



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Modélisation acoustique d'un matériau obtenu par fabrication additive placé en paroi d'un conduit.

A. Jamois ^a, D. Dragna ^a, T. G. Zielinski ^b, M.-A. Galland ^a

^a Univ Lyon, Ecole Centrale de Lyon, LMFA, UMR5509, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex

^b Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, ul.Pawinskiego 5B,02-106 Warsaw, Poland,



L'objectif de cette étude est de modéliser et de caractériser le comportement de matériaux réalisés en impression 3D lorsqu'ils sont placés en paroi d'un conduit. Le matériau considéré présente une structure périodique dont la cellule de base comporte une sphère reliée aux sphères des autres cellules par des canaux cylindriques. Le squelette rigide du matériau permet de le modéliser comme un Fluide Équivalent. Quand le matériau est placé en paroi de conduit, la modélisation par son impédance de surface n'est plus suffisante et la propagation dans le matériau doit être prise en compte. Trois modélisations du matériau sont étudiées. Les deux premières s'appuient sur une description macroscopique au moyen d'un Fluide Équivalent. Dans la première, il est décrit par ses fonctions caractéristiques dynamiques (densité et compressibilité), calculées au moyen d'un modèle numérique d'un tube de Kundt. Dans la seconde modélisation, les paramètres du modèle JCALP sont déduits par résolution des équations de Stokes, Laplace et Poisson pour une seule cellule du matériau. Le troisième modèle consiste à décrire le matériau dans sa globalité à l'échelle microscopique et à résoudre les équations de Navier-Stokes Linéarisées (NSL) dans le conduit et le matériau. Les résultats des trois modèles sont comparés en incidence normale et en paroi d'un conduit. Différentes techniques d'impression 3D ont été utilisées pour réaliser des échantillons, et montrent une variabilité importante des géométries effectivement réalisées et par suite des coefficients d'absorption mesurés en tube de Kundt. Les résultats d'expérimentations en paroi de conduit sont également comparés avec ceux de la modélisation.

1 Introduction

Récemment, les techniques de fabrication additive ont permis de réaliser des géométries de pièces jusque-là impossibles. Leurs propriétés et les possibilités offertes par ces nouvelles géométries suscitent l'intérêt notamment pour optimiser l'absorption dans les basses fréquences à travers des matériaux présentant un réseau de pores conçu.

La structure parfois complexe de ces matériaux nécessite de développer les modèles prédictifs qui permettront de les optimiser dans un contexte donné. S'ils sont de mieux en mieux décrits en incidence normale, les études prédisant le comportement acoustique de ces matériaux en paroi de conduit sont peu nombreuses; on peut citer les travaux de J. Boulvert et al. [1].

L'étude s'intéresse aux comportements acoustiques d'un matériau imprimé avec des méthodes de fabrication additive lorsqu'il est placé en paroi d'un conduit en vue d'en réduire la transmission acoustique. On se propose, dans ce contexte, de comparer différentes modélisations pour ces matériaux nouveaux afin d'être en mesure de prédire leurs comportements à partir de leur géométrie. La première modélisation consiste à résoudre les équations de Navier-Stokes Linéarisée (NSL) dans les microstructures. Les deux autres sont des modélisations macroscopiques du comportement de ces matériaux. Dans un cas, on modélise le matériau par une condition aux limites d'impédance de surface, calculée en incidence normale pour toute la géométrie. Dans l'autre cas, on représente le matériau par un Fluide Équivalent (FE) avec un modèle JCALP; pour cela, on identifie les paramètres du modèle par la résolution d'équations dans une cellule élémentaire du matériau.

Nous allons donc dans une première partie présenter le matériau réalisé puis, dans une deuxième partie, les modélisations utilisées pour prédire son comportement acoustique. Dans une troisième partie la mise en œuvre de ces modélisations en incidence normale est détaillée. Dans la quatrième partie, les résultats de l'expérience en incidence normale sont comparés avec les modèles. Dans la dernière partie, nous présentons les résultats préliminaires obtenus en paroi de conduit. Ils sont comparés aux différentes

modélisations prenant en compte la présence du traitement.

