

# DIFFRACTION DANS LES CRISTAUX PHONONIQUES

**MOISEYENKO Rayisa P.**

Sciences pour l'ingénieur

Institut FEMTO-ST (UMR6174), Université de Franche-Comté

École doctorale Sciences pour l'ingénieur et microtechniques

## *Présentation de l'auteur*

Rayisa P. Moiseyenko est doctorante en troisième année à l'université de Franche Comté, UMR6174 Femto-st, Ecole Doctorale SPIM. Elle est encadré par Dr. Vincent Laude (Femto-st, Besançon) et Dr. Nico F. Declercq (GeorgiaTech Lorraine, Metz). Elle a obtenu son Master dans le domaine de Mathématique appliquées à l'université Nationale de Donetsk, Ukraine. Rayisa a été coauteur des 10 articles publiées dans les journaux internationaux et matériaux de conférence. Ces intérêts scientifiques se focalisent sur la domaine acoustique en particulier sur l'étude structures périodique – cristaux phononiques.

## *Résumé*

Les ondes font partie de notre expérience quotidienne et de notre environnement : les champs de blé sous le vent ou nos téléphones portables et nos télévisions qui comportent des filtres électroniques exploitant des ondes acoustiques à haute fréquence . Les cristaux phononiques (CP) forment une branche nouvelle et dynamique du domaine des ondes acoustiques et élastiques qui reçoit un grand intérêt depuis 20 ans. Ces sont par définition des structures périodiques artificielles constituées d'au moins deux matériaux différents. Ils sont capables de prohiber la propagation des ondes acoustiques qui voudraient les traverser. L'objet thèse est d'explorer dans quelle mesure les cristaux phononiques peuvent être employés comme réseaux de diffraction, et en particulier de déterminer s'il est possible d'obtenir des efficacités de diffraction approchant 100% en exploitant leurs bandes interdites

## *Mots-clés:*

Réseaux de diffraction, ondes acoustiques, cristal phononique, bande interdite

## Title

Diffraction in phononic crystals

## The author

Rayisa P. Moiseyenko is a PhD student in her third year at the University of Franche-Comté (UMR6174, FEMTO-ST, Ecole Doctorale SPIM) under the direction of Dr. Vincent Laude (FEMTO-ST, Besançon) and Pr. Nico F. Declercq (Georgia Tech Lorraine, Metz). She earned her master's in the field of applied mathematics in 2007 at National University of Donetsk in Ukraine. Rayisa is the author or co-author of 10 articles appearing in several international reviews and conference proceedings. Her scientific interests focus on the field of acoustics and in particular on the study of periodic structures and phononic crystals.

## Summary

Waves are a part of our daily experience and environment, as demonstrated by the undulations in the fields of wheat in the wind or the presence in our mobile telephones and televisions of electronic filters exploiting high frequency acoustic vibrations. Phononic crystals form a new and dynamic branch in the field of acoustic and elastic waves and have been a focus of interest for 20 years. They are, by definition, artificial periodic structures composed of two different materials. They are capable of prohibiting the propagation of acoustic waves attempting to pass through them. The object of this article is to explore to what measure phononic crystals can be used as diffraction gratings, and in particular, to determine whether or not it is possible to obtain diffraction efficiencies approaching 100% in the exploitation of forbidden band widths.

## Key words

Acoustic waves, phononic crystal, band gap, diffraction.

# 1 Introduction

Les cristaux phononiques (CP) forment une branche nouvelle et dynamique du domaine des ondes acoustiques et élastiques qui reçoit un grand intérêt depuis 20 ans [KUSHWAHA, 1993]. Ce sont par définition des structures périodiques artificielles constituées d'au moins deux matériaux différents. Ils sont capables de prohiber la propagation des ondes acoustiques qui voudraient les traverser.

La singularité des cristaux phononiques peut être comprise à partir de l'exemple d'une forêt imaginaire, dans laquelle les arbres seraient plantés selon un plan parfaitement périodique. On peut supposer par exemple que la distance entre deux arbres voisins serait toujours la même tandis que l'épaisseur d'un tronc serait d'environ un mètre. Un promeneur suivant un chemin dans cette forêt pourrait constater que les sons lui parviennent déformés. Plus précisément, d'un orchestre jouant à proximité, il entendrait distinctement les sons graves des contrebasses ou les sons aigus des violons, mais s'apercevrait qu'il n'entend pas tous les autres instruments ! Cette atténuation du son dans une certaine bande de fréquence est la signature de l'existence d'une bande interdite, elle-même conséquence de l'arrangement périodique des arbres. Une telle forêt est un exemple de ce que les physiciens nomment un cristal phononique.

La première étude expérimentale du filtrage sonore par une structure périodique artificielle ou cristal phononique a été réalisée en 1995 par Francisco Meseguer et ses collaborateurs [MARTINEZ-SALA, 1995] sur une sculpture minimaliste de Eusebio Sempere (1923-1985) qui se trouve dans un jardin de Madrid. Cette sculpture présente un agencement périodique bidimensionnel de tubes d'acier. Dans l'expérience elle était entourée de microphones afin de mesurer la transmission du son la traversant. Les mesures ont montré l'atténuation de certaines fréquences, ce qu'aucun phénomène d'absorption ne peut expliquer, les tubes d'acier étant excessivement raides et se comportant comme des diffuseurs très efficaces pour les ondes sonores. L'explication avancée est fondée sur la diffusion des ondes par la structure périodique. Les multiples ondes diffusées par les tubes d'acier interfèrent entre elles pour sculpter le spectre sonore. Dans le cas où les interférences sont destructives, on parle de bande interdite car les ondes acoustiques sont rapidement atténuées à la traversée du cristal phononique.

Le domaine des cristaux phononiques a bien-sûr progressé significativement depuis les premières expériences de 1995, mais il subsiste certains aspects à explorer ou simplement comprendre. La propagation des ondes élastiques dans les milieux fluides ou solides, et plus particulièrement dans les cristaux phononiques, est tout d'abord décrite dans les sections 2 et 3 de cet article. Ces concepts initiaux exposés, je formule dans les sections suivantes la question principale qui sous-tend mes travaux de thèse. Les cristaux périodiques artificiels sont utilisés depuis longtemps pour d'autres propriétés que leurs bandes interdites, par exemple pour provoquer la diffraction des ondes. Bien

avant que le terme même de cristal phononique ait été imaginé, et sans que la notion de bande interdite soit nécessaire, les réseaux de diffraction étaient employés pour le filtrage spectral et angulaire des ondes. L'objet de ma thèse est d'explorer dans quelle mesure les cristaux phononiques peuvent être employés comme réseaux de diffraction, et en particulier de déterminer s'il est possible d'obtenir des efficacités de diffraction approchant 100% en exploitant leurs bandes interdites. Dans la section 4, je formule un modèle de la diffraction par un cristal phononique. Dans la section 5, je présente des résultats expérimentaux sur un cristal phononique qui était disponible au laboratoire mais qui n'a pas spécialement été conçu pour être un réseau de diffraction efficace ; les résultats permettent néanmoins de vérifier les concepts proposés. Dans la section 6, je présente la conception d'un cristal phononique s'inspirant des réseaux de diffraction blasés, qui permet en théorie d'obtenir une très bonne efficacité de diffraction. Enfin, la conclusion de la section 7 est l'occasion de formuler quelques perspectives de ces travaux.

