

# Méthodologie innovante pour la caractérisation des matériaux acoustiques en laboratoire et étude de son applicabilité sur le terrain

Olivier Robin  
Celse Kafui Amédin  
Alain Berry  
Noureddine Atalla  
Olivier Doutres  
Franck Sgard

RAPPORTS  
SCIENTIFIQUES

R-1022



## NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

**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.**

### 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;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

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 des normes, de l'équité, 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](http://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 CNESST ([preventionautravail.com](http://preventionautravail.com))
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

### Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec  
2018  
ISBN : 978-2-89797-014-7  
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications  
et de la valorisation de la recherche  
505, boul. De Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 3C2  
Téléphone : 514 288-1551  
[publications@irsst.qc.ca](mailto:publications@irsst.qc.ca)  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)  
© Institut de recherche Robert-Sauvé  
en santé et en sécurité du travail,  
juin 2018

# Méthodologie innovante pour la caractérisation des matériaux acoustiques en laboratoire et étude de son applicabilité sur le terrain

Olivier Robin, Celse Kafui Amédin, Alain Berry, Nouredine Atalla  
Université de Sherbrooke

Olivier Doutres  
École de technologie supérieure

Franck Sgard  
IRSST

RAPPORTS  
SCIENTIFIQUES

R-1022



## Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

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



#### ÉVALUATION PAR DES PAIRS

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.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs du rapport tiennent à remercier les membres du comité de suivi qui ont participé aux réunions et discussions au cours de cette étude, tout en soulignant la contribution particulière de M<sup>me</sup> Lucie Huberdeau, M. Franck Duchassin, M. Tony Venditti, M. Jean-Marie Guérin, M. Noureddine Larbi, M. Waguih Geadah, et M. Phat Nguyen.

Ils expriment leur considération à M. Jean Nicolas pour son soutien lors du montage de cette étude et lors de la réunion de lancement, ainsi qu'à M<sup>me</sup> Chantal Tellier pour son suivi lors des étapes administratives et à M. François Ouellet pour son aide à l'organisation générale des réunions du comité de suivi.

Les auteurs tiennent enfin à reconnaître la précieuse contribution de MM. Marc-Antoine Bernard et Xavier Mongrain-Lalonde aux campagnes de mesures, et à M. Patrick Lévesque pour son soutien technique.



## SOMMAIRE

Au Québec, la surdité professionnelle constitue la seconde maladie en importance, selon le nombre de cas, à être indemnisée par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST). Le bruit accroît également le risque d'accidents en masquant les signaux avertisseurs, en réduisant l'intelligibilité des échanges et en augmentant la fatigue des travailleurs. Diminuer le bruit permet de réduire les cas de surdité professionnelle et les coûts qui y sont associés, mais aussi de limiter la contribution de ce facteur aux accidents du travail, tout en améliorant la qualité de vie des travailleurs. La réduction du bruit en milieu de travail peut être effectuée selon trois axes : la réduction à la source (machine moins bruyante ou encoffrement), la diminution de sa transmission (installation d'écrans ou de matériaux absorbants) ou l'atténuation (port de protecteurs auditifs ou limitation du temps d'exposition). C'est le second axe (matériaux absorbants) qui est au cœur de cette étude.

La performance d'un traitement insonorisant se traduit par un coefficient d'absorption, qui est défini théoriquement entre une valeur de 0 (matériau non absorbant) et une valeur de 1 (matériau parfaitement absorbant). Peu précise à plusieurs égards, la mesure de ce coefficient est uniquement réalisée en laboratoire. Elle est caractérisée par la grande variabilité des résultats entre les laboratoires de test et les valeurs d'absorption obtenues atteignent souvent des valeurs non physiques en pratique (supérieures à 1). Pourtant, ces valeurs servent actuellement à choisir des matériaux pour des traitements absorbants, ou pour réaliser des calculs prévisionnels de bruit (pour lesquels la principale source d'erreur reste la connaissance précise de ces coefficients).

Sur la base d'une première preuve de concept, la présente étude propose une méthode de caractérisation robuste et fiable des traitements absorbants en laboratoire et évalue son applicabilité sur le terrain, afin de pouvoir mesurer les performances réelles des matériaux après leur installation. L'approche proposée repose sur la mesure de la propagation acoustique entre une source mobile (formant une « antenne » virtuelle) et un doublet microphonique fixe à faible distance d'un échantillon du matériau testé. Dans une étape de post-traitement ultérieure, ces données sont utilisées pour obtenir le coefficient d'absorption dans des conditions de champ acoustique diffus.

Un choix de cinq matériaux typiques a tout d'abord été effectué en concertation avec le comité de suivi de cette étude. Ces matériaux ont ensuite été testés selon les méthodes normatives actuelles, soit celles de la chambre réverbérante et du tube d'impédance. Les paramètres physiques intrinsèques pertinents de chaque matériau ont également été mesurés afin de pouvoir modéliser leur absorption acoustique (paramètres dits de Johnson-Champoux-Allard, soit la résistivité au passage de l'air, la tortuosité, la porosité, la longueur caractéristique thermique et la longueur caractéristique visqueuse). Le résultat de cette modélisation a ensuite été utilisé comme solution de référence pour la valeur du coefficient d'absorption. La valeur obtenue par l'approche proposée a été comparée à cette solution de référence. Par ailleurs, des simulations par éléments finis ont permis de proposer une configuration optimale pour la dimension du matériau testé, la géométrie de l'antenne de sources et celle du doublet microphonique.

Les résultats obtenus en laboratoire (dans une chambre anéchoïque) et hors laboratoire (dans deux locaux ordinaires, en présence de réverbération et de bruit de fond) confirment le potentiel de l'approche à mesurer une absorption réaliste des divers matériaux testés, généralement en conformité avec les valeurs obtenues par simulation numérique. L'approche résulte par contre en une valeur d'absorption parfois erronée dans le domaine des basses fréquences, en raison du modèle de propagation utilisé à l'étape de post-traitement des mesures. Une piste d'amélioration de ce modèle est proposée et partiellement étudiée.



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	I
SOMMAIRE .....	III
TABLE DES MATIÈRES .....	V
LISTE DES TABLEAUX .....	IX
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XVII
1. INTRODUCTION .....	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	3
2.1 Effets et méthodes de contrôle du bruit en santé et en sécurité du travail.....	3
2.2 Mesures d'absorption standardisées pour les matériaux acoustiques : tube d'impédance et chambre réverbérante.....	5
2.3 Problématiques des mesures standardisées.....	6
2.4 Mesures d'absorption en laboratoire suivant des méthodes alternatives.....	7
2.5 Mesures d'absorption <i>in situ</i> (hors laboratoire).....	9
2.6 Avis et suivi des milieux de travail sur la problématique et l'étude.....	11
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE .....	13
4. MÉTHODOLOGIE.....	15
4.1 Matériaux sélectionnés et caractérisation de leurs propriétés .....	15
4.2 Méthode proposée .....	18
4.2.1 Coefficient de réflexion sphérique pour une excitation acoustique de type monopôle .....	18
4.2.2 Coefficient de réflexion sous champ synthétisé .....	19
4.3 Coefficient de réflexion selon le modèle de Nobile-Hayek pour une excitation de type monopôle .....	20
4.3.1 Extraction de l'admittance de surface .....	22
4.3.2 Coefficient de réflexion $R\theta i, \omega$ et coefficient d'absorption $\alpha\theta i, \omega$ sous monopôle ..	23
4.4 Simulations numériques.....	25
4.4.1 Simulations numériques pour l'évaluation d'une configuration optimale pour la mesure .....	25
4.4.2 Calculs de référence pour les matériaux sélectionnés .....	27
4.5 Mesures du coefficient d'absorption acoustique en laboratoire et hors laboratoire ..	28
4.5.1 Description des mesures en chambre réverbérante selon les normes actuelles ...	28

4.5.2	Description des mesures selon l'approche proposée en conditions contrôlées (chambre semi-anéchoïque) et hors laboratoire (petit local de travail et atelier de fabrication mécanique) .....	29
4.5.3	Description des mesures en laboratoire pour des matériaux dans des conditions de montage spécifiques .....	34
5.	RÉSULTATS.....	37
5.1	Partie numérique .....	37
5.1.1	Calculs de référence (matériau d'étendue latérale infinie) .....	37
5.1.2	Effets de la taille de l'échantillon.....	38
5.1.3	Effets de la largeur et de la hauteur du réseau de sources .....	40
5.1.4	Bilan .....	43
5.2	Partie expérimentale.....	45
5.2.1	Matériaux sans conditions de montage particulières et mesures en laboratoire : résultats préliminaires de l'approche standard.....	45
5.2.2	Matériaux sans conditions de montage particulières et mesures en laboratoire : résultats comparatifs de l'approche standard et de l'approche développée .....	48
5.2.3	Matériaux sans conditions de montage particulières, et mesures en laboratoire et hors laboratoire : résultats de l'approche développée .....	54
5.2.4	Matériaux avec différentes conditions de montage en laboratoire : résultats comparatifs entre l'approche standard et l'approche développée .....	58
5.2.5	Évaluation d'une approche d'inversion source/capteur en laboratoire.....	60
5.3	Évaluation d'une approche d'amélioration basses fréquences du post-traitement des mesures en laboratoire.....	63
5.3.1	Étude de la sensibilité des résultats en fonction d'incertitudes sur les positions des microphones et de la source acoustique, et sur les valeurs de phases lors des mesures .....	63
5.3.2	Comparaisons des estimations de coefficients d'absorption obtenus par le modèle de Nobile-Hayek par bilan de puissance et par hypothèse de réflexion sphérique .....	65
6.	DISCUSSION .....	71
6.1	Avantages et limites en laboratoire .....	71
6.2	Avantages et limites hors laboratoire .....	72
6.3	Évaluation de la faisabilité d'un outil de mesure <i>in situ</i> .....	72
7.	CONCLUSION.....	75
7.1	Principales conclusions.....	75
7.2	Recommandations pour une poursuite de l'étude .....	75
	BIBLIOGRAPHIE .....	77
	ANNEXE A : PHOTOS TIRÉES DES ESSAIS.....	83

A.I	Mesure des propriétés des matériaux .....	83
A.II	Tests en chambre réverbérante .....	85
A.IV	Tests sous excitations champ diffus synthétique.....	88
A.IV.I	Mesures en conditions contrôlées (chambre anéchoïque) .....	88
A.IV.II	Mesures dans un petit local de travail.....	88
A.IV.III	Mesures dans un atelier de fabrication (Faculté de génie mécanique).....	90
ANNEXE B :	RÉSULTATS DES MESURES COMPLÉMENTAIRES.....	93
B.I	Résultats de caractérisation des matériaux en laboratoire .....	93



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Bilan des caractéristiques mesurées en laboratoire pour chacun des cinq matériaux considérés.....	17
Tableau 2 – Caractéristiques utilisées pour la modélisation de la laine de roche (issues d'une base de données existante) .....	18
Tableau 3 – Temps de réverbération (en seconde) par bande d'octave mesuré dans chaque local.....	32



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 – (a) Travailleur dans un local bruyant, (b) Solution de type encoffrement, (c) Solution de type « réduction de la transmission » (d) Port de protecteurs auditifs. ....	4
Figure 2 – Illustration d’une mesure d’absorption sous incidence normale à l’aide d’un tube d’impédance. ....	5
Figure 3 – À gauche, photo d’une petite cabine standard (illustration tirée de <a href="http://www.isolcomit.it/fr/insonorisation/produits-acoustique/chambres-de-reverberation">http://www.isolcomit.it/fr/insonorisation/produits-acoustique/chambres-de-reverberation</a> ) – à droite, résultat comparatif entre les résultats obtenus dans une grande chambre réverbérante (environ 200 m <sup>3</sup> ) et ceux d’une petite chambre réverbérante (moins de 10 m <sup>3</sup> ), extrait de Veen, Pan, et Saha (2005), reproduit avec l’autorisation de l’éditeur. ....	8
Figure 4 – Résultats obtenus pour une mesure sur une mousse PU pour les cas de configuration « une source - un microphone » et une technique de soustraction (trait rouge fin), « une source - un microphone » et une technique de fenêtrage (trait noir fin), « une source - deux microphones » et une technique de fenêtrage (trait bleu fin). La mesure de référence en tube de Kundt est indiquée par un large trait gris (De Geetere <i>et al.</i> , 2000. Communication présentée à <i>Internoise2000</i> , Nice, France. Congrès organisé par la Société Française d’Acoustique.) ....	10
Figure 5 – Échantillons destinés aux mesures en tube d’impédance : (a) Vue supérieure des échantillons; (b) Vue latérale des échantillons – (1) mousse de mélamine, (2) laine de verre, (3) panneau de fibre de verre compressée, (4) mousse PU, (5) tuile de plafond. ....	16
Figure 6 – (a) Principe pour la mesure du coefficient d’absorption sous incidence variable - (b) Principe pour la mesure du coefficient de réflexion sous une antenne synthétique de $i$ monopôles. ....	19
Figure 7 – Validation de la procédure d’inversion à partir d’une admittance théorique. ....	23
Figure 8 – Détermination du coefficient d’absorption sous monopôle à partir de la pression acoustique en surface, de l’intensité acoustique active en surface et de la puissance acoustique. ....	24
Figure 9 – Exemple de géométrie de l’antenne des sources utilisées dans les simulations numériques (49 positions des sources étaient à considérer, et seules les positions $s_0$ à $s_9$ ont fait l’objet d’un calcul, les autres ayant été déduites par symétrie). ....	27
Figure 10 – Comparaison de la mise en œuvre en laboratoire de l’approche standardisée (a) et de l’approche développée (b), dans le cas de la mesure sur tuiles de plafond (adaptée de Robin, Amédin, Berry, Atalla, Doutres et Sgard, 2016b). ...	28
Figure 11 – Montage de type A des échantillons en chambre réverbérante. ....	28
Figure 12 – Illustration du positionnement du triplet de microphones pour les deux mesures successives. ....	30

Figure 13 – Deux vues d'ensemble du premier local de travail (local 1) - la position du microphone de contrôle est indiquée par un cercle orange, et celle de la source de bruit additionnelle par un cercle rouge. ....	31
Figure 14 – Dessin Solidworks du local 2 (à gauche) – mesures mises en place dans le local (à droite, la position du microphone de contrôle est indiquée par un cercle orange). ....	31
Figure 15 – Mesures des niveaux de bruit par le microphone de contrôle dans le petit local de travail (en haut) et dans l'atelier (en bas) - une comparaison avec le niveau de bruit de fond dans la chambre semi-anéchoïque est fournie dans chaque cas. ....	33
Figure 16 – Montage de type E des échantillons en chambre réverbérante. ....	34
Figure 17 – Montage de la tuile de plafond pour la mesure d'un montage de type E-200 en chambre réverbérante (à droite), et pour la méthode proposée (à droite). ....	35
Figure 18 – Montage de la laine de verre pour la mesure en chambre réverbérante dans des conditions de montage standards (au sol et périmètre clos par un cadre de bois, en haut, à gauche), et avec ajout d'un film protecteur en mylar (en haut, à droite) – Mesures utilisant la méthode proposée avec et sans film protecteur en mylar (en bas, à gauche et à droite, respectivement). ....	36
Figure 19 – Bilan des résultats de simulation obtenus pour l'ensemble des matériaux considérés dans l'étude (à l'exception de la tuile de plafond). ....	37
Figure 20 – Illustration du rapport de la taille fixe du réseau des sources par rapport à la taille variable de l'échantillon en gris (de gauche à droite, $L_{réseau}/4$ , $L_{réseau}/2$ , $L_{réseau}$ , et $L_{réseau} \times 2$ ). ....	38
Figure 21 – Cas d'une mousse de mélamine d'épaisseur 1 pouce (en haut), 2 pouces (au centre) et 3 pouces (en bas) : résultats comparatifs entre un calcul théorique pour un matériau infini, et des dimensions variables d'échantillons pour l'approche développée (calcul de type éléments finis) – Adaptée de Robin <i>et al.</i> , (2016a).....	39
Figure 22 – Illustration de la réduction de la taille du réseau avec une taille d'échantillon fixe dans une phase de post-traitement des données - Adaptée de Robin <i>et al.</i> , (2015). ....	40
Figure 23 – Coefficients d'absorption pour une mousse de mélamine de 75 mm d'épaisseur (à gauche) et de 50 mm d'épaisseur (à droite) pour différentes tailles de réseau de sources. Le coefficient d'absorption pour la référence TMM est systématiquement indiqué (trait rouge continu) – Adaptée de Robin <i>et al.</i> , (2015). ....	41
Figure 24 – Effets de la hauteur du réseau de sources sur le coefficient d'absorption obtenu (en haut) – Comparaison des deux hauteurs minimale et maximale avec des calculs de référence TMM pour les angles d'incidence maximale correspondants (en bas) – Adaptée de Robin <i>et al.</i> , (2016b). ....	42
Figure 25 – Effets de la hauteur du réseau sur le coefficient d'absorption obtenu (en haut) – Comparaison pour les deux hauteurs minimale et maximale avec les résultats	



de référence TMM, pour les angles d'incidence maximale correspondants (en bas) – Adaptée de Robin <i>et al.</i> , (2016b).....	44
Figure 26 – (en haut) Photos de tests préliminaires sur l'évaluation de l'effet de bord (pour une surface d'échantillon fixe de 72 pieds carrés, mais avec répartition variable); (a) disposition suggérée par la norme ASTM-C423, 8 par 9 pieds carrés; (b) test de 3 bandes de 12 par 2 pieds carrés; (c) test de 3 bandes de 6 par 4 pieds carrés; (d) test de 9 panneaux de 4 par 2 pieds carrés – (en bas) Résultats des tests préliminaires sur l'estimation de l'effet de bord. ....	46
Figure 27 – (en haut) Photos de tests préliminaires concernant l'estimation de l'effet de taille du matériau RPL; (a) surface de 8 pieds carrés; (b) surface de 16 pieds carrés; (c) surface de 24 pieds carrés; (d) surface de 30 pieds carrés; (e) surface de 64 pieds carrés; (f) surface de 96 pieds carrés – (en bas) résultats des tests. ....	47
Figure 28 – Illustration des résultats des mesures sur la laine de verre pour trois positions fixes des sources (en haut) et des résultats de la procédure suivant l'approche proposée utilisant les 49 positions des sources (en bas). ....	49
Figure 29 – Bilan des résultats des mesures en chambre réverbérante selon la norme pour l'ensemble des matériaux considérés. ....	50
Figure 30 – Bilan des résultats des mesures en chambre semi-anéchoïque selon l'approche développée pour l'ensemble des matériaux considérés. ....	50
Figure 31 – Cas du matériau RPL : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et le calcul de référence. ....	52
Figure 32 – Cas du matériau mousse PU : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et le calcul de référence. ....	52
Figure 33 – Cas de la laine de verre : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et le calcul de référence. ....	53
Figure 34 – Cas de la laine de roche : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et le calcul TMM. ....	53
Figure 35 – Cas de la tuile de plafond : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante et la méthode proposée (pas de calcul de référence pour ce matériau).....	54
Figure 36 – Cas de la mousse de mélamine : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-anéchoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier) – Les résultats du calcul de référence pour un matériau infini sont indiqués. ....	55
Figure 37 – Cas de la mousse PU : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-anéchoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier) – Les résultats du calcul de référence pour un matériau infini sont indiqués.....	56
Figure 38 – Cas de la tuile de plafond : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-anéchoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier).....	56
Figure 39 – Cas du matériau RPL : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-anéchoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier) – Les résultats du calcul de référence pour un matériau infini sont indiqués.....	57

Figure 40 – Cas de la laine de verre : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-anéchoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier) – Les résultats du calcul de référence pour un matériau infini sont indiqués.....	57
Figure 41 – Cas de la laine de roche : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-anéchoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier) – Les résultats du calcul de référence pour un matériau infini sont indiqués.....	58
Figure 42 – Cas de la laine de verre avec film de protection en mylar : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et le calcul TMM.....	59
Figure 43 – Cas de la tuile de plafond avec et sans plénum : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante et la méthode proposée. ....	60
Figure 44 – (à gauche) Doublet de microphones placé au centre du matériau et source en translation – (à droite) source placée au centre du matériau et doublet en translation. ....	61
Figure 45 – (en haut) Coefficient d'absorption du matériau RPL selon l'approche développée avec source fixe et microphones mobiles (en rouge) et source mobile et microphones fixes (en bleu) - (en bas) Coefficient d'absorption de la tuile de plafond selon l'approche développée avec source fixe et microphones mobiles (en rouge) et source mobile et microphones fixes (en bleu).....	62
Figure 46 – Vue rapprochée de la surface de la tuile de plafond (à gauche) et du panneau de fibre de verre compressée (RPL) (à droite). ....	63
Figure 47 – Influence des incertitudes de positions de la source (zs) et/ou du doublet microphonique (zm) sur l'estimation du coefficient d'absorption.....	64
Figure 48 – Influence des incertitudes de valeurs de phase sur l'extraction de l'admittance (a) et sur l'estimation du coefficient d'absorption (b). ....	65
Figure 49 – Cas de la mélamine : Comparaison entre l'estimation par bilan de puissance à partir du modèle de Nobile-Hayek (courbes en rouge) et l'estimation par réflexion sphérique (courbes en bleu). ....	67
Figure 50 – Cas de la mousse PU : Comparaison entre l'estimation par bilan de puissance à partir du modèle de Nobile-Hayek (courbes en rouge) et l'estimation par réflexion sphérique (courbes en bleu). ....	68
Figure 51 – Cas du matériau RPL : Comparaison entre l'estimation par bilan de puissance à partir du modèle de Nobile-Hayek et l'estimation par réflexion sphérique. ....	69
Figure 52 – Système de mesure de la résistivité au passage de l'air statique. ....	83
Figure 53 – Mise en place d'un échantillon de laine de verre dans le porte-échantillon pour la mesure de la résistivité au passage de l'air statique.....	83
Figure 54 – Tube d'impédance à trois microphones, de diamètre 44,5 mm.....	84
Figure 55 – Exemple de test à l'analyseur mécanique quasi-statique pour la mesure du module d'Young, du coefficient de Poisson et du facteur d'amortissement. ....	84
Figure 56 – Tube d'impédance à trois microphones, de diamètre 100 mm.....	85

Figure 57 – Test de la mousse de mélamine en chambre réverbérante. ....	85
Figure 58 – Test de la laine de verre en chambre réverbérante. ....	86
Figure 59 – Test de la tuile de plafond en chambre réverbérante.....	86
Figure 60 – Test de la mousse PU en chambre réverbérante. ....	87
Figure 61 – Test des panneaux de fibre de verre compressée (RPL) en chambre réverbérante. ....	87
Figure 62 – Mesures pour le cas de la laine de roche dans le local du « LCMA ». ....	88
Figure 63 – Mesures pour le cas de la laine de verre dans le local du « LCMA ». ....	88
Figure 64 – Mesures pour le cas de la tuile de plafond dans le local du ‘LCMA’.....	89
Figure 65 – Mesures pour le cas du panneau de fibre de verre comprimée dans le local du « LCMA ». ....	89
Figure 66 – Mesures pour le cas de la mousse de mélamine dans le local « atelier ». ....	90
Figure 67 – Mesures pour le cas de la mousse PU dans le local « atelier ». ....	90
Figure 68 – Mesures pour le cas de la tuile de plafond dans le local « atelier ». ....	91
Figure 69 – Mesures pour le cas de la laine de verre dans le local « atelier ». ....	91
Figure 70 – Mesures pour le cas du panneau de fibre de verre compressée dans le local « atelier ». ....	92
Figure 71 – Mesures pour le cas de la laine de roche dans le local « atelier ». ....	92
Figure 72 – Résultats complets de caractérisation de la mousse de mélamine. ....	93
Figure 73 – Résultats complets de caractérisation de la mousse PU. ....	94
Figure 74 – Résultats complets de caractérisation du panneau de fibre de verre compressée (RPL). ....	95
Figure 75 – Résultats complets de caractérisation de la laine de verre. ....	96
Figure 76 – Résultats complets de caractérisation de la tuile de plafond.....	97



## LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

$\alpha$ :	Coefficient d'absorption acoustique (sans dimension)
ASTM :	American Society for Testing Material International
CAD :	Champ acoustique diffus
LCMA :	Laboratoire de caractérisation des matériaux acoustiques
CNESST :	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
GAUS :	Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke
ISO :	International Standard Organization
MLS :	Séquence de longueur maximale ( <i>Maximum-Length Sequence</i> )
PU :	Polyuréthane
RPL :	Panneau de fibre de verre compressée ( <i>Rigid Plenum Liner</i> )



## 1. INTRODUCTION

La mise en place de traitements acoustiquement absorbants est un moyen très répandu pour diminuer les niveaux de bruit auxquels sont exposés les travailleurs. Ces traitements sont conçus et sélectionnés à partir de la valeur de leur coefficient d'absorption, généralement fourni par le manufacturier ou mesurable par des méthodes normalisées en tube d'impédance ou en chambre réverbérante. En règle générale, la donnée pertinente est le coefficient d'absorption sous champ acoustique diffus qui qualifie la performance d'absorption acoustique d'un matériau excité acoustiquement par des ondes acoustiques planes provenant de toutes les directions de l'espace. Toutefois, plusieurs difficultés existent au regard de cette mesure du coefficient d'absorption :

- La mesure en tube d'impédance fournit un coefficient d'absorption en incidence normale, non représentatif d'une situation de champ diffus;
- La mesure en chambre réverbérante exige des moyens d'essai lourds et surestime le coefficient d'absorption réel des matériaux (allant jusqu'à fournir des valeurs supérieures à 1, donc non physiques);
- L'absorption des traitements en condition réelle, dans un site, peut différer notablement des données obtenues en laboratoire, en raison d'effets d'installation (présence de films ou de plaques protectrices, de structures de support, compression des matériaux installés).

Compte tenu de ces limitations, et afin d'améliorer les traitements acoustiques, de fournir des données d'absorption plus fiables, d'alimenter les modèles prédictifs avec un coefficient d'absorption plus réaliste et de fournir des solutions optimales pour le contrôle et la prévention du bruit en milieu de travail, il est nécessaire de :

- développer des méthodes de caractérisation améliorées en laboratoire;
- élaborer des méthodes de caractérisation hors laboratoire afin de pouvoir mesurer les performances réelles des traitements acoustiques et de mieux comprendre leurs effets d'installation.

Cette étude a pour objectif d'étudier le potentiel d'une nouvelle approche de mesure de l'absorption basée sur le principe d'une antenne virtuelle de sources acoustiques et d'un doublet microphonique, tous positionnés à proximité du matériau. Le présent rapport documente l'état des connaissances sur le sujet, explique le principe de l'approche proposée, présente les résultats obtenus en laboratoire et hors laboratoire, et les compare aux méthodes normalisées et aux calculs de référence obtenus par une approche courante (méthode de matrices de transfert).





## 2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

### 2.1 Effets et méthodes de contrôle du bruit en santé et en sécurité du travail

Environ 500 000 travailleurs québécois sont exposés quotidiennement à des niveaux nocifs de bruit en milieu de travail (Arcand, 2006). Au regard du nombre de cas indemnisés par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST), la surdité constitue la seconde maladie professionnelle en importance au Québec et représente 4500 indemnités sur la période 2010-2012 (Duguay *et al.*, 2017). Dans le secteur de la fabrication d'équipements de transport et de machines, 162 cas de maladies professionnelles ont été répertoriés en 2010 et, de ce nombre, 79 cas ont été causés par le bruit soit environ la moitié (49 %) (Millette, 2014). La surdité liée au bruit, en plus d'être placée au premier rang concernant le coût total ainsi que le coût par lésion, est la seule dont le nombre de lésions professionnelles acceptées a augmenté entre 2007 et 2012 (Duguay *et al.*, 2014). Sur la période 2010-2012, l'oreille est le siège de maladie professionnelle le plus important, avec 78,3 % des cas (Duguay *et al.*, 2017). Les séquelles de la surdité étant permanentes, il est primordial de mettre en place et d'intensifier les mécanismes de prévention nécessaires pour éviter de contracter cette maladie dont le taux d'incidence est passé de 25,6 à 65,3 pour 100 000 travailleurs de 1997 à 2010. L'objectif fixé<sup>1</sup> par la Direction générale de la santé publique du ministère de la Santé et des Services sociaux dans son [Programme national de santé publique 2003-2012](#) n'a donc pas été atteint (Michel *et al.*, 2014).

Des niveaux de bruit importants sur les lieux de travail ont également un impact direct sur la sécurité des travailleurs. Ils ont pour effet de perturber la perception des avertisseurs sonores, de gêner la communication avec l'entourage et de réduire la concentration, ce qui conduit finalement à une augmentation du risque d'accident en milieu de travail (Arcand, 2006; Girard *et al.*, 2010; Toppila, Pyykkö et Pääkkönen, 2007). Jusqu'à 12 % des accidents du travail étudiés par Girard et ses collaborateurs (2010) peuvent être attribués à l'effet du bruit ambiant ou à une perte auditive. Pour le régime d'indemnisation, le coût de ces accidents est 3,8 fois plus élevé que celui de la seule surdité dans le même échantillon. D'ailleurs, une étude québécoise basée sur l'analyse de 788 rapports d'enquête a montré que le bruit a été retenu comme une des causes d'un accident mortel dans 2,3 % des cas (Martin *et al.*, 2007). Le risque d'accident est également accru pour les travailleurs ayant un handicap auditif (Toppila, Pyykkö et Pääkkönen, 2007).

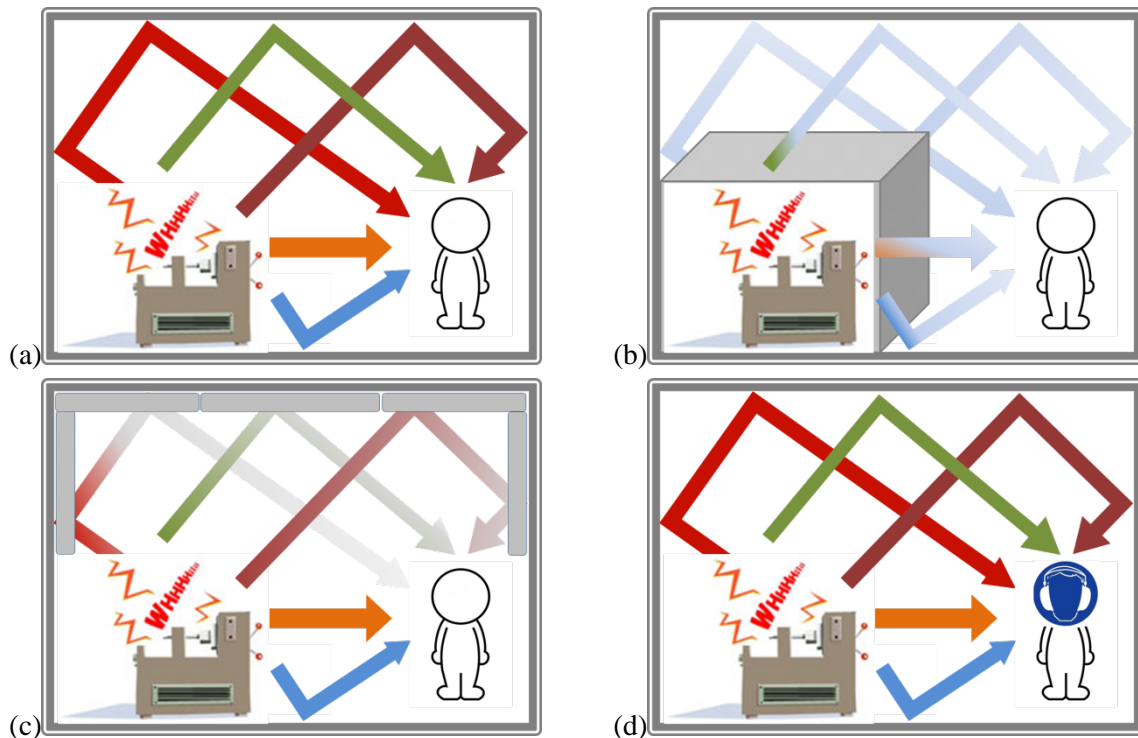
Le bruit au travail est également un facteur de risque généralisé et globalement sous-estimé, qui peut causer un certain nombre de problèmes de santé à court et à long termes selon l'Organisation mondiale de la Santé (Concha-Barrientos, Campbell-Lendrum et Steenland, 2004). En dehors des cas spécifiques de maladies professionnelles, 12,4 % des hommes et des femmes de l'ensemble des travailleurs interrogés lors de l'Enquête québécoise sur des conditions de travail, d'emploi et de santé et de sécurité du travail ([EQCOTESST](#)) (Vézina *et al.*, 2011) ont une perception négative de leur état de santé général lorsqu'ils sont exposés souvent ou tout le temps à du bruit en milieu de travail. Pour illustrer le fait que les conséquences de l'exposition au bruit dépassent amplement le seul contexte du milieu de travail, une étude

---

<sup>1</sup> « Diminuer l'incidence de la surdité professionnelle et les conséquences de cette maladie par la réduction de l'exposition des travailleurs au bruit en milieu de travail ».

exploratoire de l'Institut national de santé publique au Québec a établi que le bruit en milieu de travail et la condition auditive avaient des conséquences sur la sécurité routière (Girard *et al.*, 2005). Lorsqu'un milieu de travail est jugé trop bruyant (Figure 1(a)), les actions en matière de réduction du bruit doivent être les plus performantes possible. Trois pistes peuvent être suivies :

1. La réduction ou l'élimination du bruit directement à la source (machine, moteur ou outil) est la première des interventions à envisager. L'encoffrement qui isole la machine ou le moteur bruyant est également un moyen d'action utilisé (Figure 1(b));
2. La diminution de la transmission du bruit entre la source et le travailleur par un traitement acoustique des locaux de travail en installant des matériaux absorbants sur les parois, ou une isolation d'un poste de travail (Figure 1(c)).
3. Une limitation du temps d'exposition des travailleurs ou l'utilisation de protecteurs auditifs (Figure 1(d)) doit être envisagée lorsque les étapes précédentes donnent des résultats insuffisants. La solution de protection auditive devrait être utilisée en dernier recours, et elle ne peut se substituer aux deux actions précédentes qui ont le plus d'impact sur la réduction définitive du bruit en milieu de travail.



