

Cristaux phononiques et phoXoniques : son et lumière pris au piège

Que peuvent apporter à l'optoacoustique des cristaux artificiels pour les ondes acoustiques ?

Les cristaux phononiques sont des structures périodiques qui modifient en profondeur la façon dont les ondes élastiques se propagent en leur sein. Les ondes élastiques recouvrent de nombreux phénomènes ondulatoires dans les différents états de la matière : son dans l'air, ondes acoustiques dans l'eau et les liquides, phonons dans les cristaux naturels, etc. Les cristaux phononiques sont capables de piéger les ondes dans l'espace et le temps ou encore d'infléchir brusquement leur course. Pourvu que l'échelle soit bien choisie, ils peuvent être simultanément des cristaux photoniques, ouvrant alors la voie à une nouvelle optoacoustique dans laquelle l'interaction de la lumière et du son peut être magnifiée par l'ingénierie des nanostructures. Une structure périodique peut ainsi être considérée à la fois comme cristal phononique et photonique, que nous désignons sous le nom de cristal phoXonique (avec $X = n$ et t).

» Vincent LAUDE,
Sarah BENCHABANE
Jean-Charles BEUGNOT
Institut FEMTO-ST | Université de Franche
Comté et CNRS, Besançon
vincent.laude@femto-st.fr

Emprisonnons de la lumière dans un petit volume de matière et secouons très fort...

... Que va t-il se passer ? Ce problème, qui est celui de la diffraction de la lumière par une onde élastique, porte différents noms dans la littérature scientifique, en fonction du contexte : **effet acousto-optique** dans les matériaux cristallins, **diffusion Brillouin** en physique du solide, **diffusion Raman** en spectroscopie des états vibrationnels des molécules. Dans tous les cas, nous espérons créer une onde optique à une fréquence légèrement décalée de l'onde optique incidente, le décalage étant donné par l'effet Doppler et étant égal à la fréquence de l'onde élastique. Dans la plupart des cas pratiques, nous espérons que cet effet sera le plus fort

possible. Pour cela, notre intuition nous commande de mettre autant d'énergie mécanique que possible dans l'onde élastique, mais nous suggère également que la géométrie de l'interaction est très importante et doit faire l'objet d'une ingénierie minutieuse. Le concept des **interactions optomécaniques** a émergé récemment et correspond à cette idée quand lumière et vibration élastique sont piégées dans une même cavité de très petite dimension. Par **interaction opto-acoustique**, nous entendons dans cet article l'idée qui consiste à mélanger efficacement des ondes optiques et élastiques se propageant de concert dans un même volume. Inversement, il est possible de créer des vibrations élastiques à partir de la lumière. Nous nous intéressons tout particulièrement au mécanisme de l'**électrostriction**, qui est un phénomène optique non linéaire résonant permettant la création d'un phonon à partir de deux photons. Dans la suite de cet article, nous présentons le concept du cristal phononique, qui est le pendant pour les ondes élastiques du cristal photonique pour les ondes électromagnétiques ou lumineuses. Nous discutons ensuite

comment une structure périodique peut être considérée à la fois comme cristal phononique et photonique, que nous désignons sous le nom de cristal phoXonique (avec $X = n$ et t) et pourquoi ce concept nous semble particulièrement important pour envisager l'ingénierie des interactions optoacoustiques.

Son et ondes élastiques

Commençons par mieux définir quelques notions utiles. Une onde acoustique (dans l'eau) ou une onde sonore (dans l'air) est un ébranlement des molécules du milieu fluide, qui se propage en s'éloignant de la source qui lui a donné naissance. Une onde élastique (dans un solide) est tout à fait similaire mais met en jeu des vibrations d'atomes par ailleurs fortement liés les uns aux autres. Dans les deux cas, ce ne sont pas les molécules ou les atomes qui se propagent dans une certaine direction, mais le signal convoyé par leur ébranlement. Quelles sont les propriétés de ces ondes matérielles, notamment en comparaison aux ondes lumineuses ? Elles sont tout d'abord nettement plus lentes : environ 340 m/s pour le son dans l'air ;

environ 1500 m/s pour les ondes acoustiques dans l'eau ; quelques milliers de mètres par seconde pour les ondes élastiques dans les solides. Par ailleurs, les fréquences auxquelles on peut les observer et les utiliser couvrent tout le spectre électromagnétique.