## **2 Ondes élastiques et acoustiques**

Une onde élastique ou acoustique est une perturbation d'un milieu matériel qui se propage dans le temps et l'espace. On peut par exemple exciter une onde simplement en frappant un mur. Il existe plusieurs classifications des ondes selon le milieu dans lequel elles se propagent et selon les caractéristiques de la propagation. On peut également les diviser dans des groupes différents en fonction de leur domaine de fréquence (fig. 1). Les ondes font partie de notre expérience quotidienne et de notre environnement : les champs de blé sous le vent ou les ondulations de la surface de l'eau qui suivent l'impact d'un caillou sont des manifestations de cette classe de phénomènes. Les ondes sonores se propagent dans l'atmosphère ; par leur entremise on entend la parole humaine. Les ondes acoustiques, qui se propagent dans les milieux fluides ou solides, sont utilisées dans des domaines aussi variés que l'imagerie échographique du corps humain, la détection et la localisation d'objets sous-marins (le sonar), ou l'étude des séismes et des mouvements de l'écorce terrestre. Nos téléphones portables et nos télévisions comportent des filtres électroniques exploitant des ondes acoustiques à haute fréquence dans des cristaux synthétiques exotiques, tels le tantalate de lithium. Toutes les ondes acoustiques sont composées de vibrations progressives des atomes composant le milieu de propagation. Dans un solide par exemple, les atomes sont contraints de rester en moyenne autour de leur position d'équilibre, et l'onde se propage en mettant en mouvement une succession de plans cristallins. On parle dans ce cas plus précisément d'ondes élastiques. Les vitesses mises en jeu sont de l'ordre de quelques milliers de mètres par seconde en général dans les milieux solides.

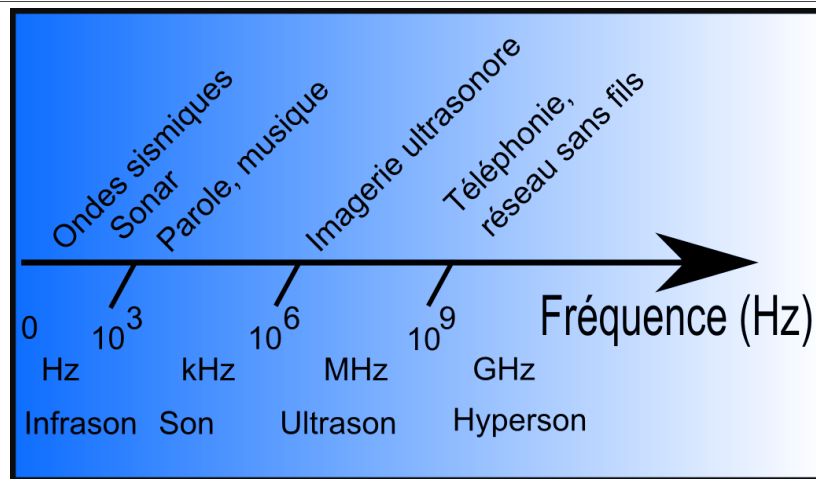


Figure 1 : Son (dans l'air), ondes acoustiques (dans les liquides), ondes élastiques (dans les solides) font partie d'une seule et même famille d'ondes couvrant un large spectre de fréquences et d'applications.

Même dans un milieu solide isotrope – pour lequel les propriétés du milieu sont les mêmes dans toutes les directions – les déplacements qui accompagnent les ondes peuvent être de deux types différents, transverse et longitudinal [ROYER, 1999]. Dans le premier cas, le mouvement des atomes autour de leur position d'équilibre s'effectue dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Dans le second cas, celui d'une onde longitudinale ou onde de pression, la direction de ce mouvement est parallèle à la direction de propagation. Les ondes transverses et longitudinales sont représentées schématiquement (fig. 2)

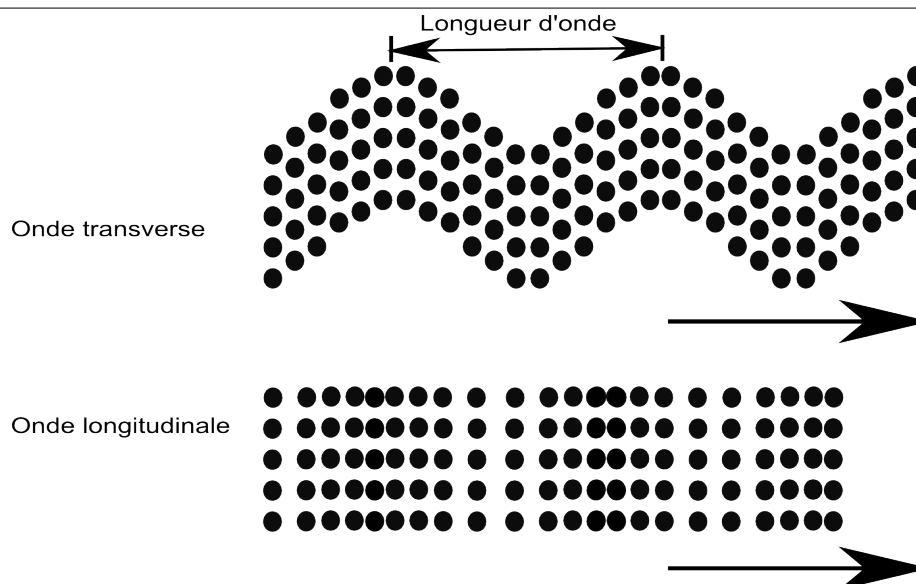


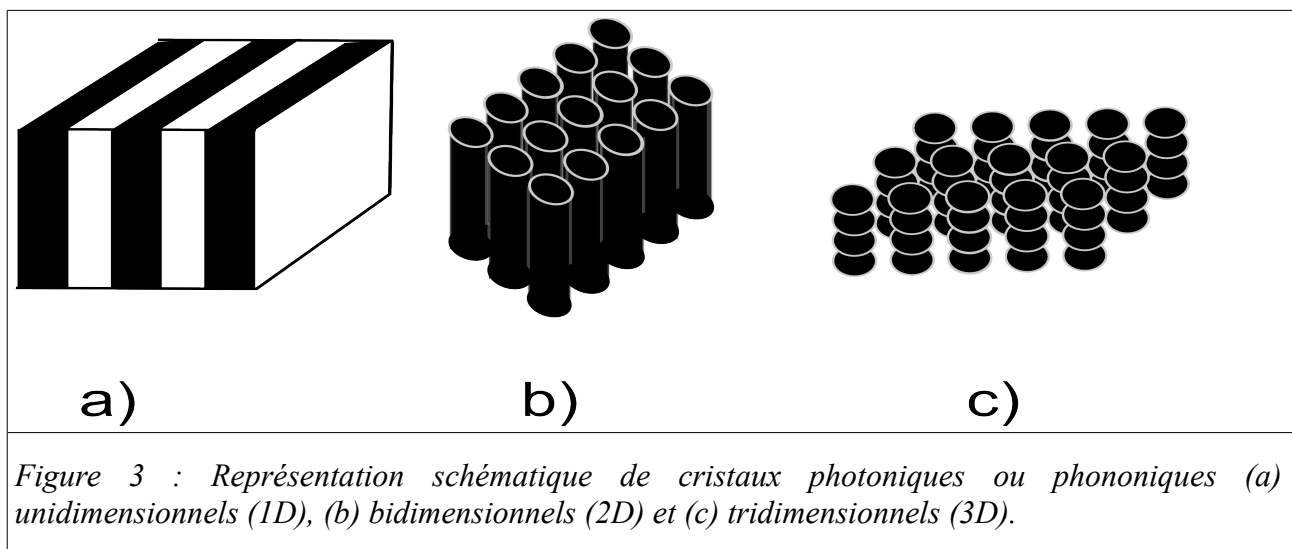
Figure 2 : Représentation schématique d'une onde transverse et longitudinale.

