Imag(in)er la Terre via la sismologie L2 - GLST306 - 13/10/2016

Christel Tiberi - Géosciences Montpellier

Qu'y-a-t-il à l'intérieur ?





... Et là dedans ?







Autre solution ?



Autre solution ?





Autre solution ?







Comment ça marche ?



Comment ça marche ?





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



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)





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)





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!





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





M. Thorne, E. Garnero, G. Jahnke, and H. Igel - 200

Terre homogène

5 (sec)

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



with courtesy of M.Thorne, Utah



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





M. Thorne, E. Garnero, G. Jahnke, and H. Igel - 200

Terre homogène

5 (sec)

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



with courtesy of M.Thorne, Utah



Arrivée des ondes dépend de la structure du globe !

with courtesy of M.Thorne, Utah











Terre radiale

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



Terre radiale

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









Archive Size

















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



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



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

Modèle PREM (PReliminary Earth Model)

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



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


Les hodochrones

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





Les hodochrones

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





Erreurs sur:localisationtemps origine

Les hodochrones

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





Erreurs sur:localisation

temps origine

Hétérogénéités latérales!

La Terre sismologique... 1970 - présent





Terre hétérogène!

with courtesy of M. Thorne & L. Boschi

La Terre sismologique... 1970 - présent





Terre hétérogène!

with courtesy of M. Thorne & L. Boschi



$P_{réelle} - P_{théorique} = délais de temps$



$P_{réelle} - P_{théorique} = délais de temps$

Pour un couple séisme - station





Pour un couple séisme - station





Pour un couple séisme - station

$$t = \frac{D}{V} \qquad t = \sum_{i} \frac{d_i}{V_i}$$

Pour tous les couples séisme - station



Pour un couple séisme - station

 $t = \frac{D}{V} \qquad t = \sum_{i} \frac{d_i}{V_i}$

Pour tous les couples séisme - station

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



Pour un couple séisme - station

$$t = \frac{D}{V} \qquad t = \sum_{i} \frac{d_i}{V_i}$$

Pour tous les couples séisme - station

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

t = G . m



Pour un couple séisme - station

 $t = \frac{D}{V} \qquad t = \sum_{i} \frac{d_i}{V_i}$

Pour tous les couples séisme - station

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

t = G.m







Courbe de résidus

Résidus = obs - calc On travaille toujours <u>en anomalie</u> *i.e.* il y a un modèle de référence





Répartition de résidus

Les sources et récepteurs définissent 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_{groupe}, V_{phase}, anisotropie)

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





La tomographie régionale

- Sources = téléséismes
 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 (Vp et Vs) par rapport à ID
- Résolution ~100 à 1000 kilomètres
- Ondes de surface aussi (mais pour $z \in [0-400 \text{ km}]$)

Zone d'investigation globale (manteau à CMB)





vitesses rapides vieille lithosphère, cratons, subduction





vitesses rapides vieille lithosphère, cratons, subduction

Bijwaard et al., 1998



vitesses lentes dorsales, panaches...

Tomographie ondes S



vitesses rapides vieille lithosphère, cratons, subduction





vitesses rapides vieille lithosphère, cratons, subduction

vitesses lentes dorsales, panaches...



Bijwaard et al., 1998



Images du manteau inférieur plus délicates à interpréter...



Images du manteau inférieur plus délicates à interpréter...



Albarede & van der Hilst, 2002



Attention aux interprétations chaud/froid... Composition, fluides, pression interviennent aussi!!



Van der Hilst et al., 1997

Modèles tomographiques obtenus avec les mêmes données...

Boschi & Dziewonski, 1999

Su & Dziewonski, 1997

Cela reste des modèles, prudence!