La figure 1 illustre cette grande variabilité et mentionne quelques applications de ces ondes. Dans le cas des milieux solides, les atomes qui constituent la matière forment souvent des réseaux périodiques naturels : les cristaux. Beaucoup de matériaux appartiennent à cette classe : le silicium de la microélectronique, les cristaux laser, les cristaux de quartz des horloges ultrastables, etc. Dans la vision quantique ou particulaire, les phonons sont les vibrations élémentaires de ces cristaux et permettent d'expliquer nombre de propriétés de la matière solide, comme par exemple la conduction et le transport de la chaleur. Dans un langage imagé, on peut dire que tout comme le photon est une particule lumineuse, le phonon est une particule sonore.

Cristaux artificiels

Dans les cristaux naturels, la distance qui sépare les atomes est inférieure au nanomètre. Les fréquences des phonons qui peuvent ressentir la période du cristal sont donc très élevées, dans la gamme

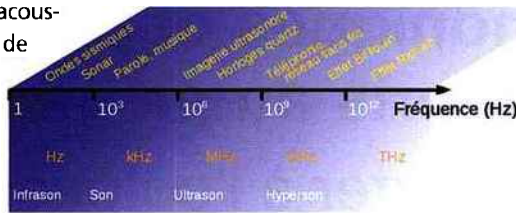


Figure 1. Son, ondes acoustiques et élastiques : fréquences et domaines d'application. Son (dans l'air), ondes acoustiques (dans les liquides), ondes élastiques (dans les solides) et phonons (vibrations élémentaires en physique de la matière condensée) font partie d'une seule et même famille d'ondes couvrant un large spectre de fréquences et d'applications.

Térahertz (1 THz = 10¹² Hz, soit un billion d'oscillations par seconde).

De tels phonons présentent des propriétés curieuses et intéressantes qui sont liées à la périodicité du réseau, comme l'apparition de bandes interdites [1]. Les ondes élastiques usuelles ne sont autres que des phonons dont la fréquence est très petite en comparaison, de sorte qu'ils « voient » un milieu de propagation équivalent, dit « homogénéisé ». Afin de s'affranchir du problème des dimensions, l'idée du cristal phononique est de créer de toutes pièces un matériau périodique que l'on pourra organiser à sa guise. En particulier, la période de ce cristal artificiel pourra être choisie aussi grande que l'on veut afin que les fréquences des vibrations, qui sont sensibles à la périodicité,

soient abaissées. Prenons deux exemples numériques extrêmes. Allons tout d'abord dans notre magasin de bricolage favori et procurons nous des tubes métalliques ou plastiques dont le diamètre fait quelques centimètres. Organisons ces tubes suivant un réseau périodique bidimensionnel (figure 2) dont la période est de l'ordre de 10 cm ; nous pourrons faire apparaître des bandes interdites pour le son dans l'air à des fréquences de quelques kHz, soit dans la gamme audible. Adressons-nous ensuite à notre centre de nanotechnologie préféré et demandons-lui de réaliser un réseau de trous d'air dans une plaquette d'un matériau cristallin tel le silicium, avec une période inférieure au micron (1 μm = 10⁻⁶ m). Le composant réalisé pourra présenter une bande interdite pour les ondes élastiques pour des fréquences de l'ordre de quelques GHz, dans la gamme des communications sans fil (1 GHz = 10⁹ Hz).

Cristaux phononiques

Les premières démonstrations des cristaux phononiques ont été réalisées à grande échelle, pour des raisons de facilité de fabrication évidentes. Pour notre part, à partir de 2003 nous avons créé au laboratoire des cristaux phononiques à l'échelle millimétrique, par exemple constitués de tiges d'acier prises dans une plaque perforée périodiquement (figure 3a).

