

Titre en français : Influence de l'anisotropie sur le transfert radiatif dans la croûte océanique.

Titre en anglais : Impact of anisotropy on radiative transfer in the oceanic crust.

Nom du directeur de thèse : Régis COTTEREAU

Tel : 04 84 52 42 49

E-Mail : cottereau@lma.cnrs-mrs.fr

Laboratoire : Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique

Financement : demandé

Type de financement : allocation doctorale

Résumé en français : Les sismologues ont identifié depuis longtemps la lithosphère comme la principale source de complexité des sismogrammes pour des fréquences de l'ordre du Hertz et au-delà (Aki & Chouet, 1975). En domaine continental en particulier, les hétérogénéités de petite échelle de la croûte (de 0.01 à 1 km) sont à l'origine de l'atténuation des ondes balistiques et du fort allongement du signal (Sato *et al.*, 2012). Les trains d'ondes suivant les ondes directes présentent toutes les caractéristiques de signaux diffusés et forment la coda sismique. L'atténuation jouant un rôle fondamental dans la variabilité observée des mouvements sismiques du sol à distance régionale (100-1000 km), des efforts importants ont été investis pour la mesurer. Depuis le début des années 1990, c'est le transfert radiatif qui s'est imposé comme LA théorie permettant de cartographier de façon systématique les libres parcours moyens de diffusion et d'absorption de la croûte continentale. Des procédures standard ont été développées et appliquées dans de nombreuses régions du monde (Fehler *et al.*, 1992; Eulenfeld *et al.*, 2016; Sato 2019b). En raison de déploiements instrumentaux plus récents et parcellaires, le domaine océanique est beaucoup moins bien connu, mais les données présentent des caractéristiques remarquables. Pour des fréquences supérieures à 2 Hz, le champ d'ondes sismiques développe un caractère diffusif en raison de la présence d'hétérogénéités de petite échelle dans la lithosphère océanique (Furumura & Kennett 2005). Le caractère émergent des phases océaniques P et S (appelées Po et So) ainsi que la coda de longue durée qui leur fait suite évoquent les signaux d'impacts observés sur la Lune (Dainty & Toksöz, 1974). Afin d'expliquer le transport à très grande distance de l'énergie des ondes Po et So, plusieurs auteurs ont mis en avant l'importance d'introduire une anisotropie des fonctions de forme décrivant les hétérogénéités (Kennett *et al.*, 2014). La pertinence de ces modèles d'hétérogénéité ad hoc est étayée par des simulations numériques fondées sur les équations de l'élastodynamique. Ces modélisations de forme d'onde ont permis de démontrer le rôle prédominant joué par les processus de multi-diffusion vers l'avant dans l'évolution et le guidage des signaux Po et So à grande distance épicertrale (Shito *et al.*, 2013). Si les simulations de champs d'ondes complets ont permis d'améliorer la compréhension de la propagation en domaine océanique, elles sont beaucoup trop lourdes pour résoudre le problème inverse, à savoir imager les hétérogénéités à partir de sismogrammes. Les données sismiques océaniques offrent donc une occasion unique d'appliquer la théorie du transport radiatif en milieu anisotrope afin de déterminer la dépendance des propriétés d'atténuation en fonction de la polarisation et de la direction de propagation des ondes (Margerin, 2006; Baydoun *et al.*, 2014, Khazaie & Cottereau, 2020). A petite échelle, les modèles géodynamiques suggèrent que l'anisotropie peut être engendrée par l'alignement des axes de l'olivine orthorhombique autour d'une direction moyenne correspondant au mouvement de la plaque (Debayle & Ricard, 2013). La diffusion des ondes sismiques peut quant à elle être générée par les fluctuations des axes cristallographiques autour de cette moyenne. Ce projet de thèse de doctorat se concentrera d'abord sur l'étude théorique des perturbations d'orientation d'un tenseur élastique orthorhombique autour d'une moyenne hexagonale (obtenue par rotation autour d'un axe fixe) et le lien avec un transport préférentiel d'énergie le long de la plaque océanique, offrant ainsi une explication texturale à la propagation longue distance des phases Po et So. Cette étude sera basée sur l'outil du transfert radiatif. Dans un deuxième

temps, la thèse se concentrera sur l'inversion de données (déjà existantes) dans le contexte du transfert radiatif, pour obtenir des cartes de libre parcours moyen de diffusion et d'absorption en domaine océanique.

Ce projet sera co-dirigé par Christophe Gomez (Institut de Mathématiques de Marseille) et effectué en collaboration avec Ludovic Margerin (Institut de Recherches en Planétologie et Géophysique, Toulouse) et Eric Savin (ONERA et CentraleSupélec).

