

ED SMAER

Sujet de thèses 2013

Laboratoire : **Institut des NanoSciences de Paris (UMR CNRS 7588)**

Etablissement de rattachement : **Université Paris 6**

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : **Bernard Bonello – Section 05 du CNRS**

Codirection et section CNU et CNRS : **Olga Boyko – Section 28 du CNU**

Titre de la thèse : **Propriétés effectives de métamatériaux acoustiques à résonances locales**

Collaborations dans le cadre de la thèse : **IEMN Lille (simulations numériques) ; Femto-St Besançon (élaboration des nanostructures)**

Résumé du sujet :

L'objectif de cette thèse est une étude expérimentale des métamatériaux acoustiques à résonances locales. Ce sont des systèmes composites dont la densité et la compressibilité *effectives* peuvent être simultanément négatives dans certaines bandes de fréquence acoustiques. Ils sont constitués de résonateurs mécaniques, insérés dans une matrice fluide ou solide. La double négativité se manifeste lorsque les résonateurs vibrent en opposition de phase par rapport à l'onde élastique qui se propage dans la matrice, et dont la longueur d'onde est grande devant les dimensions des résonateurs. Cette anti-résonance peut être obtenue de façon passive, en choisissant judicieusement la nature des matériaux constituant les résonateurs locaux, ou de façon active, en forçant l'anti-résonance par un apport énergétique. C'est cette seconde voie que nous proposons d'explorer.

L'étude portera sur des métamatériaux acoustiques 1D ou 2D, incluant des résonateurs piézoélectriques.

Dans le cas des systèmes 1D on établira d'abord le formalisme reliant les propriétés effectives du système aux coefficients de réflexion et de transmission acoustiques à travers un empilement de couches minces incluant des films minces piézoélectriques. Dans le cas des systèmes 2D, la première tâche sera de calculer la diffusion de l'onde élastique par un ensemble de résonateurs vibrant en phase afin d'identifier la ou les bandes acoustiques dans lesquelles les propriétés négatives sont possibles. Les études expérimentales se feront au moyen de techniques de génération et de détection d'ondes élastiques par impulsions lasers.

Sujet développé

Contexte

Le sujet qui est proposé, vise à concevoir et à élaborer des hétérostructures appelées « **Métamatériaux acoustiques actifs** » dont la densité et la compressibilité effectives sont simultanément négatives dans certaines bandes de fréquences acoustiques. Ces matériaux artificiels sont l'équivalent acoustique des métamatériaux optiques qui permettent d'ores-et-déjà de contrôler la propagation des ondes optiques de telle façon que les objets soient invisibles dans la bande micro-ondes [1]. Des réalisations de métamatériaux acoustiques existent déjà. Elles sont toutes basées sur l'insertion dans une matrice fluide de résonateurs locaux dont les dimensions latérales sont très petites devant la longueur d'onde des ondes élastiques se propageant dans la matrice. Jusqu'à présent, seules deux sortes de résonateurs acoustiques ont été considérées : des billes métalliques enrobées d'un polymère [2] et des résonateurs de Helmholtz couplés à un guide d'onde [3]. Cependant, dans les deux cas la matrice est fluide, ce qui constitue une sévère limitation pour nombre d'applications. Cette thématique est en plein développement et les acteurs les plus dynamiques sur le sujet sont principalement en Europe (au moins quatre groupes en France et un en Espagne) et en Asie (Hong Kong, Shanghai, Nankin, Taiwan). Des groupes américains sont également très actifs dans ce domaine comme l'atteste la réalisation récente par une équipe de l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign d'une « cape d'inaudibilité » pour des applications en acoustique sous-marine [4].

Objectifs Scientifiques

Les opticiens savent maintenant élaborer des hétérostructures artificielles permettant de s'affranchir de la limite de diffraction, qui stipule que l'image d'un point ne peut pas être ponctuelle. Plusieurs solutions ont été proposées pour cela, la plus simple consistant à juxtaposer une structure à permittivité négative avec un matériau à perméabilité négative. C'est ce que l'on appelle un métamatériau optique, pour lequel il y a une recherche très active dans la communauté des opticiens.

C'est cette idée que nous voulons transposer en acoustique.

En effet, un simple examen des équations de propagation des ondes élastiques et des ondes électromagnétiques, montre qu'on peut établir des analogies formelles entre la compressibilité et la perméabilité magnétique d'une part, la masse volumique et la constante diélectrique d'autre part. On se heurte toutefois à une difficulté majeure : élaborer un métamatériau acoustique signifie juxtaposer un matériau à compressibilité négative et un matériau ayant une masse volumique négative, ce qui n'a pas de sens d'un point de vue thermodynamique. Un matériau à compressibilité négative voit son volume augmenter quand la pression extérieure augmente ; un matériau dont la masse volumique est négative se déplace vers la droite quand on le pousse vers la gauche.