Cet aspect est important parce que les milieux considérés dans mes travaux de thèse sont solides ou fluides. Dans un milieu solide, les deux types des ondes sont présents tandis que dans un milieu

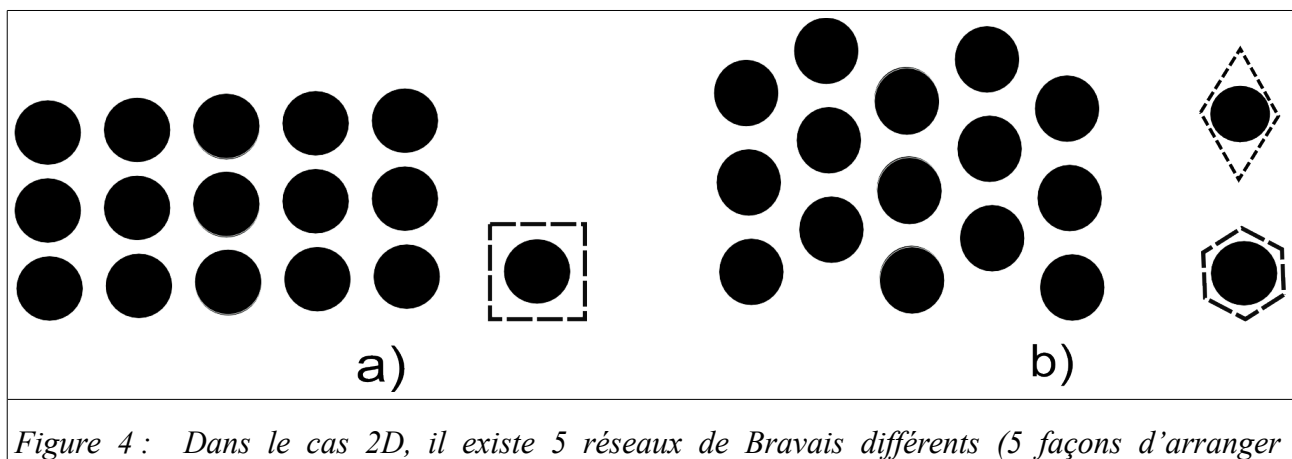
fluide seules les ondes de pression existent. Ce fait doit être pris en compte pour la modélisation des problèmes combinant solides et fluides.

### 3 Cristaux phononiques

Les cristaux phononiques sont des structures uni- deux- et trois dimensionnelles composées d'au moins deux matériaux ayant des propriétés élastiques différentes (fig. 3). Leur propriété la plus importante est l'existence potentielle de bandes interdites. Il s'agit de bandes de fréquences pour lesquelles la pénétration des ondes dans le cristal est interdite. L'apparition de bandes interdites n'est possible sous des conditions spécifiques dépendant du choix des matériaux et des paramètres géométriques des structures.



Bien que tous les cristaux phononiques réels soient des objets de l'espace physique à trois dimensions, le nombre de périodicités varie de 1 à 3 et est une caractéristique essentielle (fig. 3). D'un point de vue théorique, l'étude des propriétés phononiques est de complexité croissante avec le nombre de périodicités. Les propriétés intrinsèques des cristaux périodiques infinis sont obtenues en considérant une cellule élémentaire – l'unité de périodicité (fig. 4).



*périodiquement un motif élémentaire sur une surface plane) ; deux sont représentés ici avec leur cellule élémentaire : (a) le réseau carré et (b) le réseau hexagonal. Dans ce dernier cas, deux cellules élémentaires possibles sont également représentées.*

Outre le choix des matériaux, les paramètres géométriques qui jouent sur les propriétés phononiques sont la symétrie du réseau périodique et le facteur de remplissage de la cellule élémentaire. Le facteur de remplissage désigne la proportion de surface ou de volume de la cellule élémentaire occupe l'inclusion. Les réseaux carré et triangulaire ainsi que leurs cellules élémentaires sont représentés sur la (fig. 4). En faisant varier ces paramètres, on peut élargir les bandes interdites ou au contraire les faire disparaître complètement.

Les applications des cristaux phononiques restent pour l'heure potentielles, mais ils sont généralement considérés en tant que guides d'ondes ou filtres acoustiques. L'idée du filtre pour les fréquences audible a été décrite en introduction dans le cas d'une forêt plantée périodiquement. Mais pourquoi ces structures peuvent-elles être des guides d'ondes efficaces ? Si on imagine qu'on enlève une rangée d'arbres de la structure périodique, le son peut maintenant s'y engouffrer. Pour des fréquences situées dans une bande interdite, le son peut voyager sans pertes dans l'espace ménagé et il y reste même confiné. Cela s'explique par le fait que les cotés de guide n'absorbent pas les ondes mais au contraire agissent comme des miroirs qui les repoussent hors de la structure périodique.

## **4 Modélisation de la diffraction dans les cristaux phononiques**

Les travaux réalisés au cours de cette thèse concernent la diffraction dans les cristaux phononiques. Dans ce domaine, la diffraction est en général considérée comme un effet indésirable, voire néfaste. La plupart des travaux de la littérature considèrent des domaines de fréquences pour lesquels un cristal phononique est soit transparent soit opaque aux ondes, pour une onde incidente donnée. Or, la diffraction est un phénomène qui génère de nouvelles ondes propagatives à partir de l'onde incidente, à partir des réflexions ou diffusions multiples dans le réseau périodique. Ce phénomène apparaît en général au dessus d'une certaine fréquence de coupure, qui devient donc une borne supérieure limitant le domaine où la diffraction se manifeste de celui où elle ne le peut pas. La première bande interdite de Bragg apparaît de façon générale à des fréquences légèrement inférieures à la fréquence de coupure de la diffraction. Il existe de sorte peu ou pas de travaux qui considèrent les cristaux phononiques en régime de diffraction. Mes travaux de thèse consistent à explorer théoriquement et expérimentalement cette question.