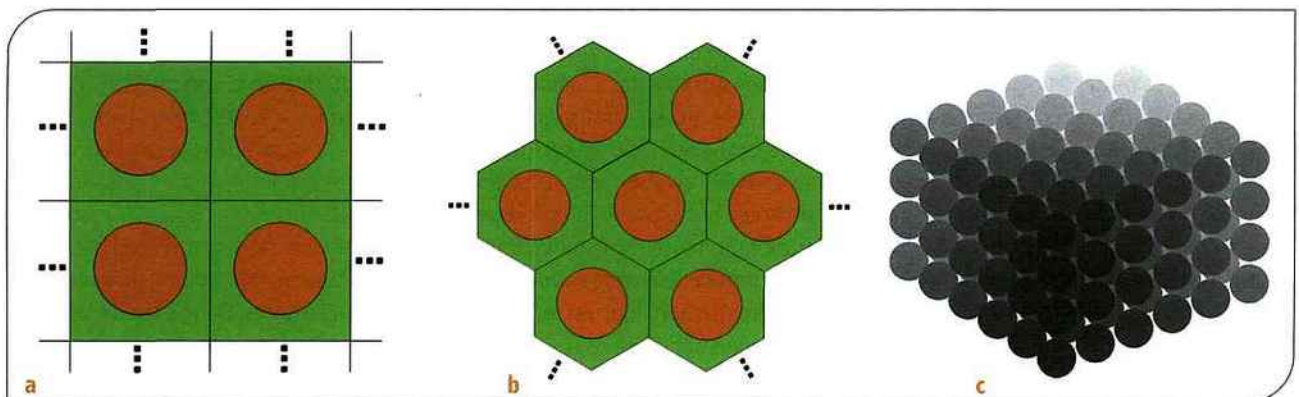


Figure 2. Principes des cristaux phononiques. Un cristal phononique est essentiellement une structure périodique composée d'au moins deux matériaux différents. Le contraste de densité et d'élasticité entre les matériaux est de façon générale important pour obtenir des effets significatifs. Le cristal phononique peut posséder une, deux ou trois périodicités dans l'espace physique ; on parle alors de cristaux phononiques 1D, 2D ou 3D. Dans le cas 2D, il existe cinq réseaux de Bravais différents (cinq façons d'arranger périodiquement un motif élémentaire sur une surface plane). Deux sont représentés ici : (a) le réseau carré et (b) le réseau hexagonal. Dans le cas 3D, il existe 14 réseaux de Bravais différents dont seul le réseau cubique (c) est représenté ici.

Ces structures, une fois placées dans un aquarium rempli d'eau, nous ont permis d'observer un certain nombre de propriétés fondamentales comme l'existence de bandes interdites omnidirectionnelles ou de cavités et de guides d'ondes créés en brisant localement la périodicité du cristal phononique. Nous avons ainsi pu obtenir des bandes interdites couvrant jusqu'à une octave de fréquence [2]. Puis, à partir de 2005, nous avons décidé de diminuer d'un facteur 1000 les périodes. Évidemment, nous ne pouvions plus continuer à enfiler des tiges dans une plaque à cette échelle et nous avons décidé de passer aux technologies de salle blanche. Partant de matériaux solides comme des plaquettes de silicium, on est aujourd'hui capable de percer des trous de très petite dimension avec des facteurs de forme [3] acceptables (figure 3b).

Nous avons jusqu'alors utilisé des ondes acoustiques se propageant dans l'eau. Pour interroger les cristaux phononiques composés de trous percés dans un solide, nous sommes passés aux ondes élastiques de surface. Ces ondes sont naturellement guidées à la surface des matériaux, d'une façon qui rappelle le mouvement des vagues sur la mer. Les ondes de surface ont plusieurs avantages : leur énergie est concentrée au voisinage de la surface, de sorte que la densité d'énergie y est grande ; elles peuvent être excitées efficacement à la surface des matériaux

