N° d'ordre NNT : 2024ECDL0010

THÈSE de DOCTORAT DE L'ECOLE CENTRALE DE LYON
membre de l'Université de Lyon

École Doctorale N° 162
Mécanique Énergétique Génie Civil Acoustique

Spécialité de doctorat : Acoustique

Soutenue le 14/03/2024, par

Jamois Alexis

Modélisation et réalisation d'absorbants acoustiques par impression 3D. Étude en incidence normale et application au traitement d'un conduit.

Devant le jury composé de :

Dauchez, Nicolas	Professeur	Université de technologie de Compiègne	Président du Jury
Dragna, Didier	Maître de conférences	École Centrale de Lyon	Directeur de thèse
Galland, Marie-Annick	Professeure	École Centrale de Lyon	Directrice de thèse
Gourdon, Emmanuel	Professeur	École National des Travaux Publiques de l'État	Examinateur
Ichchou, Mohammed	Professeur	École Centrale de Lyon	Directeur de thèse
Perrot, Camille	Professeur	Université Gustave Eiffel	Rapporteur
Sadoulet-Reboul, Émeline	Maître de conférences	Université de Franche-Comté	Rapporteur
Zielinski, Tomasz G.	Associate professor	Institute of Fundamental Technlogical Research	Examinateur

Abstract

In recent years, it has become possible to produce acoustic absorbers with geometries that were previously difficult to manufacture, thanks to advances in 3D printing techniques. The ease of use and affordable prices of these techniques mean that tailor-made absorbing devices can be designed to meet a specific demand very quickly. This requires, on the one hand, the ability to print precisely the designed geometries and, on the other hand, the ability to predict the acoustic behaviour of the printed materials in the desired configuration.

The objectives of this thesis are to study the effect of dimensional variability of samples produced by 3D printing on acoustic performance and to examine different methods for predicting acoustic performance, ranging from comprehensive but expensive microscopic approaches to rapid but simplified macroscopic approaches.

Stereolithography was chosen to print the samples following a review of the printing methods evaluated in the literature. The geometries studied consist of a stack of volumes (spherical or cubic), connected in the three directions of space by channels like cubic crystals. A double nested network variant also paves the way for optimising acoustic absorption. To study the effect of variability, a large number of samples were produced with different sets of printing parameters, and the characteristic dimensions of the samples manufactured were measured. A judicious choice of parameters reduces dimensional dispersion.

The relevance of an equivalent fluid approach is demonstrated: it can faithfully reproduce, at reduced cost, the results of a direct approach solving the linearised Navier-Stokes equations in the pores of samples. In this approach, the JCAPL parameters of the equivalent fluid functions are identified from a representative elementary volume of the sample.

The samples are first studied at normal incidence. The highly resonant nature of the materials causes the absorption coefficient to be very sensitive to any discrepancy between the target dimensions and the dimensions actually manufactured. This applies both to the internal dimensions (diameter of spheres or channels) and to the diameter of the sample itself. As the samples produced by 3D printing are rigid, it is very difficult to adapt them precisely to the diameter of the Kundt tube. However, the measurement results and the predictions are in good agreement overall. This confirms the validity of the equivalent fluid model at normal incidence, which is classically treated in the literature.

Samples were then made specifically for testing in the duct wall, and their acoustic performance was investigated by measuring the transmission loss. Again, the experimental results confirm the relevance of using the equivalent fluid approach to predict the acoustic behaviour of this type of material under a grazing incidence.

Keywords : 3D printing, variability, acoustic absorbing material, transmission loss, equivalent fluid model

Résumé

Au cours des dernières années, il est devenu possible de réaliser des absorbants acoustiques dont la géométrie était difficile à produire auparavant, grâce au perfectionnement des techniques d'impression 3D. La facilité d'utilisation et les prix abordables de ces techniques permettent d'imaginer la conception de dispositifs absorbants sur mesure pour répondre à une demande spécifique très rapidement. Cela nécessite d'une part de pouvoir imprimer précisément les géométries conçues et d'autre part de pouvoir prédire le comportement acoustique des matériaux imprimés dans la configuration souhaitée.

Les objectifs de cette thèse sont d'étudier l'effet de la variabilité des dimensions d'échantillons produits par impression 3D sur l'absorption acoustique et d'examiner différentes méthodes pour prédire leur comportement, allant d'approches microscopiques complètes mais coûteuses, à des approches macroscopiques rapides mais simplifiées.

La stéréolithographie a été choisie pour imprimer les échantillons à la suite d'une revue des moyens d'impression évalués dans la littérature. Les géométries étudiées consistent en un empilement de volumes (sphériques ou cubiques), reliés dans les trois directions de l'espace par des canaux à l'image de cristaux cubiques. Une variante à double réseau permet également d'ouvrir quelques pistes en vue d'une optimisation des absorptions réalisées. Pour étudier l'effet de la variabilité, un grand nombre d'échantillons a été fabriqué avec différents jeux de paramètres d'impression et les dimensions caractéristiques des échantillons produits ont été mesurées. Un choix judicieux des paramètres permet de réduire la dispersion.

La pertinence d'une approche fluide équivalent est montrée : elle permet de reproduire fidèlement et à coût réduit les résultats d'une approche directe résolvant les équations de Navier-Stokes linéarisées dans les pores des échantillons. Dans cette approche, les paramètres JCAPL des fonctions du fluide équivalent sont identifiés à partir d'un volume élémentaire représentatif de l'échantillon.

Les échantillons sont d'abord étudiés en incidence normale. Le caractère très résonnant des matériaux rend le coefficient d'absorption très sensible à tout écart entre les dimensions cibles et les dimensions effectivement réalisées. Il en est ainsi pour les dimensions intérieures (diamètre des sphères ou des canaux) et pour le diamètre propre de l'échantillon. La nature rigide des échantillons produits par impression 3D rend très délicate leur adaptation stricte au diamètre du tube de Kundt. Les résultats de la mesure et les prédictions sont cependant globalement en bon accord et confirment dans ce cas classiquement traité dans la littérature, la validité du modèle de fluide équivalent.

Des échantillons ont été ensuite réalisés spécifiquement pour être testés en paroi de conduit, par mesure de la perte par transmission. Les résultats expérimentaux confirment là aussi la pertinence de l'utilisation de l'approche fluide équivalent pour prédire le comportement de ce type de matériau dans des conditions moins classiques.

Mots clefs : Impression 3D, variabilité, matériau acoustique absorbant, perte par transmission, modèle de fluide équivalent

Remerciements

Tout d'abord je souhaite remercier le LabEx CeLyA qui a rendu cette thèse possible ainsi que le travail des chargées d'aide au pilotage : Carine Zambardi et Agnès Delebassée-Nabet.

Un grand merci à l'équipe encadrante. Merci à Marie-Annick de m'avoir fait confiance tout d'abord pour le stage puis pour la thèse. Merci pour ton exigence et ta rigueur dont j'espère avoir été imprégné au cours de ces 3 ans. Et malgré tout merci pour ta bienveillance.

Merci à Didier pour ta disponibilité et ton implication, nos discussions et tes conseils m'ont permis d'arriver au bout de cette aventure, et sans oublier ta bonne humeur !

Merci à Mohammed, même si tu as été moins présent dû à l'orientation qu'ont pris mes travaux, nos échanges ont toujours été enrichissants et ton appui a été important.

La thèse est une aventure pour soit mais il faut être bien entouré. Le support à la recherche dont on bénéficie au LMFA à un grand rôle à jouer dans la réalisation de nos travaux.

Qu'il s'agisse du support administratif, un grand merci à Marie-Gabrielle, Marie-Noëlle et Camille pour votre gentillesse, votre efficacité et ces moments de convivialité le midi.

Mais également pour le support du côté expérimental, merci à Pascal, Édouard, Manu et un grand merci à Jean-Charles, ou du support pour la partie informatique merci à Laurent, Dan , Mateo et Anne (merci pour le tire-bouchon).

Merci à l'équipe du Fablab et de fabrication mécanique Cloé et Bertrand pour leur aide et le temps que vous m'avez accordé.

Et plus généralement merci aux permanents du laboratoire, pour toutes les discussions scientifique ou concernant l'enseignement ou autre, merci à Marc, Michel, Gilles, Vincent, Philippe, Christophe.

Et merci aux collègues ! Ceux qui étaient là avant pour leurs conseils Ariane, Léo, Danny, Étienne, Mathieu, Élina, Mohcen, Codor, Arthur, Nacho, Courtney, Daher, Jean. Merci Simon pour la motivation en course à pied et la petite année en club !

Ceux qui ont signé pour l'aventure en même temps que moi Hugo et Igor. On aura quand même bien rigolé. Merci Igor pour la découverte de la grande voie et m'avoir accompagné pour les courses de "récup".

Et merci à ceux qui nous ont rejoints et ont égayé nos bureaux dans le calme et la tranquillité, merci à Daniel, Laura, Emanuele, Simon, Loïc et Jules (au plaisir de rejouer avec le FunKCA), Corentin, Giovani, Yulin, Lucas, Manju, Bill et les nouveaux Pierre-Louis et Emilian, courage à vous c'est dur mais c'est fun.

Et finalement mon entourage, merci Alice, merci les copains Adri Bastien JB Syd Théo Juliette Charlie. Merci à mes parents, merci maman pour ton soutien et d'avoir essayé de me convaincre que la rédaction c'est agréable, merci papa pour les discussions, les relectures, ton intérêt et tes conseils.

Table des matières

Abstract i

Résumé iii

Remerciements v

Table des matières vii

Table des figures ix

Liste des tableaux xiii

Introduction 1

1 L'impression 3D, catalyseur du développement des matériaux architecturés 5
- 1.1 Introduction . . . 6
- 1.2 Présentation générale des différentes techniques d'impression 3D . . . 7
- 1.3 Matériaux acoustiques obtenus par impression 3D : état de l'art . . . 11
- 1.4 Objectif de l'étude et choix technologique . . . 15

2 Présentation des paramètres de fabrication et des géométries, et étude de la variabilité dimensionnelle 17
- 2.1 Introduction . . . 18
- 2.2 Choix des paramètres de fabrication . . . 18
- 2.3 Géométrie sélectionnée . . . 21
- 2.4 Contrôle des dimensions réalisées . . . 22
- 2.5 Variations autour de la géométrie principale . . . 37

3 Modélisation acoustique des échantillons, cas de l'incidence normale 39
- 3.1 Introduction . . . 40
- 3.2 Les modélisations envisagées . . . 40
- 3.3 Implémentation des modélisations à l'échelle microscopique . . . 47
- 3.4 La modélisation macroscopique . . . 54
- 3.5 Modélisation des modifications de géométries . . . 61

4 Comparaisons avec l'expérience en incidence normale 67
- 4.1 Introduction . . . 68
- 4.2 Impact de la variabilité des échantillons . . . 69
- 4.3 Échantillons de différentes géométries . . . 80

5 Caractérisation en paroi de conduit **85**
5.1 Introduction 86
5.2 Modélisation de la veine d'essai 91
5.3 Résultats expérimentaux 95
5.4 Prise en compte de la variabilité des réalisations 101

Conclusion **107**

A Diamètres des canaux des échantillons de la série C **109**

B Étude paramétrique de la fuite placée du côté des canaux **111**

Bibliographie **113**

Table des figures

1.1 Schéma de principe de l'impression par dépose de fil fondu 7
1.2 Exemples d'imprimantes par dépose de fil disponibles au laboratoire 8
1.3 Schéma de principe d'impression par stéréolithographie 9
1.4 Schéma de principe de la technique Inkjet printing 10
1.5 Schéma de principe de la technique fusion dans un bain de poudre 11
1.6 Réalisation d'échantillons présentant un taux de remplissage variable Carbajo et al. . . 13
1.7 Échantillon présentant plusieurs tailles de rugosité 14
1.8 Imprimante 3D par stéréolithographie Form2 de Formlabs® 16

2.1 Représentation de l'empilement des couches polymérisées d'épaisseur e 19
2.2 Pièce réalisée pour le calibrage 20
2.3 Coupe d'une cellule élémentaire de l'échantillon 21
2.4 Photos des échantillons étudiés face A et face B 22
2.5 Schéma d'un projecteur de profil 23
2.6 Photo du projecteur utilisé avec un échantillon 24
2.7 Pièce dans l'agrès pour la mesure de la taille de la cellule dans le sens de l'extrusion . 24
2.8 Sphères d'un échantillon observées sur l'écran du projecteur de profil 25
2.9 Schéma du protocole de mesure 25
2.10 Photo du canal observé à travers le projecteur de profil 25
2.11 Dispersion des dimensions pour les échantillons des configurations de la série A 28
2.12 Dispersion des dimensions pour les échantillons des configurations de la série B 30
2.13 Dispersion des dimensions pour les échantillons des configurations de la série C 32
2.14 Photos : visualisation des facettes des échantillons série A 32
2.15 Photo d'un échantillon pour lequel sont matérialisés les deux cercles 33
2.16 Diamètre extérieur moyen sur toutes les configurations pour les séries A,B et C et écart-type correspondant 36
2.17 Coupe d'une cellule élémentaire de l'échantillon cubique 37
2.18 Imbrication des deux réseaux et coupe d'une cellule élémentaire de la géométrie double réseau Double Nested Network (DNN) 38

3.1 Principe de la modélisation par condition aux limites d'impédance 42
3.2 Taille des couches limites visqueuse et thermique 42
3.3 Dimensions limitant la validité du modèle de condition aux limites d'impédance 42
3.4 Schéma des différentes configurations utilisées pour le modèle 46
3.5 Représentation d'une cellule avec ses congés modélisés dans COMSOL ® 47
3.6 Géométrie utilisée en incidence normale pour la face A et la face B 48

3.7 Modèle microscopique pour la résolution NSL 48
3.8 Géométries utilisées pour valider l'utilisation des symétries 48
3.9 Coefficient d'absorption pour la géométrie avec symétrie et avec une géométrie étendue 49
3.10 Représentation du maillage utilisé 49
3.11 Convergence en maillage 50
3.12 Champs de dissipation total, visqueux et thermique pour la géométrie OPCL 51
3.13 Champ de dissipation pour la géométrie OPCL modèle étendu 52
3.14 Coefficient d'absorption pour la face A et la face B obtenu par simulation directe . . . 52
3.15 Coefficient d'absorption pour différents nombres de résonateurs pour la géométrie OPCL 53
3.16 Géométrie réalisée pour la modélisation, la conditions aux limites prenant en compte les dissipations est appliquée sur les surfaces en bleu 53
3.17 Coefficient d'absorption obtenu par la simulation directe et la modélisation BLI 54
3.18 1/16ème d'une cellule élémentaire dans laquelle sont résolues les équations présentées . 54
3.19 Coefficient d'absorption pour la simulation direct et la modélisation par un fluide équivalent 55
3.20 Coefficient d'absorption pour les deux faces par la simulation directe et avec l'approche fluide équivalent 56
3.21 Coefficient d'absorption pour différents nombres de résonateurs comparaison entre la simulation directe et l'approche fluide équivalent 57
3.22 Coefficient d'absorption comparaison entre la simulation directe et l'approche fluide équivalent pour différentes conditions derrière l'échantillon 58
3.23 Compressibilité effective pour différents nombres de résonateurs avec la simulation directe et avec l'approche fluide équivalent 58
3.24 Densité effective pour différents nombres de résonateurs avec la simulation directe et avec l'approche fluide équivalent 59
3.25 Compressibilité effective pour la géométrie OPC 59
3.26 Densité effective pour la géométrie OPC 60
3.27 Coefficient d'absorption pour la géométrie OPC 61
3.28 Coefficient d'absorption pour la géométrie cubique 62
3.29 Face A et face B pour la géométrie DNN 63
3.30 Cellule représentative de la géométrie DNN réalisée pour calculer les paramètre JCAPL 63
3.31 Coefficient d'absorption pour la géométrie double réseau approche fluide équivalent initiale 64
3.32 Modèle éléments finis réalisé avec les deux domaines JCAPL côte à côte 64
3.33 Conservation du débit en face avant de l'échantillon 65
3.34 Coefficient d'absorption pour la géométrie double réseau approche fluide équivalent modifiée 66

4.1 Aire considérée pour le rapport de surface fuite/matériau publication de Cummings . 69
4.2 Aire considérée pour le rapport de surface dans le cas de l'échantillon OPC L 70
4.3 Coefficient d'absorption pour un matériau poreux classique avec et sans fuite 71
4.4 Coefficient d'absorption pour différent modèle de représentation d'une fuite autour de l'échantillon OPC L 72
4.5 Champ de dissipation (W/m^3) à la fréquence maximale d'absorption pour un cas sans fuite (c) et un cas avec une fuite placée du côté de la sphère (b) ou du côté du canal (a) 73
4.6 Maximum du coefficient d'absorption et fréquence de ce maximum avec une fuite paramétrée 74

4.7 Moyennes des coefficients d'absorption modélisés et expérimentaux pour la configuration Clear25 de chaque série . . . 75
4.8 Étendue des coefficients d'absorption obtenus en modélisant les dimensions minimales et maximales mesurées pour la configuration Clear25 . . . 76
4.9 Étendue des coefficients d'absorption obtenus en modélisant les dimensions minimales et maximales mesurées pour chaque configuration d'échantillon Clear25 (violet), Clear50 (bleue) et Black25 (gris) . . . 76
4.10 Étendue des coefficients d'absorption obtenus en modélisant les dimensions minimales et maximales mesurées comparée avec la mesure acoustique des échantillons de la configuration . . . 77
4.11 Coefficient d'absorption pour les 4 échantillons de la configuration Clear25 ; comparaison entre modèle et mesure . . . 78
4.12 Coefficient d'absorption de l'échantillon C251B et comparaison avec un modèle prenant en compte variabilité dimensionnelle et une fuite . . . 79
4.13 Coefficients d'absorption de la géométrie OPC ; modèle et mesure . . . 80
4.14 Coefficients d'absorption de la géométrie OPCL ; modèle et mesure . . . 81
4.15 Coefficients d'absorption de la géométrie cubique ; modèle et mesure . . . 82
4.16 Coefficients d'absorption de la géométrie cubique ; mesure et modélisation prenant en compte les dimensions mesurées . . . 82
4.17 Coefficients d'absorption de la géométrie double réseau ; modèle et mesure . . . 83

5.1 Traitement en paroi de conduit . . . 86
5.2 Échantillon placé en paroi de conduit : résonateurs quart d'onde enroulés . . . 86
5.3 Échantillon placé en paroi de conduit : résonateurs de Helmholtz désaccordés . . . 87
5.4 Échantillon placé en paroi de conduit : résonateurs de Helmholtz cou interne . . . 87
5.5 Banc d'essai Matisse . . . 88
5.6 Propagation acoustique dans la veine MATISSE et moyen de mesure . . . 89
5.7 Perte par transmission pour une paroi rigide . . . 90
5.8 Pertes par transmission pour un échantillon de laine synthétique . . . 90
5.9 Échantillon utilisant la géométrie cubique réalisé pour l'absorption en paroi de conduit 91
5.10 Pièce réalisée pour l'adaptation du matériau en paroi de conduite . . . 92
5.11 Modèles réalisés pour le calcul du TL . . . 93
5.12 Modèle réalisé pour l'approche microscopique, en bleu la surface de symétrie . . . 93
5.13 Pertes par transmission de la géométrie OPCL ; comparaison des modèles . . . 93
5.14 Champ de dissipation pour la géométrie OPCL . . . 94
5.15 Domaine modélisé pour l'étude tenant compte de la géométrie du porte échantillon . . . 94
5.16 Pertes par transmission avec l'approche fluide équivalent, prise en compte de la géométrie du porte échantillon . . . 95
5.17 Pertes par transmission de la géométrie OPCL ; comparaison entre modélisations et mesures . . . 96
5.18 Pertes par transmission de la géométrie OPC ; comparaison entre modélisations et mesures 97
5.19 Comparaison entre champs de dissipation et champs de pression pour la géométrie OPC 97
5.20 Champs de pression pour la géométrie OPC obtenue par approche fluide équivalent . . . 98
5.21 Pertes par transmission de la géométrie cubique ; comparaison entre modélisations et mesures . . . 98
5.22 Modélisation pour le calcul de la géométrie double réseau avec l'approche fluide équivalent ; les deux domaines correspondent aux deux sous-réseaux . . . 99
5.23 Pertes par transmission de la géométrie DNN ; comparaison entre modélisations et mesures 99

5.24 Pertes par transmission de la géométrie DNN ; utilisation des paramètres du petit et du gros réseau pour l'approche fluide équivalent 100
5.25 Pertes par transmission de la géométrie DNN ; modification du modèle fluide équivalent 101
5.26 Pertes par transmission de la géométrie OPCL ; prise en compte des variations de dimensions 102
5.27 Pertes par transmission de la géométrie OPC ; prise en compte des variations de dimensions 102
5.28 Pertes par transmission de la géométrie cubique ; prise en compte des variations de dimensions 103
5.29 Schéma de la prise en compte d'une fuite en paroi de conduit 104
5.30 Pertes par transmission de la géométrie OPCL ; prise en compte de différentes épaisseurs de fuite 105
5.31 Pertes par transmission de la géométrie cubique ; prise en compte de 2 épaisseurs de fuite106

B.1 Coefficient d'absorption ; prise en compte d'une fuite du côté des canaux 111
B.2 Schéma d'une fuite du coté des canaux en incidence normale 112
B.3 Maximum du coefficient d'absorption et fréquence de ce maximum avec une fuite paramétrée 112

Liste des tableaux

1.1 Résumé des principales méthodes de fabrication additives 12

2.1 Plan d'expérience 26
2.2 Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear25 Série A . . 27
2.3 Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear50 Série A . . 27
2.4 Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Black25 série A . . 27
2.5 Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear25 série B . . . 29
2.6 Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear50 série B . . . 29
2.7 Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Black25 série B . . 29
2.8 Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Black50 série B . . 30
2.9 Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear25 Série C . . 31
2.10 Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear50 Série C . . 31
2.11 Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Black25 série C . . 31
2.12 Mesure du diamètre externe des échantillons de la série A 34
2.13 Mesure du diamètre externe des échantillons de la série B 35
2.14 Mesure du diamètre externe des échantillons de la série C 35
2.15 Géométries utilisées pour la thèse 38

3.1 Description des différents paramètres de maillage 50
3.2 Paramètres JCAPL obtenus pour la géométrie OPCL 56
3.3 Paramètres JCAPL obtenus pour la géométrie cubique 62
3.4 Paramètres JCAPL obtenus pour la géométrie DNN et les deux sous-réseaux . 63

4.1 Conversion entre l'épaisseur e utilisée par le modèle et le rapport de surface Φ_{leak} 74
4.2 Conversion entre le diamètre externe moyen mesuré de chaque série et le rapport de surface Φ_{leak} 75

5.1 Position relative des microphones du banc MATISSE 89

A.1 Valeurs des diamètres des canaux moyennées par pièce pour la configuration Clear25 Série C face A 109
A.2 Valeurs des diamètres des canaux moyennées par pièce pour la configuration Clear50 Série C face A 109
A.3 Valeurs des diamètres des canaux moyennées par pièce pour la configuration Black25 Série C face A 109

Introduction

Le bruit, qu'il soit généré par les machines industrielles, la circulation routière ou l'aéronautique, est devenu un problème majeur dans nos environnements urbains. Outre les effets nuisibles sur la santé et le bien-être des individus, il a également un impact négatif sur la productivité et la performance au travail et cause des problèmes tels que des troubles du sommeil, du stress, des problèmes cardiovasculaires et des difficultés de concentration. Selon les statistiques de l'Agence européenne pour l'environnement, un européen sur cinq est exposé quotidiennement à des niveaux de bruit nuisibles pour la santé (E.E.A, 2020).

Face à cette problématique, la diminution du bruit à la source reste le plus efficace. Cependant, elle est parfois incompatible avec les applications ou avec les objectifs de performance. Lorsque ce n'est pas possible, il apparaît nécessaire de développer des matériaux absorbant les ondes sonores pour réduire l'exposition au bruit des populations.

Les matériaux absorbants acoustiques les plus largement utilisés sont des mousses ou des matériaux fibreux (Allard et Atalla, 2009; Biot, 1956). Ils permettent une bonne absorption sur une large gamme de fréquences et sont très répandus pour les applications domestiques et les installations de la vie quotidienne. Leur performance est cependant limitée dans les basses fréquences, lorsque la longueur d'onde est supérieure à l'épaisseur du traitement acoustique. C'est notamment le cas pour les fréquences des nuisances générées par des machines industrielles (fréquence de rotation de moteur, de machine tournante, de réacteur ...). L'utilisation de matériaux absorbants classiques nécessiterait une masse de matériaux en pratique impossible à mettre en œuvre.

Pour ces applications, les dispositifs acoustiques utilisés sont constitués généralement de résonateurs. Le traitement acoustique de référence actuellement utilisé dans les nacelles d'avion est composé d'une plaque perforée (Maa, 1975, 1998) devant des cavités réalisées avec une structure en nid d'abeille (Jones *et al.*, 2020). Certaines structures périodiques réalisées pour obtenir des performances spécifiques peuvent être désignées "métamatériaux" ou "cristaux phononiques". Ce champ de recherche provient de l'électromagnétisme (Weiglhofer et Lakhtakia, 2003) et s'est étendu à l'acoustique depuis une vingtaine d'années. Il a éveillé un fort intérêt au vu des possibilités de performances qu'il offre (Wu *et al.*, 2019). Ainsi, l'inclusion périodique de résonateurs dans un matériau poreux permet d'augmenter l'absorption à la fréquence de résonance (Boutin, 2013; Chevillotte *et al.*, 2015; Ji *et al.*, 2019; Ho *et al.*, 2005; Opiela *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2016). On retrouve également des structures avec des cavités d'air semblables à des résonateurs de Helmholtz. Leurs géométries sont étudiées pour augmenter le volume de la cavité ou la longueur du canal de sorte à s'accorder aux fréquences cibles, le tout en limitant leur encombrement (Carbajo *et al.*, 2020; Groby *et al.*, 2015; Jiménez *et al.*, 2016). L'optimisation est réalisée soit par un enroulement permettant de limiter l'épaisseur des échantillons tout en offrant une longueur de cavité pouvant être accordée à une certaine fréquence (Xie *et al.*, 2013; Liang et Li, 2012; Li *et al.*, 2013; Jia *et al.*, 2018), soit en intégrant le col à l'intérieur du résonateur

pour en augmenter la longueur sans occuper plus d'espace (Duan *et al.*, 2020, 2021).

En parallèle (et pour certains en appui) de ces travaux, les techniques de fabrication additives se sont développées rapidement ces dernières années. Elles permettent la réalisation de géométries jusque-là impossibles à obtenir avec des techniques d'usinage classiques (Setaki *et al.*, 2014; Sekar *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2021; Duan *et al.*, 2020). La fabrication additive utilise la conception assistée par ordinateur (CAO). Ainsi, on pourrait imaginer utiliser la géométrie réalisée pour l'impression dans un outil de prédiction de la performance acoustique. On serait alors capable de créer un matériau répondant à un besoin dans un certain contexte et de le réaliser en impression 3D par la suite.

Les études citées précédemment présentent des cas de structures optimisées par le coefficient d'absorption ou, plus rarement, par l'impédance de surface. Ces indicateurs sont obtenus en incidence normale, et expérimentalement sur des bancs d'essai appelés tube de Kundt ou tube d'impédance. Le principe est d'envoyer des ondes planes dans une direction normale à la surface de l'échantillon et de mesurer la proportion de l'énergie de l'onde absorbée.

L'étude en incidence normale, essentielle pour caractériser les échantillons, est cependant limitée en termes de représentativité de la majorité des cas réels. La conception de matériaux absorbants doit souvent tenir compte de champs acoustiques diffus ou en incidence rasante. Les capacités d'absorption peuvent aussi être modifiées par la présence d'un écoulement. Ces considérations ont motivé le choix d'un deuxième dispositif d'étude. Parmi les cas possibles pour étendre l'étude de ce type de matériaux, on peut considérer l'utilisation d'une chambre réverbérante (Kamrul *et al.*, 2021). Cela nécessite la réalisation d'une surface d'échantillon de dimension suffisante pour avoir un effet mesurable et pouvoir s'affranchir d'effet de bord. On retrouve également dans la littérature des études en paroi d'un conduit (Oh et Jeon, 2022; Guo *et al.*, 2023; Boulvert *et al.*, 2022a,b) avec et sans écoulement. Les matériaux considérés sont des résonateurs de Helmholtz désaccordés (Oh et Jeon, 2022; Boulvert *et al.*, 2022a) réalisés par impression 3D ou des résonateurs quarts d'onde remplis de mousse polyurethane (PU) (Guo *et al.*, 2023) ou réalisés par impression 3D (Boulvert *et al.*, 2022b). Dans ces études, le matériau est placé en paroi du conduit au milieu de celui-ci. On évalue alors le rapport de la puissance de l'onde acoustique transmise sur celle de l'onde incidente. Le cas peut être adapté plus spécifiquement pour modéliser, par exemple, une ligne d'échappement avec ses phénomènes physiques et les contraintes associées. On choisit pour cela un conduit ouvert (Meng *et al.*, 2023) et le matériau est placé à l'extrémité du conduit pour permettre de limiter le bruit rayonné vers l'extérieur. L'impédance du tube ouvert complexifie alors l'expression des caractéristiques du matériau pour obtenir le niveau d'absorption souhaité. D'autres études essayent de reproduire au mieux les conditions réelles d'absorption comme celle de Xiao *et al.* (2022). Dans cette étude, l'expérimentation est réalisée en chambre anéchoïque avec une hélice comme source de bruit. Le matériau est réalisé en forme de cylindre et placé autour de l'hélice de sorte à réaliser une expérience très proche de l'effet d'un absorbant présent à l'intérieur d'une nacelle d'avion.

En prenant en compte les dimensions réalisables en impression 3D et l'objectif d'application aéroacoustique, le choix s'est porté sur l'étude en paroi de conduit. Ce cas se rapproche suffisamment de situations réelles tout en permettant une modélisation relativement simple sur le principe. Il permet également d'envisager l'ajout d'un écoulement pour de futurs travaux. L'étude s'appuiera sur des installations déjà présentes sur le site de l'École Centrale de Lyon au LMFA. L'installation utilisée, qui sera présentée au chapitre 6, est le banc MATISSE, qui a déjà été utilisé et caractérisé pour d'autres travaux expérimentaux (Sellen, 2003; Sellen *et al.*, 2006; Betgen et Galland, 2009).

Le but général est de tester la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation de la fabrication additive pour la réalisation de matériaux absorbants sur mesure. Comme exprimé plus haut, l'idée est de définir un protocole permettant la réalisation de matériaux adaptés au contexte (incidence normale, paroi de conduit, champ diffus) et ciblant une performance (la fréquence ou la bande de fréquence

cible de l'absorption). Une partie du travail de cette thèse consiste à mettre en œuvre la réalisation des échantillons en utilisant des méthodes de fabrication additives. Ces méthodes sont relativement récentes et il est nécessaire de s'assurer qu'elles permettent la précision nécessaire à la réalisation de la structure cible. Les échantillons sont ensuite testés en incidence normale et en paroi de conduit. Une autre partie du travail vise à étudier la capacité à prédire la performance acoustique des matériaux imprimés dans différentes conditions, tout d'abord en incidence normale pour évaluer la pertinence des modèles utilisés, puis en paroi de conduit.

Organisation du manuscrit

Chapitre 1 Le premier chapitre de cette thèse présente l'état de l'art des méthodes de fabrication additives. Les réalisations spécifiques dans le domaine de l'absorption acoustique permettent d'identifier les avantages et les inconvénients des différentes techniques. Ces caractéristiques conduisent, à la lumière des objectifs poursuivis, à la sélection de la technique la plus adaptée pour la poursuite des travaux.

Chapitre 2 Dans ce deuxième chapitre, les paramètres de fabrication liés à la technique sélectionnée sont détaillés. Les géométries testées pour ces travaux sont présentées. Les résultats obtenus en termes de précision dimensionnelle des échantillons permettent de sélectionner les paramètres les mieux adaptés. Les bonnes pratiques sont identifiées et les résultats de plusieurs séries de réalisation sont commentés.

Chapitre 3 Dans ce troisième chapitre, différentes méthodologies de modélisation sont présentées et la mise en œuvre numérique des modèles est détaillée. Des comparaisons pour une géométrie de référence dans le cas simple d'une incidence normale permettent de cibler la meilleure approche. Les adaptations nécessaires pour modéliser des géométries plus complexes sont présentées.

Chapitre 4 Dans ce chapitre, on présente les résultats des mesures en incidence normale des échantillons réalisés. Les liens que l'ont peut établir entre la mesure des dimensions des échantillons imprimés et leur performances acoustiques confirment le choix des bonnes pratiques de réalisation faits au chapitre 2. Les résultats des mesures sont comparés avec les résultats de la modélisation du chapitre 3.

Chapitre 5 Dans ce dernier chapitre, les conditions de mesure et de modélisation en paroi de conduit sont présentées. Les résultats de la mesure sont comparés aux modélisations pour les différentes géométries réalisées.

Chapitre 1

L'impression 3D, catalyseur du développement des matériaux architecturés

Résumé

Dans ce chapitre, nous allons présenter les principales techniques d'impression 3D. Leur principe de fonctionnement est détaillé ainsi que les caractéristiques des pièces réalisées. Ces différentes caractéristiques sont ensuite utilisées pour analyser les travaux dans lesquels le comportement acoustique de matériaux absorbants fabriqués en impression 3D est mesuré. Cette analyse conforte le choix de la stéréolithographie comme technique de fabrication la mieux adaptée à la présente étude.

Sommaire

1.1 Introduction 6

1.2 Présentation générale des différentes techniques d'impression 3D 7

1.2.1 Dépose de fil fondu (FDM) 7

1.2.2 Stéréolitographie (SLA) 8

1.2.3 Inkjet printing 10

1.2.4 Fusion dans un bain de poudre 10

1.2.5 Synthèse 11

1.3 Matériaux acoustiques obtenus par impression 3D : état de l'art 11

1.3.1 Dépose de fil 12

1.3.2 Stéréolithographie 13

1.3.3 L'encollage poudre 14

1.4 Objectif de l'étude et choix technologique 15

1.4.1 Choix technologique 16

1.1 Introduction

Les méthodes de fabrication additive, ou impression 3D, se sont largement développées ces dernières années. Les géométries qu'elles permettent de réaliser, ainsi que leur facilité d'utilisation, ont rendu possible un prototypage plus efficace et ont permis d'élargir le champ de conception des pièces techniques. Dans une société ou la lutte contre les nuisances sonores est de plus en plus présente, le domaine de l'acoustique ne fait pas exception à l'utilisation de ces nouveaux procédés de fabrication, tant pour la fabrication de bancs d'essais que pour la conception de nouveaux matériaux absorbants. Alors que la modélisation fine des mécanismes d'absorption dans les absorbants classiques est rendue compliquée par des géométries non contrôlée et inconnues (responsable par ailleurs de l'absorption sur une bande de fréquence plus large), le design a priori très régulier obtenu avec une imprimante 3D permet une modélisation plus fine de la géométrie et peut conduire à une meilleure compréhension des phénomènes d'absorption. Cette approche est à mettre en lien avec celle présentée dans (Luu *et al.*, 2017a; Tran *et al.*, 2023) qui consiste à calculer les propriétés acoustiques de matériaux fibreux à partir d'une observation au microscope de la structure de ces matériaux.

Par ailleurs, la facilité de la conception de nouvelles architectures assistée par ordinateur suggère qu'il pourrait être facile d'optimiser numériquement un matériau pour un besoin précis et de le tester immédiatement grâce à l'impression 3D. Pour étudier la faisabilité de cette démarche, ce premier chapitre commence par lister et décrire les différentes techniques d'impression disponibles sur le marché. Une étude bibliographique permet de mettre en lien différents comportements acoustiques avec les caractéristiques des techniques d'impression. Ces différents comportements ont permis de cibler la technique la mieux adaptée à notre objectif.

La fabrication additive (AM pour Additive Manufacturing) désigne les différentes méthodes d'impression 3D par opposition avec les méthodes de fabrication classiques pour lesquelles la matière est retirée (tournage ou fraisage) (Gibson *et al.*, 2021). Les progrès de ces technologies permettent à présent d'imprimer différentes matières, des plastiques thermoformables classiques (l'acide polylactique, dit PLA par exemple) aux métaux et alliages (titane, aluminium et acier chromé) en passant par des résines (principalement des photo-polymères) et des céramiques (sable, ciment, argile ...). Les méthodes qui mettent en œuvre l'impression de ces matières permettent des précisions dimensionnelles, des états de surface et des densités de matériau très variés.

Pour toutes ces techniques, la fabrication commence par la réalisation d'un dessin 3D grâce à des outils de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) (OpenScad, FreeCAD ...). Une caractéristique importante de ces techniques est leur résolution, soit le plus petit pas dimensionnel réalisable. Cette résolution peut bien sûr dépendre des géométries, certaines pouvant être plus difficiles à réaliser que d'autres. La résolution est l'un des premiers paramètres à prendre en compte dans la réalisation d'une pièce. Le dessin pourra également être impacté par la précision des différentes techniques.

Si la précision dimensionnelle du dessin 3D est infinie, celle des techniques d'impression peut être interprétée comme l'écart entre les résultats et le dessin. À cet écart par rapport aux cotes fonctionnelles, on peut rajouter une qualification de l'état de surface (comme en mécanique industrielle). On pourrait la définir comme une variation autour de la cote ciblée : présence de sillons, de grains, ou de surépaisseur avec des dimensions de plusieurs ordres de grandeur inférieures aux dimensions des cotes.

Par ailleurs, la pièce dessinée en 3D est massive car tous les volumes sont pleins. En fonction de la méthode de fabrication additive utilisée, il peut rester des interstices entre les ajouts successifs de matière créant ainsi une porosité.

La transformation d'un dessin en commandes numériques utilisables par une machine se fait au moyen d'un "slicer". Ces logiciels transcrivent le dessin en instruction en découpant la réalisation en couche, les "Slices". Pour chaque couche, sont donnés les mouvements de la buse d'impression, du laser

ou les pixels du masque. Il permet également de rajouter si besoin une structure, appelée support, pour permettre la réalisation de pièce présentant une partie en porte-à-faux.

1.2 Présentation générale des différentes techniques d'impression 3D

Nous présentons dans cette section les principales techniques d'impression recensées dans la littérature récente (Yuan *et al.*, 2021; Tuan *et al.*, 2018). Les paramètres, les matières utilisées ainsi que la résolution sont détaillés. Toutes les techniques présentées ne sont cependant pas disponibles au laboratoire.

1.2.1 Dépose de fil fondu (FDM)

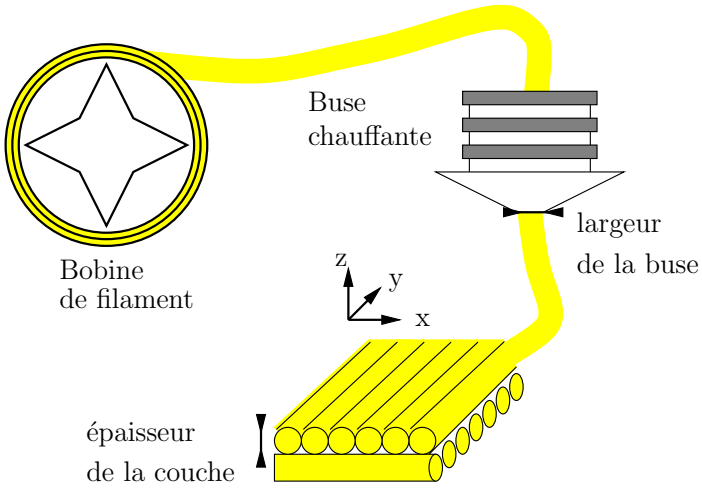


FIGURE 1.1 – Schéma de principe de l'impression par dépose de fil fondu

La dépose de fil fondu (Fused Deposition Modelling FDM) est la technique qui a été développée le plus rapidement et est devenue la plus répandue des techniques d'impression. Elle consiste à extruder la pièce sur un plateau fixe en déposant couche après couche un cordon de plastique fondu. L'ordre de grandeur du diamètre du cordon est de plusieurs dixièmes de millimètres. Il est contrôlé par le diamètre de la buse et la vitesse de dépose du fil, (cf. figure 1.1). La méthode permet d'utiliser, de manière classique, différents thermoplastiques tel que l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) ou l'acide polylactique (PLA). Certaines machines permettant de chauffer à plus haute température peuvent également imprimer des plastiques chargés en carbone ou des thermoplastiques plus techniques.

Plusieurs machines utilisant ce principe sont disponibles au laboratoire (2 exemples en photo 1.2) : des machines dédiées à la production comme la Fortus 450mc (Stratasys, 2015) ou la Fortus 250 mais également des machines dédiées à du prototypage comme la Ultimaker S5 (UltiMaker, 2015) peuvent être utilisées. La Fortus est une imprimante de production offrant peu de possibilités de réglage en comparaison avec les imprimantes Ultimaker disponibles. Ces dernières sont très utilisées par les utilisateurs amateurs avec des slicers libres de droit autorisant un grand nombre de possibilités de paramétrage.

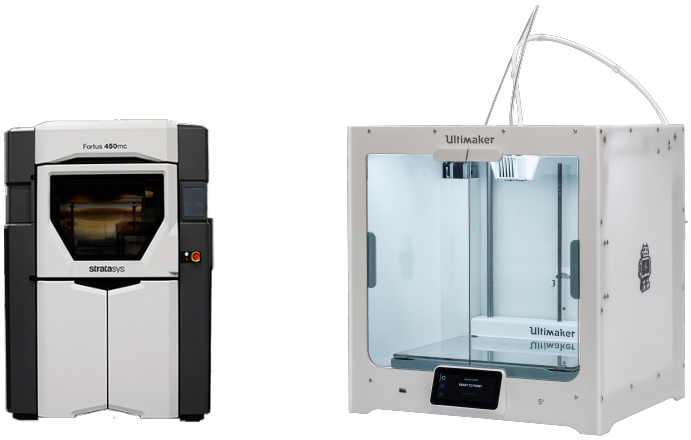


FIGURE 1.2 – Exemples d'imprimantes par dépose de fil disponible au laboratoire : à gauche la Fortus 450mc et à droite la Ultimaker S5.

Présentation du slicer CURA

Le logiciel Cura est l'un des slicers dédié à la dépose de fil fondu les plus utilisés. Il permet de réaliser un fichier d'impression pour de nombreuses marques de machines et permet de choisir la position des objets réalisés sur le plateau d'impression et de gérer certains paramètres d'impression. Ces paramètres sont : l'épaisseur des cordons en changeant la taille de la buse et la vitesse de déplacement de la tête d'impression, mais également la densité du treillis interne de la pièce en modifiant le pas entre chaque passage de la tête d'impression (on parlera de taux de remplissage). On peut également gérer la présence ou non de supports, ainsi que d'autres paramètres comme le maintien en température ou le refroidissement de l'enceinte (affectant les propriétés mécaniques des pièces réalisées et la jonction entre les cordons, etc). Pour la FDM, les supports sont constitués d'une matière soluble (à l'eau ou dans un autre solvant). En théorie, quand il faut réaliser une couche qui ne prend pas appui sur une couche inférieure, l'utilisation de support est nécessaire. Dans la pratique, il existe une tolérance. Le slicer permet de gérer un angle d'auto-portance (self-supporting) fixant la limite à partir de laquelle le support est nécessaire ; en deçà on considère que la couche supérieure aura un appui suffisant sur la couche inférieure.

En résumé

Du fait de la méthode d'extrusion, l'état de surface des pièces réalisées avec la FDM présente une rugosité de la taille de l'épaisseur du cordon. La jonction entre les cordons peut être imparfaite et dépend du taux de remplissage choisi et du refroidissement de l'enceinte de construction. Cette technique permet d'imprimer un niveau de détail avec en général une résolution de 50 à 200 µm.

1.2.2 Stéréolitographie (SLA)

La Stéréolithographie consiste à polymériser au moyen d'un laser une résine liquide contenue dans un bain. Le laser est dirigé sous le bain à travers une vitre pour réaliser le dessin de chaque couche dans le plan xOy. La polymérisation se fait couche après couche : la première couche est réalisée au contact d'un plateau puis les suivantes au contact de la couche précédente. L'épaisseur des couches dépend de la hauteur dont est remonté le plateau entre chaque polymérisation. L'ordre de grandeur de l'épaisseur des couches est du dixième de millimètre mais peut aller jusqu'au centième de millimètre. La couche la plus fine possible avec la machine à notre disposition, une Form2 de Formlabs® est de

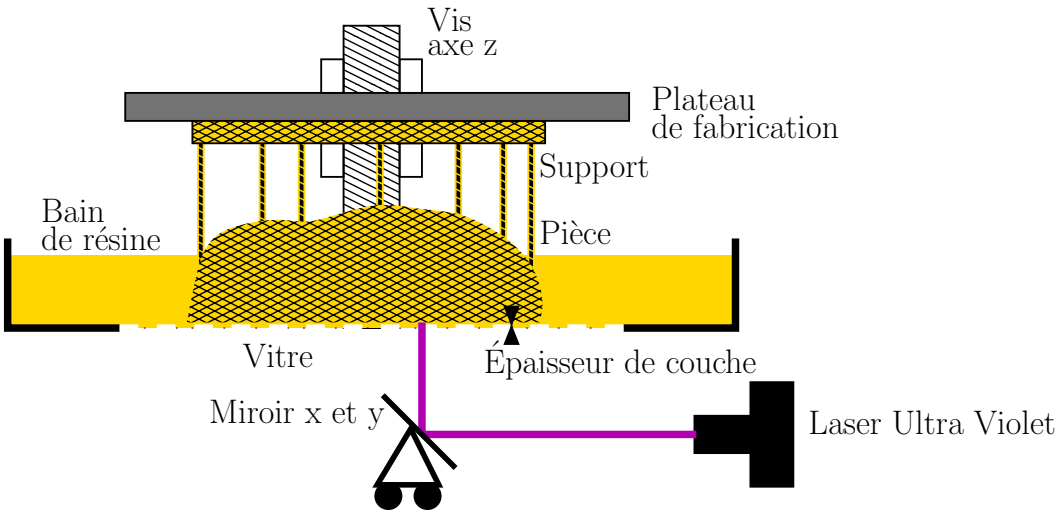


FIGURE 1.3 – Schéma de principe d'impression par stéréolithographie

25 μm.

Cette technique nécessite un post traitement : il est nécessaire de rincer le surplus de résine qui reste collé sur l'échantillon. Les pièces sont trempées dans un solvant à plusieurs reprises puis séchées. Il faut ensuite traiter la pièce dans un four UV pour finaliser la polymérisation et assurer une bonne tenue mécanique et une bonne longévité aux pièces réalisées.

Une autre technique de polymérisation voisine de la SLA est la Masqued SLA (MSLA) qui consiste à utiliser une nappe laser plutôt qu'un faisceau et à gérer la transparence des pixels d'un masque permettant de créer la couche. Cette technique est plus rapide car on s'affranchit du temps de parcours effectué par le faisceau du laser. Un des freins à l'utilisation de cette technique a longtemps été la taille des pixels du masque responsable d'un état de surface très rugueux. La résolution du masque n'est actuellement plus un frein, car on dispose d'écran de masque avec une résolution 8K (8000 pixels sur une longueur de 250 mm environ).

Présentation du slicer

La traduction du fichier de conception en instruction utilisable par l'imprimante se fait à l'aide du logiciel propriétaire Preform ®. Le nombre de paramètres pilotables est limité : il est uniquement possible de régler l'épaisseur des couches polymérisées, l'orientation de l'échantillon et l'ajout du support.

En résumé

Cette technique permet d'obtenir un dessin très fin, un état de surface plutôt lisse et une absence de porosité. La résolution que l'on peut obtenir avec des machines commerciales est de l'ordre de 10μm. La faible épaisseur des couches associée aux avantages de la polymérisation d'une résine limitent la rugosité de surface et permettent la réalisation d'un squelette plein. Il faut toutefois noter que la résine et les solvants utilisés présentent un niveau de toxicité élevé. La réalisation doit donc se faire sous une hotte avec gants et masque à cartouche filtrante. Il existe actuellement des résines lavables à l'eau. Leur utilisation induit néanmoins une perte en qualité d'impression.

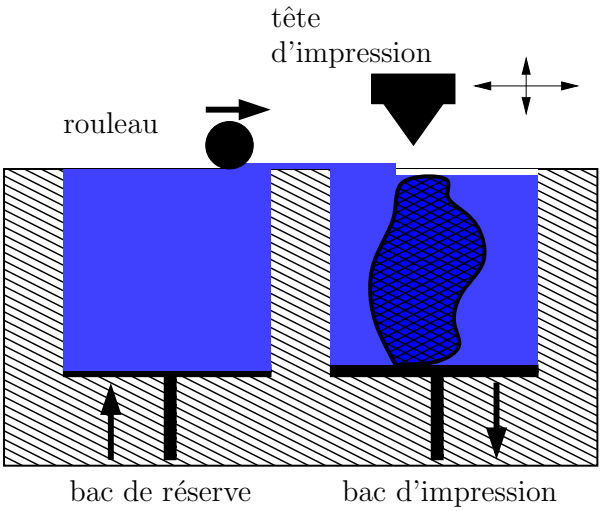


FIGURE 1.4 – Schéma de principe de la technique Inkjet printing

1.2.3 Inkjet printing

La technologie par encollage de poudre est désignée MJM pour Multi Jet Modeling ou CJP pour Color Jet Printing ou encore Ink Jet Printing (IJP). Elle consiste à projeter par couches successives un liant sur un bac de poudre. Comme on peut le voir sur le schéma 1.4, un rouleau déplace la poudre depuis un bac de réserve vers le bac d'impression. Le bac d'impression descend entre chaque couche. La poudre est encollée par une projection de liant sortant de la tête de la buse. Le liant peut être coloré ; de ce fait, la technique est en général utilisée pour des applications ludiques. Pour cette technique, la résolution dépend bien évidemment de la gamme de l'imprimante. Pour les imprimantes moyenne gamme, la technique ne permet pas d'obtenir une grande résolution de réalisation et l'état de surface n'est pas très fin. Les grains de la poudre sont susceptibles d'être toujours présents hors du liant et de dégrader cet état de surface. La tenue mécanique des pièces est mauvaise car les couches adhèrent peu les unes aux autres. Elle a surtout l'avantage d'être peu chère et rapide. Il est possible de réaliser des supports, une deuxième buse dédiée projetant alors un liant soluble. Un post traitement permet également d'améliorer la cohésion des grains en immergeant la pièce dans un bain.

En résumé

Les résultats obtenus avec cette technologie de dépose de liant sont irréguliers. La résolution des géométries que l'on peut obtenir avec des machines du commerce est de l'ordre du dixième de millimètre. L'état de surface est très rugueux et on peut supposer que les grains ne sont pas entièrement collés entre eux ce qui va induire une microporosité.

1.2.4 Fusion dans un bain de poudre

La fusion en bain de poudre est une technique dont le processus est similaire à la technique précédente. La différence est que la poudre n'est pas encollée, mais un laser la fait fusionner (voir schéma 1.5). L'utilisation du laser permet l'impression de métaux et d'alliages, de certains photo-polymères et de quelques céramiques.

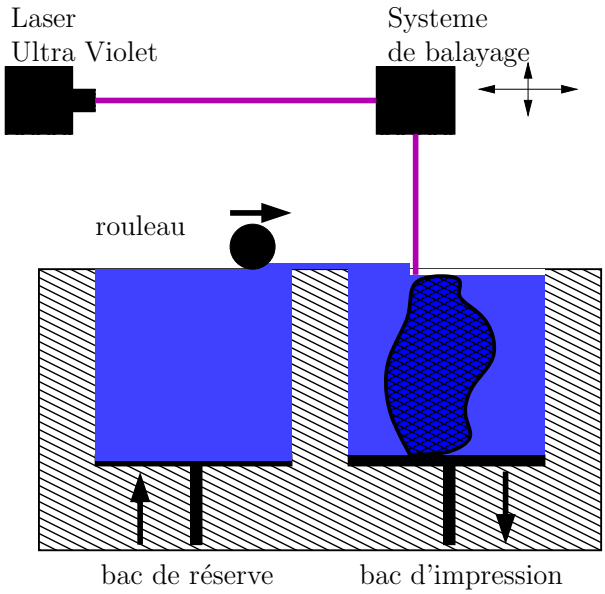


FIGURE 1.5 – Schéma de principe de la technique fusion dans un bain de poudre

En résumé

Cette technique est plus chère que la précédente, mais l'utilisation du laser offre une meilleure résolution de l'ordre de 80 à 250μm. Les pièces réalisées sont poreuses, la fusion entre les grains n'étant pas parfaite. Cette technique n'est pas disponible au laboratoire.

1.2.5 Synthèse

Une synthèse des caractéristiques principales des différentes techniques de réalisation est proposée dans le tableau 1.1. On peut noter un net avantage de la stéréolithographie en termes de précision et qualité de la réalisation. Cette technique permet en effet des réalisations plus proches du dessin, un meilleur état de surface et une absence de porosité et ce même avec des machines commerciales. Pour obtenir la même qualité avec les autres techniques décrites dans ce chapitre, il faudrait sûrement investir dans du matériel de gamme professionnelle. La stéréolithographie reste cependant parmi les techniques actuellement les plus chères.

1.3 Matériaux acoustiques obtenus par impression 3D : état de l'art

Parmi les techniques d'impressions précédemment citées, plusieurs d'entre elles ont déjà été utilisées pour des applications acoustiques. Des états de l'art comparant les différentes techniques ont été réalisées pour étudier la fiabilité de réalisation de ces méthodes et la capacité à répondre aux besoins dans le domaine de l'acoustique. Par exemple dans l'étude interlaboratoires de (Zieliński *et al.*, 2020a) de nombreux échantillons ont été réalisés à partir de la même géométrie sur différentes machines utilisant les différentes techniques présentées pour comparer les mesures d'absorption obtenues. Plus récemment, (Fusaro *et al.*, 2023) ont également comparé les résultats d'absorption obtenus avec différentes techniques pour des résonateurs quart d'onde enroulés. La conclusion de ces études est le fort impact de la technique de réalisation sur les coefficients d'absorption. Cet impact peut-être dû

TABLE 1.1 – Résumé des principales méthodes de fabrication additives (Tuan *et al.*, 2018)

Technique	Matière	Application	Points forts	Inconvénients	Résolution
Dépose de fil fondu (FDM)	Polymère thermoplastique Polymère à fibre renforcé	1^{er} prototype Jouets Pièce composite	Bas coût Rapide Simple	Faible tenue mécanique uniquement des thermoplastiques État de surface	$50 - 200\mu$m
Encollage de poudre (IJP)	Particule de liant sur poudre céramique	Biomédicale Grande structure Jouet	Rapide Grande structure	Mauvaise résolution Manque de tenue entre les couches État de surface couche par couche	$5 - 200\mu$m
Fusion dans un bain de poudre (SLS)	Fine poudre de métaux d'alliages de céramiques	Biomédical Électronique Aérospatial	Bonne résolution Haute qualité	Cher Porosité élevée	$80 - 250\mu$m
Stéréolithographie (SLA)	Résine photo active	Biomédical Prototypage fin	Bonne résolution Haute qualité Aucune porosité	Matériaux très limités Cher Toxicité	10μm

à la précision des réalisations ou à d'autres facteurs comme la microporosité ou la rugosité que nous allons détailler dans cette section.

1.3.1 Dépose de fil

La technique par dépose de fil est la plus répandue ; il existe donc naturellement beaucoup d'exemples dans la littérature d'utilisation de cette technique pour réaliser des dispositifs acoustiques. L'impact de la porosité et de la rugosité des objets obtenus avec cette technique est documenté.