**Figure 1 – (a) Travailleur dans un local bruyant, (b) Solution de type encoffrement, (c) Solution de type « réduction de la transmission » (d) Port de protecteurs auditifs.**

## 2.2 Mesures d'absorption standardisées pour les matériaux acoustiques : tube d'impédance et chambre réverbérante

Les traitements acoustiques, ou matériaux absorbants, sont utilisés dans de nombreuses applications : locaux et bâtiments, cabines insonorisées, capotages de machines, encoffrements, écrans acoustiques, conduits. Leur performance est caractérisée par le coefficient d'absorption (noté  $\alpha$ ), qui représente le rapport de l'énergie sonore absorbée par le matériau à l'énergie sonore incidente sur sa surface. Sa valeur varie théoriquement entre 0 (matériau complètement réfléchissant) et 1 (matériau complètement absorbant).

À l'heure actuelle, il existe des outils de prédiction théorique de l'absorption acoustique de matériaux qui nécessitent de connaître l'ensemble des paramètres d'entrée physiques, intrinsèques aux matériaux, qui contrôlent les phénomènes d'absorption sonore (porosité, tortuosité, résistance à l'écoulement, longueurs caractéristiques visqueuse et thermique). La mesure de ces paramètres physiques étant relativement longue et complexe, on a généralement recours à la mesure directe du coefficient d'absorption acoustique, réalisée selon deux méthodes standardisées. La première est décrite par les normes ISO 10534-2 (International Standard Organization [ISO], 1998) et ASTM E1050-12 (American Society for Testing Material International [ASTM], 2012), et repose sur l'utilisation d'un tube d'impédance (ou tube de Kundt) afin d'estimer le coefficient d'absorption d'un matériau en incidence normale uniquement. L'échantillon à tester doit être placé à l'extrémité d'un tube de diamètre donné sur un fond rigide (Figure 2). À l'autre extrémité, un haut-parleur permet de générer des ondes acoustiques. En dessous d'une certaine fréquence, dite fréquence de coupure, les ondes acoustiques qui se propagent dans le tube sont planes et excitent le matériau en incidence normale (la fréquence de coupure du tube est fonction du diamètre donc plus le diamètre est grand, plus cette fréquence est basse). Deux microphones sont placés dans le tube et leur espacement est précisément connu. La mesure de la fonction de transfert entre ces deux microphones permet de remonter au coefficient de réflexion du matériau, et ensuite, à son coefficient d'absorption.

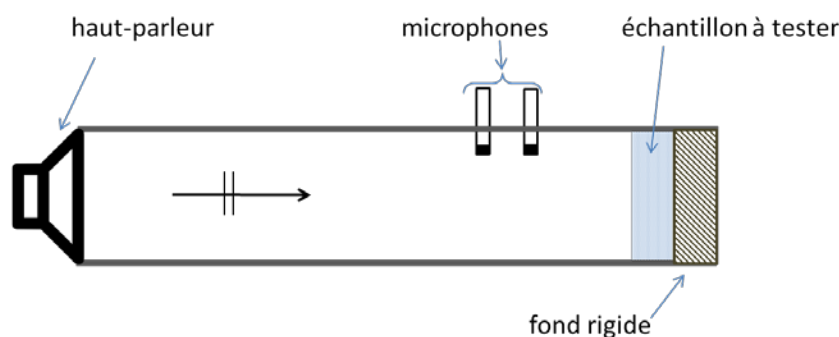


Figure 2 – Illustration d'une mesure d'absorption sous incidence normale à l'aide d'un tube d'impédance.

La deuxième méthode normalisée, dite « de la chambre réverbérante » et décrite dans les normes ASTM-C423 (ASTM International<sup>2</sup>, 2009) et ISO 354 (ISO, 2003) est couramment utilisée pour mesurer le coefficient d'absorption acoustique sous une excitation de type « champ acoustique diffus ». Cette méthode est considérée comme étant plus représentative de l'utilisation pratique des matériaux absorbants. La mesure nécessite un local réverbérant d'un volume minimal de 150 m<sup>3</sup> (selon la norme ASTM-C423), une source acoustique et un ensemble de microphones qui servent à mesurer le temps de réverbération moyen dans le local en absence et en présence du matériau absorbant ( $T_0$  et  $T_{\text{échantillon}}$ , respectivement). Une fois que ces deux temps de réverbération sont établis (en secondes et par bande de tiers d'octave), le coefficient d'absorption peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$\alpha = \frac{55,3 V}{c_0 S} \left[ \frac{1}{T_{\text{échantillon}}} - \frac{1}{T_0} \right] \quad (1)$$

où  $V$  est le volume du local (en m<sup>3</sup>),  $c_0$  est la célérité des ondes acoustiques dans l'air (en m/s) et  $S$  est la surface de l'échantillon (en m<sup>2</sup>).

### 2.3 Problématiques des mesures standardisées

La méthode du tube d'impédance permet une mesure précise du coefficient d'absorption, mais uniquement dans le cas d'une onde plane en incidence normale. Il est bien connu par ailleurs que l'absorption d'un matériau dépend significativement de la direction d'arrivée de l'onde incidente. La gamme fréquentielle de validité de la mesure est déterminée en fonction du diamètre du tube (deux tubes de diamètres différents sont généralement utilisés pour couvrir une gamme fréquentielle allant de 0 à 5000 Hz). La limitation technique la plus importante réside dans la nécessité de découper un échantillon, généralement de forme circulaire, dans le matériau pour lequel on désire mesurer le coefficient d'absorption. Cette action de découpe peut s'avérer complexe selon le matériau considéré (la découpe au jet d'eau reste idéale). De plus, seulement un petit échantillon d'un matériau est testé, ce qui peut être fortement non représentatif des performances acoustiques globales du matériau surtout s'il présente des hétérogénéités. Enfin, la mise en place de l'échantillon dans le tube peut aussi faire émerger des problématiques si les bords d'un échantillon trop grand sont comprimés (modification du matériau) ou si l'échantillon est trop petit (présence de fuites acoustiques qui peuvent être limitées par un joint de vaseline s appliqué sur la périphérie de l'échantillon).

En ce qui a trait à la méthode de mesure en chambre réverbérante, ses limites sont nombreuses malgré son utilisation courante du fait qu'elle est normalisée (Nash, 2005; Vercammen, 2010). En effet, il est avéré que le test d'échantillons de surface importante tel que recommandé par les normes (surface supérieure à 6,7 m<sup>2</sup> pour la norme C423 (ASTM International, 2009) et supérieure à 12 m<sup>2</sup> pour la norme ISO 354 (ISO, 2003)) peut faire obstacle à l'obtention d'un décrémentation logarithmique dans le local réverbérant ce qui pourrait avoir comme conséquence une sous-estimation du coefficient d'absorption. En fait, cette mesure est fondée sur l'hypothèse d'un champ acoustique diffus dans la chambre de test, hypothèse valide lorsque la chambre est vide, mais souvent invalide dès lors que l'on place un

<sup>2</sup> Autrefois connu sous le nom de American Society for Testing Material.

échantillon dans la chambre (hypothèse d'autant plus erronée que la surface de l'échantillon est grande par rapport au volume de la salle ou que son absorption acoustique est élevée).

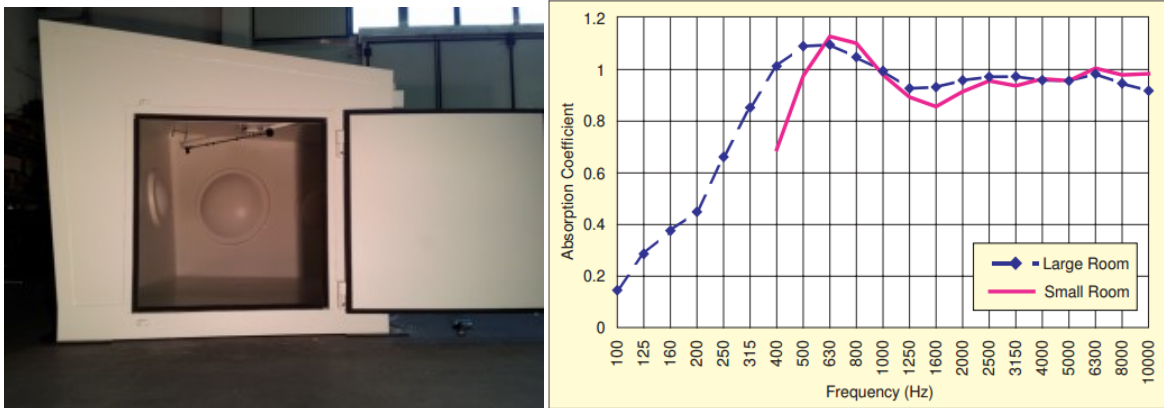
Avec la chambre réverbérante, l'utilisation de petits échantillons pourrait alors être envisagée, mais elle conduit à l'obtention de coefficients d'absorption plus élevés que ceux prédits par la théorie. Les effets du montage de l'échantillon sont également importants (traitements des bords, assemblage des éléments, mise en place des échantillons dans le local). L'ensemble de ces effets est généralement regroupé sous les dénominations d'effets de taille et de bord. Cette sensibilité à ces deux derniers paramètres limite donc l'applicabilité de la chambre réverbérante à des dimensions et des mises en œuvre très spécifiques de matériaux.

Enfin, une des problématiques les plus cruciales réside dans le fait que les résultats issus de ces tests effectués par différents laboratoires montrent de très grandes variabilités (Vercammen, 2010). Par ailleurs, les valeurs de coefficient d'absorption supérieures à 1 doivent être corrigées pour qu'elles puissent être utilisées dans les codes de calculs (qui ne peuvent pas prendre en compte ces valeurs non physiques). Il est ainsi inapproprié de s'appuyer directement sur de tels résultats pour réaliser des calculs prévisionnels précis.

## **2.4 Mesures d'absorption en laboratoire suivant des méthodes alternatives**

Des méthodes autres que celle de la méthode de la chambre réverbérante existent, la plus connue étant celle de la cabine dite « alpha », qui est couramment utilisée dans le domaine des transports et spécialement celui de l'automobile. Elle repose toujours sur une stratégie de mesure en deux temps et nécessite une cabine dans lequel le champ acoustique peut être considéré comme diffus. Le volume de la cabine doit être réduit (maximum  $10 \text{ m}^3$ ), de même que la taille de l'échantillon et la gamme fréquentielle des tests (l'échantillon fait environ  $1 \text{ m}^2$ , et la gamme fréquentielle utile débute à compter du tiers d'octave 400 Hz, quand une mesure en chambre réverbérante débute au tiers d'octave 100 Hz). Une illustration d'un tel moyen d'essai et d'un résultat comparatif entre petite cabine et chambre réverbérante standard est fournie à la Figure 3.

Hormis la méthode de la petite chambre réverbérante, peu de travaux ont envisagé la possibilité de mesurer le coefficient d'absorption d'un matériau absorbant sous une excitation de type « champ acoustique diffus » en réduisant les contraintes liées à la méthode de la chambre réverbérante (standard ou de dimensions réduites). Une méthode utilisant deux microphones et le bruit ambiant dans un local comme seule source d'excitation a été proposée (Takahashi, Otsuru, et Tomiku, 2005). Les résultats obtenus étaient précis comparativement à des résultats expérimentaux obtenus sous incidence approximativement aléatoire et au-dessus d'une fréquence de 400 Hz pour des petites surfaces de laine de verre et de laine de roche. D'autres auteurs (Otsuru, Tomiku, Din, Okamoto, et Murakami, 2009) ont étudié numériquement des améliorations possibles de la méthode précédente, avec une moyenne d'ensemble des contributions de sources ponctuelles réparties sur un hémisphère centré sur un matériau, cette moyenne d'ensemble montrant une réduction des effets de bord. Ce concept a été récemment appliqué à la mesure de l'impédance normale de surface avec une sonde pression-vitesse, et testé dans des locaux de différents volumes (entre  $56$  et  $500 \text{ m}^3$ ) dans lesquels étaient positionnés des haut-parleurs fixes et mobiles (Din, Otsuru, Tomiku, Okamoto, et Asniawaty, 2013). Les résultats obtenus montrent une bonne reproductibilité ainsi qu'un faible effet de la taille des échantillons testés.



**Figure 3 – À gauche, photo d'une petite cabine standard (illustration tirée de <http://www.isolcomitinsonorizzazioni.com/camere-riverberanti-alpha-cabin/>) – à droite, résultat comparatif entre les résultats obtenus dans une grande chambre réverbérante (environ 200 m<sup>3</sup>) et ceux d'une petite chambre réverbérante (moins de 10 m<sup>3</sup>), extrait de Veen, Pan, et Saha (2005), reproduit avec l'autorisation de l'éditeur.**

Hormis les travaux précédemment cités, les approches alternatives développées en laboratoire portaient majoritairement sur l'estimation du coefficient d'absorption uniquement sous une excitation de type onde plane en incidence normale ou en incidence oblique en utilisant des mesures dans des conditions contrôlées (soit généralement en chambre anéchoïque afin d'obtenir des conditions dites de champ libre). Les méthodes utilisées peuvent être classifiées selon qu'elles utilisent une approche dans le domaine fréquentiel ou dans le domaine temporel.

Les méthodes fréquentielles peuvent reposer sur l'utilisation :

- d'une source et de deux microphones, méthode dite du doublet (Allard et Champoux, 1989);
- d'une source et de deux capteurs de vitesse particulière (Hirosawa *et al.*, 2009);
- d'une source et d'un réseau de microphones placé à deux hauteurs différentes au-dessus du matériau (Tamura, Allard et Lafarge, 1995);
- d'une source et d'un capteur pression-vitesse particulière (Lanoye, Vermeir, Lauriks, Kruse et Mellert, 2006; Hirosewa *et al.*, 2009).

Quant aux méthodes temporelles, elles utilisent généralement une source et un seul microphone (Li et Hodgson, 1997), et reposent très majoritairement sur l'utilisation d'un signal pseudo-aléatoire de type MLS (Maximum-Length Sequence).

La grande majorité des approches citées repose donc sur l'utilisation d'une seule source sonore (par ex. un haut-parleur). Récemment, les méthodes de synthèse de champ sonore utilisant des réseaux de haut-parleurs ont été appliquées à l'estimation en laboratoire du coefficient d'absorption. Deux cas de figure peuvent être rencontrés :

1. L'estimation vise à obtenir un coefficient d'absorption sous une onde plane en incidence normale, alors synthétisée par un réseau de huit haut-parleurs (Zhang, Kuang, Wu, et Yang, 2015; Zhang, Tan, Kuang, Wu, et Yang, 2016).

2. L'estimation vise à obtenir un coefficient d'absorption sous un champ diffus, alors synthétisé par un réseau virtuel de haut-parleurs (Robin, Doutres, Berry et Atalla, 2014). En effet, le nombre de sources à piloter simultanément devenant prohibitif sur le plan des contraintes matérielles et de l'encombrement, un réseau de N sources existant simultanément est remplacé par une source déplacée N fois. Sous des hypothèses de linéarité et de stationnarité, le réseau existe virtuellement dans une phase de post-traitement des données. C'est cette approche qui a été développée dans le cadre de cette étude, et investiguée en dehors des conditions de laboratoire.

## 2.5 Mesures d'absorption *in situ* (hors laboratoire)

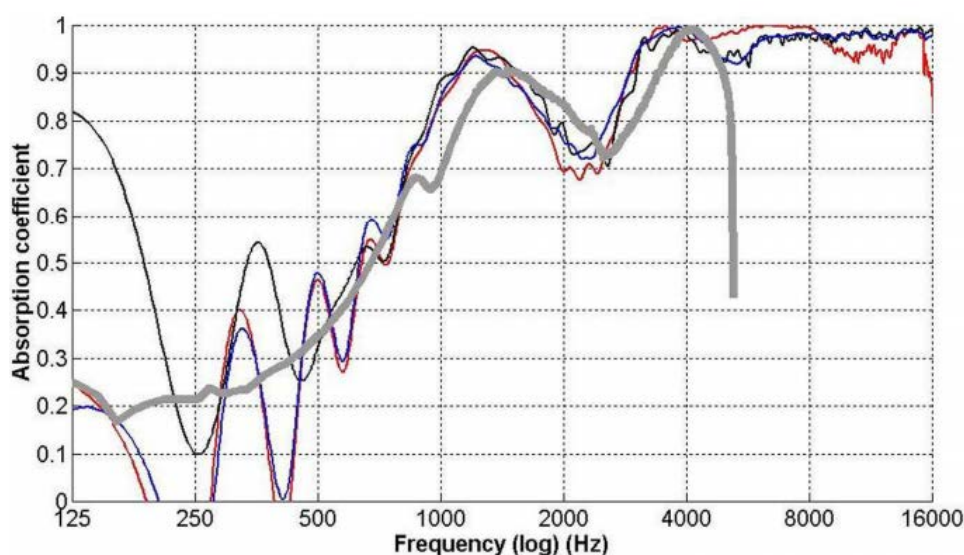
Comparativement aux mesures standardisées en laboratoire, de très nombreux travaux avaient pour objet la mesure du coefficient d'absorption dans des conditions plus réalistes de mise en œuvre des matériaux, et éventuellement sur le terrain. Une revue de la littérature très précise sur toutes les méthodes de mesure du coefficient d'absorption ou de l'impédance *in situ* a été réalisée par Brandao, Lenzi et Pau (2015). La majorité des études recensées dans cette publication ont vérifié l'applicabilité des méthodes décrites dans le paragraphe précédent (à l'exception de la petite cabine réverbérante) à des cas peu représentatifs de conditions de terrain réalistes. Les validations se sont généralement limitées à une estimation dans le cas d'une onde plane en incidence normale alors qu'il est admis que des données sous incidence diffuse sont généralement plus réalistes quant à l'utilisation pratique des matériaux absorbants. Enfin, peu de travaux rapportent des résultats des mesures effectués dans des environnements de travail (avec toutes les contraintes d'encombrement et d'espace que cela suppose). Il est conseillé de se reporter à la publication de Brandao, Lenzi et Pau (2015) pour avoir une vision exhaustive, car les quelques références évoquées ci-dessous n'ont pour but que de fournir quelques exemples pour situer la problématique de manière large.

La mesure *in situ* de l'absorption acoustique d'un matériau consiste en un dispositif composé d'une source sonore (ou d'un réseau de sources) permettant d'insonifier une zone ou un échantillon du matériau à caractériser, d'un capteur (ou d'un réseau de capteurs) et d'un système de traitement des données. Le système de mesure *in situ* doit être idéalement robuste au bruit ambiant, compact, et fournir une estimation de l'absorption dans des conditions de champ acoustique incident similaires à celles de l'application réelle. Il est précisé que la locution adverbiale *in situ* est souvent utilisée erronément dans de nombreux travaux. Alors qu'une mesure *in situ* correspondrait selon sa définition rigoureuse à une mesure « sur site » ou « dans le lieu précis où quelque chose se trouve », le terme est souvent utilisé improprement pour définir des mesures réalisées en dehors des moyens standards (sous-entendu sans préparation de l'échantillon comme pour le cas de la chambre réverbérante ou du tube d'impédance), mais souvent dans des conditions contrôlées en laboratoire.

Au regard des méthodes temporelles, Li et Hodgson (1997) ont par exemple comparé les performances de la méthode à une source et à un microphone dans un environnement anéchoïque et à celles obtenues dans un environnement semi-réverbérant. La similarité des résultats a démontré la robustesse de la méthode. Une analyse en laboratoire a été réalisée par De Geetere, Vermeir et Lauriks (2000) afin de définir des paramètres optimaux pour une procédure de mesure pour le cas d'une onde plane en incidence normale (validée par comparaison avec une mesure en tube d'impédance). Un exemple des résultats obtenus est illustré à la Figure 4 (pour le cas d'une mousse de polyuréthane (PU) d'une épaisseur de

47 mm, de résistivité à l'écoulement de  $40 \text{ kNs/m}^4$  et de masse volumique de  $30 \text{ kg/m}^3$ ). Les trois méthodes suggérées dans cette étude (technique de soustraction à un microphone, technique de fenêtrage à un microphone, technique de fenêtrage à deux microphones) donnent des résultats similaires au-dessus d'une fréquence d'environ 600 Hz. En dessous de cette fréquence, la disparité des résultats obtenus est importante, avec des valeurs de coefficient d'absorption soit très élevées ou très faibles (par rapport à la mesure de référence en tube d'impédance). Un décalage fréquentiel entre les trois mesures prises sur un grand échantillon et celle réalisée en tube illustre bien les effets de montage en tube d'impédance (influence des conditions aux limites) évoqués à la sous-section 2.3.

D'autres auteurs ont utilisé un signal MLS avec une antenne directive de 13 microphones afin de limiter l'influence des conditions réverbérantes souvent rencontrées en dehors du laboratoire (Ducourneau, Planeau, Chatillon et Nejade, 2009). Une comparaison des résultats obtenus en laboratoire et dans un local industriel avec l'antenne de 13 microphones suggérée montre peu de différences entre eux, mais montre une limite dans le domaine des basses fréquences (mesures valides à partir de la bande d'octave 500 Hz uniquement). Dans leur étude, Ducourneau et ses collègues ont recouru à la méthode à deux microphones (qui sera utilisée dans la présente étude) et ont obtenu des résultats équivalents à ceux obtenus avec un réseau de 13 microphones dans des conditions de laboratoire (en utilisant un signal de type MLS pour chaque mesure) (Ducourneau *et al.*, 2009).



**Figure 4 – Résultats obtenus pour une mesure sur une mousse PU pour les cas de configuration « une source - un microphone » et une technique de soustraction (trait rouge fin), « une source - un microphone » et une technique de fenêtrage (trait noir fin), « une source - deux microphones » et une technique de fenêtrage (trait bleu fin). La mesure de référence en tube de Kundt est indiquée par un large trait gris (De Geetere *et al.*, 2000. Communication présentée à *Internoise2000*, Nice, France. Congrès organisé par la Société Française d'Acoustique.)**



## 2.6 Avis et suivi des milieux de travail sur la problématique et l'étude

Une première réunion d'ancrage a eu lieu le mardi 8 juillet 2014 à l'IRSST en présence de Waguih Geadah (Association sectorielle – Fabrication d'équipement de transport et de machines (ASFETM)), Tony Vanditti (ASFETM), Jean-Marie Guérin (LVM Inc.), Phat Nguyen (Vinacoustik Inc.), Franck Sgard (IRSST), François Ouellet (IRSST), Alain Berry (Université de Sherbrooke (UdS)) et Olivier Robin (UdS). MM. Robin et Berry ont pu y présenter la proposition d'activité. Outre le fait que cette présentation a permis de constituer un comité de suivi, les membres du comité ont pu exprimer leur intérêt au regard des besoins prioritaires suivants :

1. Disposer de données plus fiables;
2. Pouvoir mesurer *in situ* le coefficient d'absorption de matériaux déjà installés dans un local, mais dont les paramètres physiques intrinsèques ne sont pas connus, afin d'alimenter des calculs prévisionnels;
3. Être en mesure de caractériser les capacités d'absorption des encoffrements, des cabines de travail, des écrans acoustiques;
4. Accéder à des connaissances étendues sur les effets de montage des matériaux sur leur absorption acoustique.

Le comité de suivi de cette activité de recherche s'est ensuite réuni à deux reprises les 9 avril 2015 et 11 mai 2016. Lucie Huberdeau (CNESST) et Nouredine Larbi (Acovib Group Inc.) ont alors été intégrés au comité de suivi. Les membres du comité ont participé au choix des matériaux qui ont fait l'objet de tests, par le biais d'un questionnaire qu'ils ont rempli. L'ensemble de leurs réponses ont été compilées pour finaliser le choix des matériaux, en concertation avec l'équipe de recherche.

Une dernière rencontre a eu lieu le 31 mars 2017, avant le dépôt du rapport, afin d'y présenter les derniers résultats, particulièrement ceux provenant des expérimentations effectuées hors laboratoire, ainsi que les principales conclusions et recommandations.



### 3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

Sur la base d'une première preuve de concept obtenue par une équipe du Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS) (Robin *et al.*, 2014), l'objectif général de cette étude est de développer une méthode innovante de mesure de l'efficacité d'absorption acoustique des matériaux absorbants en laboratoire et sur le terrain, pour résoudre une problématique de SST. Les matériaux sont d'abord caractérisés de manière optimale en laboratoire avant d'être testés *in situ* avec le même système de mesure qui est déplacé à cet effet sur le terrain.

L'étude a été scindée en deux parties :

- une étape de recherche et développement du concept en laboratoire, dans des conditions acoustiques contrôlées (en chambre anéchoïque);
- une étude d'applicabilité du concept dans des locaux hors laboratoire.

Les mesures réalisées selon les normes actuelles sont comparées à celles prises selon la méthode proposée, en utilisant des simulations numériques comme solutions de référence, afin de valider la méthode et d'évaluer les progrès qu'elle apporte. Pour y parvenir, plusieurs sous-objectifs ont été définis :

- a. Déterminer numériquement une configuration optimale d'antenne de sources et de capteurs pour la méthode proposée;
- b. Évaluer les propriétés d'absorption de matériaux avec la configuration déterminée, et selon les normes actuelles;
- c. Modéliser les matériaux afin de disposer de résultats numériques de comparaison;
- d. Mesurer les propriétés d'absorption de certains matériaux avec différentes conditions de montage (avec la nouvelle méthode en laboratoire et selon les normes actuelles);
- e. Mesurer les propriétés d'absorption des matériaux dans des locaux hors laboratoire, soit un local de petites dimensions et de faible niveau de bruit de fond, et un second local de grandes dimensions et de niveau de bruit de fond élevé.



## 4. MÉTHODOLOGIE

### 4.1 Matériaux sélectionnés et caractérisation de leurs propriétés

Cinq matériaux différents ont été sélectionnés dans le cadre de cette étude : une mousse de mélamine, une fibre de verre, un panneau de fibre de verre à haute densité (fibre compressée, RPL), une mousse PU et des tuiles de plafond. À l'exception de la mousse de mélamine, tous ces matériaux sont courants dans le domaine industriel et ont soit été directement commandés auprès de leur fabricant, soit achetés dans un grand magasin.

Afin de pouvoir modéliser les matériaux suivant le modèle de Johnson-Champoux-Allard (JCA) (Allard et Atalla, 2009), les paramètres non acoustiques<sup>3</sup> des matériaux ont été mesurés dans les installations du Laboratoire de caractérisation des matériaux acoustiques à l'Université de Sherbrooke, en utilisant les méthodes décrites dans Doutres, Salissou, Atalla, et Panneton (2010). Des mesures directes ont été également réalisées pour la masse volumique, la porosité ouverte (Salissou et Panneton, 2007) et pour la résistivité au flux (ASTM International, 2016). Les échantillons de 100 mm et 44,5 mm de diamètre, utilisés pour les mesures en tube d'impédance, sont illustrés à la Figure 5 et l'ensemble des paramètres obtenus est présenté dans le Tableau 1.

Quatre des matériaux avaient des épaisseurs mesurées comparables (14,5 mm pour les tuiles de plafond, 22 mm pour le panneau de fibre de verre comprimée, 25 mm pour la mousse de mélamine et la mousse PU), tandis que l'épaisseur de la laine de verre atteignait 80 mm.

Les mesures et simulations sur mousse de mélamine ont finalement considéré des échantillons de trois épaisseurs (échantillons de 25 mm utilisés initialement, puis de 50 mm et de 75 mm, correspondant à des épaisseurs de 1 pouce, 2 pouces et 3 pouces en unités impériales). Aucun but n'était particulièrement poursuivi par cela, mais cela s'explique par l'utilisation d'anciennes bases de données (Robin, Doutres, Berry et Atalla, 2014) et la disponibilité de ce matériau en plusieurs épaisseurs, contrairement aux autres matériaux considérés dans cette étude. Cela explique que les résultats peuvent faire référence à trois épaisseurs de mélamine, selon le test ou la simulation considérés.

---

<sup>3</sup> Soit la résistivité au passage de l'air, la porosité, la tortuosité et les longueurs caractéristiques thermique et visqueuse.



**Figure 5 – Échantillons destinés aux mesures en tube d'impédance : (a) Vue supérieure des échantillons; (b) Vue latérale des échantillons – (1) mousse de mélamine, (2) laine de verre, (3) panneau de fibre de verre compressée, (4) mousse PU, (5) tuile de plafond.**

La laine de verre a finalement été préférée à la laine de roche. En effet, la laine de roche présente une très grande inhomogénéité pour la mesure de ses paramètres, ainsi qu'une mauvaise tenue mécanique pour la réalisation de plusieurs tests successifs. Néanmoins, des tests comparatifs (sans mesure des paramètres matériaux, et une modélisation TMM utilisant simplement une base de données déjà existante) ont été effectués pour une laine de roche de type Roxul SAFE'n'SOUND<sup>MD</sup> (Tableau 2) entre les mesures obtenues en chambre réverbérante et celles obtenues en laboratoire et hors laboratoire pour l'approche proposée, décrite dans Robin *et al.* (2014).

Des photos complémentaires des tests réalisés figurent à l'annexe A et les résultats pour tous les matériaux peuvent être consultés à l'annexe B.

**Tableau 1 – Bilan des caractéristiques mesurées en laboratoire pour chacun des cinq matériaux considérés**

Matériau (dénomination commerciale et fabricant)	Tortuosité [-]	Porosité [-]	Résistivité au passage de l'air [Nm <sup>-4</sup> .s]	Longueur caractéristique visqueuse [μm]	Longueur caractéristique thermique [μm]	Masse volumique [kg.m <sup>-3</sup> ]
Laine de verre (EcoTouch Pink Fiber Glass Insulation, Owens Corning)	1	0,99	4860	225	388	10
Panneau de fibre de verre compressée (Rigid Plenum Liner with EcoSe <sup>MD</sup> technology, Knauf Insulation)	1	0,96	22200	57	115	66
Tuile de plafond (Radar <sup>MD</sup> R2310, United States Gypsum Corporation)	> 4	0,82	> 1x10 <sup>6</sup>	25	60	210
Mousse PU (Conasorb F-100, Blachford)	2,95	0,96	9770	123	227	29,8
Mousse de mélamine (BASF)	1	0,98	7920	132	149	6,1

**Tableau 2 – Caractéristiques utilisées pour la modélisation de la laine de roche (issues d'une base de données existante)**

Matériau (dénomination commerciale et fabricant)	Tortuosité [-]	Porosité [-]	Résistivité au passage de l'air [Nm <sup>-4</sup> s]	Longueur caractéristique visqueuse [μm]	Longueur caractéristique thermique [μm]	Masse volumique [kg.m <sup>-3</sup> ]
Laine de roche (Roxul Safe'n'Sound)	1	0,971	18600	64,3	128,5	41,95

## 4.2 Méthode proposée

### 4.2.1 Coefficient de réflexion sphérique pour une excitation acoustique de type monopôle

La Figure 6 décrit le principe de la méthode proposée, telle que présentée dans Robin *et al.*, 2014. À la Figure 6(a), une source ponctuelle omnidirectionnelle (monopôle), située au-dessus d'une couche de matériau absorbant en un point  $s_i$  et à une hauteur  $z_{s_i}$ . Le matériau est supposé être à réaction localisée, ce qui est une hypothèse courante (la réaction du matériau à une onde incidente est supposée se produire uniquement dans la direction normale à la surface du matériau, et est donc en chaque point indépendante de la réaction des points voisins). Deux microphones identifiés  $M1$  et  $M2$  sont placés au centre et au-dessus de la couche absorbante, à des hauteurs  $z_1$  et  $z_2$ , respectivement. La source acoustique est caractérisée par son accélération volumique  $\dot{q}_i$ . Sous l'hypothèse que l'onde réfléchie est sphérique, on peut estimer que le champ acoustique au-dessus du matériau est la superposition de l'onde sphérique créée par la source  $\dot{q}_i$  et de l'onde sphérique issue de la source image  $\dot{q}_i'$  symétrique de la source réelle  $\dot{q}_i$  par rapport à la surface du matériau (supposée plane).

La convention temporelle choisie dans l'ensemble de ce rapport est  $e^{-j\omega t}$ . Si la distance de séparation des 2 microphones est suffisamment petite, l'angle d'incidence  $\theta_i$  est approximativement égal pour les 2 microphones. La pression acoustique  $\tilde{p}_{ij}(\theta_i, \omega)$ , reçue au microphone  $Mj$  ( $j = 1, 2$ ) à la fréquence angulaire  $\omega$  pour une position de la source au point  $Q_i$ , est :

$$\tilde{p}_{ij}(\theta_i, \omega) = \rho_0 \dot{q}_i \frac{e^{jk_0 r_{ij}}}{r_{ij}} + R(\theta_i, \omega) \rho_0 \dot{q}_i \frac{e^{jk_0 r_{ij}'}}{r_{ij}'}, \quad (2)$$

où  $\rho_0$  est la masse volumique de l'air,  $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$  le nombre d'onde acoustique ( $c_0$  est la vitesse du son),  $r_{ij}$  (respectivement  $r_{ij}'$ ) sont les distances entre le microphone  $Mj$  et la source (respectivement la source image) et  $R(\theta_i, \omega)$  est le coefficient de réflexion complexe de la couche absorbante correspondant à la position  $Q_i$  de la source. La mesure de la fonction de transfert entre les 2 microphones  $H(\theta_i, \omega) = \frac{\tilde{p}_{i2}(\theta_i, \omega)}{\tilde{p}_{i1}(\theta_i, \omega)}$  et l'équation (2) permet d'en déduire le coefficient de réflexion pour une incidence  $\theta_i$  et une fréquence  $\omega$  :



$$R(\theta_i, \omega) = \frac{\frac{e^{jk_0 r_{i2}}}{r_{i2}} - H(\theta_i, \omega) \frac{e^{jk_0 r_{i1}}}{r_{i1}}}{H(\theta_i, \omega) \frac{e^{jk_0 r_{i1}'}}{r_{i1}'} - \frac{e^{jk_0 r_{i2}'}}{r_{i2}'}} \quad (3)$$

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  peut alors être déduit par la relation  $\alpha(\theta_i, \omega) = 1 - \|R(\theta_i, \omega)\|^2$  où  $\| \cdot \|$  représente la norme 2.

