

Pilotage de l'amortissement pour améliorer l'effet de trou noir acoustique

M. Ouisse, D. Renault, P. Butaud, E. Sadoulet-Reboul

Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS/UFC/ENSMM/UTBM, Institut FEMTO-ST, Département
Mécanique Appliquée, Besançon - FR
prenom.nom@femto-st.fr

Résumé

Les trous noirs acoustiques constituent des solutions innovantes pour amortir les vibrations de flexion grâce à l'utilisation de profils d'épaisseurs à loi puissance dans les poutres et les plaques. Cependant, les applications pratiques du concept sont limitées en raison de l'épaisseur terminale non nulle de la structure hôte. Dans ce travail, il est proposé d'ajouter une couche viscoélastique au trou noir acoustique et de contrôler ses propriétés mécaniques en faisant varier la température du matériau afin d'obtenir un trou noir à propriétés ajustables. Une méthodologie de conception de la couche d'amortissement est proposée, basée sur le calcul du coefficient de réflexion de la terminaison trou noir, donc indépendante de l'excitation et des conditions aux limites de la structure hôte. Cette optimisation est effectuée à une température proche de la transition vitreuse du matériau viscoélastique afin de trouver la configuration offrant le niveau de dissipation le plus élevé. En contrôlant la température du patch, il est possible d'ajuster le comportement du trou noir en fonction de l'application pratique considérée. Les résultats de simulation sont confrontés aux mesures afin d'illustrer l'applicabilité du concept.

Abstract

Acoustic black holes are innovative solutions for damping flexural vibrations using power law profiles in beams and plates. Practical applications of the concept are limited because of the non-zero terminal thickness of the host structure. In this work, it is proposed to add a viscoelastic layer to the black hole and use temperature to control its properties. A design methodology of the damping layer is proposed, based on the calculation of the reflection coefficient of the black hole termination, thus independent of the boundary conditions of the host structure. This optimization is performed at a temperature close to the glass transition of the viscoelastic material in order to find the configuration providing the highest level of dissipation. By controlling the temperature of the patch, it is possible to adjust the behavior of the acoustic black hole. The simulation results are compared with the measurements to illustrate the applicability of the concept.

Mots clefs : contrôle vibratoire, pilotage de l'amortissement, trou noir acoustique

1 Introduction

L'amortissement des vibrations de structures minces peut être réalisé de diverses façons, parmi lesquelles l'utilisation de l'effet trou noir acoustique [22, 17, 14], qui est obtenu en amincissant les bords de la structure en suivant une loi de puissance. Cela permet aux ondes de flexion de voir leur vitesse de propagation asymptotiquement ralentie vers zéro, ce qui signifie que le bord n'est jamais atteint et que l'onde n'est pas réfléchi. Ce comportement théorique est cependant impossible à obtenir en pratique, puisque l'épaisseur terminale est non nulle, induisant une réflexion des ondes de flexion. Bien que les effets non linéaires liés à la réduction d'épaisseur en bout de trou noir puissent conduire à une dissipation d'énergie [11], l'amélioration de l'efficacité du trou noir passe souvent par l'utilisation d'une couche de matériau amortissant localisée dans la zone du trou noir [10].

L'applicabilité du concept de trou noir a été démontrée par plusieurs auteurs [2, 9, 25], principalement pour les structures métalliques, mais également pour des plaques composites verre/epoxy [3]. De nouvelles conceptions ont récemment été proposées, comme l'utilisation d'agencements en spirale du trou noir afin de minimiser la taille du dispositif [19]. L'émergence de ces dispositifs basés sur l'effet trou noir a probablement incité certains groupes de recherche à imaginer d'autres applications que l'amortissement structural : entre autres, la récupération d'énergie [26] ou la focalisation de l'énergie [15] sont de bons exemples de concepts pouvant tirer parti des propriétés mécaniques inhabituelles des trous noirs acoustiques.

