



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com



Phononic crystals / Cristaux phononiques

## Phononic crystals: Harnessing the propagation of sound, elastic waves, and phonons

*Cristaux phononiques : maîtriser la propagation du son, des ondes élastiques et des phonons***Foreword**

Phononic crystals are artificial periodic structures that can alter efficiently the flow of sound in air, of acoustic waves in fluids, or of elastic waves in solids. They were introduced about twenty years ago [1,2] and have gained increasing interest since then, both because of their amazing physical properties and because of their potential applications. The topic of phononic crystals [3–5] stands at the cross-road of several fields of physics – condensed matter physics, wave propagation in inhomogeneous and periodic media – and engineering – acoustics, ultrasonics, mechanical engineering, and electrical engineering. Phononic crystals cover a wide range of scales, from meter-size periodic structures for sound in air to nanometer-size structures for information processing or thermal phonon control in integrated circuits. They furthermore offer a practical implementation for the paradigms of acoustic metamaterials. The articles in this dossier illustrate several of these aspects.

*Three-dimensional crystals.* Caleap and Drinkwater consider the problem of assembling three-dimensional (3D) periodic crystals dynamically. They describe how acoustic radiation forces can guide the assembly of colloidal particles into structures that serve as microscopic elements in acoustic metamaterials or phononic crystals. They show a diversity of colloidal structures with orthorhombic symmetry assembled with megahertz-frequency (MHz) standing pressure waves. These structures allow rapid tuning of acoustic properties and provide a new platform for dynamic metamaterial applications. Psarobas et al. describe theoretically phononic isolators that operate as a result of asymmetrical wave transmission through a slab of a crystallographic phononic structure with broken mirror symmetry. The existence of unidirectional phononic band gaps implies that elastic waves can be trapped in properly designed multilayered 3D structures. A proposed application of such an isolator is the dramatic enhancement of the absorption rate of a vibrational harvesting cell.

*Acoustic metamaterials based on phononic crystals.* El Ayouch et al. consider the acoustic shielding effect provided by a plate that is periodically perforated with subwavelength slits and immersed in water. They specifically explore experimentally the role played by diffraction: as the angle of incidence on the plate is increased, spurious diffraction orders appear that limit the expected attenuation of ultrasound. Assouar et al. explore theoretically the related problem of sound mitigation in an air-borne sound environment. They consider a plate-type acoustic metamaterial incorporating either a spring-mass or a system of pillars. Such systems can induce a high sound transmission loss even though the metamaterial plate is less than 1 mm thick. Zhao & Wang explore the negative refraction property in a chiral structure based on a two-dimensional square lattice. They emphasize the relation between symmetry of the unit cell and negative refraction. Due to the rotational symmetry of their unit cell, a frequency-dependent transmission phase difference is introduced, leading to tunable steering of waves.

*Nonlinearities and couplings in phononic crystals.* Jiménez et al. study the propagation of intense acoustic waves in a one-dimensional phononic crystal, in view of obtaining control of acoustic wave propagation in the nonlinear regime. They show that the interplay between strong dispersion and nonlinearity leads to new scenarios of wave propagation when the nonlinearly generated harmonics lie inside or close to band gaps, leading to the possibility of engineering a medium in order to get a particular waveform. Djafari-Rouhani et al. review phoxonic crystals – dual phononic/photonic crystals exhibiting

<http://dx.doi.org/10.1016/j.crhy.2016.02.010>

1631-0705/© 2016 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

simultaneously band gaps for both types of excitations. Phoxonic crystals can confine phonons and photons in the same cavity and in turn allow the enhancement of their interaction. Cavity optomechanical interactions are reviewed for different types of phoxonic crystals, including two-dimensional, slab, and nanobeam structures.

*Loss and the complex phononic band structure.* Frazier & Hussein consider the problem of describing loss that occurs simultaneously in space and time. While solutions are known for time-harmonic wave motion – complex wavenumbers as a function of real frequency – and for damped free-wave motion – complex frequencies as a function of real wavenumber, – they let both frequency and wavenumber become simultaneously complex and discuss an algorithm to obtain the corresponding complex phononic band structure. The algorithm is applied to a viscously damped mass-in-mass metamaterial exhibiting local resonance.

## Avant-propos

Les cristaux phononiques sont des structures périodiques artificielles qui peuvent altérer très efficacement la propagation du son dans l'air, des ondes acoustiques dans les fluides ou des ondes élastiques dans les solides. Depuis leur introduction, il y a un peu plus de vingt ans [1,2], ils n'ont cessé de faire croître l'intérêt des chercheurs, aussi bien pour leurs propriétés physiques remarquables que pour leurs applications potentielles. En tant que sujet d'étude, les cristaux phononiques [3–5] se tiennent à la croisée de plusieurs champs de la physique – physique de la matière condensée, propagation des ondes dans les milieux inhomogènes périodiques – et de l'ingénierie – acoustique, ultrasons, mécanique appliquée et électronique. Les cristaux phononiques couvrent une vaste gamme de dimensions, depuis les structures périodiques de taille métrique pour les ondes sonores jusqu'aux structures de taille nanométrique pour le traitement de l'information ou le contrôle des phonons thermiques dans les circuits intégrés. Ils constituent par ailleurs une implémentation pratique pour de nombreux paradigmes des métamatériaux. Les articles de ce dossier illustrent plusieurs de ces aspects.

