

Etudes numérique et expérimentale de structures périodiques en vue du guidage d'ondes ultrasonores

K. ZONG^{a,b}, O. LENOIR^b, H. FRANKLIN^b, A. TINEL^b

a. Qingdao University of Science and Technology, 53 Road Zhengzhou, 266042 Qingdao, Chine,
zongkunqust@163.com

b. Laboratoire Ondes et Milieux complexes, UMR CNRS 6294, Université du Havre, 75 rue Bellot,
76610 Le Havre, olivier.lenoir@univ-lehavre.fr, herve.franklin@univ-lehavre.fr, alain.tinel@univ-lehavre.fr

Résumé:

On s'intéresse au guidage d'ondes ultrasonores dans des structures phononiques "composites" périodiques ou quasi-périodiques élaborées à partir de deux types de réseaux de tiges cylindriques, en acier (\emptyset 1mm) et en polyéthylène (\emptyset 1,5 mm) immergées dans l'eau. Les bandes passantes fréquentielles des structures en acier ou en polyéthylène uniquement sont déterminées au préalable, les espacements étant fixés. Le choix adéquat des fréquences du signal harmonique incident (de l'ordre de 170 kHz) sur les structures phononiques permet alors de réaliser le guidage étroit via une bande d'acier pratiquée dans un environnement de polyéthylène. Plusieurs géométries de bandes de guidage sont considérées en vue d'un guidage, linéaire ou courbe. Dans ce dernier cas, on met en évidence le rayon de courbure. Des simulations temporelles sont réalisées en utilisant la méthode des éléments finis. Des mesures expérimentales sont effectuées en vue d'une comparaison avec les prédictions théoriques.

Abstract:

We are interested in the guiding of ultrasonic waves in periodic or quasi-periodic "composites" elaborated phononic structures from two types of cylindrical rods, steel (\emptyset 1mm) and polyethylene (\emptyset 1,5mm) immersed in the water. The frequency bandwidths of the structures about steel or polyethylene are only determined in advance, the spacings have been fixed. The correct selection of the incident harmonic signal frequencies (the order of 170 kHz) on the phononic structures makes it possible to carry out the narrow guidance via a steel strip in a polyethylene environment. Several geometries of guide strips are considered for linear or curved guidance. In the last case, the radius of curvature is shown. Time simulations are performed using the finite element method. Experimental measurements are made for comparison with theoretical predictions.

Mots clefs : structure phononique, guide d'onde, éléments finis

1 Introduction

La propagation d'ondes dans les milieux périodiquement structurés (très majoritairement artificiels) a connu un formidable essor ces vingt dernières années tant en optique (cristaux photoniques) qu'en acoustique (cristaux phononiques). Le terme métamatériau est même appliqué actuellement à tout matériau composite artificiel susceptible de dégager des propriétés acoustiques ou électromagnétiques qu'il n'est pas possible d'obtenir à partir d'un matériau naturel. Certaines recherches et applications

tendent à miniaturiser sans cesse ces structures car si les métamatériaux possèdent des propriétés particulières, il convient pour la commodité de leur utilisation qu'elles aient des tailles relativement petites. Les influences des paramètres géométriques et physiques ont été étudiées en poussant le plus loin possible les développements analytiques. Dans ce papier nous abordons des structures de métamatériaux plus complexes pour réaliser un guidage d'ondes ultrasonores. De ce fait, des simulations temporelles vont être présentées ; elles sont réalisées avec le logiciel de calcul par éléments finis COMSOL MULTIPHYSICS 5.1.

Tout d'abord, on présente la diffusion d'une onde plane acoustique par un cylindre infini immergé. L'exploitation des conditions de continuité aux interfaces fluide/solide permet de déterminer les coefficients de diffusion du cylindre puis la pression diffusée. On peut alors calculer la fonction de forme en champ lointain. Dans la deuxième partie, on étudie une SP2D (structure périodique bidimensionnelle formée par des cylindres disposés dans une matrice liquide) constituée de N réseaux linéaires parallèles d'un même matériau. On rappelle d'abord l'expression du coefficient de transmission de cette structure phononique. Des résultats de simulations numériques sont donnés. Les bandes passantes et interdites apparaissant sur les tracés des coefficients de transmission sont analysées. Dans la troisième partie, on examine les propriétés de guidage par association de cylindres en acier et de cylindres en polyéthylène. Les fréquences de l'onde incidente sur le guide sont toujours choisies dans la bande passante de l'acier (qui coïncide avec une bande interdite du polyéthylène). Des résultats de simulations numériques et expérimentaux portant sur un guide d'onde linéaire sont présentés. En conclusion, des perspectives à ce travail sont données.

