

Tomographie de la Terre

L2 – Sismologie et Traitement du signal

Qu'y-a-t-il à l'intérieur ?

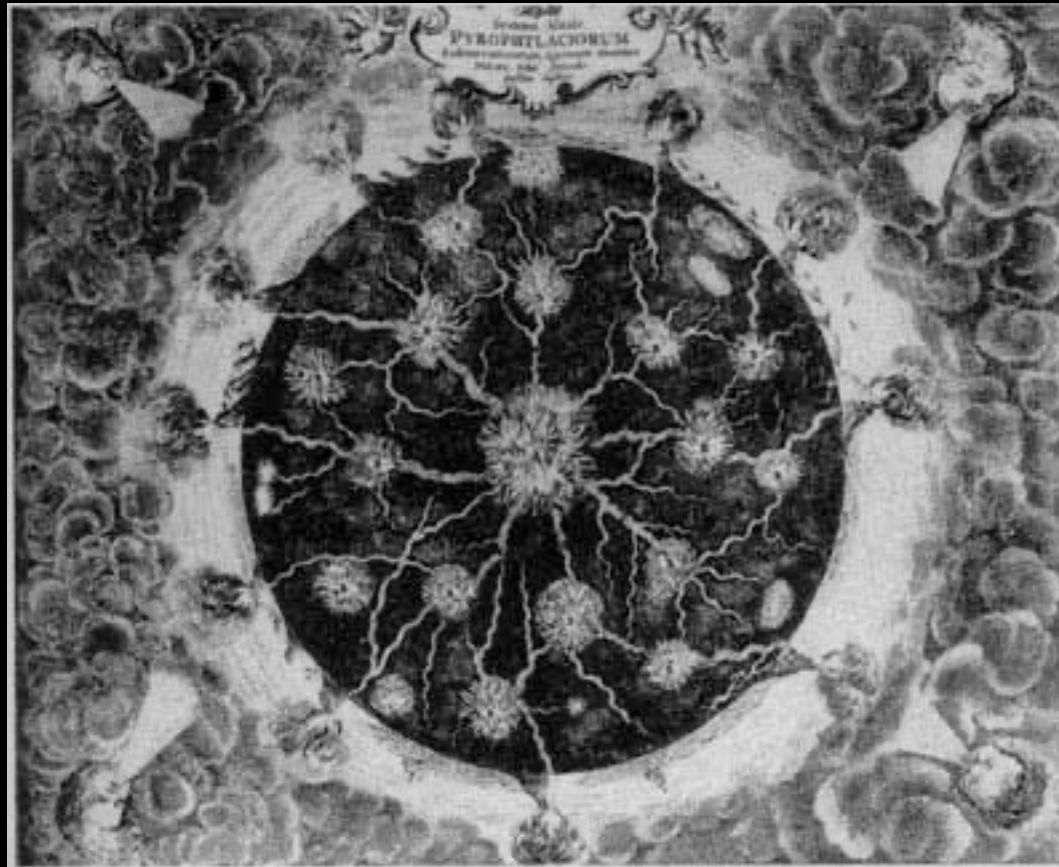




... Et là dedans ?



Le mundus subterraneus de Kircher (1665)



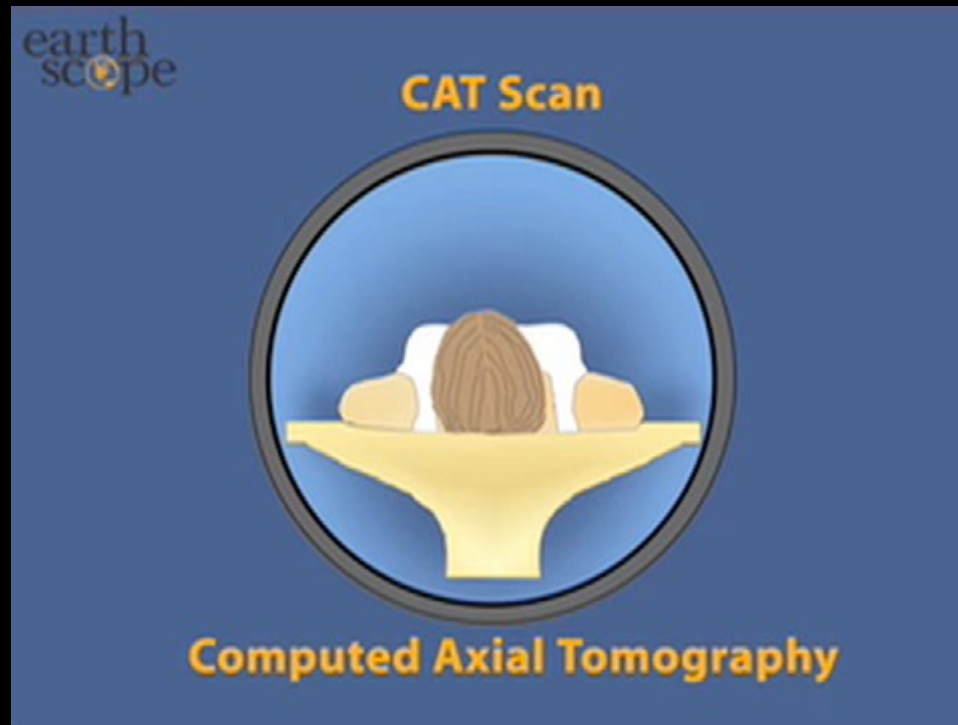
La Terre est un ancien Soleil refroidi.

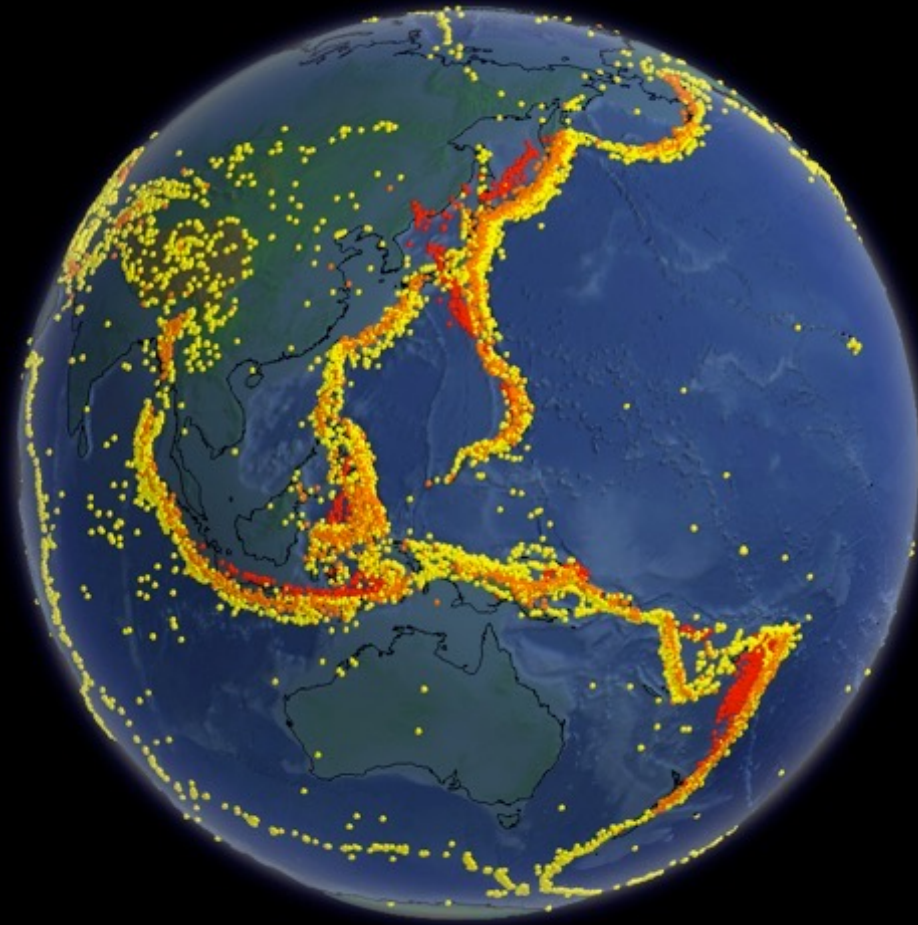
Elle possède un foyer central, relié aux volcans de la surface par des conduits de feu avec des réserves intermédiaires.

Les volcans sont les manifestations de l'activité interne du Globe, ce sont des soupiraux par lesquels s'échappe le feu intérieur.



Comment ça marche ?

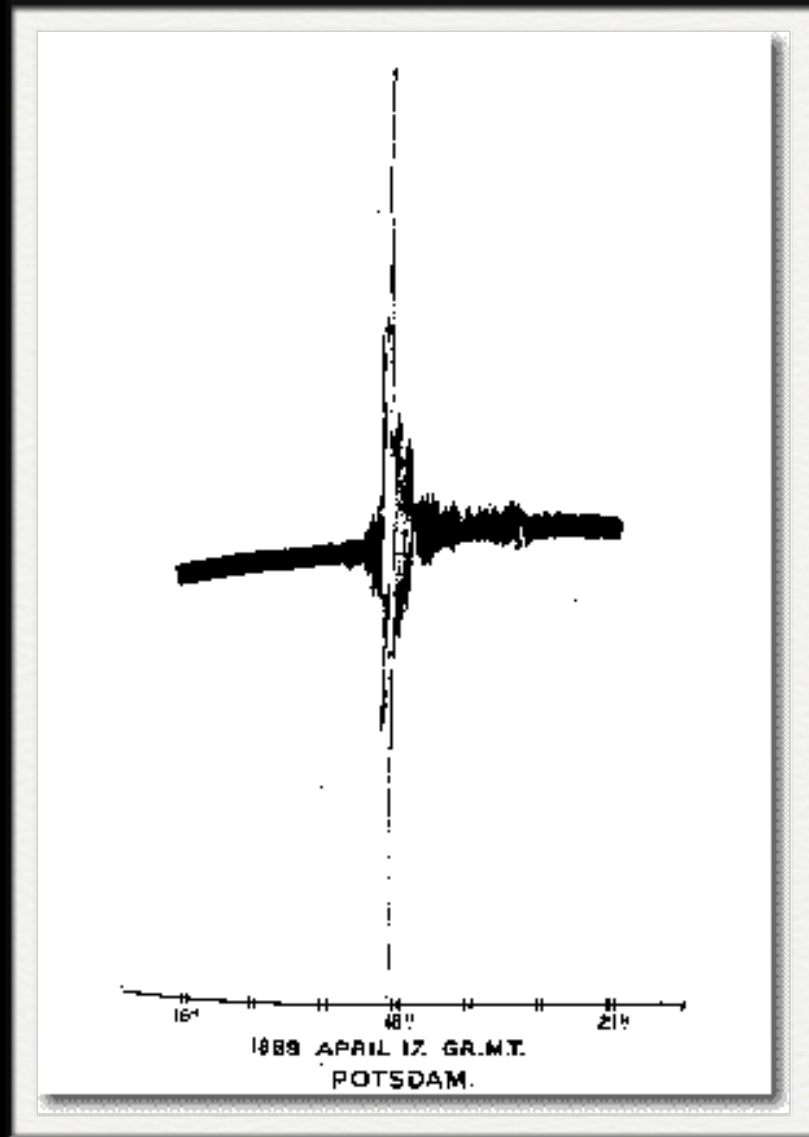




Quelle(s) source(s) pour ausculter la
Terre?

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!

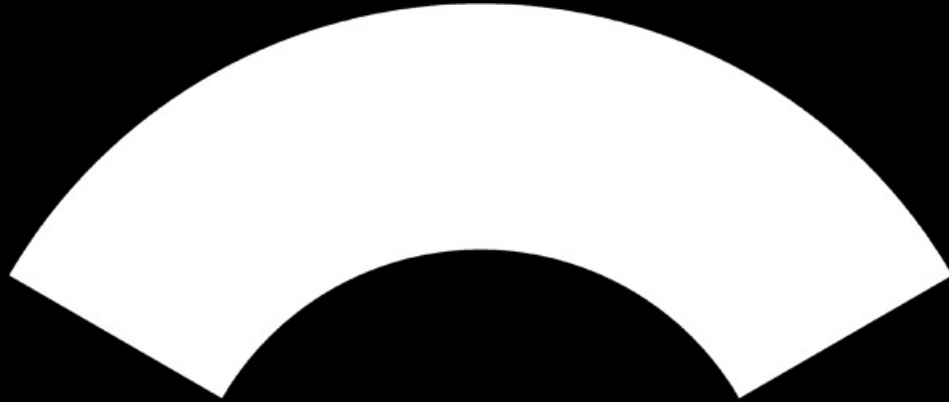


La Terre sismologique...

Homogeneous Earth Model

Source Depth: 0 km
Tdom: 30 sec
Vs: 2.0 km/sec

ASU LMU



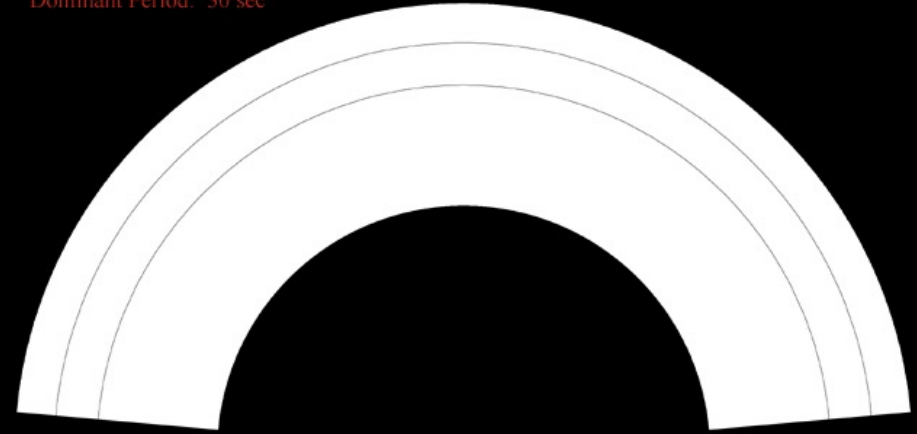
5 (sec)

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

Terre homogène

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]

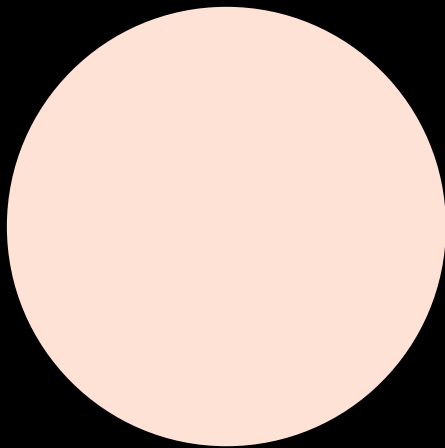
1 couche + rapide

Arrivée des ondes dépend de la structure du globe !

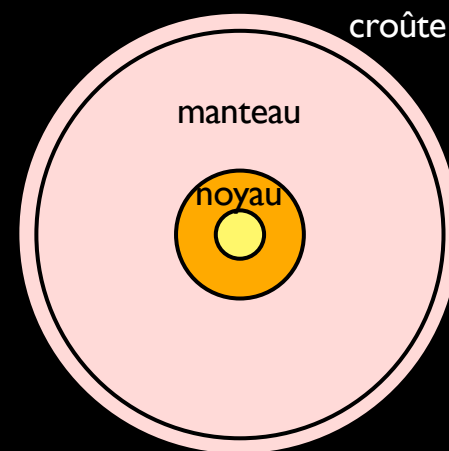
La Terre sismologique...

~1910-1960

Terre
homogène



Terre
radiale



De l'imagination aux investigations scientifiques

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

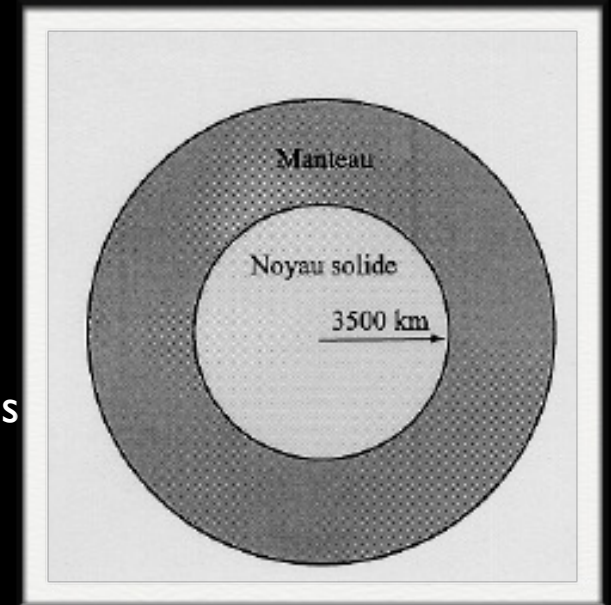


Beno Gutenberg: Discontinuité d'Oldham (noyau) à 2900 km.



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

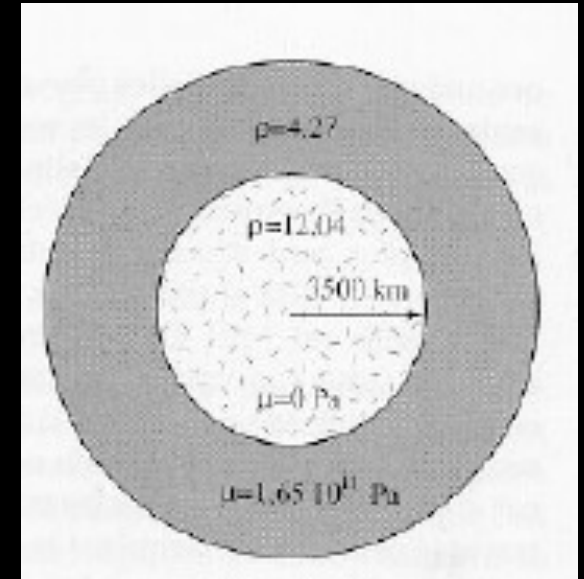


La Terre sismologique...