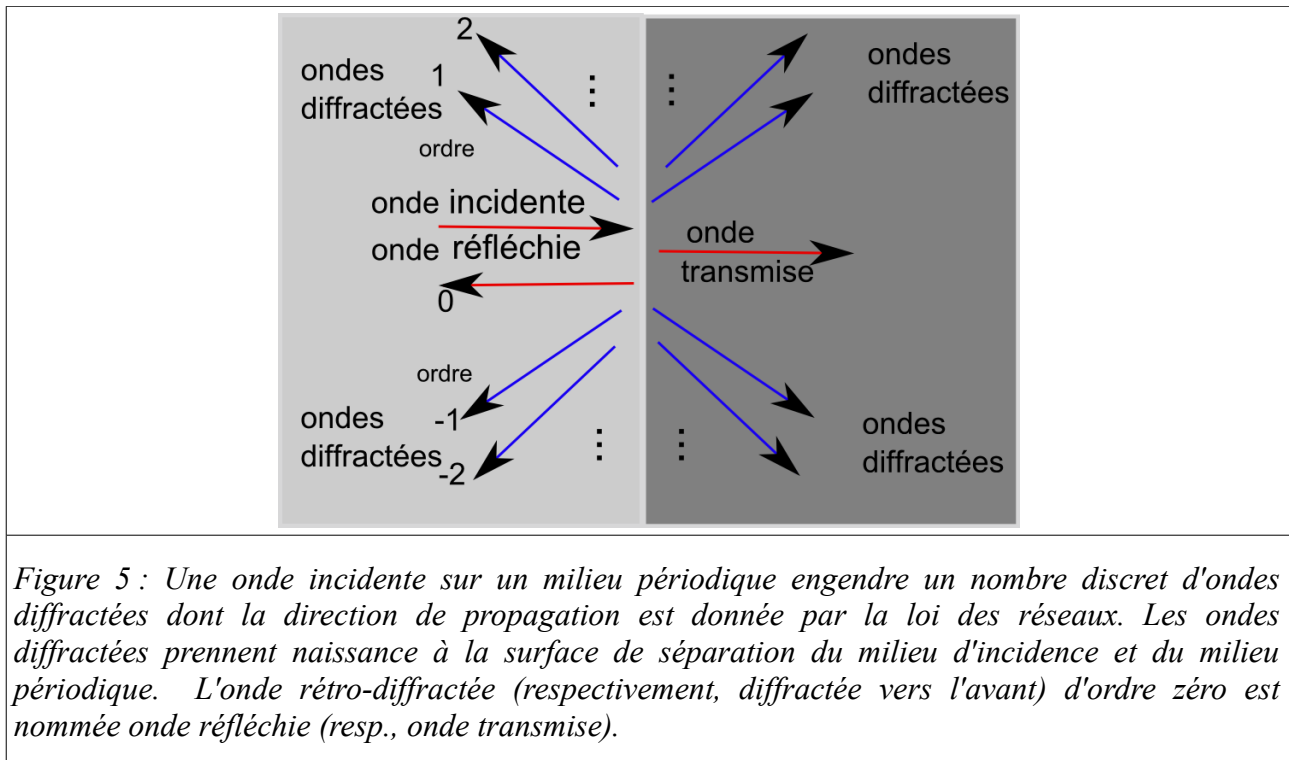


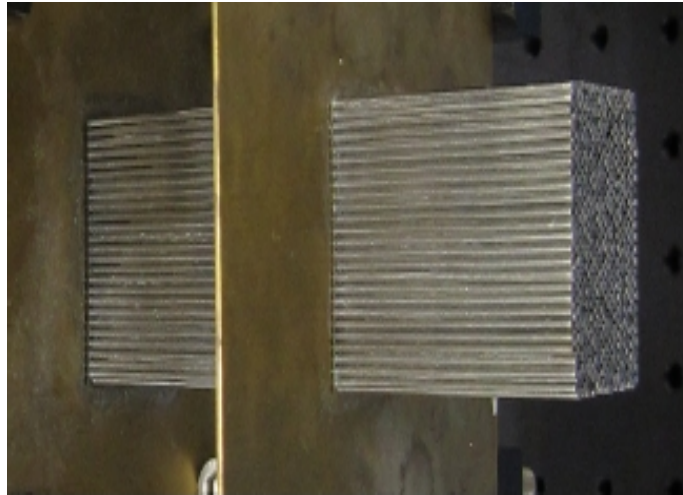
Figure 5 : Une onde incidente sur un milieu périodique engendre un nombre discret d'ondes diffractées dont la direction de propagation est donnée par la loi des réseaux. Les ondes diffractées prennent naissance à la surface de séparation du milieu d'incidence et du milieu périodique. L'onde rétro-diffractée (respectivement, diffractée vers l'avant) d'ordre zéro est nommée onde réfléchie (resp., onde transmise).

La notion de diffraction est très bien connue et largement exploitée en optique. Les réseaux de diffraction permettent la décomposition de lumière en un spectre de couleurs dispersées dans différentes directions [LOEWEN, 1997]. De nombreux exemples des filtrage de nature esthétique ou stratégique existent depuis bien longtemps dans la nature. Par exemple, les magnifiques reflets bleu-vert des ailes de papillon *Princeps Nireus* sont dus à l'interaction entre la lumière ambiante et la microstructuration naturelle de leurs ailes. Le phénomène physique sous-jacent est la diffraction de la lumière par la microstructuration dont la périodicité est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière incidente. Le même type de phénomène a été trouvé pour les ondes acoustiques et élastiques [ROYER, 1999] L'onde en rencontrant des obstacles placés périodiquement peut être transmise, réfléchi et diffracté (avec un angle différent de l'angle d'incidence), comme le représente la (fig. 5). Comme expliqué précédemment, les ondes diffractées apparaissent à partir d'une certaine fréquence qui dépend du pas de réseau, du contenu de la cellule élémentaire et des propriétés des milieux. Quand la fréquence est augmentée, les ondes diffractées dans les premiers ordres apparaissent tout d'abord (ordres 1 et -1), puis les ondes diffractées dans le deuxième ordre (ordres 2 et -2), et ainsi de suite. Les modèles mathématiques élémentaires sont décrits dans [ROYER, 1999].

Afin de donner une idée plus concrète du problème considéré, je montre (fig.6) une photographie d'un cristal phononique réalisé au laboratoire et sur lequel j'ai effectué des mesures. Le réseau considéré est triangulaire et a été construit en utilisant 575 tiges cylindriques d'acier insérées dans des plaques d'alignement perforées périodiquement [HSIAO, 2007]. Chaque tige a un diamètre de

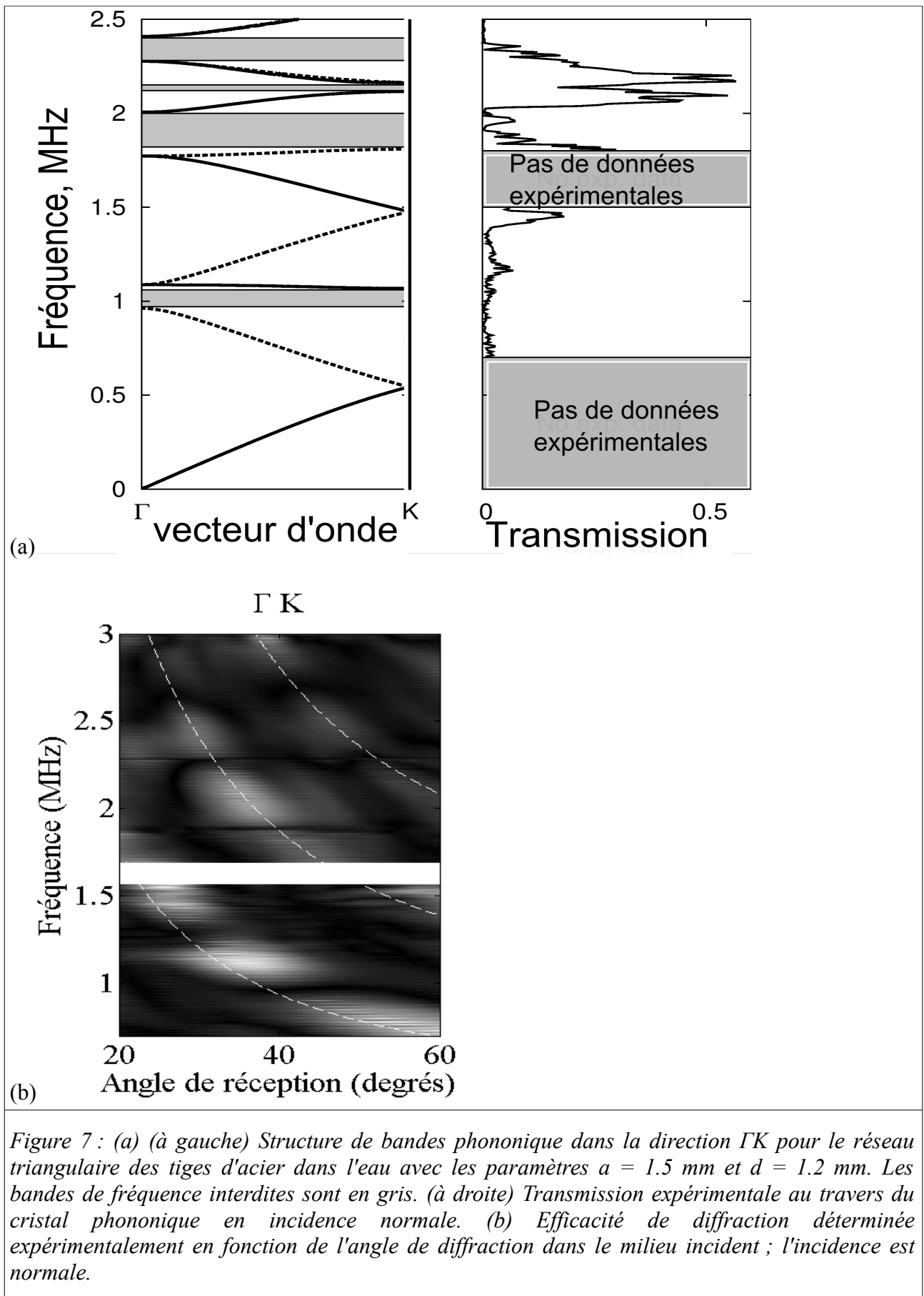


1.2 mm et une longueur de 150 mm. La distance entre deux tiges est de 1.5 mm.