2 Diffusion acoustique par un cylindre infini

L'objectif de cette partie est de rappeler de façon très succincte, les principales propriétés de la diffusion acoustique d'une onde plane harmonique par un cylindre élastique infini^[1]. Le cylindre, de rayon a , est fabriqué dans un matériau de masse volumique ρ_2 , les célérités des ondes s'y propageant étant c_l (onde longitudinale) et c_t (onde transversale). Le milieu externe au cylindre est un fluide parfait de masse volumique ρ_1 et de célérité des ondes c_1 . La géométrie du problème est décrite Figure 1. La direction de propagation de l'onde plane incidente d'extension infinie est perpendiculaire à l'axe OZ du cylindre mais fait un angle α avec l'axe OX. On étudie la diffusion dans le plan OXY en utilisant le système de coordonnées polaires (r, θ) .

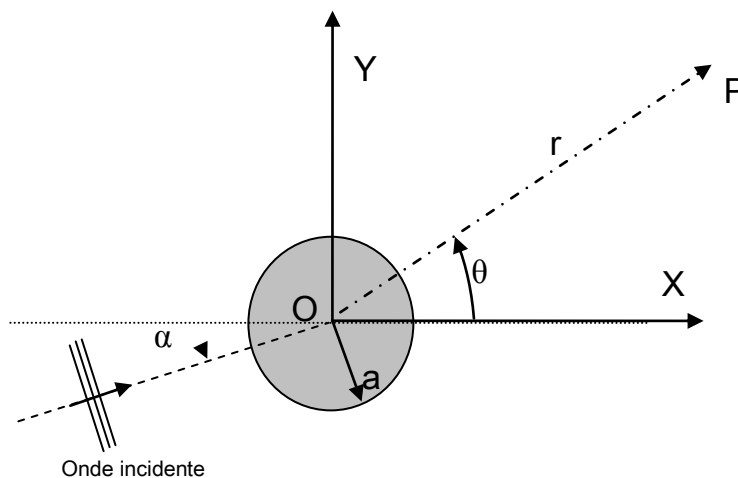


Figure 1 : Géométrie du problème

La solution recherchée est la pression diffusée par le cylindre au point P dans le fluide externe. Cette pression est la somme de l'onde incidente et de l'onde diffusée par le cylindre dans la direction θ .

2.1 Onde dans le milieu fluide

Dans le milieu fluide, il ne peut se propager qu'une seule onde longitudinale. Le potentiel de l'onde plane harmonique incidente peut s'écrire :

$$\phi_{inc} = \exp i(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t), \quad (1)$$

où $\vec{k}_1 = (k_1 \cos \alpha, k_1 \sin \alpha)$ est le vecteur d'onde associé, $k_1 = \|\vec{k}_1\| = \omega / c_1$ le nombre d'onde et $\vec{r} = (r \cos \theta, r \sin \theta)$ un vecteur indiquant le point d'observation P.

Le potentiel total ϕ_1 au point P est la superposition du potentiel de l'onde incidente ϕ_{inc} et du potentiel de l'onde diffusée par le cylindre élastique ϕ_{diff} :

$$\phi_1 = \phi_{inc} + \phi_{diff} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} i^n [J_n(k_1 r) + T_n H_n^{(1)}(k_1 r)] e^{in(\theta - \alpha)}. \quad (2)$$

où $J_n(k_1 r)$ désigne la fonction de Bessel de première espèce d'ordre n et $H_n^{(1)}(k_1 r)$ la fonction de Hankel de première espèce, d'ordre n . A partir de là, on déduit les pressions $p_{1inc} = -\rho_1 \omega^2 \phi_{inc}$ et $p_{1diff} = -\rho_1 \omega^2 \phi_{diff}$ relatives à l'onde incidente au point P.

Les coefficients T_n , souvent appelés coefficients de diffusion simple, sont des inconnues caractérisant la diffusion de l'onde acoustique par le cylindre. Ils sont déterminés via la résolution du système linéaire résultant de l'application des conditions aux limites.

