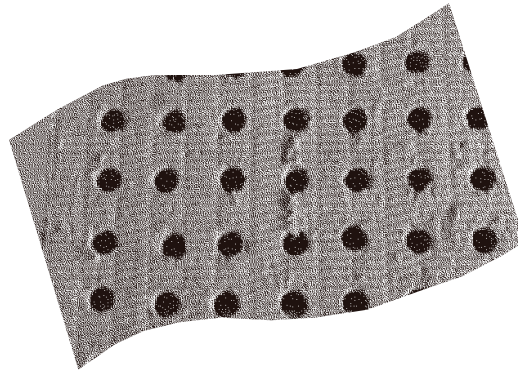


Développement de nouveaux matériaux absorbants à hautes performances acoustiques pour diminuer le bruit en basses fréquences

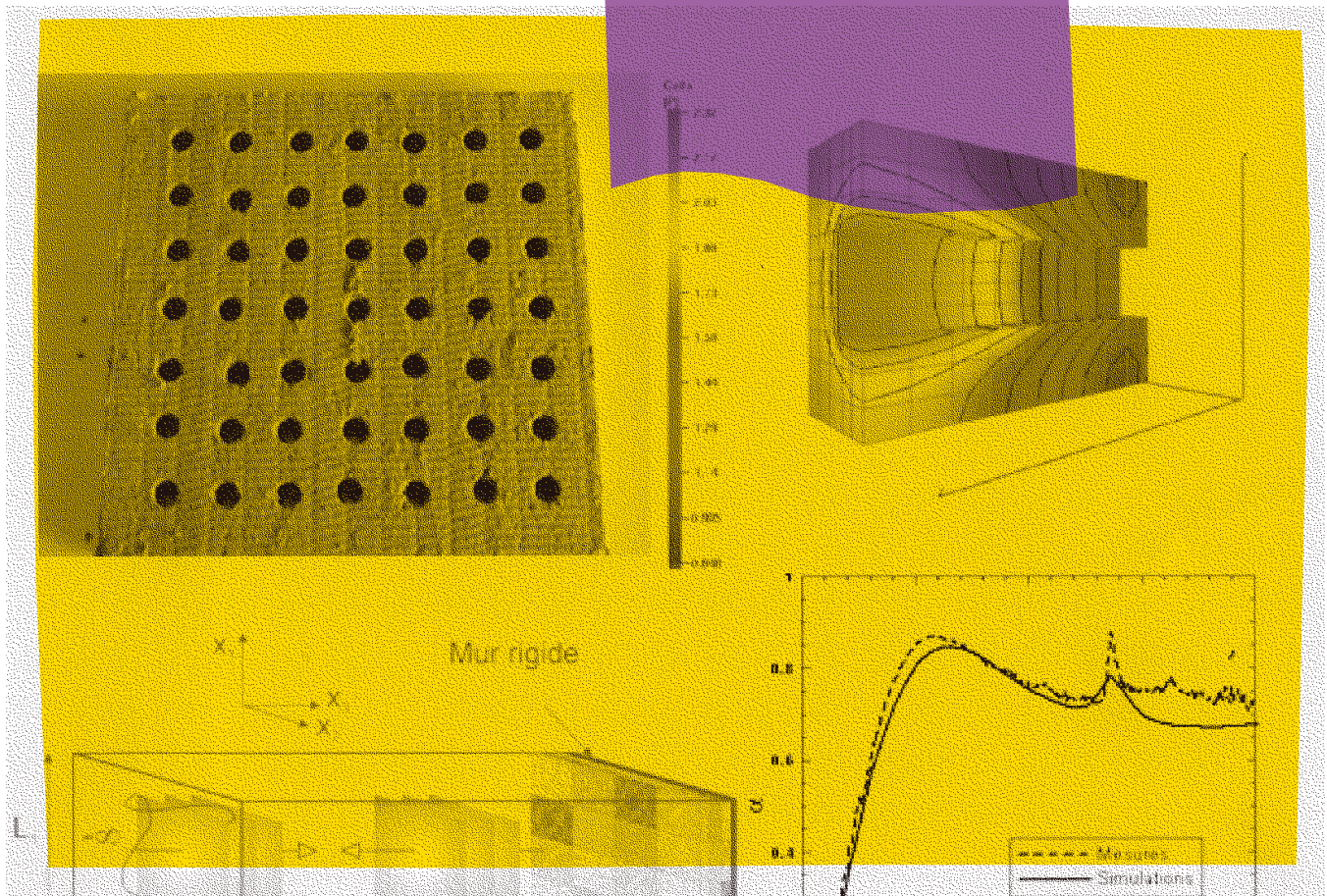


ÉTUDES ET RECHERCHES

Noureddine Atalla
Celse H. Amédin
Youssef Atalla
Raymond Panneton
Franck Sgard

R-370

RAPPORT





Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
avril 2004

**Développement de nouveaux
matériaux absorbants
à hautes performances
acoustiques pour diminuer
le bruit en basses fréquences**

Noureddine Atalla, Celse K. Amédin,
Youssef Atalla et Raymond Panneton
Université de Sherbrooke

Franck Sgard
École nationale des travaux publics de l'État (France)

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

De par les niveaux élevés ainsi que le nombre de travailleurs concernés, les problèmes du bruit produits par les machines sont extrêmement importants et fort complexes. Tous les secteurs sont concernés: fabrication, forage, transport, bâtiment, manufacturier, etc. Parmi les dispositifs absorbants acoustiques généralement utilisés pour réduire ces niveaux de bruit, on distingue les systèmes passifs dissipatifs qui consistent à placer un matériau absorbant sur le trajet de l'onde à absorber. Ces dispositifs passifs dissipatifs sont constitués essentiellement de matériaux poreux (laines, mousses). Ils s'avèrent efficaces en moyennes et hautes fréquences, mais très peu performants dans le domaine des basses fréquences, là où l'énergie émise par les sources peut être relativement importante. De plus, la nécessité de solutions compatibles avec les contraintes de poids, d'épaisseur et de coûts, et l'absence de modèles réalistes basses fréquences simulant finement le comportement vibroacoustique des matériaux poroélastiques, ont fait que les solutions connues et disponibles actuellement ne permettent pas d'agir efficacement sur les basses fréquences. Le développement de nouveaux matériaux à haut pouvoir de dissipation acoustique en basses fréquences est donc d'une importance capitale. Un premier projet, qui a été réalisé dans ce sens avec le concours financier de l'IRSST, a permis de comprendre les mécanismes régissant l'absorption acoustique des matériaux poreux hétérogènes en basses fréquences et d'identifier des solutions à fort potentiel d'applicabilité.

Le projet actuel est une suite du projet précédent. L'**objectif principal** est de poursuivre les travaux antérieurs sur la conception des matériaux à haut pouvoir dissipatif, de les valider dans des configurations industrielles en relation avec la SST. Cet objectif s'articule autour d'une modélisation fine de milieux absorbants, de l'optimisation de matériaux absorbants, de l'élaboration de prototypes optimisés pour l'absorption et la transparence acoustique, et de tests de l'efficacité des concepts élaborés par des mesures expérimentales.

Une grande partie du projet a été consacrée aux tests expérimentaux relatifs à l'absorption acoustique des milieux macro-perforés. Des tests expérimentaux et des études paramétriques ont été effectués en tube de Kundt sur plusieurs échantillons de matériau poreux; elles ont permis de retenir une laine de roche dénommée RHT100. Contrairement au matériau qui a servi aux mesures expérimentales du projet précédent, cette laine de roche n'est pas hautement résistive, mais c'est la seule facilement accessible sur le marché canadien et dont les paramètres sont les moins éloignés des conditions idéales pour une performance optimale des macro-perforations. Pour bien cerner les contributions de ses performances dissipatives en fonction de macro-porosités, ce matériau a été ensuite utilisé pour effectuer des mesures de perte par insertion et de coefficient d'absorption en champ diffus. Ces mesures sont effectivement plus représentatives en contexte industriel que les mesures en tube de Kundt. Les résultats obtenus ont révélé des tendances encourageantes, qui étaient toutefois en deçà des observations faites dans les mesures en tube de Kundt.

La laine de roche RHT100 a été ensuite utilisée pour plusieurs traitements partiels d'une chambre réverbérante, dont l'environnement peut être assimilé à celui d'un contexte industriel, et des mesures de perte par insertion ont été faites. Les résultats expérimentaux obtenus n'ont pas été à la hauteur des prévisions précédemment établies. Les mesures ont toutefois permis de cerner les conditions idéales d'utilisation dans lesquelles les macro-perforations amélioreraient la performance d'absorption des matériaux poreux hautement résistifs. Elles ont aussi permis de

conclure que dans le contexte d'une application industrielle, de simples fentes effectuées dans le matériau peuvent valablement servir de macro-perforations, ce qui éviterait les contraintes financières et techniques liées à la réalisation de macro-perforations de forme circulaire ou rectangulaire.

Une autre partie du projet a été consacrée à l'étude approfondie de la transparence acoustique de matériaux poreux hétérogènes. Une modélisation théorique a été développée, et elle a servi à des investigations numériques qui ont indiqué que des inclusions de fluides ou de solides dans un matériau poreux peuvent contribuer à l'obtention de pertes par transmission plus élevées. Il a été surtout intéressant de relever que les inclusions de poches d'air donnaient les meilleurs résultats, tout en s'accompagnant d'une réduction de poids de l'ensemble du système.

Globalement, le projet a été l'occasion d'explorer et de comprendre l'influence de macro-perforations sur la performance d'absorption et de transparence acoustique de matériaux poreux hautement résistifs. Des difficultés techniques (disponibilité de matériau à très grande résistivité) et le manque de partenaire n'ont toutefois pas permis de tester et d'appliquer les concepts développés dans un contexte industriel réel. Le travail a été tout de même enrichissant sur le plan scientifique. Les formulations originales développées et les résultats expérimentaux obtenus en tube de Kundt ont été présentés dans plusieurs congrès de renommée internationale, et ont été aussi publiés dans des journaux scientifiques. Plus important, vu le grand potentiel de cette technologie, les auteurs poursuivent le projet par des études complémentaires numériques et expérimentales pour l'optimisation de ces nouveaux matériaux et leurs applications dans des domaines tels que le bâtiment, l'automobile et l'aéronautique.

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire	i
Table des matières	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Introduction	1
I Rappel des objectifs de recherche	1
I.1 Objectif principal	1
I.2 Objectifs spécifiques.....	1
II Rappel des développements effectués précédemment	3
II.1 Problématique scientifique et travaux de recherche réalisés	3
II.2 Modèles numériques développés	3
II.3 Résultats obtenus	6
III Premiers tests en environnement quasi-industriel	10
III.1 Le compresseur comme source de bruit.....	10
III.2 Le compresseur et une source calibrée comme sources de bruit	15
III.3 Observations et conclusions sur la première série de tests	17
IV Tests pour le choix d'un matériau approprié	19
IV.1 Mesures de la résistance à l'écoulement sur différents types de laines de roches minérales.....	19
IV.2 Effet de la macro-perforation sur diverses laines de roche.....	20
IV.3 Effet de l'épaisseur sur la macro-perforation de la laine de roche RHT100	24
IV.4 Caractérisation complète de la laine de roche RHT 100	25
V Tests de perte par insertion et d'absorption en champ diffus	27
V.1 Mesures de perte par insertion	27
V.2 Mesures de coefficient d'absorption en champ diffus	31
VI Mesures en environnement semblable à un contexte industriel	39
VI.1 Perte par insertion sur la laine de roche RHT100 dans le cas d'un traitement partiel des murs d'une chambre réverbérante: cas proche d'une application industrielle	39
VI.2 Mesures de pertes par insertion avec utilisation d'une armature en bois autour du matériau: conditions aux bords optimales	42
VII transmission acoustique de matériaux poreux macro-hétérogènes	46
VII.1 Introduction.....	46
VII.2 Modélisation des divers milieux et calcul d'indicateurs acoustiques.....	46
VII.3 Résultats numériques	48
Conclusion	58
Références	60
ANNEXE A : Équations de la poroélasticité de Biot-Allard-Johnson	63

ANNEXE B : Formulation faible {u,p} par éléments finis des équations de Biot-Allard-Johnson.....	64
ANNEXE C : Formulation faible par éléments finis d'un milieu fluide et d'un milieu solide	66
ANNEXE D : Couplage entre un matériau poroélastique et des hétérogénéités de nature fluide, solide et poroélastique	67
ANNEXE E : Couplage entre guide d'onde et matériau poroélastique ou élastique	68
ANNEXE F : Calcul de puissances dissipées et de perte par transmission	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Configuration en absorption.....	5
Figure 2 – Configuration en transmission.....	5
Figure 3 – Exemple de matériau à double porosité et comparaison entre les mesures expérimentales et la modélisation, pour une laine de roche à double porosité.....	7
Figure 4 – Le compresseur utilisé comme source de bruit.....	11
Figure 5 – Une vue du traitement partiel des murs du local avec de la laine minérale homogène.....	11
Figure 7 – Une vue du traitement partiel des murs du local avec de la laine minérale macro-perforée.....	12
Figure 8 – Autre vue du traitement partiel des murs du local avec de la laine minérale macro-perforée.....	13
Figure 9 – Niveaux de pression moyens dans la salle (entre 50 et 2000 Hz).....	14
Figure 10 – Niveaux de pression moyens dans la salle (entre 50 et 500 Hz).....	15
Figure 11 – Photo de la source calibrée HP 1001 de B&K.....	15
Figure 12: Comparaison des niveaux de pression dans la salle avec et sans traitement lorsque le compresseur et la source calibrée sont utilisés comme sources de bruit.	16
Figure 13: Niveaux de pression mesurés lorsque le compresseur et la source calibrée sont en fonction dans différentes configurations de traitements partiel des murs de la salle.	17
Figure 14: Les 5 différentes sortes de laine minérale RHT sur lesquelles on a testé l’effet de macro perforation sur l’absorption.....	20
Figure 15: Effet de doubles porosités sur le coefficient d’absorption de la RHT40.....	21
Figure 16: Effet de doubles porosités sur le coefficient d’absorption de la RHT60.....	21
Figure 17: Effet de doubles porosités sur le coefficient d’absorption de la RHT80.....	22
Figure 18: Effet de doubles porosités sur le coefficient d’absorption de la RHT100.....	22
Figure 19: Effet de doubles porosités sur le coefficient d’absorption de la RHT100_2.....	23
Figure 20: Gain en absorption des laines de roche testées (rapport entre les coefficients d'absorption des macro porosité de 7.56 % et du cas homogène).....	23
Figure 21: Comparaison du coefficient d’absorption de deux épaisseurs différentes de la laine de roche RHT100 homogène.....	24
Figure 22: Effet de l'épaisseur sur l’absorption de la RHT100 macro-perforée.....	25
Figure 23: Caractérisation acoustique et physique de la laine de roche RHT100.....	26
Figure 24: Perte par insertion pour différentes configurations de positionnement des panneaux de la laine de roche RHT100 dans la chambre réverbérante.....	28
Figure 25: Comparaison entre les pertes par insertion du traitement homogène et du traitement avec macro-porosité de 9 % (perforations de 5 cm de diamètre).....	29
Figure 26: Comparaison entre les pertes par insertion du traitement homogène et du traitement avec macro-porosité de 10 % (perforations de 10 cm de diamètre).....	30
Figure 27: Comparaison entre les pertes par insertion du traitement homogène et du traitement avec macro-porosité de 19 % (perforations de 5 cm et de 10 cm de diamètre).....	30
Figure 28: Gain obtenu dans les trois de macro-perforations par rapport au cas de traitement homogène.....	31
Figure 29: Motif des macro-perforations réalisées sur chaque panneau de laine de roche RHT100.....	32
Figure 30: Vue de la surface de matériau traité pour la mesure de coefficient d'absorption en champ diffus.....	32

Figure 31: Autre vue de la surface de matériau traité pour la mesure de coefficient d'absorption en champ diffus.....	33
Figure 32: Coefficient d'absorption en champ diffus de configurations de 5 cm d'épaisseur.	34
Figure 33: Coefficient d'absorption en champ diffus de configurations de 10 cm d'épaisseur. ...	35
Figure 34: Comparaison des coefficients d'absorption en champ diffus pour de macro-porosités de 16.9 % obtenues avec des trous de 10cm de diamètre.....	35
Figure 35: Comparaison des coefficients d'absorption en champ diffus de panneaux de 10 cm, pour différentes macro-porosités.	36
Figure 36: Simulations numériques de coefficients d'absorption en tube de Kundt avec des échantillons de 10 cm d'épaisseur.....	37
Figure 37: Cavité d'air créée par des morceaux de bois de 3.75 cm d'épaisseur.	38
Figure 38: Comparaison des coefficients d'absorption en champ diffus de panneaux de 5 cm reposant sur une cavité d'air de 3.75 cm.	38
Figure 39: Photos du traitement partiel des murs de la chambre réverbérante avec de la laine de roche RHT100 homogène.....	40
Figure 40: Photos du traitement partiel des murs de la chambre réverbérante avec de la laine de roche RHT100 à 5 % de double porosité.....	40
Figure 41: Traitement partiel de la chambre réverbérante avec de la laine de roche RHT100 à 5 % de double porosité.....	41
Figure 42: Photos de traitements partiels avec armature.....	42
Figure 43: Pertes par insertion mesurées dans des configurations de traitement avec cadre – cas basses fréquences.....	43
Figure 44: Pertes par insertion mesurées dans des configurations de traitement avec cadre – cas hautes fréquences.....	43
Figure 45: Illustrations de macro-porosité obtenues à l'aide de fentes.....	44
Figure 46: Perte par insertion de macro-perforations de 5 % avec trous cylindriques et de 4.5 % avec fentes.....	45
Figure 47: Exemple d'un système sandwich placé dans un guide d'onde infini. Le milieu poreux contient des inclusions solides ou fluides.	47
Figure 48: Description des configurations analysées: (a) mousse hétérogène; (b) plaque + mousse hétérogène; (c) plaque + mousse hétérogène + septum.....	49
Figure 49: Effet de 50 inclusions solides sur la perte par transmission sous incidence normale d'une mousse plastique.....	51
Figure 50: Effet de 100 inclusions solides sur la perte par transmission sous incidence normale d'une mousse plastique.....	52
Figure 51: Effet de l'inclusions de poches d'air dans une mousse plastique, sur la perte par transmission sous incidence normale.....	53
Figure 52: Perte par transmission sous incidence normale d'une configuration d'un panneau et d'une mousse plastique avec inclusions solides.....	54
Figure 53: Perte par transmission sous incidence normale d'une configuration composée d'un panneau et d'une mousse plastique avec inclusions fluides.....	55
Figure 54: Perte par transmission sous incidence normale d'une configuration composée d'un panneau, d'une mousse plastique avec inclusions solides et d'un septum en vinyle.....	56
Figure 55: Perte par transmission sous incidence normale d'une structure sandwich composée d'un panneau, d'une mousse plastique avec inclusions fluides et d'un septum en vinyle.....	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Mesures comparatives de la résistance au passage de l'air effectuée sur sept laines de roche minérale fournies par Roxul Inc.	19
Tableau 2. Propriétés des matériaux utilisés.....	50

INTRODUCTION

Ce rapport présente une synthèse des travaux réalisés dans le cadre du projet intitulé: "Développement de nouveaux matériaux absorbants à hautes performances acoustiques pour diminuer le bruit en basses fréquences". La première section est un rappel des objectifs de recherche qui ont été proposés dans la demande de soumission du projet. La seconde section fait un rappel des développements effectués dans un projet précédent, auquel ce projet fait suite. Le rapport final du projet précédent ayant largement abordé les concepts théoriques développés, l'accent est plutôt mis dans ce rapport sur les études expérimentales. Plusieurs sections sont ainsi consacrées à la description et à l'analyse de mesures expérimentales qui ont été menées pour tester divers concepts élaborés pour améliorer les performances d'absorption en basses fréquences. La dernière section est ensuite consacrée aux développements théoriques élaborés pour proposer un concept acoustique performant pour la transmission acoustique, ainsi qu'aux résultats numériques obtenus.

I RAPPEL DES OBJECTIFS DE RECHERCHE

I.1 Objectif principal

Le bruit dégrade les conditions de travail et de sécurité, et il cause de graves problèmes de santé dans la plupart des secteurs industriels. La réduction du bruit repose généralement sur l'utilisation de traitements acoustiques qui impliquent des matériaux poreux classiques (laines, mousses). Toutefois, les performances d'absorption et de transparence acoustique de ces matériaux sont médiocres en basses fréquences. Dans le souci d'améliorer ces performances, un premier projet a été réalisé avec le concours financier de l'IRSST (cf. "Étude numérique et expérimentale de l'absorption acoustique et de la transparence acoustique des matériaux poreux hétérogènes en basses fréquences dans le but d'identifier des solutions à fort potentiel d'applicabilité". Rapport R-278 publié par l'IRSST, Octobre 2001). Il a permis aux chercheurs de montrer que l'utilisation de matériaux basés sur le concept d'hétérogénéité pourrait fournir une réponse à la problématique d'absorption en basses fréquences.

L'objectif principal défini dans la demande de subvention du projet actuel est de **poursuivre les travaux antérieurs sur la conception des matériaux à hauts pouvoirs d'absorption et de les valider dans plusieurs configurations industrielles en relation avec la SST.**

I.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques du projet sont:

- Poursuivre la modélisation et l'optimisation de matériaux poreux hétérogènes à haut pouvoir absorbant (mélange de plusieurs matériaux, effet des films protecteurs, tests dans des configurations industrielles).

- Élaborer des prototypes optimisés basés sur des matériaux poreux hétérogènes, et tester leur efficacité par des mesures expérimentales (absorption).
- Développer un modèle mathématique du comportement vibroacoustique en transmission des matériaux poreux hétérogènes en basses fréquences; étudier numériquement l'influence de la mise en place d'hétérogénéités dans les matériaux poreux sur l'isolation acoustique.

La finalité du projet de recherche est de favoriser une meilleure compréhension des phénomènes d'absorption et de transmission acoustique des matériaux poreux non homogènes, et de proposer de nouveaux concepts qui fournissent une réduction substantielle du bruit rayonné, ce qui autoriserait leur utilisation dans des applications réelles.

II RAPPEL DES DÉVELOPPEMENTS EFFECTUÉS PRÉCÉDEMMENT

II.1 Problématique scientifique et travaux de recherche réalisés

La lutte contre la gêne et les problèmes de santé occasionnés par les nuisances sonores et vibratoires dans l'industrie, les transports, l'environnement et le bâtiment, correspond à une demande très forte de la part des acteurs socio-économiques et scientifiques. L'utilisation de traitements acoustiques passifs, impliquant essentiellement des matériaux poreux classiques (laines, mousses), constitue l'un des moyens les plus utilisés pour réduire ces nuisances sonores. Ces dispositifs sont efficaces en hautes et moyennes fréquences, mais leurs performances acoustiques se dégradent en basses fréquences, alors que beaucoup de spectres de sources de bruit rencontrées dans divers secteurs tels que le trafic routier, les équipements des bâtiments ou l'industrie (machines), présentent une énergie importante dans cette zone. Un **projet de recherche précédent** financé par l'IRSST a donné des résultats très intéressants. Ce premier projet était intitulé: «*Étude numérique et expérimentale de l'absorption acoustique et de la transparence acoustique des matériaux poreux hétérogènes en basses fréquences dans le but d'identifier des solutions à fort potentiel d'applicabilité*». Le rapport final, qui a été publié par l'IRSST en octobre 2001, rend compte des travaux et résultats obtenus, et il relève aussi les difficultés rencontrées par les chercheurs, difficultés inhérentes à un domaine fort complexe. La suite de cette section fait un bref rappel de ces travaux et résultats.

II.2 Modèles numériques développés

Pour augmenter l'absorption acoustique ou diminuer la transparence acoustique de structures à parois multiples (murs, portes, capotages, fuselages, etc.), des matériaux poreux absorbants sont adjoints à ces dernières. En hautes fréquences, pour caractériser leur efficacité à isoler et à absorber le bruit, la loi de masse et des modèles analytiques basés sur des structures à dimensions latérales infinies sont généralement utilisés (Allard, 1993; Bell et Bell, 1994). Mais en basses fréquences, là où la finitude du milieu est importante et le comportement modal est apparent, ces formulations sont inadaptées. Pour corriger ces insuffisances, des modèles d'éléments finis basés essentiellement sur la théorie de Biot ont été développés pour simuler l'absorption et la transparence des structures multicouches avec matériaux poreux dans le domaine des basses fréquences. Ainsi, à partir des modèles de dissipation et des modèles de propagation dans les milieux poreux (Biot, 1956; Allard, 1993), les chercheurs ont développé auparavant des modèles d'éléments finis pour des matériaux à structure élastique, rigide et souple (Panneton et Atalla, 1998, 1997a, 1997b, 1996; Atalla et Panneton, 1996; Atalla et coll., 1998a, 1998b). Ces modèles autorisent la simulation fine du comportement vibroacoustique de matériaux poreux, mais ils sont limités aux matériaux poreux homogènes et isotropes, utilisés seuls ou dans des structures multicouches. L'expérience et les simulations ont montré que ces matériaux traditionnels donnent de bons résultats en hautes et moyennes fréquences, mais des résultats médiocres en basses fréquences. Par ailleurs, très peu d'études portent sur l'optimisation des propriétés absorbantes et de transmission acoustique en basses fréquences des structures multicouches incluant des matériaux acoustiques absorbants.

Dans le but d'améliorer les performances d'absorption et de transmission acoustique en basses fréquences, les chercheurs ont exploré les implications qui découleraient de l'inclusion d'hétérogénéités dans les matériaux poreux homogènes.

La propagation des ondes dans des milieux hétérogènes élastiques ou poroélastiques a été étudiée par de nombreux auteurs. Parmi les travaux des deux dernières décennies, des contributions ont été apportées à la compréhension des mécanismes de propagation dans de tels milieux. On peut citer les travaux fondamentaux de Sornette (Sornette 1989a, 1989b, 1989c), ceux de Auriault et Boutin dans le cadre d'applications géophysiques (Auriault et Boutin, 1992, 1993 ; Boutin et Coll. 1998) et acoustiques (Auriault et Boutin, 1994; Boutin et Royer, 1995; Boutin et Olny, 1999; Olny et Boutin 2003).

Sornette (Sornette 1989a, 1989b, 1989c) a étudié à la fois théoriquement et expérimentalement d'un point de vue microscopique la propagation d'onde dans des milieux élastiques non dissipatifs comportant des hétérogénéités. Il a mis en évidence l'existence de trois comportements différents (propagation, diffusion, localisation) en fonction de la distance parcourue par l'onde à partir de son point d'entrée dans le milieu. Pour des distances inférieures au libre parcours moyen élastique, l'onde se propage. Pour des distances supérieures au libre parcours moyen, l'onde devient diffusive. Enfin, pour des distances encore plus grandes et après le processus de diffusion, l'onde est piégée dans une petite région de l'espace caractérisée par une longueur de localisation dépendant de la fréquence.

Le concept de milieux à double porosité (matériau poreux contenant deux échelles de pores) a été étudié par Auriault et Boutin (Auriault et Boutin, 1992, 1993) et Boutin et Coll. (1998) dans le cadre d'applications géophysiques à partir de la méthode d'homogénéisation des structures périodiques (HSP) appliquée aux matériaux multi-échelles. Ces auteurs ont montré que leur comportement macroscopique dépendait fortement du rapport inter-échelle des tailles caractéristiques des hétérogénéités identifiées dans ces milieux.

Les matériaux méso-perforés étudiés dans le cadre de ce travail sont aussi appelés matériaux à double porosité puisqu'ils sont constitués de deux réseaux de pores interconnectés de tailles caractéristiques différentes. Dans le cas qui nous préoccupe, la taille caractéristique des perforations est donc grande devant la taille des micro-pores du substrat poreux et petite devant la longueur d'onde dans le milieu. Ces matériaux existent à l'état naturel (sol poreux fracturé) ou résultent d'un processus de fabrication (certaines mousses métalliques ou matériaux recyclés, matériaux poreux perforés). Les travaux de Auriault et Boutin ont été étendus en 1999 aux applications acoustiques et une description plus générale de ces milieux a été proposée pour clarifier leurs comportements possibles (Boutin et Olny, 1999; Only 1999; Olny et Boutin 2003). Olny et Boutin (2003) ont appliqué leur théorie à l'absorption acoustique des matériaux poreux. Ils ont montré à la fois de façon théorique et expérimentale que le coefficient d'absorption de matériaux poreux fortement résistifs pouvait être augmenté de façon considérable dans une large bande de fréquence en y pratiquant des méso-perforations appropriées.

Toutefois, l'ensemble des travaux précédents considère le matériau infini et/ou à structure rigide. Les auteurs de ce rapport ont levé ces limitations en utilisant la méthode des éléments finis. La formulation théorique qu'ils ont alors développée est relative à un problème d'absorption ou de transmission acoustique d'un milieu poreux hétérogène, tel qu'illustré par la figure 1 (pour l'absorption) ou la figure 2 (pour la transmission).