2 Présentation du matériau

Le matériau que nous avons étudié est inspiré des structures à cellule ouverte de la « Round-Robin Study » réalisée par T. Zielinski et al. [2]. Cette étude visait à analyser l'influence de différentes techniques de fabrication sur l'absorption acoustique de matériaux imprimés. Il présente une structure périodique dont la cellule de base comporte une sphère reliée aux sphères des autres cellules par des canaux cylindriques (voir schéma de la figure 1) avec $a = 9$ mm $d = 8$ mm et $w = 1.5$ mm. La géométrie du matériau a l'avantage d'être relativement simple à modéliser au vu de ses nombreux axes de symétrie. Les dimensions de la cellule du matériau ont été augmentées par rapport à la publication citée pour diminuer la fréquence des premiers pics d'absorption. Les échantillons utilisés en incidence normale et en paroi de conduit ont une épaisseur de 31.5 mm. Il y a donc 3.5 structures résonnantes dans l'épaisseur. Les faces des échantillons présentent deux géométries différentes. Il faudra tenir compte de l'orientation du matériau pour les expériences et les différents modèles (cf figure 2).

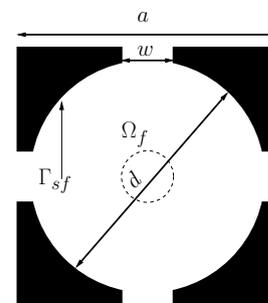


FIGURE 1 – Coupe d'une cellule élémentaire du matériau avec Ω_f le domaine fluide et Γ_{sf} l'interface fluide solide

La stéréolithographie a été utilisée pour imprimer les différents échantillons. Ils ont été fabriqués sur une "Form 2" de Formlabs® mise à disposition au FabLab de l'École Centrale de Lyon. Cette technique permet d'obtenir des géométries fines avec une très bonne résolution (figure 2). Elle offre un état de surface plus lisse que la dépose de fil fondu et à la différence d'autres techniques, le squelette n'est pas microporeux. Il n'est ainsi pas nécessaire de le prendre en compte dans la modélisation.

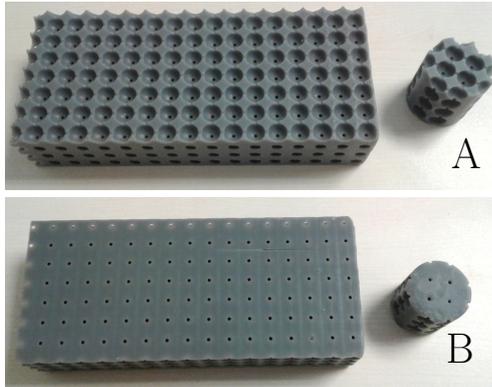


FIGURE 2 – Matériau étudié : Face A avec des sphères affleurantes à la surface, face B avec des canaux affleurants.

L'échantillon fabriqué présente néanmoins des imperfections : rayures à la surface, canaux cylindriques et sphères plus petits que sur la géométrie demandée. L'impression 3D est un bon moyen de tester certaines géométries que l'on ne pourrait pas réaliser autrement. Elle permet de comprendre les mécanismes acoustiques de dissipation et de contrôler la fiabilité des modèles prédictifs. Cependant, il faut garder à l'esprit ces différences géométriques entre la conception et la réalisation.

3 Présentation des modélisations

Trois modélisations ont été utilisées pour prédire le comportement acoustique du matériau dans différents contextes. La première détaille le matériau à l'échelle microscopique, les deux autres modèles décrivent son comportement à l'échelle macroscopique.

3.1 Modélisation à l'échelle microscopique

La première méthode pour décrire le comportement du matériau consiste à décrire sa géométrie précisément et à y modéliser finement les pertes thermovisqueuses en résolvant les équations de Navier-Stokes linéarisées.

