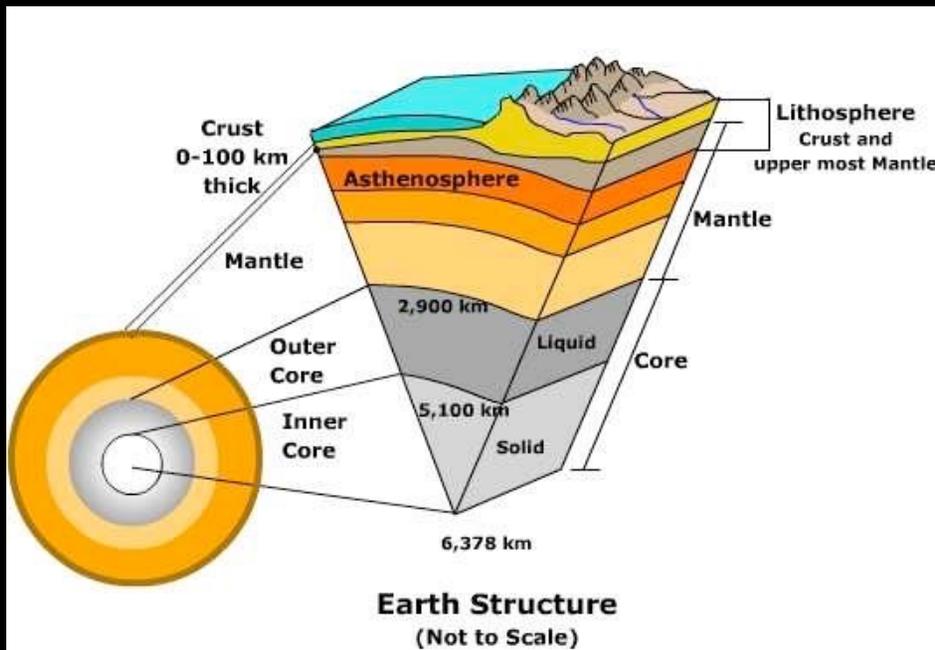
# Les hodochrones

## Modèle PREM (*PRE*liminary *E*arth *M*odel)

- Discontinuités principales, zones de transition, à faible vitesse, etc...
- Modèle radial (pas de variation latérale)
- Pas de distinction croûte océanique/continentale

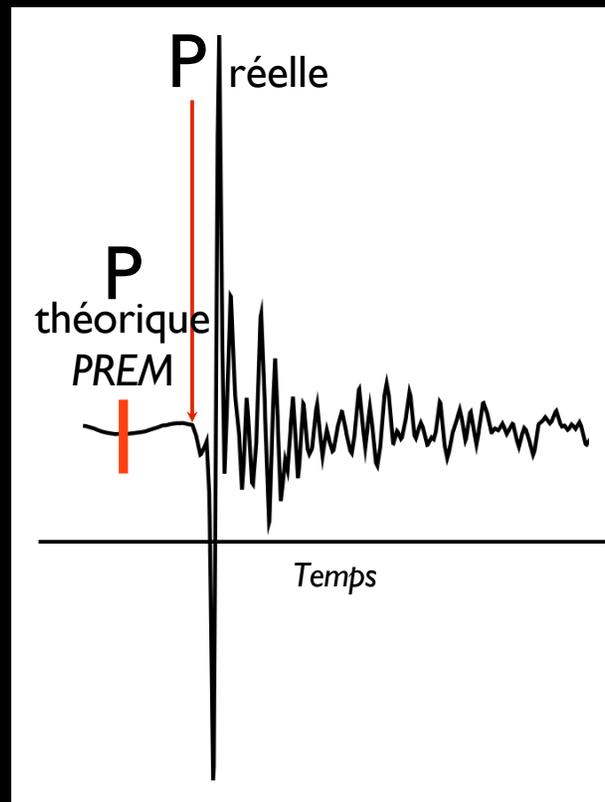
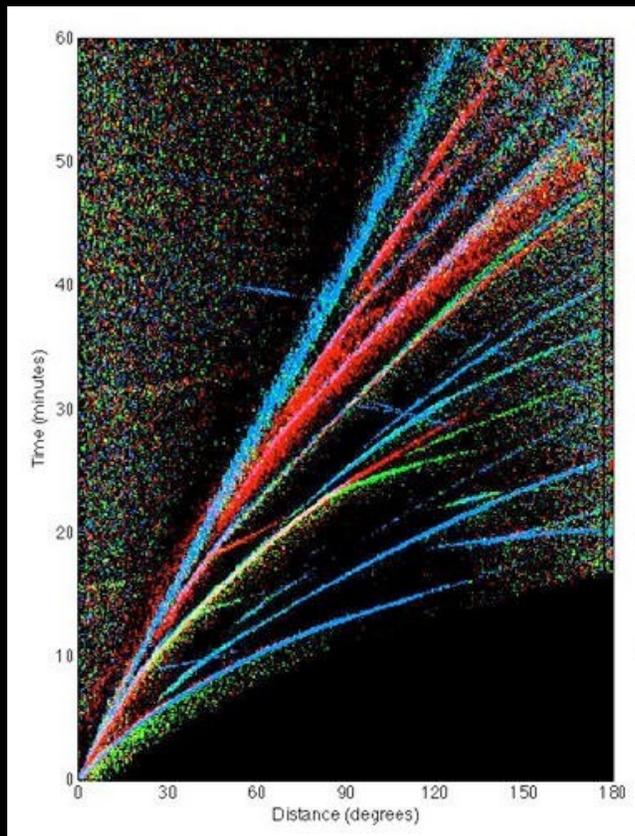


# Les hodochrones



# Les hodochrones

Mais il existe des différences entre les arrivées prédites par PREM et la réalité

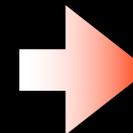


Erreurs sur:

- localisation
- temps origine

Hétérogénéités latérales!

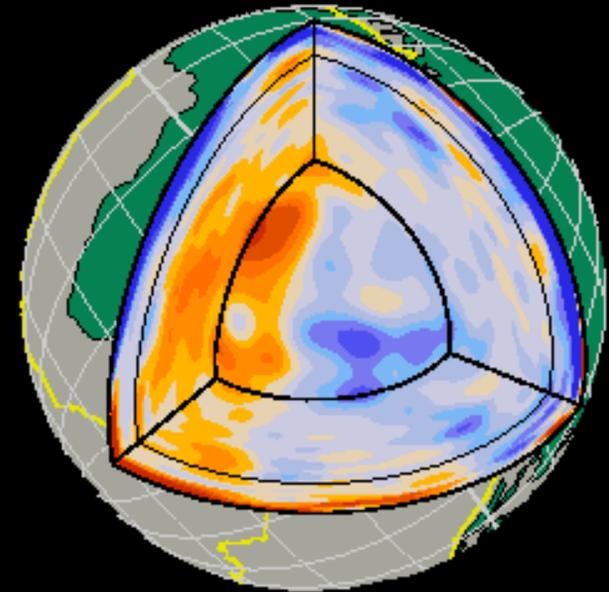
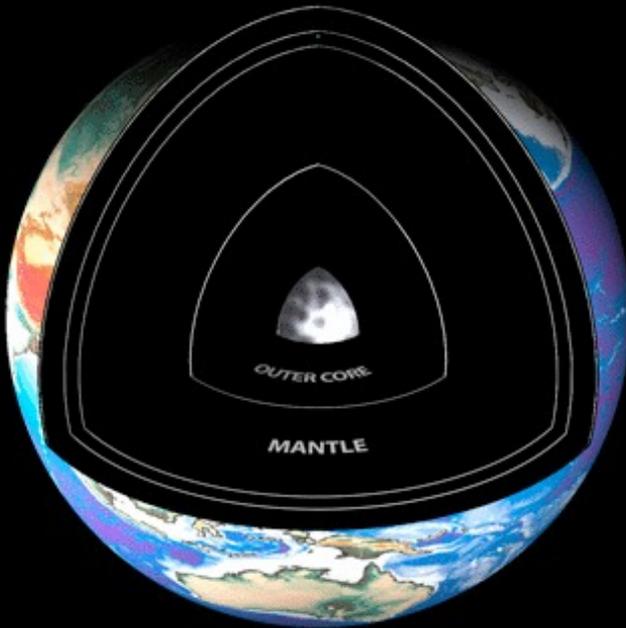
5% d'hétérogénéités latérales



Tomographie sismique

# La Terre sismologique...

1970 - présent



Terre hétérogène!