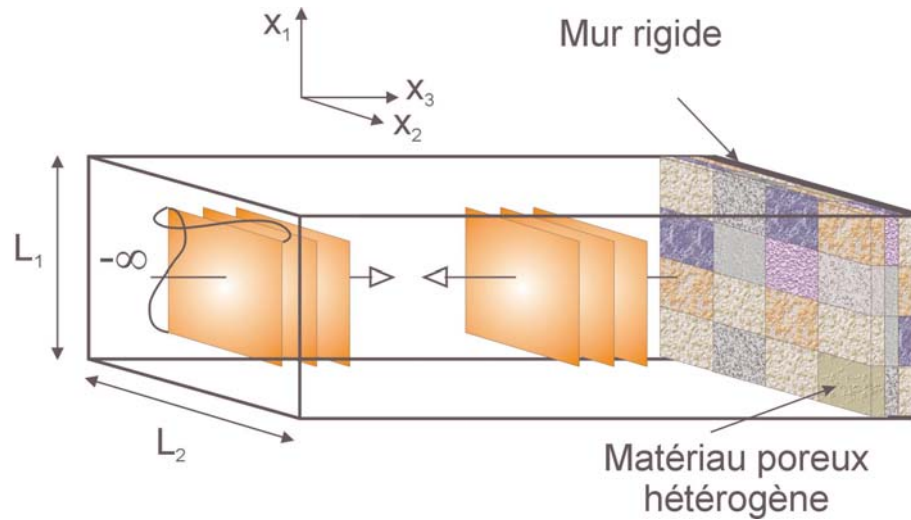


Figure 1 – Configuration en absorption

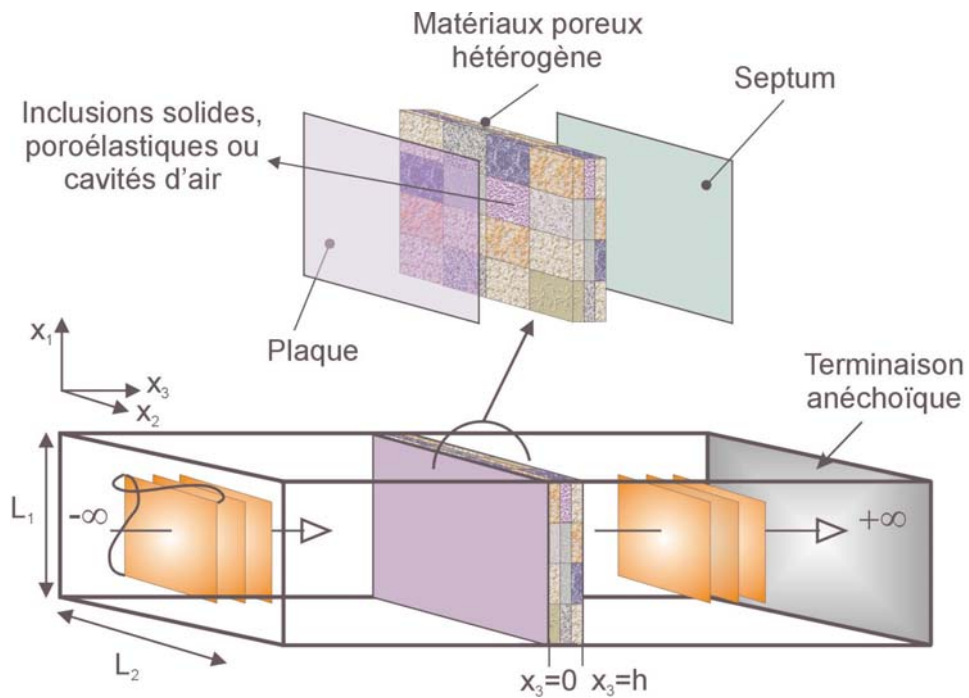


Figure 2 – Configuration en transmission

Pour la configuration en absorption, le matériau est placé au fond d'un guide d'onde rectangulaire semi-infini et est excité par une onde plane provenant d'un haut-parleur. On s'intéresse alors à la partie absorbée par le matériau, c'est-à-dire à la part de l'énergie non réfléchi. Pour la configuration en transmission, le matériau est placé dans un guide d'onde infini et excité d'un côté par une onde plane. On s'intéresse dans ce cas à ce qui est transmis par le matériau dans le milieu récepteur. Le matériau poreux hétérogène est supposé composé de pièces de matériaux poreux homogènes et isotropes (*patches*) poroélastiques, éventuellement combinés à des *patches* fluides ou solides. Les hétérogénéités sont donc d'ordre macroscopique. Le nombre, la dimension, la position, la forme et les propriétés physiques des *patches* sont considérés comme des paramètres du modèle.

La modélisation de chaque *patch* est basée sur la théorie de la poroélasticité de Biot. La formulation mixte $\{u, p\}$ des équations de la poroélasticité, auparavant développée par Atalla et Coll., a été utilisée. Cette formulation permet de réécrire les équations en déplacement $\{u, U\}$ de Biot en termes du vecteur déplacement associé à un squelette viscoélastique équivalent et de la pression dans un fluide compressible saturant l'espace interstitiel. Ce faisant, la formulation $\{u, p\}$ permet la réécriture du système dynamique du problème de la poroélasticité sous la forme classique d'un problème de couplage fluide structure. Par ailleurs, la formulation mixte conduit à un système matriciel de petite taille (quatre degrés de liberté par nœud au lieu de six dans la formulation $\{u, U\}$), autorisant ainsi un gain important en temps de calcul. Plus important, la formulation mixte permet de tenir compte automatiquement, via la procédure d'assemblage, du couplage entre différents matériaux poroélastiques, facilitant ainsi l'assemblage de matériau hétérogène à partir de différentes pièces. Ceci représente un avantage par rapport à la formulation classique en déplacement. Cependant, pour des distributions quelconques de *patches* (solides, fluides ou poroélastiques) dans le matériau poreux, la gestion du calcul des termes de couplage peut représenter une difficulté importante au niveau informatique. Une formulation mixte adaptée selon le type d'hétérogénéité considérée (fluide, solide ou poroélastique) a été alors mise au point pour s'affranchir du calcul de ces termes de couplage.

La modélisation du champ acoustique dans le guide d'onde a été faite par une approche modale, étant donné sa forme géométrique. L'avantage de cette approche par rapport à une méthode d'éléments finis est d'éviter la discrétisation du volume du guide d'onde et la prise en compte de conditions aux limites de type d'impédance aux extrémités du guide. Ce faisant, le guide d'onde est pris en compte de manière exacte sans qu'on n'introduise de degrés de liberté supplémentaires dans le système à résoudre. Les équations de continuité des déplacements normaux acoustique et structural ont été utilisées pour traduire le couplage entre le guide d'onde et les *patch* élastiques. Il a été montré que le couplage entre le champ acoustique dans le guide d'onde et un *patch* poreux ou un fluide se traduit par une matrice d'admittance qui se rajoute sur les degrés de liberté en pression à la surface du matériau. Dans le cas du couplage entre le guide d'onde et un *patch* élastique, c'est plutôt une matrice d'impédance qui se rajoute sur les degrés de liberté en déplacement normal à la surface du matériau.

II.3 Résultats obtenus

Les modèles théoriques développés ont permis de concevoir un code numérique de prédiction de divers indicateurs d'absorption (impédance de surface, coefficient d'absorption, puissances dissipées) de structures multicouches constituées de plaques élastiques, de septum, de milieux acoustiques, de milieux solides et de matériaux poreux hétérogènes, placées dans un guide d'onde. Le code numérique a été d'abord validé expérimentalement dans le cas d'un matériau à *double porosité* qui est constitué d'une laine de roche avec des perforations périodiques contenant de l'air (et appelées macro-pores). Ce matériau est dit à double porosité, pour tenir compte de la micro-porosité de la laine et de la macro-porosité associée aux perforations. La figure 3 présente un exemple de matériau à double porosité, et elle illustre une comparaison entre la simulation et les mesures, pour un matériau de 5.75 cm d'épaisseur. L'excellent accord qui est observé prouve la validité de la méthode et en augmente le niveau de confiance.

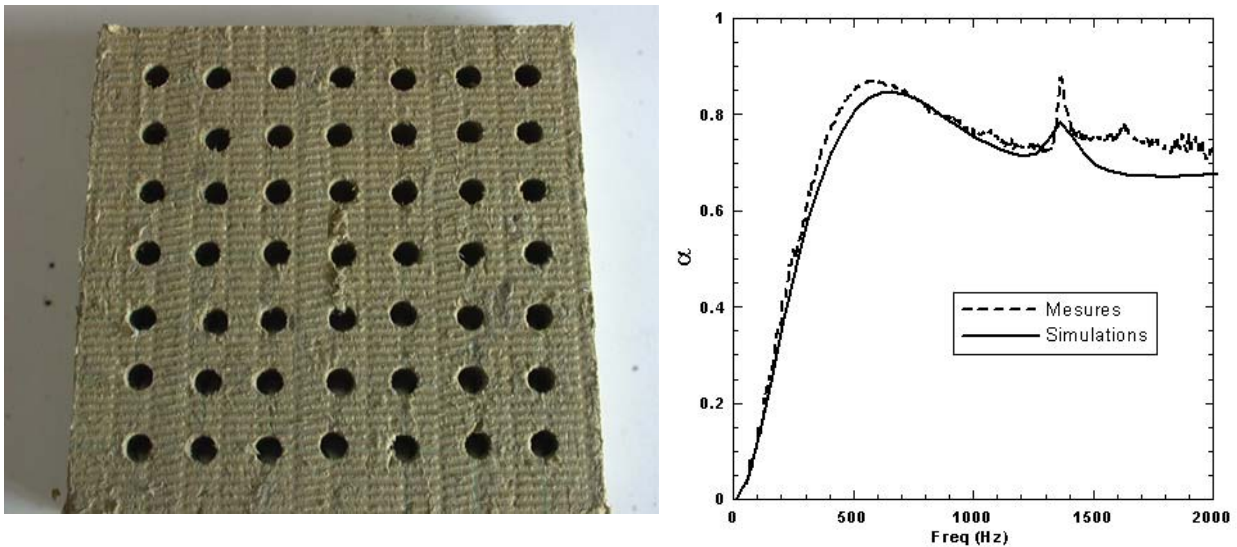


Figure 3 – Exemple de matériau à double porosité et comparaison entre les mesures expérimentales et la modélisation, pour une laine de roche à double porosité

Une vaste étude numérique a été réalisée par la suite, pour analyser l'influence des hétérogénéités sur le coefficient d'absorption des matériaux hétérogènes. Divers tests ont été effectués, et ils ont conduit à des résultats intéressants. Il a été d'abord noté que la valeur de la macro-porosité (c'est-à-dire le rapport entre le volume des perforations et le volume total du matériau) influence l'absorption d'un matériau à double porosité pour une taille de perforation fixée. Il est en effet apparu que la macro-porosité peut être choisie adéquatement pour obtenir un maximum d'absorption dans une bande fréquentielle donnée. En basses fréquences, une petite macro-porosité donne de meilleurs résultats, alors qu'une plus grande macro-porosité permet de mieux contrôler l'absorption en hautes fréquences. Une seconde série de tests a permis de conclure que la taille des perforations, à macro-porosité fixée, peut servir au contrôle de la largeur de bande du pic d'absorption, car il a été noté que la position fréquentielle et la largeur de bande des pics d'absorption augmentent avec la taille de la perforation. Une troisième série de tests a constaté l'influence de la distribution des macro-pores. Il est en effet apparu qu'une distribution compacte donne de meilleures performances d'absorption en basses fréquences, et

qu'une distribution aléatoire offre plutôt une efficacité large bande. La quatrième série de tests a indiqué qu'un ajustement adéquat du profil des macro-pores permet d'améliorer le coefficient d'absorption de façon significative dans une bande de fréquences donnée. Ainsi, il a été noté qu'une diminution progressive de la macro-porosité au fur et à mesure que l'onde s'enfonce dans le matériau permet d'augmenter le coefficient d'absorption dans une bande de fréquences très large. Aussi, une macro-porosité faible en surface du matériau cause l'apparition d'un pic d'absorption très sélectif en basses fréquences, mais le coefficient d'absorption diminue alors en hautes fréquences. La cinquième série de tests a révélé l'influence de la résistivité du matériau perforé, car les macro-perforations sont plus efficaces pour les matériaux à grande résistivité (Olney, 1999). Il a été constaté aussi que si la macro-perforation est plutôt remplie par un autre matériau poreux, la performance d'absorption est alors grandement améliorée dans le cas où le contraste des résistivités des deux matériaux constitutifs est élevé. Finalement, une comparaison numérique a été faite entre une configuration multicouche composée de deux milieux poreux homogènes et une configuration hétérogène constituée d'une distribution aléatoire des mêmes matériaux, le taux de volume occupé par les deux matériaux étant constant dans les deux configurations. Un meilleur coefficient d'absorption a été obtenu dans le cas hétérogène, et ce résultat confirme numériquement que les différents patches interagissent entre eux et qu'une meilleure performance d'absorption peut être obtenue par l'utilisation d'une configuration hétérogène.

L'étude numérique décrite ci-dessus a permis aussi d'évaluer finement la contribution des mécanismes de dissipation thermique et visqueuse dans la performance d'absorption. Il est ainsi apparu clairement que ces deux types de dissipations augmentent l'absorption dans la configuration hétérogène, mais que la plus grande contribution est due à la dissipation visqueuse. Aussi, une série de résultats expérimentaux ont été obtenus en laboratoire pour illustrer certaines conclusions de l'étude numérique.

Le rappel des travaux réalisés dans le projet précédent indique que les chercheurs ont développé un modèle numérique pour simuler le comportement vibratoire et acoustique des matériaux poreux hétérogènes tridimensionnels placés dans un guide d'onde, et ce dans le domaine des basses fréquences. Le modèle a permis d'étudier l'effet des hétérogénéités sur le comportement en absorption des matériaux poreux. Des validations expérimentales ont été faites sur des configurations hétérogènes pour démontrer l'exactitude du modèle développé dans le cas de matériaux fibreux résistifs. Une étude paramétrique numérique a permis de montrer que les patches voisins interagissent entre eux, et que des matériaux hétérogènes donnent des performances supérieures à celles de simples couches de matériaux. En particulier, il a été prouvé que les matériaux poreux macro-perforés résistifs fournissent une augmentation notable des performances d'absorption en basses fréquences, sans qu'il y ait diminution de performances en hautes fréquences.

En somme, l'étude basée sur des simulations et des mesures en configurations tubes de Kundt démontre que la macro-perforation ou encore la double porosité favorise les matériaux denses (lourds) et fortement résistifs. Cette double condition limite le choix pratique des matériaux admissibles.

Le projet précédent a ainsi permis d'acquérir une compréhension des mécanismes régissant l'absorption acoustique des milieux poreux hétérogènes. Le projet actuel devait toutefois le compléter, par la réalisation de tests en configurations industrielles, qui conduiraient à l'élaboration de prototypes industriels optimisés. Aussi, il fallait poursuivre et approfondir les développements théoriques initiés pour l'optimisation de la transparence acoustique des matériaux hétérogènes. Les sections suivantes rendent donc compte des travaux entrepris dans le cadre spécifique du projet actuel.

III PREMIERS TESTS EN ENVIRONNEMENT QUASI-INDUSTRIEL

Cette section rend compte des premières mesures en configuration quasi-industrielle qui ont été réalisées dans le cadre du projet. Les mesures ont été faites dans un local dans lequel se trouve un compresseur qui peut être considéré comme une source de nuisance sonore. Ce type de compresseurs se retrouve couramment dans plusieurs sites d'activités professionnelles.

Le matériau utilisé durant les tests fait partie d'une grande classe de laines de roche minérale distribuées par la compagnie Roxul Inc¹. Cette laine de roche, appelée "cavity rock" est couramment utilisée au Québec pour l'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments industriels. Elle ressemble au matériau qui a servi dans les mesures expérimentales effectuées en tube de Kundt dans le projet précédent, mais elle présente toutefois des propriétés physiques distinctes. En effet, des tests de caractérisation ont révélé que la "cavity rock" est très peu résistive. Elle a une faible résistance au passage de l'air de 26000 N.s/m^4 , alors que celle de la laine de roche utilisée dans le projet précédent est égale à 135000 N.s/m^4 . Or, il avait été observé qu'une très grande résistivité était un facteur important de performance dans le cas des macro-perforations. Le matériau du projet précédent n'est toutefois disponible que sur le marché européen; c'est donc la seule laine de roche minérale qui était disponible sur le marché à Sherbrooke, qui a été retenue pour les premiers tests. Il était convenu que, dépendamment des résultats obtenus, il pourrait s'avérer nécessaire d'explorer d'autres sortes de laines de roche minérale disponibles sur le marché canadien. À titre indicatif, le prix d'un ballot du matériau retenu était de 40 \$.

Les tests effectués visaient à vérifier si le gain en absorption observé lors des mesures en tube de Kundt sur des milieux hautement résistifs, se reproduit lorsque c'est un matériau standard mais peu résistif qui est utilisé dans un contexte plus réaliste, comme celui d'un environnement industriel. Le premier test consistait à effectuer des mesures du niveau de bruit dans un local dont les murs sont partiellement traités avec une laine de roche minérale et dans lequel se trouve un compresseur en marche. Des mesures de niveau de pression dans le local sans traitement, avec traitement sans et avec des macro perforations ont été donc effectuées.

III.1 Le compresseur comme source de bruit

Le compresseur en marche a été premièrement utilisé comme seule source de bruit dans la salle. Six microphones TMS de $\frac{1}{4}$ de pouce ont servi à mesurer le niveau de pression moyen dans la salle. Les six microphones ont été placés pour éviter au mieux le champ direct, ce qui n'était pas évident étant donné les dimensions de la salle et l'espace occupé par le compresseur.

La figure 4 présente une vue du compresseur dans le local, et les figures 5 et 6 illustrent un traitement partiel des murs du local, avec de la laine de roche de 10 cm d'épaisseur. Au total, onze panneaux de dimensions 61 cm x 48 cm et un autre panneau de dimensions 48 cm x 13 cm ont été utilisés dans le traitement des murs. Tous les panneaux ayant une épaisseur de 5 cm, deux

¹ <http://www.roxul.ca>

panneaux de 5 cm ont été superposés dans chaque cas pour obtenir un traitement de 10 cm d'épaisseur.



Figure 4 – Le compresseur utilisé comme source de bruit

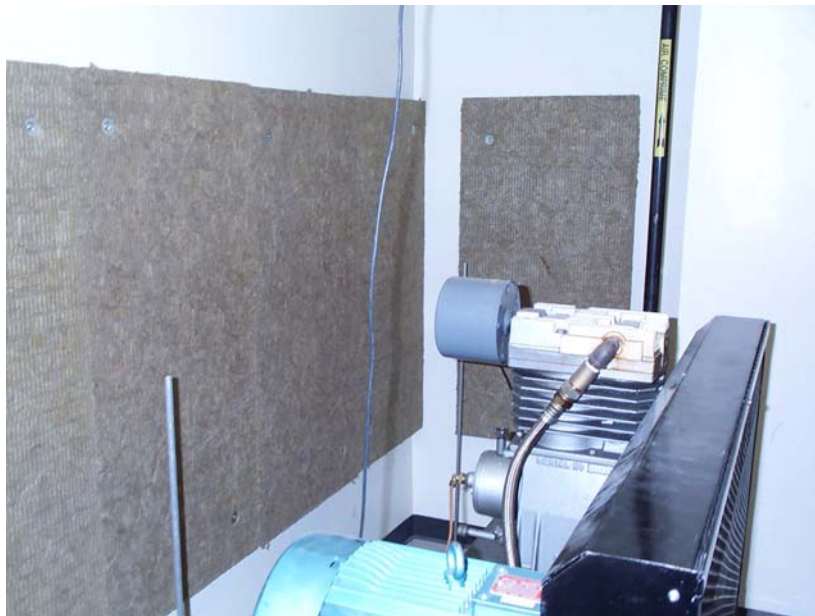


Figure 5 – Une vue du traitement partiel des murs du local avec de la laine minérale homogène



Figure 6 – Autre vue du traitement partiel des murs du local avec de la laine minérale homogène

Les figures 7 et 8 montrent quant-à-elles, les traitements de murs du local avec de la laine de roche macro-perforée. La macro-porosité rajoutée était comprise entre 20 et 24 %, et des macro-perforations de diverses tailles ont été réalisées. Il faut préciser que les macro-perforations ont été faites grossièrement, l'objectif poursuivi étant d'évaluer l'influence des macro-perforations sur la performance acoustique d'un matériau standard couramment utilisé, mais qui est peu résistif.



Figure 7 – Une vue du traitement partiel des murs du local avec de la laine minérale macro-perforée



Figure 8 – Autre vue du traitement partiel des murs du local avec de la laine minérale macro-perforée

Les figures suivantes indiquent les niveaux de pression moyens mesurés dans la salle lorsque le compresseur est en marche, dans cinq configurations suivantes:

- i) La salle vide sans traitement
- ii) La salle partiellement traitée avec de la laine minérale de 5 cm d'épaisseur
- iii) La salle partiellement traitée avec de la laine minérale de 10 cm d'épaisseur
- iv) La salle partiellement traitée avec de la laine minérale macro-perforée de 10 cm d'épaisseur
- v) La salle partiellement traitée avec de la laine minérale macro-perforée de 10 cm d'épaisseur qui est recouverte d'une couche de polyimide résistive (de résistance au passage de l'air de l'ordre de 500.000 N.s/m^4 et de 0.625 cm d'épaisseur). Ce matériau très léger mais hyper-résistif est ajouté ici pour fin d'augmenter l'absorption en basses fréquences.

La figure 9 donne le niveau de pression dans la gamme fréquentielle [50 Hz – 2000 Hz], alors que la figure 10 reprend la même information, mais avec une focalisation sur les basses fréquences couvertes dans la gamme [50 Hz – 500 Hz]. Ces figures indiquent qu'en basses fréquences (125 Hz-350 Hz), la macro-perforation permet un gain de 2-3 dB en moyenne. Mais, en très basses fréquences (50 Hz – 100 Hz), il n'y a pas de différence significative entre les divers traitements. Même comparé au traitement de 5 cm d'épaisseur, le traitement de 10 cm d'épaisseur ne fournit pas de gain notable. Il en est de même de l'ajout de la polyimide. Quelques hypothèses ont été avancées pour expliquer ces résultats décevants:

- d'abord, il y a le fait que le compresseur ne fournit pas un niveau de bruit assez élevé (à peine une moyenne de 65 dB en basses fréquences dans la salle non traitée). Ce niveau de bruit est peu élevé par rapport au bruit de fond dans la salle, et il est alors difficile d'apprécier les gains fournis par un traitement.

- il y a aussi la possibilité que les champs de pression directs (du compresseur aux micros) soient dominants, et qu'ainsi cela ne favorise pas les performances d'absorption des traitements appliqués.

- enfin, une autre possibilité est que le contraste de perméabilités entre le matériau homogène et le matériau macro-perforé ne soit pas adéquat dans la plage de fréquences considérée (Pilon et al, 2003).

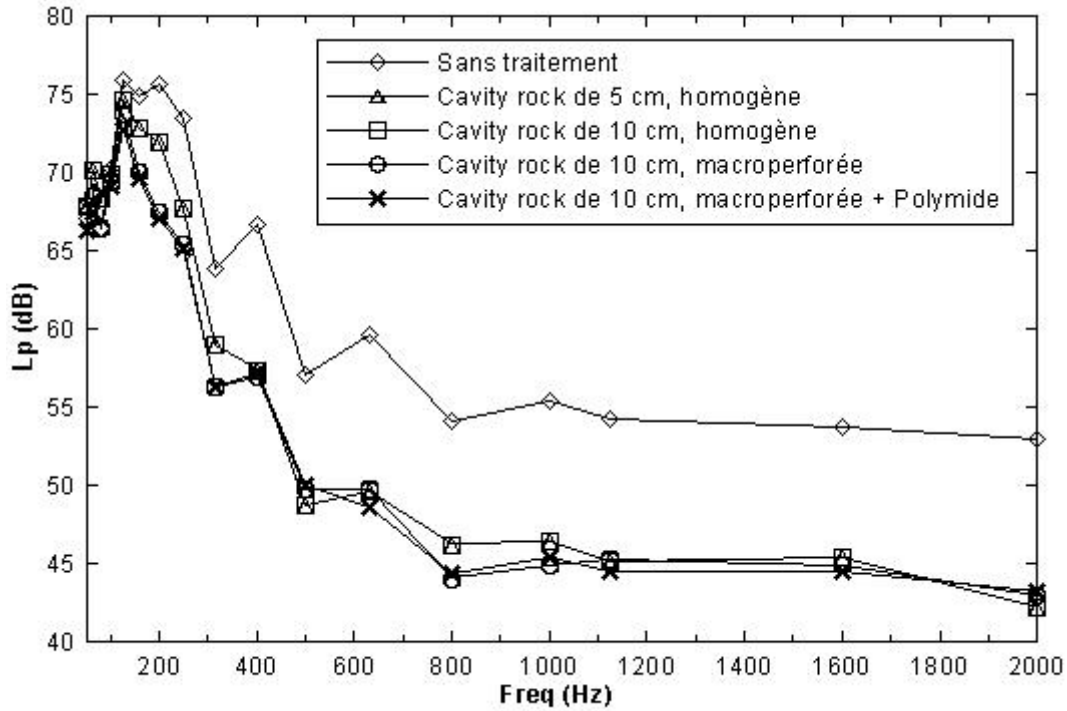


Figure 9 – Niveaux de pression moyens dans la salle (entre 50 et 2000 Hz)

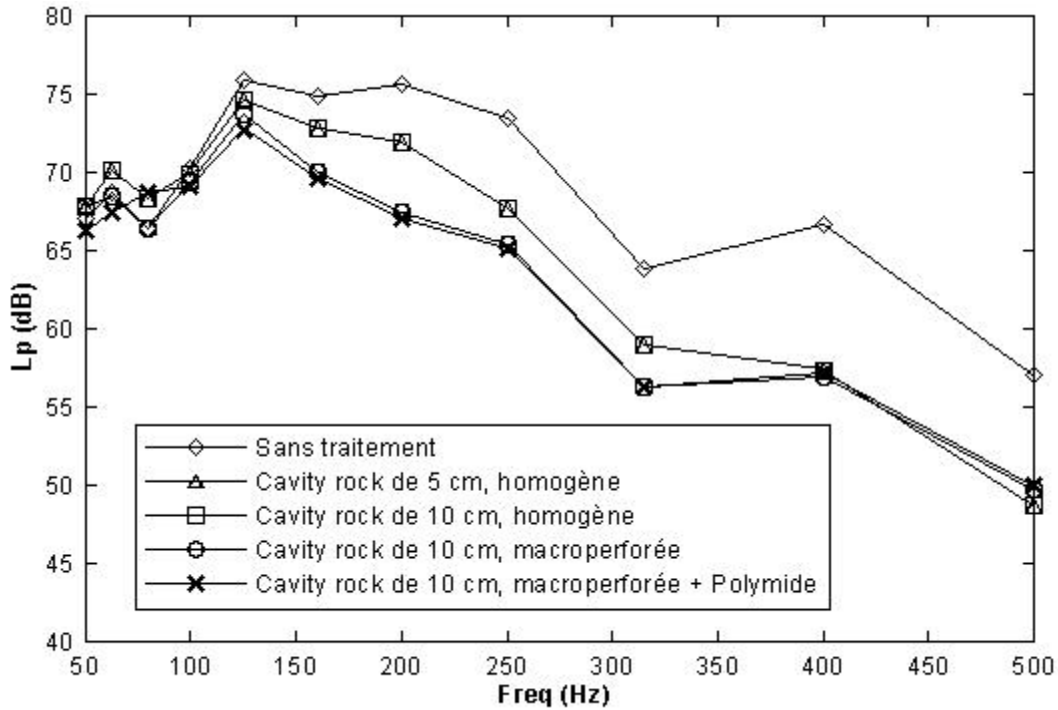


Figure 10 – Niveaux de pression moyens dans la salle (entre 50 et 500 Hz)

III.2 Le compresseur et une source calibrée comme sources de bruit

Pour augmenter le niveau sonore dans la salle, et surtout pour obtenir une meilleure gamme dynamique lors des mesures acoustiques, une deuxième source de bruit a été rajoutée au compresseur. Il s'agit d'une source calibrée, la HP 1001 de marque B&K, qui est représentée par la figure 11.



Figure 11 – Photo de la source calibrée HP 1001 de B&K

La figure 12 fournit une comparaison entre les niveaux de pression dans la salle non traitée et dans la salle partiellement traitée avec de la "cavity rock", lorsque le compresseur et la source calibrée sont tous les deux en fonction. Globalement, il est noté que l'utilisation de la source calibrée comme deuxième source de bruit, se traduit par une amélioration de la gamme dynamique. L'amélioration majeure est observée à partir de 400 Hz. La figure 13 présente ensuite les niveaux de pression mesurés dans les 3 situations suivantes, en utilisant toujours la source calibrée et le compresseur comme sources de bruit:

- i) La salle partiellement traitée avec une couche de 10 cm de laine de roche minérale homogène;
- ii) La salle partiellement traitée avec une couche de 10 cm de laine de roche minérale macro-perforée;
- iii) La salle partiellement traitée avec une couche de 10 cm de laine de roche minérale macro-perforée plus une couche de polyimide résistive de 0.625 cm d'épaisseur.

De la comparaison des niveaux de pression dans ces configurations, il est remarqué que les traitements avec macro-perforations et avec film résistif ne fournissent pas une réduction convaincante du niveau sonore par rapport au cas d'un traitement homogène. Le gain observé en basses fréquences est faible, de l'ordre de 1-2 dB. Comparé au traitement homogène, la performance semble même se dégrader, encore une fois de l'ordre de 1-2 dB, entre 500 Hz et 800 Hz. Cette dégradation est plus visible dans le cas de l'ajout de la couche résistive de polyimide. Ce dernier comportement est classique.

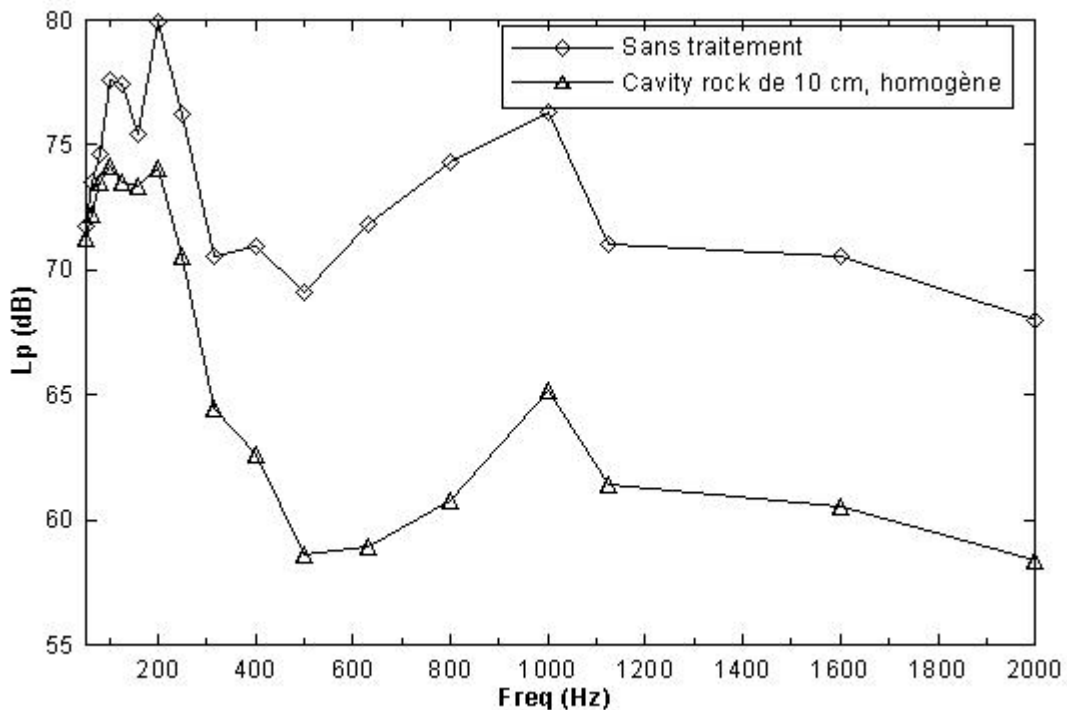


Figure 12: Comparaison des niveaux de pression dans la salle avec et sans traitement lorsque le compresseur et la source calibrée sont utilisés comme sources de bruit.