On fait l'hypothèse d'un matériau rigide pour ne modéliser que le fluide à l'intérieur des pores. Ainsi dans chacune des cellules du matériau dont une est présentée sur le schéma de la figure 1 on résout :

$$\eta(\nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v})) - \nabla p = i\omega \rho_0 \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\rho_0 \nabla \cdot \mathbf{v} + i\omega \rho = 0 \quad (2)$$

$$\kappa \nabla^2 T = i\omega \rho_0 C_p T - i\omega p \quad (3)$$

$$\frac{p}{P_0} = \frac{\rho}{\rho_0} + \frac{T}{T_0} \quad (4)$$

La convention utilisée est $e^{i\omega t}$ avec la pulsation $\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence des oscillations de vitesse \mathbf{v} , pression p , température T et masse volumique ρ autour de leurs valeurs moyennes $\mathbf{v}_0 (= \mathbf{0})$, P_0 , T_0 et ρ_0 . η est la viscosité dynamique et κ la conductivité thermique.

On impose également des conditions aux limites : une condition de non-glissement pour la vitesse et une condition isotherme pour la température soit $\mathbf{v} = \mathbf{0}$ et $T = 0$ sur Γ_{sf} .

Cette méthode nécessite de mailler le domaine très finement pour atteindre un nombre suffisant d'éléments dans les couches limites thermiques et visqueuses. Cela a un coût de calcul significatif, surtout dans le cas du matériau utilisé en paroi de conduit pour lequel le nombre de cellules devient important.

3.2 Modélisation macroscopique

3.2.1 Modèle d'impédance

Le second modèle consiste à représenter le matériau par une condition aux limites d'impédance. Pour cela l'impédance de surface est calculée dans un cas simple d'incidence normale à partir de la modélisation à l'échelle microscopique. Cette méthode est très économe, mais n'est valable que pour une seule épaisseur de matériau avec une condition arrière rigide. De plus, elle suppose la réaction localisée du matériau et néglige les propagations transverses dans celui-ci.

3.2.2 Modèle fluide équivalent JCALP

La troisième méthode consiste à modéliser le matériau par un FE avec un modèle Johnson Champoux Allard Lafarge Pride (JCALP). Pour cela, on identifie les 8 paramètres semi-phénoménologiques du modèle JCALP à l'aide de la méthode décrite et utilisée dans de nombreux ouvrages, comme par exemple dans [3]. Elle consiste à interpréter les paramètres du modèle comme les valeurs asymptotiques des perméabilités et tortuosités dynamiques (thermique et visqueuse). Pour cela il est nécessaire de résoudre dans une cellule élémentaire les équations de Laplace, Stokes et Poisson. Cette modélisation est plus générale que celle utilisant la condition aux limites d'impédance, car elle prend en compte la propagation transverse. Cependant, la possibilité de modéliser le matériau par un FE n'est pas évidente. C'est un matériau à structure périodique et la théorie d'homogénéisation multi-échelle suppose une longueur caractéristique des structures (a) très petite devant la taille de l'échantillon (D) et les longueurs d'onde étudiées (λ). En outre, l'hypothèse d'un modèle FE JCALP est encore plus restrictive. Par ailleurs,

ce modèle ne prend pas en compte la structure présentée à l'onde acoustique (Face A ou Face B de la figure 2).

4 Mise en œuvre numérique

Dans un premier temps, on se place dans le cas simple d'une incidence normale selon le schéma de la figure 3.

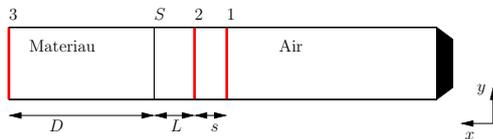


FIGURE 3 – Modèle réalisé pour l'incidence normale

4.1 Modélisation à l'échelle microscopique

Pour réaliser la modélisation à l'échelle microscopique on utilise le logiciel commercial de modélisation éléments finis COMSOL Multiphysics ®. Le modèle réalisé pour le cas d'une incidence normale est présenté sur la figure 4.