En revanche, si on adopte un point de vue dynamique, on peut donner un sens aux notions de compressibilité et de masse volumique négatives. Il suffit pour cela de considérer une matrice constituée d'un matériau A dans laquelle sont dispersées des inclusions faites d'un matériau B et une onde élastique se propageant dans cet ensemble. Si la longueur d'onde est très grande devant les dimensions des inclusions, celles-ci subissent des alternances compression-extension à la fréquence de l'onde élastique. Si on fait l'hypothèse supplémentaire que la fréquence de l'onde élastique est une fréquence de résonance des inclusions, alors celles-ci peuvent entrer en résonance sur un de leurs modes propres, cette mise en résonance étant pilotée par le passage de l'onde élastique. **La masse volumique et la compressibilité du milieu effectif (A+B) seront négatives si les résonances des**

inclusions sont en opposition de phase avec l'onde élastique. On peut se représenter simplement le phénomène en considérant des inclusions sphériques pour lesquelles le mode propre le plus simple est le mode dit de « respiration », auquel est associé un mouvement du type « cœur qui bat ». La compressibilité effective sera négative si la sphère est dilatée sur l'alternance de compression et comprimée sur l'alternance d'extension. De la même façon, on peut montrer qu'un autre mode propre, correspondant cette fois-ci à une résonance sans changement de volume de la sphère, conduit à une masse effective négative, sous certaines conditions de phase.

La difficulté dans le raisonnement qui précède vient des ordres de grandeur. Pour que l'onde élastique se propageant dans le composite (A+B) puisse mettre les sphères en résonance, il faut que la vitesse du son dans le matériau B soit très petite (typiquement, 100 fois plus petite) devant la vitesse du son dans le matériau A. On est donc amené à chercher des matériaux B dans lesquels le son se propage à des vitesses ne dépassant pas quelques mètres par seconde. En dehors de caoutchoucs très spécifiques, de tels matériaux n'existent pas.

C'est la raison pour laquelle nous proposons une autre approche pour élaborer un métamatériau acoustique. Elle consiste à insérer dans la matrice A des inclusions aux formes parfaitement contrôlées et à forcer leur mise en vibration via une tension électrique appliquée sur des résonateurs B faits d'un matériau piézoélectrique. Si on réussit à contrôler simultanément les modes de vibration des inclusions et leur phase, on mime la situation décrite plus haut, la seule différence provenant de l'apport énergétique sur les résonateurs B.

Deux cas seront envisagés :

1- des systèmes unidimensionnels constitués par des empilements périodiques d'un piézoélectrique et d'un métal. On établira le formalisme reliant les propriétés effectives du système aux coefficients de réflexion et de transmission acoustiques [5].

2- des systèmes bidimensionnels constitués par des piliers piézoélectriques sur une membrane de silicium. Dans ce cas, on peut montrer que les propriétés effectives du milieu sont reliées aux coefficients de diffusion de l'onde élastique sur les inclusions [6].

La mise en évidence expérimentale de la double négativité se fera au moyen des techniques « laser-ultrasons » et « réseaux transitoires » dont nous disposons dans notre équipe. Il s'agira de mesurer la transmission (phase et amplitude) de l'onde élastique à travers l'empilement 1D ou dans le cas des systèmes 2D, de cartographier le champ élastique diffusé par un ensemble de résonateurs en vibration sur leur mode propre.

Résultats attendus

L'utilisation de systèmes nanostructurés, tels que les cristaux phononiques, pour manipuler les ondes élastiques concerne généralement des fréquences près de la bande interdite phononique, pour lesquelles les longueurs d'onde sont du même ordre de grandeur que le pas du réseau. Avec ce travail de thèse, nous voulons montrer que l'on peut aussi utiliser des systèmes nanostructurés pour manipuler des modes acoustiques dont la longueur d'onde est très grande devant les dimensions des inclusions. La mise en résonance de ces inclusions se faisant via une source externe, cette voie aurait l'avantage de conduire à des métamatériaux électriquement commandables.

Références

- [1] D. Schuring *et al.*, Science **314**, 977 (2006).
- [2] Z. Liu *et al.*, Science **289**, 1734 (2000).
- [3] N. Fang *et al.*, Nature Mater. **5**, 452 (2006).
- [4] S. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 024301 (2011).
- [5] V. Fokin *et al.* Phys. Rev. B **76**, 144302 (2007).
- [6] P. Sheng *et al.* Phys. Rev. B **76**, 134205 (2007).