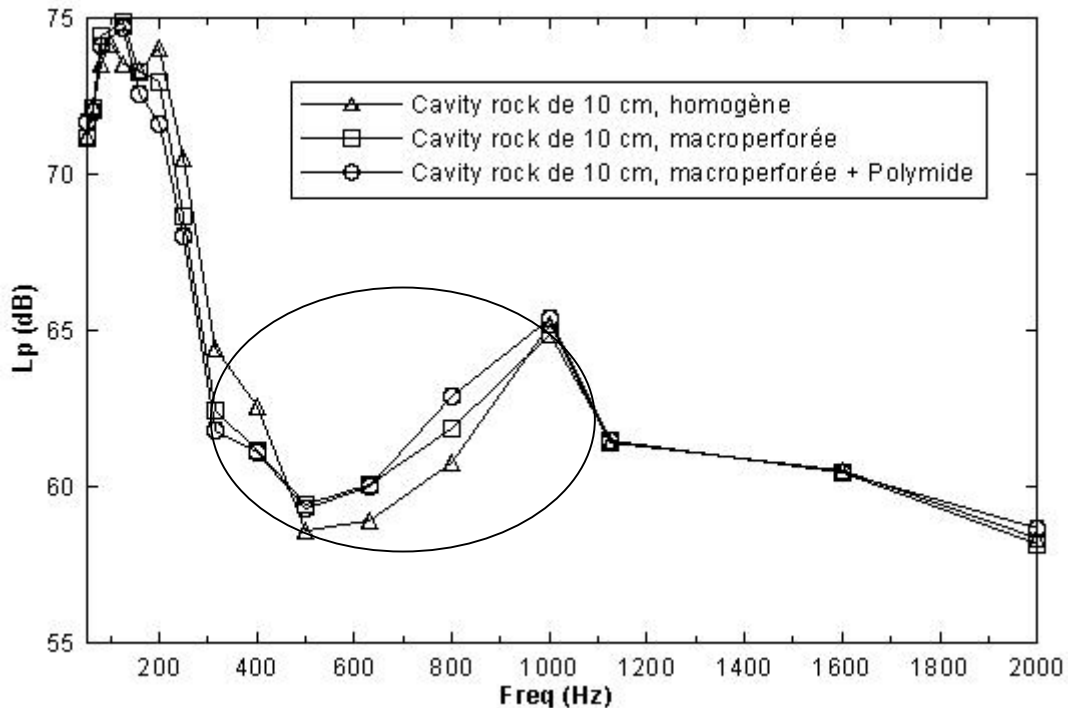


Figure 13: Niveaux de pression mesurés lorsque le compresseur et la source calibrée sont en fonction dans différentes configurations de traitements partiel des murs de la salle.

III.3 Observations et conclusions sur la première série de tests

L'analyse des résultats présentés dans cette section a conduit à formuler les observations suivantes:

- Il n'y a pas eu de réduction du niveau de bruit notable lorsque la laine de roche "cavity rock" est utilisée avec des macro-perforations, comparativement au cas où elle est utilisée sans perforations.
- Cette faible performance des macro-perforations est très probablement due à la faible résistance au passage de l'air de cette sorte de laine de roche minérale. La résistance au passage de l'air n'est effectivement pas assez grande pour que des phénomènes de diffusion se produisent lorsqu'un milieu à double porosité est créé en effectuant des macro-perforations dans le milieu poreux. Il ne faut pas non plus négliger le contraste des perméabilités entre le matériau homogène et le matériau macro-perforé, qui, lorsqu'il n'est pas adéquat, ne favorise pas une contribution significative des macro-perforations (Pilon et al, 2003). Il devenait donc nécessaire d'explorer le marché canadien pour trouver un matériau poreux ayant des caractéristiques physiques et acoustiques plus appropriées (surtout très forte résistivité et grande densité), tout en étant abordable économiquement.
- L'utilisation de deux sources de bruits n'a pas permis d'améliorer les mesures en basses fréquences; elle n'a donc pas suffi à résoudre les difficultés inhérentes d'une part à des modes propres de la salle, et d'autre part au champ proche (la salle étant relativement petite, les sources et les microphones sont proches les uns des autres).

- Le caractère partiel des traitements a aussi été discuté. Les résultats auraient-ils été plus convaincants à partir d'un certain pourcentage de traitement de la salle?
- L'indicateur utilisé est aussi sujet à analyse. Dans les tests en tube de Kundt effectués dans le projet précédent, c'est le coefficient d'absorption qui servait d'indicateur de comparaison, et les études paramétriques ont été faites relativement à cet indicateur. Malheureusement, les observations relevées avec le coefficient d'absorption mesuré en tube de Kundt, ne peuvent pas être automatiquement appliquées à des mesures de niveau de pression en contexte *in situ*. Comme exemple, le taux de macro-porosité optimal qui permettrait que la réduction du bruit associée aux macro-perforations dans le matériau soit perceptible dans des mesures de niveau de pression, n'était pas connu.
- Pour espérer retrouver les indications et tendances obtenues avec les études paramétriques en tube de Kundt, il serait plus approprié de faire des mesures de validation basées sur l'absorption en champ diffus. Avec de telles mesures, l'indicateur de base reste l'absorption, comme dans le cas des mesures en tube de Kundt. Une fois que les tendances en tube de Kundt seraient confirmées avec des mesures d'absorption en champ diffus, des tests en contexte industriel général pourraient être réalisés.

IV TESTS POUR LE CHOIX D'UN MATÉRIAU APPROPRIÉ

Comme cela a été rapporté dans la section précédente, le matériau utilisé pour la première série de mesures expérimentales avait une résistance au passage de l'air peu élevée, alors qu'il a été montré dans le projet précédent que la macro-porosité concourt à une absorption optimale dans le cas de matériau très résistif. Cette section rend compte des divers tests qui ont dû être faits pour retenir un matériau poreux disponible sur le marché canadien et dont les caractéristiques physiques et acoustiques répondent aux critères définis dans le projet précédent. Les premiers tests ont servi à dégager une classe de laines de roche ayant une résistance au passage de l'air assez élevée. Il a fallu ensuite vérifier les effets de la macro-porosité avec les matériaux retenus, pour dégager celui qui validait le mieux les résultats obtenus à partir des études paramétriques. D'autres tests ont pu alors être faits pour déterminer les diverses autres caractéristiques acoustiques et physiques du matériau retenu.

IV.1 Mesures de la résistance à l'écoulement sur différents types de laines de roches minérales

L'objectif de ces mesures était l'identification de matériaux candidats pour les tests en configuration industrielle. Il a été alors demandé à la Compagnie Roxul Canada de fournir des échantillons de différents types de laine de roche minérale. Des mesures de résistance au passage de l'air ont été alors effectuées sur ces échantillons, avec le résistivimètre du Laboratoire de Caractérisation des Matériaux Acoustiques (LCMA) de l'Université de Sherbrooke. Les mesures ont permis d'identifier les matériaux dont la performance d'absorption est susceptible d'être améliorée par des macro-perforations. Le tableau suivant résume les résultats des mesures de résistance au passage de l'air, qui ont été effectuées sur sept matériaux. Le tableau indique aussi la densité de ces matériaux.

Matériau	Résistance au passage de l'air σ (N.s.m ⁻⁴)	Densité ρ (kg/m ³)
Cavity Rock	26600	72
AcousFirBatt	26039	40
AcousFirBatt2	23847	40
Home Insul	13943	40
RHT40	45381	56
RHT60	38166	70
RHT80	81647	94
RHT100	71858	122
RHT100_2	86542	137

Tableau 1. Mesures comparatives de la résistance au passage de l'air effectuée sur sept laines de roche minérale fournies par Roxul Inc.

L'analyse des résultats a indiqué que les laines de roche minérale RHT80, RHT100 et RHT100_2 possèdent les plus grandes résistances au passage de l'air, et aussi les plus grandes

densités. Ces laines de roche pouvaient donc être retenues pour la phase suivante d'identification du matériau.

IV.2 Effet de la macro-perforation sur diverses laines de roche

Afin de valider l'hypothèse selon laquelle l'une ou l'autre des laines de roche RHT80, RHT100 ou RHT100_2 serait un bon candidat pour tester la performance d'absorption d'un milieu à double porosité en contexte industriel, des mesures ont été d'abord effectuées dans un tube d'impédance de 10 cm de diamètre, sur les laines de roche RHT40, RHT60, RHT80, RHT100 et RHT100_2. Les échantillons de ces matériaux sont représentés sur la figure 14. Les macro-porosités ont été obtenues par des perforations de 1.23 cm de diamètre dans des échantillons de 10 cm de diamètre et de 5.08 cm d'épaisseur. Deux macro-porosités ont été testées: une de 4.54 % obtenue avec trois perforations, et une autre de 7.56 % obtenues avec cinq perforations. Les figures 15 à 19 illustrent les résultats de l'effet des deux macro-porosités, respectivement sur les laines RHT40, RHT60, RHT80, RHT100 et RHT100_2.



Figure 14: Les 5 différentes sortes de laine minérale RHT sur lesquelles on a testé l'effet de macro-perforation sur l'absorption

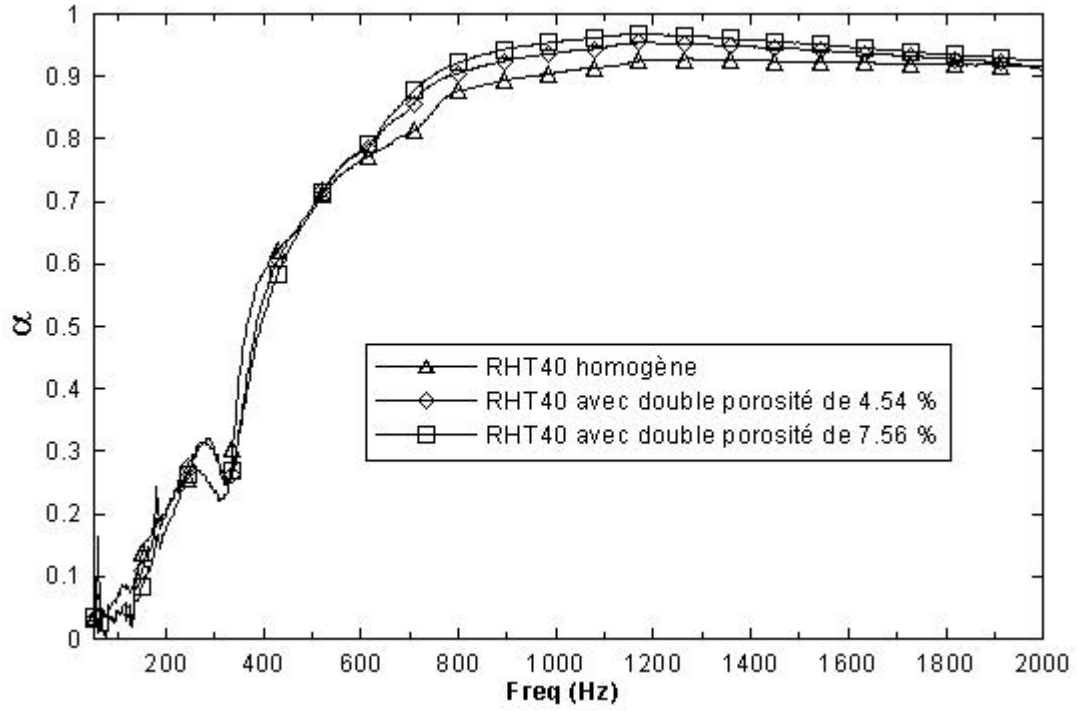


Figure 15: Effet de doubles porosités sur le coefficient d'absorption de la RHT40

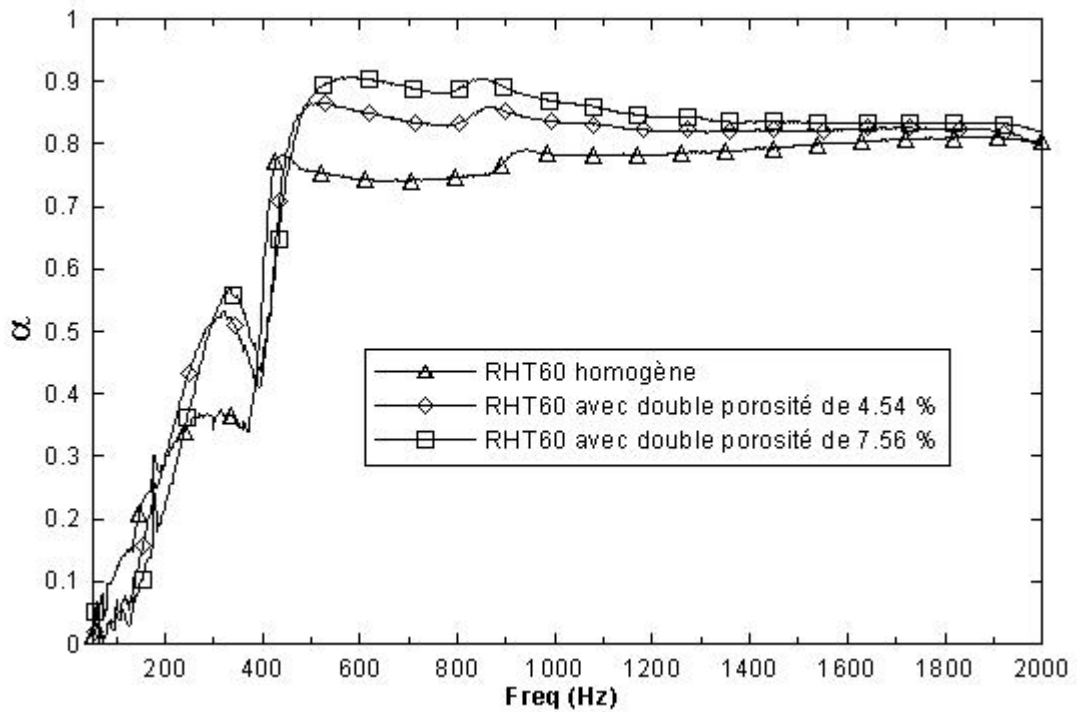


Figure 16: Effet de doubles porosités sur le coefficient d'absorption de la RHT60

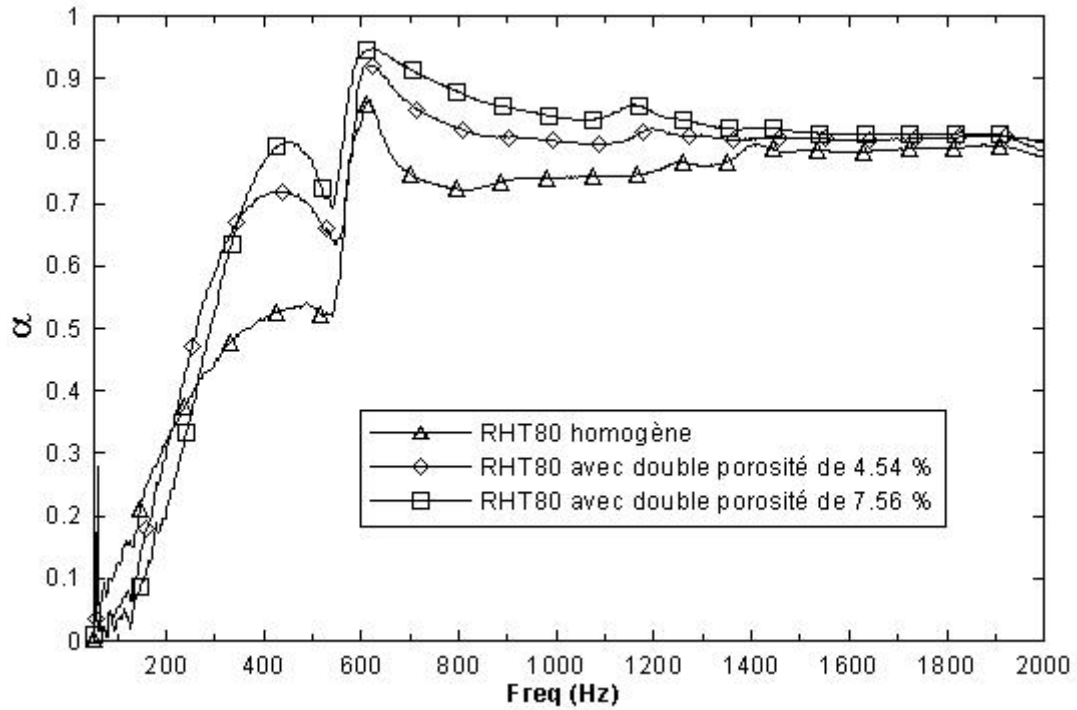


Figure17: Effet de doubles porosités sur le coefficient d'absorption de la RHT80

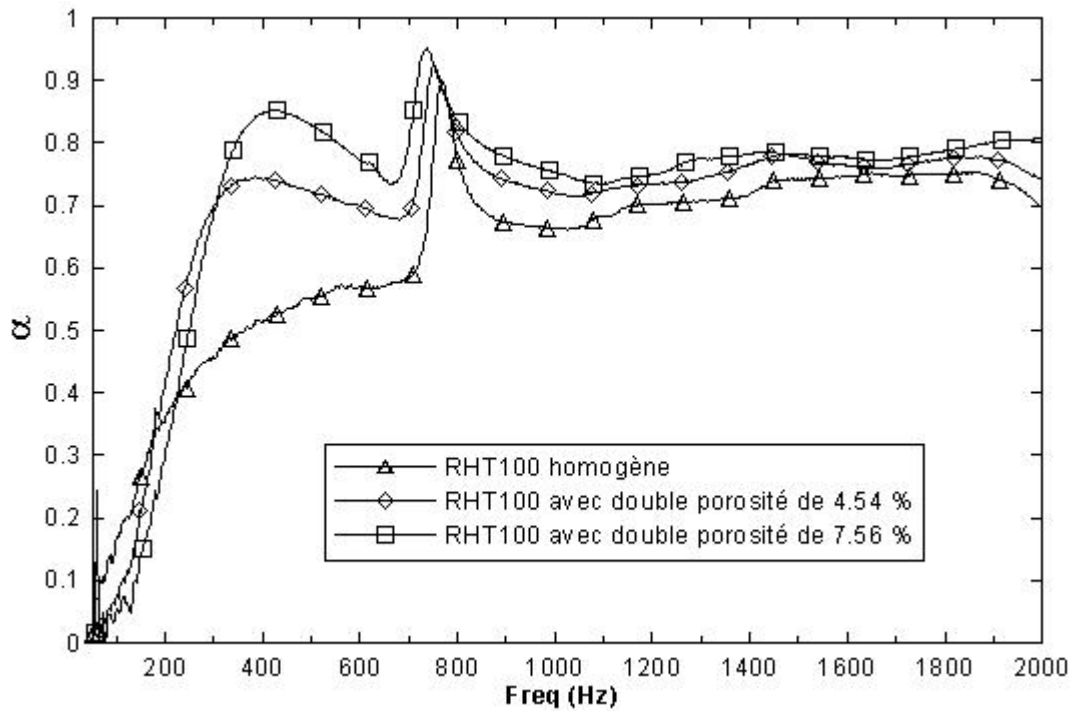


Figure 18: Effet de doubles porosités sur le coefficient d'absorption de la RHT100

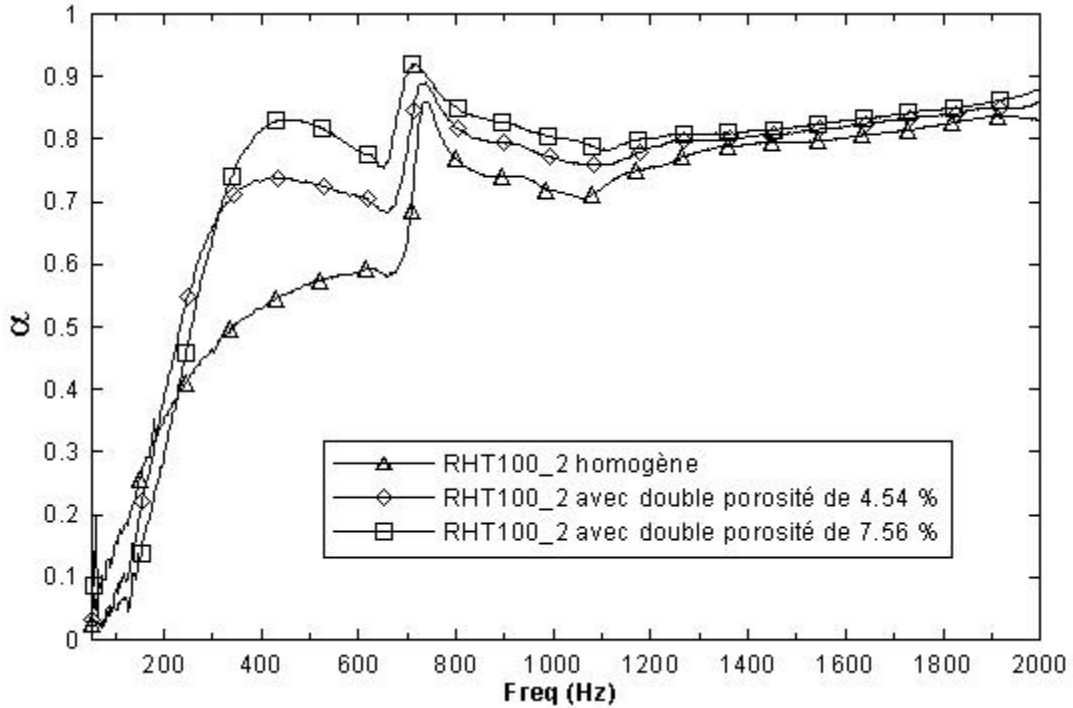


Figure 19: Effet de doubles porosités sur le coefficient d'absorption de la RHT100_2

La figure 20 présente une comparaison du gain en absorption, évalué ici en terme de rapport entre deux coefficients d'absorption, de chacune des cinq laines de roche testées dans le cas de la macro-porosité de 7.56 %, par rapport au cas du matériau homogène.

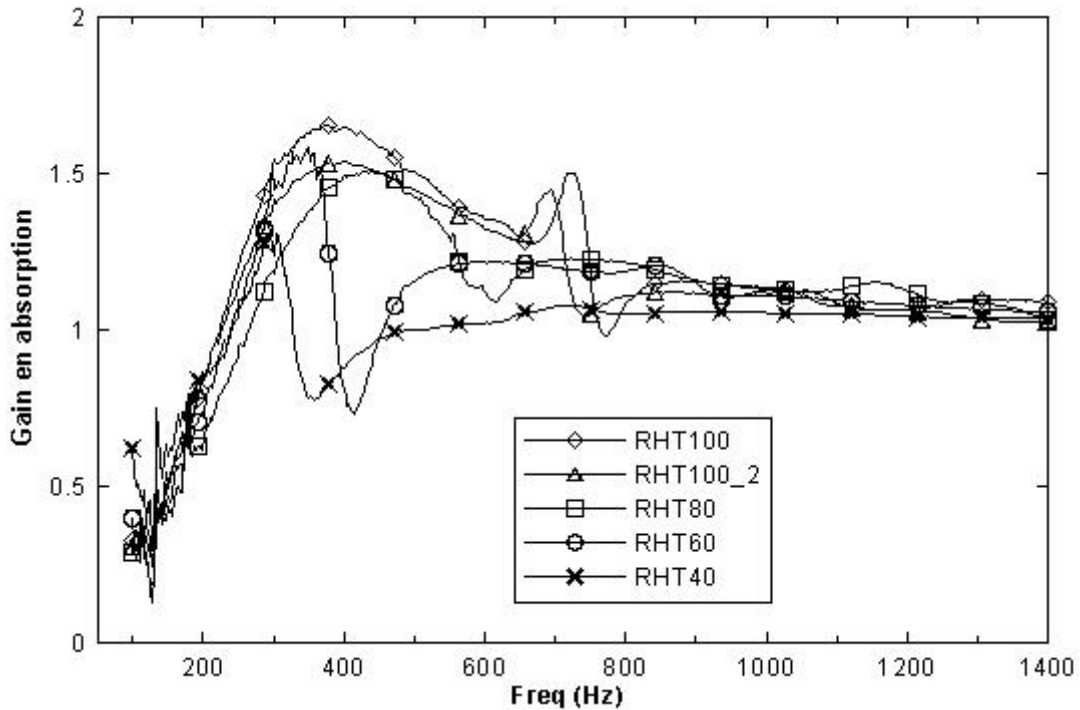


Figure 20: Gain en absorption des laines de roche testées (rapport entre les coefficients d'absorption des macro porosité de 7.56 % et du cas homogène)

L'analyse des six figures précédentes indique que la laine de roche RHT100, mais aussi les RHT80 et RHT100_2 devraient être de bons candidats pour les tests en contexte industriel. En se basant sur la disponibilité du matériau chez le fabricant, le choix s'est porté sur la laine de roche RHT100 pour la suite des tests. Il faut toutefois noter que la résistance au passage de l'air et la densité de la RHT100 demeurent relativement éloignées de celles de la laine de roche «européenne» qui a servi aux tests du projet précédent. Ces propriétés étaient respectivement 135000 N.s/m^4 et 130 Kg/m^3 , alors que pour la RHT100, elles sont respectivement de l'ordre de 72000 N.s/m^4 et 122 Kg/m^3 .

IV.3 Effet de l'épaisseur sur la macro-perforation de la laine de roche RHT100

La figure 21 montre d'abord une comparaison des coefficients d'absorption entre une épaisseur de 5.1 cm (épaisseur standard des panneaux reçus) et une épaisseur de 10.2 cm (obtenue avec un assemblage de deux panneaux) dans le cas de la RHT100 homogène,. Les mesures ont été faites dans un tube de Kundt, sur des échantillons de 4.45 cm de diamètre. Il apparaît que, sauf en dessous de 350 Hz, l'augmentation de l'épaisseur ne se traduit pas par une augmentation du gain d'absorption.

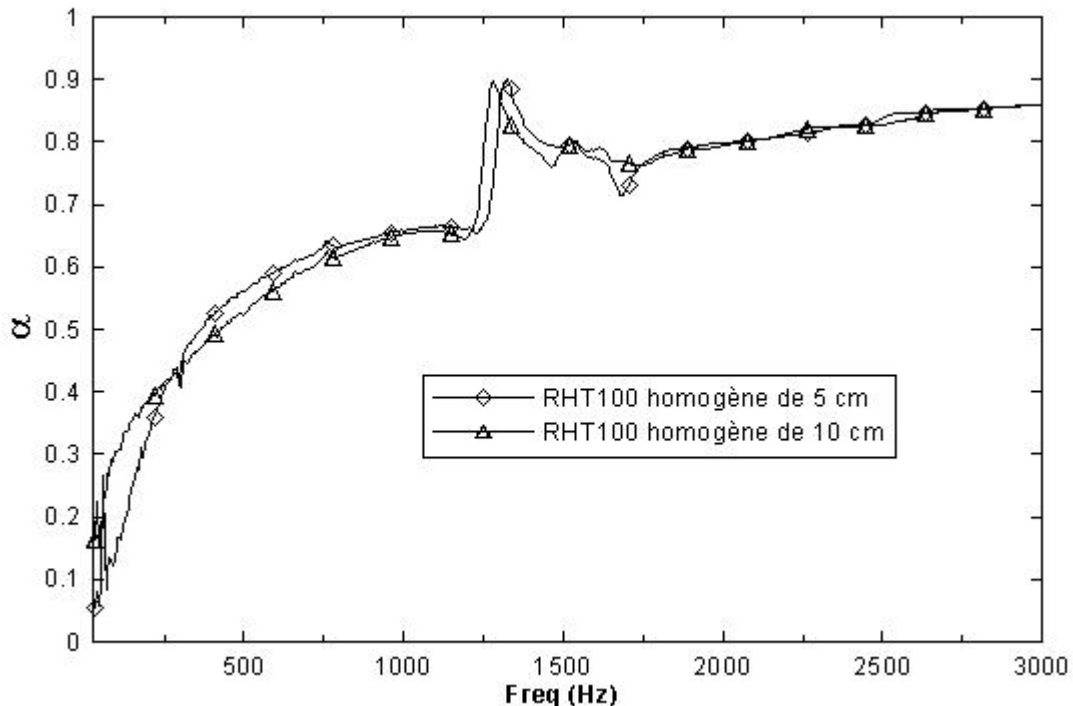


Figure 21: Comparaison du coefficient d'absorption de deux épaisseurs différentes de la laine de roche RHT100 homogène

D'autres tests ont été ensuite effectués, toujours dans le tube de Kundt, pour évaluer l'effet de l'épaisseur sur la performance des macro-perforations. Des macro-porosités de 4.5 %

ont été réalisées sur des échantillons de 4.45 cm de diamètre. Les coefficients d'absorption des épaisseurs de 5.1 cm et 10.2 cm ont été encore comparés. La figure 22 indique que les deux épaisseurs de la RHT100 macro-perforée fournissent un gain d'absorption considérable en basses fréquences par rapport au cas du matériau homogène. Le pic d'absorption de l'épaisseur de 10.2 cm se situe plus autour de 150 Hz, alors que celui de l'épaisseur de 5.1 cm est autour de 350 Hz. Ce résultat est conforme aux prédictions numériques. Pour profiter de l'absorption en très basses fréquences, il est alors convenu que les tests ultérieurs se feraient le plus souvent avec des couches de 10.2 cm d'épaisseur.