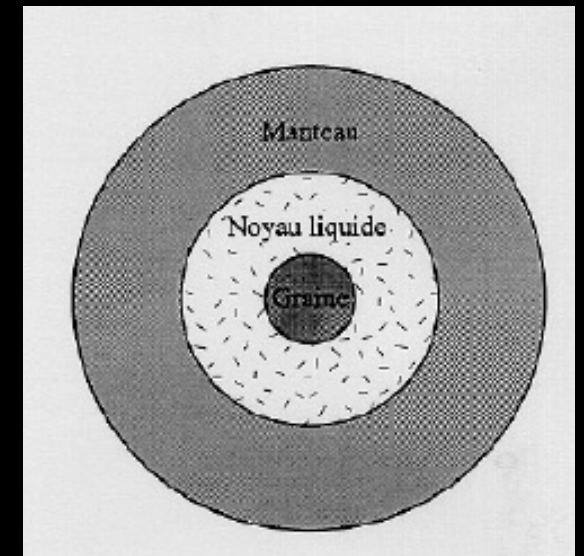
1926, le Noyau liquide!

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)

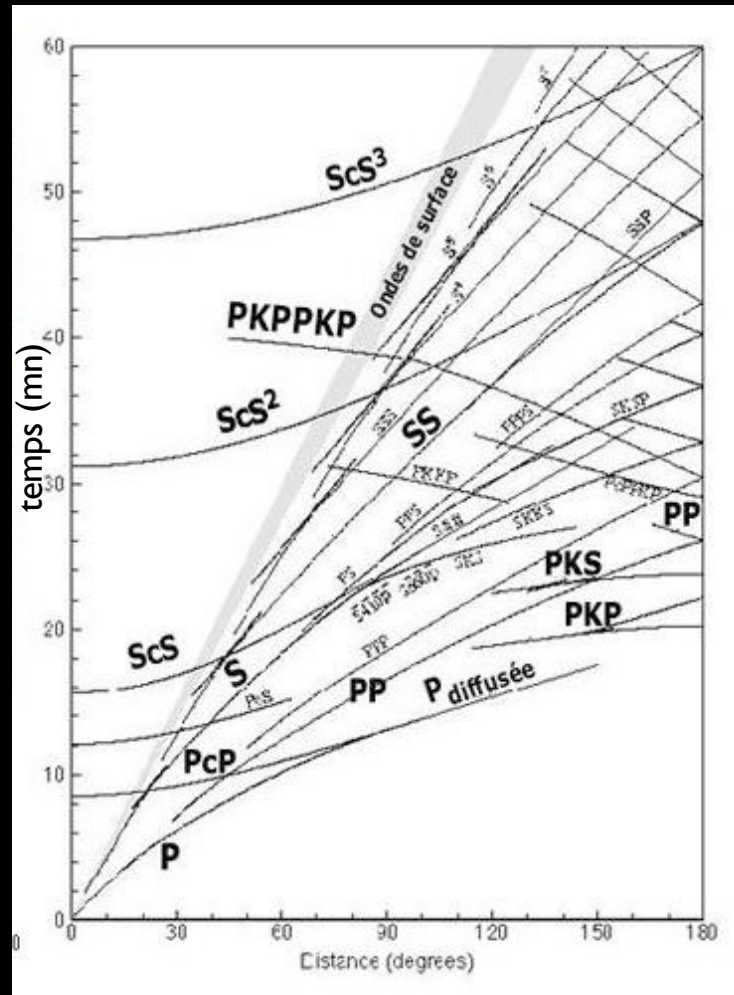
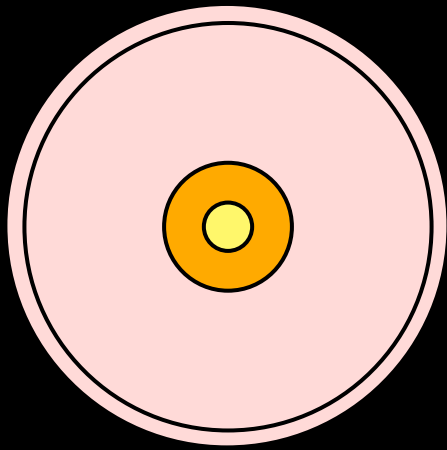
1940: Birch pense que la graine est solide

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

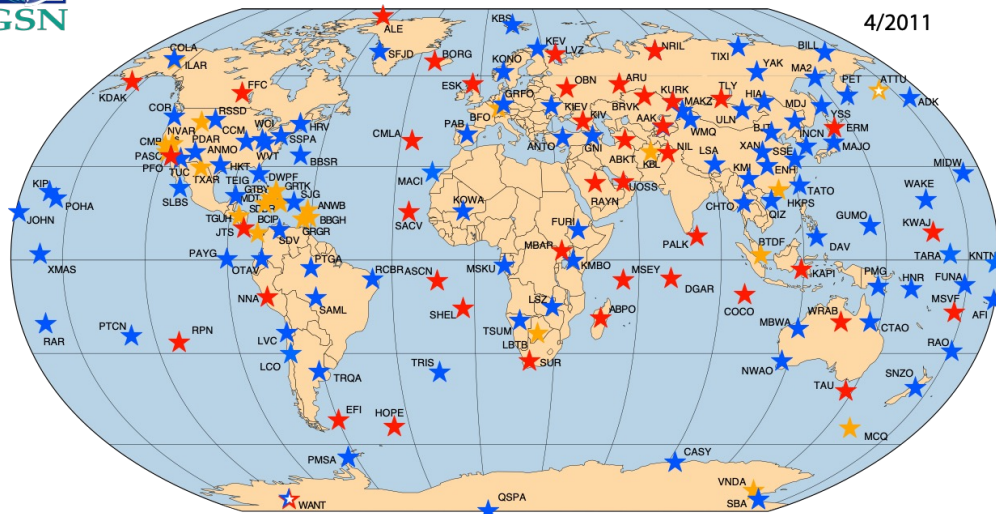


La Terre sismologique...



GLOBAL SEISMOGRAPHIC NETWORK

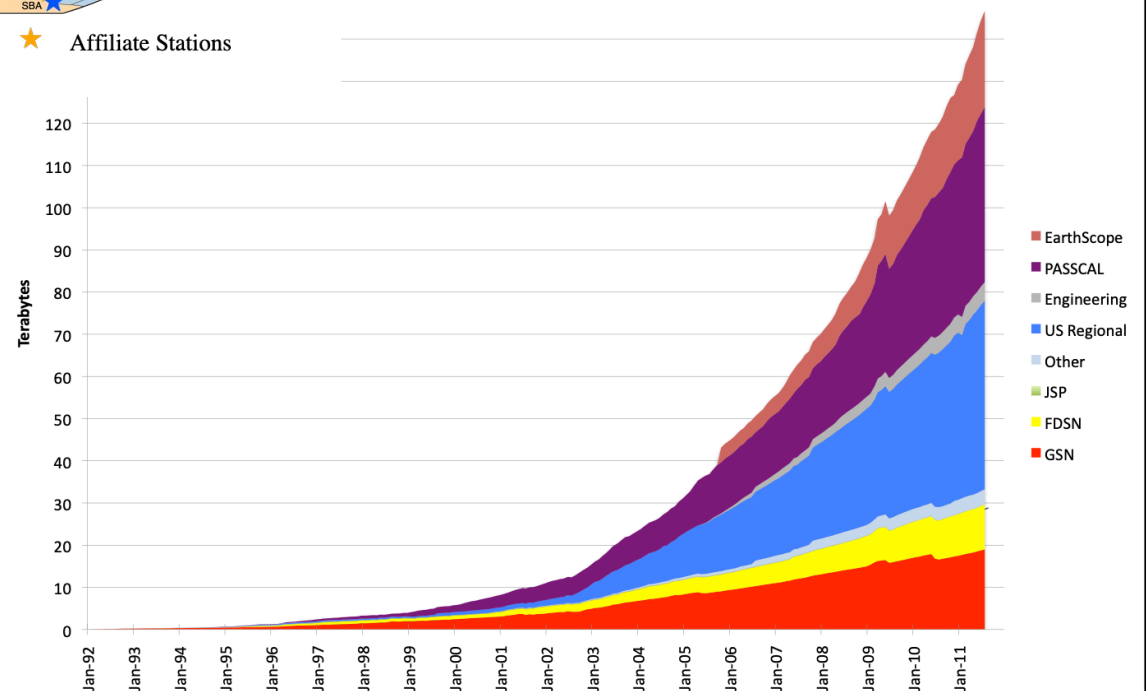
4/2011



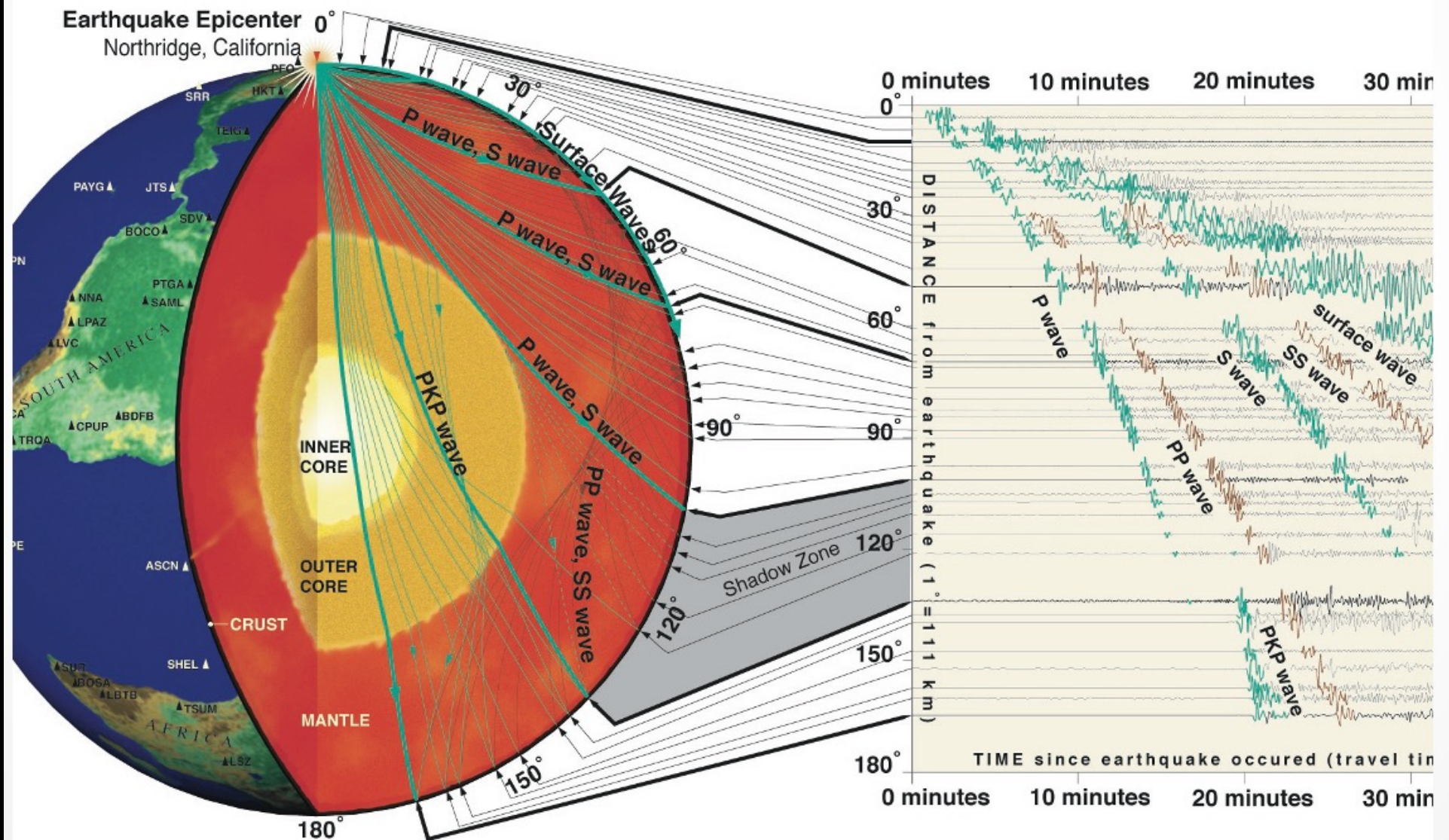
- ★ IRIS / IDA Stations
- ★ IRIS / USGS Stations
- ★ Affiliate Stations
- ★ Planned Stations



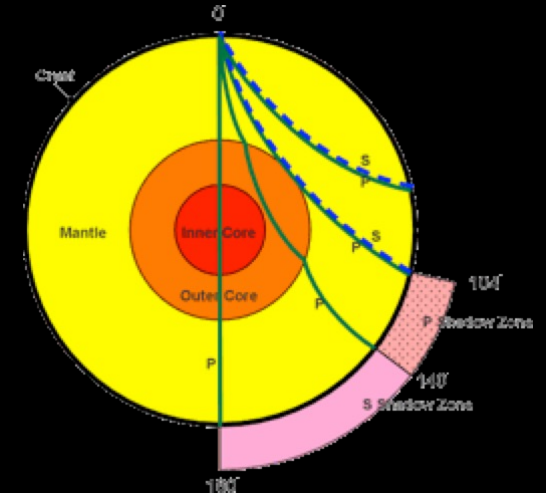
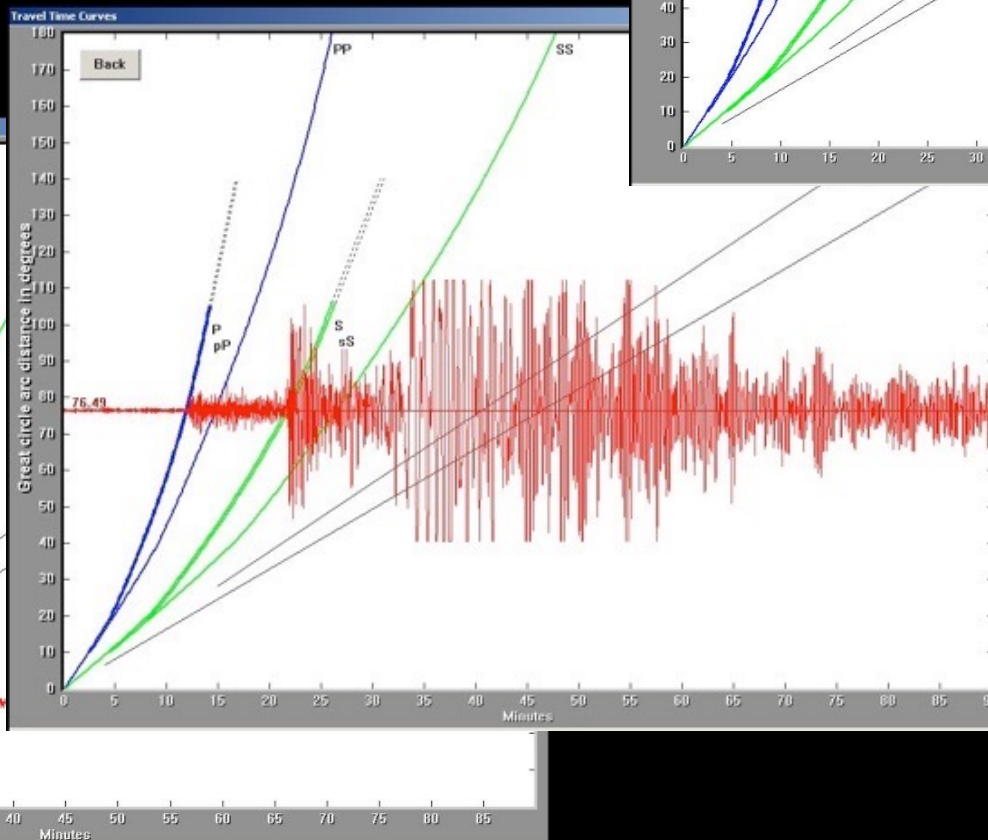
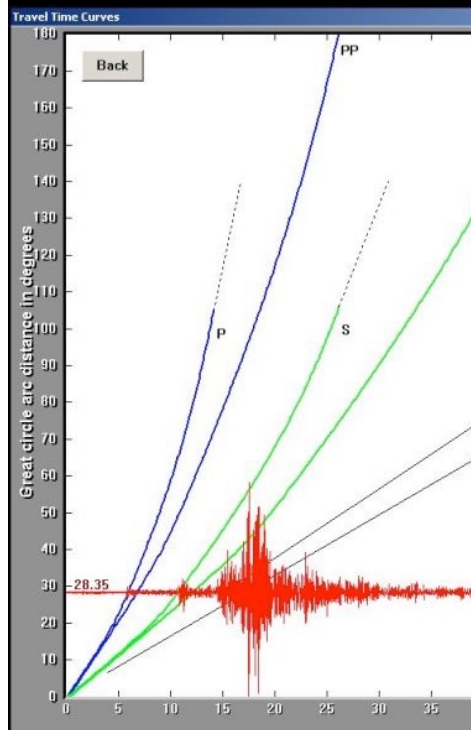
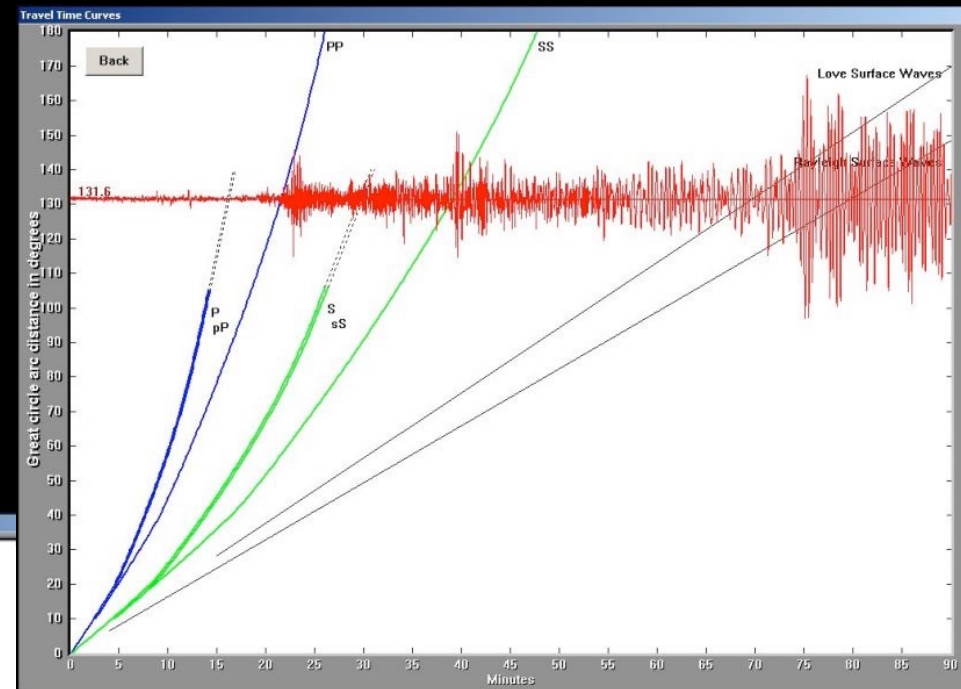
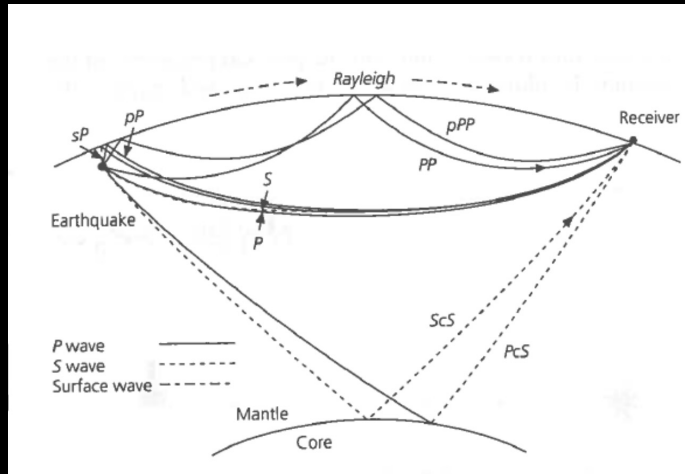
Archive Size