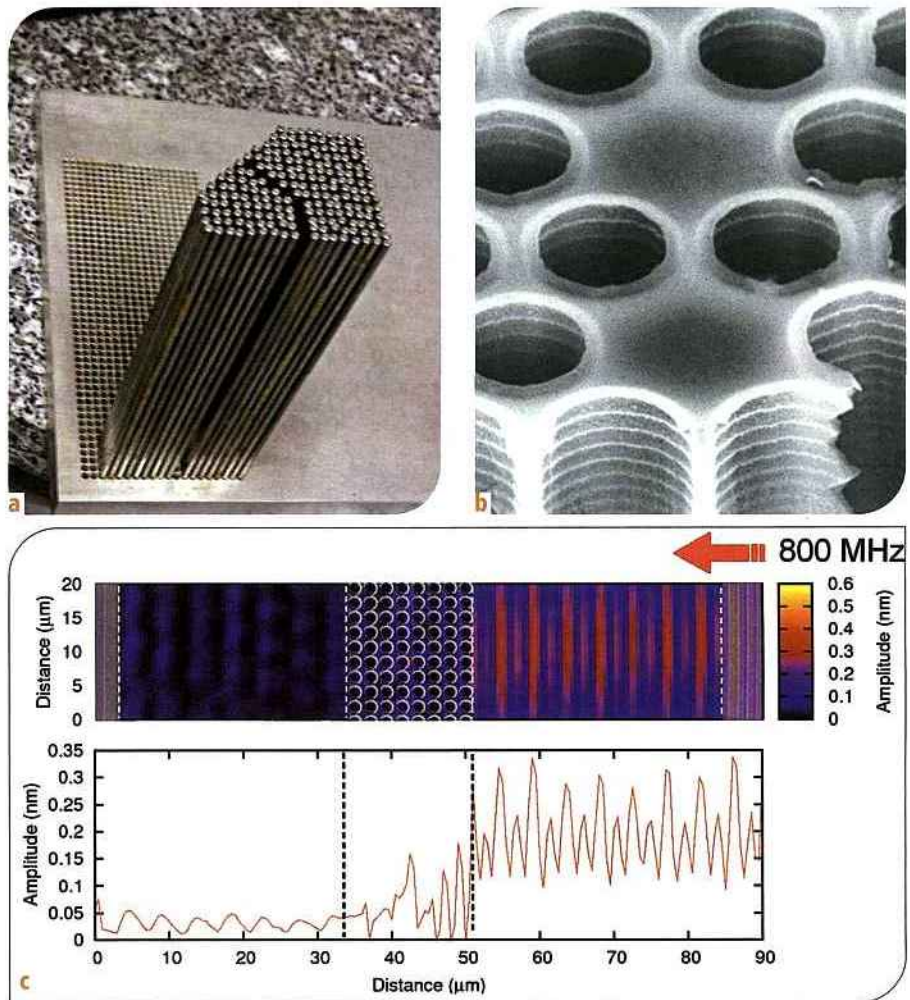


Figure 3. Cristaux phononiques sonores et hypersonores réalisés à FEMTO-ST. a. Cristal phononique de période millimétrique. **b.** Cristal phononique de trous d'air dans une plaquette de silicium. La période est de 6 μm. **c.** Cristal phononique de trous d'air dans une plaquette de niobate de lithium. La période est de 2 μm. L'échelle de couleur montre les déplacements de la surface mesurés par un interféromètre optique hétérodyne. Une onde de surface à la fréquence 800 MHz incidente de la gauche est fortement réfléchiée par le cristal phononique.

piézoélectriques par des antennes acoustiques composées de réseaux d'électrodes ; enfin, leurs pertes de propagation sont très faibles pour nombre de matériaux cristallins. La *figure 3c* montre un de nos résultats récents démontrant la possibilité de réaliser des cristaux phononiques pour les ondes de surface autour de 1 GHz.