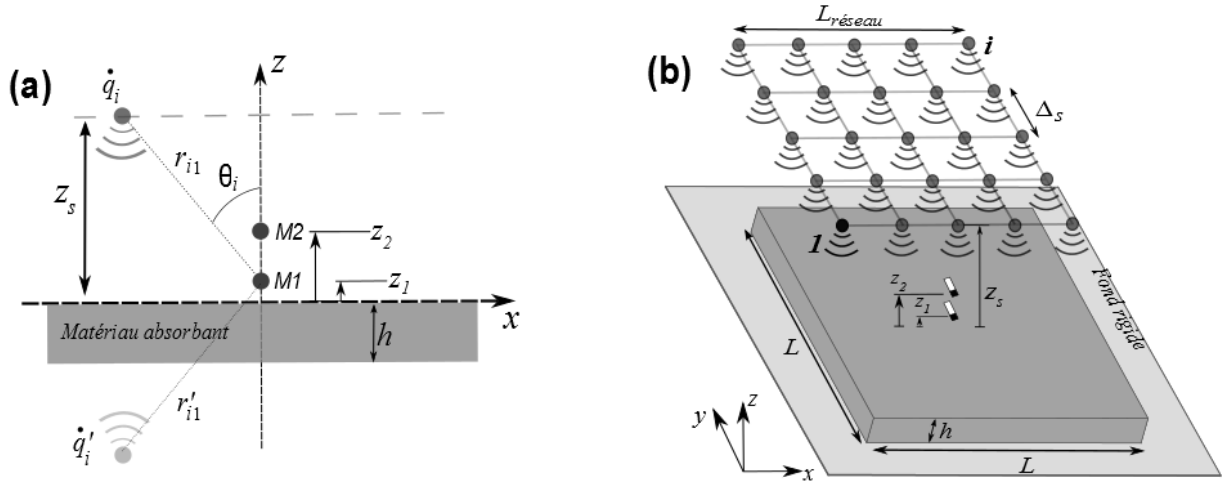


Figure 6 – (a) Principe pour la mesure du coefficient d'absorption sous incidence variable - (b) Principe pour la mesure du coefficient de réflexion sous une antenne synthétique de  $i$  monopôles.

#### 4.2.2 Coefficient de réflexion sous champ synthétisé

L'approche pour estimer le coefficient de réflexion sous champ synthétisé (par exemple, un champ diffus) est illustrée à la Figure 6(b). La source monopolaire est déplacée en une série de positions correspondant à un maillage régulier dans un plan parallèle au matériau, et le doublet microphonique est maintenu en position fixe au centre du matériau. Le coefficient de réflexion peut être estimé pour chaque position de la source à partir de l'équation (3). Le coefficient de réflexion sous l'effet du réseau de sources fictif est alors estimé selon la démarche exposée ci-après.

Par souci de simplification, on notera  $g_{ij}(\omega) = \frac{e^{jk_0 r_{ij}}}{r_{ij}}$  (respectivement  $g_{ij}'(\omega) = \frac{e^{jk_0 r_{ij}'}}{r_{ij}'}$ ) les fonctions de Green entre la source  $i$  (la source image  $i$ ) et le microphone  $j$ . La pression acoustique observée par le microphone 1 sous l'effet simultané de toutes les sources correspond à la sommation :

$$\tilde{p}_1(\omega) = \sum_i \rho_0 \dot{q}_i g_{i1}(\omega) + \sum_i R(\theta_i, \omega) \rho_0 \dot{q}_i g_{i1}'(\omega) = \mathbf{Q}^T \mathbf{g}_1 + \mathbf{Q}^T \mathbf{h}_1 \quad (4)$$

où  $\mathbf{Q} = \{\dots \dot{q}_i \dots\}^T$ ,  $\mathbf{g}_1 = \{\dots \rho_0 g_{i1}(\omega) \dots\}^T$ ,  $\mathbf{h}_1 = \{\dots R(\theta_i, \omega) \rho_0 g_{i1}'(\omega) \dots\}^T$  et l'exposant  $T$  dénote la transposée. Si l'on définit  $R_{synth}(\omega)$  le coefficient de réflexion du matériau sous l'effet simultané de toutes les sources ponctuelles, l'équation (4) peut être écrite sous la forme :

$$\tilde{p}_1(\omega) = \sum_i \rho_0 \dot{q}_i g_{i1}(\omega) + R_{synth}(\omega) \sum_i \rho_0 \dot{q}_i g_{i1}'(\omega) = \mathbf{Q}^T \mathbf{g}_1 + R_{synth}(\omega) \mathbf{Q}^T \mathbf{g}_1' \quad (5)$$

où  $\mathbf{g}_1' = \{\dots \rho_0 g_{i1}'(\omega) \dots\}^T$ . Dans les équations précédentes,  $\mathbf{Q}^T \mathbf{g}_1$  représente le champ acoustique incident dû à toutes les sources au microphone  $M1$  et  $\mathbf{Q}^T \mathbf{g}_1'$  représente le champ acoustique dû à toutes les sources au microphone  $M1$  et réfléchi par la surface si elle était parfaitement rigide. Le coefficient  $R_{synth}$  est alors un coefficient moyenné sur les angles d'incidence. Si l'on combine les équations (4) et (5), on obtient :

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{h}_1 = R_{synth}(\omega) \mathbf{Q}^T \mathbf{g}_1' \quad (6)$$

Si l'on considère la densité spectrale de puissance des quantités apparaissant à gauche et à droite de l'équation (6), on obtient :

$$\mathbf{h}_1^H \mathbf{S}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}} \mathbf{h}_1 = \|R_{synth}(\omega)\|^2 \mathbf{g}_1'^H \mathbf{S}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}} \mathbf{g}_1' \quad (7)$$

où  $\mathbf{S}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}}$  est la matrice des densités interspectrales des accélérations volumiques des sources, et l'exposant  $H$  désigne une transposée hermitienne.

On déduit alors la relation :

$$\|R_{synth}(\omega)\|^2 = \frac{\mathbf{h}_1^H \mathbf{S}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}} \mathbf{h}_1}{\mathbf{g}_1'^H \mathbf{S}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}} \mathbf{g}_1'} \quad (8)$$

Le coefficient d'absorption sous champ synthétisé est donc obtenu à partir de l'équation (8) et grâce à la relation  $\alpha_{synth}(\omega) = 1 - \|R_{synth}(\omega)\|^2$ . Dans les équations (7) et (8), la matrice interspectrale des accélérations volumiques des sources  $\mathbf{S}_{\mathbf{Q}\mathbf{Q}}$  peut être déterminée à partir de différentes approches de synthèse de champs en vue, par exemple, de créer des conditions de champ diffus incident ou d'ondes planes obliques (voir les détails dans Berry, Dia, et Robin, 2012; Robin, Berry, et Moreau, 2013). Le calcul du coefficient d'absorption  $\alpha_{synth}(\omega)$  est donc réalisé dans une étape de post-traitement, à partir de la base de données des fonctions de transfert mesurées entre les 2 microphones du doublet  $H(\theta_i, \omega) = \frac{\tilde{p}_{i2}(\theta_i, \omega)}{\tilde{p}_{i1}(\theta_i, \omega)}$ .

### 4.3 Coefficient de réflexion selon le modèle de Nobile-Hayek pour une excitation de type monopôle

Dans les sous-sections précédentes, le modèle de réflexion de l'onde acoustique par la couche de matériau absorbant sous la forme d'une onde sphérique n'est pas exact. Cette approximation est d'autant moins valable que la fréquence est basse ou que la source est

proche du matériau. Elle conduit généralement à une estimation d'un coefficient d'absorption négatif aux basses fréquences selon les équations (3) et (8), ce qui n'est évidemment pas physique (voir les exemples de résultats des mesures fournis à la Figure 4). Une façon de remédier à ce problème est de recourir à une solution exacte du problème de réflexion d'une onde sphérique par une couche absorbante. Parmi de nombreux modèles existants pour décrire de manière théorique la propagation d'une onde sphérique (issuée d'une source ponctuelle) au-dessus d'un matériau (par exemple, Di et Gilbert, 1994), celui de Nobile-Hayek est le plus couramment utilisé (Nobile et Hayek, 1985).

Ce modèle repose sur les hypothèses suivantes :

1. La source est un monopôle idéal en milieu semi-infini;
2. La couche absorbante est plane et de dimensions infinies;
3. La couche absorbante est modélisée comme un milieu à réaction localisée, caractérisé par une admittance de surface normalisée  $(\omega) = \frac{\rho_0 c_0}{Z(\omega)}$ ,  $Z(\omega)$  étant l'impédance de surface.

En référence à la Figure 6(a), le champ de pression acoustique  $\tilde{p}_{ij}(\theta_i, \omega)$ , reçu au microphone  $M_j$  ( $j = 1, 2$ ), à la fréquence angulaire  $\omega$ , pour une position  $i$  de la source selon Nobile et Hayek (1985), est :

$$\tilde{p}_{ij}(\theta_i, \omega) = \rho_0 \dot{q}_i \left[ \frac{e^{jk_0 r_{ij}}}{r_{ij}} + \frac{e^{jk_0 r_{ij}'}}{r_{ij}'} + I_{ij}(\beta, \theta_i, \omega) \right] \quad (9)$$

$$\text{avec } I_{ij}(\beta, \theta_i, \omega) = -\frac{4jk_0 \beta B e^{jk_0 r_{ij}'}}{\beta + \cos \theta_i} \int_0^\infty \frac{e^{jk_0 r_{ij}'(t^2 + 2Bt)}}{\sqrt{1 - \frac{t^2}{H} - \frac{2Bt}{H}}} dt$$

Les paramètres  $B$  et  $H$  sont définis par Nobile et Hayek (1985); ils dépendent de l'admittance de surface  $\beta$ . Les trois termes apparaissant dans la partie droite de l'équation précédente correspondent respectivement au champ incident, au champ réfléchi par la surface supposée rigide et à un terme correctif qui tient compte de l'impédance finie de la surface. Ce troisième terme doit être calculé numériquement.

La fonction de transfert entre les deux microphones  $M1$  et  $M2$ ,  $H(\theta_i, \omega) = \frac{\tilde{p}_{i2}(\theta_i, \omega)}{\tilde{p}_{i1}(\theta_i, \omega)}$ , peut alors être estimée selon le modèle de Nobile-Hayek par la relation :

$$H(\theta_i, \omega) = \frac{\frac{e^{jk_0 r_{i2}}}{r_{i2}} + \frac{e^{jk_0 r_{i2}'}}{r_{i2}'} + I_{i2}(\beta, \theta_i, \omega)}{\frac{e^{jk_0 r_{i1}}}{r_{i1}} + \frac{e^{jk_0 r_{i1}'}}{r_{i1}'} + I_{i1}(\beta, \theta_i, \omega)} \quad (10)$$

La méthode d'identification du coefficient d'absorption de la couche de matériau, selon ce modèle, procède en 3 étapes :

- Extraction de l'admittance de surface normalisée  $\beta$  pour chaque position  $i$  de la source à partir de la mesure de la fonction de transfert  $H(\theta_i, \omega)$ , en inversant l'équation (9);
- Calcul du coefficient de réflexion complexe  $R(\theta_i, \omega)$  ou du coefficient d'absorption  $\alpha(\theta_i, \omega)$ , sous monopôle, à partir de  $\beta$ , selon le modèle de Nobile-Hayek;

- Calcul du coefficient de réflexion  $R_{synth}(\omega)$  ou du coefficient d'absorption  $\alpha_{synth}(\omega)$ , sous champ synthétisé, à partir de  $R(\theta_i, \omega)$  ou  $\alpha(\theta_i, \omega)$ , selon la méthode présentée à la sous-section 4.2.2.

Les deux premières étapes sont détaillées dans la sous-section suivante.

#### 4.3.1 Extraction de l'admittance de surface

L'utilisation d'un algorithme d'optimisation pour déduire de manière itérative l'impédance de surface ou le coefficient d'absorption d'un matériau a été suggérée par plusieurs auteurs (Champoux et Richarz, 1990; Alvarez et Jacobsen, 2008).

Dans la présente étude, l'équation (9) sera utilisée, soit, pour rappel :

$$\tilde{p}_{ij}(\theta_i, \omega) = \rho_0 \dot{q}_i \left[ \frac{e^{jk_0 r_{ij}}}{r_{ij}} + \frac{e^{jk_0 r_{ij}'}}{r_{ij}'} + I_{ij}(\beta, \theta_i, \omega) \right].$$

La procédure d'inversion, pour estimer l'admittance normalisée  $\beta$  à partir du modèle de Nobile-Hayek, comporte les points suivants, pour chaque position de source  $i$  et pour chaque fréquence :

1. Construire une fonction de transfert  $H_{mes}(\theta_i, \omega) = \frac{\tilde{p}_{i2}(\theta_i, \omega)}{\tilde{p}_{i1}(\theta_i, \omega)}$ , à partir des pressions acoustiques  $\tilde{p}_{i1}$  et  $\tilde{p}_{i2}$  mesurées en deux points  $M_1$  et  $M_2$  au-dessus du matériau;
2. Construire une fonction de transfert numérique correspondante à  $H_{NH}(\theta_i, \omega) = \frac{\tilde{p}_{i2}(\theta_i, \omega)}{\tilde{p}_{i1}(\theta_i, \omega)}$ , en exploitant le modèle de Nobile-Hayek décrit ci-dessus;
3. Estimer l'admittance normalisée  $\beta$  de telle façon que la fonction d'écart entre mesure et modèle  $\|H_{mes} - H_{NH}\|^2$  soit minimale.

Trois algorithmes ont été testés pour le dernier point de la procédure : (i) optimisation par moindres carrés non linéaires avec l'algorithme *lsqnonlin* du logiciel MATLAB<sup>MD</sup>; (ii) optimisation génétique avec l'algorithme *ga* du logiciel MATLAB<sup>MD</sup>; (iii) recherche de minimum avec un algorithme de résolution non linéaire (bissection) basé sur la méthode hybride de Powell (1964). Les trois algorithmes fournissent des résultats équivalents. L'algorithme *lsqnonlin* a toutefois été préféré pour la poursuite du travail, car il converge plus facilement, surtout dans le cas où la valeur de l'admittance estimée à une fréquence donnée est utilisée comme estimation initiale à la fréquence suivante.

Pour valider numériquement la procédure d'inversion, des valeurs théoriques d'admittance ont d'abord été utilisées pour construire une fonction de transfert « test » à partir du modèle de Nobile-Hayek. La procédure a ensuite été exploitée avantageusement, comme l'illustre la Figure 7, pour retrouver l'admittance théorique.

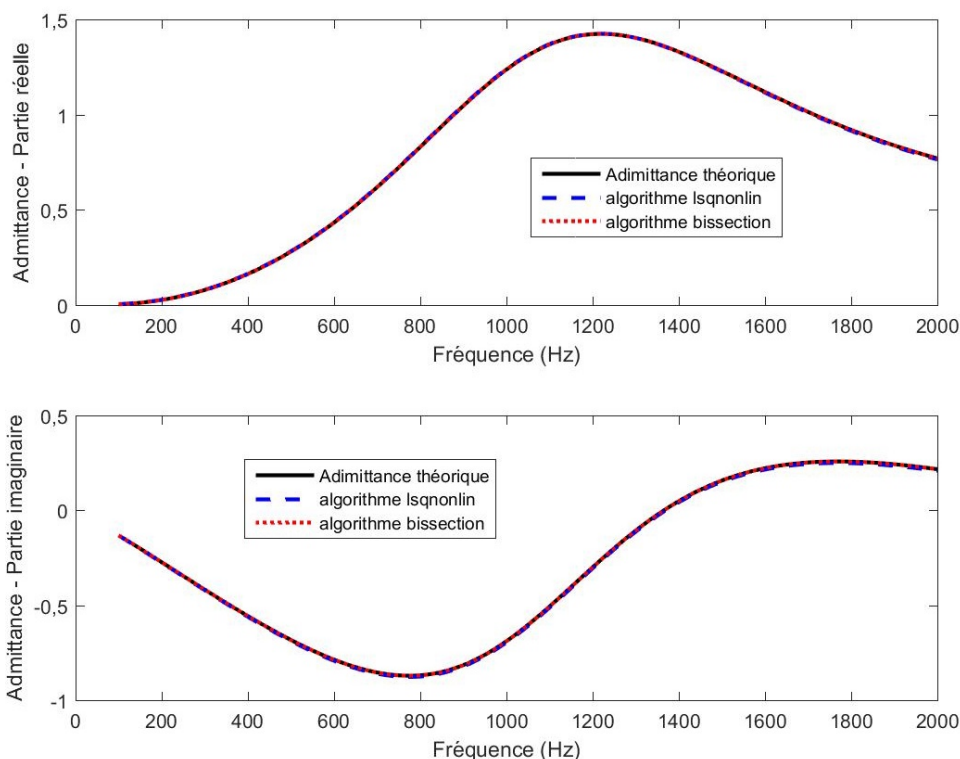


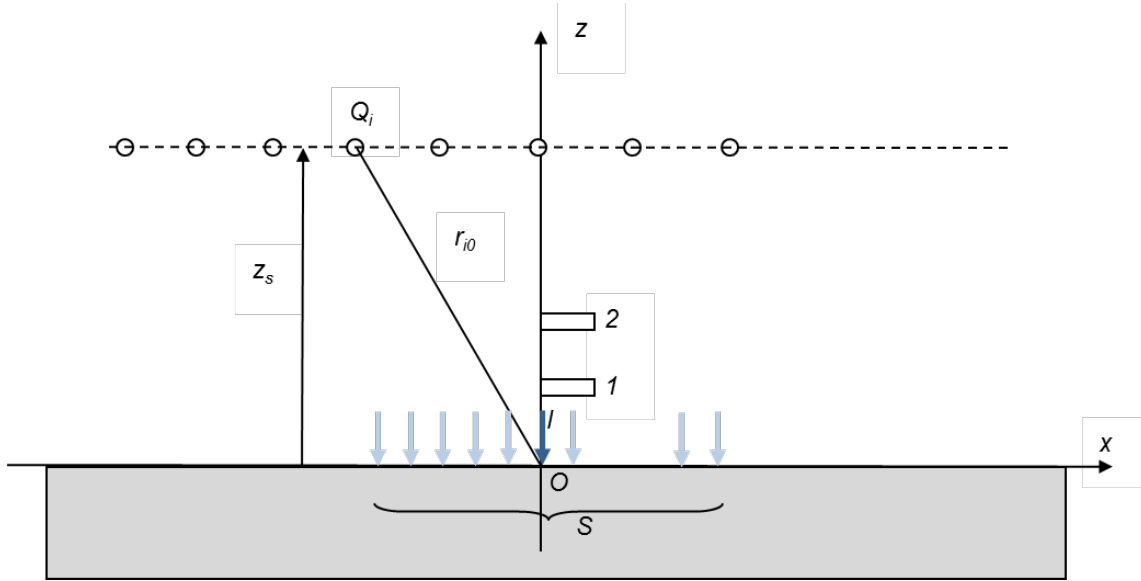
Figure 7 – Validation de la procédure d’inversion à partir d’une admittance théorique.

### 4.3.2 Coefficient de réflexion $R(\theta_i, \omega)$ et coefficient d’absorption $\alpha(\theta_i, \omega)$ sous monopôle

Une fois l’admittance de surface du matériau déterminée pour chaque position de source à partir de la fonction de transfert mesurée  $H(\theta_i, \omega)$ , il est possible de réinjecter cette admittance dans le modèle de Nobile-Hayek [équation (9)], pour prédire le champ acoustique en tout point au-dessus du matériau et en déduire le coefficient de réflexion ou d’absorption pour chaque position de source considérée. Excepté le cas d’une onde plane incidente, il n’existe pas de consensus clair dans la littérature sur la définition du coefficient de réflexion d’une couche de matériau d’impédance finie.

Trois définitions du coefficient de réflexion ou d’absorption sous onde sphérique incidente sont ici proposées (Figure 8), à partir de :

- la pression acoustique en surface du matériau au point O, intersection de l’axe du doublet microphonique et du plan  $z=0$ ;
- l’intensité acoustique active en surface du matériau au point O;
- la puissance acoustique traversant une surface du matériau entourant le doublet microphonique.



**Figure 8 – Détermination du coefficient d'absorption sous monopôle à partir de la pression acoustique en surface, de l'intensité acoustique active en surface et de la puissance acoustique.**

#### 4.3.2.1 Calcul basé sur la pression acoustique

En partant de la définition classique du coefficient de réflexion  $R(\theta_i, \omega) = \frac{\tilde{p}_{ref}(\theta_i, \omega)}{\tilde{p}_{inc}(\theta_i, \omega)}$  où  $\tilde{p}_{inc}(\theta_i, \omega)$  est la pression acoustique incidente au point O à la surface du matériau et  $\tilde{p}_{ref}(\theta_i, \omega)$  est la pression acoustique réfléchie au même point, nous avons :

$$\tilde{p}_{inc}(\theta_i, \omega) = \rho_0 \dot{q}_i \frac{e^{jk_0 r_{i0}}}{r_{i0}} \quad (11)$$

et

$$\tilde{p}_{ref}(\theta_i, \omega) = \tilde{p}_{i0}(\theta_i, \omega) - \tilde{p}_{inc}(\theta_i, \omega) = \rho_0 \dot{q}_i \left[ \frac{e^{jk_0 r_{i0}'}}{r_{i0}'} + I_{i0}(\beta, \theta_i, \omega) \right].$$

Donc

$$R(\theta_i, \omega) = \frac{\frac{e^{jk_0 r_{i0}'}}{r_{i0}'} + I_{i0}(\beta, \theta_i, \omega)}{\frac{e^{jk_0 r_{i0}}}{r_{i0}}} \quad (12)$$

#### 4.3.2.2 Calcul basé sur l'intensité acoustique

Certains auteurs définissent plutôt le coefficient d'absorption directement à partir d'un bilan d'intensité ou de puissance acoustique en surface du matériau (Kuipers, Wijnant et de Boer, 2012, 2014a, 2014b).

En définissant le coefficient d'absorption  $\alpha(\theta_i, \omega) = \frac{i(\theta_i, \omega)}{i_{inc}(\theta_i, \omega)}$  où  $i(\theta_i, \omega) = \frac{1}{2} Re(\tilde{p}_{i0} \tilde{v}_{i0}^*)$  est l'intensité acoustique active totale au point O normale à la surface du matériau et  $i_{inc}(\theta_i, \omega) = \frac{1}{2} Re(\tilde{p}_{inc} \tilde{v}_{inc}^*)$  est l'intensité acoustique active incidente normale au même point ( $\tilde{v}_{i0}, \tilde{v}_{inc}$  sont les vitesses particulières normales à la surface correspondantes,  $Re$  désigne la partie réelle et  $*$  désigne la conjugaison complexe), nous avons donc :

$$\alpha(\theta_i, \omega) = \frac{Re(\tilde{p}_{i0} \tilde{v}_{i0}^*)}{Re(\tilde{p}_{inc} \tilde{v}_{inc}^*)}. \quad (13)$$

Les pressions  $\tilde{p}_{i0}, \tilde{p}_{inc}$  peuvent être déterminées à partir des équations (8) et (10), la vitesse particulière  $\tilde{v}_{inc}$  se déduit facilement de  $\tilde{p}_{inc}$  et la vitesse particulière  $\tilde{v}_{i0}$ , à la surface, se déduit de  $\tilde{p}_{i0}$  par la condition d'admittance  $\frac{\tilde{v}_{i0}}{\tilde{p}_{i0}} = \frac{\beta}{\rho_0 c_0}$ .

#### 4.3.2.3 Calcul basé sur la puissance acoustique

On peut également définir le coefficient d'absorption par un bilan de puissance acoustique sur une surface  $S$  du matériau entourant le doublet microphonique (Kuipers, Wijnant et de Boer, 2014a) :

$$\alpha(\theta_i, \omega) = \frac{\iint_S Re(\tilde{p}_{i0} \tilde{v}_{i0}^*) ds}{\iint_S Re(\tilde{p}_{inc} \tilde{v}_{inc}^*) ds}. \quad (14)$$

## 4.4 Simulations numériques

### 4.4.1 Simulations numériques pour l'évaluation d'une configuration optimale pour la mesure

Diverses simulations numériques ont été réalisées pour satisfaire les deux considérations suivantes :

- Étude paramétrique pour déterminer les critères et les paramètres pertinents pour une estimation optimale du coefficient d'absorption par la méthode proposée;
- Évaluations préliminaires de la méthode proposée à partir de simulations numériques effectuées avec certains des matériaux identifiés dans l'étude.

Ces simulations numériques ont été faites principalement avec le module éléments finis (basses fréquences) du logiciel NOVA développé par des membres du GAUS<sup>4</sup>. La procédure pour chaque simulation consiste à évaluer la pression acoustique totale en deux points au-dessus d'un matériau poreux excité par une source ponctuelle (monopôle), également située au-dessus du matériau. Ce dernier a été traité comme un matériau poreux « limp » avec le modèle de Johnson-Champoux-Allard (Allard et Atalla, 2009), et le maillage d'éléments finis permet de prendre en compte son épaisseur et ses dimensions latérales. Le matériau est considéré

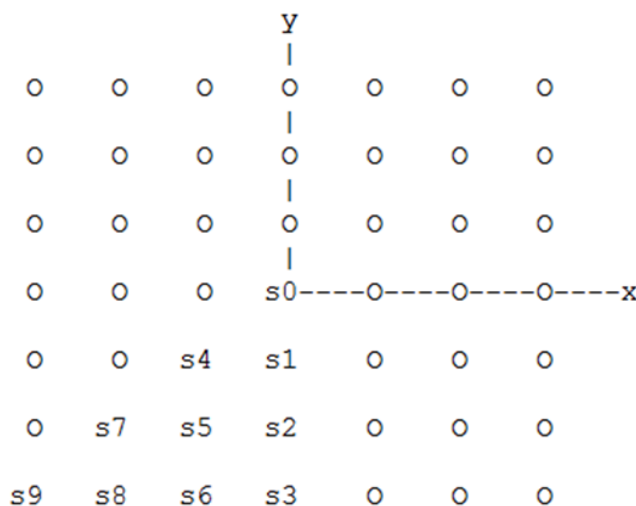
<sup>4</sup> [Logiciel Nova](#)

comme étant inséré dans un baffle rigide infini. Les pressions acoustiques simulées ont ensuite été exploitées par la méthode proposée dans cette étude afin d'en déduire le coefficient d'absorption sous champ diffus synthétisé, pour étudier les deux considérations données à la page précédente. Ici, seule l'approche décrite dans la sous-section 4.2 (hypothèse de réflexion sphérique) a été utilisée.

Deux matériaux, la mousse de mélamine et le panneau de fibre de verre compressée (RPL), ont principalement été utilisés dans les simulations numériques effectuées pour l'évaluation préliminaire de la méthode proposée. Les paramètres suivants ont été pris en compte dans les simulations pour les fins de l'étude paramétrique :

- L'épaisseur du matériau : 2,54 cm, 5,08 cm ou 7,62 cm (ces épaisseurs correspondant à des dimensions impériales de 1 pouce, 2 pouces et 3 pouces, respectivement); ces dimensions ayant été choisies puisqu'elles représentent des standards dans les matériaux existants dans le commerce;
- La taille latérale du matériau : matériau carré de côté 22,5 cm, 45 cm, 90 cm, 1,8 m ou 3,6 m; ces dimensions ayant été choisies puisqu'elles représentent des fractions ou des multiples du côté de l'antenne de sources;
- La hauteur de l'antenne des sources par rapport à la surface du matériau : 20 cm, 40 cm, 60 cm ou 80 cm; ces dimensions ayant été choisies puisqu'elles représentent des multiples de la hauteur initialement utilisée (20 cm), et elles ne vont pas au-delà d'une hauteur de 80 cm pour conserver un système compact (choix empirique);
- La taille de l'antenne des sources (nombre de sources et distance entre les sources). Dans chaque cas, le nombre de sources considérées représente en fait une sous-partie de la dimension totale de l'antenne en utilisant des considérations de symétrie. Par exemple, la Figure 9 illustre le maillage des sources utilisé pour la configuration 7 x 7 (vue au-dessus du matériau). Le champ de pression complexe au doublet de microphones, situé au centre du repère  $(x,y)$ , et donc à la verticale de la source dénommée «  $s_0$  », était donc à évaluer pour 49 positions des sources (pour obtenir le coefficient de réflexion complexe pour chacune de ces positions en utilisant l'équation 3). Le problème considéré étant symétrique, les calculs finalement effectués n'ont concerné qu'une partie des positions des sources (soit 10 positions des sources pour obtenir les coefficients pour 49 positions au total).





**Figure 9 – Exemple de géométrie de l’antenne des sources utilisées dans les simulations numériques (49 positions des sources étaient à considérer, et seules les positions s0 à s9 ont fait l’objet d’un calcul, les autres ayant été déduites par symétrie).**

#### **4.4.2 Calculs de référence pour les matériaux sélectionnés**

Pour chacun des matériaux choisis, un calcul de référence utilisant la méthode des matrices de transfert (Transfer Matrix Method, ou TMM [Allard et Atalla, 2009]) a été réalisé (à l’exception de la tuile de plafond pour laquelle aucun résultat probant n’a pu être obtenu étant donné la complexité de modélisation de ce matériau). Le résultat de ce calcul de référence est celui qui devrait théoriquement être obtenu dans le cadre d’une mesure sous excitation de type « Champ Acoustique Diffus », sans l’influence des effets de taille, de bords ou de non-représentativité du champ excitateur. L’angle limite de l’excitation était alors de 90 degrés.

Appuyée sur un fond rigide, la couche de matériau est considérée de dimension infinie. Deux matériaux (mousse de mélamine et laine de verre) ont été traités comme des matériaux poreux « limp » (modèle de fluide équivalent prenant en compte des effets d’inertie du squelette rigide du matériau). La mousse PU et le panneau de fibre de verre comprimée ont été traités comme des matériaux poreux rigides (modèle de fluide équivalent supposant que le squelette du matériau est rigide, donc immobile). Le modèle de matériau de Johnson-Champoux-Allard a été systématiquement utilisé (Allard et Atalla, 2009). Le module de calcul TMM du logiciel Nova a été utilisé pour réaliser toutes ces simulations.

Il est précisé qu’une correction pour permettre la prise en compte de la dimension finie des échantillons peut venir en extension à la méthode des matrices de transfert (Allard et Atalla, 2009, chapitre 12.3). La méthode est alors nommée Finite Transfer Matrix Method, ou FTMM. Quelques résultats numériques ont été obtenus suivant cette méthode, et peuvent être trouvés en annexe B.

## 4.5 Mesures du coefficient d'absorption acoustique en laboratoire et hors laboratoire

### 4.5.1 Description des mesures en chambre réverbérante selon les normes actuelles

Les mesures en chambre réverbérante ont été réalisées selon la norme ASTM C423-09a dans la chambre réverbérante du GAUS, dont le volume est de  $143 \text{ m}^3$  (ASTM, 2009). Cinq microphones (PCB 377B02) ont été positionnés dans la chambre suivant les recommandations normatives (respect des distances minimales avec les parois, la source et le matériau). Une source JBL alimentée par une source de bruit blanc permettait d'exciter la chambre avec et sans matériau. Chaque matériau était placé directement sur le sol de la chambre (Figure 10(a)), et son périmètre était scellé avec un cadre en bois et du ruban d'aluminium (Figure 11). Cette mise en œuvre de l'échantillon à tester correspond à un montage de type A, comme décrit dans la norme E795-05 (ASTM, 2005). Dix décroissances successives après extinction du signal d'excitation étaient mesurées pour les cas sans et avec matériau, afin de déduire ensuite les temps de réverbération  $T_0$  et  $T_{\text{échantillon}}$ , respectivement. Cela permettait ensuite de calculer le coefficient d'absorption par bande de tiers d'octave en utilisant l'équation (1) qui est détaillée à la sous-section 2.2.

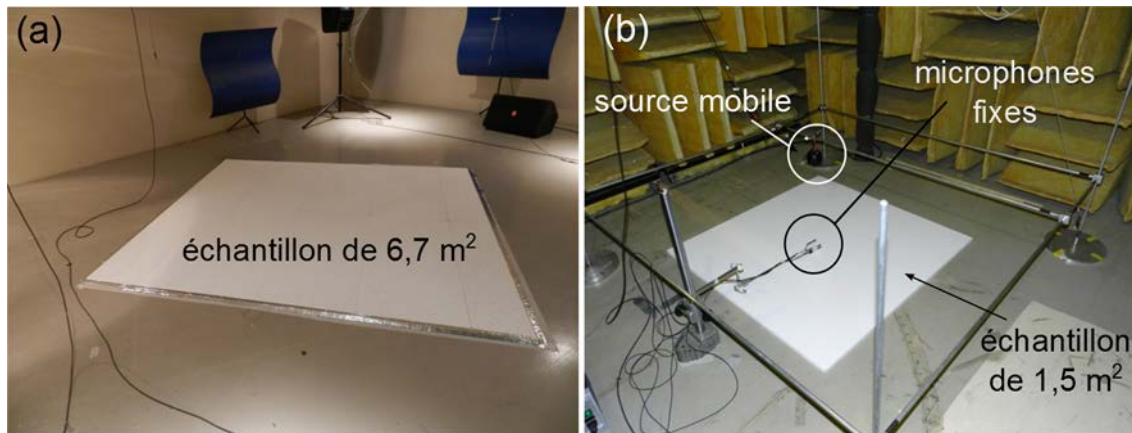


Figure 10 – Comparaison de la mise en œuvre en laboratoire de l'approche standardisée (a) et de l'approche développée (b), dans le cas de la mesure sur tuiles de plafond (adaptée de Robin, Amédin, Berry, Atalla, Doutres et Sgard, 2016b).

