

Diminution du bruit des transports terrestres par des cristaux soniques de faible hauteur

Transport noise reduction by low height sonic crystal noise barriers

Faouzi Koussa, Jérôme Defrance, Philippe Jean

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
24, rue Joseph Fourier
38400 Saint Martin d'Hères
E-mail : faouzi.koussa@cstb.fr
jerome.defrance@cstb.fr
philippe.jean@cstb.fr

Philippe Blanc-Benon

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique
UMR CNRS 5509
École Centrale de Lyon
36, avenue Guy de Collongue
69134 Écully CEDEX
E-mail : philippe.blanc-benon@ec-lyon.fr

Résumé

Un moyen de protéger les habitants du bruit de la circulation est de placer des écrans acoustiques le long des voies routières ou ferroviaires. Dans ce travail, nous étudions l'efficacité acoustique des cristaux soniques dans le but de créer des espaces calmes en milieu urbain. Pour des raisons techniques, esthétiques et de sécurité, la hauteur de ces écrans acoustiques ne dépasse pas un mètre. Des diffuseurs cylindriques avec des propriétés acoustiques de résonance et d'absorption sont utilisés dans ce travail afin d'améliorer la performance acoustique des cristaux soniques de faible hauteur. Des simulations numériques sont réalisées, en utilisant la méthode des éléments finis de frontière (BEM) en deux dimensions, afin d'évaluer leurs propriétés acoustiques en termes de perte par insertion. Nos résultats montrent que l'efficacité acoustique des cristaux soniques de faible hauteur est significative sur toute la gamme de fréquences étudiée pour les bruits routier et de tramway.

Abstract

Noise barriers along roads and railways are one of the existing solutions to protect inhabitants from noise. In this research we attempt to create quiet areas in cities using sonic crystal noise barriers. For aesthetic and security aspects, such protections do not exceed a size of 1 m×1 m in a vertical section. Cylindrical scatterers with added acoustical properties of resonance and absorption are used in this work to improve the acoustic performance of low height sonic crystal barriers. Numerical simulations, using a 2D Boundary Element Method (BEM), are carried out to evaluate their acoustic properties in terms of insertion loss. Our results show that the effectiveness of low height sonic crystal noise barriers is significant for road and tramway noise over the entire frequency range of study.

Les cristaux soniques sont des milieux inhomogènes constitués d'un réseau périodique des diffuseurs dans un milieu fluide. L'absence des modes propagatifs des ondes acoustiques pour de telles structures, dans une gamme de fréquences donnée, est qualifiée de bande interdite (*band gap* en anglais : BG). Ceci est le principal avantage de telles structures. Les bandes passantes et les bandes interdites sont les conséquences de la diffusion multiple des ondes dans la structure périodique. La fréquence centrale de la bande interdite f_{BG} est déterminée par la constante du réseau des diffuseurs α qui représente la distance entre deux diffuseurs adjacents [1] :

$$f_{BG} = \frac{c}{2\alpha} \quad (1)$$

où c est la vitesse du son dans l'air.

L'étude de l'efficacité acoustique des cristaux soniques a fait l'objet de plusieurs publications dans les deux dernières décennies.

Sánchez-Pérez et al. [2] ont été parmi les premiers à étudier l'efficacité de ces structures périodiques utilisées comme des écrans acoustiques. Ils ont montré qu'un arrangement bidimensionnel de cylindres creux ou pleins dans l'air, avec un faible nombre d'éléments, peut produire des valeurs significatives d'atténuation acoustique dans une gamme de fréquences bien déterminée. Vasseur et al. [3] ont montré théoriquement et expérimentalement que des cylindres creux ou pleins contribuent à la même perte par insertion. Ceci se produit pour des longueurs d'onde acoustiques qui sont plus grandes que le diamètre des cylindres. Pour avoir une bande interdite indépendante de la direction de propagation (bande interdite totale), certaines études d'optimisation des cristaux soniques ont été effectuées afin de chercher des distributions des cylindres améliorées [4,5]. Romero-García et al. [6] ont utilisé un algorithme d'optimisation génétique couplé avec un modèle de diffusion multiple. Ils ont montré que la création de certaines zones de vide à l'intérieur du réseau de diffuseurs rigides peut améliorer l'efficacité du cristal sonique autour d'une fréquence bien déterminée.