Porosité

Comme décrit dans la section précédente 1.2.1, le taux de remplissage est un des paramètres contrôlable avec la FDM. Le taux de remplissage interne peut ainsi être à l'origine d'une micro porosité couplée avec la porosité centimétrique de la structure choisie. Ce couplage a été exploité pour, par exemple, élargir la bande d'absorption acoustique. C'est le cas dans les travaux de (Carbajo *et al.*, 2021), où le taux de remplissage est testé avec des échantillons présentant une perforation cylindrique. Dans cette publication, les auteurs font varier le taux de remplissage pour deux types d'échantillon présentant ou non une perforation en leur centre (cf figure 1.6). La conclusion de cette étude est qu'il est possible de modéliser les échantillons macro perforés avec une approche mixte entre un modèle fluide équivalent et une approche double porosité. L'absorption acoustique est améliorée par la combinaison de deux porosités à différentes échelles et on observe un pic de résonance, dû à la macro-perforation, élargi par la micro porosité. Ce principe de porosité contrôlée est utilisé dans (Fotsing *et al.*, 2019; Ring et Langer, 2019; Costa-Baptista *et al.*, 2022; Kuschmitz *et al.*, 2021; Boulvert *et al.*, 2020).

La possibilité de réaliser des échantillons en contrôlant la porosité a été également étudiée dans (Johnston et Sharma, 2021). Les filaments sont étirés après avoir été fixés et solidifiés sur les bords

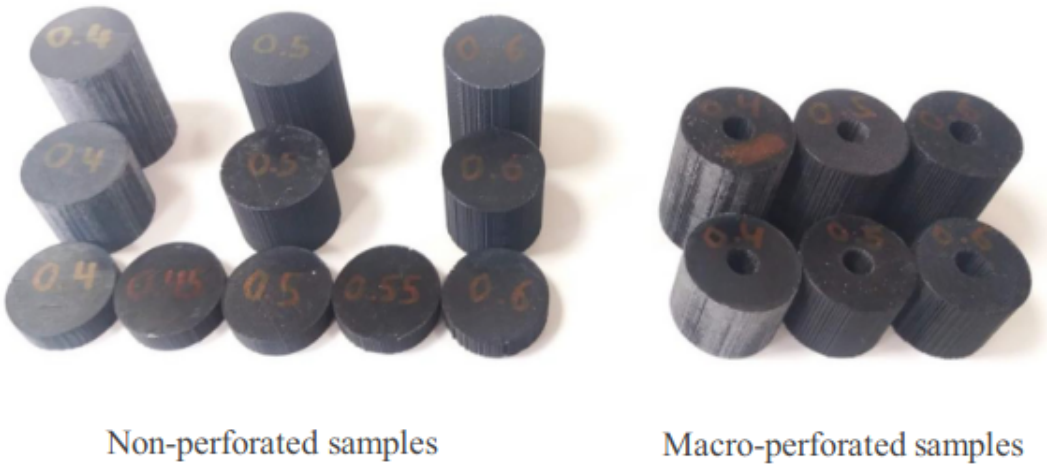


FIGURE 1.6 – Réalisation d'échantillons à gauche sans perforation et à droite avec perforation. Le taux de remplissage varie de 40 à 60%. Figure tiré de (Carbajo *et al.*, 2021)

d'échantillons cylindriques pour obtenir des cordons plus fins que les dimensions de la buse. Cela permet d'obtenir une porosité plus proche des matériaux fibreux classiques.

Dans (Boulvert *et al.*, 2019), le taux de remplissage des échantillons réalisés évolue suivant la direction d'impression. L'objectif est d'élargir le pic d'absorption en variant la porosité et la tortuosité dans l'épaisseur du matériau. Il en résulte que la configuration optimale consiste en un taux de remplissage faible en surface qui va décaler le premier pic d'absorption vers les basses fréquences, et un taux de remplissage augmentant dans la longueur du matériau qui va permettre d'élargir les pics obtenus.

Rugosité

Dans leur étude, Ciochon *et al.* (2023) mesurent et modélisent l'impact que peut avoir la rugosité due à l'épaisseur des cordons d'impression en FDM. Plusieurs tailles de buse ont été utilisées pour imprimer les échantillons en suivant la géométrie de Zieliński *et al.* (2020a) (cf figure 1.7). Une rugosité de l'ordre de 100 μm, qui est la définition la plus fine testée, est déjà responsable, d'après leur modélisation, d'une variation notable des coefficients d'absorption. Quand l'épaisseur des cordons d'impression augmente, la rugosité augmente également et on observe alors que le pic d'absorption augmente en intensité avec un léger décalage vers les plus hautes fréquences. L'étude théorique présentée indique que ce comportement est dû à une augmentation de l'épaisseur des couches limites dans lesquelles ont lieu les dissipations d'énergie. Ces modélisations ont été comparées à l'expérience, elles ont confirmé l'augmentation de la dissipation et le décalage du pic d'absorption vers les hautes fréquences.

1.3.2 Stéréolithographie

La technique d'impression par stéréolithographie (SLA) est considérée comme la plus précise si l'on retient les conclusions de l'étude de validation interlaboratoires (round robin study RRS) (Zieliński *et al.*, 2020a), conclusions également apportées par l'étude de Fusaro *et al.* (2023).

Il n'est a priori pas nécessaire de prendre en compte une porosité ou une rugosité dans la modélisation pour prédire correctement le comportement acoustique des échantillons réalisés. La méthode de fabrication, consistant à polymériser des couches les unes sur les autres permet d'obtenir des échan-

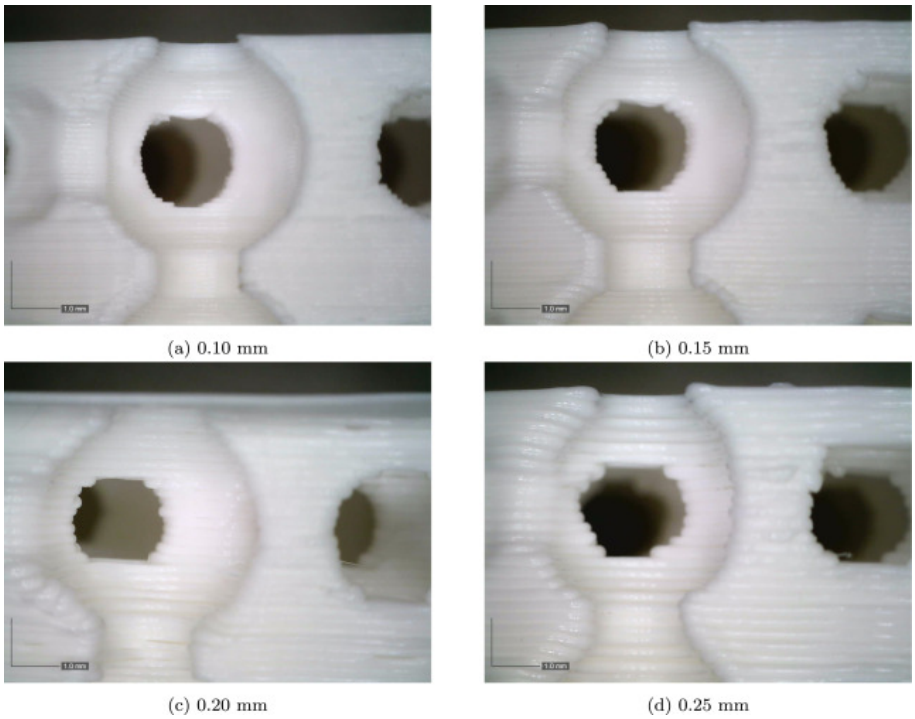


FIGURE 1.7 – Échantillons réalisés avec plusieurs tailles de buses. Figure tiré de (Ciochon *et al.*, 2023)

tillons pleins, sans porosité. Il semble que la rugosité ne soit pas un enjeu non plus pour cette technique de réalisation. En effet, la stéréolithographie permet d'imprimer des couches dont l'épaisseur est un ordre de grandeur en dessous de la FDM (25μm). On peut alors anticiper que la fréquence à partir de laquelle la rugosité va avoir un impact sur l'épaisseur de la couche limite sera plus haute (longueur d'onde plus petite). Il s'agit probablement de la technique permettant le meilleur accord entre la mesure et une prédiction simplifiée des phénomènes acoustiques.

1.3.3 L'encollage poudre

Peu d'études ont été réalisées à partir de la technique Inkjet Printing (IJP) dans le domaine de l'acoustique. On peut citer les études de Zieliński *et al.* (2022),(2023). Dans l'étude de 2022, des échantillons identiques à ceux de l'étude interlaboratoires citée précédemment sont réalisés. Dans celle de 2023, il s'agit de structures labyrinthiques dont le but est d'augmenter la tortuosité des échantillons. Dans ces deux études les échantillons sont réalisés en utilisant deux techniques d'impression : la stéréolithographie (SLA) et l'encollage de poudre (IJP). Les courbes d'absorptions obtenues avec les échantillons réalisés par IJP présentent un pic plus large que les échantillons réalisés en SLA. Pour expliquer cette différence entre les deux types d'échantillons, des essais ont été réalisés en post traitant les échantillons IJP avec une fine couche de vernis. Le but de ce post traitement était de colmater la micro-porosité du squelette des échantillons obtenus. Ainsi, les comparaisons entre des échantillons IJP avec ou sans post-traitement par un vernis ont permis de mettre en évidence l'influence de la porosité entre les grains encollés. L'élargissement du pic d'absorption est alors attribué à une diffusion de pression en paroi des échantillons présentant une microporosité et le comportement global du matériau est assimilé à un matériau à double porosité. Dans les deux études, ce comportement est calculé en se basant sur des cas de macro-perforations dans des matériaux poreux classiques par Olny et Boutin (2003). On peut également supposer que la taille des grains peut créer une rugosité qui

aura un impact sur les performances acoustiques. Il n'y a pas à notre connaissance, d'études dans la littérature sur les effets de la rugosité due à la taille des grains.

1.4 Objectif de l'étude et choix technologique

Le modèle de référence pour la présente étude est un objet fabriqué en impression 3D constitué de cavités traversantes et périodiques. Un des objectifs est de prédire le plus fidèlement possible le comportement acoustique des échantillons réalisés en impression 3D et d'identifier les éventuelles sources de désaccord. Par la suite, pour des raisons pratiques, il peut être plus efficace d'utiliser un modèle représentant le comportement global de l'échantillon dans une phase d'optimisation de la géométrie. Des études seront réalisées avec ce type de modèle (par exemple, un modèle de fluide équivalent).

Pour obtenir le meilleur accord possible entre le modèle numérique et l'échantillon réel (et ainsi atteindre les deux objectifs présentés), il est souhaitable de maîtriser le niveau de précision de l'impression 3D. L'étude bibliographique nous a permis de cerner les points importants pour faire le choix de la technologie la mieux adaptée. Il faut noter que du strict point de vue de la performance acoustique, il peut être intéressant d'exploiter les caractéristiques des différentes techniques 3D présentées comme des inconvénients. En effet, la rugosité, la porosité et la dispersion des dimensions des géométries semblent être responsables d'une absorption sur une bande de fréquence plus large, et parfois même d'une augmentation de l'amplitude absorbée.

Besoin de precision dimensionnelle

La précision dimensionnelle ainsi que la capacité à réaliser certaines formes géométriques complexes est le premier point d'attention pour choisir la technique d'impression 3D. Le tableau 1.1 de la section précédente permet d'avoir une idée de la résolution dimensionnelle accessible avec les différentes technologies. On relève dans la littérature certaines applications (Fusaro *et al.*, 2023) pour lesquelles les échantillons obtenus par fusion de poudre métallique présentent des structures labyrinthiques bouchées. Les structures réalisées avec la technique FDM peuvent donner des résultats plus ou moins concordants selon les matières utilisées pour l'extrusion (PLA, PTEG, ABS, etc.). En théorie, la réalisation par fabrication additive permet d'obtenir des géométries qui ne sont pas réalisables autrement, notamment des cavités internes comme les enroulements présentés dans la publication précédente (Fusaro *et al.*, 2023). Cependant, il faut prendre des précautions particulières pour réaliser ces géométries, par exemple l'utilisation de support pour la technique FDM quand l'angle de porte-à-faux est dépassé. Il est néanmoins possible pour beaucoup de géométries de choisir soigneusement l'orientation de la pièce à imprimer pour limiter ces cas. En l'absence de support la pièce peut ne pas être réalisable, ou les géométries réalisées peuvent présenter des affaissements.

Absence de porosité

Afin de limiter le nombre de paramètres à prendre en compte, on souhaite éviter que le squelette des échantillons ne présente une quelconque porosité. Pour ce faire, on peut sélectionner les techniques dont le résultat est poreux et traiter les échantillons avec un vernis pour imperméabiliser la structure, procédé utilisé dans (Zieliński *et al.*, 2022). La technique FDM peut également être correctement paramétrée en enceinte chauffée pour permettre de colmater au mieux les interstices entre les filaments (Abbad *et al.*, 2019). Pour cela, le cordon précédent est encore fondu quand le suivant est déposé dessus.

Cependant, cela complique la réalisation des voûtes et augmente le besoin de support. Une autre option est la stéréolithographie garantissant l'absence de porosité, comme on l'a vu précédemment.

Rugosité la plus faible possible

Pour limiter la rugosité, la stéréolithographie est la technique la plus adaptée car elle permet de réaliser les épaisseurs de couches les plus fines. De surcroît, la technique conduit à un état de surface plus lisse.

1.4.1 Choix technologique

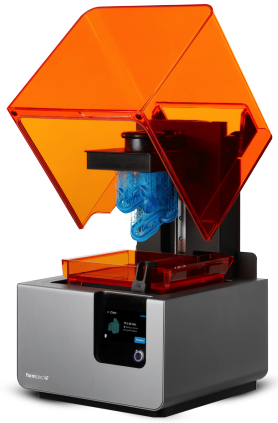


FIGURE 1.8 – Imprimante 3D par stéréolithographie Form2 de Formlabs®(credit : Formlabs.com)

Au regard de la littérature et des moyens disponibles au laboratoire et au Fablab de l'École Centrale de Lyon, le choix retenu est la stéréolithographie avec la Form2 (cf. figure 1.8) de Formlabs ® et donc l'utilisation du slicer propriétaire associé Preform.

Il est important de noter que cet état de l'art ainsi que le choix technologique qui en découle est réalisé à un instant donné. Les progrès technologiques dans le domaine de l'impression 3D sont très rapides et il est probable que la technologie choisie au début de la thèse pour ses performances soit rapidement obsolète.

Chapitre 1 — Conclusion

Un état de l'art sur les techniques d'impression 3D et leur application pour réaliser des absorbants acoustiques a été réalisé. Différents points importants pour la qualité des réalisations ont été mis en évidence, comme la porosité du squelette ou la rugosité due aux différentes couches imprimées ou à la taille des grains. Pour atteindre les différents objectifs (une bonne comparaison avec un modèle numérique microscopique de la structure puis avec un modèle macroscopique pour l'optimisation) il nous faut choisir une technique d'impression 3D permettant de réaliser les pièces les plus fidèles aux dessins de conception. On espère ainsi obtenir des comparaisons satisfaisantes entre modèles et expériences, voire même aboutir à des modèles simplifiés représentatifs. En considérant ces différents points, la stéréolithographie présente clairement les meilleures performances pour la réalisation des échantillons.

Chapitre 2

Présentation des paramètres de fabrication et des géométries, et étude de la variabilité dimensionnelle

Résumé

Le chapitre précédent a permis, au vu des réalisations existantes dans la littérature, de justifier le choix de la technique d'impression que nous allons utiliser : la stéréolithographie. Ce chapitre détaille les paramètres auxquels nous avons accès pour réaliser les impressions. Le choix de ces paramètres et le respect de certaines bonnes pratiques pour la réalisation des pièces doivent permettre d'obtenir des échantillons avec la finition la plus fiable possible. La géométrie de l'échantillon de référence est présentée. Un plan d'expérience comprenant une cinquantaine d'échantillons permet de réaliser une étude sur la variabilité dimensionnelle. Les mesures de contrôle de la qualité des réalisations sont détaillées. La comparaison des résultats dimensionnels obtenus permet de sélectionner la résine Clear et des couches d'une épaisseur de 25 μm afin d'obtenir les échantillons les plus conformes à la conception. En se basant sur ces résultats et les difficultés rencontrées, deux géométries sont proposées pour améliorer les performances acoustiques ; l'une en augmentant la porosité avec des volumes cubiques et l'autre en imbriquant deux réseaux de résonateurs pour dédoubler les pics d'absorptions.

Sommaire

2.1 Introduction 18
2.2 Choix des paramètres de fabrication 18
2.2.1 Type de résine 18
2.2.2 Épaisseur de couche 19
2.2.3 Calibrage de la machine 19
2.2.4 Rinçage des pièces 20
2.3 Géométrie sélectionnée 21
2.4 Contrôle des dimensions réalisées 22
2.4.1 Méthodes de mesure 22

2.4.2 Résultats de variabilité dimensionnelle 26
2.4.3 Mesure du diamètre externe de l'échantillon 32
2.4.4 Conclusions sur la réalisation 36
2.5 Variations autour de la géométrie principale 37
2.5.1 Géométrie cubique 37
2.5.2 Géométrie double réseau 37
2.5.3 Conclusion sur les différentes géométries 38

2.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les caractéristiques des techniques de fabrication ont une influence sur les comportements acoustiques des échantillons obtenus par impression 3D. L'objectif que l'on s'est donné dans ces travaux de recherche nécessite de prédire efficacement le comportement acoustique de différentes géométries et ainsi d'être en capacité de concevoir des structures absorbantes sur mesure. Cet objectif a orienté le choix vers la stéréolithographie, la plus fiable selon la littérature (Zieliński *et al.*, 2020a; Fusaro *et al.*, 2023). Il est néanmoins nécessaire d'évaluer la précision de la technique et nous proposons pour cela de faire varier certains paramètres de réalisation à notre disposition.

Dans ce chapitre, nous commençons par introduire les différents paramètres contrôlables pour les impressions réalisées en stéréolithographie. Nous présentons également les bonnes pratiques pour obtenir des échantillons conformes. Ces différents paramètres ont été testés et une cinquantaine d'échantillons a été réalisé. Nous présentons ensuite les méthodes de mesures dimensionnelles et les résultats obtenus pour les dimensions critiques. Enfin, en intégrant les difficultés rencontrées lors des différentes fabrications, nous proposons des variations autour de la géométrie principale pour améliorer les performances acoustiques.

2.2 Choix des paramètres de fabrication

Des essais préliminaires ont été réalisés pour prendre en main cette technique de fabrication. Ils ont permis d'analyser les paramètres de l'impression et les précautions de réalisation pouvant influer sur la qualité du résultat final. L'objectif est d'obtenir l'accord le plus précis possible avec le fichier de conception. L'imprimante utilisée est une Form2 de Formlab® disponible au FabLab de l'École Centrale de Lyon.

2.2.1 Type de résine

La stéréolithographie permet d'imprimer par polymérisation plusieurs types de résine. Le choix de la résine se traduit par des comportements mécaniques différents : par exemple, des résines dites durables offrent de meilleures tenues mécaniques et des résines dites élastiques peuvent être utilisées pour imprimer des dispositifs se comportant comme des tissus biologiques. La résine standard est proposée en plusieurs couleurs ; nous avons utilisé des résines dites "Grey" pour les essais préliminaires et "Black" par la suite. La résine Clear, testée également, est destinée à des applications "microfluidiques" ; les informations fournies par le constructeur indiquent qu'elle permet de meilleurs états de surface et une plus grande précision. Ces caractéristiques proviennent certainement de sa fluidité.

La résine sélectionnée doit permettre l'impression la mieux définie possible. Par ailleurs, il est souhaitable que la résine permette la sélection de plusieurs épaisseurs de couches dont les plus fines. Le produit fini doit être le plus lisse possible.

2.2.2 Épaisseur de couche

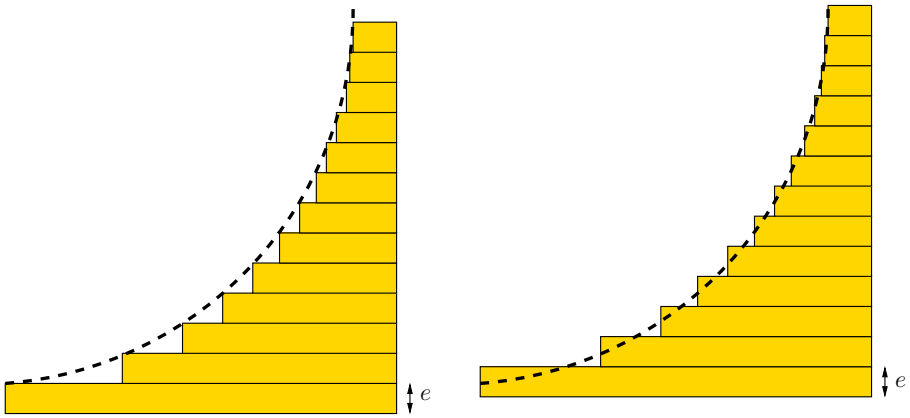


FIGURE 2.1 – Représentation de l'empilement des couches polymérisées d'épaisseur e à gauche la courbe est discrétisée par le sommet de la couche et à droite par le milieu

Avec la résine choisie (Grey ou Black et Clear) pour l'imprimante Form2, plusieurs épaisseurs de couche sont disponibles, à savoir 100 μm, 50 μm et 25 μm. Ce paramètre contrôle le pas d'élévation du plateau d'impression entre chaque couche. Il nous a semblé en première analyse que l'épaisseur de la couche n'est responsable que d'une variation de la rugosité comme on peut le voir sur la figure 2.1. Il est toutefois probable que la définition et donc la précision dimensionnelle soit impactée par ce paramètre. L'empilement des couches, notamment pour la réalisation de forme arrondie, est susceptible de créer des rugosités de la taille de la couche de résine polymérisée. On peut également se demander comment le slicer discrétise une courbe. Sur la vue de gauche, la courbe est discrétisée en partant du point haut de chaque couche et sur le cas de droite à partir du point milieu de chaque couche. Ce paramètre est une source d'incertitude supplémentaire. Comme on peut le voir sur le schéma, les déviations dimensionnelles de ces deux méthodes de discrétisation risquent d'être différentes.

2.2.3 Calibrage de la machine

L'imprimante dispose de peu de réglages de calibrage : il est uniquement possible d'ajouter un facteur d'échelle aux déplacements le long des axes du plateau. Pour calibrer l'appareil, on imprime une pièce de référence (cf. figure 2.2) simple à réaliser, permettant de mesurer les cotes d'intérêt pour les futurs échantillons. Des modifications de ces facteurs sont apportées si nécessaire et la pièce est réimprimée jusqu'à l'obtention d'un résultat satisfaisant sur un mode essai/erreur.

Les résultats ont montrés la difficulté d'obtenir à la fois des dimensions internes et externes exactes. Pour caractériser les échantillons du point de vue acoustique nous utilisons un tube de Kundt. Les échantillons réalisés doivent pouvoir être insérés dans un tube de 29 mm de diamètre. Certains échantillons ont été produits en approchant les dimensions internes dans le but d'obtenir la géométrie interne la plus proche de celle souhaitée. Les dimensions externes obtenues étaient parfois plus grandes que celle du tube d'expérimentation et les échantillons ont été ajustés pour pouvoir être insérés dans le tube.

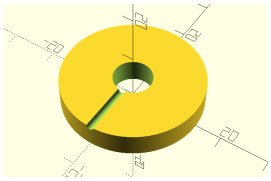


FIGURE 2.2 – Pièce réalisée pour le calibrage

Ajustement des dimensions extérieures

Des écarts entre le tube et l'échantillon peuvent poser un problème d'étanchéité acoustique comme cela peut être observé dans la littérature pour différents matériaux (Cummings, 1991; Mbailassem, 2016; Kino et Ueno, 2007; Lee *et al.*, 2013). Les fuites acoustiques sont souvent jugées responsables des divergences entre les modélisations et la mesure. Il apparaît donc essentiel de maîtriser l'intégration de l'échantillon dans le dispositif. Cela implique de maintenir un jeu mécanique suffisant pour intégrer deux pièces l'une dans l'autre, mais suffisamment fin pour ne pas perturber les expériences.

Dans cette optique, plusieurs méthodes ont été employées. Lorsque les réglages de l'impression produisent des échantillons trop larges, il est possible de réaliser un ponçage manuel. Cependant, le résultat est trop irrégulier, ce qui génère des interstices importants entre l'échantillon et le dispositif expérimental. Un meilleur calibrage de la dimension extérieure de l'échantillon a permis par la suite d'obtenir des cylindres aux dimensions très proches de la cible. Néanmoins, la variabilité de la technique d'impression ne permet pas d'obtenir des échantillons dont la dimension extérieure soit suffisamment reproductible vis-à-vis de nos contraintes. La technique retenue a consisté à imprimer des échantillons volontairement plus grands afin de les rectifier ensuite par usinage au tour comme l'ont mis en oeuvre Zieliński *et al.* (2022). De cette façon, les dimensions extérieures des échantillons ne dépendent que de la précision de l'usinage, a priori meilleure que celle de l'impression. Les éventuels interstices résiduels sont traités au cas par cas (silicone, ruban adhésif, colle ...).

2.2.4 Rinçage des pièces

À la différence d'autres méthodes de réalisation par fabrication additive, la stéréolithographie nécessite un post traitement des échantillons après impression : la résine non polymérisée restée sur la pièce doit être retirée avec un solvant. Puis la pièce est placée dans un four UV pour finaliser la polymérisation et donner à l'échantillon ses qualités mécaniques. Dans le cas de petites structures et de cavités, il peut être difficile d'évacuer toute la résine. La résine restante peut alors remplir les structures et modifier fortement la géométrie des échantillons. Une attention particulière doit donc être portée au rinçage des échantillons avant le post traitement UV.

Qualité du bain et bain à ultrason

Comme tout solvant, celui utilisé pour rincer les pièces peut arriver à saturation et il n'est alors plus possible de nettoyer correctement les pièces. Un rinçage méthodique et efficace consiste en une succession de trempages dans plusieurs bains de solvants de plus en plus propres. L'utilisation d'un bain à ultrason peut également aider à obtenir un rinçage plus efficace. Les courants induits vont faire circuler le solvant dans toutes les petites cavités (VEVOR, 2016).

Temps entre réalisation et rinçage

Une influence qui n'a pas pu être évaluée systématiquement est le temps écoulé entre la fin de l'impression et le rinçage de la pièce. Étant donné que les résines polymérisent aux UV et à la chaleur, il est possible que la polymérisation débute lentement dans l'environnement ambiant de l'imprimante. Il a été constaté que si les échantillons sont laissés trop longtemps sur le plateau d'impression avant le nettoyage, la résine résiduelle commence à polymériser. Cela peut produire des défauts pour les géométries fines, notamment un rétrécissement des cavités. Ce facteur peut être atténué simplement en prenant des dispositions de planification d'impression pour limiter ce temps préjudiciable à la réalisation.

2.3 Géométrie sélectionnée

La géométrie que nous avons étudiée est inspirée des structures à cellule ouverte de l'étude inter-laboratoires réalisée par Zieliński *et al.* (2020a). Cette étude visait à analyser l'influence de différentes techniques de fabrication sur l'absorption acoustique de matériaux imprimés. La géométrie étudiée par Zielinski et al. 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 2.3). Les trois dimensions structurantes des cellules sont respectivement le côté de la cellule $a = 5$ mm ou 3 mm, le diamètre de la sphère $d = 4.5$ mm ou 2.7 mm, et le diamètre du canal $w = 2$ mm ou 1.2 mm. Ces échantillons sont appelés One Pore Cell (OPC). À noter qu'une variante étudiée par Zielinski et al. consiste en une répartition plus aléatoire des sphères avec 4 tailles de pores différents (Four Pore Cell (FPC))

À partir de la géométrie OPC, nous avons réalisé différentes variantes présentées à la fin de ce chapitre.

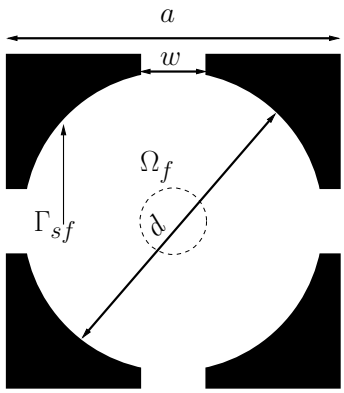


FIGURE 2.3 – Coupe d'une cellule élémentaire de l'échantillon avec Ω le domaine total Ω_f le domaine fluide et Γ_{sf} l'interface fluide/solide

Géométrie "One Pore Cell Large"

La géométrie de référence appelée One Pore Cell Large ou OPCL , se base sur la géométrie proposée par Zieliński *et al.* (2020a). Elle a l'avantage d'être relativement simple à modéliser au vu de ses nombreux axes de symétrie. Elle est utilisée pour étudier la variabilité de la méthode de fabrication, pour réaliser les essais d'intégration de l'échantillon dans le dispositif de mesure et pour les travaux de validation des modèles numériques. Par rapport à la géométrie de Zielinski, les dimensions ont été

modifiées afin de diminuer la fréquence du premier pic d'absorption, et de rechercher un comportement plus résonnant. Les dimensions de la géométrie la plus utilisée sont $a = 9$ mm le côté de la cellule $d = 8$ mm le diamètre de la sphère et $w = 1.5$ mm le diamètre du canal. Cette modification des dimensions a également pour effet de réduire le nombre de cellules dans l'échantillon. Cela implique que certaines hypothèses de modélisation seront à la limite de validité (cf paragraphe 3.2.2).

Les échantillons imprimés pour les essais en incidence normale et en paroi de conduit ont une épaisseur de 31.5 mm. Il y a donc l'équivalent de 3.5 structures résonnantes dans l'épaisseur de l'échantillon. Les faces des échantillons présentent deux géométries affleurantes différentes, des sphères en face A, ou des canaux en face B (cf figure 2.4). Ce choix a été fait pour permettre d'étudier l'influence sur le comportement acoustique de ces deux géométries en face avant de l'échantillon.

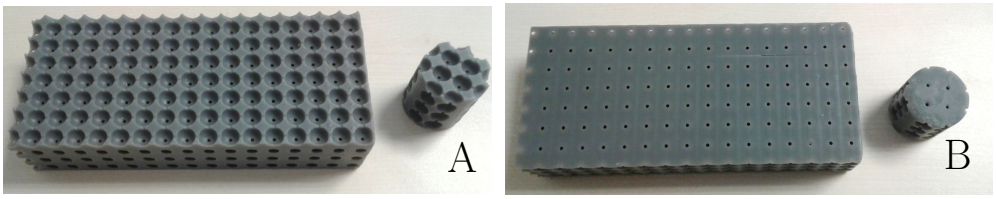


FIGURE 2.4 – Matériau étudié : face A avec des sphères affleurantes à la surface et face B avec des canaux affleurants.

2.4 Contrôle des dimensions réalisées

Malgré le choix de la technique permettant la résolution la plus fine en fonction des paramètres présentés précédemment, les résultats peuvent être différents du dessin réalisé. Il apparaît donc nécessaire de quantifier ces variations pour évaluer par la suite leur impact sur les performances acoustiques. On définit trois grands groupes de réalisation pour lesquels la technique d'ajustement des dimensions extérieures varie, qu'on appelle "série" dans la suite du texte. Au sein de ces 3 séries, différentes configurations, combinaisons entre une résine et une épaisseur de couches, ont été réalisées. Pour chaque configuration de chaque série, 6 échantillons sont réalisés. Les dimensions critiques de tous les échantillons sont mesurées pour tirer des conclusions sur la variabilité obtenue. Dans cette section, nous allons présenter les méthodes et les résultats de mesures dimensionnelles réalisées sur un panel d'échantillons, avec la géométrie OPCL et en faisant varier certains paramètres de fabrication.

2.4.1 Méthodes de mesure

Pour évaluer l'influence des paramètres d'impression utilisés sur les écarts dimensionnels, on a mesuré certaines cotes de toutes les pièces réalisées. Seules les cotes à la surface des échantillons ont été mesurées. La découpe des échantillons aurait pu permettre de déterminer si les formes et les dimensions intérieures des pièces sont bien conformes aux dimensions extérieures. Cependant, cela aurait nécessité de détruire les échantillons tout en sachant que la technique de découpe du matériau peut introduire d'autres erreurs. Par exemple, l'épaisseur de l'outil de découpe peut ajouter une incertitude sur la mesure des dimensions après découpe ou l'échauffement de l'outil dû au frottement peut faire fondre une partie de l'échantillon.

Pour chaque échantillon, on a donc mesuré le diamètre de 4 sphères, le diamètre de 8 canaux et le côté de 8 cellules. Les formes géométriques des échantillons feront référence à ces trois cotes dans la suite de la description. Les dimensions des différentes formes géométriques sont moyennées

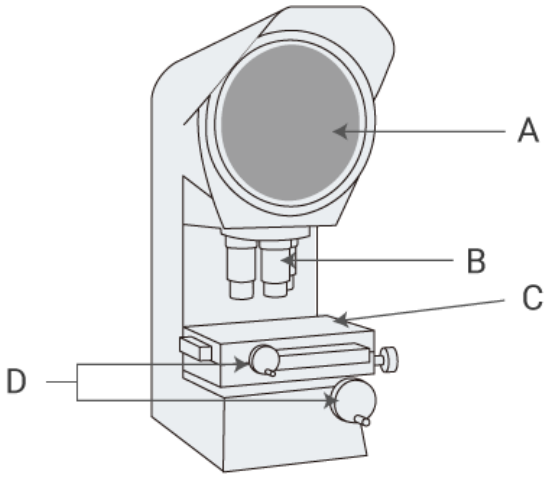


FIGURE 2.5 – Schéma d'un projecteur de profil. A : Écran ; B : Objectif de projection ; C : Platine mobile ; D : Poignées de déplacement de la platine ref :Keyence®

par échantillon. L'écart-type associé permet d'estimer si la moyenne est représentative de l'échantillon (écart-type faible). Les dimensions sont également moyennées par configuration (pour les 6 échantillons d'une même combinaison d'épaisseur de couche et de type de résine), et l'écart-type associé permet de qualifier la répétabilité liée aux paramètres sélectionnés.

Comme cela a été mentionné, l'insertion des échantillons dans le dispositif expérimental est un aspect très important. La dimension du diamètre du cylindre de l'échantillon a été mesurée pour chaque échantillon.

Présentation du banc de mesure

Les mesures sont réalisées à l'aide d'un projecteur de profil Mitutoyo (Mitutoyo, 2016) présenté sur la figure 2.5. Une photo d'un échantillon sur la machine est visible sur la figure 2.6 (photo de gauche). L'éclairage du projecteur permet de visualiser les formes géométriques que l'on souhaite mesurer. Le protocole de mesure pour les diamètres des canaux et des sphères est le même. À l'aide du logiciel intégré, il consiste à placer cinq points sur le pourtour du cercle projeté que l'on souhaite caractériser ; le logiciel détermine le cercle idéal passant par les points et donne le diamètre du cercle ainsi projeté (comme on peut le voir sur la figure 2.9).

Pour mesurer la taille des cellules présentes sur la base du cylindre, on a choisi de mesurer la distance entre les centres de deux sphères ou de deux canaux. On place les points sur les deux cercles projetés par les sphères ou les canaux, et le projecteur donne la distance entre les deux centres comme on peut le voir sur la figure 2.6. La pièce est réalisée dans la direction de l'axe de révolution du cylindre. La taille de cellule ainsi mesurée dépend de la calibration des facteurs d'axes de l'imprimante (cf. 2.2.3). On peut comparer ces valeurs à celles que l'on peut obtenir en mesurant la taille de la cellule dans la direction de l'axe du cylindre (cf figure 2.7). La résolution de la machine de mesure est de 0.001 mm et la précision de l'illumination du contour d'une pièce placé sur l'écran est de $\pm 0.1\%$ (Mitutoyo, 2016).

Incertitude sur la mesure dimensionnelle

En mécanique industrielle, la précision est relative à la dispersion des dimensions autour d'une valeur moyenne. L'exactitude décrit la proximité de cette dimension avec la dimension souhaitée.

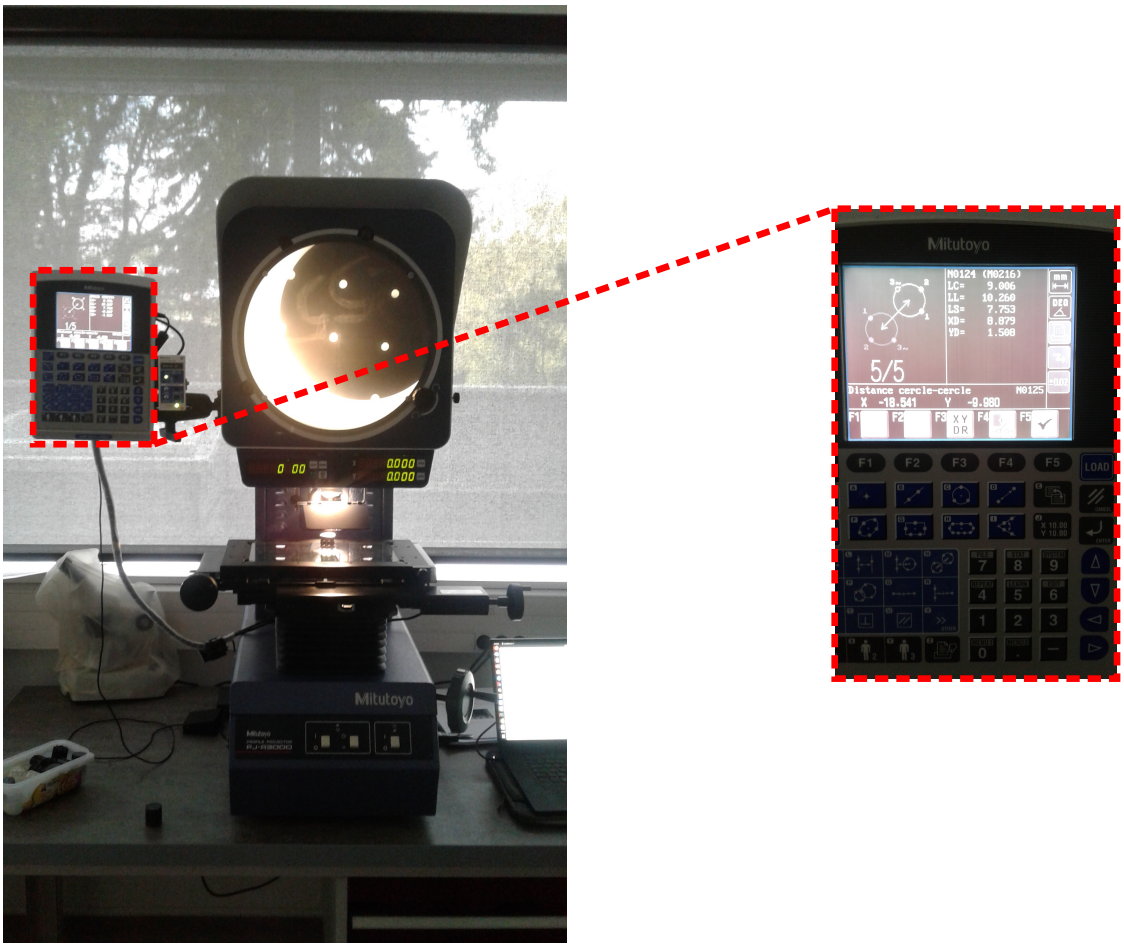
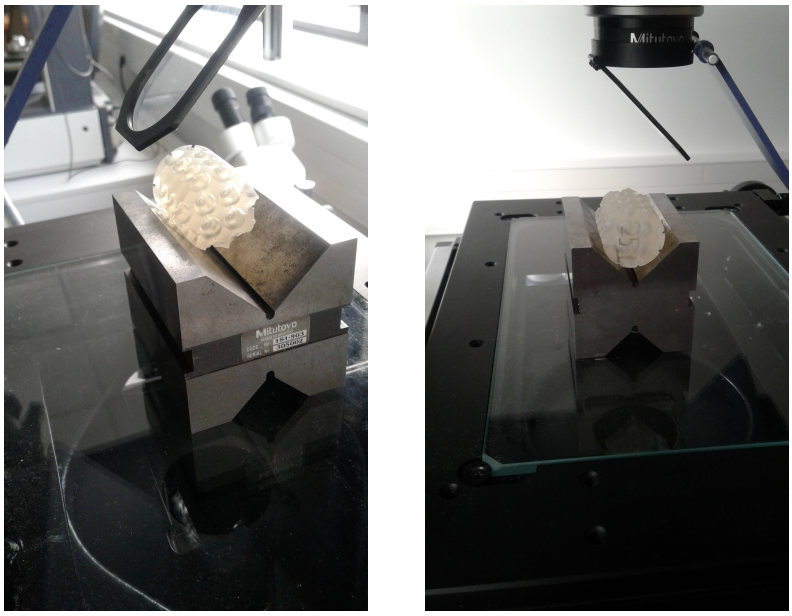


FIGURE 2.6 – Photo du projecteur utilisé avec un échantillon



(a) (b)

FIGURE 2.7 – Pièce dans l'agrès pour la mesure de la taille de la cellule dans le sens de l'extrusion

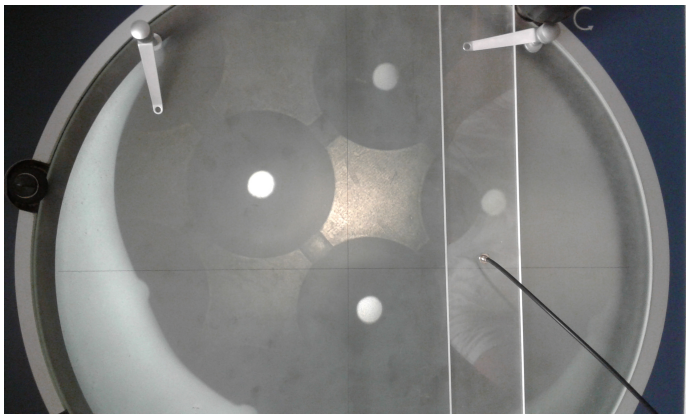


FIGURE 2.8 – Sphères d'un échantillon observées sur l'écran du projecteur de profil

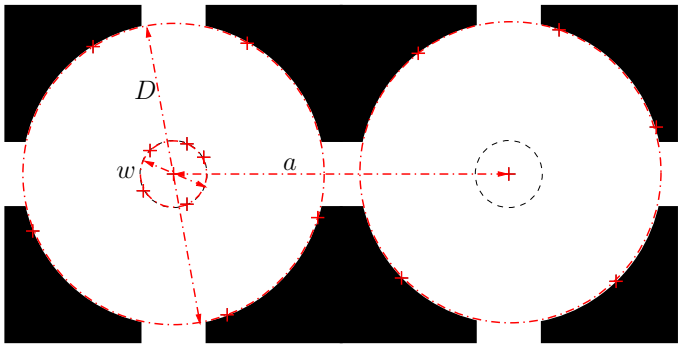


FIGURE 2.9 – Schéma du protocole de mesure



FIGURE 2.10 – Photo du canal observé à travers le projecteur de profil

Une dimension mesurée peut être réalisée précisément, mais être inexacte (dimension proche entre les différentes pièces d'une série, mais éloignée de la dimension souhaitée).

La technique de mesure peut être à l'origine de différents biais et/ou engendrer des incertitudes selon qu'il s'agit des canaux ou des sphères. Dans le cas des sphères, comme on peut le voir sur la photo 2.8, la délimitation du bord peut être difficile à déterminer. Mesurer le diamètre de la sphère suppose également que les arêtes à la surface du cylindre sont suffisamment bien définies pour être visualisées correctement (précision de l'illumination dans (Mitutoyo, 2016)). L'impression peut les avoir plus ou moins arrondies et il est dans ce cas plus difficile d'avoir une mesure précise.

En ce qui concerne la mesure de la taille des canaux, suivant les paramètres d'impression utilisés, le contour de ceux-ci peut être plus ou moins bien défini. On peut voir sur la figure 2.10 que certains

canaux sont particulièrement dégradés et présentent de nombreuses irrégularités qui peuvent être la cause d'importantes incertitudes de mesure.

La mesure de la taille de la cellule, la dimension a, dépend de la mesure des cercles projetés, des sphères ou des canaux. Cette mesure est donc impactée par les incertitudes et biais des mesures précédentes.

2.4.2 Résultats de variabilité dimensionnelle

TABLE 2.1 – Plan d'expérience

Série	A		B		C	
Épaisseur	Clear	Black	Clear	Black	Clear	Black
25 μm	X	X	X	X	X	X
50 μm	X		X	X	X	
100 μm					X	

Plusieurs séries de pièces ont été réalisées avec une approche différente pour obtenir la dimension souhaitée du diamètre extérieur de l'échantillon. Pour chaque série, deux résines différentes ont été utilisées : la résine Clear et la résine Black. Pour chaque résine, deux à trois paramètres d'épaisseur de couche ont pu être testés. Pour chaque configuration (cf. tableau 2.1) obtenue avec ces deux paramètres épaisseur/résine, 6 échantillons ont été réalisés.

Pour la première série (série A), les échantillons obtenus présentaient un diamètre extérieur légèrement supérieur à la cible avec le calibrage par défaut de la machine. Le diamètre a été ramené à la dimension du dispositif expérimental par ponçage.

Pour la deuxième série (série B), les échantillons ont été réalisés avec un diamètre extérieur qui respecte la dimension du dispositif expérimental en ciblant une dimension un peu plus petite.

Enfin pour la troisième série (série C), les échantillons ont été imprimés avec un diamètre extérieur volontairement supérieur et ramené à la dimension du dispositif expérimental grâce à un usinage au tour.

Dans les sections suivantes, les échantillons seront désignés par le type de résine (Clear ou Black) puis l'épaisseur de la couche(25μm, 50μm ou 100μm) 25X, 50X ou 100X en remplaçant X par un chiffre de 1 à 6 (le numéro de l'échantillon) et enfin l'indice de la série (A,B ou C). Par exemple, le 3ème échantillon réalisé en utilisant la résine Clear et une épaisseur de couche de 50 μm de la série C est désigné C503C.

Série A

Dans les tableaux 2.2, 2.3 et 2.4, sous les indices de chaque échantillon (251, 252.0 ... ou 501, 502 ...) on donne la dimension moyenne des formes géométriques de l'échantillon et l'écart-type qui lui est associé. Sur les deux colonnes de droite, on note les dimensions moyennes pour la configuration et l'écart type des dimensions moyennes. Les dimensions de a qui sont données dans ces tableaux correspondent à des mesures réalisées dans le plan de la base du cylindre des échantillons. A posteriori, des mesures ont été réalisées dans la direction de l'axe de révolution du cylindre.

On a pu vérifier que les dimensions dans cette direction (la direction d'extrusion) sont identiques à la dimension cible. La moyenne est égale à 9 mm pour tous les échantillons et l'écart type est

TABLE 2.2 – Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear25 Série A

Dimension	**Cible**	**251**	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**	**moyenne**	**écart type**
a mm	9	9.173	9.166	9.183	9.146	9.181	9.163	9.169	0.013
écart type sur a mm		0.049	0.014	0.028	0.026	0.023	0.038		
w mm	1.5	1.297	1.357	1.359	1.334	1.382	1.329	1.343	0.024
écart type sur w mm		0.045	0.039	0.019	0.023	0.014	0.014		
d mm	8	8.112	8.154	8.182	8.106	8.163	8.112	8.138	0.032
écart type sur d mm		0.038	0.004	0.039	0.006	0.011	0.006		

TABLE 2.3 – Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear50 Série A

Dimension	**Cible**	**501**	**502**	**503**	**504**	**505**	**506**	**moyenne**	**écart type**
a mm	9	9.173	9.164	9.188	9.144	9.186	9.169	9.171	0.016
écart type sur a mm		0.05	0.052	0.038	0.034	0.034	0.024		
w mm	1.5	1.314	1.306	1.347	1.306	1.372	1.371	1.336	0.031
écart type sur w mm		0.028	0.113	0.016	0.029	0.018	0.01		
d mm	8	8.174	8.185	8.187	8.156	8.195	8.204	8.183	0.017
écart type sur d mm		0.013	0.006	0.017	0.018	0.038	0.014		

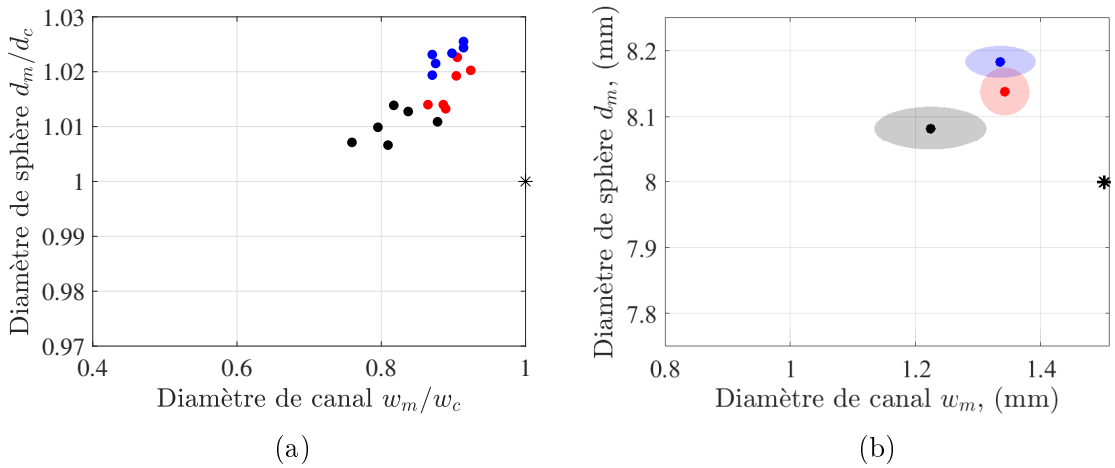
TABLE 2.4 – Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Black25 série A

Dimension	**Cible**	**251**	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**	**moyenne**	**écart type**
a mm	9	9.137	9.144	9.166	9.152	9.109	9.168	9.146	0.022
écart type sur a mm		0.033	0.049	0.034	0.014	0.031	0.027		
w mm	1.5	1.193	1.139	1.226	1.318	1.214	1.256	1.224	0.06
écart type sur w mm		0.089	0.105	0.109	0.033	0.051	0.019		
d mm	8	8.079	8.057	8.111	8.088	8.053	8.102	8.082	0.024
écart type sur d mm		0.012	0.032	0.024	0.034	0.26	0.034		

cohérent avec l'incertitude produite par le moyen de mesure. La taille de la cellule dans la direction de l'extrusion est liée à la hauteur dont le plateau de l'imprimante s'élève entre chaque couche. Il est contrôlé par une vis micrométrique et il est logique que cette valeur soit stable.

Les moyennes des deux configurations Clear donnent des résultats très similaires mais légèrement éloignés de la cible. On peut noter pour le diamètre du canal, une moyenne de 1.343 mm pour la configuration Clear25 et une moyenne de 1.336 mm pour la configuration Clear50, quand la dimension cible est 1.5 mm. La moyenne des mesures du diamètres des canaux de la configuration Black est encore plus éloigné de la cible comparé aux configurations Clear.

Pour les deux configurations Clear25 et Clear50, les écart-types associés à la mesure des formes géométriques sont relativement faibles et sont inférieurs à 2 % de la dimension cible. On peut donc supposer que la moyenne est représentative de toutes les dimensions de l'échantillon, même celles à l'intérieur qui n'ont pas pu être mesurées. Ce n'est pas le cas pour la configuration Black25. L'écart-type obtenu pour toutes les formes géométriques est presque deux fois plus grand que celui des configurations Clear. On peut s'attendre à ce que la modélisation par les dimensions moyennes ne soit pas représentative de l'échantillon réel. En ce qui concerne le diamètre du canal w, on remarque que l'écart-type augmente entre les configurations Clear25 et Clear50 et entre les configurations Clear50 et Black25. C'est un résultat attendu car le canal est la géométrie la plus sensible du fait de ses petites dimensions.



(a) (b)

FIGURE 2.11 – Dispersion des dimensions pour les échantillons des configurations Clear25 (●), Clear50 (●) et Black25 (●) de la série A par rapport à la valeur cible de la conception ; a) moyennes relatives des dimensions mesurées par échantillon et b) moyennes absolues de toutes les dimensions des échantillons de chacune des configurations et l'écart-type qui y est associé

Si l'on constate des différences entre la réalisation avec une épaisseur de couche de 50 et celle avec une épaisseur de 25 microns, elles semblent plutôt concerner le diamètre des sphères.

On peut observer, pour chacune des configurations, un ou deux échantillons se détachant du lot par des valeurs significativement supérieures ou inférieures aux valeurs moyennes. Les canaux de l'échantillon C251 sont par exemple particulièrement petits.

Sur la figure 2.11a on représente la dispersion des moyennes des dimensions mesurées. Seules les dimensions du diamètre des sphères et du diamètre des canaux sont présentées, la variation de la taille de la cellule étant faible. Les mesures de ces deux formes géométriques apparaissent en abscisse pour le diamètre des canaux et en ordonnée pour le diamètre des sphères. Chaque point correspond à un échantillon et chaque couleur à une configuration. Les valeurs des dimensions sont normalisées par la dimension ciblée de la conception ; w_c pour le diamètre du canal et d_c pour le diamètre de la sphère, afin de rendre compte de la dispersion de chaque forme géométrique. Aucun des résultats de mesure n'est centré autour de la valeur cible de la réalisation (matérialisé par une étoile en (1,1)). On remarque également que les diamètres des canaux sont systématiquement plus petits que la valeur cible, jusqu'à 20%. Les tailles de cellules et les diamètres des sphères sont systématiquement plus grands. C'est une conséquence du calibrage par défaut de la machine, problème qui est résolu pour la série B. D'autre part, la faible dimension des canaux rend difficile l'évacuation du surplus de matière, ce qui cause leur rétrécissement. Ce rétrécissement est plus marqué avec la résine Black, moins fluide. En outre, la configuration Clear25 conduit à un résultat légèrement plus exact que la Clear50 même s'il est moins précis. Sur la figure 2.11b, on a représenté la moyenne des mesures de tous les canaux et de toutes les sphères de chaque configuration. L'ellipse en transparence est représentative de la dispersion des mesures. Elle est centrée autour des valeurs moyennes et le rayon le long de chaque axe est égale à l'écart-type correspondant. On remarque l'étendue des mesures obtenues pour les canaux des échantillons de la configuration Black25. Ce graphique permet également de constater que la résine Clear25 semble donner de meilleurs résultats. L'écart-type est plus faible surtout celui correspondant aux diamètres des canaux, leur réalisation est plus précise.

Série B

Les mesures de ces échantillons sont présentées dans les tableaux 2.5, 2.6, 2.7 et 2.8. Les échantillons sont mesurés de manière analogue à la série précédente et la représentation graphique de la dispersion des moyennes, comme pour la série A, est présentée sur la figure 2.12. On observe que les dimensions de cette série sont plus exactes que les dimensions de la série précédente, notamment le diamètre de la sphère. Le calibrage par la dimension extérieure, plus facile à réaliser que par la dimension intérieure, a permis d'améliorer le calibrage de la machine.

