

Modélisation électromagnétique par couplage de méthodes numériques et semi-analytiques et algorithmes d'inversion

C. Reboud¹, R. Miorelli¹, X. Artusi¹, A. Skarlatos¹, E. Demaldent¹

¹ : CEA, LIST, Département Imagerie Simulation pour le Contrôle
christophe.reboud@cea.fr

Résumé

L'usage intensif de la simulation à des fins d'inversion a connu un large essor ces dernières années dans le domaine du contrôle non destructif, à la faveur notamment de la démocratisation des méthodes d'apprentissage automatique. Cette communication présente l'approche adoptée au CEA LIST pour la caractérisation des défauts affectant des pièces inspectées par la technique des courants de Foucault.

À l'échelle du modèle direct, une stratégie de couplage entre des méthodes spectrales rapides et une formulation par équations intégrales de frontières permet d'accélérer la résolution du problème direct unitaire. Ce type d'accélération rend possible la génération de bases de données de simulations sans recourir à des solutions de calculs distribuées trop lourdes. À plus haut niveau, le lien entre différents paramètres d'entrée du modèle et les signaux physiques correspondant peuvent être appris dans une démarche non intrusive en entraînant des algorithmes d'apprentissage automatique comme les machines à support vecteur ou les réseaux de neurones. Cet apprentissage, appliqué dans le sens direct, produit une approximation quasi temps réel du modèle physique sous-jacent, qui peut être utilisée dans des schémas inverses classiques consistant optimiser une fonction coût afin de remonter aux paramètres caractérisant un défaut. Appliqué dans l'autre sens, il permet de construire une approximation de l'opérateur inverse, capable de fournir en quasi temps réel des estimations paramétriques. Les deux approches et leurs mises en œuvre pratiques seront commentées et discutées dans plusieurs situations. D'autres applications de cette méthodologie à la classification automatique et à la démonstration de performance des méthodes de contrôle seront également présentées.

Contrôle des ondes sismiques (séismes et tsunamis) en les rendant invisibles

S. Brûlé¹, S. Enoch¹, S. Guenneau¹

¹ : Aix Marseille Univ, CNRS, Institut Fresnel,
52 avenue Escadrille Normandie Niemen, 13013 Marseille,
stephane.brule@menard-mail.com

Résumé

Ce papier raconte l'émergence des métamatériaux sismiques depuis la proposition théorique d'une cape d'invisibilité pour les ondes mécaniques de plaque en 2009, à la validation expérimentale d'un bouclier et d'une lentille plate pour les ondes de sismiques de surface en 2012. Les ondes de Rayleigh se comportent de manière analogue aux ondes électromagnétiques dans les métamatériaux.

1. Introduction

Les physiciens Victor Veselago et John Pendry ont révolutionné l'optique ondulatoire avec leur proposition d'une lentille plate convergente possédant un indice de réfraction qui requiert une permittivité et une perméabilité négatives. Une alternative pour une lentille plate convergente est de faire appel à l'anisotropie effective dans les cristaux photoniques dans des fréquences proches des bandes interdites [1]. Nous avons suivi cette seconde voie pour la réalisation d'une lentille plate sismique. Nous avons en premier lieu validé expérimentalement dans la région grenobloise en 2012 le concept de bande interdite pour les ondes de Rayleigh se propageant dans un sol structuré [5].

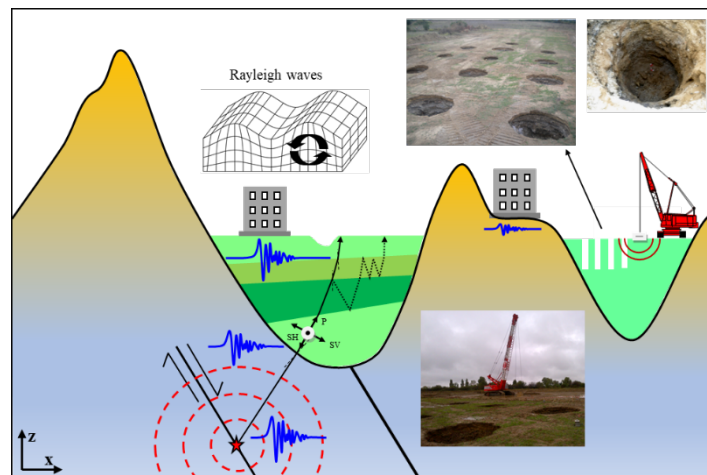


Figure 1. Illustration (vue de coupe dans le plan vertical x-z) du principe d'amplification (effet de site) des vibrations de sol induite par des sédiments recouvrant de la roche. Un bâtiment situé sur la roche subit un signal sismique modéré, contrairement à un bâtiment situé sur le bassin sédimentaire. L'impact d'une masse de 17 tonnes lâchée du haut d'une grue génère des ondes de surface (de Rayleigh) dont les fréquences autour de 8 hertz sont focalisées par un réseau de trous de 2m de diamètre espacés de 7m [6]. Ce réseau se comporte de manière analogue à une lentille plate de Pendry-Veselago par le biais de la dispersion anormale quand le réseau est tourné [1].