*Cristaux tridimensionnels.* Caleap et Drinkwater considèrent le problème de l'assemblage dynamique de cristaux périodiques tridimensionnels (3D). Ils décrivent comment les forces de radiation acoustiques peuvent guider l'assemblage de particules colloïdales qui servent alors d'éléments microscopiques composant des métamatériaux acoustiques ou des cristaux phononiques. Ils démontrent diverses structures colloïdales de symétrie orthorhombique assemblées à l'aide d'ondes de pression stationnaires dont la fréquence est de l'ordre du mégahertz (MHz). Ces structures permettent un ajustement rapide des propriétés acoustiques et constituent une nouvelle plateforme pour les applications des métamatériaux dynamiques. Psarobas et al. décrivent théoriquement des isolateurs phononiques dont le fonctionnement résulte du caractère asymétrique de la transmission à travers une tranche d'un cristal phononique cristallographique pour laquelle la symétrie miroir est brisée. L'existence de bandes interdites phononiques unidirectionnelles implique alors que les ondes élastiques peuvent être piégées dans des structures multicouche 3D correctement conçues. Une application potentielle pour un tel isolateur est l'exaltation de l'absorption d'une cellule de récupération d'énergie vibratoire.

*Métamatériaux acoustiques fondés sur les cristaux phononiques.* El Ayouch et al. considèrent le phénomène de bouclier acoustique obtenu à la traversée d'une plaque perforée périodiquement de fentes sub-longueur d'onde et immergée dans l'eau. Ils explorent en particulier le rôle joué par la diffraction : à mesure que l'angle d'incidence augmente, des ordres de diffraction parasites apparaissent et limitent l'atténuation ultrasonore qu'il est possible d'obtenir. Assouar et al. explorent théoriquement le problème connexe de l'atténuation sonore dans un environnement aérien. Ils considèrent un métamatériau acoustique membranaire qui incorpore, soit un système de masses et de ressorts, soit un système de piliers. De telles structures peuvent induire une atténuation sonore très élevée à la transmission alors que la plaque de métamatériau est épaisse de moins d'un millimètre. Zhao et Wang explorent la propriété de réfraction négative dans une structure chirale fondée sur un réseau périodique bidimensionnel. Ils mettent en évidence la relation qui lie symétrie de la maille périodique et réfraction négative. En raison de la symétrie de rotation de leur maille, une différence de phase à la transmission est introduite, qui dépend de la fréquence. Cette dernière conduit à l'existence d'un angle de réfraction accordable en fréquence.

*Non-linéarités et couplages dans les cristaux phononiques.* Jiménez et al. étudient la propagation d'ondes acoustiques intenses à travers un cristal phononique unidimensionnel dans le but d'obtenir un contrôle de la propagation en régime non linéaire. Ils démontrent que la prise en compte simultanée de la forte dispersion et de la non-linéarité conduit à de nouveaux scénarios pour la propagation des ondes quand les harmoniques générés non linéairement apparaissent à l'intérieur ou à proximité des bandes interdites, ce qui conduit à la possibilité de façonner un milieu afin d'obtenir une forme d'onde donnée. Djafari-Rouhani et al. décrivent les cristaux phoxoniques – des cristaux à la fois phononiques et photoniques qui possèdent des bandes interdites pour les deux types d'excitation simultanément. Les cristaux phoxoniques peuvent confiner photons et phonons dans la même cavité et, en retour, exalter leur interaction. Les interactions optomécaniques en cavité sont décrites pour différents cristaux phoxoniques, incluant les structures bidimensionnelles ou membranaires et les nano-poutres.

*Pertes et structure de bande phononique complexe.* Frazier et Hussein considèrent le problème lié à la description des pertes de propagation qui interviennent simultanément en temps et en espace. En effet, tandis que des solutions sont connues tant

pour les ondes monochromatiques – les nombres d'onde devenant complexes en fonction de la fréquence réelle – que pour les oscillations libres amorties – les fréquences permises devenant complexes en fonction d'un nombre d'onde réel –, les auteurs autorisent simultanément les fréquences et les nombres d'onde complexes et discutent un algorithme permettant d'obtenir la structure de bande phononique complexe correspondante. Cet algorithme est appliqué à un métamatériau amorti de type « masse dans une masse » qui possède une résonance locale.

## References

- [1] M.S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani, Acoustic band structure of periodic elastic composites, *Phys. Rev. Lett.* 71 (13) (1993) 2022–2025, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.2022>.
- [2] M.M. Sigalas, E.N. Economou, Band structure of elastic waves in two dimensional systems, *Solid State Commun.* 86 (3) (1993) 141–143, [http://dx.doi.org/10.1016/0038-1098\(93\)90888-T](http://dx.doi.org/10.1016/0038-1098(93)90888-T).
- [3] P.A. Deymier (Ed.), *Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals*, Springer, 2013.
- [4] V. Laude, *Phononic Crystals: Artificial Crystals for Sonic, Acoustic, and Elastic Waves*, De Gruyter, 2015.
- [5] A. Khelif, A. Adibi (Eds.), *Phononic Crystals*, Springer, 2015.

Vincent Laude

*Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique (FEMTO-ST), CNRS UMR 6174,  
Université de Bourgogne Franche-Comté, 25030 Besançon cedex, France  
E-mail address: [vincent.laude@femto-st.fr](mailto:vincent.laude@femto-st.fr)*