

Phénomènes non conventionnels impliqués dans les méta-matériaux acoustiques

Luc Jaouen, François-Xavier Bécot, Fabien Chevillotte

Matelys – Research Lab
7, rue des Maraîchers, Bât. B
69120 Vaulx-en-Velin
France

E-mail : luc.jaouen@matelys.com ; fxb@matelys.com ;
fabien.chevillotte@matelys.com

Résumé

Les "métamatériaux", que l'on peut également nommer matériaux à dynamiques multiples, sont l'objet d'un grand intérêt dans le domaine des matériaux acoustiques depuis plusieurs années. Le terme "méta" est utilisé pour souligner qu'au moins un phénomène supplémentaire est sollicité, en plus de la dissipation visco-thermique intrinsèque des matériaux poreux habituels.

Ce travail présente un aperçu non exhaustif des différents phénomènes impliqués permettant une identification des matériaux utilisant de nouveaux concepts ou combinant plusieurs concepts existants.

Abstract

"Metamaterials", which can also be called multi-dynamic materials, have been an increasing research topic in the field of acoustic materials since several years. The term "meta" is used to emphasize that, at least, one phenomenon in addition to the usual intrinsic visco-thermal dissipation of porous materials occurs.

This work presents a non-exhaustive overview of the different phenomena involved allowing to identify materials bringing new concepts or combining several existing concepts.

Motivation et cadre de travail

Le terme métamatériau regroupe aujourd'hui un ensemble très varié de matériaux. Il devient alors intéressant d'identifier les phénomènes mis en jeu dans ces matériaux à des fins d'analyse physique. En effet, dans un premier temps, on devrait interpréter les métamatériaux non pas comme des "matériaux de matériaux" mais plutôt comme des matériaux à dynamiques multiples.

Une fois les phénomènes ou les dynamiques identifiés, il est plus aisé d'en déduire les contraintes et les limites d'utilisation. Parmi ces phénomènes, parfois appelés "non conventionnels", on peut citer : (i) les couplages entre échelles

multiples (dont la double porosité est un exemple), (ii) la diffusion multiple, (iii) les résonances internes acoustiques, (iv) les résonances internes mécaniques...

Dans ce rapide aperçu, on se limitera à des matériaux acoustiques passifs, homogènes (du moins à une certaine échelle), ce qui implique que ces matériaux peuvent être décrits par une masse volumique dynamique ρ et un module d'incompressibilité dynamique K . Ces deux dernières grandeurs permettent de calculer ou peuvent être calculées à partir de l'impédance caractéristique d'un matériau Z_c et de son nombre d'onde caractéristique k [1].



a) Résonateur quart d'onde



b) Résonateur de Helmholtz



c) inclusions solides



d) Echelles multiples

Table 1: Représentations schématiques de phénomènes (et morphologies associées) applicables aux matériaux acoustiques à dynamiques multiples

Exemples de phénomènes

On peut classer les phénomènes impliqués dans les matériaux à dynamiques multiples suivant deux groupes : les phénomènes résonnants et les phénomènes diffusifs. Les exemples les plus courants de matériaux acoustiques à phénomènes résonnants (sans considérer les applications purement vibratoires) sont les résonateurs quart d'onde (cf. Table 1a) ou les résonateurs de Helmholtz (Table 1b).

Les exemples les plus courants de phénomènes diffusifs, pour les matériaux acoustiques toujours, sont les inclusions solides (Table 1c) et les diffusions de pression entre échelles de matériau à échelles multiples (Table 1d).

Les phénomènes résonnants ont un intérêt lorsqu'ils sont utilisés autour de leurs fréquences de résonances, fréquences qui sont bien connues et assez simple à calibrer. Les phénomènes diffusifs, ont un intérêt dans les gammes de fréquences où ils sont activés. Pour les matériaux avec inclusions solides, cette gamme de fréquence correspond à celle d'existence du phénomène (ou plus généralement des phénomènes) de diffusion multiple. Pour les matériaux à échelles multiples, comme les matériaux à double porosité, elle correspond à la gamme de fréquence des phénomènes de diffusion de pression entre deux échelles de la structure du matériau.