Puis nous avons testé la réponse d'un réseau de trous de 2 mètres de diamètre espacés de 7 mètres à une source sismique générée par l'impact d'une masse lâchée du haut d'un grue (voir Figure 1). L'analyse des données de l'expérience menée par l'équipe de Stéphane Brûlé de l'entreprise Ménard dans la région lyonnaise en 2012 a confirmé la focalisation de certaines fréquences de la source (autour de 8 hertz) par le réseau de trous [7]. Ces deux expériences ont confirmé la pertinence de modèles de mégastructures que nous avons baptisées métamatériaux sismiques [5], par le biais d'analogies entre la propagation de la lumière, des vagues et des ondes de surface sismiques, dans les milieux structurés à des échelles très différentes (de la dizaine de nanomètres aux décamètres).

2. Concept de cape d'invisibilité sismique

Si l'on pousse l'analogie onde sismique-lumière, on peut s'attendre à ce que la trajectoire d'une onde sismique puisse être contrôlée dans un sol savamment structuré de telle sorte qu'elle contourne une région à protéger (voir Figure 2). Nous avons fait cette proposition théorique de cape sismique il y a dix ans [3], qui s'appuie sur des analogies avec les capes d'invisibilité pour les vagues [2], le son et les micro-ondes [6]. L'essor des métamatériaux pour les ondes mécaniques à petite [3,4] et grande [5,7,9,10] échelles est tel qu'il est vraisemblable qu'une cape sismique soit implémentée à un coût non prohibitif dans les années à venir avec les techniques récentes du génie civil [8].

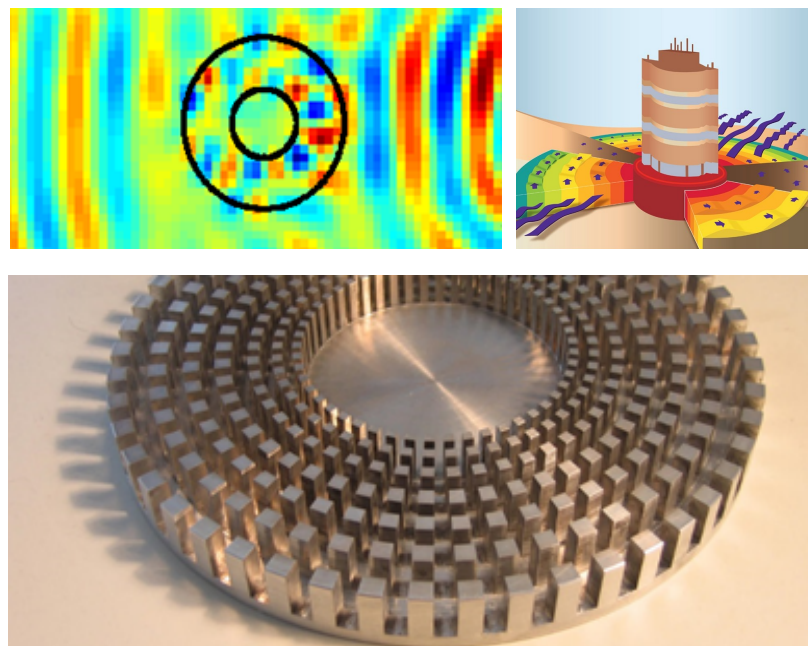


Figure 2. Une cape d'invisibilité en aluminium (Photo du bas: S. Enoch) de 20cm de diamètre, validée expérimentalement pour les vagues en 2008 [1], puis pour les ondes sonores au Massachusetts Institute of Technology et pour les micro-ondes (en haut à gauche, R. Abdeddaïm) à l'Institut Fresnel [5], sert de modèle pour le design d'une cape sismique à grande échelle (vue d'artiste en haut à droite: Institut Fresnel/INSIS/CNRS Photothèque). La région au centre du dispositif est protégée des ondes.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré l'intérêt des analogies entre ondes mécaniques et électromagnétiques, pour le design de sols structurés ayant des propriétés anti-vibratiles.

5. Remerciements

Ce travail a été soutenu par le conseil européen de la recherche entre 2011 et 2016 (ERC STARTING GRANT ANAMORPHISM) et par l'INSIS du CNRS depuis 2009.