Résumé en anglais : Seismologists have long since identified the lithosphere as the main source of complexity in seismograms for frequencies higher than the Hz (Aki & Chouet, 1975). In particular, in the continental domain, small-scale crustal heterogeneities (from 0.01 to 1 km) induce attenuation of the ballistic waves and an important lengthening of the signals (Sato *et al.*, 2012). The wave trains following the first arrivals display features of diffuse signals and form the coda. As attenuation plays a fundamental role in the variability of seismic movements at the regional scale (100-1000 km), important efforts have been made to measure it. In the 90s, radiative transfer became THE method of choice to systematically map diffusion and absorption mean free lengths of the continental crust. Standard procedures have been developed and set up in many regions of the world (Fehler *et al.*, 1992; Eulenfeld *et al.*, 2016; Sato 2019b). Mainly because of later and more scarce instrumental deployment, the oceanic domain is much less known, but the data displays remarkable features. For frequencies higher than 2 Hz, the seismic wave field develops a diffuse character due to small-scale heterogeneities everywhere in the oceanic crust (Furumura & Kennett 2005). The so-called oceanic phases P and S (denoted P_o and S_o), as well as the specially long coda, are reminiscent of impact signals observed on the Moon (Dainty & Toksöz, 1974). In order to try and explain long distance transport of P_o and S_o wave energy, several authors have put forward the introduction of anisotropy in the functions describing the heterogeneities (Kennett *et al.*, 2014). Numerical simulations based on elastodynamics confirm the appropriateness of these ad hoc functions. These models have shown the predominant role of forward-scattering in the long-distance evolution of P_o and S_o signals (Shito *et al.*, 2013). While full-wave simulations have improved our understanding of oceanic domain wave propagation, they are much too expensive for the inverse problem, where heterogeneities are identified based on seismograms. Oceanic seismic signal therefore offer a unique occasion to apply radiative transport theory in an anisotropic medium so as to determine the polarization and direction dependency of attenuation properties (Margerin, 2006; Baydoun *et al.*, 2014, Khazaie & Cottreau, 2020). At smaller scales, geodynamical models suggest that anisotropy can be generated by the alignment of the axis of orthorhombic olivine with the average direction of the movement of the plate (Debayle & Ricard, 2013). The diffusion of seismic waves can then be induced by fluctuations of the crystallographic axes around that average direction. This doctoral project will first concentrate on studying how fluctuations of the orientations of an orthorhombic elasticity tensor around an hexagonal average (obtained by random rotations around a fixed axis) can create preferential transport of energy along the oceanic plate, hence giving a textural explanation to the long-distance propagation of P_o and S_o phases. This study will be based on the tools of radiative transfer. In a second step, the doctoral project will concentrate on data inversion (based on existing seismograms), in the context of radiative transfer, to obtain diffusion and absorption mean free path maps in oceanic domains.

This project will be co-directed by Christophe Gomez (Institut de Mathématiques de Marseille) and performed in collaboration with Ludovic Margerin (Institut de Recherches en Planétologie et Géophysique, Toulouse) and Eric Savin (ONERA and CentraleSupélec).

Profil du candidat recherché : Le candidat recherché a une formation en mécanique numérique ou théorique. Une expérience ou formation en mécanique stochastique serait un plus mais pas nécessaire.

Références:

Aki, K., & Chouet, B. (1975). Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects. *J. Geophys. Res.*, 80(23), 3322-3342

- Baydoun, I., Savin, É., Cottureau, R., Clouteau, D., & Guillemot, J. (2014). Kinetic modeling of multiple scattering of elastic waves in heterogeneous anisotropic media. *Wave Motion*, 51(8), 1325-1348.
- Dainty, A. M., Toksöz, M. N., Anderson, K. R., Pines, P. J., Nakamura, Y., & Latham, G. (1974). Seismic scattering and shallow structure of the Moon in Oceanus Procellarum. *The Moon*, Volume 9, Issue 1-2, pp. 11-29, 9, 11-29.
- Debayle, E., & Ricard, Y. (2013). Seismic observations of large-scale deformation at the bottom of fast-moving plates. *Earth Planetary Sci. Lett.*, 376, 165-177.
- Eulenfeld, T., & Wegler, U. (2016). Measurement of intrinsic and scattering attenuation of shear waves in two sedimentary basins and comparison to crystalline sites in Germany. *Geophys. J. Int.*, 205(2), 744-757.
- Fehler, M., Hoshihara, M., Sato, H., & Obara, K. (1992). Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan, using measurements of S-wave energy versus hypocentral distance. *Geophys. J. Int.*, 108(3), 787-800.
- Furumura, T., and Kennett, B. L. N. (2005), Subduction zone guided waves and the heterogeneity structure of the subducted plate: Intensity anomalies in northern Japan, *J. Geophys. Res.*, 110, B10302.
- Huang, J., and Zhong, S. (2005), Sublithospheric small-scale convection and its implications for the residual topography at old ocean basins and the plate model, *J. Geophys. Res.*, 110, B05404.
- Kennett, B. L. N., Furumura, T., & Zhao, Y. (2014). High-frequency Po/So guided waves in the oceanic lithosphere: II—heterogeneity and attenuation. *Geophys. J. Int.*, 199(1), 614-630.
- Khazaie, S. & Cottureau R. (2020). Influence of local cubic anisotropy on the transition towards an equipartition regime in a 3D texture-less random elastic medium. *Wave Motion*, 96(102574), 1-18.
- Margerin, L. (2006). Attenuation, transport and diffusion of scalar waves in textured random media. *Tectonophys.*, 416(1-4), 229-244.
- Sato, H., Fehler, M. C., & Maeda, T. (2012). Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth. Springer Science & Business Media.
- Sato, H. (2019). Isotropic scattering coefficient of the solid earth. *Geophys. J. Int.*, 218(3), 2079-2088.
- Shito, A., Suetsugu, D., Furumura, T., Sugioka, H., & Ito, A. (2013). Small-scale heterogeneities in the oceanic lithosphere inferred from guided waves. *Geophys. Res. Lett.*, 40(9), 1708-1712.

Insertion professionnelle après thèse : publique ou privée