Le remplissage des zones vides créées par des cylindres absorbants permet d'élargir la gamme de fréquences atténuées par le cristal sonique. Dans le même contexte, Sánchez-Pérez et al. [7] ont proposé des géométries fractales formées par des réseaux de cylindres dont la même distribution périodique se répète dans une échelle géométrique de plus en plus petite. Cela permet d'élargir la gamme de fréquences atténuées du cristal par sommation des pics d'atténuation dus aux différents réseaux périodiques.

La performance acoustique d'un cristal sonique peut être améliorée aussi en variant les propriétés physiques des diffuseurs en les rendant absorbants [8, 9] ou des résonateurs acoustiques [10, 11, 12]. Dans le premier cas, où les diffuseurs sont absorbants, les mécanismes de création des bandes interdites sont la réflexion et l'absorption des ondes acoustiques. Dans le deuxième cas, où les éléments constituant le cristal sonique sont des cavités résonantes, il est possible d'atténuer le champ de pression acoustique dans une bande de fréquences au-dessous de la bande interdite. Romero-García et al. [13] ont étudié théoriquement et expérimentalement la performance acoustique des cristaux soniques constitués de cylindres creux et perforés. Ils ont montré que la périodicité des perforations dans l'axe perpendiculaire au plan du cristal introduit une atténuation dans une bande de fréquences au-dessous de la bande interdite. La position de cette bande dans la gamme de fréquences dépend de la taille de la cavité intérieure, du rayon de la perforation ainsi que de la distance entre les perforations. Le remplissage des cylindres par un matériau absorbant permet d'avoir une bande de fréquences interdites totale avec une conservation de la bande atténuée due aux perforations.

Dans ce travail, nous nous intéressons aux cristaux soniques de faible hauteur dédiés aux transports terrestres. Nous étudions l'efficacité de ces écrans de faible hauteur dans l'objectif de proposer des dispositifs s'intégrant dans l'environnement d'une manière satisfaisante pour les riverains contrairement aux écrans de grande hauteur souvent mal perçus par les résidents à cause de la gêne visuelle occasionnée. Nous évaluons l'efficacité de ces protections acoustiques par des simulations numériques en utilisant la BEM (*Boundary element method* ou méthode des éléments finis de frontière) en deux dimensions. D'abord, une brève description de la BEM est exposée. Ensuite, la forme géométrique du cristal sonique de faible hauteur est présentée. Enfin, les résultats des simulations numériques sont détaillés.

Méthode des éléments finis de frontière (BEM)

La BEM ou *Boundary element method* est une technique développée depuis le début des années soixante et fondée sur la théorie des équations intégrales de frontière. Deux ouvrages de référence sur cette méthode sont ceux de Ciskowski et Brebbia [14] et de Bonnet [15]. Cette méthode apparaît plus appropriée en espace infini que la méthode des éléments finis (FEM) puisque seule la surface de la frontière du domaine doit être discrétisée. Le champ acoustique en tout point de l'espace étant dû au rayonnement de ses frontières. Il existe deux formulations de la BEM : la formulation directe et la formulation indirecte.

La formulation directe de la méthode des éléments finis de frontière repose sur l'utilisation de l'équation intégrale d'Helmholtz, dans laquelle les fonctions inconnues sont la pression et la vitesse acoustique. Pour la formulation indirecte, le champ sonore rayonné par une frontière peut être représenté par une distribution des monopôles et de dipôles. Le code de calcul MICADO [16], basé sur la formulation directe de la BEM dans une approche variationnelle, est utilisé dans notre travail pour étudier la performance acoustique des cristaux soniques de faible hauteur. Dans ce code, les frontières sont maillées à chaque fréquence de façon automatique selon des critères de nombre de segments minimal par élément et par longueur d'onde, ce qui optimise les temps de calculs. Les fonctions d'Hankel utilisées pour calculer la fonction de Green sont pré-calculées en permettant la division des temps de calculs par plus de 20. Dans le cas d'un baffle, c'est-à-dire une surface infinie plane présentant une surface de sol, la fonction de Green élémentaire est la solution élémentaire pour une source ponctuelle et un récepteur placés au dessus de ce baffle qui peut être rigide ou impédant.