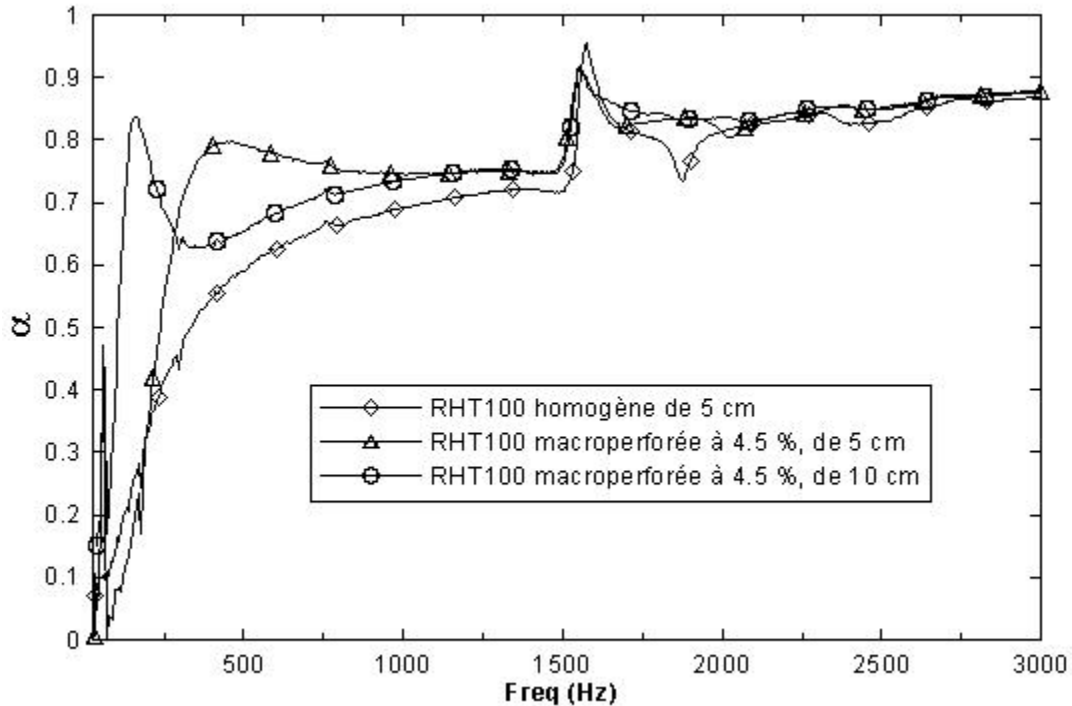


Figure 22: Effet de l'épaisseur sur l'absorption de la RHT100 macro-perforée

IV.4 Caractérisation complète de la laine de roche RHT 100

La laine de roche RHT100 ayant été retenue, une caractérisation complète des propriétés physiques et acoustiques de ce matériau a été alors effectuée à l'aide d'un résistivimètre, d'un porosimètre et du logiciel Foam-X, développé au GAUS et commercialisé par la firme Mecanum². La figure 23 représente l'interface graphique du logiciel ainsi que les résultats obtenus par la caractérisation. Ces propriétés sont nécessaires aux simulations numériques sur le matériau.

² <http://www.mecanum.com>

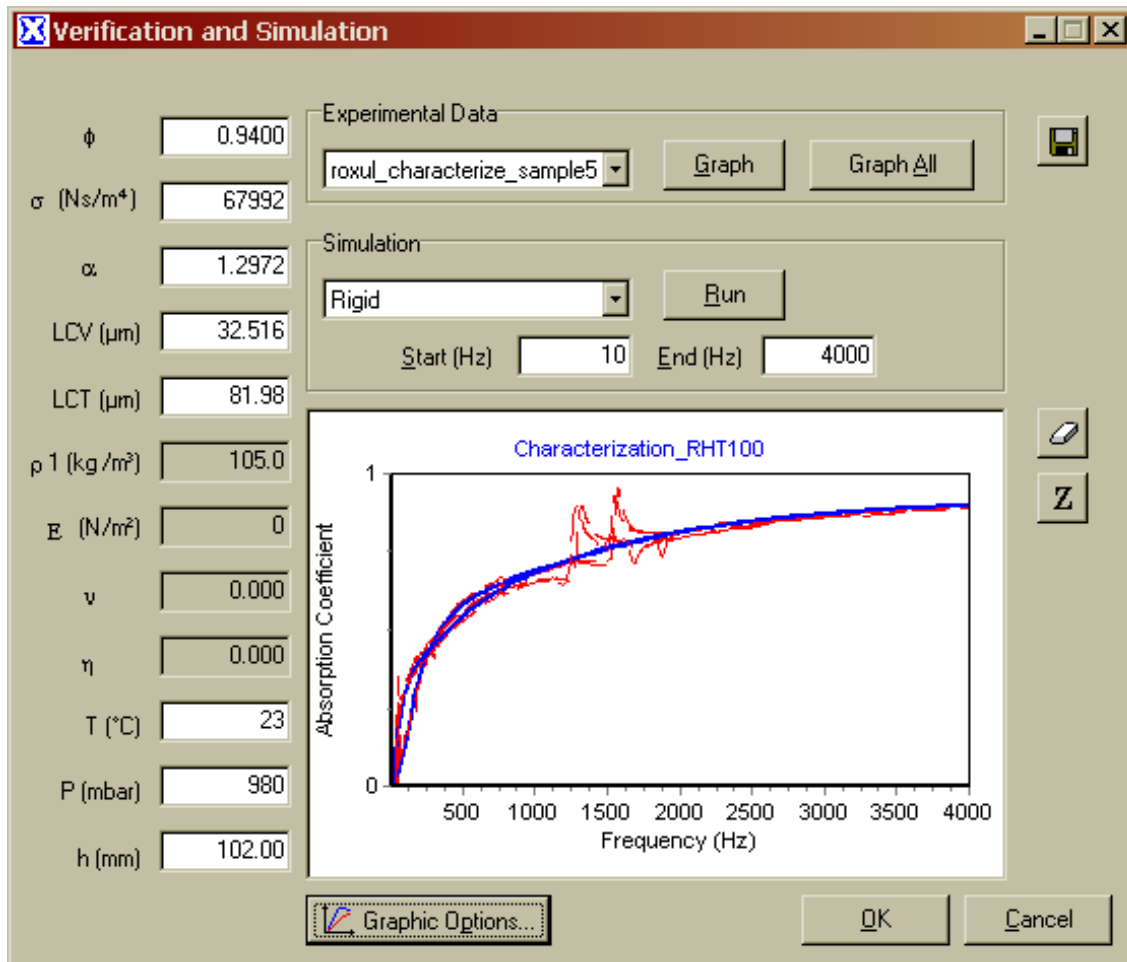


Figure 23: Caractérisation acoustique et physique de la laine de roche RHT100

V.1 Mesures de perte par insertion

Les tests de perte par insertion ont consisté à calculer la différence entre les niveaux de pression mesurés dans une chambre réverbérante non traitée et les niveaux mesurés lorsque des traitements partiels à base de la laine de roche RHT100 homogène ou macro-perforée sont appliqués dans la chambre. La chambre réverbérante est de dimensions 7.5 m x 6 m x 3 m. Six panneaux de RHT100 ont servi pour chacun des traitements. Trois des panneaux sont de dimension latérale 120 cm x 60 cm, et les trois autres sont de dimensions 110 cm x 60 cm. Tous les panneaux ont une épaisseur de 10 cm (qui sont constitués en réalité d'une superposition de deux panneaux de 5 cm d'épaisseur).

Le champ sonore dans la chambre réverbérante a été généré par trois sources acoustiques. Divers tests ont permis de vérifier la répétitivité (stabilité) du champ acoustique dans la chambre. Il est ainsi apparu que le niveau de pression varie au maximum de 0.5 dB entre tests répétés sur plusieurs jours.

a) Configuration adoptée pour le positionnement des panneaux dans la chambre

Vu les dimensions de la chambre réverbérante et le nombre restreint de panneaux de laine RHT100 disponibles, seuls des traitements partiels pouvaient être effectués. Il était donc judicieux de déterminer la position idéale des panneaux qui favorise des mesures avec une excellente gamme dynamique. Quatre configurations de positions des panneaux de la RHT100 ont été alors évaluées dans le cas de traitements homogènes:

- Configuration 1: les panneaux de laine de roche sont déposés sur le plancher et regroupés au centre de la chambre.
- Configuration 2: les panneaux sont déposés sur le plancher mais sont dispersés dans la chambre.
- Configuration 3: les panneaux sont dispersés et accolés verticalement sur les quatre murs de la chambre (la grande surface du panneau repose sur le mur)..
- Configuration 4: les panneaux sont dispersés et accolés horizontalement sur les quatre murs de la chambre (la grande surface du panneau repose sur le plancher).

La figure 24 illustre la comparaison des résultats obtenus dans les quatre configurations évaluées. Elle révèle que la configuration 3 offre la meilleure gamme dynamique en basses fréquences. Par conséquent, cette configuration a été adoptée pour les tests dans lesquels la perte par insertion du traitement homogène sera comparée à celle de traitement macro-perforé.

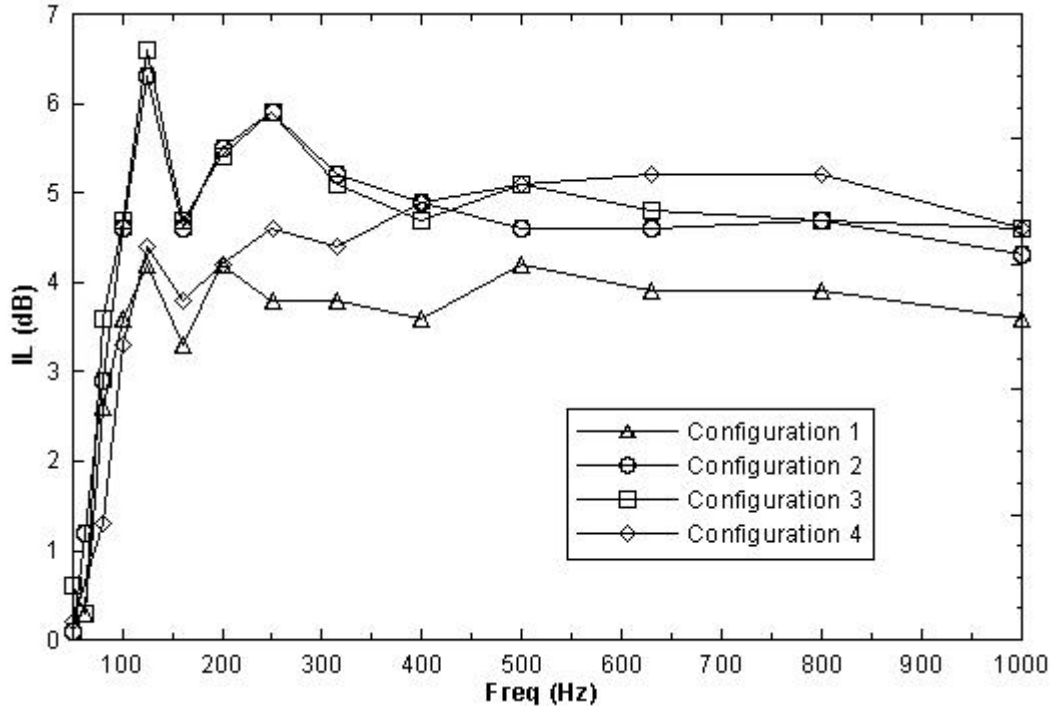


Figure 24: Perte par insertion pour différentes configurations de positionnement des panneaux de la laine de roche RHT100 dans la chambre réverbérante

b) Perte par insertion de la laine de roche RHT100 macro-perforée

Après avoir déterminé le positionnement des panneaux de RHT100 dans la chambre réverbérante, des mesures de perte par insertion ont été faites pour des traitements de laine de roche macro-perforée. Les macro-perforations ont été faites par des perforations cylindriques de 5 cm ou de 10 cm de diamètre. Trois tests de différentes macro-porosités ont été effectués sur une épaisseur de 10 cm de la laine de roche RHT 100:

- une macro-porosité de l'ordre de 9 % obtenue avec les perforations de 5 cm de diamètre;
- une macro-porosité de l'ordre de 10 % obtenue avec les perforations de 10 cm de diamètre;
- une macro-porosité de l'ordre de 19 % obtenue avec toutes les perforations de 5 cm et de 10 cm de diamètre.

Les figures 25, 26 et 27 représentent les comparaisons des résultats obtenus entre un traitement homogène et chacun des trois cas de macro-porosité ci-dessus décrits, respectivement. Dans chaque cas, les mesures de traitement homogène ont été refaites, pour tenir compte des variations de conditions et de mesure en fonction du temps. La figure 28 indique les gains obtenus (évalués en terme de rapports entre deux niveaux de pression) dans les trois cas de macro-perforation, relativement au traitement homogène. Elle révèle les constats suivants:

- la macro porosité de 9 % réalisée avec des perforations de 5 cm de diamètre apporte un gain maximum de l'ordre de 1.2 dB dans la bande fréquentielle [125 – 500] Hz;
- la macro porosité de 10 % réalisée avec des perforations de 10 cm de diamètre donne un gain maximum de l'ordre de 0.9 dB dans la bande fréquentielle [125 – 400] Hz;

- la macro porosité de 19 % obtenue avec les perforations de 10 cm et de 5 cm de diamètre, se traduit par un gain maximum de l'ordre de 1.8 dB dans la gamme [200 – 500] Hz.

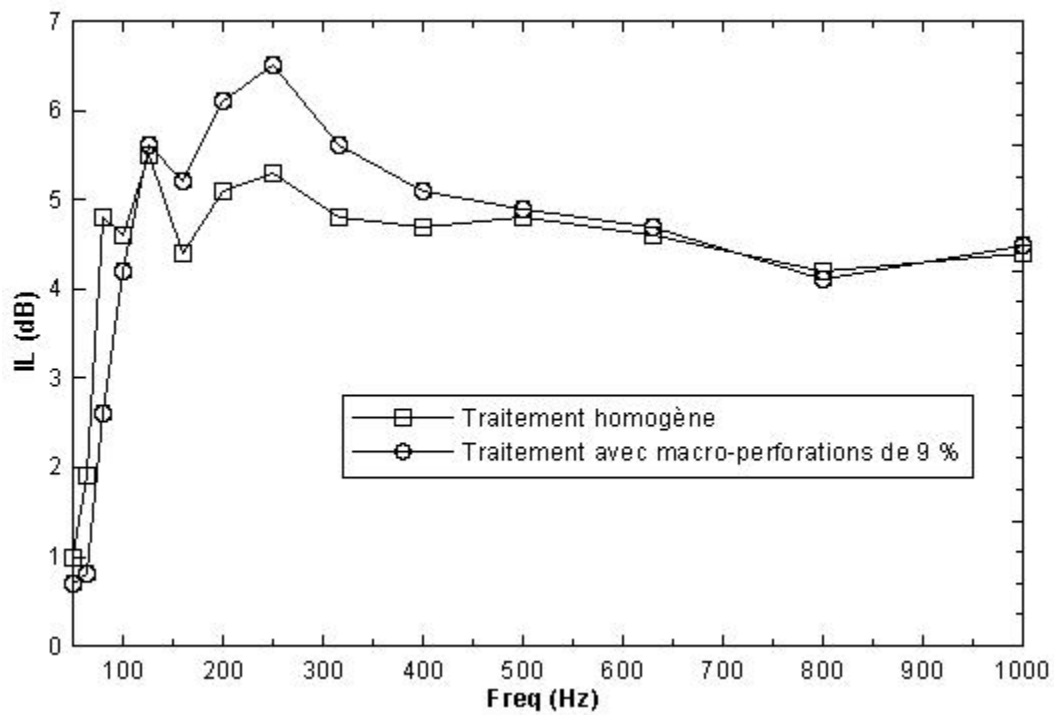


Figure 25: Comparaison entre les pertes par insertion du traitement homogène et du traitement avec macro-porosité de 9 % (perforations de 5 cm de diamètre)

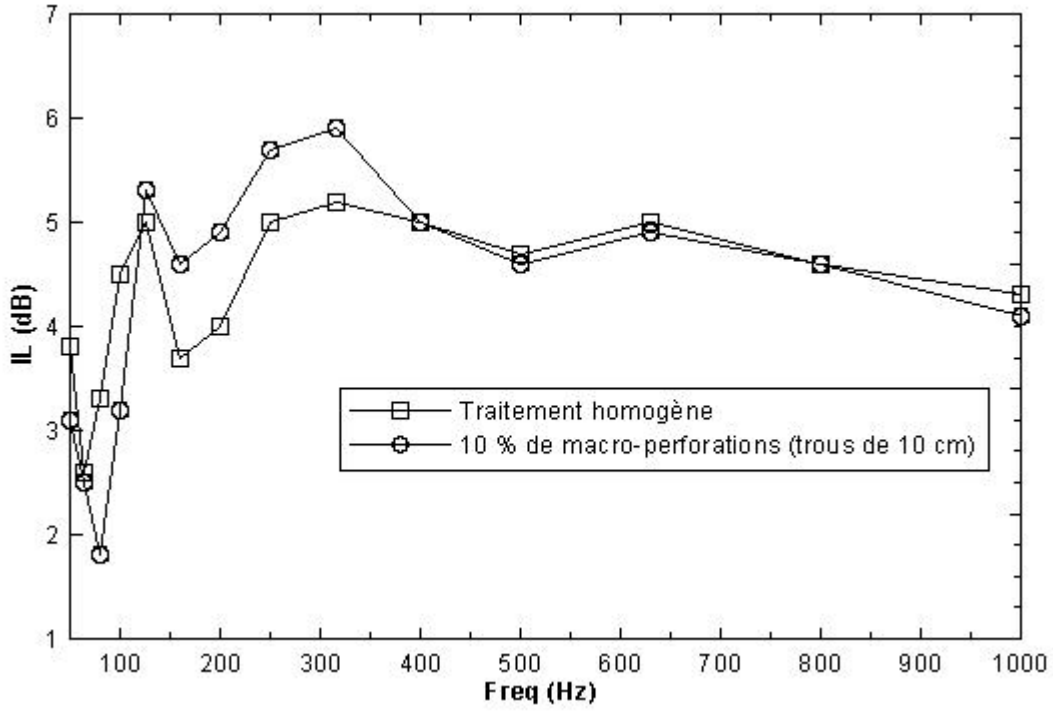


Figure 26: Comparaison entre les pertes par insertion du traitement homogène et du traitement avec macro-porosité de 10 % (perforations de 10 cm de diamètre)

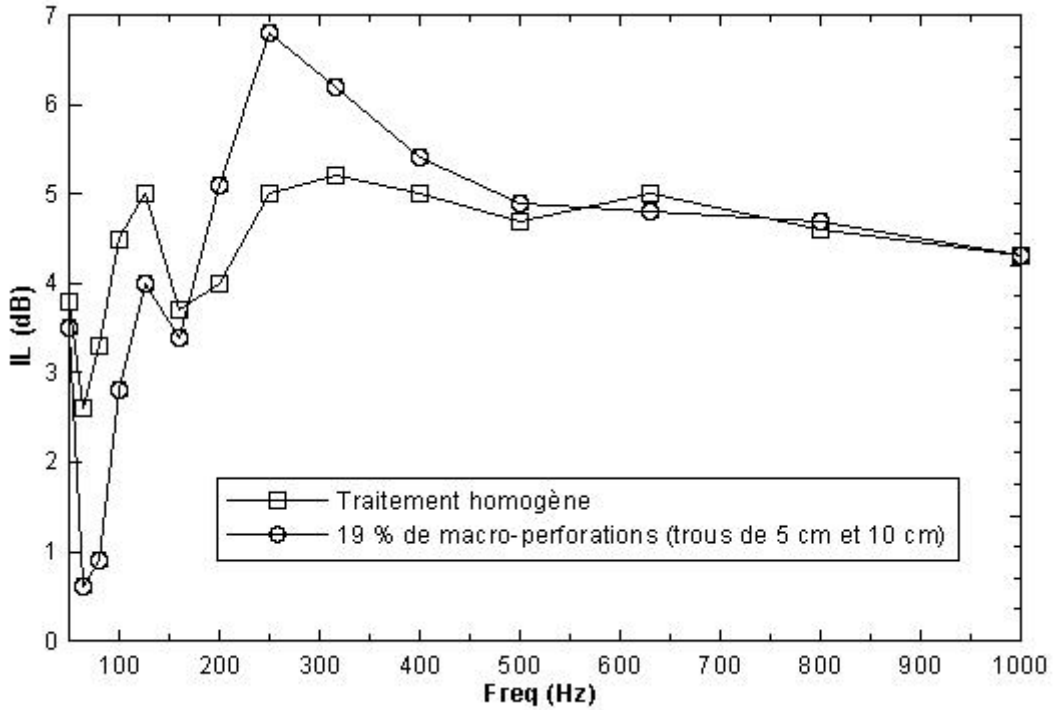


Figure 27: Comparaison entre les pertes par insertion du traitement homogène et du traitement avec macro-porosité de 19 % (perforations de 5 cm et de 10 cm de diamètre)

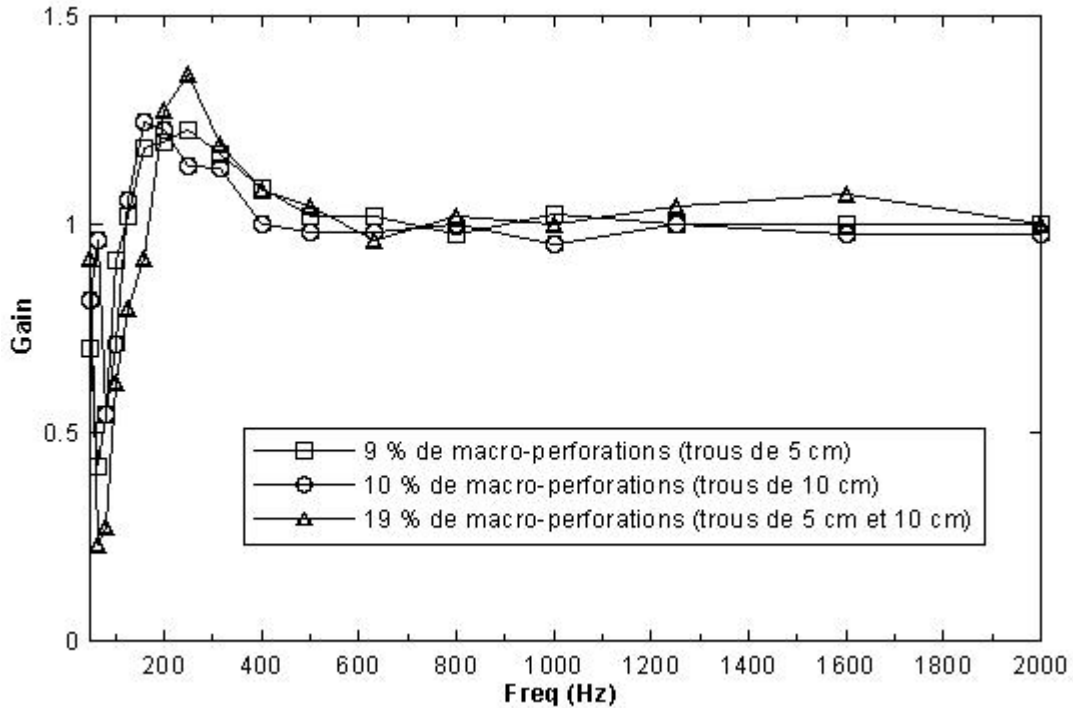


Figure 28: Gain obtenu dans les trois de macro-perforations par rapport au cas de traitement homogène

Les quatre figures ci-dessus indiquent donc que le gain obtenu n'est pas considérable dans les trois cas, mais il se produit tout de même dans la zone des basses fréquences, ce qui résulte probablement de la macro-perforation, puisqu'il a été rapporté précédemment que les variations relatives aux sources de bruit n'excédaient pas 0.5 dB. Il est à noter aussi que dans les deux premiers cas des macro-perforations (9 % et 10 %), le gain obtenu dans la gamme 125 Hz à 500 Hz est toutefois accompagné d'une perte de gain pour les fréquences inférieures à 125 Hz. Il faudrait idéalement, pouvoir contrôler cette perte.

V.2 Mesures de coefficient d'absorption en champ diffus

Dans le souci de confirmer les résultats obtenus avec les mesures de perte par insertion des traitements avec et sans macro-perforations, des mesures de coefficient d'absorption en champ diffus ont été ensuite effectuées dans la chambre réverbérante.

Pour pouvoir effectuer plusieurs tests de macro-porosité, un motif de perforations a été créé sur une pièce de panneau de dimensions latérales 30 cm x 30 cm. Ce motif a été appliqué huit fois pour couvrir chaque panneau de dimensions 60 cm x 120 cm x 5 cm. Les macro-perforations du motif ont été réalisées à l'aide d'une découpe au jet d'eau.

Le motif de base est constitué de 2 trous de 10 cm de diamètre, 8 trous de 5 cm de diamètre et 17 trous de 3 cm de diamètre. Il est illustré sur la figure 29, qui représente son application sur un panneau complet (de dimensions latérales 60 cm x 120 cm). Ce motif équivaut à une macro-

porosité maximale de 16.9 % pour chaque type de macro-perforation. Il permet ainsi de tester, pour une macro-porosité donnée, l'effet de la double porosité sur le coefficient d'absorption, en fonction de la taille des macro-perforations.

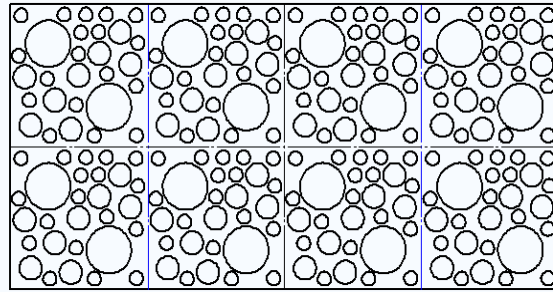


Figure 29: Motif des macro-perforations réalisées sur chaque panneau de laine de roche RHT100.

Pour chaque mesure de coefficient d'absorption en champ diffus, la surface de matériau traité était définie par un cadre carré en bois de dimensions 183 cm x 183 cm, tel qu'illustré par les figures 30 et 31.



Figure 30: Vue de la surface de matériau traité pour la mesure de coefficient d'absorption en champ diffus.



Figure 31: Autre vue de la surface de matériau traité pour la mesure de coefficient d'absorption en champ diffus.

Plusieurs configurations de mesures ont été effectuées, mais les résultats présentés ici se rapportent aux configurations suivantes, qui ont fourni des comparaisons intéressantes:

- Traitement homogène de 5 cm d'épaisseur
- Traitement homogène de 10 cm d'épaisseur
- Traitement de 5 cm d'épaisseur avec 16.9 % de macro-porosité obtenue par 72 perforations de 10 cm de diamètre.
- Traitement de 5 cm d'épaisseur avec 16.9 % de macro-porosité obtenue par 288 perforations de 5 cm de diamètre.
- Traitement de 10 cm d'épaisseur avec 16.9 % de macro-porosité obtenue par 72 perforations de 10 cm de diamètre.
- Traitement de 10 cm d'épaisseur avec 16.9 % de macro-porosité obtenue par 288 perforations de 5 cm de diamètre.

Pour les deux dernières configurations, les 10 cm d'épaisseur sont obtenus par la superposition de deux panneaux de 5 cm d'épaisseur dont les perforations sont alignées. Les figures 32 et 33 illustrent les résultats obtenus, respectivement pour les configurations de 5 cm d'épaisseur et celles de 10 cm. Il faut préciser que ces figures représentent le coefficient d'absorption de Sabine qui est couramment utilisé pour la mesure de l'absorption en champ diffus, et dont la valeur peut dépasser l'unité. De plus, la figure 34 présente une comparaison entre des configurations de 5 cm et 10 cm d'épaisseur avec des perforations de 10 cm de diamètre, pour illustrer l'effet de l'épaisseur sur la performance des macro-perforations. Les remarques suivantes peuvent être dégagées à partir de l'analyse de ces figures:

- Dans le cas de la macro porosité de 16.9 %, l'effet de la double porosité sur le RHT100 est plus intéressant sur les panneaux de 10 cm que sur ceux de 5 cm.

- Le cas de la macro-porosité de 16.9 % réalisée sur une épaisseur de 10 cm fait apparaître deux pics d'absorption dans les voisinages des fréquences de 200 Hz et 315 Hz. Le second pic est très accentué, et il traduit un gain de l'ordre de 33 % en terme du coefficient d'absorption.
- Une réduction de l'ordre de 20 % de la performance d'absorption est observée pour les fréquences inférieures à 200 Hz, dans le cas de la macro-porosité de 16.9 % réalisée sur l'épaisseur de 10 cm.

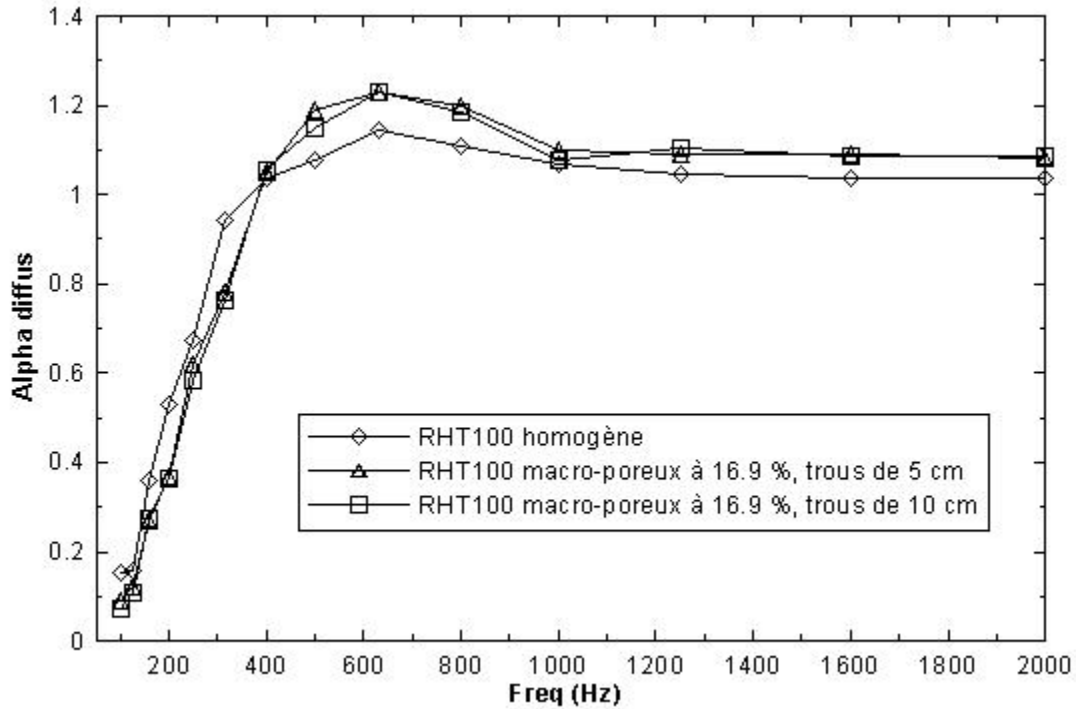


Figure 32: Coefficient d'absorption en champ diffus de configurations de 5 cm d'épaisseur.