Dans ce travail, nous présentons un concept de trou noir accordable en terme de niveau d'amortissement. Ce concept est basé sur le principe de contrôle des propriétés viscoélastiques d'une couche de matériau amortissant [4], collé sur le trou noir. Il s'agit d'un dispositif adaptatif, que nous ne qualifions pas d'actif [13, 16] dans le sens où l'échelle de temps utilisée pour la régulation est très différente de celle caractéristique du phénomène à contrôler. On peut cependant le qualifier de semi-actif [8, 23] puisqu'une énergie est nécessaire pour piloter le comportement du matériau. Ce pilotage se fait en contrôlant la température : il est connu depuis des années que les propriétés de raideur et d'amortissement des matériaux viscoélastiques sont dépendants de la fréquence et de la température [6, 12, 18]. De nombreux travaux ont porté sur l'effet de la température sur les performances structurales [7, 24, 20] ou sur l'optimisation des propriétés viscoélastiques pour une température donnée [21]. Le pilotage des propriétés d'une structure incluant un élément viscoélastique par la température est un concept récent [4], qui a été utilisé par exemple pour piloter la rigidité d'une couche dans un métamatériau [1]. Ici, l'objectif est plutôt porté sur l'ajustement des propriétés d'amortissement qui ont un impact direct sur les performances du trou noir.

2 Couplage du trou noir avec une couche viscoélastique

Le trou noir considéré ici est localisé en bout d'une poutre en aluminium, d'épaisseur 5 mm. La couche amortissante est collée sur une portion du trou noir, de longueur 15 cm et de profil quadratique, comme illustré sur la figure 1.

L'effet amortissant est illustré sur la figure 2, qui montre clairement que, sans amortissement (dans une configuration géométrique idéale mais d'épaisseur finale finie), le trou noir est inefficace, alors que la présence d'une couche absorbante (ici constituée d'un matériau choisi arbitrairement) permet de limiter fortement le niveau vibratoire. Dans cette simulation, la configuration correspond au dispositif expérimental : poutre libre-libre, excitation harmonique transversale localisée en bout de poutre (extrémité

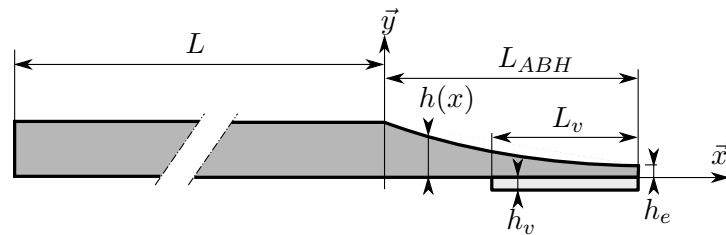


FIGURE 1 – Trou noir acoustique avec couche viscoélastique

opposée au trou noir). Cette simulation, comme toutes celles présentées dans cet article, est réalisée par éléments finis 2D.