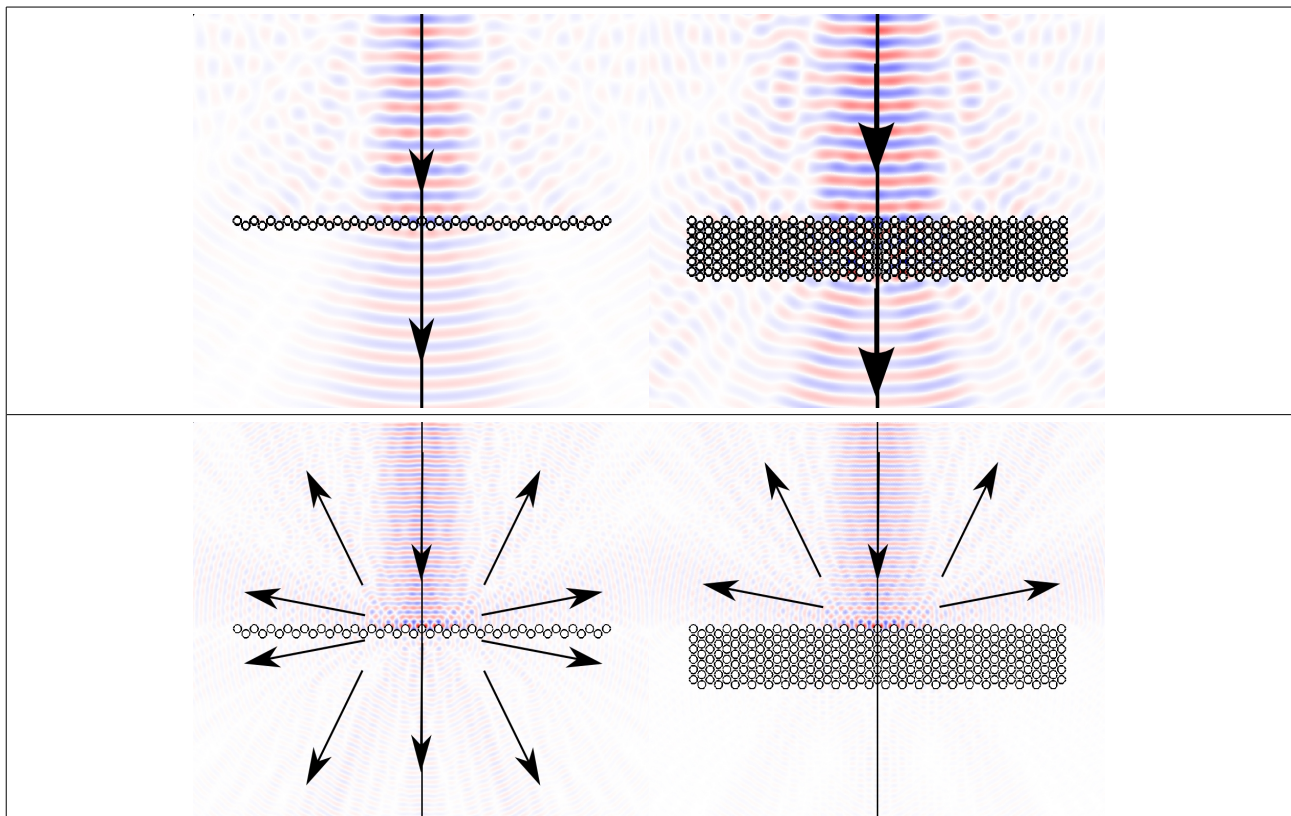
*Figure 6 : Échantillon de cristal phononique composé des tiges d'acier insérées dans des plaques d'alignement perforées. Le diamètre des tiges est  $d=1.2$  mm et la période est  $a=1.5$  mm. Afin d'effectuer les mesures, le cristal phononique est immergé dans une cuve remplie d'eau.*

La modélisation de la diffraction d'une onde incidente par un cristal phononique demande de connaître précisément les modes propres de propagation dans le cristal. Il existe plusieurs méthodes pour résoudre ce problème. J'ai personnellement travaillé sur la base de deux d'entre elles : la méthode des éléments finis [LAUDE, 2011] et la méthode de décompositions en ondes planes (PWE) [MOISEYENKO, 2011]. Afin de ne pas compliquer outre mesure la présentation de cet article, je me contente de décrire brièvement ce que ces méthodes permettent d'obtenir. Le résultat principal de ce type de simulation numérique porte le nom de diagramme de dispersion, ou structure des bandes. Celle-ci montre pour chaque fréquence les ondes – ou modes de Bloch – qui sont susceptibles d'exister ; elle montre de plus quelles régions de fréquence sont des bandes interdites mais également si des bandes sourdes [RUBIO, 1999] peuvent exister. Les détails sont décrits dans les références citées, néanmoins il faut noter que ces structures de bande sont calculées pour une cellule élémentaire, ce qui explique leur modélisation relativement aisée. Le temps de calcul nécessaire pour caractériser une structure périodique infinie (fig. 7) est clairement plus court que celui qui est nécessaire pour analyser un cristal phononique de dimensions finies (figs. 8 et 11).



Le cas des cristaux phononiques de dimensions finies a été modélisé par l'entremise du logiciel

d'éléments finis Comsol Multiphysics [COMSOL, 2008]. (Fig. 8) illustre les propriétés de bande interdite et de diffraction. Les images montrent la distribution de la pression acoustique dans l'eau. Sur ces figures, les tiges d'aciers (représentées par des cercles) sont entourées. Un cristal phononique de 2 couches est représenté à gauche tandis qu'un cristal de 12 couches est représenté à droite. L'onde incidente ainsi que les ondes transmises et diffractées sont repérées par des flèches. Deux fréquences ont été sélectionnées : 0.4 MHz et 1.05 MHz. Pour la première fréquence, il n'y a ni bande interdite ni diffraction ; nous sommes dans le cas simple où l'onde acoustique traverse le cristal. La seconde fréquence correspond à une bande interdite, précisément la seconde bande interdite de Bragg, pour laquelle les ordres de diffractions -1 et +1 peuvent être excités. Quand le cristal phononique est suffisamment épais, toute traversée du cristal est inhibée et le cristal phononique se comporte comme un « miroir diffractant ». Pour seulement 2 couches de cristal phononique, l'effet est bien moins prononcé et on voit qu'une certaine proportion de l'onde incidente est transmise et diffractée vers l'avant.