Cristaux artificiels pour le son et la lumière

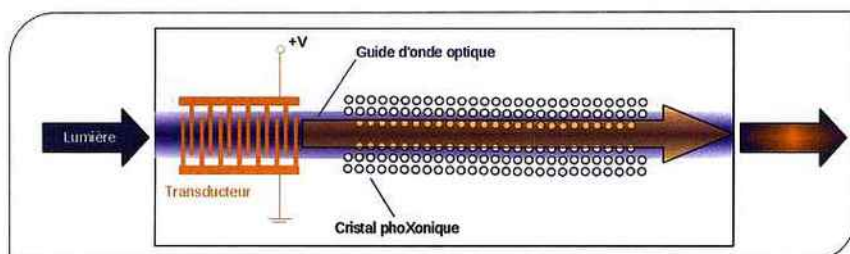
Tournons maintenant notre attention vers les propriétés optiques des cristaux phononiques. La période d'un cristal phononique hypersonore est de l'ordre du micron, soit également l'ordre de grandeur d'une longueur d'onde optique dans le domaine visible. Le lecteur averti et perspicace avait peut-être déjà fait la relation avec les cristaux photoniques conçus pour le visible ou le proche infrarouge. Mettant notre fierté d'acousticiens de côté, il nous faut bien admettre que les cristaux photoniques (1987) sont probablement le modèle qui a conduit à l'idée du cristal phononique (1993). Tout comme le modèle des bandes électroniques dans les solides avait fourni l'analogie décisive pour les cristaux photoniques... L'article considéré comme fondateur du domaine des cristaux phononiques utilise d'ailleurs les analogies entre électrons, photons et phonons se propageant dans un milieu périodique.

Faisons maintenant un pas supplémentaire et posons-nous la question suivante : une même nanostructure périodique peut-elle être simultanément un cristal photonique et phononique ? La réponse est positive, comme le titre de notre arti-

cle le suggère : même s'il est nécessaire d'optimiser avec grand soin la structure, la période (ainsi que le choix du matériau) fixe la gamme de fréquence dans laquelle on peut obtenir une bande interdite photonique comme celle dans laquelle on peut obtenir une bande interdite phononique. La différence entre les deux réside dans l'écart de fréquence gigantesque qui les sépare : quelques 100 THz par rapport à quelques GHz. Cet écart est la conséquence de l'immense différence des vitesses de propagation : $3 \cdot 10^8$ m/s pour la lumière dans le vide contre de l'ordre de 5000 m/s pour les ondes élastiques dans les solides. Que peut-on attendre de tels cristaux phoXoniques ? Les cristaux artificiels influencent à la fois les propriétés de dispersion spatiale et temporelle des ondes qui s'y propagent. Jouer sur la dispersion spatiale signifie qu'il est par exemple possible de confiner son et lumière dans une même région de l'espace, par exemple dans une même cavité ou un même guide d'onde. Puisque cette région peut avoir de très petites dimensions, par exemple une section inférieure à $1 \mu\text{m}^2$ pour un guide d'onde, on imagine que la densité énergétique peut y devenir très importante. Par ailleurs, jouer sur la dispersion temporelle consiste par exemple à ralentir la propagation de l'énergie lumineuse et élastique et permet donc d'augmenter significativement la durée de l'interaction des deux types d'ondes. La *figure 4* représente ce concept du guide d'onde conjoint, fondé sur une bande interdite photonique et phononique simultanée et exploitant lumière lente et son lent pour rendre l'interaction plus efficace.

... Et de la lumière jaillit le son !

Il existe une autre voie que nous suivons également pour exalter l'interaction des photons et des phonons. Plutôt que de passer par des technologies de salle blanche, on peut utiliser les fibres optiques microstructurées (*figure 5*). Ces fibres comportent un réseau périodique de trous dont les dimensions peuvent être plus petites que 100 nm et qui courent sur des distances pouvant atteindre plusieurs kilomètres. Qu'elles exploitent un guidage par bande interdite photonique ou par réflexion totale interne, elles permettent de guider la lumière en la confinant dans un cœur dont le diamètre peut être plus petit qu'un micron. Il se trouve que les fibres microstructurées sont également de parfaits guides d'onde pour les ondes élastiques, que l'on peut elles aussi confiner dans le cœur. La diffraction des ondes optiques par les phonons thermiques est appelée effet Brillouin, qui est un effet de diffusion inélastique de la lumière s'accompagnant d'un changement de fréquence. Quand l'accord de phase est réalisé entre photons et phonons, cet effet devient stimulé et conduit notamment à une limitation de la puissance optique pouvant être transportée par une fibre. Afin de produire efficacement du son à partir de la lumière, la piste que nous suivons utilise un effet intimement lié à l'effet Brillouin : l'électrostriction. En effet, en injectant dans la fibre deux ondes optiques présentant un léger décalage de fréquence, l'électrostriction engendre à l'intérieur de la silice une force optique oscillant à la fréquence de décalage qui peut donner naissance à une onde élastique si l'accord de phase est réalisé [4] (*figure 5*). En termes de particules, on dirait que deux photons permettent la génération d'un phonon si la conservation de l'énergie et de l'impulsion sont respectées conjointement. Par ce mécanisme, il est possible de générer des vibrations et des ondes élastiques, donc de mettre la matière en mouvement par la seule action de la lumière. Tout l'enjeu est de rendre ce phénomène plus efficace en jouant à la fois sur le confinement des ondes et sur leur ralentissement, exactement comme