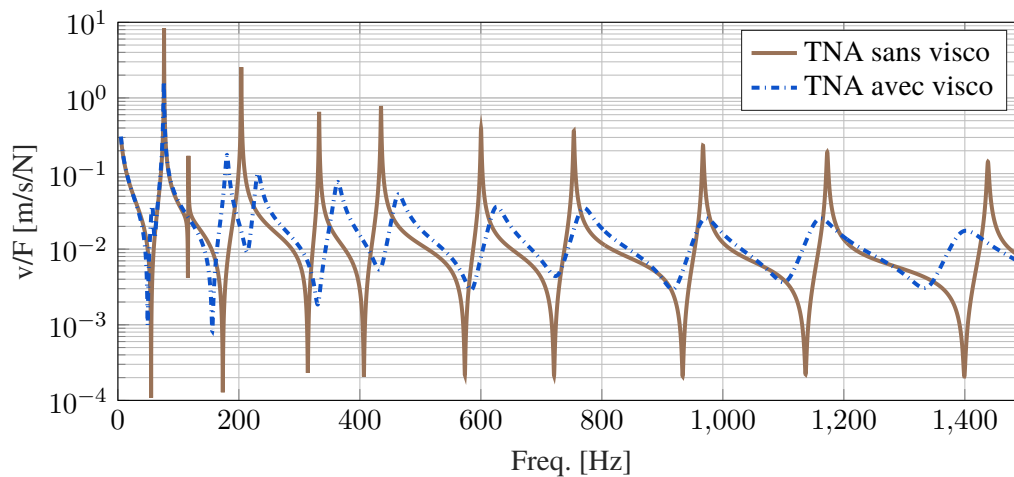


FIGURE 2 – Résultats simulés - mobilité d'entrée (fonction de transfert vitesse/effort au point d'excitation) de la poutre TNA (Trou Noir Acoustique), avec/sans couche viscoélastique

Comme attendu, la couche d'amortissement joue un rôle majeur dans l'efficacité du trou noir car elle contribue à dissiper l'énergie qui est réfléchiée sur la terminaison d'épaisseur non nulle. La courbe de mobilité est assez illustrative mais dépend des propriétés de la poutre, de ses conditions limites et de l'emplacement de la force d'excitation. On propose donc d'analyser les résultats au travers du coefficient de réflexion, qui est indépendant de l'excitation utilisée, de la longueur et des conditions aux limites utilisées sur la poutre. Dans ce travail, le coefficient de réflexion est évalué à partir de la mesure de l'accélération transversale en deux (pour le modèle numérique) ou trois points (pour la caractérisation expérimentale) localisés dans la zone centrale de la poutre. On estime l'amplitude des ondes incidentes et réfléchies en négligeant les contributions des ondes évanescentes par pseudo-inverse afin de calculer le coefficient de réflexion.

Le module du coefficient de réflexion calculé avec cette technique est représenté sur la figure 3 où il est possible de constater que la couche viscoélastique a un effet très important sur le coefficient de réflexion et permet effectivement de dissiper l'énergie, tandis que l'épaisseur non nulle la terminaison du trou noir sans matériau amortissant réfléchit presque toute l'énergie, la dissipation se produisant uniquement par le facteur de perte du matériau de la poutre porteuse.

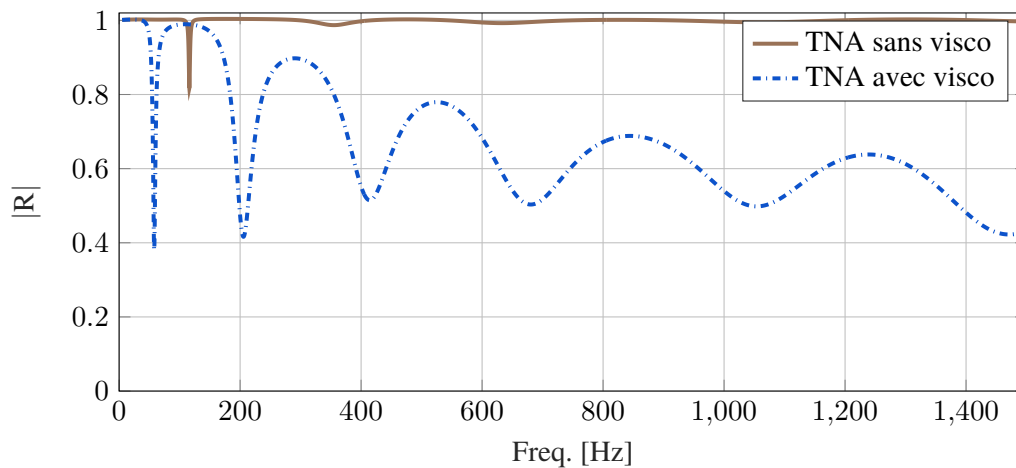


FIGURE 3 – Résultats simulés - coefficient de réflexion de la poutre TNA (Trou Noir Acoustique), avec/sans couche viscoélastique

3 Contrôle de l'amortissement dans la couche viscoélastique

Le matériau viscoélastique utilisé ici est le tBA/PEGDMA dont le comportement peut être efficacement représenté par le modèle proposé dans [4], construit sur les caractérisations présentées dans [5]. Ce matériau a des propriétés dépendant très fortement de la température, en particulier le facteur de perte qui atteint une valeur maximale de 2,4 (à la température de 70°C). Avec une épaisseur arbitraire pour cette couche, la dépendance du coefficient de réflexion à la température est présentée sur la figure 4.