Dans ce travail, nous utilisons la version 2D du code MICADO. La géométrie du problème est bidimensionnelle: les sources sont infinies, linéaires et cohérentes et tous les obstacles sont infinis le long d'une direction perpendiculaire au plan de coupe vertical (voir figure 1). Des calculs préliminaires sont effectués pour trouver des valeurs aux paramètres numériques assurant la convergence des calculs BEM afin d'obtenir un compromis acceptable entre la précision de calcul et le temps de calcul.

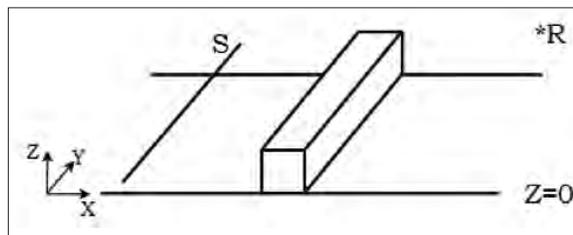


Fig. 1 : Configuration géométrique pour les calculs BEM en 2D
Geometrical configuration for 2D BEM calculations

Conception du cristal sonique de faible hauteur

La conception du cristal sonique de faible hauteur est présentée en figure 2. Les diffuseurs sont générés dans une coupe du cristal sonique et sont donc considérés comme infinis dans la troisième direction et parallèles aux sources routières. Le cristal sonique se compose de deux bandes des diffuseurs BS1 et BS2. La première bande BS1 présente un réseau périodique de diffuseurs (cavités) qui s'étend de $x = 0$ m à $x = 0,30$ m avec une constante de réseau $\alpha_1 = 0,085$ m. Les diffuseurs utilisés ont un diamètre $d_1 = 0,05$ m. La deuxième bande BS2 présente aussi un réseau périodique des diffuseurs (cavités) et s'étend de $x = 0,30$ m à $x = 0,80$ m avec une constante de réseau $\alpha_2 = 0,17$ m. Le diamètre des diffuseurs de cette bande est $d_2 = 0,13$ m. BS1 est proposée pour améliorer la perte par diffraction de la protection acoustique dans une bande de fréquences autour de 2 kHz correspondant à la bande interdite.

BS2 est proposée pour augmenter la perte par diffraction dans la bande de fréquences de 1 kHz présentant l'énergie principale du bruit de circulation routière ou de tramway. Une rangée de cylindres reliés est fixée derrière les deux bandes BS1 et BS2 et s'étend de $x = 0,80$ m à $x = 1$ m. Le rôle de cette rangée est d'avoir une bonne perte par transmission derrière le cristal sonique et peut être remplacée par un écran droit conventionnel de faible hauteur.

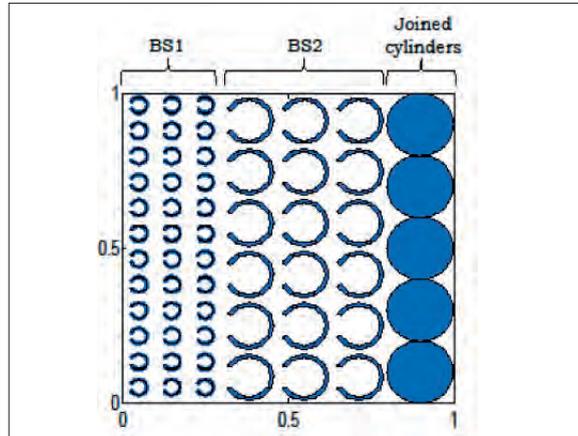


Fig. 2 : Arrangement des diffuseurs dans le cristal sonique de faible hauteur
Scatterers arrangement in the low height sonic crystal noise barrier