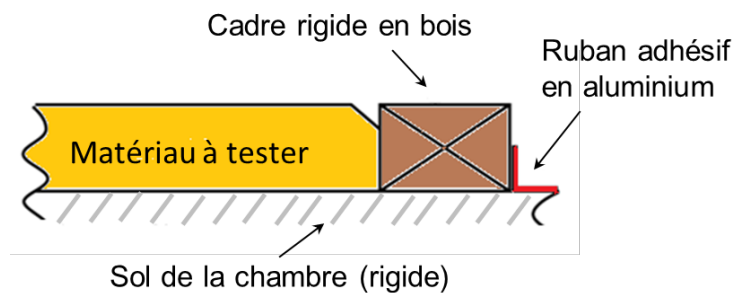
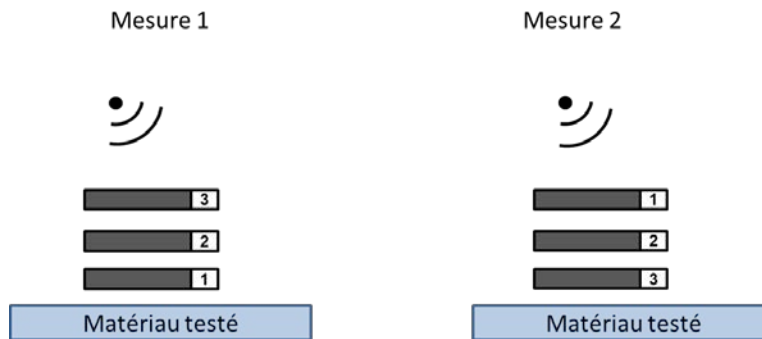


Figure 11 – Montage de type A des échantillons en chambre réverbérante.

#### **4.5.2 Description des mesures selon l'approche proposée en conditions contrôlées (chambre semi-anéchoïque) et hors laboratoire (petit local de travail et atelier de fabrication mécanique)**

Les mesures selon l'approche proposée en conditions contrôlées ont suivi le protocole décrit à la sous-section 4.2. Les échantillons étaient toujours placés directement sur le sol, mais aucune préparation spécifique n'était alors mise en œuvre (pas de cadre en bois, ou d'application de ruban d'aluminium en bordure du matériau, tel qu'illustré en Figure 10(b)). Les microphones (doublet initialement, ou triplet pour les tests finaux) étaient positionnés au centre du matériau, généralement à une hauteur de 1 cm par rapport à la surface du matériau pour le microphone le plus bas. Deux microphones BSWA ¼ pouce ont d'abord été utilisés dans le cas de la mesure au doublet, puis ensuite trois microphones PCB ¼ pouce dans le cas de la mesure au triplet. Les hauteurs des trois microphones par rapport à la surface du matériau étaient respectivement de 1 cm, 3,5 cm et 6 cm. Ainsi, deux espacements microphoniques pouvaient être utilisés pour le calcul du coefficient de réflexion : 2,5 cm ou 5 cm. Ces deux espacements permettaient de couvrir la bande de fréquence 100-5000 Hz considérée dans les normes de mesures. En effet, un espacement important était requis pour permettre des mesures précises en basses fréquences, mais si la fréquence dépassait 2500 Hz, la mesure était erronée. Il était donc nécessaire de compléter le doublet d'espacement de 5 cm par un second doublet d'espacement réduit (alors de 2,5 cm). Ce point a été identifié dans le cadre de la présente étude, car les mesures réalisées auparavant se limitaient à une fréquence haute de 2000 Hz et cette limitation n'avait pas été mise en lumière (Robin *et al.*, 2014). La nécessité d'utiliser plusieurs espacements pour couvrir une large gamme fréquentielle est par ailleurs documentée dans la littérature pour ce type de mesures (Champoux et l'Espérance, 1988). Il est précisé que cela ne change pas les considérations exposées dans la section théorique puisque les calculs reposent toujours sur un doublet. Le triplet permet simplement de disposer directement de deux doublets microphoniques avec un espacement différent entre les microphones.

De plus, la technique dite de l'inversion du doublet a été mise en œuvre (Kruse et Sauerzapf, 2008). Ainsi, le doublet a été pivoté de 180 degrés par rapport à l'axe vertical, le microphone le plus proche de la surface du matériau s'est alors retrouvé dans la position du microphone le plus éloigné et inversement, et la position du microphone central est restée inchangée puisque celui-ci est au centre du doublet. Cette opération avait pour objectif de limiter les erreurs de phase en basses fréquences avec le doublet possédant le plus grand espacement, erreurs qui peuvent être préjudiciables à une bonne estimation du coefficient de réflexion complexe. La source acoustique était donc translatée une première fois avec le triplet dans sa position initiale, puis une seconde fois dans la position inversée. Cela a pour effet de doubler le temps de mesure, un inconvénient qui amène un intérêt pour translater la source de manière mécanique dans le futur. La Figure 12 illustre le positionnement successif du triplet de microphones



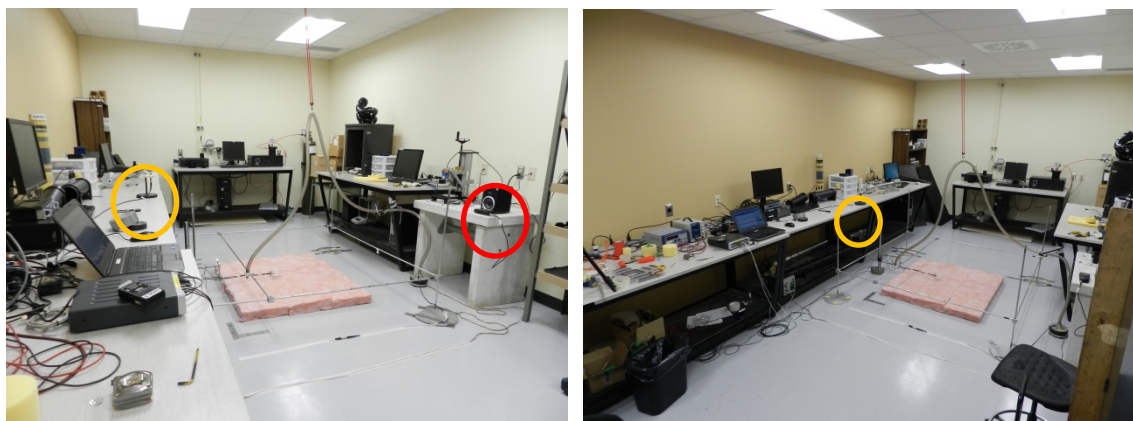
**Figure 12 – Illustration du positionnement du triplet de microphones pour les deux mesures successives.**

Pour sa part, la source acoustique (haut-parleur Gallo Nucleus ou source LMS Mid-High Frequency Volume Velocity Source) était positionnée à une hauteur  $h$  (par rapport à la surface du matériau), et elle était ensuite translatée en différents points d'un maillage carré. Pour chaque position d'une source, un signal de type bruit blanc ou sinus glissant (qui a été préféré ensuite dans les expérimentations) était émis par la source acoustique dans la bande fréquentielle 150-6000 Hz et la fonction de transfert entre les microphones était mesurée (ce qui permet le calcul du coefficient de réflexion correspondant à la position de la source considérée). Il est précisé que la fréquence basse de 150 Hz a été choisie pour des questions de limites techniques liées aux sources acoustiques. Ces sources sont de dimensions compactes (3 cm pour la source LMS et 6 cm pour le haut-parleur Gallo) et leurs formes limitent les effets de diffractions (canule à l'extrémité d'un tube et sphère, respectivement). Elles sont toutes les deux considérées comme omnidirectionnelles.

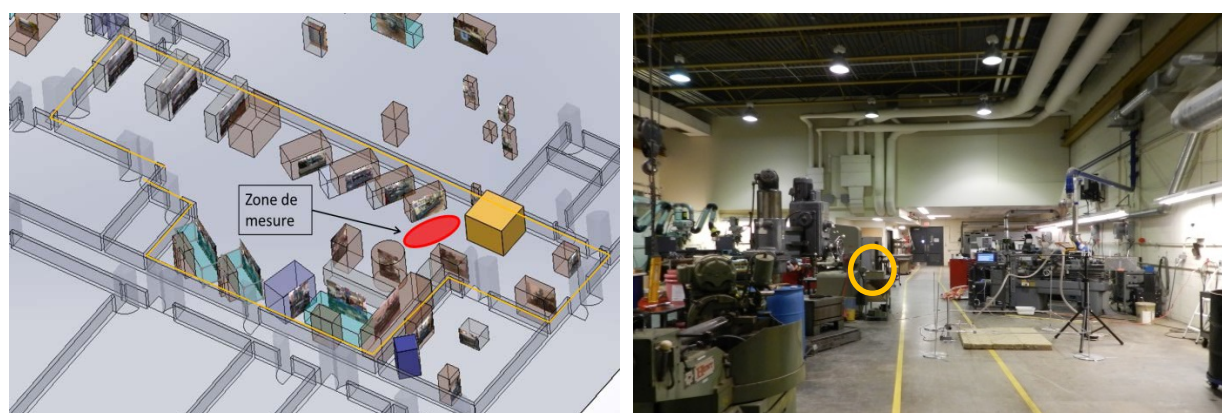
Les deux locaux choisis pour tester l'approche proposée dans des environnements réalistes sont le local de travail du Laboratoire de caractérisation des matériaux acoustiques (LCMA, local 1, illustré à la Figure 13) et l'atelier de fabrication de génie de la Faculté de génie (local 2, illustré à la Figure 14). Ces configurations devaient tester l'approche en présence de bruit de fond et de réverbération par l'environnement de mesure. Les dimensions des locaux sont respectivement de 9 mètres x 4 mètres x 2,70 mètres (volume total d'environ 100 m<sup>3</sup>) et de 32 mètres x 19 mètres x 7 mètres (volume total d'environ 3500 m<sup>3</sup>).

Aucune précaution particulière n'a été prise lors de la mesure dans le local 1. Plus précisément :

- Les mesures se sont déroulées durant les heures normales d'ouverture de la faculté;
- Aucune consigne n'a été donnée dans les locaux environnants pour limiter les niveaux de bruits ou d'activité;
- Tous les appareils et systèmes, soit 4 ordinateurs et la ventilation des locaux, sont demeurés en situation de fonctionnement;
- Une source de bruit additionnelle « parasite » a été introduite pour tester la robustesse de l'approche au bruit de fond.



**Figure 13 – Deux vues d’ensemble du premier local de travail (local 1) - la position du microphone de contrôle est indiquée par un cercle orange, et celle de la source de bruit additionnelle par un cercle rouge.**



**Figure 14 – Dessin Solidworks du local 2 (à gauche) – mesures mises en place dans le local (à droite, la position du microphone de contrôle est indiquée par un cercle orange).**

Les mesures dans le local 2 ont dû être réalisées en dehors des heures de travail dans l’atelier, pour des questions de santé et de sécurité au travail (SST). En effet, la zone de mesure choisie empiétait sur celle réservée à la circulation des personnes. Tout comme pour le local 1, aucune consigne n’a été donnée pour limiter les niveaux de bruits ou d’activité dans les locaux environnants, et la ventilation des locaux est demeurée en mode standard de fonctionnement. Dans chaque local, les temps de réverbération ont été mesurés à l’aide d’un système Concerto de la société Soft dB (mesures dites interrompues à l’aide d’une source de bruit rose), et sont rapportés dans le Tableau 3. Installé dans chaque local, un microphone de contrôle a permis de mesurer le niveau de bruit ambiant avant ou durant les mesures sur matériau. Les résultats sont illustrés à la Figure 15.

Il est notable sur les graphiques de cette figure que le niveau de bruit dans le local 2 (atelier) est beaucoup plus élevé que celui mesuré dans le local 1 (LCMA). Le niveau de bruit moyen mesuré avec la source des mesures en fonctionnement n’excède pas de 1 dB celui mesuré sans cette source, jusqu’à la bande de tiers d’octave 1000 Hz inclusivement. Pour cette raison,

aucune source de bruit additionnelle n'a été utilisée dans le local 2. Enfin, dans le local 1 (LCMA), une source de bruit additionnelle a été mise en œuvre durant la mesure sur un des matériaux (RPL) afin de potentiellement perturber la mesure réalisée. Le niveau de la source de bruit additionnelle était réglé de sorte à être au moins égal à celui de la source utilisée pour les mesures. Ainsi, il résultait une situation où le rapport signal sur bruit était généralement égal ou inférieur à 0 dB. Cela a été confirmé par le fait que le niveau de bruit mesuré avec la source de bruit additionnelle était toujours supérieur de 2 à 3 dB sur la bande des tiers d'octave 200 - 5000 Hz (avec des écarts atteignant 7 à 8 dB pour les bandes de tiers d'octave 500 et 630 Hz). Le signal sonore généré par la source de type monopôle dans le local au microphone de contrôle est donc inférieur à celui du bruit ambiant, et les mesures sont alors polluées par du bruit parasite. L'utilisation d'un signal de type 'sinus glissant' permet d'améliorer le rapport signal sur bruit au niveau des microphones de mesure (positionnés au-dessus du matériau).

**Tableau 3 – Temps de réverbération (en seconde) par bande d'octave mesuré dans chaque local**

Fréquence	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
<b>Local 1 (LCMA)</b>	0,47	0,37	0,47	0,32	0,46	0,39
<b>Local 2 (Atelier)</b>	Non estimé		1,1	1,29	0,83	0,66

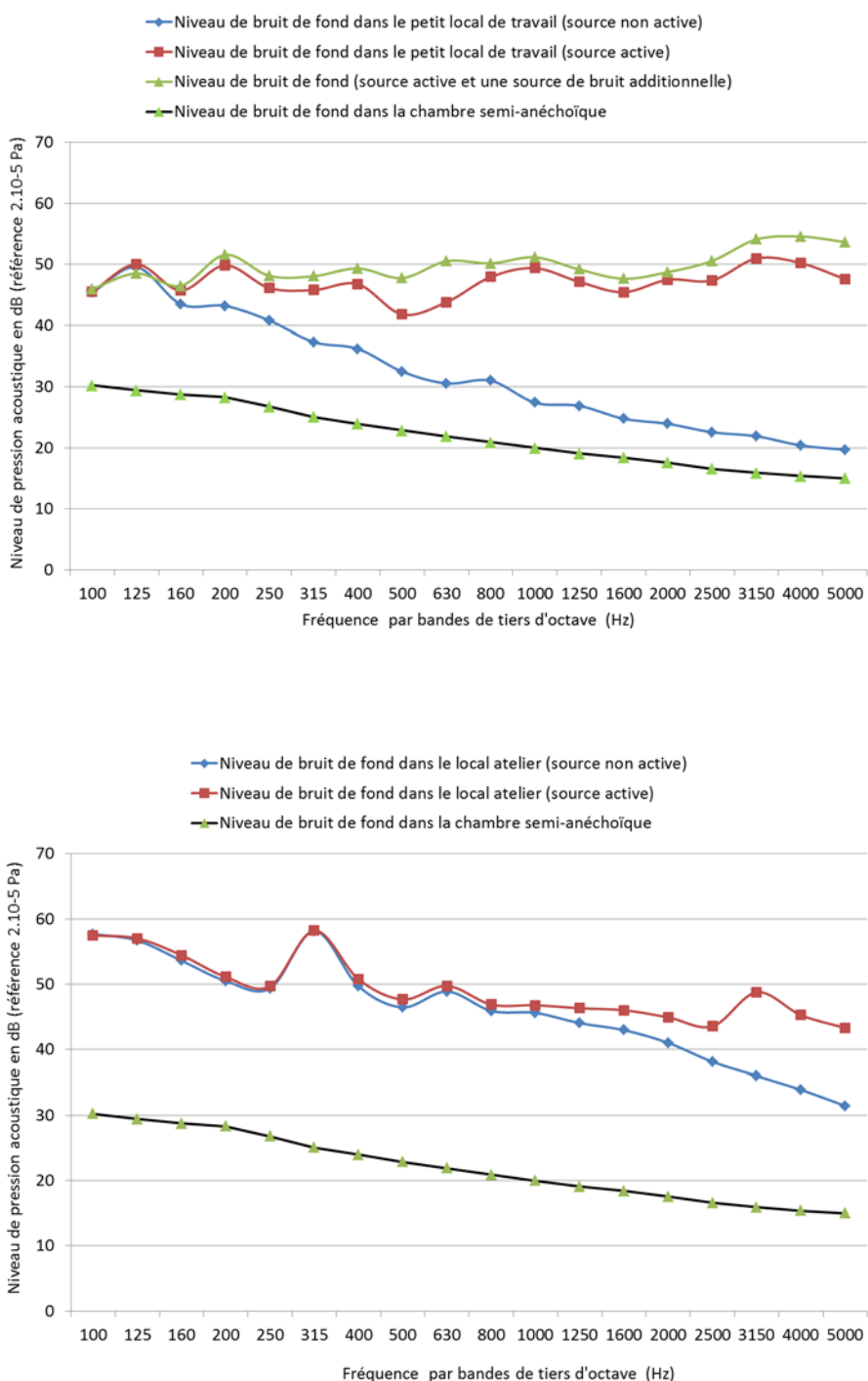


Figure 15 – Mesures des niveaux de bruit par le microphone de contrôle dans le petit local de travail (en haut) et dans l’atelier (en bas) - une comparaison avec le niveau de bruit de fond dans la chambre semi-anéchoïque est fournie dans chaque cas.

### 4.5.3 Description des mesures en laboratoire pour des matériaux dans des conditions de montage spécifiques

Afin de diversifier l'étude et de limiter certaines contraintes techniques, il a été choisi de tester deux conditions de montage pour deux des matériaux plutôt que d'en tester un seul dans trois conditions de montage comme initialement envisagé. De plus, les conditions de montage initialement considérées pour la laine de verre n'étaient pas usuelles, alors que celles finalement testées sont très courantes (film de protection, lame d'air).

La tuile de plafond a été testée comme décrit dans la sous-section 4.6.1 et elle l'a ensuite été en présence d'une lame d'air en arrière. Cet espace correspond au plénum qui, dans le domaine de la construction, décrit l'espace entre le faux-plafond (la tuile) et la dalle rigide du niveau supérieur. Le montage effectué suit les spécifications de la norme (ASTM, 2005) pour un montage de type E (montage E-200 précisément, où le chiffre 200 indique la profondeur effective de montage incluant l'épaisseur de l'échantillon, Figure 16). La Figure 17 présente les montages en chambre réverbérante et en chambre semi-anéchoïque. Dans le cas des mesures en chambre réverbérante, la surface testée était de 6,7 m<sup>2</sup> (c'est-à-dire 72 pieds carrés, soit l'équivalent de 9 tuiles dont la surface unitaire est de 8 pieds carrés). Dans le cas des mesures pour l'approche développée, 2 tuiles ont été utilisées.

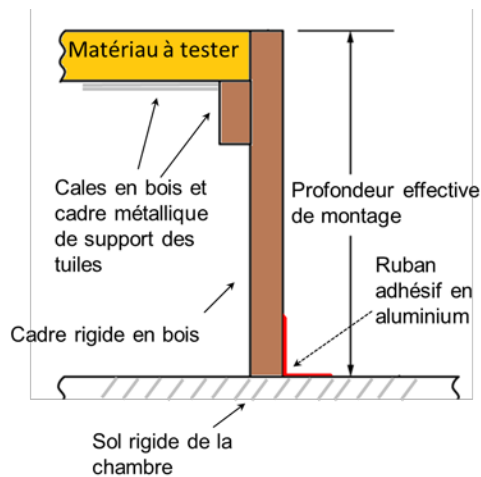


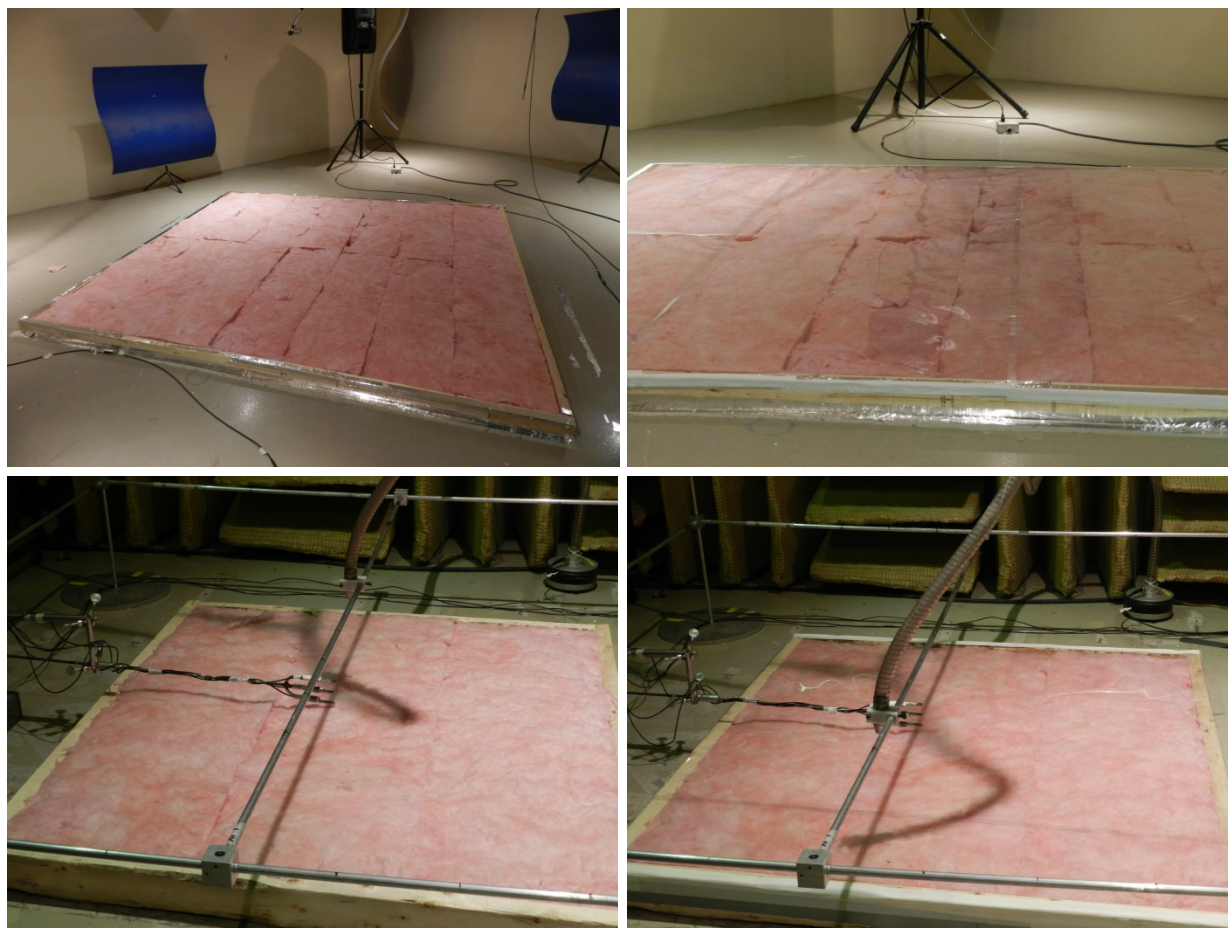
Figure 16 – Montage de type E des échantillons en chambre réverbérante.





**Figure 17 – Montage de la tuile de plafond pour la mesure d’un montage de type E-200 en chambre réverbérante (à droite), et pour la méthode proposée (à droite).**

La laine de verre a été testée avec un film protecteur en mylar, souvent utilisé afin de limiter les projections et l’effet de l’humidité sur le matériau. L’épaisseur nominale de 0,003 pouce (soit  $7,6 \times 10^{-5}$  m, la mesure fournissant une valeur de  $7,7 \times 10^{-5}$  m) a été choisie pour des questions de robustesse mécanique. La masse volumique a été estimée expérimentalement sur deux échantillons carrés de surfaces différentes ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$  et  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ ), fournissant une valeur finale de  $1380 \text{ kg/m}^3$ . Il est précisé qu’un montage avec film protecteur en mylar et tôle perforée a été envisagé pour être finalement non testé pour des questions techniques (difficultés de mettre en œuvre et de soutenir mécaniquement la surface de  $8 \times 9$  pieds carrés nécessaire pour respecter la norme en chambre réverbérante). Des photographies des montages réalisés dans des conditions avec et sans mylar dans le cas de la mesure en chambre réverbérante et pour l’approche proposée sont exposées à la Figure 18. Dans le cas de la mesure en chambre réverbérante, 14 nattes de laine de verre ont été utilisées par rapport à 3 dans le cas de l’approche proposée (chaque natte a une dimension de 1194 mm par 381 mm, soit 47 pouces par 5 pouces). Tout comme celles du matériau, les dimensions de la protection en mylar différaient fortement entre les deux tests.



**Figure 18 – Montage de la laine de verre pour la mesure en chambre réverbérante dans des conditions de montage standards (au sol et périmètre clos par un cadre de bois, en haut, à gauche), et avec ajout d'un film protecteur en mylar (en haut, à droite) – Mesures utilisant la méthode proposée avec et sans film protecteur en mylar (en bas, à gauche et à droite, respectivement).**

## 5. RÉSULTATS

### 5.1 Partie numérique

#### 5.1.1 Calculs de référence (matériau d'étendue latérale infinie)

La Figure 19 présente l'ensemble des résultats de simulation obtenus par la méthode des matrices de transfert pour le cas d'un matériau considéré infini, placé sur un fond rigide et soumis à une excitation champ diffus idéale (angle limite de 90 degrés). Il est notable qu'une gamme relativement large de valeurs de coefficients d'absorption est couverte avec le choix de matériaux réalisés. Les valeurs des paramètres utilisés pour les simulations sont issues des Tableau 1 et Tableau 2. Il est rappelé qu'étant donné qu'aucun effet de taille ni de bord n'est pris en compte, les valeurs des coefficients d'absorption sont toujours inférieures ou égales à l'unité.

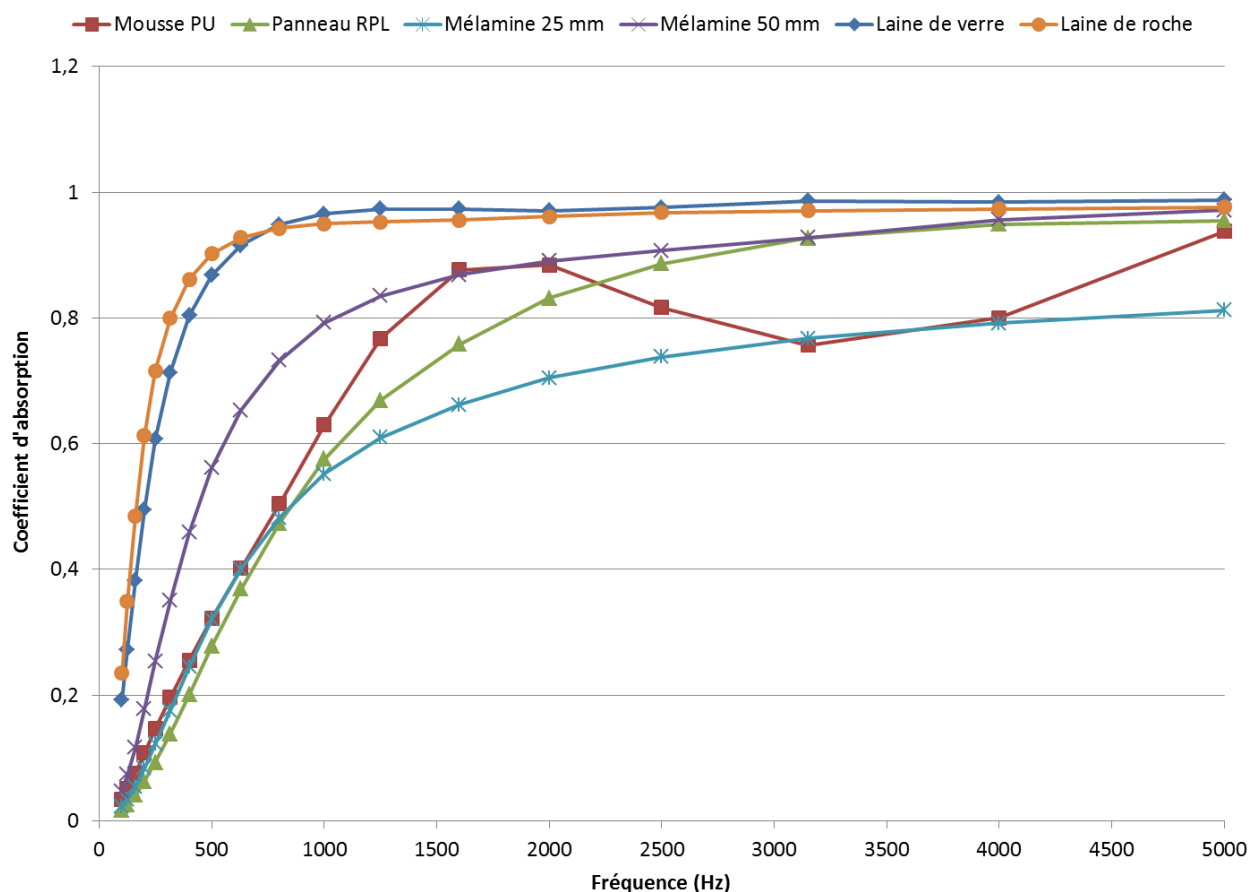
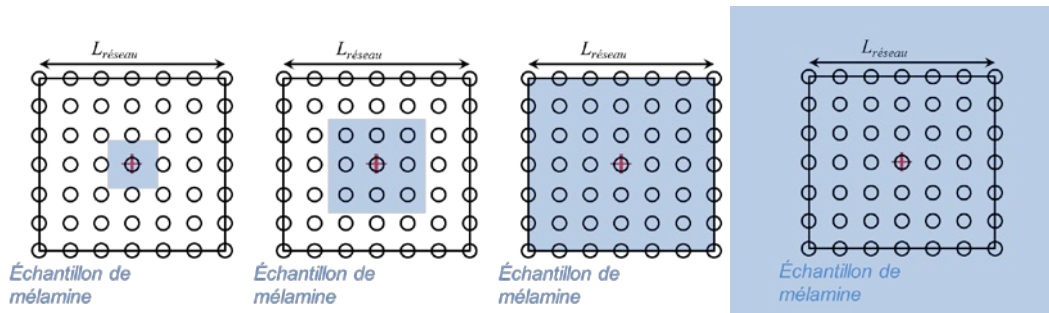


Figure 19 – Bilan des résultats de simulation obtenus pour l'ensemble des matériaux considérés dans l'étude (à l'exception de la tuile de plafond).

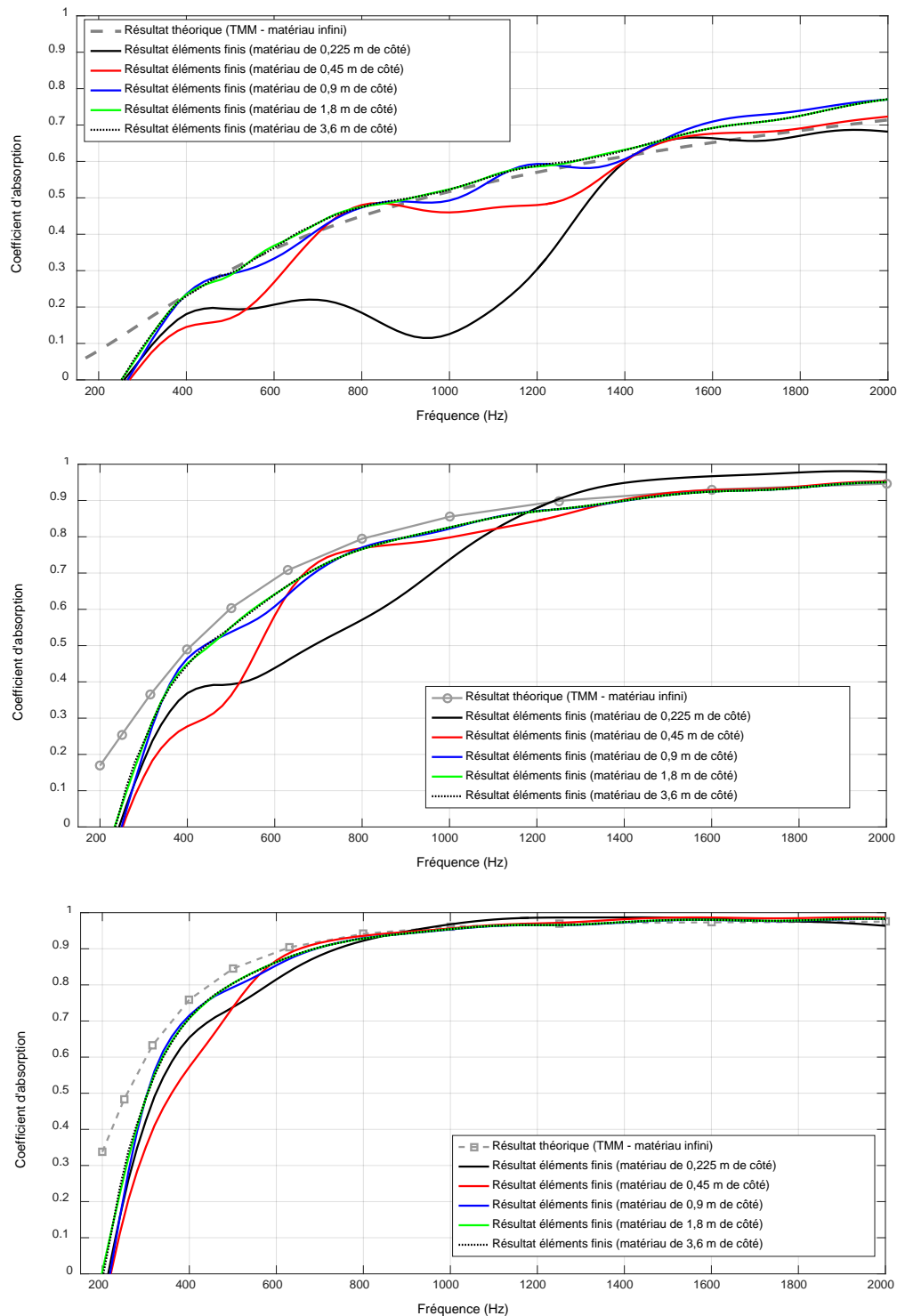
### 5.1.2 Effets de la taille de l'échantillon

Les résultats fournis dans la section précédente considèrent un matériau de dimensions infinies, ce qui est peu réaliste dans de nombreux cas expérimentaux. Néanmoins, ces résultats sont ceux qui devraient théoriquement être obtenus par une méthodologie de laboratoire insensible aux effets de taille ou de bords, et qui permet la mesure sous excitation champ diffus idéale. Les simulations numériques par éléments finis décrites à la sous-section 4.4.1 ont permis de simuler complètement la démarche expérimentale proposée dans la sous-section 4.2, en partant de simulations numériques pour les fonctions de transfert  $H(\theta_i, \omega)$ . Ces simulations ont eu premièrement pour objet de comprendre quels effets la taille forcement finie d'un échantillon réel pouvaient induire dans l'approche proposée. Les dimensions du réseau utilisées dans Robin *et al.* (2014) ont été reprises, soit 7 x 7 sources, espacées de 15 cm et une source placée à une hauteur de 20 cm par rapport à la surface du matériau. Des échantillons carrés de mousse de mélamine de 3 épaisseurs ont été considérés (25 mm, 50 mm et 75 mm), pour lesquels la dimension latérale était variable (0,225 m, 0,45 m, 0,9 m, 1,8 m et 3,6 m). Par rapport à la dimension latérale fixe du réseau de sources  $L_{\text{réseau}}$  valant 0,9 m, les échantillons résultants étaient respectivement de dimensions  $L_{\text{réseau}}/4$ ,  $L_{\text{réseau}}/2$ ,  $L_{\text{réseau}}$ ,  $L_{\text{réseau}} \times 2$  et  $L_{\text{réseau}} \times 4$  (voir Figure 20 pour les quatre premiers cas évoqués).