- Hétérogénéités latérales vues par la tomographie
- Variations en profondeur des discontinuités radiales (Moho, 410-660, LAB) vu aussi par la sismologie
- Signal contenu dans le sismogramme, mais difficile à extraire

On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique

On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique



Pour toute onde P arrivant à une interface délimitant un contraste de vitesse, on a reflection et transmission de l'énergie + conversion en S

On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique



Pour toute onde P arrivant à une interface délimitant un contraste de vitesse, on a reflection et transmission de l'énergie + conversion en S

On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique



Pour toute onde P arrivant à une interface délimitant un contraste de vitesse, on a reflection et transmission de l'énergie + conversion en S

On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique



Pour toute onde P arrivant à une interface délimitant un contraste de vitesse, on a reflection et transmission de l'énergie + conversion en S

On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique



Pour toute onde P arrivant à une interface délimitant un contraste de vitesse, on a reflection et transmission de l'énergie + conversion en S

On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique



Pour toute onde P arrivant à une interface délimitant un contraste de vitesse, on a reflection et transmission de l'énergie + conversion en S
On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique



Pour toute onde P arrivant à une interface délimitant un contraste de vitesse, on a reflection et transmission de l'énergie + conversion en S

 P_s = signal sur la composante radiale (R) P = signal sur la composante verticale (Z)

On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique



$$D_R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t)$$

On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique



$$D_R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t)$$



On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique







On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique



WWWWWWWWWWWWW







On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique

On traite le signal pour n'avoir que la réponse impulsionnelle du milieu $E_R(t)$ pour mieux voir P_S

$D_R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t)$





On utilise 2 choses concernant les téléséismes:

- les lois de Snell-Descartes,
- l'information contenue dans le signal sismologique

MMMMMmmmmmm

On traite le signal pour n'avoir que la réponse impulsionnelle du milieu E_R(t) pour mieux voir P_S







$$(t_{Ps} - t_P) \propto H$$



$$(t_{Ps} - t_P) \propto H$$



$$(t_{Ps} - t_P) \propto H$$



H affecte $(t_{Ps} - t_P)$

Vs affecte $(t_{Ps} - t_P) + amplitude$

Vp/Vs affecte ($t_{Ps} - t_P$) + amplitude



$$(t_{Ps} - t_P) \propto H, V_P, V_S$$

Pb sous-déterminé i.e. nécessite de fixer l'un des paramètres (modèle de vitesse sous-jacent)

Les interfaces imagées

Moho (transition vitesse crustale à mantellique)



Epaisseurs crustales Possibilité de comparer/combiner avec la gravimétrie, les ondes de surface

James et al. (2003)

Les interfaces imagées

Zone de transition (changement de phase associé à une variation de vitesse)



Panaches mantelliques signature en RF







Problématique d'actualité

- panache "fin"?
- changement(s) de phase?

Les interfaces imagées

Limite lithosphère - asthénosphère



Attention! Définition de la limite lithoasthénosphère pas unique!





• Les instruments



• Les instruments







• Les instruments













Les techniques

High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise

Nikolai M. Shapiro,^{1*} Michel Campillo,² Laurent Stehly,² Michael H. Ritzwoller¹



• Les techniques



High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise

Nikolai M. Shapiro,¹* Michel Campillo,² Laurent Stehly,² Michael H. Ritzwoller¹



• Les techniques



High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise

Nikolai M. Shapiro,^{1*} Michel Campillo,² Laurent Stehly,² Michael H. Ritzwoller¹



• Les techniques





High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise

Nikolai M. Shapiro,¹* Michel Campillo,² Laurent Stehly,² Michael H. Ritzwoller¹



Les techniques





-123

-122.5

Longitude (degrees)

S-velocity perturbation (%)

-122

-121.5

 -12^{1}

90

High-Resolution Surface-Wave **Tomography from Ambient Seismic Noise**

Nikolai M. Shapiro,^{1*} Michel Campillo,² Laurent Stehly,² Michael H. Ritzwoller¹



38

36

-0.1

176

178

km

 $\Delta v / v$ (%)

180

182



С



















