

## **Transformation du son par un cristal phononique**

N. Côté, J. Vasseur, Q. Souron et A.-C. Hladky-Hennion  
IEMN, UMR 8520 CNRS, ISEN, 41 Boulevard Vauban, 59046 Lille, France  
nicolas.cote@isen.fr

Le concept de cristal phononique a été proposé au début des années 1990. Il s'agit de structures artificielles constituées de distributions périodiques d'inclusions insérées dans une matrice. En raison de leur structure périodique, les cristaux phononiques peuvent présenter sous certaines conditions (géométrie du réseau d'inclusions, choix des constituants) des domaines fréquentiels dans lesquels la propagation des ondes acoustiques est atténuée. La gamme de fréquence correspondante est appelée bande interdite. Cette propriété spectrale confère aux cristaux phononiques une application potentielle dans le domaine de l'isolation phonique. La réduction des nuisances sonores dues au bruit environnemental étant reconnue de nos jours comme étant un enjeu de santé publique, l'utilisation possible des cristaux phononiques comme écran acoustique a suscité beaucoup d'intérêt. Cette étude a pour objectif de quantifier l'impact des cristaux phononiques au niveau perceptif et se basera sur un ensemble de calculs numériques et également d'une évaluation perceptive. Pour cela nous proposons de coupler une étude acoustique et auditive de signaux sonores transformés par un écran acoustique droit et un cristal phononique. En particulier, les deux phénomènes acoustiques décrits ci-dessous sont étudiés ; (1) la modification de l'intensité sonore perçue apportée par un cristal phononique, et (2) le phénomène de réfraction négative. Il est donc nécessaire de comparer, d'un point de vue auditif, les écrans acoustiques droits qui permettent d'atténuer le bruit routier et les cristaux phononiques qui peuvent engendrer une modification spectrale voire temporelle du bruit routier. La réfraction négative est un phénomène de focalisation acoustique modifiant artificiellement la position de la source sonore. Ainsi, un cristal phononique pourrait réduire la distance perçue d'une source de bruit.

## 1 Introduction

Au cours des dix dernières années, plusieurs études ont décrit les phénomènes physiques inhérents aux Cristaux Phononiques (CP) [1, 2, 3]. Ces systèmes sont constitués de distributions périodiques d'inclusions insérées dans une matrice. Les matériaux constituant la matrice et les inclusions peuvent être tous deux solides, tous deux fluides (liquide ou gaz) ou former une combinaison mixte solide/fluide : par exemple un réseau de poteaux d'acier dans l'air.

Ces systèmes, basés sur une structure artificielle constituée d'une distribution périodique de poteaux rigides, utilisent les phénomènes d'interférences multiples entre les ondes réfléchies par ces poteaux afin de modifier la propagation des ondes acoustiques. En raison de sa structure périodique, le CP agit comme un filtre coupe-bande (des bandes de fréquences appelées bandes "interdites" sont atténuées et déphasées dans une direction donnée) et/ou comme un guide d'onde (la direction des ondes acoustiques est modifiée). Par exemple, Vasseur et al. [4] obtiennent une forte atténuation pour la gamme de fréquences [4000;9000] Hz pour une périodicité de 3 cm. Ces CP peuvent présenter sous certaines conditions (géométrie du réseau périodique, fraction volumique des poteaux, forme des poteaux, ...) des bandes interdites "absolues" c'est-à-dire des domaines fréquentiels où la propagation des ondes est interdite quelle que soit la direction de propagation des ondes incidentes. Dans les deux cas, la fréquence centrale des bandes interdites est liée à la période du cristal. Un troisième phénomène appelé réfraction négative est associé aux cristaux phononiques. Le comportement des "rayons" sonores à l'interface entre deux milieux peut être décrit par les lois de *Snell-Descartes* correspondant à des pentes positives sur les courbes de dispersion. Pour obtenir une réfraction négative nous exploitons certaines particularités des courbes de dispersion : des branches à pente négative. Lorsque les indices des deux milieux (par exemple air et CP) sont accordés, on assiste à la focalisation des ondes : l'image d'un point source est un point situé de l'autre côté d'un écran fini à base de CP (appelé écran CP dans le reste de l'article).