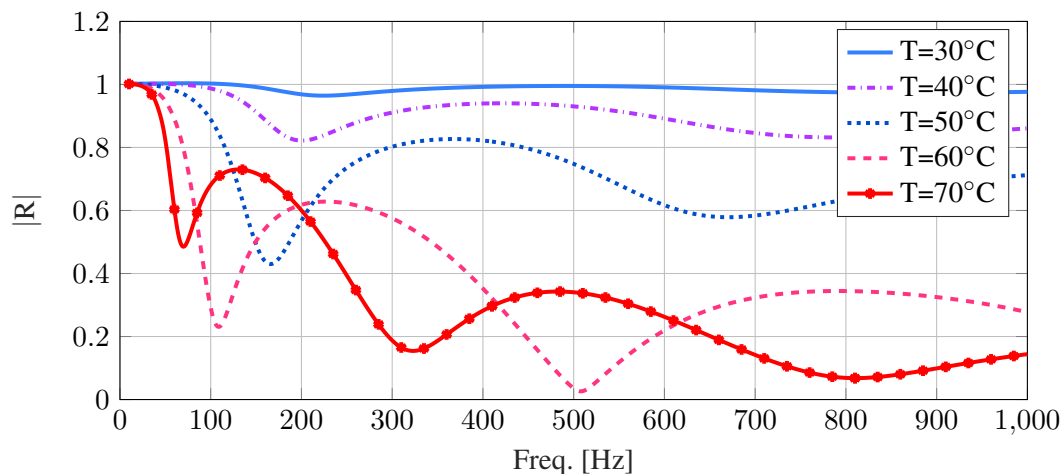


FIGURE 4 – Résultats simulés - coefficient de réflexion de la poutre TNA équipée du tBA/PEGDMA, pour différentes températures

À température ambiante, le facteur de perte du matériau est très faible et le tBA/PEGDMA ne dissipe que peu d'énergie. Lorsque la température du matériau augmente, l'effet sur le coefficient de réflexion devient plus important : le premier minimum du coefficient de réflexion se produit à une fréquence inférieure, et sa valeur moyenne diminue également. Au-delà de cette température, les performances du dispositif en terme d'amortissement pourraient être affectées par la réduction du facteur de perte lié au dépassement de la température de transition vitreuse. La figure illustre clairement le fait que les propriétés mécaniques du trou noir peuvent être ajustées par le contrôle de la température.

4 Détermination des dimensions de la couche viscoélastique

La conception d'un dispositif multicouche pour l'amortissement consiste toujours à trouver un compromis entre amortissement et la rigidité, ce qui est particulièrement vrai dans le cas considéré, car la couche ajoutée augmentera la rigidité du trou noir et, par conséquent, affectera ses performances. La valeur ajoutée fournie par la dissipation devrait apporter plus d'avantages que la baisse de performance due à la rigidité supplémentaire.

Afin de dimensionner la couche d'amortissement, une étude paramétrique basée sur un modèle a été réalisée. Comme illustré ci-dessus, la capacité d'amortissement du polymère utilisé est la plus efficace pour une température proche de la transition vitreuse qui se situe à 70°C environ.

Une étude paramétrique a été réalisée en fixant la température à 70 °C, utilisant deux paramètres géométriques (l'épaisseur et la longueur de la couche). L'indicateur de performance considéré est la valeur moyenne du coefficient de réflexion sur la plage de fréquences d'intérêt.