Figures 4. Cristal phoXonique. Schéma de principe montrant le confinement simultané de la lumière et d'une onde élastique de surface dans un guide d'onde phoXonique. La lumière est injectée dans un guide d'onde optique, tandis que les ondes élastiques sont générées par un transducteur à peignes interdigués réalisé sur un matériau piézoélectrique.

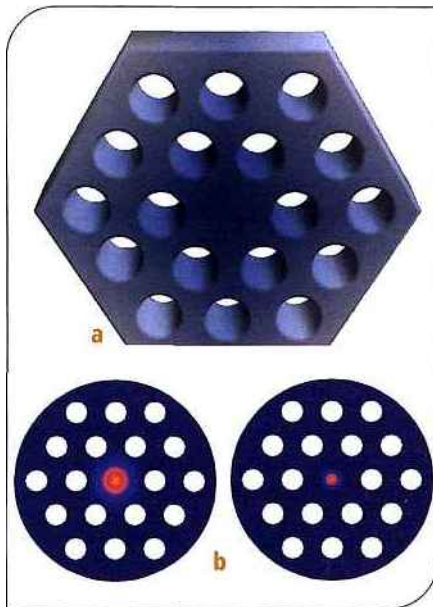


Figure 5. Effet Brillouin dans les fibres optiques/électrostriction. a. Schéma d'une section d'une fibre optique microstructurée composée d'un réseau de trous cylindriques entourant un cœur solide. **b.** Simulation numérique de la force optique d'électrostriction créée par le mode optique fondamental de la fibre (à gauche) et distribution d'énergie acoustique résultante (à droite).

nous l'avons décrit pour les cristaux photoniques. Nous explorons en particulier cette voie dans le but de réaliser des systèmes de stockage et de retard des impulsions lumineuses à accès tout-optique, dans lesquels l'information serait stockée sous forme de phonons cohérents.

Un domaine de recherche prometteur

Dans cet article, nous avons esquissé les contours du domaine des cristaux photoniques et de leurs relations avec les cristaux photoniques et les fibres optiques microstructurées. Il s'agit d'un domaine scientifique récent et prometteur, mais qui en est encore pour l'essentiel au stade des démonstrations fondamentales des concepts. Nous avons volontairement omis de souligner les difficultés technologiques et numériques qui séparent encore ces cristaux artificiels de leurs applications, et nous ne sommes d'ailleurs même pas certains de ce que seront ces applications. Nous sommes cependant convaincus

du potentiel qu'ils recèlent et persuadés que pour eux l'avenir sera radieux... et sonore ! ■

Nous tenons à remercier nos collègues de FEMTO-ST (équipes Nano-Optique et Optique Non Linéaire) et nos collaborateurs, avec lesquels nous menons cette aventure photo-phononique. Ces travaux sont soutenus par l'ANR et le programme FP7 de l'Union européenne.

Compléments

[1] Une bande interdite est une gamme de fréquence à l'intérieur de laquelle la propagation des ondes est interdite. Plus précisément, il ne peut exister à ces fréquences que des ondes évanescentes dont l'amplitude de vibration décroît exponentiellement depuis la source qui leur donne naissance.

[2] L'octave correspond à un intervalle de fréquence allant du simple au double ; c'est par exemple l'écart de fréquence séparant deux notes consécutives pour un instrument de musique.

[3] Le facteur de forme est ici le rapport de la profondeur des trous sur leur ouverture en surface. Ce nombre est généralement compris entre 1 et 10, ou plus suivant les matériaux considérés.

[4] C'est-à-dire s'il se trouve qu'il existe une onde acoustique à la fréquence de décalage présentant un vecteur d'onde axial compensant exactement l'écart des vecteurs d'onde optiques.