Les résultats numériques peuvent également être présentés à l'aide de la fonction F_∞ appelée elle fonction de forme en champ lointain.

$$F_\infty(x_1, \theta) = \frac{2}{\sqrt{\pi x_1}} \left| \sum_{n=-\infty}^{+\infty} T_n e^{in(\theta - \alpha)} \right|. \quad (3)$$

2.2 Fonctions de forme

La fonction de forme en champ lointain permet de localiser les fréquences de résonances d'un cylindre. Les résultats numériques sont présentés pour des cylindres d'acier et des cylindres de polyéthylène. Les propriétés physiques de ces matériaux et de l'eau sont données dans le tableau ci-dessous.

Matériau	Masse volumique (kg m ⁻³)	Vitesse longitudinale (m s ⁻¹)	Vitesse transversale (m s ⁻¹)	Rayon du cylindre (mm)
Acier	7900	5900	3100	1
Polyéthylène	940	2370	800	1,5
Eau	1000	1470		

Tableau 1 : Propriétés physiques des matériaux utilisés.

Pour un cylindre, la fonction de forme en champ lointain F_∞ dépend essentiellement de trois variables, la fréquence, le rayon de cylindre et l'angle θ d'observation lorsque α est fixé^[2]. Les fonctions F_∞ pour les deux matériaux sont tracées en fonction de la fréquence à angle fixé $\theta = 0^\circ$ sur les Figures 2.

On remarque que les courbes présentent un fond non résonant continu d'amplitude croissante quand la fréquence augmente, auquel se superposent des transitions brusques ou des pics en certaines valeurs qui sont liées aux résonances du cylindre à des fréquences d'excitation particulières.

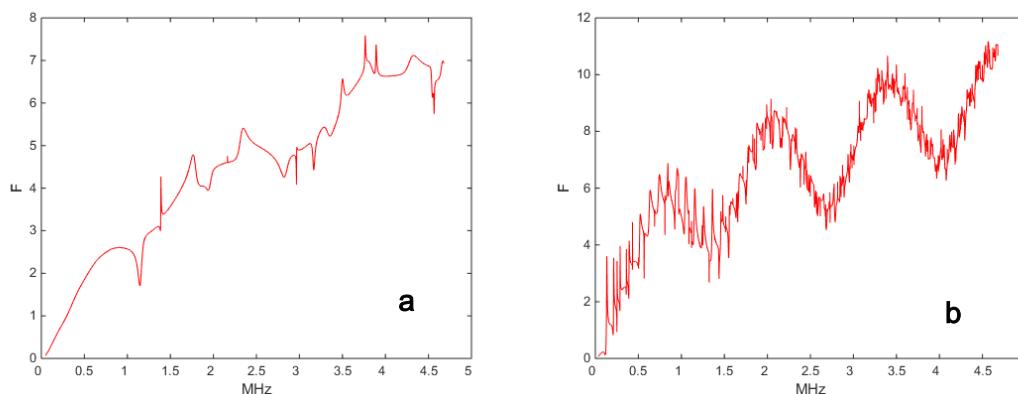


Figure 2: Fonctions de forme de diffusion vers l'avant ($\theta = 0^\circ$) pour un cylindre en acier (a) et pour un cylindre en polyéthylène (b)

On s'est borné ici au domaine fréquentiel $0 \leq f \leq 5\text{MHz}$ qui correspond à celui où existent les seules ondes de Scholte-Stoneley dites aussi ondes A. Ce sont des ondes se propageant autour du cylindre tout en ayant l'essentiel de leur énergie du côté du fluide. Elles sont appelées ondes externes et vont revêtir un intérêt particulier dans les structures telles que les réseaux car susceptibles de provoquer un couplage si les cibles sont suffisamment proches.

2.3 Comparaison avec les résultats expérimentaux

Pour vérifier les résultats théoriques, on met en œuvre un système expérimental (Figure 3). Les transducteurs sont immergés dans l'eau, on place les cylindres entre l'émetteur et le récepteur.

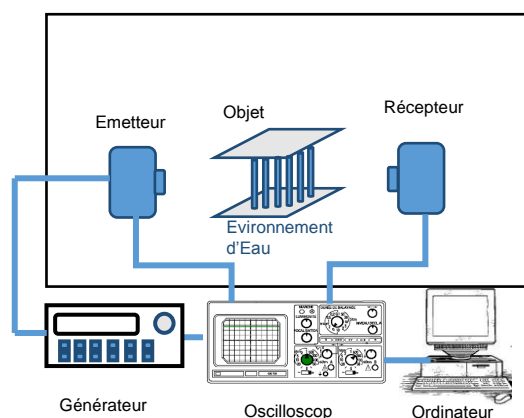


Figure 3 : Configuration expérimentale

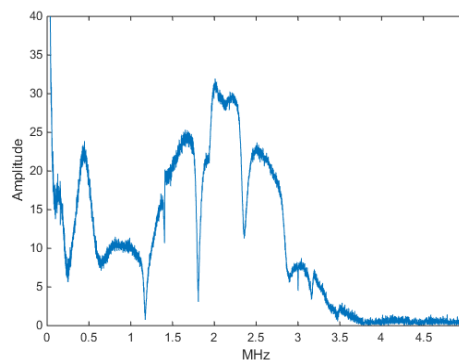


Figure 4 : FFT pour un cylindre en acier ($a = 1\text{mm}$)