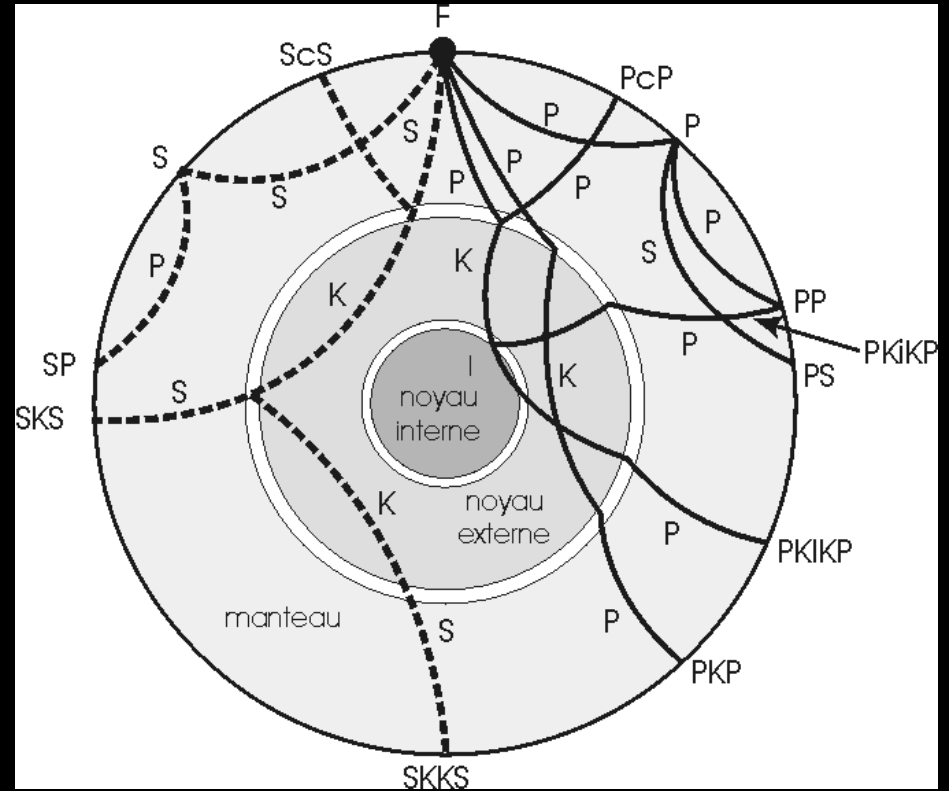
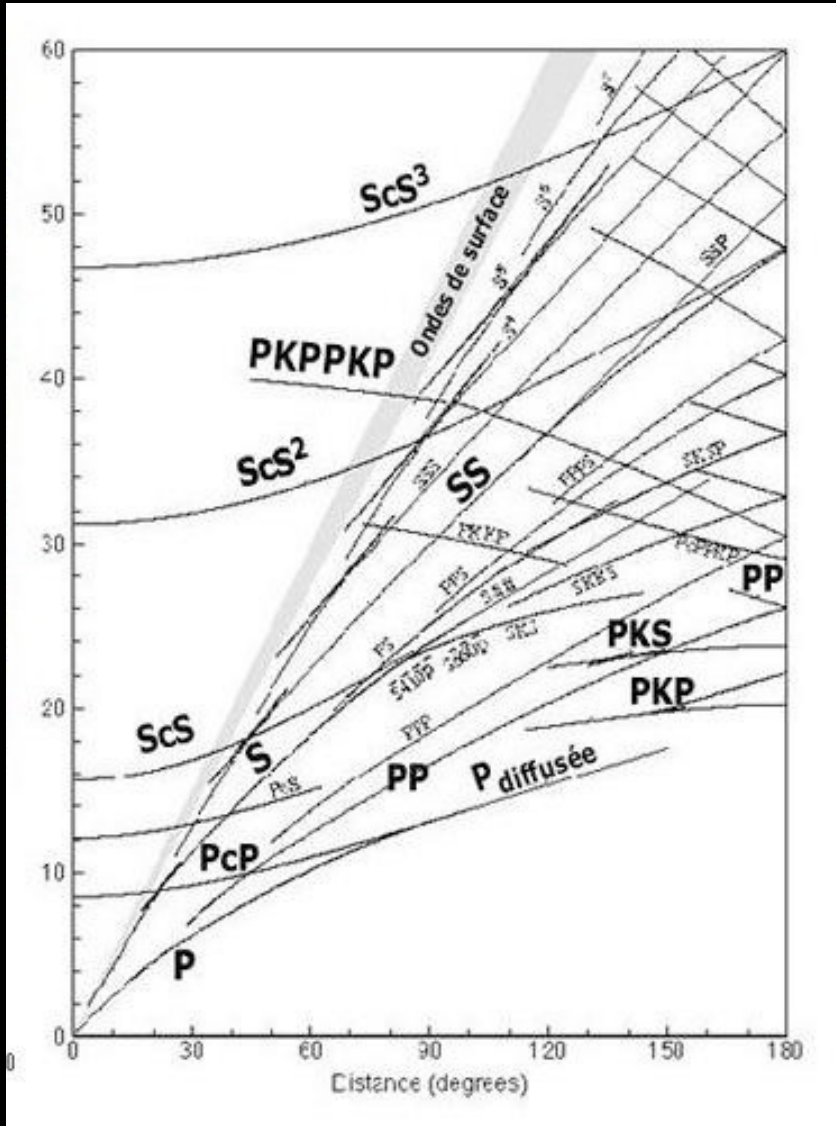
Les hodochrones



Les hodochrones



Les hodochrones



P : onde P manteau

S : onde S manteau

K : onde P noyau

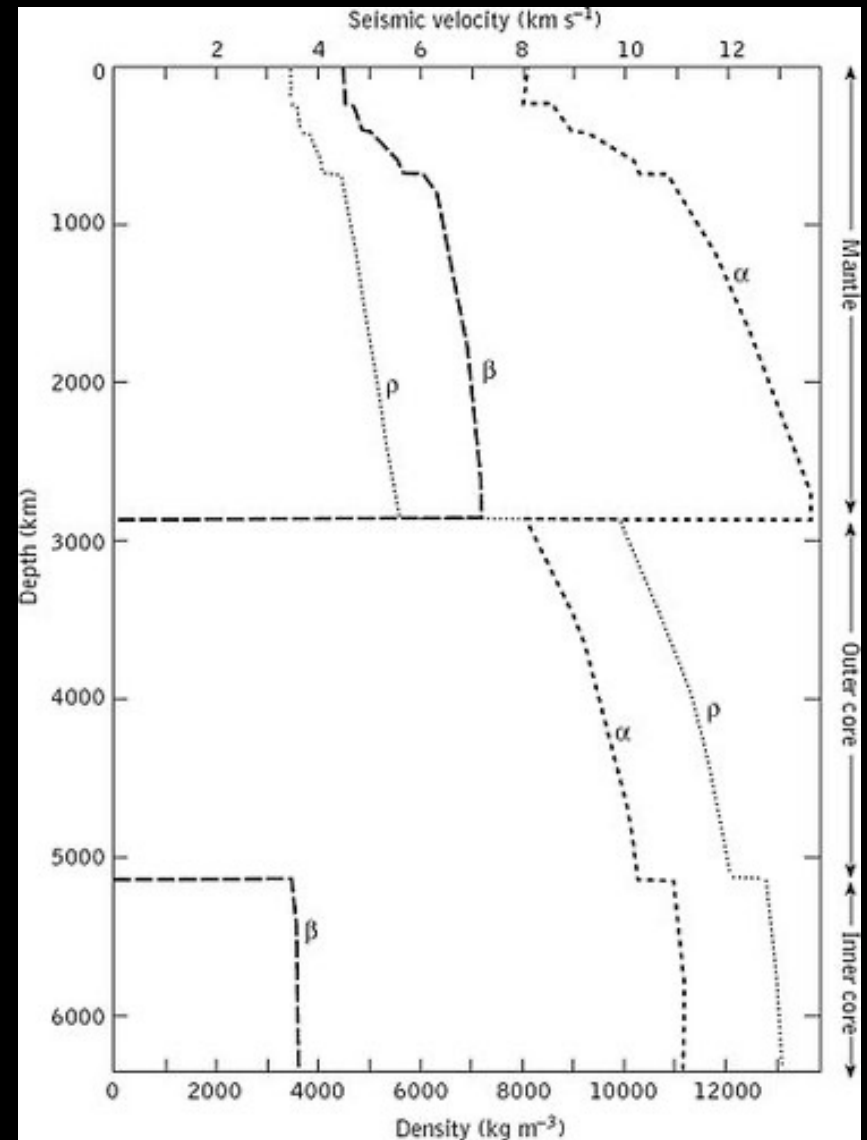
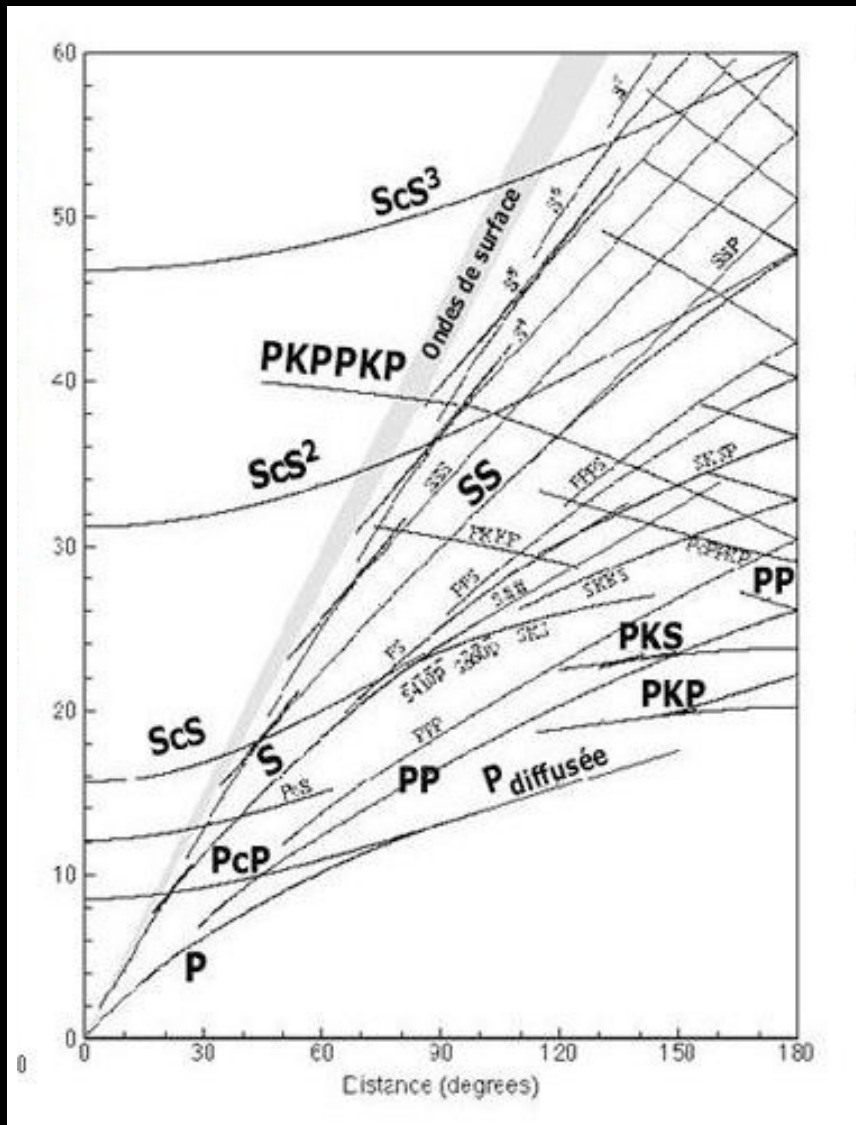
I : onde P graine

J : onde S graine

c : onde réfléchie noyau externe

i : onde réfléchie graine

Les hodochrones

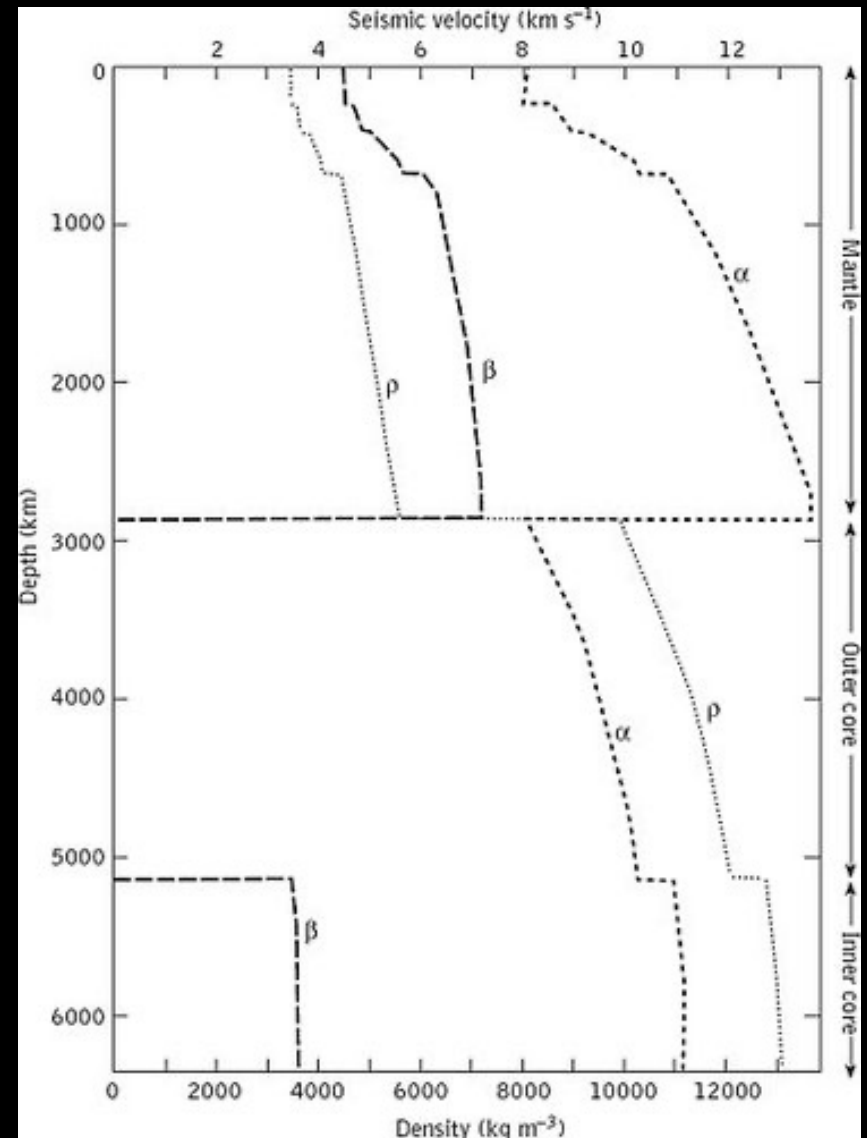


Modèle de Terre (vitesse, densité, anisotropie...) pour expliquer au mieux les données