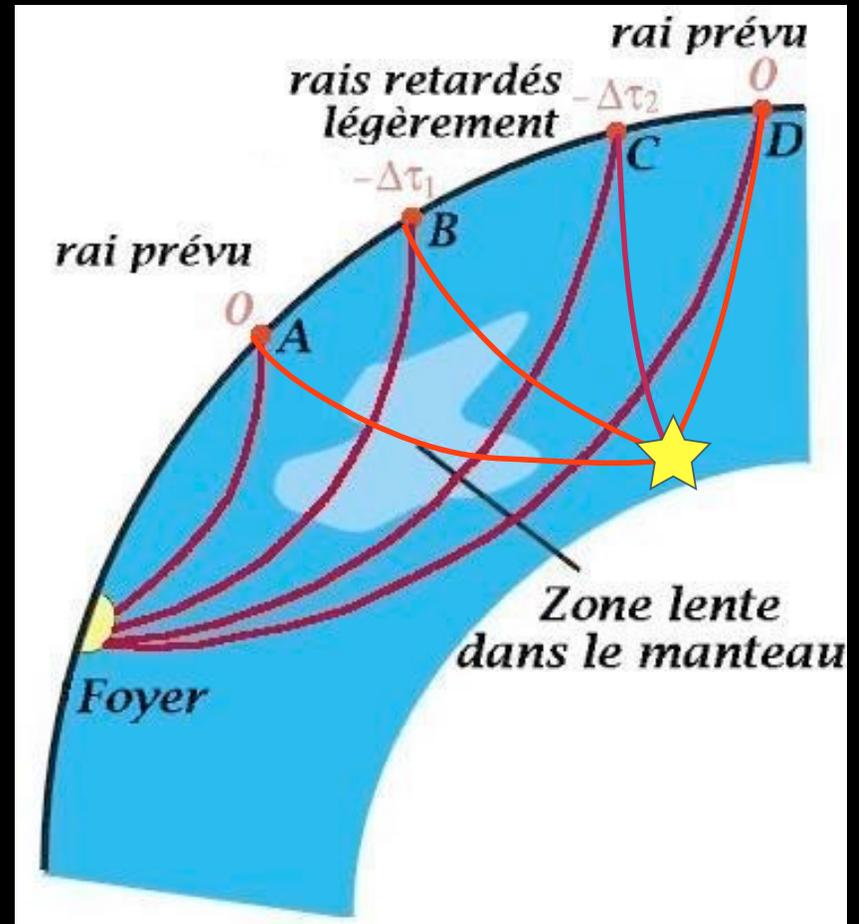
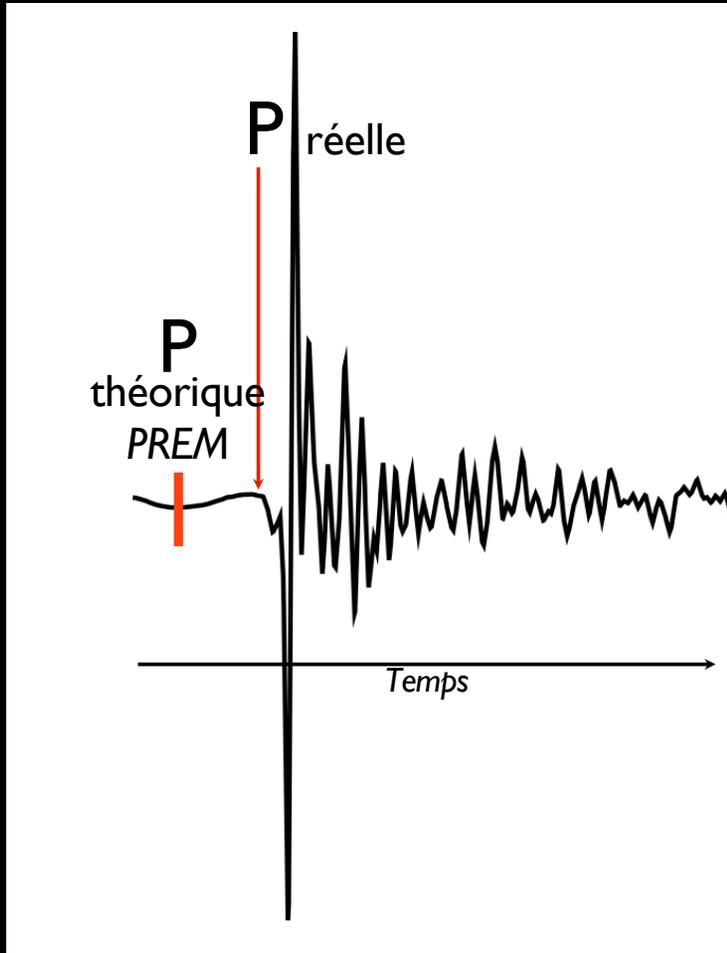
Une Terre radiale à 95%



5% d'hétérogénéités latérales

with courtesy of M. Thorne & L. Boschi

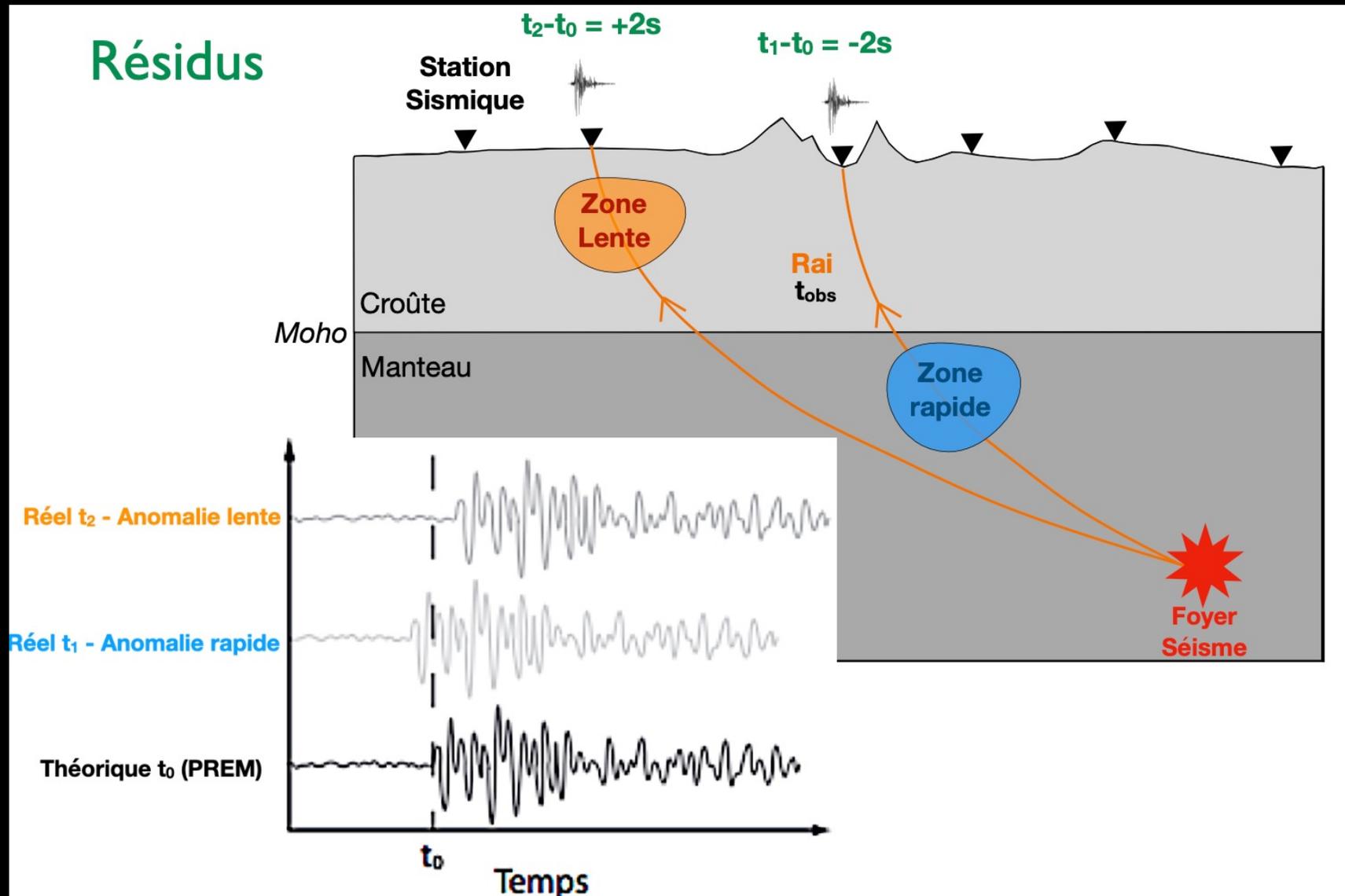
# La Tomographie



$P_{réelle} - P_{théorique} = \text{délais de temps} \rightarrow \text{anomalie de vitesse!}$