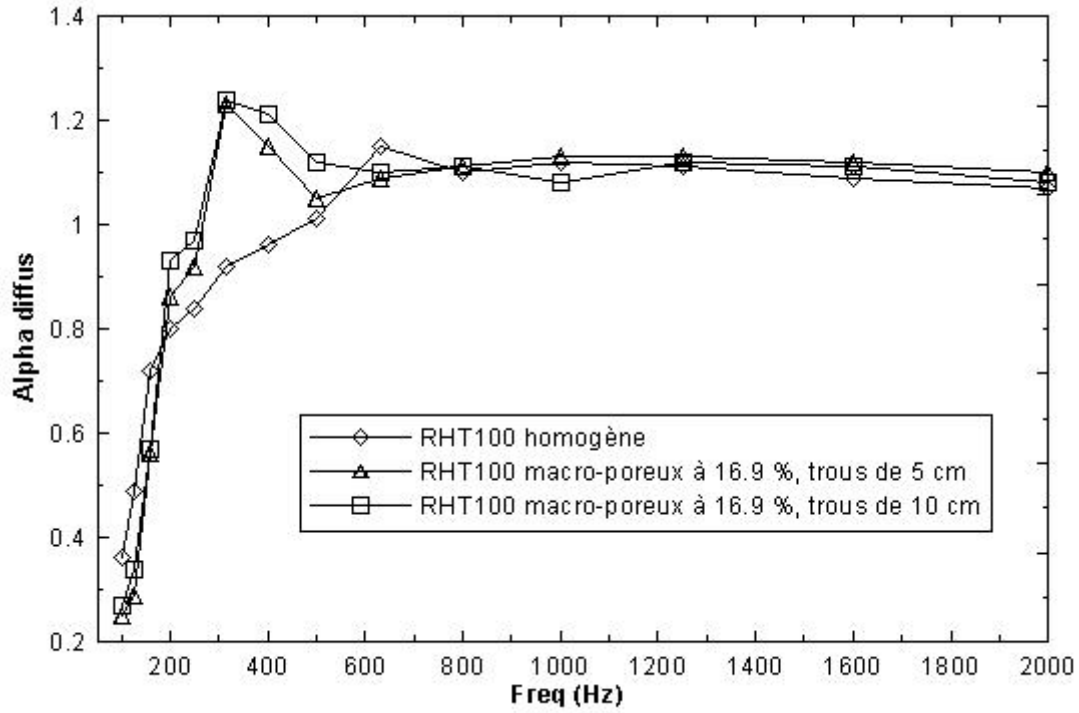


Figure 33: Coefficient d'absorption en champ diffus de configurations de 10 cm d'épaisseur.

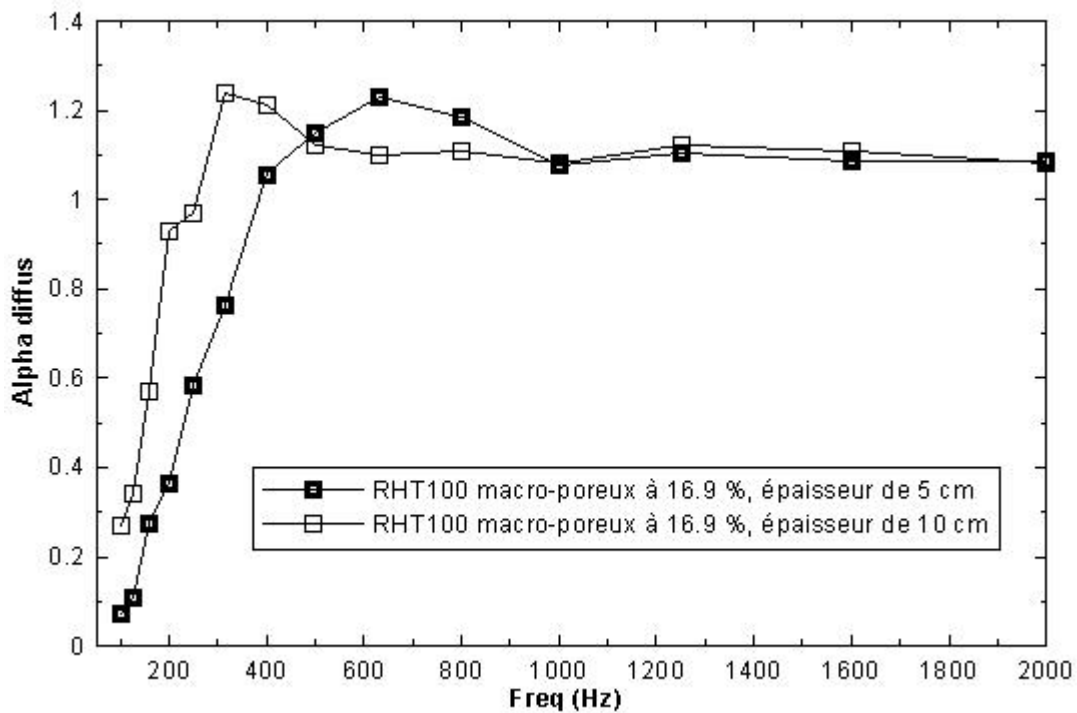


Figure 34: Comparaison des coefficients d'absorption en champ diffus pour de macro-porosités de 16.9 % obtenues avec des trous de 10cm de diamètre.

D'autres mesures ont été faites par la suite sur les panneaux de 10 cm, en faisant varier la macro-porosité, dans le but de vérifier l'influence du pourcentage de macro-porosité. La figure 35 illustre que la macro-porosité de 33.8 % est nettement moins efficace que celle de 16.9 %, et qu'un résultat intéressant est aussi obtenu avec la macro-porosité de 5 %. Ces observations sont conformes à celles de la figure 36 qui présente les résultats de simulations numériques de l'absorption en tube de Kundt effectuées avec des échantillons de 10 cm de laine de roche RHT100. Elles indiquent donc qu'il y a un taux idéal de macro-perforation au-delà duquel la performance d'absorption se dégrade. La macro-porosité de 5 %, étant économique et réaliste, a été alors retenue pour les tests ultérieurs.

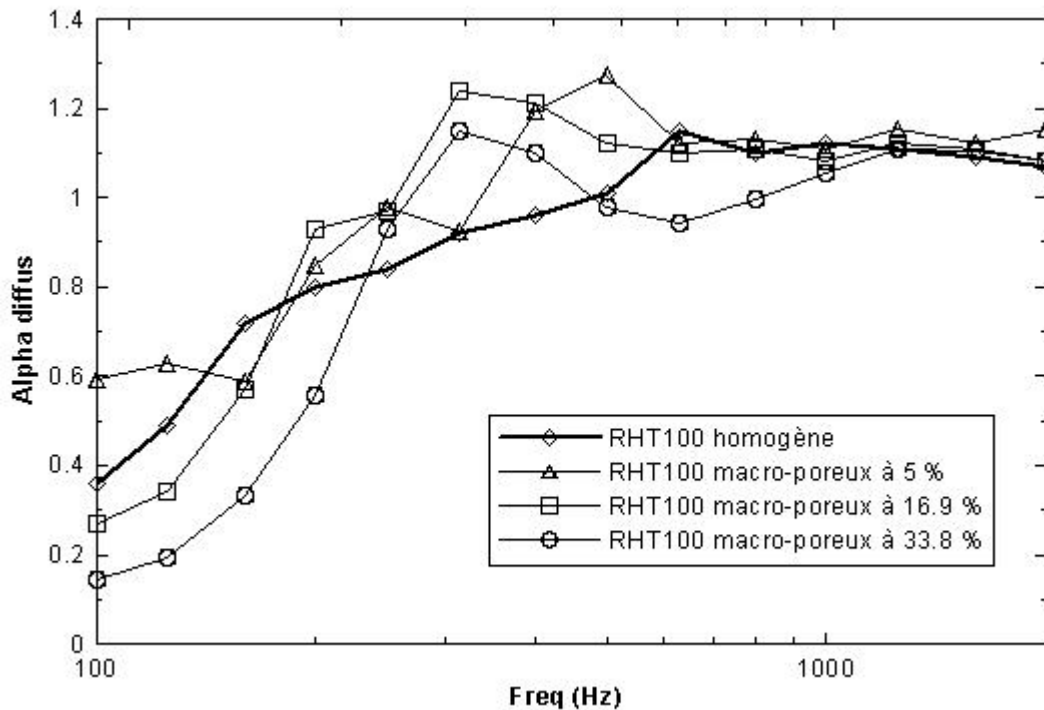


Figure 35: Comparaison des coefficients d'absorption en champ diffus de panneaux de 10 cm, pour différentes macro-porosités.

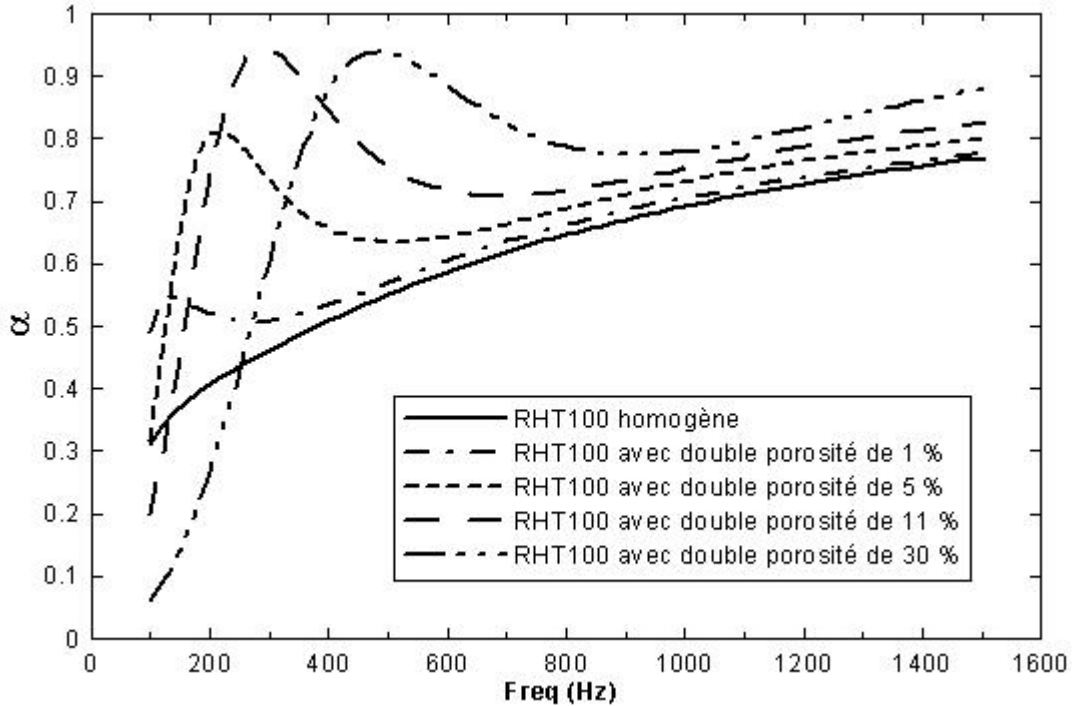


Figure 36: Simulations numériques de coefficients d'absorption en tube de Kundt avec des échantillons de 10 cm d'épaisseur

Une autre série de tests a consisté à mesurer les coefficients d'absorption de panneaux de 5 cm qui reposaient sur une cavité d'air. Il est fréquent que dans la pratique, l'installation des panneaux isolants s'accompagne de plenum (lame d'air). L'idée est donc de vérifier si une exploitation adéquate de ces lames d'air peut se traduire par une amélioration de la performance d'absorption des panneaux. La cavité d'air a été créée par des morceaux de bois posés sur le plancher et qui servaient de support aux panneaux de laine de roche, comme cela est illustré par la figure 37. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 38. Il y apparaît que l'effet conjugué des macro-porosités et de la cavité d'air se traduit par une amélioration de l'absorption en basses fréquences (entre 125 Hz et 300 Hz), mais par une dégradation à partir de 600 Hz. L'association de cavité d'air et de macro-porosité pourrait donc néanmoins servir à améliorer l'absorption en basses fréquences. Qui plus est, puisque l'installation pratique exige un découplage (donc une lame d'air), le gain apporté par les macro-perforation doit être comparé avec le cas homogène avec lame d'air ; et dans ce cas, il n'y a pas de perte en hautes fréquences.

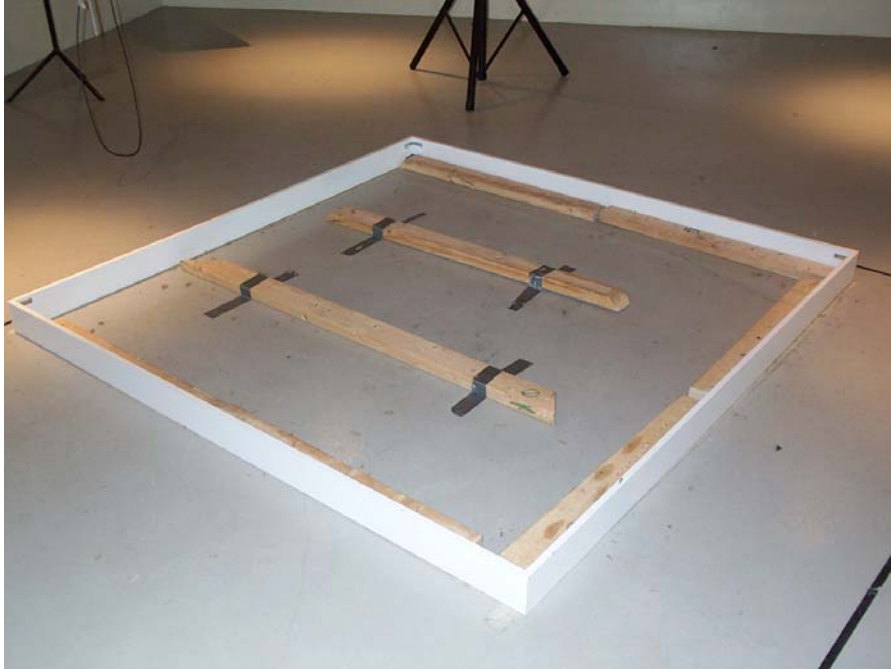


Figure 37: Cavité d'air créée par des morceaux de bois de 3.75 cm d'épaisseur.

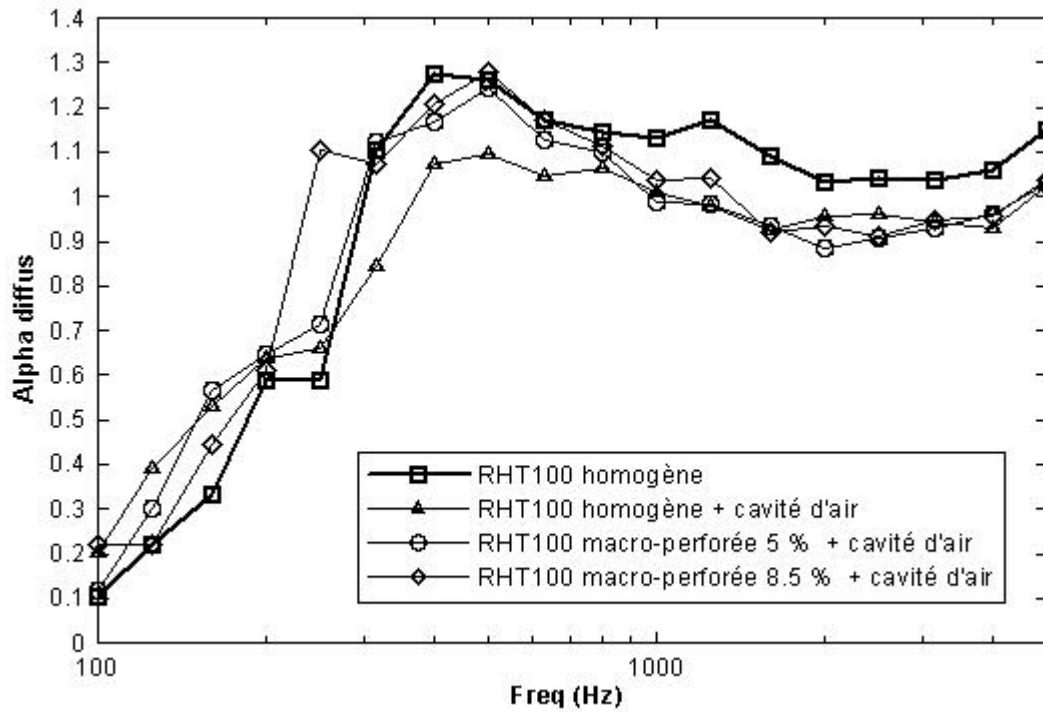


Figure 38: Comparaison des coefficients d'absorption en champ diffus de panneaux de 5 cm reposant sur une cavité d'air de 3.75 cm.

VI MESURES EN ENVIRONNEMENT SEMBLABLE À UN CONTEXTE INDUSTRIEL

Cette section est consacrée à des tests effectués suite aux conclusions énumérées dans la section précédente. L'emphase a été mise principalement sur le cas des macro-perforations correspondant à une macro-porosité de 5 % et réalisée au moyen de trous de 5 cm de diamètre. Des mesures de perte par insertion ont été d'abord effectuées dans un cas proche d'une application industrielle. Par la suite, d'autres mesures ont été faites pour cerner correctement les conditions aux bords optimales pour l'utilisation des traitements macro-poreux en contexte industriel. Vu le coût important des matériaux, de fabrication et d'installation, il a été difficile de trouver un partenaire industriel pour effectuer les tests sur une base volontaire. En conséquence, les mesures ont été faites dans la chambre réverbérante du Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke, qui a été assimilée à un environnement en contexte industriel (= le problème de traitement d'un local bruyant). L'objectif était alors de cerner le type de traitement qui y réduirait le bruit de façon significative et considérable. La chambre est de dimensions 7.5 m x 6 m x 3 m; ses murs offrent donc au total une superficie de 175.2 m².

VI.1 Perte par insertion sur la laine de roche RHT100 dans le cas d'un traitement partiel des murs d'une chambre réverbérante: cas proche d'une application industrielle

Vu la quantité de matériau disponible et étant donné les dimensions de la chambre réverbérante, il a été convenu de procéder à un traitement partiel de celle-ci. En tout, 37 panneaux de la laine de roche RHT100 ont servi à traiter partiellement les murs de la chambre réverbérante. Chaque panneau est de dimensions 121.92 cm x 60.96 cm x 10.16 cm. Les 37 panneaux ont donc permis de traiter environ 15 % de la superficie des murs de la chambre. Des mesures de perte par insertion ont été faites pour un traitement homogène et pour des traitements à double porosité. Ils consistent à mesurer le niveau de bruit dans la salle utilisant la moyenne de quatre microphones stationnaires pour différentes configurations de traitement. Pour les traitements à double porosité, environ 5 % de macro-perforations ont été réalisées dans les panneaux, à l'aide de 20 trous de 5 cm de diamètre (ce qui donne exactement une macro-porosité de 5.27 %). Les figures 39 et 40 fournissent respectivement des représentations du traitement homogène et du traitement à double porosité.

Trois sources sonores ont été activées dans la chambre, pour assurer un bon niveau de bruit sur une plage fréquentielle très étendue. Une des sources était en effet adaptée aux très basses fréquences, une autre aux basses fréquences, et la troisième aux moyennes et hautes fréquences. La figure 41 fournit la comparaison des pertes par insertion mesurées pour le traitement homogène et le traitement à double porosité. Elle indique malheureusement que dans le cas du traitement à double porosité, l'augmentation intrinsèque de l'absorption du matériau ne paraît pas sur le niveau de pression..



Figure 39: Photos du traitement partiel des murs de la chambre réverbérante avec de la laine de roche RHT100 homogène



Figure 40: Photos du traitement partiel des murs de la chambre réverbérante avec de la laine de roche RHT100 à 5 % de double porosité

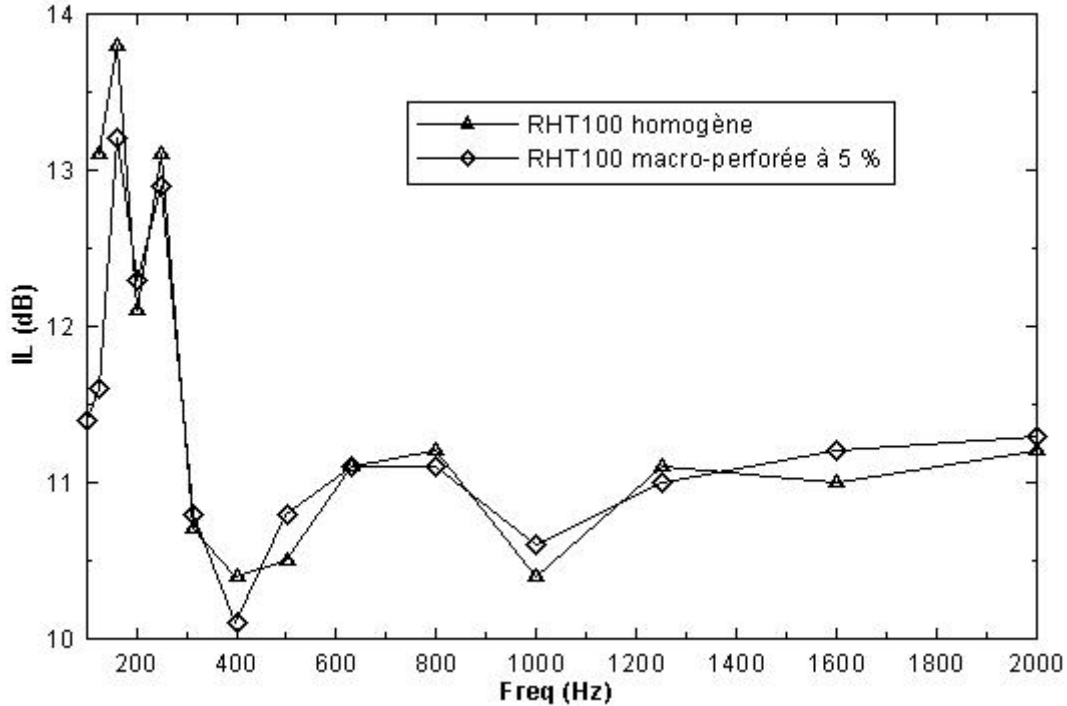


Figure 41: Traitement partiel de la chambre réverbérante avec de la laine de roche RHT100 à 5 % de double porosité

Des réflexions ont été menées pour tenter d'expliquer le résultat décevant obtenu. Il y a d'abord le fait qu'il s'agissait de traitements partiels. Il a été question de savoir si les surfaces non traitées dans la chambre (85 %) n'étaient pas trop élevées pour qu'une discrimination puisse être observée entre les deux types de traitements... Mais des raisons techniques et pratiques (principalement le coût de fabrication et d'installation) ne permettaient pas de faire un traitement complet de la chambre réverbérante. D'un autre côté, des interrogations ont été soulevées sur le type de conditions aux bords qui doivent être imposées aux panneaux. Le fait est que de bons résultats ont été obtenus numériquement et expérimentalement lorsque des mesures de coefficient d'absorption étaient faites en tube de Kundt (cf. section IV) ou en champ diffus (cf. section V). Comparées aux mesures de perte par insertion, les mesures de coefficient d'absorption étaient faites alors que le matériau était placé dans un cadre rigide: le tube de Kundt, ou l'armature en bois servant pour l'absorption en champ diffus. Dans ces cas donc, les bords latéraux du matériau sont contraints, et le champ acoustique n'arrive au matériau que par la surface frontale. L'idée a donc été avancée de refaire les mesures de perte par insertion, mais en se servant de l'armature en bois utilisable pour les mesures d'absorption en champ diffus.

VI.2 Mesures de pertes par insertion avec utilisation d'une armature en bois autour du matériau: conditions aux bords optimales

La figure 42 présente une illustration des traitements avec l'armature en bois disponible, dont les dimensions sont 1.83 m x 1.83 m. Cela correspond à une surface de traitement de 3.35m^2 , c'est-à-dire environ 1.91 % des surfaces des murs de la salle.



Figure 42: Photos de traitements partiels avec armature

Les figures 43 et 44 montrent, respectivement pour les basses et les hautes fréquences, les comparaisons des pertes par insertion obtenues avec le traitement à base de laine de roche RHT100 homogène et des traitements à base de doubles porosités 5.27%, 10.55 %, 13.19 % et 16.8 %. Ces comparaisons indiquent que les traitements à double porosité conduisent à une amélioration de la performance acoustique en basses fréquences, sans qu'il y ait de dégradation notable en hautes fréquences. En d'autres termes, pour espérer retrouver en contexte industriel, les résultats intéressants obtenus lors de mesures de coefficient d'absorption en tube de Kundt et en champ diffus, il faudrait placer les panneaux de matériau dans des armatures rigides. Les conditions aux bords rigides du matériau joueraient donc un rôle important dans la contribution des macro-perforations, en ce sens qu'elles imposent à l'onde d'arriver au matériau seulement par la surface où se trouvent les macro-perforations.

Il est cependant important de noter que les phénomènes associés à la diffusion en basses fréquences en champ diffus ne se sont pas manifestés avec la même intensité comme c'était le cas lors des mesures en tube de Kundt, où l'onde acoustique a une incidence normale.

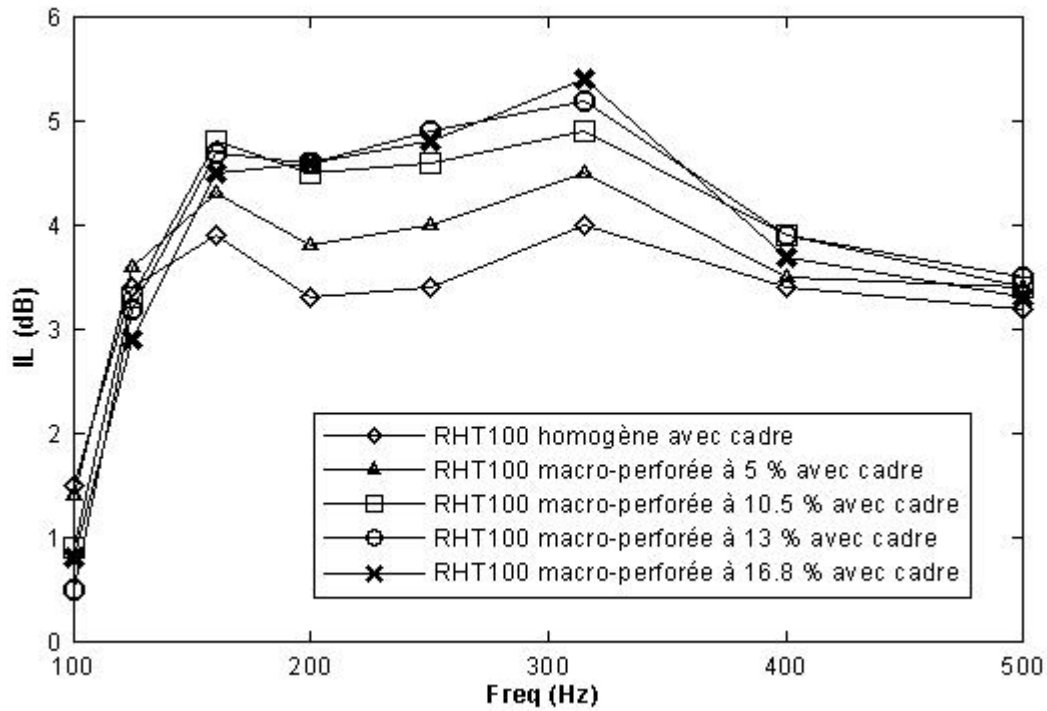


Figure 43: Pertes par insertion mesurées dans des configurations de traitement avec cadre – cas basses fréquences

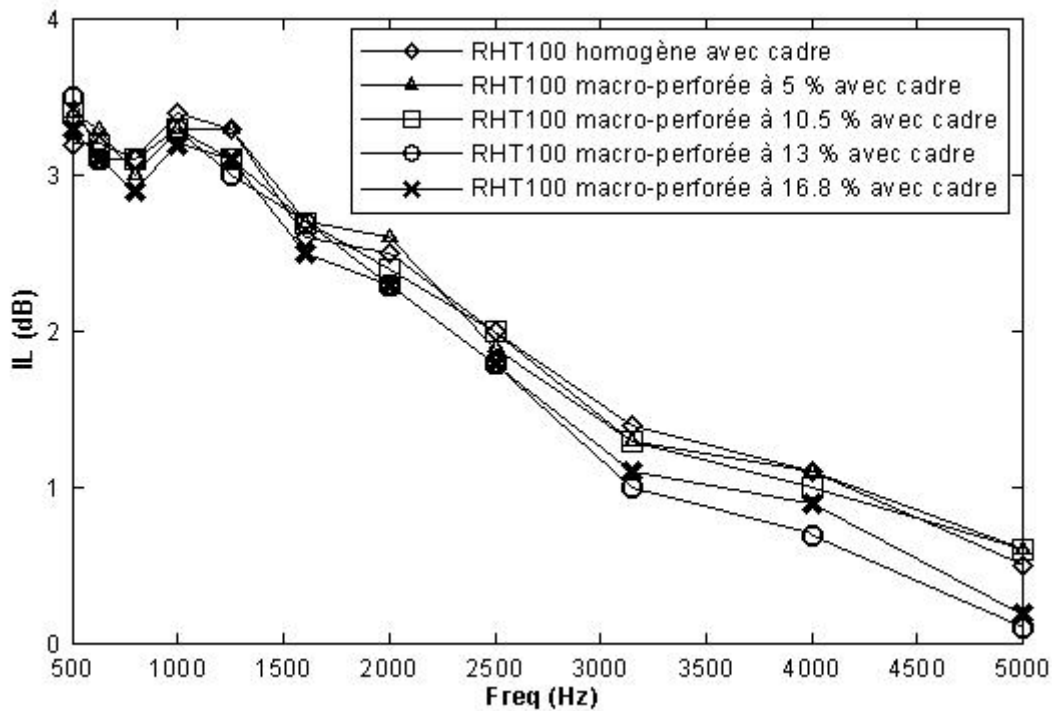


Figure 44: Pertes par insertion mesurées dans des configurations de traitement avec cadre – cas hautes fréquences

Une autre série de tests a été menée en se basant sur le fait qu'il est très coûteux et peu pratique en industrie de faire des macro-perforations sous formes cylindriques et/ou rectangulaires dans des matériaux poreux destinés à la réduction du bruit. Il était alors intéressant de tester des macro-perforations obtenues à l'aide de fentes entre les divers panneaux. Ces fentes peuvent être créées soit en laissant un certain espace entre les panneaux ou en coupant les bords des panneaux, pour obtenir la macro-porosité désirée. Ce type de macro-porosité est illustré par la figure 45. Les fentes ont été créées en découpant les bords des panneaux, et la macro-porosité obtenue est de l'ordre de 4.5 %.