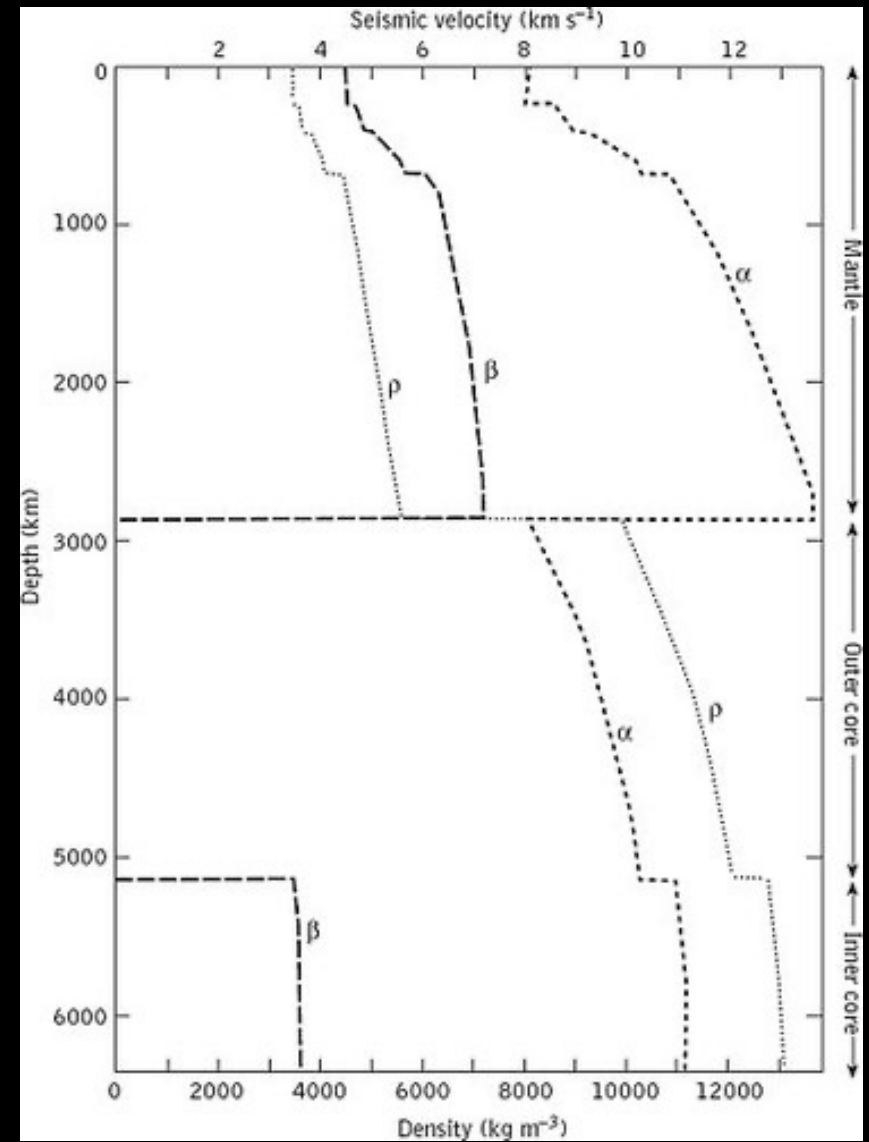
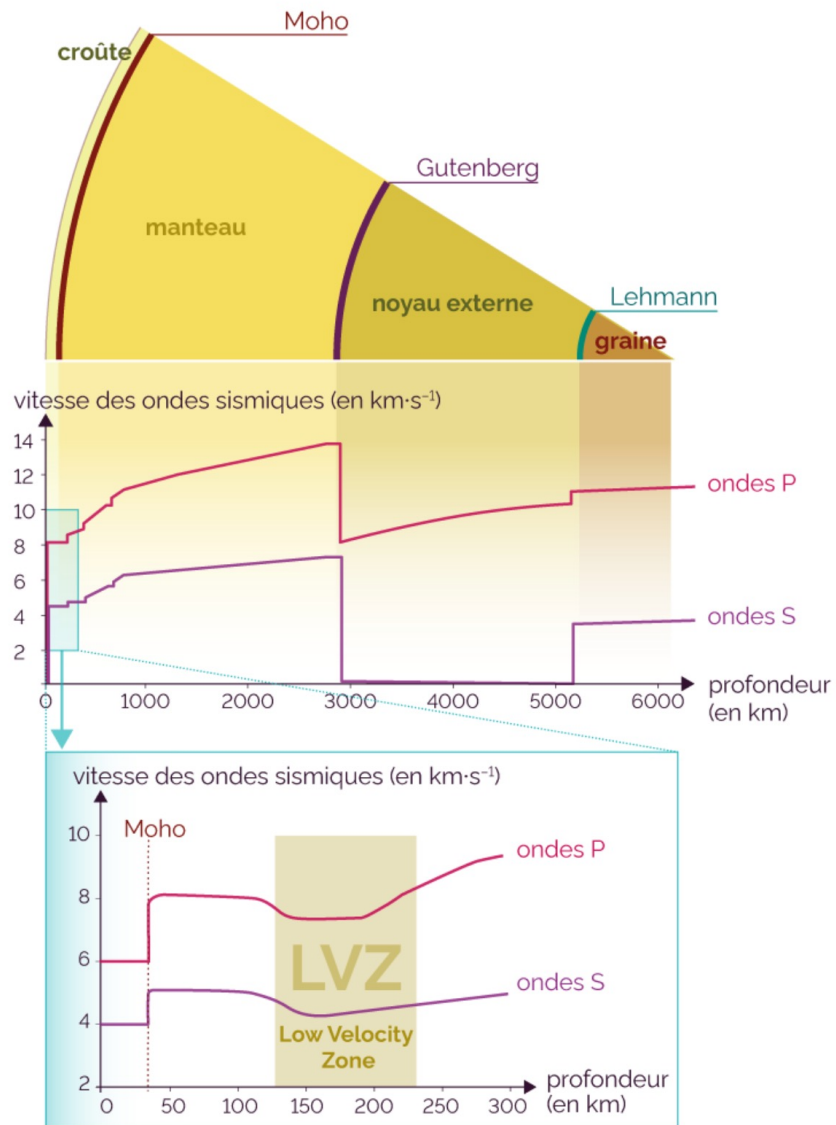
Terre radiale

Modèle PREM (*P*Reliminary *E*arth Model)

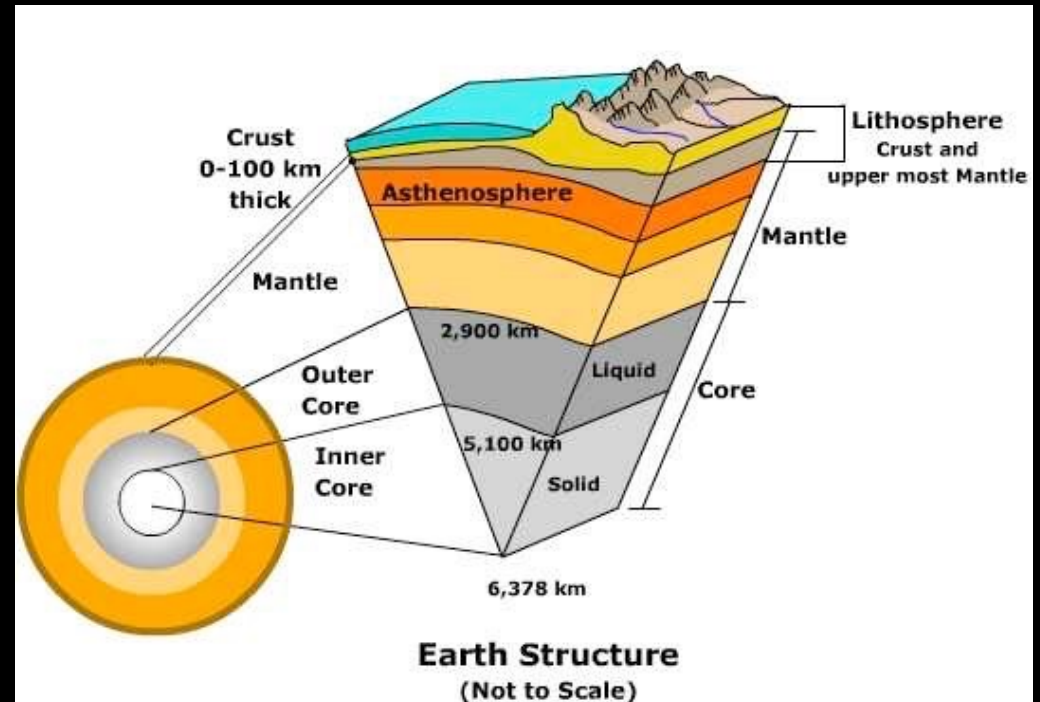
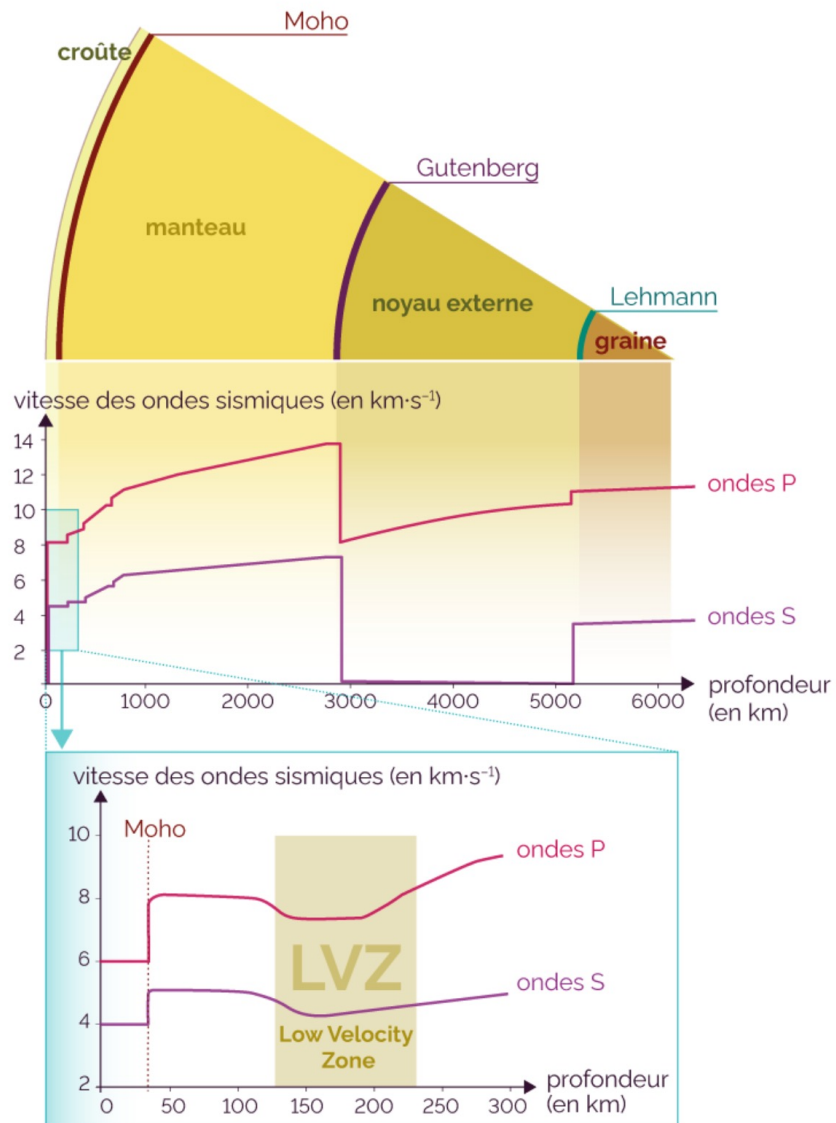
- Discontinuités principales, zones de transition, à faible vitesse, etc...
- Modèle radial (pas de variation latérale)
- Pas de distinction croûte océanique/continentale



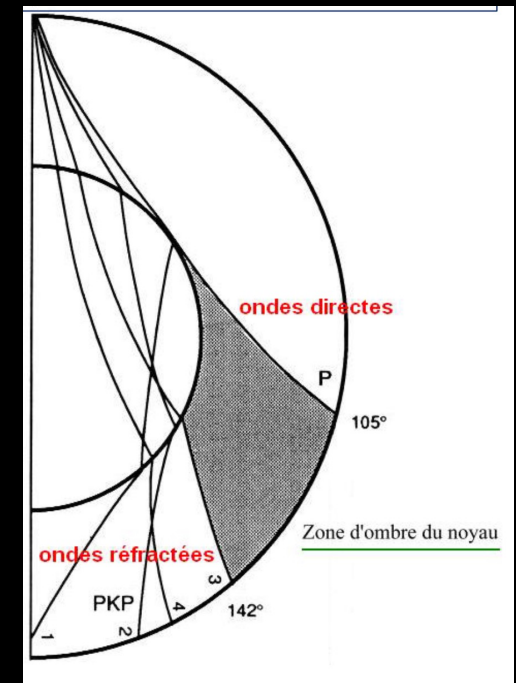
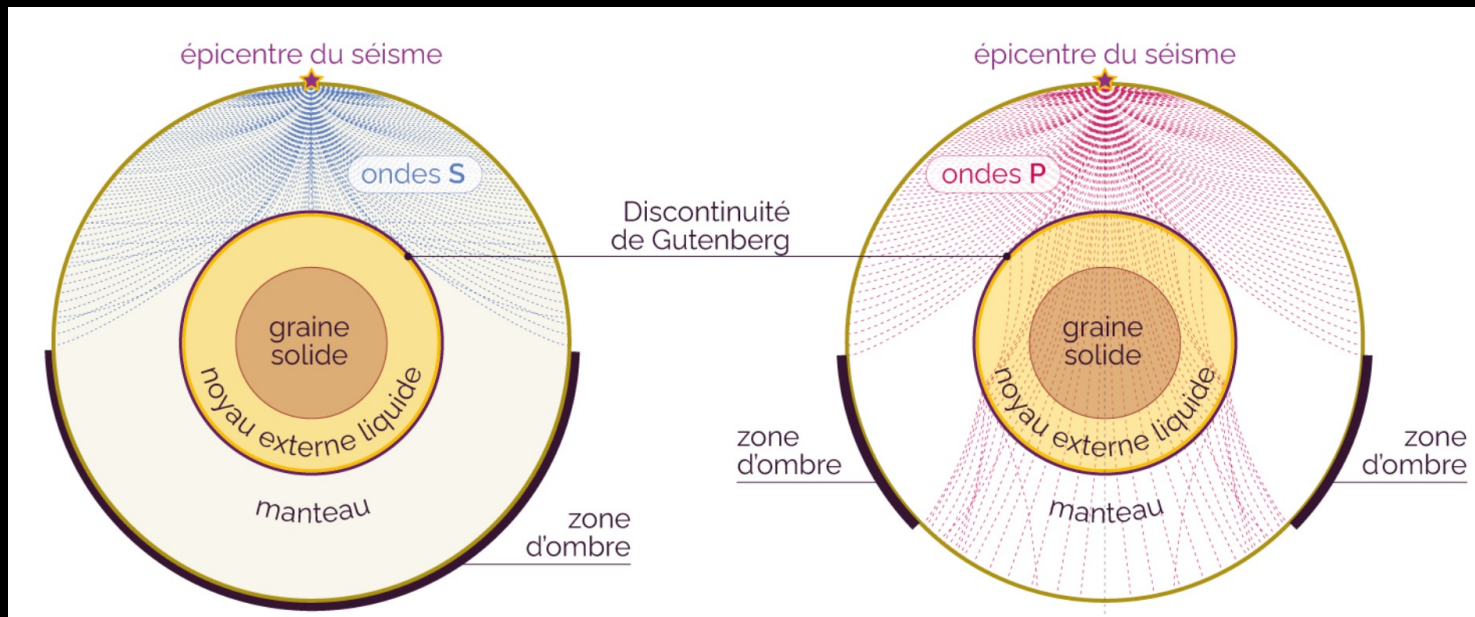
Terre radiale



Terre radiale

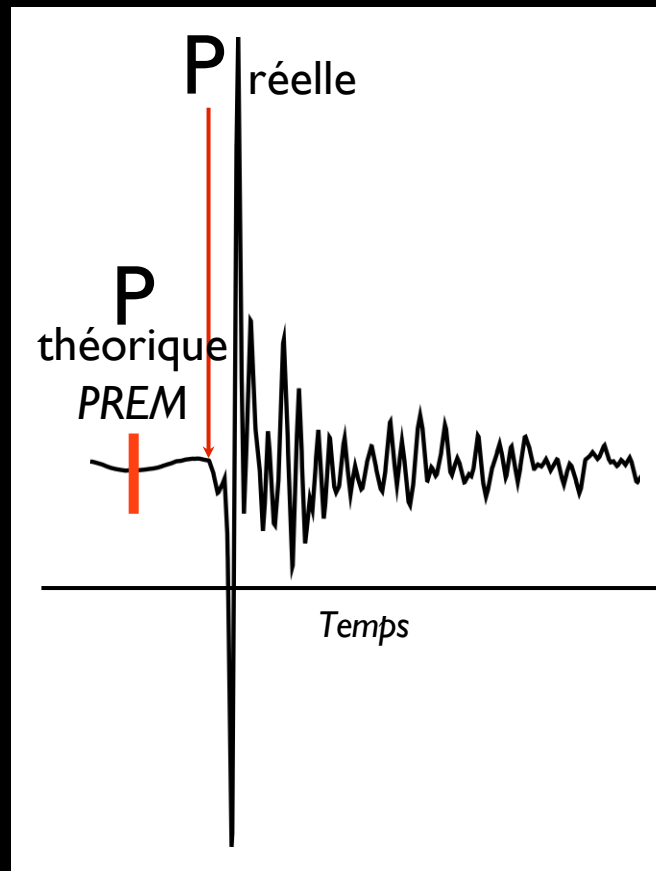
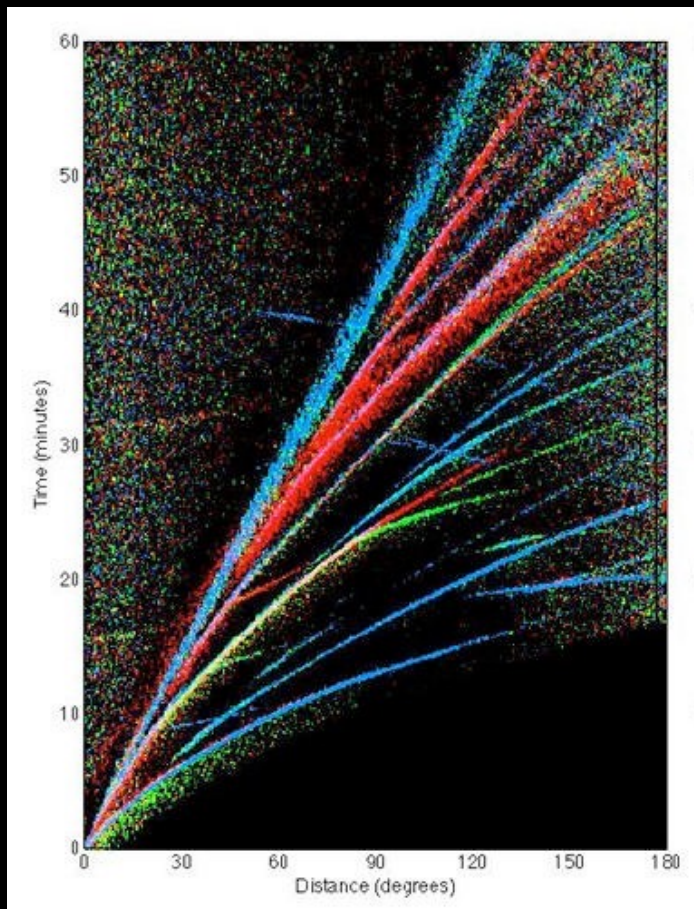


Zones d'ombre



La Tomographie

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

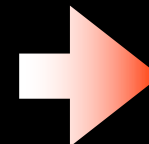


Erreurs sur:

- localisation
- temps origine

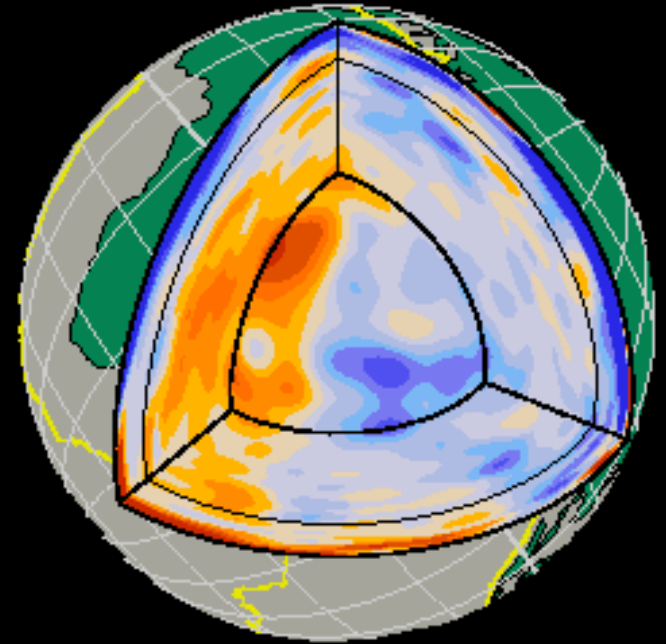
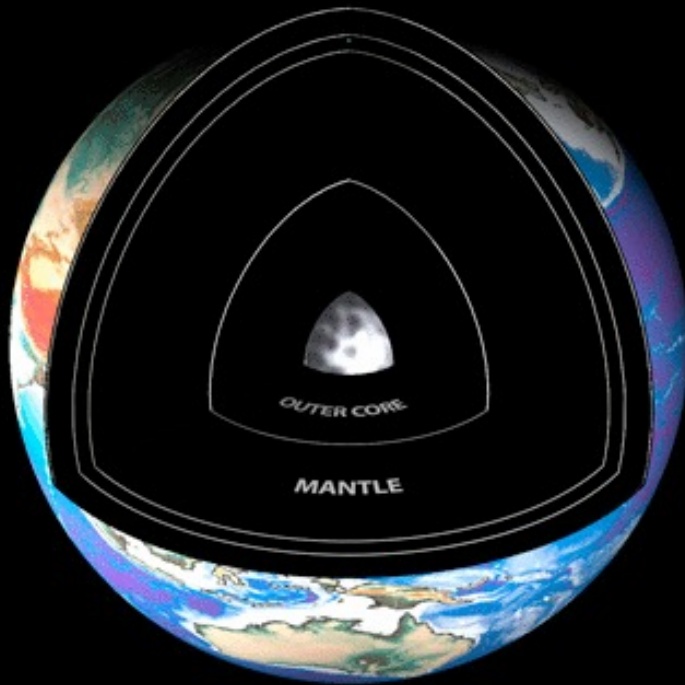
Hétérogénéités latérales!