Le matériau de dimension $D = 31.5$ mm est modélisé, il présente 3.5 cellules. La géométrie du matériau nous permet d'exploiter les symétries. On définit un domaine où les équations de NSL sont résolues sur la partie du fluide occupant le matériau et un domaine en amont de la structure pour prendre en compte les dissipations au voisinage de celle-ci. Sur le reste du domaine, on résout l'équation de Helmholtz pour propager les variables acoustiques dans l'air sans dissipation.

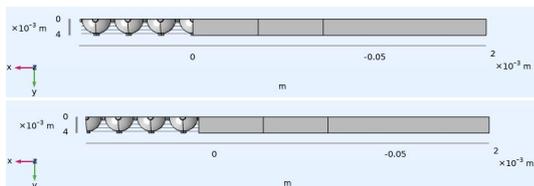


FIGURE 4 – Géométrie utilisée en incidence normale pour (haut) la face A et (bas) la face B

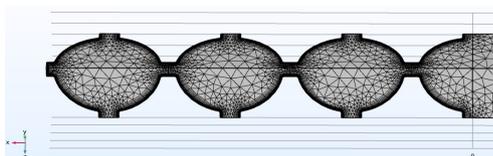


FIGURE 5 – Maillage réalisé pour l'incidence normale

La prise en compte des dissipations visqueuse et thermique dans les couches limites nécessite un maillage fin au niveau des parois comme on peut le voir sur la figure 5 l'épaisseur de la couche limite dans cette région est de l'ordre du 10^{-5} m. Ce calcul comportant un peu moins

d'un million de degrés de liberté est réalisé pour 300 pas de fréquence de 1 à 6000 Hz sur le calculateur du Pôle de Modélisation et de Calcul en Sciences de l'Ingénieur et de l'Information (PMCS2I) de l'École Centrale de Lyon. Il occupe 6 nœuds de 16 cœurs disposant chacun de 64 Go de mémoire pour une durée d'environ 6 h 30.

4.2 Calcul de l'impédance de surface

À partir du modèle précédent on peut, de manière analogue à ce qui est réalisé dans un tube de Kundt expérimental, déterminer l'impédance de surface Z_s en S grâce à la réponse fréquentielle entre les pressions aux points 1 et 2.

4.3 Modèle de fluide équivalent JCALP

Pour calculer les paramètres du modèle JCALP il suffit de modéliser une seule cellule élémentaire du matériau. Du fait de nombreuses symétries et antisymétries (prise en compte du sens de la propagation) il est même possible de n'en représenter qu'1/16ème. Cette méthode nécessite la même finesse du maillage que pour la méthode NSL mais sur un domaine bien plus petit et sans besoin de balayer chaque fréquence puisque l'on s'intéresse aux comportements asymptotiques.

Les 8 paramètres du modèle JCALP sont présentés dans le tableau 1, ils sont calculés comme présenté dans la partie 3.2.2.

Tableau 1 – Paramètres obtenues pour le modèle JCALP

Paramètres	Symbole	Valeur
Porosité	Φ	0.376
Longueur caract. visqueuse	Λ_v	8.258×10^{-4} m
Tortuosité cinématique	α_∞	4.629
Perméabilité visqueuse	K_0	7.280×10^{-9} m ²
Tortuosité statique visqueuse	α_{0v}	6.569
Longueur caract. thermique	Λ_{th}	2.666×10^{-3} m
Perméabilité thermique	θ_0	3.983×10^{-7} m ²
Tortuosité statique thermique	α_{0th}	1.441

Ces paramètres permettent de calculer les fonctions du FE et de modéliser le matériau à l'échelle macroscopique. On pourra noter la valeur importante de la tortuosité cinématique, laissant espérer la présence de pic d'absorption en basse fréquence.