Afin de lutter contre le bruit de la circulation routière et ferroviaire, une solution consiste à mettre en place des

écrans acoustiques. Ces écrans sont placés entre la source de bruit et les bâtiments ou milieux exposés. Cependant, ils ont une efficacité limitée dans la zone d'ombre géométrique liée à la diffraction des ondes sonores sur les arêtes de l'écran. Certaines études ont montré la faisabilité d'un écran antibruit à base d'un réseau périodique. Cependant, les cristaux phononiques atténuent une bande de fréquences étroite et peu intéressante vu le spectre d'un bruit routier : bruit large-bande riche en très basses-fréquences avec un maximum autour de 1000 Hz. Afin de pallier cette limite des CP, Romero-Garcia et al. [5] ont combiné les effets d'un écran CP, de résonateurs et de matériaux absorbants dans un écran acoustique nommé SCAB (*Sonic Crystal Acoustic Barrier*). Cet écran acoustique obtient de bonnes performances suivant les standards utilisés pour l'évaluation des écrans acoustiques droits (voir la série des NF EN 1793) : 8 dB en absorption acoustique et 20 dB en isolation aux bruits aériens. Koussa et al. [6] propose une solution différente en combinant un cristal phononique à un écran acoustique droit. Ce système améliore de l'ordre de 2 à 6 dB (en fonction de la configuration du trafic routier) les performances de l'écran acoustique droit seul. Ainsi, les études semblent montrer que l'utilisation d'un écran CP seul n'est pas adaptée à la réduction des nuisances sonores.

Il existe peu d'études auditives des effets acoustiques associés aux cristaux phononiques. Spiouzas et al. [7] ont étudié la perception en distance d'objets sonores positionnés derrière un écran CP. Mershon et al. [8] ont défini quatre indices acoustiques de perception de la distance : l'intensité, la réverbération, le contenu spectral et les différences binaurales. L'intensité est souvent considérée comme l'indice principal de perception de la distance d'une source sonore. En effet, la variation de cet indice en fonction de la distance est très bien détectée par un auditeur. Ainsi, l'atténuation introduite dans la bande de fréquences interdites pourrait éloigner artificiellement la source sonore. Cependant, l'intensité est un paramètre physique et non perceptif. Ainsi, Stevens et al. [9] ont montré que la distance perçue avait une relation linéaire avec la *sonie* qui est l'indicateur de l'intensité sonore perçue [10]. Spiouzas et al. [7] ont effectué un test auditif (avec 4 sujets) pour étudier la réfraction négative d'un écran CP. De plus, ils ont procédé à des enregistrements binauraux avec et sans écran entre une source sonore et une tête artificielle : la distance entre

la tête artificielle et l'écran variant de 0 à 4 m. Trois indices de perception de la distance sont étudiés : l'intensité, la cohérence entre les deux voies d'un enregistrement binaural ou *InterAural Cross Correlation* (IACC) et le rapport entre le champ direct et le champ réverbéré ( $I_d/I_r$ ). Ils montrent que l'écran CP modifie la distance perçue et que la source sonore semble se rapprocher lorsqu'un écran CP est positionné entre la source sonore et l'auditeur. Cette étude semble montrer que lorsque la réfraction négative existe en acoustique audible, son effet est perçu.

Cet article présente l'étude perceptive d'un cristal phononique. Il est divisé en trois sections. La section 2 décrit le cristal phononique étudié et le protocole de l'étude. La section 3 présente l'étude acoustique du cristal phononique. Enfin, la section 4 introduit une étude psychoacoustique du CP.

## 2 Méthode

### 2.1 Problématique

L'objectif de ce travail est de déterminer si un écran à base de cristal phononique peut avoir un effet audible. Pour cela, un CP particulier a été conçu présentant trois caractéristiques différentes, toutes dans une bande de fréquences audibles :

1. une bande interdite dans une direction donnée,
2. de la réfraction négative,
3. une bande interdite absolue, c'est-à-dire pour toutes les directions de l'espace, dans une gamme de fréquences plus élevées.

Chacune des caractéristiques précédentes sera évaluée à partir d'indicateurs psychoacoustiques.