5% d'hétérogénéités latérales



Tomographie
sismique

La Tomographie



Terre hétérogène!

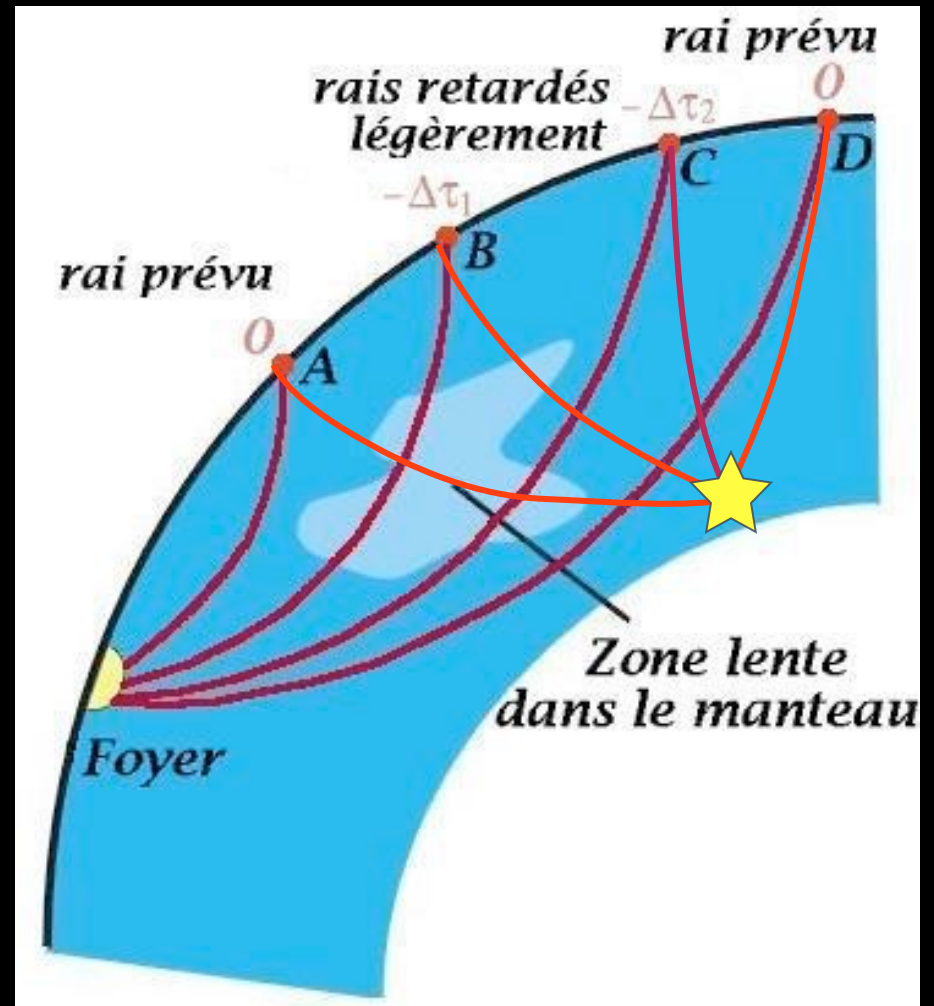
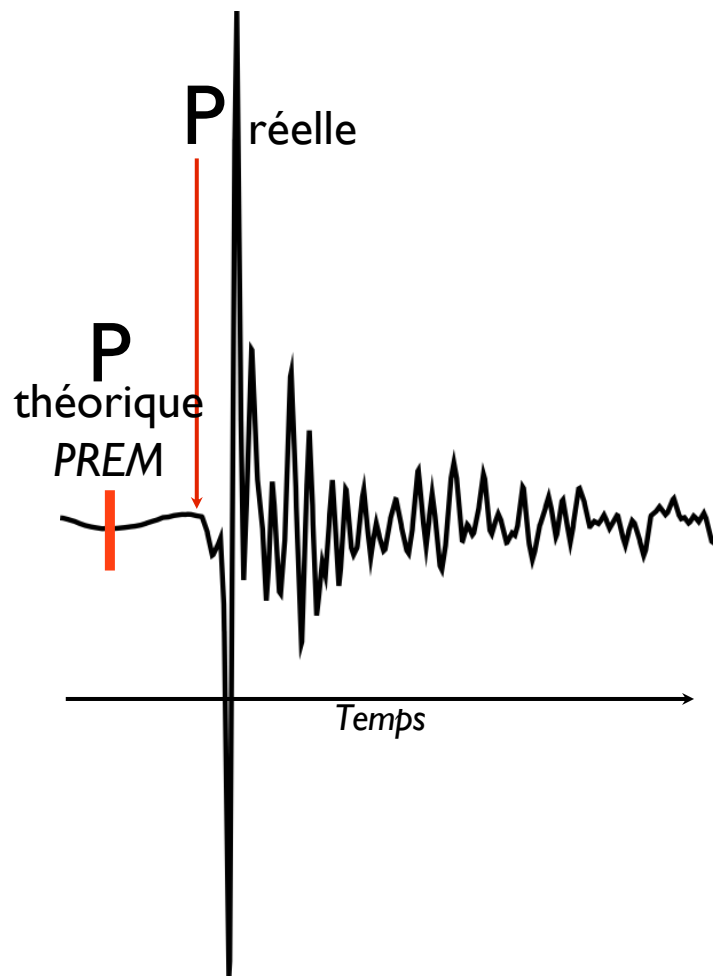
Une Terre radiale à 95%



5% d'hétérogénéités latérales

with courtesy of M. Thorne & L. Boschi

La Tomographie

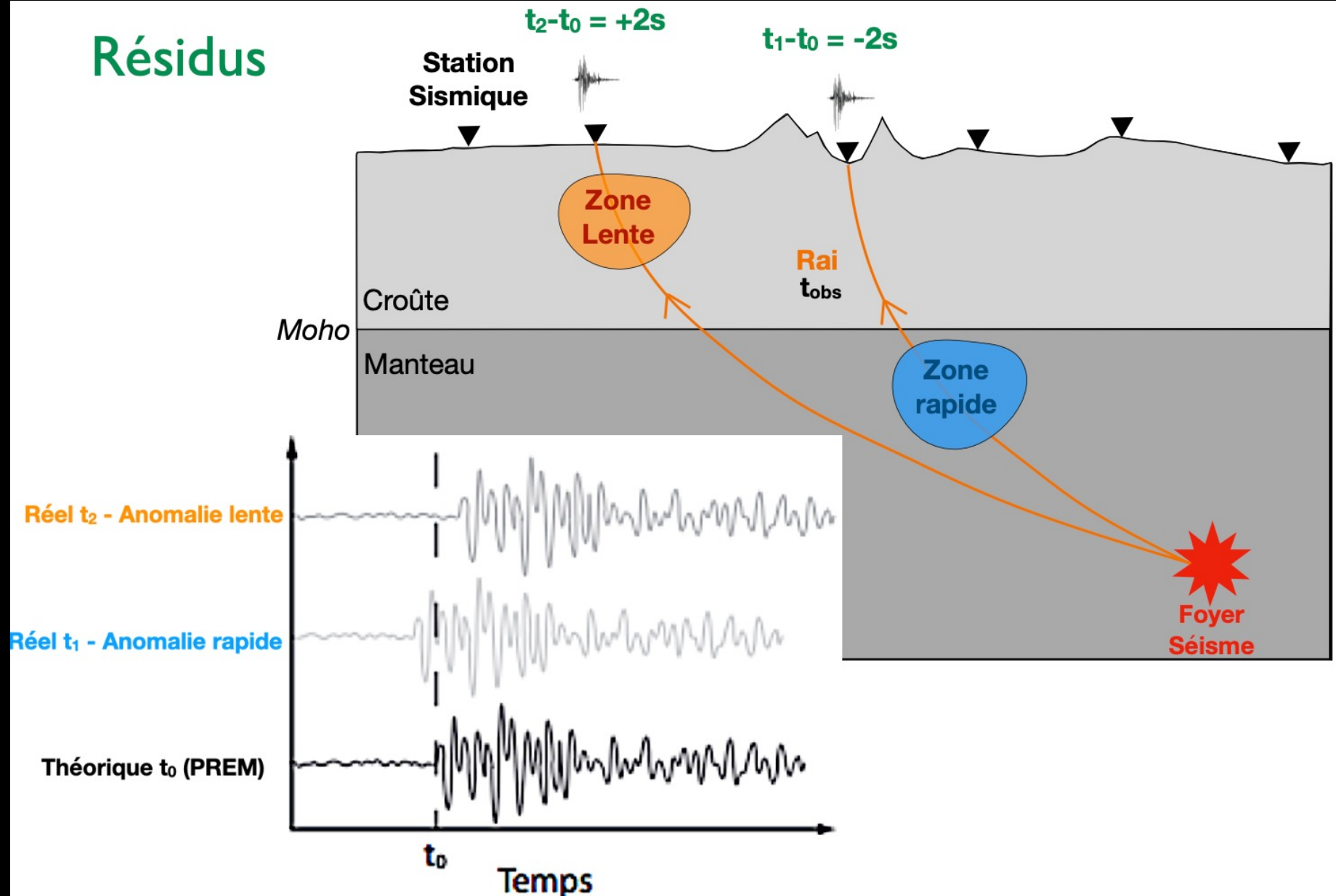


$P_{\text{réelle}} - P_{\text{théorique}} = \text{délais de temps} \rightarrow \text{anomalie de vitesse!}$

La Tomographie

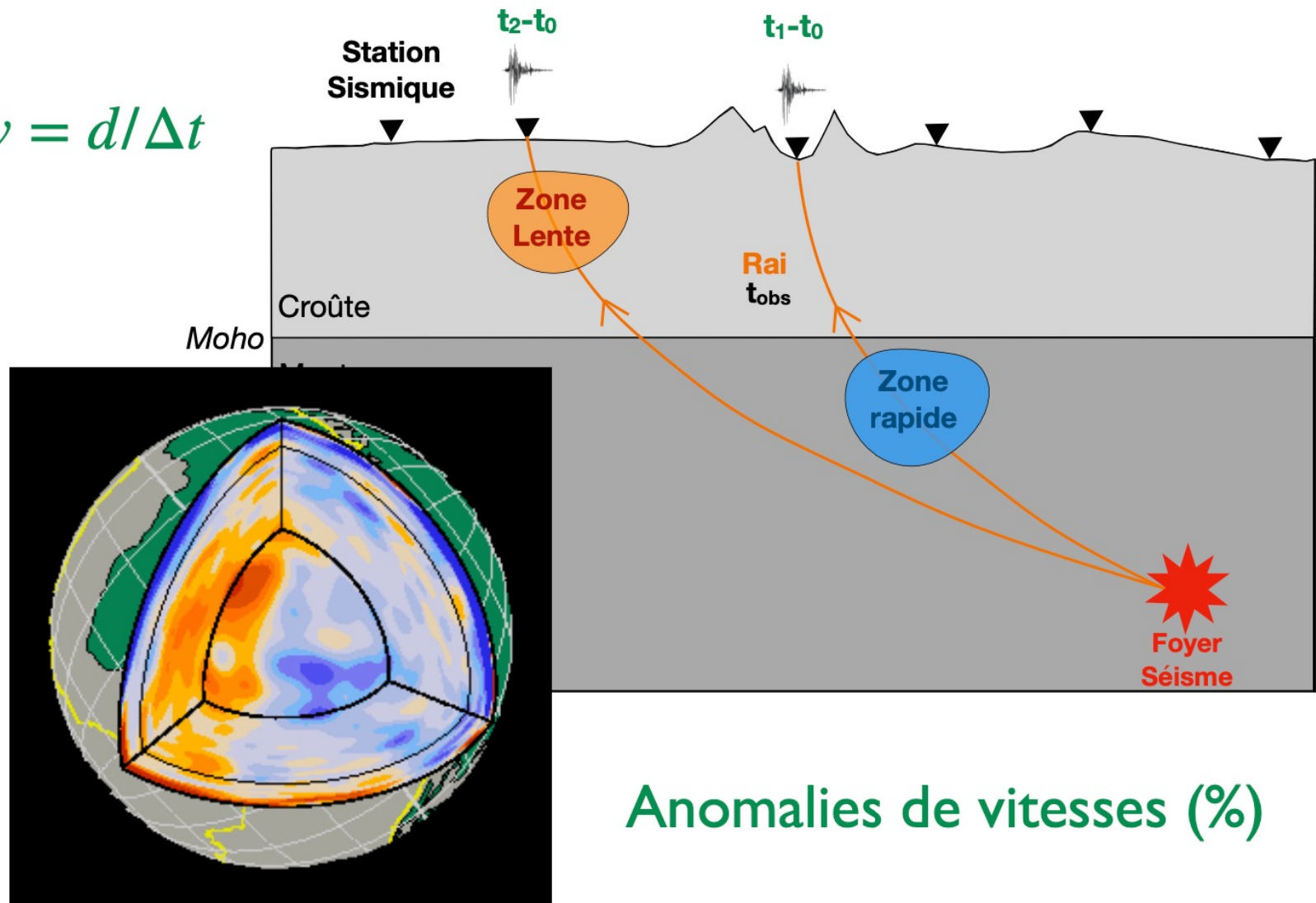
$$\text{Résidu} = T^{\text{obs}} - T^{\text{calc}}$$

Résidus



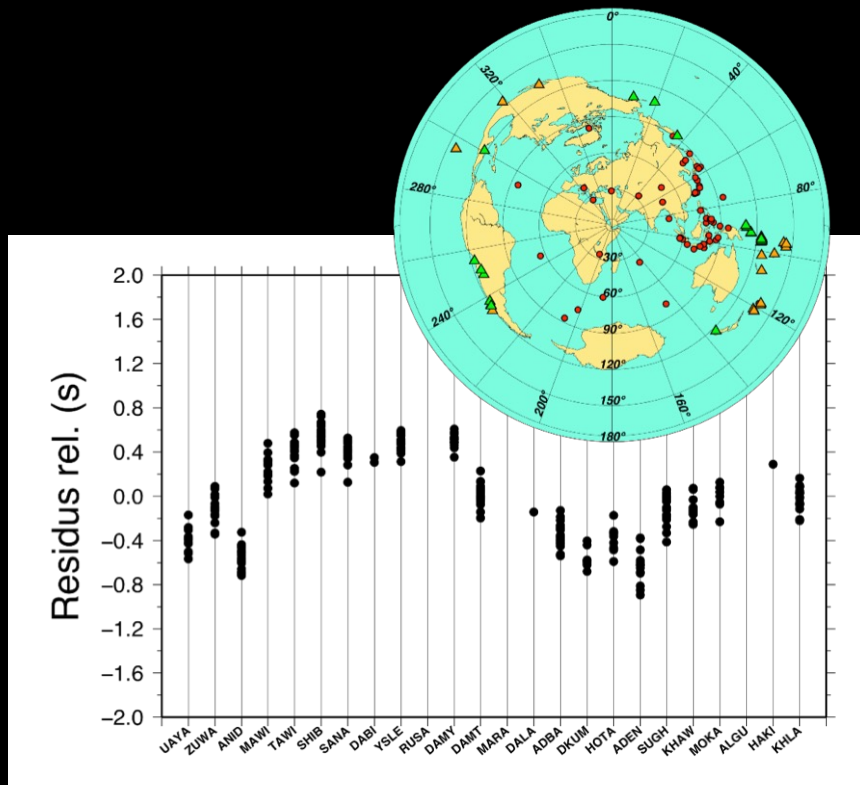
La Tomographie

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



Anomalies de vitesses (%)