Figure 45: Illustrations de macro-porosité obtenues à l'aide de fentes

La figure 46 présente les mesures obtenues avec les macro-perforations en forme de fentes, qui sont comparées aux résultats des macro-perforations à 5 % obtenus par des trous cylindriques. Un bon accord se révèle entre les deux courbes. Il n'y a pas de dégradation de la performance acoustique en basses fréquences dans les deux cas, ce qui est en corrélation avec les tendances observées lors des mesures de coefficient d'absorption en champ diffus. Cela suggère qu'en application industrielle, l'utilisation des fentes pour créer des macro-perforations serait une solution plus simple à faire que procéder à des macro-perforations cylindriques. En effet, pour créer les fentes, il suffit de séparer les panneaux entre eux pour créer la macro porosité désirée. En plus, cette solution est moins coûteuse que de faire des macro perforations cylindriques.

Il faut noter aussi que dans le cas de la macro porosité de 5 % réalisée soit avec des perforations de 5 cm de diamètre ou sous forme de fentes, on n'a pas de perte en basses fréquences, ce qui apparaît en corrélation avec les conclusions faites lors des mesures de α diffus avec 5 % de macro porosité.

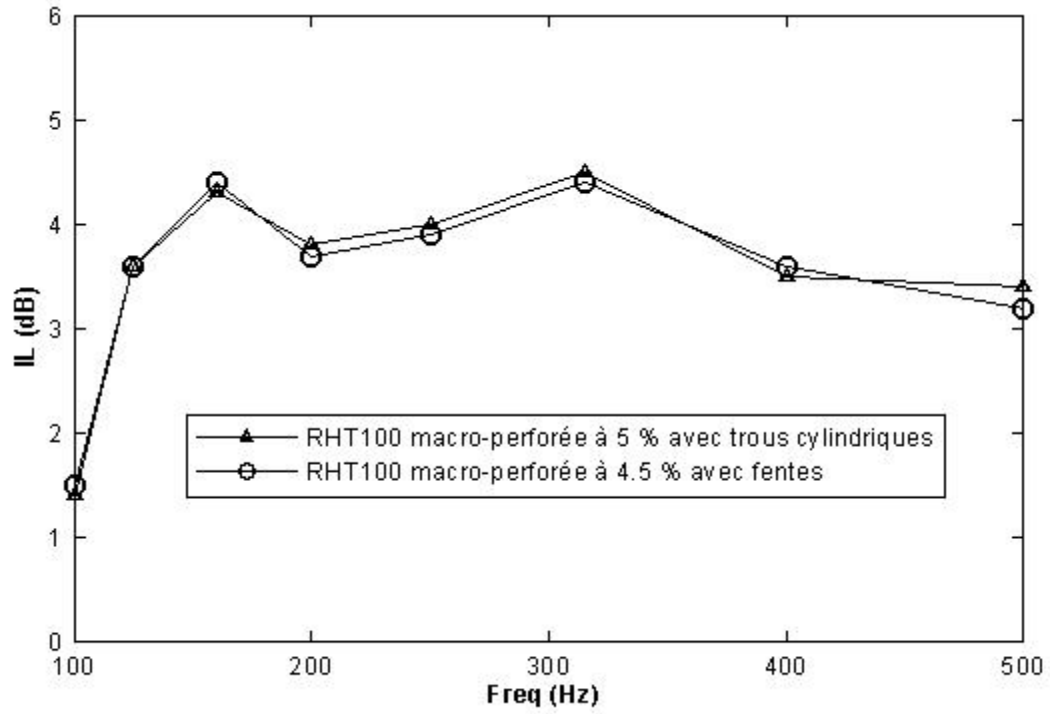


Figure 46: Perte par insertion de macro-perforations de 5 % avec trous cylindriques et de 4.5 % avec fentes

VII.1 Introduction

Cette section est consacrée aux recherches effectuées sur la transmission acoustique des matériaux poreux macro-hétérogènes. Ces matériaux sont constitués de matériaux poro-élastiques obtenus par de combinaisons *patches* poreux possédant différentes propriétés acoustiques et mécaniques, et contenant des inclusions fluides et/ou solides. La motivation de ces recherches est double. D'abord, vérifier si la performance d'isolation sonore des matériaux poreux peut être améliorée par l'insertion d'inclusions solides et/ou fluides. Ensuite, puisque dans la pratique, les matériaux poreux sont rendus hétérogènes par la présence de trous d'air et d'inclusions solides (morceaux de métal, etc.), il était souhaitable d'étudier l'influence de ces hétérogénéités sur la performance acoustique des milieux poreux.

Comparée à la problématique de l'absorption, très peu de travaux ont été publiés sur la problématique de la transmission acoustique à travers les matériaux poreux hétérogènes. L'idée d'impédances inégales a été exploitée (Cushman, 1995) pour la conception de matériaux hybrides faits de polymères avec des inclusions solides (fer, plomb, cuivre). Des résultats expérimentaux indiquaient que ce concept améliorerait l'atténuation des ondes acoustiques. Peu de détails étaient toutefois fournis pour soutenir cette idée. L'objectif principal de cette recherche était donc de mener des investigations numériques sur la perte par transmission d'une variante du concept de matériaux hybrides ci-dessus décrit. Cette variante est constituée d'un mousse macro-hétérogène qui est prise en sandwich entre un panneau élastique (plaque) et un écran massique (septum). Le matériau macro-hétérogène est fait de milieux poreux homogènes contenant des inclusions solides et/ou fluides. Le système a été étudié en trois étapes: d'abord une mousse toute seule, ensuite une mousse avec un écran massique, puis le système panneau – mousse – écran massique. Le modèle théorique qui a été proposé est basé sur la formulation par éléments finis $\{u,p\}$ des milieux poreux (Atalla, 1998) et sur la formulation classique par éléments finis des milieux solides et fluides. Il a été supposé que le système multicouche est inséré dans un guide d'onde rectangulaire infini, pour permettre plus tard des validations expérimentales. Le couplage entre le milieu poreux et le guide d'onde a été pris en compte explicitement en utilisant le comportement modal du guide d'onde. Les prochaines sous-sections donnent un aperçu des formulations théoriques des différents milieux et des indicateurs acoustiques calculés, puis des résultats numériques sont fournis pour illustrer l'influence des hétérogénéités sur la performance de transparence acoustique de divers systèmes.

VII.2 Modélisation des divers milieux et calcul d'indicateurs acoustiques

La géométrie du problème est décrite sur la figure 47. Dans sa forme générale, le système est une structure sandwich avec des conditions aux limites arbitraires, qui est insérée dans un guide d'onde rectangulaire infini. Il est excité par une onde plane propagative dans le guide

d'onde. Entre la plaque et le septum, se trouve un matériau poreux macro-hétérogène, qui peut être en contact ou non avec la plaque et le septum.

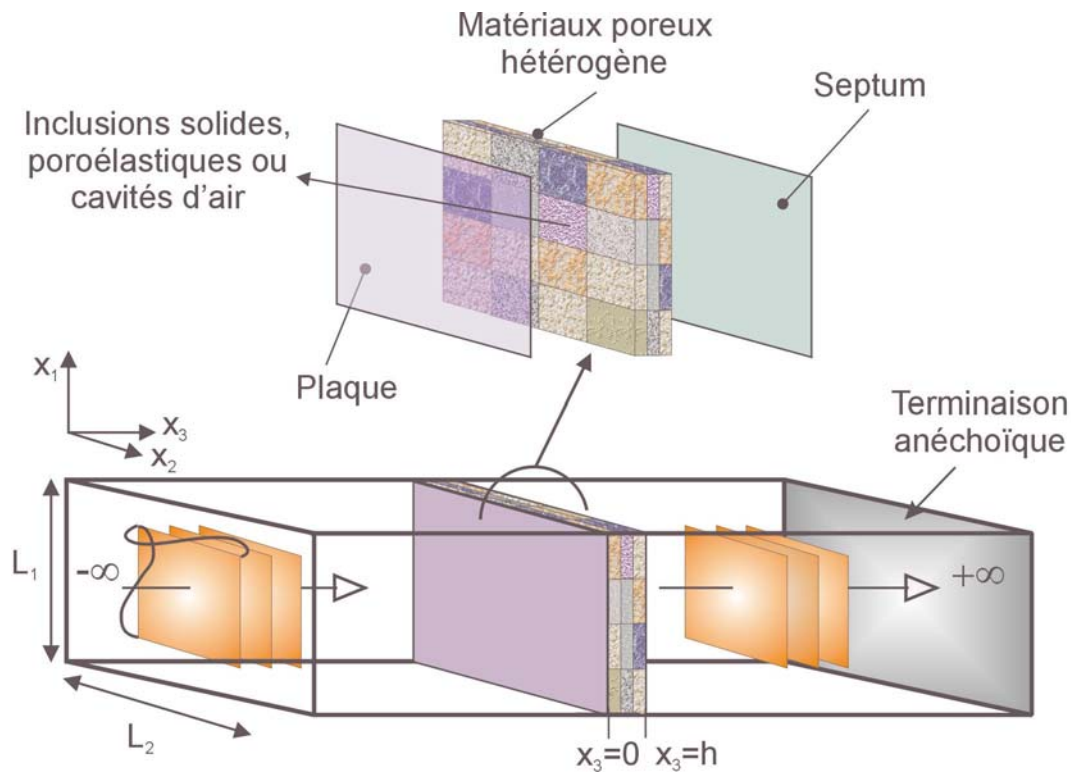


Figure 47: Exemple d'un système sandwich placé dans un guide d'onde infini. Le milieu poreux contient des inclusions solides ou fluides.

Le matériau poreux hétérogène est considéré comme un milieu tridimensionnel fait de *patches* (pièces). Chaque *patch* peut être un matériau poroélastique, une cavité d'air ou un matériau solide. La formulation mixte $\{u, p\}$ dérivée des équations de la poroélasticité de Biot (cf. Annexe A) est utilisée pour modéliser chaque *patch*. Cependant, pour des distributions quelconques de *patches* (solides, fluides ou poroélastiques) dans le matériau poreux, la gestion du calcul des termes de couplage peut représenter une difficulté importante au niveau informatique. Le calcul de ces termes de couplage a été évité en utilisant une formulation $\{u, p\}$ adaptée selon le type d'hétérogénéité considérée, comme illustré dans les annexes B et D. L'annexe C indique aussi brièvement les formulations faibles associées aux milieux fluides et solides.

Une approche modale a été utilisée pour décrire le champ acoustique dans le guide d'onde, compte tenu de sa forme géométrique simple. Par rapport à une méthode d'éléments finis, on évite ainsi la discrétisation du volume du guide d'onde et la prise en compte de conditions aux limites de type d'impédance aux extrémités du guide. Avec l'approche modale, la présence du guide d'onde est prise en compte de façon exacte à travers l'impédance de rayonnement.

Dans le modèle développé, la pression acoustique dans le guide d'onde est écrite sous la forme d'une somme de la pression acoustique rayonnée par le matériau et une pression réfléchie

bloquée. La pression acoustique rayonnée est ensuite décomposée en une somme de modes propagatifs et évanescents d'amplitudes inconnues. Les amplitudes de ces modes sont obtenues à partir d'une formulation faible des équations de continuité de la pression acoustique dans le guide et de la pression interstitielle dans le cas du couplage avec un poreux ou un milieu acoustique. Dans le cas où le guide d'onde est en contact avec un matériau élastique (ou un septum), une formulation faible des équations de continuité des déplacements normaux acoustique et structural est utilisée. Dans le cas du couplage entre le guide d'onde et un matériau poreux (ou un fluide), les amplitudes modales sont exprimées en terme de la pression interstitielle à la surface du matériau. L'effet du guide d'onde est alors équivalent à une matrice d'admittance qui se rajoute sur les degrés de liberté en pression à la surface du matériau. Dans le cas du couplage entre le guide d'onde et une structure élastique ou un septum, les amplitudes inconnues des modes s'expriment en fonction du déplacement structural normal à la surface de la structure élastique. L'effet du guide d'onde est alors équivalent à une matrice d'impédance qui se rajoute sur les degrés de liberté en déplacement normal à la surface du matériau. L'annexe E expose en détails la prise en compte du couplage du milieu poreux avec le guide d'onde.

Les modélisations ci-dessus décrites ont permis d'évaluer des indicateurs acoustiques de puissances dissipées dans les divers milieux, et de puissance transmise à travers le système étudié. La perte par transmission du système a pu être ensuite calculée à partir de la puissance transmise (cf. Annexe F).

VII.3 Résultats numériques

La figure 48 présente les trois configurations qui ont été analysées numériquement. La performance de transmission acoustique d'une mousse hétérogène est d'abord considérée (figure 48 (a)). Ensuite, le cas d'une plaque élastique fixée sur une mousse hétérogène est traité (figure 48 (b)). Et finalement, le cas d'un système multicouches constitué d'une plaque élastique, d'une mousse hétérogène et d'une mince couche de septum est analysé. (figure 48 (c)). Dans chacun des cas, le système est placé dans un guide d'onde de section rectangulaire 10 cm x 10 cm (cf. figure 47). Les maillages d'éléments finis utilisés pour les domaines ont été choisis pour assurer la convergence de la solution. La mousse est discrétisée par un maillage de 18 x 18 x 5 éléments cubiques à 8 nœuds. Le maillage de la plaque est composé de 18 x 18 éléments de coque à 4 nœuds, et celui du septum comprend 18 x 18 éléments linéaires. Des distributions spatiales aléatoires d'inclusions solides et fluides ont été considérées. Dans chacune des trois configurations, les inclusions fluides étaient des poches d'air, et les calculs ont été faits en supposant que le volume total occupé par ces inclusions était égal à 10 %, ou 20 %, ou 30 % du volume total du milieu poreux. Les inclusions solides consistaient en de fictives cellules rigides. Le nombre de ces inclusions solides a été arbitrairement fixé à 50 ou 100. Dans le cas de la mousse seule, la densité des inclusions est ajustée de telle sorte que leur masse totale soit équivalente à une, ou deux, ou quatre fois la masse du matériau poreux. Dans les deux autres cas, la densité des inclusions solides est fixée pour que leur masse totale soit égale à 10 % de la masse de la plaque. Les propriétés physiques de la mousse, de la plaque et du septum utilisés, sont fournies dans le tableau 2.

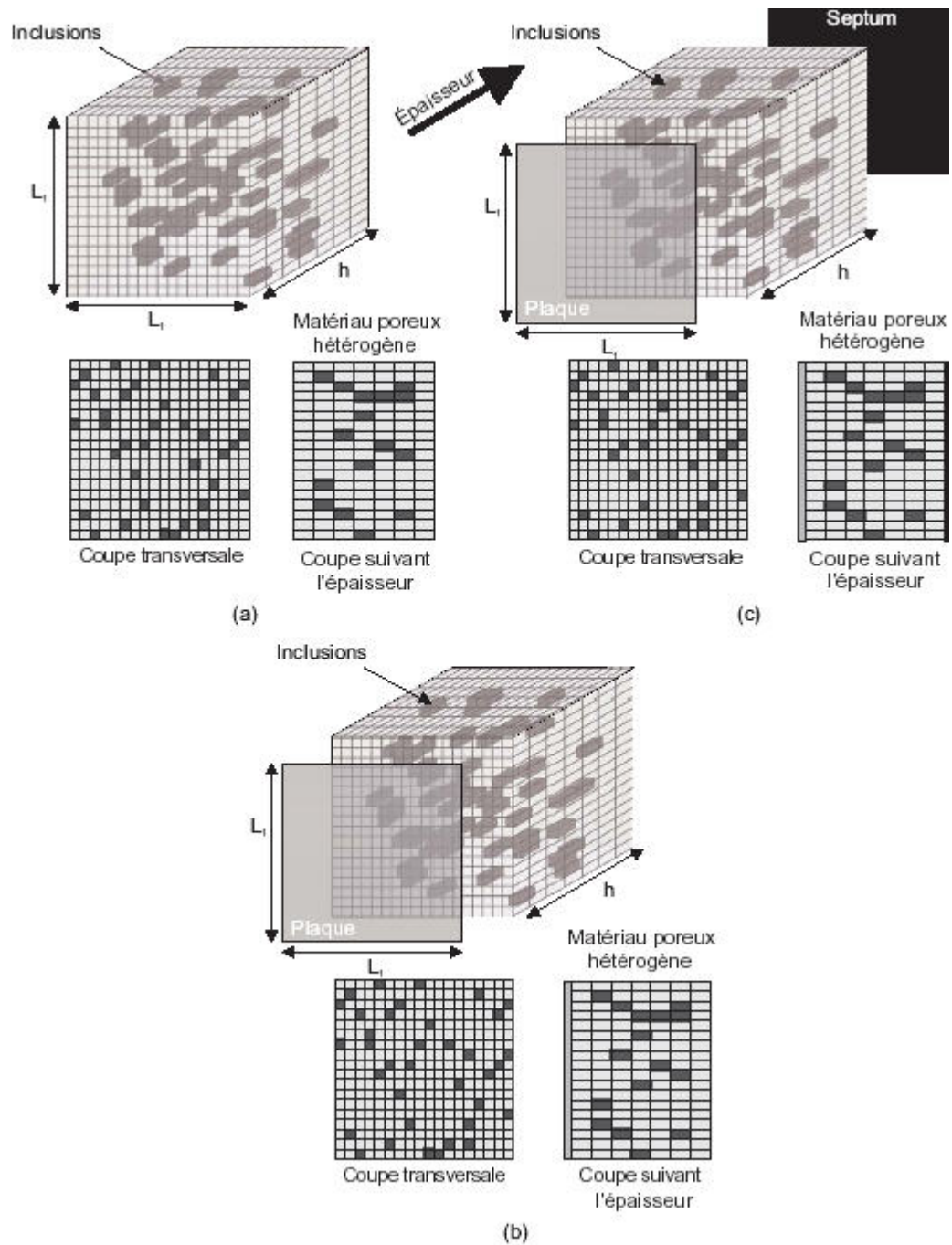


Figure 48: Description des configurations analysées: (a) mousse hétérogène; (b) plaque + mousse hétérogène; (c) plaque + mousse hétérogène + septum

Matériau I: Mousse plastique

Résistance à l'écoulement	$\sigma_m = 87000 \text{ Nm}^{-4}\text{s}$
Porosité	$\phi_m = 0,97$
Tortuosité	$\alpha_\infty = 2,52$
Longueur caractéristique visqueuse	$\Lambda = 37 \cdot 10^{-6}\text{m}$
Longueur caractéristique thermique	$\Lambda' = 119 \cdot 10^{-6}\text{m}$
Coeff. de Poisson	$\nu = 0.3$
Module d'Young	$E = 143000 \text{ Pa}$
Facteur de perte	$\eta = 0.055$
Masse volumique de la phase solide	$\rho_1 = 31 \text{ kg/m}^3$
Matériau 2 : Acier	
Module d'Young	$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$
Coeff. de Poisson	$\nu = 0.32$
Masse volumique	$\rho = 7841 \text{ kg/m}^3$
Facteur de perte	$\eta = 0.007$
Matériau 3 : Septum vinyle	
Masse volumique	$\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$

Tableau 2. Propriétés des matériaux utilisés

Dans la première configuration analysée, le matériau est une mousse plastique très résistive de 2.54 cm d'épaisseur, et dont la masse est égale à 7.874 g. Des conditions aux limites de glissement sont considérées sur les bords latéraux. Les figures 49 et 50 traduisent la perte par transmission sous incidence normale, respectivement pour 50 et 100 inclusions, dont la masse totale M_{inc} est un multiple de la masse M_p du milieu poreux, le facteur multiplicatif étant égal à 1, 2 ou 4. Pour fins de comparaisons, le matériau sans inclusion ajoutée est pris comme référence. La fréquence de résonance observée dans la perte par transmission du cas homogène traduit une résonance structurale due au caractère élastique de la mousse. Il apparaît que sa position n'est pas affectée par l'ajout d'inclusions solides. Pour tous les cas considérés, les inclusions solides se traduisent par une augmentation de la perte par transmission, comparativement au cas de la mousse sans inclusions. L'ajout de masse favorise donc une augmentation de la perte par transmission. Cette augmentation n'est toutefois pas seulement due à l'ajout de masse. En effet, il a été vérifié numériquement qu'une affectation artificielle de la masse ajoutée à la densité du matériau poreux, ne donne pas les mêmes résultats que les inclusions solides. Par ailleurs, dans les cas d'inclusions solides, la perte par transmission présente de nombreuses résonances, qui sont décalées vers les plus basses fréquences lorsque la masse volumique des inclusions augmente. La rigidité des inclusions étant plus grande que celle des *patches* poreux, le système étudié peut alors être perçu comme un ensemble de masses locales connectées avec des ressorts dissipatifs, c'est-à-dire un ensemble d'oscillateurs. Les résonances observées sont donc probablement dues aux fréquences de résonances de ces oscillateurs.

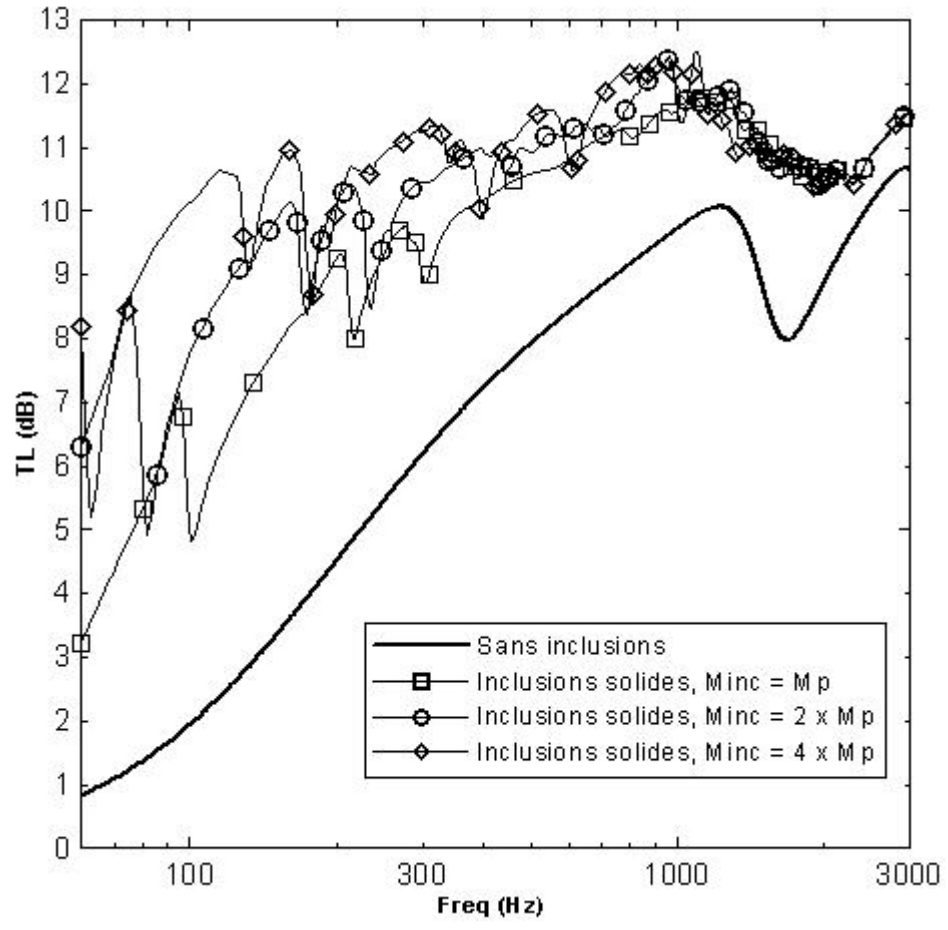


Figure 49: Effet de 50 inclusions solides sur la perte par transmission sous incidence normale d'une mousse plastique

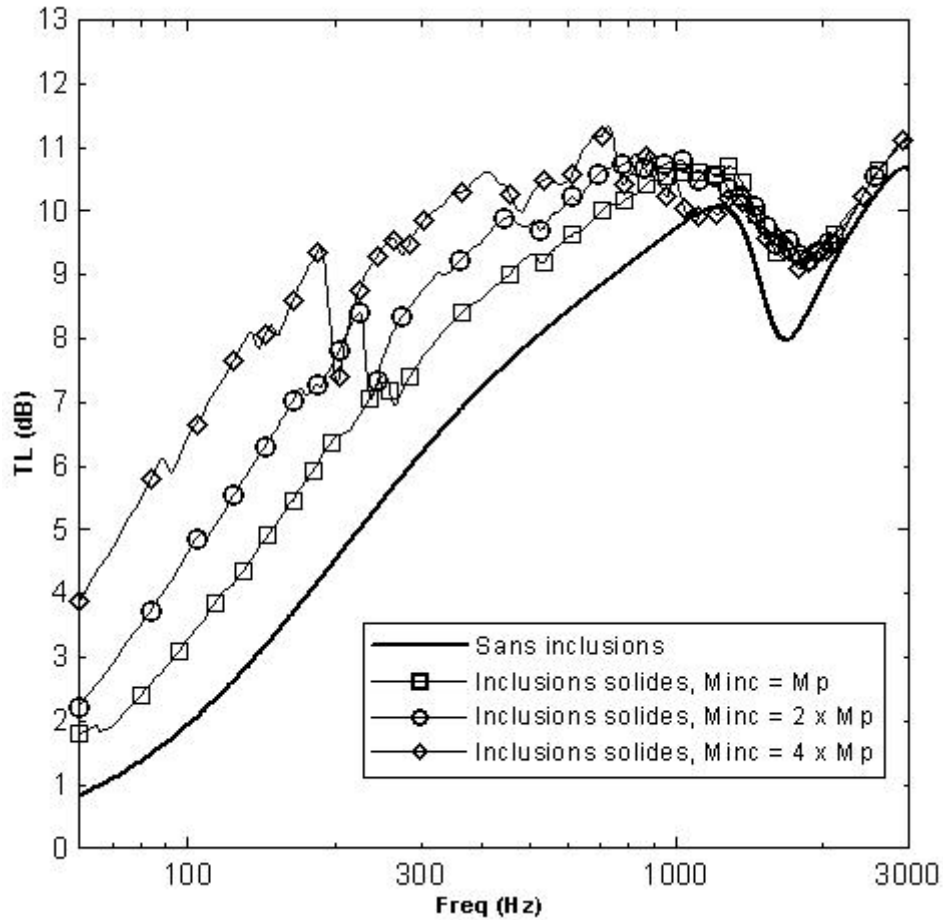


Figure 50: Effet de 100 inclusions solides sur la perte par transmission sous incidence normale d'une mousse plastique

La figure 51 présente la perte par transmission sous incidence normale, lorsque 10 %, ou 20 % ou 30 % du volume poreux est occupé par des poches d'air à l'intérieur du milieu poreux. Ces inclusions réduisent la masse du milieu poreux, ainsi que sa capacité de réflexion sonore, et cela se traduit par une diminution notable de la perte par transmission.

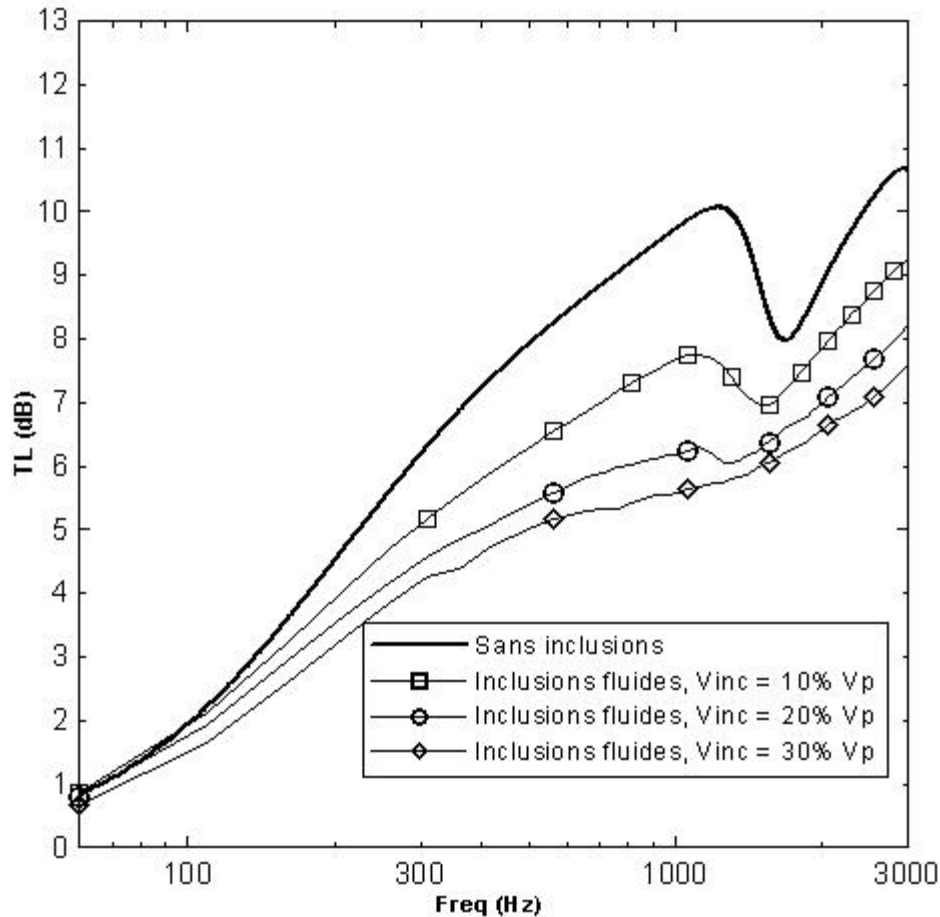


Figure 51: Effet de l'inclusion de poches d'air dans une mousse plastique, sur la perte par transmission sous incidence normale

La seconde configuration étudiée est composée d'un panneau d'acier de 1 mm et de la mousse plastique déjà décrite dans la configuration précédente. Le panneau est simplement supporté et des conditions aux limites de glissement sont considérées sur les bords latéraux de la mousse.