Cette analyse conduit à choisir un patch dont l'épaisseur est 3 mm et qui couvre la moitié du trou noir.

Cette configuration est retenue et des simulations ont été réalisées afin de montrer la capacité du matériau à contrôler le comportement d'amortissement lorsqu'il est piloté en température. La valeur moyenne du coefficient de réflexion a été calculée sur la plage de fréquences 0-1000 Hz pour différentes températures. La figure 5 montre qu'un état stable est atteint pour des températures supérieures à 70°C, et que le niveau d'amortissement est très élevé au-delà de 55°C environ.

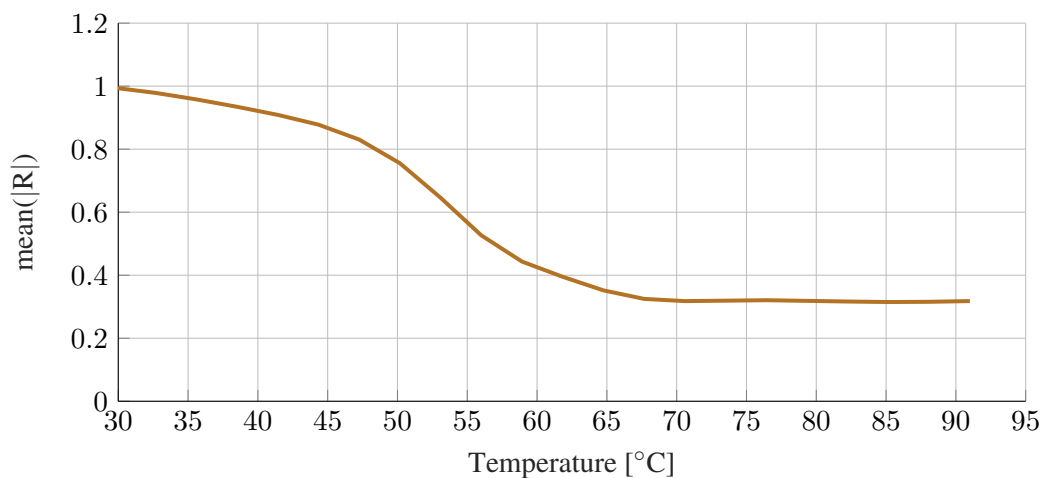


FIGURE 5 – Résultats de simulation : évolution de la valeur moyenne du coefficient de réflexion avec la température

5 Validation expérimentale

La poutre équipée du trou noir utilisée pour la validation expérimentale a été fournie par le LAUM-Le Mans Université, tandis que le matériau viscoélastique a été élaboré à FEMTO-ST-Université Bourgogne Franche-Comté, en accord avec le dimensionnement présenté ci-dessus.

La poutre est suspendue à l'intérieur d'une enceinte thermique. Un excitateur sans contact est utilisé pour générer un bruit blanc. Les mesures accélérométriques sont réalisées dans la zone centrale de la poutre, après un temps de stabilisation thermique d'une dizaine de minutes entre chaque température testée.