*Figure 8 : Simulation par éléments finis de la distribution de pression créée par une source qui émet des ondes planes en incidence normale sur un cristal phononique de réseau triangulaire orienté suivant la direction GK. Un cristal phononique comportant 2 couches (à gauche) et 12 couches (à droite) est considéré. Par ailleurs, la première ligne montre des simulations numériques pour la fréquence 0.4 MHz, tandis que la fréquence est de 1.05 MHz pour la seconde ligne.*

## 5 Étude expérimentale de la diffraction

Des mesures ont été effectuées avec le cristal phononique représenté (fig. 6) plongé dans une cuve d'eau. L'expérience de mesure ultra-sonore de type *polar/C-scan* est schématisé sur la (fig. 9(a)). Un transducteur permet l'émission des ondes de pression, tandis qu'un transducteur récepteur permet les mesures de transmission ou de diffraction vers l'arrière. La mesure de la transmission signifie la mesure de l'efficacité de diffraction dans l'ordre 0 transmis (*C-scan*). En d'autres termes, on mesure l'intensité des ondes acoustiques qui pénètrent à travers du cristal et ne changent pas de direction en sortant du cristal. Cette transmission est présentée en fonction de la fréquence (fig. 7(a)). Par ailleurs, les mesures de diffraction vers l'arrière sont effectuées en balayant l'angle de réception (*polar scan*). Ces mesures renseignent sur les ondes qui sont à la fois réfléchies et diffractées dans les ordres supérieurs. Les scans angulaires présentés (fig. 7 (b)) permettent de préciser la relation de dispersion qui lie fréquence d'émission et angle de diffraction. Pour des raisons pratiques liées aux montures des transducteurs et de l'échantillon, la région angulaire accessible est de  $40^\circ$ . Il faut noter qu'en raison des contraintes imposées par le robot *polar/C-scan*, les mesures de diffraction ont été faites à l'extérieur de la seconde plaque de support, alors que de meilleures mesure auraient pu être faites pour la région du cristal placée entre les deux plaques, pour laquelle le parallélisme des tiges est mieux garanti.

Afin de couvrir une large plage de fréquence, deux paires distinctes de transducteurs ont été utilisées. Le premier paire possède une fréquence centrale de 1 MHz (modèle Valpey-Fisher IS0104GP), et la seconde une fréquence centrale de 2.25MHz (modèle Technisonics ISL-0203-SP). Le diamètre des ondes émises par ces transducteurs est de 10 mm. Les spectres de fréquence mesurés dans l'eau en l'absence du cristal phononique sont présentés (fig. 9(b)). Il est apparent qu'en l'absence de recouvrement des spectres d'émission des transducteurs utilisés, nous ne pouvons obtenir de données pour les fréquences comprises entre 1.5 MHz et 1.8 MHz. La résolution angulaire pour les scans est de  $0.1^\circ$ .

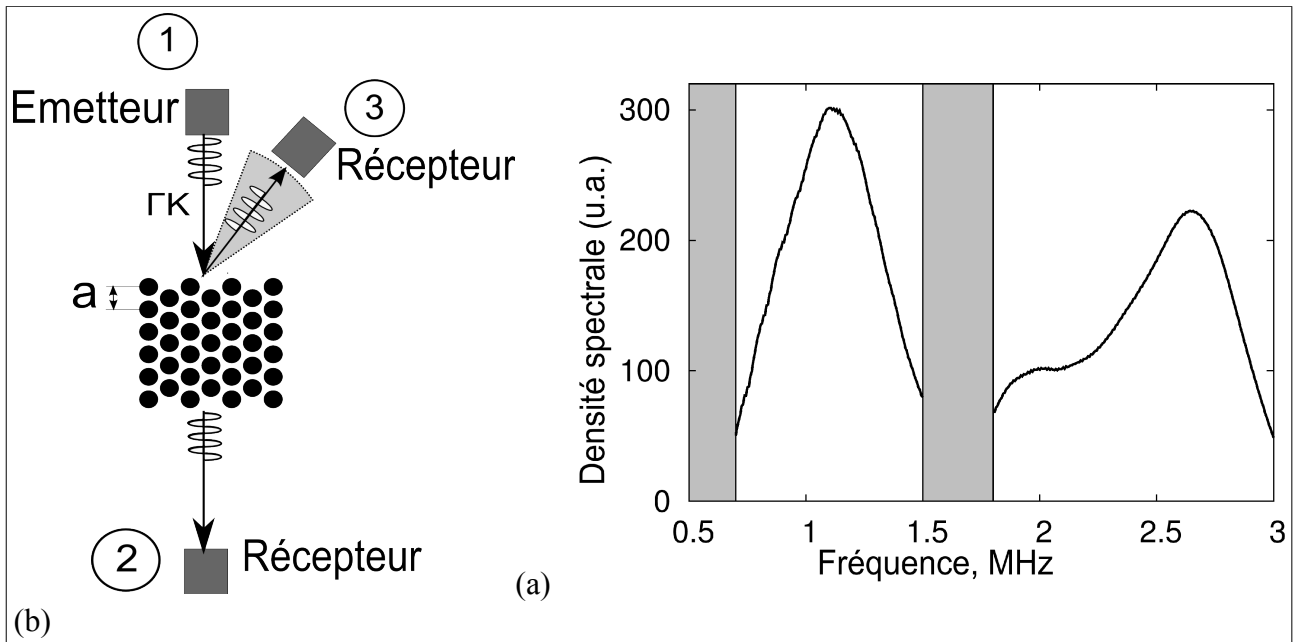


Figure 9 : (a) Configuration expérimentale pour les mesures de diffraction (1-3) et de transmission (1-2) pour la direction  $\Gamma K$  du cristal phononique. La périodicité apparente du cristal phononique considéré comme réseau de diffraction est  $b = \sqrt{3}a$ . (b) Transmission expérimentale en fonction de la fréquence (en unités arbitraires) pour les deux paires des transducteurs. Ces mesures sont utilisées pour normaliser les mesures de transmission et de diffraction en présence du cristal phononique.

Les mesures de diffraction sont effectuées entre 0.7 et 3 MHz. L'efficacité de diffraction est représentée (fig. 7(b)) par la variation de couleur du noir (faible efficacité) jusqu'au blanc (forte efficacité). La dispersion théorique des ordres de diffraction est superposée aux données expérimentales. Cette dispersion est calculée en utilisant la loi des réseaux pour un réseau de diffraction équivalent dont la période est donnée par la période de l'interface entre cristal phononique et milieu incident, soit  $b = \sqrt{3}a$  comme représenté (fig. 9(a)). On observe que l'expérience permet d'évaluer la façon dont l'énergie incidente se répartit entre les ordres de diffraction. On trouve que la dispersion de chaque ordre de diffraction ne semble dépendre que de la période apparente de la corrugation de surface du cristal phononique. En revanche, l'efficacité de diffraction dépend de manière compliquée des propriétés intrinsèques du cristal et en définitive des modes de Bloch du milieu périodique.