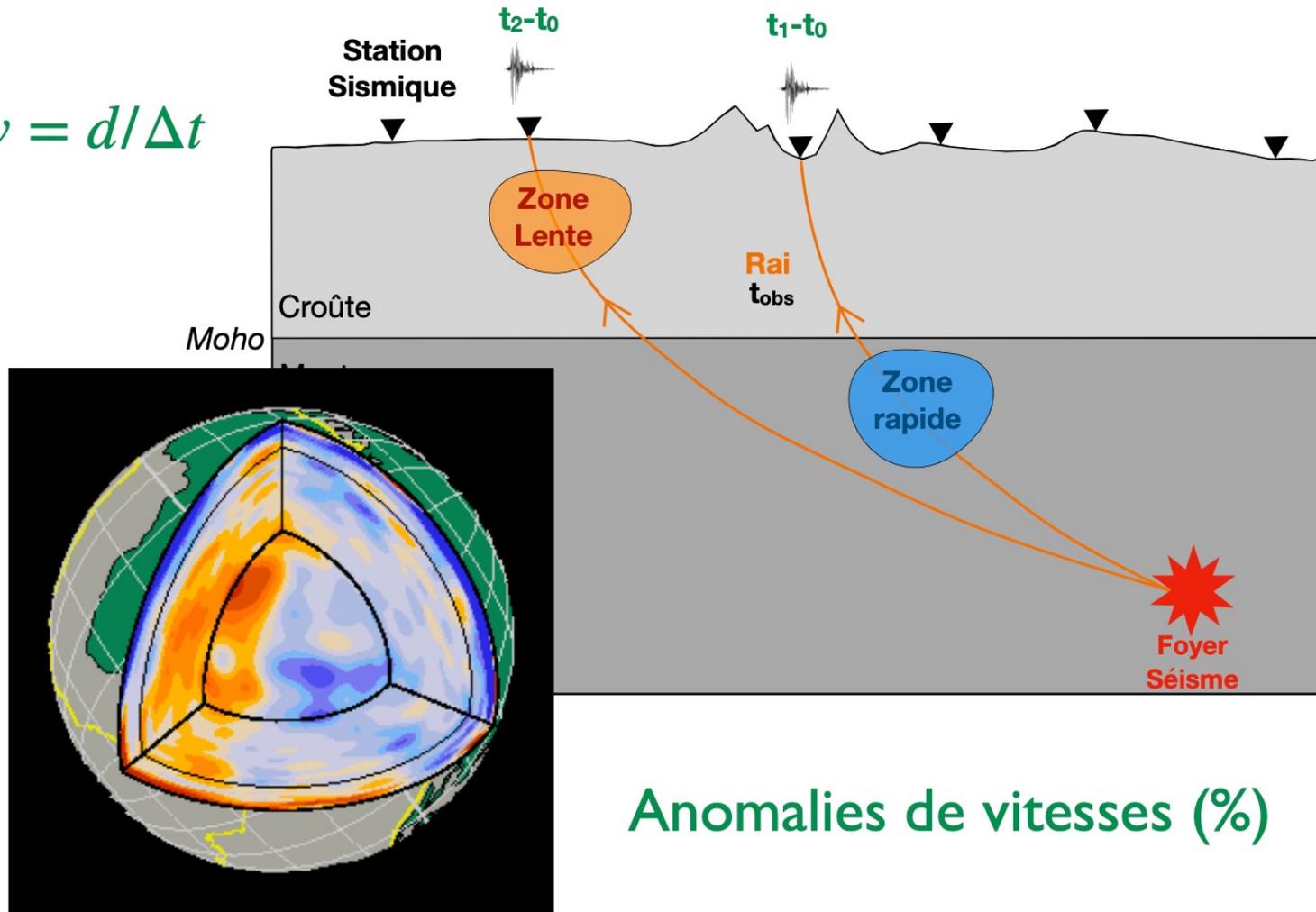
# La Tomographie

$$\text{Résidu} = T_{\text{obs}} - T_{\text{calc}}$$

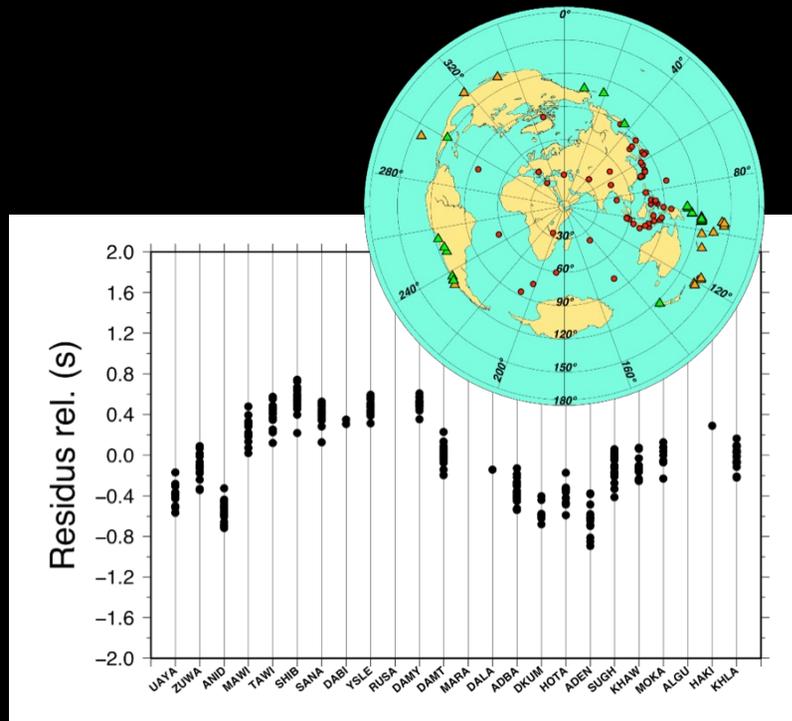


# La Tomographie

$$\Delta v = d/\Delta t$$



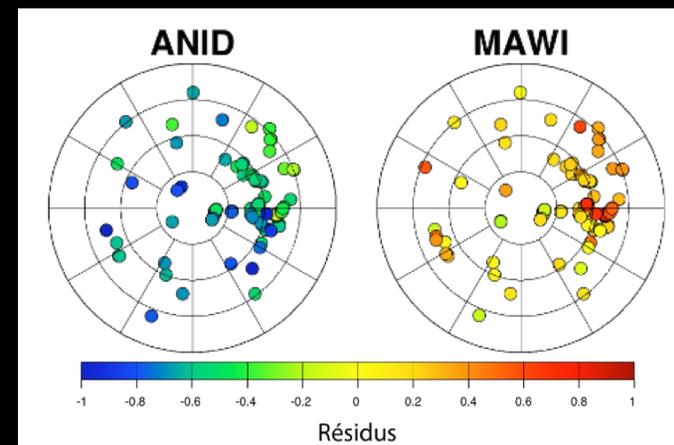
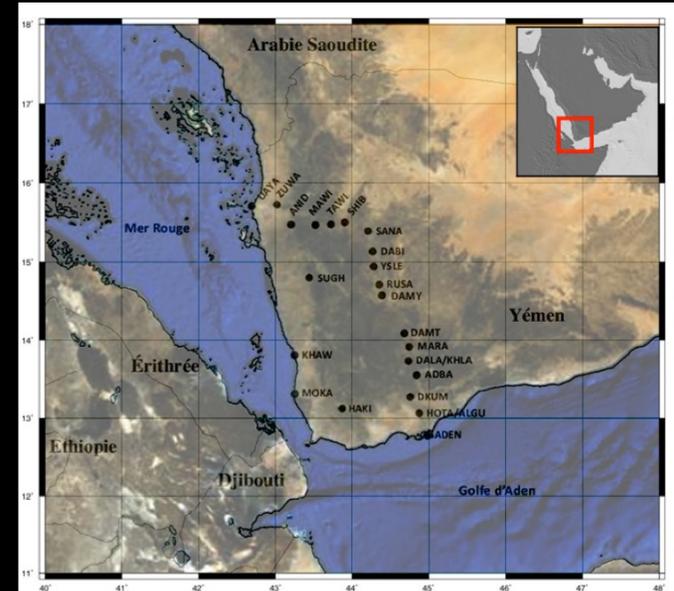
# La Tomographie



Courbe de résidus

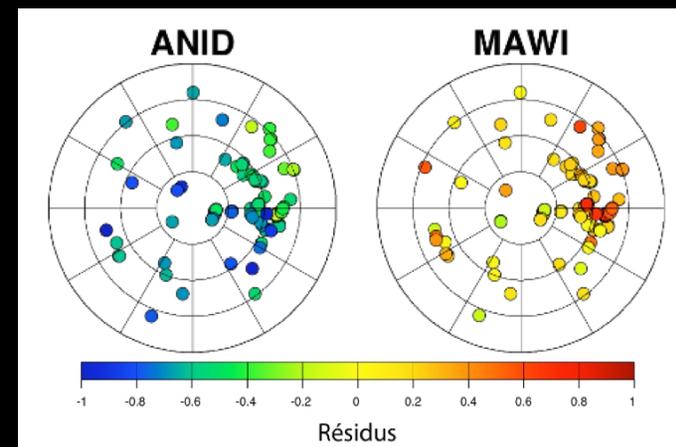
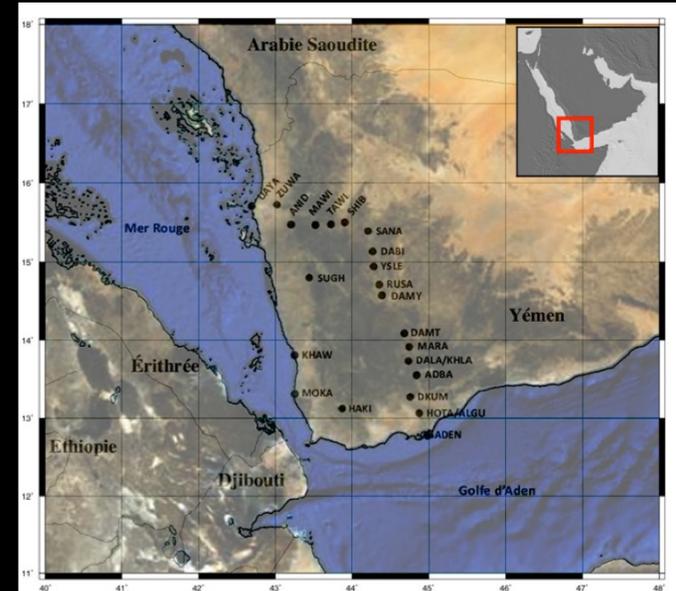
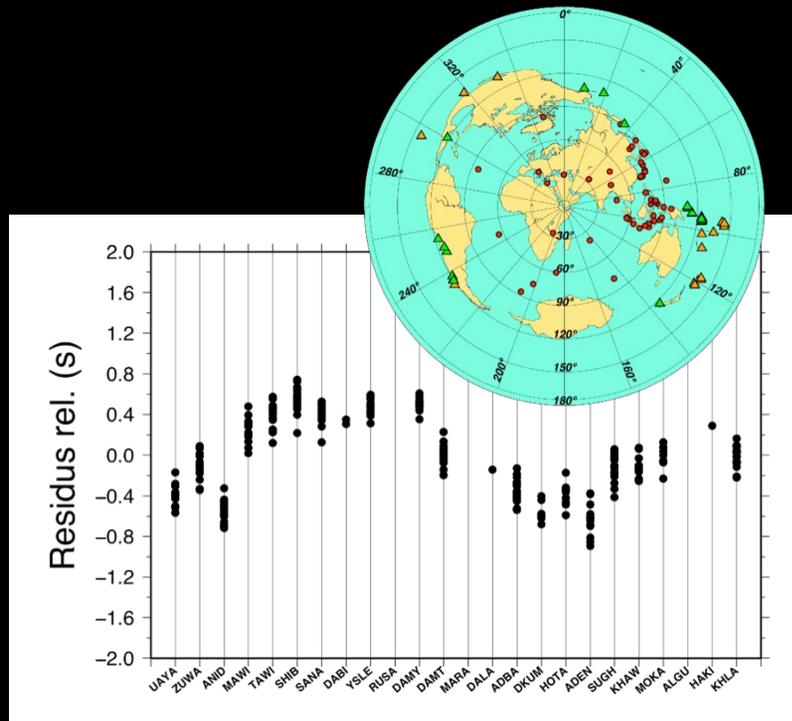
Résidus = obs - calc

On travaille toujours en anomalie  
*i.e.* il y a un modèle de référence



Répartition de résidus

# La Tomographie



Courbe de résidus  
Résidus = +/- 1s pour  $L \sim 500$  km  
 $V_p \sim 10$  km/s  
ie. 2 % !!!!