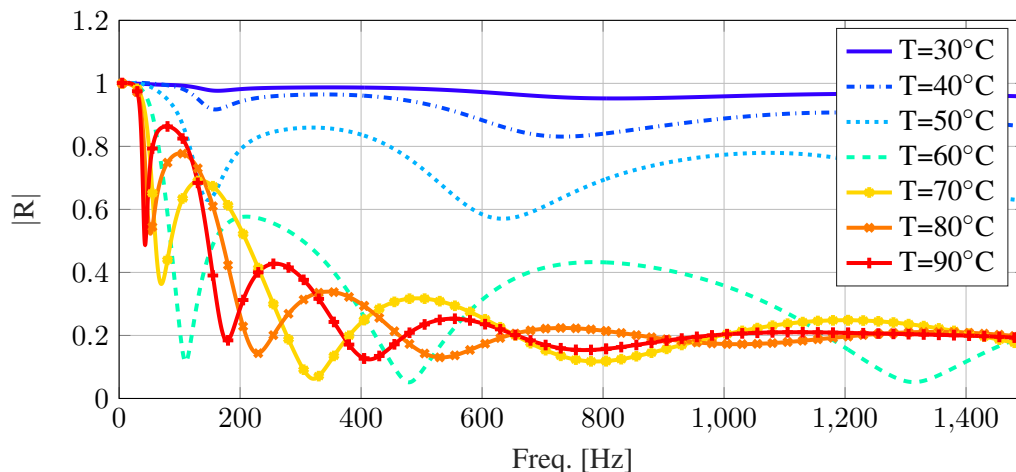


FIGURE 6 – Résultats de simulation : amplitude du coefficient de réflexion pour plusieurs températures

La figure 7 montre les évolutions des coefficients de réflexion identifiés à partir des mesures pour le même jeu de températures que celui utilisé pour les simulations. Les données expérimentales sont un peu bruitées, cela est principalement dû à un alignement non parfait de la force ponctuelle et des accéléromètres sur la ligne médiane de la poutre, ce qui peut entraîner des mouvements parasites tels que la torsion ou la flexion dans le plan. De plus, les accéléromètres peuvent générer des composantes évanescentes dans le champ de déplacement qui ne sont pas prises en compte dans l'évaluation du coefficient de réflexion. On pourrait probablement réduire le bruit en utilisant un vibromètre à balayage laser afin de pouvoir mesurer un grand nombre de points sans perturbation du champ vibratoire. Globalement, les tendances observées sur les courbes de la figure 6 sont parfaitement reproduites dans l'expérience.

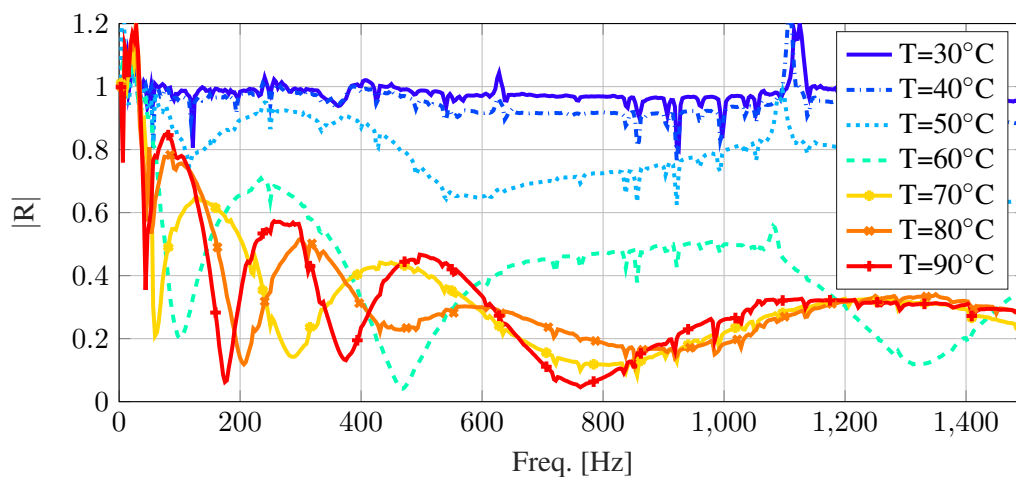


FIGURE 7 – Résultats expérimentaux : amplitude du coefficient de réflexion pour plusieurs températures

Les valeurs moyennes de ces coefficients de réflexion expérimentaux peuvent être calculées et comparées aux valeurs numériques. Les courbes associées, présentées figure 8, montrent une très bonne corrélation. Les écarts observés, relativement faibles, peuvent s'expliquer par les valeurs non physiques du coefficient de réflexion mesuré à très basses fréquences.