**Figure 20 – Illustration du rapport de la taille fixe du réseau des sources par rapport à la taille variable de l'échantillon en gris (de gauche à droite,  $L_{\text{réseau}}/4$ ,  $L_{\text{réseau}}/2$ ,  $L_{\text{réseau}}$ , et  $L_{\text{réseau}} \times 2$ ).**

Les résultats pour les épaisseurs de mousse de mélamine de 25 mm (1 pouce), 50 mm (2 pouces) et 75 mm (3 pouces) sont affichés à la Figure 21, et ont fait l'objet d'une présentation lors d'un congrès (Robin *et al.*, 2016a). Deux résultats importants émergent clairement : (1) Si l'échantillon est de dimensions inférieures à celles de l'antenne des sources, les effets de taille sont alors très prononcés. Lorsque l'échantillon est de dimensions égales ou supérieures à celles de l'antenne des sources (0,9 m dans ce cas), l'adéquation avec les résultats obtenus par la simulation TMM de référence est alors très satisfaisante; (2) L'épaisseur de l'échantillon a une influence évidente sur les valeurs calculées de coefficient d'absorption (l'agrément avec les calculs de référence TMM est meilleur lorsque l'épaisseur, et donc l'absorption de l'échantillon, augmente).



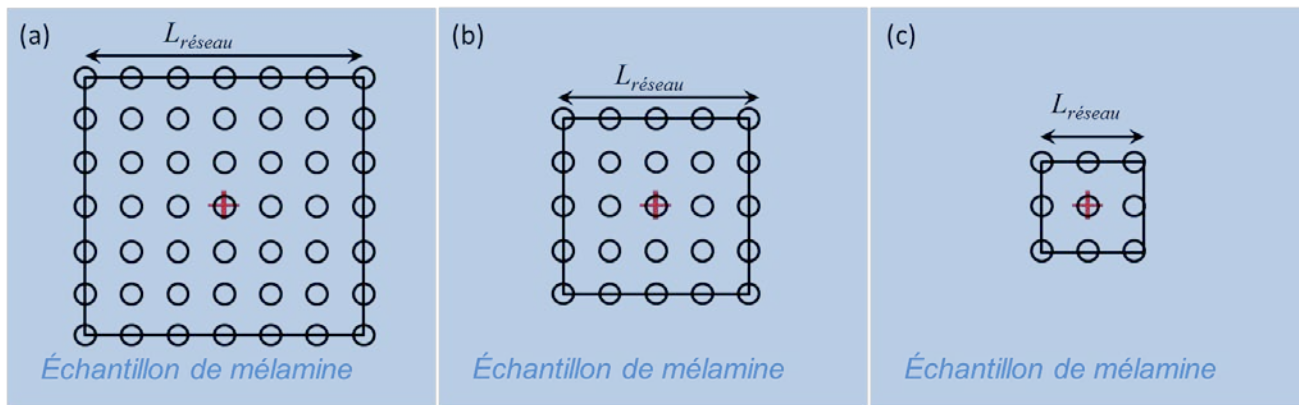
**Figure 21 – Cas d’une mousse de mélamine d’épaisseur 1 pouce (en haut), 2 pouces (au centre) et 3 pouces (en bas) : résultats comparatifs entre un calcul théorique pour un matériau infini, et des dimensions variables d’échantillons pour l’approche développée (calcul de type éléments finis) – Adaptée de Robin *et al.*, (2016a).**

Ces résultats sont conformes à ceux vus dans la littérature, et illustrent bien des effets de taille importants dans le cas des mesures réalisées sur des petits échantillons, avec des configurations utilisant une seule source (Hirosawa *et al.*, 2009; Brandao, Lenzi et Cordioli, 2012) ou un réseau de sources, pour réaliser une synthèse de champs sonores (Yankai *et al.*, 2016).

Par ailleurs, les résultats de la Figure 21 illustrent les limites du modèle de réflexion sphérique utilisé dans l'approche, qui entraînent des valeurs négatives du coefficient d'absorption aux basses fréquences. Un écart entre les valeurs théoriques et les résultats éléments finis est également parfois notable en dessous d'une fréquence de 500 Hz environ.

### 5.1.3 Effets de la largeur et de la hauteur du réseau de sources

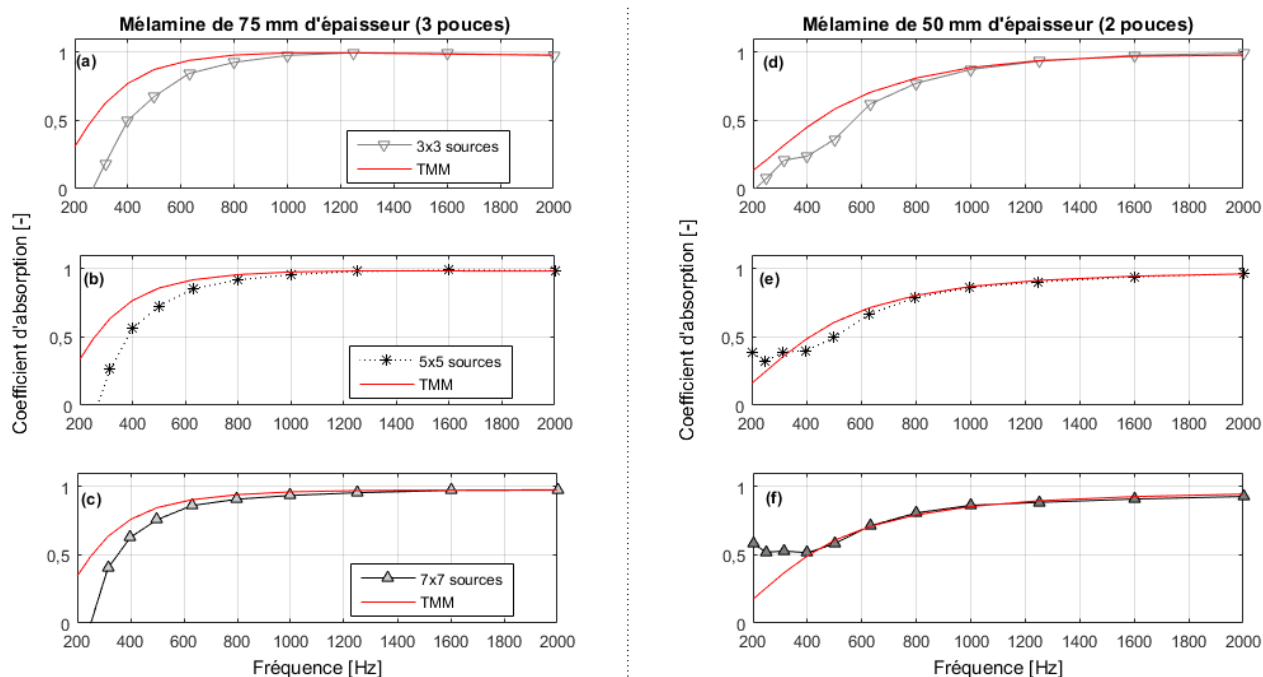
La majorité des résultats présentés dans cette sous-section ont fait l'objet de deux présentations lors de congrès (Robin *et al.*, 2015; Robin *et al.*, 2016b). Une première étude a consisté à recourir à la base de données expérimentale utilisée dans Robin *et al.* (2014), mais sans simulations numériques. Il est précisé que ces mesures avaient alors été réalisées sur une mousse de mélamine aux propriétés sensiblement différentes de celles des matériaux utilisés dans la présente étude. L'idée est de passer successivement d'une configuration de 7 x 7 sources à des configurations de 5 x 5 sources, puis de 3 x 3 sources (pour une hauteur source-matériau fixe de 20 cm). Sachant qu'il y a un espacement régulier entre chaque source, le nombre variable de sources constitue finalement un réseau de surface plus ou moins grande. Les réseaux de sources considérés avaient alors des dimensions latérales qui variaient de 0,9 m à 0,6 m, puis finalement à 0,3 m (Figure 22). Les dimensions des échantillons testés sont restées fixes, et toujours plus grandes que celles du réseau, en accord avec le résultat précédemment énoncé.



**Figure 22 – Illustration de la réduction de la taille du réseau avec une taille d'échantillon fixe dans une phase de post-traitement des données - Adaptée de Robin *et al.*, (2015).**

Les résultats obtenus sont affichés à la Figure 23. Lorsque la dimension du réseau de sources est augmentée (en passant successivement de 3 x 3, à 5 x 5 puis à 7 x 7 sources), la conformité entre les résultats expérimentaux et numériques (simulation TMM) est toujours très satisfaisante au-delà de la fréquence la plus basse pouvant être théoriquement reproduite (c'est-à-dire au-dessus de la bande de tiers d'octave 1000 Hz pour le cas 3 x 3 sources, au-

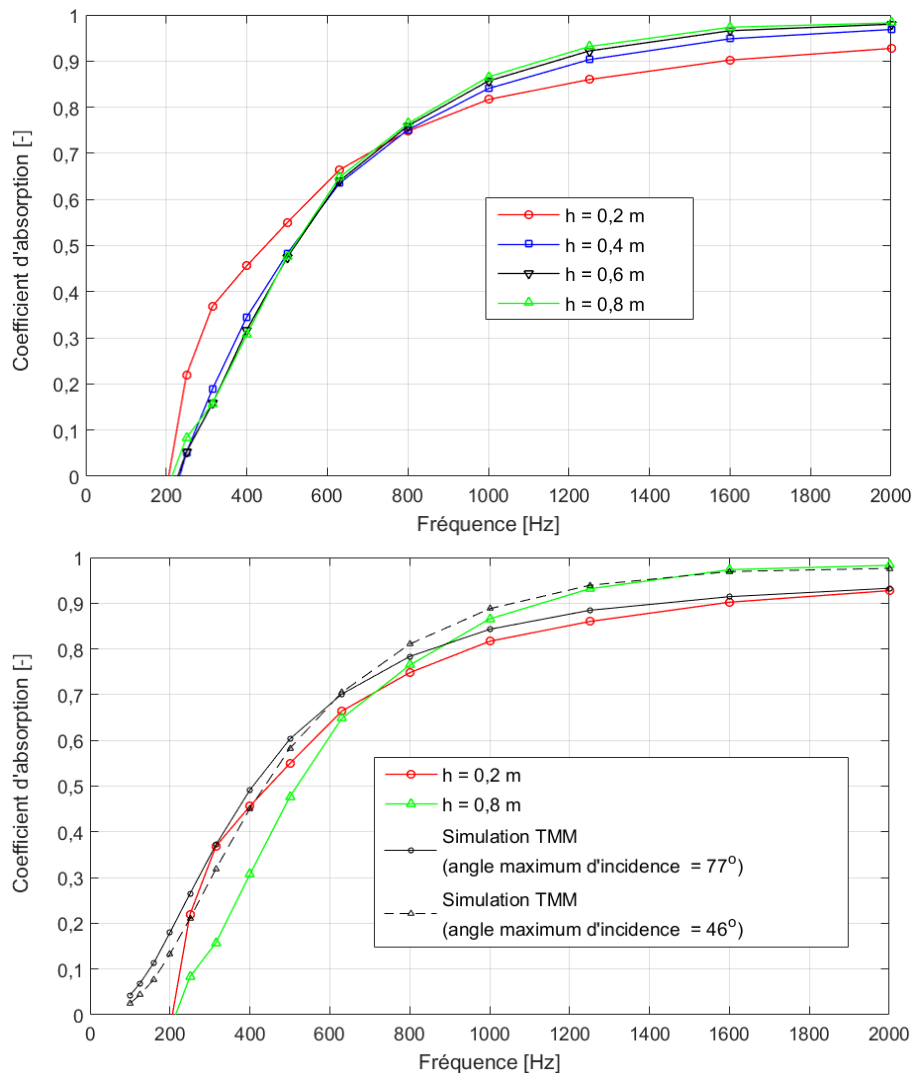
dessus de la bande de tiers d'octave 630 Hz pour le cas 5 x 5 sources, et au-dessus de la bande de tiers d'octave 400 Hz pour le cas 7 x 7 sources). En effet, la dimension latérale du réseau impose théoriquement une limitation à la plus grande longueur d'onde (ou plus basse fréquence) pouvant être convenablement reproduite (correspondant finalement à  $L_{réseau}$ ). Avec une vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'air  $c_0$  égale à 345 m/s, les fréquences basses correspondantes ( $=c_0/L_{réseau}$ ) pour les cas 3 x 3, 5 x 5 et 7 x 7 sources sont égales à 1150 Hz, 575 Hz et 383 Hz, respectivement (nous verrons dans la suite des résultats présentés que cette limitation basse fréquence dans le cas du réseau 7 x 7 sources peut finalement être étendue). Le phénomène plus important qui est alors illustré est que la troncature du réseau nécessite une diminution de la valeur maximale d'angle d'incidence contenu dans la base de données générée (on rappelle que les microphones étaient situés au centre du matériau, position illustrée par la croix rouge à la Figure 22). L'angle d'incidence maximal  $\theta_{max}$  vaut approximativement 72 degrés dans le cas du réseau 7 x 7 sources (environ 64 degrés pour le cas 5 x 5 sources et 46 degrés pour le cas 3 x 3 sources). Il est important de noter que les résultats des simulations TMM ont été obtenus pour des valeurs identiques d'angle d'incidence maximal, donc le calcul suppose des champs diffus d'angle d'incidence maximum de 72 degrés, 64 degrés et 46 degrés. Également, ces calculs diffèrent de ceux considérés comme référence, car ces derniers impliquent un angle limite de 90 degrés.



**Figure 23 – Coefficients d’absorption pour une mousse de mélamine de 75 mm d’épaisseur (à gauche) et de 50 mm d’épaisseur (à droite) pour différentes tailles de réseau de sources. Le coefficient d’absorption pour la référence TMM est systématiquement indiqué (trait rouge continu) – Adaptée de Robin *et al.*, (2015).**

Une seconde étude a été réalisée, dans laquelle un échantillon carré de mousse de mélamine de 50 mm d’épaisseur avec un côté de 1,8 m a été considéré. L’antenne synthétique des sources a alors été simulée numériquement. Elle était composée de 9 x 9 sources séparées l’une de l’autre par 0,15 m, ce qui résultait en un réseau de dimension latérale  $L_{réseau}$  de 1,2 m.

La hauteur entre le réseau de sources et la surface du matériau était variable entre 0,2 m et 0,8 m, avec un incrément de 0,2 m. Lorsque la hauteur du réseau de sources augmentait, la valeur maximale d'angle d'incidence incluse dans la base de données de coefficients de réflexion diminuait, les hauteurs de 0,2 m, 0,4 m, 0,6 m et 0,8 m correspondant alors à des angles d'incidence maximale de 77, 64, 54 et 46 degrés, respectivement. Les résultats illustrés à la Figure 24 (en haut) montrent que lorsque la hauteur  $h$  du réseau augmente, les coefficients d'absorption décroissent en dessous d'une fréquence de 800 Hz approximativement, tandis que les valeurs obtenues au-dessus de cette même fréquence augmentent continûment. C'est un résultat typiquement attendu pour l'absorption d'un matériau sous une excitation de type champ acoustique diffus lorsque l'angle d'incidence maximal de cette excitation varie.



**Figure 24 – Effets de la hauteur du réseau de sources sur le coefficient d'absorption obtenu (en haut) – Comparaison des deux hauteurs minimale et maximale avec des calculs de référence TMM pour les angles d'incidence maximale correspondants (en bas) – Adaptée de Robin *et al.*, (2016b).**



Des comparaisons entre les résultats obtenus avec l'antenne synthétique simulée par calculs éléments finis et des calculs TMM sont fournies à la Figure 24 (en bas). Au-dessus d'une fréquence de 800 Hz, l'adéquation entre les résultats TMM (impliquant des angles limites différents de celui qui devrait théoriquement être atteint pour un champ acoustique diffus, soit 90 degrés) et les résultats éléments finis est très satisfaisante et illustre bien l'effet de la variation de cet angle. La différence plus importante observée en basses fréquences dans le cas de la plus grande hauteur n'a pas été expliquée.

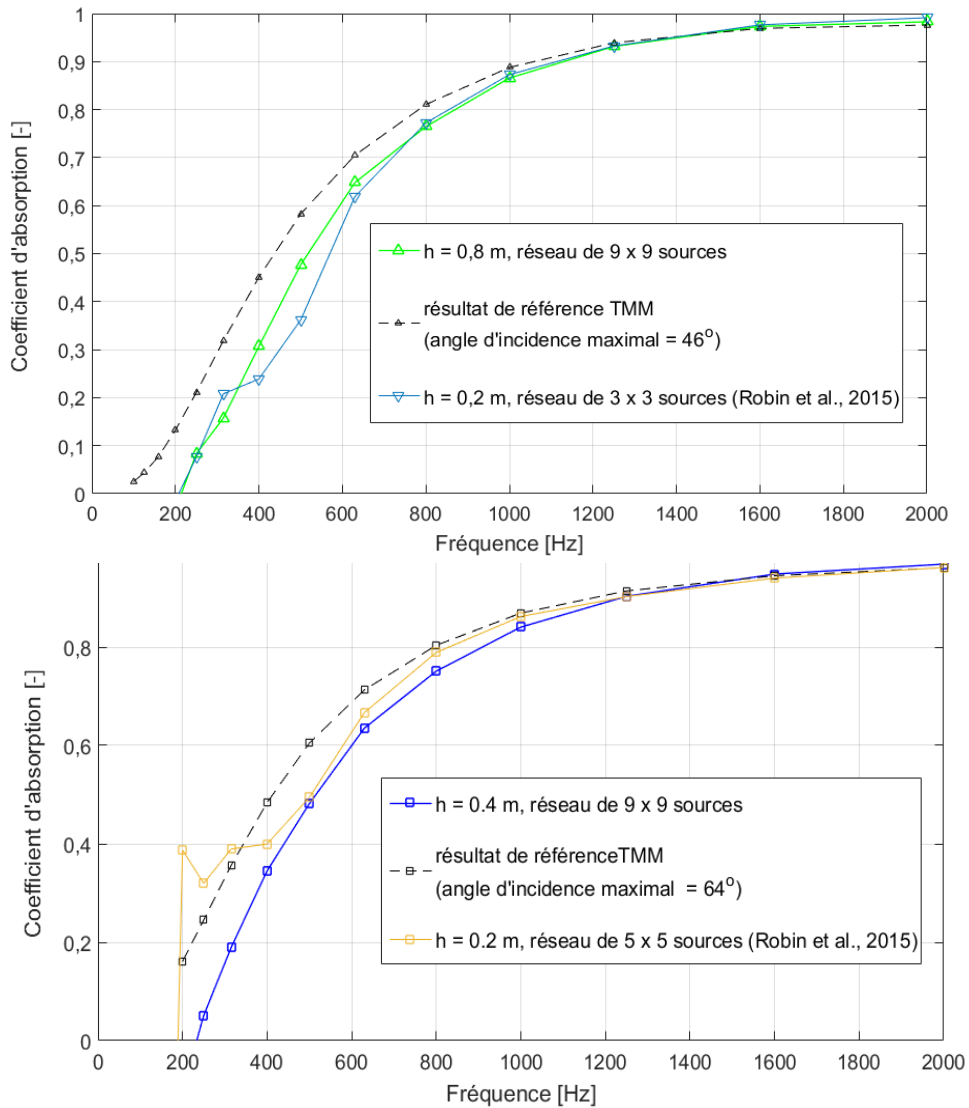
Une comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus précédemment (Robin *et al.*, 2015) a finalement été entreprise. Le cas de réseaux de 3 x 3 et 5 x 5 sources, à une hauteur  $h = 20$  cm a été considéré. Il mène à des angles d'incidence similaires à ceux obtenus dans le cas d'un réseau de 9 x 9 sources positionné à des hauteurs de 0,8 m et 0,4 m (angles de 46 et 64 degrés). Les résultats sont présentés à la Figure 25. Il est intéressant de noter que, pour une largeur fixée de réseau, l'augmentation de la hauteur de ce dernier fournit le même résultat que celui révélé lorsque la largeur du réseau est réduite pour une hauteur fixée : la valeur de l'angle d'incidence maximal inclus dans la base de données diminue. Cela se traduit par des estimations de coefficient d'absorption semblables, comme ceux affichés à la Figure 25. Il est important de préciser que les résultats présentés à la Figure 24 sont uniquement issus de simulations numériques, alors que les résultats présentés à la Figure 25 comparent les résultats issus des simulations numériques à ceux obtenus grâce à des tests expérimentaux.

#### **5.1.4 Bilan**

L'ensemble des résultats numériques obtenus ont permis de dégager plusieurs règles simples de dimensionnement du réseau de sources et des principaux critères à respecter pour que la mesure permette d'être au plus proche du calcul de référence.

Tout d'abord, l'échantillon à tester devrait être au moins aussi grand que l'antenne utilisée. Si ce critère n'est pas respecté, des effets de bord notables seront visibles et vont fortement biaiser les résultats. Si ce critère est respecté, les effets de taille et de bords sont très faibles selon les comparaisons effectuées avec les calculs de référence.

Ensuite, un compromis nécessaire apparaît concernant le rapport « hauteur sur largeur » du réseau de sources. En effet, élargir le réseau permet théoriquement de reproduire des angles d'incidence plus élevés, mais cela n'améliore pas substantiellement les résultats obtenus. De plus, cet élargissement implique des échantillons plus grands suivant le résultat précédemment énoncé. Augmenter la hauteur des sources pour potentiellement améliorer la problématique vue en basses fréquences (en partie due à la proximité de la source) a finalement un effet adverse en réduisant l'angle d'incidence maximal. Les résultats expérimentaux ou numériques obtenus avec la procédure proposée sont cohérents avec ceux issus des simulations pour un matériau infini, en considérant la limitation de l'angle d'incidence maximal. Néanmoins, cette étude vise à remplacer la méthode de la chambre réverbérante (intégrant des angles jusqu'à 78 degrés minimalement et 90 degrés idéalement) et donc cette limitation de l'angle due à un réseau placé plus haut ne nous apparaît pas intéressante dans la suite de l'étude (même si elle est intéressante pour la vérification des tendances dues à l'éloignement du réseau de sources).



**Figure 25 – Effets de la hauteur du réseau sur le coefficient d’absorption obtenu (en haut) – Comparaison pour les deux hauteurs minimale et maximale avec les résultats de référence TMM, pour les angles d’incidence maximale correspondants (en bas) – Adaptée de Robin *et al.*, (2016b).**

Il est précisé ici que des réseaux de dimension plus importante que 9 x 9 sources ont été testés (jusqu’à 13 x 13), ainsi que des réseaux plus denses (séparation de 10 cm au lieu de 15 cm). Ces variations n’ayant apporté aucun gain significatif, les résultats correspondants ne sont pas présentés, par souci de concision.

Enfin, la recommandation pour la configuration expérimentale est un réseau de 7 x 7 sources, espacées de 15 cm, à une hauteur de 20 cm de la surface de l’échantillon. Les expériences suivantes sont basées sur cette configuration. L’effort sur les améliorations dans le

domaine des basses fréquences s'est alors porté sur l'utilisation de la technique de l'inversion des microphones (sous-section 4.5.2) et ultérieurement sur l'utilisation d'un post-traitement amélioré (sous-sections 4.3 et 5.3.2).

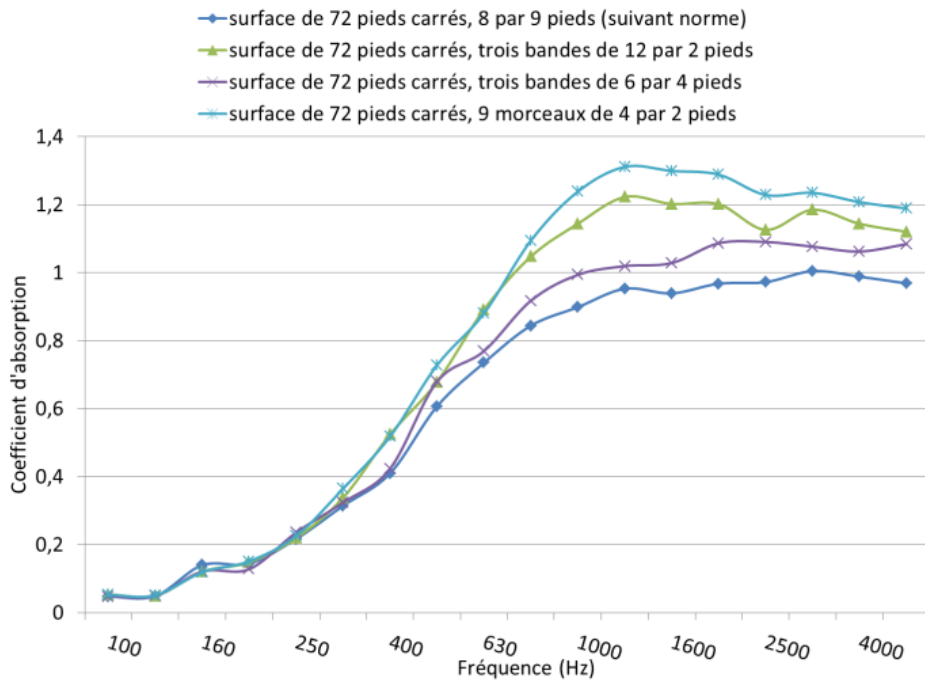
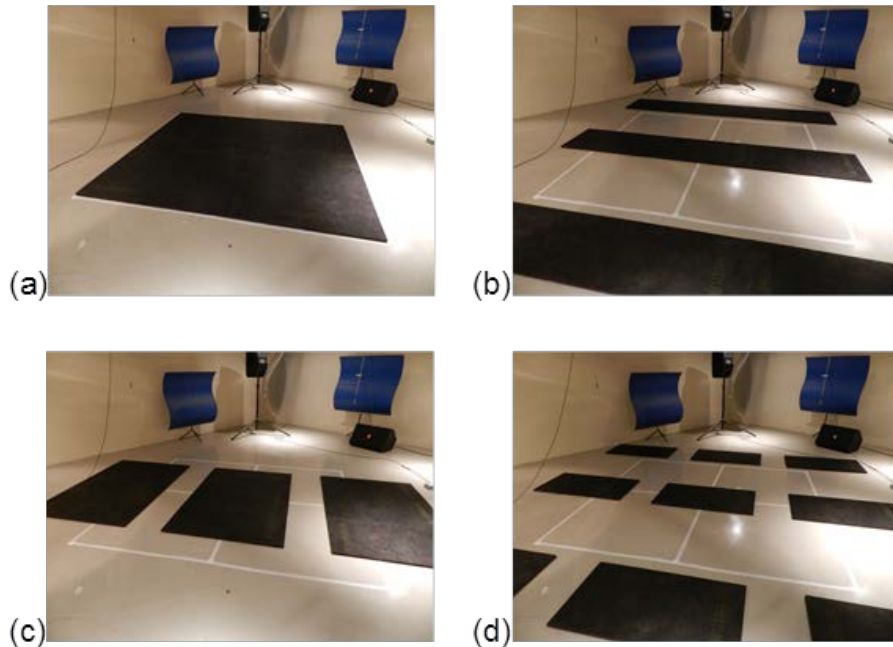
## **5.2 Partie expérimentale**

### **5.2.1 Matériaux sans conditions de montage particulières et mesures en laboratoire : résultats préliminaires de l'approche standard**

Une étude préliminaire a tout d'abord été menée sur un matériau pour vérifier si les résultats issus de la littérature concernant les effets de bord et de taille étaient semblables à ceux de la présente étude. Cette étude préliminaire semblait nécessaire, car un des avantages pressentis de la méthode proposée est de pouvoir tester des échantillons de dimensions réduites. Ainsi, il a été vérifié que la méthode de la chambre réverbérante ne permet pas de tester des échantillons de dimensions réduites. Ceci permet de démontrer que cette possibilité est clairement distinctive de la méthode proposée dans la présente étude.

Le matériau RPL a été choisi pour sa facilité de manipulation et de mise en œuvre. Un premier test a consisté en une mesure sur un échantillon de 72 pieds carrés, positionné selon quatre répartitions : (1) celle suggérée par la norme ASTM-C423 (soit un rectangle de 8 par 9 pieds carrés, ou environ 2,4 par 2,7 mètres carrés); (2) celle en trois bandes de 12 par 2 pieds carrés, ou environ 3,6 par 0,6 mètre carré; (3) celle en trois bandes de 6 par 4 pieds carrés, ou environ 1,8 par 1,2 mètre carré; (4) celle en 9 panneaux de 4 par 2 pieds carrés, ou environ 1,2 par 0,6 mètre carré. Des photos des configurations ainsi que les résultats correspondants sont présentés à la Figure 26. Un second test consistait à prendre une mesure sur des échantillons de surface croissante (de 8 à 98 pieds carrés, par pas croissant de 8 pieds carrés), centrés dans la salle. Les photos et les résultats relatifs à quelques-unes de ces configurations sont affichés à la Figure 27.

Pour le premier test, des différences apparaissent dès 315 Hz, et ces différences sont d'autant plus marquées que la surface est sous-divisée (la longueur totale des bords augmentant). Pour le second test, et spécialement à une fréquence supérieure à 630 Hz, les effets de taille sont spécialement marqués pour la plus petite surface. Les effets demeurent importants tant qu'une surface de 64 pieds carrés n'est pas atteinte, surface à partir de laquelle les résultats montrent une certaine constance. Ces tests confirment qu'il n'est pas envisageable de tester des échantillons de dimensions réduites ou par « blocs », selon la méthode de la chambre réverbérante.