D'autres phénomènes que la seule diffraction sont à l'œuvre dans les résultats présentés (fig. 7). On peut voir en particulier que les mesures de transmission comportent des régions d'absence de transmission qui sont plus larges que celles qui correspondent aux seules bandes interdites. Ce fait peut être *a priori* expliqué par plusieurs phénomènes distincts, entre lesquels nous avons essayé de trancher. Premièrement, on pourrait penser que les pertes d'énergie peuvent être causées par des imperfections dans la fabrication de la structure. Bien que cette explication ne puisse être

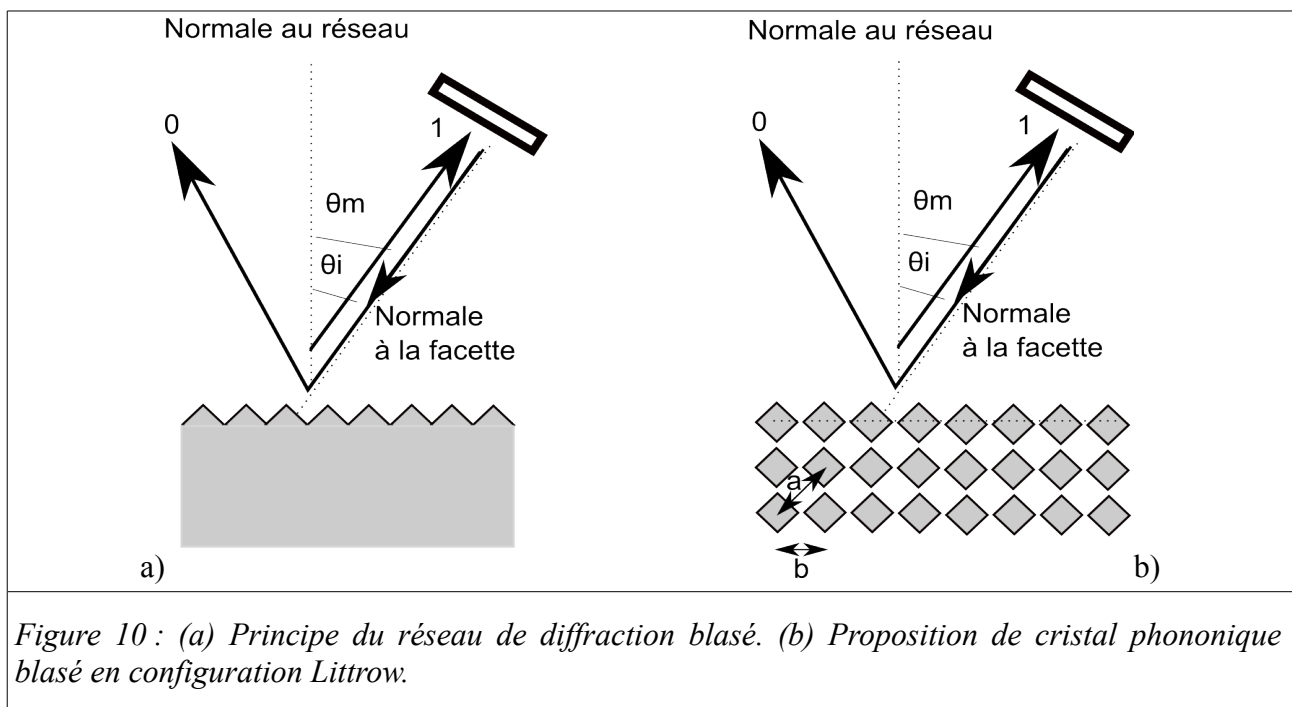
complètement réfutée, il ne nous semble pas qu'elle puisse conduire aux résultats observés. Deuxièmement, des pertes sont à attendre en raison de la viscosité de l'eau, dont l'effet augmente avec la fréquence. Pour mémoire, un exemple classique de liquide visqueux est le miel. Pour utiliser une image approximative, quand on fait des mesures à des fréquences élevées l'eau devient une sorte de miel qui empêche la propagation des ondes acoustiques. Quand on considère les ordres de grandeur, on s'aperçoit qu'autour de quelques MHz l'eau reste relativement peu visqueuse, de sorte que l'explication ne tient guère pour nos mesures. Quand les fréquences augmentent, cet effet peut cependant devenir considérable et cette constatation m'a conduit à étudier les transformations des structures de bande quand on prend en considération la viscosité des milieux de propagation [MOISEYENKO, 2011]. J'ai considéré un réseau carré de cylindres d'acier dans une matrice époxyde et un modèle simple dans lequel la viscosité dépend linéairement de la fréquence. L'influence des pertes viscoélastiques est d'adoucir fortement les transitions brutales dans la dispersion des ondes de Bloch du cristal et en particulier d'interdire l'obtention de vitesses de groupe rigoureusement nulles. Troisièmement, il s'avère qu'une onde plane incidente ne peut pas exciter tous les modes possibles d'un milieu périodique. En effet, certains de ces modes de Bloch présentent des symétries incompatibles avec celle de l'onde incidente. Ce phénomène est connu dans la littérature sous le nom de bande sourde. Ces bandes sourdes ont d'abord été trouvées expérimentalement [RUBIO, 1999]. Nous avons récemment proposé un critère pour leur apparition [LAUDE, 2011]. Ces bandes sourdes sont clairement présentes dans nos mesures. La structure de bandes de la (fig. 7) les représente en ligne pointillée. Les bandes sourdes sont très sensibles à la symétrie de la cellule élémentaire et à la direction d'incidence. Une fois cette symétrie rompue, elles disparaissent rapidement.

## **6 Réseaux de diffraction blazés**

Les réseaux de diffraction usuels sont des structures périodiques normalement planes dont la surface est corruguée. Ils sont très utilisés en optique pour décomposer la lumière en ordres de diffraction. Il est intuitif dans le cas des cristaux phononiques de chercher une configuration pour laquelle on peut obtenir un maximum d'énergie réfléchi suivant une certaine direction. En optique, une telle solution est par exemple fournie par un certain type de réseaux dits blazés. Leur efficacité de diffraction peut atteindre 60 à 80% sans reposer sur le moindre effet de bande interdite, mais toutefois sur l'effet miroir produit par une couche mince métallique ou un empilement de couches minces diélectriques réflecteur. Une condition qui est souvent recherchée est de rediriger toute l'énergie diffractée en arrière vers l'émetteur, de telle sorte que les ondes incidentes soient alignées avec les ondes diffractées. Cette situation est représentée (fig. 10(a)) et correspond à la condition de

Littrow [HORIBA, 2012]. La condition à remplir est que chaque facette doit être localement équivalente à un miroir plan réfléchissant l'onde incidente vers un ordre de diffraction donné, par exemple celui d'ordre -1. La fréquence pour laquelle cette propriété est vérifiée est par ailleurs donnée par la loi des réseaux [LOEWEN, 1997].

Il était naturel de continuer mes travaux de thèse sur la diffraction par les cristaux phononiques en cherchant dans cette direction. L'équivalent d'un cristal phononique blasé est représenté (fig. 10(b)). Les tiges de section cylindrique considérées précédemment sont remplacées par des tiges de section carrée toutes tournées selon le même angle.