Une première différence entre phénomènes apparaît ici : les phénomènes diffusifs fonctionnent sur des gammes de fréquences souvent plus étendues que les phénomènes résonnants dont les effets sont autour de résonances.

Trois exemples concrets

Un matériau à double porosité

Dans le cas d'un matériau à échelle multiple et plus précisément un matériau à double porosité (Table 1d et Figure 1), dont l'objectif principal est d'absorber l'énergie incidente, on essaie de bénéficier de :

- la dissipation visco-thermique du matériau poreux (la mousse, le matériau fibreux ou granulaire...), cf. par exemple [2],
- l'effet de diffusion de pression (qui va apporter une dissipation supplémentaire), cf. par exemple [3,4,5].

L'efficacité de la dissipation visco-thermique dépend du rapport entre les couches limites visqueuses et thermiques (dont les valeurs dépendent de la fréquence) et des dimensions caractéristiques des pores. Cette dissipation est efficace dans une gamme de fréquence donnée qui peut s'étendre sur l'ensemble du spectre audible humain si les dimensions des pores sont de l'ordre de quelques centaines de microns.

L'effet de diffusion de pression dépend du rapport entre les échelles de porosité et de la longueur d'onde acoustique de l'excitation (l'énergie des ondes acoustiques dans les perforations mésoscopiques se dissipe par diffusion dans la matrice microporeuse). La dissipation acoustique associée à cet effet de diffusion n'a également d'intérêt que dans une gamme de fréquence donnée.



Fig. 1 : Laine de roche avec perforations (matériau à double porosité) au sol d'une salle réverbérante

En combinant les deux dynamiques, on réalise un matériau offrant une dissipation acoustique augmentée dans une gamme de fréquences spécifique par rapport au même matériau poreux avec une seule échelle de porosité. Il faut noter que ce gain peut-être associé à une perte de dissipation dans une ou plusieurs gammes de fréquences autour.

Peu de mesures en champ diffus sont disponibles dans la littérature, principalement du fait de clauses de confidentialité des applications industrielles associées. On peut toutefois inviter le lecteur à se reporter aux figures 9 et 10 dans [6], ou les figures 4 et 5 de [4].

Un matériau avec résonateurs de Helmholtz

Dans le cas d'un matériau avec résonateurs internes (cas de résonateurs de Helmholtz en Table 1b et Figures 2 et 3 – dans les Figures 2 et 3, seuls les résonateurs sont observés, le matériau dans lequel ils peuvent être insérés n'est pas présent), dont l'objectif principal est d'absorber l'énergie incidente, on essaie de bénéficier de :

- la dissipation visco-thermique du matériau poreux,
- l'effet de dissipation autour des fréquences de résonances des résonateurs (cf. par exemple [7,8,9]).

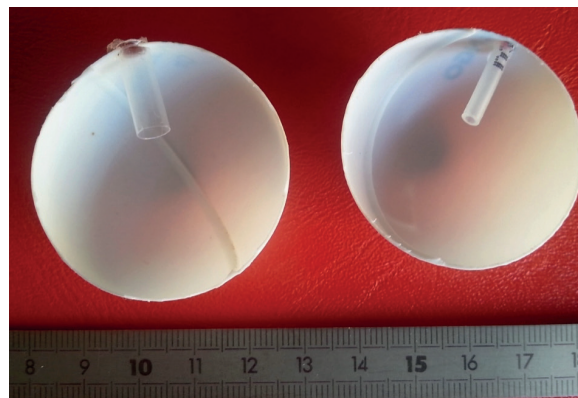


Fig. 2 : Coupes de 2 résonateurs de Helmholtz (avec cols dans les cavités) fabriqués à partir de balles de ping-pong et pailles alimentaires pouvant être insérés dans un matériau poreux



Fig. 3 : Résonateurs de la figure précédente assemblés en une structure verticale

L'efficacité de la dissipation visco-thermique n'est intéressante que dans une gamme de fréquence donnée comme discutée plus tôt.

De même, la dissipation visqueuse dans les cols des résonateurs n'a un impact significatif qu'aux fréquences des résonateurs.