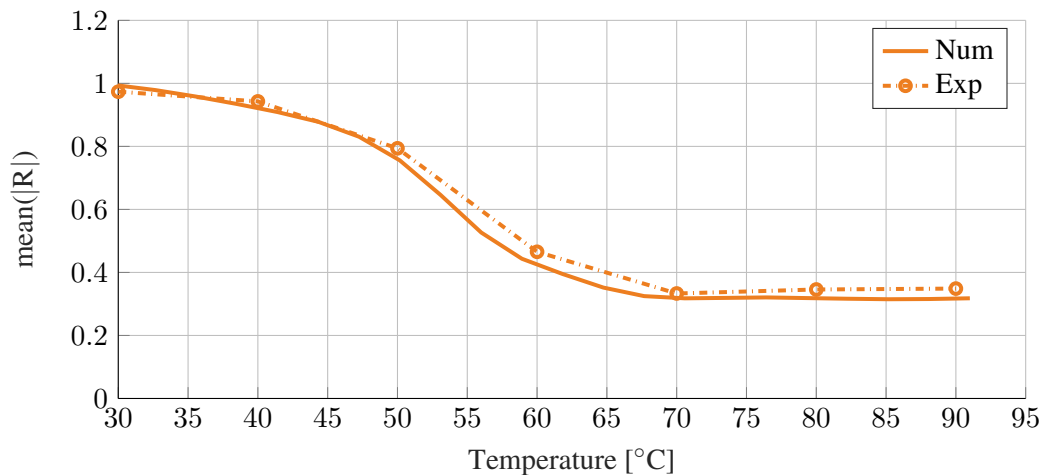


FIGURE 8 – Évolution de la valeur moyenne du coefficient de réflexion avec la température, comparaison calculs/essais

6 Conclusion

Dans cet travail, il a été montré qu'il était possible de contrôler l'amortissement afin d'améliorer l'effet de trou noir acoustique. Ceci est réalisé grâce à l'utilisation d'une couche viscoélastique dont les propriétés sont ajustées par le contrôle de la température. Le trou noir est équipé d'un patch de polymère, dont les dimensions peuvent être optimisées pour maximiser l'effet d'amortissement à une température proche de la transition vitreuse, à partir de la valeur moyenne de l'amplitude du coefficient de réflexion sur la plage de fréquences d'intérêt. Cela rend la méthodologie indépendante de l'excitation et des conditions aux limites de la structure hôte. Ensuite, en contrôlant la température du patch, il est facile d'ajuster le comportement du trou noir en fonction de l'application pratique considérée.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier François Gautier et Adrien Pelat (Le Mans Université) pour les échanges scientifiques et pour avoir fourni la poutre équipée d'un trou noir acoustique. Ce travail a été financé par l'ANR (projet ANR-17-CE08-0035 ETNAA), en collaboration avec EIPHI Graduate School (ANR-17-EURE-0002).

Références

- [1] K. Billon, M. Ouisse, E. Sadoulet-Reboul, M. Collet, P. Butaud, G. Chevallier, and A. Khelif. Design and experimental validation of a temperature-driven adaptive phononic crystal slab. *Smart Materials and Structures*, 2019.
- [2] E. Bowyer and V. V. Krylov. Damping of flexural vibrations in turbofan blades using the acoustic black hole effect. *Applied Acoustics*, 76:359–365, 2014.
- [3] E. Bowyer and V. V. Krylov. Experimental investigation of damping flexural vibrations in glass fibre composite plates containing one-and two-dimensional acoustic black holes. *Composite Structures*, 107:406–415, 2014.
- [4] P. Butaud, E. Foltête, and M. Ouisse. Sandwich structures with tunable damping properties : on the use of shape memory polymer as viscoelastic core. *Composite Structures*, 153:401–408, 2016.