### 2.2 Protocole

La démarche suivie dans cette étude est la suivante :

1. une description du CP et une analyse des courbes de dispersion correspondantes, mettant en évidence les trois caractéristiques citées précédemment,
2. une série de calculs par la méthode des éléments finis, utilisant le code ATILA, pour obtenir les réponses impulsionnelles d'un ensemble de scènes sonores listées dans le tableau 1,
3. la synthèse d'une base de données à partir de signaux sources et des réponses impulsionnelles obtenues,
4. une analyse auditive des signaux sonores à partir d'indicateurs psychoacoustiques.

## 3 Analyse acoustique

### 3.1 Description du cristal phononique

Le CP considéré dans cette étude est formé de cylindres supposés rigides, de diamètre 10 cm, formant un réseau triangulaire de 12 cm de côté, voir figure 1. Les courbes de dispersion sont déterminées par la méthode des éléments

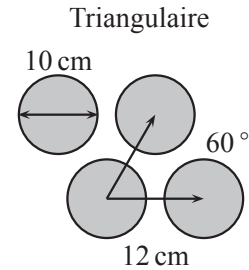


FIGURE 1 – Description du cristal phononique étudié dans cette étude.

finis, utilisant le code ATILA. Les cylindres étant supposés infinis et uniformes dans la troisième direction de l'espace ( $z$ ), un maillage bidimensionnel uniquement est considéré. Seule une cellule élémentaire est maillée, composée d'éléments connectés par des nœuds, sur laquelle des conditions aux limites périodiques sont imposées [11]. Des éléments à interpolation quadratique sont considérés dans les calculs. Enfin, les propriétés de l'air sont une densité de  $\rho_{\text{air}} = 1,3 \text{ kg m}^{-3}$  et une célérité de  $c_{\text{air}} = 339 \text{ m s}^{-1}$ . Les courbes de dispersion sont présentées à la figure 2. Nous observons les trois phénomènes détaillés ci-dessous.

- Dans la direction  $\Gamma X$  ( $0^\circ$ , normale à la surface du CP), on note une bande interdite dans la gamme de fréquences [1080;1610] Hz. La bande interdite n'est pas absolue au sens où il n'existe pas de bande interdite dans les autres directions de l'espace (i.e. en incidence oblique) dans cette gamme de fréquence.
- A plus hautes fréquences, dans la gamme [1610; 2500] Hz, les courbes de dispersion présentent des branches à pente négative, liées à de la réfraction négative. Sur la figure 2, on note que les branches à pente négative interceptent les lignes droites, dont les pentes sont la vitesse du son dans l'air. Les points d'intersection sont à 1620 Hz dans la direction  $\Gamma X$ , et à 1550 Hz dans la direction  $\Gamma J$  (i.e. avec un angle d'incidence de  $30^\circ$ ). Au point d'intersection, signifiant qu'il y a accord d'indice entre le milieu extérieur (air) et le CP, la focalisation des ondes peut avoir lieu : l'image d'un point source situé d'un côté de l'écran CP, donnera naissance à un point image de l'autre côté de l'écran, et la distance source-image sera égale à deux fois l'épaisseur de l'écran [12]. Ainsi, placée derrière un écran CP, une source sonore se rapprocherait virtuellement d'un auditeur. Dans le cas présent, il n'y a pas exacte isotropie du CP dans cette gamme de fréquences puisque les points d'intersection entre les courbes de dispersion et les lignes du son dans l'air ne se produisent pas exactement à la même fréquence selon la direction de propagation ( $\Gamma X$  et  $\Gamma J$ ). Néanmoins, la focalisation des ondes pourra avoir lieu, malgré la faible anisotropie du CP.
- A encore plus hautes fréquences, dans la gamme [2500;2960] Hz, on note une bande interdite absolue, au sens où il n'y a aucun mode qui se propage quelle que soit la direction de propagation.