Encore une fois, combinant les deux dynamiques, on réalise un matériau offrant une dissipation acoustique augmentée dans une gamme de fréquences spécifique et des pertes de dissipation dans d'autres (cf. par exemple, les résultats fig. 10 de [10] en champ diffus).

On peut noter que, suivant le type de résonance, la masse volumique dynamique ou le module d'incompressibilité dynamique K peuvent avoir une partie réelle négative. Les négativités simultanées de ρ et K permettent d'obtenir un matériau avec un indice de réfraction négatif (sans être la seule condition d'y arriver [11]) qui pourra être utilisé comme dispositif de masquage (*cloaking* en anglais). Dans des applications de masquage, la dissipation énergétique n'est, en revanche, pas une propriété que l'on recherche (cf. par exemple quelques-uns des travaux de références de cette branche de la recherche dans le domaine de l'optique : [12,13,14]).

Un matériau avec inclusions solides

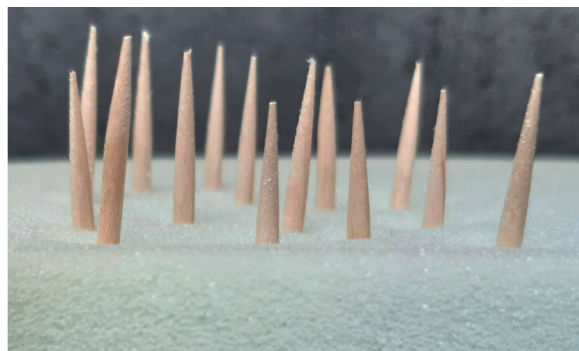


Fig. 4 : Mousse (en vert) avec inclusions solides, cylindriques et parallèles entre elles, traversant le matériau. La propagation des ondes acoustiques se fait du 1^{er} plan vers l'arrière-plan



Fig. 5 : Autre exemple de matériaux avec inclusions solides (ici des billes) dans un matériau poreux granulaire (des grains de riz)

Dans le cas d'un matériau avec inclusions solides (Table 1c et Figures 4 et 5), dans un but de réduction de la transmission acoustique, on essaie de bénéficier de :

- l'isolation acoustique du matériau avec ses diffuseurs liée à l'ensemble des masses et propriétés élastiques mises en jeu,
- la dissipation visco-thermique du matériau s'il est poreux,
- les effets liés à la présence des inclusions : (i) possibles dissipation supplémentaire de par la diffusion multiple et (ii) apparition de bandes de transmission interdites pour des structures périodiques [15,16,17,18].

L'isolation acoustique liée à l'ensemble des masses et propriétés élastiques en jeu est évidemment dépendante de la fréquence (et des conditions limites en basses fréquences).

Comme précédemment, l'efficacité de la dissipation visco-thermique n'est intéressante que dans une gamme de fréquence donnée. Elle permet de limiter la transmission et la réflexion par dissipation de l'énergie. On notera que cette dissipation est légèrement différente de celle du matériau sans diffuseurs : les diffuseurs modifiant sa structure.

Parmi les quelques résultats de mesures en champ diffus publiés dans la littérature, on peut citer, la figure 6 de [19], la figure 11 de [20] et pour le cas de résonateurs de Helmholtz, les figures 2 à 5 de [21]

Les effets de diffusion multiple dépendent du rapport entre la longueur d'onde acoustique et les dimensions des diffuseurs. Ces effets peuvent être de différentes natures. Lorsque la longueur d'onde reste grande devant les inclusions, la présence des inclusions peut ajouter une dissipation supplémentaire par diffusion Rayleigh (due à la dissipation visco-thermique dans le matériau support des diffuseurs ou liée aux couches limites en surfaces des diffuseurs). Lorsque la longueur de l'onde incidente est de l'ordre de grandeur de la distance entre diffuseurs, un arrangement périodique (ou quasi-périodiques) peut permettre l'apparition de bandes de transmission interdites.

En combinant l'ensemble de ces dynamiques, on réalise un matériau offrant une isolation acoustique dans une gamme de fréquences plus large que le matériau seul ou que les inclusions seules plongées dans l'air.

