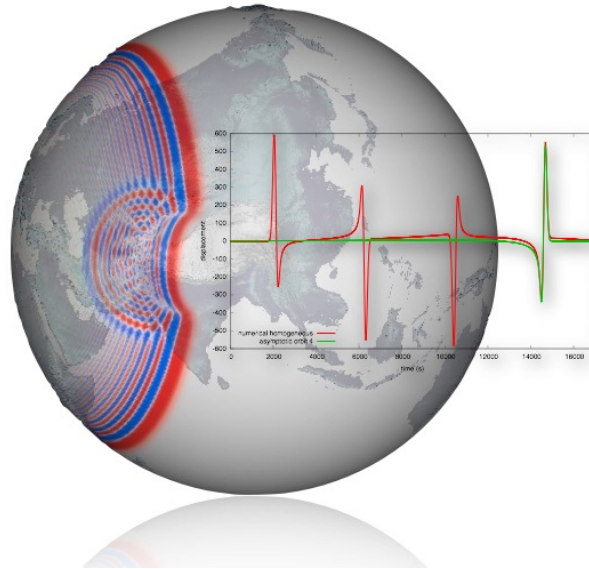


DISS. ETH No. 17807

**FINITE-FREQUENCY EFFECTS IN GLOBAL
SEISMOLOGY:
FORWARD MODELING AND IMPLICATIONS
ON TOMOGRAPHIC IMAGING**



A dissertation submitted to
ETH ZURICH
for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES
presented by
DANIEL B. PETER

Dipl. phys. ETH, ETH Zurich
born November 22, 1973
citizen of Sargans, SG, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Domenico Giardini, examiner
Dr. Lapo Boschi, co-examiner
Prof. Dr. John H. Woodhouse, co-examiner
Prof Dr. Jeannot Trampert, co-examiner

2008

Abstract

In seismology, earthquakes can be used to explore the inner structure of our planet. Similar to medical applications of high-energy electromagnetic radiation, seismologists use seismic waves traveling through the body of the Earth to image its interior. These tomographic images show distributions of seismic velocities. Such velocities themselves depend upon material composition and physical properties such as temperature and pressure. Therefore, interpreting these velocity distributions is important to understand the Earth's structure and dynamics.

An important goal in global seismic tomography is to improve the resolution of these velocity models. A promising approach involves the full numerical forward modeling of seismic waves. Most tomographic models of the Earth have not yet made use of it; instead, they almost always relied on ray theory, which simplifies the formulation of both forward and inverse problems. But we have to be aware that ray theory is an infinite-frequency approximation. In practice, this means that it is valid only provided that the wavelength of considered seismic phases is short compared to the spatial extent of Earth's heterogeneities. Obviously, this limits the resolution power, and such approaches fail to detect very small-scale heterogeneities. Especially for low-frequency surface waves, one should ultimately formulate the inverse problem via more accurate descriptions of wave propagation. Finite-frequency theory is such a description, in that it considers the single scattering of seismic waves at small anomalies. Taking this into account, finite-frequency theory replaces rays with complicated kernel functions covering large regions, where seismic measurements are sensitive to heterogeneity.

The first part of my Ph.D. work consisted of computing such sensitivity functions relating seismic phase-delay measurements of surface waves to two-dimensional phase-velocity structures. I combined the computational benefits of a simplified description of forward surface-wave propagation and a time-reversal, adjoint method to construct, by a fully numerical procedure, sensitivity kernels employed in the tomographic inverse problem. In the second part, the effects of such numerical finite-frequency sensitivity kernels upon tomographic imaging were investigated. I compared the finite-frequency

and ray-theoretical approaches for both the forward and the inverse problem in global surface-wave tomography. The benefits of finite-frequency theory on tomographic images is demonstrated by a controlled-environment exercise for surface-wave phase-velocity inversions. The third part of this work applies numerical, two-dimensional finite-frequency kernels to derive a high-resolution dataset of dispersion curves for a regional study. With focus on Europe and the Mediterranean region, such datasets are inverted for the three-dimensional, seismic shear-velocity structure of the upper mantle. Conducting an exhaustive search over all possible depth profiles for both, ray-theoretical- and finite-frequency-derived dispersion datasets, the most probable seismic shear-velocity models are found, which were compared to independent studies. Considering the reliability of our derived models, further efforts in improving seismic measurements together with finite-frequency descriptions in inverse approaches will lead to a better knowledge of Earth's structure and processes.