Répartition de résidus

# La Tomographie

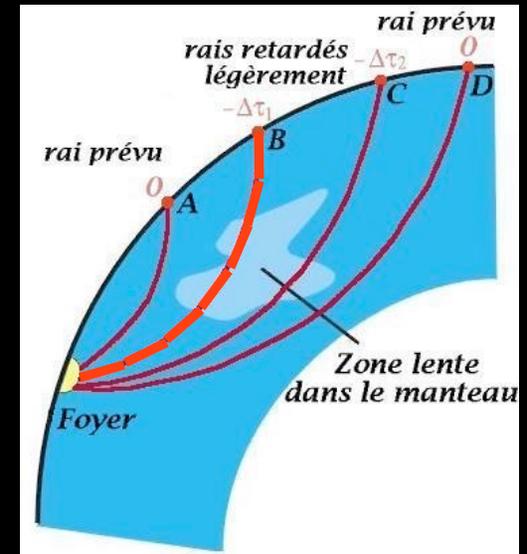
Pour un couple séisme - station

$$t = \frac{D}{V} \quad t = \sum_i \frac{d_i}{V_i}$$

Pour tous les couples séisme - station

$$\begin{pmatrix} t_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ t_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nm} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{V_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{1}{V_m} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{m}$$



$$\mathbf{m} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{t}$$

# La Tomographie

On adapte les sources et récepteurs pour définir l'échelle d'investigation de la tomographie

- locale
- régionale
- globale

# La Tomographie

On adapte les sources et récepteurs pour définir l'échelle d'investigation de la tomographie

- locale
- régionale
- globale

Le type d'onde définit les paramètres recherchés

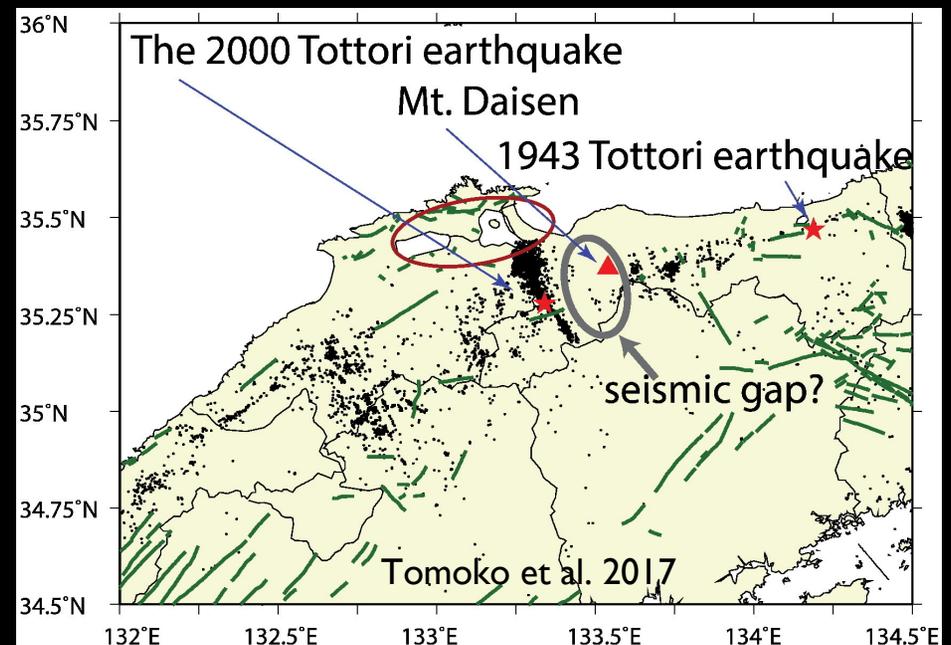
- ondes de volume ( $\delta V_P$ ,  $\delta V_S$ )
- ondes de surface ( $V_{\text{groupe}}$ ,  $V_{\text{phase}}$ , anisotropie)

# Échelle locale



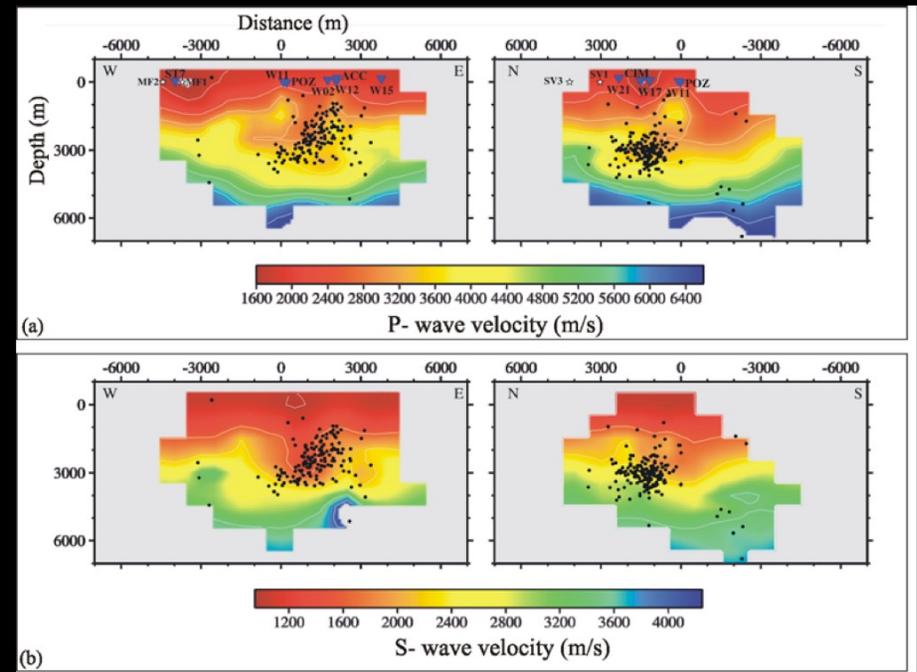
Imager les structures crustales:  
réservoirs, failles ...

Risques naturels, exploration  
minière...

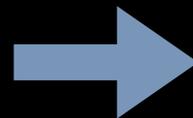


# La tomographie locale

- ▶ Sources = séismes locaux
- ▶ Sources + récepteurs dans le volume d'étude
- ▶ Détermination **conjointe** des hypocentres et des vitesses absolues ( $V_P$  et  $V_S$ )
- ▶ Résolution de l'ordre du kilomètre

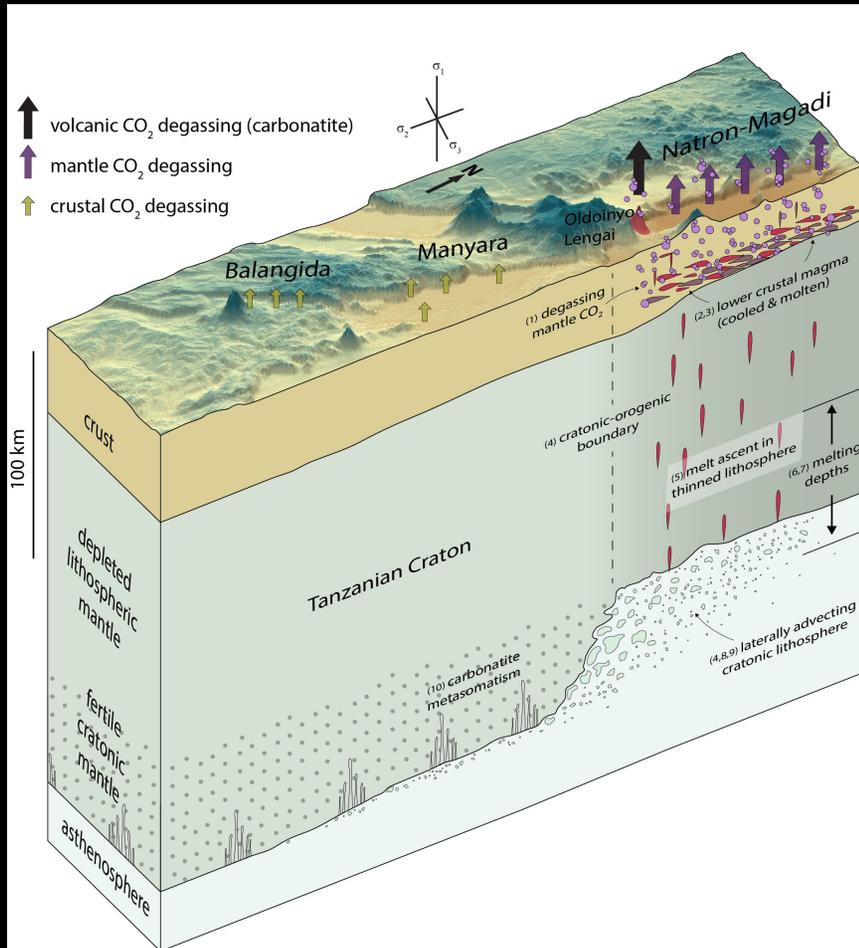


Vanorio et al. 2005



Zone d'investigation locale (crustale)