6. Bibliographie

- [1] GRALAK B, ENOCH S AND TAYEB G, Anomalous refraction properties of photonic crystals, *Journal Optical Society of America A*, Vol. 17, pp. 1012-1020, 2000
- [2] FARHAT M, GUENNEAU S, ENOCH S AND MOVCHAN AB, Broadband cylindrical acoustic cloak for linear surface waves in a fluid, *Physical Review Letters*, Vol. 101, pp. 134501, 2008
- [3] FARHAT M, GUENNEAU S and ENOCH S, Ultrabroadband elastic cloaking in thin plates, *Physical Review Letters*, vol. 103, pp. 024301, 2009
- [4] KADIC M, BUCKMANN T, SCHITTNY R AND WEGENER M, Metamaterials beyond electromagnetism, *Report Progress Physics*, vol. 76, pp. 126501, 2013
- [5] BRULE S, JAVELAUD EH, ENOCH S and GUENNEAU, Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves, *Physical Review Letters*, vol. 112, pp. 133901, 2014
- [6] XU J, JIANG X, FANG N, GEORGET E, ABDEDDAIM R, GEFFRIN J-M, FARHAT M, SABOUROUX P, ENOCH S AND GUENNEAU S, *Scientific reports*, Vol. 5, pp. 10678, 2015
- [7] BRULE S, JAVELAUD EH, ENOCH S and GUENNEAU, Flat lens for seismic waves, *Scientific Reports*, vol. 7, pp. 18066, 2017
- [8] BRULE S AND CUIRA F, *Pratique de l'interaction sol-structure sous séisme. Application aux fondations et aux soutènements*, Afnor Editions, 2017
- [9] COLOMBI A, ROUX P, GUENNEAU S, GUEGUEN P AND CRASTER RV, Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances, *Scientific Reports*, vol. 6, pp. 19238, 2016
- [10] BRULE S, ENOCH S and GUENNEAU S, Role of nanophotonics in the birth of seismic megastructures, *Nanophotonics*, sous presse

Capteurs Quantiques

A. Landragin¹

¹: LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, 61
avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France,

Résumé

L'interférométrie atomique est basée sur le principe de dualité onde-matière, énoncé par Louis de Broglie. Les techniques de refroidissement des atomes ont permis d'amplifier les aspects ondulatoires de la matière. En particulier, depuis les expériences pionnières de 1991, l'interférométrie atomique s'est imposée comme un outil unique pour la mesure précise des constantes fondamentales et des effets gravito-inertiels. En pratiques, la plupart des interféromètres atomiques sont basés sur la manipulation des paquets d'ondes atomiques (séparation et déflexion) par la lumière (faisceaux lasers). Elle couvre des applications multiples en métrologie[1], navigation inertielle, géophysique[2], tests de physique fondamentale, et a été proposée pour la détection des ondes gravitationnelles[3]. En effet, l'interférométrie atomique combine à la fois une haute sensibilité intrinsèque, liée aux grands temps de mesure accessibles avec des particules massiques, et une grande précision grâce au haut niveau de contrôle de l'interaction atome-laser. Deux grandes classes d'interféromètres sont les études : les interféromètres avec des atomes en chute libre, qui atteignent déjà des performances de pointe, et les interféromètres piégés ou guidés, plus prospectifs et ouverts à de nouvelles applications. J'illustrerai ces développements à travers différents projets que nous menons : gravimètre[4], gyromètre[5], test de l'université de la chute libre[6], ou mesure de forces à faibles distance[7].

6. Bibliographie

- [1] M. Thomas, P. Espel, D. Ziane, P. Pinot, P. Juncar, F. Pereira Dos Santos, S. Merlet, F. Piquemal and G. Genevès, First determination of the Planck constant using the LNE watt balance, *Metrologia* 52, 433-443 (2015)
- [2] B. Fang, I. Dutta, P. Gillot, D. Savoie, J. Lautier, B. Cheng, C. L Garrido Alzar, R. Geiger, S. Merlet, F. Pereira Dos Santos, A. Landragin, *Metrology with Atom Interferometry: Inertial Sensors from Laboratory to Field Applications*, *Journal of Physics : Conference Series* 723 (2016) 012049.
- [3] W. Chaibi, R. Geiger, B. Canuel, A. Bertoldi, A. Landragin, and P. Bouyer, Low frequency gravitational wave detection with ground-based atom interferometer arrays, *Phys. Rev. D* 93, 021101 (2016).
- [4] R. Karcher, A. Imanaliev, S. Merlet, F. Pereira dos Santos, Improving the accuracy of atom interferometers with ultracold sources, *New J. Phys.* 20, 113041 (2018).
- [5] D. Savoie, M. Altorio, B. Fang, L. A. Sidorenkov, R. Geiger, A. Landragin, Interleaved Atom Interferometry for High Sensitivity Inertial Measurements, *Science Advances*, Vol. 4, no. 12, eaau7948 (2018).
- [6] Brynle Barrett, Laura Antoni-Micollier, Laure Chichet, Baptiste Battelier, Thomas Lévêque, Arnaud Landragin and Philippe Bouyer, Dual matter-wave inertial sensors in weightlessness, *Nature Communications* 7, 13786 (2016)
- [7] Xavier Alauze, Alexis Bonnin, Cyrille Solaro, Franck Pereira Dos Santos, A trapped ultracold atom force sensor with a μm -scale spatial resolution, *New J. Phys.* 20, 083014 (2018).