On présente Figure 4 la transformée de Fourier (FFT) de la réponse impulsionnelle par un seul cylindre d'acier insoné avec un transducteur de fréquence centrale 2.25MHz. On observe que les minimums correspondent bien aux résonances qui sont détectables Figure 2-a.

3 Diffusion acoustique par des structures phononiques à N réseaux lineaires

3.1 Matrices de réflexion et de transmission pour N réseaux linéaires

L'existence de bandes interdites dans les structures phononiques unidimensionnelles (SP1D) aussi bien que bidimensionnelles (SP2D) a conduit à des applications variées telle que la mise au point de matériaux ou de dispositifs peu émissifs d'ondes ultrasonores dans le milieu aquatique utilisant des cylindres^{[3][4]}. Dans cette partie, nous étudions les coefficients de réflexion et de transmission des SP2D composées d'un nombre fini (N) de réseaux linéaires formés de cylindres en acier ou en polyéthylène immergés dans l'eau.

Notons par $\mathbf{R}(j-1)$ et $\mathbf{T}(j-1)$ les coefficients de réflexion et de transmission pour les $(j-1)$ réseaux groupés, puis par G_j et F_j les coefficients de réflexion et de transmission du réseau j et par \mathbf{I} la matrice identité de rang $(j-1)$. On peut déduire les coefficients de réflexion et de transmission du groupe de j réseaux.

$$\mathbf{T}(j) = \mathbf{T}(j-1) [\mathbf{I} - G_j \mathbf{R}(j-1)]^{-1} F_j \quad (4)$$

$$\mathbf{R}(j) = \mathbf{R}(j-1) + \mathbf{T}(j-1) [\mathbf{I} - G_j \mathbf{R}(j-1)]^{-1} G_j \mathbf{T}(j-1) \quad (5)$$

3.2 N réseaux identiques linéaires

D'abord, les calculs numériques sont effectués pour des réseaux de cylindres en acier. La distance D entre deux réseaux consécutifs est égale à la distance d entre 2 cylindres d'un réseau ($D = d = 3a$ avec $a = 1 \text{ mm}$). Les Figures 5-a et 5-b présentent les coefficients de transmission d'une structure formée de 32 réseaux horizontaux contenant des cylindres en acier et en polyéthylène. Le calcul a été fait pour un angle d'incidence de 0° .

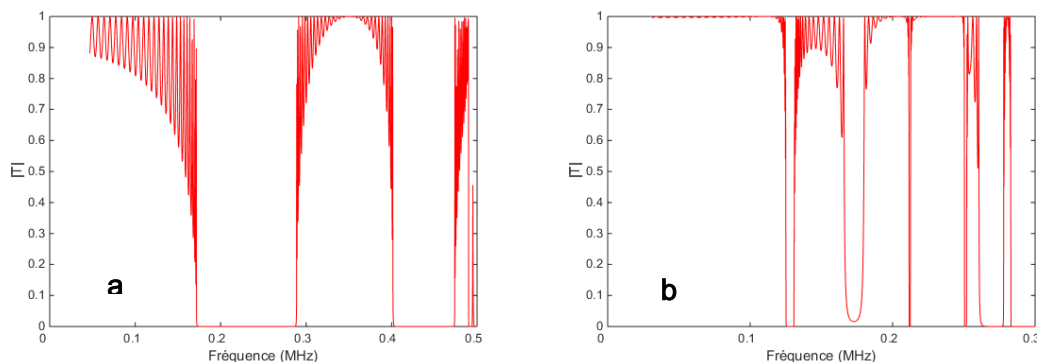


Figure 5 : Coefficients de transmission de 32 réseaux en acier (a) et en polyéthylène (b)

Sur les deux figures, la fréquence 168 kHz est située dans la bande interdite du réseau en polyéthylène tout en étant dans la bande passante du réseau en acier. Expérimentalement, les relevés se font à cette fréquence, car on cherche à vérifier qu'il y a guidage d'onde dans le réseau en acier.