# Échelle régionale

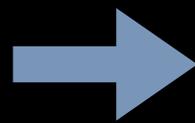
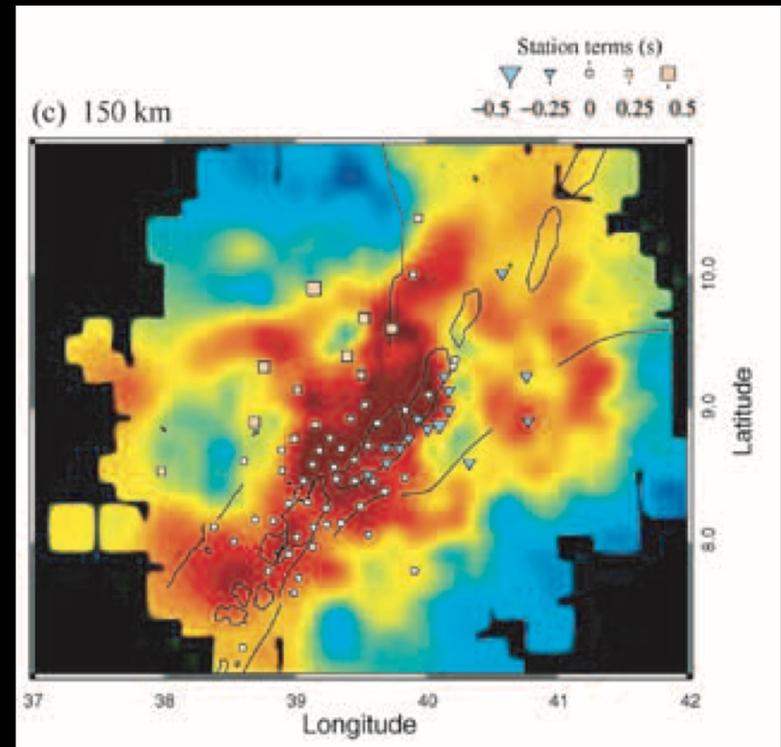


Imager les structures mantellique supérieures: panaches, subduction ...

Risques naturels, géodynamique...

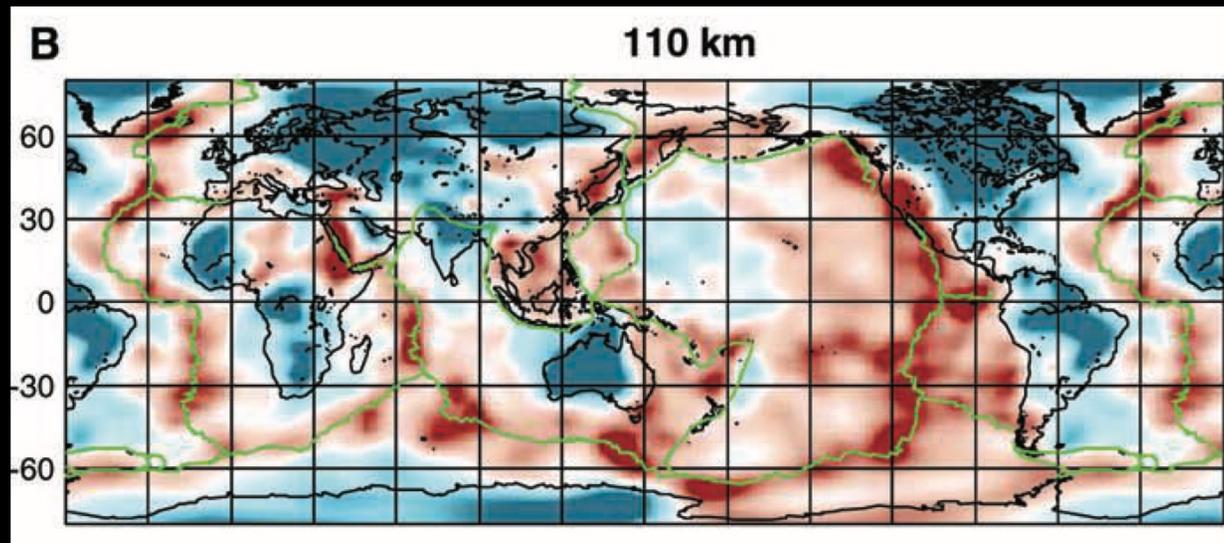
# La tomographie régionale

- ▶ Sources = télé-séismes
- ▶ Récepteurs dans le volume d'étude, sources dehors
- ▶ Détermination des vitesses relatives dans chaque couche ( $V_P$  et  $V_S$ )
- ▶ Résolution de l'ordre de la dizaine de kilomètres (latérale mieux que prof.)

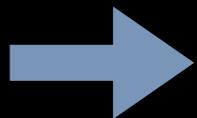


Zone d'investigation régionale  
(croûte et manteau supérieur)

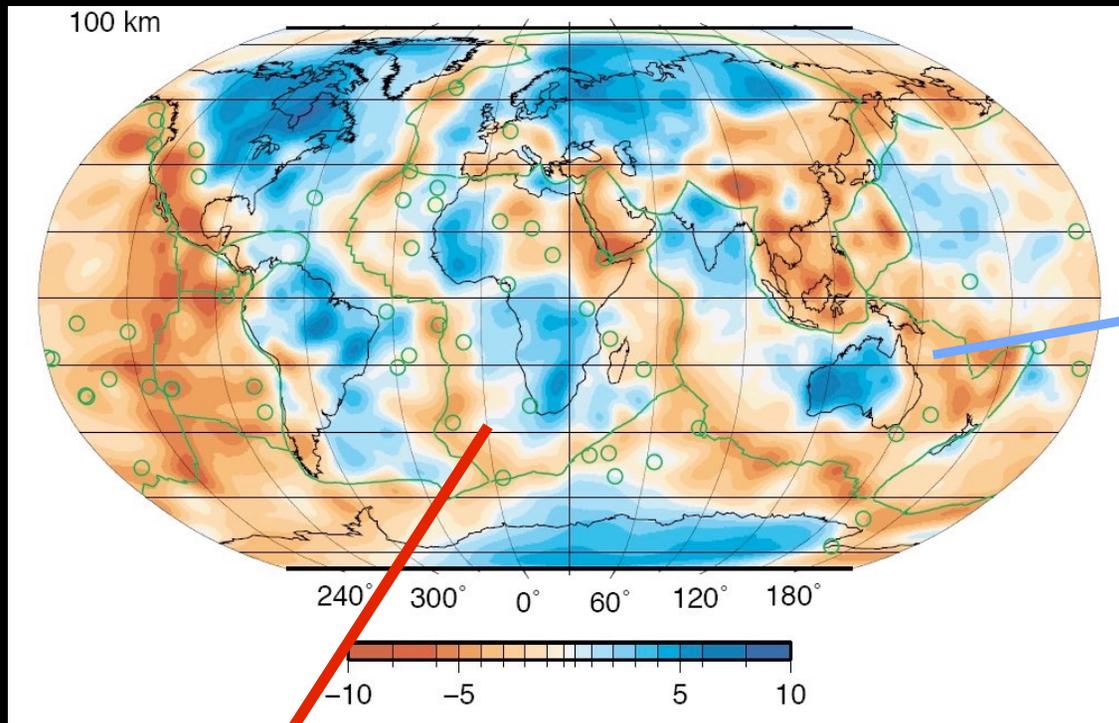
# La tomographie globale



- ▶ Sources = tous les séismes de la zone
- ▶ Sources et récepteurs dans le volume d'étude
- ▶ Détermination de perturbations de vitesse ( $V_p$  et  $V_s$ ) par rapport à  $1D$
- ▶ Résolution  $\sim 100$  à  $1000$  kilomètres
- ▶ Ondes de surface aussi (mais pour  $z \in [0-400 \text{ km}]$ )



Zone d'investigation globale (manteau à CMB)