On pourra noter que les bandes interdites en transmission (i.e. la transmission des ondes est impossible pour ces fréquences) sont souvent associées à des réflexions importantes, la dissipation n'étant pas forcément significative. Cette dissipation dans le matériau avec inclusions est un point à ne pas négliger pour la prédiction des bandes interdites, l'influence de la dissipation étant souvent de réduire la largeur de la ou des bandes interdites.

Par ailleurs, si la périodicité d'une structure est parfois mise en avant, il faut garder à l'esprit qu'elle ajoute des interférences de Bragg utiles pour la réalisation de bandes de transmission interdites.

La périodicité n'est, en revanche, pas nécessaire au fonctionnement des autres phénomènes. Pour les matériaux dont les interférences de Bragg sont le phénomène principal, ces matériaux sont généralement appelés cristaux phononiques.

Autres types d'effets

Parmi les matériaux à résonances mécaniques, non illustrés dans la section précédente, on peut citer, comme exemple particulier, les travaux sur les matériaux à membranes résonnantes [22,23]

On peut également ajouter, les matériaux reposant sur des phénomènes de sorption-désorption (cf. par exemple [24]) et les matériaux actifs. Un exemple, parmi d'autres comme [25], de solution active est l'effet diode acoustique (qui nécessite un écoulement pour être large bande), autorisant une propagation du son dans un sens et l'empêchant dans le sens inverse (cf. par exemple [26]).

On peut également lister les structures retardantes [27], une forme de matériaux à gradient de propriétés qui est aussi parfois appelée « trous noirs ». Cette dénomination « trou noir », inspirée des théories de la relativité d'Albert Einstein n'est toutefois pas adéquate dans la mesure où aucun effet de relativité, restreinte ou générale, n'est impliqué ici.

En conclusion, on pourra garder à l'esprit que plus on ajoute de dynamiques à un matériau, plus il est possible d'en augmenter les propriétés d'absorption ou d'isolation à condition toutefois d'augmenter les dimensions de ce matériau afin de disposer les éléments qui donneront naissance à ces dynamiques. Par exemple, pour cibler les basses fréquences audibles, des dimensions de l'ordre de quelques centimètres seront requises.

Références bibliographiques

- [1] C. Zwikker, C. W. Kosten, *Sound absorbing materials*, Elsevier (New-York), 1949
- [2] L. Jaouen, *Acoustical Porous Material Recipes*, <http://apmr.matelys.com> (ISSN 2606-4138), consulté le 11/09/2020
- [3] X. Olny, C. Boutin, *Acoustic wave propagation in double porosity media*, *J. Acoust. Soc. Am.* 114(1), 73-89, 2003
- [4] F.-X. Bécot, L. Jaouen, E. Gourdon, *Applications of the Dual Porosity Theory to Irregularly Shaped Porous Materials*, *Acta Acustica United with Acustica* 94(5), 715-724, 2008
- [5] F. Chevillotte, L. Jaouen, F.-X. Bécot, *On the modeling of visco-thermal dissipations in heterogeneous porous media*, *J. Acoust. Soc. Am.* 138(6), 3922-