Résumé

En sismologie, les tremblements de terre sont étudiés pour améliorer la connaissance de la structure interne de notre planète. A l'instar de la tomographie médicale, les sismologues étudient les ondes sismiques se propageant à travers la Terre pour en imager l'intérieur. Ces images tomographiques révèlent des distributions de vitesse sismique qui dépendent de la composition minéralogique et des propriétés physiques du sous-sol comme la température et la pression. L'interprétation de ces distributions de vitesse est déterminante pour une meilleure compréhension de la structure de la Terre et de ses processus géodynamiques. Cependant, ces images tomographiques globales restent aujourd'hui encore approximatives.

Un objectif important de la tomographie sismique réside dans l'amélioration de la résolution des modèles de vitesse. Une approche prometteuse implique l'utilisation de modélisations numériques de la propagation des ondes sismiques. Cependant, à ce jour, la plupart des modèles tomographiques globaux ont employé la théorie des rais qui simplifie la description de la propagation des ondes dans les problèmes direct et inverse des études tomographiques. La théorie des rais est une approximation des fréquences infinies. En pratique, elle implique que la longueur d'onde des phases sismiques considérées doit être plus petite que les hétérogénéités que l'on cherche à imager. Cette approximation limite évidemment le potentiel de résolution de cette approche pour détecter des perturbations de vitesse de petite taille, notamment lors de l'utilisation des ondes de surface basse-fréquence. Pour ces dernières, une description plus précise de la propagation des ondes, comme celle énoncée par la théorie des fréquences finies, est nécessaire dans les approches d'imagerie inverse. En effet, la théorie des fréquences finies, qui prend en compte la dispersion des ondes sismiques aux petites hétérogénéités, transforme des rais en noyaux complexes au niveau le quel les mesures sismiques sont sensibles.

La première partie de ma thèse consistait à calculer ces noyaux de sensibilité reliant les mesures d'anomalies des phases sismiques aux vitesses de phases des ondes de surface. Pour cela, les avantages numériques d'une description simplifiée de la propagation des ondes de surface ont été combinés à une méthode adjointe.

Durant la deuxième partie de ma thèse, j'ai examiné les effets de ces noyaux de sensibilité des fréquences finies sur l'imagerie de tomographie globale. Les deux approches basées sur la théorie des rais et celle des fréquences finies ont été comparées dans le cadre des problèmes direct et inverse. La supériorité de la théorie des fréquences finies a été démontrée par des tests synthétiques pour les inversions de vitesse de phase des ondes de surface.

Dans la troisième partie de ma thèse, j'ai utilisé les noyaux des fréquences finies numériques 2D pour dériver un jeu de courbes de dispersion à l'échelle régionale. Pour la région Euro-Méditerranéenne, ces courbes de dispersion ont été inversées pour obtenir le modèle 3D de vitesse de cisaillement du manteau supérieur. Pour chaque courbe de dispersion, dérivée par la théorie des rais et par celle des fréquences finies, une recherche exhaustive des modèles en profondeur a été effectuée pour déterminer les modèles de vitesse de cisaillement les plus probables. La comparaison de ces modèles avec ceux d'études indépendantes suggère que l'approche des fréquences finies est plus cohérente. Néanmoins, l'incertitude dans les modèles dérivés est trop importante pour conclure définitivement; seule une amélioration des mesures sismiques utilisées dans mon étude permettrait de démontrer, de façon probante, l'efficacité de l'approche des fréquences finies.