4. Guidage d'ondes ultrasonores dans des structures phononiques

Dans cette partie nous abordons des structures plus complexes^[5]. On étudie la structure dans laquelle un réseau de cylindres en acier est inséré entre deux réseaux de cylindres en polyéthylène, Figure 6.

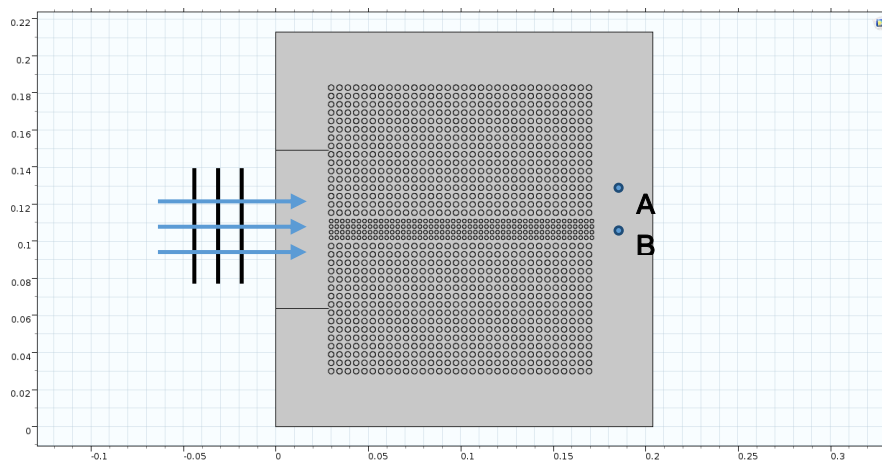


Figure 6 : Structure de guide linéaire

Pour les simulations temporelles, on envoie un signal harmonique de fréquence 168 kHz sur la structure, en insonant à la fois les cylindres en acier et ceux en polyéthylène.

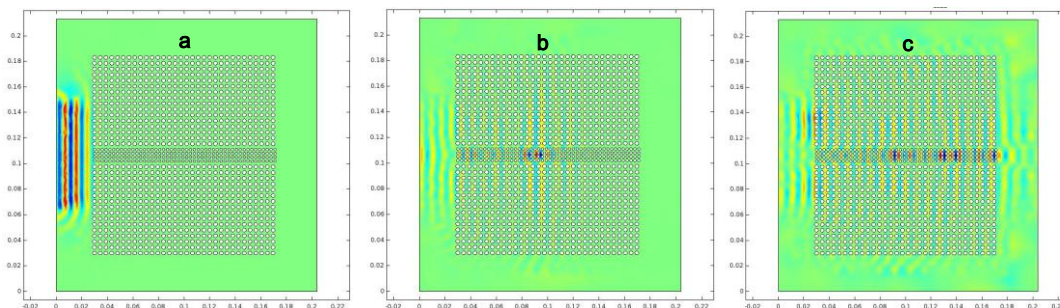


Figure 7 : Simulations numériques pour le guide d'onde linéaire

La Figure 7 ; montre les simulations à 3 instants différents. On peut bien suivre le trajet linéaire de l'onde dans le guide de la gauche vers la droite. Ensuite, on relève les signaux reçus aux points A et B à la sortie de la cible (Figure 6). Ces signaux sont présentés sur la Figure 8. On constate que l'amplitude maximum du signal reçu au point A est plus élevée que celle au point B. Quand on fait le rapport des maximum d'amplitude de ces signaux, on obtient 0,28.

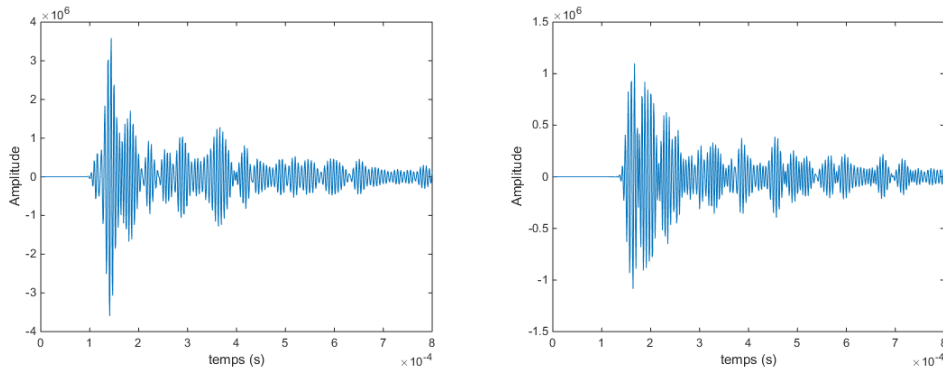


Figure 8 : Signaux temporels aux points A et B obtenus par simulation.