Simulations numériques

Nous étudions dans ce travail la performance acoustique des cristaux soniques de faible hauteur pour les bruits de trafic routier et de tramway. Pour le bruit de trafic routier, nous considérons une route à deux voies (figure 3). Le sol est modélisé par une surface rigide. Quatre sources sont considérées : S2 et S4 représentent les sources de bruit de roulement d'un véhicule léger situées à une hauteur de 0,01 m et S1 et S3 représentent les sources de bruit de moteur d'un véhicule léger situées à une hauteur de 0,30 m. Le niveau de bruit utilisé pour les sources est le spectre défini dans le modèle Harmonoise [17] pour une vitesse des véhicules de 50 km/h. Pour le bruit du tramway (figure 4), nous considérons une seule voie ferrée. Les deux sources sonores, présentant le bruit du contact roue-rail, sont placées à une hauteur de 0,05 m. Le spectre de niveau de puissance utilisé pour le bruit de tramway est défini dans le modèle français NMPB [18] pour une vitesse moyenne du tramway de 30 km/h, avec une densité de passage de 20 tramways par heure. À cause du phénomène de réflexions multiples qui peut se produire entre le tramway et le cristal sonique, nous modélisons la caisse du tramway par une surface réfléchissante de 3,2 m × 2,45 m. Pour les deux infrastructures routière et ferroviaire, nous considérons une région de récepteurs derrière le cristal sonique avec un maillage de 9 points récepteurs par m². Elle débute 1 m derrière la protection acoustique et s'étend sur 40 m à une hauteur comprise entre 1 m et 2 m. Elle représente les piétons et les usagers des pistes cyclables. La perte par insertion moyenne est calculée dans la région de récepteurs par bande de tiers d'octave.

Les effets météorologiques sont négligés dans ce travail. Cette hypothèse est acceptable puisque les distances considérées sont inférieures à une centaine de mètres.

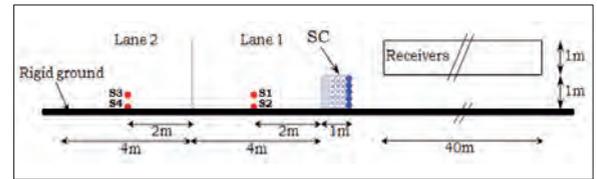


Fig. 3 : Configuration géométrique pour le bruit de trafic routier
Geometrical configuration for road traffic noise

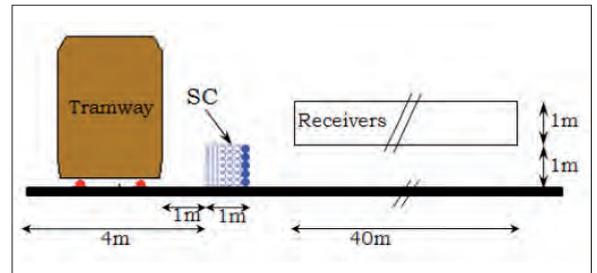


Fig. 4 : Configuration géométrique pour le bruit de tramway
Geometrical configuration for tramway noise

Nous présentons les résultats d'efficacité des cristaux soniques pour deux types de diffuseurs. Pour le premier type (SC1), nous utilisons des cavités résonantes rigides. Pour le deuxième type (SC2), nous utilisons des cavités résonantes dont l'intérieur est couvert d'un matériau absorbant. Ce dernier matériau est la laine minérale dont l'impédance de surface est définie par le modèle de Delany et Bazley [19] avec une résistivité au passage de l'air $\sigma = 30$ kPa.s.m⁻². Les deux cristaux soniques SC1 et SC2 sont comparés, à travers leur perte par insertion, à un écran de référence rigide (RB) de même hauteur (1 m) et de même largeur (1 m).

Résultats des simulations numériques

Nous étudions la perte par insertion des cristaux soniques pour une gamme de fréquences entre 100 Hz et 2 500 Hz. La perte par insertion est la différence de niveau de pression entre les deux configurations sans et avec le cristal sonique. Pour un point récepteur, elle est donnée en dB pour chaque bande de tiers d'octave Δf par la formule suivante :

$$IL_{\Delta f} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{ref}(\Delta f)}{P_{SC}(\Delta f)} \right)^2 \quad (2)$$

où $P_{SC}(\Delta f)$ est la pression acoustique pour la configuration avec le cristal sonique dans la bande de tiers d'octave Δf et $P_{ref}(\Delta f)$ est la pression acoustique pour la configuration de référence sans le cristal sonique dans la bande de tiers d'octave Δf .