TABLE 2.5 – Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear25 série B

Dimension	**Cible**	**251**	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**	**moyenne**	**écart type**
a mm	9	9.059	9.031	9.049	8.995	9.028	8.998	9.027	0.026
écart type sur a mm		0.028	0.025	0.027	0.049	0.073	0.032		
w mm	1.5	1.33	1.312	1.312	1.254	1.34	1.306	1.309	0.028
écart type sur w mm		0.026	0.030	0.024	0.044	0.027	0.021		
d mm	8	8.012	8.013	8.026	7.980	8.018	8.004	8.009	0.016
écart type sur d mm		0.022	0.027	0.030	0.022	0.014	0.031		

TABLE 2.6 – Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear50 série B

Dimension	**Cible**	**501**	**502**	**503**	**504**	**505**	**506**	**moyenne**	**écart type**
a mm	9	8.995	9.043	8.993	9.032	9.016	9.028	9.018	0.021
écart type sur a mm		0.063	0.036	0.052	0.030	0.071	0.035		
w mm	1.5	1.303	1.322	1.323	1.331	1.362	1.321	1.327	0.020
écart type sur w mm		0.032	0.015	0.035	0.022	0.024	0.029		
d mm	8	8.016	8.069	8.024	8.053	8.060	8.051	8.046	0.021
écart type sur d mm		0.015	0.016	0.025	0.032	0.012	0.029		

TABLE 2.7 – Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Black25 série B

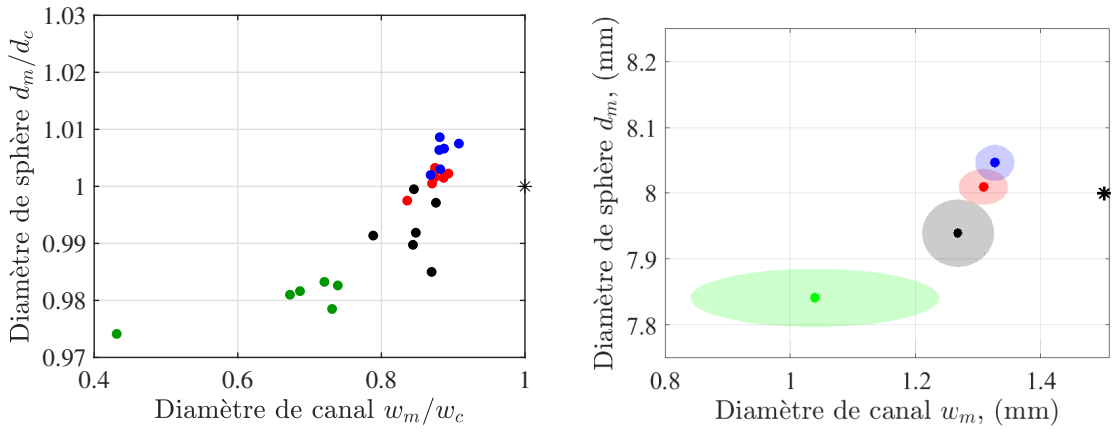
Dimension	**Cible**	**251**	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**	**moyenne**	**écart type**
a mm	9	9.038	8.995	9.028	9.032	9.024	9.045	9.027	0.017
écart type sur a mm		0.025	0.050	0.059	0.111	0.033	0.33		
w mm	1.5	1.268	1.305	1.314	1.183	1.266	1.273	1.268	0.047
écart type sur w mm		0.049	0.019	0.035	0.069	0.021	0.024		
d mm	8	7.996	7.881	7.977	7.931	7.918	7.935	7.940	0.042
écart type sur d mm		0.039	0.035	0.012	0.014	0.018	0.049		

Les dimensions de la taille de la cellule semblent ne pas dépendre de la configuration et donc du type de résine et de l'épaisseur de couche. Les mesures ont néanmoins permis de mettre en évidence des variations selon que la taille de la cellule est mesurée suivant l'axe x ou l'axe y du plateau d'impression (cf. section 1.2.2 et figure1.3). Les coefficients du paramétrage de la machine peuvent en conséquence être réajustés pour corriger cet écart. Les valeurs de la taille de la cellule dans le sens de l'extrusion sont exactes, comme cela a été mesuré pour la série A, et présentent des variations de l'ordre de la précision de la technique de mesure.

La mesure normalisée présentée sur la figure 2.12a montre toujours une variation très importante des dimensions du canal comparée à la variation de celles de la sphère. On observe également dans

TABLE 2.8 – Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Black50 série B

Dimension	**Cible**	**501**	**502**	**503**	**504**	**505**	**506**	**moyenne**	**écart type**
a mm	9	9.049	9.017	9.055	9.001	9.036	9.060	9.036	0.023
écart type sur a mm		0.037	0.053	0.024	0.045	0.066	0.041		
w mm	1.5	1.081	1.097	1.010	0.647	1.110	1.030	0.996	0.175
écart type sur w mm		0.111	0.096	0.165	0.440	0.152	0.328		
d mm	8	7.866	7.828	7.848	7.793	7.861	7.852	7.841	0.027
écart type sur d mm		0.043	0.026	0.044	0.032	0.030	0.039		



(a) (b)

FIGURE 2.12 – Dispersion des dimensions pour les échantillons des configurations Clear25 (●), Clear50 (●), Black25 (●) et Black50 (●) de la série B par rapport à la valeur cible de la conception ; a) moyennes relatives des dimensions mesurées par échantillon et b) moyennes absolues de toutes les dimensions des échantillons de chacune des configurations et l'écart-type qui y est associé

les tableaux de valeurs un recouvrement des moyennes des différents échantillons mis en évidence par l'écart type des dimensions des formes géométriques par échantillon. Par exemple, si on prend la moyenne du diamètre du canal de l'échantillon C252B (1.312 mm) et qu'on l'encadre par l'écart-type des diamètres des canaux de cet échantillon 1.282 mm $< w <$ 1.342 mm on encadre la moyenne des diamètres de canal de presque tous les échantillons. On peut ainsi s'interroger sur la pertinence de la valeur moyenne par échantillon d'une même configuration pour les discriminer entre eux. On peut également noter, comme pour la série précédente, l'existence d'un ou deux échantillons par configuration présentant une valeur moyenne significativement différente. Le diamètre du canal de l'échantillon C254B est particulièrement petit quand celui de l'échantillon C505B est plus grand que la moyenne.

Sur le graphe de la figure 2.12b on observe que la qualité de la résine ainsi que les épaisseurs des couches polymérisées ont un réel impact. L'écart-type pour les diamètres des canaux des échantillons de la configuration Black50 le montre. Les mesures obtenues pour la configuration Black50, qui n'a pas été réalisée lors de la première série (cf. tableau 2.1), sont très loin des dimensions attendues par la conception. On relève notamment l'échantillon Black504 pour lequel deux des canaux sont bouchés. La figure 2.12b semble montrer que les réglages sont mieux maîtrisés que ceux de la série précédente. Les diamètres des canaux réalisés pour cette série sont plus petits que la cible. Ils ne sont pas plus proches du diamètre souhaité que ceux de la série précédente. Cependant, le diamètre des

sphères est maintenant celui qui est ciblé. Les écarts-types pour les échantillons en résine Clear sont relativement faibles comparés à la résine Black et on peut avoir une bonne confiance dans la précision de ces configurations. Il est néanmoins nécessaire d'en améliorer l'exactitude particulièrement en ce qui concerne les diamètres des canaux.

Série C

Pour obtenir des résultats encore plus robustes et répétables sur le diamètre extérieur les échantillons de la série C ont été usinés au tour. Ils ont été réalisés volontairement avec un diamètre extérieur plus grand -31 mm - et ramené à 29 mm par usinage.

Comme cela est présenté dans les tableaux 2.9, 2.10 et 2.11, les dimensions des canaux pour la série C sont beaucoup plus petites que la cible. Une des raisons de cet écart, identifiée a posteriori, tient à la qualité du rinçage des pièces. Une rupture d'approvisionnement en solvant nous a contraints à réutiliser un bain saturé. Il en a résulté des pièces moins bien rincées et des canaux plus petits que désiré. De plus, un écart très important a été constaté entre les mesures des canaux affleurants sur la face B plus petits que ceux observés face A. Les résultats des mesures sont néanmoins présentés pour une moyenne sur l'échantillon face A et face B dans les tableau 2.9, 2.10 et 2.11. La distinction entre les deux faces est indiqué sur le tableau en annexe A.

TABLE 2.9 – Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear25 Série C

Dimension	**Cible**	**251**	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**	**moyenne**	**écart type**
w mm	1.5	1.008	1.208	1.214	1.178	1.210	1.268	1.184	0.085
écart type sur w mm		0.12	0.041	0.033	0.045	0.061	0.077		
d mm	8	8.002	7.980	7.977	8.003	7.971	7.993	7.988	0.013
écart type sur d mm		0.017	0.007	0.027	0.005	0.017	0.031		

TABLE 2.10 – Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Clear50 Série C

Dimension	**Cible**	**501**	**502**	**503**	**504**	**505**	**506**	**moyenne**	**écart type**
w mm	1.5	1.153	1.237	1.083	1.255	1.204	1.232	1.194	0.065
écart type sur w mm		0.014	0.032	0.177	0.056	0.056	0.063		
d mm	8	8.026	7.972	8.025	8.060	8.044	8.017	8.024	0.030
écart type sur d mm		0.023	0.011	0.011	0.017	0.007	0.016		

TABLE 2.11 – Valeurs des dimensions moyennées par pièce pour la configuration Black25 série C

Dimension	**Cible**	**251**	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**	**moyenne**	**écart type**
w mm	1.5	1.216	1.118	1.026	1.200	1.164	1.193	1.153	0.07
écart type sur w mm		0.029	0.066	0.118	0.036	0.025	0.015		
d mm	8	7.959	7.916	7.937	7.946	7.923	7.994	7.945	0.028
écart type sur d mm		0.025	0.049	0.040	0.025	0.042	0.058		

On voit notamment que pour la configuration Clear25 la moyenne des diamètres du canal est de 1.184 mm quand la face B est prise en compte comparé à 1.216 mm quand on ne considère que la face A. L'écart est particulièrement prononcé pour l'échantillon C251C pour lequel le diamètre moyen est

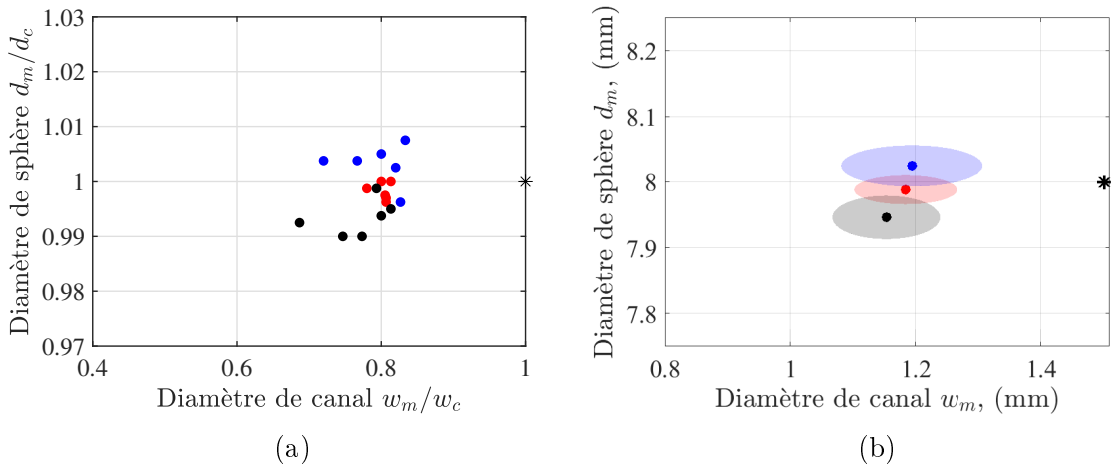


FIGURE 2.13 – Dispersion des dimensions pour les échantillons des configurations Clear25 (●), Clear50 (●) et Black25 (●) de la série C par rapport à la valeur cible de la conception ; a) moyennes relatives des dimensions mesurées par échantillon et b) moyennes absolues de toutes les dimensions des échantillons de chacune des configurations et l'écart-type qui y est associé

de 1.008 mm quand on considère les deux faces comparé à 1.203 mm lorsque l'on ne tient compte que de la face A. L'échantillon Clear251C est particulièrement dégradé en termes de diamètre de canal en comparaison avec les autres échantillons de la série. Il reste que ce problème de différence du diamètre des canaux entre la face A et la face B est présent sur tous ces échantillons pour toutes les impressions de la série C et doit faire l'objet d'une attention constante en cours de fabrication. On peut voir sur la figure 2.13b que les mauvaises conditions de rinçage ont eu un réel impact sur l'exactitude et la précision de la technique en comparaison avec la série B. La moyenne des diamètres des canaux sur la configuration est plus loin de la cible et l'écart-type qui y est associé est plus étendu. La moyenne et l'écart-type associés au diamètre des sphères ont, de leur côté peu varié. La procédure de nettoyage des pièces est cruciale pour obtenir des pièces conformes et le diamètre des canaux est de ce point de vue, la dimension la plus critique.

2.4.3 Mesure du diamètre externe de l'échantillon

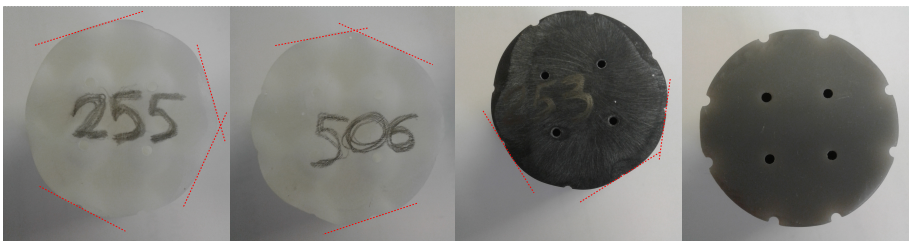


FIGURE 2.14 – Photos des différents échantillons de la série A et visualisation des facettes, comparaison avec un échantillon hors série (tout à droite)

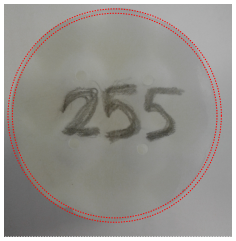


FIGURE 2.15 – Photo d'un échantillon pour lequel sont matérialisés les deux cercles

Selon le choix des réglages permettant d'anticiper la dimension extérieure de l'échantillon, les caractéristiques de la face extérieure du cylindre (diamètre, cylindricité) sont différentes.

Les photos de la figure 2.14 présentent un échantillon de chaque configuration pour la série A et permettent de les comparer à une réalisation précédente pour laquelle il n'a pas été nécessaire de poncer l'échantillon. On remarque clairement l'apparition de facettes. Elles se situent régulièrement autour du matériau aux endroits où il y a le moins de matière (sphère en surface du cylindre) qui ont naturellement été poncés plus vite que le reste de l'échantillon. Pour quantifier les interstices qui apparaissent entre l'échantillon et le tube de Kundt, on réalise des mesures spécifiques pour cette série. En visualisant le cylindre comme un polygone (à cause de ses facettes) on définit un cercle inscrit et un cercle circonscrit (cf figure 2.15). La différence de diamètre entre ces deux cercles permet d'estimer la taille de l'interstice entre l'échantillon et le dispositif. Les mesures ont été réalisées avec le projecteur de profil, en distinguant les cercles inscrits et circonscrits projetés par la face A et par la face B de l'échantillon.

Si l'on suppose les échantillons parfaitement cylindriques, comme cela peut être le cas pour ceux de la série C, repris au tour, la mesure au pied à coulisse de plusieurs diamètres en plusieurs endroits sur l'échantillon permet d'obtenir une mesure plus fiable. Pour les échantillons dont le diamètre externe n'a pas été "retouché", on a également cherché à évaluer l'aspect cylindrique sur plusieurs échantillons.

Série A

Les échantillons de la série A ont été imprimés avec un diamètre extérieur plus large et ramené à la dimension du dispositif expérimental par ponçage. Les résultats des mesures sont présentés dans le tableau 2.12. Les diamètres des cercles inscrit et circonscrit ainsi que leur différence pour les deux faces de l'échantillon y sont énumérées pour chaque échantillon de chaque configuration. Les conséquences du ponçage apparaissent clairement dans ce tableau, la différence entre les diamètres des deux cercles allant parfois jusqu'à 1 mm. De plus, les diamètres extérieurs sont souvent inférieurs à 28.5 mm alors que la plupart des échantillons sont insérés en forçant légèrement dans le tube de Kundt de 29 mm. Ceci peut s'expliquer par une grande irrégularité du polygone formé par le ponçage, ce qui implique des géométries de fuites très diverses. Ceci peut également être dû à des échantillons en forme de "tonneau" à cause du ponçage plus important des bords de l'échantillon.

Cette série, présentant a priori de gros défauts de réalisation, est cependant utile pour mesurer l'impact que peut avoir ce genre de défaut sur les mesures acoustiques. Il est intéressant de mesurer ces interstices et de les comparer avec les mesures des séries suivantes.

Série B

Le tableau 2.13 présente les diamètres des cercles inscrits et circonscrits ainsi que leur différence pour cette deuxième série d'échantillons. Les valeurs sont bien plus proches de la dimension cible

TABLE 2.12 – Mesure des diamètres des cercles inscrits et circonscrits à l'échantillon (en mm) pour la Série A

Clear25 A							
		251	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**
Face A	inscrit	28.177	27.735	27.878	28.125	28.13	28.097
	circonscrit	28.678	28.091	28.33	28.708	28.624	28.734
	différence	0.501	0.356	0.453	0.578	0.494	0.637
Face B	inscrit	27.463	27.336	27.182	27.847	27.548	27.493
	circonscrit	28.323	28.299	27.995	28.481	28.219	28.345
	différence	0.86	0.963	0.813	0.634	0.671	0.852
Clear50 A							
		501	**502**	**503**	**504**	**505**	**506**
Face A	inscrit	28.052	28.342	28.117	28.227	28.054	28.36
	circonscrit	28.4	28.716	28.508	28.48	28.173	28.703
	différence	0.348	0.374	0.391	0.253	0.119	0.343
Face B	inscrit	27.687	27.972	27.629	27.989	27.526	27.896
	circonscrit	28.461	28.695	28.648	28.415	28.537	28.635
	différence	0.774	0.723	1.019	0.426	1.011	0.739
Black25 A							
		251	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**
Face A	inscrit	28.241	28.24	28.423	28.128	28.305	28.255
	circonscrit	28.865	28.737	28.793	28.858	28.847	28.859
	différence	0.624	0.497	0.37	0.73	0.542	0.604
Face B	inscrit	27.938	28.036	28.041	27.652	27.892	28.11
	circonscrit	28.741	28.426	28.682	28.485	28.484	28.684
	différence	0.803	0.39	0.641	0.833	0.592	0.573

(29 mm). Les écarts entre les cercles inscrits et circonscrits sont également bien plus faibles en moyenne que ceux de la série précédente.

On remarque par ailleurs que certains des diamètres sont supérieurs à la valeur de 29 mm du tube de Kundt. Comme tous les échantillons rentrent dans le tube d'impédance, ce résultat rend compte indirectement des incertitudes de mesures du protocole mis en œuvre. Le diamètre extérieur le plus grand mesuré est de 29.067 mm (échantillon B255B) pour une taille maximale possible de 29 mm. La precision sur la mesure du diamètre extérieur est donc ± 0.067 mm. La difficulté de la mesure des diamètres est particulièrement notable pour les échantillons en résine Black pour lesquels l'illumination au bord de l'échantillon complique la mesure précise du diamètre. D'ailleurs, les valeurs obtenues pour le diamètre du cercle inscrit sont parfois plus importantes que celles du cercle circonscrit. Il n'y a pas de facette apparente sur ces échantillons. Cependant, même si la série est bien plus conforme que la série A, certains échantillons ont dû être rectifiés très légèrement pour rentrer dans le tube avant d'être mesurés. On peut noter par exemple le Clear251, qui présente un diamètre légèrement plus petit que les autres échantillons de la série.

Série C

Les diamètres externes des échantillons de la série C ont été obtenus en usinant au tour les échantillons réalisés volontairement plus gros. Le processus d'usinage doit être mis en œuvre avec certaines précautions. Après avoir inséré l'échantillon dans le mors, on usine la moitié de l'échantillon avant de le sortir du mors et de le retourner pour usiner l'autre moitié. Le plastique utilisé pour réaliser les échantillons est très déformable comparé aux matériaux habituellement usinés avec un tour. Un serrage mal réalisé peut fausser l'alignement de l'échantillon cylindrique avec l'axe du tour

TABLE 2.13 – Mesure du diamètre des cercles inscrits et circonscrits à l'échantillon (en mm) pour la Série B

Clear25 B							
		251	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**
Face A	inscrit	28.535	28.845	28.773	28.901	28.843	28.93
	circonscrit	28.746	28.904	28.936	28.929	28.776	28.947
	différence	0.211	0.059	0.163	0.028	0.077	0.017
Face B	inscrit	28.228	28.78	28.678	28.851	28.715	28.798
	circonscrit	28.679	28.919	28.867	28.906	28.908	28.971
	différence	0.451	0.139	0.189	0.055	0.193	0.173
Clear50 B							
		501	**502**	**503**	**504**	**505**	**506**
Face A	inscrit	28.897	28.811	28.843	28.887	28.875	29.000
	circonscrit	28.858	28.736	28.867	28.813	28.844	28.98
	différence	0.039	0.075	0.024	0.074	0.031	0.019
Face B	inscrit	28.825	28.598	28.837	28.719	28.732	28.88
	circonscrit	28.876	28.855	28.93	28.895	28.886	28.99
	différence	0.051	0.257	0.093	0.176	0.154	0.106
Black25 B							
		251	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**
Face A	inscrit	29.046	28.974	28.998	28.916	29.067	28.774
	circonscrit	29.016	28.918	29.015	28.959	29.016	28.829
	différence	0.03	0.056	0.017	0.043	0.0515	0.055
Face B	inscrit	28.942	28.895	28.967	28.831	28.981	28.823
	circonscrit	28.924	28.783	28.805	28.73	28.841	28.617
	différence	0.018	0.112	0.0162	0.101	0.14	0.206
Black50 B							
		501	**502**	**503**	**504**	**505**	**506**
Face A	inscrit	29.02	29.04	28.813	28.737	28.902	28.782
	circonscrit	28.894	29.00	28.745	28.742	28.951	28.605
	différence	0.126	0.04	0.068	0.005	0.049	0.177
Face B	inscrit	28.901	29.05	28.667	28.727	28.926	28.613
	circonscrit	28.605	28.95	28.282	28.399	28.727	28.18
	différence	0.296	0.1	0.385	0.328	0.199	0.433

TABLE 2.14 – Mesure des diamètres des échantillons (en mm) pour la Série C

Clear25 C							
échantillons	**251**	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**	**moyenne**
Diamètre (mm)	28.97	28.94	28.96	28.91	28.72	28.94	28.91
Clear50 C							
	501	**502**	**503**	**504**	**505**	**506**	**moyenne**
Diamètre (mm)	28.95	28.97	28.96	28.98	28.89	28.94	28.95
Black25 C							
	251	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**	**moyenne**
Diamètre (mm)	28.91	28.87	28.81	28.87	28.89	28.91	28.88

(d'autant plus avec les formes géométriques affleurant la surface externe du cylindre). Cette méthode permet cependant d'obtenir un ajustage du diamètre extérieur des échantillons bien plus précis que celui obtenu en impression 3D (quelques centièmes contre plusieurs dixièmes de millimètre).

Le tableau 2.14 présente les diamètres externes des échantillons mesurés au pied à coulisse. La cylindricité a été confirmée et la présentation des résultats condensée par souci de simplicité. Les diamètres présentés dans le tableau sont bien plus proches du diamètre du dispositif expérimental

(29 mm). Les diamètres extérieurs des échantillons de la configuration Black25 sont tout de même plus petits que les deux autres configurations. Les résultats semblent plus précis et plus proches de la cible que ceux des séries A et B.

On peut néanmoins noter que l'échantillon Clear255C présente un diamètre plus petit que la cible.

Par ailleurs, si le diamètre de l'échantillon Clear254C ne paraît pas beaucoup plus petit que les autres, on observe sur l'échantillon une variation du diamètre externe qui a été causé par une mauvaise manipulation lors du passage au tour. L'échantillon Clear505C est également un peu plus petit que la moyenne de la configuration.

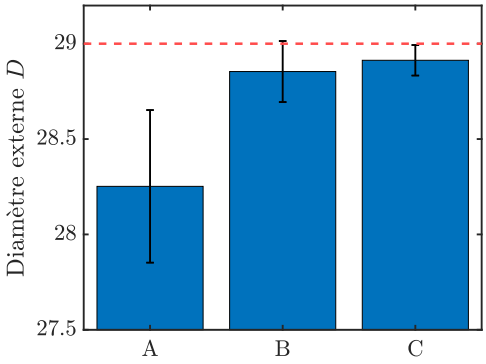


FIGURE 2.16 – Diamètre extérieur moyen sur toutes les configurations pour les séries A,B et C et écart-type correspondant

Sur la figure 2.16 on représente la valeur moyenne du diamètre extérieur pour chaque configuration (la moyenne comprend les diamètres des cercles inscrits et circonscrits pour les séries A et B, et une moyenne de mesures au pied à coulisse pour la série C). Le diamètre de l'échantillon est évidement plus proche du diamètre souhaité quand les échantillons sont passés au tour. On remarque que l'écart entre le diamètre des échantillons et celui du dispositif expérimental est très faible relativement aux dimensions de l'échantillon. Quoiqu'il en soit, il est nécessaire de conserver un jeu mécanique pour insérer l'échantillon dans le dispositif.

2.4.4 Conclusions sur la réalisation

Ces différentes séries permettent de tirer des conclusions sur le choix des paramètres de réalisation. Ils mettent également en évidence les impacts des post traitements utilisés pour obtenir des échantillons avec des dimensions internes proches de la cible tout en étant adaptés au dispositif de mesure. La résine Clear avec une épaisseur de couche de 25 µm donne systématiquement des résultats plus précis et exacts quand la procédure de nettoyage est scrupuleusement respectée. En comparant les séries A, B et C, on constate que le diamètre des sphères est systématiquement plus petit pour les échantillons en résine Black. La technique permettant d'obtenir les échantillons dont la dimension extérieure est la plus conforme à celle du dispositif instrumental est l'usinage au tour.

Pour réaliser des échantillons correspondant le mieux possible aux objectifs de l'étude, nous allons utiliser la résine Clear avec un paramètre d'épaisseur de couche de 25 µm. Les échantillons seront nettoyés plusieurs fois dans un bain propre et le nettoyage sera finalisé dans une cuve à ultrasons. Les diamètres externes des échantillons seront volontairement augmentés pour permettre de les usiner au tour pour les échantillons les moins fragiles. Les autres seront entourés de ruban adhésif pour assurer l'étanchéité.

2.5 Variations autour de la géométrie principale

Une fois la méthode de fabrication éprouvée, nous avons pu nous intéresser aux différents moyens d'améliorer, en théorie, les performances des échantillons réalisés. Dans le but à la fois d'obtenir des performances acoustiques plus intéressantes en termes de fréquence d'absorption, de largeur de la bande de fréquence absorbée ou de compacité à fréquence d'absorption identique, d'autres géométries dérivées de la géométrie de référence ont été étudiées. La fabrication de ces géométries a également permis de mettre en évidence d'autres limites de la réalisation par impression 3D.

2.5.1 Géométrie cubique

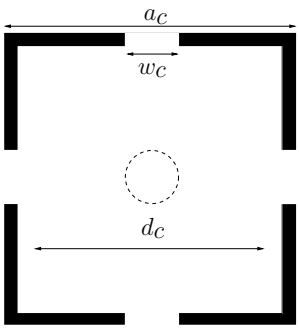


FIGURE 2.17 – Coupe d'une cellule élémentaire de l'échantillon cubique

La première idée est d'augmenter la porosité des échantillons en choisissant une géométrie offrant un ratio surface/volume plus favorable. Pour une cellule de même taille avec des cubes à la place des sphères, le volume des pores est plus important, ce qui doit en théorie diminuer la fréquence d'absorption (Tang et Sirignano, 1973). Cette géométrie "cubique" est présentée sur la figure 2.17. La taille de la cellule est $a_c = 9$ mm, le côté du cube $d_c = 8$ mm, et le diamètre du canal $w_c = 1.5$ mm. Du fait de sa plus grande porosité, les parois entre les cellules sont plus fines. Cela peut poser un problème de fragilité en particulier si l'on souhaite usiner l'échantillon au tour pour l'insérer dans le dispositif expérimental. Le choix des dimensions prend en compte cette limite. Un autre paramètre d'impression à prendre en compte est la tenue du "plafond" de l'échantillon. Lors de l'extrusion de la pièce, les premières couches refermant le cube en haut de la géométrie peuvent s'affaisser sous leur propre poids. Une solution consiste par exemple à incliner la pièce pour l'imprimer, afin d'éliminer toutes les faces horizontales.

2.5.2 Géométrie double réseau

Une autre idée pour élargir le pic d'absorption est d'imbriquer deux réseaux différents (Double Nested Network DNN) dans la même géométrie (cf. figure 2.18). Le volume de matière entre les sphères des cellules est suffisant pour insérer un deuxième réseau. Les deux réseaux ne communiquent pas entre eux. Les dimensions entre les deux réseaux doivent être suffisamment différentes pour permettre d'obtenir deux comportements acoustiques distincts. Par ailleurs, la taille des sphères des deux réseaux ne doit pas être trop importante au risque de créer des parois trop fines qui ne pourront pas être fabriquées. La taille de la cellule est $a = 9$ mm, le diamètre de la sphère du grand sous-réseau est $d_1 = 8.5$ mm, le diamètre du canal du grand sous-réseau est $w_1 = 1.2$ mm, le diamètre de la sphère du petit sous-réseau est $d_2 = 6.5$ mm et le diamètre du canal du petit sous-réseau est $w_2 = 2$ mm.

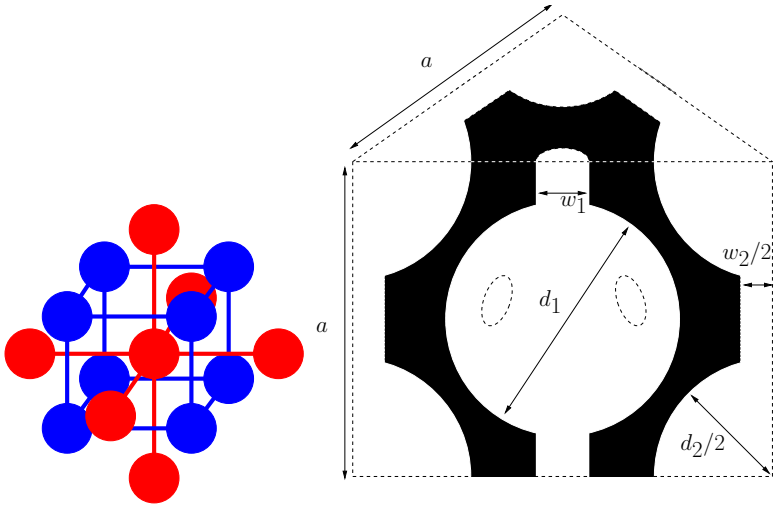


FIGURE 2.18 – Imbrication des deux réseaux et coupe d'une cellule élémentaire de la géométrie double réseau Double Nested Network (DNN)

2.5.3 Conclusion sur les différentes géométries

TABLE 2.15 – Géométries utilisées pour la thèse

Désignation	Forme géométrique	taille de cellule	d, d_c ou d_1	w, w_c ou w_1	d_2	w_2
OPCL	sphérique	9 mm	8 mm	1.5 mm		
OPC	sphérique	5 mm	4.5 mm	2 mm		
Cubique	cubique	9 mm	8 mm	1.5 mm		
DNN	double réseau	9 mm	8.5 mm	1.2 mm	6.5 mm	2 mm

Toutes les géométries qui seront étudiées dans ce manuscrit sont décrites dans le tableau 2.15. La géométrie OPC n'a pas été détaillée, car elle reprend la même structure que la géométrie OPCL et utilise les dimensions des échantillons "OPC 5" de l'étude de validation interlaboratoires de Zieliński *et al.* (2020a).

Chapitre 2 — Conclusion

Dans cette partie, les paramètres de l'impression et les différentes étapes importantes pour la préparation d'échantillons ont été détaillés. Les géométries étudiées durant cette thèse ont été présentées. Pour une des géométries un plan d'expérience de plus de cinquante échantillons a été réalisé. Le plan est composé de 3 séries faisant varier les procédures de contrôle du diamètre externe. Les séries comportent elles-mêmes au moins 3 configurations (combinaison d'épaisseur de couche d'impression et de type de résine) pour lesquelles 6 échantillons ont été réalisés, l'objectif de ce plan d'expérience étant d'étudier la variabilité de la technique de réalisation. Les mesures et les valeurs obtenues pour les échantillons ayant permis de réaliser l'étude dimensionnelle ont été détaillées. Comme expliqué au chapitre 1, l'objectif est de définir le moyen de réaliser des échantillons dont les dimensions sont les plus proches possible des dimensions de la conception. Les résultats fournis dans cette partie permettent de sélectionner la résine clear et une impression d'épaisseur 25 μm. Par ailleurs l'étude a permis de définir des géométries a priori plus performantes en absorption acoustique en prenant en compte les limites observées avec la géométrie OPCL.

Chapitre 3

Modélisation acoustique des échantillons, cas de l'incidence normale

Résumé

Suite à la présentation des échantillons réalisés au chapitre 2, on cherche maintenant à modéliser leur comportement acoustique en incidence normale. Dans ce chapitre, nous allons présenter la mise en œuvre de plusieurs modélisations issues de la littérature qu'il faut appliquer à la géométrie périodique des échantillons.
La modélisation consistant à résoudre les équations de Navier-Stokes linéarisées est optimisée en termes de maillage et de symétrie. D'autres approches moins coûteuses en temps et moyen de calcul telles que l'utilisation d'une Boundary Layer Impedance (BLI) ou une approche fluide équivalent sont testées sur la géométrie OPCL. L'utilisation d'une BLI ne donne pas de résultats satisfaisants, contrairement à l'approche fluide équivalent dont les potentielles limites sont étudiées. Dans une dernière partie les résultats de performances acoustiques des géométries complexes (OPC, cubique et DNN) sont présentées.

Sommaire

3.1 Introduction 40
3.2 Les modélisations envisagées 40
3.2.1 Approches microscopiques 41
3.2.2 Approche macroscopique 43
3.2.3 Configuration de l'étude 45
3.3 Implémentation des modélisations à l'échelle microscopique 47
3.3.1 Modélisation par les équations de Navier-Stokes linéarisées . . 47
3.3.2 La modélisation BLI 52
3.4 La modélisation macroscopique 54
3.4.1 Identification des paramètres JCAPL 54
3.4.2 Discussion modèle fluide équivalent 57
3.4.3 Conclusion sur l'approche fluide équivalent 60
3.5 Modélisation des modifications de géométries 61

3.5.1 La géométrie cubique 61
3.5.2 La géométrie double réseau 62

3.1 Introduction

L'enjeu est de modéliser le comportement des échantillons pour prédire leurs performances acoustiques. Comme on l'a vu, les dimensions des géométries peuvent varier et il sera nécessaire de prendre en compte ces variations de dimensions pour obtenir la meilleure prédiction du comportement acoustique des échantillons. On retrouve, dans la littérature, différentes approches utilisées pour modéliser ce type de structures absorbantes qu'on peut assimiler à un empilement de résonateurs. La fréquence de résonance de ces empilements peut être prédite à partir du volume des résonateurs, de la section et de la longueur des canaux, en couplant des résonateurs de Helmholtz. La mise en équation de ce couplage (Chaigne, 2001) permet de trouver les fréquences de résonance dont le nombre est égal au nombre de résonateurs. Al Jahdali et Wu (2018) étudient des empilements similaires et proposent une description par un milieu équivalent. Ces deux approches (Chaigne et Al Jahdali) ne permettent pas de prédire les performances dans le cas où l'échantillon est placé en paroi de conduit. Par ailleurs, les deux méthodes ne prennent pas en compte les canaux transverses qui participeront sans doute à la dissipation globale dans ce cas.

Dans ce chapitre, on présente différentes méthodologies permettant de modéliser des matériaux absorbants. L'implémentation du modèle à l'échelle microscopique de référence est ensuite mise en œuvre en incidence normale. Les calculs sont réalisés avec le logiciel éléments finis propriétaire COMSOL ®. Puis, les autres approches moins coûteuses sont mises en œuvre et des comparaisons des prédictions sont réalisées avec le modèle de référence afin de s'assurer de leur pertinence pour la géométrie OPCL et OPC. Finalement les modélisations des deux géométries modifiées, présentées au chapitre 2, sont étudiées.

3.2 Les modélisations envisagées

L'étude bibliographique et des essais préliminaires ont orienté le choix de l'imprimante 3D vers une technique permettant d'obtenir un échantillon présentant un squelette plein et sans porosité. Ce choix permet de faire l'hypothèse d'une paroi infiniment rigide dans les différentes modélisations pour ne considérer que les dissipations ayant lieu dans le fluide saturant les pores ouverts. La solution de ce problème est obtenue par la résolution des équations de Navier-Stokes linéarisées (NSL) dans tout le domaine fluide. Cette résolution demande beaucoup de ressources en termes de mémoire et de temps de calcul et il est plus judicieux de mettre en œuvre des modélisations simplifiées. La première simplification consiste à formuler, à partir des équations de Navier-Stokes linéarisées, une condition aux limites qui prend en compte les dissipations aux interfaces fluides/solide et à l'appliquer sur les parois du squelette. Cette modélisation est appelée Boundary Layer Impedance (BLI) et nécessite également la modélisation de toute la géométrie.

Ces deux modèles seront appelés "approches microscopiques" pour les différencier des méthodes par approche macroscopique pour lesquelles le comportement acoustique est décrit à l'échelle de l'échantillon complet.

Dans la première des approches macroscopiques étudiées, le comportement de l'échantillon est d'abord calculé au moyen de la résolution NSL en incidence normale. On utilise l'impédance de surface ainsi calculée pour caractériser une surface le long de laquelle l'échantillon est placé comme, par

exemple, la paroi de la veine d'essai. Une autre approche macroscopique fait l'hypothèse que le matériau peut être décrit à partir d'une cellule élémentaire de référence homogénéisée sur l'ensemble de l'échantillon. À l'intérieur de cette cellule, le comportement asymptotique en basse et haute fréquence permet d'identifier les paramètres d'un modèle fluide équivalent.

3.2.1 Approches microscopiques

Dans cette partie nous allons présenter les équations de Navier-Stokes linéarisées décrivant le modèle complet, puis nous présenterons l'approche BLI.

NSL

La méthode la plus directe mais également la plus coûteuse en temps de calcul est la résolution des équations de Navier-Stokes Linéarisées (NSL) dans toute la géométrie. Les variations de pression p, de température T et de vitesse particulaire $\mathbf{V}$ sont régies par l'équation de Navier-Stokes linéarisée, l'équation de conservation de la masse, et l'équation de conduction thermique :

$$\mathrm{i}\omega\rho_0\mathbf{V} = \nabla\cdot\Big(-p\mathbf{I}+\eta\big(\nabla\mathbf{V}+(\nabla\mathbf{V})^T\big)-\frac{2}{3}\eta(\nabla\cdot\mathbf{V})\mathbf{I}\Big) \tag{3.1}$$

$$\mathrm{i}\omega\rho_0\Big(\frac{p}{P_0}-\frac{T}{T_0}\Big)+\rho_0\nabla\cdot\mathbf{V}=0 \tag{3.2}$$

$$\mathrm{i}\omega\rho_0 c_P T = -\nabla\cdot(-\kappa_T\nabla T)+\mathrm{i}\omega p \tag{3.3}$$

La convention $\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega\mathrm{t}}$ est utilisée, $\mathbf{I}$ est la matrice identité . P_0, T_0 et ρ_0 sont les valeurs ambiantes de la pression, de la température et de la masse volumique du fluide. η est la viscosité dynamique du fluide, c_p sa capacité thermique spécifique à pression constante et κ_T est sa conductivité thermique.

À l'interface fluide/structure une condition de non glissement $\mathbf{V}=\mathbf{0}$ et une condition isotherme $T=0$ sont appliquées. La condition de non glissement est directe dans le cas d'une paroi infiniment rigide, avec une vitesse (même tangentielle) imposée nulle en paroi. La condition isotherme repose quant à elle sur une bonne capacité de conduction thermique du matériau de la structure, et d'un "réservoir" thermique important c'est à dire un grand volume de matériau. Cette hypothèse semble valide dans notre cas. Il faut cependant noter que les plastiques obtenus par fabrication additive peuvent être utilisés pour leur propriété de faible conduction thermique dans des applications thermoacoustiques (Sarpero *et al.*, 2023). Dans ce cas il y a bien un échange thermique entre l'air et la structure, et celle-ci est alors étudiée pour être la plus fine possible afin de favoriser cet échange.

Dans le cas qui nous intéresse -des pores saturés d'air- on peut lier les constantes d'équilibre par la loi des gaz parfaits $P_0 = R_m\rho_0 T_0$. La constante spécifique de l'air R_m est reliée à la différence des capacités thermiques spécifiques à pression et volume constant $R_m = c_P - c_V$. En linéarisant la loi des gaz parfaits on obtient :

$$\frac{p}{P_0}=\frac{\rho}{\rho_0}+\frac{T}{T_0}. \tag{3.4}$$

La vitesse du son est définie par l'équation $c^2=\gamma\frac{P_0}{\rho_0}$ où $\gamma=\frac{c_P}{c_V}$. Afin de pouvoir utiliser cette méthode comme référence pour les autres calculs et pour la mesure, plusieurs aspects numériques concernant le modèle doivent être validés.

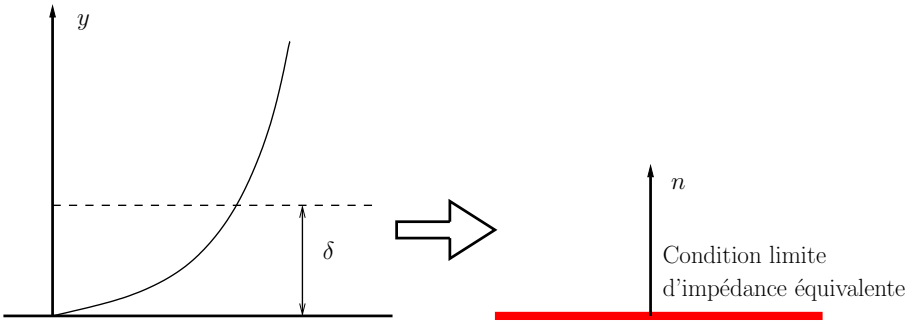


FIGURE 3.1 – Principe de la modélisation par condition aux limites d'impédance

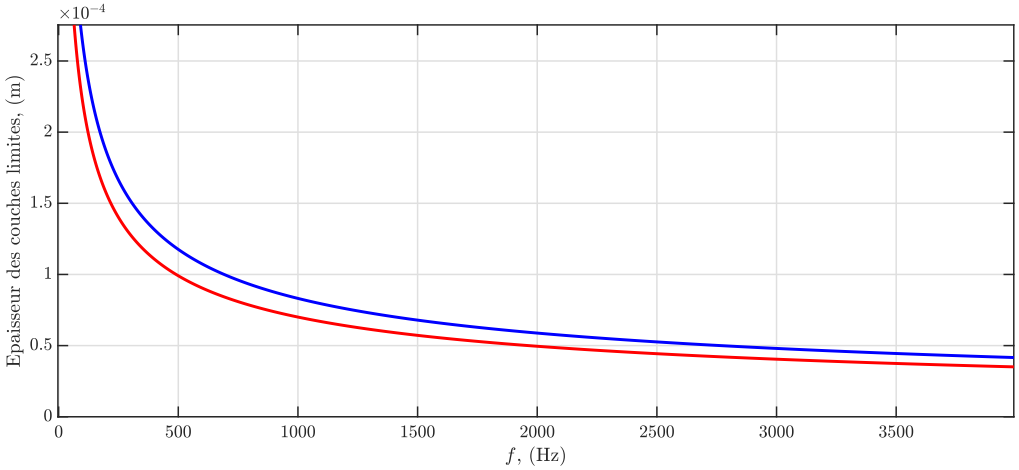


FIGURE 3.2 – Taille des couches limites visqueuse (—) et thermique (—)

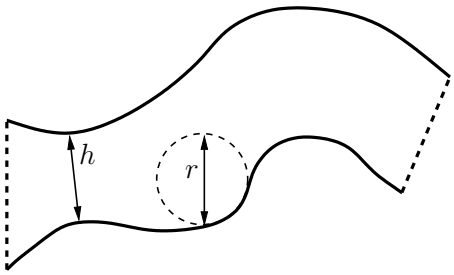


FIGURE 3.3 – Dimensions limitant la validité du modèle de condition aux limites d'impédance

BLI

Cette méthode consiste à représenter les dissipations visco-thermiques se produisant dans la couche limite à proximité d'une paroi rigide par une condition aux limites d'impédance équivalente. Le principe est représenté sur la figure 3.1, la courbe sur la partie gauche du schéma représente la vitesse imposée en paroi par la condition de non glissement et tendant vers une asymptote loin de la paroi. La couche limite δ représente une épaisseur dans laquelle a lieu la majorité des dissipations. Ces dissipations dans la couche limite sont représentées à l'aide d'une condition aux limites de type impédance appliquée à la paroi (partie droite du schéma de la figure 3.1). La modélisation s'effectue alors en négligeant les effets thermiques et visqueux dans l'ensemble des pores par l'utilisation de l'équation de Helmholtz, associée à la condition aux limites de type impédance pour prendre en compte ces dissipations, ce qui permet

un gain significatif en termes de mémoire et de temps de calcul. La formulation est décrite dans le livre de Pierce (2019) et l'implémentation numérique a été proposée plus récemment dans Berggren *et al.* (2018) pour une paroi dont la vitesse normale est nulle. C'est cette formulation qui est implémentée directement dans COMSOL ®. La condition aux limites d'impédance équivalente s'écrit :

$$-\delta_V \frac{i-1}{2} \nabla_T p + \delta_T k_0^2 \frac{(i-1)(\gamma-1)}{2} p + \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \text{ pour } y = 0 \tag{3.5}$$

où k_0 est le nombre d'onde, $\delta_V = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}$ est l'épaisseur de la couche visqueuse et $\delta_T = \sqrt{\frac{2\kappa}{\omega \rho_0 c_p}}$ est l'épaisseur de la couche thermique. L'épaisseur de ces couches limites est représentée en fonction de la fréquence sur la figure 3.2. Il est intéressant de noter que si le nom de la méthode peut être traduit par "impédance de couches limites", l'expression ne ressemble pas vraiment à une condition d'impédance.

Dans (Berggren *et al.*, 2018), il est indiqué que l'approche BLI est valable pour une paroi plane. Elle peut-être étendue à une paroi courbe, si le rayon de courbure de la paroi r et la dimension caractéristique de la géométrie h sont très grands devant les épaisseurs de couches limites, soit $h \gg \delta_V$ et $r \gg \delta_V$

Ces conditions n'étant pas vérifiées pour les structures que nous avons réalisées, les essais numériques de mise en œuvre doivent permettre de tester la pertinence de cette méthode.

3.2.2 Approche macroscopique

Les approches macroscopiques regroupent des modèles représentant les propriétés acoustiques des échantillons à l'échelle globale. On peut mettre en œuvre une modélisation par une impédance de surface, et également une modélisation par un fluide équivalent. La modélisation par une impédance de surface est simple à mettre en œuvre mais s'appuie sur les résultats d'une simulation au niveau microscopique de la structure en incidence normale. La modélisation par un fluide équivalent se base sur une homogénéisation des propriétés d'un volume élémentaire représentatif sur l'ensemble de l'échantillon (Olny, 1999).

Modélisation par une impédance de surface

La modélisation du matériau par une impédance de surface nécessite de l'avoir calculée au préalable en incidence normale. Cette impédance de surface peut ensuite être appliquée à l'interface fluide/matériau, typiquement la surface qui est traitée acoustiquement dans le cas de l'étude en paroi de conduit. Cela suppose de considérer que le matériau est à réaction localisée, c'est à dire qu'il n'y a pas de propagation transversale à l'intérieur du matériau. Cette technique est particulièrement adaptée pour modéliser des combinaisons de résonateurs en série comme cela peut être le cas dans Boulvert *et al.* (2022a); Guo *et al.* (2021). Cette méthode est largement utilisée dans la majorité des études de matériaux imprimés en paroi de conduit, car la plupart des géométries réalisées sont à réaction localisée. Dans notre cas, la présence de canaux transverses entre les cellules des échantillons ne sera pas prise en compte dans la modélisation par impédance de surface. La pertinence de cette méthode sera évaluée en paroi de conduit.

Modélisation par un fluide équivalent

La modélisation par un fluide équivalent est une analogie très adaptée aux matériaux poreux à structure rigide (comme les mousses et les fibres). On considère dans ce modèle que le matériau se comporte comme un fluide pour lequel les dissipations visco-thermiques sont prises en compte au moyen de sa compressibilité et sa densité. Dans le cas du matériau poreux, la densité et la compressibilité du

fluide équivalent sont des grandeurs dynamiques fonctions de la fréquence. Elles sont appelées densité effective $\rho_e(\omega)$ et compressibilité effective $C_e(\omega)$. Les équations de propagation de l'onde acoustique dans le matériau s'écrivent alors :

$$\rho_e(\omega)\mathrm{i}\omega\mathbf{V} = -\nabla p \tag{3.6}$$

$$C_e(\omega)p = \frac{\rho}{\rho_0} \tag{3.7}$$

La compressibilité effective C_e est définie par :

$$C_e(\omega) = \frac{\Phi}{P_0}\left(1 - \frac{1-\gamma_0}{\gamma_0}\frac{\rho_0 c_p}{\Phi\kappa}\mathrm{i}\omega\theta(\omega)\right) \tag{3.8}$$

et la densité effective est donnée par :

$$\rho_e(\omega) = \frac{\eta_0}{\mathrm{i}\omega K(\omega)} \tag{3.9}$$

avec $\theta(\omega)$ et $K(\omega)$ les perméabilités dynamiques visqueuses et thermiques. Les fonctions du fluide équivalent décrivent les propriétés thermiques et visqueuses du matériau poreux. Des modèles analytiques ont été proposés dans la littérature pour relier ces fonctions du fluide équivalent à des paramètres décrivant la géométrie et la propagation de l'onde acoustique dans le matériau. Le modèle le plus utilisé est le modèle Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge(JCAPL) (Johnson *et al.*, 1987; Champoux, 1994; Lafarge *et al.*, 1997; Pride *et al.*, 1993), pour lequel les fonctions de fluide équivalent sont données par :

$$\theta(\omega) = \frac{\theta_0}{\mathrm{i}\frac{\omega}{\omega_{th}} + F_{th}}, \tag{3.10}$$

$$K(\omega) = \frac{K_0}{\mathrm{i}\frac{\omega}{\omega_v} + F_v}, \tag{3.11}$$

où, pour les termes visqueux, on a :

$\omega_v = \Phi\frac{\nu_v}{\alpha_\infty K_0}$, $M_v = \frac{8\alpha_\infty K_0}{\Phi\Lambda_v^2}$, $P_v = \frac{M_v}{4(\frac{\alpha_{0v}}{\alpha_\infty}-1)}$ et $F_v = 1 - P_v + \sqrt{P_v^2 + \frac{M_v}{2}\frac{i\omega_v}{\omega}}$

et pour les termes thermiques :

$\omega_{th} = \Phi\frac{\nu_{th}}{\theta_0}$,$M_{th} = \frac{8\theta_0}{\Phi\Lambda_{th}^2}$, $P_{th} = \frac{M_{th}}{4(\alpha_{0th}-1)}$ et $F_{th} = 1 - P_{th} + \sqrt{P_{th}^2 + \frac{M_{th}}{2}\frac{i\omega_{th}}{\omega}}$.

Les paramètres du modèle JCAPL sont la porosité Φ, la perméabilité statique visqueuse K_0, la longueur caractéristique visqueuse Λ_v, la tortuosité α_∞, la tortuosité statique visqueuse α_{0v} et la longueur caractéristique thermique Λ_{th}, la perméabilité statique thermique θ_0, et la tortuosité statique thermique α_{0th}. Le modèle JCAPL est dis semi-phénoménologique.

La méthode qui consiste à passer de la géométrie aux caractéristiques globales du matériau est décrite comme un passage de caractéristiques microscopiques de la géométrie à des paramètres macroscopiques. Elle est utilisée dans Perrot *et al.* (2008); Chevillotte *et al.* (2013); Luu *et al.* (2017b). Ainsi à partir de photos avec un important grossissement de matériaux poreux à structure rigide, qu'il s'agisse d'enchevêtrement des fibres d'une laine ou de la structure des mousses, on peut calculer des fonctions du fluide équivalent. Des outils de traitement d'image permettent d'évaluer les caractéristiques d'une géométrie. On fait ensuite l'hypothèse de la représentativité du volume élémentaire considéré sur la photo en question, et les paramètres du modèle JCAPL y sont identifiés par observation des comportements asymptotiques haute et basse fréquences de l'équation de Stokes et de l'équation de conduction de la chaleur. Ces équations sont obtenues par une séparation des variables locales et globales (Levy et Sanchez-Palencia, 1977; Auriault *et al.*, 1985, 2010). Pour réaliser cette séparation on fait l'hypothèse d'une longueur caractéristique du volume représentatif petite devant la taille de l'échantillon et devant la longueur d'onde. La validité de cette hypothèse n'est pas évidente pour les géométries étudiées dans

cette thèse, cependant les travaux de Zieliński *et al.* (2020b) montrent la pertinence de la méthode, pour une cellule dont la taille caractéristique est d'au plus 5 mm.

De manière plus détaillée, les paramètres du modèles fluide équivalent s'obtiennent par la résolution des problèmes de Stokes, Poisson et Laplace dans le domaine élémentaire représentatif. Il est constitué d'une fraction de la cellule résonnante en utilisant les symétries. Les champs de scalaire ou de tenseur obtenus par la résolution de ces systèmes d'équations, sont moyennés sur le domaine pour obtenir les différents paramètres JCAPL ; 2 paramètres par systèmes d'équations et 2 paramètres géométriques. La porosité et la longueur caractéristique thermique sont déterminées uniquement grâce à la géométrie. La porosité est le rapport du volume occupé par le fluide Ω_f sur le volume total Ω (cf figure 2.3). Elle est évaluée de manière directe à l'aide de la géométrie et peut être mesurée avec un porosimètre. La longueur caractéristique thermique est liée à la surface d'échange fluide/solide dans le matériau. La résolution du problème de Laplace permet d'obtenir la tortuosité et la longueur caractéristique visqueuse. La tortuosité est un paramètre utilisé dans de nombreux champs de la physique et notamment en électricité. Les équations de Laplace décrivent un problème de conduction électrique dans un matériau poreux (Zieliński *et al.*, 2020b; Ghanbarian *et al.*, 2013). Le problème de Stokes, décrivant les caractéristiques d'un écoulement dans la cellule élémentaire permet, lui, de déterminer la perméabilité visqueuse et la tortuosité statique visqueuse. La tortuosité statique thermique et la perméabilité thermique sont déterminées par les équations de Poisson qui décrivent le champ de température dans les pores du matériau.

Les paramètres du modèle JCAPL identifiés dans une cellule permettent de calculer les fonctions de fluide équivalent pour l'ensemble de l'échantillon. Ces fonctions permettent d'obtenir analytiquement les caractéristiques de propagation du son dans le matériau qui sont : le nombre d'onde k_c et l'impédance caractéristiques Z_c. Elles permettent de calculer le coefficient d'absorption connaissant l'épaisseur du matériau.

Conclusion

Tous les modèles simplifiés sont basés sur une description des équations NSL dans la cellule en prenant comme hypothèse de départ une paroi infiniment rigide et non poreuse. La modélisation complète doit être validée d'un point de vue numérique pour servir de référence, ce qui permettra de juger de la pertinence ou non des autres méthodes de modélisations. On se propose de réaliser ces tests et validations en incidence normale avec un modèle de tube d'impédance.