La Tomographie

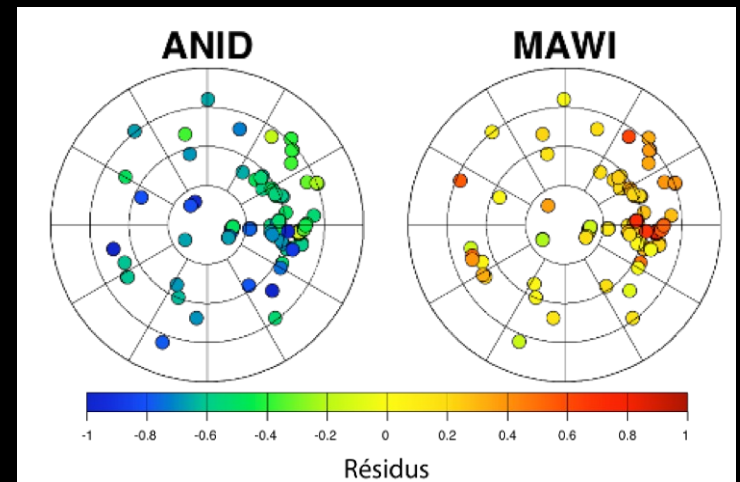


Courbe de résidus

Résidus = obs - calc

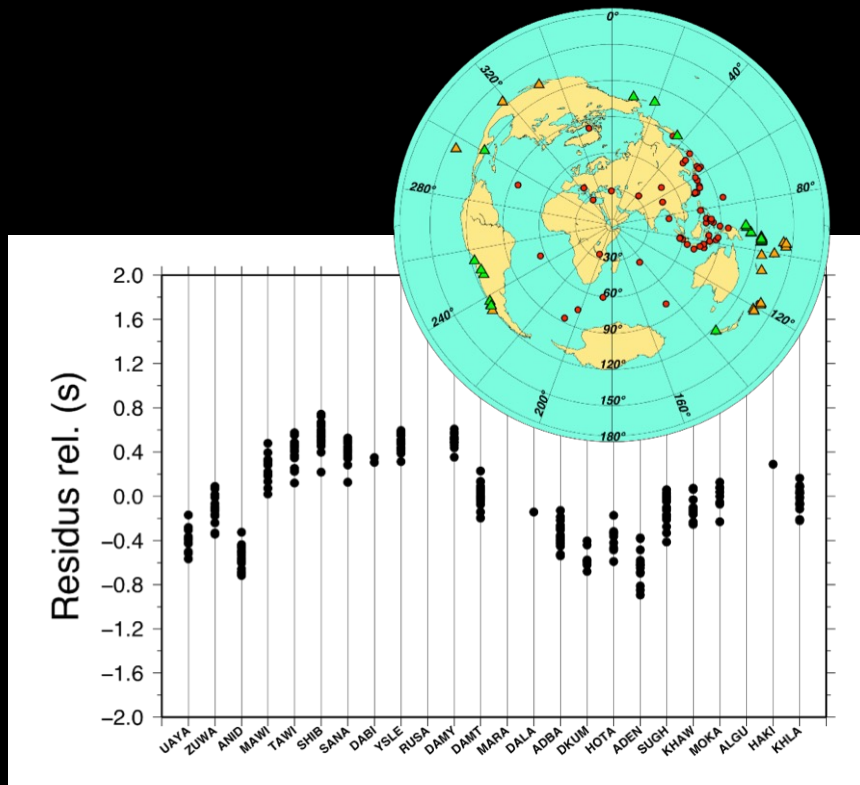
On travaille toujours en anomalie

i.e. il y a un modèle de référence



Répartition de résidus

La Tomographie

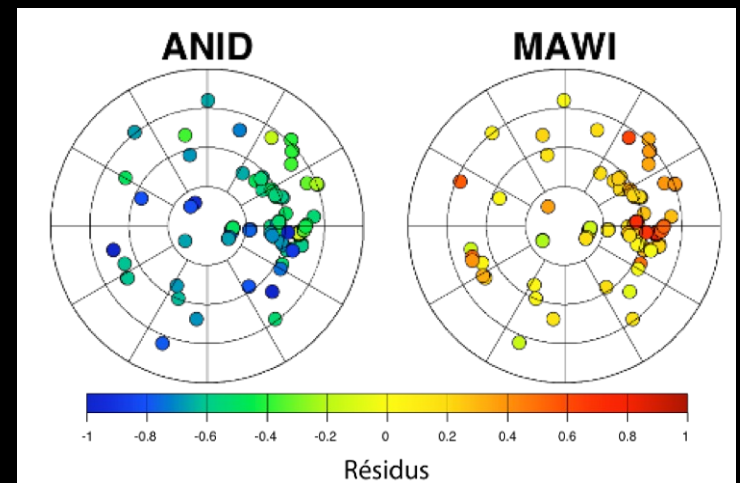


Courbe de résidus

Résidus = ± 1 s pour $L \sim 500$ km

$V_p \sim 10$ km/s

ie. 2 % !!!!!



Répartition de résidus

La Tomographie

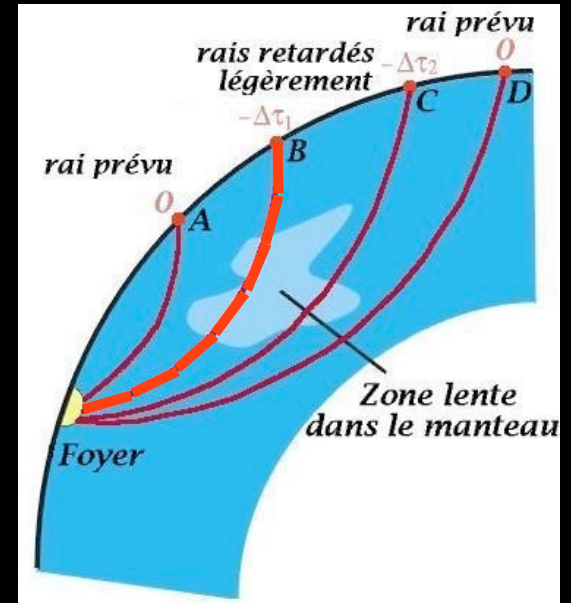
Pour un couple séisme - station

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

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

Le type d'onde définit les paramètres recherchés

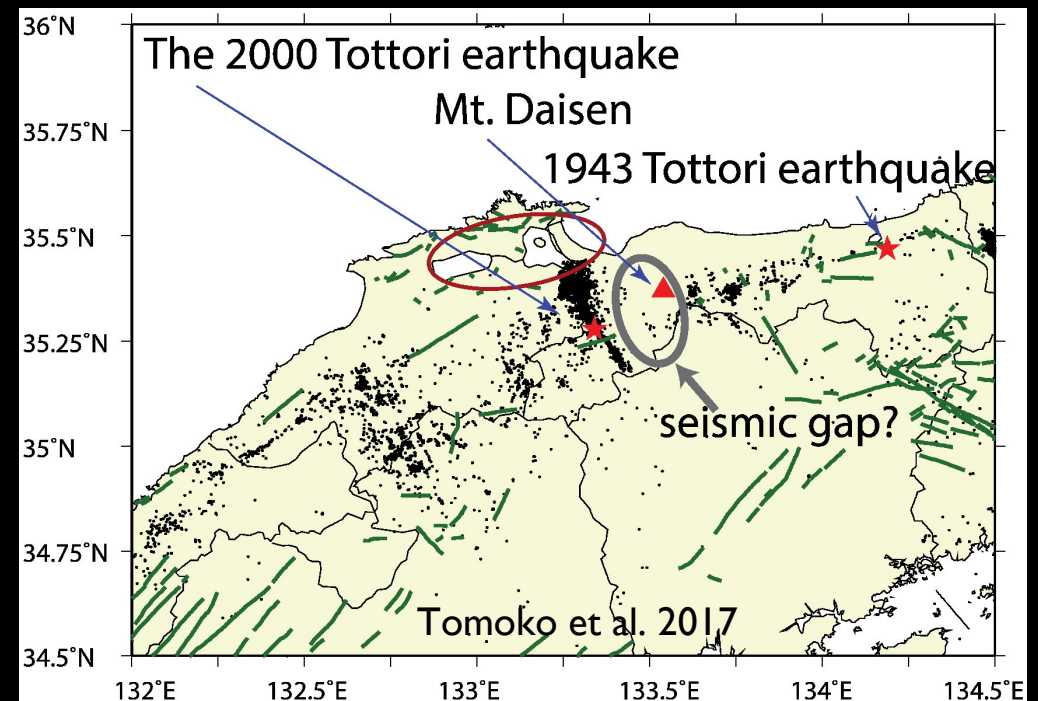
- ondes de volume (δV_P , δV_S)
- ondes de surface (V_{groupe} , V_{phase} , anisotropie)

Échelle locale



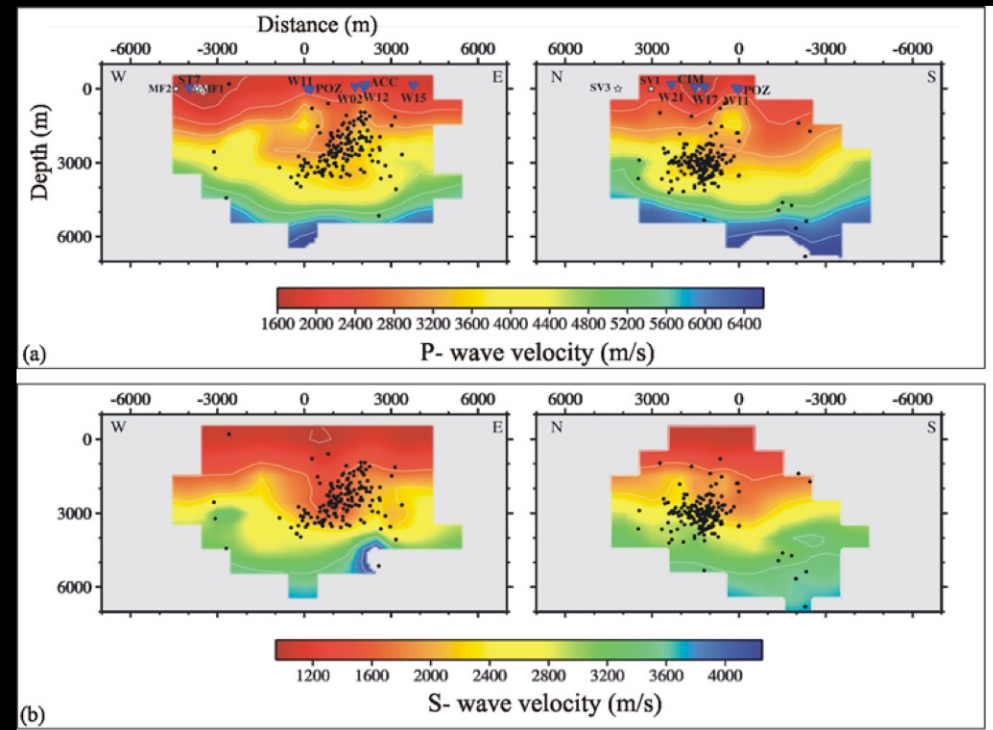
Imager les structures crustales:
réservoirs, failles ...

Risques naturels, exploration
minière...

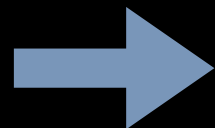


La tomographie locale

- ▶ 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

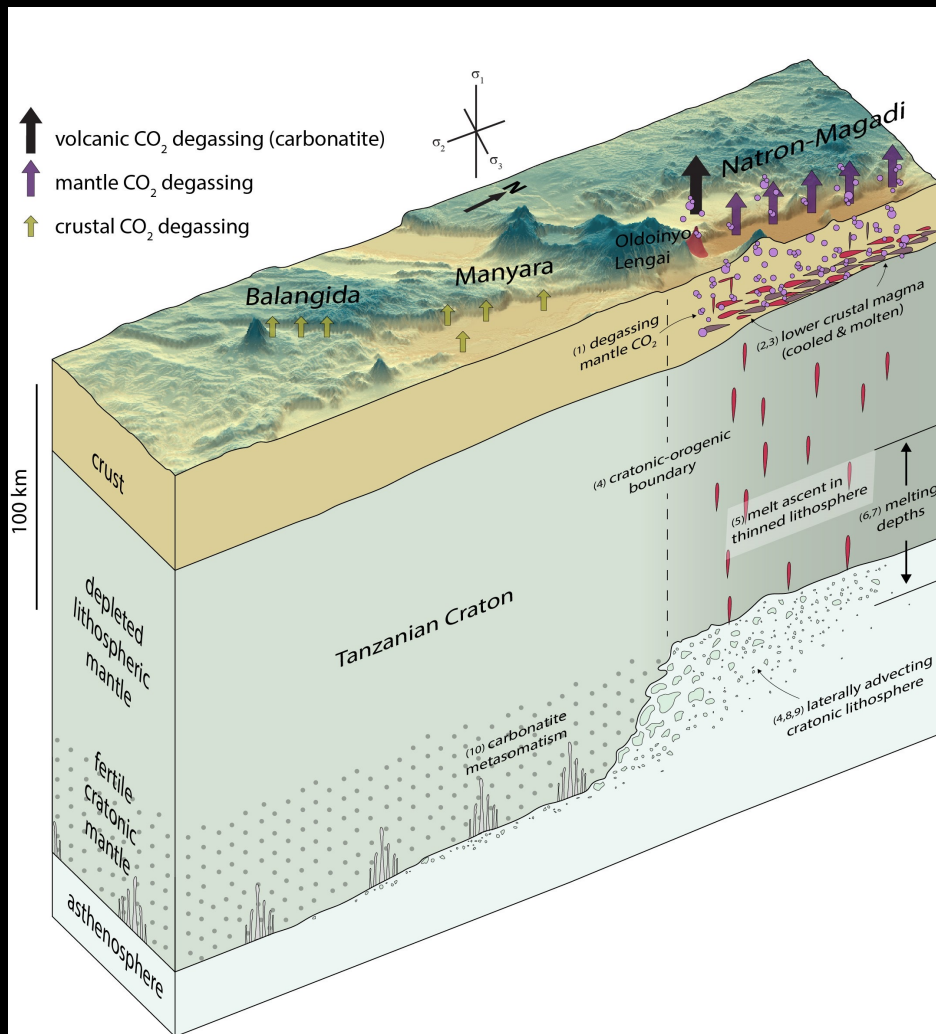


Vanorio et al. 2005



Zone d'investigation locale (crustale)

Échelle régionale

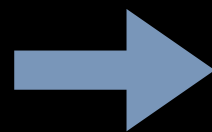
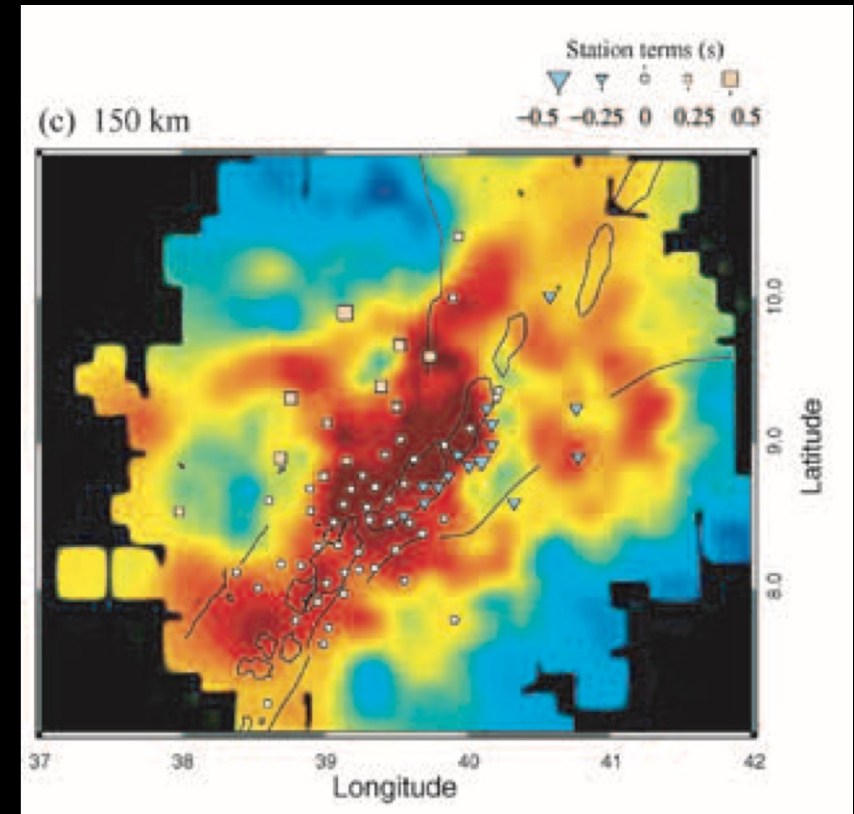


Imager les structures
mantellique supérieures:
panaches, subduction ...

Risques naturels,
géodynamique...

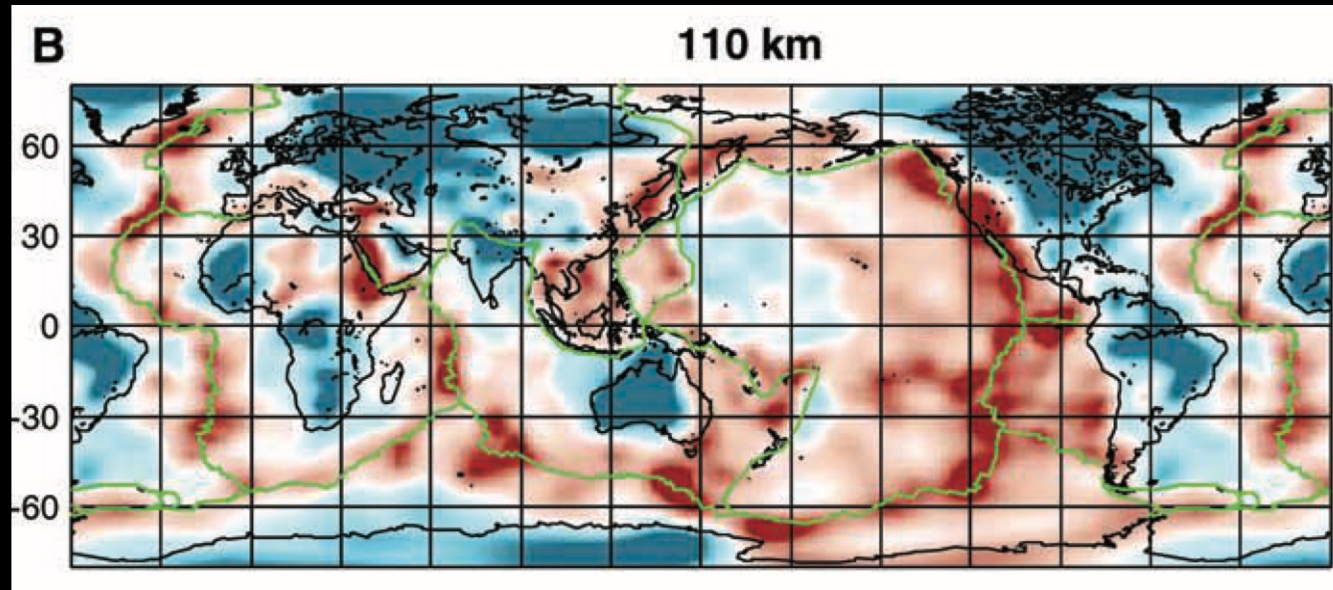
La tomographie régionale

- ▶ Sources = téléseïsmes
- ▶ 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.)