4.4 Discussion autour de la modélisation par fluide équivalent

Comme cela a été introduit dans la partie 3.2.2 l'utilisation du modèle fluide équivalent pour décrire le type de matériau étudié mérite d'être discutée. Le matériau est périodique et présente un comportement résonnant. On

se propose de comparer les fonctions du fluide équivalent obtenues avec le modèle JCALP et à partir de la modélisation à l'échelle microscopique par résolution NSL. Pour cette dernière, on calcule les nombres d'onde caractéristique et impédance caractéristique du matériau en utilisant les pressions aux 3 points 1,2 et 3 du schéma de la figure 3 par la méthode proposée par Y.Salissou et R. Panneton [4]. On en déduit ensuite la compressibilité effective C_e et la densité effective ρ_e .

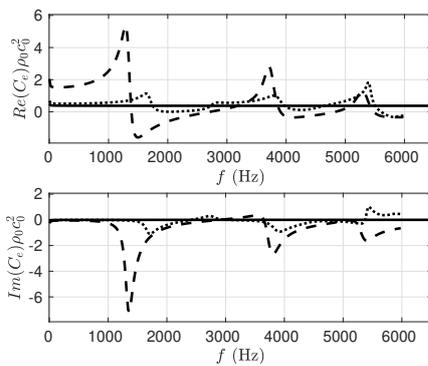


FIGURE 6 – Comparaison des compressibilités effectives obtenues par la résolution NSL présentant la face A (- -) puis la face B (· · ·) et par le modèle JCALP (-)

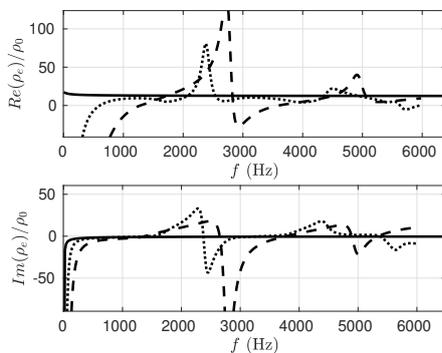


FIGURE 7 – Comparaison des densités effectives obtenues par la résolution NSL présentant la face A (- -) puis la face B (· · ·) et par le modèle JCALP (-)

Sur les figures 6 et 7 on compare respectivement les compressibilités effectives et densités effectives normalisées pour les deux échantillons face A et face B dans le cas de la modélisation NSL avec le résultat unique de la modélisation JCALP. On retrouve le comportement classique des fonctions de fluide équivalent pour le modèle JCALP. L'allure des fonctions pour la modélisation par résolution NSL est cohérente avec les structures résonnantes. Au vu de ce qui a été développé, il n'est pas étonnant d'obtenir ces valeurs inhabituelles. On observe également que les compressibilités effectives et densités effectives dépendent de l'orientation du matériau. D'autres essais non présentés ici ont montré une variation en fonction de l'épaisseur (et

donc du nombre de résonances observées).

Conformément à ce que l'on attendait, un modèle de FE n'est a priori pas satisfaisant pour représenter le comportement de ce type de matériau.

5 Comparaison avec l'expérimentation en incidence normale

L'échantillon cylindrique du matériau présenté figure 2 est testé dans un tube d'impédance (la mesure suivant le même principe que le calcul effectué avec la modélisation NSL). Pour ces deux cas, on a pu tester les deux faces A et B. Sur les figures 8 et 9 on compare les coefficients d'absorption obtenus expérimentalement et par modélisation. On observe sur les figures un décalage attendu entre l'expérience et la modélisation NSL. Ceci est dû aux différences entre la géométrie dessinée et celle fabriquée. On remarque également une évolution différente de l'intensité des pics en fonction de la fréquence. Pour les modélisations avec l'échantillon A (figure 8) on observe un bon accord entre les résultats NSL et JCALP jusqu'à environ 4000 Hz, fréquence à partir de laquelle la validité de l'hypothèse d'homogénéisation peut être limitée ($\lambda \gg a$).