3.2.3 Configuration de l'étude

La caractérisation des échantillons en incidence normale utilise comme grandeur indicatrice principale le coefficient d'absorption α. Cet indicateur adimensionnel, compris entre 0 et 1, traduit dans le cas d'un matériau adossé à une paroi rigide la proportion de l'énergie de l'onde acoustique incidente qui est absorbée par le matériau, le reste étant réfléchi. Le coefficient d'absorption est calculé à partir de l'impédance de surface Z_s en connaissant l'impédance du milieu, ici l'air noté Z_0

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \right|^2 \tag{3.12}$$

On peut obtenir cette impédance de surface par le rapport de pression sur la vitesse à la surface du matériau. Cependant, dans le cas des échantillons étudiés, pour éviter les perturbations de potentielles ondes évanescentes en surface et pour se rapprocher de la configuration expérimentale qui sera utilisée dans le chapitre suivant, nous utilisons une autre méthode. Sur la figure 3.4, différentes

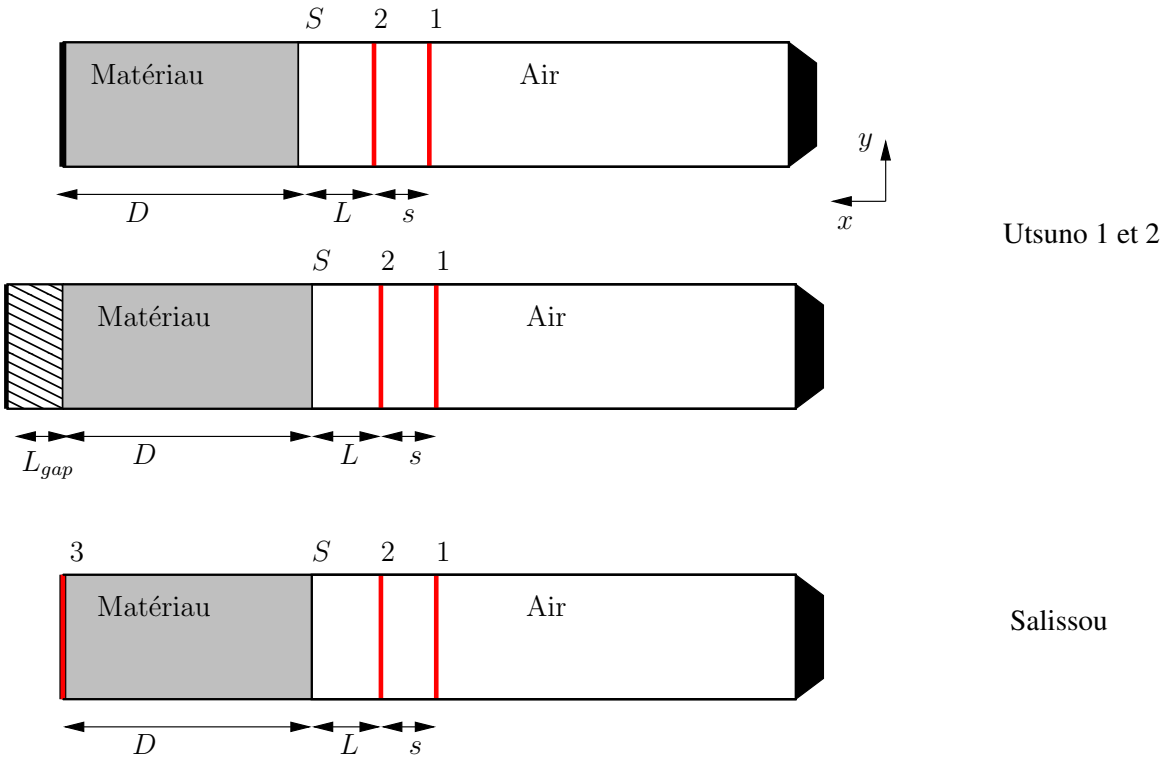


FIGURE 3.4 – Schéma des différentes configurations utilisées pour le modèle

configurations de tube d'impédance sont représentées (Salissou et Panneton, 2010). La méthode de référence consiste à calculer le coefficient de réflexion $R(\omega)$ à partir de la réponse fréquentielle entre deux microphones. Pour la modélisation, on calcule la pression moyenne sur les surfaces 1 et 2 (cf. schéma de la figure 3.4.A). On a :

$$R = \frac{\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_0 s} - H_{12}}{H_{12}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}k_0 s}} \mathrm{e}^{\mathrm{i}2k_0 L} \tag{3.13}$$

avec H_{12} le rapport des pressions P_1/P_2, s la distance entre les microphones et L la distance entre la surface 2 et le matériau. On a ensuite

$$Z_s = Z_0 \frac{1+R}{1-R}. \tag{3.14}$$

Différentes méthodes sont proposées dans la littérature pour déterminer les fonctions caractéristiques d'un matériau. On peut dans ce but utiliser la méthode développée par Utsuno *et al.* (1989). Elle nécessite deux configurations avec deux terminaisons différentes à l'arrière de l'échantillon. Pour mettre en œuvre cette méthode, on crée un deuxième modèle avec une lame d'air de profondeur L_{gap} derrière l'échantillon (cf. figure 3.4.B). Une autre possibilité proposée par Salissou et Panneton (2010) consiste à utiliser un troisième microphone à l'arrière de l'échantillon. De cette façon, une seule configuration est nécessaire pour obtenir les fonctions caractéristiques, à savoir le nombre d'onde caractéristique k_c et l'impédance caractéristique Z_c du matériau. Elles sont ainsi calculées avec :

$$\begin{aligned} k_c &= \frac{1}{D}\arccos\left(\frac{1+R}{\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_0 L} + R\mathrm{e}^{-\mathrm{i}k_0 L}} H_{23}\right), \\ Z_c &= Z_0 \frac{H_{12}\sin(k_0 L) - \sin(k_0(L+s))}{H_{12}\cos(k_0 L) - \cos(k_0(L+s))} \tan(k_c D), \end{aligned} \tag{3.15}$$

avec $H_{23} = P_2/P_3$. À partir de ces grandeurs caractéristiques, on peut déterminer l'impédance de surface dans le cas du matériau adossé à une paroi rigide avec $Z_s = -\mathrm{i}Z_c \cot(k_c D)$. Ces fonctions caractéristiques sont également liées à la densité effective ρ_e et la compressibilité effective C_e par :

$$\begin{aligned} Z_c &= \sqrt{\frac{\rho_e}{C_e}}, \\ k_c &= \omega\sqrt{\rho_e C_e}. \end{aligned} \tag{3.16}$$

3.3 Implémentation des modélisations à l'échelle microscopique

Nous commençons par présenter les modélisations à l'échelle microscopique de l'échantillon de référence. Ces modèles sont réalisés sur le logiciel éléments finis propriétaire COMSOL®. La géométrie utilisée pour les modélisations est légèrement différente de celle qui a été utilisée pour réaliser les échantillons en impression 3D. Dans le but de simplifier la génération du maillage, les angles saillants présentés par la jonction entre la sphère et le canal sont remplacés par des congés (cf. figure 3.5). Cette opération est également nécessaire pour éviter les indéterminations du problème de Laplace dans le cas d'arêtes franches. On peut retrouver une étude de l'effet des congés sur le coefficient d'absorption pour ce type de matériaux dans l'étude de Zieliński *et al.* (2020b). La géométrie modifiée avec l'ajout de congés est présentée sur la figure 3.5. Cette modification est réalisée dans toutes les modélisations nécessitant une représentation de la géométrie : les deux modélisations microscopiques et le modèle permettant l'identification des paramètres JCAPL, présentés dans la section suivante. Le rayon du congé implémenté est de 0.15 mm. Notons que l'impression 3D ne permettant pas d'obtenir ces angles saillants, cette modélisation de la géométrie réalisée est certainement plus proche de la réalité géométrique des échantillons.

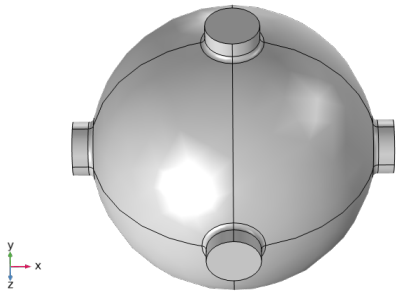


FIGURE 3.5 – Représentation d'une cellule avec ses congés modélisés dans COMSOL ®

3.3.1 Modélisation par les équations de Navier-Stokes linéarisées

L'échantillon de référence de dimension $D = 31.5$ mm est modélisé ; il présente 3.5 cellules. Du fait de cette demi-cellule, la face présentée à chaque extrémité de l'échantillon n'est pas la même. Ces deux faces sont représentées sur la figure 3.6. Pour ces modélisations, seul l'air saturant les pores est modélisé. La partie matière est considérée comme étant infiniment rigide et sans porosité comme cela a été discuté au chapitre 1. La géométrie du matériau nous permet d'exploiter les symétries. On définit un domaine dans lequel les équations de NSL sont résolues sur la partie du fluide saturant les

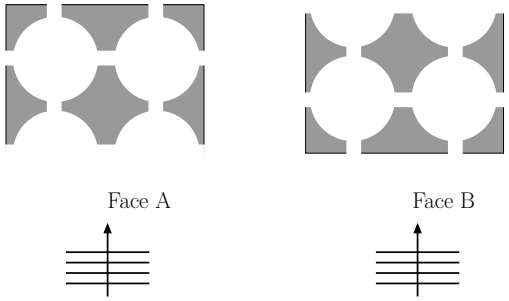


FIGURE 3.6 – Géométrie utilisée en incidence normale pour (gauche) la face A et (droite) la face B

pores de l'échantillon et un domaine en amont de la structure pour prendre en compte les dissipations au voisinage de celui-ci (cf. figure 3.7). Cette résolution est désignée "physique acoustique thermovisqueuse" dans le logiciel éléments finis. Sur le reste du domaine, on résout l'équation de Helmholtz pour propager la pression acoustique dans l'air sans dissipation. Cette méthode de résolution est désignée "physique pression acoustique" dans COMSOL. L'excitation acoustique est définie dans ce domaine au moyen d'un piston vibrant paramétré par une vitesse en paroi de 1 $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$.

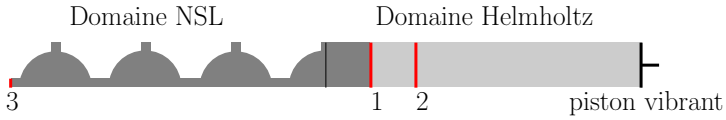


FIGURE 3.7 – Modèle microscopique pour la résolution NSL

Validation de l'utilisation des symétries

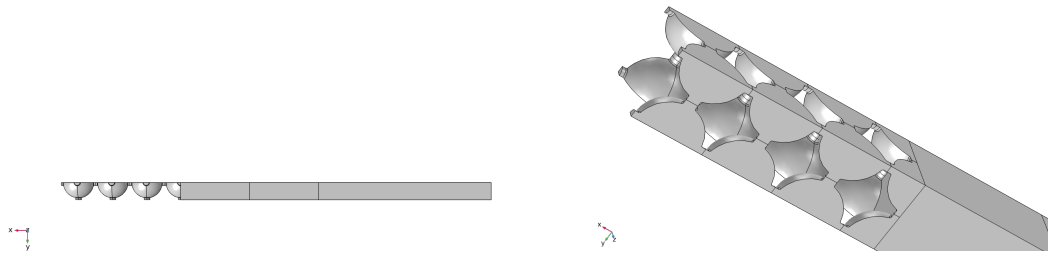


FIGURE 3.8 – Géométries utilisées pour valider l'utilisation des symétries : a) géométrie avec symétrie et b) géométrie étendue

L'utilisation des symétries pour la réalisation du modèle microscopique a été validée à l'aide de la géométrie présentée sur la figure 3.8b. La géométrie dite étendue, à droite de la figure 3.8b, doit permettre de tester les symétries entre les cellules du réseau. Les comparaisons entre les coefficients d'absorption obtenus avec cette géométrie étendue et la géométrie de la figure 3.8a confirme la possibilité d'utiliser les symétries (cf. figure 3.9).

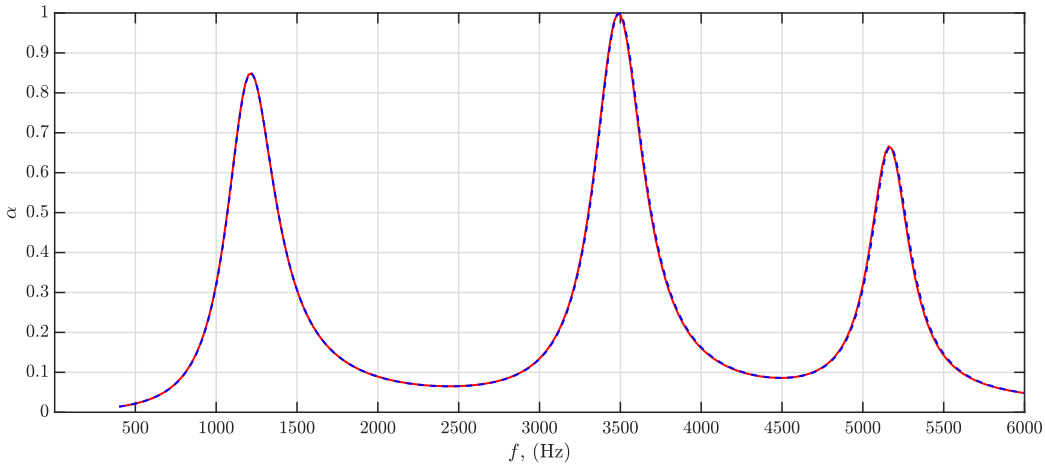
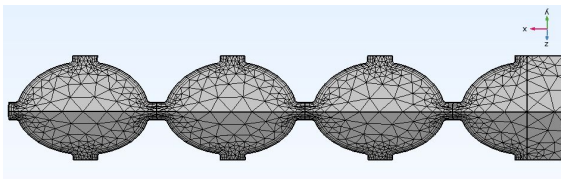
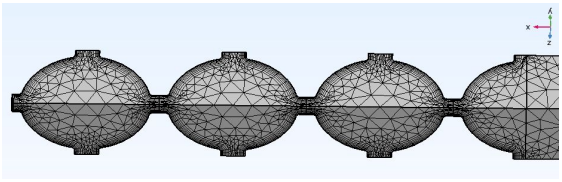


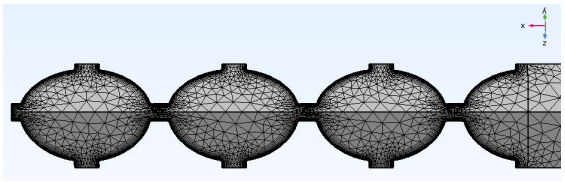
FIGURE 3.9 – Coefficient d'absorption pour la géométrie avec symétrie (– –) et avec une géométrie étendue (– –)



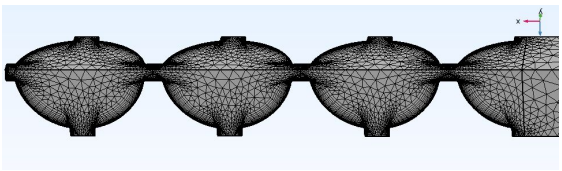
(a) Maillage grossier



(b) Maillage medium



(c) Maillage fin



(d) Maillage extra

FIGURE 3.10 – Représentation du maillage utilisé

Convergence en maillage

La prise en compte des dissipations visqueuses et thermiques dans les couches limites nécessite un maillage fin au niveau des parois. En s'appuyant sur le graphe 3.2 représentant l'épaisseur des couches limites en fonction de la fréquence, on obtient une épaisseur de la première couche limite de l'ordre de 10^{-5} m voir 5×10^{-6} m. Il est conseillé d'utiliser entre 5 et 10 éléments pour discrétiser la couche limite.

On se propose ici de réaliser un test de convergence en maillage pour valider les simulations réalisées dans la suite de l'ouvrage. La figure 3.10 présente les différents maillages utilisés pour réaliser le test de convergence. Les différents paramètres contrôlant ces maillages sont décrits dans le tableau 3.1. On y retrouve les dimensions minimales et maximales des éléments, ainsi que le nombre d'éléments dans la couche limite et l'épaisseur de l'élément le plus petit dans la couche limite. Le calcul utilisé pour le maillage fin comportant un peu moins d'un million de degrés de liberté, il 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. Les résultats de cette

convergence en maillage sont présentés sur la figure 3.11 en prenant comme indicateur le coefficient d'absorption. Les résultats varient peu et commencent à diverger à haute fréquence, lorsque les couches limites deviennent plus fines. Le maillage utilisé par la suite est le maillage medium, pour lequel le coût reste raisonnable. De cette façon les résultats ne devraient pas dépendre du maillage même si des géométries plus petites sont modélisées, une diminution du diamètre des canaux pourrait avoir un effet sur la prise en compte de la dissipation.

TABLE 3.1 – Description des différents paramètres de maillage

Maillage	**Taille max**	**Taille min**	**nbr d'éléments**	**épaisseur 1ère couche**
maillage grossier	6.2×10^{-3} m	4.5×10^{-5} m	3	1×10^{-4}
maillage medium	6.2×10^{-3} m	4.5×10^{-5} m	7	5×10^{-5}
maillage fin	3.9×10^{-3} m	1.7×10^{-5} m	14	1×10^{-5}
maillage extra	2.25×10^{-3} m	2.25×10^{-5} m	21	1×10^{-5}

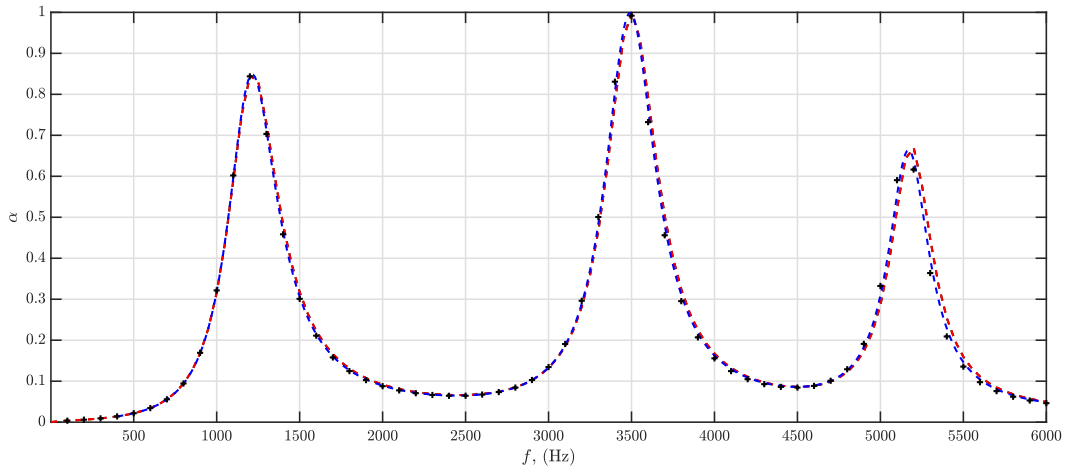
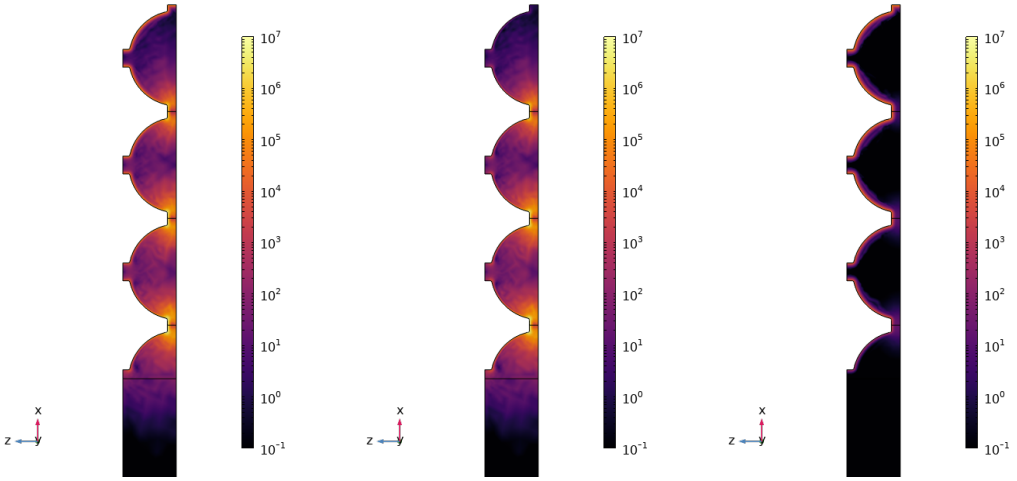


FIGURE 3.11 – Coefficient d'absorption pour les 4 maillages différents : grossier (– –), medium (– –), fin (– –) et extra fin (+)

Le comportement acoustique de l'échantillon

Les résultats obtenus par résolution des équations de Navier-Stokes permettent d'étudier le comportement acoustique. Sur les figures 3.9 et 3.11 on observe 3 pics d'absorption, le premier ayant une fréquence de 1200 Hz environ. Ces pics aigus sont révélateurs d'un comportement résonnant. Les 3 pics présents semblent liés aux 3 sphères résonnantes. Ils peuvent être accordés en modifiant les dimensions des sphères ou des canaux. Le choix de la dimension des résonateurs et de l'épaisseur du matériau est adapté pour cibler la plage de fréquence de l'application finale en paroi de conduit. Le dispositif expérimental en paroi de conduit (le banc MATISSE) est détaillé au chapitre 5. Il présente une fréquence de coupure à 2500 Hz et l'espacement des microphones fixe la fréquence minimum autour de 500 Hz

Les deux faces du matériau ne sont pas les mêmes car l'échantillon de longueur $D = 31.5$ mm compte 3.5 cellules. On peut s'intéresser au comportement de l'échantillon en fonction de la face dirigée vers l'excitation acoustique : celle qui présente les sphères ou bien celle qui présente les canaux (cf. figure 3.6). Dans la suite du texte et les différentes géométries, on décrira le matériau en face A quand la cavité est en face avant et la face B quand le canal est en face avant.



(a) Total (b) Visqueux (c) Thermique

FIGURE 3.12 – Champs de dissipation total (a) visqueux (b) et thermique (c) pour la géométrie OPCL en échelle logarithmique W/m^3 à $f = 1218$ Hz

Phénomène de dissipation Sur la figure 3.12, on se propose d'étudier les mécanismes de dissipation d'énergie dans la géométrie. On compare le champ de dissipation total avec uniquement le champ de dissipation visqueux ou uniquement le champ de dissipation thermique. L'énergie dissipée Δ en W/m^3 est décrite comme :

$$\Delta = \tau : \nabla \mathbf{V} + \frac{\kappa_T}{T_0}(\nabla T)^2 = \Delta_v + \Delta_t \tag{3.17}$$

où τ est le tenseur des contraintes visqueuses. On a dissocié Δ_v et Δ_t, les dissipations visqueuses et thermiques qui correspondent aux deux termes de la deuxième expression. L'expression est écrite sous forme temporelle : ce sont donc les valeurs RMS qui sont utilisées dans notre cas dans le domaine fréquentiel.

On remarque que la dissipation visqueuse a lieu majoritairement au niveau de l'entrée et de la sortie des canaux, ce qui est à mettre en lien avec l'équation (3.17). Le gradient de vitesse est plus important dans ces régions, d'où l'importante dissipation visqueuse. Pareillement le fait que la dissipation thermique se situe en paroi est à mettre en lien avec la même équation et la condition aux limites isotherme imposant un gradient de température plus important en paroi.

Le cas test de la géométrie étendue présenté pour l'étude des symétries a, par ailleurs, fourni des informations supplémentaires sur la dissipation visco-thermique dans le matériau. Sur la figure 3.13 on observe le champ de dissipation à la fréquence du premier pic d'absorption pour cette géométrie. On y voit une forte dissipation dans les canaux dans le sens de l'incidence de l'onde (de la droite vers la gauche). On remarque également qu'il n'y a pas de dissipation dans les canaux latéraux, hormis la dissipation dans la couche limite thermique, le long des parois.

La face avant du matériau Sur la figure 3.14, on compare les coefficients d'absorption de l'échantillon comportant 3.5 cellules présentant soit la face A (tiret bleu) soit la face B (tiret rouge) face au front d'onde. On remarque un décalage vers les basses fréquences des pics d'absorption pour la face B. Il y a également un pic d'absorption supplémentaire à haute fréquence. Ce pic d'absorption supplémentaire est dû à la présence de la demi-cavité supplémentaire quand on retourne l'échantillon. Le décalage des fréquences des pics d'absorption vers les basses fréquences peut être dû à ce résonateur supplémentaire, ou à un effet de longueur ajoutée dû au canal.

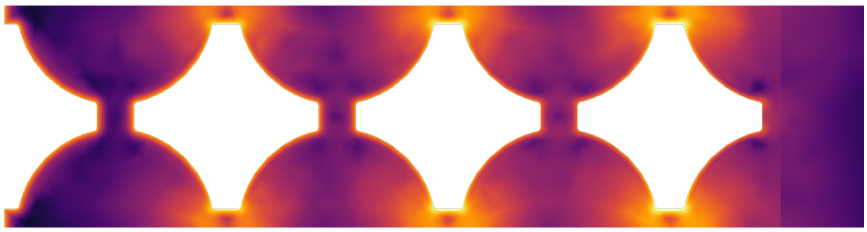


FIGURE 3.13 – Champ de dissipation visco-thermique à la fréquence du pic d'absorption en échelle logarithmique ($f = 1220$ Hz)

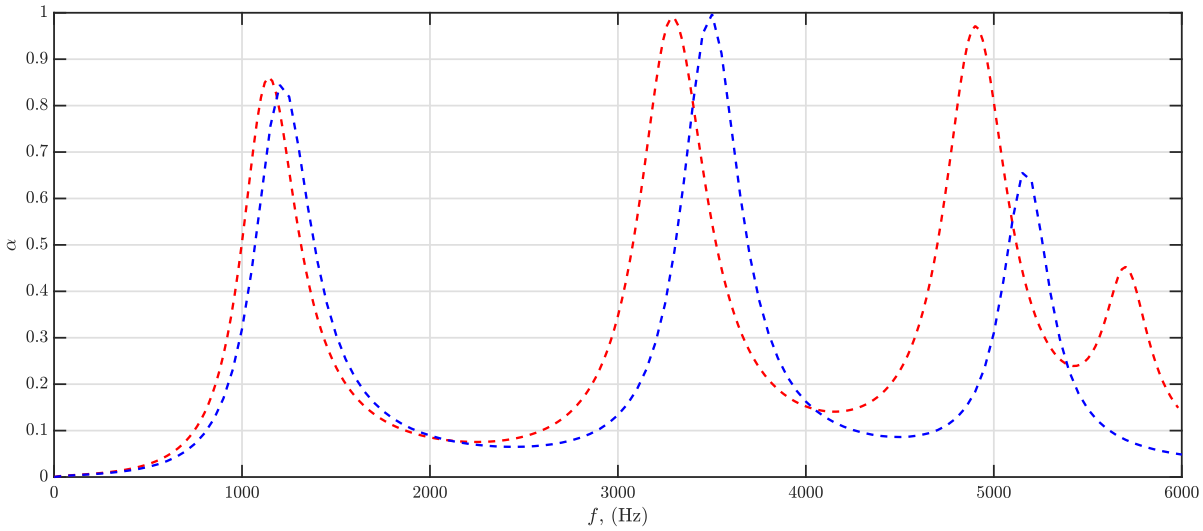


FIGURE 3.14 – Coefficient d'absorption pour la face A (– –) et la face B (– –)

Le nombre de résonateurs Les coefficients d'absorption d'échantillons présentant 3.5 (tiret bleu), 5.5 (tiret rouge) et 7.5 (tiret noir) résonateurs avec la face A à l'avant sont présentés sur la figure 3.15. Ces échantillons ont respectivement une longueur de 31.5 mm, 49.5 mm et 67.5 mm. Comme on peut le voir, il y a autant de pics d'absorption qu'il y a de résonateurs entiers dans la longueur de l'échantillon. Les fréquences ont été calculées avec la méthode de couplage de résonateurs de Helmholtz décrite dans (Chaigne, 2001) (présentée en introduction de ce chapitre) et elles correspondent bien à celles trouvées par simulation numérique directe. En incidence normale, les dissipations visqueuses n'ayant pas lieu dans les canaux transversaux, cette modélisation plus simple permet donc de prédire les fréquences de résonance de l'échantillon.

3.3.2 La modélisation BLI

Comme cela a été évoqué, le modèle microscopique résolvant les équations NSL est très coûteux en temps de calcul et en mémoire. Pour la suite des travaux, il apparaît nécessaire de valider d'autres moyens de prédiction du comportement des échantillons. Une des méthodes, basée sur une approche microscopique, est l'utilisation d'une condition aux limites représentant les phénomènes de dissipation (voir sous-section 3.2.1). Dans cette partie, on se propose de vérifier si l'implémentation de cette

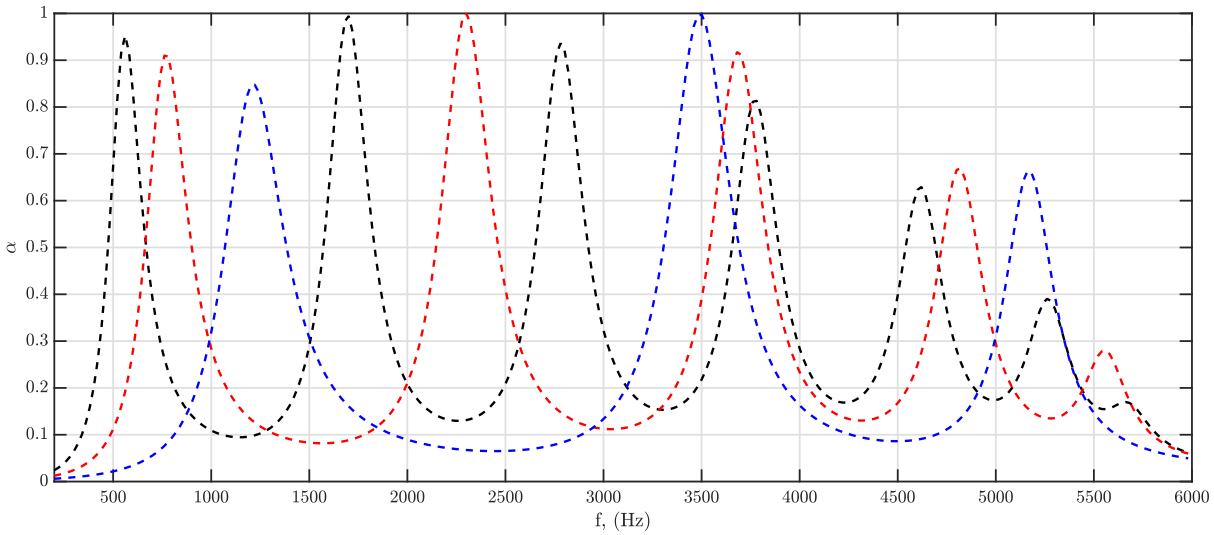


FIGURE 3.15 – Coefficient d'absorption pour les géométrie 3.5 (– –) , 5.5 (– –) et 7.5 (– –) résonateurs avec le modèle NSL pour la face A

méthode permet la prise en compte des dissipations acoustiques dans le cas étudié.

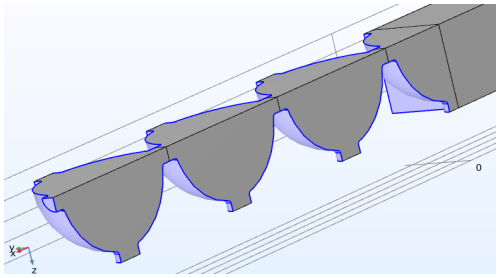


FIGURE 3.16 – Géométrie réalisée pour la modélisation, la conditions aux limites prenant en compte les dissipations est appliquée sur les surfaces en bleu

On réalise la même géométrie que pour le modèle précédent en dirigeant la face A du matériau vers l'excitation acoustique. La physique du logiciel COMSOL "pression acoustique" est utilisée sur tout le domaine (il s'agit de la résolution de l'équation d'Helmholtz). On implémente la condition aux limites d'impédance sur les parois de la géométrie. Il s'agit de remplacer une paroi rigide par une formulation tenant compte des dissipations thermo-visqueuses dans la couche limite (cf. paragraphe 3.2.1). Pour la géométrie étudiée, les parois concernées sont représentées en bleu sur la figure 3.16. Le modèle se base sur les hypothèses suivantes : les parois sont planes ou faiblement non planes et les dimensions des géométries sont grandes devant l'épaisseur de la couche limite. Les dimensions critiques pour la validité de ces hypothèses sont le rayon du congé liant le canal à la sphère $r = 1.5 \times 10^{-4}$ m, et le diamètre du canal $h = 1.5 \times 10^{-3}$ m (cf. figure 3.3). Sur la majorité de la plage de fréquence on peut considérer une épaisseur de couche limite de 1×10^{-4} : il faudrait que les dimensions critiques soient 10 fois plus grandes. La taille du congé ne satisfait pas cette condition.

La comparaison avec la résolution des équations de Navier-Stokes Linéarisées doit permettre de tester la validité de l'hypothèse. La figure 3.17 montre le coefficient d'absorption calculé à partir de la simulation NSL et avec l'approche BLI. On observe une différence notable du pic d'absorption, que ce soit en amplitude ou en fréquence du maximum d'absorption. Il s'agit ici uniquement d'une comparaison pour la face A ; les calculs ont également été réalisés pour la face B avec des conclusions identiques.

L'utilisation de cette modélisation de la dissipation dans les couches limites permet un gain notable par rapport à la simulation NSL : le calcul peut être réalisé sur une machine de bureau en environ 30 minutes. Malgré un gain en temps et en besoin mémoire, cette méthode ne permettra pas d'atteindre les performances de modélisation souhaitées et n'est donc plus utilisée par la suite.

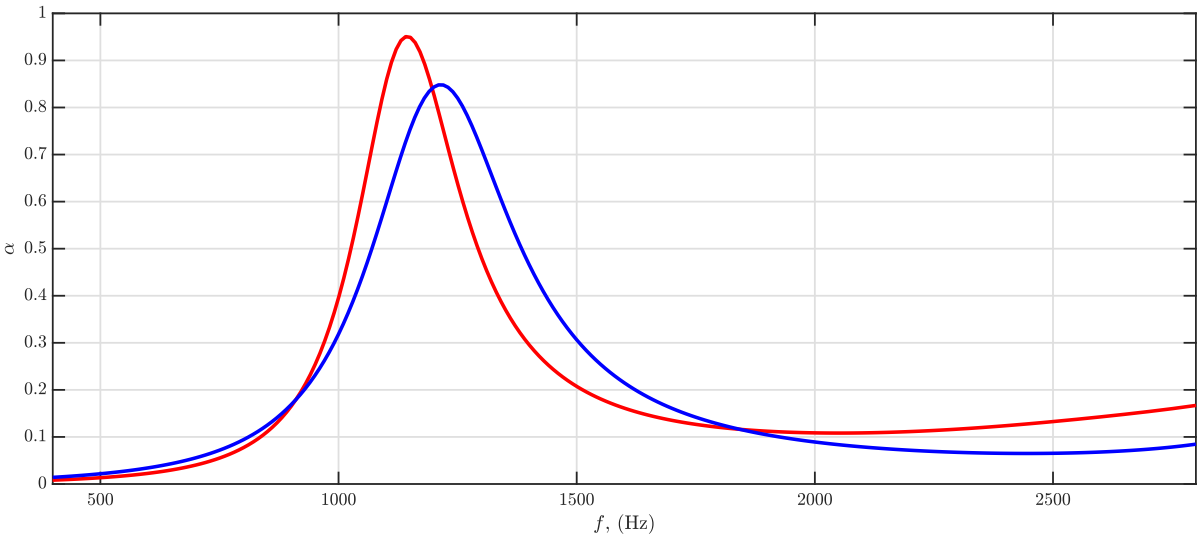


FIGURE 3.17 – Coefficient d'absorption pour la modélisation Navier-Stokes(—) et pour la modélisation BLI (—)

3.4 La modélisation macroscopique

Dans cette section, nous allons présenter la mise en œuvre de l'approche macroscopique au moyen d'un fluide équivalent. Pour la modélisation de l'échantillon à l'échelle macroscopique, il est d'abord nécessaire de déterminer les paramètres du modèle JCAPL. Ceci est réalisé par un calcul éléments finis qui résout les équations de Laplace, Stokes et Poisson dans un domaine élémentaire représentatif de l'échantillon. Puis, pour le cas d'une incidence normale, une formulation analytique à partir des fonctions caractéristiques acoustiques du modèle JCAPL permet de calculer le coefficient d'absorption.

3.4.1 Identification des paramètres JCAPL

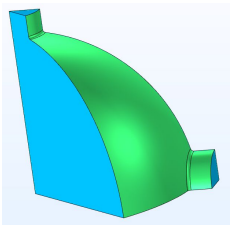


FIGURE 3.18 – 1/16ème d'une cellule élémentaire dans laquelle sont résolues les équations présentées

Nous présentons le cas de l'échantillon de référence avec la géométrie OPCL dont les dimensions sont : $a = 9$ mm, $d = 8$ mm et $w = 1.5$ mm. Cette géométrie est sélectionnée pour sa simplicité de modélisation. En effet, il suffit de modéliser 1/16ème de la cellule grâce aux symétries (cf. figure 3.18).

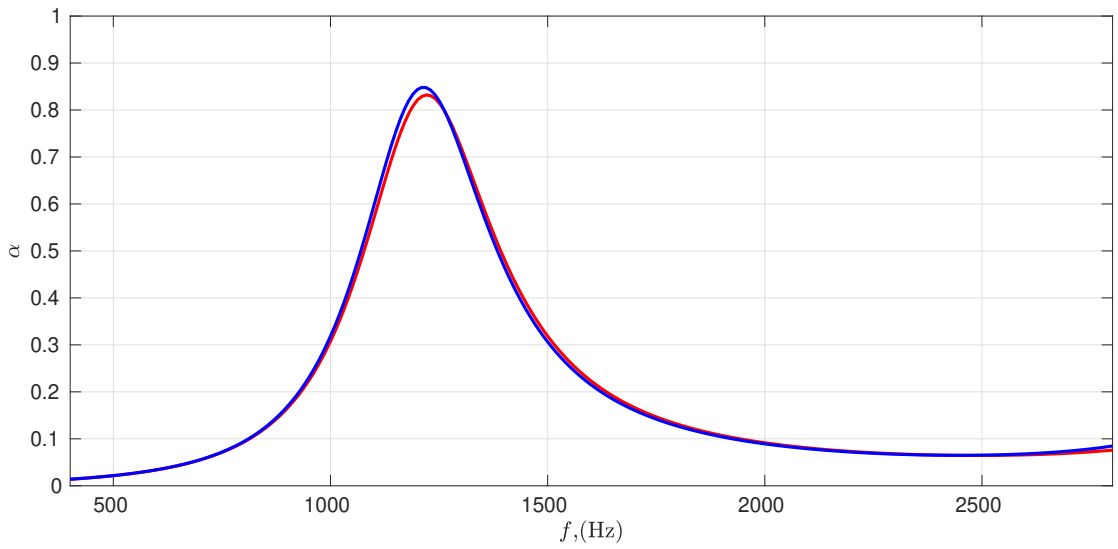


FIGURE 3.19 – Coefficient d'absorption pour la modélisation Navier-Stokes(—) et pour la modélisation JCALP (—)

C'est dans ce domaine que sont résolues les équations de Stokes, Poisson et Laplace présentées dans la section 3.2.2. Les 8 paramètres du modèle JCAPL ainsi obtenus sont rassemblés dans le tableau 3.2. On remarque une faible porosité et une tortuosité importante. La porosité des matériaux absorbants classiques est très proche de 1 et la tortuosité entre 1 et 1.2. Ces paramètres permettent de calculer les fonctions du fluide équivalent puis le coefficient d'absorption, en passant par l'impédance caractéristique et le nombre d'onde. On réalise l'identification des paramètres sur une fraction du domaine en quelques minutes sur une machine de bureau. Le calcul analytique de l'absorption à partir des paramètres identifiés est immédiat.

Sur la figure 3.19, on observe un bon accord entre les coefficients d'absorption obtenus à partir de la modélisation microscopique de l'échantillon pour la face A et avec le modèle JCAPL sur la plage de fréquence comprise entre 500 et 3000 Hz. Les valeurs particulières de tortuosité et de porosité sont responsables de la courbe d'absorption présentant des pics aigus. En effet, il est observé qu'une tortuosité importante produit des pics d'absorption fins et d'amplitude importante, ainsi qu'un décalage vers les basses fréquences, alors qu'une faible porosité tend à rendre les pics d'absorption plus étroits et moins élevés.

Sur la figure 3.20, on compare le modèle JCAPL (trait plein noir) et les deux modélisations microscopiques face A (tiret bleu) et face B (tiret rouge). Un décalage important apparaît à partir de 3000 Hz entre les courbes d'absorption obtenues avec le modèle JCAPL et la modélisation directe pour la face A. On peut relier cet écart avec l'hypothèse d'homogénéité. En effet, pour que l'échantillon soit considéré comme un fluide équivalent il faut que la taille de la cellule soit très petite devant la longueur d'onde, soit $\lambda \gg a$. En prenant une longueur d'onde $\lambda = c_0/f$ un ordre de grandeur plus grand que la taille de la cellule, on obtient une fréquence limite d'environ 3000 Hz. De même, on remarque que la modélisation avec les paramètres JCAPL donne une courbe d'absorption qui semble présenter un nombre infini de pics si l'on étend la plage de fréquence. Ce n'est pas le cas de la modélisation microscopique, comme cela a été montré précédemment dans la section 3.3.1. L'approche macroscopique conduit à un résultat qui correspond bien à l'échantillon présentant la face A (jusqu'à 3000 Hz) et diffère légèrement pour la face B.

L'identification des paramètres se fait à partir d'une demi sphère dans la direction de la propagation, mais n'est pas sensible à son sens. Il n'est donc pas possible de faire la différence entre les deux

faces de l'échantillon avec l'approche fluide équivalent. La présence du demi résonateur contre la paroi rigide avec l'échantillon en face B peut expliquer la différence observée sur les courbes d'absorption entre les deux faces. Lorsque l'on considère la face A du matériau, on compte 3 résonateurs entiers, la demi-sphère en face avant ayant à priori un effet limité. Pour la face B, on considère à présent 3 résonateurs entiers et un demi résonateur, d'où le pic supplémentaire vers 5800 Hz. Il est à noter que les 3.5 résonateurs correspondent à 7 volumes élémentaires représentatifs dans le sens de la propagation. La comparaison entre l'approche fluide équivalent et la simulation directe est réalisée pour un nombre fini de volumes élémentaires représentatifs (c'est-à-dire de 1/16ème de cellule représentée figure 3.18). Comme évoqué dans la section 3.3.1 la différence de comportement acoustique entre la face A et la face B peut aussi s'expliquer par un effet de longueur ajoutée dû aux petits canaux en face B du matériau. Cet effet peut être pris en compte par une correction des paramètres JCAPL, justifiée par une diffusion en sortie des canaux comme décrit dans Jaouen et Chevillotte (2018). La prise en compte de cette longueur ajoutée permettrait certainement de décaler le pic d'absorption vers les basses fréquences et de se rapprocher du comportement observé avec la simulation directe de la face B. Cependant, l'hypothèse privilégiée est l'effet de résonance supplémentaire dû à la demi sphère contre la paroi rigide en raison du pic supplémentaire observé sur le coefficient d'absorption obtenue par l'approche NSL.

TABLE 3.2 – Paramètres obtenus pour le modèle JCALP

Paramètres	**Valeurs**
Porosité	$\Phi = 0.3754$
Longueur caractéristique visqueuse	$\Lambda_v = 8.1038 \times 10^{-4}$ m
Tortuosité cinématique	$\alpha_\infty = 4.6316$
Perméabilité visqueuse	$K_0 = 7.2512 \times 10^{-9}$ m^2
Tortuosité statique visqueuse	$\alpha_{0v} = 6.5688$
Longueur caractéristique thermique	$\Lambda_{th} = 2.6654 \times 10^{-3}$ m
Perméabilité thermique	$\theta_0 = 3.9809 \times 10^{-7}$ m^2
Tortuosité statique thermique	$\alpha_{0th} = 1.4407$

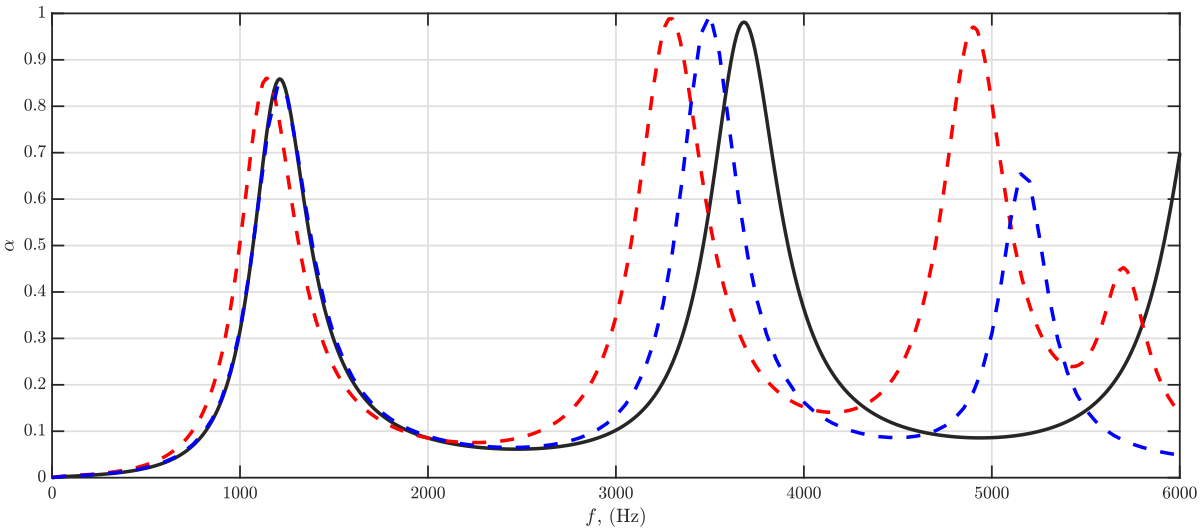


FIGURE 3.20 – Coefficient d'absorption pour la modélisation Navier-Stokes de la face A (– –) et de la face B (– –) et pour la modélisation JCALP (—)

3.4.2 Discussion modèle fluide équivalent

Nous avons pu observer des différences entre la modélisation par les équations de NSL et l'approche fluide. Dans cette section, nous nous proposons de comparer l'approche microscopique avec la modélisation de la structure étudiée par un fluide équivalent dans différentes configurations. Pour toutes ces configurations, les échantillons sont testés en face A.

Empilement de résonateurs

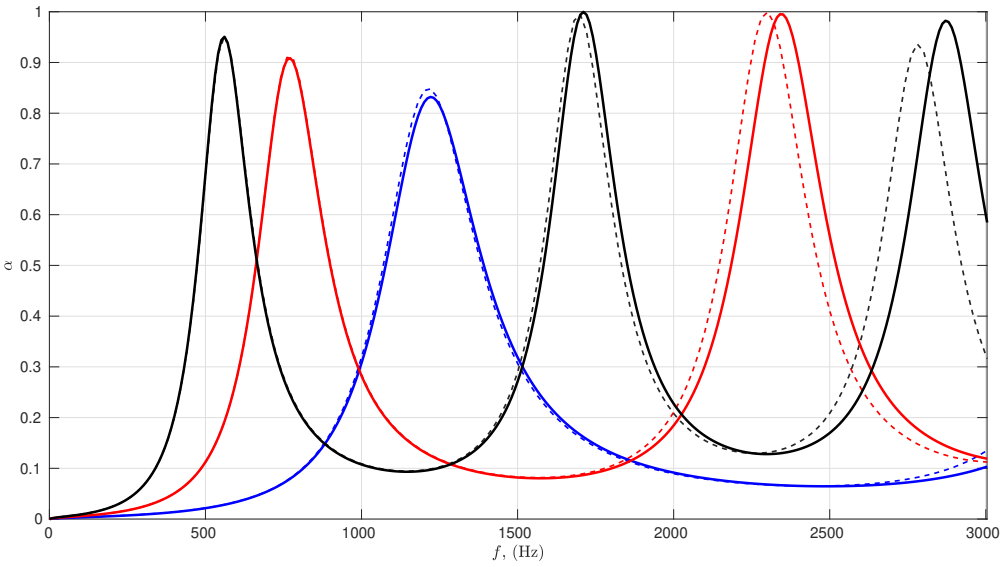


FIGURE 3.21 – Coefficient d'absorption pour les géométries 3.5 (—), 5.5 (—) et 7.5 (—) résonateurs pour le modèle JCAPL et (– –), (– –) et (– –) pour le modèle NSL

Comme cela a été vu, les échantillons se comportent comme un empilement de résonateurs, et présentent autant de pics d'absorption qu'il y a de cavités de résonance. On remarque sur la figure 3.21 le bon accord entre les courbes obtenues par les modélisations microscopiques de la face A et fluide équivalent pour des échantillons avec un nombre différent de cellules. On voit que la fréquence à partir de laquelle les courbes commencent à diverger est approximativement la même : autour de 2500 Hz. Le décalage en fréquence est néanmoins plus visible au niveau d'un pic d'absorption que d'un creux ce qui peut avoir pour effet de fausser cette considération. La taille de l'échantillon ne semble donc pas impacter l'approche fluide équivalent. Une des hypothèses pour cette approche est la petite taille des volumes élémentaires représentatifs devant la taille de l'échantillon. Cette hypothèse qui n'est pas nettement vérifiée, ne paraît pas préjudiciable à la prédiction du coefficient d'absorption.

Présence d'une lame d'air

On cherche maintenant à comparer les deux types de modélisation quand l'impédance à l'arrière de l'échantillon varie. Dans ce but, on considère une lame d'air à l'arrière de l'échantillon. Dans le cas de la modélisation fluide équivalent on prend en compte la lame d'air analytiquement dans le calcul de l'impédance de surface de l'échantillon :

$$Z_{sgap} = Z_c \frac{-\mathrm{i} Z_{gap} \cot(k_c D) + Z_c}{Z_{gap} - \mathrm{i} Z_c \cot(k_c D)} \tag{3.18}$$

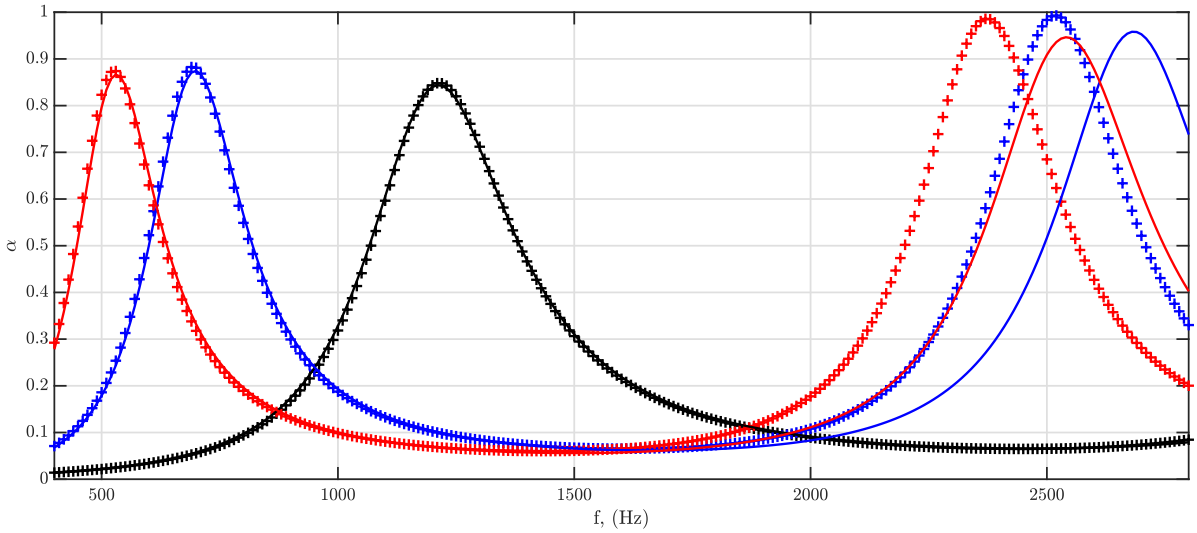


FIGURE 3.22 – Coefficient d'absorption pour une lame d'air de 20 mm (—), 10 mm (—) et contre une paroi rigide (—) pour le modèle JCAPL et 20 mm(+), 10 mm (+) et paroi rigide (+) pour le modèle NSL

avec $Z_{gap} = -\mathrm{i}Z_0 \cot(k_0 L_{gap})$ Sur la figure 3.22 on compare les coefficients d'absorption pour une paroi rigide, une lame d'air de 10 mm et une lame d'air de 20 mm. On constate que le modèle fluide équivalent prédit toujours correctement le comportement des échantillons. Un décalage est visible à des fréquences plus basses quand la taille de la lame d'air augmente. La taille de la cellule représentative est peut-être surévaluée en raison de ce résonateur supplémentaire à l'arrière de l'échantillon, ce qui peut expliquer un décalage entre les deux approches à des fréquences plus basses.

Fonctions du fluide équivalent

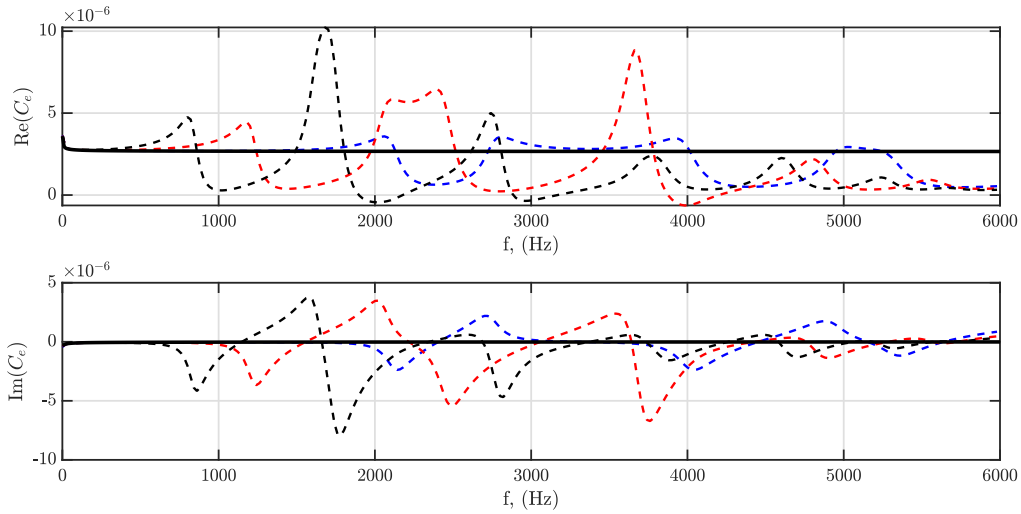


FIGURE 3.23 – Compressibilité effective pour les géométries comptant 3.5 (– –), 5.5 (– –), 7.5 (– –) résonateurs déterminé à partir de la simulation NSL et (—) en passant par l'identification des paramètres JCAPL

La compressibilité effective $C_e(\omega)$ et la densité effective $\rho_e(\omega)$ sont calculées au moyen de la technique de Salissou et Panneton (2010) utilisant deux microphones en face avant et un à l'arrière de

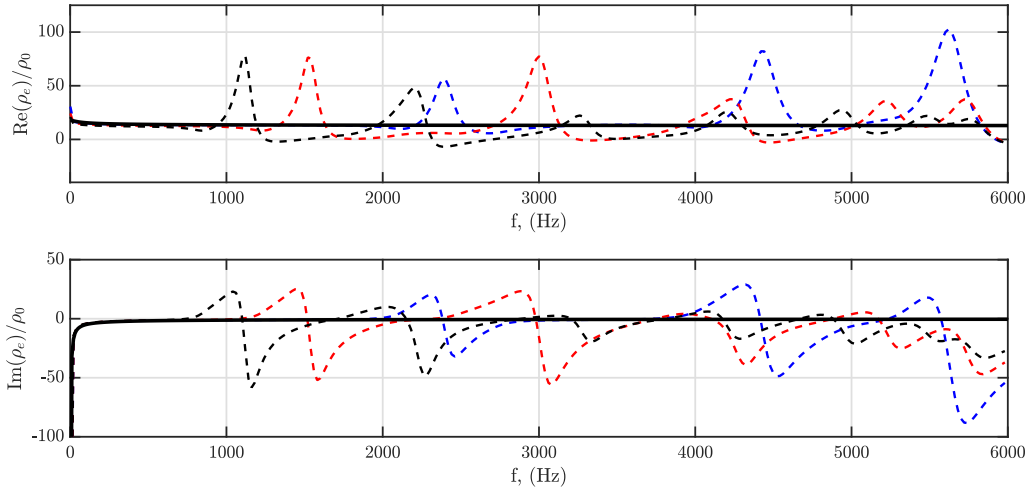


FIGURE 3.24 – Densité effective pour les géométries comptant 3.5 (– –), 5.5 (– –), 7.5 (– –) résonateurs avec la modélisation numérique de la configuration 3 microphones et (—) obtenu analytiquement en passant par l'identification des paramètres JCAPL

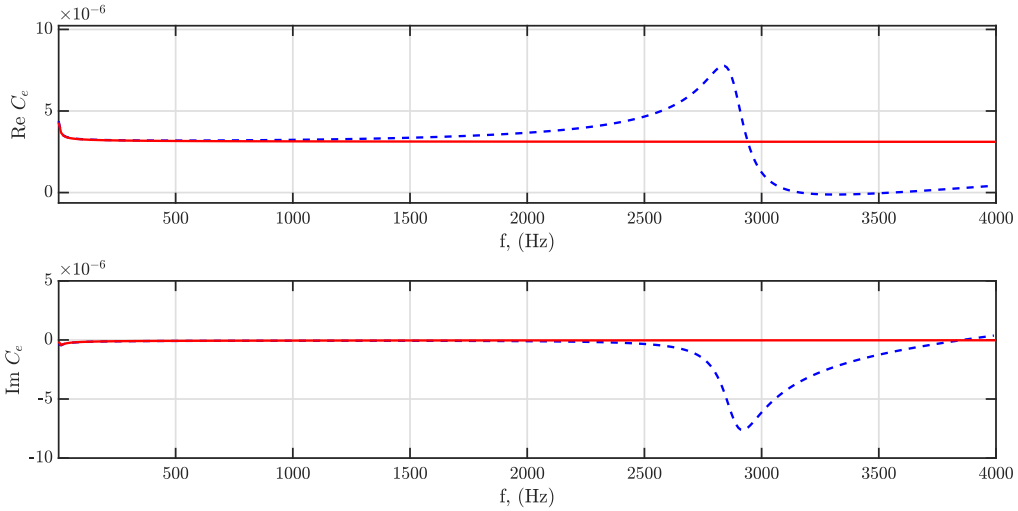


FIGURE 3.25 – Compressibilité effective pour la géométrie OPC approche fluide équivalent (—) et simulation NSL (– –)

l'échantillon contre la paroi rigide (cf. figure 3.4 C). On observe ainsi les parties réelles et imaginaires de ces fonctions sur les figures 3.23 et 3.24. Elles sont présentées pour la géométrie OPC avec 3.5, 5.5 et 7.5 résonateurs comme cela a été réalisé plus haut pour les coefficients d'absorption (cf. section 3.4.2). Ces fonctions du fluide équivalent calculées à partir de la simulation NSL sont comparées avec celles que l'on obtient analytiquement avec l'identification des paramètres JCAPL (trait plein noir). On obtient 3 courbes différentes pour les 3 simulations directes NSL ce qui ne serait pas le cas s'il s'agissait d'un matériau homogène. Les allures des courbes sont très différentes entre les deux approches. Pour la simulation NSL les courbes de ρ_e et C_e sont très éloignées du comportement attendu pour les fluides équivalents. En basse fréquence (loin du premier pic d'absorption) les deux approches donnent un résultat cohérent. Pour les fréquences plus importantes, les courbes issues de la simulation NSL présentent des variations rapides et importantes.