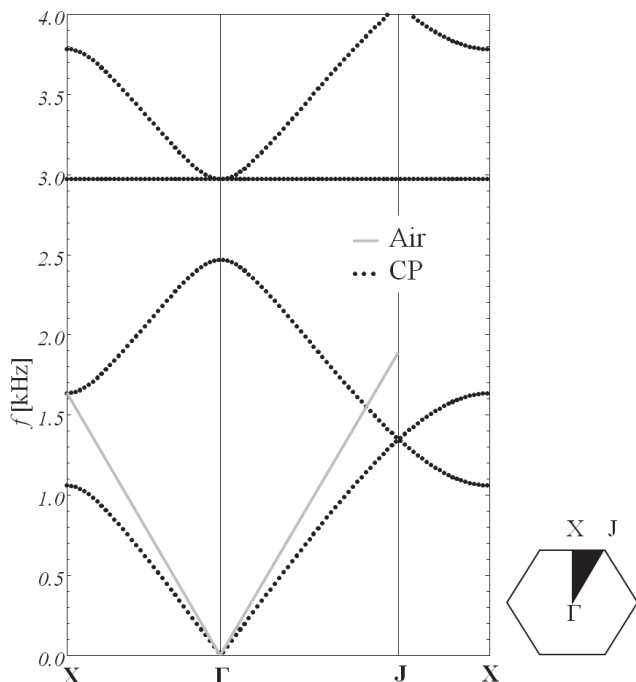


FIGURE 2 – Courbes de dispersion du cristal phononique étudié

### 3.2 Analyse harmonique du CP en champ libre

Dans un premier temps, un écran CP composé de 11/12 cylindres en largeur et de 5 cylindres en épaisseur est considéré. Le maillage comprend l'écran CP ainsi qu'une région composée d'air uniquement suffisamment grande autour de l'écran. Une condition de non réflexion est appliquée sur la frontière extérieure du maillage. Un point source est considéré, positionné à 0,1 m du début de l'écran CP face à un cylindre. Une analyse harmonique est menée à l'aide du code éléments finis ATILA et le champ de pression au-delà de l'écran CP est calculé en fonction de la fréquence. Dans la gamme de fréquences correspondant à la réfraction négative, la figure 3 présente l'évolution du champ de pression ( $p$ ) en fonction de la distance au-delà de l'écran CP ( $x$ , voir figure 4) et pour différentes fréquences [1400;2000] Hz. Cette ligne perpendiculaire à l'écran CP passe par la source sonore ( $S$ ) et par la tâche focale. Le niveau de gris nous renseigne sur les niveaux de pression. La figure montre que le point focal est maximal pour des fréquences proches de 1700 Hz et à 60 cm derrière l'écran CP. Ainsi, la distance source-image (120 cm) est légèrement supérieure à deux fois l'épaisseur du CP ( $2 * 50$  cm). Nous observons également que le point focal s'éloigne de l'écran lorsque la fréquence augmente. La position et l'étalement de cette tâche focale sont liés à la faible anisotropie du CP, discutée précédemment.

### 3.3 Analyse harmonique avec un pseudo-auditeur

La simulation numérique est conduite maintenant en considérant un pseudo-auditeur, placé à 200 cm derrière l'écran (correspondant à la scène sonore 6 du tableau 1). Il est symbolisé par un cylindre de rayon 10 cm. La figure 4 présente la position de la source sonore, de l'écran et du

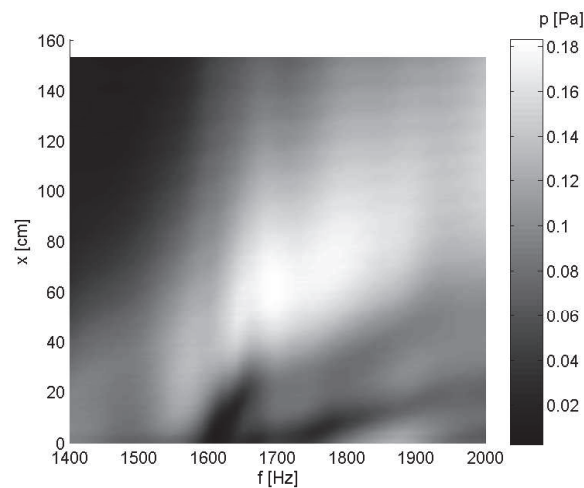


FIGURE 3 – Évolution du champ de pression ( $p$ ) en fonction de la distance au-delà du CP ( $x$ ) et pour différentes fréquences [1400;2000] Hz.