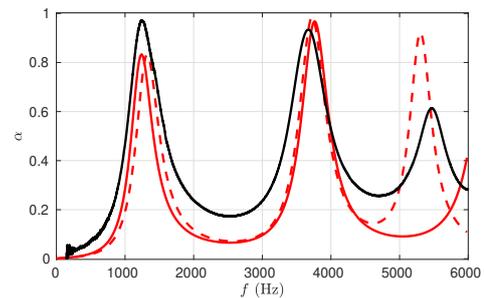


FIGURE 8 – Comparaison de l'absorption pour l'échantillon A; les modèles prédictifs : le modèle NSL (- -), le modèle JCALP (-) et l'expérience (-)

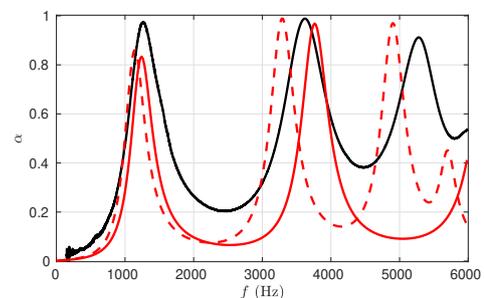


FIGURE 9 – Comparaison de l'absorption pour l'échantillon B; les modèles prédictifs : le modèle NSL (- -), le modèle JCALP (-) et l'expérience (-)

On observe des différences importantes entre l'expérience et la modélisation NSL dans le cas de la face B (figure 9). Le canal est la géométrie la plus sensible et il est possible que les imperfections de réalisation de l'échantillon aient un impact plus important dans ce cas. On peut aussi penser que les fuites acoustiques dans le tube autour de l'échantillon auront un plus fort impact du fait de la faible porosité présentée en surface du matériau. Le modèle NSL donne des résultats différents entre les échantillons alors que les résultats expérimentaux pour les faces A et B sont relativement proches jusqu'à 2500 – 3000 Hz.

Au vu des résultats de ces essais en incidence normale, on peut déjà souligner les difficultés rencontrées pour prédire le comportement d'un échantillon imprimé en 3D ce qui est probablement dû à la différence entre le dessin et la réalisation. Par ailleurs, le modèle JCALP qui apparaissait comme peu pertinent pour un tel matériau donne des prédictions satisfaisantes sur une large plage de basse fréquence.

6 Cas du matériau en paroi de conduit

Les calculs et la mesure ont été réalisés dans un conduit de section carrée de 66 mm dont la fréquence de coupure est 2500 Hz. Ce conduit présente une terminaison anéchoïque et les performances sont évaluées par la donnée du Transmission Loss (TL).

Le matériau de la figure 2 est placé en paroi du conduit, il mesure 150 mm de longueur et 66 mm de large. Son épaisseur et la même que celle de l'échantillon évalué en incidence normale. Il est également testé selon les faces A et B.

6.1 Modélisation du conduit traité

Les trois modèles sont présentés dans le schéma de la figure 10. La zone "Perfectly Matched Layer" permet d'éviter les réflexions pour imiter la terminaison anéchoïque. Le matériau est décrit soit à l'échelle microscopique (NSL), soit à l'échelle macroscopique par son impédance de surface ou par un FE JCALP.

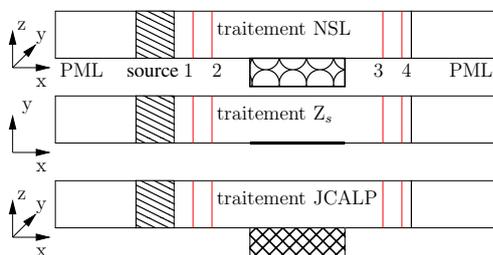


FIGURE 10 – Modélisations réalisées pour prédire le comportement du matériau

Dans ce cas, la résolution du modèle NSL comporte plus de 8 millions de degrés de liberté, elle se fait sur 20 nœuds de 16 cœurs disposant de 64 Go chacun. Le calcul est réalisé

en environ 15 h, le facteur limitant est la mémoire nécessaire à la méthode éléments finis.