**Figure 26 – (en haut) Photos de tests préliminaires sur l’évaluation de l’effet de bord (pour une surface d’échantillon fixe de 72 pieds carrés, mais avec répartition variable); (a) disposition suggérée par la norme ASTM-C423, 8 par 9 pieds carrés; (b) test de 3 bandes de 12 par 2 pieds carrés; (c) test de 3 bandes de 6 par 4 pieds carrés; (d) test de 9 panneaux de 4 par 2 pieds carrés – (en bas) Résultats des tests préliminaires sur l’estimation de l’effet de bord.**

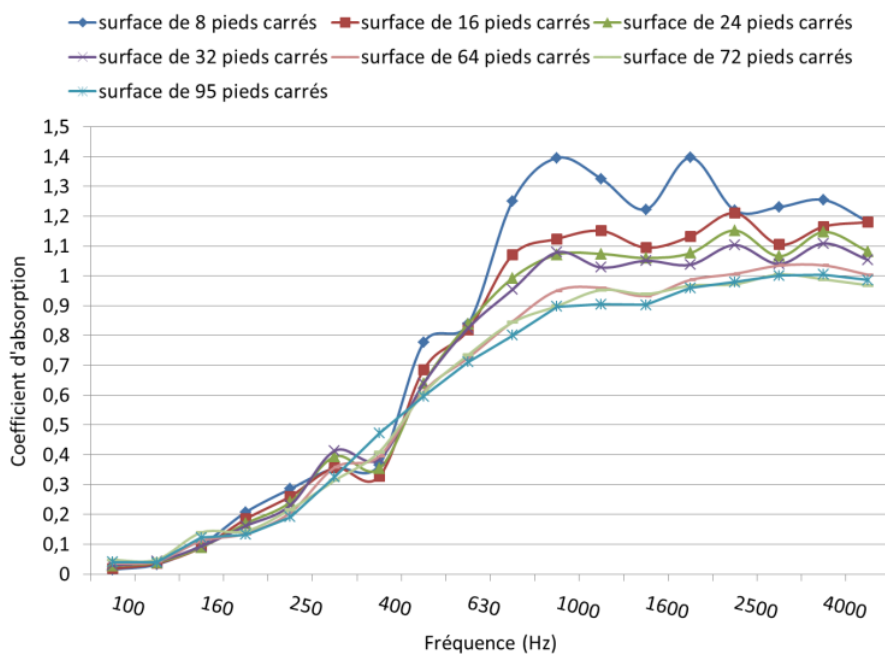
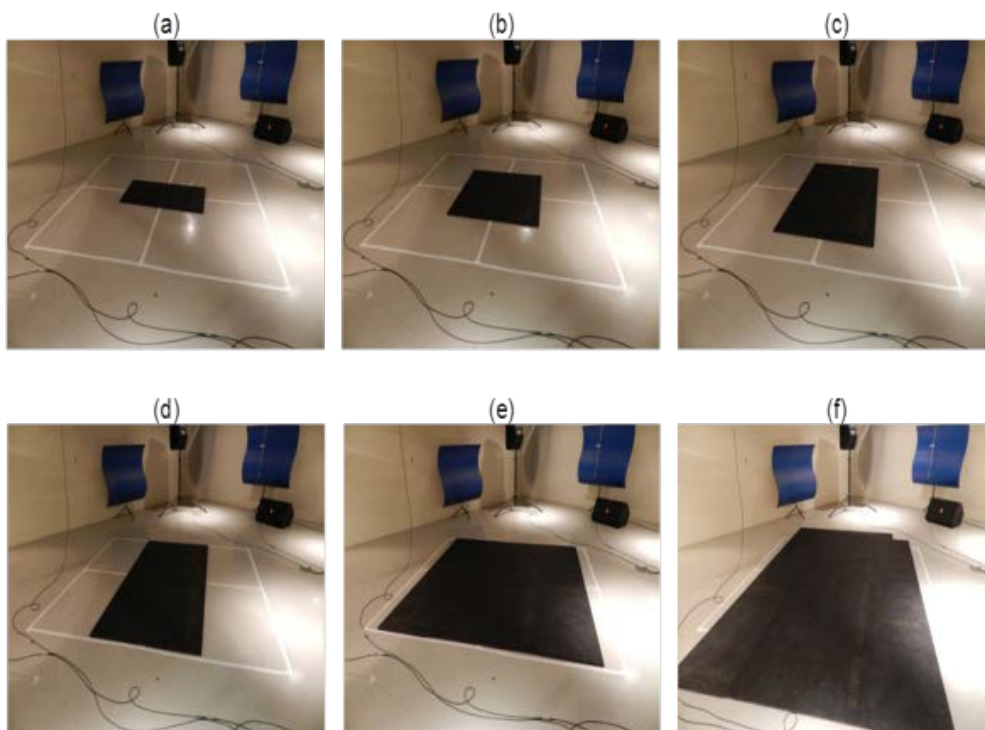


Figure 27 – (en haut) Photos de tests préliminaires concernant l’estimation de l’effet de taille du matériau RPL; (a) surface de 8 pieds carrés; (b) surface de 16 pieds carrés; (c) surface de 24 pieds carrés; (d) surface de 30 pieds carrés; (e) surface de 64 pieds carrés; (f) surface de 96 pieds carrés – (en bas) résultats des tests.

### **5.2.2 Matériaux sans conditions de montage particulières et mesures en laboratoire : résultats comparatifs de l'approche standard et de l'approche développée**

En préambule à la présentation des résultats comparatifs de l'approche standard et de l'approche développée, l'effet apporté par la méthode proposée sur obtention du coefficient d'absorption sous un champ diffus synthétisé à une étape de post-traitement est illustré à la Figure 28. Dans cette figure, les coefficients d'absorption obtenus pour trois positions des sources sont présentés en haut suivant la méthode décrite dans la sous-section 4.2.1. Le matériau testé est la mousse de mélamine (Robin *et al.*, 2014). Les trois positions de sources sont identifiées par un code couleur sur un schéma de positionnement : une source au centre du matériau (au-dessus des microphones, soit un cas en incidence normale, notée « source centre », en rouge); une source au centre d'un côté du réseau de sources (notée « source côté », en bleu); une source dans un coin du réseau de sources, correspondant au cas de l'angle d'incidence le plus élevé (notée « source coin », en vert). Les résultats sont présentés à partir d'une fréquence de 200 Hz, le bruit de mesure étant important en dessous de cette fréquence. Les trois positions des sources fournissent des valeurs d'absorption clairement différentes sur l'ensemble de la gamme fréquentielle considérée. Avec l'augmentation de l'angle d'incidence, une tendance classique est assez bien retrouvée, à savoir que l'absorption acoustique tend à augmenter en basses fréquences et à diminuer en hautes fréquences.

Les résultats affichés au bas de la Figure 28 illustrent le résultat de la procédure décrite à la sous-section 4.2.2 qui utilise alors la base de données constituée par les coefficients de réflexion obtenus aux 49 positions de sources (synthèse en phase de post-traitement de l'absorption sous un champ diffus). La différence avec les résultats obtenus pour des positions individuelles de sources est notable. L'effet de lissage par moyennage sur les 49 positions est notable et l'intérêt de la procédure de synthèse est clairement illustré. À l'égard des mesures discrètes très variables (des mesures réalisées à des positions de sources symétriques peuvent montrer une certaine variabilité), leur recombinaison à une phase de post-traitement permet des calculs spécifiques (champ excitateur avec des caractéristiques définies) et qui bénéficieront de l'effet de la synthèse.

Les résultats des mesures en chambre réverbérante (échantillons de surface supérieure ou égale à 6,7 m<sup>2</sup>, soit 72 pieds carrés, avec montage encadré) et pour l'approche développée (échantillons de surface variant entre 1,4 et 1,7 m<sup>2</sup>, sans montage particulier) sont tout d'abord présentés de manière séparée à la Figure 29 et à la Figure 30, respectivement.

Au regard de la chambre réverbérante, il est notable que les résultats des mesures pour les deux types de laine (de verre et de roche) sont surévalués, puisqu'ils sont supérieurs ou égaux à 1 au-dessus d'une fréquence de 250 Hz. Les résultats issus de la mesure suivant l'approche développée affichent des valeurs toujours inférieures à l'unité, mais des divergences en basses fréquences apparaissent, malgré la compensation de l'erreur de phase dans la mesure par permutation du triplet microphonique. Elles semblent également liées à l'absorption du matériau, car deux limites apparaissent selon que l'on considère les laines ou les autres matériaux (valeurs positives d'absorption à partir d'une fréquence de 250 Hz pour les laines, quand l'estimation apparaît erronée en dessous d'une fréquence de 500 Hz pour les autres matériaux).

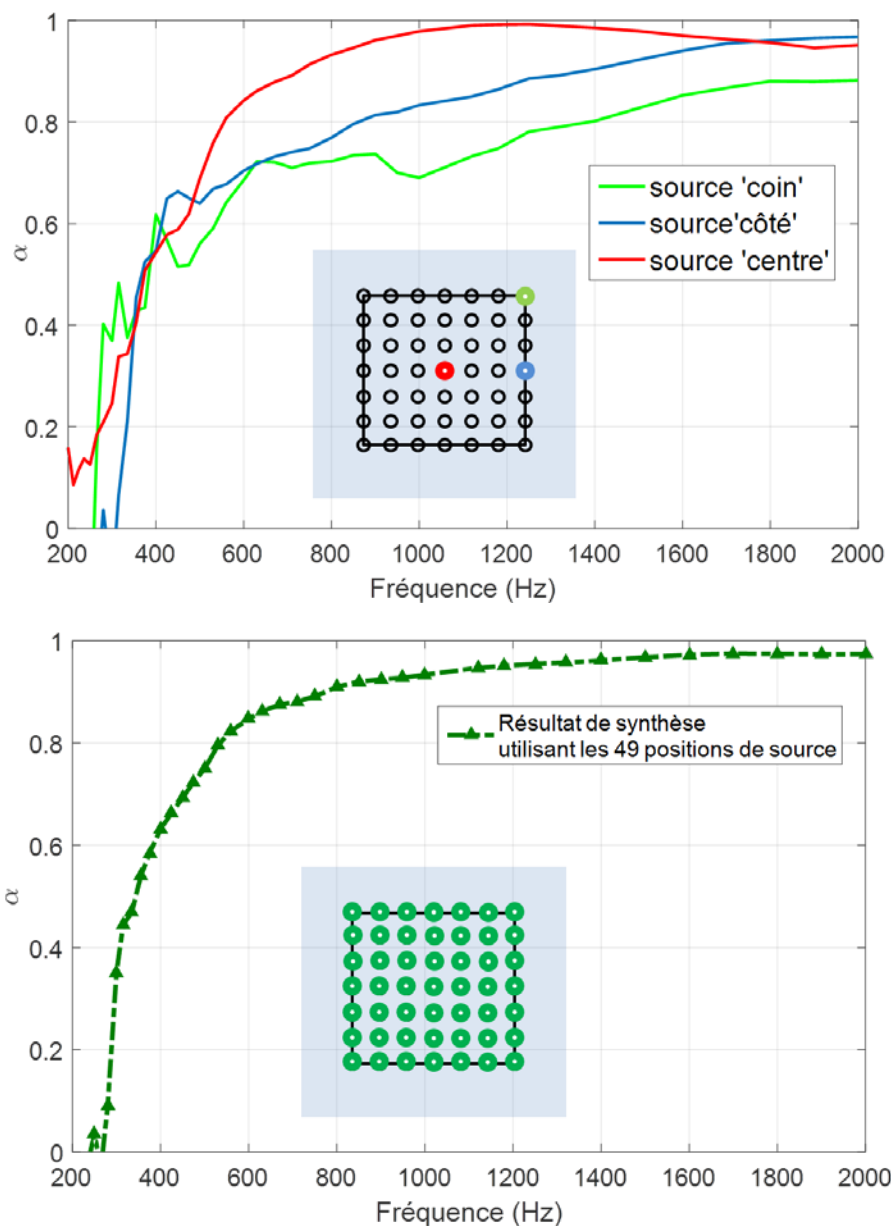


Figure 28 – Illustration des résultats des mesures sur la laine de verre pour trois positions fixes des sources (en haut) et des résultats de la procédure suivant l’approche proposée utilisant les 49 positions des sources (en bas).

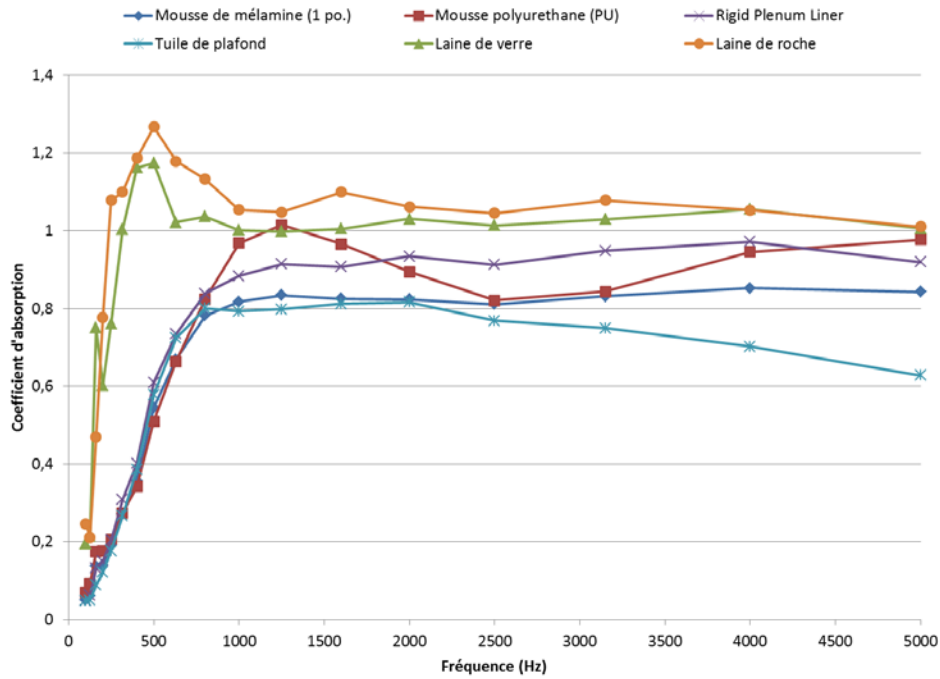


Figure 29 – Bilan des résultats des mesures en chambre réverbérante selon la norme pour l'ensemble des matériaux considérés.

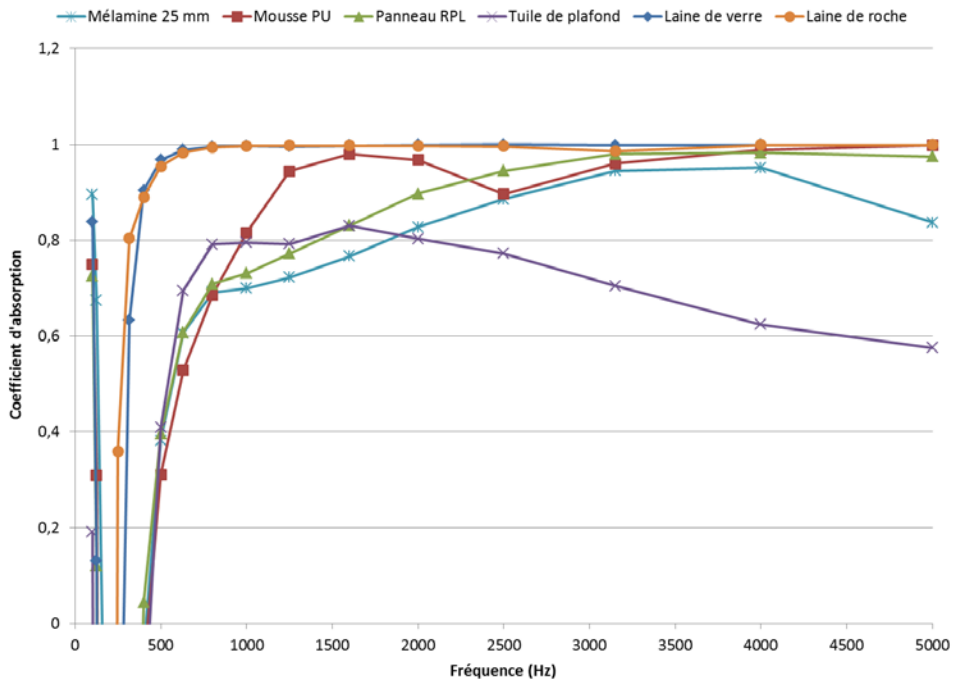


Figure 30 – Bilan des résultats des mesures en chambre semi-anéchoïque selon l'approche développée pour l'ensemble des matériaux considérés.



Une présentation comparative des résultats entre les deux méthodes et le calcul de référence permet de mettre en lumière certains éléments importants (par souci de concision, l'ensemble des résultats n'est pas présenté dans le corps du rapport). L'accent est mis dans cette sous-section sur les matériaux à vocation industrielle (mousse PU, tuile de plafond, laine de verre, panneau de fibre de verre compressée), car la mousse de mélamine a déjà été longuement investiguée dans les travaux précédents (Robin *et al.*, 2014) ou présentée en congrès (Robin *et al.*, 2016b). Les auteurs ont voulu mettre en avant la capacité de la méthode à pouvoir mesurer convenablement (ou non) le coefficient d'absorption de matériaux usuels, pour ensuite vérifier la possibilité d'aller tester ces mêmes matériaux sur le terrain.

Le cas du matériau RPL est tout d'abord considéré à la Figure 31. La mesure réalisée à l'aide de la chambre réverbérante est conforme aux résultats de simulations en hautes fréquences (à partir de 2500 Hz), mais surestime fortement le coefficient d'absorption en dessous de cette fréquence (presque 0,9 à 1000 Hz quand la simulation prédit une valeur de 0,57 environ). Le résultat obtenu par le biais de la méthode proposée ne permet pas de retrouver le coefficient d'absorption théorique en dessous d'une fréquence de 400 Hz, mais est globalement en meilleure adéquation au-dessus de cette fréquence avec le résultat de simulation que ne l'est le résultat de la mesure en chambre réverbérante. Ce résultat est d'autant plus intéressant que les surfaces des échantillons diffèrent fortement (72 pieds carrés pour la méthode de la chambre réverbérante, alors que la mesure selon l'approche proposée n'a besoin que d'un échantillon de 16 pieds carrés, soit une réduction de la surface par un facteur 4,5).

Les résultats concernant la mousse PU, la laine de verre, la laine de roche et la tuile de plafond sont ensuite exposés aux Figure 32, Figure 33, Figure 34, et Figure 35, respectivement. Quel que soit le matériau considéré, l'approche proposée produit des résultats généralement plus proches des calculs de référence que ceux fournis par la méthode de la chambre réverbérante, et ce, pour une surface réduite. Les limites de la méthode apparaissent toujours dans le domaine des basses fréquences pour lequel les estimations sont généralement biaisées. Les valeurs obtenues pour les fréquences supérieures ou égales à 500 Hz restent par contre dans une gamme physique (ne dépassant pas 1).

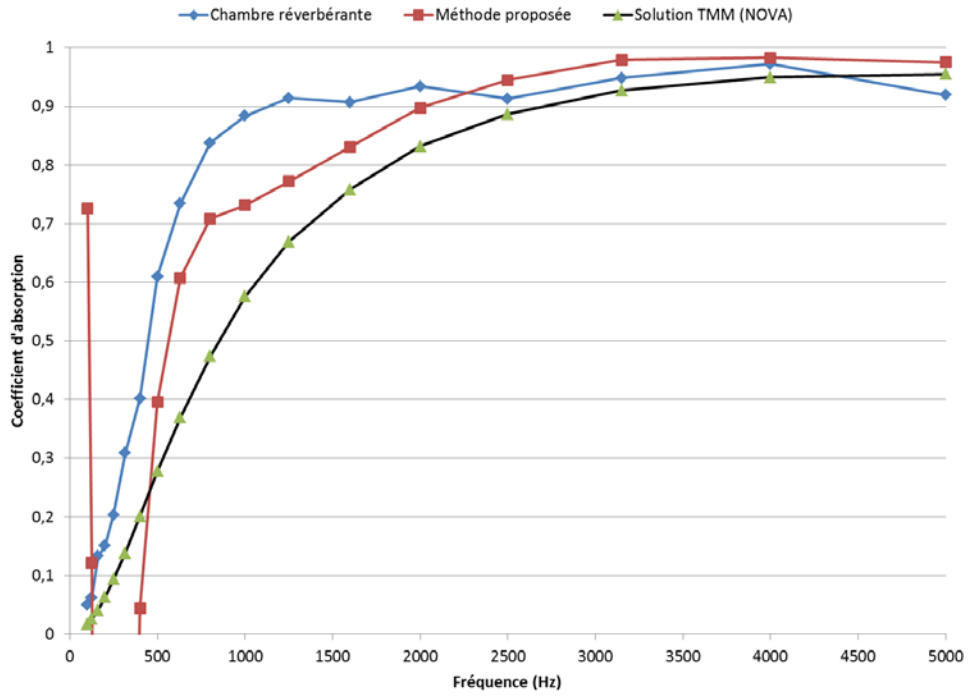


Figure 31 – Cas du matériau RPL : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et le calcul de référence.

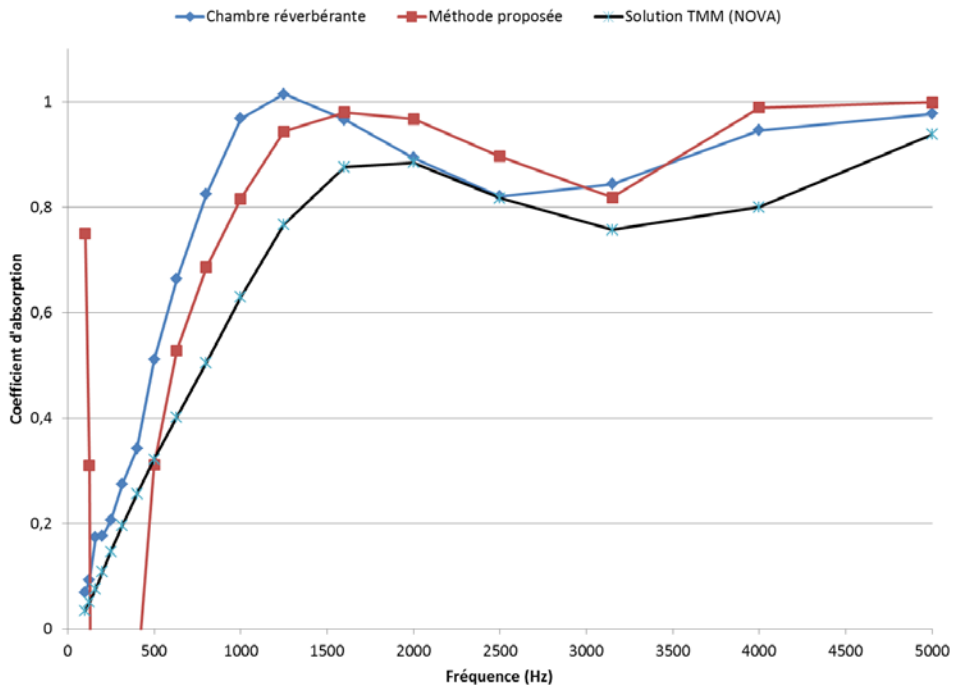


Figure 32 – Cas du matériau mousse PU : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et le calcul de référence.

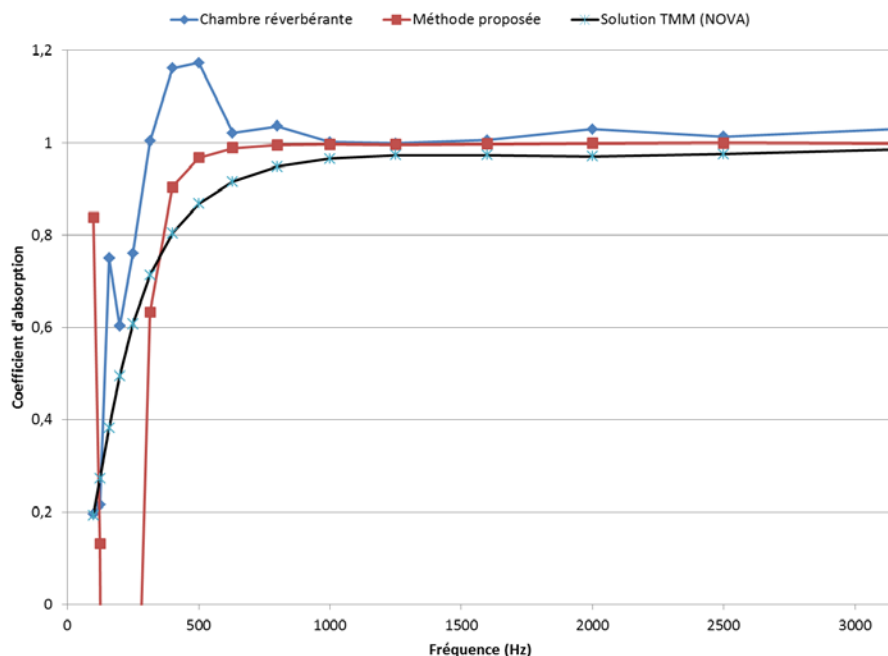


Figure 33 – Cas de la laine de verre : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et le calcul de référence.

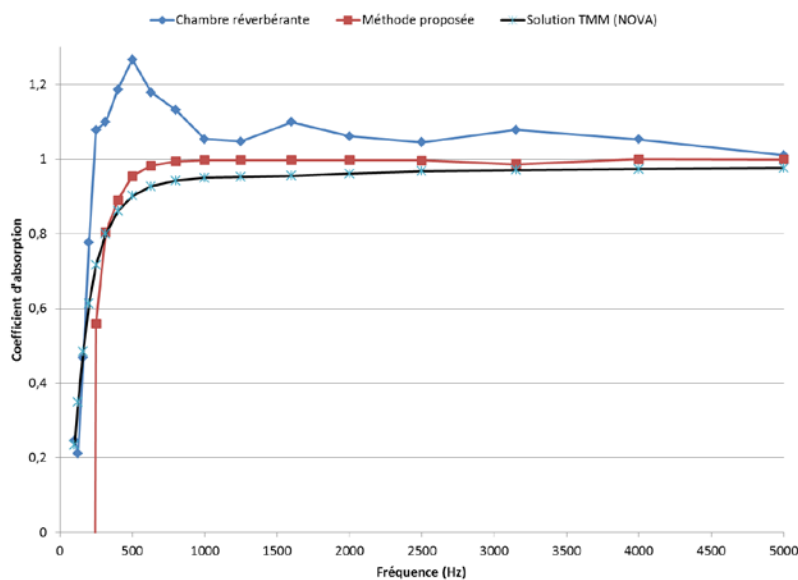
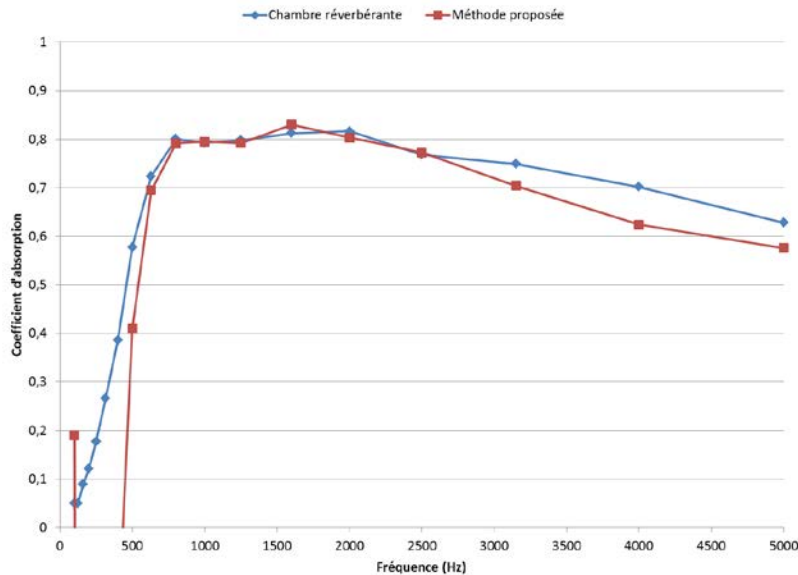


Figure 34 – Cas de la laine de roche : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et le calcul TMM.



**Figure 35 – Cas de la tuile de plafond : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante et la méthode proposée (pas de calcul de référence pour ce matériau).**

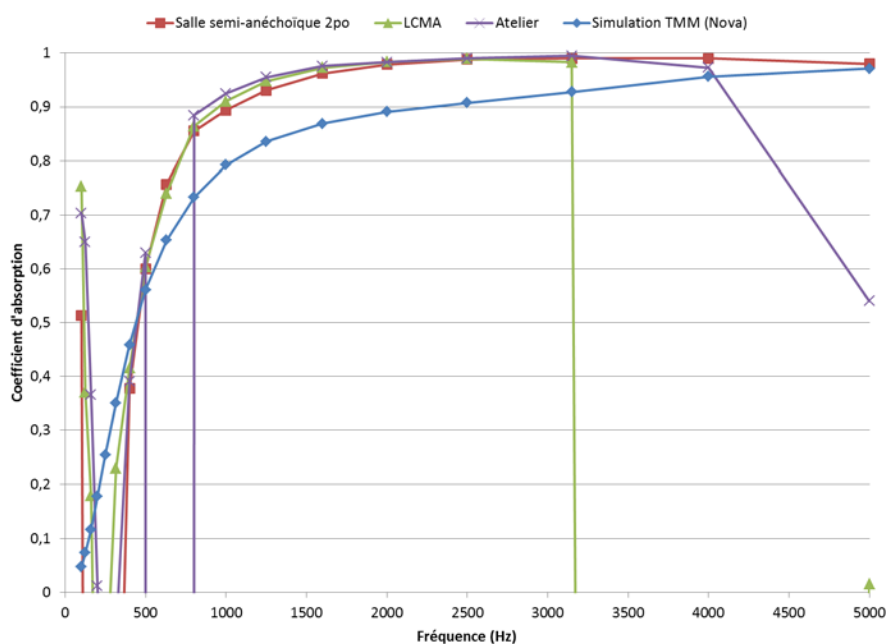
### **5.2.3 Matériaux sans conditions de montage particulières, et mesures en laboratoire et hors laboratoire : résultats de l'approche développée**

Dans cette sous-section sont comparés les résultats des mesures utilisant l'approche développée, obtenus au laboratoire et dans les deux locaux hors laboratoire. Le résultat TMM est généralement ajouté pour pouvoir comparer ces résultats expérimentaux à la référence théorique. L'ensemble des matériaux est alors considéré, car cette capacité de mesure hors laboratoire est originale et de fort intérêt pour le milieu du travail. Les résultats obtenus pour la mélamine 2 pouces, la mousse PU, la tuile de plafond, le panneau de fibre de verre compressée, la laine de verre et la laine de roche sont présentés aux Figure 36, Figure 37, Figure 38, Figure 39, Figure 40 et Figure 41, respectivement.

Il apparaît sur l'ensemble des résultats présentés que ceux obtenus en laboratoire et hors laboratoire sont généralement conformes dans la bande de fréquences 500 – 3000 Hz, spécialement lorsque la méthode de la chambre semi-anéchoïque et celle de l'atelier sont comparées.

En dessous d'une fréquence de 500 Hz, une variation qui semble à la fois dépendante des conditions environnementales et du matériau apparaît, quel que soit le matériau considéré. Malgré le soin apporté au positionnement précis des microphones et la prise en compte de la compensation de phase par inversion des microphones, de petites erreurs de positionnement peuvent influencer le résultat (ce point est par ailleurs confirmé par l'étude présentée à la sous-section 5.3.1). L'approximation du modèle sphérique utilisé peut aussi avoir une influence notable, comme déjà évoqué.

Au-delà d'une fréquence de 3000 Hz, le bruit de fond ou la présence de parois réfléchissantes peut générer des résultats fortement biaisés. Il est notable que la mesure réalisée dans le local 1 (LCMA), même avec un niveau de bruit de fond plus faible que dans le cas du local 2, montre les résultats les moins probants. En fait, l'analyse des résultats indique que l'approche semble plus sensible à la présence de parois réfléchissantes en proximité qu'à celle du bruit de fond. En effet, hypothèse est formulée que le champ incident est sphérique, ce qui sera d'autant moins valide que des réflexions parasites peuvent provenir des parois proches. Cela est particulièrement le cas pour la mesure dans le local 1 (LCMA), qui est effectuée dans un milieu finalement confiné, entre des tables. Dans le local 2 (atelier), même si le niveau de bruit de fond est globalement plus élevé, les parois sont plus éloignées et la mesure produit dans l'ensemble de meilleurs résultats. Il est précisé que cette sensibilité à la présence de parois réfléchissantes (et donc finalement de réflexions parasites) semble d'autant plus importante que le matériau est moins absorbant (voir le cas typique de la tuile de plafond). Dans tous les cas, l'utilisation d'un signal de type 'sinus glissant' permet théoriquement de garantir un rapport signal sur bruit maximal.



**Figure 36 – Cas de la mousse de mélamine : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-anéchoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier) – Les résultats du calcul de référence pour un matériau infini sont indiqués.**

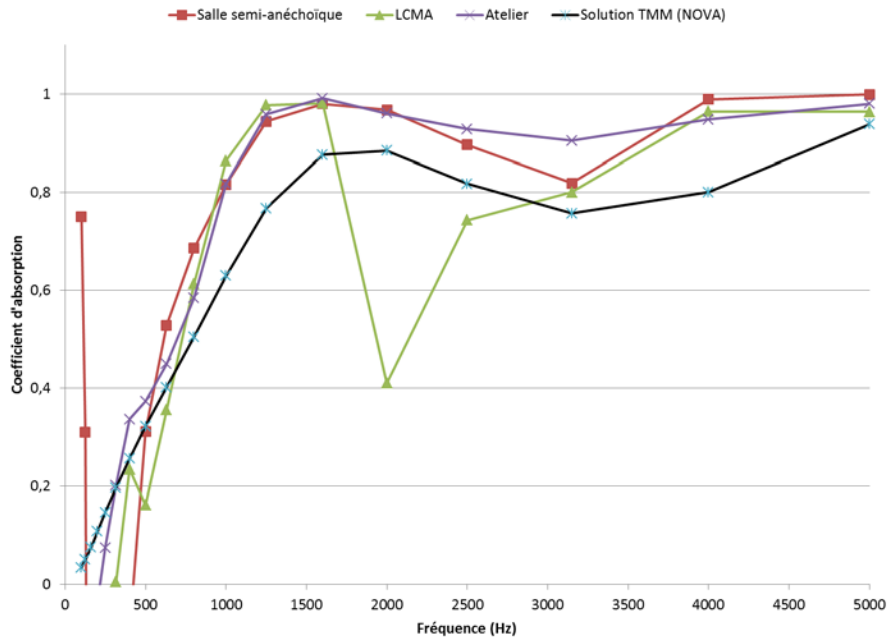


Figure 37 – Cas de la mousse PU : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-échoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier) – Les résultats du calcul de référence pour un matériau infini sont indiqués.