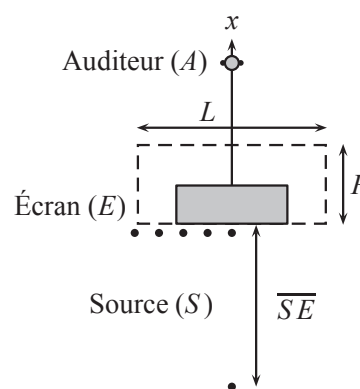


FIGURE 4 – Position de l'auditeur, de l'écran et de la source sonore pour les différentes scènes sonores du tableau 1.

“pseudo”-auditeur pour les scènes sonores listées dans le tableau 1. La source ( $S$ ) et l'auditeur ( $A$ ) sont placés de part et d'autre de l'écran CP comme indiqué dans la figure 4. Afin d'évaluer les performances de l'écran CP, trois calculs sont menés en parallèle :

- champ libre, c'est-à-dire que la source ne rencontre aucun obstacle mis à part le pseudo-auditeur (scènes sonores 1 et 2),
- avec l'écran à base de cristal phononique décrit précédemment positionné au niveau de la zone grisée (scènes sonores 3 à 6),
- avec un écran acoustique droit idéal (condition de réflexion parfaite air/écran) de même taille que l'écran CP (scènes sonores 7 à 10).

L'analyse harmonique est menée sur la bande de fréquences [7,81;4000] Hz, avec un pas de 3,9 Hz (soit 1024 points). La pression estimée, en partie réelle et en partie imaginaire, est récupérée au niveau du pseudo-auditeur, sur le côté droit et sur le côté gauche, symbolisant les signaux reçus au niveau des pavillons de l'auditeur ou *Ear Reference Point* (ERP) suivant la nomenclature de l'Union Internationale des Télécommunications [13]. La transformée de Fourier inverse de la pression estimée permet d'obtenir la réponse impulsionnelle de 256 ms pour les 10 scènes sonores



TABLEAU 1 – liste des 18 scènes sonores étudiées.

$N$	Type d'écran	$\overline{SE}$ [m]	$L$ [m]	$P$ [m]
1	-	2	-	0,5
2	-	0,1	-	0,5
3	CP	2	1,4	0,5
4	CP	2	2,35	0,5
5	CP	2	1,4	1
6	CP	0,1	1,4	0,5
7	Droit	2	1,4	0,5
8	Droit	2	2,35	0,5
9	Droit	2	1,4	1
10	Droit	0,1	1,4	0,5