6.2 Le dispositif expérimental

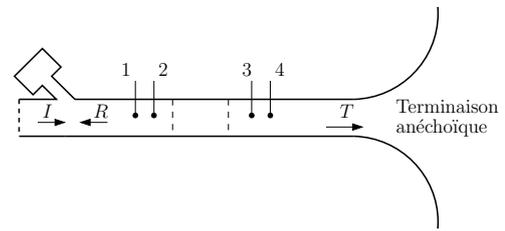


FIGURE 11 – Dispositif expérimental pour la mesure en paroi de conduit : banc Caïman

Les essais sur le matériau sont réalisés dans la conduite Caïman représentée sur le schéma de la figure 11. L'onde acoustique est générée par un haut-parleur dans l'enceinte en amont du conduit. À droite du schéma, la terminaison anéchoïque permet d'éviter les réflexions. Les microphones 1 et 2 permettent de calculer l'amplitude de l'onde incidente et le microphone 3 (ou 4) celle de l'onde transmise et par suite le TL.

6.3 Résultats

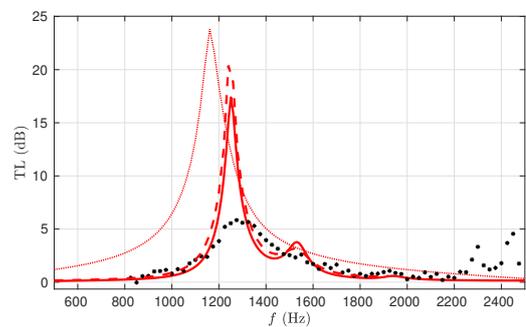


FIGURE 12 – Transmission Loss pour un échantillon présentant la face A : déterminé avec le modèle NSL (- -) le modèle d'impédance (· · ·) et le modèle JCALP (-) et par l'expérience (*)

On compare donc les résultats de TL pour les 3 modèles et l'expérience pour les deux échantillons A et B sur les figures 12 et 13.

On remarque une surestimation de la performance de tous les modèles par rapport à l'expérience. En effet, une disparité entre les formes géométriques peut être responsable d'un phénomène moins intense et plus large bande. Cette disparité est potentiellement exacerbée quand le matériau est testé en incidence rasante plutôt qu'en incidence normale. Dans le cas de la face A (cf figure 12) on observe une bonne cohérence entre le modèle NSL et le modèle JCALP. Comme on pouvait s'y attendre, la seule condition aux limites d'impédance de surface ne permet pas d'obtenir une

bonne prédiction : le TL maximum n'est pas atteint à la fréquence prédite.

Sur la figure 13 on remarque la même surestimation de la performance par les modèles dans le cas de la face B. Comme cela a pu être observé en incidence normale, on ne remarque pas sur les résultats expérimentaux de différence majeure entre les deux faces.

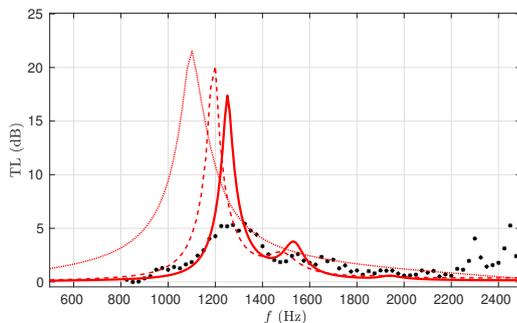


FIGURE 13 – Transmission Loss pour un échantillon présentant la face B : déterminé avec le modèle NSL (- -) le modèle d'impédance (· · ·) et le modèle JCALP (-) et par l'expérience (*)