rapide = froid

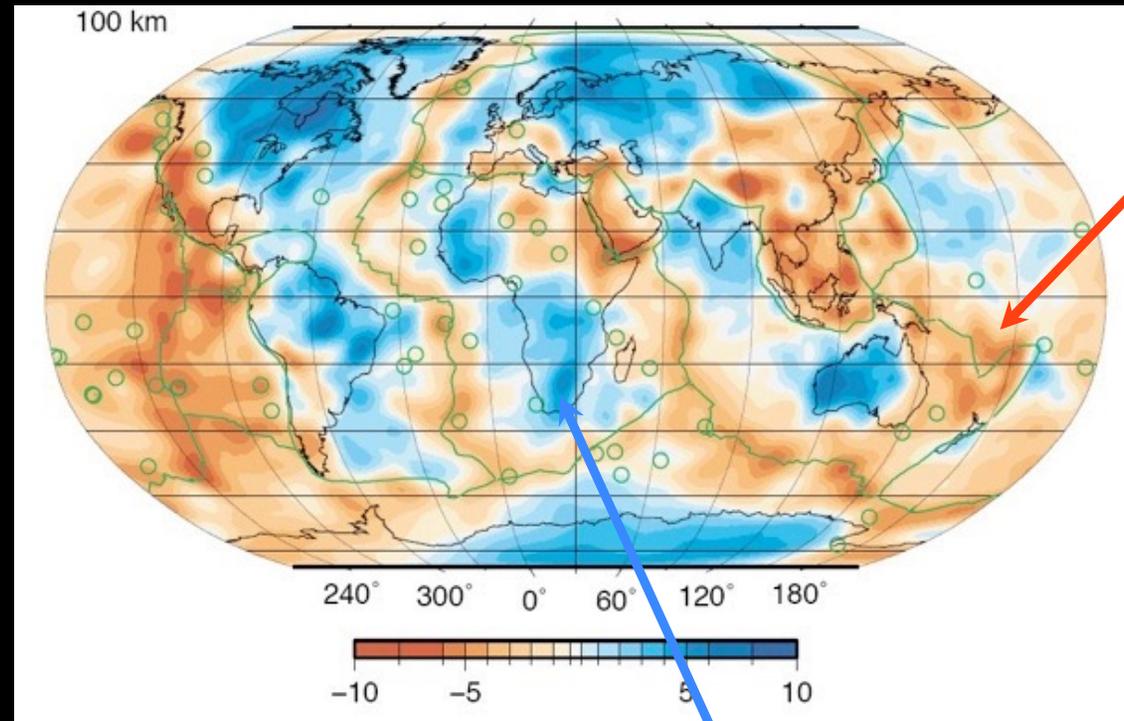


lent = chaud

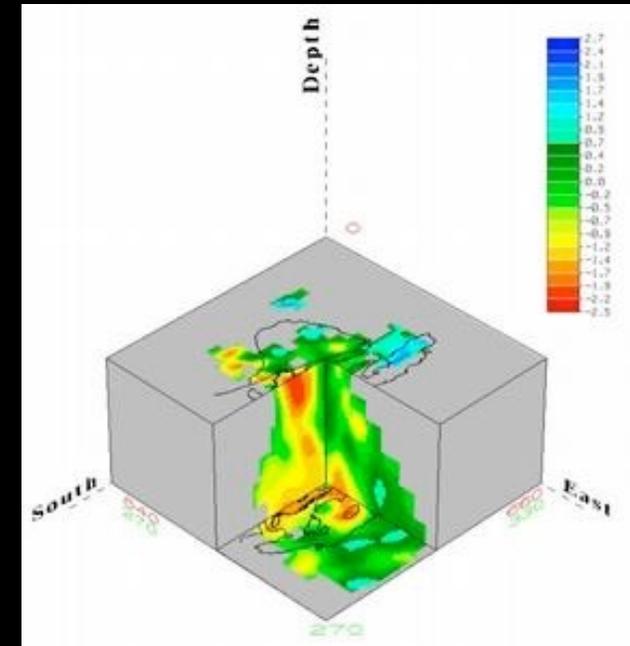
Est-ce vraiment aussi simple?



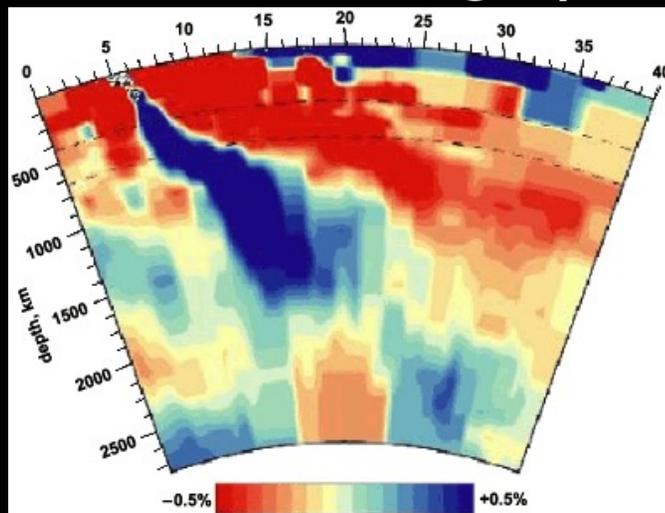
La vitesse ne dépend pas que de la température (composition, pression, eau...)



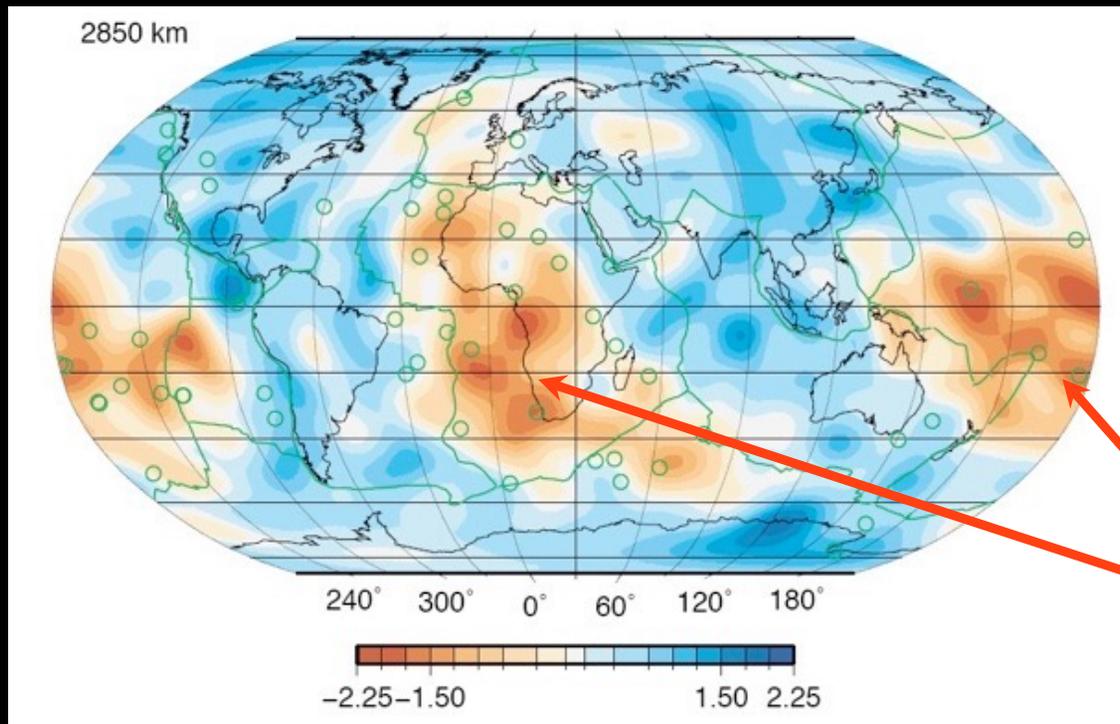
vitesses lentes  
dorsales,  
panaches...



## Tomographie ondes S



vitesses rapides  
vieille lithosphère,  
cratons, subduction

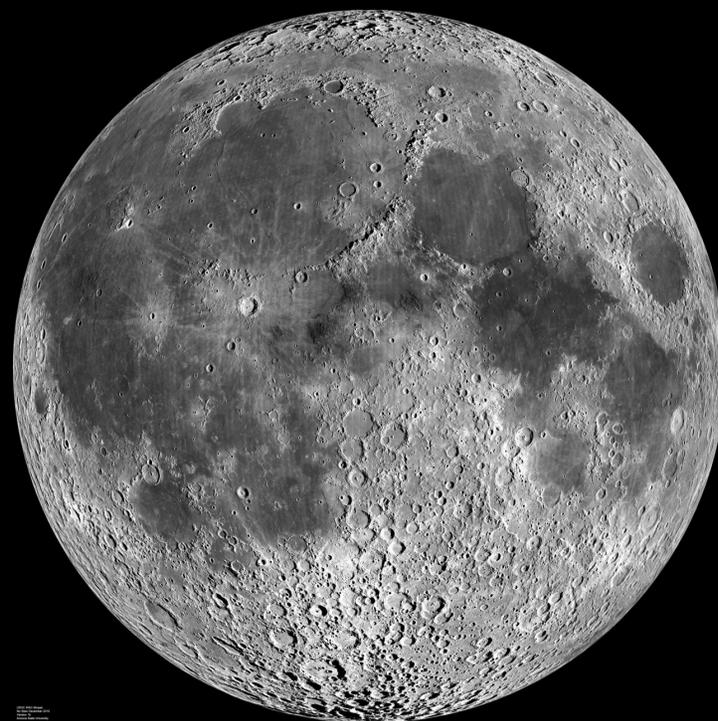


Super-panaches?

## Tomographie ondes S

Images du manteau inférieur plus délicates à interpréter...

# Comment est née notre Lune ?

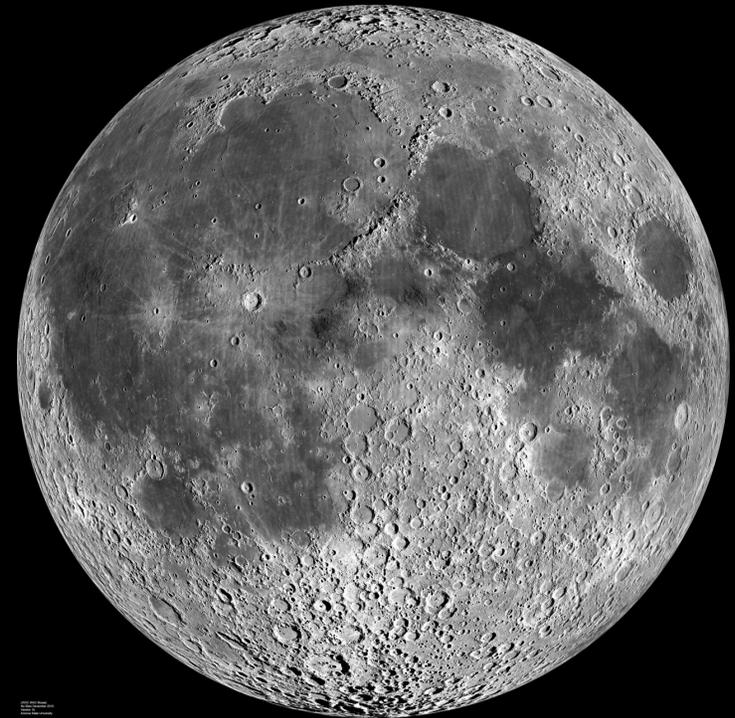


## Comment est née notre Lune ?

La Lune serait née peu de temps après la formation du système solaire et la projection de comètes, de météores et d'astéroïdes, il y a 4,5 milliards d'années.

La collision entre la Terre et un bolide de la taille de Mars aurait fait tourbillonner de la roche en fusion dans l'espace.