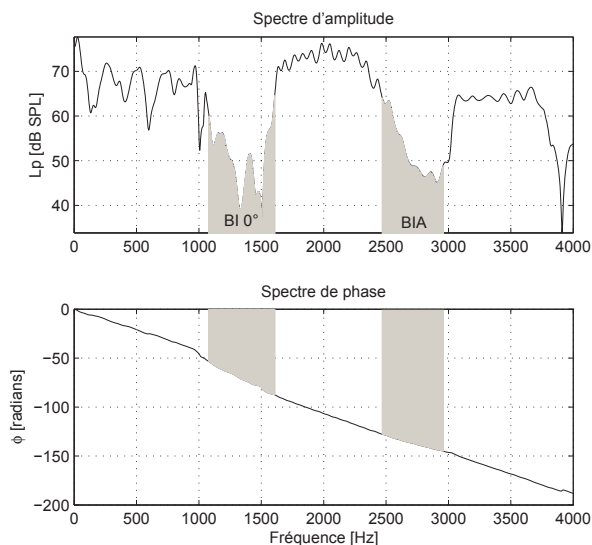


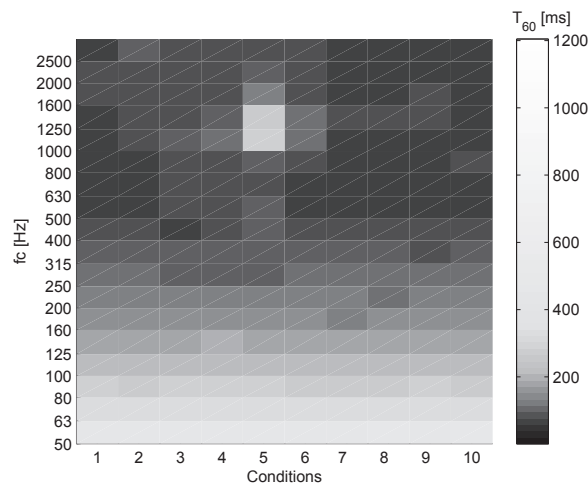
FIGURE 5 – Spectre d'amplitude et spectre de phase pour le signal gauche obtenu au niveau du pseudo-auditeur pour la scène sonore 6 du tableau 1.

du tableau 1. La figure 5 montre le spectre d'amplitude et le spectre de phase pour la scène sonore 6 du tableau 1. Le spectre d'amplitude montre l'atténuation de l'écran CP dans la bande interdite [1080;1610] Hz (BI0°) et dans la bande interdite absolue [2470;2960] Hz (BIA). Le niveau est plus élevé dans la gamme de fréquence de la réfraction négative [1610;2500] Hz, zone dans laquelle la focalisation à lieu.

## 4 Analyse auditive

### 4.1 Base de données

Afin d'étudier l'impact d'un cristal phononique sur l'identité sonore d'une source, les réponses impulsionnelles calculées précédemment ont été convoluées avec 22 bruits blancs bandes-étroites. La fréquence centrale  $f_c$  de chaque bruit correspond aux tiers d'octave entre 25 Hz et 3150 Hz et la bande passante de chaque bruit vaut un tiers d'octave ( $[f_c/\sqrt{2}; f_c * \sqrt{2}]$ ). Une base de données de signaux vocaux a également été créée. Elle comprend 4 locuteurs (2 hommes, 2 femmes) et 4 phrases par locuteur. Ainsi, nous obtenons une base de données de 684 signaux sonores. Les bruits tiers d'octaves nous permettent d'évaluer en détail l'impact fréquentiel du cristal phononique. Les signaux vocaux,

FIGURE 6 – Temps de réverbération  $T_{60}$  estimé pour les 10 scènes sonores du tableau 1 et pour les tiers d'octave de fréquences centrales [50;2500] Hz.

par définition large-bande nous permettront d'étudier si le masquage fréquentiel atténue l'influence de l'écran CP sur le signal sonore.

### 4.2 Indicateurs psychoacoustiques

Dans un premier temps nous avons utilisé un indicateur physique, le temps de réverbération à 60 dB,  $T_{60}$  (ici en ms) pour estimer le déphasage introduit par l'écran CP. La figure 6 montre le temps de réverbération estimé pour les 10 scènes sonores et pour les 19 tiers d'octave de fréquences centrales [50;2500] Hz. Le temps de réverbération décroît avec la fréquence centrale pour l'ensemble des scènes sonores. Cependant, pour la scène sonore 5, le temps de réverbération augmente considérablement pour les tiers d'octave de fréquences centrales 1000 Hz et 1250 Hz, ce qui se traduit par une zone plus claire dans la figure 6. Ainsi, l'écran CP introduit un déphasage conséquent (i.e. vitesse de propagation plus faible) dans la première bande interdite.

Afin d'étudier si l'atténuation due à l'écran CP dans la bande de fréquences interdites est audible, la sonie (niveau sonore perçu) des 684 signaux de la base de données a été estimée suivant le modèle de Zwicker [10]. Ce modèle est particulièrement adapté pour les bruits tiers d'octave qui ont un niveau sonore continu. Le niveau de pression sonore au niveau du pseudo-auditeur pour la scène sonore 1 est fixé à  $L_p = 66 \text{ dB}_{\text{SPL}}$  pour le tiers d'octave de fréquence centrale  $f_c = 1000 \text{ Hz}$ . Tout d'abord, la figure 7 montre la sonie estimée des 16 signaux vocaux pour les trois scènes sonores 2, 6 et 14 (i.e. même position de la source sonore). Nous observons que pour les 16 phrases, la sonie est atténuée pour les scènes sonores avec écran (CP ou écran droit). Cependant, pour l'ensemble des 16 phrases, le niveau sonore perçu est trois fois plus fort avec l'écran CP par rapport à l'écran acoustique droit. Ainsi, pour des signaux large-bande, le CP semble beaucoup moins efficace qu'un écran acoustique droit.