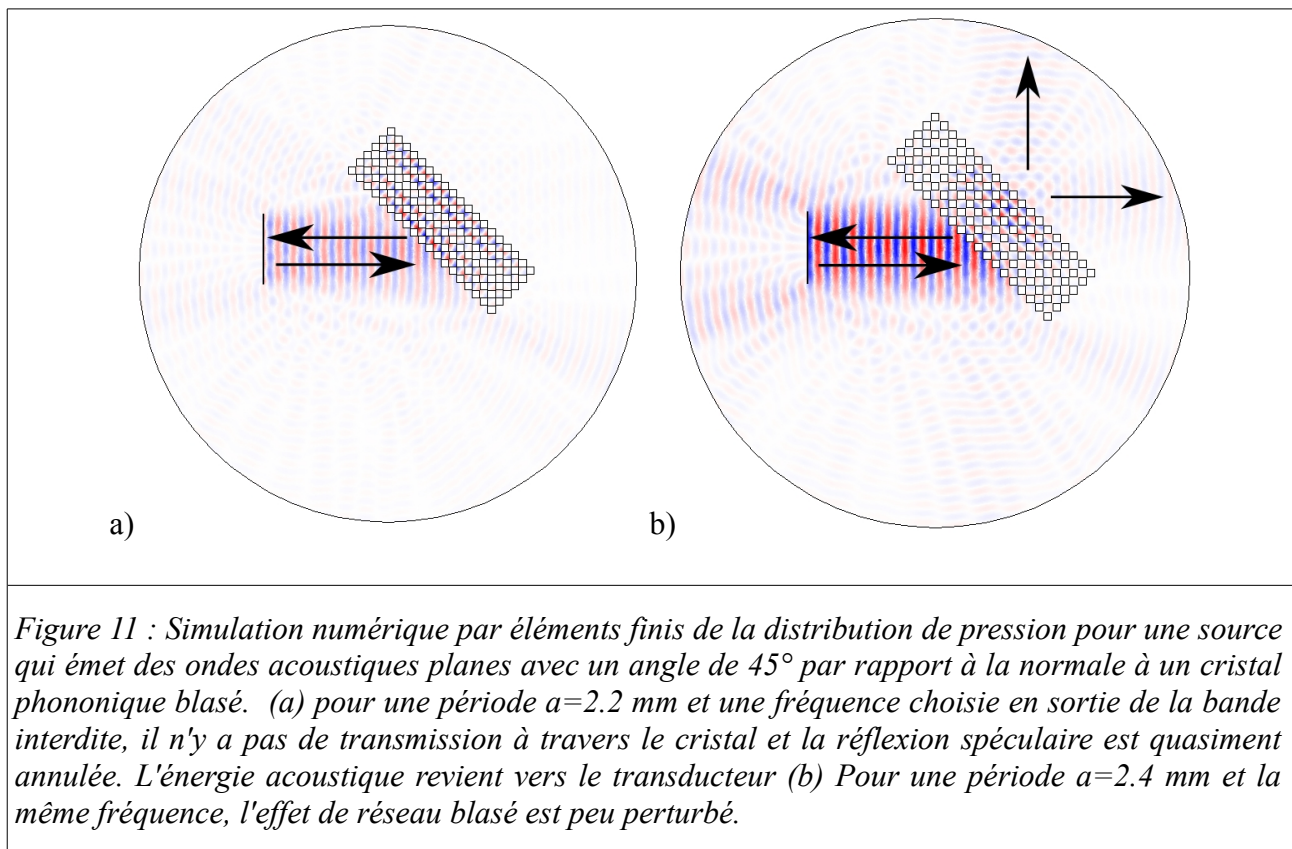


Un problème qu'il faut résoudre en acoustique et qui n'existe pas pour un réseau de diffraction optique métallique est l'existence d'une transmission quels que soient les matériaux utilisés. Ce problème peut être résolu pour des fréquences situées dans une bande interdite du cristal phononique, afin d'interdire la propagation des ondes à travers le cristal. Il subsistera néanmoins toujours une transmission minimale qui s'explique par les dimensions finies du cristal phononique et les possibles imperfections intervenant durant la fabrication.

En combinant propriété de bande interdite et géométrie de diffraction blasée, l'efficacité de diffraction peut être augmentée. Je n'ai pu démontrer cet effet que de façon théorique pour le moment, mais une réalisation expérimentale est en cours. Les calculs théoriques ont été menés à l'aide de la méthode d'éléments finis et sont présentés (fig. 11). Pour un choix judicieux des dimensions du cristal phononique (fig. 11(a)), il est possible à la fois d'empêcher la transmission mais également d'annuler la réflexion spéculaire (ou ordre de diffraction 0 réfléchi). Quand on



introduit un léger désaccord, par exemple sur la période du cristal phononique, (fig. 11(b)), l'effet de réseau blasé est peu perturbé. Cette observation numérique laisse penser que l'expérience est réalisable même avec une structure légèrement imparfaite.



## 7 Conclusions et perspectives

Les cristaux phononiques forment un nouveau domaine de la physique appliquée qui depuis vingt ans environ a reçu beaucoup d'intérêt de la part des chercheurs. Ce sont des structures périodiques composées au moins de deux matériaux différents Leur propriété la plus importante est la possibilité d'obtenir sous certaines conditions des bandes interdites, soit des régions en fréquence pour lesquelles le cristal agit comme un miroir parfait pour les ondes acoustiques, interdisant leur propagation à travers le cristal. D'autres phénomènes sont également liés à la périodicité des cristaux phononiques, telle l'existence de bande sourdes en fonction de la symétrie de la cellule élémentaire et de la symétrie de la direction de l'onde incidente par rapport à cette dernière. Mes travaux de thèse se focalisent sur la considération de la diffraction dans les cristaux phononiques. J'ai participé à la démonstration expérimentale de l'existence de bandes interdites et de bandes sourdes pour un cristal phononique composé de tiges d'acier dans l'eau. De plus, j'ai pu montrer que le cristal phononique agit comme un réseau de diffraction ordinaire dont le pas est donné par la période apparente de l'interface séparant le cristal phononique du milieu incident.

Je pousse maintenant l'idée de combiner effet de diffraction et bandes interdites afin d'élaborer un



nouveau type du cristal diffractant : le cristal phononique blasé. Les premiers résultats sont prometteurs et indiquent la possibilité de réaliser un cristal phononique ayant des propriétés dispersives optimisées. Nous sommes en train de fabriquer ce cristal afin de démontrer les phénomènes expérimentalement. Les résultats que j'ai obtenus se placent surtout sur le plan fondamental pour le moment. On peut cependant imaginer de multiples applications potentielles, par exemple pour concevoir de nouveaux types des transducteurs ultrasonores et des systèmes permettant la redirection de l'énergie acoustique.

## ***Bibliographie***

[COMSOL, 2008] *Comsol Multiphysics, Acoustics Module, User's Guide*, Version 3.5a. (2008).

[HORIBA] Réf.. du 12 janvier 2012. Disponible sur internet :

<http://www.horiba.com/scientific/products/optics-tutorial/diffraction-gratings/>

[HSIAO, 2007] F.-L. Hsiao, A. Khelif, H. Moubchir, A. Choujaa, C.-C. Chen, and V. Laude, *Complete band gaps and deaf bands of triangular and honeycomb water-steel phononic crystals* J. Appl. Phys. 101, 044903 (2007).

[KUSHWAHA, 1993] M. S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski, and B. Djafari-Rouhani, *Acoustic band structure of periodic elastic composites* Phys. Rev. Lett. 71, 2022 (1993).

[LAUDE, 2011] Vincent Laude, Rayisa P. Moiseyenko, Sarah Benchabane, and Nico F. Declercq *Bloch wave deafness and modal conversion at a phononic crystal boundary* AIP Advances 1, 041402 (2011)

[LOEWEN, 1997] E. G. Loewen and E. Popov, *Diffraction Gratings and Applications* (Marcel-Dekker, New York, (1997).

[MARTINEZ-SALA, 1995] R. Martinez-Sala, J. Sancho, J. V. Sanchez, V. Gomez, J. Llinares, and F. Meseguer, *Sound attenuation by sculpture* Nature 378, 241 (1995).

[MOISEYENKO, 2011] R. P. Moiseyenko and V. Laude, "Material loss influence on the complex band structure and group velocity in phononic crystals," Phys. Rev. B 83, 064301 (2011).

[ROYER, 1999] D. Royer and E. Dieulesaint, *Elastic Waves in Solids* (Wiley, New York, 1999)

[RUBIO, 1999] C. Rubio, D. Caballero, J. S'anchez-P'erez, R. Martinez-Sala, J. Sanchez-Dehesa, F. Meseguer, and F. Cervera, *The existence of full gaps and deaf bands in two-dimensional sonic crystals* J. of Lightwave Technology 17, 2202 (1999).