La figure 52 présente la perte par transmission sous incidence normale, lorsque 50 ou 100 inclusions solides sont aléatoirement réparties à l'intérieur de la mousse. La masse totale des inclusions est équivalente à 10 % de la masse du panneau. L'effet de ces inclusions est d'augmenter la perte par transmission sur une bonne partie de la gamme fréquentielle. Dans ce cas aussi, en affectant artificiellement la masse ajoutée à celle de la plaque, il est noté que le gain observé n'est pas seulement relié à l'effet de masse. Il est observé par ailleurs qu'un meilleur résultat est obtenu pour le plus grand nombre d'inclusions, et que la première résonance du système tend à diminuer lorsque le nombre d'inclusions augmente.

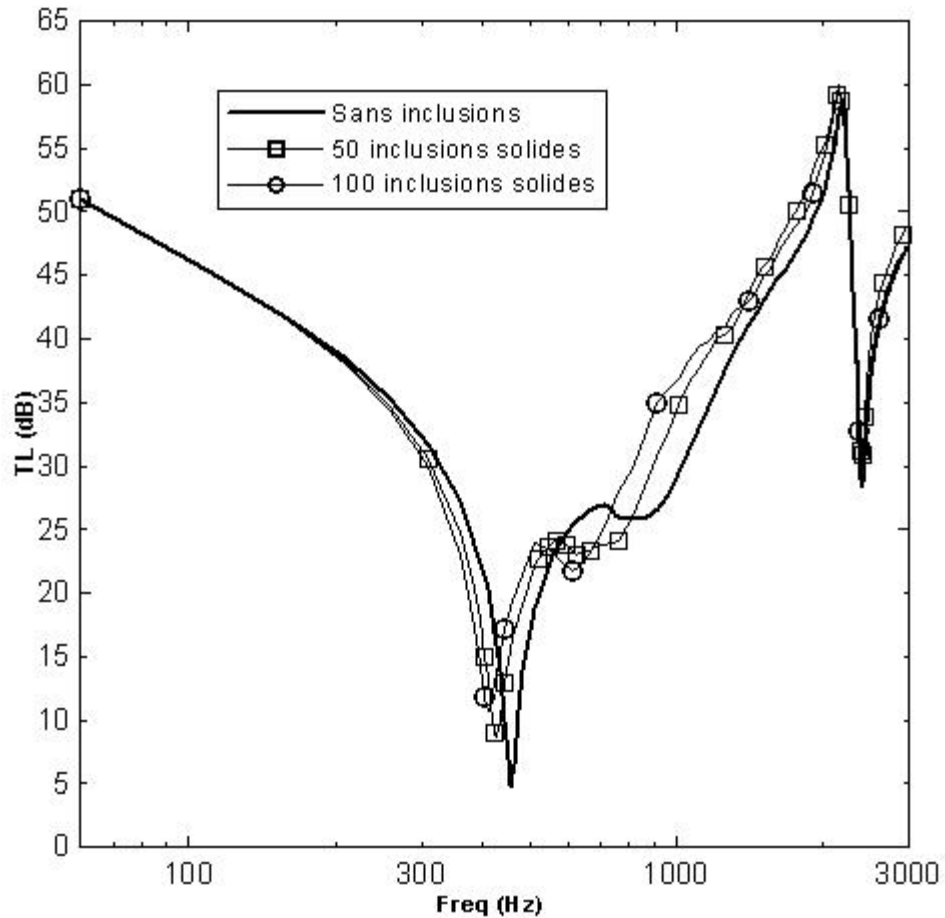


Figure 52: Perte par transmission sous incidence normale d'une configuration d'un panneau et d'une mousse plastique avec inclusions solides

La figure 53 illustre la perte par transmission sous incidence normale d'une distribution aléatoire de poches d'air qui occupent 10 %, ou 20 %, ou 30 % du volume de la mousse plastique. Ces inclusions ont pour effet d'augmenter la perte par transmission du système après la première fréquence de résonance du panneau. Le meilleur résultat est obtenu avec le plus grand pourcentage d'inclusions, et il faut alors noter que la performance obtenue s'accompagne d'une réduction de poids, ce qui rend la configuration très intéressante.

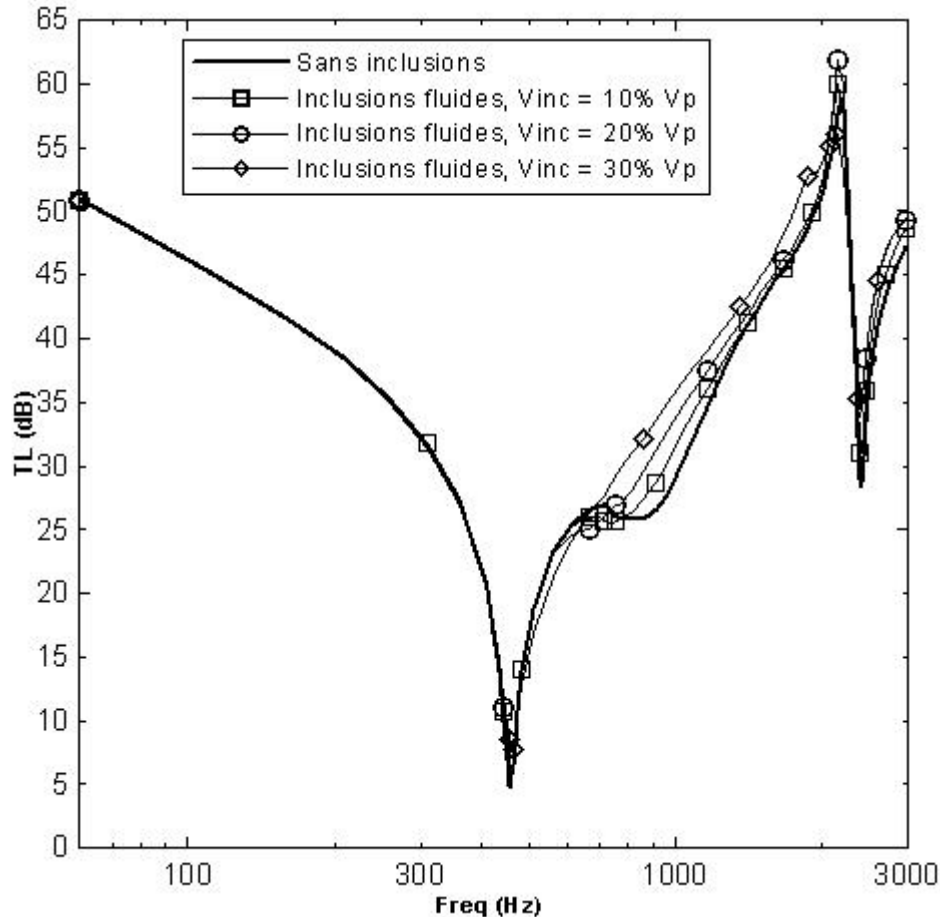


Figure 53: Perte par transmission sous incidence normale d'une configuration composée d'un panneau et d'une mousse plastique avec inclusions fluides

La troisième configuration étudiée est une structure sandwich qui est composée du panneau et de la mousse plastique de la seconde configuration, et qui sont terminés par une couche de septum en vinyle de 1.71 mm d'épaisseur. Le panneau est simplement supporté, la mousse a des conditions aux limites de glissement sur ces bords latéraux, et le septum est guidé par la mousse.

La figure 54 illustre les résultats de perte par transmission en incidence normale qui sont obtenus lorsque 50 ou 100 inclusions solides de masse totale équivalente à 10 % celle du panneau, sont aléatoirement distribuées à l'intérieur de la mousse. Les première et seconde résonances observées sur les courbes correspondent respectivement à la résonance de double paroi et au premier mode contrôlé par le panneau. Il apparaît que les inclusions solides entraînent une légère baisse de la perte par transmission sur une petite bande fréquentielle au dessus de la première résonance du panneau, mais un gain significatif est observé sur des fréquences plus élevées. Le meilleur résultat est obtenu avec le plus grand nombre d'inclusions, puisque c'est ce cas qui détériore le moins la perte par transmission. Une fois encore, il a été vérifié numériquement que les gains obtenus ne sont pas seulement dus à la masse ajoutée.

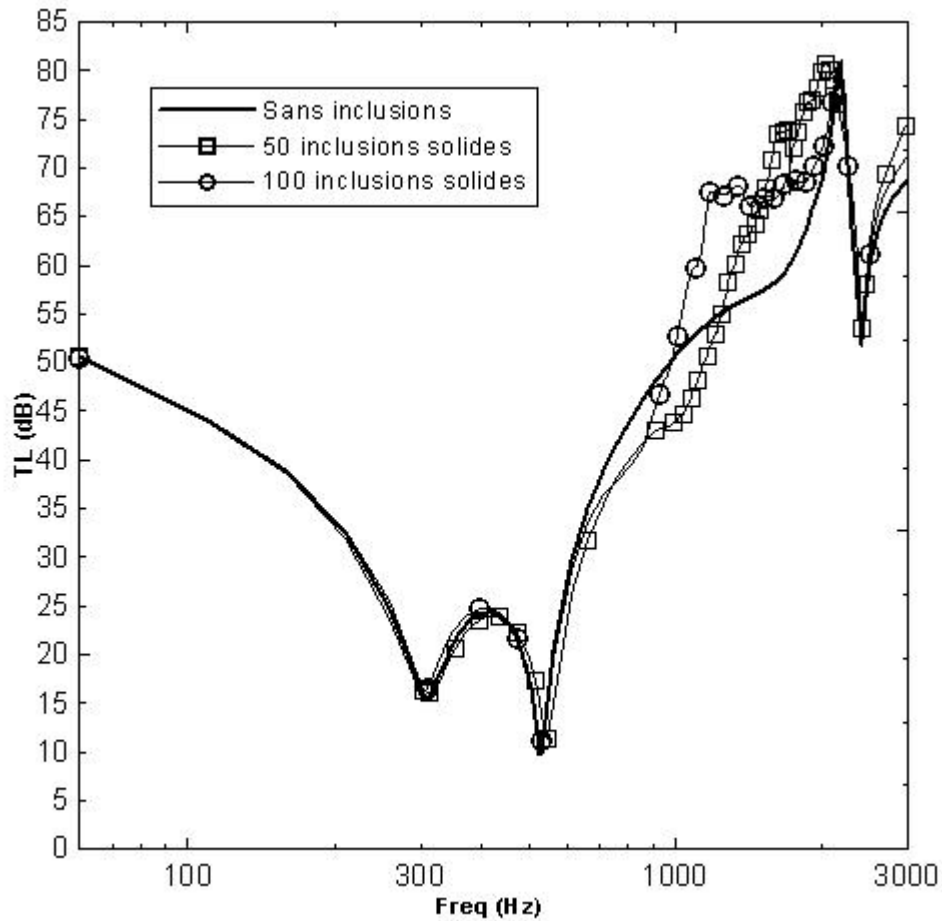


Figure 54: Perte par transmission sous incidence normale d'une configuration composée d'un panneau, d'une mousse plastique avec inclusions solides et d'un septum en vinyle

Les résultats de perte par transmission sous incidence normale d'une distribution aléatoire de poches d'air occupant 10 %, ou 20 %, ou 30 % du volume de la mousse, sont illustrés sur la figure 55. Comme dans la configuration précédente, les inclusions d'air se sont traduites par une augmentation de la perte par transmission sur la plupart des fréquences. Le meilleur des résultats est obtenu avec le plus grand nombre d'inclusions fluides : l'augmentation de la perte par transmission s'accompagne donc d'une réduction intéressante de la masse totale du système.

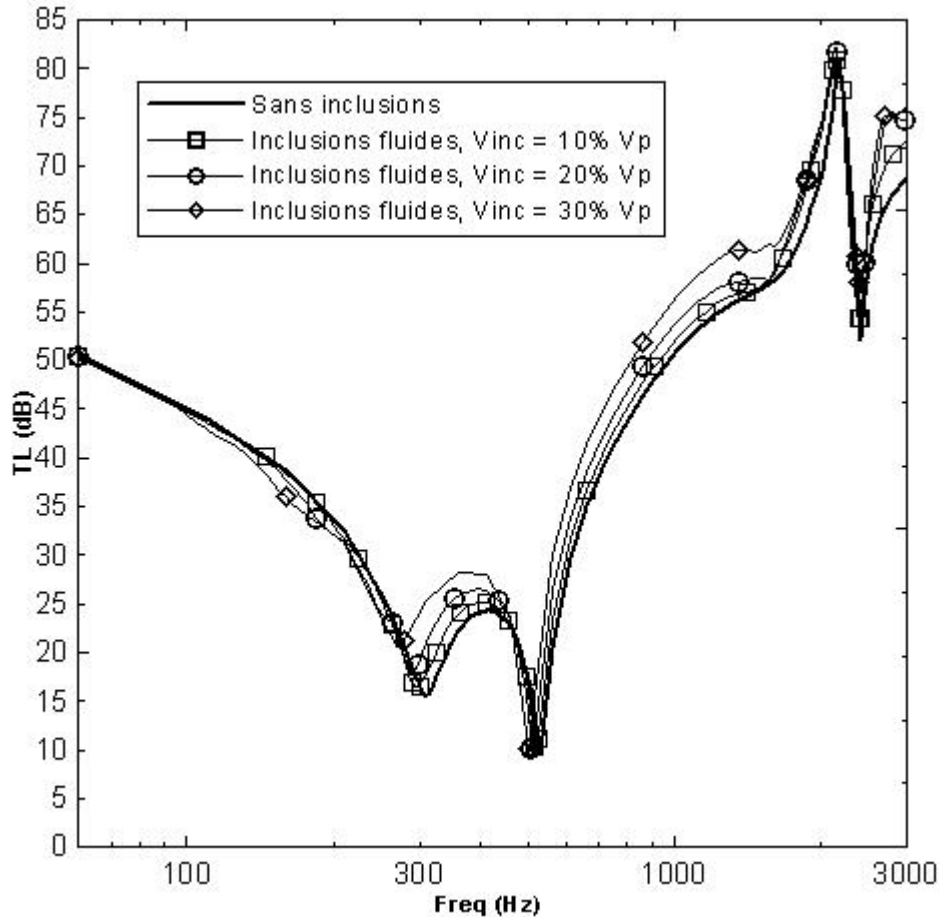


Figure 55: Perte par transmission sous incidence normale d'une structure sandwich composée d'un panneau, d'une mousse plastique avec inclusions fluides et d'un septum en vinyle

En résumé, il a été vérifié numériquement dans les trois configurations, que les inclusions solides ou fluides permettent globalement une augmentation de la perte par transmission. Il est apparu que les inclusions de poches d'air produisent les résultats les plus intéressants, en ce sens que le gain en perte par transmission s'accompagne d'une réduction de la masse de la structure étudiée. Aussi, les meilleurs résultats ont été obtenus avec le plus grand nombre d'inclusions fluides. Il est donc probable que le concept d'inclusions puisse servir à améliorer la perte par transmission de systèmes multicouches qui contiennent des matériaux poreux. Il faut noter toutefois que les analyses numériques n'ont pas révélé de gain significatif en basses fréquences. Les recherches doivent être approfondies pour mieux cerner la problématique des basses fréquences, et des validations expérimentales devront aussi être menées pour valider concrètement le concept d'inclusions fluides et/ou solides en matériau poreux pour l'amélioration de la performance en transmission acoustique.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet était de poursuivre les travaux antérieurs sur la conception des matériaux à haut pouvoir d'absorption, de les valider dans des configurations industrielle en relation avec la santé et la sécurité au travail. Cet objectif impliquait l'élaboration de prototypes optimisés pour l'absorption, des tests de l'efficacité des concepts élaborés par des mesures expérimentales, et la modélisation et l'optimisation de matériaux poreux hétérogènes pour une transparence acoustique accrue en basses fréquences.

Pour répondre à cet objectif, une première étude numérique-expérimentale a porté sur des matériaux couramment utilisés dans l'industrie aéronautique. Dans cette seconde étape, le travail s'est concentré sur des matériaux couramment utilisés sur le marché canadien du bâtiment. Les travaux numérique et expérimental préalablement effectués ont indiqué qu'une résistivité très élevée, une faible tortuosité ainsi qu'une large densité constituaient les paramètres clés pour favoriser l'obtention de meilleures performances d'absorption acoustique à partir de macro-porosités. Tout d'abord, une laine de roche régulièrement utilisée dans le marché canadien a servi de base de traitements macro-poreux dans un environnement de contexte industriel. Des résultats décevants ayant été obtenus, des mesures expérimentales systématiques ont été effectuées dans l'optique d'identifier un matériau poreux facilement disponible sur le marché canadien, peu coûteux et qui serait hautement résistif. Les diverses mesures ont permis de retenir une laine de roche dénommée RHT100, régulièrement disponible sur le marché canadien et dont les caractéristiques sont les moins éloignées des conditions optimales préalablement déterminées.

Le matériau retenu a été d'abord soumis à des tests de caractérisations acoustique et physique. Des études paramétriques basées sur des mesures de perte par insertion et d'absorption en champ diffus ont été ensuite effectuées pour évaluer les performances d'absorption du matériau en fonction de macro-porosités. Elles ont permis de constater que le matériau retenu présentait des tendances intéressantes mais en deçà des prévisions établies. En raison des contraintes et disponibilités du marché, ce matériau a toutefois été utilisé pour plusieurs traitements à base de macro-perforations dans un contexte assimilable à celui d'une application industrielle. Globalement, les mesures effectuées n'ont pas indiqué de gain significatif du matériau macro-perforé par rapport au matériau homogène. Les résultats obtenus ont donc confirmé indirectement l'importance d'une résistance au passage de l'air très élevée pour une contribution optimale des macro-perforations. Toutefois, les mesures ont contribué à cerner les conditions idéales d'utilisation des matériaux macro-perforés pour l'obtention d'une meilleure performance acoustique. [Il a été en effet observé que les matériaux utilisés pour les traitements doivent être placés dans des cadres rigides.] Ces conditions d'utilisation se rapprochent des conditions de mesures en tube de Kundt, et elles obligent l'onde acoustique à entrer en contact avec le matériau seulement par la surface où se trouvent les macro-perforations. Aussi, les mesures expérimentales ont révélé que des macro-perforations de forme rectangulaire ou cylindrique peuvent être simplement remplacées par des fentes dans le matériau, ce qui réduirait les considérations techniques et financières pour l'utilisation de matériaux macro-perforés.

Sur un autre plan, une modélisation théorique exacte de la transparence acoustique des matériaux poreux hétérogènes a été élaborée. Des investigations numériques ont été ensuite

effectuées. Elles ont indiqué que des inclusions de fluides ou de solides dans un matériau poreux peuvent contribuer à augmenter la perte par transmission. Un fait intéressant est que les inclusions de poches d'air donnent de bons résultats, tout en s'accompagnant d'une réduction de poids de l'ensemble du système. Par manque de temps, ces observations n'ont pas pu être validées par des mesures expérimentales.

Les objectifs visés par le projet n'ont donc pas été complètement atteints. Bien que le projet ait permis d'explorer et de commencer à comprendre l'influence des macro-perforations sur la performance d'absorption et de transparence acoustique de matériaux poreux, des difficultés liées à la disponibilité de matériau à très grande résistivité et aux coûts de fabrication et d'installation n'ont pas permis de trouver un partenaire industriel volontaire pour tester et appliquer les concepts développés dans des contextes réels d'application industrielle. Le projet a été toutefois enrichissant sur les plans scientifique et technologique. En ce sens qu'il a donné lieu à des publications d'articles dans des journaux scientifiques et à des présentations dans plusieurs congrès. Plus important, vu le grand potentiel de cette technologie, les auteurs poursuivent le projet par des études complémentaires numériques et expérimentales pour l'optimisation de ces nouveaux matériaux via des méthodes hybrides passives /actives et leurs applications dans des domaines tels que le bâtiment, l'automobile et l'aéronautique.

RÉFÉRENCES

- Allard. J. F. Propagation of sound in porous media, Modelling sound absorbing materials. Elsevier Application Science, New York, Londres, 1993. 284 p.
- Amédin C. K., Atalla N., Sgard F. C. Acoustic absorption of non-homogeneous poroelastic materials. Canadian Acoustical Association Conference, 2000.
- Atalla N., Amédin C. K., Sgard F. Étude numérique et expérimentale de l'absorption acoustique et de la transparence acoustique des matériaux poreux hétérogènes en basses fréquences dans le but d'identifier des solutions à fort potentiel d'applicabilité. Rapport technique, IRSST, 2000.
- Atalla N., Amédin C. K., Sgard F. Numerical modeling of the transmission loss of multilayer structures with heterogeneous porous materials. In 6th U.S. National Congress on Computational Mechanics, Dearbron, MI, USA, 2001.
- Atalla N., Panneton R. The effects of multilayer sound-absorbing treatments on the noise field inside a plate backed cavity. *Noise Control Eng.*, 44(5) : 235-243, 1996.
- Atalla N., Panneton R., Allard J. F. Sound absorption by non homogenous thin porous layers. *Acta Acoustica*, 83 (5) : 891-896, 1997.
- Atalla N., Panneton R., Debergue P. A mixed displacement-pressure formulation for poroelastic materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 104 (3) : 1444-1452, 1998.
- Atalla N., Sgard F. C., Olny X., Panneton R. Acoustic absorption of macro-perforated porous materials. *Accepté dans J. Sound and Vibration*, 2000a.
- Atalla N., Hamdi M.A., Panneton R. Enhanced weak integral formulation for mixed (u,p) poroelastic equations. , *Accepté dans J. Acoust. Soc.Amer.*, 2000b.
- Atalla N., Sgard F. Transmission loss of non-homogeneous porous media. ASA meeting, Long Beach, Ca., December 2000.
- Auriault J., Boutin C. Deformable porous media with double porosity quasistatics. i: Coupling effects, *Transport in porous media* 7, 63–82, 1992.
- Auriault J., Boutin C. Deformable porous media with double porosity quasistatics. ii: Memory effects, *Transport in porous media* 10, 153–169, 1993.
- Auriault J., Boutin C. Deformable porous media with double porosity iii : Acoustics. *Transport in Porous media*, 14 : 143-162, 1994.

- Bardot A., Brouard B., Allard J. F. Frame decoupling at low frequencies in thin porous saturated by air. *J. Appl. Phys.*, 79, 1996.
- Bell et Bell. *Industrial noise control*, (Marcel Dekker Inc. NY, USA), 1994.
- Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves... *J. Acoust. Soc. Am.*, 28 : 1468-178, 1956.
- Boutin C., Royer P., Auriault J. Sound absorption of dry porous media with single and double porosity, *Journal of Engineering Mechanics*, 796–799, 1995.
- Boutin C., Royer P., Auriault J. L., Acoustic absorption of porous surfacing with dual porosity. *Int. J. Solids Structures*, 35 (34-35) :4709-4737, 1998.
- Boutin C., Olny X.. *Mécanique des matériaux hétérogènes*. In *Mécanique des matériaux hétérogènes*, pages 29-34, Grenoble (France), 1999.
- Brouard B., Lafarge D., Allard. J. F. General method of modeling sound propagation in layered media. *J. Sound Vib.*, 183 : 129-142, 1995.
- Debergue P. Développement d'une formulation mixte en déplacement-pressure pour les matériaux poroélastiques. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 1997.
- Debergue P., Panneton R., Atalla N. Boundary conditions for the weak formulation of the mixed (u,p) poroelasticity problem. *J. Acoust. Soc. Am.*, 106(5), 2383-2390, 1999.
- Cushman W. *Modern Plastics*. Pages 75 à 79. Using additives to reduce sound transmission, 1995.
- Coyette J. P., Wynendaele. A finite element model for predicting... *Proceedings of Inter-Noise 95* : 1279-1282, 1995.
- Gorog S., Panneton R., Atalla N. Mixed displacement pressure formulation for acoustic anisotropic porous media. *J. Appl. Phys.* 82 : 4192-4196, 1997
- Ingard U. *Notes on sound absorption technology*. Bk and Disk edition, 1994.
- Kang Y. J., Bolton J. S. Finite element modeling of isotropic elastic porous materials coupled with acoustical finite elements. *J. Acoust. Soc. Am.*, 98 : 635-643, 1996.
- Millot P. *Rayonnement acoustique de plaques couplées dans une cavité*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1987.
- MNS/Nova 2.0™. Logiciel développé à l'Université de Sherbrooke (QC, Canada) et distribué par Mecanum Inc. (www.mecanum.com), 2000.

- Olny X. Absorption acoustique des milieux poreux à simple et double porosité – Modélisation et validation expérimentale. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1999.
- Olny X., Boutin C.. Acoustic wave propagation in double porosity media, *Journal of the Acoustical Society of America* 114 (1), 73–89, 2003.
- Panneton R. Homogeneity of porous materials. Note technique, GAUS, Université de Sherbrooke, 2002
- Panneton R. *Modélisation numérique tridimensionnelle par éléments finis des milieux poroélastiques*. Thèse de doctorat, Génie mécanique, Université de Sherbrooke 1996.
- Panneton R., Atalla N. Numerical prediction of sound transmission... *J. Acoust. Soc. Am.*, 99 : 2755-2765, 1996.
- Panneton R., Atalla N. An efficient finite element scheme for solving the three dimensional poroelasticity problem in acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 101 : 3287-3298, 1997a.
- Panneton R., Atalla N. Low frequency approximations for acoustics porous. *Trans. CSME*, 21 : 401-413, 1997b.
- Panneton R., Atalla N. Computer simulations of multilayer panels... *Proceedings of Noise Con* 1998.
- Pilon D., Panneton R., Sgard F. Behavioral criterion quantifying the effects of circumferential air gaps on porous materials in the standing wave tube. *Soumis pour publication au J. Acoust. Soc. Am.*, 2003.
- Rigobert S., Sgard F., Atalla N. Numerical modeling of multilayered including porous materials: hierarchical elements and non coincident meshes. *Euronoise, Patra*, 2001.
- Sornette D. Acoustic waves in random media. i. weak disorder regime, *Acustica* 67, 199–215, 1989a.
- Sornette D. Acoustic waves in random media. ii. coherent effects and strong disorder regime, *Acustica* 67, 251–265, 1989b.
- Sornette D. Acoustic waves in random media. iii. experimental situations, *Acustica* 68, 15–25, 1989c.

ANNEXE A : ÉQUATIONS DE LA POROÉLASTICITÉ DE BIOT-ALLARD-JOHNSON

Les équations de la formulation mixte (\underline{u} , p) de la poro-élasticité de Biot [3] sont données par :

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \underline{\underline{\tilde{\sigma}}}^S(\underline{u}) + \omega^2 \tilde{\rho} \underline{u} + \tilde{\gamma} \nabla p &= 0 \\ \Delta p + \omega^2 \frac{\tilde{\rho}_{22}}{\tilde{R}} p - \omega^2 \frac{\tilde{\rho}_{22}}{\phi^2} \tilde{\gamma} \operatorname{div} \underline{u} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

Dans ces équations, \underline{u} et p désignent respectivement le vecteur de déplacement de la phase solide et la pression interstitielle du milieu poroélastique, et $\underline{\underline{\tilde{\sigma}}}^S$ représente le tenseur de contraintes *in vacuo* du matériau poreux. Le tenseur $\underline{\underline{\tilde{\sigma}}}^S$ est relié au tenseur de contraintes $\underline{\underline{\sigma}}^t$ du matériau par la relation suivante : $\underline{\underline{\tilde{\sigma}}}^S = \underline{\underline{\sigma}}^t + \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) p \underline{\underline{1}}$ où ϕ est la porosité du matériau, \tilde{Q} est

un coefficient de couplage élastique entre les deux phases, \tilde{R} peut être interprétée comme étant le module de compression de l'air occupant une fraction ϕ d'une unité de volume global [1], et $\underline{\underline{1}}$ désigne la matrice unité. Il faut noter que l'amortissement structural dans le squelette est pris en compte dans $\underline{\underline{\tilde{\sigma}}}^S$ via un module de Young complexe $E(1 + j\eta)$. Le terme $\tilde{\rho}_{22}$ est la densité de Biot modifiée de la phase fluide, qui prend en compte la dissipation visqueuse. Ce terme peut s'écrire sous la forme $\tilde{\alpha} \phi \rho_0$ où $\tilde{\alpha}$ représente la tortuosité dynamique du matériau. Cette densité s'exprime en fonction de la densité apparente de la phase solide $\tilde{\rho}_{11}$ et du coefficient de couplage massique $\tilde{\rho}_{12}$ entre les deux phases, par la relation $\tilde{\rho} = \tilde{\rho}_{11} - \frac{\tilde{\rho}_{12}^2}{\tilde{\rho}_{22}}$, où $\tilde{\rho}$ est une densité modifiée.

Le terme $\tilde{\gamma}$ est défini sous la forme $\tilde{\gamma} = \phi \left[\frac{\tilde{\rho}_{12}}{\tilde{\rho}_{22}} - \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right]$. Il faut noter que pour des matériaux typiques d'absorption sonore, on a la relation $\phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \approx 1$ [1]. Notons également que puisque $\tilde{Q} \approx (1 - \phi) \tilde{K}_{\text{eff}}$ et $\tilde{R} \approx \phi \tilde{K}_{\text{eff}}$, où \tilde{K}_{eff} dénote le module d'incompressibilité dynamique complexe du fluide contenu dans les pores, le rapport $\frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}$ est réel.