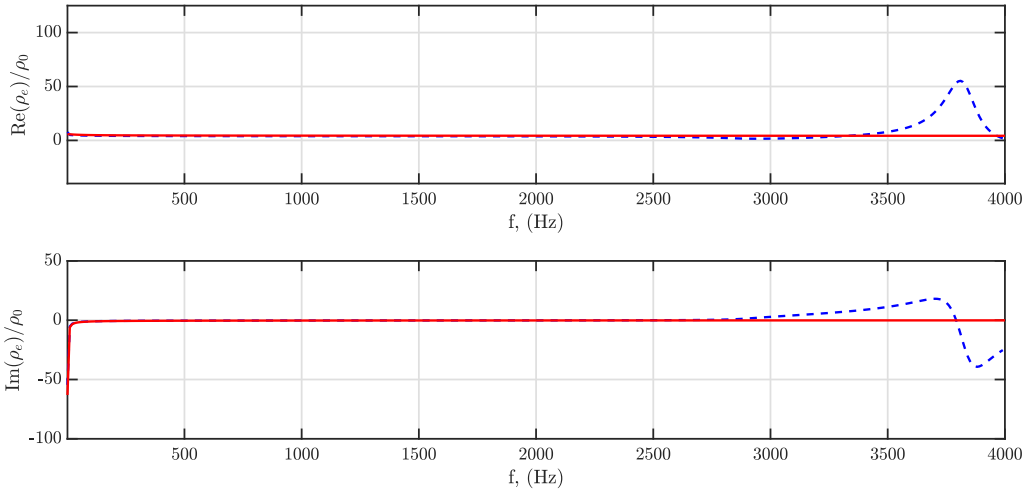


FIGURE 3.26 – Densité effective pour la géométrie OPC approche fluide équivalent (—) et simulation NSL (- -)

Cette comparaison est réalisée ensuite pour un échantillon dont la fréquence du premier pic d'absorption est plus grande. On utilise les dimensions de la géométrie OPC proposée par (Zieliński *et al.*, 2020a). On modélise un échantillon de 32.5 mm d'épaisseur présentant 6.5 cellules de dimension 5 mm, des canaux de diamètre $w = 2$ mm et des sphères de diamètre $d = 4.5$ mm.

Pour cette géométrie, le pic d'absorption apparaît plus haut en fréquence que pour la géométrie OPCL (autour de 2000 Hz) et les courbes d'absorption entre l'approche directe et la modélisation macroscopique sont très proches jusqu'à plus de 4000 Hz. La comparaison entre les fonctions du fluide équivalent obtenues par l'identification des paramètres JCAPL et calculées avec la simulation NSL est présentée sur les figures 3.25 et 3.26. Les deux approches donnent des résultats cohérents sur une bande de fréquence plus large. La fréquence à partir de laquelle elles divergent est vraisemblablement liée à la fréquence du premier pic d'absorption.

Les échantillons utilisant la géométrie OPCL étudiés précédemment mesurent 31.5 mm d'épaisseur. Cette épaisseur a été modifiée pour les échantillons OPC pour une meilleure comparaison entre les deux approches. Sur la figure 3.27, on compare les coefficients d'absorption obtenus avec la simulation numérique directe et l'approche fluide équivalent, selon que l'on considère un échantillon d'une épaisseur de 31.5 mm ou de 32.5 mm. Il y a un bon accord pour le deuxième cas, mais les courbes d'absorption pour l'échantillon de 31.5 mm diffèrent. L'échantillon est composé de ≈6.3 cellules représentatives dans le premier cas et de 6.5 cellules dans le second cas. Le comportement modélisé à partir de l'identification des paramètres JCAPL représente un nombre fini de volumes élémentaires représentatifs. Étant donné que l'identification des paramètres JCAPL est réalisée avec un volume représentant une demi-cellule dans le sens de la propagation, la modélisation d'une plus petite fraction de cellule ne donne pas un résultat satisfaisant.

3.4.3 Conclusion sur l'approche fluide équivalent

Les comparaisons réalisées semblent indiquer qu'il est possible de représenter le type d'échantillon étudié par un fluide équivalent. Cette modélisation présente des limites, notamment à cause de l'hypothèse d'homogénéisation. Une taille de cellule petite devant la longueur d'onde est nécessaire pour prédire précisément les coefficients d'absorption. La deuxième hypothèse sur laquelle se base

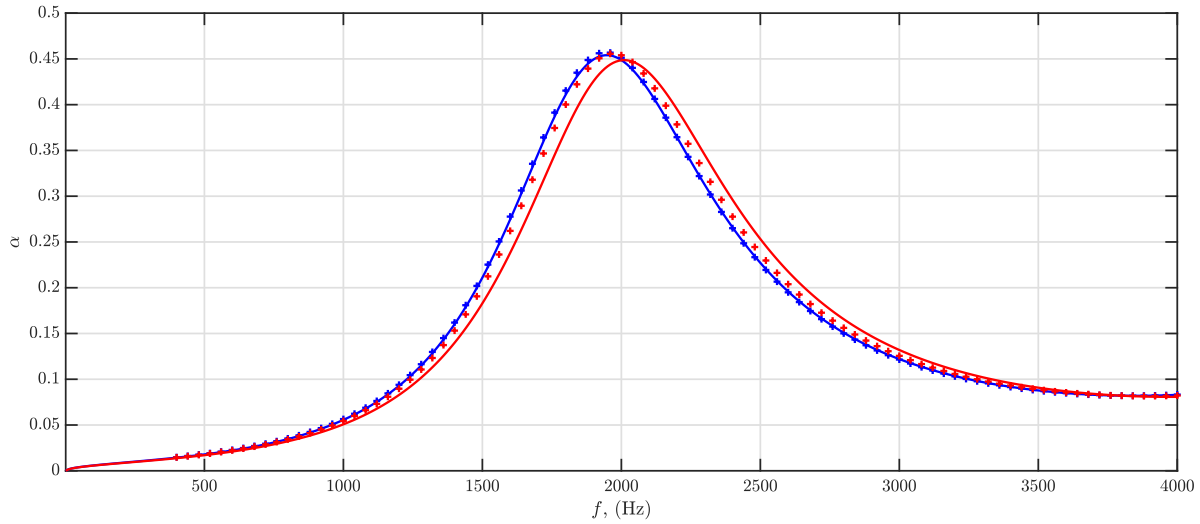


FIGURE 3.27 – Coefficient d'absorption pour la géométrie OPC : approche fluide équivalent (trait plein) et simulation NSL (symboles), pour une épaisseur de 31.5 mm (rouge) et de 32.5 mm (bleu)

l'homogénéisation de l'approche fluide équivalent est une taille du volume élémentaire représentatif petite devant la taille de l'échantillon. L'impact de cette deuxième hypothèse n'est pas évident sur les configurations qui ont été testées. En effet, sur la figure 3.21 on compare la simulation directe et l'approche fluide équivalent pour des échantillons présentant un nombre différent de cellules. Les courbes de coefficients d'absorption ne paraissent pas plus en accord pour le cas présentant 7.5 cellules que pour les cas d'échantillons plus petits. Par ailleurs les courbes des fonctions de fluide équivalent divergent à des fréquences plus basses et présentent des variations plus importantes dans le cas de l'échantillon de 7.5 cellules. À l'inverse l'échantillon utilisant la géométrie OPC de (Zieliński *et al.*, 2020a), dont les dimensions sont plus petites, permet d'obtenir un meilleur accord entre les courbes des fonctions du fluide équivalent obtenues par la simulation directe et l'approche macroscopique.

La méthode paraît valide pour la plage de fréquence ciblée, entre 500 et 2500 Hz, qui est l'étendue de mesure du dispositif expérimental en paroi de conduit. Nous pouvons maintenant appliquer l'approche fluide équivalent aux géométries optimisées pour tester son efficacité.

3.5 Modélisation des modifications de géométries

On rappelle que l'objectif, à terme, est de disposer d'un outil efficace d'optimisation des géométries de dispositifs absorbants. Dans cette partie, nous allons examiner les modélisations microscopiques et macroscopiques des géométries optimisées, présentées dans la section 2.5.

3.5.1 La géométrie cubique

La première géométrie examinée est la géométrie cubique (présentée au chapitre 2). Pour rappel les dimensions caractéristiques de la cellule sont identiques à la géométrie OPCL, avec la taille de la cellule $a = 9$ mm, le côté du cube $d_c = 8$ mm, et le diamètre du canal $w_c = 1.5$ mm. On réalise le modèle microscopique pour un échantillon présentant la cavité (face A) et le canal en face avant (face B). On réalise également le modèle de la cellule élémentaire qui permettra de calculer les paramètres du modèle JCAPL. On ajoute des congés aux arêtes pour supprimer l'indétermination de calcul (cf.

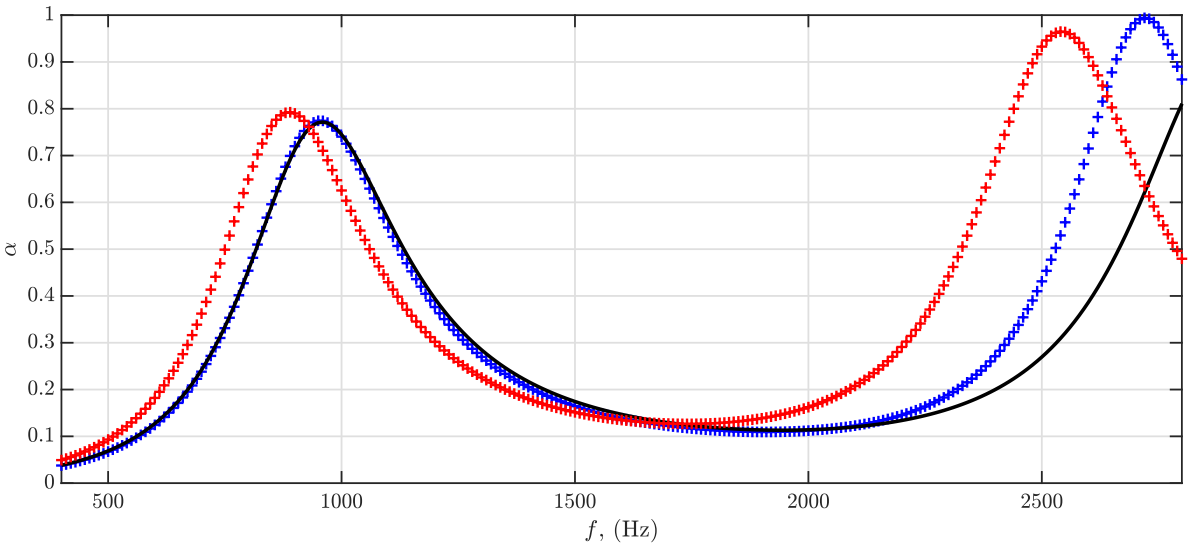


FIGURE 3.28 – Coefficient d'absorption pour la géométrie cubique avec la modélisation NSL : face A (+) et face B (+) et avec la modélisation JCAPL (—)

TABLE 3.3 – Paramètres JCAPL obtenus pour la géométrie cubique

Paramètres	**Valeurs**
Porosité	$\Phi = 0.70557$
Longueur caractéristique visqueuse	$\Lambda_v = 7.3593 \times 10^{-4}$ m
Tortuosité cinématique	$\alpha_\infty = 7.5050$
Perméabilité visqueuse	$K_0 = 8.1124 \times 10^{-9}$ m^2
Tortuosité statique visqueuse	$\alpha_{0v} = 11.135$
Longueur caractéristique thermique	$\Lambda_{th} = 2.7823 \times 10^{-3}$ m
Perméabilité thermique	$\theta_0 = 9.2208 \times 10^{-7}$ m^2
Tortuosité statique thermique	$\alpha_{0th} = 1.5320$

section 3.2.2). On réalise 1/8 ème de cellule pour l'identification des paramètres. Les 8 paramètres sont présentés dans le tableau 3.3. L'objectif qui était d'augmenter la porosité et la tortuosité en modifiant la géométrie des cavités est atteint puisque chacun de ces paramètres a quasiment doublé.

Sur la figure 3.28, on compare les coefficients d'absorption pour la modélisation microscopique avec les deux faces A et B et la modélisation par un fluide équivalent. Pour cette géométrie cubique, la fréquence du pic d'absorption est plus basse que pour la géométrie OPCL : 960 Hz contre 1218 Hz. C'est l'effet qui était recherché en augmentant la tortuosité. Les pics d'absorption semblent également plus larges avec l'augmentation de la porosité. On obtient un bon accord entre la prédiction avec un fluide équivalent et la simulation directe pour la face A de l'échantillon. Comme pour la géométrie OPCL, la modélisation à l'échelle microscopique de la face B donne une absorption légèrement plus basse en fréquence.

3.5.2 La géométrie double réseau

Nous proposons d'évaluer maintenant la modélisation de la géométrie double réseau (Double nested network DNN). La taille de la double cellule est $a = 9$ mm, avec pour le petit réseau (1) le diamètre de la sphère $d_1 = 6.5$ mm, le diamètre du canal $w_1 = 2$ mm, et avec pour le grand réseau (2) le diamètre de la sphère $d_2 = 8.5$ mm et le diamètre du canal $w_2 = 1.2$ mm. Comme pour les

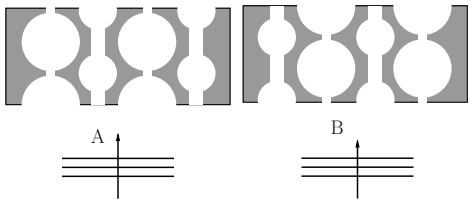


FIGURE 3.29 – Face A et face B pour la géométrie DNN

TABLE 3.4 – Paramètres JCAPL obtenus pour la géométrie DNN et les deux sous-réseaux

Paramètres	**DNN**	**petit**	**grand**
Porosité Φ	0.67476	0.23146	0.44335
Longueur caractéristique visqueuse Λ_v m	8.0294×10^{-4}	1.0336×10^{-3}	6.4588×10^{-4}
Tortuosité cinématique α_∞	4.335	3.0191	5.7349
Perméabilité visqueuse K_0 m^2	1.6012×10^{-8}	1.1070×10^{-8}	4.5701×10^{-9}
Tortuosité statique visqueuse α_{0v}	7.0456	4.1719	8.3537
Longueur caractéristique thermique Λ_{th} m	2.5168×10^{-3}	2.0367×10^{-3}	2.8566×10^{-3}
Perméabilité thermique θ_0 m^2	6.8636×10^{-7}	1.5189×10^{-7}	5.3391×10^{-7}
Tortuosité statique thermique α_{0th}	1.5365	1.5271	1.4303

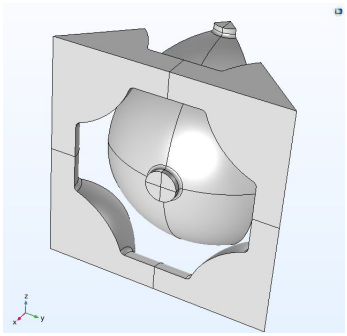


FIGURE 3.30 – Cellule représentative de la géométrie DNN réalisée pour calculer les paramètre JCAPL

autres géométries, deux faces différentes peuvent être présentées en face avant. On définit ici la face A comme la face présentant les sphères du grand réseau et les canaux du petit, et la face B comme la face présentant les canaux du grand réseau et les sphères du petit réseau (cf. figure 3.29). La cellule élémentaire, correspondant à 1/4 d'une cellule complète est représentée sur la figure 3.30. Pour réaliser des comparaisons et comprendre le comportement obtenu, les paramètres JCAPL ont aussi été déterminés pour chacun des sous réseaux, le petit (1) et le grand (2). Les paramètres JCAPL du DNN et des deux sous réseaux sont présentés dans le tableau 3.4. La porosité de la géométrie DNN est la somme des deux sous réseaux tandis que sa tortuosité correspond à leur moyenne.

Sur la figure 3.31 on compare les coefficients d'absorption obtenus avec l'approche microscopique pour la face A et la face B avec ceux provenant des fluides équivalents correspondants à la géométrie DNN et aux petit et grand réseaux. On observe deux pics d'absorption pour les deux modélisations face A et face B avec l'approche microscopique. Par ailleurs, il est intéressant de remarquer l'écart entre les faces A et B. Le premier pic, centré autour de 1000 Hz correspondant à la résonance du grand réseau se décale vers les basses fréquences entre la face A et la face B. C'est l'inverse pour le deuxième pic noté à 1600 Hz correspondant au petit réseau. Le décalage vers les basses fréquences

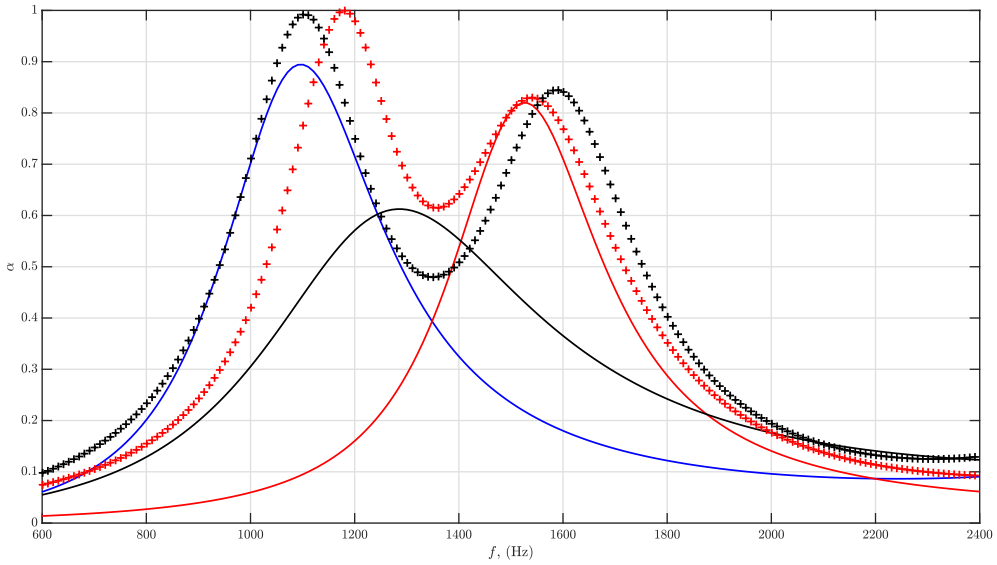


FIGURE 3.31 – Coefficient d'absorption pour la géométrie double réseau avec la modélisation NSL (+) face A (+) face B et la modélisation JCAPL pour le réseau entier (—) le petit réseau (—) et le grand réseau (—)

est relié à la géométrie en surface comme expliqué précédemment section 3.4.1. En effet, pour la face A, comme le canal du petit réseau est en face avant, on observe un décalage du deuxième pic de résonance. Inversement, pour la face B, le canal du grand réseau est en face avant ; c'est pourquoi on note cette fois-ci un décalage du premier pic.

Le fluide équivalent global ne permet pas de rendre compte ni des doubles résonances ni de la performance que l'on observe avec l'approche microscopique. La présence de deux résonances liées aux deux réseaux ne communiquant pas entre eux ne peut pas être prise en compte par une approche fluide équivalent unique. On peut noter que le coefficient d'absorption calculé pour chaque sous-réseau avec l'approche fluide équivalent coïncide avec le pic d'absorption du double réseau pour lequel les canaux du sous-réseau sont affleurants. Ainsi, le coefficient d'absorption pour le fluide équivalent construit avec le seul gros réseau est en meilleur accord avec le pic d'absorption basse fréquence face B alors que celui du fluide équivalent petit réseau est plus proche du pic d'absorption haute fréquence face A.

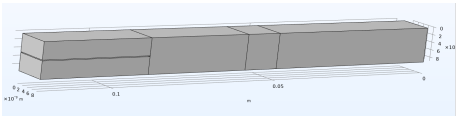


FIGURE 3.32 – Modèle éléments finis réalisé avec les deux domaines JCAPL côte à côte

Pour améliorer le modèle fluide équivalent, on se propose de représenter le matériau par deux fluides équivalents accolés, chacun correspondant à un des deux sous-réseaux.

DNN par éléments finis On réalise tout d'abord ce modèle avec deux fluides équivalents modélisés en éléments finis avec le logiciel COMSOL (cf. figure 3.32). Comme le logiciel ne permet pas de définir une paroi rigide entre deux domaines poreux, nous avons donc introduit un petit interstice entre les deux domaines. Nous avons vérifié que les résultats ne dépendaient pas de la largeur de

l'interstice considéré.

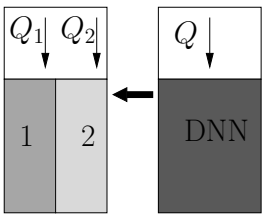


FIGURE 3.33 – Conservation du débit en face avant de l'échantillon

DNN analytique On peut aussi dériver analytiquement l'impédance de surface à partir de la conservation du débit et de l'égalité de la pression à la surface de l'échantillon. Ainsi en face avant, le débit volumique pour l'échantillon Q_{DNN} (cf. figure 3.33) est égal à :

$$Q_{DNN} = Q_1 + Q_2. \tag{3.19}$$

où Q_1 et Q_2 sont les débits dans chacun des deux sous-réseaux. Ce débit est égal au produit de la vitesse acoustique et de la surface correspondante $S_2 = S_1 = \frac{S}{2}$. On obtient :

$$V_{DNN} = V_1 \frac{S_1}{S} + V_2 \frac{S_2}{S}, \tag{3.20}$$

où V_1 et V_2 sont les vitesses incidentes au premier et deuxième sous-réseau respectivement. Cela permet de mettre en équation l'impédance de surface totale Z_{DNN} correspondante et de calculer ensuite le coefficient d'absorption.

$$Z_{DNN} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{S_1}{S} Z_1} + \frac{1}{\frac{S_2}{S} Z_2}} \tag{3.21}$$

Ici les impédances Z_1 et Z_2 sont calculées à partir des 8 paramètres JCAPL des deux sous réseaux, petit (1) et grand (2).

On peut comparer sur la figure 3.34 les coefficients d'absorption du calcul éléments finis et du modèle analytique avec celui de l'approche microscopique. Le calcul éléments finis et le modèle analytique donnent des résultats très proches.

L'approche fluide équivalent modifiée fourni des résultats en accord avec l'approche microscopique pour la face B. Elle permet de prédire une double résonance à des fréquences proches de celles prédites par l'approche microscopique face B pour le grand réseau et face A pour le petit. Cependant, elle ne parvient pas à reproduire fidèlement le comportement acoustique. On peut supposer qu'il existe en face avant un effet de couplage entre les deux réseaux qui est pris en compte par l'approche microscopique (plus exacte, on le rappelle).

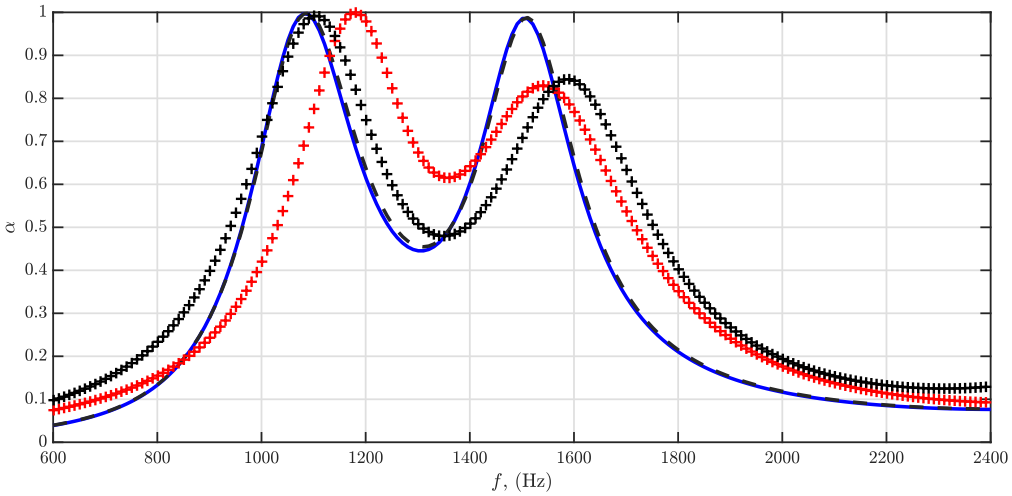


FIGURE 3.34 – Coefficient d'absorption pour la géométrie double réseau avec la modélisation NSL pour la face A (+) et la face B (+) face B et la modélisation par deux fluides équivalents avec une approche FEM (—) et analytique (—)

Chapitre 3 — Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la mise en œuvre numérique des différentes modélisations pour prédire le coefficient d'absorption en incidence normale des matériaux imprimés. Des comparaisons pour la géométrie de base ont conduit à écarter la modélisation des dissipations par une condition aux limites spécifique. Les tests réalisés ont montré une bonne capacité de prédiction de l'approche fluide équivalent avec un gain de temps et de coût de calcul substantiel. Le comportement de l'échantillon de base (OPCL) et les mécanismes de dissipation ainsi que les spécificités entre les deux faces des échantillons ont été étudiés. Nous avons essayé de dégager certaines limites de l'approche fluide équivalent en étudiant des variations des conditions d'expérience en incidence normale en testant des structures plus ou moins grandes ou la présence d'une lame d'air derrière l'échantillon. Finalement, la modélisation des géométries optimisées a été réalisée. L'approche fluide équivalent peut prédire le comportement de la face A des échantillons présentant un unique réseau. Pour la géométrie double réseau, il est nécessaire de considérer deux fluides équivalents distincts et cela ne permet qu'une modélisation globale du comportement.

Chapitre 4

Comparaisons avec l'expérience en incidence normale

Résumé

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats expérimentaux obtenus avec le tube de Kundt pour les échantillons des séries présentées au chapitre 2. Les comparaisons entre échantillons, configurations et séries, nous permettent de confirmer le protocole de réalisation afin d'obtenir les échantillons les plus conformes possible au dessin de conception. Ces comparaisons vont également permettre d'identifier les différents facteurs d'écart entre prédictions et modèles et d'en estimer l'impact. Ainsi, la taille des canaux à un réel effet sur le coefficient d'absorption. Il en va de même pour l'espace entre l'échantillon lui-même et la paroi du tube d'impédance. L'étude paramétrique réalisée sur cet interstice montre que de très petites dimensions vont avoir un fort impact. Finalement, nous présentons les résultats pour les géométries introduites au chapitre 2 et les expériences sont en bon accord avec les prédictions pour ces géométries optimisées.

Sommaire

4.1 Introduction 68
4.1.1 Introduction générale 68
4.1.2 Dispositif expérimental 68
4.2 Impact de la variabilité des échantillons 69
4.2.1 Effet de fuite 69
4.2.2 Variabilité des dimensions internes 75
4.2.3 Modélisation d'une fuite et des variations dimensionnelles pour retrouver un comportement acoustique mesuré 78
4.2.4 Conclusion sur l'impact acoustique de la variabilité des échantillons 79
4.3 Échantillons de différentes géométries 80
4.3.1 OPC 80
4.3.2 OPC Large 81

4.3.3 Géométrie cubique 81
4.3.4 Géométrie DNN 82
4.3.5 Conclusions sur les différentes géométries 83

4.1 Introduction

4.1.1 Introduction générale

Pour atteindre l'objectif de prédiction du comportement de géométries différentes réalisées pour des contextes plus complexes, nous allons dans la première partie de ce chapitre nous intéresser aux effets des variations dimensionnelles sur le coefficient d'absorption en incidence normale. Dans une seconde partie, nous présenterons les résultats obtenus pour les différentes géométries réalisées en tenant compte de l'impact que peuvent avoir les dimensions internes.

Faire le lien entre les variations des dimensions mesurées et le comportement acoustique peut présenter certaines difficultés. Tout d'abord, comme nous l'avons montré au chapitre 2, la variabilité ne concerne pas seulement les dimensions internes des géométries, mais aussi le diamètre externe de l'échantillon. Il en résulte un phénomène de fuite qui peut compliquer l'interprétation des résultats. On retrouve dans différents articles des références à des méthodes permettant de limiter les fuites pour améliorer les résultats, comme la découpe au jet d'eau (Chevillotte et Panneton, 2007) ou l'utilisation d'un tour mécanique (Zieliński *et al.*, 2022).

Par ailleurs, la méthode de mesure des dimensions mise en place au chapitre 2 est limitée aux géométries accessibles à la surface des échantillons. Cette méthode ne garantit pas que les dimensions inaccessibles à l'intérieur présentent la même variabilité. Comme cela a été évoqué, mesurer les dimensions internes en détruisant les échantillons a posteriori poserait d'autres problèmes ; par exemple, le manque de finesse de la découpe ne permettrait pas de mesurer le diamètre de la sphère avec précision. Enfin, le comportement résonnant des échantillons les rend très sensibles aux fuites et aux autres défauts potentiels comme la rugosité. Dans un premier temps, on cherchera donc à observer l'effet de la fuite et à la quantifier expérimentalement ou en la modélisant. Ceci permettra de s'en affranchir de manière relative, ou de la prendre en compte, pour étudier les effets de la variabilité dimensionnelle interne. Enfin, on cherchera le moyen de simuler un comportement cible à partir des dimensions mesurées.

4.1.2 Dispositif expérimental

Dans cette première partie, nous allons nous intéresser aux coefficients d'absorption des échantillons réalisés pour l'étude de variabilité géométrique et présentés dans le chapitre 2. Les mesures sont réalisées dans un tube d'impédance Bruël&Kaer (B&K) ®. L'excitation acoustique est un bruit blanc d'environ 70 dB obtenu avec un haut-parleur inséré dans le tube. Le tube, comme cela a été décrit au chapitre 2, mesure 29 mm de diamètre, ce qui fixe la limite de planéité des ondes à environ 6000 Hz. Les deux microphones placés à l'avant de l'échantillon sont des 1/4 de pouce B&K et sont espacés de 2 cm. Cet écart entre les microphones limite la précision des résultats en basse fréquence. On se limitera à 600 Hz pour éviter des courbes trop bruitées. L'acquisition est réalisée sur 30 blocs d'une seconde avec une fréquence d'échantillonnage de 51200 Hz et les transformées de Fourier sont moyennées sur ces blocs. Un piston à l'arrière de l'échantillon permet de réaliser soit une terminaison rigide, soit une lame d'air.

4.2 Impact de la variabilité des échantillons

Comme indiqué en introduction de ce chapitre, nous allons étudier l'effet de la variabilité des échantillons sur le coefficient d'absorption, tant du point de vue de la dimension externe que des dimensions internes.

4.2.1 Effet de fuite

Modélisation de la fuite

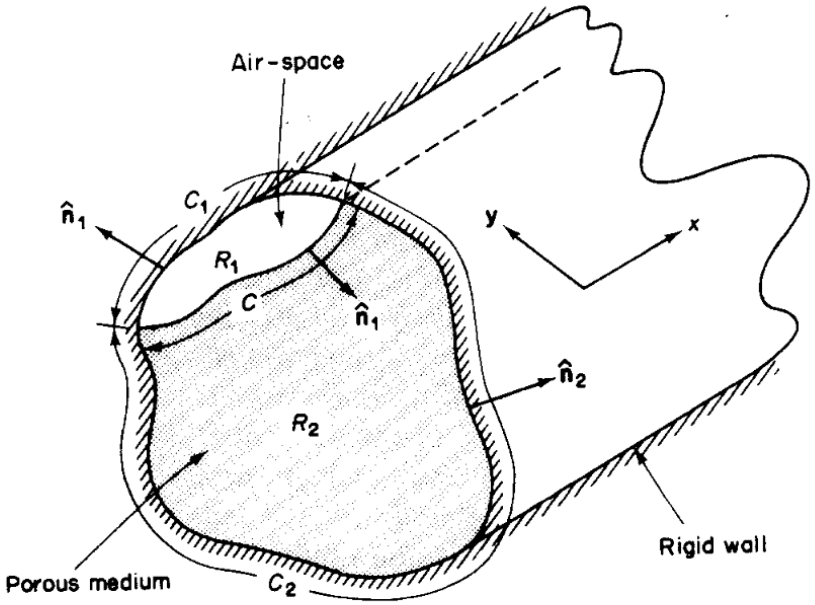


Figure 1. Geometry of a duct partly filled with a porous medium.

FIGURE 4.1 – Aire considérée pour le rapport de surface dans la publication de Cummings (1991)

Comme on peut le trouver dans la littérature (Lee *et al.*, 2013; Kino et Ueno, 2007; Selamet *et al.*, 2009), l'impact des fuites acoustiques autour d'un échantillon est un sujet connu. Le problème du montage de l'échantillon dans le tube est identifié dès les premières descriptions de la méthode par Yaniv (1973). Les fuites dues au dispositif de mesure (entre le joint et la bride du tube d'impédance) sont étudiées dans l'article de Sakamoto *et al.* (2016). Concernant les matériaux poreux à structure rigide (Cummings, 1991) il semble que l'effet se matérialise par une baisse de l'amplitude du pic d'absorption pour des matériaux ayant une faible résistivité (i.e 3000 rayls/m, soit une perméabilité statique de $6.07 \times 10^{-9}\mathrm{m}^2$) et une légère augmentation pour les matériaux ayant une résistivité plus importante ($>$ 10000 rayls/m, soit une perméabilité statique inférieure à 1.821×10^{-9} m²). Si on se rapporte aux identifications des paramètres réalisées pour les échantillons de notre étude au chapitre 3, on se place dans le premier cas. Dans Cummings (1991), la fuite est paramétrée par un rapport de surface dans le plan perpendiculaire au conduit : le rapport de l'aire de la fuite sur l'aire du matériau. Ce rapport vaut $R_1/R_2 = 0.14$ pour la fuite la plus importante (cf. figure 4.1). Kino et Ueno (2007) concluent que l'effet d'élasticité observé quand un échantillon plus grand que le tube est comprimé à l'intérieur est plus dommageable sur la mesure de l'impédance de surface qu'un échantillon plus petit que le tube. Dans (Lee *et al.*, 2013) l'effet de perforations de différentes dimensions sur des résonateurs de Helmholtz est étudié. L'objet de cette étude est de caractériser les variations de

performance de silencieux dans le cas de perforations non voulues, ou réalisées intentionnellement pour des questions de conception (ouverture de drainage). Cette étude est réalisée en paroi de conduit pour des dispositifs résonnants et est donc particulièrement en lien avec notre étude. Il résulte généralement des perforations un décalage vers les hautes fréquences et une baisse de la performance acoustique du résonateur.

Ces différents articles sont à ma connaissance les seuls à avoir réalisé une étude portant spécifiquement sur la fuite, que ce soit par une étude paramétrique, des modélisations du gap d'air ou une comparaison d'expériences et de modélisations. Il est admis qu'une fuite autour de l'échantillon a un impact important sur la mesure acoustique. La présence de fuites est de fait mentionnée très régulièrement pour expliquer les variations observées entre modélisation et expérimentation en tube d'impédance. Par ailleurs, dans le cas des matériaux poreux, il est possible de les comprimer légèrement en les insérant en force (ce qui peut causer d'autres problèmes en raison de l'élasticité de la structure). Comprimer les échantillons est impossible dans le cas de réalisations en impression 3D. Zieliński *et al.* (2022) proposent d'utiliser un tour mécanique pour ajuster le diamètre externe des échantillons réalisés en impression 3D et limiter au maximum cet effet de fuite. Nous avons utilisé cette technique pour les échantillons de la série C. Néanmoins, un jeu mécanique est nécessaire à l'insertion de l'échantillon dans le tube et une lame d'air subsiste.

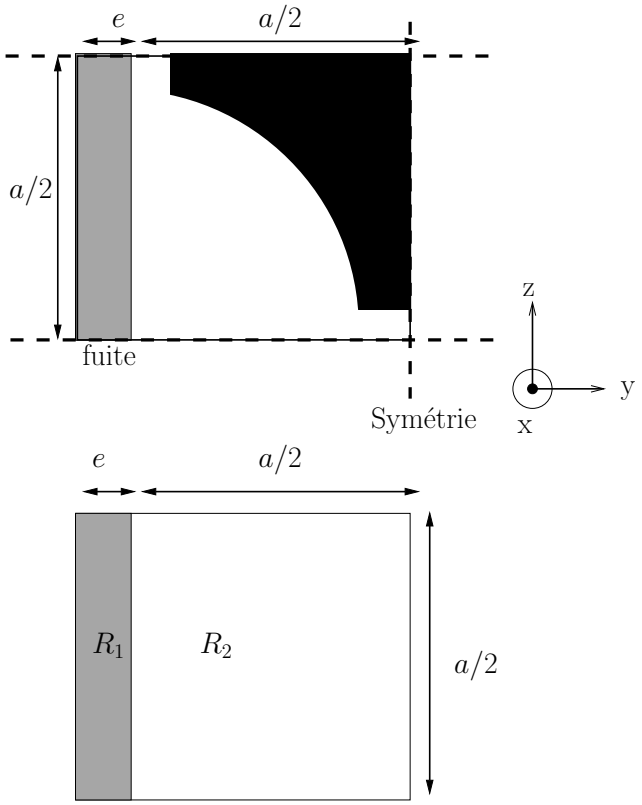


FIGURE 4.2 – Aire considérée pour le rapport de surface dans le cas de l'échantillon OPC L

La fuite ne pouvant donc pas être éliminée complètement, on va essayer dans un premier temps de modéliser l'impact de ce phénomène sur les échantillons réalisés. Sur la figure 4.2 on représente les aires utilisées pour définir les proportions entre la fuite et l'échantillon. La fuite est ajoutée du côté d'une sphère. Ce choix est motivé par un impact plus important de la fuite sur les courbes d'absorption dans ce cas et par le fait que les échantillons présentent des sphères tout autour du cylindre (plus de détails en annexe B). On utilise le même ratio $R_1/R_2 = \Phi_{leak}$ que Cummings (1991) pour réaliser la

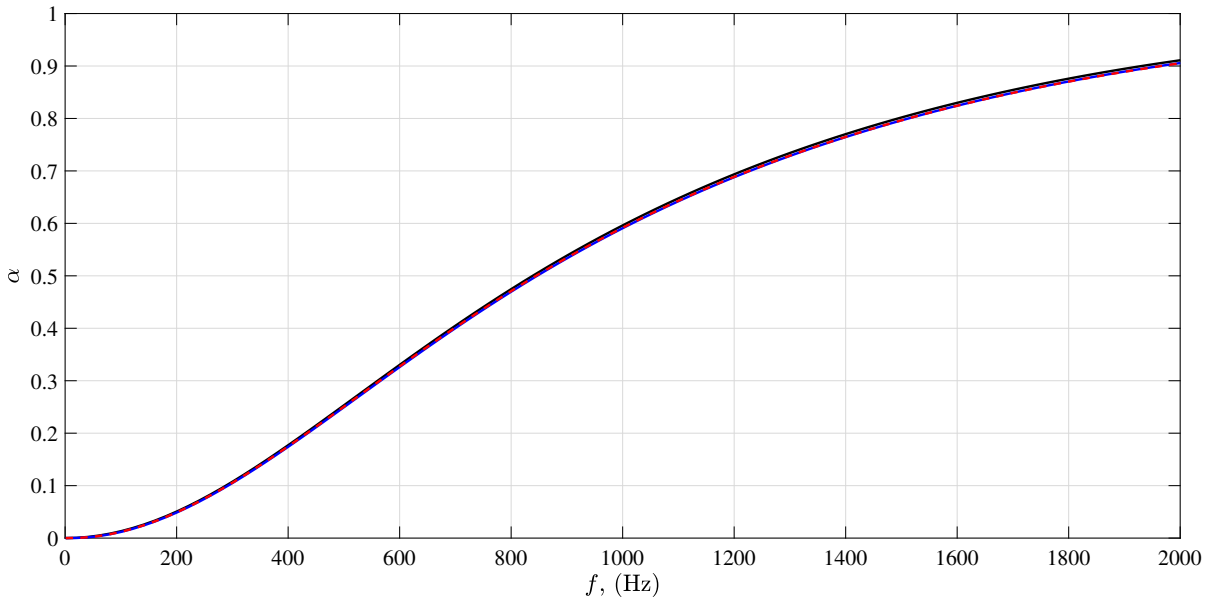


FIGURE 4.3 – Coefficient d'absorption pour un matériau poreux classique (14000 Rayls/m, porosité 0.99 et tortuosité 1) sans fuite (—), la prise en compte d'une fuite($\Phi_{leak} = 0.022$) avec le modèle analytique (—) et un modèle éléments finis avec un fluide équivalent (– –)

comparaison. On considère donc dans un premier temps une épaisseur $e = 0.1$ mm ce qui donne un rapport $\Phi_{leak} = 0.022$. Pour les échantillons imprimés, on réalise une comparaison de 3 méthodes de prise en compte de la fuite :

- Le modèle analytique proposé par Cummings (1991) ;
- Un modèle éléments finis avec l'échantillon décrit par un fluide équivalent, et les équations NSL résolues dans la fuite ;
- Un modèle éléments finis avec l'échantillon décrit à l'échelle microscopique et la résolution des équations NSL dans l'échantillon et la fuite.

Contrairement au modèle analytique, les deux dernières méthodes prennent en compte des dissipations dans la fuite grâce à la résolution des équations NSL. Une attention particulière est apportée à la densité du maillage dans la fuite pour prendre en compte correctement la dissipation.

Le modèle analytique proposé par Cummings (1991) permet de calculer le nombre d'onde k_{eff} dans le matériau en considérant une onde plane et la continuité de la pression et de la vitesse normale à la frontière entre l'échantillon et l'aire de la fuite. Dans le cas des échantillons étudiés, que l'on va considérer isotropes, on a :

$$k_{\text{eff}} = k_c \left(\frac{1 + k_0^2 \rho_e \Phi_{\text{leak}} / (k_c^2 \rho_0)}{1 + \rho_e \Phi_{\text{leak}} / \rho_0} \right)^{1/2}, \tag{4.1}$$

À partir de ce nombre d'onde, on calcule l'impédance de surface modifiée Z_{m} :

$$Z_m = \frac{\omega \rho_e}{k_{\text{eff}}} \frac{\coth(i k_{\text{eff}} e)}{1 + \epsilon(\rho_e/\rho_0 - 1)}, \tag{4.2}$$

avec $\epsilon = \Phi_{\text{leak}}/(1 + \Phi_{\text{leak}})$.

On teste le modèle analytique sur un matériau poreux à structure rigide classique et on compare avec un modèle éléments finis équivalent, résolvant uniquement l'équation de Helmholtz (on ne prend pas en compte de dissipation dans la fuite). La proportion de la fuite choisie pour le calcul est du même ordre de grandeur que celle mesurée sur les échantillons imprimés, mais elle est plus petite que

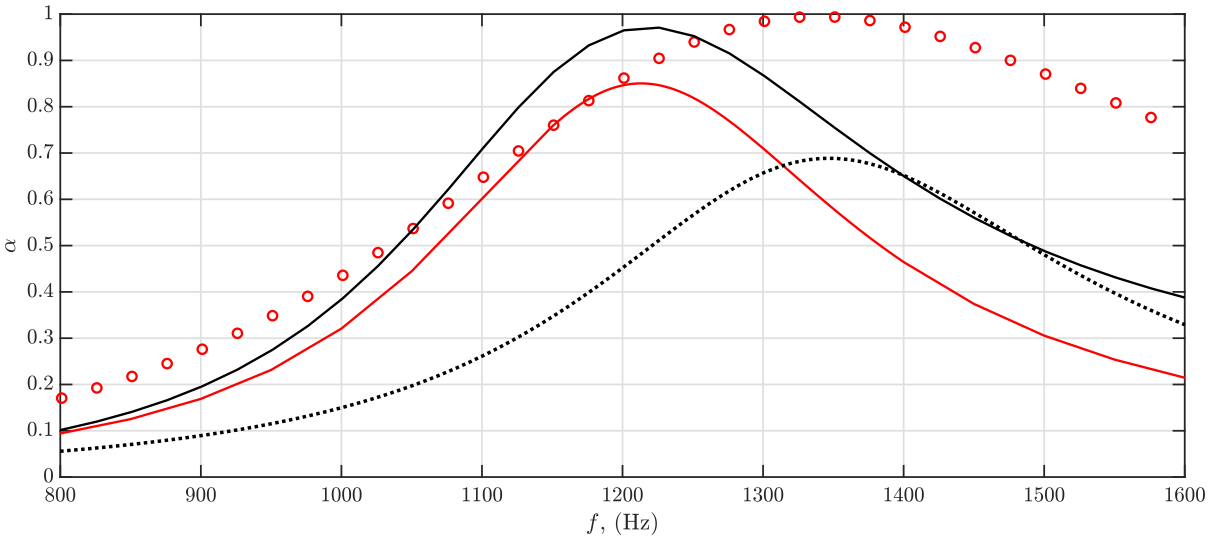
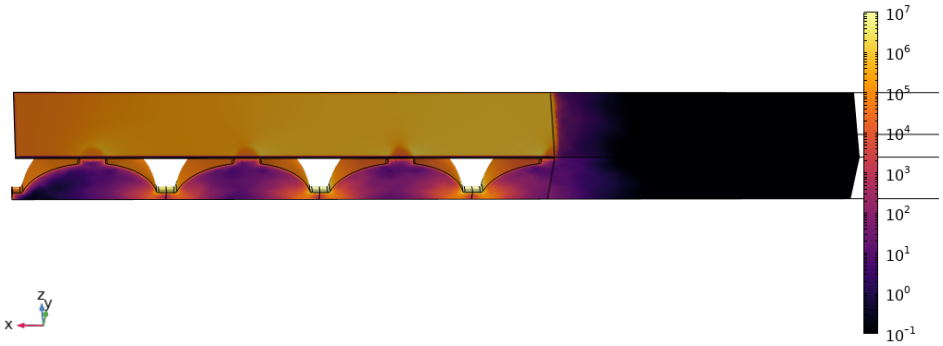


FIGURE 4.4 – Coefficient d'absorption pour l'approche microscopique sans fuite (—), la prise en compte d'une fuite($\Phi_{\text{leak}} = 0.022$) avec le modèle analytique de Cummings(·····) avec un modèle fluide équivalent éléments finis (—) et avec l'approche microscopique (○)

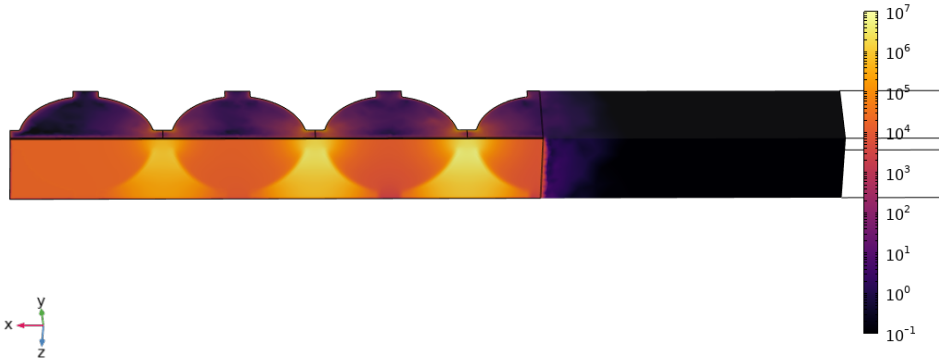
celles étudiées par Cummings (1991). La comparaison des coefficients d'absorption est proposée sur la figure 4.3. Nous observons un effet très faible de la fuite sur le coefficient d'absorption. De plus, le modèle analytique et le modèle éléments finis utilisant un fluide équivalent donnent des résultats similaires.

Le résultat des modélisations d'une fuite localisée sur le contour de l'échantillon imprimé est présenté sur la figure 4.4. Le modèle analytique donne un pic d'absorption fortement décalé vers les hautes fréquences. On observe également une forte baisse de l'amplitude du pic d'absorption. Les modèles résolvant les équations NSL dans la fuite et décrivant donc des dissipations thermovisqueuses donnent des résultats très différents. Il y a une augmentation de presque 20% de l'amplitude du pic d'absorption par rapport au cas sans fuite et 30% par rapport au cas de la fuite avec la résolution analytique. On remarque qu'il y a une différence importante entre les coefficients d'absorption obtenus quand l'échantillon est représenté par un fluide équivalent et quand il est représenté à l'échelle microscopique. L'hypothèse pour expliquer cette différence est un couplage important entre la fuite et les résonateurs, qui ne peut être pris en compte qu'avec une modélisation à l'échelle microscopique. On observe sur la figure 4.5 le champ de dissipation obtenu avec et sans la fuite à la fréquence du maximum d'absorption. On étudie le cas d'une fuite côté canal, une fuite côté sphère et le cas de référence. On remarque qu'il y a une dissipation importante dans la fuite dans les deux configurations : de tels niveaux de dissipation ont nécessairement un impact sur le comportement de l'échantillon.

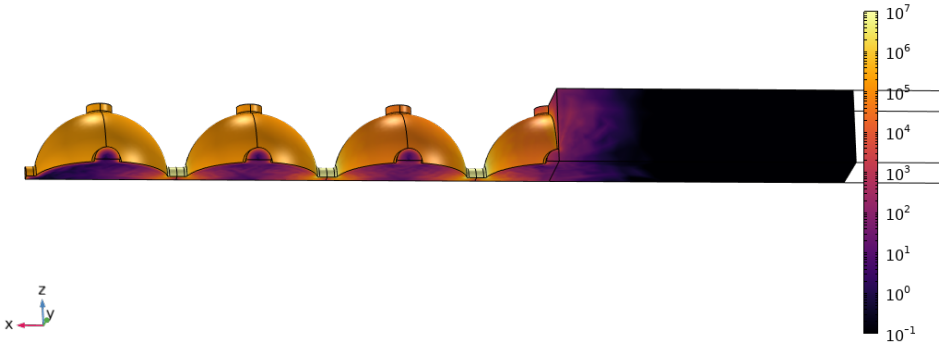
Afin d'étudier le rôle de la taille de la fuite, on réalise une étude paramétrique en faisant varier le rapport entre la fuite et la surface de l'échantillon. À cette fin, on modélise 5 cas avec un Φ_{leak} allant de 0.0022 à 0.044 (cf. tableau 4.1). Sur les deux graphiques de la figure 4.6, on représente d'une part le maximum du coefficient d'absorption en fonction du rapport de surface Φ_{leak} et d'autre part la fréquence de ce maximum d'absorption. Le carré noir placé en abscisse 0 correspond au cas sans fuite. Les carrés rouges correspondent aux 5 cas modélisés pour cette étude paramétrique. On observe une augmentation de la performance avec l'ajout d'une fuite. Au-delà d'une certaine proportion (0.015) les performances commencent à baisser. À mesure que le taux de fuite augmente la fréquence du maximum d'absorption commence par baisser légèrement puis augmente. Notons que nous n'avons



(a) fuite du côté du canal



(b) fuite du côté de la sphère



(c) cas de référence

FIGURE 4.5 – Champ de dissipation (W/m^3) à la fréquence maximale d'absorption pour un cas sans fuite (c) et un cas avec une fuite placée du côté de la sphère (b) ou du côté du canal (a)

TABLE 4.1 – Conversion entre l'épaisseur e utilisée par le modèle et le rapport de surface Φ_{leak}

e (mm)	Φ_{leak}
0.2	0.044
0.1	0.022
0.075	0.0167
0.05	0.0111
0.01	0.0022

pas observé expérimentalement le décalage du pic vers les basses fréquences, prédit pour le cas de fuite très faible.

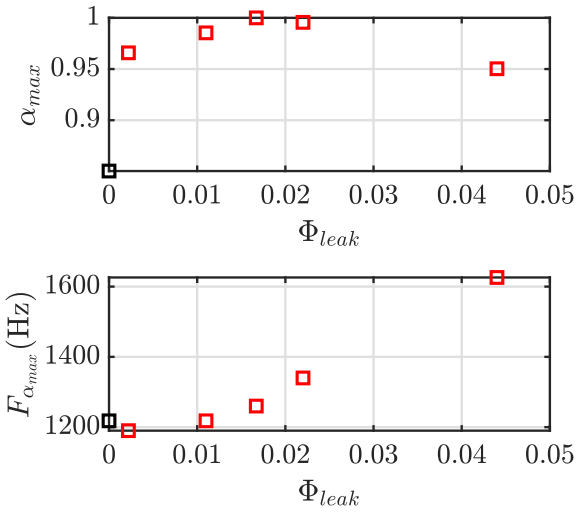


FIGURE 4.6 – Maximum du coefficient d'absorption et fréquence de ce maximum pour le cas de référence (□) et pour différents rapports de surface de fuite (□)

Comparaison avec les résultats expérimentaux

Pour compléter ces comparaisons de modèles avec l'expérience, on considère maintenant les trois séries d'échantillons qui ont été réalisées. En utilisant les diamètres externes indiqués sur la figure 2.16 (qui compare les diamètres moyens obtenus pour les trois séries réalisées) on obtient les porosités de surface Φ_{leak} de la même manière que pour les modèles. L'étendue des porosités correspondant aux séries A, B et C est couverte par l'étude paramétrique numérique de la fuite (cf. tableau 4.2).