Les spectres de la perte par insertion des cristaux soniques SC1 et SC2 et de l'écran de référence sont présentés en figures 4 et 5 respectivement pour le bruit de trafic routier et le bruit de tramway.

Pour le bruit de trafic routier, l'amélioration de l'efficacité de l'écran de référence (RB) due au cristal sonique SC1 est visible pour deux bandes de fréquences autour de 1 kHz et 2 kHz. Elles correspondent aux deux bandes interdites créées respectivement par la première bande des cavités BS1 et par la deuxième bande des cavités BS2 du cristal sonique. En effet, pour ces bandes de fréquences, les ondes acoustiques sont atténuées par le réseau périodique des cavités avant d'être diffractées par le sommet du cristal sonique. L'amélioration de la performance de RB autour de 500 Hz est due à l'effet de résonance. Concernant le cristal sonique SC2 présentant des cavités absorbantes, nous observons une amélioration de la perte par insertion du SC1 au-dessus de 160 Hz. L'amélioration de la performance globale de RB due à SC2 peut atteindre 2,5 dB(A).

Pour le bruit de tramway, l'amélioration de l'efficacité de l'écran de référence (RB) due aux cristaux soniques SC1 et SC2 est visible sur toute la gamme de fréquences. En effet, l'utilisation d'une distribution périodique des cavités résonnantes ou absorbantes en face du tramway réduit l'effet de réflexions multiples entre la protection acoustique et la caisse du tramway conduisant à une réduction significative des niveaux de pression dans la région de récepteurs derrière le cristal sonique. L'amélioration de la perte par insertion globale de RB due à SC2 et SC3 peut atteindre respectivement 4 dB(A) et 8 dB(A).

La perte par insertion de deux cristaux soniques SC1 et SC2 est significative pour les bruits de circulation routière et de tramway. Cependant, le nombre de cavités utilisées dans la conception du cristal sonique est élevé rendant la mise en œuvre de ce type d'écrans difficile. L'objectif est donc de réduire le nombre de cavités sans dégrader de manière significative la perte par insertion du cristal sonique. La structure initiale du cristal sonique contient deux bandes périodiques de cavités (six rangées) et une dernière rangée de cylindres reliés faisant un total de 59 diffuseurs. Nous définissons un nombre d'ordres de réduction du nombre de cavités.

Pour chaque ordre, nous enlevons aléatoirement une cavité dans chaque rangée des deux bandes périodiques. Six cavités sont donc enlevées pour chaque ordre. Un calcul de la perte par insertion du cristal sonique est effectué pour chaque ordre. Le nombre d'ordre choisi est le nombre pour lequel une dégradation de 1,5 dB(A) est atteinte. Les spectres de la perte par insertion des cristaux soniques SC1 et SC2 sont présentés en figures 8 et 9 respectivement pour le bruit de trafic routier et le bruit de tramway. À partir de ces résultats, le nombre maximal d'ordre choisi est $n=4$. Pour ce nombre d'ordre, le nombre total de cavités dans le cristal est réduit à 35 (figure 7).

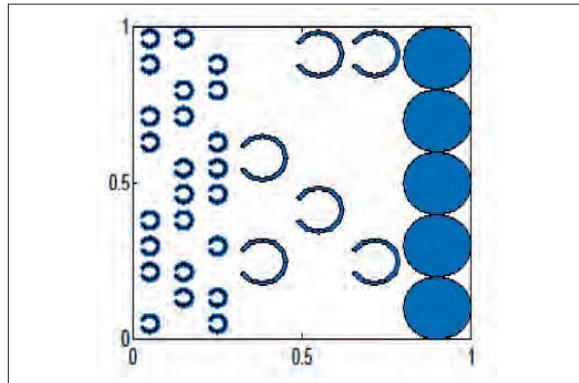


Fig. 7 : Cristal sonique obtenu pour $n=4$
Obtained sonic crystal for $n=4$

Pour le bruit de trafic routier, la dégradation de la perte par insertion des cristaux sonores SC1 et SC2 est faible et ne dépasse pas 1,5 dB (A) pour $n=4$ (24 cavités enlevées). Pour le bruit de tramway, la dégradation de l'efficacité de SC2 est faible et ne dépasse pas 1,2 dB (A). Pour SC1, nous observons aucune dégradation. Au contraire, une amélioration de la perte par insertion est observée pour certaines bandes de tiers d'octave pour les différents ordres n .