- [5] P. Butaud, M. Ouisse, V. Placet, F. Renaud, T. Travaillet, A. Maynadier, G. Chevallier, F. Amiot, P. Delobelle, E. Foltête, and C. Rogueda-Berriet. Identification of the viscoelastic properties of the tBA/PEGDMA polymer from multi-loading modes conducted over a wide frequency–temperature scale range. *Polymer Testing*, may 2018.
- [6] M. Caputo and F. Mainardi. Linear models of dissipation in anelastic solids. *La Rivista del Nuovo Cimento (1971-1977)*, 1(2):161–198, 1971.
- [7] K.-C. Chang, T. Soong, S.-T. Oh, and M. Lai. Effect of ambient temperature on viscoelastically damped structure. *Journal of Structural Engineering*, 118(7):1955–1973, 1992.
- [8] M. Collet, M. Ouisse, and F. Tateo. Adaptive metacomposites for vibroacoustic control applications. *IEEE Sensors Journal*, 14(6), 2014.
- [9] S. C. Conlon, J. B. Fahline, and F. Semperlotti. Numerical analysis of the vibroacoustic properties of plates with embedded grids of acoustic black holes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(1):447–457, 2015.
- [10] J. Cuenca, A. Pelat, F. Gautier, and N. Ferguson. Improving the acoustic black hole effect for vibration damping in one-dimensional structures. In *Acoustics 2012*, Nantes (France), April 2012.
- [11] V. Denis, A. Pelat, and F. Gautier. Scattering effects induced by imperfections on an acoustic black hole placed at a structural waveguide termination. *Journal of Sound and Vibration*, 362:56–71, 2016.
- [12] J. D. Ferry and J. D. Ferry. *Viscoelastic properties of polymers*. John Wiley & Sons, 1980.
- [13] C. C. Fuller, S. Elliott, and P. A. Nelson. *Active control of vibration*. Academic Press, 1996.
- [14] V. Georgiev, J. Cuenca, F. Gautier, L. Simon, and V. Krylov. Damping of structural vibrations in beams and elliptical plates using the acoustic black hole effect. *Journal of sound and vibration*, 330(11):2497–2508, 2011.
- [15] W. Huang, H. Ji, J. Qiu, and L. Cheng. Wave energy focalization in a plate with imperfect two-dimensional acoustic black hole indentation. *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(6):061004, 2016.
- [16] D. J. Inman. *Vibration with control*. John Wiley & Sons, 2017.
- [17] V. Krylov and F. Tilman. Acoustic black holes for flexural waves as effective vibration dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 274(3-5):605–619, 2004.
- [18] R. S. Lakes. *Viscoelastic solids*, volume 9. CRC press, 1998.
- [19] J. Y. Lee and W. Jeon. Vibration damping using a spiral acoustic black hole. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3):1437–1445, 2017.
- [20] G. A. Lesieutre and K. Govindswamy. Finite element modeling of frequency dependent and temperature-dependent dynamic behavior of viscoelastic materials in simple shear. *International Journal of Solids and Structures*, 33(3):419–432, 1996.
- [21] P. Millithaler, J.-B. Dupont, M. Ouisse, E. Sadoulet-Reboul, and N. Bouhaddi. Viscoelastic property tuning for reducing noise radiated by switched-reluctance machines. *Journal of Sound and Vibration*, 407:191–208, 2017.
- [22] M. Mironov. Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval. *Soviet Physics Acoustics-USSR*, 34(3):318–319, 1988.

- [23] M. Ouisse, M. Collet, and F. Scarpa. A piezo-shunted kirigami auxetic lattice for adaptive elastic wave filtering. *Smart Materials and Structures*, 25:115016, 2016.
- [24] Y. Sefrani and J.-M. Berthelot. Temperature effect on the damping properties of unidirectional glass fibre composites. *Composites Part B : Engineering*, 37(4-5):346–355, 2006.
- [25] L. Tang and L. Cheng. Enhanced acoustic black hole effect in beams with a modified thickness profile and extended platform. *Journal of Sound and Vibration*, 391:116–126, 2017.
- [26] L. Zhao, S. C. Conlon, and F. Semperlotti. Broadband energy harvesting using acoustic black hole structural tailoring. *Smart materials and structures*, 23(6):065021, 2014.