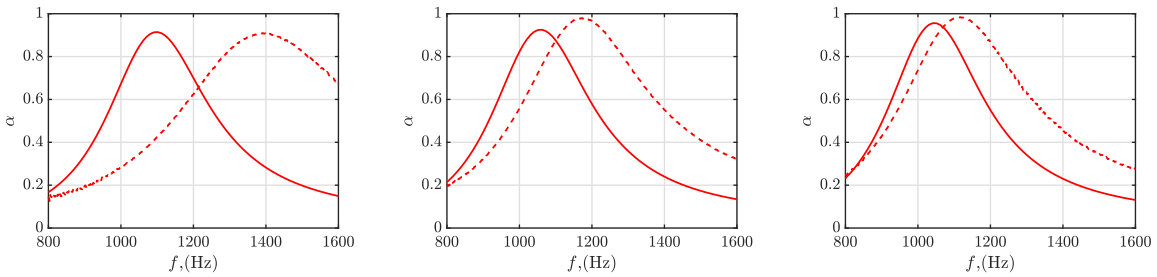
On cherche à déterminer si le phénomène observé en modélisant les différents échantillons est également observable expérimentalement. Les dimensions internes obtenues sur les différentes séries ne sont pas les mêmes en raison des variations dans le réglage de l'imprimante ou aux protocoles de post traitement des pièces. On a vu dans le chapitre 2 que la configuration Clear25 permet d'obtenir les échantillons présentant le moins de variabilité interne. On choisit donc cette configuration pour étudier en particulier l'effet de fuite acoustique. On cherche à qualifier un écart avec les comportements modélisés en prenant en compte les dimensions mesurées. Ainsi sur la figure 4.7 on compare la moyenne des coefficients d'absorption mesurés par série avec la moyenne des coefficients d'absorption modélisés avec les dimensions internes mesurées pour chaque série. Dans le chapitre 2 on a pu remarquer que

malgré l'attention qui a été portée à la réalisation des dimensions, internes ou externes, certains échantillons des configurations Clear25 de chaque série pouvaient s'écarter notablement de la tendance moyenne, particulièrement en terme de diamètre extérieur. Pour tenter de mettre en évidence une tendance fiable on a choisi de ne pas tenir compte des échantillons en question (C252A, C254A, C251B, C254C, C255C) dans les moyennes des résultats expérimentaux et pour les modélisations. On observe sur la figure 4.7 une différence de moins en moins importante entre la prédiction et la mesure lorsque l'écart entre le diamètre externe et le diamètre cible diminue. La tendance observée pour l'étude paramétrique correspond relativement bien aux résultats expérimentaux. La fréquence du pic d'absorption est décalée vers les hautes fréquences quand la proportion de la fuite augmente. Et à partir d'une certaine proportion de fuite, l'absorption qui a augmenté diminue comme le montrent les courbes correspondant à la série A.

À partir de ces résultats focalisés sur l'étude de la fuite, nous avons concentré notre étude sur la série C pour observer l'effet de la variabilité des dimensions internes des échantillons sur le coefficient d'absorption.

TABLE 4.2 – Conversion entre le diamètre externe moyen mesuré de chaque série et le rapport de surface Φ_{leak}

Série	**Diamètre moyen réel (mm)**	Φ_{leak}
A	28.25	0.0511
B	28.85	0.0103
C	28.91	0.0062



(a) Série A (b) Série B (c) Série C

FIGURE 4.7 – Moyennes des coefficients d'absorption modélisés (trait plein) et expérimentaux (tirets) pour la configuration Clear25 de chaque série

4.2.2 Variabilité des dimensions internes

Dans un premier temps, pour observer les effets de la variabilité interne des échantillons, on se propose d'encadrer les comportements acoustiques possibles en prenant en compte les mesures dimensionnelles réalisées. Pour cela, on relève les dimensions minimales et maximales des diamètres des sphères et des diamètres des canaux mesurés sur les échantillons de la configuration considérée. On ne considère que les dimensions des faces A. En effet, on a vu dans la section 2.4.2 que les échantillons de la série C présentaient des dimensions très différentes entre les deux faces, les dimensions en question sont présentées en annexe A. De plus, dans le cas d'une étude des échantillons présentant la face A, les canaux de la face B étant placés contre la paroi rigide, on estime que ces derniers n'ont pas d'influence sur l'absorption acoustique.

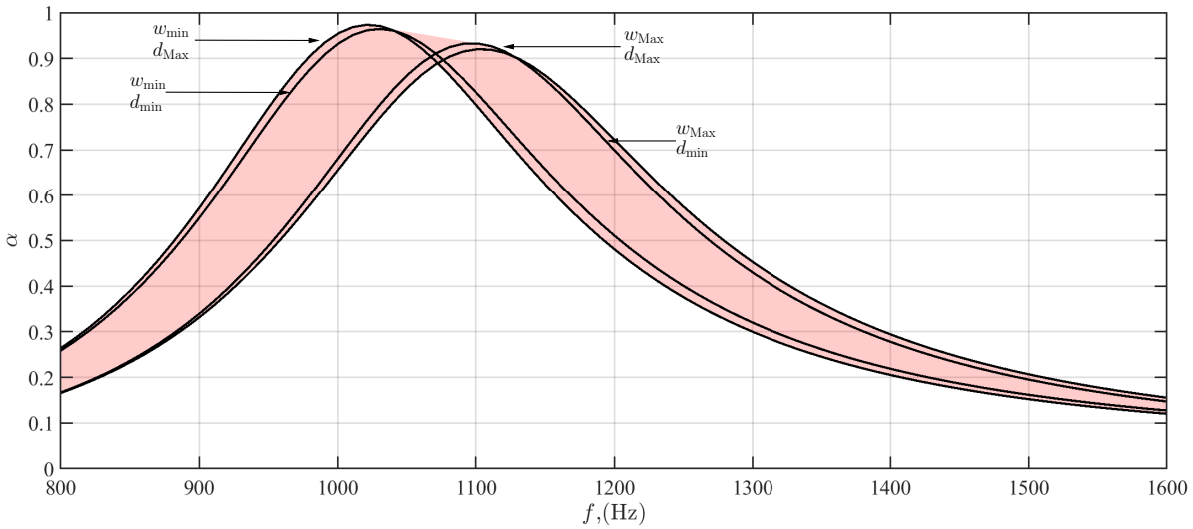


FIGURE 4.8 – Étendue des coefficients d'absorption obtenus en modélisant les dimensions minimales ($w_{\min}$ le diamètre du canal et $d_{\min}$ le diamètre de la sphère) et maximales (w_{Max} le diamètre du canal et d_{Max} le diamètre de la sphère) mesurées pour la configuration Clear25

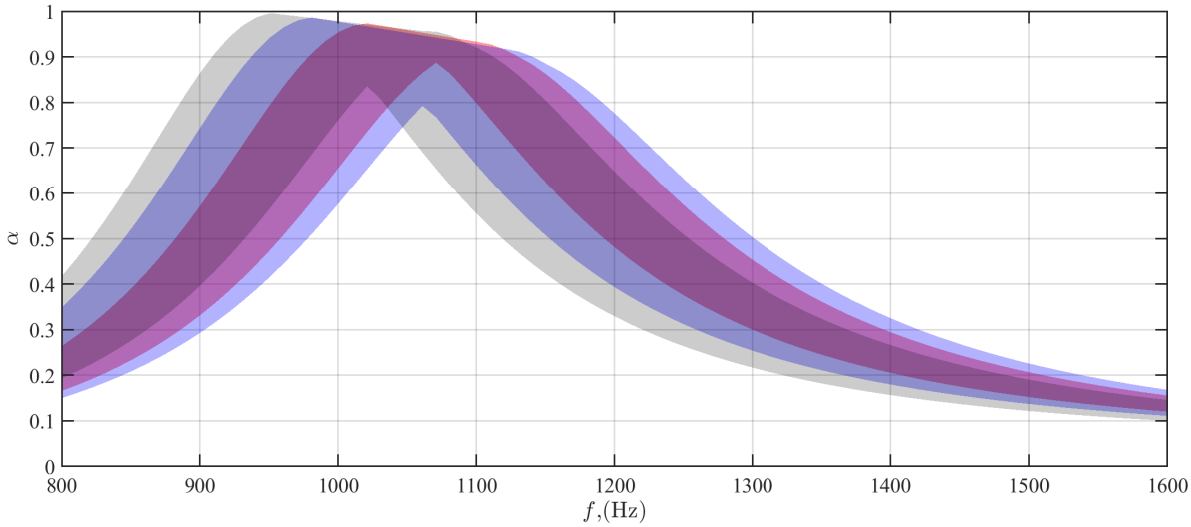


FIGURE 4.9 – Étendue des coefficients d'absorption obtenus en modélisant les dimensions minimales et maximales mesurées pour chaque configuration d'échantillon Clear25 (violet), Clear50 (bleue) et Black25 (gris)

Avec ces 2×2 valeurs, on modélise le coefficient d'absorption de 4 échantillons par configuration ce qui nous permet de réaliser l'encadrement. L'enveloppe de cet encadrement est présentée sur la figure 4.8 pour la configuration Clear25. Comme on peut le voir sur la figure, le gabarit permet d'encadrer les coefficients d'absorption possibles entre ces courbes correspondant à des dimensions maximales ou minimales. Sur cette figure les deux couples de courbes correspondent aux deux diamètres de sphères combinés à un diamètre de canal. On voit sur cette modélisation que le diamètre du canal a un effet prédominant sur le comportement des échantillons.

Sur la figure 4.9, on réalise la comparaison entre les encadrements présentés pour les 3 configurations de la série C. On remarque que le gabarit a l'étendue la plus importante pour la configuration Black25 et la plus petite pour la Clear25. La variabilité des dimensions mesurées sur les échantillons

a un effet visible sur la modélisation du coefficient d'absorption de ces échantillons.

Cependant, les modélisations utilisent les valeurs extrêmes mesurées sur tous les échantillons, par configuration. L'étendue ainsi obtenue est à priori bien plus large que pour un échantillon réel qui, même s'il possède un canal ou une sphère avec un diamètre éloigné de la moyenne, en présente de nombreux autres dont les dimensions sont compris dans les écart-types présentés au chapitre 2. Les différentes étendues ainsi calculées devraient théoriquement couvrir l'ensemble des mesures de coefficients d'absorption de tous les échantillons de chaque configuration.

Sur la figure 4.10, on compare l'étendue théorique avec la mesure pour la configuration Clear25. Les coefficients d'absorption des 6 échantillons ne rentrent pas dans le gabarit. En effet, la fréquence du pic d'absorption de tous les éléments est situé à de plus hautes fréquences. L'amplitude des pics d'absorption est par ailleurs plus importante. On note cependant que la dispersion des courbes expérimentales est comparable à l'étendue du gabarit obtenue par la modélisation. Ainsi même dans le cas des échantillons présentant le diamètre le mieux adapté au dispositif expérimental (c'est-à-dire présentant le moins de fuite), la prise en compte des variations de dimensions n'est pas suffisante pour faire correspondre la prédiction avec la mesure.

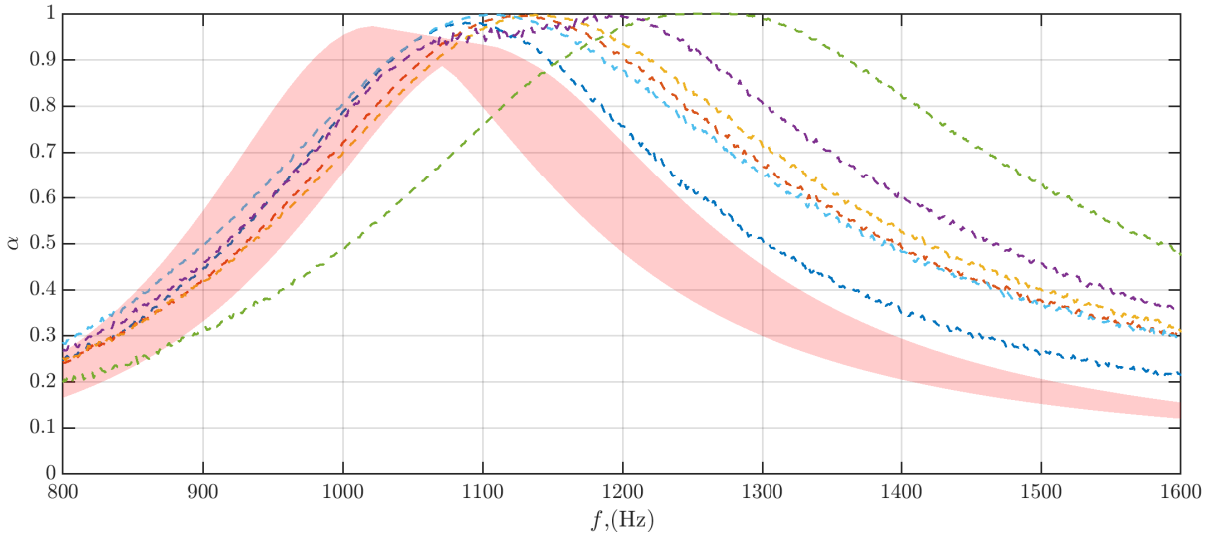


FIGURE 4.10 – Étendue des coefficient d'absorption obtenus en modélisant les dimensions minimales et maximales mesurées sur la configuration Clear25 (surface rouge), et absorptions obtenues expérimentalement pour les échantillons de la série C251C (—) C252C (—) C253C (—) C254C (—) C255C (—) C256C (—)

On peut remarquer le comportement particulier des échantillons C254C et C255C. Le décalage plus important vers les hautes fréquences de l'échantillon C255C est expliqué par son diamètre extérieur plus petit que les autres échantillons (cf. tableau 2.14). Le diamètre extérieur de l'échantillon C254C est également plus petit, mais ce constat ne suffit a priori pas à expliquer à lui seul le comportement de cet échantillon. On a remarqué à la section 2.4.3 que le diamètre extérieur de cet échantillon présente une irrégularité du diamètre certainement due à une mauvaise position dans la mâchoire du tour mécanique. Ceci pourrait expliquer la double résonance (pics à 1100 et 1200 Hz) observée.

On cherche néanmoins à savoir si on est capable d'expliquer la dispersion, ou si sur un panel d'échantillons présentant le moins de fuites possible, la prise en compte des dimensions internes de l'échantillon permet de faire le lien avec la variation des coefficients d'absorption. On choisit les échantillons de la série C et on prend la configuration Clear25 utilisée sur la figure 4.10. On a vu que les échantillons C254C et C255C présentaient de grandes différences dues à la dimension externe des

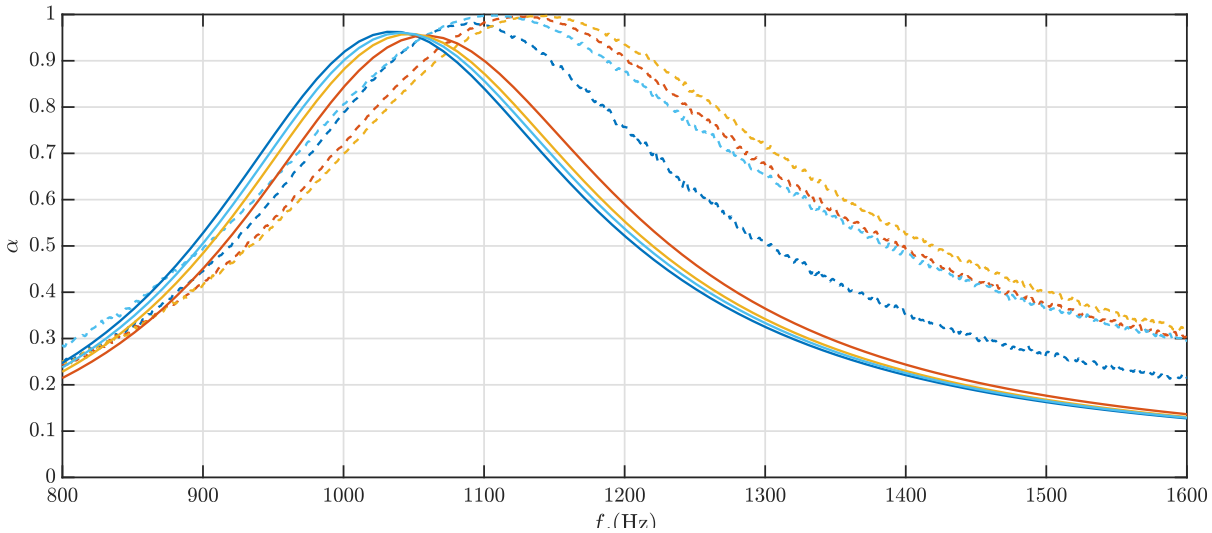


FIGURE 4.11 – Coefficient d'absorption pour les 6 échantillons de la configuration Clear25 de la série C : C251C (– –) C252C (– –) C253C (– –) C256C (– –) comparé aux modélisations JCAPL avec les dimensions mesurées C251C (—) C252C (—) C253C (—) C256C (—)

échantillons, c'est pourquoi on les exclut de cette comparaison. On modélise les échantillons restants avec un fluide équivalent en prenant la moyenne des dimensions mesurées sur la face A (cf. annexe A).

La comparaison entre les courbes expérimentales et les courbes obtenues par cette modélisation est présentée sur la figure 4.11. Là également la prise en compte des dimensions ne permet pas de faire correspondre les courbes de prédiction à la mesure. On est cependant capable d'observer les tendances obtenues expérimentalement. Le pic mesuré pour l'échantillon C251C est bien le pic observé aux plus basses fréquences, suivi du C256C. Bien que la différence de diamètre externe entre les deux échantillons C252C et C253C soit petite, cet écart a un effet plus important que les différences des dimensions internes. L'effet est toutefois difficile à prédire même si les fuites tendent à décaler le pic d'absorption vers les hautes fréquences et à augmenter l'absorption.

4.2.3 Modélisation d'une fuite et des variations dimensionnelles pour retrouver un comportement acoustique mesuré

On essaie de retrouver la courbe d'absorption expérimentale, en considérant conjointement la présence de la fuite et les dimensions des diamètres des canaux et des sphères. On réalise un modèle numérique à l'échelle microscopique en se basant sur les dimensions mesurées pour l'échantillon Clear251B. Pour cela, on prend en compte la moyenne des dimensions mesurées pour les diamètres des canaux et des sphères de l'échantillon ainsi qu'une estimation d'une fuite selon le diamètre externe. On utilise le même rapport Φ_{leak} entre la section de l'échantillon et la section de la fuite (porosité de surface) pour modéliser une lame d'air en conservant ce rapport.

Sur la figure 4.12, on compare le coefficient d'absorption mesuré (tirets colorés) avec ceux issus de la modélisation. On modélise un échantillon avec les dimensions mesurées par l'approche fluide équivalent (trait plein coloré) et un échantillon à l'échelle microscopique avec les dimensions mesurées prenant en compte une fuite (ligne pointillée noir). Les résultats de la mesure de l'échantillon C251B présentent un réel écart par rapport à la prédiction. La modélisation des dimensions réelles de l'échantillon ne permet pas vraiment d'obtenir une meilleure prédiction du comportement acoustique,

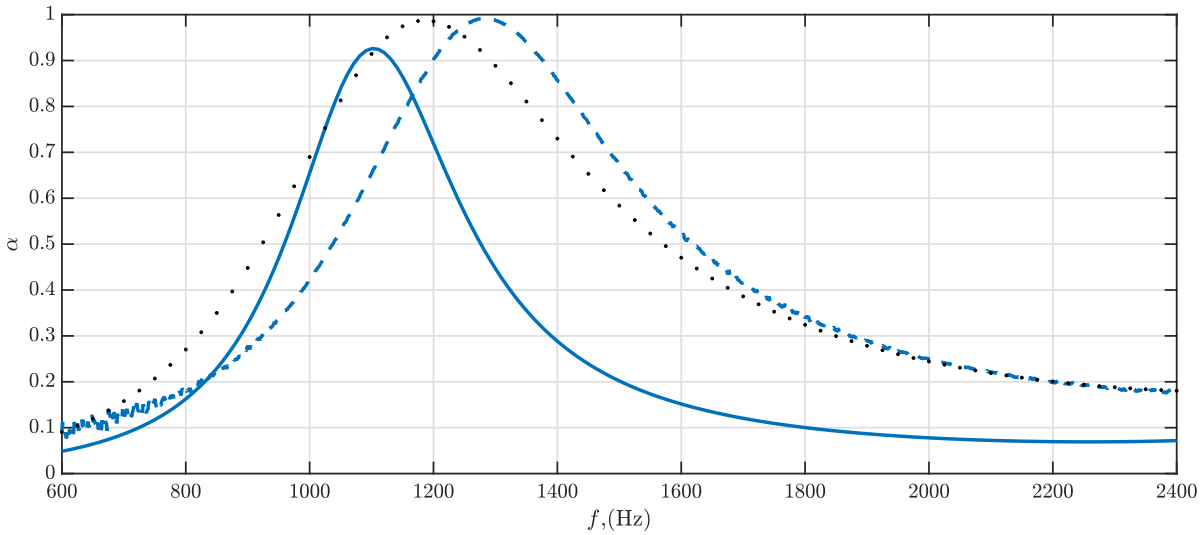


FIGURE 4.12 – Coefficient d'absorption, résultats expérimentaux pour l'échantillon C251B (– –), modélisation des dimensions réelles (JCAPL) (—) sans prise en compte d'une fuite, et modélisation de l'échantillon avec les dimensions corrigées et les fuites (NSL) (•)

en particulier pour la fréquence du pic d'absorption. La prise en compte de la fuite et des dimensions permet une meilleure prédiction.

4.2.4 Conclusion sur l'impact acoustique de la variabilité des échantillons

Comme cela a été décrit la modélisation de la fuite est simplifiée. L'évaluation de sa forme réelle serait nécessaire pour modéliser les phénomènes de dissipation ayant lieu dans des régions de formes et de tailles variables. Il est possible d'avoir un aperçu des effets de fuites grâce à ces modélisations, mais il apparaît nécessaire de les limiter lors des expériences. Dans cette section sur l'impact de la variabilité des échantillons sur les performances acoustiques, on a observé un impact prédominant de la qualité de l'adaptation de l'échantillon au diamètre du tube. L'impact est très important même pour des fuites minimes : ce paramètre ne peut pas être négligé. Une des raisons rendant ce problème de fuite inévitable est la grande rigidité du squelette. Contrairement à des échantillons en mousse ou fibreux, on ne peut pas insérer dans le tube un échantillon de diamètre légèrement supérieur en comptant sur l'élasticité de la structure. On peut également souligner que l'étude portant sur notre géométrie peut être étendue à tous les échantillons réalisés en impression 3D actuellement. Une solution qui a été discutée, mais n'a pas pu être mise en place est la réalisation d'une pièce comprenant l'échantillon inséré dans un cadre rigide qu'il faudrait raccorder au tube d'impédance. Certains problèmes de réalisation se poseraient, comme l'évacuation de la résine. On peut aussi imaginer s'affranchir du problème de fuite en changeant la configuration de la caractérisation comme, par exemple, l'absorption par une surface dans une chambre réverbérante (Kamrul *et al.*, 2021).

4.3 Échantillons de différentes géométries

Dans cette section, on présente les résultats obtenus avec les différentes géométries réalisées. Ces géométries ont été présentées au chapitre 2.

- une géométrie OPC avec un set de dimensions réalisées par Zieliński *et al.* (2020a) ;
- une géométrie OPC "Large" étudié précédemment ;
- la géométrie cubique ;
- la géométrie double réseau (DNN).

4.3.1 OPC

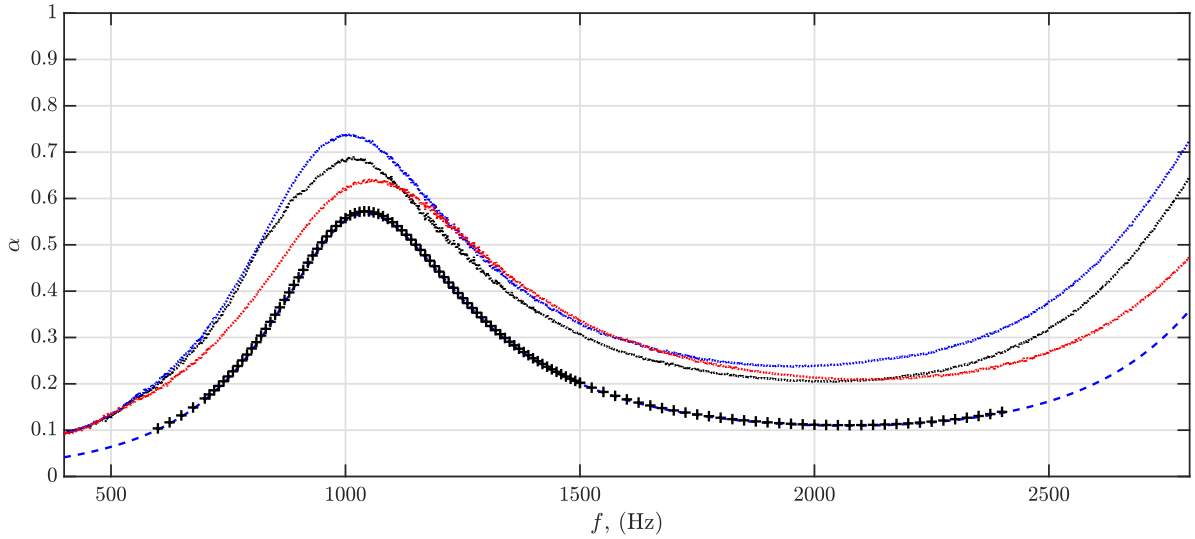


FIGURE 4.13 – Coefficients d'absorption de la géométrie OPC pour la modélisation NSL (+), la modélisation fluide équivalent (– –) et la mesure pour des échantillons réalisés avec différentes techniques d'impression : encollage de poudre (·····), SLA (·····) et impression métallique (·····)

La première géométrie est celle utilisée par Zieliński *et al.* (2020a). Les dimensions sont : pour la taille de la cellule $a = 5$ mm, pour le diamètre de la sphère $d = 4.5$ mm et pour le diamètre du canal $w = 2$ mm. Les échantillons dont on a mesuré les caractéristiques sont des échantillons issus de l'étude interlaboratoires de Zieliński *et al.* (2020a). L'objectif de cette comparaison est d'une part de valider la méthode et les moyens de mesure, d'autre part de s'assurer de la capacité de prédiction de nos modèles. Les échantillons mesurent 60 mm d'épaisseur et seule la face A est présente des deux côtés des échantillons.

Sur la figure 4.13 on compare les courbes d'absorption obtenues à partir de différentes méthodes de réalisations. Les mesures, bien que d'amplitudes différentes sont cohérentes par rapport aux résultats rapportés dans Zieliński *et al.* (2020a). Elles sont comparées aux courbes obtenues avec l'approche microscopique et l'approche fluide équivalent. Ici, les deux approches théoriques fournissent des prédictions quasiment identiques et la fréquence du pic d'absorption est bien prédite. Les différences observées entre les mesures et la prédiction sont similaires aux différences constatées dans la partie précédente sur les fuites : l'amplitude des pics d'absorption est moins importante. En effet les échantillons glissent facilement dans le tube d'expérimentation.

4.3.2 OPC Large

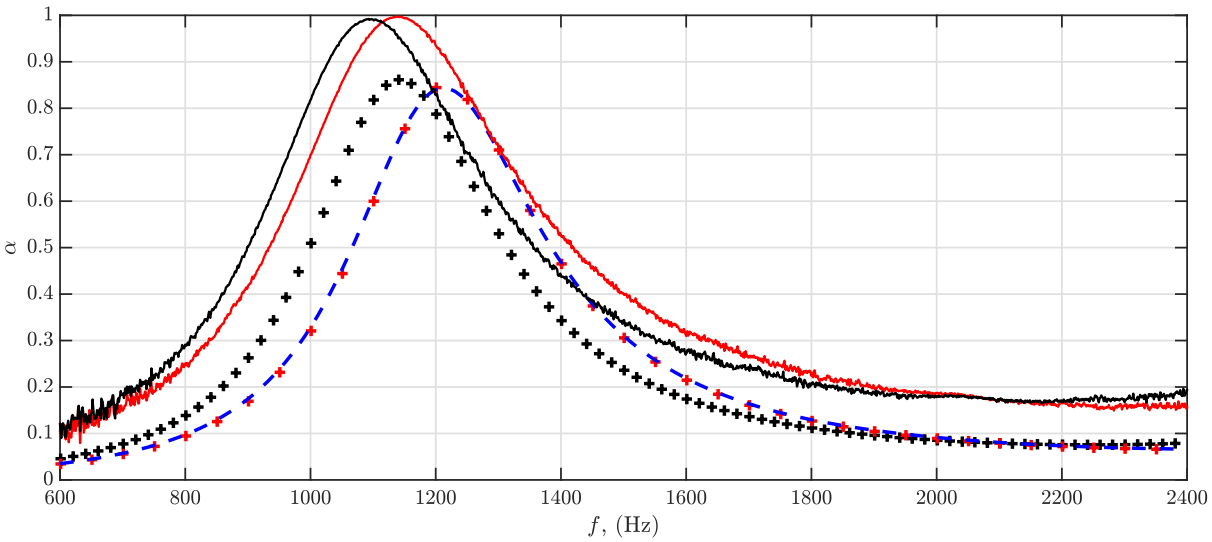


FIGURE 4.14 – Coefficients d'absorption de la géométrie OPCL, pour la modélisation NSL, - face A (+) et face B (+) - et la modélisation fluide équivalent (– –) et la mesure pour la face A (▬) et B (—)

On revient sur la géométrie qui a servi à l'étude dimensionnelle et on compare maintenant la mesure de l'absorption obtenue pour chacune des deux faces A et B avec celle obtenue pour la modélisation fluide équivalent et pour la modélisation microscopique également pour les deux faces. L'échantillon utilisé pour la mesure est l'échantillon C253C. Cette comparaison est présentée sur la figure 4.14. Les comparaisons des résultats de modélisation ont été réalisées au chapitre 3. La différence de comportement entre les faces A et B, mise en évidence par la modélisation, est confirmée par l'expérience. Les différences observées entre la prédiction et l'expérience ont été discutées dans la section précédente. Cependant, la différence attendue entre les deux faces est expérimentalement atténuée par les effets dimensionnels évoqués au début de ce chapitre. Comme cela a été montré la prédiction peut être améliorée en prenant en compte différentes corrections.

4.3.3 Géométrie cubique

On s'intéresse maintenant à la géométrie cubique avec les dimensions présentées au chapitre 2. Les résultats expérimentaux sont présentés sur la figure 4.15 et sont comparés avec les deux approches théoriques. Comme pour les géométries précédentes la différence entre les deux faces est visible, mais moins prononcée que ce que la modélisation prédit.

On a également modélisé le comportement acoustique par un fluide équivalent en prenant en compte les dimensions mesurées sur l'échantillon. Les résultats de ce modèle corrigé sont comparés aux résultats précédents sur la figure 4.16. Comme pour les géométries OPCL, l'utilisation des dimensions réelles permet de rapprocher la prédiction du comportement acoustique mesuré, sans toutefois le simuler parfaitement. L'augmentation de l'amplitude du pic d'absorption peut être lié à une fuite autour de cet échantillon.

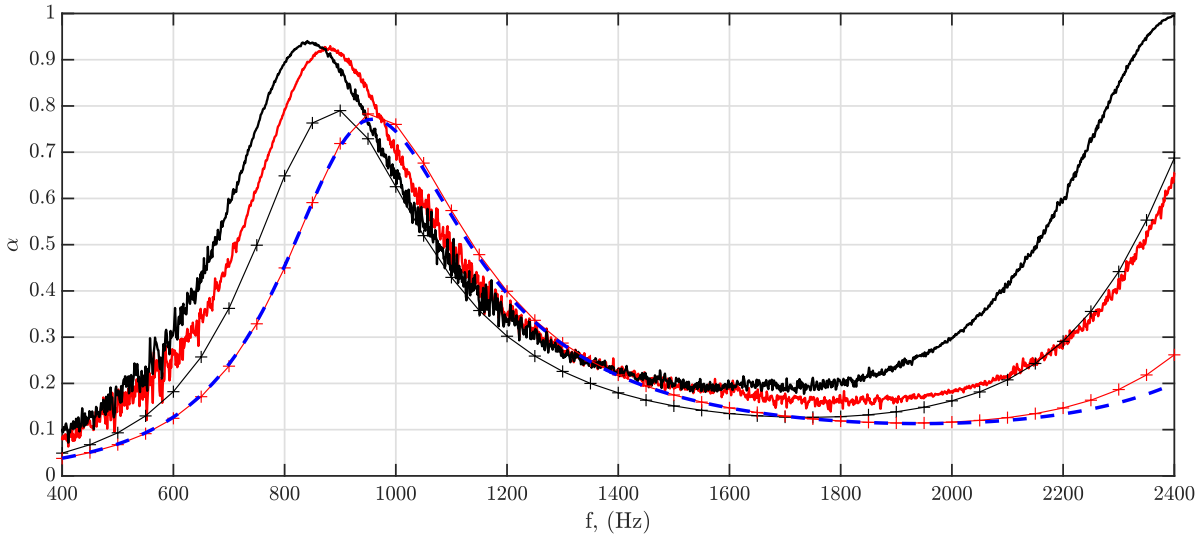


FIGURE 4.15 – Coefficients d'absorption de la géométrie cubique, pour la modélisation NSL, la face A (+) et B (+) et la modélisation fluide équivalent (– –) et la mesure de la face A (▬) et B (▬)

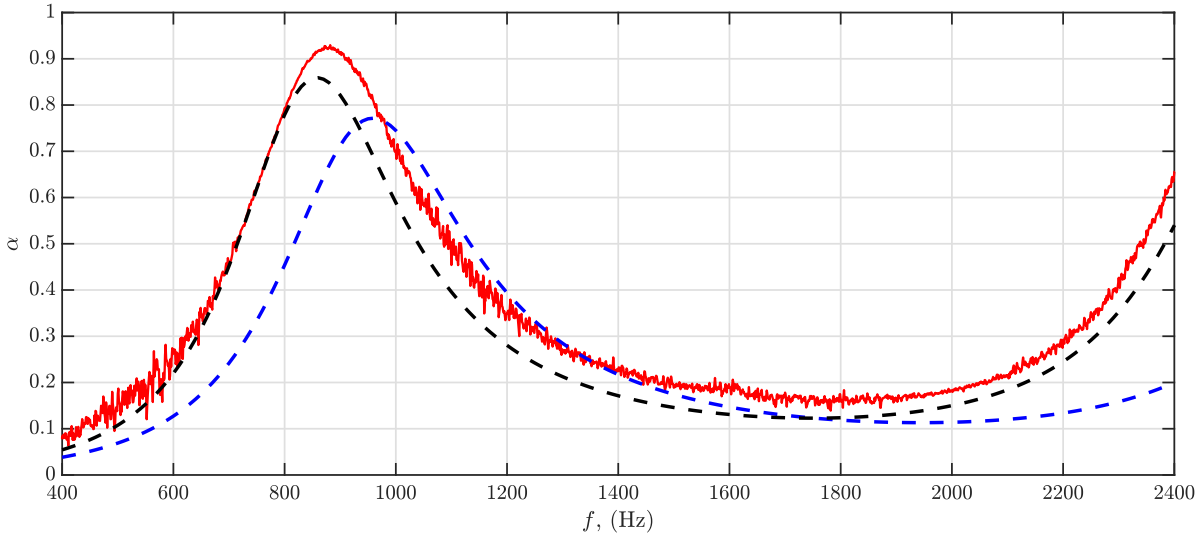


FIGURE 4.16 – Coefficients d'absorption de la géométrie cubique pour la modélisation fluide équivalent (– –) et la modélisation prenant en compte les dimensions mesurées (– –) et la mesure de la face A (▬)

4.3.4 Géométrie DNN

On s'intéresse maintenant au comportement de la géométrie double réseau. Comme cela a été présenté au chapitre 3, l'approche fluide équivalent n'est pas réellement adaptée pour décrire le comportement de cette géométrie à double résonance. On réalise sur la figure 4.17 la comparaison entre les coefficients d'absorption mesurés pour la face A et la face B et la modélisation microscopique pour les deux faces. On obtient bien expérimentalement les deux pics d'absorption que l'on prévoyait avec les modèles. Comme pour les géométries précédentes, on observe expérimentalement un étalement de la réponse acoustique ce qui a tendance, pour cette géométrie, à fusionner les deux pics d'absorption attendus. Ce phénomène d'étalement est particulièrement visible pour la face A, comme cela a été discuté au chapitre 4 : les deux pics sont plus proches que pour la face B et donc moins distincts l'un

de l'autre.

Pour la réalisation de ces mesures, il a été important de s'assurer que les deux réseaux ne communiquent pas. Cela implique une attention particulière portée aux dimensions extérieures et l'utilisation de bande adhésive pour entourer l'échantillon et isoler au mieux les deux réseaux l'un de l'autre afin d'éviter toute communication par les côtés de l'échantillon. La minutie avec laquelle la bande adhésive est posé pour éviter les potentiels plis créés dans le tube peut contribuer aux écarts observés avec la prédiction.

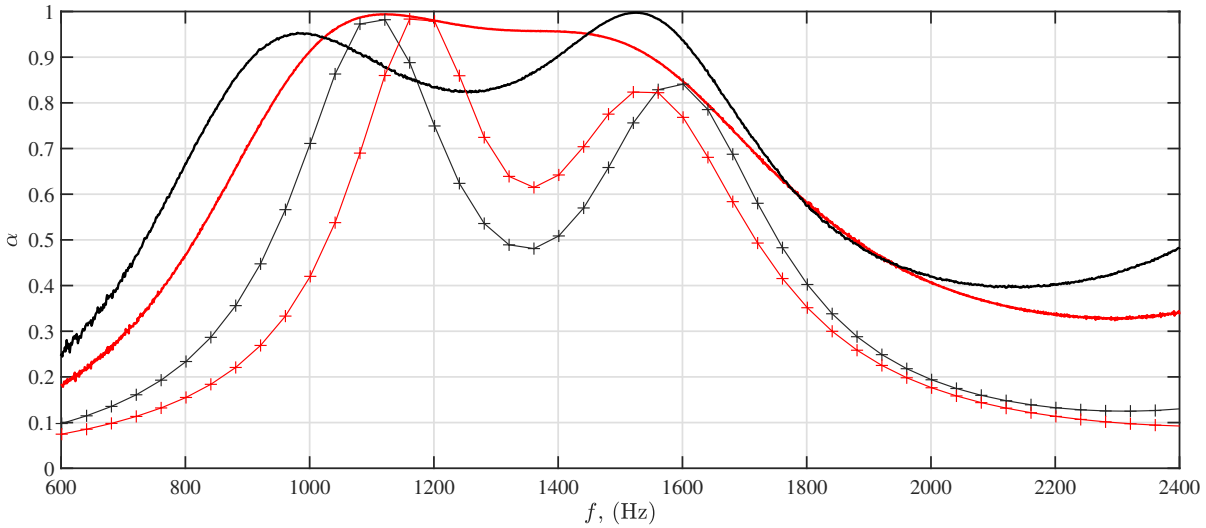


FIGURE 4.17 – Coefficient d'absorption de la géométrie double réseau pour NSL A (+) B (+) et la mesure de la face A (—) et B (—)

4.3.5 Conclusions sur les différentes géométries

Tout d'abord, nous avons mesuré et modélisé les échantillons de l'étude interlaboratoires de Zieliński *et al.* (2020a). Les résultats que nous avons obtenus sont en accord avec ceux de la publication et la comparaison avec les approches NSL et fluide équivalent est satisfaisante.

On retrouve pour la géométrie OPCL la différence de comportement entre la face A et la face B en modélisation et en mesure. Le même constat est fait dans le cas des deux autres géométries cubique et double réseau. Les prédictions sont en bon accord pour les deux géométries présentant un seul réseau et la prise en compte des dimensions réelles permet d'approcher le comportement des échantillons sans toutefois expliquer toutes les différences. Nous avons vu que ces différences étaient certainement dues à des fuites, même très petites, autour de l'échantillon. Finalement, on observe expérimentalement deux pics pour la géométrie double réseau. Le comportement est cohérent avec la prédiction. Il faut noter qu'il est nécessaire d'isoler physiquement les deux réseaux l'un de l'autre pour obtenir ces deux pics.

Chapitre 4 — Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats de mesures acoustiques réalisées sur un large panel d'échantillons reprenant la géométrie de référence (OPC L) ont été présentés. La variabilité de comportement acoustique entre échantillons et les écarts avec la prédiction ont été décrits. Un lien clair existe entre la présence de fuites dues à des échantillons trop petits pour le tube expérimental et un fort écart entre la prédiction et la mesure. La variabilité entre les échantillons mieux adaptés au tube peut être liée à la variabilité des dimensions des géométries internes. Nous avons ensuite étudié des échantillons plus complexes dont la géométrie a été décrite au chapitre 2 et dont les performances acoustiques ont été prédites au chapitre 3. Les résultats montrent une bonne capacité de prédiction compte tenu de l'étude de variabilité réalisée en première partie de chapitre. Le cas de l'incidence normale nous a permis d'évaluer les échantillons et d'étudier les facteurs de variation en vue de réaliser l'étude en paroi de conduit.

Chapitre 5

Caractérisation en paroi de conduit

Résumé

À partir de l'étude des modélisations réalisée au chapitre 3 et de la comparaison avec l'expérience du chapitre 4, toutes les deux réalisées en incidence normale, nous proposons dans ce chapitre d'étudier les comportements acoustiques des échantillons des différentes géométries en paroi de conduit. Après une présentation du dispositif expérimental et des modèles réalisés les résultats obtenus sont comparés. L'approche fluide équivalent permet de reproduire relativement fidèlement les résultats obtenus avec la simulation directe pour les géométries présentant un réseau unique. Les résultats expérimentaux divergent, eux, plus ou moins en fonction de la géométrie étudiée. La variation des dimensions géométriques est prise en compte dans les modèles, mais ne permet pas d'approcher les mesures acoustiques obtenues. La prise en compte d'une fuite modélisée avec la résolution des équations de NSL permet d'expliquer les mesures réalisées pour la géométrie OPCL et la géométrie cubique.

Sommaire

5.1 Introduction 86
5.1.1 Motivation du choix du cas d'étude 86
5.1.2 Dispositif expérimental 88
5.1.3 Adaptation à la veine des échantillons imprimés 91
5.2 Modélisation de la veine d'essai 91
5.2.1 Présentation des modèles 91
5.2.2 Résultats de la modélisation 92
5.2.3 Effet du rebord du porte échantillon 94
5.3 Résultats expérimentaux 95
5.3.1 Géométrie OPCL 95
5.3.2 Géométrie OPC 96
5.3.3 Géométrie cubique 98
5.3.4 Géométrie DNN 99
5.3.5 Conclusion sur les résultats de perte par transmission 100

5.4 Prise en compte de la variabilité des réalisations 101
5.4.1 Adaptation des dimensions 101
5.4.2 Prise en compte des fuites 103
5.4.3 Conclusion sur la prise en compte des variabilité de réalisation 105

5.1 Introduction

Sur la base de la littérature, et de la forme des échantillons réalisés pour cette thèse, nous avons fait le choix d'étudier leur comportement en paroi de conduit. En effet, la porosité ouverte et les contraintes liées à la réalisation rendent compliquées la réalisation de panneaux acoustiques à tester en absorption en chambre réverbérante. Le choix de la paroi de conduit permet de s'appuyer sur des installations déjà utilisées et caractérisées lors de précédents travaux au LMFA, et de s'appuyer sur le savoir-faire de l'équipe.

5.1.1 Motivation du choix du cas d'étude

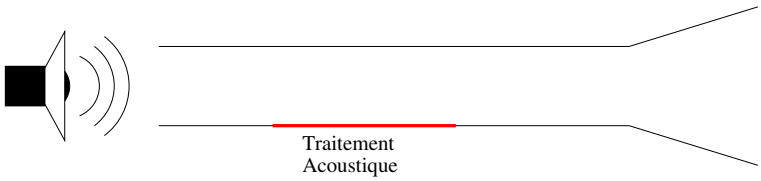


FIGURE 5.1 – Traitement en paroi de conduit

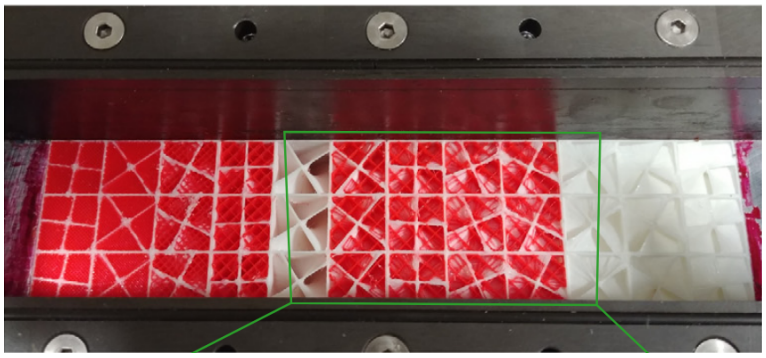


FIGURE 5.2 – Échantillon placé en paroi de conduit : résonateurs quart d'onde enroulés ; figure extraite de (Boulvert *et al.*, 2022b)

On rappelle que l'on cherche à définir un protocole ou des outils permettant de concevoir et réaliser des dispositifs d'absorption acoustique pour des contextes variés et a priori différents d'une incidence normale (qui est un cas très restrictif). Le cas test choisi pour vérifier notre capacité à prédire le comportement des échantillons est la paroi de conduit, présenté sur la figure 5.1. De cette façon, les conditions d'absorption ne sont plus celles d'une onde en incidence normale, mais en incidence rasante si l'on considère des ondes planes. L'étude en paroi de conduit se rapproche de plusieurs contextes industriels (système de ventilation, ligne d'échappement, nacelle d'un moteur d'avion (Malmary, 2000)). De plus dans les cas réels d'application les distances entre la source acoustique, le traitement et la partie rayonnante peuvent être importantes. Ces dimensions rendent coûteuses la modélisation directe

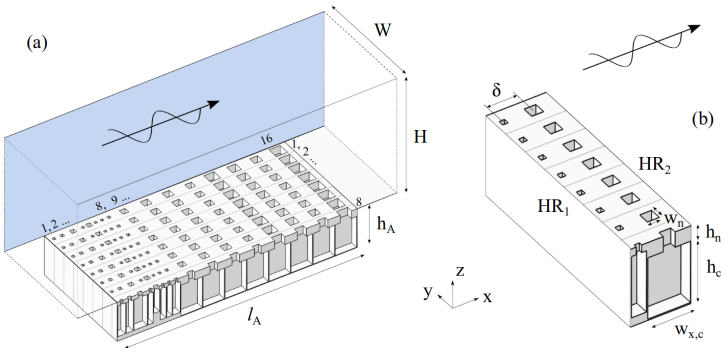


FIGURE 5.3 – Échantillon placé en paroi de conduit : résonateurs de Helmholtz désaccordés ; figure extraite de (Boulvert *et al.*, 2022a)

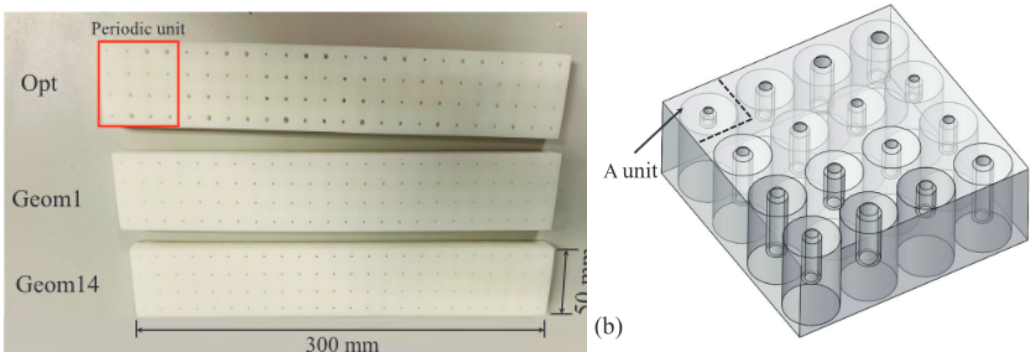


FIGURE 5.4 – Échantillon placé en paroi de conduit : résonateurs de Helmholtz cou interne ; figure extraite de (Guo *et al.*, 2021).

du problème et impliquent une recherche de simplification des moyens de prédiction (Sack, 2017). Par ailleurs, le cas simple d'une atténuation en paroi de conduit peut également être complexifié en prenant en compte un comportement modal (Humbert *et al.*, 2022). Il permet par ailleurs de rajouter un écoulement pour se rapprocher des contextes aéroacoustiques. On se limitera dans notre cas à l'étude d'ondes planes et sans écoulement.

On retrouve dans la littérature quelques exemples de matériaux réalisés en impression 3D placés en paroi de conduit (Oh et Jeon, 2022; Boulvert *et al.*, 2022a; Guo *et al.*, 2021; Boulvert *et al.*, 2022b).

La structure réalisée par Boulvert *et al.* (2022b) présente plusieurs résonateurs quart d'onde enroulés (cf. figure 5.2). Le pas de l'enroulement varie dans la longueur de l'échantillon pour réaliser plusieurs pics d'absorption. Par ailleurs, les pics d'absorption sont élargis par une microporosité contrôlée par l'espacement entre les cordons d'impression de l'imprimante FDM utilisée.

Dans Boulvert *et al.* (2022a), le principe est de contrôler grâce à des résonateurs de Helmholtz les ondes transmises et les ondes réfléchies. La gestion de l'espacement de résonateurs désaccordés permet de "piéger" les ondes acoustiques et ainsi de réaliser une absorption quasi parfaite en transmission (cf. figure 5.3).

Les réalisations de Guo *et al.* (2021) consistent également en une optimisation de résonateurs de Helmholtz, les cols des résonateurs sont intégrés à l'intérieur de la cavité de façon à minimiser l'encombrement (cf. figure 5.4). Le comportement à réaction localisée de ces réalisations permet de prédire leurs performances grâce à l'impédance de surface calculée en incidence normale. Ces impédances sont ensuite implémentées dans des matrices de transfert pour optimiser le matériau. Des méthodes de raccordement modal ont été proposées pour des cas similaires (Xiong *et al.*, 2017). En considérant

un traitement acoustique infini, on peut également optimiser les structures en ciblant les impédances optimales proposées par Cremer et Tester (Cremer, 1953; Tester, 1973b,a), en présence ou non d'un écoulement.

Cependant, la géométrie choisie pour notre étude présente probablement une réaction étendue contrairement aux réalisations des publications citées. C'est pour cette raison que les modèles choisis pour décrire les échantillons ne se basent pas sur les caractéristiques d'un matériau à réaction localisée. Dans ce chapitre, on confirme cette réaction étendue en comparant les résultats obtenus pour une modélisation par une impédance de surface avec les autres modèles. L'approche microscopique et la résolution éléments finis permettent également d'observer les différentes régions du matériau dans lesquelles la dissipation viscothermique a lieu. Cette observation peut permettre de valider le comportement à réaction étendue des échantillons.

Dans ce chapitre, après une présentation du dispositif expérimental, nous présenterons la mise en œuvre des différents modèles pour cette étude en paroi de conduite. Les résultats des différents modèles sont comparés pour la géométrie principale (OPCL) afin de valider l'utilisation des approches limitant les coûts de calcul. Puis, nous comparons les résultats expérimentaux aux prédictions pour les différentes géométries réalisées : la géométrie OPCL, OPC, cubique et double réseau. Enfin dans une dernière partie, la variabilité de réalisation est prise en compte dans les modèles pour expliquer les potentielles différences entre mesure et prédiction.

5.1.2 Dispositif expérimental

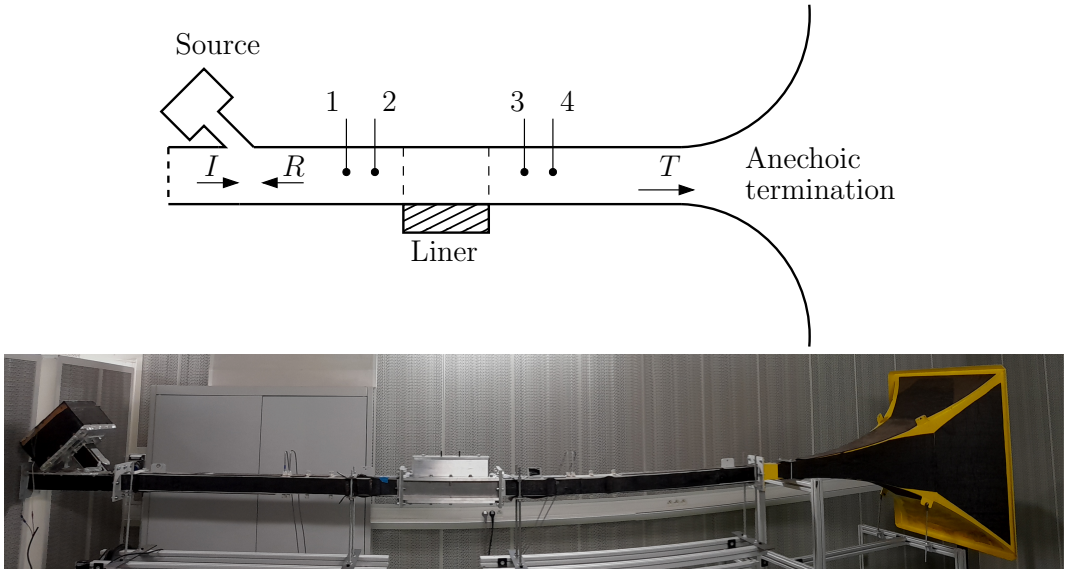


FIGURE 5.5 – Banc d'essai Matisse

Nous réalisons les essais dans la veine MATISSE (Sellen, 2003), dispositif présent au LMFA sur le site de l'École Centrale de Lyon et déjà utilisé dans plusieurs études (Sellen *et al.*, 2006; Sellen, 2003; Hilbrunner *et al.*, 2001). Le schéma du banc et une photo du banc sont présentés sur la figure 5.5. La source est un haut parleur placé au-dessus du conduit. La terminaison anéchoïque d'un côté et un morceau de mousse polyuréthane (PU) taillé en biseau de 30° et inséré dans le tube de l'autre permettent de limiter les réflexions. La pièce dans laquelle est réalisée l'expérience est traitée avec des panneaux acoustiques. La mesure est réalisée au moyen de 4 microphones 1/4 de pouce B&K. La section carrée de 66 mm impose une fréquence de coupure à environ 2500Hz.

Nous utilisons la perte par transmission (TL pour Transmission Loss) comme indicateur de la performance des échantillons dans la conduite. Elle est définie comme le rapport de la puissance de l'onde transmise sur la puissance de l'onde incidente (Munjal, 1987) après la zone du traitement acoustique.

Le pavillon caténoïde du banc MATISSE constitue une terminaison anéchoïque très satisfaisante pour des fréquences supérieurs à 500 Hz (Sellen, 2003). Le conduit est supposé ne présenter aucune réflexion à l'aval du matériau (cf. figure 5.5), on calcule la perte par transmission grâce à la pression mesurée par 3 microphones et à la formule :

$$\mathrm{TL} = 20\log_{10}\left|2\mathrm{i}\sin\left[k_0(x_2-x_1)\right]\frac{P_3\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_0(x_3-x_1)}}{P_1\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_0(x_2-x_1)}-P_2}\right|, \tag{5.1}$$

où P_i et x_i sont les pressions et abscisses aux points i. Une autre manière de mesurer la perte par transmission basée sur la documentation Bruel&Kjaer, a été testée. Elle consiste à recréer la matrice de transmission à l'aide de 4 microphones. Elle permet de calculer le TL sans terminaison anéchoïque, mais nécessite que le problème soit symétrique de part et d'autre de l'échantillon. En particulier, elle n'est pas applicable en présence d'un écoulement (Bolton *et al.*, 2007). Les deux méthodes donnent des résultats équivalents.