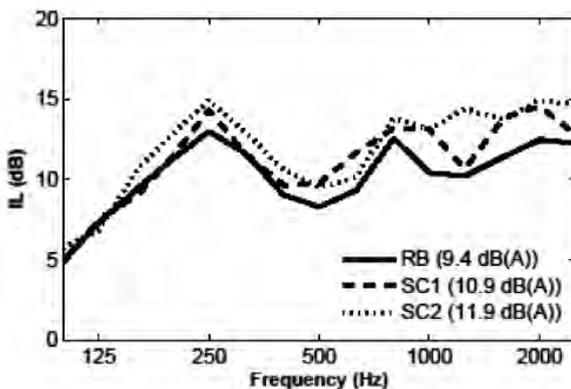


Fig. 5 : Perte par insertion en fonction de la fréquence de RB (traits continus), SC1 (traits interrompus) et SC2 (traits pointillés) avec les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A) dans le cas de bruit de trafic routier
Insertion loss spectra of RB (solid line), SC1 (dashed line) and SC2 (dotted line) with global insertion loss values in dB(A) in the case of road traffic noise

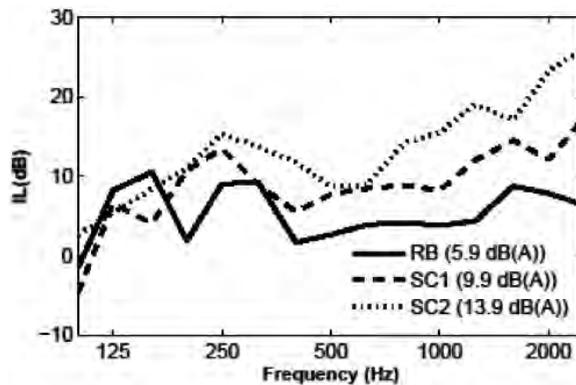


Fig. 6 : Perte par insertion en fonction de la fréquence de RB (traits continus), SC1 (traits interrompus) et SC2 (traits pointillés) avec les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A) dans le cas de bruit de tramway
Insertion loss spectra of RB (solid line), SC1 (dashed line) and SC2 (dotted line) with global insertion loss values in dB(A) in the case of tramway noise

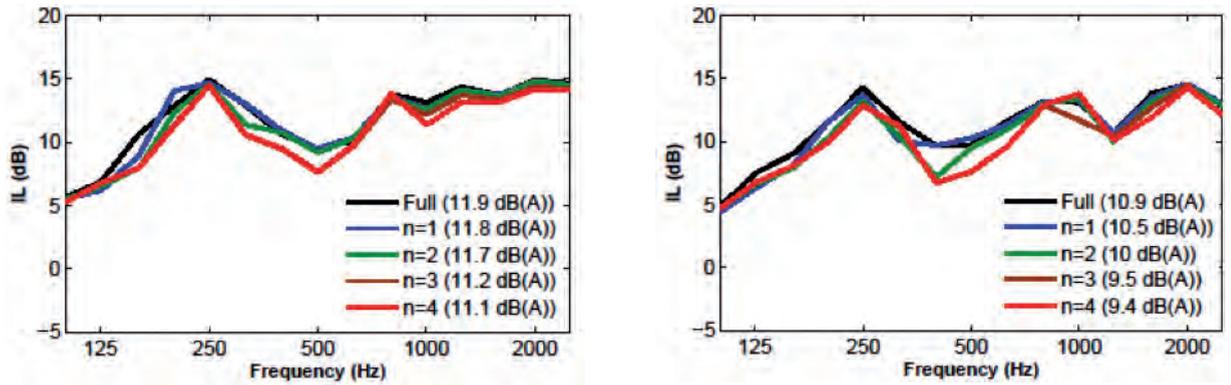


Fig. 8 : Perte par insertion en fonction de la fréquence de SC1 (a) et SC2 (b) pour les différents ordres n de réduction du nombre de diffuseurs avec les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A) dans le cas de bruit de trafic routier
Insertion loss spectra of SC1 (a) and SC2 (b) for the different orders of scatterers number reduction n with global insertion loss values in dB(A) in the case of road traffic noise

