

Transport et diffusion anisotrope des ondes élastiques

É. Savin (ONERA/DADS), D. Clouteau, R. Cottureau (LMSS-Mat), J. Guilleminot (MSME)

Les champs d'onde se propageant dans des milieux acoustiques ou élastiques complexes, voire aléatoires, ne peuvent pas être décrits par des approches déterministes. Les phénomènes de propagation dans les milieux diffusants comme les nuages, la croûte terrestre, les matériaux fortement hétérogènes, etc ... sont modélisés par des approches probabilistes, notamment la théorie du transfert radiatif (Chandrasekhar 1960), aujourd'hui très développée en électromagnétisme et optique. Pour ces systèmes d'ondes polarisées, la nature aléatoire du milieu de propagation génère un phénomène de dépolarisation dont la connaissance fine permet d'accéder à des grandeurs caractéristiques du milieu. Ces propriétés ont été mises à jour et étudiées récemment par des géophysiciens de surface qui, partant d'enregistrements de signaux sismiques, ont pu reconstituer le profil, ou le degré d'hétérogénéité, de l'intérieur de la Terre : fluctuations spatiales des paramètres élastiques, ou des vitesses des ondes P, S ou de Rayleigh, et de la densité (Shapiro *et al.* 2005 par exemple).

Les équations de transfert radiatif décrivent la propagation des ondes acoustiques, élastiques ou électromagnétiques, entre autres, dans le régime mésoscopique, lorsque leurs longueurs d'onde λ sont comparables à une longueur caractéristique du milieu L (longueur de corrélation ou parcours libre moyen). Elles peuvent être résolues numériquement à l'aide de méthodes de Monte-Carlo, fondées sur leur interprétation probabiliste en tant qu'équation de Fokker-Planck pour la densité de probabilité marginale d'un processus de Markov homogène sous-jacent. Ces méthodes sont non dissipatives et non dispersives, il est donc possible de travailler sur des simulations de Monte-Carlo pour mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu (Przybilla *et al.* 2009). Plusieurs résultats récents ont montré la pertinence de cette approche et son adéquation avec des observations, telles que des enregistrements de codas sismiques. Les simulations devraient ainsi permettre d'accéder au phénomène de dépolarisation, et plus généralement à la limite diffusive des équations de transfert radiatif lorsque, pour des temps/distances de propagation grands, la mémoire de la polarisation initiale des ondes est perdue.

Si l'émergence de la diffusion est bien comprise pour des milieux statistiquement isotropes (Savin 2008), c'est-à-dire des milieux pour lesquels les hétérogénéités aléatoires ne présentent pas de directions privilégiées de diffraction des ondes, en revanche le cas des milieux anisotropes, appelés parfois aussi anisomères, est bien moins établi (Margerin 2006). L'anisotropie évoquée concerne l'échelle macroscopique $\lambda \ll L$ correspondant au régime de diffusion, pour des distances de propagation ou d'observation bien supérieures au parcours libre moyen des ondes dans un milieu qui lui peut parfaitement être isotrope à l'échelle microscopique $\lambda \gg L$: par exemple une structure de grains alignés suivant une direction privilégiée, ou une structure laminaire de composants isotropes. La diffusion dans un milieu anisomère est décrite par un tenseur de diffusion non circulaire, contrairement au cas isotrope, qui exhibe des directions principales de transfert des ondes jusqu'à d'éventuels phénomènes de localisation (Akkermans & Montambaux 2007, Lobkis & Weaver 2008). L'objectif principal de ce projet est de tenter de décrire formellement ce tenseur de diffusion partant d'une structure texturée d'hétérogénéités aléatoires d'un milieu isotrope sous jacent. On

pourra par exemple s'appuyer sur les expériences conduites par Lobkis & Weaver (2008) sur une plaque plane entaillée suivant des directions particulières. Compte tenu du peu de résultats disponibles dans la littérature concernant ces modèles, l'étude proposée ici sur la base de considérations plutôt spéculatives restera essentiellement exploratoire. Néanmoins les applications pratiques des modèles mésoscopiques de propagation d'ondes sont nombreuses : contrôle non destructif, imagerie, télédétection ... au delà de l'élastodynamique. À titre indicatif, on pourra s'inspirer dans ce travail des contributions des physiciens des solides pour développer, en première approche, des modèles discrets d'inclusions aléatoires alignées (Akkermans & Montambaux 2007). On envisagera également une comparaison avec des résultats expérimentaux tels que ceux mentionnés plus haut.

Les contributions attendues des différents participants font appel aux compétences suivantes : modélisation probabiliste des matériaux hétérogènes (D. Clouteau, R. Cottureau, J. Guilleminot), modélisation du transfert radiatif et de la diffusion (É. Savin), modélisation et méthodes numériques en propagation d'ondes (tous les proposant). Ce projet relève par ailleurs de différents thèmes scientifiques de la Fédération : approches probabilistes en mécanique, dynamique (propagation d'ondes), matériaux hétérogènes, voire approches multi-échelles.

Durée et financement :

Le projet prévoit le recrutement d'un(e) post-doctorant(e) sur une période de 12 mois (50000 €), le financement des moyens de calcul (3000 €), et la participation à des conférences pour les membres du projet (4500 €). Le(a) post-doctorant(e) sera de préférence rattaché(e) au laboratoire MSS-Mat de l'École Centrale Paris.

Participants :

D. Clouteau & R. Cottureau, Laboratoire MSS-Mat (UMR-CNRS 8579), École Centrale Paris, didier.clouteau@ecp.fr, regis.cottureau@ecp.fr.

J. Guilleminot, Laboratoire MSME (UMR-CNRS 8208), Université Paris-Est, johann.guilleminot@univ-paris-est.fr.

É. Savin, Département Aéroélasticité et Dynamique des Structures, ONERA (Châtillon), Eric.Savin@onera.fr.

Références :

E. Akkermans & G. Montambaux : *Mesoscopic Physics of Electrons and Photons*. Cambridge University Press, Cambridge (2007).

S. Chandrasekhar : *Radiative Transfer*, Dover Publications, New York (1960).

O.I. Lobkis & R.L. Weaver : Anderson localization of ultrasound in plates: Further experimental results. *Journal of the Acoustical Society of America* **124**, 3528-3533 (2008).

L. Margerin : Attenuation, transport and diffusion of scalar waves in textured random media. *Tectonophysics* **416**, 229-244 (2006).

J. Przybilla, U. Wegler & M. Korn : Estimation of crustal scattering parameters with elastic radiative transfer theory. *Geophysical Journal International* **178**, 1105-1111 (2009).

É. Savin : Diffusion regime for high-frequency vibrations of randomly heterogeneous structures. *Journal of the Acoustical Society of America* **124**, 3507-3520 (2008).

N.M. Shapiro, M. Campillo, L. Stehly, & M.H. Ritzwoller : High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science* **307**, 1615-1618 (2005).