Caractérisation de la veine d'essai

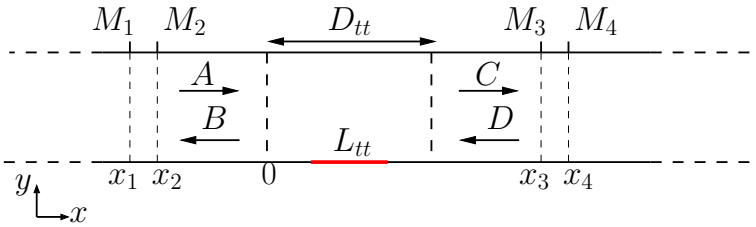


FIGURE 5.6 – Propagation acoustique dans la veine MATISSE et moyen de mesure

TABLE 5.1 – Position relative des microphones du banc MATISSE

Microphone	Position relative en m
M_1	-0.493
M_2	-0.472
M_3	0.724
M_4	0.747

On cherche à caractériser la veine d'essai présentée à nouveau schématiquement sur la figure 5.6. La position relative des microphones et présentée dans le tableau 5.1. La source acoustique est un bruit blanc d'environ 80 dB généré par le haut-parleur accolé à la veine. L'acquisition est réalisée sur 30 blocs d'une seconde avec une fréquence d'échantillonnage de 51 200 Hz de la même manière qu'en incidence normale.

Paroi rigide On souhaite contrôler le caractère anéchoïque de la terminaison ainsi que le résultat de la transmission entre le domaine avant et après la zone de traitement de longueur $D_{tt} = 0.43$ m. Le porte-échantillon décrit dans la section suivante 5.1.3 est monté dans la veine d'essai et l'échantillon fabriqué en impression 3D est remplacé par une plaque en aluminium.

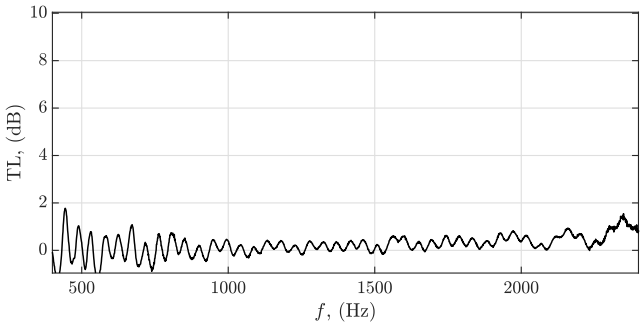


FIGURE 5.7 – Perte par transmission pour une paroi rigide

On calcule la perte par transmission pour le cas d'une paroi rigide avec l'équation (5.1). Le résultat est présenté sur la figure 5.7. La perte par transmission est inférieur à 1 dB ce qui doit permettre d'obtenir des mesures plutôt fiables. On note une très légère augmentation de la perte par transmission avec la fréquence.

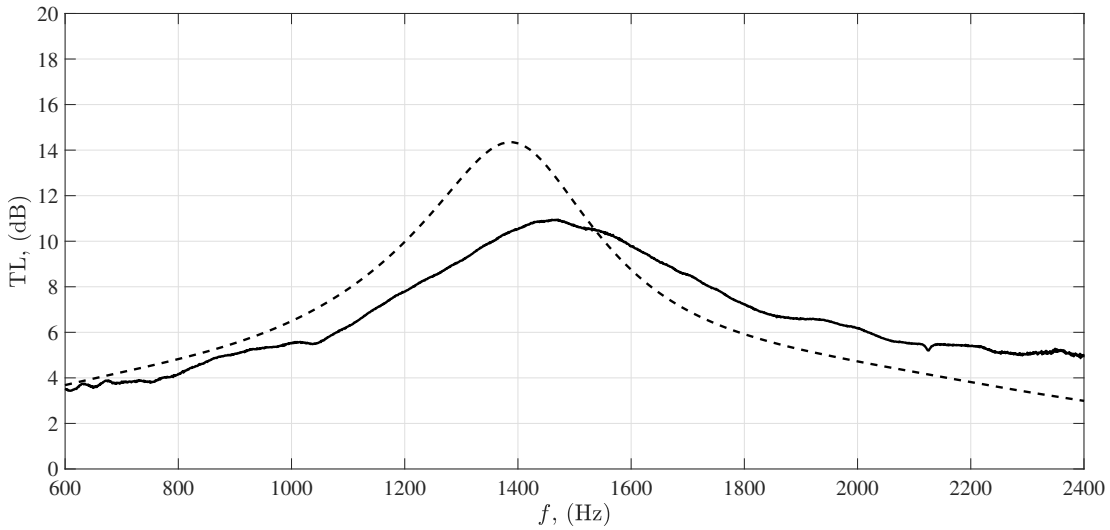


FIGURE 5.8 – Pertes par transmission pour un échantillon de laine synthétique obtenue par la modélisation JCA par éléments finis (– –) et par la mesure (—)

Cas d'un échantillon poreux classique Pour valider le dispositif expérimental et la capacité de prédiction des simulations réalisées, on teste un échantillon de matériau poreux à structure rigide classique. Il s'agit d'une laine en fibre synthétique, dont les paramètres du modèle JCA ont été identifiés après une mesure en tube de Kundt. Les paramètres utilisés pour la modélisation sont une porosité $\phi = 0.97$ une résistivité $\sigma = 6200$ Rayls/m, une tortuosité $\alpha_\infty = 1.05$, et des facteurs de forme $S = 1$ et $S' = 1.1$ permettant le calcul des longueurs caractéristiques thermique et visqueuse $\Lambda = S\sqrt{\frac{8\eta_0\alpha_\infty}{\sigma\phi}}$ et $\Lambda' = S'\sqrt{\frac{8\eta_0\alpha_\infty}{\sigma\phi}}$. Ces valeurs de S et S' sont des valeurs classiques pour les poreux fibreux. Ces paramètres sont implémentés dans un modèle éléments finis de la veine d'essai avec le logiciel COMSOL. La mesure est réalisée dans le montage qui sera utilisé pour les échantillons fabriqués en impression 3D avec un échantillon mesurant 150 mm de long pour 66 mm de large et 50 mm d'épaisseur. La comparaison des pertes par transmission obtenues par la modélisation et par la mesure est présentée sur la figure 5.8. La prédiction est acceptable.

5.1.3 Adaptation à la veine des échantillons imprimés

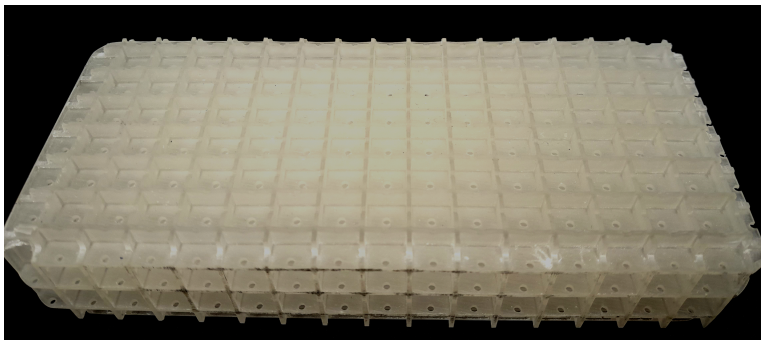


FIGURE 5.9 – Échantillon utilisant la géométrie cubique réalisé pour l'absorption en paroi de conduit

Comme décrit dans le chapitre 2 l'intégration de l'échantillon dans le dispositif est très importante pour obtenir des résultats exploitables. Un échantillon de la géométrie cubique est présenté sur la figure 5.9. L'échantillon présente une longueur $L_{tt} = 150$ mm, une largeur $l_{tt} = 66$ mm et une épaisseur $htt = 31.5$ mm ($h_{tt} = 32.5$ mm pour l'échantillon de la géométrie OPC). Nous pouvons déjà souligner la faible longueur du traitement acoustique, résultat des contraintes de fabrication. Les traitements acoustiques rencontrés dans la littérature sont généralement plus longs, 300 mm pour les réalisations de Boulvert *et al.* (2022a) et Guo *et al.* (2021), 200 mm pour celle de Boulvert *et al.* (2022b). Dans le chapitre 4 nous avons également constaté que les échantillons étudiés lors de cette thèse sont particulièrement sensibles aux problèmes de fuite et qu'une attention particulière doit être portée à l'insertion de l'échantillon dans le banc de mesure.

Une des étapes préalables a donc été la réalisation d'un porte-échantillon en aluminium dédié (deux vues du même modèle 3D sont présentées sur la figure 5.10). À l'intérieur de la pièce nous avons ajouté un rebord sur lequel l'échantillon est en appui de sorte à limiter les fuites possibles le long de l'échantillon. L'idée est de pouvoir étanchéifier l'interface aluminium/aluminium constituée par le porte-échantillon et la veine. Les rebords dépassent sur la face de l'échantillon affleurante au conduit sur 3 mm de chaque côté de l'échantillon et font 3 mm d'épaisseur. Il y a un congé de 5 mm de rayon sur toutes les arêtes normales à la face affleurante dans le conduit. Cette diminution de la surface effective de l'échantillon en paroi du conduit va avoir un impact sur les mesures, cet impact est estimé dans la section 5.2.3. L'échantillon est ensuite monté quasiment en force. Le couvercle et les différentes cales prévus initialement pour contrôler une lame d'air à l'arrière de l'échantillon, servent de presse avec un jeu de visserie. Les espaces restants entre les rebords et l'échantillon (côté veine et côté paroi rigide) sont calfeutrés avec de l'adhésif aluminium fin, destiné aux applications aéroacoutiques.

5.2 Modélisation de la veine d'essai

Pour prédire le TL des différents échantillons en paroi de conduit, on utilise les différentes modélisations qui ont été présentées et testées précédemment en incidence normale.

5.2.1 Présentation des modèles

Les trois modèles que l'on a souhaité tester pour cette étude en paroi de conduit sont présentés sur la figure 5.11. Comme pour l'incidence normale, on choisit pour modélisation de référence une approche

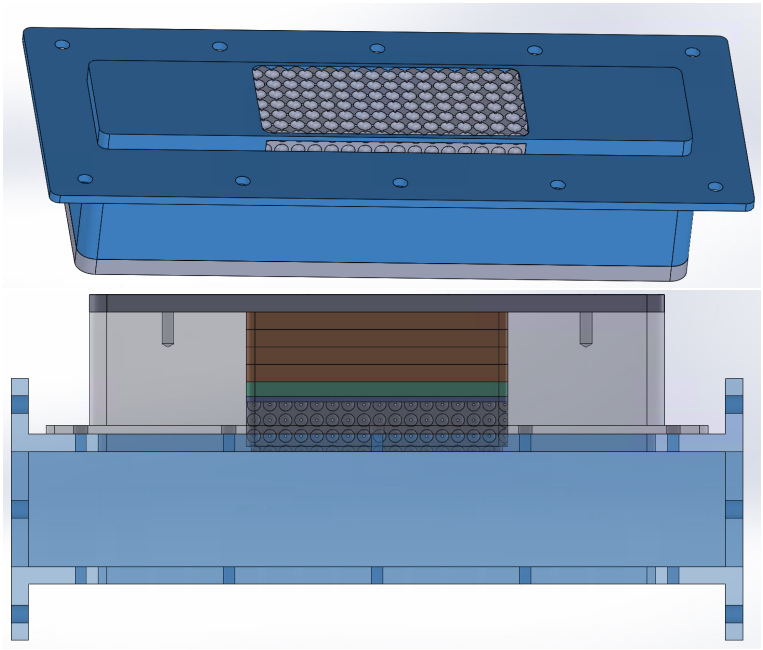


FIGURE 5.10 – Pièce réalisée pour l'adaptation du matériau en paroi de conduite

microscopique avec la résolution des équations NSL. Ces résultats seront comparés à deux modélisations différentes, la modélisation par approche fluide équivalent et une modélisation par condition aux limites d'impédance. Cette impédance de surface a au préalable été calculée par une résolution des équations NSL pour un modèle incidence normale (cf. Chapitre 3). Ce modèle d'impédance permet de limiter le problème à un cas bidimensionnel dont la résolution numérique demande peu de ressources informatiques. L'approche microscopique nécessite une description de la géométrie en 3D. Le modèle utilisant l'approche fluide équivalent est réalisé en 3D bien qu'un modèle 2D suffirait. Le choix a été fait pour anticiper les modifications à apporter au modèle, par exemple, pour modéliser la géométrie double réseau ou prendre en compte le rebord du porte échantillon.

Pour les trois modèles, les extrémités du tube sont des couches dites "perfectly matched layer" (PML) qui empêchent les réflexions. L'excitation acoustique est réalisée dans un domaine amont par une onde plane d'amplitude 1 Pa et dirigée vers les x positifs. Les lignes rouges matérialisent la position de surface d'intégration. Elles sont placées aux mêmes positions que les microphones de l'expérience.

Les besoins en mémoire de l'approche microscopique croissent très rapidement ce qui est dû à l'inversion de matrice de la résolution éléments finis. Pour diminuer le coût numérique on utilise les symétries de la structure périodique en ne modélisant qu'une tranche de la conduite d'une demi cellule de profondeur (cf. figure 5.12). De même, les équations de NSL sont résolues uniquement dans le domaine de dimension D_{tt} (cf. figure 5.6), dans le reste du domaine, les perturbations acoustiques sont propagées au moyen de l'équation de Helmholtz. Comme pour le cas de l'incidence normale, les angles aux intersections entre canaux et sphères sont arrondis par des congés.

5.2.2 Résultats de la modélisation

Pour valider le choix des modèles une comparaison est réalisée avec la géométrie OPC L présentant la face A. Sur la figure 5.13 on compare la perte par transmission obtenue à partir des trois modèles présentés dans la section 5.2.1. Les courbes obtenues avec l'approche fluide équivalent et l'approche microscopique sont en bon accord. On observe par ailleurs que la modélisation obtenue avec la condition d'impédance ne prédit pas la bonne fréquence de pics de perte par transmission. Comme cela a

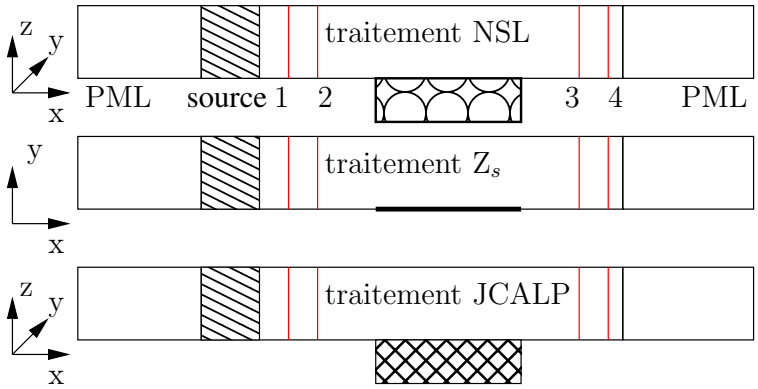


FIGURE 5.11 – Modèles réalisés pour le calcul du TL

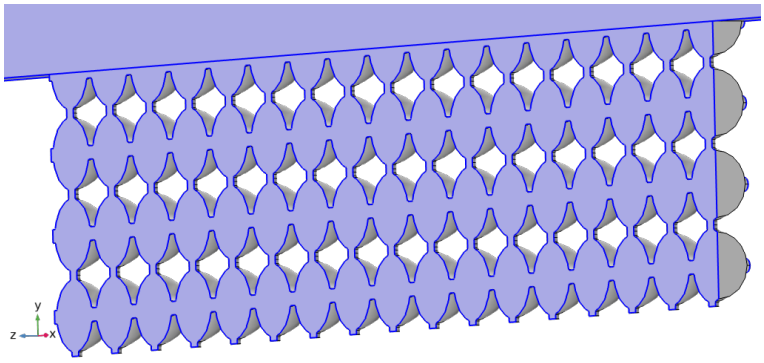


FIGURE 5.12 – Modèle réalisé pour l'approche microscopique, en bleu la surface de symétrie

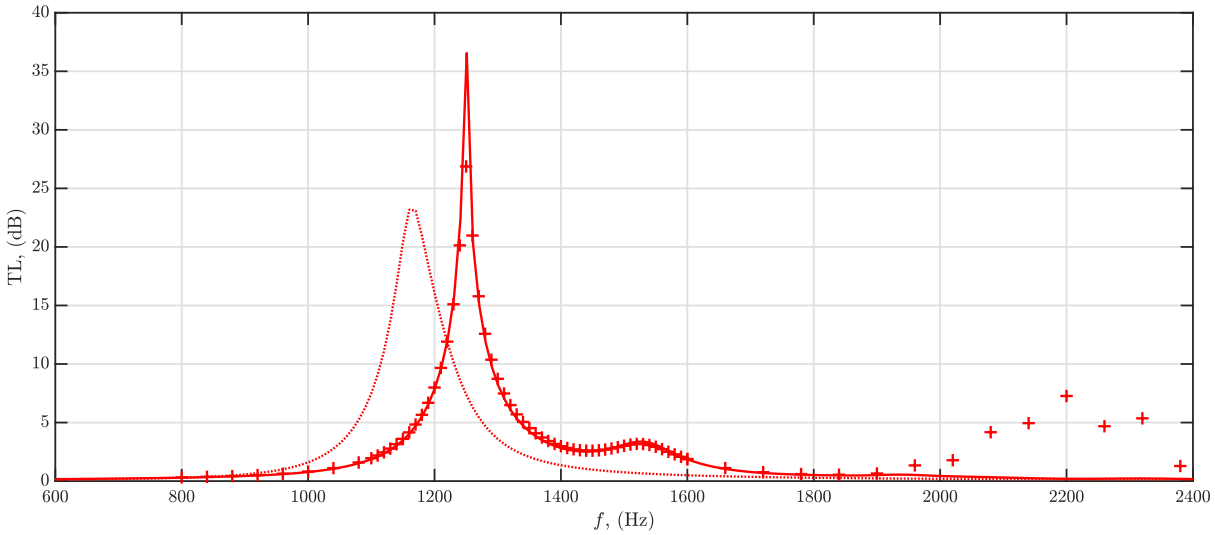


FIGURE 5.13 – Pertes par transmission de la géométrie de référence OPCL modélisée par l'approche fluide équivalent (—) par l'approche microscopique (+) et par une condition aux limites d'impédance (····)

été décrit à la section 3.2.2, la modélisation par une condition aux limites d'impédance est adaptée dans le cas de structure à réaction localisée. Avec la géométrie utilisée, nous avons fait le choix de faire communiquer les cellules dans le sens transverse à l'onde acoustique.

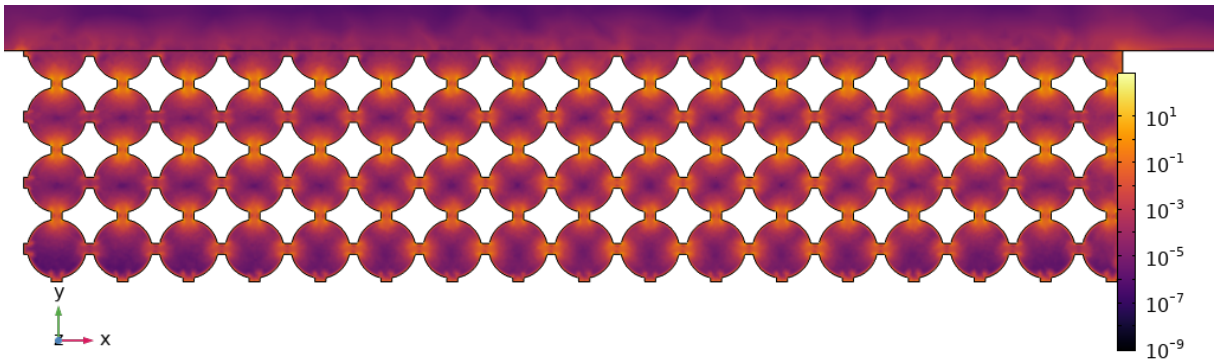


FIGURE 5.14 – Champ de dissipation pour la géométrie OPCL W/m^3

On représente sur la figure 5.14 le champ de dissipation en échelle logarithmique obtenu à partir de la modélisation à l'échelle microscopique de l'échantillon. L'onde acoustique vient des x négatifs et se propage vers les x positifs. On observe que la dissipation thermo-visqueuse est importante dans les canaux transversaux et pas seulement dans les canaux normaux à la paroi. En observant attentivement les canaux transversaux, on remarque que la dissipation est plus importante dans ceux présents au centre sur les cellules les plus profondes de l'échantillon.

5.2.3 Effet du rebord du porte échantillon

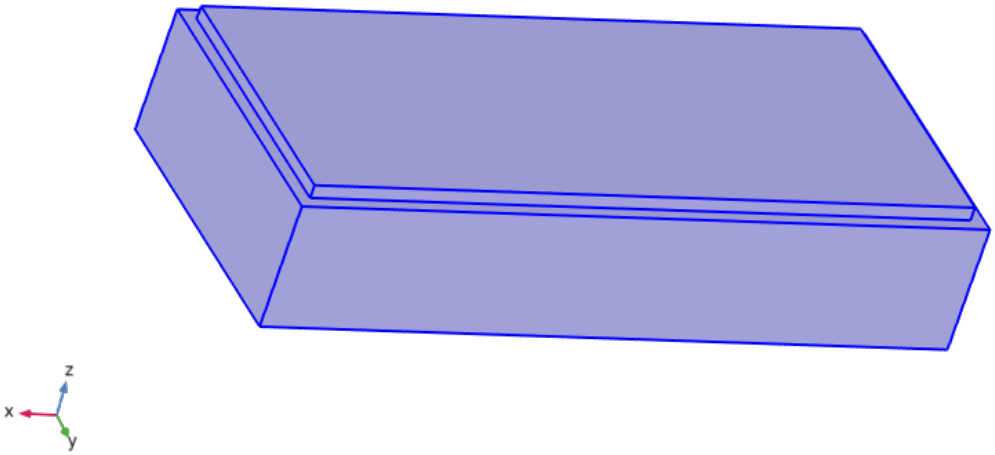


FIGURE 5.15 – Domaine modélisé pour l'étude tenant compte de la géométrie du porte échantillon

Comme expliqué précédemment, pour limiter les effets de fuite dans la veine MATISSE, nous avons ajouté des rebords sur le porte-échantillon. La surface de la face exposée directement dans la veine est donc réduite. On cherche à estimer l'impact que cela peut avoir sur les résultats de la mesure.

On modélise l'échantillon OPCL avec l'approche fluide équivalent en prenant en compte le rebord. Le rebord en aluminium est considéré infiniment rigide et sa prise en compte dans le modèle consiste juste à retirer le volume correspondant à l'échantillon modélisé avec l'approche fluide équivalent (cf.

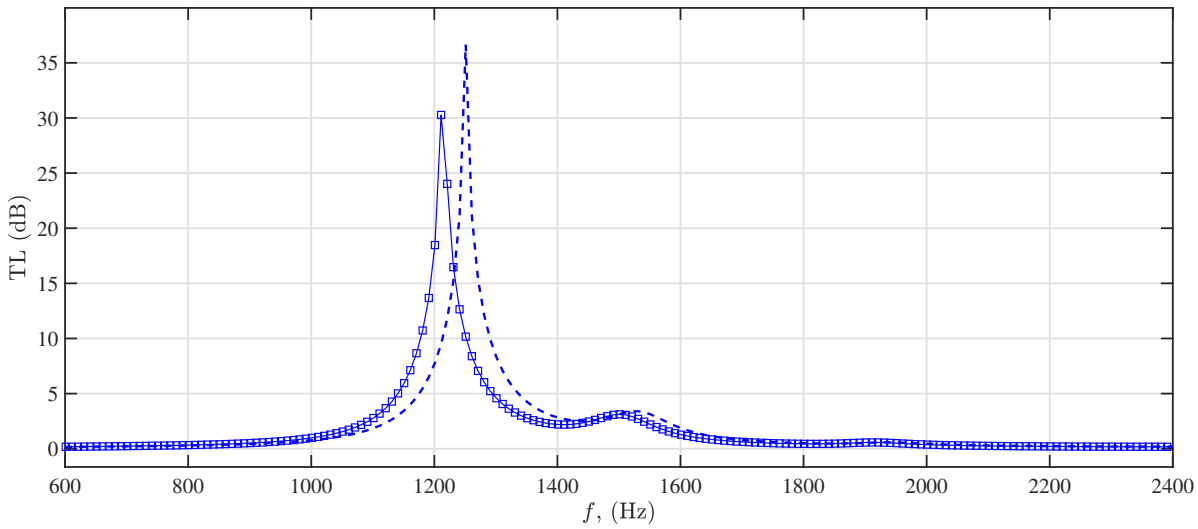


FIGURE 5.16 – Pertes par transmission pour la modélisation fluide équivalent sans prise en compte du porte échantillon (– –) et avec la prise en compte du porte échantillon (▫)

figure 5.15). Le modèle fluide équivalent a été choisi pour réaliser ce test, car il permet de modéliser tout le domaine de l'échantillon. L'unique tranche de résonateur modélisée pour le modèle microscopique ne le permet pas.

On représente sur la figure 5.16 la perte par transmission obtenue avec et sans prise en compte de ce porte-échantillon. On observe un léger décalage du pic de perte par transmission vers les basses fréquences, associé à une légère diminution de l'amplitude du pic. On peut donc s'attendre à observer un décalage du pic vers les basses fréquences d'une quarantaine de Hertz à cause de cette modification géométrique. L'influence des fuites observée en incidence normale est bien plus importante.

5.3 Résultats expérimentaux

On réalise maintenant les comparaisons avec les échantillons insérés en paroi de la conduite MATISSE.

5.3.1 Géométrie OPCL

Sur la figure 5.17 on réalise la comparaison pour l'échantillon OPC L, la géométrie de référence. On compare les pertes par transmissions obtenues avec la modélisation à l'échelle microscopique pour les deux faces, la modélisation avec l'approche fluide équivalent et l'expérience pour les deux faces. La modélisation de la face B à l'échelle microscopique donne un pic dont la fréquence est légèrement plus basse que pour la face A (cette observation vaut aussi pour la mesure). Comme en incidence normale, deux hypothèses peuvent expliquer cette différence entre les deux faces. La présence des canaux affleurants à la surface peut être responsable d'un effet de longueur ajoutée. On peut également considérer que dans cette configuration positionnant une demi-sphère contre la paroi rigide à l'arrière, un demi résonateur est ajouté à l'échantillon ce qui est responsable de cette différence. En incidence normale, la deuxième hypothèse était la plus probable. En incidence rasante, avec une onde acoustique qui se propage également comme on l'a vu, dans le sens transversal de l'échantillon, l'effet d'une longueur ajoutée par les petits canaux débouchant paraît plus crédible.

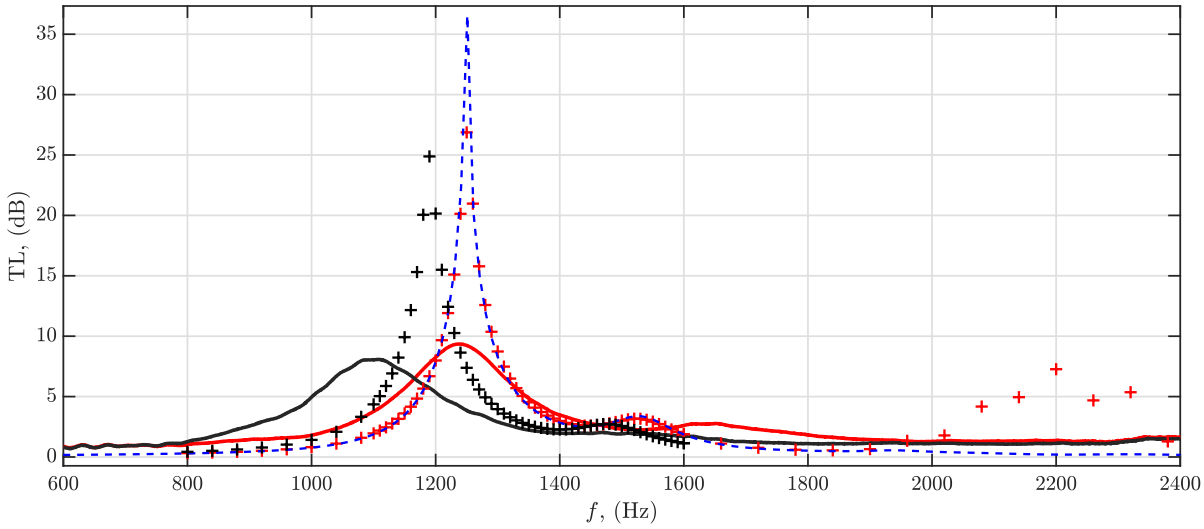


FIGURE 5.17 – Pertes par transmission de la géométrie OPCL pour la modélisation NSL, la face A (+) et B (+) et la modélisation fluide équivalent (– –) et la mesure de la face A (▬) et de la face B (—)

L'étude comparative des modèles de la section 5.2.1 a permis de constater que l'approche fluide équivalent donne un résultat très proche de celui obtenu pour l'échantillon présentant la face A et modélisé avec l'approche microscopique. Cette spécificité en incidence rasante est la même qu'en incidence normale.

Les échantillons imprimés sont nettement moins performants que ne le prédisent les modèles. On observe que la valeur maximale de TL des mesures est nettement inférieure à celle des simulations. Par exemple, pour la face A, on obtient un TL maximum de 10 dB pour la mesure alors que le TL obtenu par simulation dépasse les 25 dB. On observe également que la largeur du pic du TL mesuré est plus grande que celle observée sur le TL obtenu par simulations. Les hypothèses envisagées pour expliquer cette différence sont une variation importante des dimensions internes et la présence de fuites, malgré l'attention portée à l'adaptation de l'échantillon dans le dispositif.

5.3.2 Géométrie OPC

Sur la figure 5.18, on réalise la même comparaison pour l'échantillon OPC réalisé avec une épaisseur de 32.5 mm. Le TL de l'approche fluide équivalent est également, pour ce cas, en meilleur accord avec le TL de l'approche microscopique pour la face A. On remarque néanmoins un léger décalage en fréquence.

On note l'évolution particulière de la perte par transmission avec la fréquence. On pourrait s'attendre à un pic unique comme pour l'échantillon OPCL car seule la taille des géométries internes a varié entre les deux échantillons. On obtient cependant un TL important sur une bande de fréquence relativement large, avec plusieurs pics. Sur la figure 5.19 on affiche pour la fréquence de chacun des pics le champ de dissipation dans le matériau en échelle logarithmique. L'onde acoustique se propage depuis les x négatifs vers les x positifs. On remarque que les zones de l'échantillon dans lesquelles se produisent les maxima de dissipation ne sont pas toujours les mêmes en fonction du pic de TL considéré. Ceci semble indiquer la présence de mode dans l'échantillon. Par ailleurs, si les résultats expérimentaux présentés dans la figure 5.18 sont proches des prédictions en amplitude et en fréquence, les courbes de TL ne sont pas tout à fait les mêmes : en particulier, on n'observe pas le deuxième pic (1920 Hz) expérimentalement. On peut se demander si les modes observés sur la figure 5.19 avec

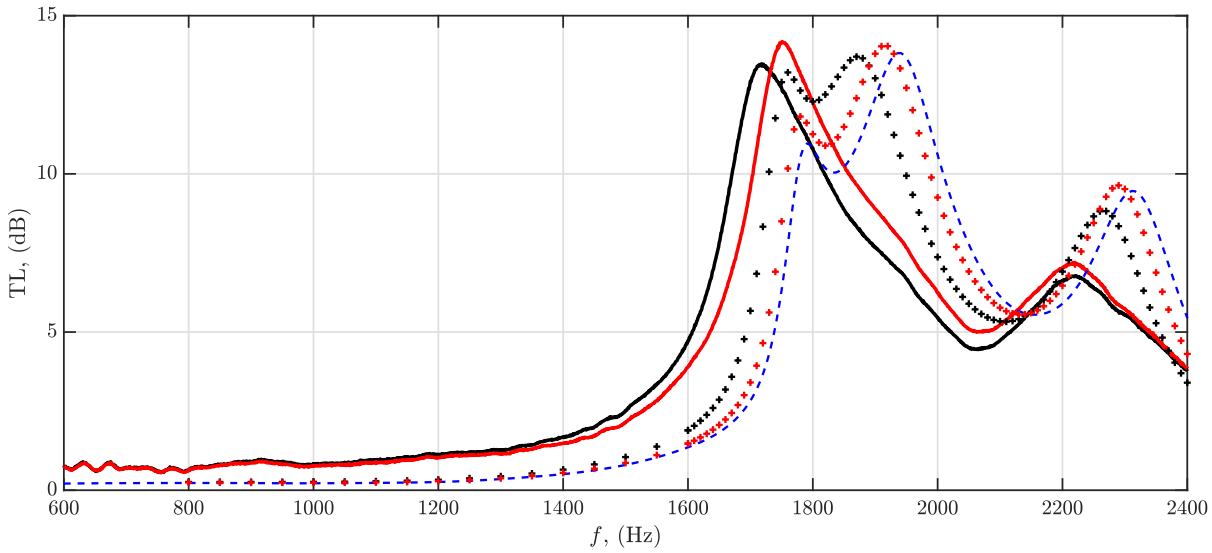
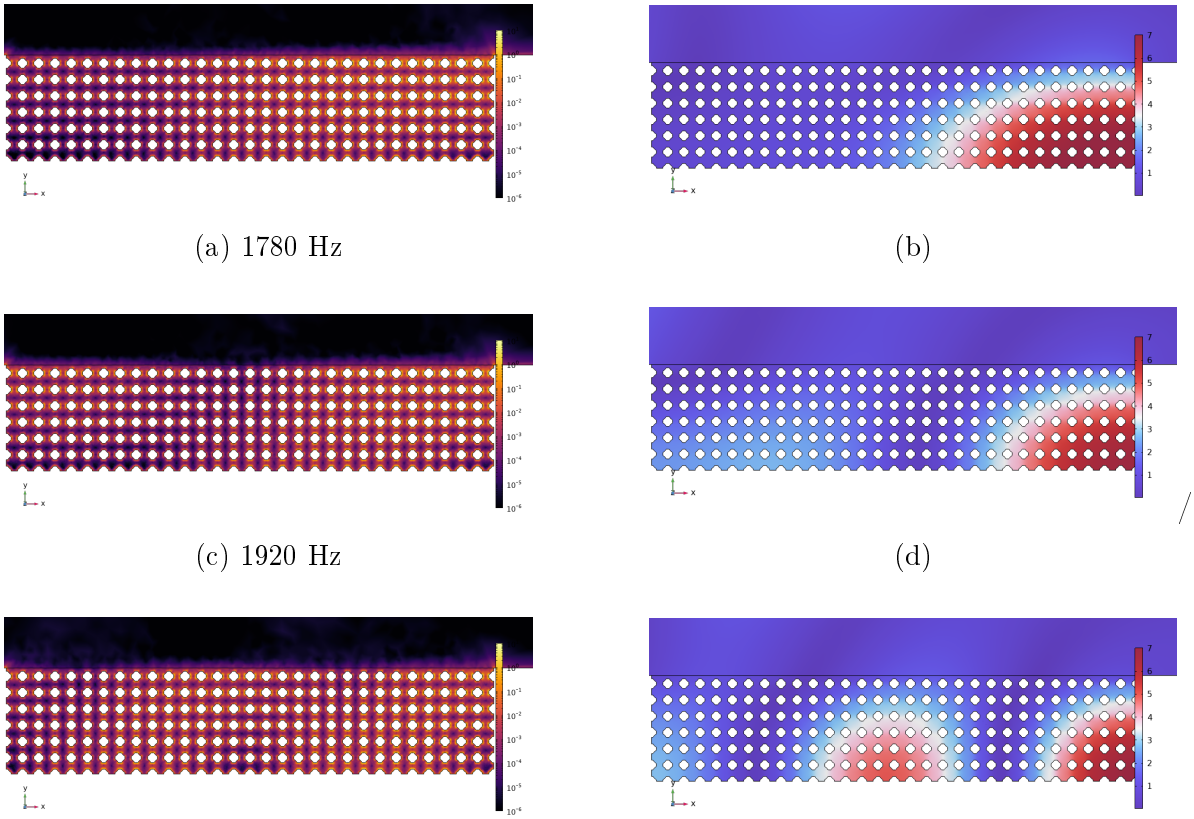


FIGURE 5.18 – Pertes par transmission de la géométrie OPC pour la modélisation NSL, la face A (+) et B (+) et la modélisation fluide équivalent (– –) et la mesure de la face A (—) et B (—)



(a) 1780 Hz (b)

(c) 1920 Hz (d)

(e) 2290 Hz (f)

FIGURE 5.19 – Comparaison entre les champs de dissipation en échelle logarithmique en W/m^3 à gauche et norme de la pression à droite, aux fréquence des pics 1790Hz 1920Hz et 2290Hz

l'approche microscopique sont également présents avec la modélisation par approche fluide équivalent.

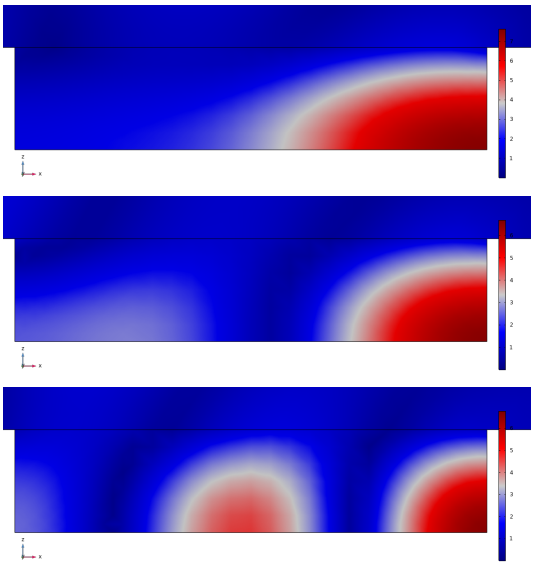


FIGURE 5.20 – Champs de pression (norme) aux fréquence des pics 1790Hz, 1920Hz et 2290Hz

On représente sur la figure 5.20 la norme de la pression pour les mêmes fréquence avec la modélisation de l'échantillon par un fluide équivalent. Les champs de pression sont effectivement très similaires entre les deux approches et les différentes fréquences.

5.3.3 Géométrie cubique

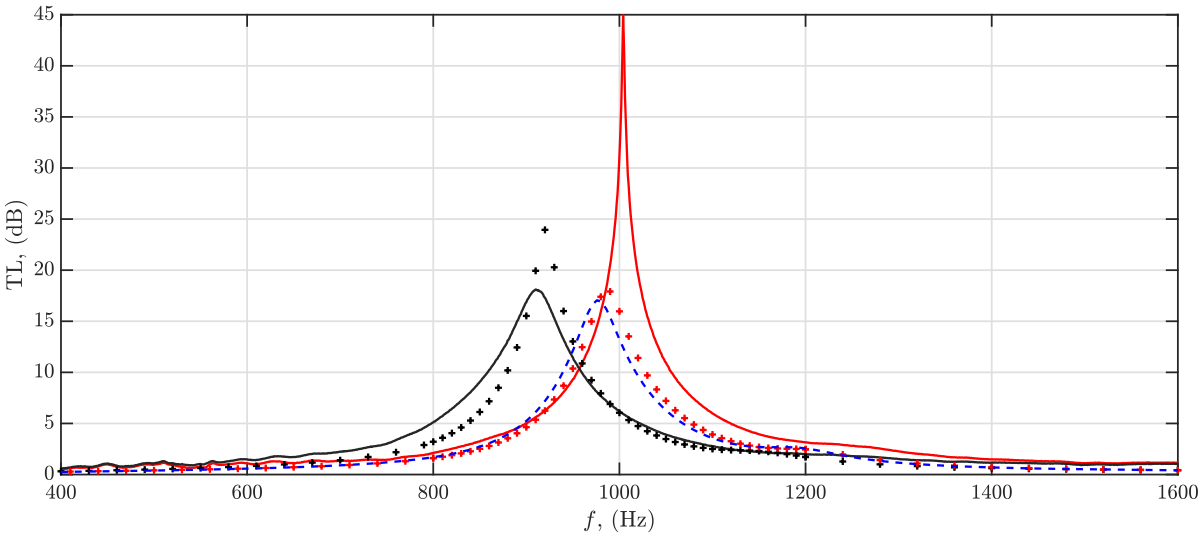


FIGURE 5.21 – Pertes par transmission de la géométrie cubique pour la modélisation NSL, la face A (+) et B (+) et la modélisation fluide équivalent (– –) et la mesure de la face A (▬) et B (▬)

Sur la figure 5.21, on réalise la même comparaison pour l'échantillon présentant la géométrie cubique. Comme pour les autres géométries, la modélisation macroscopique donne un résultat qui est en accord avec la modélisation microscopique de la face A. On observe également pour cette géométrie une bonne prédiction du comportement expérimental de l'échantillon, que ce soit pour la

face A ou la face B, par la simulation directe. La porosité importante de l'échantillon le rend peut-être moins sensible aux fuites ou aux variations de dimensions. On note tout de même une augmentation importante de l'amplitude du pic mesurée dans le cas de la face A. Le pic de perte par transmission dans cette configuration est très piqué.

5.3.4 Géométrie DNN

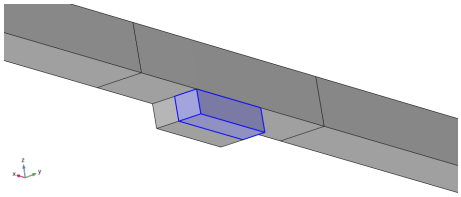


FIGURE 5.22 – Modélisation pour le calcul de la géométrie double réseau avec l'approche fluide équivalent ; les deux domaines correspondent aux deux sous-réseaux

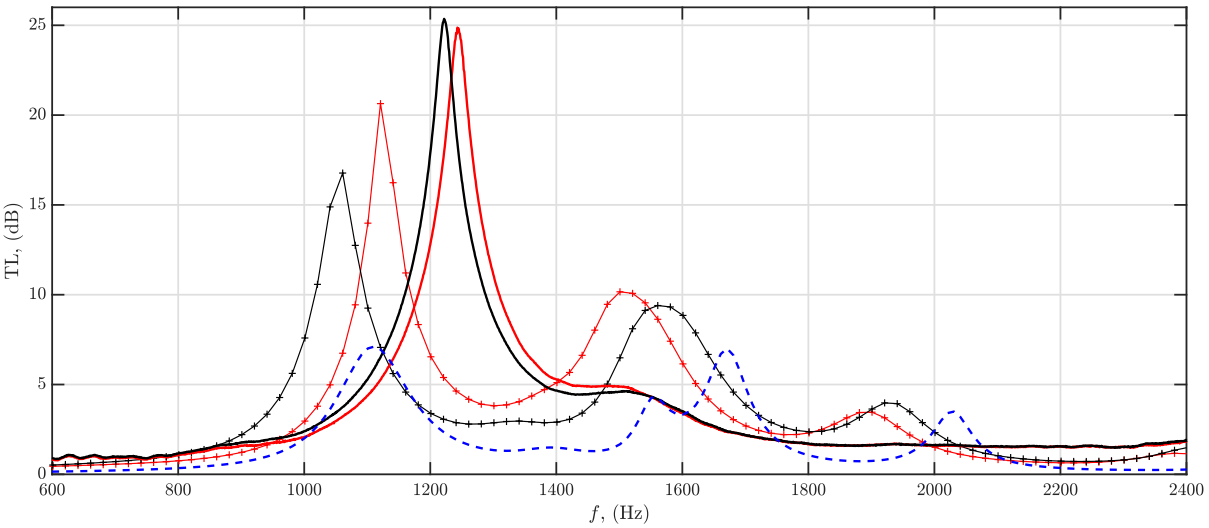


FIGURE 5.23 – Pertes par transmission de la géométrie DNN pour la modélisation NSL face A (+) et B (+) et la modélisation fluide équivalent (– –) et la mesure de la face A (▬) et B (—)

Pour modéliser la géométrie double réseau avec l'approche fluide équivalent, de manière analogue à ce qui a été réalisé en incidence normale, on accole deux domaines en appliquant à chacun des deux, l'un des jeux de paramètres JCAPL des deux sous-réseaux (cf. figure 5.22).

Sur la figure 5.23, on réalise la comparaison du TL mesuré et simulé pour les deux faces, pour l'échantillon présentant la géométrie double réseau. Les deux pics observés en incidence normale sont obtenus par la modélisation en paroi de conduit pour les deux faces des échantillons. La modélisation par approche fluide équivalent ne permet pas de reproduire le TL prédit par la modélisation NSL. On observe deux pics à 1100 Hz et 1600 Hz, à peu près aux mêmes fréquences que les pics obtenus avec la modélisation NSL, mais ils ne sont pas cohérents en amplitude. Par ailleurs, le double pic du TL du modèle NSL n'est pas observé expérimentalement.

On se propose de comparer sur la figure 5.24 les résultats de la modélisation par un fluide équivalent lorsque l'on modélise uniquement le petit et le grand réseau. On remarque que le pic basse fréquence

correspond au grand réseau et le pic plus haute fréquence correspond au petit réseau. Du fait de la division de la surface par deux, les amplitudes des pics sont bien plus faibles. Le pic expérimental observé sur la figure 5.23 se situe au milieu de ces deux pics de TL. Ce comportement rappelle ce qui a été observé lors des essais de modélisation de cette géométrie au chapitre 3.

On présente sur la figure 5.25 les résultats de la modélisation des paramètres JCAPL pour la géométrie DNN complète et les résultats pour deux domaines JCAPL représentant le petit et le grand réseau accolés. Accoler les deux réseau représentés par un fluide équivalent revient à considérer le fait que les deux réseaux communiquent, sans doute en raison de problèmes d'insertion de l'échantillon dans le dispositif expérimental. La modélisation avec les paramètres JCAPL de la cellule entière ne donne pas de très bons résultats même si l'on retrouve deux pics de TL plutôt bien placés comparé à l'expérience. Par contre, la modélisation des deux sous-réseaux accolés avec les paramètres du petit et du grand réseau donne une meilleure représentation de ce qui est observé expérimentalement. On peut en conclure que malgré l'attention qui y est apportée des fuites persistent autour de l'échantillon et les deux réseaux communiquent.

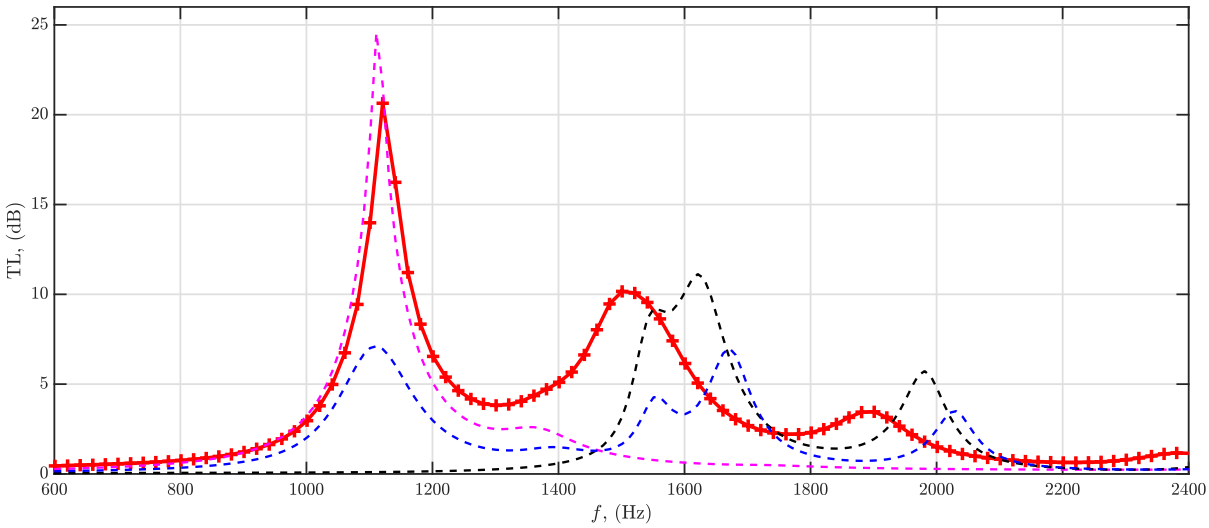


FIGURE 5.24 – Pertes par transmission de la géométrie DNN pour la modélisation NSL face A (+), la modélisation fluide équivalent avec les deux domaines séparés (– –), la modélisation fluide équivalent uniquement le gros réseau (– –), et la modélisation fluide équivalent uniquement le petit réseau (– –)

5.3.5 Conclusion sur les résultats de perte par transmission

Nous avons réalisé des comparaisons entre les TLs obtenus expérimentalement et leur prédiction pour 4 géométries. Les résultats expérimentaux sont plus ou moins en accord avec les prédictions suivant les géométries étudiées. L'amplitude du pic de perte par transmission obtenue expérimentalement avec la géométrie OPCL, a priori la plus simple, est particulièrement basse comparé à la prédiction. Les mesures obtenues pour la géométrie OPC et la géométrie cubique sont en accord avec leurs prédictions respectives. Systématiquement, la prédiction de la performance acoustique est en bon accord entre les approches NSL et fluide équivalent pour la face A. Comme cela a été évoqué au chapitre 3 dans la section 3.4.1, la prise en compte d'une longueur ajoutée en surface peut compléter le modèle et permettre de prédire le comportement de la face B. Les résultats de la géométrie double réseau sont particuliers et révèlent la présence d'un problème de fuite autour de l'échantillon dans le dispositif expérimental. Par ailleurs concernant l'approche fluide équivalent, on est capable pour

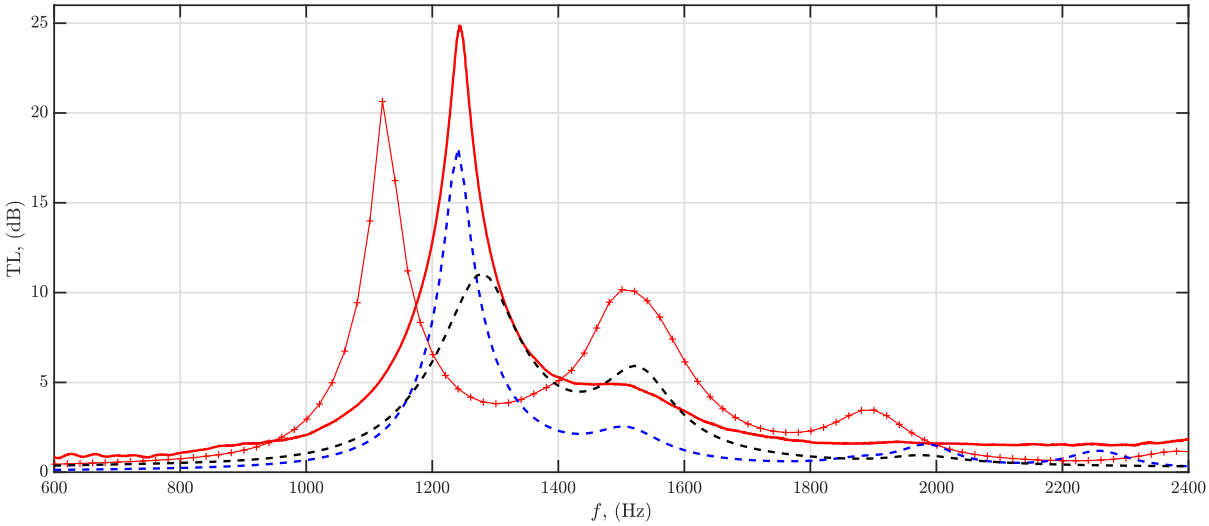


FIGURE 5.25 – Pertes par transmission de la géométrie DNN pour la modélisation NSL face A (+), la modélisation fluide équivalent avec les deux domaines accolés (– –), la modélisation fluide équivalent pour un domaine avec les paramètres JCAPL de la cellule DNN (– –), et le résultat expérimental pour la face A (▬)

les trois géométries présentant un unique réseau de donner une prédiction cohérente avec le modèle microscopique. Cette modélisation fluide équivalent offre un gain substantiel en temps et besoin de mémoire, les calculs prennent 10 minutes sur une machine de bureau quand les calculs NSL demandent 10 heures et un besoin mémoire d'environ 200Go.

5.4 Prise en compte de la variabilité des réalisations

Au vu des différences observées entre les résultats expérimentaux et la prédiction, on cherche maintenant à estimer si la prise en compte des variabilités de réalisation, comme on l'a testé en incidence normale, peut améliorer la prédiction.

5.4.1 Adaptation des dimensions

Pour les échantillons présentant un réseau unique qui ont été réalisés pour la paroi de conduit, on mesure les dimensions des sphères et des canaux avec le même protocole utilisé pour les échantillons testés en incidence normale. On utilise ensuite la moyenne des dimensions mesurées pour réaliser une identification des paramètres JCAPL. On utilise ces paramètres dans le modèle macroscopique de l'échantillon en paroi de conduit. On compare les résultats de cette modélisation avec la modélisation NSL de la face qui correspond le mieux et l'expérience correspondante.

OPCL

On présente les résultats pour la géométrie OPCL sur la figure 5.26. On remarque un décalage du pic de perte par transmission lorsqu'on prend en compte les dimensions réelles de l'échantillon. Les canaux mesurés sont plus petits (1.45 mm en moyenne), ce qui provoque un décalage vers les basses fréquences du pic du TL. Le décalage vers les basses fréquences, même s'il est observé expérimentalement est bien trop important avec cette adaptation des dimensions dans le modèle. La différence entre l'expérience et la prédiction ne s'explique pas seulement par la prise en compte de cette variation. Un

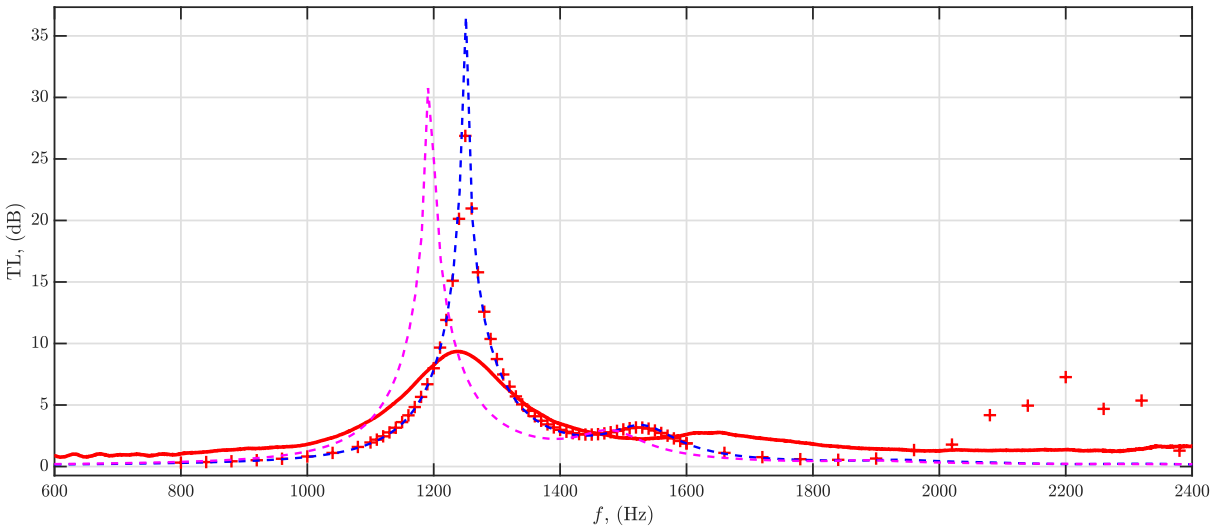


FIGURE 5.26 – Pertes par transmission de la géométrie OPCL modélisation microscopique de la face A (+), pour le résultat expérimental de la face A (—), et pour la modélisation avec l'approche fluide équivalent avec la géométrie de référence (– –) et avec la prise en compte des dimensions mesurées (– –)

autre phénomène doit être responsable d'un décalage vers les hautes fréquences et d'une diminution importante des performances pour cet échantillon.