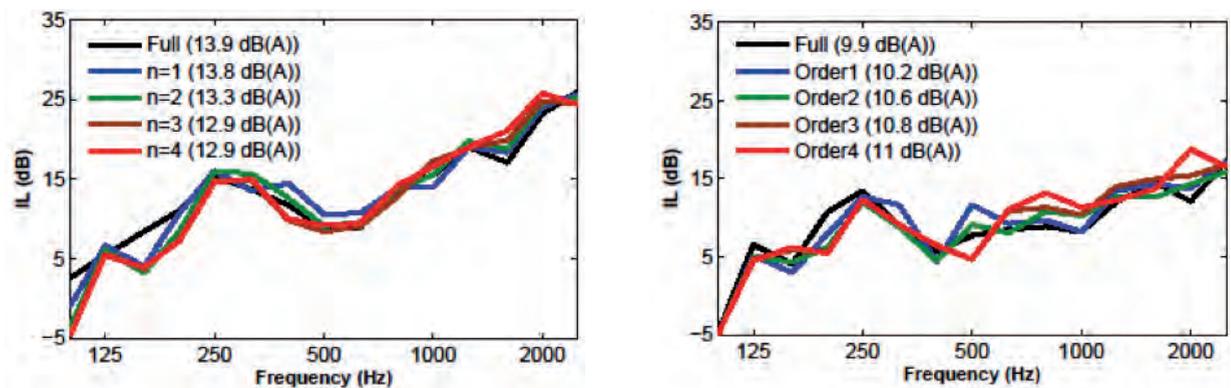


Fig. 9 : Perte par insertion en fonction de la fréquence de SC1 (a) et SC2 (b) pour les différents ordres n de réduction du nombre de diffuseurs avec les valeurs de la perte par insertion globale en dB(A) dans le cas de bruit de tramway
Insertion loss spectra of SC1 (a) and SC2 (b) for the different orders of scatterers number reduction n with global insertion loss values in dB(A) in the case of tramway noise

L'amélioration globale de la performance acoustique de SC1 est de 1,1 dB (A) pour $n=4$. En effet, la suppression de certains diffuseurs permet de créer des zones de vide à l'intérieur du cristal sonique. L'amélioration de l'efficacité du cristal sonique pour certaines bandes de fréquences est donc due à un effet de résonance. Ces résultats montrent l'intérêt de l'utilisation de tels dispositifs antibruit innovants ayant un faible nombre de diffuseurs pour réduire significativement les bruits issus des infrastructures routières et ferroviaires.

Conclusion

L'efficacité acoustique des cristaux soniques de faible hauteur est étudiée dans ce travail dans le but de proposer des dispositifs antibruit innovants s'intégrant en milieu urbain d'une manière satisfaisante pour les riverains. Des simulations numériques effectuées à l'aide d'un code de calcul BEM ont montré une perte par insertion signifi-

cative de tels écrans acoustiques. La perte par insertion globale d'un cristal sonique constitué des cavités résonnantes peut atteindre 10 dB (A) pour le bruit du trafic routier ou le bruit de tramway. Lorsque l'intérieur des cavités résonnantes est couvert d'un matériau absorbant, l'efficacité du cristal sonique atteint 12 dB(A) pour le bruit routier et 14 dB(A) pour le bruit de tramway. L'effet de la suppression de quelques cavités sur l'efficacité acoustique du cristal sonique a été négligeable. Cela peut conduire au contraire à une amélioration de l'efficacité suite à la création des zones résonnantes à l'intérieur du cristal sonique. Les résultats des simulations numériques montrent la possibilité de concevoir des dispositifs antibruit innovants en utilisant des cristaux soniques de faible hauteur avec une efficacité équivalente ou supérieure à celle d'un écran conventionnel. Pour améliorer l'efficacité de tels écrans acoustiques, le travail est toujours en cours pour trouver des formes améliorées des cristaux soniques. Pour ce faire, une nouvelle approche, basée sur un couplage de la BEM avec une méthode d'optimisation, sera utilisée.