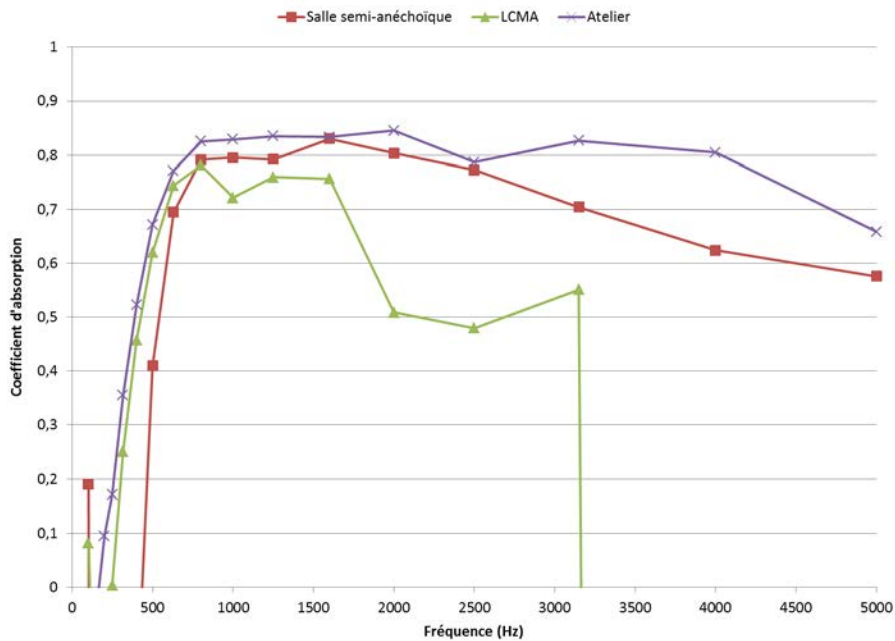
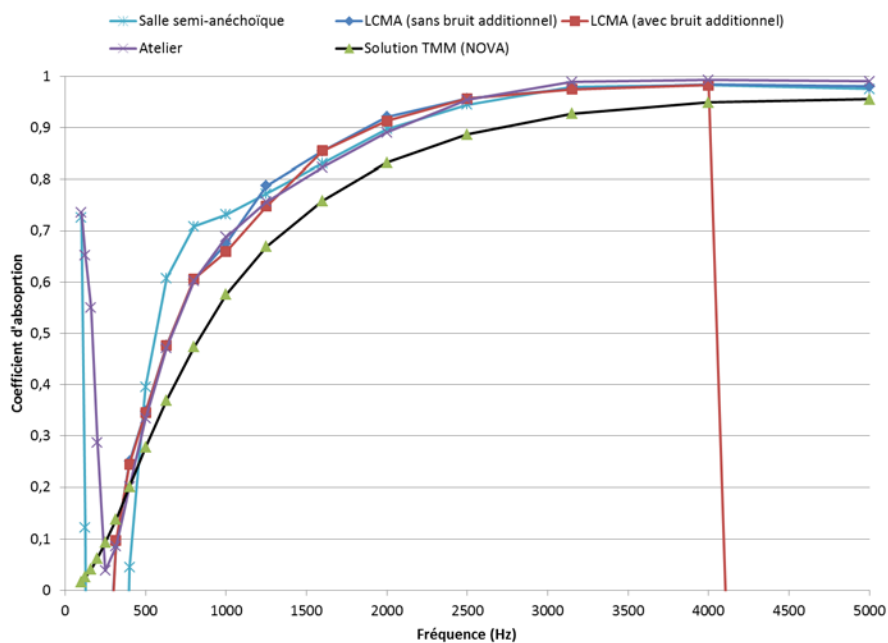
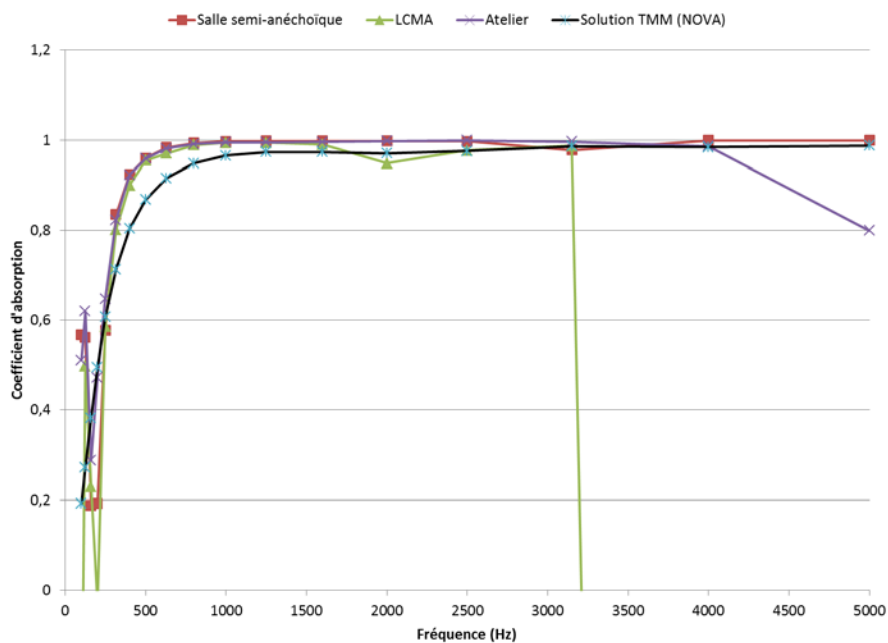


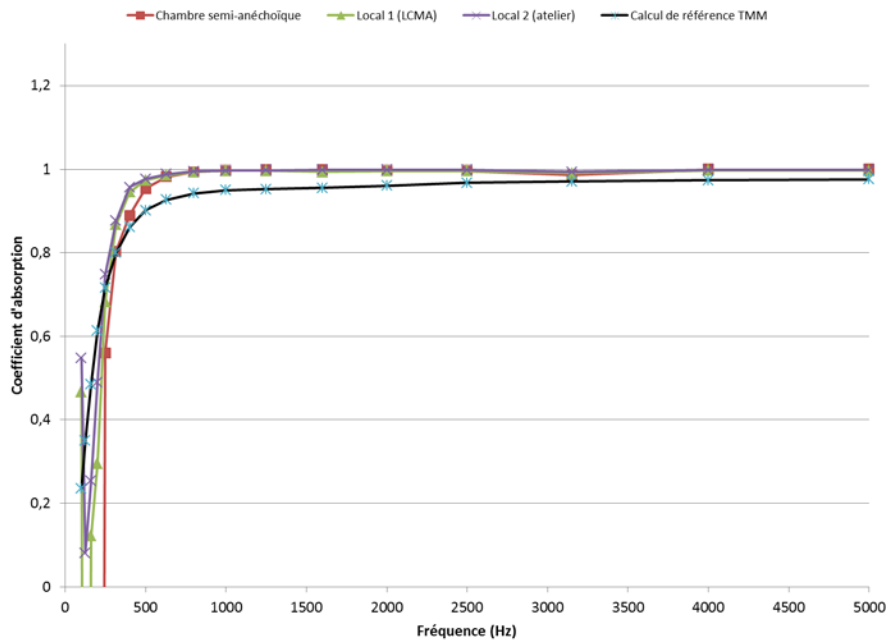
Figure 38 – Cas de la tuile de plafond : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-échoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier).



**Figure 39 – Cas du matériau RPL : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-anéchoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier) – Les résultats du calcul de référence pour un matériau infini sont indiqués.**



**Figure 40 – Cas de la laine de verre : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-anéchoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier) – Les résultats du calcul de référence pour un matériau infini sont indiqués.**



**Figure 41 – Cas de la laine de roche : Résultats comparés de la méthode proposée entre laboratoire (salle semi-anéchoïque), local 1 (LCMA) et local 2 (atelier) – Les résultats du calcul de référence pour un matériau infini sont indiqués.**

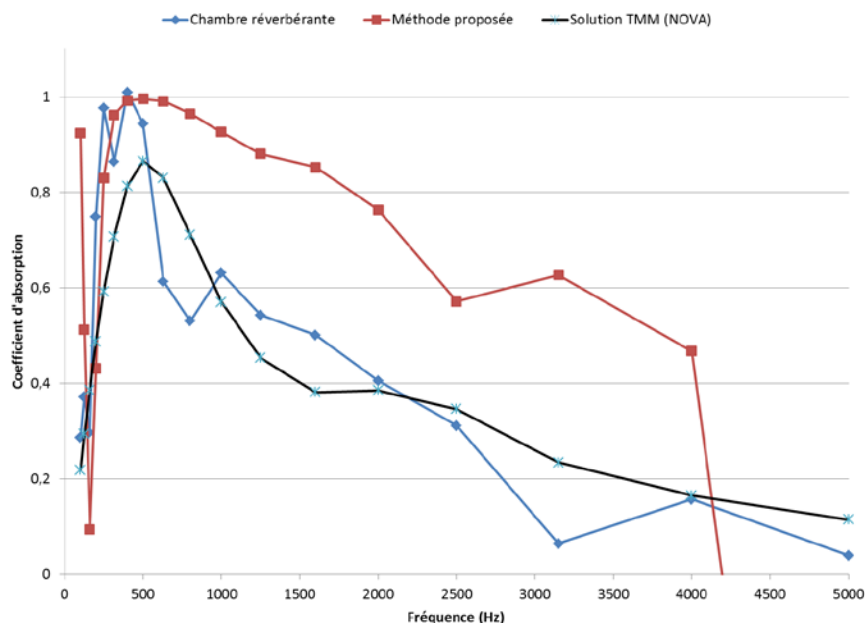
#### **5.2.4 Matériaux avec différentes conditions de montage en laboratoire : résultats comparatifs entre l'approche standard et l'approche développée**

La Figure 42 présente tout d'abord une comparaison des résultats obtenus avec la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et un résultat de simulation pour un matériau infini. La simulation suppose également que le film de protection en mylar est étanche à l'air, et utilise la masse volumique et l'épaisseur déterminées expérimentalement. La simulation prédit un comportement fortement « mécanique », c'est-à-dire dicté par le mouvement de la masse du film et la raideur équivalente de la cavité remplie d'air et du matériau laine de verre. Cela se traduit par une résonance marquée au tiers d'octave 500 Hz, et une diminution importante de l'absorption due à l'effet imperméable du film. L'ajout d'un film de protection favorise donc une absorption proche de celle observée pour le matériau seul dans le domaine des basses fréquences (voir Figure 40), mais diminue fortement la performance d'absorption avec l'augmentation de la fréquence.

Cette tendance prédite est globalement confirmée dans le cas de la mesure utilisant la chambre réverbérante, avec un pic d'absorption légèrement plus important (et supérieur à l'unité), et atteint au tiers d'octave 400 Hz. La décroissance de l'absorption avec l'augmentation de la fréquence est conforme à celle prédite par la simulation. Dans le cas de la mesure utilisant l'approche proposée, les valeurs de crête de l'absorption et les fréquences correspondantes sont proches de celles obtenues par le biais de la méthode standardisée et de la simulation, mais la décroissance de l'absorption avec la fréquence est beaucoup moins importante comparativement aux autres résultats (méthode standardisée et simulation). La différence de surface en mylar nécessaire ( $1,5 \text{ m}^2$  au lieu de  $6,7 \text{ m}^2$ ), et les conditions de montage ou de

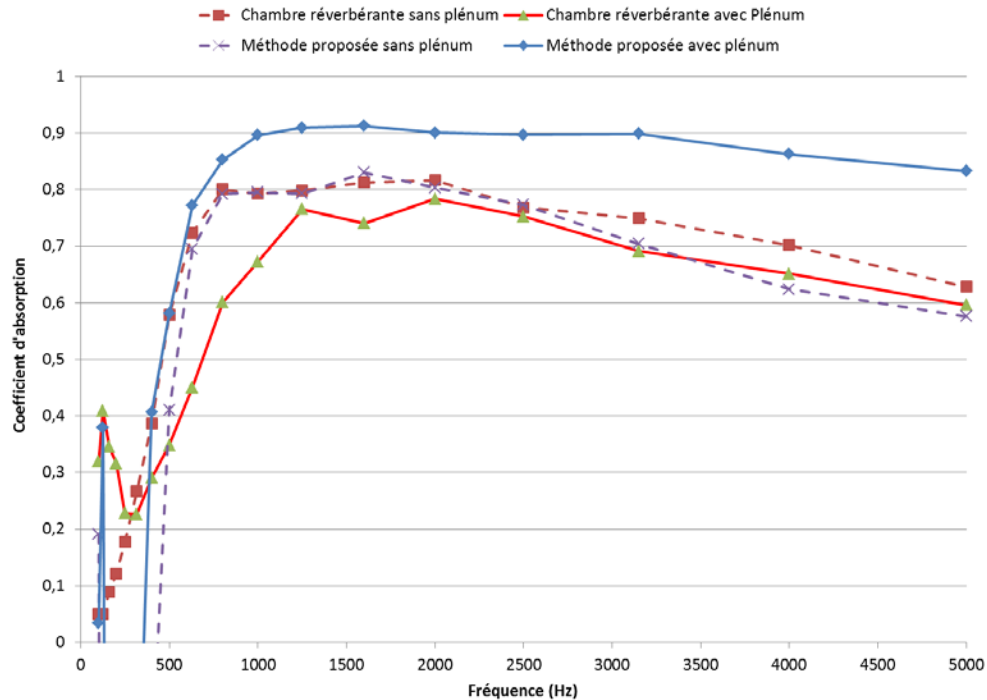


tension du film peuvent être à l'origine de ces écarts (même si le montage respectait le même protocole et utilisait les mêmes matériaux dans les deux cas).



**Figure 42 – Cas de la laine de verre avec film de protection en mylar : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante, la méthode proposée et le calcul TMM.**

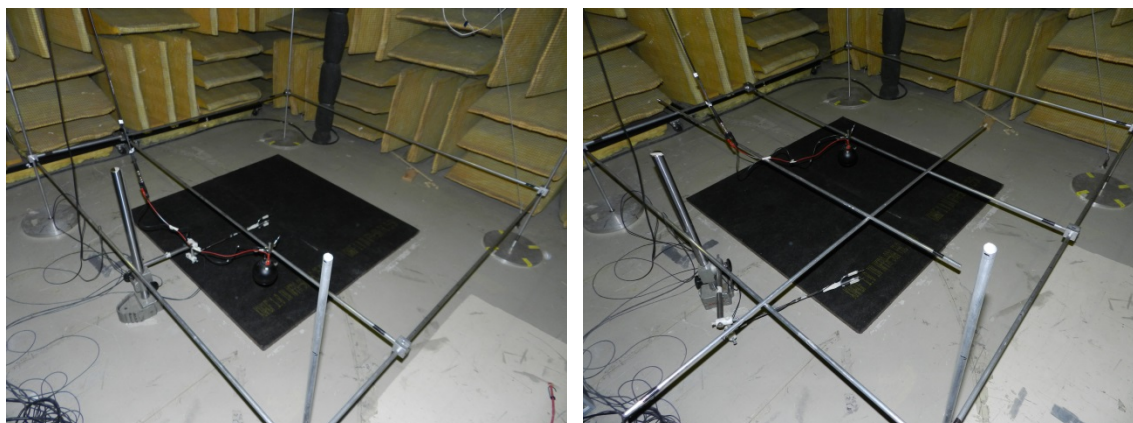
La Figure 43 présente un bilan des résultats des tuiles de plafond avec et sans plénum dans le cas de la méthode standardisée et de la méthode proposée. Comme indiqué précédemment, aucun cas de simulation n'est présenté en raison de la complexité de la modélisation de la tuile. Dans le cas de la chambre réverbérante, la présence du plénum augmente significativement l'absorption acoustique de 100 à 250 Hz, mais tend à dégrader ensuite l'efficacité du traitement, spécialement entre 400 et 1600 Hz. La méthode proposée, étant donné ses limites en basses fréquences, ne permet pas d'apprécier le gain potentiel constaté dans la gamme 100 – 250 Hz. Les résultats obtenus montrent, par contre, une augmentation de l'absorption acoustique dans le cas du plénum. Cette tendance n'a pas pu être expliquée; deux mesures successives ont produit des résultats similaires, excluant la possibilité d'une erreur ponctuelle de mesure. Comme dans le cas de la laine de verre avec mylar, la différence importante des surfaces de test, et surtout la différence importante de volume en arrière des tuiles pourraient expliquer ces écarts. De plus, il est envisagé que les potentielles fuites dues au montage des tuiles soient globalement plus importantes selon la méthode de la chambre réverbérante pour laquelle une surface équivalente à 9 tuiles est montée de manière suspendue, alors que la méthode développée n'en requiert que deux qui doivent être montées avec une lame d'air.



**Figure 43 – Cas de la tuile de plafond avec et sans plénum : Comparaison des résultats selon la méthode de la chambre réverbérante et la méthode proposée.**

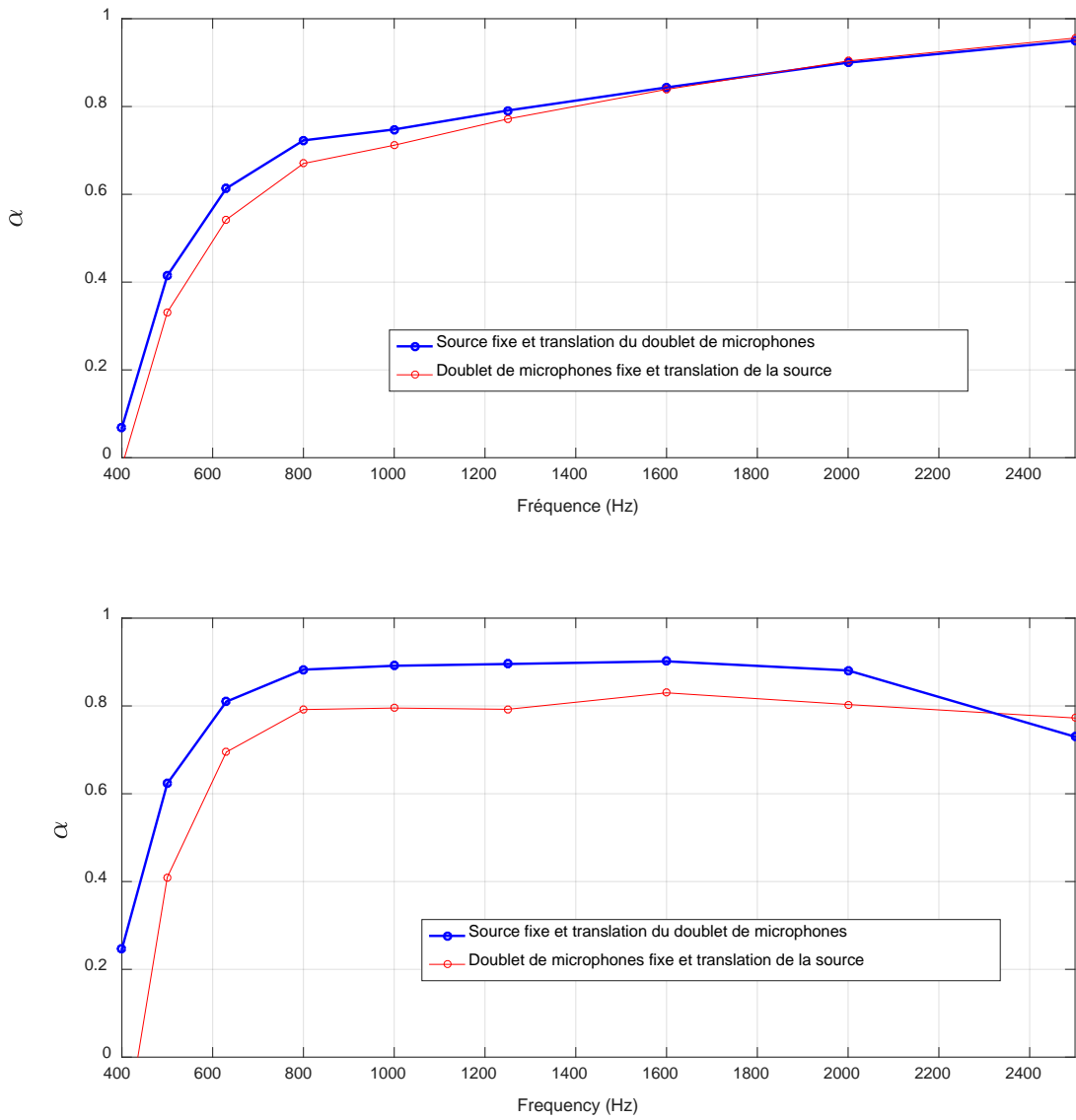
### 5.2.5 Évaluation d'une approche d'inversion source/capteur en laboratoire

En vertu du principe de réciprocité, la possibilité d'inverser source acoustique et capteur a interpellé l'équipe de recherche, en plus de soulever des questions de la part des membres du comité de suivi. En effet, cela offre une possibilité intéressante selon laquelle la source acoustique peut alors demeurer à une position fixe face à un matériau à tester, et le doublet de microphones (ou un autre type de capteur) peut alors être déplacé à la main par un opérateur, ou de façon automatique (Figure 44). Cela permettrait le développement d'un mode de cartographie de l'absorption à la surface du matériau, tel que suggéré pour des mesures d'intensimétrie acoustique par Pearson, L'Espérance, Boudreault, Sgard, Nélisse, et Boutin, (2011). L'opération de synthèse réalise alors une moyenne sur les positions des capteurs, et non sur les positions des sources. Si le matériau est homogène, l'effet de ce changement d'opération sur les résultats obtenus doit être faible. Au contraire, si le matériau est inhomogène, les résultats obtenus dans les deux cas (déplacement de la source ou déplacement des capteurs) doivent présenter des différences importantes.



**Figure 44 – (à gauche) Doublet de microphones placé au centre du matériau et source en translation – (à droite) source placée au centre du matériau et doublet en translation.**

Cette possibilité a été testée sur deux matériaux : le panneau de fibre de verre compressée et la tuile de plafond, les deux étant posées directement sur le sol. Un seul espacement de microphones a été utilisé (50 mm). La hauteur de la source était de 200 mm, et la hauteur du premier microphone (le plus bas) était de 10 mm. Un réseau de 7 x 7 positions de sources ou un réseau de 7 x 7 positions de microphones ont donc été considérés. Les résultats de mesures sont affichés à la Figure 45. Dans le cas du matériau RPL (panneau de fibre de verre compressée), les deux résultats de mesures fournissent des résultats très proches, à l'exception d'une légère augmentation de la valeur du coefficient d'absorption entre les bandes de tiers d'octave 500 et 1000 Hz (inférieure à 0,5). Cela semble indiquer une certaine homogénéité du matériau. Dans le cas de la tuile de plafond, une différence plus systématique apparaît entre les deux mesures, alors que l'absorption mesurée est pour ainsi dire toujours plus élevée lorsque la source est fixe et le doublet de microphones mobile. Ainsi, la tuile de plafond semble beaucoup plus inhomogène, ce qui peut potentiellement s'expliquer par la présence de macroporosités à la surface de ce matériau (voir la différence des surfaces des deux matériaux à la Figure 46).



**Figure 45 – (en haut) Coefficient d’absorption du matériau RPL selon l’approche développée avec source fixe et microphones mobiles (en rouge) et source mobile et microphones fixes (en bleu) - (en bas) Coefficient d’absorption de la tuile de plafond selon l’approche développée avec source fixe et microphones mobiles (en rouge) et source mobile et microphones fixes (en bleu).**

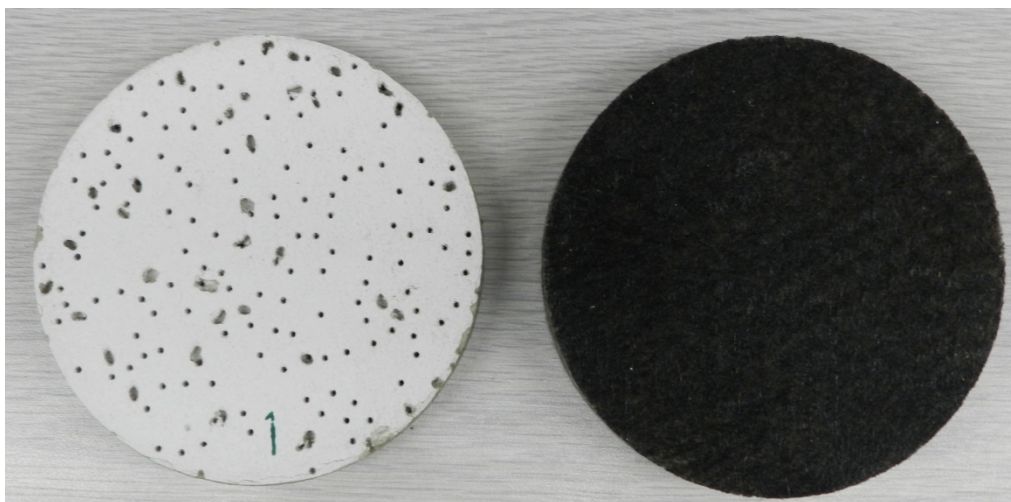


Figure 46 – Vue rapprochée de la surface de la tuile de plafond (à gauche) et du panneau de fibre de verre compressée (RPL) (à droite).

### 5.3 Évaluation d'une approche d'amélioration basses fréquences du post-traitement des mesures en laboratoire

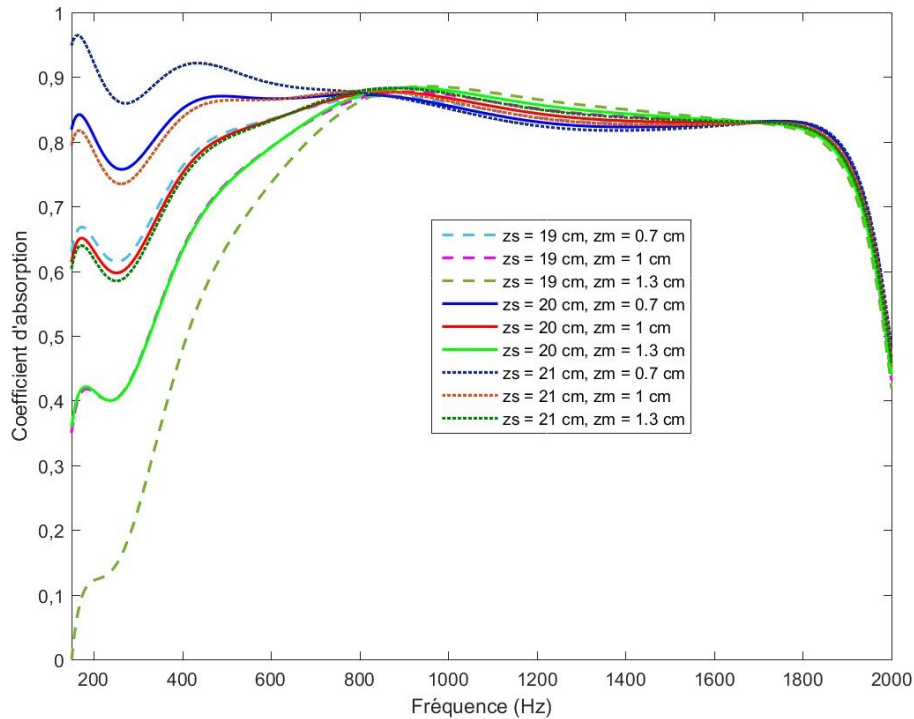
Comme observé dans les résultats précédents, la méthode souffre d'une limitation dans le domaine des basses fréquences. Plusieurs techniques ont donc été explorées pour résoudre ce problème ou pour en limiter les effets, et pour mieux en cerner les origines. Cette section détaille les résultats obtenus sur ce volet d'amélioration.

#### 5.3.1 Étude de la sensibilité des résultats en fonction d'incertitudes sur les positions des microphones et de la source acoustique, et sur les valeurs de phases lors des mesures

Les développements réalisés avec le modèle de Nobile-Hayek constituent une phase exploratoire qui n'a toutefois pas encore été exploitée jusqu'à l'étape complète de synthèse. Ces développements ont cependant été utilisés pour mener une étude paramétrique portant sur la sensibilité des positions des microphones et de la source acoustique ainsi que sur les valeurs de phase de la fonction de transfert intermicrophones lors des mesures. Il a en effet été constaté que les positions des microphones et de la source sont sujettes à des incertitudes lors des mesures. La configuration de référence considérée dans l'étude paramétrique est la mélamine d'épaisseur 5,08 cm, avec la source acoustique et le microphone inférieur du doublet respectivement positionnés *a priori* à 20 cm et à 1 cm au-dessus du matériau, la source étant à la verticale du doublet microphonique. Des observations ont permis d'estimer des marges d'incertitudes de  $\pm 1$  cm sur la position de la source et de  $\pm 0,3$  cm sur la position du doublet microphonique. L'étude paramétrique a donc consisté à évaluer l'influence d'une erreur de positionnement de la source ou du doublet microphonique sur l'estimation du coefficient d'absorption à partir du bilan des puissances (sous-section 4.3.2).

La Figure 47 illustre l'influence des incertitudes sur les positions de la source et du doublet microphonique. Le cas «  $z_s = 20$  cm,  $z_m = 1$  cm » correspond aux valeurs de *référence*, c'est-à-dire au cas où il est supposé qu'aucune erreur sur les positions ne se produit. Les résultats

reportés indiquent qu'une imprécision sur une de ces positions se traduit essentiellement par de très importantes variations en basses fréquences (en dessous de 500 Hz) sur l'estimation du coefficient d'absorption. Cette estimation en basses fréquences pourrait donc être très affectée par des erreurs sur le positionnement de la source et/ou du doublet de microphones.

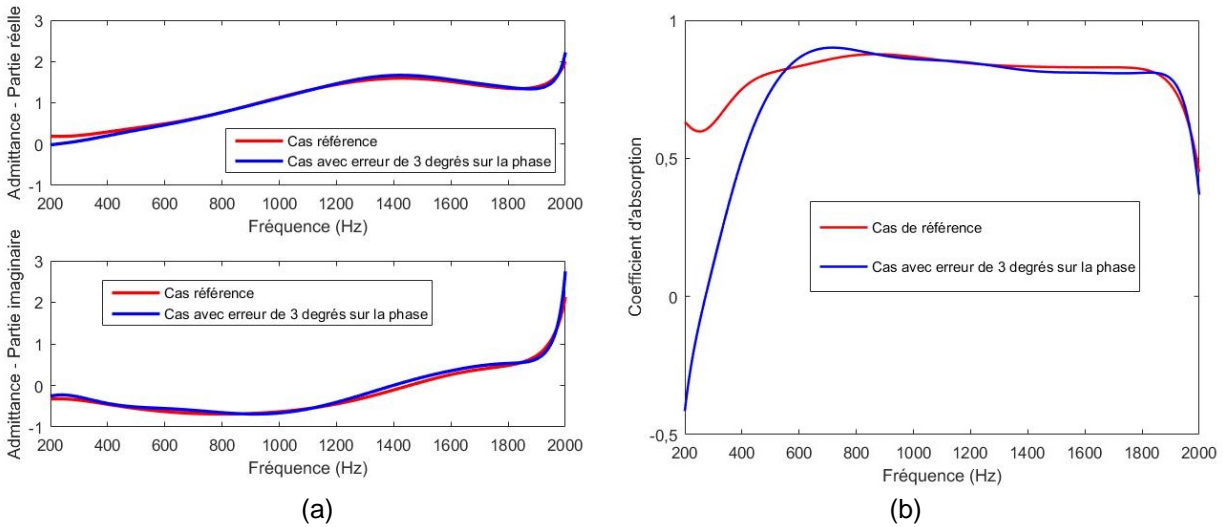


**Figure 47 – Influence des incertitudes de positions de la source ( $z_s$ ) et/ou du doublet microphonique ( $z_m$ ) sur l'estimation du coefficient d'absorption.**

Par ailleurs, les microphones PCB utilisés pour les mesures ont une précision en phase nominale de plus ou moins 3 degrés sur la plage fréquentielle de 100 Hz à 3 kHz. Une étude sur la sensibilité a alors été réalisée sur la phase de la fonction de transfert mesurée. Pour estimer l'influence d'une erreur de mesure de la phase, une incertitude de 3 degrés a été prise en compte par rapport au cas de référence, dans la procédure d'extraction de l'admittance de surface (sous-section 4.3.1). L'admittance extraite dans les deux cas est ensuite utilisée pour estimer le coefficient d'absorption à partir du bilan de puissances acoustiques, pour la position de la source considérée.

L'influence de l'incertitude sur les valeurs de phase est illustrée par la Figure 48. Cette incertitude a été prise en compte lors de la phase de la fonction de transfert obtenue à partir des pressions mesurées, dans la procédure d'extraction de l'admittance de surface. L'effet de cette incertitude paraît très minime sur l'extraction de l'admittance. Par contre, au-delà du résultat discutable du coefficient d'absorption négatif en basses fréquences, il apparaît clairement qu'une très faible erreur sur la phase mesurée peut se traduire par une énorme variation sur l'estimation du coefficient d'absorption, pour les fréquences inférieures à 500 Hz. En termes pratiques, la compensation par inversion du doublet microphonique, réalisée dans le

cadre des mesures, apparaît clairement importante afin de limiter au maximum une erreur de phase.



**Figure 48 – Influence des incertitudes de valeurs de phase sur l'extraction de l'admittance (a) et sur l'estimation du coefficient d'absorption (b).**

L'étude paramétrique indique donc *a priori* :

- qu'il faudrait accueillir avec précautions les résultats de coefficients d'absorption en basses fréquences dans le travail d'amélioration du post-traitement en basses fréquences réalisé dans cette étude (étant donné que les résultats reposent sur des données expérimentales pouvant comporter des incertitudes de positionnement).
- Qu'il faudra dans des étapes ultérieures garantir un positionnement des microphones qui soit précis et répétable, typiquement en utilisant un système robotisé.

### 5.3.2 Comparaisons des estimations de coefficients d'absorption obtenus par le modèle de Nobile-Hayek par bilan de puissance et par hypothèse de réflexion sphérique

Des résultats préliminaires obtenus à partir du modèle de Nobile-Hayek (Nobile et Hayek, 1985) et le calcul du coefficient d'absorption par bilan de puissance (équations (9) et (14), et sous-sections 4.3.1 et 4.3.2) ont ensuite été comparés avec des estimations de coefficients d'absorption par hypothèse de réflexion sphérique (sous-section 4.2.1, coefficient de réflexion sphérique pour une excitation acoustique de type monopôle). Il a été choisi de travailler sur quelques positions spatiales de la source acoustique afin de valider l'approche. Il reste encore à l'issue de ce travail à étendre l'approche à l'ensemble des mesures et à un calcul finalement sous une excitation de type champ acoustique diffus synthétique.