OPC

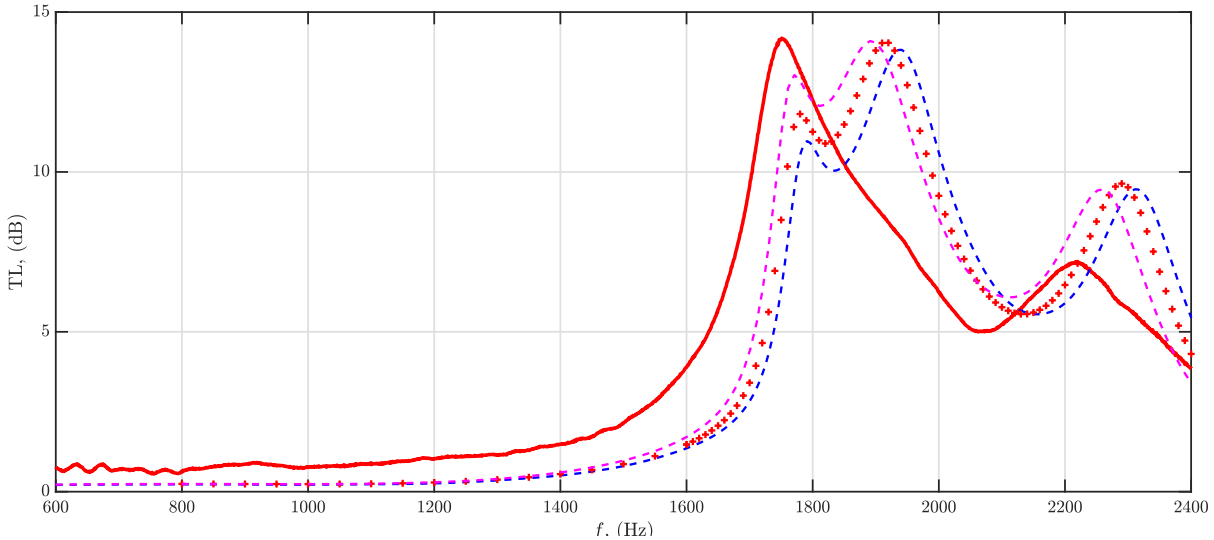


FIGURE 5.27 – Pertes par transmission de la modélisation microscopique de la face A (+), pour le résultat expérimental de la face A (—), et pour la modélisation avec l'approche fluide équivalent avec la géométrie de référence (– –) et avec la prise en compte des dimensions mesurées (– –)

De même, sur la figure 5.27, la courbe du TL obtenue avec les dimensions corrigées est décalée vers les basses fréquences. Un meilleur accord avec l'expérience est obtenu pour la fréquence du premier et du troisième pic. Même si le comportement observé est bien plus proche de la prédiction que pour

la géométrie OPCL, la différence d'allure de la courbe (premier double pic) n'est pas expliquée par la prise en compte des dimensions réelles.

Cubique

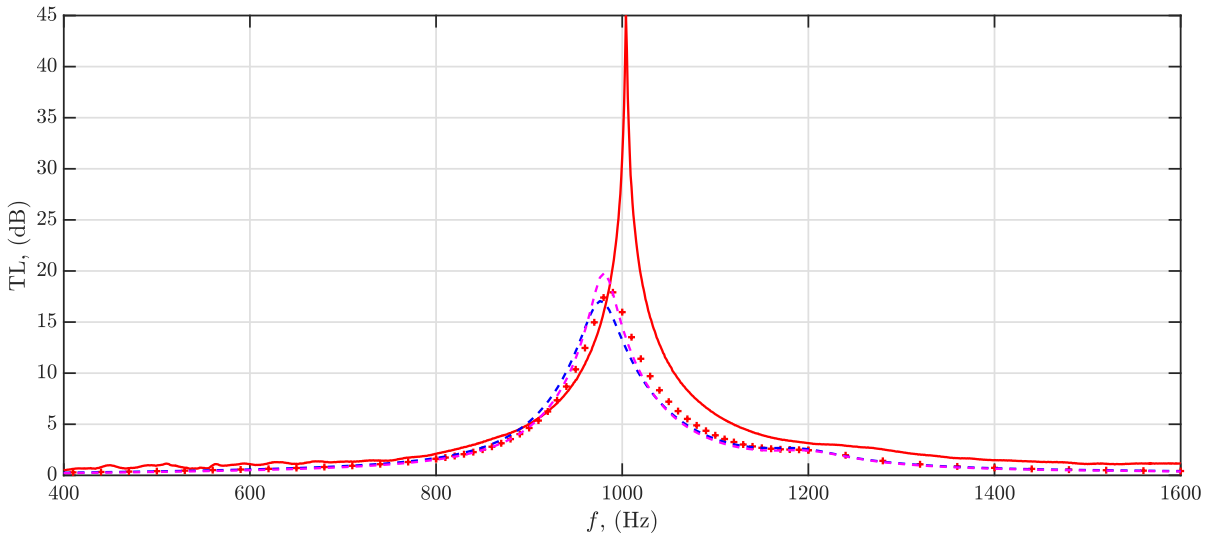


FIGURE 5.28 – Pertes par transmission de la modélisation microscopique de la face A (+), pour le résultat expérimental de la face A (—), et pour la modélisation avec l'approche fluide équivalent avec la géométrie de référence (– –) et avec la prise en compte des dimensions mesurées (– –)

Pour la figure 5.28 la modélisation JCAPL prenant en compte les dimensions réelles est comparée avec la modélisation microscopique et l'expérience. La prédiction précédente était déjà très bonne et la prise en compte de dimensions réelles n'améliore pas la prédiction (peut-être légèrement du point de vue de l'amplitude des pertes par transmission). Un phénomène supplémentaire est responsable de la différence observée, notamment de la forte augmentation de l'amplitude de la perte par transmission et du léger décalage du pic vers les hautes fréquences.

5.4.2 Prise en compte des fuites

Comme on l'a étudié au chapitre 4, le phénomène de fuite autour des échantillons est prédominant. Pour le cas de l'incidence normale, il ne permet pas d'observer clairement l'effet de la variabilité des dimensions internes des échantillons.

Lorsqu'on utilise le même dispositif expérimental et la même méthode de contrôle des fuites pour les différentes géométries, on n'obtient pas le même accord entre les prédictions et la mesure. Les résultats expérimentaux de la géométrie OPCL montrent une très nette baisse de performance par rapport à la prédiction quand ceux obtenus avec la géométrie cubique sont plutôt sous estimés par la modélisation. Pour ces deux échantillons les conditions d'insertion de l'échantillon dans le dispositif expérimental sont pourtant les mêmes : on utilise le même porte-échantillon et les échantillons sont tous deux insérés en force.

Dans cette section, on se propose d'évaluer l'impact que pourrait avoir des fuites le long des échantillons placés en paroi de conduit. On réalise donc une étude paramétrique en faisant varier l'épaisseur d'une lame d'air le long de l'échantillon présentant la face A en paroi du conduit pour ces deux géométries.

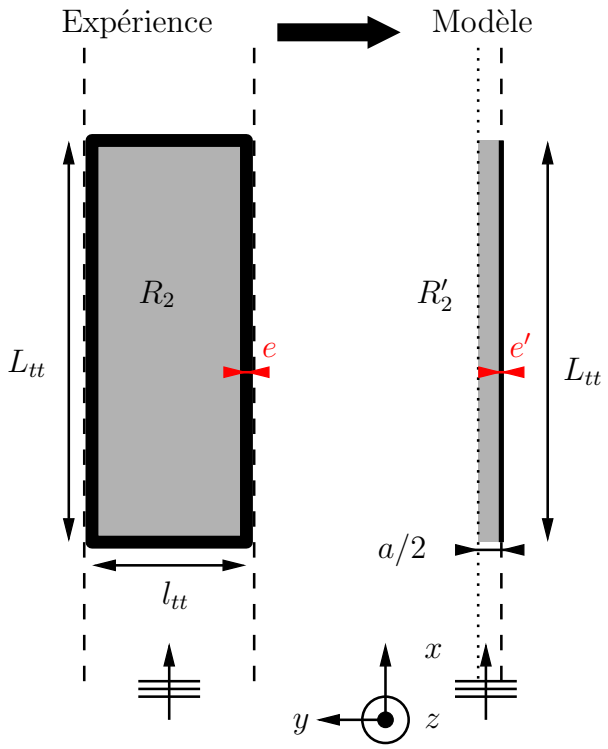


FIGURE 5.29 – Prise en compte de la fuite dans le cas d'un échantillon en paroi de conduit avec $L_{tt} = 150$ mm et $N \times a = l_{tt} = 66$ mm avec N le nombre de cellule dans la largeur de l'échantillon, e et e' l'épaisseur de la fuite et R_2 et R'_2 l'air occupé par l'échantillon.

On reprend le rapport aire de la fuite/aire du matériau pour caractériser l'importance de la fuite, utilisé au chapitre 4. Il permet de paramétrer les différentes modélisations qui seront réalisées et de les comparer à l'expérience. Expérimentalement, le ratio correspond à l'aire de la fuite R_1 représentée en noir sur la partie gauche de la figure 5.29 divisée par l'aire R_2 en gris sur la figure. On rappel $\Phi_{leak} = R_1/R_2$. Dans le cas expérimental, on peut calculer ce Φ_{leak} en faisant l'estimation d'une fuite de largeur constante de $e = 0.2$ mm sur tout le périmètre $\mathscr{P} = l_{tt} \times 2 + L_{tt} \times 2$ de l'échantillon, avec donc $R_1 = e \times \mathscr{P}$. On obtient alors un ratio $\Phi_{leak} = 0.0087$ ce qui correspond aux ratios des fuites les moins importantes observées en incidence normale.

On a vu au chapitre 4 qu'il était nécessaire de modéliser l'échantillon à l'échelle microscopique pour être capable de prendre en compte la totalité du phénomène de fuite. Nous sommes néanmoins limités par les besoins en ressources de calcul pour un tel modèle. On ne modélise donc, comme pour les cas à l'échelle microscopique précédents, qu'une rangée de demi-cellule dans le sens de la longueur. La fuite est modélisée d'un seul côté de cette rangée comme on peut le voir sur la figure 5.29 où elle est représentée par la ligne noire d'épaisseur e'. Le ratio Φ_{leak} est ensuite calculé de la même façon par le rapport R_1/R_2. Du fait des limitations de la modélisation à l'échelle microscopique, nous nous sommes restreints à des fuites un peu plus importantes que celles que nous estimons dans le cas expérimental $\Phi_{leak} = 0.022$ à $\Phi_{leak} = 0.044$. Ce sont les ratios les plus importants utilisés pour l'étude en incidence normale.

On rappelle que pour le ratio le plus petit il y avait un décalage vers les basses fréquences qui n'est pas observé dans la littérature. Par ailleurs les fuites en amont et en aval de l'échantillon ne sont pas représentées et l'utilisation du rebord, censé limiter les fuites, complexifie encore davantage la modélisation du cas expérimental. En outre si un ratio de fuite/matériau est très pertinent en

incidence normale, la propagation de l'onde dans le matériau et dans la fuite est bien différente en incidence rasante.

Sur la figure 5.30, on présente les résultats de la modélisation de l'échantillon OPCL par le modèle NSL sans et avec la présence d'une fuite. On observe une chute très importante de l'amplitude du pic de TL due à la fuite. Cette baisse d'amplitude est à peu près la même pour toutes les dimensions de fuite. On remarque un décalage vers les hautes fréquences quand la taille de la fuite augmente. Ce décalage avait déjà été observé en incidence normale pour les fuites de cette importance. Le comportement observé en prenant en compte la fuite est semblable à la baisse importante de l'amplitude du pic observée pour la géométrie OPCL(cf. figure 5.17).

Sur la figure 5.31 on réalise une étude paramétrique semblable pour la géométrie cubique. On observe pour la fuite avec $\Phi_{leak} = 0.022$ une augmentation de l'amplitude du pic de TL. C'est ce qui était observé expérimentalement pour la face A avec un pic de TL de 45 dB (cf.figure 5.21). Là encore quand la taille de la fuite augmente, on observe un décalage vers les hautes fréquences. On n'observe cependant pas la baisse de performance observée avec la géométrie OPCL.

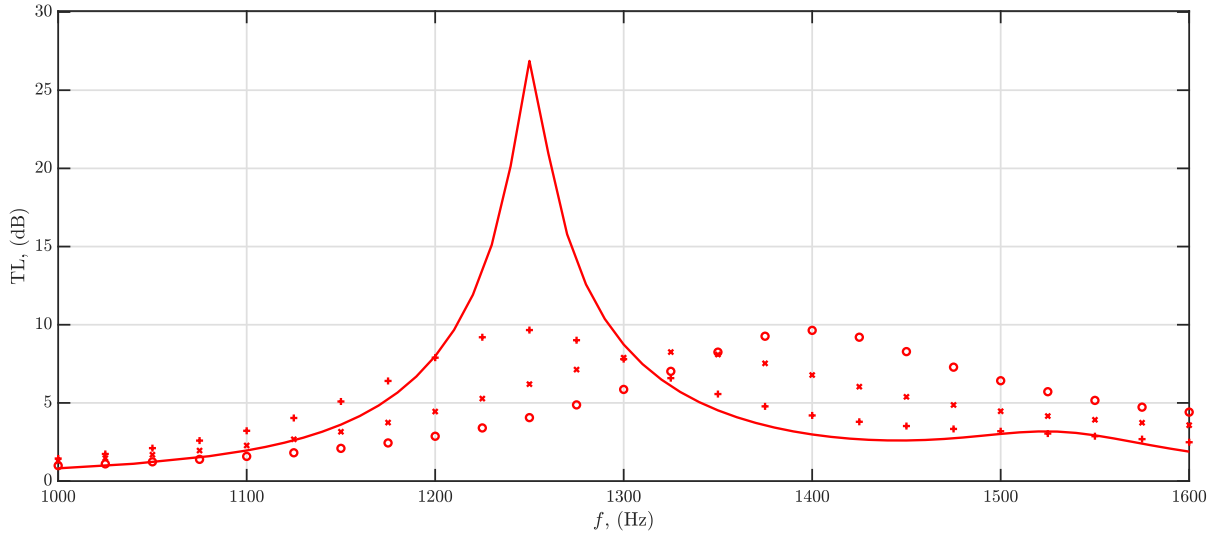


FIGURE 5.30 – Pertes par transmission de la géométrie OPCL pour la modélisation microscopique sans fuite (—) avec une fuite de $\Phi_{leak} = 0.022$ mm (+), avec une fuite de $\Phi_{leak} = 0.0334$ mm (×) avec une fuite de $\Phi_{leak} = 0.044$ mm (○)

5.4.3 Conclusion sur la prise en compte des variabilité de réalisation

La prise en compte des dimensions mesurées sur les échantillons OPCL, OPC et cubique fait varier les résultats. On observe notamment un décalage de la fréquence du pic d'absorption pouvant aller jusqu'à 60 Hz. Ces variations de dimensions ne sont cependant pas en mesure d'expliquer les différences observées entre la prédiction et la mesure, que ce soit la baisse drastique de performance de la géométrie OPC ou l'augmentation de performance observée avec la géométrie cubique. Dans un deuxième temps, l'effet des fuites le long de l'échantillon a été évalué, ce qui a permis de fournir une explication à certains des comportements observés expérimentalement. On peut en conclure que, comme pour l'incidence normale, les échantillons étudiés sont particulièrement sensibles à leur insertion dans le dispositif expérimental. D'autre part la fuite est plus dommageable à la géométrie OPCL qu'à la géométrie cubique au vu de la réduction de performance qu'elle provoque.

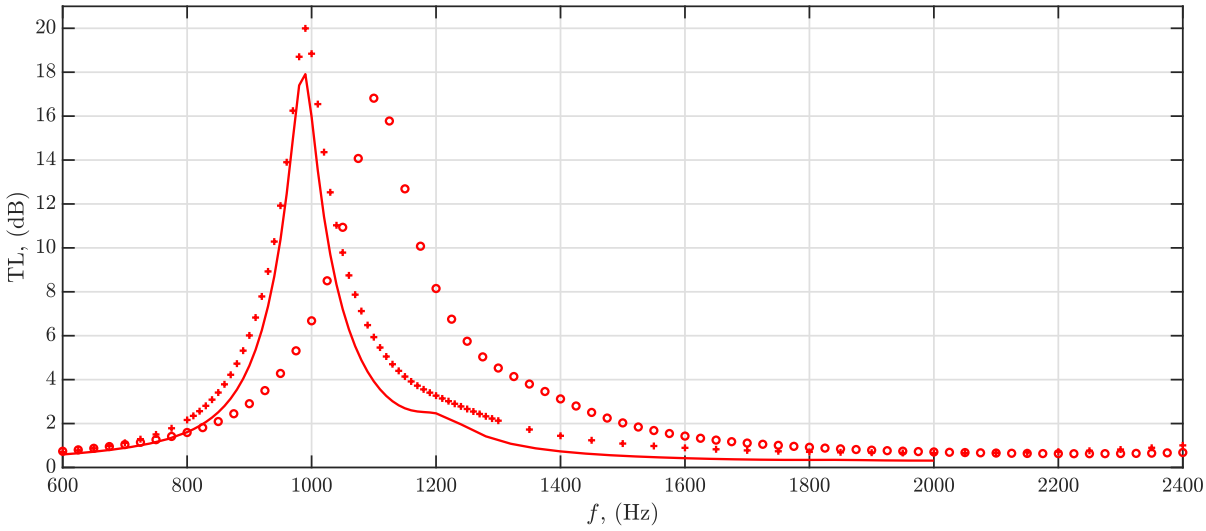


FIGURE 5.31 – Pertes par transmission de la géométrie cubique pour la modélisation microscopique sans fuite (—) avec une fuite de $\Phi_{leak} = 0.022$mm (+) et avec une fuite de $\Phi_{leak} = 0.044$mm (○)

Chapitre 5 — Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons approfondi l'étude des géométries étudiées en plaçant des échantillons fabriqués en impression 3D en paroi de conduit. Le dispositif expérimental a été décrit et caractérisé. Différents modèles déjà étudiés précédemment ont été comparés pour valider leur utilisation en paroi de conduit. Nous avons ensuite comparé les résultats expérimentaux de 4 géométries d'échantillon avec la prédiction des modèles. Selon les géométries, les mesures sont plus ou moins cohérentes avec la prédiction. Comme pour le chapitre 4, la variabilité des échantillons a été modélisée. La variation des dimensions des géométries due à la variabilité de la technique d'impression a un impact sur les performances acoustiques. Cependant, comme dans le chapitre 4 ces variations dimensionnelles ne permettent pas à elles seules d'expliquer les différences qui sont en majorité dues à des fuites acoustiques.

Conclusion

L'objectif motivant ces travaux de recherche est de mettre en place une méthode de réalisation de matériaux absorbants sur mesure. L'étude des matériaux absorbants s'est orientée ces dernières années sur des géométries résonnantes accordées à certaines fréquences, ou proposant une absorption large bande grâce à des résonateurs désaccordés entre eux. Le but de nos recherches est d'établir la démonstration d'une méthodologie permettant la réalisation d'un matériau fabriqué par impression 3D qui réponde à un cahier des charges acoustiques dans un environnement donné et d'en déterminer les limites.

Pour atteindre ce but, on doit tout d'abord prendre en compte la précision de la réalisation par impression 3D. Les différentes techniques existantes ne conduisent pas à la même qualité de réalisation, et cette qualité a un impact sur l'absorption des ondes acoustiques par les échantillons réalisés. Il a été observé dans la littérature que la non homogénéité des réalisations à l'intérieur d'un matériau permettent le plus souvent d'obtenir des absorptions plus large bande et donc potentiellement plus intéressantes. Cependant, cette hétérogénéité est difficilement maîtrisable et demande de complexifier davantage les modélisations des échantillons. Par ailleurs la simulation numérique des dissipations dans une géométrie complète va être limitée par un temps de calcul et un besoin mémoire prohibitifs. Il apparaît donc nécessaire d'utiliser des modèles simplifiés ou ne nécessitant pas la description de tous les détails géométriques des échantillons. Ainsi les apports de cette thèse sont :

- Une étude de variabilité sur une cinquantaine d'échantillons dans le but d'observer l'impact que peuvent avoir les variations de fabrication, sur les coefficients d'absorption en incidence normale.
- Une étude de la capacité d'un modèle fluide équivalent à décrire le comportement d'échantillons résonnants présentant différentes géométries (des cellules sphériques de différentes tailles et des cellules cubiques) dans deux champs acoustiques différents. L'étude a d'abord été réalisée en incidence normale avec et sans lame d'air à l'arrière, puis en incidence rasante.
- Une étude paramétrique de l'influence d'une fuite le long de l'échantillon en incidence normale, puis en paroi de conduit. Le squelette très rigide et le caractère résonnant des géométries considérées rendent ce problème très difficilement évitable dans les réalisations pratiques et très pénalisant vis-à-vis de la mise en œuvre des méthodes de prédiction. Les comparaisons réalisées ont aussi permis de conclure que le modèle de Cummings (1991) ne permet pas de modéliser de manière satisfaisante le phénomène.

Comme cela a été dit au moment du choix technologique de la stéréolithographie et de l'imprimante utilisée pour cette étude, l'évolution technologique dans ce domaine est très rapide. On peut s'attendre à ce que les problèmes soulevés -la variabilité des dimensions réalisés, la rugosité des surfaces- soient améliorés par l'évolution de la fabrication additive. De même le volume des fabrications réalisable avec cette technique, jusqu'à maintenant limité, va certainement augmenter. La taille maximale des

échantillons a dicté le choix de la configuration d'étude. Une augmentation de cette taille permettra sûrement de réaliser des panneaux acoustiques pouvant être testés en champs diffus dans une chambre réverbérante. Il sera alors possible d'étudier le comportement des géométries réalisées et la pertinence du modèle de prédiction dans une configuration acoustique différente.

Le choix de la configuration d'étude en paroi de conduit permet par ailleurs d'envisager l'ajout d'un écoulement moyen. De plus, la conception du porte-échantillon a été réalisée en incluant la possibilité d'ajouter d'une lame d'air à l'arrière de l'échantillon. Les phénomènes résonnants couplés avec le volume arrière pourraient être particulièrement intéressants à étudier, mais la capacité du modèle fluide équivalent à prédire le comportement dans un tel cas n'est pas acquise.

Il a été montré que, en raison de la réaction étendue du matériau, l'évaluation par méthode numérique de la perte en transmission dans le conduit ne peut se limiter à la prise en compte d'une impédance de surface de l'échantillon. Ceci a justifié l'utilisation de l'approche fluide équivalent. L'utilisation de cette approche pour un empilement de résonateurs soulève de nombreuses interrogations. Les hypothèses d'homogénéisation sont à la limite de la validité pour les cas étudiés et même si les prédictions sont très souvent en accord avec la résolution microscopique, de futurs travaux pourraient investiguer davantage les limites de validité de cette approche pour ce type d'échantillon. On peut également se demander dans quelle mesure l'approche fluide équivalent pourrait être adaptée pour représenter au mieux le comportement de la géométrie double réseau, et ainsi envisager une réelle optimisation des absorptions réalisées.

Annexe A

Diamètres des canaux des échantillons de la série C

La série C présente des erreurs de réalisation dû à la saturation du bain de rinçage. On présente dans les tableaux suivant les dimensions ne prenant pas en compte la face B. Ces dimensions ont été utilisées pour les modélisation des échantillons de cette série.

TABLE A.1 – Valeurs des diamètres des canaux moyennées par pièce pour la configuration Clear25 Série C face A

Dimension	**Cible**	**251**	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**	**moyenne**	**écart type**
w mm	1.5	1.203	1.240	1.214	1.224	1.260	1.259	1.216	0.085
écart type sur w mm		0.12	0.041	0.033	0.045	0.061	0.077		

TABLE A.2 – Valeurs des diamètres des canaux moyennées par pièce pour la configuration Clear50 Série C face A

Dimension	**Cible**	**501**	**502**	**503**	**504**	**505**	**506**	**moyenne**	**écart type**
w mm	1.5	1.275	1.253	1.241	1.255	1.297	1.250	1.270	0.065
écart type sur w mm		0.014	0.032	0.177	0.056	0.056	0.063		

TABLE A.3 – Valeurs des diamètres des canaux moyennées par pièce pour la configuration Black25 Série C face A

Dimension	**Cible**	**251**	**252**	**253**	**254**	**255**	**256**	**moyenne**	**écart type**
w mm	1.5	1.216	1.162	1.130	1.220	1.162	1.193	1.201	0.07
écart type sur w mm		0.029	0.066	0.118	0.036	0.025	0.015		

Annexe B

Étude paramétrique de la fuite placée du côté des canaux

Au chapitre 4 la position de la fuite est modélisée du côté des sphères. On présente le résultat qui a motivé ce choix.

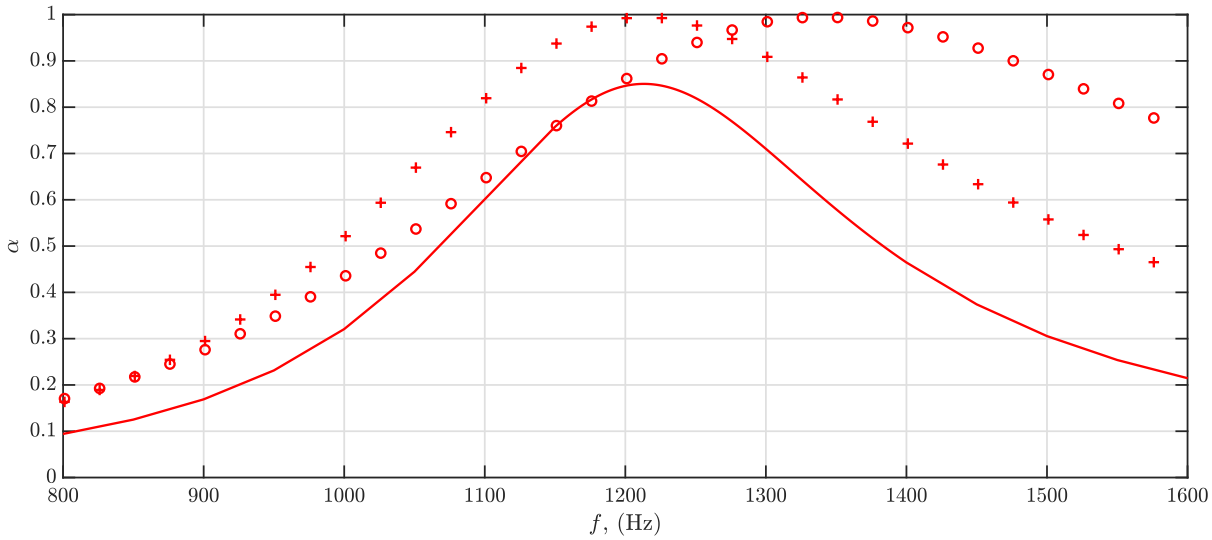


FIGURE B.1 – Coefficient d'absorption pour l'approche microscopique sans fuite (—), la prise en compte d'une fuite($\Phi_{leak} = 0.022$) du côté des canaux (+) et du côté des sphères (o)

On présente sur la figure B.1 une comparaison entre les coefficients d'absorption obtenus pour un cas sans fuite, pour un cas dans lequel la fuite est du côté des sphères et un dans lequel la fuite est du côté des canaux. On remarque que l'effet sur l'amplitude du pic d'absorption et sur la fréquence de ce pic est plus important quand la fuite est placée du côté des sphères. De plus les échantillons réalisés en impression 3D présentent des sphères sur la surface cylindrique. Ces raisons nous ont poussés à considérer uniquement la fuite du côté des sphères dans le corps du manuscrit.

La même étude paramétrique que celle réalisée dans le corps du manuscrit a été réalisée pour une fuite du côté des canaux. On peut voir un schéma de la position de la fuite sur la figure B.2. On rappelle le paramètre d'étude le rapport entre la surface de la fuite et la surface du matériau $\Phi_{leak} = R_1/R_2$. Les résultats de l'étude paramétrique correspondant à cette configuration sont présentés sur la figure B.3. Comme pour l'étude dans le corps du manuscrit, on présente en fonction de la proportion de la fuite,

l'amplitude du premier pic d'absorption et la fréquence de ce premier pic. On remarque le même comportement que pour la fuite du côté des sphères ; une augmentation de l'amplitude de l'absorption quand la proportion de la fuite augmente. Pour la fréquence, on observe le même phénomène de décalage vers les basses fréquences pour les fréquences les plus faibles et ensuite un fort décalage du pic vers les hautes fréquences.

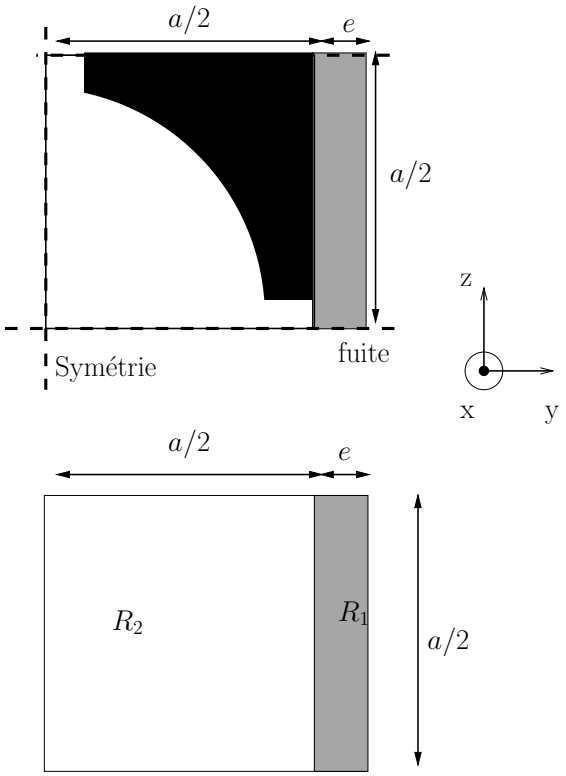


FIGURE B.2 – Fuite du coté des canaux en incidence normale

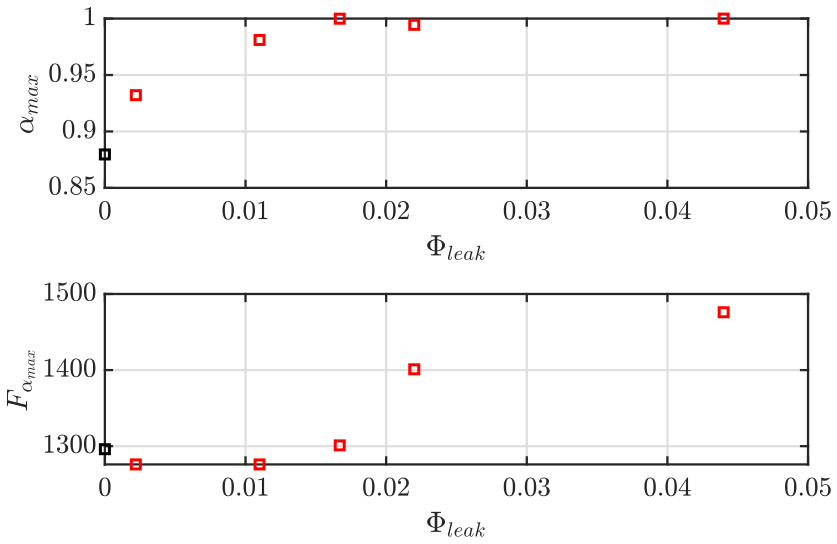


FIGURE B.3 – Maximum du coefficient d'absorption et fréquence de ce maximum pour le cas de référence (□) et pour différent rapport de surface de fuite (□)

Bibliographie

Abbad, A., Lassoued, M.-A. B., Michon, G. et Ross, A. (2019). On the use of 3d printed architected core in sandwich structure for vibration control. *In 26th International Congress on Sound and Vibration*. Canadian Acoustical Association. (Cited on page 15)

Al Jahdali, R. et Wu, Y. (2018). Coupled resonators for sound trapping and absorption. *Scientific Reports*, 8(1):13855. (Cited on page 40)

Allard, J. et Atalla, N. (2009). *Propagation of sound in porous media : modelling sound absorbing materials*. John Wiley & Sons. (Cited on page 1)

Auriault, J., Borne, L. et Chambon, R. (1985). Dynamics of porous saturated media, checking of the generalized law of darcy. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(5):1641–1650. (Cited on page 44)

Auriault, J.-L., Boutin, C. et Geindreau, C. (2010). *Homogenization of coupled phenomena in heterogenous media*, volume 149. John Wiley & Sons. (Cited on page 44)

Berggren, M., Bernland, A. et Noreland, D. (2018). Acoustic boundary layers as boundary conditions. *Journal of Computational Physics*, 371:633–650. (Cited on page 43)

Betgen, B. et Galland, M.-A. (2009). Active control of complex surface impedance. *In 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference)*, page 3248. (Cited on page 2)

Biot, M. A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. ii. higher frequency range. *The Journal of the acoustical Society of america*, 28(2):179–191. (Cited on page 1)

Bolton, J. S., Yoo, T. et Olivieri, O. (2007). Measurement of normal incidence transmission loss and other acoustical properties of materials placed in a standing wave tube. Rapport technique. (Cited on page 89)

Boulvert, J., Cavalieri, T., Costa-Baptista, J., Schwan, L., Romero-García, V., Gabard, G., Fotsing, E. R., Ross, A., Mardjono, J. et Groby, J.-P. (2019). Optimally graded porous material for broadband perfect absorption of sound. *Journal of Applied Physics*, 126(17):175101. (Cited on page 13)

Boulvert, J., Costa-Baptista, J., Cavalieri, T., Romero-García, V., Gabard, G., Fotsing, E. R., Ross, A., Perna, M., Mardjono, J. et Groby, J.-P. (2020). Folded metaporous material for sub-wavelength and broadband perfect sound absorption. *Applied Physics Letters*, 117(25). (Cited on page 12)

Boulvert, J., Gabard, G., Romero-García, V. et Groby, J.-P. (2022a). Compact resonant systems for perfect and broadband sound absorption in wide waveguides in transmission problems. *Scientific Reports*, 12(1):10013. (Cited on pages 2, 43, 87, and 91)

Boulvert, J., Humbert, T., Romero-García, V., Gabard, G., Fotsing, E. R., Ross, A., Mardjono, J. et Groby, J.-P. (2022b). Perfect, broadband, and sub-wavelength absorption with asymmetric absorbers : Realization for duct acoustics with 3d printed porous resonators. *Journal of Sound and Vibration*, 523:116687. (Cited on pages 2, 86, 87, and 91)

Boutin, C. (2013). Acoustics of porous media with inner resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(6):4717–4729. (Cited on page 1)

Carbajo, J., Ghaffari Mosanenzadeh, S., Kim, S. et Fang, N. (2020). Multi-layer perforated panel absorbers with oblique perforations. *Applied Acoustics*, 169:107496. (Cited on page 1)

Carbajo, J., Molina-Jordá, J., Maiorano, L. et Fang, N. (2021). Sound absorption of macro-perforated additively manufactured media. *Applied Acoustics*, 182:108204. (Cited on pages 12 and 13)

Chaigne, A. (2001). *Ondes acoustiques*. Editions Ecole Polytechnique. (Cited on pages 40 and 52)

Champoux, Y. (1994). *Etude experimentale du comportement acoustique des materiaux poreux a structure rigide*. Thèse de doctorat. (Cited on page 44)

Chevillotte, F., Jaouen, L. et Bécot, F.-X. (2015). On the modeling of visco-thermal dissipations in heterogeneous porous media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(6):3922–3929. (Cited on page 1)

Chevillotte, F. et Panneton, R. (2007). Elastic characterization of closed cell foams from impedance tube absorption tests. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(5):2653–2660. (Cited on page 68)

Chevillotte, F., Perrot, C. et Guillon, E. (2013). A direct link between microstructure and acoustical macro-behavior of real double porosity foams. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(6):4681–4690. (Cited on page 44)

Ciochon, A., Kennedy, J., Leiba, R., Flanagan, L. et Culleton, M. (2023). The impact of surface roughness on an additively manufactured acoustic material : An experimental and numerical investigation. *Journal of Sound and Vibration*, 546:117434. (Cited on pages 13 and 14)

Costa-Baptista, J., Fotsing, E. R., Mardjono, J., Therriault, D. et Ross, A. (2022). Design and fused filament fabrication of multilayered microchannels for subwavelength and broadband sound absorption. *Additive Manufacturing*, 55:102777. (Cited on page 12)

Cremer, L. (1953). Theorie der luftschall-dämpfung im rechteckkanal mit schluckender wand und das sich dabei ergebende höchste dämpfungsmaß. *Acustica*, 3(2):249–263. (Cited on page 88)

Cummings, A. (1991). Impedance tube measurements on porous media : The effects of air-gaps around the sample. *Journal of Sound and Vibration*, 151(1):63–75. (Cited on pages 20, 69, 70, 71, 72, and 107)

Duan, M., Yu, C., Xin, F. et Lu, T. J. (2021). Tunable underwater acoustic metamaterials via quasi-helmholtz resonance : From low-frequency to ultra-broadband. *Applied Physics Letters*, 118(7). (Cited on page 2)

Duan, M., Yu, C., Xu, Z., Xin, F. et Lu, T. J. (2020). Acoustic impedance regulation of helmholtz resonators for perfect sound absorption via roughened embedded necks. *Applied Physics Letters*, 117(15). (Cited on page 2)

E.E.A (2020). Environmental noise in europe 2020. Rapport technique, European Environment Agency. (Cited on page 1)

Fotsing, E. R., Dubourg, A., Ross, A. et Mardjono, J. (2019). Acoustic properties of periodic micro-structures obtained by additive manufacturing. *Applied Acoustics*, 148:322–331. (Cited on page 12)

Fusaro, G., Barbaresi, L., Cingolani, M., Garai, M., Ida, E., Prato, A. et Schiavi, A. (2023). Investigation of the impact of additive manufacturing techniques on the acoustic performance of a coiled-up resonator. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 153(5):2921. (Cited on pages 11, 13, 15, and 18)

Ghanbarian, B., Hunt, A. G., Ewing, R. P. et Sahimi, M. (2013). Tortuosity in porous media : a critical review. *Soil science society of America journal*, 77(5):1461–1477. (Cited on page 45)

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B. et Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies*, volume 17. Springer. (Cited on page 6)

Groby, J.-P., Lagarrigue, C., Brouard, B., Dazel, O., Tournat, V. et Nennig, B. (2015). Enhancing the absorption properties of acoustic porous plates by periodically embedding helmholtz resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(1):273–280. (Cited on page 1)

Guo, J., Fang, Y., Jiang, Z. et Zhang, X. (2021). An investigation on noise attenuation by acoustic liner constructed by Helmholtz resonators with extended necks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(1):70–81. (Cited on pages 43, 87, and 91)

Guo, J., Qu, R., Fang, Y., Yi, W. et Zhang, X. (2023). A phase-gradient acoustic metasurface for broadband duct noise attenuation in the presence of flow. *International Journal of Mechanical Sciences*, 237:107822. (Cited on page 2)

Hilbrunner, O., Sellen, N., Galland, M.-A., Mazoyer, T. et Pellerin, A. (2001). Active control method for the identification of the parameters of porous media. *In 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. (Cited on page 88)

Ho, K. M., Yang, Z., Zhang, X. et Sheng, P. (2005). Measurements of sound transmission through panels of locally resonant materials between impedance tubes. *Applied Acoustics*, 66(7):751–765. (Cited on page 1)

Humbert, T., Golliard, J., Portier, E., Gabard, G. et Auregan, Y. (2022). Multimodal characterisation of acoustic liners using the maine flow facility. *In 28th AIAA/CEAS Aeroacoustics 2022 Conference*, page 3082. (Cited on page 87)

Jaouen, L. et Chevillotte, F. (2018). Length correction of 2d discontinuities or perforations at large wavelengths and for linear acoustics. *arXiv preprint arXiv :1804.09391*. (Cited on page 56)

Ji, G., Fang, Y., Zhou, J. et Huang, X. (2019). Porous labyrinthine acoustic metamaterials with high transmission loss property. *Journal of Applied Physics*, 125(21):215110. (Cited on page 1)

Jia, Z., Li, J., Shen, C., Xie, Y. et Cummer, S. A. (2018). Systematic design of broadband path-coiling acoustic metamaterials. *Journal of Applied Physics*, 123(2). (Cited on page 1)

Jiménez, N., Huang, W., Romero-García, V., Pagneux, V. et Groby, J.-P. (2016). Ultra-thin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption. *Applied Physics Letters*, 109(12):121902. (Cited on page 1)

Johnson, D. L., Koplik, J. et Dashen, R. (1987). Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of fluid mechanics*, 176:379–402. (Cited on page 44)

Johnston, W. et Sharma, B. (2021). Additive manufacturing of fibrous sound absorbers. *Additive Manufacturing*, 41:101984. (Cited on page 12)

Jones, M. G., Watson, W. R., Nark, D. M., Howerton, B. M. et Brown, M. C. (2020). A review of acoustic liner experimental characterization at nasa langley. *NASA TP*. (Cited on page 1)

Kamrul, V. H., Bettini, L., Musso, E., Nistri, F., Piciucco, D., Zemello, M., Krushynska, A., Misseroni, D., Pugno, N., Gliozzi, A. *et al.* (2021). Proof of concept for a lightweight panel

with enhanced sound absorption exploiting rainbow labyrinthine metamaterials. *arXiv preprint arXiv :2110.05026*. (Cited on pages 2 and 79)

Kino, N. et Ueno, T. (2007). Investigation of sample size effects in impedance tube measurements. *Applied Acoustics*, 68(11):1485–1493. (Cited on pages 20 and 69)

Kuschmitz, S., Ring, T. P., Watschke, H., Langer, S. C. et Vietor, T. (2021). Design and additive manufacturing of porous sound absorbers—a machine-learning approach. *Materials*, 14(7):1747. (Cited on page 12)

Lafarge, D., Lemarinier, P., Allard, J. F. et Tarnow, V. (1997). Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4):1995–2006. (Cited on page 44)

Lee, I., Jeon, K. et Park, J. (2013). The effect of leakage on the acoustic performance of reactive silencers. *Applied Acoustics*, 74(4):479–484. (Cited on pages 20 and 69)

Levy, T. et Sanchez-Palencia, E. (1977). Equations and interface conditions for acoustic phenomena in porous media. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 61(3):813–834. (Cited on page 44)

Li, Y., Liang, B., Zou, X.-Y. et Cheng, J.-C. (2013). Extraordinary acoustic transmission through ultrathin acoustic metamaterials by coiling up space. *Applied Physics Letters*, 103(6). (Cited on page 1)

Liang, Z. et Li, J. (2012). Extreme acoustic metamaterial by coiling up space. *Physical review letters*, 108(11):114301. (Cited on page 1)

Liu, Z., Zhan, J., Fard, M. et Davy, J. L. (2016). Acoustic properties of a porous polycarbonate material produced by additive manufacturing. *Materials Letters*, 181:296–299. (Cited on page 1)

Luu, H. T., Perrot, C., Monchiet, V. et Panneton, R. (2017a). Three-dimensional reconstruction of a random fibrous medium : Geometry, transport, and sound absorbing properties. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(6):4768–4780. (Cited on page 6)

Luu, H. T., Perrot, C. et Panneton, R. (2017b). Influence of porosity, fiber radius and fiber orientation on the transport and acoustic properties of random fiber structures. *ACTA Acustica united with Acustica*, 103(6):1050–1063. (Cited on page 44)

Maa, D.-Y. (1975). Theory and design of microperforated panel sound-absorbing constructions. (Cited on page 1)

Maa, D.-Y. (1998). Potential of microperforated panel absorber. *the Journal of the Acoustical Society of America*, 104(5):2861–2866. (Cited on page 1)

Malmary, C. (2000). *Etude théorique et expérimentale de l'impédance acoustique de matériaux en présence d'un écoulement d'air tangentiel*. Thèse de doctorat, Le Mans. (Cited on page 86)

Mbailassem, F. (2016). *Contrôle du bruit par effets de localisation par géométries irrégulières*. Thèse de doctorat, Université de Lyon. (Cited on page 20)

Meng, Y., Romero-García, V., Gabard, G., Groby, J.-P., Bricault, C. et Goudé, S. (2023). Subwavelength broadband perfect absorption for unidimensional open-duct problems. *Advanced Materials Technologies*, page 2201909. (Cited on page 2)

Mitutoyo (2016). *Mitutoyo PJ-A3000 Profil Projector*. https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/2021_PJ-A3000.pdf. (Cited on pages 23 and 25)

Munjal, M. L. (1987). *Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design*. John Wiley & Sons. (Cited on page 89)

Oh, T. S. et Jeon, W. (2022). Acoustic metaliners for sound insulation in a duct with little flow resistance. *Applied Physics Letters*, 120(4). (Cited on pages 2 and 87)

Olny, X. (1999). *Absorption acoustique des milieux poreux à simple et double porosité : Modélisation et validation expérimentale*. Thèse de doctorat, Lyon, INSA. (Cited on page 43)

Olny, X. et Boutin, C. (2003). Acoustic wave propagation in double porosity media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(1):73–89. (Cited on page 14)

Opiela, K. C., Zieliński, T. G., Dvorák, T. et Kúdela Jr., S. (2021). Perforated closed-cell aluminium foam for acoustic absorption. *Applied Acoustics*, 174:107706. (Cited on page 1)

Perrot, C., Chevillotte, F. et Panneton, R. (2008). Dynamic viscous permeability of an open-cell aluminum foam : Computations versus experiments. *Journal of Applied Physics*, 103(2). (Cited on page 44)

Pierce, A. D. (2019). *Acoustics : an introduction to its physical principles and applications*. Springer. (Cited on page 43)

Pride, S. R., Morgan, F. D. et Gangi, A. F. (1993). Drag forces of porous-medium acoustics. *Physical review B*, 47(9):4964. (Cited on page 44)

Ring, T. P. et Langer, S. C. (2019). Design, experimental and numerical characterization of 3d-printed porous absorbers. *Materials*, 12(20):3397. (Cited on page 12)

Sack, S. (2017). *Experimental and numerical multi-port eduction for duct acoustics*. Thèse de doctorat, KTH Royal Institute of Technology. (Cited on page 87)

Sakamoto, S., Azami, T., Nitta, I. et Tsukiyama, Y. (2016). Fundamental study of acoustic leakage through a gap between gasket and flange surface. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 10(4):JAMDSM0067–JAMDSM0067. (Cited on page 69)

Salissou, Y. et Panneton, R. (2010). Wideband characterization of the complex wave number and characteristic impedance of sound absorbers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(5):2868–2876. (Cited on pages 46 and 58)

Sarpero, E., Gourdon, E. et Borelli, D. (2023). Experimental development and optimization of a standing wave thermoacoustic refrigerator using additive manufactured stacks. *International Journal of Refrigeration*, 146:63–73. (Cited on page 41)

Sekar, V., Noum, S. Y. E., Putra, A., Sivanesan, S. et Sheng, D. D. C. V. (2022). Fabrication of light-weighted acoustic absorbers made of natural fiber composites via additive manufacturing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 5(4):520–527. (Cited on page 2)

Selamet, A., Kim, H. et Huff, N. T. (2009). Leakage effect in Helmholtz resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(3):1142–1150. (Cited on page 69)

Sellen, N. (2003). *Modification de l'impédance de surface d'un matériau par contrôle actif : Application à la caractérisation et à l'optimisation d'un absorbant acoustique*. Thèse de doctorat, Ecully, Ecole centrale de Lyon. (Cited on pages 2, 88, and 89)

Sellen, N., Cuesta, M. et Galland, M.-A. (2006). Noise reduction in a flow duct : Implementation of a hybrid passive/active solution. *Journal of sound and vibration*, 297(3-5):492–511. (Cited on pages 2 and 88)

Setaki, F., Tenpierik, M., Turrin, M. et van Timmeren, A. (2014). Acoustic absorbers by additive manufacturing. *Building and Environment*, 72:188–200. (Cited on page 2)

Stratasys (2015). *Fortus 450mc*. https://www.stratasys.com/siteassets/3d-printers/printer-catalog/fdm-printers/fortus-450mc/pss_fdm_fortus450mc_0721a.pdf?v=48ec21. (Cited on page 7)

Tang, P. K. et Sirignano, W. A. (1973). Theory of a generalized helmholtz resonator. *Journal of Sound and Vibration*, 26(2):247–262. (Cited on page 37)

Tester, B. (1973a). Acoustic energy flow in lined ducts containing uniform or "plug" flow. *Journal of Sound and Vibration*, 28(2):205–215. (Cited on page 88)

Tester, B. (1973b). The optimization of modal sound attenuation in ducts, in the absence of mean flow. *Journal of Sound and Vibration*, 27(4):477–513. (Cited on page 88)

Tran, Q. V., Perrot, C., Panneton, R., Hoang, M. T., Dejaeger, L., Marcel, V. et Jouve, M. (2023). Effect of polydispersity on the transport and sound absorbing properties of three-dimensional random fibrous structures. *arXiv preprint arXiv :2309.09388*. (Cited on page 6)

Tuan, D. N., Alireza, K., Gabriele, I., Kate, T. N. et David, H. (2018). Additive manufacturing (3d printing) : A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B : Engineering*, 143:172–196. (Cited on pages 7 and 12)

UltiMaker (2015). *UltiMaker S5*. https://ultimaker.com/3d-printers/s-series/ultimaker-s5/. (Cited on page 7)

Utsuno, H., Tanaka, T., Fujikawa, T. et Seybert, A. F. (1989). Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86(2):637–643. (Cited on page 46)

VEVOR (2016). *VEVOR digital ultrasonic cleaner*. https://d2v0huudrf11kh.cloudfront.net/vevor-center-goods/UltrasonicCleanerManual_1656321320775.pdf. (Cited on page 20)

Weiglhofer, W. S. et Lakhtakia, A. (2003). *Introduction to complex mediums for optics and electromagnetics*, volume 123. SPIE press. (Cited on page 1)

Wu, X., Su, Y. et Shi, J. (2019). Perspective of additive manufacturing for metamaterials development. *Smart Materials and Structures*, 28(9):093001. (Cited on page 1)

Xiao, H., Yuan, T., Song, X., Chen, J., Zhou, J., Sui, D. et Gu, J. (2022). Broadband sound absorption of subwavelength porous meta-liner. *Frontiers in Materials*, 9:845597. (Cited on page 2)

Xie, Y., Popa, B.-I., Zigoneanu, L. et Cummer, S. A. (2013). Measurement of a broadband negative index with space-coiling acoustic metamaterials. *Physical review letters*, 110(17):175501. (Cited on page 1)

Xiong, L., Nennig, B., Aurégan, Y. et Bi, W. (2017). Sound attenuation optimization using metaporous materials tuned on exceptional points. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(4):2288–2297. (Cited on page 87)

Yaniv, S. L. (1973). Impedance tube measurement of propagation constant and characteristic impedance of porous acoustical material. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 54(5):1138–1142. (Cited on page 69)

Yuan, S., Li, S., Zhu, J. et Tang, Y. (2021). Additive manufacturing of polymeric composites from material processing to structural design. *Composites Part B : Engineering*, 219:108903. (Cited on page 7)

Zhao, T., Chen, Y., Zhang, K. et Hu, G. (2021). Tunable network sound absorber based on additive manufacturing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 150(1):94–101. (Cited on page 2)

Zieliński, T. G., Dauchez, N., Boutin, T., Leturia, M., Wilkinson, A., Chevillotte, F., Bécot, F.-X. et Venegas, R. (2022). Taking advantage of a 3d printing imperfection in the development of sound-absorbing materials. *Applied Acoustics*, 197:108941. (Cited on pages 14, 15, 20, 68, and 70)

Zieliński, T. G., Opiela, K. C., Dauchez, N., Boutin, T., Galland, M.-A. et Attenborough, K. (2023). Low frequency absorption by 3d printed materials having highly tortuous labyrinthine slits in impermeable or microporous skeletons. *In 10th Convention of the european Acoustics Association*. (Cited on page 14)

Zieliński, T. G., Opiela, K. C., Pawłowski, P., Dauchez, N., Boutin, T., Kennedy, J., Trimble, D., Rice, H., Van Damme, B., Hannema, G., Wróbel, R., Kim, S., Ghaffari Mosanenzadeh, S., Fang, N. X., Yang, J., Briere de La Hosseraye, B., Hornikx, M. C., Salze, E., Galland, M.-A., Boonen, R., Carvalho de Sousa, A., Deckers, E., Gaborit, M. et Groby, J.-P. (2020a). Reproducibility of sound-absorbing periodic porous materials using additive manufacturing technologies : Round robin study. *Additive Manufacturing*, 36:101564. (Cited on pages 11, 13, 18, 21, 38, 60, 61, 80, and 83)

Zieliński, T. G., Venegas, R., Perrot, C., Červenka, M., Chevillotte, F. et Attenborough, K. (2020b). Benchmarks for microstructure-based modelling of sound absorbing rigid-frame porous media. *Journal of Sound and Vibration*, 483:115441. (Cited on pages 45 and 47)

dernière page de la thèse

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 25 mai 2016 modifié par l'arrêté du 26 août 2022,

Vu la demande du directeur de thèse

Madame M-A. GALLAND et Monsieur M. ICHCHCOU

et les rapports de

M. C. PERROT
Professeur, MSME, 5 boulevard Descarte 77454 Marne-la-Vallée Cedex 2

et de

Mme E. SADOULET-REBOUL
Maître de Conférences - Mécanique Appliquée - 24 rue de l'Epitaphe - 25000 Besançon

Monsieur JAMOIS Alexis

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

Ecole doctorale Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique

Fait à Ecully, le 11 mars 2024

Pour le directeur de l'École Centrale de Lyon
Le directeur de la recherche



Christophe CORRE

Résumé

Au cours des dernières années, il est devenu possible de réaliser des absorbants acoustiques dont la géométrie était difficile à produire auparavant, grâce au perfectionnement des techniques d'impression 3D. La facilité d'utilisation et les prix abordables de ces techniques permettent d'imaginer la conception de dispositifs absorbants sur mesure pour répondre à une demande spécifique très rapidement. Cela nécessite d'une part de pouvoir imprimer précisément les géométries conçues et d'autre part de pouvoir prédire le comportement acoustique des matériaux imprimés dans la configuration souhaitée.

Les objectifs de cette thèse sont d'étudier l'effet de la variabilité des dimensions d'échantillons produits par impression 3D sur l'absorption acoustique et d'examiner différentes méthodes pour prédire leur comportement, allant d'approches microscopiques complètes mais coûteuses, à des approches macroscopiques rapides mais simplifiées.

La stéréolithographie a été choisie pour imprimer les échantillons à la suite d'une revue des moyens d'impression évalués dans la littérature. Les géométries étudiées consistent en un empilement de volumes (sphériques ou cubiques), reliés dans les trois directions de l'espace par des canaux à l'image de cristaux cubiques. Une variante à double réseau permet également d'ouvrir quelques pistes en vue d'une optimisation des absorptions réalisées. Pour étudier l'effet de la variabilité, un grand nombre d'échantillons a été fabriqué avec différents jeux de paramètres d'impression et les dimensions caractéristiques des échantillons produits ont été mesurées. Un choix judicieux des paramètres permet de réduire la dispersion.

La pertinence d'une approche fluide équivalent est montrée : elle permet de reproduire fidèlement et à coût réduit les résultats d'une approche directe résolvant les équations de Navier-Stokes linéarisées dans les pores des échantillons. Dans cette approche, les paramètres JCAPL des fonctions du fluide équivalent sont identifiés à partir d'un volume élémentaire représentatif de l'échantillon.

Les échantillons sont d'abord étudiés en incidence normale. Le caractère très résonnant des matériaux rend le coefficient d'absorption très sensible à tout écart entre les dimensions cibles et les dimensions effectivement réalisées. Il en est ainsi pour les dimensions intérieures (diamètre des sphères ou des canaux) et pour le diamètre propre de l'échantillon. La nature rigide des échantillons produits par impression 3D rend très délicate leur adaptation stricte au diamètre du tube de Kundt. Les résultats de la mesure et les prédictions sont cependant globalement en bon accord et confirment dans ce cas classiquement traité dans la littérature, la validité du modèle de fluide équivalent.

Des échantillons ont été ensuite réalisés spécifiquement pour être testés en paroi de conduit, par mesure de la perte par transmission. Les résultats expérimentaux confirment là aussi la pertinence de l'utilisation de l'approche fluide équivalent pour prédire le comportement de ce type de matériau dans des conditions moins classiques.

Mots clefs : Impression 3D, variabilité, matériau acoustique absorbant, perte par transmission, modèle de fluide équivalent