Au fil du temps, des nuages de débris se seraient rassemblés pour former la Lune.



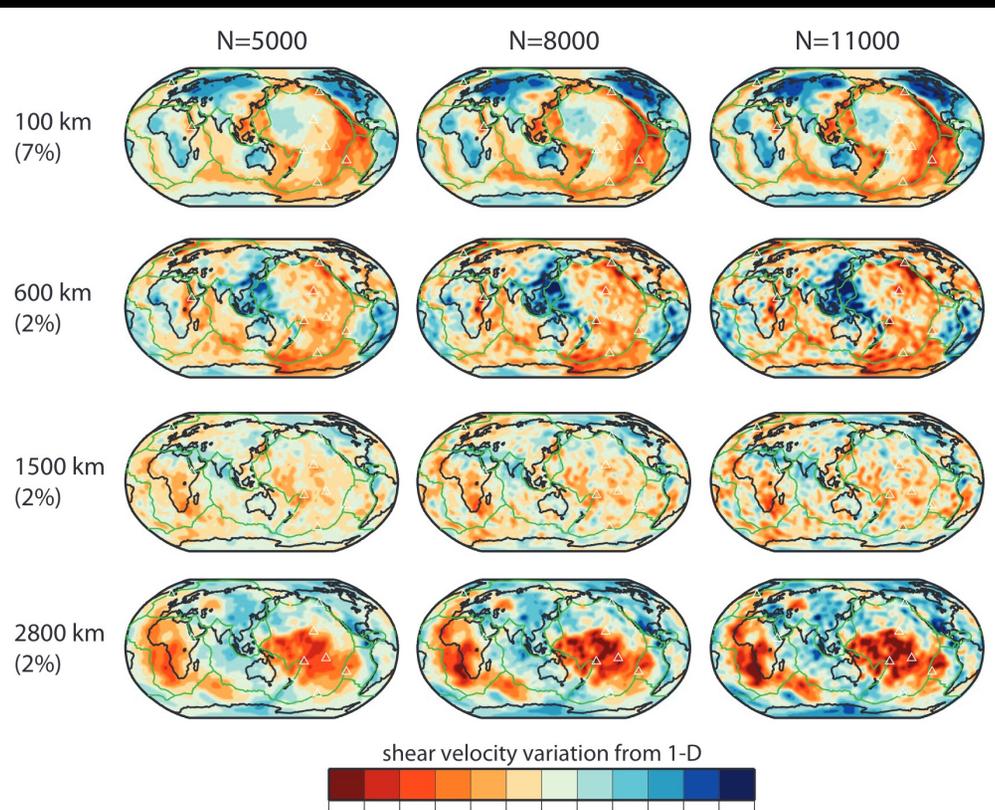


Figure 6. Maps of shear-velocity heterogeneity at, from top to bottom, 100 km, 600 km, 1500 km and 2800 km depth for, from left to right, a total number of unknowns equal to  $N = 5000$ ,  $N = 8000$  and  $N = 11000$  (eq. 5). Model S40RTS has 8000 unknowns.

Ritsema et al., Geophys. J. Int. (2011)

2800 km  
(2%)

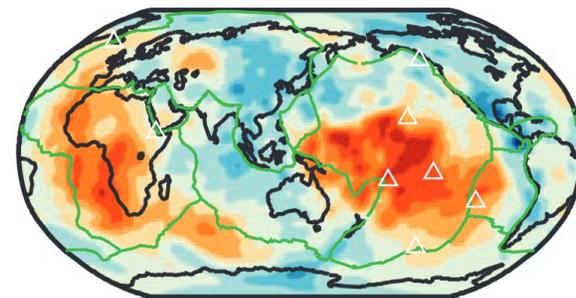
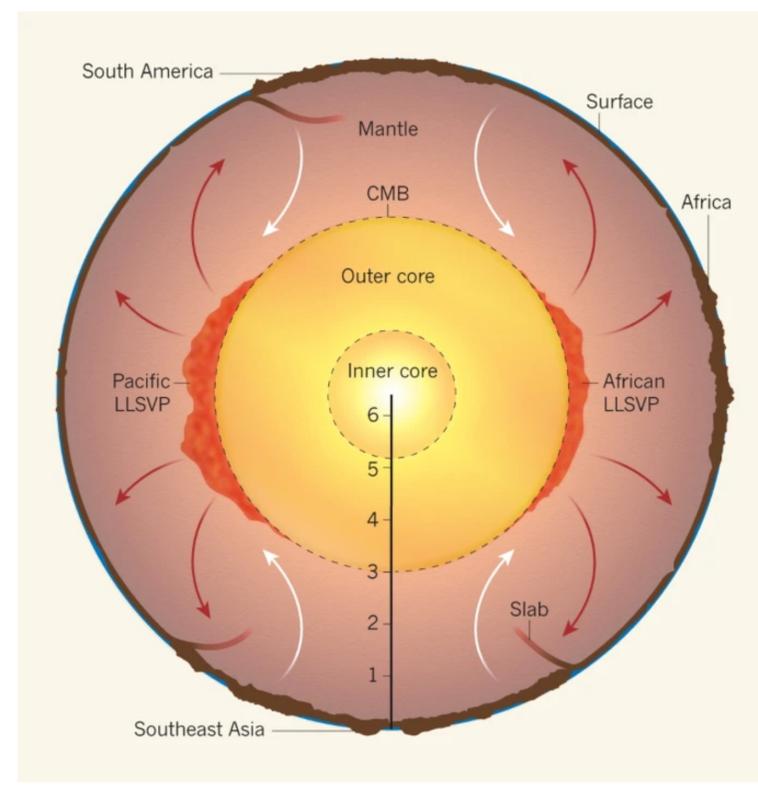


Figure 1: Earth's internal structure.