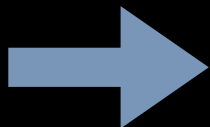


Zone d'investigation régionale
(croûte et manteau supérieur)

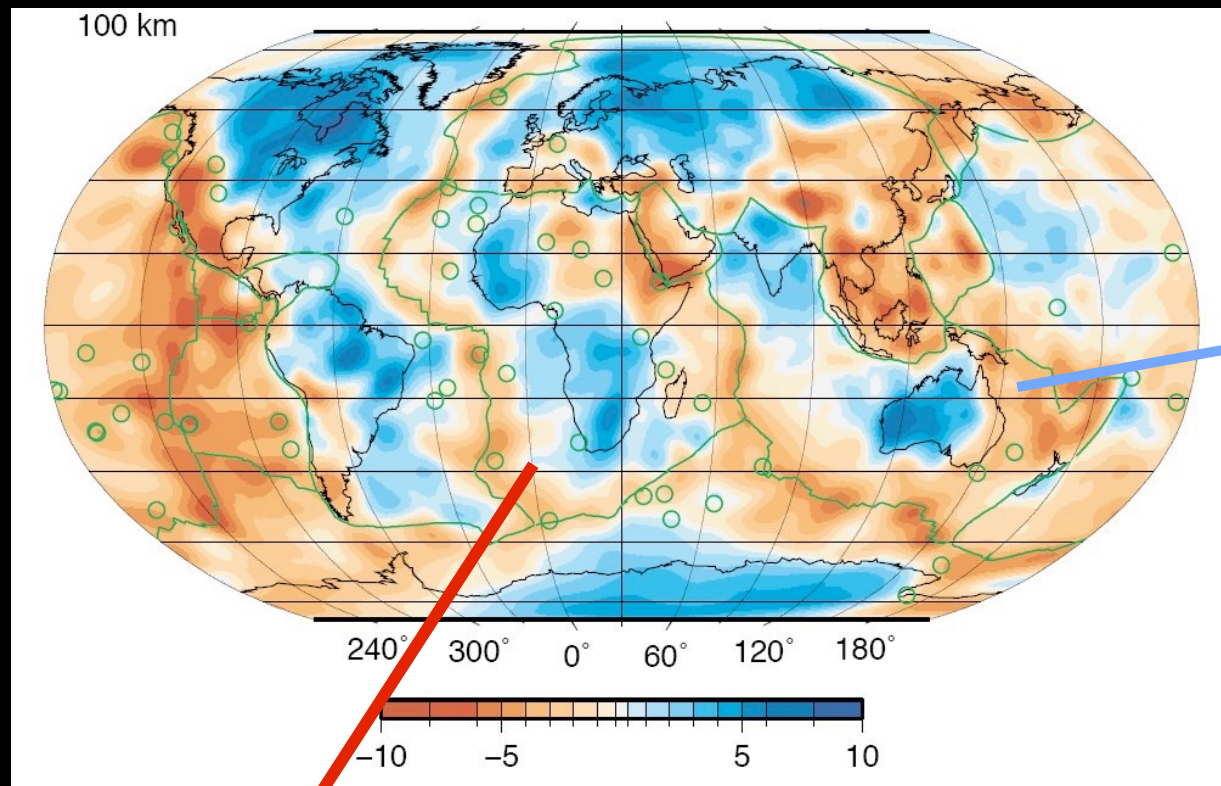
La tomographie globale



- ▶ 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 ~ 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

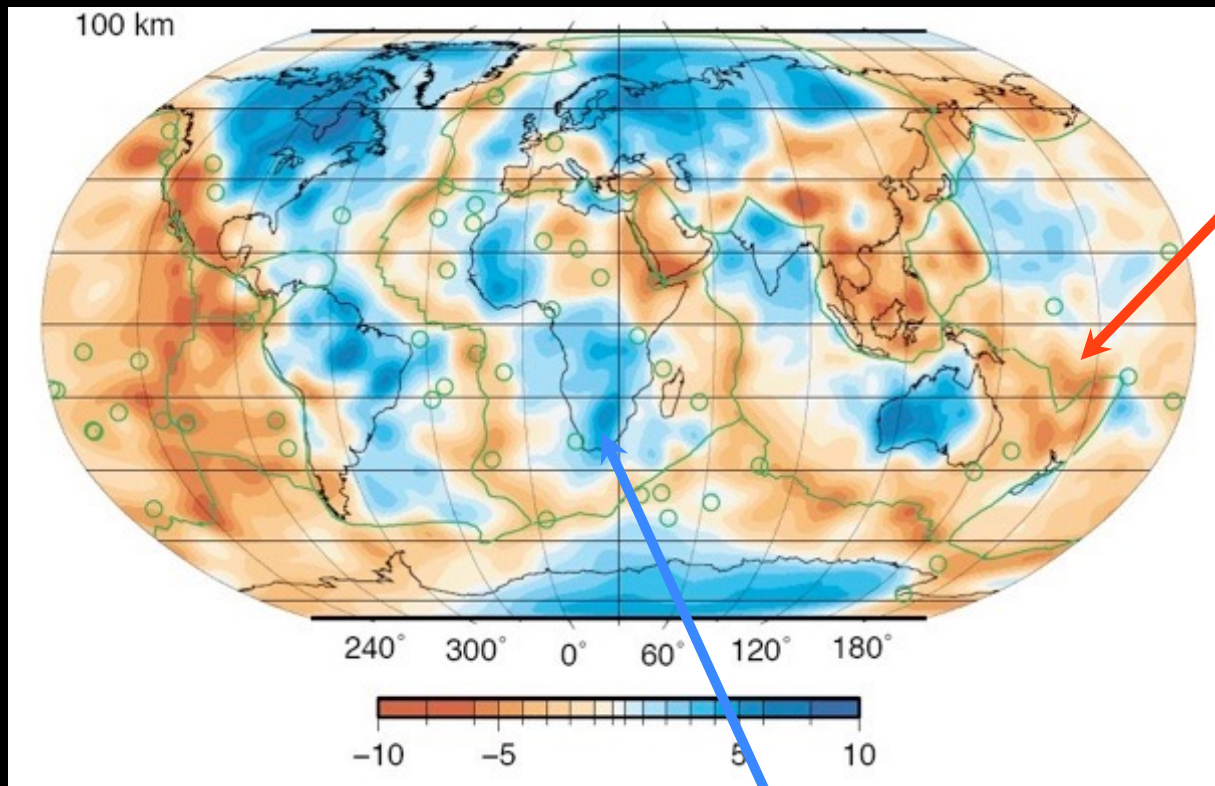


lent = chaud

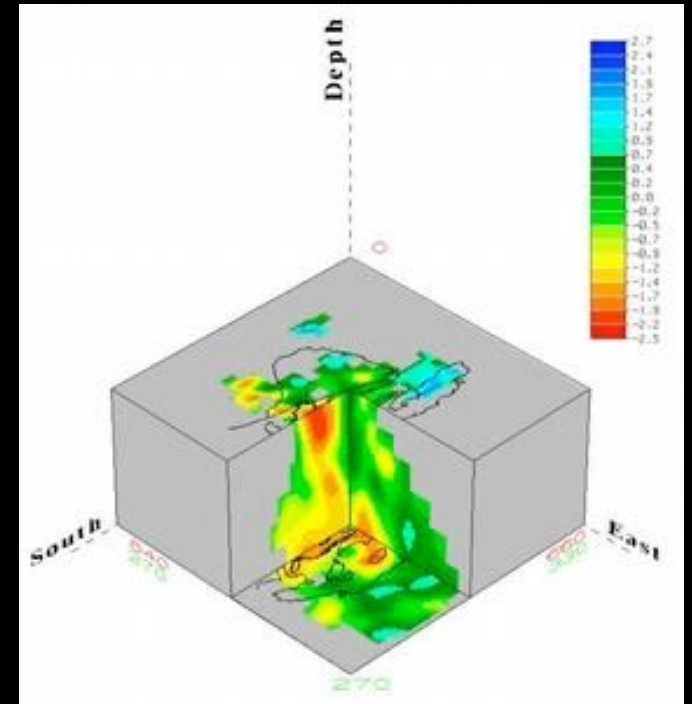
Est-ce vraiment aussi simple?



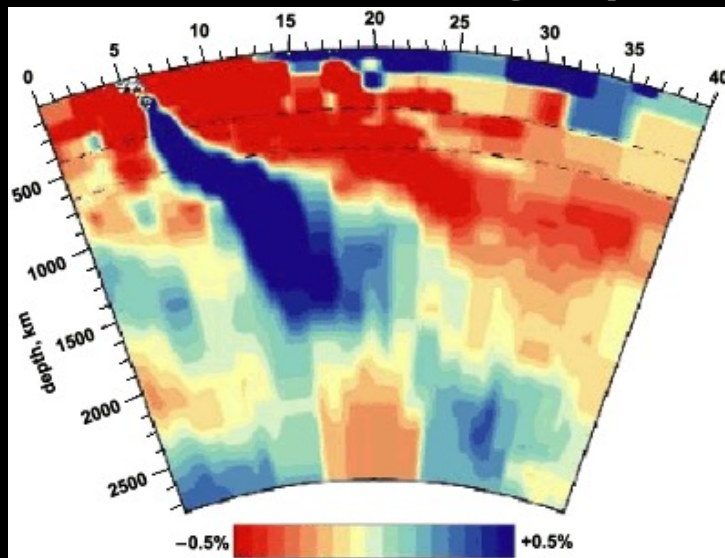
La vitesse ne dépend pas que de la température (composition, pression, eau...)



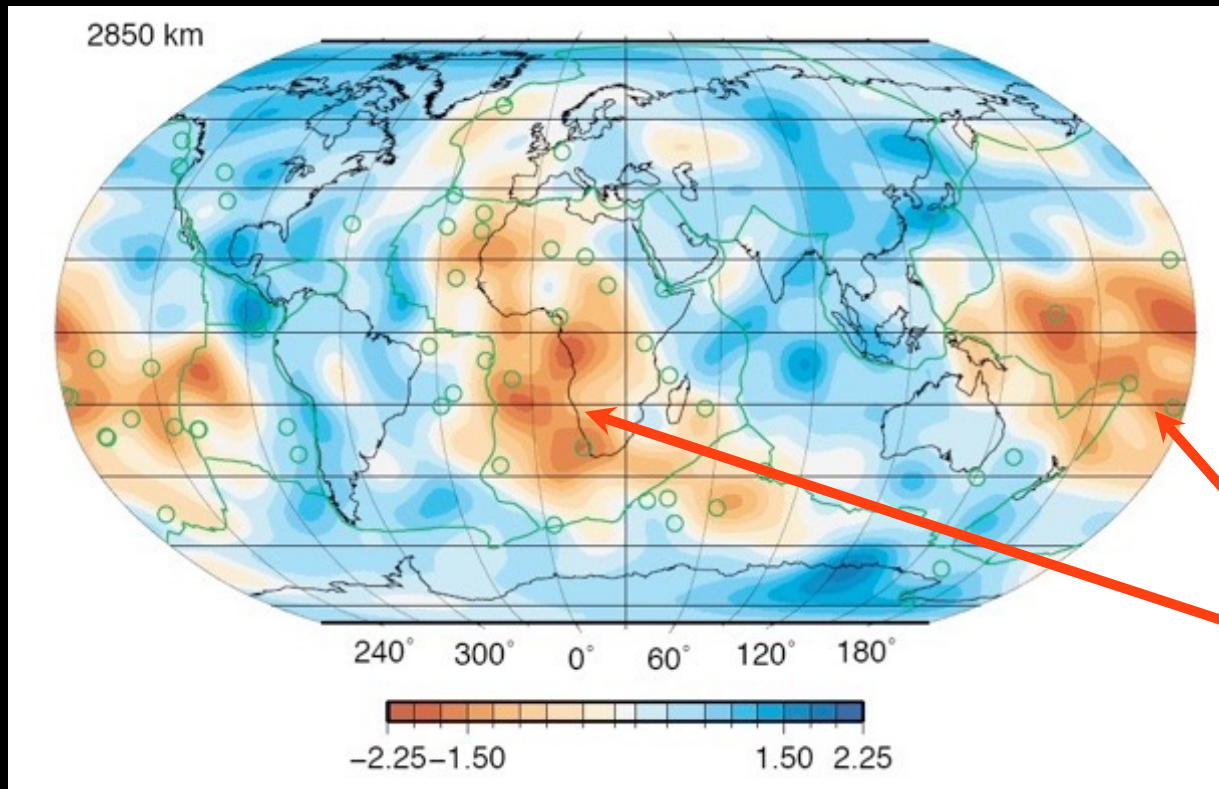
vitesses lentes
dorsales,
panaches...



Tomographie ondes S



vitesses rapides
vieille lithosphère,
cratons, subduction

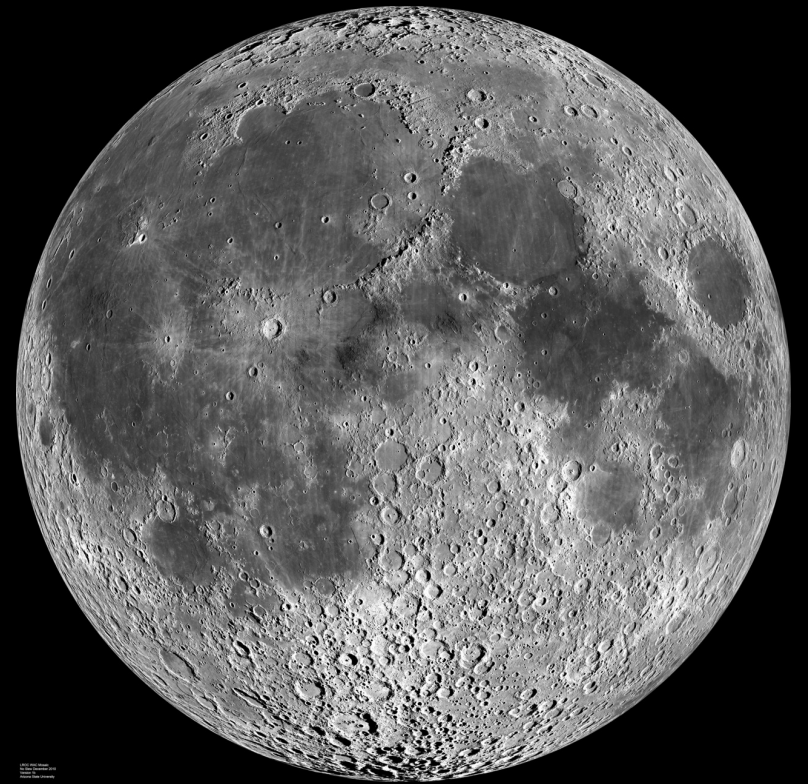


Super-panaches?

Tomographie ondes S

Images du manteau inférieur plus
délicates à interpréter...

Comment est née notre Lune ?

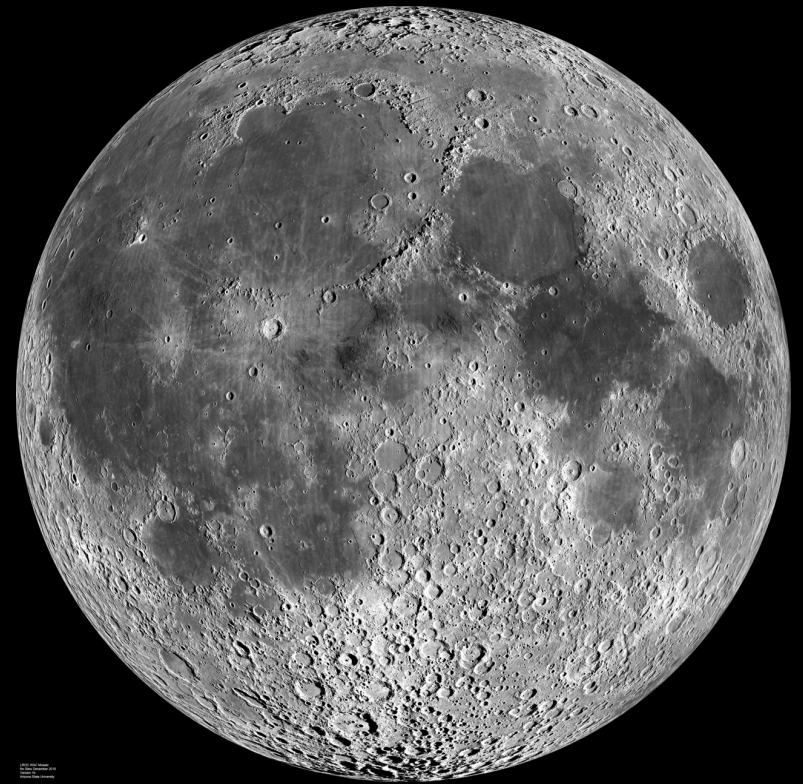


Comment est née notre Lune ?

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.