ANNEXE B : FORMULATION FAIBLE $\{u,p\}$ PAR ÉLÉMENTS FINIS DES ÉQUATIONS DE BIOT-ALLARD-JOHNSON

Formulation $\{u,p\}$ classique

En multipliant les deux équations de la poroélasticité (A.1) par les variations cinématiquement admissibles $\delta \underline{u}$ et δp du déplacement de la phase solide et de la pression dans les pores, on obtient après quelques manipulations algébriques, la formulation faible $\{u,p\}$ [3] :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega^p} \left[\underline{\underline{\tilde{\sigma}}}^s(\underline{u}) : \underline{\underline{\varepsilon}}^s(\delta \underline{u}) - \tilde{\rho} \omega^2 \underline{u} \cdot \delta \underline{u} \right] d\Omega - \tilde{\gamma} \int_{\Omega^p} \delta(\nabla p \underline{u}) d\Omega + \int_{\Omega^p} \left[\frac{\phi}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot \nabla \delta p - \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \delta p \right] d\Omega \\ - \int_{\partial\Omega^p} \left[\underline{\underline{\tilde{\sigma}}}^s(\underline{u}) \cdot \underline{n} \right] \delta \underline{u} dS + \int_{\partial\Omega^p} \left[\tilde{\gamma} \underline{u} \cdot \underline{n} - \frac{\phi^2}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} \frac{\partial p}{\partial n} \right] \delta p dS = 0 \quad \forall (\delta \underline{u}, \delta p) \end{aligned} \quad (B.1)$$

où Ω_p et $\partial\Omega_p$ représentent le volume occupé par le domaine poroélastique et sa frontière. \underline{n} représente la normale sortante au sous-domaine. Les champs de déplacement et de pression dans le matériau poreux constituant la réponse de ce matériau à une sollicitation doivent vérifier l'équation (B.1). La première intégrale de volume représente la somme des travaux développés dans le déplacement virtuel du champ associé à $\delta \underline{u}$ par les forces internes et inertielles dans la phase solide du milieu poreux. La seconde intégrale de volume représente le travail développé dans le déplacement virtuel du champ associé à $\delta \underline{u}$ et δp par les forces de couplage entre la phase solide et la phase fluide du milieu poreux. La troisième intégrale de volume représente le travail développé dans le déplacement virtuel du champ associé δp par les forces internes internes et inertielles dans la phase fluide du milieu poreux. Les deux intégrales de surface représentent respectivement le travail des forces de surface agissant sur la phase solide dans le déplacement virtuel du champ associé à $\delta \underline{u}$ et le travail virtuel de la pression interne à la frontière du domaine acoustique, par suite de l'imposition d'un mouvement sur la surface de ce domaine. L'interprétation de l'équation (B.1) est facilitée par réécriture des termes de surface :

$$\underline{\underline{\tilde{\sigma}}}^s = \underline{\underline{\sigma}}^t + \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) p \underline{\underline{I}} \quad (B.2)$$

et

$$\tilde{\gamma} \underline{u} \cdot \underline{n} - \frac{\phi^2}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} \frac{\partial p}{\partial n} = -\phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \underline{u} \cdot \underline{n} - \phi (\underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n}) \quad (B.3)$$

où \underline{U} dénote le déplacement de la phase fluide. On obtient finalement :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega^p} \left[\underline{\underline{\tilde{\sigma}}}^s(\underline{u}) : \underline{\underline{\varepsilon}}^s(\delta \underline{u}) - \tilde{\rho} \omega^2 \underline{u} \cdot \delta \underline{u} \right] d\Omega - \tilde{\gamma} \int_{\Omega^p} \delta(\nabla p \underline{u}) d\Omega + \int_{\Omega^p} \left[\frac{\phi}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot \nabla \delta p - \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \delta p \right] d\Omega \\ - \int_{\partial\Omega^p} \left[\underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{n} \right] \delta \underline{u} dS - \int_{\partial\Omega^p} \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \delta(p \underline{u} \cdot \underline{n}) dS - \int_{\partial\Omega^p} \phi (\underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n}) \delta p dS = 0 \quad \forall (\delta \underline{u}, \delta p) \end{aligned} \quad (B.4)$$

Cette formulation est généralement utilisée en supposant que $\phi\left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}\right) \approx 1$, et on a alors :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega^p} [\tilde{\underline{\underline{\sigma}}}^s(\underline{u}) : \underline{\underline{\varepsilon}}^s(\delta\underline{u}) - \tilde{\rho}\omega^2 \underline{u} \cdot \delta\underline{u}] d\Omega - \tilde{\gamma} \int_{\Omega^p} \delta(\nabla p \underline{u}) d\Omega + \int_{\Omega^p} \left[\frac{\phi}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot \nabla \delta p - \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \delta p \right] d\Omega \\ - \int_{\partial\Omega^p} [\underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{n}] \delta \underline{u} dS - \int_{\partial\Omega^p} \delta(p \underline{u} \cdot \underline{n}) dS - \int_{\partial\Omega^p} \phi(\underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n}) \delta p dS = 0 \quad \forall (\delta\underline{u}, \delta p) \end{aligned} \quad (B.5)$$

Sous cette dernière forme, cette formulation est appropriée pour le cas de poreux contenant des hétérogénéités poroélastiques ou fluides. En effet dans ce cas, les termes de couplage de surface sont nuls et seules les conditions de couplage cinématiques doivent être imposées (continuité des pressions dans le cas de poreux et fluides en contact et continuité des pressions et des déplacements dans le cas de poreux de nature différente en contact).

Formulation {u,p} modifiée

La formulation {u,p} classique (B.5) est adaptée au cas d'inclusions fluides ou poroélastiques. Cependant dans le cas d'inclusions solides, les termes de couplage surfacique sont non nuls et obligent à une gestion complexe au niveau informatique des interfaces entre patches. Ceci peut être évité par une modification de l'équation (B.4). Une intégration par partie permet de réécrire l'équation (B.4) sous la forme :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega^p} [\tilde{\underline{\underline{\sigma}}}^s(\underline{u}) : \underline{\underline{\varepsilon}}^s(\delta\underline{u}) - \tilde{\rho}\omega^2 \underline{u} \cdot \delta\underline{u}] d\Omega - \left[\tilde{\gamma} + \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \right] \int_{\Omega^p} \delta(\nabla p \underline{u}) d\Omega + \int_{\Omega^p} \left[\frac{\phi}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot \nabla \delta p - \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \delta p \right] d\Omega \\ - \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \int_{\Omega^p} \delta(p \nabla \cdot \underline{u}) d\Omega - \int_{\partial\Omega^p} [\underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{n}] \delta \underline{u} dS - \int_{\partial\Omega^p} \phi(\underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n}) \delta p dS = 0 \quad \forall (\delta\underline{u}, \delta p) \end{aligned} \quad (B.6)$$

Cette formulation permet le couplage naturel entre des éléments poroélastiques de nature différente et des éléments poroélastiques et des éléments solides. Il n'y a pas d'intégrales de couplage à calculer dans ce cas et seules les conditions de couplage cinématiques doivent être imposées par exemple au niveau de l'assemblage.

ANNEXE C : FORMULATION FAIBLE PAR ÉLÉMENTS FINIS D'UN MILIEU FLUIDE ET D'UN MILIEU SOLIDE

Milieu fluide

La propagation des ondes acoustiques dans un milieu fluide, de densité ρ_0 et de vitesse du son c , occupant un volume Ω_p et de frontière $\partial\Omega_p$ est régie par l'équation de Helmholtz :

$$\Delta p + \frac{\omega^2}{c^2} p = 0 \quad (C.1)$$

et la forme intégrale faible associée est donnée par la relation :

$$\int_{\Omega^p} \left[\underline{\nabla} p \cdot \underline{\nabla} \delta p - \frac{\omega^2}{c^2} p \delta p \right] d\Omega - \int_{\partial\Omega^p} \frac{1}{\omega^2 \rho_0} \frac{\partial p}{\partial n} \delta p dS = 0 \quad \forall \delta p \quad (C.2)$$

Milieu solide

La propagation des ondes dans un milieu solide, de densité ρ , occupant un volume Ω_p et de frontière $\partial\Omega_p$ est régie par l'équation:

$$\underline{\nabla} \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \omega^2 \rho \underline{u} = 0 \quad (C.3)$$

et la forme intégrale faible associée est donnée par la relation :

$$\int_{\Omega^p} \left[\underline{\underline{\sigma}}(\underline{u}) : \underline{\underline{\varepsilon}}(\delta \underline{u}) - \rho \omega^2 \underline{u} \cdot \delta \underline{u} \right] d\Omega - \int_{\partial\Omega^p} \left[\underline{\underline{\sigma}}(\underline{u}) \cdot \underline{n} \right] \delta \underline{u} dS \quad \forall (\delta \underline{u}) \quad (C.4)$$

ANNEXE D : COUPLAGE ENTRE UN MATÉRIAU POROÉLASTIQUE ET DES HÉTÉROGÉNÉITÉS DE NATURE FLUIDE, SOLIDE ET POROÉLASTIQUE

Cas du couplage entre poreux et milieu fluide

Soit p^a la pression dans le milieu fluide. Les équations traduisant le couplage entre un matériau poroélastique décrit par les variables $(\underline{u}, p, \underline{U})$ et un fluide sont données par :

$$\begin{cases} \underline{\underline{\sigma}}^t = -p^a \underline{\underline{I}} \\ p = p^a \\ (1-\phi)\underline{u}\cdot\underline{n} + \phi\underline{U}\cdot\underline{n} = \frac{1}{\rho_0\omega^2} \frac{\partial p^a}{\partial n} \end{cases} \quad (D.1)$$

Dans ce cas, on constate que l'addition des termes de surface de la formulation $\{u, p\}$ classique donnés par (B.5) et de ceux de la formulation (C.2) donne zéro. Le couplage est donc naturel et il n'y a pas d'intégrales de couplage à calculer. Seule la continuité de la pression des milieux fluides et poroélastiques doit être imposée au niveau de l'interface. La formulation classique $\{u, p\}$ est donc appropriée pour traiter ce type d'hétérogénéité. La formulation $\{u, p\}$ modifiée donnerait lieu au calcul d'une matrice de couplage qui alourdirait les calculs.

Cas du couplage entre poreux et milieu solide

Soit \underline{u}^e le déplacement du milieu solide. Les équations traduisant le couplage entre un matériau poroélastique décrit par les variables $(\underline{u}, p, \underline{U})$ et un solide sont données par:

$$\begin{cases} \underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{n} = \underline{\underline{\sigma}}^e \cdot \underline{n} \\ \underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n} = 0 \\ \underline{u} = \underline{u}^e \end{cases} \quad (D.2)$$

Dans ce cas, on constate que l'addition des termes de surface de la formulation $\{u, p\}$ modifiée donnés par (B.6) et de ceux de la formulation (C.4) donne zéro. Le couplage est donc naturel et il n'y a pas d'intégrales de couplage à calculer. Seule la continuité du déplacement du milieu solide et du déplacement du milieu poroélastique doit être imposée au niveau de l'interface. La formulation $\{u, p\}$ modifiée est donc appropriée pour traiter ce type d'hétérogénéité. La formulation $\{u, p\}$ classique donnerait lieu au calcul d'une matrice de couplage qui alourdirait les calculs.

ANNEXE E : COUPLAGE ENTRE GUIDE D'ONDE ET MATÉRIAU POROÉLASTIQUE OU ÉLASTIQUE

On détaille ici la prise en compte du couplage entre le guide d'onde et un matériau poreux décrit par les formulations (B.5) et (B.6). Dans ce qui suit, $\partial\Omega_p$ dénote l'interface entre le guide d'onde et le matériau poreux.

Soit p^a la pression dans le guide d'onde. Les conditions aux limites pour un matériau poreux en contact avec le guide d'onde sont données par :

$$\begin{cases} \underline{\underline{\sigma}}^t = -p^a \underline{\underline{I}} \\ p = p^a \\ (1-\phi)\underline{u}\cdot\underline{n} + \phi\underline{U}\cdot\underline{n} = \frac{1}{\rho_0\omega^2} \frac{\partial p^a}{\partial n} \end{cases} \quad (\text{E.1})$$

Formulation {u,p} classique

Dans ce cas, le terme de frontière dans l'équation (B.5) devient :

$$\begin{aligned} & - \int_{\partial\Omega^p} [\underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{n}] \delta \underline{u} dS - \int_{\partial\Omega^p} \delta(p \underline{u} \cdot \underline{n}) dS - \int_{\partial\Omega^p} \phi (\underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n}) \delta p dS = \\ & \int_{\partial\Omega^p} p \delta(\underline{u} \cdot \underline{n}) dS - \int_{\partial\Omega^p} \delta(p \underline{u} \cdot \underline{n}) dS - \int_{\partial\Omega^p} \frac{1}{\rho_0\omega^2} \frac{\partial p^a}{\partial n} \delta p dS + \int_{\partial\Omega^p} \underline{u} \cdot \underline{n} \delta p dS = - \int_{\partial\Omega^p} \frac{1}{\rho_0\omega^2} \frac{\partial p^a}{\partial n} \delta p dS \end{aligned} \quad (\text{E.2})$$

Pour calculer ce terme de surface qui traduit le couplage entre guide d'onde et poreux, la pression p^a est écrite comme la somme d'une pression bloquée p_b et d'une pression p_{rad} rayonnée à partir de la surface du patchwork :

$$p^a = p_b + p_{\text{rad}} \quad (\text{E.3})$$

Pour une excitation du mode normal d'amplitude p_0 , la pression bloquée p_b est égale à $2p_0$. La pression rayonnée peut être exprimée en termes de modes normaux orthogonaux dans le guide d'onde :

$$p_{\text{rad}}(\underline{x}) = \sum_{m,n} B_{mn} \varphi_{mn}(x_1, x_2) e^{jk_{mn}x_3} \quad (\text{E.4})$$

où les B_{mn} représentent les amplitudes obtenues des propriétés d'orthogonalité des modes. Pour un guide d'onde de section rectangulaire $L_1 \times L_2$, on a :

$$\varphi_{mn}(x_1, x_2) = \cos\left(\frac{m\pi}{L_1}\right) \cos\left(\frac{n\pi}{L_2}\right) \quad (\text{E.5})$$

On a

$$\int_{\partial\Omega^p} p_{\text{rad}} \varphi_{mn}(x_1, x_2) dS_x = \int_{\partial\Omega^p} (p - p_b) \varphi_{mn}(x_1, x_2) dS_x \quad (\text{E.6})$$

qui conduit à :

$$B_{mn} = \frac{1}{N_{mn}} \int_{\partial\Omega^p} (p - p_b) \varphi_{mn} dS \quad (E.7)$$

avec N_{mn} qui est la norme du mode (m, n) :

$$N_{mn} = \int_{\partial\Omega^p} |\varphi_{mn}|^2 dS \quad (E.8)$$

En exploitant les équations (E.4) et (E.5), le déplacement normal à l'interface entre le patchwork et l'air (position $x_3 = 0$) peut être écrit sous la forme :

$$\frac{1}{\rho_0 \omega^2} \frac{\partial p^a}{\partial n}(\underline{x}) = \frac{1}{j\omega} \int_{\partial\Omega^p} A(\underline{x}, \underline{y})(p(\underline{y}) - p_b(\underline{y})) dS_y \quad (E.9)$$

où \underline{A} est l'opérateur d'admittance suivant :

$$A(\underline{x}, \underline{y}) = \sum_{m,n} \frac{k_{mn}}{\rho_0 \omega N_{mn}} \varphi_{mn}(\underline{x}) \varphi_{mn}(\underline{y}) \quad (E.10)$$

Finalement, le terme de couplage de frontière devient :

$$\begin{aligned} \int_{\partial\Omega^p} \frac{1}{\rho_0 \omega^2} \frac{\partial p^a}{\partial n} \delta p dS &= \frac{1}{j\omega} \int_{\partial\Omega^p} \int_{\partial\Omega^p} A(\underline{x}, \underline{y}) p(\underline{y}) \delta p(\underline{x}) dS_y dS_x \\ &\quad - \frac{1}{j\omega} \int_{\partial\Omega^p} \int_{\partial\Omega^p} A(\underline{x}, \underline{y}) p_b(\underline{y}) \delta p(\underline{x}) dS_y dS_x \end{aligned} \quad (E.11)$$

Cette forme a l'avantage de représenter le couplage avec le guide d'onde en termes d'admittance de rayonnement et de charge de pression bloquée. Il faut noter qu'en basses fréquences (en dessous de la fréquence de coupure du guide d'onde), des modes plus élevés conduisent à un opérateur d'admittance purement imaginaire de type inertance. L'intérêt de cette modélisation est qu'on ramène l'effet du guide d'onde à une matrice d'admittance sur les degrés de liberté en pression du poreux. On n'ajoute donc pas de degrés de liberté supplémentaires.

Formulation {u,p} modifiée

Dans ce cas, le terme de frontière dans l'équation (B.5) devient :

$$\begin{aligned} - \int_{\partial\Omega^p} [\underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{\underline{n}}] \delta \underline{\underline{u}} dS - \int_{\partial\Omega^p} \phi(\underline{\underline{U}} \cdot \underline{\underline{n}} - \underline{\underline{u}} \cdot \underline{\underline{n}}) \delta p dS = \\ \int_{\partial\Omega^p} p \delta(\underline{\underline{u}} \cdot \underline{\underline{n}}) dS - \int_{\partial\Omega^p} \frac{1}{\rho_0 \omega^2} \frac{\partial p^a}{\partial n} \delta p dS + \int_{\partial\Omega^p} \underline{\underline{u}} \cdot \underline{\underline{n}} \delta p dS = - \int_{\partial\Omega^p} \frac{1}{\rho_0 \omega^2} \frac{\partial p^a}{\partial n} \delta p dS + \int_{\partial\Omega^p} \delta(p \underline{\underline{u}} \cdot \underline{\underline{n}}) dS \end{aligned} \quad (E.12)$$

On a donc le même terme de surface à calculer que pour la formulation {u,p} classique auquel il faut rajouter un terme de couplage surfacique entre la pression interstitielle et le déplacement normal.

ANNEXE F : CALCUL DE PUISSANCES DISSIPÉES ET DE PERTE PAR TRANSMISSION

F.1 Puissances dissipées

Dans cette section, les expressions des puissances dissipées à travers les différents mécanismes qui gouvernent la dissipation dans les milieux poreux, sont calculées pour les différentes formulations.

Formulation {u,p} classique

Pour faciliter l'interprétation du bilan de puissance associé au poreux, la formulation (B.4) est légèrement modifiée en ajoutant et retranchant le terme

$$\phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \int_{\Omega^p} \delta(\nabla p \cdot \underline{u}) d\Omega \quad (\text{F.1})$$

De plus, en remarquant que

$$\tilde{\gamma} + \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) = \frac{\phi}{\tilde{\alpha}} \quad (\text{F.2})$$

où $\tilde{\alpha}$ représente la tortuosité dynamique (associée aux effets visqueux), on obtient :

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega^p} \left[\underline{\underline{\sigma}}^s(\underline{u}) : \underline{\underline{\varepsilon}}^s(\delta \underline{u}) - \tilde{\rho} \omega^2 \underline{u} \cdot \delta \underline{u} \right] d\Omega - \frac{\phi}{\tilde{\alpha}} \int_{\Omega^p} \delta(\nabla p \cdot \underline{u}) d\Omega + \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \int_{\Omega^p} \delta(\nabla p \cdot \underline{u}) d\Omega \\ & + \int_{\Omega^p} \left[\frac{\phi}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot \nabla \delta p - \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \delta p \right] d\Omega \quad (\text{F.3}) \\ & - \int_{\partial \Omega^p} \left[\underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{n} \right] \delta \underline{u} dS - \int_{\partial \Omega^p} \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \delta(p \underline{u} \cdot \underline{n}) dS - \int_{\partial \Omega^p} \phi (\underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n}) \delta p dS = 0 \quad \forall (\delta \underline{u}, \delta p) \end{aligned}$$

En substituant dans l'équation (F.3) un couple de fonctions admissibles choisies sous la forme $-j\omega \underline{u}^*$ et $-j\omega p^*$, on obtient :

$$\begin{aligned}
& \underbrace{-j\omega \int_{\Omega^p} [\tilde{\underline{\sigma}}^s(\underline{u}) : \underline{\underline{\varepsilon}}^s(\underline{u}^*)] d\Omega}_{\Pi_{\text{elas}}^s} + \underbrace{j\omega^3 \int_{\Omega_p} \tilde{\rho} \underline{u} \cdot \underline{u}^* d\Omega}_{\Pi_{\text{iner}}^s} \\
& + \underbrace{j\omega \frac{\phi}{\tilde{\alpha}} \int_{\Omega^p} (\nabla p \cdot \underline{u}^* + \nabla p^* \cdot \underline{u}) d\Omega - j\omega \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}\right) \int_{\Omega^p} (\nabla p \cdot \underline{u}^* + \nabla p^* \cdot \underline{u}) d\Omega}_{\Pi_{\text{coup}}^{\text{fs}}} \\
& \underbrace{-j \int_{\Omega_p} \frac{\phi}{\omega \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot \nabla p^* d\Omega}_{\Pi_{\text{iner}}^f} + \underbrace{j\omega \int_{\Omega_p} \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \cdot p^* d\Omega}_{\Pi_{\text{elas}}^f} \\
& + \underbrace{j\omega \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}\right) \int_{\partial\Omega^p} (p \underline{u}^* \cdot \underline{n} + p^* \underline{u} \cdot \underline{n}) dS + j\omega \int_{\partial\Omega^p} [\underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{n}] \underline{u}^* dS + j\omega \int_{\partial\Omega^p} \phi (\underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n}) p^* dS}_{-\Pi_{\text{ech}}} = 0
\end{aligned} \tag{F.4}$$

Cette relation fournit l'équation d'équilibre des puissances :

$$\Pi_{\text{elas}}^s + \Pi_{\text{iner}}^s + \Pi_{\text{elas}}^f + \Pi_{\text{iner}}^f + \Pi_{\text{coup}}^{\text{fs}} - \Pi_{\text{ech}} = 0 \tag{F.5}$$

où Π_{elas}^s , Π_{iner}^s , Π_{elas}^f , Π_{iner}^f , $\Pi_{\text{coup}}^{\text{fs}}$ désignent respectivement les puissances développées par les forces élastiques et inertielles dans la phase solide et la phase fluide, la puissance développée par les forces de couplage volumique entre les deux phases et Π_{ech} est la puissance échangée à travers l'interface entre le milieu poreux et son environnement (guide d'onde, autres matériaux).

La moyenne temporelle de la puissance dissipée à l'intérieur du système est de la forme :

$$\frac{1}{2} \Re \left[-j\omega \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}\right) \int_{\partial\Omega^p} 2\Re(p \underline{u}^* \cdot \underline{n}) dS - j\omega \int_{\partial\Omega^p} [\underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{n}] \underline{u}^* dS - j\omega \int_{\partial\Omega^p} \phi [\underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n}] p^* dS \right] \tag{F.6}$$

qui se réécrit

$$\frac{1}{2} \Re \left[-j\omega \int_{\partial\Omega^p} [\underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{n}] \underline{u}^* dS - j\omega \int_{\partial\Omega^p} \phi [\underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n}] p^* dS \right] \tag{F.7}$$

car $\frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}$ est supposé réel. Elle peut être subdivisée en trois contributions de puissances dissipées provenant des effets visqueux et thermiques et de l'amortissement structural dans le squelette, $\Pi_{\text{diss}} = \Pi_{\text{diss}}^s + \Pi_{\text{diss}}^v + \Pi_{\text{diss}}^t$. La moyenne temporelle de la puissance dissipée via les effets visqueux est obtenue à partir de Π_{elas}^s :

$$\Pi_{\text{diss}}^s = \frac{1}{2} \Im \left[\omega \int_{\Omega^p} [\tilde{\underline{\sigma}}^s(\underline{u}) : \underline{\underline{\varepsilon}}^s(\underline{u}^*)] d\Omega \right] \tag{F.8}$$

La moyenne temporelle de la puissance dissipée via les effets visqueux est obtenue à partir de Π_{iner}^s , Π_{iner}^f et $\Pi_{\text{coup}}^{\text{fs}}$, à savoir :

$$\Pi_{\text{diss}}^v = \frac{1}{2} \Im \left[-\omega^3 \int_{\Omega_p} \tilde{\rho} \underline{u} \cdot \underline{u}^* d\Omega + \int_{\Omega_p} \frac{\phi}{\omega \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot \nabla p^* d\Omega - 2\omega \frac{\phi}{\tilde{\alpha}} \int_{\Omega_p} \Re(\nabla p \cdot \underline{u}^*) d\Omega \right] \quad (\text{F.9})$$

Notons que cette expression peut se réécrire sous la forme

$$\Pi_{\text{diss}}^v = \frac{1}{2} \Im \left[-\omega^3 \int_{\Omega_p} \tilde{\rho} \underline{u} \cdot \underline{u}^* d\Omega + \int_{\Omega_p} \frac{\phi}{\omega \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot \nabla p^* d\Omega - 2\omega \tilde{\gamma} \int_{\Omega_p} \Re(\nabla p \cdot \underline{u}^*) d\Omega \right] \quad (\text{F.10})$$

puisque $\Im \left[\frac{\phi}{\tilde{\alpha}} \right] = \Im \left[\tilde{\gamma} + \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \right] = \Im[\tilde{\gamma}]$ puisque $\frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}$ est supposé réel.

La puissance dissipée via les effets thermiques est obtenue à partir de Π_{elas}^f et $\Pi_{\text{coup}}^{\text{fs}}$, à savoir :

$$\Pi_{\text{diss}}^t = \frac{1}{2} \Im \left[\omega \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \int_{\Omega_p} 2\Re(\nabla p \cdot \underline{u}^*) d\Omega - \omega \int_{\Omega_p} \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \cdot p^* d\Omega \right] \quad (\text{F.11})$$

Du fait que $\frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}$ est supposé réel, cette expression devient :

$$\Pi_{\text{diss}}^t = \frac{1}{2} \Im \left[-\omega \int_{\Omega_p} \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \cdot p^* d\Omega \right] \quad (\text{F.12})$$

Formulation {u,p} modifiée

La formulation (B.4) peut être réécrite en fonction de la tortuosité dynamique sous la forme :

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_p} \left[\tilde{\underline{\sigma}}^s(\underline{u}) : \underline{\varepsilon}^s(\delta \underline{u}) - \tilde{\rho} \omega^2 \underline{u} \cdot \delta \underline{u} \right] d\Omega - \frac{\phi}{\tilde{\alpha}} \int_{\Omega_p} \delta(\nabla p \underline{u}) d\Omega + \int_{\Omega_p} \left[\frac{\phi}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} \nabla p \cdot \nabla \delta p - \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p \delta p \right] d\Omega \\ & - \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}} \right) \int_{\Omega_p} \delta(p \nabla \cdot \underline{u}) d\Omega - \int_{\partial \Omega_p} [\tilde{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{n}] \delta \underline{u} dS - \int_{\partial \Omega_p} \phi(\underline{U} \cdot \underline{n} - \underline{u} \cdot \underline{n}) \delta p dS = 0 \quad \forall (\delta \underline{u}, \delta p) \end{aligned} \quad (\text{F.13})$$

En procédant comme pour la formulation classique, le bilan de puissances s'écrit :

$$\begin{aligned}
& \underbrace{-j\omega \int_{\Omega^p} [\underline{\underline{\tilde{\sigma}}}^s(\underline{\underline{u}}) : \underline{\underline{\varepsilon}}^s(\underline{\underline{u}}^*)] d\Omega}_{\Pi_{\text{elas}}^s} + \underbrace{j\omega^3 \int_{\Omega^p} \tilde{\rho} \underline{\underline{u}} \cdot \underline{\underline{u}}^* d\Omega}_{\Pi_{\text{iner}}^s} \\
& + \underbrace{j\omega \frac{\phi}{\tilde{\alpha}} \int_{\Omega^p} (\nabla \underline{\underline{p}} \cdot \underline{\underline{u}}^* + \nabla \underline{\underline{p}}^* \cdot \underline{\underline{u}}) d\Omega + j\omega \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}\right) \int_{\Omega^p} (\underline{\underline{p}} \nabla \cdot \underline{\underline{u}}^* + \underline{\underline{p}}^* \nabla \cdot \underline{\underline{u}}) d\Omega}_{\Pi_{\text{coup}}^{\text{fs}}} \\
& \underbrace{-j \int_{\Omega^p} \frac{\phi}{\omega \tilde{\rho}_{22}} \nabla \underline{\underline{p}} \cdot \nabla \underline{\underline{p}}^* d\Omega}_{\Pi_{\text{iner}}^f} + \underbrace{j\omega \int_{\Omega^p} \frac{\phi^2}{\tilde{R}} \underline{\underline{p}} \cdot \underline{\underline{p}}^* d\Omega}_{\Pi_{\text{elas}}^f} \\
& + \underbrace{j\omega \int_{\partial\Omega^p} [\underline{\underline{\sigma}}^t \cdot \underline{\underline{n}}] \underline{\underline{u}}^* dS + j\omega \int_{\partial\Omega^p} \phi (\underline{\underline{U}} \cdot \underline{\underline{n}} - \underline{\underline{u}} \cdot \underline{\underline{n}}) \underline{\underline{p}}^* dS}_{-\Pi_{\text{ech}}} = 0
\end{aligned} \tag{F.14}$$

En utilisant le fait que $\frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}$ est réel et que par conséquent $\Re \left[j\omega \phi \left(1 + \frac{\tilde{Q}}{\tilde{R}}\right) \int_{\Omega^p} 2\Re(\underline{\underline{p}} \nabla \cdot \underline{\underline{u}}^*) d\Omega \right] = 0$, on retrouve les expressions des puissances dissipées de la formulation classique.

F.2 Perte par transmission

La perte par transmission caractérise la performance du matériau à atténuer la transmission des sons. Elle est définie comme:

$$\text{TL} = -10 \log \left(\frac{\Pi_t}{\Pi_{\text{inc}}} \right) \tag{F.25}$$

où Π_t dénote la puissance transmise du côté réception et Π_{inc} la puissance incidente qui traverserait la surface du matériau si ce dernier était infiniment absorbant.