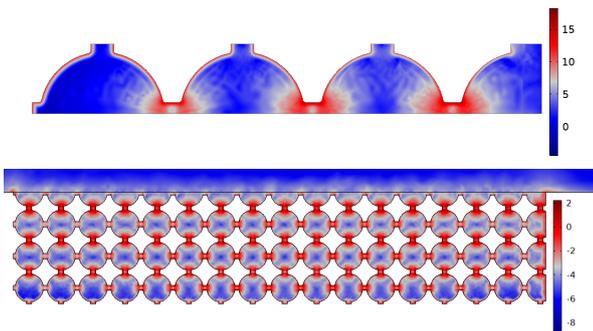


FIGURE 14 – Champ de puissance dissipée total (W/m^3) en échelle logarithmique dans une coupe du matériau en incidence normale (haut) et en paroi de conduit en (bas)

Pour mieux comprendre les différences entre le comportement en incidence normale et en paroi de conduit, on se propose d'observer qualitativement les phénomènes de dissipation. Sur la figure 14, on affiche le champ de dissipation en échelle logarithmique à la fréquence du pic d'absorption acoustique ou du TL. Il s'agit de la somme des dissipations thermique et visqueuse. On observe aucune dissipation au niveau des canaux transverses en incidence normale alors que la figure montre de la dissipation dans tous les canaux en paroi de conduit. Cette différence est peut-être responsable d'une plus grande sensibilité aux dimensions des canaux. Par ailleurs, ces propagations dans les canaux transverses tendent à montrer que la modélisation par une condition aux limites ne pourra pas rendre compte du comportement réel du matériau.

7 Conclusion et Perspectives

Dans cette étude, nous avons étudié différents modèles pour prédire le comportement acoustique de matériaux réalisés en impression 3D. Les résultats numériques et expérimentaux ne sont pas toujours concordants. Une des raisons peut provenir des différences géométriques entre le dessin et la réalisation des échantillons. On peut néanmoins, en comparant le modèle NSL et le modèle JCALP, conclure que le modèle JCALP qui semble peu adapté à ce genre de matériau permet d'aboutir à moindre coût aux prédictions les plus satisfaisantes. Des mesures sur les échantillons des géométries effectives réalisées, alliées avec une étude de sensibilité des modèles à ces variations, permettront d'évaluer leurs impacts sur les performances acoustiques. Il est par ailleurs prévu de modéliser le matériau avec les fonctions du fluide équivalent directement extraites de la résolution en incidence normale. À plus long terme, l'étude de la propagation dans le conduit traité en présence d'écoulement sera menée aussi bien du point de vue théorique qu'expérimental.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au soutien financier du LABEX CeLyA (ANR-10-LABX-0060) de l'Université de Lyon, dans le cadre du programme « Investissements d'Avenir » (ANR-16-IDEX-0005) géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Les auteurs tiennent à remercier le PMCS2I (Pôle de Modélisation et de Calcul en Sciences de l'Ingénieur de l'information) de l'École Centrale de Lyon pour les moyens matériels de simulation numérique.

Références

- [1] J. Boulvert, T. Humbert, V. Romero-Garcia, G. Gabard, E. R. Fotsing, A. Ross, J. Mardjono et J. P. Groby, Perfect, broadband, and sub-wavelength absorption with asymmetric absorbers, *Journal of Sound and Vibration* **523**, 116687 (2022).
- [2] T. G. Zielinski et al, Reproducibility of sound-absorbing periodic porous materials using additive manufacturing technologies : Round robin study, *Additive Manufacturing*, **36**, 101564 (2020)
- [3] T. G. Zielinski, R. Venegas, C. Perrot, M. Červanka, F. Chevillote et K. Attenborough, Benchmarks for microstructure-based modelling of sound absorbing rigid-frame porous media, *Journal of Sound and Vibration*, **483**, 115441 (2020)
- [4] Y. Salissou et R. Panneton, Wideband characterization of the complex wave number and characteristic impedance of sound absorbers *The Journal of the Acoustical Society of America*, **128**, 2868-2876 (2010).