Romanowicz, Nature, 2017

Article

# Moon-forming impactor as a source of Earth's basal mantle anomalies

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06589-1>

Received: 4 February 2022

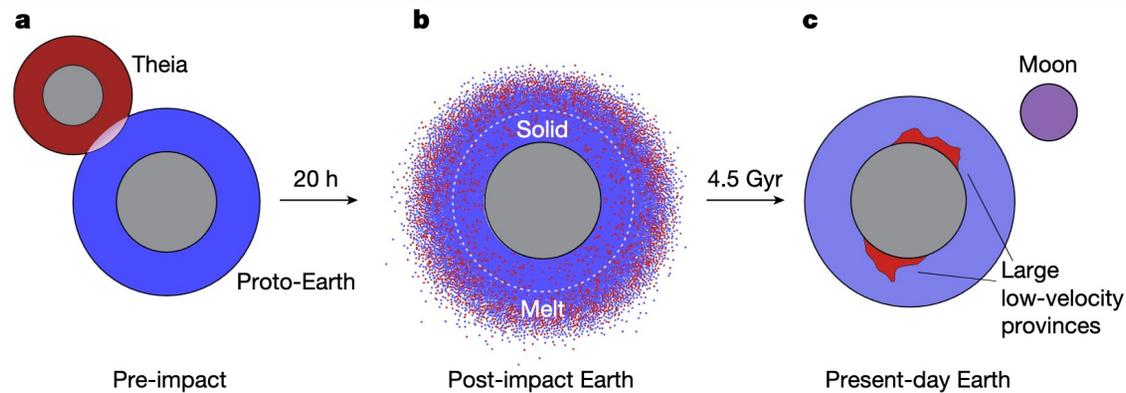
Accepted: 30 August 2023

Published online: 1 November 2023

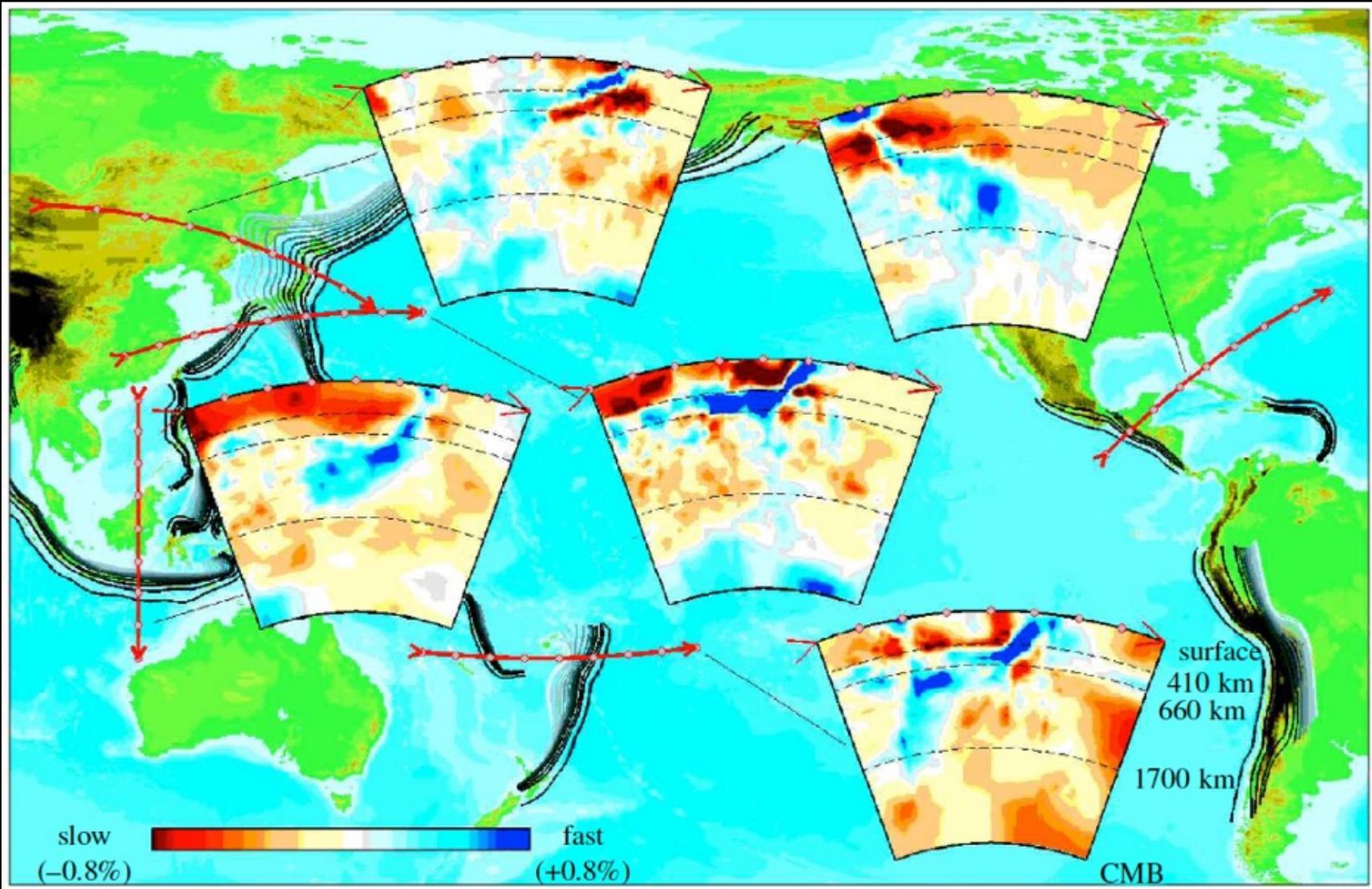
 Check for updates

Qian Yuan<sup>1,2,3</sup>, Mingming Li<sup>1</sup>, Steven J. Desch<sup>1</sup>, Byeongkwan Ko<sup>1,3</sup>, Hongping Deng<sup>4</sup>, Edward J. Garnero<sup>1</sup>, Travis S. J. Gabriel<sup>5</sup>, Jacob A. Kegerreis<sup>6</sup>, Yoshinori Miyazaki<sup>7</sup>, Vincent Eke<sup>8</sup> & Paul D. Asimow<sup>2</sup>

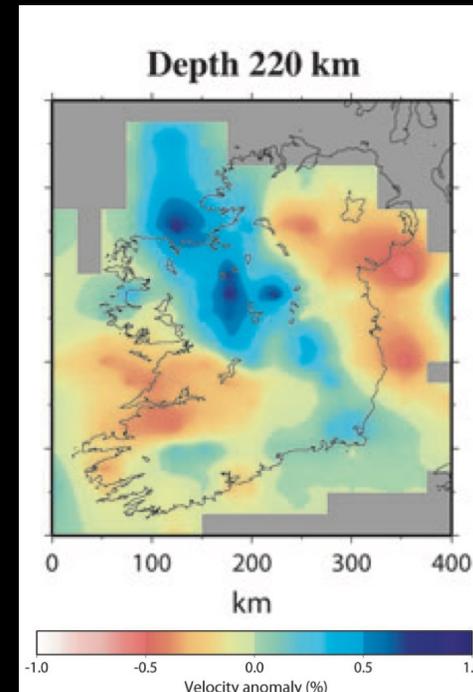
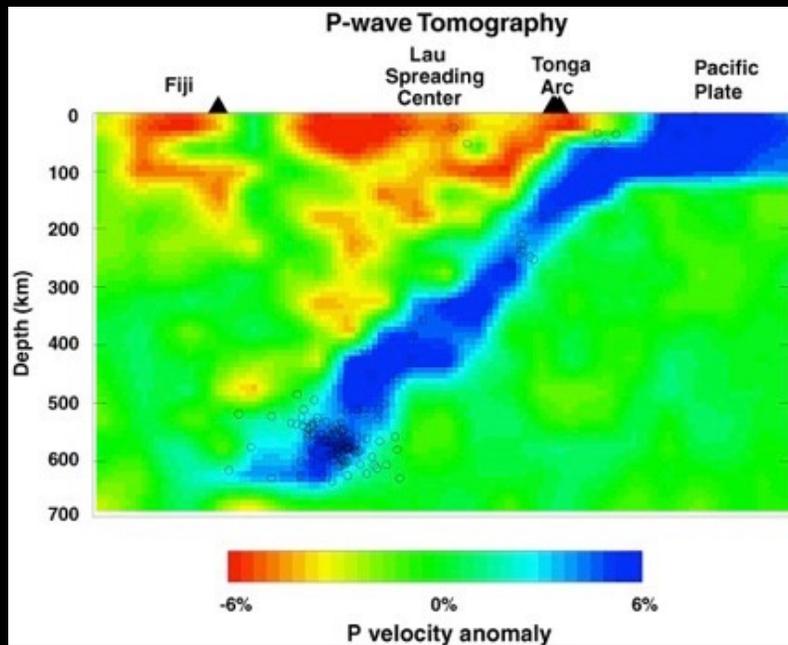
Seismic images of Earth's interior have revealed two continent-sized anomalies with low seismic velocities, known as the large low-velocity provinces (LLVPs), in the lowermost mantle<sup>1</sup>. The LLVPs are often interpreted as intrinsically dense heterogeneities that are compositionally distinct from the surrounding mantle<sup>2</sup>. Here we show that LLVPs may represent buried relics of Theia mantle material (TMM) that was preserved in proto-Earth's mantle after the Moon-forming giant impact<sup>3</sup>. Our canonical giant-impact simulations show that a fraction of Theia's mantle could have been delivered to proto-Earth's solid lower mantle. We find that TMM is intrinsically 2.0–3.5% denser than proto-Earth's mantle based on models of Theia's mantle and the observed higher FeO content of the Moon. Our mantle convection models show that dense TMM blobs with a size of tens of kilometres after the impact can later sink and accumulate into LLVP-like thermochemical piles atop Earth's core and survive to the present day. The LLVPs may, thus, be a natural consequence of the Moon-forming giant impact. Because giant impacts are common at the end stages of planet accretion, similar mantle heterogeneities caused by impacts may also exist in the interiors of other planetary bodies.



**Fig. 1 | Schematic diagram illustrating the giant-impact origin of the LLVPs.** stratification model from ref. 19. c, Present day: after approximately 4.5 Gyr, the



# La Tomographie

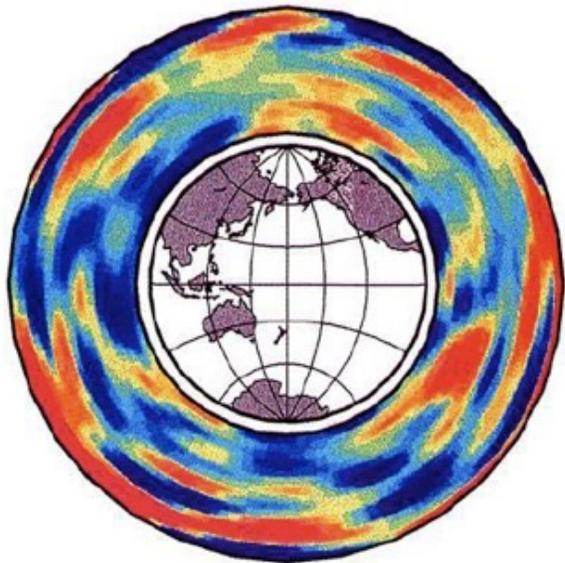


Attention aux interprétations chaud/froid...

**Composition, fluides, pression** interviennent aussi!!

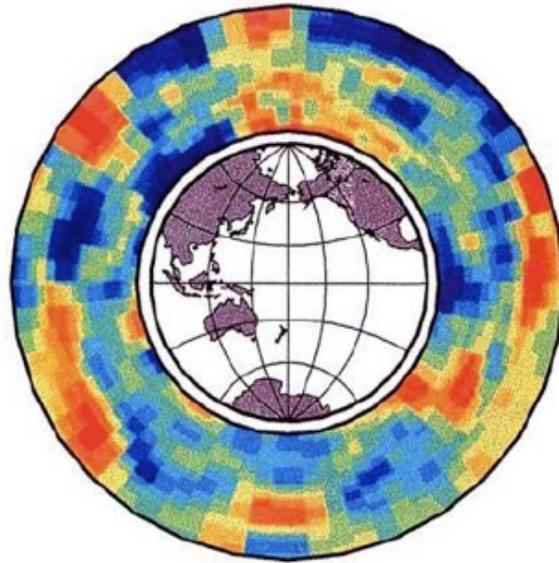
# La Tomographie

deg. 12 sph. har.



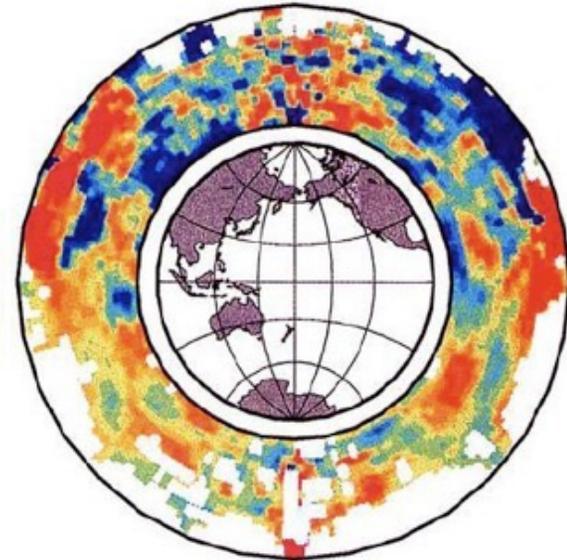
Su & Dziewonski, 1997

5 deg. X 5 deg.



Boschi & Dziewonski, 1999

2 deg x 2 deg



Van der Hilst et al., 1997

Modèles tomographiques obtenus avec les mêmes données...

Cela reste des modèles, prudence!