La figure 8 montre la sonie estimée pour les 19 tiers d'octave de fréquences centrales [50;3150] Hz et les 10 scènes sonores. Pour les scènes sonores 1 et 2, la sonie varie peu en fonction de la fréquence. Nous observons une nette diminution du niveau sonore perçu pour les scènes

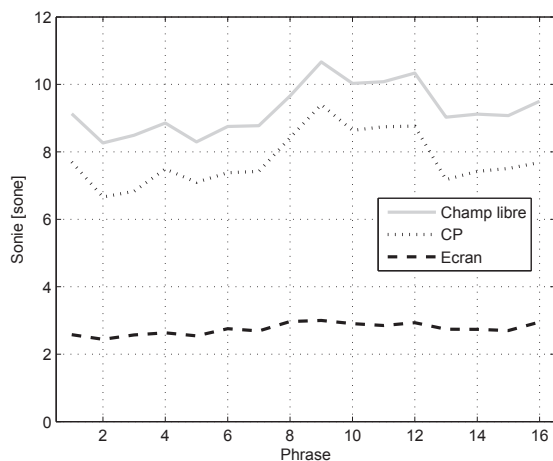


FIGURE 7 – Estimation de la sonie des 16 signaux vocaux pour les trois scènes sonores 2, 6 et 14, voir tableau 1.

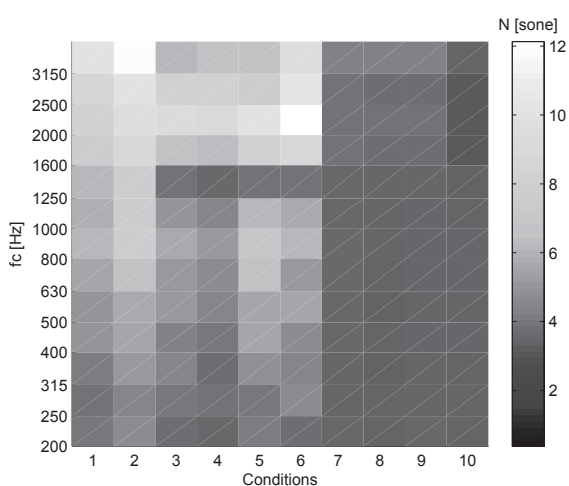


FIGURE 8 – Sonie au niveau de l'oreille droite du pseudo-auditeur pour les 10 scènes sonores du tableau 1 pour la gamme de fréquence [200;3150] Hz.

sonores 7 à 10, i.e. lorsque l'écran acoustique droit est positionné entre la source sonore et le pseudo-auditeur. L'écran CP ne permet pas d'obtenir une atténuation aussi élevée sauf pour les fréquences proches de 1250 Hz (correspondant à la première bande interdite) où l'atténuation est proche de celle de l'écran droit. Enfin, pour la scène sonore 6, nous observons une augmentation du niveau sonore perçu par rapport à la scène sonore de référence (dans ce cas la scène sonore 2) pour les fréquences proches de 2000 Hz. Ainsi, la figure 8 nous montre qu'un écran CP permet d'atténuer le niveau sonore perçu aussi bien qu'un écran acoustique droit pour les fréquences dans la bande interdite et également que le phénomène de réfraction négative amplifie artificiellement le niveau sonore perçu de certaines fréquences : c'est le phénomène de *focalisation*.

## 5 Conclusion

Le cristal phononique étudié dans cet article présente trois caractéristiques différentes : une bande interdite dans la gamme de fréquences [1080;1610] Hz, de la réfraction négative dans la gamme [1610;2500] Hz, et une bande

interdite absolue dans la gamme [2500;2960] Hz. L'analyse auditive montre qu'un écran acoustique à base d'un cristal phononique introduit une réduction de l'intensité sonore perçue proche d'un écran acoustique droit de même taille dans la bande des fréquences interdites. Un déphasage conséquent apparaît également dans cette gamme de fréquences. De plus, le phénomène de réfraction négative introduit une amplification de l'intensité sonore perçue pour une bande de fréquences données, autour de 2000 Hz dans notre étude, ce qui correspond à la focalisation (création d'une source image) derrière l'écran CP.