Références bibliographiques

- [1] A.Y. Boon Chong, K. Attenborough, S. Tahaerzadeh, "The performance of vertical and horizontal sonic crystal noise barriers above a ground surface", *Internoise*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [2] J.V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, R. Martínez-Sala, R. Sánchez-Grandia, V. Gómez. "Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, pp. 5240-5242, 2002.
- [3] J.O. Vasseur, P.A. Deymier, A. Khelif, P. 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", *Phys.Rev. E.*, vol. 65, 056608, 2002.
- [4] V. Romero-García, E. Fuster, L.M. García-Raffi, E.A. Sánchez-Pérez, M. Sopena, J. Linares, J.V. Sánchez Pérez, "Band gap creation using quasiordered structures based on sonic crystals", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, 174104, 2006.
- [5] J. M. Herrero, S. García-Nieto, X. Blasco, V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez, L. M. García-Raffi, "Optimization of sonic crystal attenuation properties by ev-MOGA multiobjective evolutionary algorithm", *Struct. Multidisc. Optim.*, vol. 39, pp. 203-215, 2009.
- [6] V. Romero-García, E. Fuster-García, L.M. García-Raffi, J.V. Sánchez-Pérez, "Acoustic Barriers Based on Sonic Crystals", *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2007)*, Nevada, USA, 2007.
- [7] J.V. Sánchez-Pérez, S. Castineira-Ibanez, V. Romero-García, L.M. García-Raffi, "New arrangements of acoustic scatterers with high attenuation properties", *Internoise*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [8] W. Kuang, Z. Hou, Y. Liu, "The effects of shapes and symmetries of scatterers on the phononic band gap in 2D phononic crystals", *Physical Letters A*, vol. 332, pp. 481-490, 2004.
- [9] O. Umnova, K. Attenborough, C.M. Linton, "Effects of porous covering on sound attenuation by periodic arrays of cylinders", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, pp. 278-284, 2006.
- [10] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Zhu, Z. Yang, C. Chan, P. Sheng, "Locally Resonant Sonic Materials", *Science*, vol. 289, pp. 1734, 2000.
- [11] A.B. Movchan, S. Guenneau, "Split-ring resonators and localized modes", *Phys. Rev.B*, vol. 70, pp. 125116, 2004.
- [12] M. Hikerson, P.P. Delsanto, N.K. Balra, P. Matic, "Modelling and simulation of acoustic wave propagation in locally resonant sonic materials", *Ultrasonics*, vol. 42, pp. 231-235, 2004.
- [13] V. Romero-García, E. Fuster-García, J.V. Sánchez-Pérez, L.M. García-Raffi, "Sonic crystal acoustic barriers based on scatterers with added acoustical properties", *Internoise*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [14] R.D. Ciskowski, C.A. Brebbia, "Boundary Element Methods in Acoustics", Elsevier Applied Science, London, 1991.
- [15] M. Bonnet, "Équations intégrales et éléments de frontière : applications en mécanique des solides et des fluides", Paris : CNRS Editions, Eyrolles, 1995.
- [16] P. Jean, "A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise", *J. Sound Vib.*, vol. 212, pp. 275-294, 1998.
- [17] H. Jonasson, U. Sandberg, G. van Blokland, J. Ejsmont, G. Watts, M. Luminari, "Source modelling of road vehicles", Deliverable 9 of the Harmonoise project, Technical report HAR11TR-041210-SP10, 2004.
- [18] J. Defrance, Y. Gabillet, D. van Maercke, C. Dine, P.E. Gautier, "A new French Method for Railway Noise Prediction", *Internoise*, Nice, France, 2000.