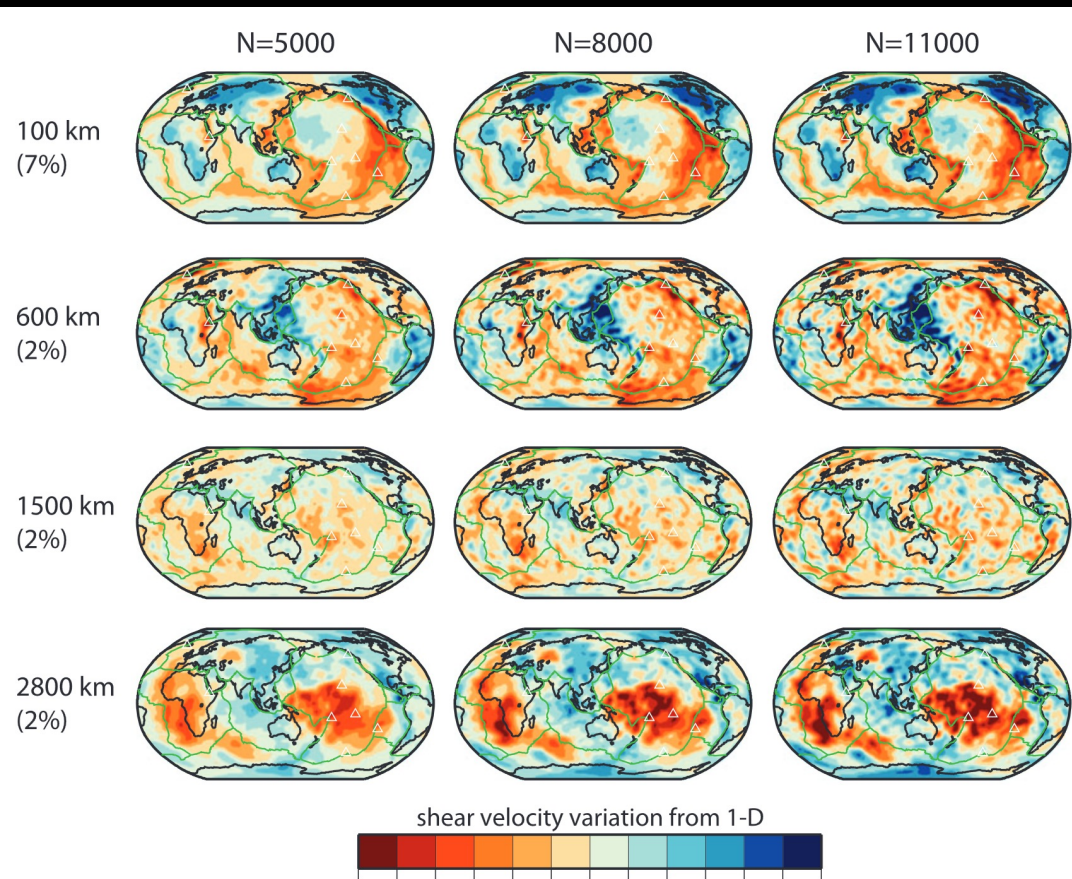


Figure 6. Maps of shear-velocity heterogeneity at, from top to bottom, 100 km, 600 km, 1500 km and 2800 km depth for, from left to right, a total number of unknowns equal to $N = 5000$, $N = 8000$ and $N = 11000$ (eq. 5). Model S40RTS has 8000 unknowns.

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

2800 km
(2%)

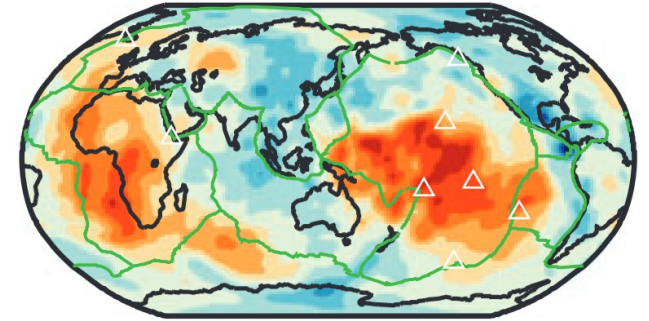
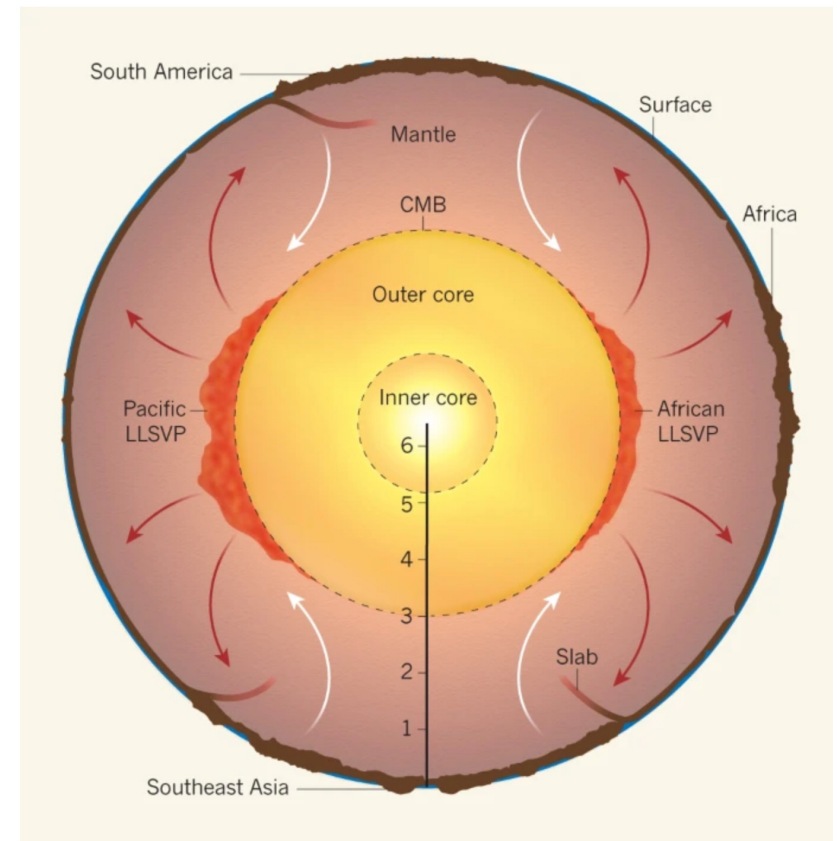


Figure 1: Earth's internal structure.



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^{1,2✉}, Mingming Li¹, Steven J. Desch¹, Byeongkwan Ko^{1,3}, Hongping Deng⁴, Edward J. Garnero¹, Travis S. J. Gabriel⁵, Jacob A. Kegerreis⁶, Yoshinori Miyazaki², Vincent Eke⁷ & Paul D. Asimow²

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 mantle¹. The LLVPs are often interpreted as intrinsically dense heterogeneities that are compositionally distinct from the surrounding mantle². 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 impact³. 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.

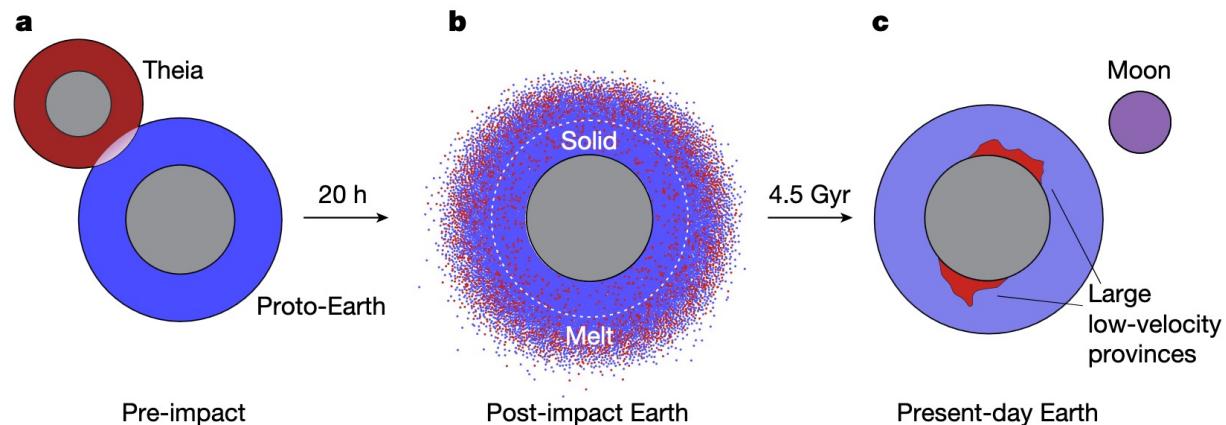
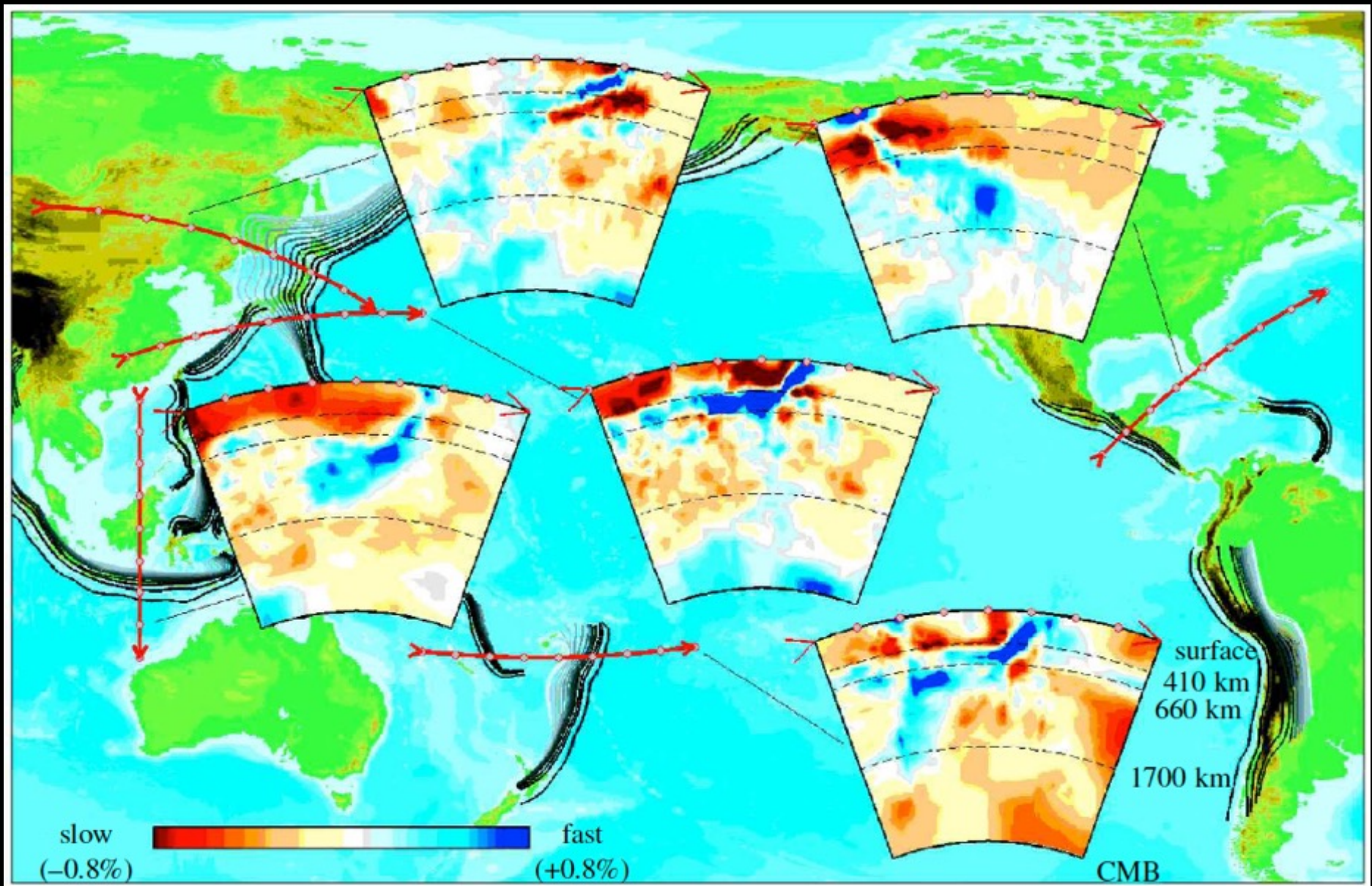
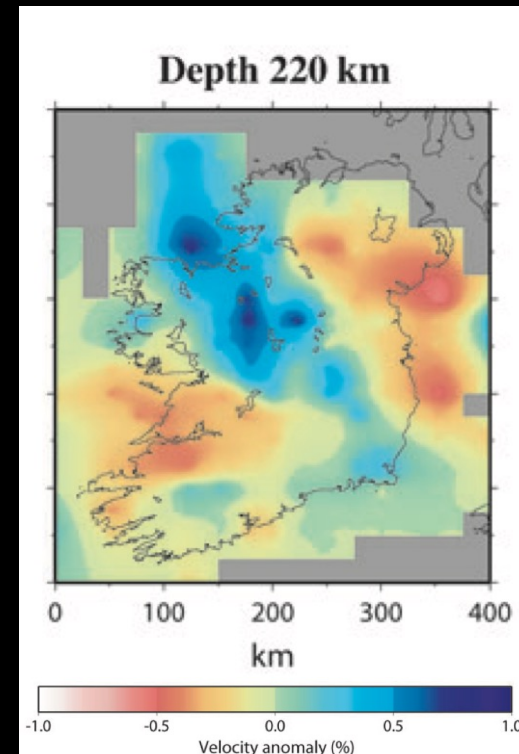
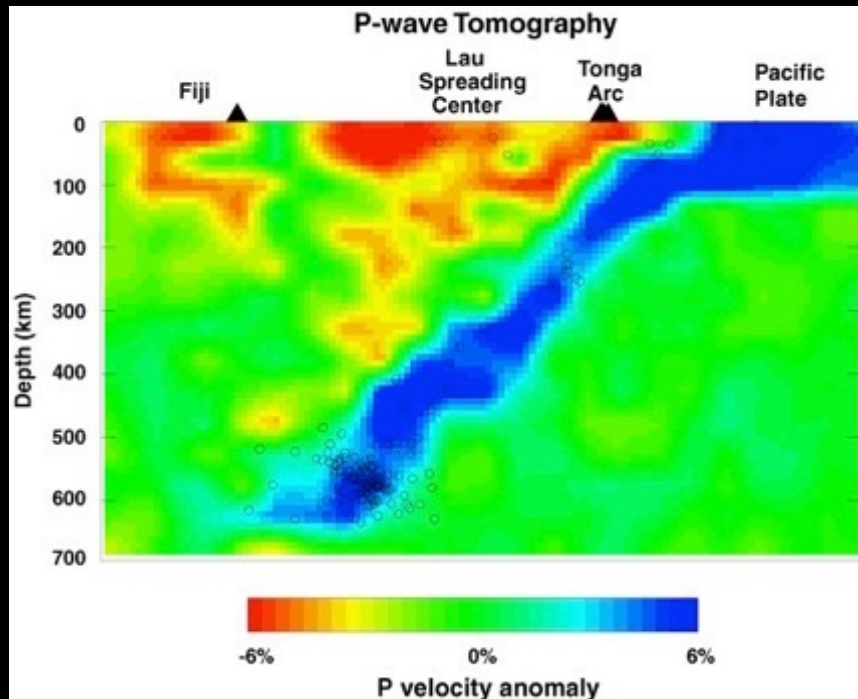


Fig. 1 | Schematic diagram illustrating the giant-impact origin of the LLVPs. stratification model from ref. 19. **c**, Present day: after approximately 4.5 Gyr, the



La Tomographie

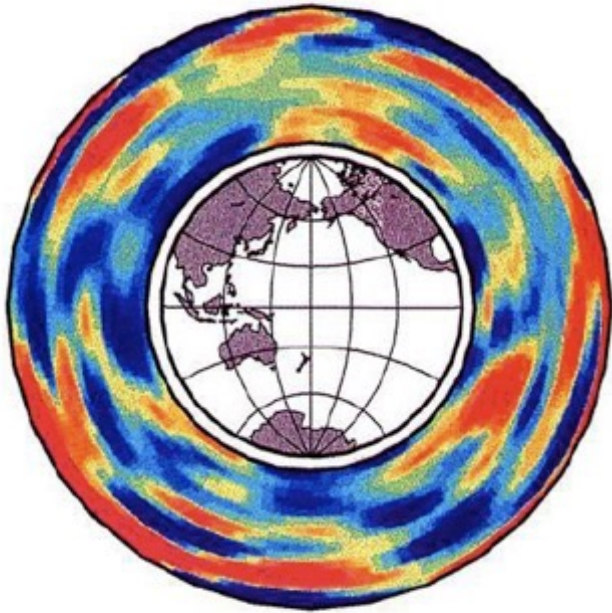


Attention aux interprétations chaud/froid...

Composition, fluides, pression interviennent aussi!!

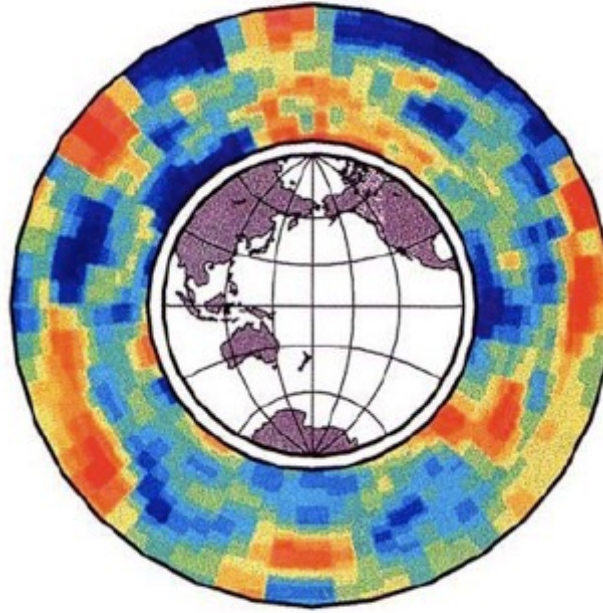
La Tomographie

deg. 12 sph. har.



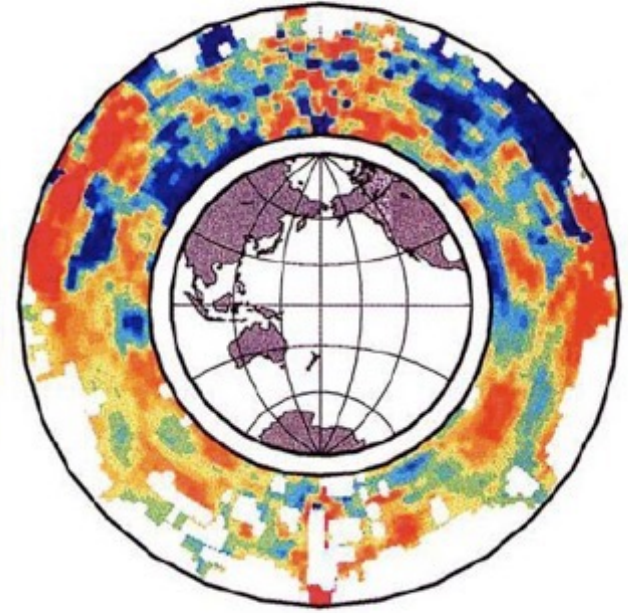
Su & Dziewonski, 1997

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!