3929, 2015

- [6] N. Atalla, C. K. Amédin, Y. Atalla, R. Panneton, F. Sgard, *Développement de nouveaux matériaux absorbants à hautes performances acoustiques pour diminuer le bruit en basses fréquences*, rapport IRSST R370, 2004
- [7] C. Boutin, *Acoustics of porous media with inner resonators*, *J. Acoust. Soc. Am.* 134(6), 4717-4730, 2013
- [8] C. Lagarrigue, J. P. Groby, V. Tournat, O. Dazel, O. Umnova, *Absorption of sound by porous layers with embedded periodic arrays of resonant inclusions*, *J. Acoust. Soc. Am.* 134(6), 4670-4680, 2013
- [9] C. Boutin and F. X. Bécot, *Theory and experiments on poro-acoustics with inner resonators*, *Wave Motion* 54, 76-99, 2015
- [10] HR : *Transfer matrix modeling and experimental validation of cellular porous material with resonant inclusions*
The Journal of the Acoustical Society of America 137, 3502 (2015); <https://doi.org/10.1121/1.4921027>
Olivier Doutres and Noureddine Atalla, Haisam Osman
- [11] T. Brunet, O. Poncelet, C. Aristégui, *Negative-index metamaterials: is double negativity a real issue for dissipative media?*, *EPJ Appl. Metamat.* 2, 3, 2015
- [12] V. G. Veselago, *Electrodynamics of substances with simultaneously negative and , Soviet Physics Uspekhi* 10(4), 509-514, 1968 (traduction anglaise par W. H. Furry du papier original de 1967 publié dans « *Usp. Fiz. Nauk* » 92, 517-526)
- [13] N. A. Nicorovici, R. C. McPhedran, G. W. Milton, *Optical and dielectric properties of partially resonant composites*, *Phys. Rev. B*, 49(12), 8479-8482, 1994
- [14] J. B. Pendry, *Negative refraction makes a perfect lens*. *Phys. Rev. Lett.* 85(18), 3966-3969, 2000
- [15] J. V. Sánchez-Pérez, D. Caballero, R. Martínez-Sala, C. Rubio, J. Sánchez-Dehesa, F. Meseguer, J. Linares, F. Gálvez, *Sound attenuation by a two-dimensional array of rigid cylinders*. *Phys. Rev. Lett.* 80(24), 5325-5328, 1998
- [16] V. Tournat, V. Pagneux, D. Lafarge, L. Jaouen, *Multiple scattering of acoustic waves and porous absorbing media*, *Phys. Rev. E* 70(2), 026609, 2004
- [17] V. Romero-Garcia, C. Lagarrigue, J.-P. Groby, O. Richoux, V. Tournat, *Tunable acoustic waveguides in periodic arrays made of rigid square-rod scatterers: theory and experimental realization*, *J. Phys. D* 46, 305108, 2013
- [18] T. Weisser, J.-P. Groby, O. Dazel, F. Gautier, E. Deckers, S. Futatsugi, L. Monteiro, *Acoustic behavior of a rigidly backed poroelastic layer with periodic resonant inclusions by a multiple scattering approach*. *J. Acoust. Soc. Am.* 139(2), 617-629, 2016
- [19] M. R. F. Kidner, C. R. Fuller, B. Gardner, *Increase in transmission loss of single panels by addition of mass inclusions to a poro-elastic layer: Experimental investigation*, *J. Sound Vib* 294(3), 466-472, 2006
- [20] K. Idrisi, M. E. Johnson, Alessandro Toso, J. P. Carneal, *Increase in transmission loss of a double panel system by addition of mass inclusions to a poro-elastic layer: A comparison between theory and experiment*, *J. Sound Vib* 323(1-2), 51-66, 2009
- [21] R. A. Prydz, L. S. Wirt, H. L. Kuntz L. D. Pope, *Transmission loss of a multilayer panel with internal tuned Helmholtz resonators*, *J. Acoust. Soc. Am.* 87(4), 1597-1602, 1990
- [22] R. Venegas, C. Boutin, *Acoustics of permeo-elastic materials*. *J. Fluid Mech.* 828, 135-174, 2017
- [23] C. Gaulon, J. Pierre, C. Derec, L. Jaouen, FX Bécot, F. Chevillotte, F. Elias, W. Drenckhan, V. Leroy, *Acoustic absorption of solid foams with thin membranes*, *Appl. Phys. Lett.* 112(26), 261904, 2018
- [24] R. Venegas, O. Umnova, *Influence of sorption on sound propagation in granular activated carbon*. *J. Acoust. Soc. Am.* 140(2), 755-766, 2017
- [25] H. Lissek, E. Rivet, T. Laurence, R. Fleury, *Toward wideband steerable acoustic metasurfaces with arrays of active electroacoustic resonators*, *J. Appl. Phys.* 123, 091714, 2018
- [26] Y. Aurégan, V. Pagneux, *Slow sound in lined flow ducts*, *J. Acoust. Soc. Am.* 138(2), 605-613, 2015
- [27] C. L. Pekeris, *Theory of Propagation of Sound in a Half Space of Variable Sound Velocity under Conditions of Formation of a Shadow Zone*, *J. Acoust. Soc. Am.* 18(2), 295-315, 1946