Dans la dernière partie, on utilise l'environnement expérimental montré Figure 3. Les signaux temporels expérimentaux reçus aux positions A et B sont donnés Figure 9-a et 9-b, qu'on compare aux résultats de simulation.

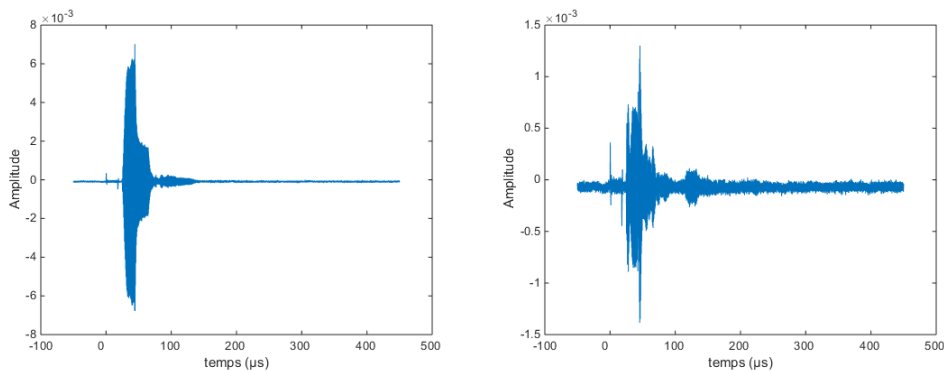


Figure 9 : Signaux temporels expérimentaux aux point A et B

On observe que les formes des signaux numériques et expérimentaux sont similaires et le rapport des amplitudes des maximums expérimentaux aux points A et B est de 0.2. Donc on peut constater que les rapports d'amplitude sont du même ordre de grandeur numériquement et expérimentalement.

On souligne le fait que dans les simulations précédentes (Figure 8), le matériau le plus dense (acier) est celui utilisé pour assurer le guidage. Pour pouvoir guider une onde il faut que la fréquence de l'onde plane incidente soit telle qu'elle se trouve à la fois dans une bande passante de l'acier et dans une bande interdite du polyéthylène. On montre par ailleurs qu'on ne peut pas intervertir le rôle des cylindres en polyéthylène et en acier, à la fréquence choisie. En effet, il faudrait dans ce cas sélectionner une fréquence dans une bande passante du réseau en polyéthylène et une bande interdite du réseau en acier.

5 Conclusion

Dans ce papier, on montre qu'un guidage d'onde existe dans le réseau métallique inséré dans les réseaux de cylindres plastiques. On a comparé les signaux de simulations et expérimentaux. Dans les deux cas, on a placé un récepteur soit en face du guide, soit éloigné de celui-ci. La comparaison des rapports d'amplitude dans ces deux cas a validé les résultats de simulations. Des simulations de structures plus complexes ont porté sur des guides d'onde présentant une courbure. Les expériences sur ces types de structure sont en cours.

Références

- [1] G. Maze, Méthode d'isolement et d'identification des résonances (MIIR) in N. GESPA, La diffusion acoustique par des cibles élastiques de forme géométrique simple, Editions du CEDOCAR (1987)
- [2] L. Flax, L. R. Dragonette, H. Überall, Theory of elastic resonance excitation by sound scattering, J. Acoust. Soc. Am, 63(3),723-731 (1978)
- [3] A. Khelif, P. A. Deymier, B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, and L. Dobrzynski, Two-dimensional phononic crystal with tunable narrow passband: Application to a waveguide with selective frequency, J. Appl. Phys. 94(3), 1308–1311 (2003).
- [4] L. Sanchis, F. Cervera, J. Sanchez-Dehesa, J. V. Sanchez-Perez, C. Rubio, and R. Martinez-Sala, Reflectance properties of two-dimensional sonic band-gaps crystals, J. Acoust. Soc. Am. 109(6), 2598–2605 (2001).
- [5] Zhaojian He, Feiyan Cai, Zhengyou Liu, Guiding acoustic waves with graded phononic crystals, Solid State Communications 148, pp. 74-77 (2008)