Pour la suite de cette étude, nous envisageons d'effectuer une série de mesures expérimentales et également un test auditif afin de déterminer l'impact de la bande de fréquences interdites sur la modification du timbre des objets sonores. Pour cela nous proposons de mettre en place une expérience où les sujets devront quantifier la gêne sonore perçue de signaux sonores transformés par un écran acoustique droit et un écran à base de cristal phononique. Dans ce cas, les deux phénomènes, atténuation et déphasage, seront pris en compte par les auditeurs pour déterminer si un écran CP permet une diminution des nuisances sonores dues aux bruits routiers. Enfin, un second test permettra de quantifier l'impact de la réfraction négative sur la perception en distance d'objets sonores.

## Références

- [1] M. M. M. Sigalas, E. N. Economou, Attenuation of multiple-scattered sound, *EPL (Europhysics Letters)*, **36** 4, 241–246 (1996).
- [2] J. V. Sánchez-Pérez, D. Caballero, R. Martínez-Sala, C. Rubio, J. Sánchez-Dehesa, F. Meseguer, J. Llinares, F. Galvez, Sound attenuation by a two-dimensional array of rigid cylinders, *Physical review letters*, **80** 24, 5325–5328 (1998).
- [3] C. Goffaux, F. Maseri, J. O. Vasseur, B. Djafari-Rouhani, Ph. Lambin, Measurements and calculations of the sound attenuation by a phononic band gap structure suitable for an insulating partition application, *Applied Physics Letters*, **83** 2, 281–283 (2003).
- [4] J. O. Vasseur, P. A. Deymier, A. Khelif, Ph. Lambin, B. Djafari-Rouhani, A. Akjouj, L. Dobrzynski, N. Fettouhi, J. Zemmouri, Phononic crystal with low filling fraction and absolute acoustic band gap in the audible frequency range : A theoretical and experimental study, *Physical Review E*, **65**, 056608 (2002).
- [5] V. Romero-garcia, S. Castiñeira-Ibañez, J. V. Sánchez-Pérez, L. M. Garcia-Raffi, Design of wideband attenuation devices based on Sonic Crystals made of multi-phenomena scatterers, in *Acoustics 2012*, 543–548 (2012).
- [6] F. Koussa, J. Defrance, P. Jean, P. Blanc-benon, Transport noise reduction by low height sonic crystal noise barriers, in *Acoustics 2012*, 997–1001 (2012).
- [7] I. Spiouzas, P. E. Etchemendy, E. R. Calcagno, M. C. Eguia, Shifts in the judgement of distance to a sound source in the presence of a sonic crystal, in

- the Proceedings of Meetings on Acoustics*, 19, 050162 (2013).
- [8] D. H. Mershon, L. E. King, Intensity and Reverberation as Factors in the Auditory Perception of Egocentric Distance, *Attention, Perception & Psychophysics*, **18**(6), 409–415 (1975).
- [9] S. S. Stevens, M. Guirao, Loudness, Reciprocity, and Partition Scales, *Journal of the Acoustical Society of America*, **34**(9B), 1466–1471 (1962).
- [10] H. Fastl, E. Zwicker, *Psychoacoustics : Facts and Models*, 3ème édition, Springer, Berlin (2007).
- [11] P. Langlet, A. C. Hladky-Hennion, J. N. Decarpigny, Analysis of the propagation of acoustic waves in passive periodic materials using the finite element method, *Journal of the Acoustical Society of America*, **98**, 2792–2800 (1995).
- [12] A. Sukhovich, B. Merheb, K. Muralidharan, J. O. Vasseur, Y. Pennec, P. A. Deymier, J. H. Page, Experimental and theoretical evidence for subwavelength imaging in phononic crystals, *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 154301 (2009).
- [13] ITU–T Rec. P.58 Head and torso simulator for telephonometry, Union Internationale des Télécommunications, Recommendation P.58, Genève, Suisse (2013).