Dans les configurations adoptées pour les comparaisons, le monopôle est à une position verticale de 20 cm au-dessus du matériau, et quatre positions latérales suivant les axes x et y par rapport au centre du matériau (correspondant également à la position du doublet) ont été

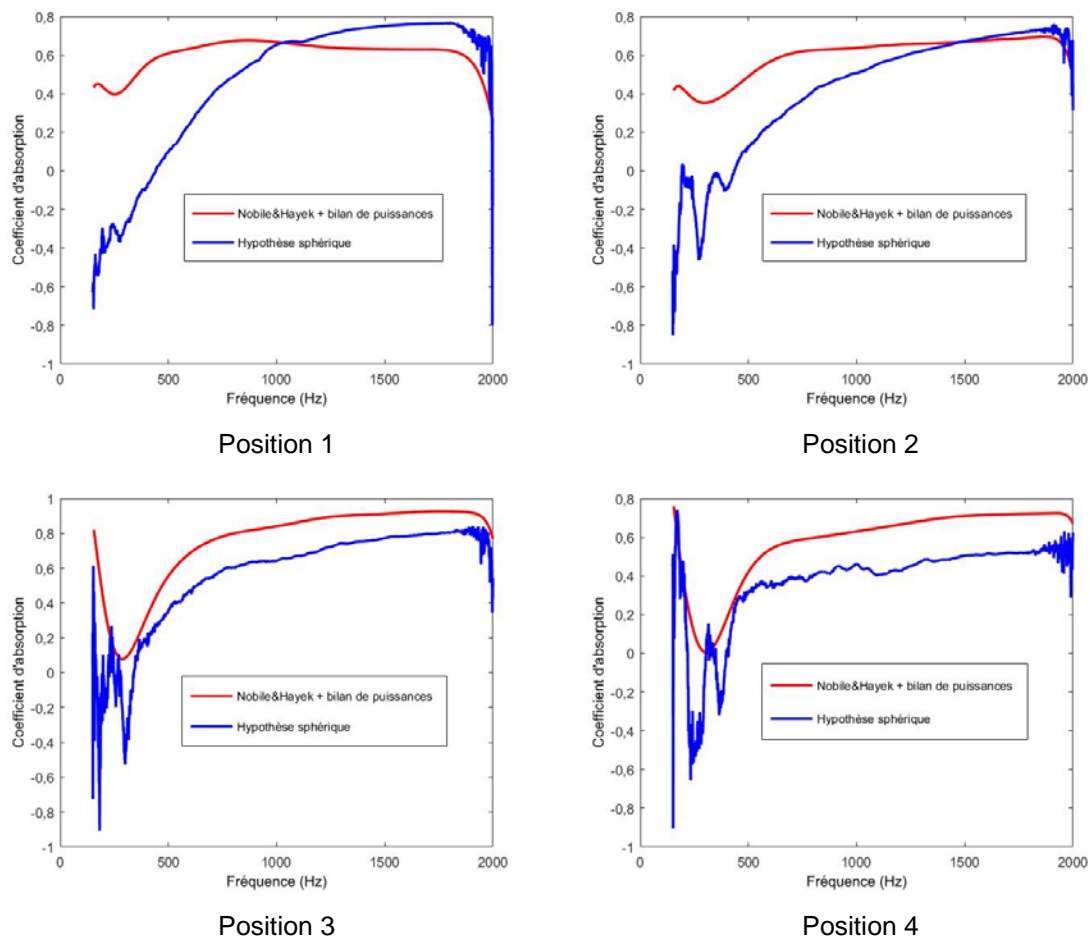
considérées : position 1 = (0 cm, 0 cm); position 2 = (15 cm, 15 cm) ; position 3 = (30 cm, 30 cm) ; position 4 = (45 cm, 45 cm). Les fonctions de transfert mesurées dans chaque configuration ont été exploitées pour estimer le coefficient d'absorption à partir du modèle de Nobile-Hayek et du bilan de puissance, et ce résultat a ensuite été comparé au coefficient d'absorption estimé par hypothèse de réflexion sphérique.

Les résultats des comparaisons entre les calculs par hypothèse de réflexion sphérique et ceux couplant le modèle de Nobile-Hayek et le bilan de puissance sont illustrés aux Figure 49, Figure 50 et Figure 51 (pour la mélamine, la mousse PU et le matériau RPL, respectivement). Comme précisé en début de cette section, les résultats présentés dans ces figures concernent l'obtention d'un coefficient d'absorption pour une position de source, et non pour le cas d'un champ acoustique diffus. Deux observations intéressantes peuvent être formulées :

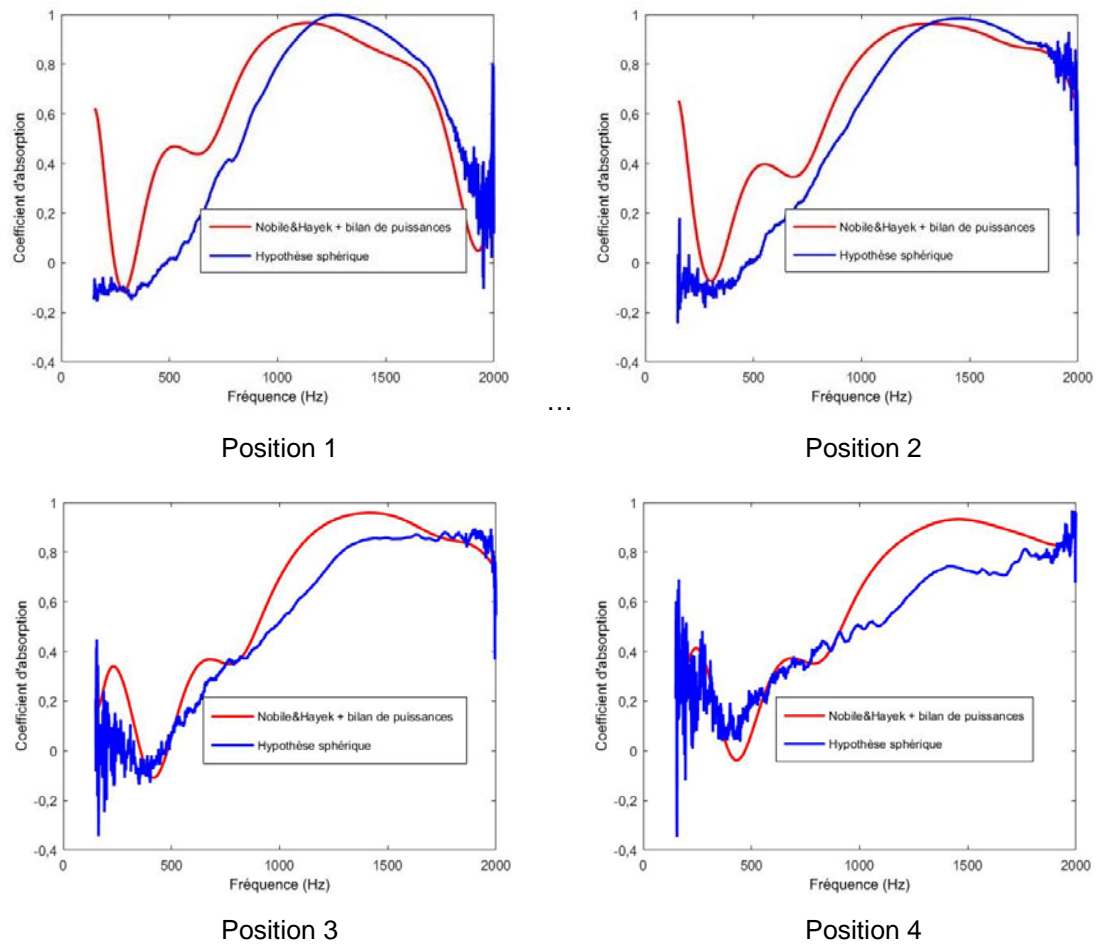
- (i) Les deux méthodes donnent globalement les mêmes tendances, surtout pour les deux derniers matériaux.
- (ii) L'estimation par bilan de puissance à partir du modèle de Nobile-Hayek semble corriger, dans la plupart des cas, les valeurs négatives de coefficient d'absorption obtenues en basses fréquences par l'estimation par hypothèse d'onde sphérique.

L'estimation par bilan de puissance, à partir du modèle de Nobile-Hayek, pourrait donc constituer une alternative à prendre en compte dans la méthode globale développée pour l'estimation du coefficient d'absorption sous champ synthétisé, dans l'objectif de corriger les valeurs de l'estimation en basses fréquences. L'étape de lissage des données brutes incluse dans le post-traitement permet également de limiter l'influence du bruit de mesure.

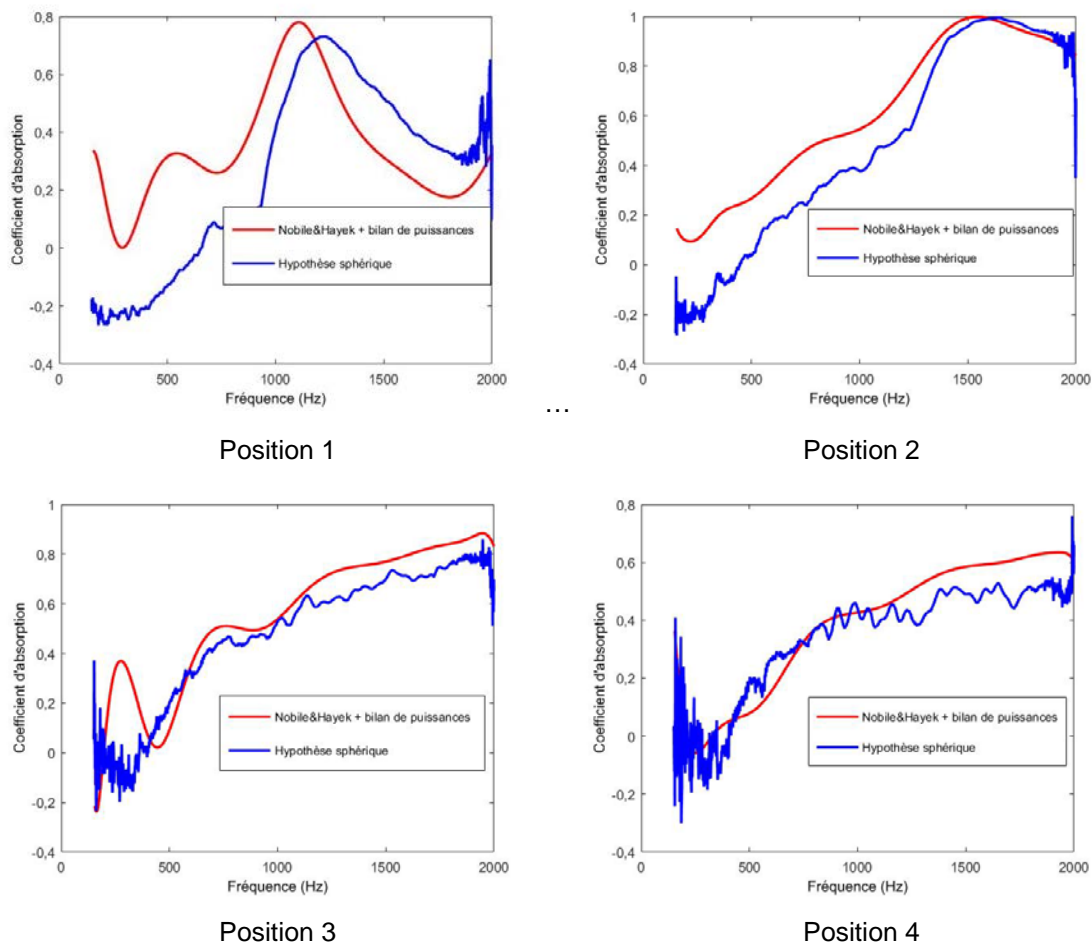




**Figure 49 – Cas de la mélamine : Comparaison entre l'estimation par bilan de puissance à partir du modèle de Nobile-Hayek (courbes en rouge) et l'estimation par réflexion sphérique (courbes en bleu).**



**Figure 50 – Cas de la mousse PU : Comparaison entre l'estimation par bilan de puissance à partir du modèle de Nobile-Hayek (courbes en rouge) et l'estimation par réflexion sphérique (courbes en bleu).**



**Figure 51 – Cas du matériau RPL : Comparaison entre l'estimation par bilan de puissance à partir du modèle de Nobile-Hayek et l'estimation par réflexion sphérique.**



## 6. DISCUSSION

### 6.1 Avantages et limites en laboratoire

Au vu des résultats présentés dans ce rapport, les principaux avantages de la méthode proposée sont les suivants :

- Comparativement à des résultats de simulation de référence supposant un matériau de dimensions infinies, les mesures obtenues par la méthode proposée sont globalement en meilleur accord que celles obtenues par la méthode standardisée en chambre réverbérante (spécialement au-dessus d'une fréquence d'approximativement 400 Hz);
- En utilisant des surfaces de matériaux de dimensions inférieures à celles requises pour la méthode standardisée (des échantillons de dimensions réduites d'un facteur maximal de 4,5 ont été testés), les valeurs de coefficient d'absorption obtenues ne présentent pas les effets de bord ou les surestimations liées aux effets de taille de l'échantillon, associés aux mesures en chambre réverbérante;
- Les données issues des mesures effectuées suivant la méthode proposée peuvent être utilisées sans correction pour des calculs de bruit prévisionnels, car elles ne présentent justement pas les surestimations qui caractérisent les mesures en chambre réverbérante;
- Aucune préparation spécifique des échantillons n'est nécessaire pour leur montage sur le sol (supposé rigide);
- Des post-traitements originaux peuvent être appliqués sur les données (variation possible des angles d'incidence des champs acoustiques synthétisés); il serait théoriquement envisageable d'obtenir la valeur du coefficient en incidence normale, soit celle obtenue uniquement dans le cas du tube d'impédance avec les difficultés évoquées en début de ce rapport;
- Les résultats obtenus permettent de confirmer plusieurs tendances (effets de bord) déjà publiées dans la littérature et comportent plusieurs originalités, dont la plus importante est de pouvoir estimer le coefficient d'absorption sous un champ acoustique diffus virtuel.

La méthode proposée présente par contre une limite importante relative à sa précision dans le domaine des basses fréquences (en dessous d'une fréquence de 400 Hz environ). Cette limite a pour origine première l'approximation faite dans le modèle sphérique utilisé. Des erreurs dans le positionnement de la source et des microphones peuvent également générer des biais de mesure. Enfin, l'influence du matériau sur lequel se fait la mesure est notable, dans le sens où la précision du résultat est généralement meilleure avec l'augmentation de l'absorption théorique du matériau.

Cette limite en basses fréquences pour les méthodes de mesure (en laboratoire et hors laboratoire) est néanmoins connue et fait souvent l'objet des publications recensées dans la littérature (section 2). L'approche proposée en fin de rapport démontre la possibilité d'ajouter un post-traitement des fonctions de transfert mesurées en utilisant un modèle exact (modèle de Nobile-Hayek) qui permet de réduire fortement les écarts observés en basses fréquences, spécialement l'obtention de coefficients d'absorption de valeur négative.

Enfin, il est possible de souligner deux tendances ou possibilités établies dans l'étude :

- Par la réalisation de deux mesures comparatives avec source fixe et doublet de microphones mobile, et avec source mobile et doublet de microphones fixe, il apparaît possible de caractériser la relative homogénéité ou inhomogénéité d'un matériau;
- Dans le cas des mesures avec conditions de montage spécifiques, il apparaît plus difficile de faire une comparaison directe des résultats obtenus avec la chambre réverbérante et ceux de l'approche proposée, car la diminution de la surface de test entraîne également la réalisation de tests sur des montages qui présentent une dimension physique différente. Le volume du plénum et la surface du film protecteur diffèrent fortement entre les deux mesures, alors que le matériau reste inchangé. Les résultats obtenus sont alors très éloignés de ceux du cas du matériau infini. Dans le cas d'un positionnement sur sol rigide, cela semble à première vue beaucoup moins influent.

## 6.2 Avantages et limites hors laboratoire

Au vu des résultats obtenus dans deux locaux ordinaires, la méthode semble facilement applicable dans des conditions plus réalistes que celles réunies dans une chambre semi-anéchoïque. La grande majorité des résultats obtenus dans les locaux hors laboratoire est en conformité avec ceux obtenus en laboratoire.

Même en présence de niveaux de bruit de fond importants (équivalents à ceux de la source utilisée, donc un rapport signal sur bruit de 0 dB), la méthode proposée produit toujours des résultats très homogènes. Comme pour les tests en laboratoire, ceux-ci présentent l'avantage de tester les matériaux sans préparation spécifique.

L'origine de la principale limite est la proximité de parois réfléchissantes, spécialement mise en lumière dans le cas du local 1. Dans ce cas, de plus grandes variabilités et erreurs de mesure apparaissent et conduisent à l'obtention de résultats souvent aberrants.

## 6.3 Évaluation de la faisabilité d'un outil de mesure *in situ*

En ce qui a trait à la faisabilité d'un outil de mesure *in situ*, plusieurs points techniques importants ont été établis :

- Utiliser une configuration expérimentale suivant un réseau de 7 x 7 sources espacées de 15 cm et situé à une hauteur de 20 cm de la surface de l'échantillon;
- Disposer d'un système de translation automatisé de la source, afin de réduire les erreurs de positionnement potentielles et de diminuer le temps de mesure (par rapport à une translation manuelle de la source);
- Recourir à un système de positionnement précis d'un triplet de microphones (qui autorise également leur inversion par rotation), afin de pouvoir limiter l'influence des erreurs de positionnement et d'autoriser une mesure sur une large gamme fréquentielle (nécessité de disposer de deux séparations microphoniques, et d'utiliser une compensation de phase par inversion des microphones ayant la plus grande séparation);

- Réaliser les mesures avec un signal de type « sinus glissant » afin d'optimiser le rapport signal sur bruit (même en présence d'un niveau de bruit de fond important). Il est possible d'utiliser une source de type monopole ou un petit haut-parleur, car aucune différence majeure n'a été observée entre ces deux sources. Idéalement, il faudra veiller à avoir la fréquence de coupure la plus basse possible, soit un transducteur permettant idéalement de travailler jusqu'à une fréquence de 100 Hz.

Comme dit précédemment, une limite principale est identifiée pour la mesure *in situ* et permet de cerner un cas de mesure identifié comme problématique : ne pas être situé à proximité des murs d'un local ou de parois réfléchissantes (typiquement, se placer au milieu d'un local, si cela est possible). Plusieurs solutions pourraient être envisagées pour limiter l'effet de ces réflexions parasites, comme des techniques de traitement du signal avancées, ou encore utiliser des barrières autour de la zone de mesure.





## 7. CONCLUSION

### 7.1 Principales conclusions

La principale conclusion de cette étude est que la mesure du coefficient d'absorption selon la méthode proposée permet de suggérer une alternative intéressante à la méthode de la chambre réverbérante. Ce constat est confirmé par les résultats de tests effectués avec six matériaux différents.

La méthode proposée montre une limite dans le domaine des basses fréquences (fréquence inférieure ou égale à 400 Hz environ), dont les origines sont globalement bien identifiées (approximation du modèle, erreurs de positionnement ou de phase) et pour laquelle une solution originale est proposée. Cette solution devrait théoriquement augmenter la robustesse du calcul en basses fréquences.

Dans le reste du domaine fréquentiel (de 400 à 5000 Hz), la méthode procure des valeurs de coefficient d'absorption conformes à celles obtenues avec des calculs numériques de référence tout en utilisant des surfaces de matériau beaucoup plus faibles que celles nécessaires aux mesures en chambre réverbérante, et en éliminant la nécessité de traiter les bords des échantillons. De plus, les valeurs obtenues sont toujours dans une gamme physique (inférieures ou égales à 1), ce qui constitue également un point d'intérêt par rapport à la mesure standardisée de la chambre réverbérante qui procure souvent des valeurs non physiques (comme plusieurs résultats de ce rapport l'établissent). Cette méthode se présente donc comme une alternative intéressante aux standards actuels en laboratoire.

Hors laboratoire, la méthode montre toujours la même limite (en basses fréquences), mais permet l'obtention de résultats très homogènes par rapport à la mesure *en laboratoire*. Cela démontre qu'il est possible de s'éloigner d'un cas de mesure idéal, soit « en conditions contrôlées et proches de la théorie », pour se diriger vers des cas « pratiques » et proches de la réalité de tests concrets à réaliser en milieu de travail. Selon les résultats obtenus, la méthode proposée est relativement robuste au regard du bruit de fond et de la réverbération, mais est notamment plus sensible à la présence de parois réfléchissantes à proximité immédiate de la zone de mesure. Cela permet de cerner quelques limites immédiates qui caractérisent son application à des cas concrets.

### 7.2 Recommandations pour une poursuite de l'étude

Au vu de l'ensemble des résultats obtenus, et présentés aux membres du comité de suivi lors d'une rencontre tenue le 31 mars 2017, la recommandation principale pour la poursuite de l'étude consiste à proposer une phase intermédiaire qui vise à finaliser l'étape relative à l'amélioration de la méthode dans le domaine des basses fréquences et en laboratoire.

En effet, même si la mesure en laboratoire produit des résultats très homogènes sur les matériaux étudiés (comparativement à des simulations de référence et à la méthode de la chambre réverbérante), et que son application hors laboratoire semble à première vue robuste et clairement envisageable, il semble nécessaire à l'équipe de recherche et au comité de suivi

de lever tout d'abord cette limite relative aux basses fréquences (qui est d'ailleurs commune au cas laboratoire et à celui hors laboratoire).

Une fois cette étape finalisée, il est suggéré de réaliser des tests en laboratoire sur un ensemble de matériaux choisis par le comité de suivi afin de produire une base de données issue de la méthode proposée sans limites dans le domaine des basses fréquences. Il conviendra de séparer le choix des traitements absorbants entre matériaux seuls et matériaux avec conditions de montage spécifiques (et donc ajout potentiel de films, de cavités d'air). En effet, la méthode semble montrer quelques limites dans le cas des traitements avec conditions de montage spécifiques.

La base de données obtenue pourrait ensuite être utilisée afin de réaliser des calculs prévisionnels ou de choisir des matériaux pour des applications en matière de réduction de bruit. Si les applications et utilisateurs de cette base de données démontrent qu'elle permet effectivement de disposer d'informations plus fiables que celles fournies par les normes des mesures existantes, cela permettrait de justifier une évolution des normes actuelles en y incluant la méthode améliorée.

Enfin, une étape ultérieure de ce travail consisterait au développement final d'un prototype incluant l'ensemble des résultats obtenus et développés dans les premières phases, prototype utilisable en laboratoire et hors laboratoire.

## BIBLIOGRAPHIE

- Allard J.-F., et Atalla, N. (2009). Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials. 2nd edition (Wiley, Chichester, UK, 2009).
- Allard, J.-F., et Champoux, Y. (1989). In-situ two-microphone technique for the measurement of the acoustic surface impedance. *Noise Control Engineering Journal*, 32 (1), 15-23.
- Alvarez, J.D. et Jacobsen, F. (2008). An iterative method for determining the surface impedance of acoustic materials *in situ*. Communication présentée à Internoise2008, Shanghai, China.
- American Society for Testing Material International. (2005) Standard Practices for Mounting Test Specimens During Sound Absorption Tests. Norme E795-05 (réapprouvée en 2012).
- American Society for Testing Material International. (2009). Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method. Norme C423-09a.
- American Society for Testing Material International. (2012). Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System. Norme ASTM E1050-12
- American Society for Testing Material International. (2016) Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials. Norme ASTM C522-03.
- Arcand, R. (2006). Surveillance de la santé en milieu de travail au Québec. *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, 40-41, 317-319.
- Berry A., Dia R., et Robin O. (2012). A Wave Field Synthesis Approach to Reproduction of Spatially-Correlated Sound Fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131 (2), 1226-1239.
- Brandao, E., Tijs, E., Lenzi, A., et H.-E. de Bree, H.-E. (2011). A comparison of three methods to calculate the surface impedance and absorption coefficient from measurements under free field or *in situ* conditions. *Acta Acustica United with Acustica*, 97, 2826-2831.
- Brandao, E., Lenzi, A. et Cordioli, J. (2012). Estimation and minimization of errors caused by sample size effect in the measurement of the normal absorption coefficient of a locally reactive surface. *Applied Acoustics*, 73, 543-556.
- Brandao, E., Lenzi, A. et Pau, S. (2015). A review of the *in situ* impedance and sound absorption measurement techniques. *Acta Acustica united with Acustica*, 101 (3), 443-463.
- Concha-Barrientos, M., Campbell-Lendrun, D. et Steenland, K. (2004). Occupational noise: Assessing the burden of disease from work-related hearing impairment at national and local levels (Rapport World Health Organization, Environmental Burden of Disease Series No9). Tiré de [http://www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/publications/en/ebd9.pdf](http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/en/ebd9.pdf)

Champoux, Y. et Richarz, W. (1990). An aid in the numerical integration for *in situ* acoustic impedance and absorption coefficient measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87 (4), 1809-1812.

Champoux, Y. et L'Espérance, A. (1988). Numerical evaluation of errors associated with the measurement of acoustic impedance in a free field using two microphones and a spectrum analyzer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84 (1), 30-38.

De Geetere, L., Vermeir, G., et Lauriks, W. (2000). *In situ* measurement of the absorption coefficient at normal incidence using MLS-sequences and 1 or 2 microphone techniques. Communication présentée à Internoise2000, Nice, France. Tiré de <http://www.conforg.fr/internoise2000/cdrom/data/articles/000652.pdf>

Di, X. et Gilbert, K. (1994). An exact Laplace transform formulation for a point source above a ground surface. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93 (2), 714-720.

Din, N., Otsuru, T., Tomiku, R., N. Okamoto N., et Asniawaty, K. (2013). Reproducibility and applicability of ensemble averaged surface normal impedance of materials using an in-situ technique, " *Acoustics Australia*, 41(3), 207-212.

Doutres, O., Salissou, Y., Atalla, N., et Panneton, R. (2010) Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. *Applied Acoustics*, 71 (6), 506-509.

Ducourneau, J., Planeau, V., Chatillon, J. et Nejade, A. (2009). Measurement of sound absorption coefficients of flat surfaces in a workshop. *Applied Acoustics*, 70, 710-721.

Duguay, P., Boucher, A. et Busque, M.-A. (2014). *Statistiques sur les maladies professionnelles au Québec, Colloque IRSST – Maladie professionnelles : portrait, défis et perspectives*, Novembre 2014

Duguay, P., Boucher, A., Prud'homme, P., Busque, M.-A. et Lebeau, M. (2017). Lésions professionnelles indemnisées au Québec en 2010-2012 Profil statistique par industrie - catégorie professionnelle, Rapport IRSST R-963. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-963.pdf>

Girard, S.-A., Picard, M., Simard, M., Larocque, R., Turcotte, F., Lavoie, M., De Guise, J., Paquette, G. et Simpson, A. (2005). Étude exploratoire de la relation entre l'exposition au bruit en milieu de travail, la perte d'audition permanente et la sécurité routière (Rapport INSPQ-2004-075). Tiré de <https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/341-bruitmilieutravailsecuriteroutiere.pdf>

Girard, S.-A., Leroux, T., Quesnel, J.-P., Courteau, M., Picard, M., Turcotte, F. et Laroque, R. (2010). Que coûte le bruit en milieu de travail au régime d'indemnisation ? Une perspective québécoise ! *Assurances et gestion des risques*, 78 (1-2), 101-123.

Hirosawa, K., Takashima, K., Nakagawa, H., Kon, M., Yamamoto, A. et Lauriks, W. (2009). Comparison of three measurements techniques for the normal absorption coefficient of sound

absorbing materials in the free field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126 (6), 3020-3027.

International Standard Organization. (1998). Acoustics -- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -- Part 2: Transfer-function method. Norme ISO 10534-2

International Standard Organization. (2003). Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room. Norme ISO 354:2003.

Kruse, R. et Sauerzapf, S. (2008). Reducing the Influence of Microphone Errors on In-Situ Ground Impedance Measurements. *Acta Acustica United with Acustica*, 94, 151-155.

Kuipers, E.R., Wijnant, Y.H. et de Boer, A. (2012). A numerical study of a method for measuring the effective *in situ* sound absorption coefficient. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132 (3), EL236-EL242.

Kuipers, E.R., Wijnant, Y.H. et de Boer, A. (2014a). Measuring sound absorption: considerations on the measurement of the active acoustic power. *Acta Acustica united with Acustica*, 100, 193-204.

Kuipers, E.R., Wijnant, Y.H. et de Boer, A. (2014b). Measuring oblique incidence sound absorption using a local plane wave assumptions. *Acta Acustica united with Acustica*, 100, 205-214.

Lanoye, R., Vermeir, G., Lauriks, W., Kruse, R. et Mellert, V. (2006). Measuring the free-field acoustic impedance and absorption coefficient of sound absorbing materials with a combined particle velocity-pressure sensor. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119 (5), 2826-2831.

Li, J.-F. et Hodgson, M. (1997). Use of pseudo-random sequences and a single microphone to measure surface impedance at oblique incidence. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102 (4), 2200-2210.

Martin, R., Belzile, D., Deshaies, P., Fortier, P., Laroche, C., Girard, S.-A., Leroux, T., Nélisse, H., Arcand, R., Picard, M. et Poulin, M. (2007). Le bruit comme facteur explicatif dans les enquêtes pour accidents mortels au travail : étude descriptive. Communication présentée à Noise At Work : premier forum européen sur les solutions efficaces pour maîtriser les risques du bruit au travail, Lille, France.

Michel, C., Funès, A., Martin, R., Fortier, P., Girard, S.-A., Deshaies, P., St-Cyr, J.-P., Tremblay, I. et Gagné, M. (2014). Portrait de la surdité professionnelle acceptée par la Commission de la santé et de la sécurité du travail au Québec : 1997-2010 – Troubles de l'audition sous surveillance (Rapport INSPQ). Tiré de [https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1770\\_Portrait\\_Surdite\\_Professionnelle.pdf](https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1770_Portrait_Surdite_Professionnelle.pdf).

Millette, C. (2014). Prévention auditive [Présentation aux collaborateurs de l'ASFETM]. Tiré de <http://asfetm.com/wp-content/uploads/2013/12/PreventionauditiveCollaborateurs2014.pdf>.

Müller-Trapet, M., Dietrich, P., Aretz, M., van Gemmeren, J. et Vorländer, M. (2013). On the *in situ* impedance measurement with pu-probes – Simulation of the measurement setup. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134 (2), 1082-1089.

Nash, A. (2012). On the reproducibility of measuring random incidence sound absorption. Communication présentée à InterNoise 2012, New-York City, USA (p. 1-12).

Nobile, M., et Hayek, S. (1985). Acoustic propagation over an impedance plane. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 78 (4), 1325-1336.

Otsuru, T., Tomiku, R., Din, N., Okamoto, N. et Murakami, M. (2009). Ensemble averaged surface normal impedance of material using an in-situ technique: Preliminary study using boundary element method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125, 3784-3791.

Pearson, M., L'Espérance, A., Boudreault, L.-A., Sgard, F., Nélisse, H., et Boutin, J. (2011). Développement d'un système de cartographie d'intensité acoustique et transfert en milieu de travail. Rapport de recherche IRSST R-714. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-714.pdf>

Powell, M. J. D. (1964). An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *Computer Journal*, 7 (2): 155–162. doi:10.1093/comjnl/7.2.155.

Robin, O., Berry, A., et Moreau, S. (2013). Reproduction of Random Pressure Fields based on Planar Nearfield Acoustic Holography. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133, 3885-3899.

Robin, O., Berry, A., Doutres, O. et Atalla, N. (2014). Measurement of the absorption coefficient of sound absorbing materials under a synthesized diffuse acoustic field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136, EL13-19.

Robin, O., Berry, A., Doutres, O. et Atalla, N. (2014). Mesure du Coefficient d'Absorption de Matériaux Poreux sous Champ Acoustique Diffus Synthétique. Communication présentée au 12<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique, Poitiers, France.

Robin, O., Amédin, C.K., Berry, A., Atalla, N., Doutres, O. et Sgard, F. (2015). Assessing sound absorption coefficient under a synthesized diffuse acoustic field: Effect of the sample size and nature. Communication présentée à InterNoise2015, San Francisco, USA.

Robin, O., Amédin, C.K., Berry, A., Atalla, N., Doutres, O. et Sgard, F. (2016). A numerical study of a method for estimating sound absorption coefficient under a synthesized diffuse acoustic field. Communication présentée à 9th International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress, Graz, Austria [publiée ensuite dans la revue *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* 9(3):1111-1116, 2016].

Robin, O., Amédin, C.K., Berry, A., Atalla, N., Doutres, O. et Sgard, F. (2016). Sound Absorption Measurements: Comparison of Standard Tests in Reverberant Room with Measurements using a Synthesized Diffuse Acoustic Field. Communication présentée à InterNoise2016, Hamburg, Germany, 4139-4148.

Salissou, Y., et Panneton, R. (2007) Pressure/mass method to measure open porosity of porous solids. *J. Appl. Phys.*, 101:124913.1–3.7.

Takahashi, Y., Otsuru, T. et Tomiku, R. (2005). *In situ* measurements of surface impedance and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise. *Applied Acoustics*, 66, 845-865.

Tamura, M., Allard, J.-F., et Lafarge, D. (1995). Spatial Fourier-transform method for measuring reflection coefficients at oblique incidence. II. Experimental results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(4), 2255-2262.

Toppila, E. Pyykkö, I. et Pääkkönen, R. (2009). Evaluation of the increased accident risk from workplace noise. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 15 (2), 155-162.

Veen, J., Pan, J. et Saha, P. (2005). Standardized test procedures for small reverberation rooms. *Sound and Vibration*, 18-20

Vercammen, M. (2010). Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354. Communication présentée à International Symposium on Room Acoustics, Melbourne, Australia.

Vézina, M., Cloutier, E., Stock, S., Lippel, K., Fortin, E., Delisle, A., St-Vincent, M., Funès, A., Duguay, P. et Prud'homme, P. (2011). Enquête québécoise des conditions de travail, d'emploi et de SST (EQCOTESST) (Rapport IRSST-R691). Tiré de <http://www.irsst.gc.ca/media/documents/pubirsst/r-691.pdf>

Zhang, Y., Tan, S., Kuang, Z., Wu, M. et Yang, J. (2016). Measurement of sound absorbing properties under a plane-wave sound field reproduced by linear loudspeaker array. Communication présentée à 23<sup>rd</sup> international congress on sound and vibration, Athens, Greece, 1-8.

Zhang, Y., Kuang, Z., Wu, M. et Yang, J. (2015). *In-situ* measurement of sound absorbing properties using plane-wave sound field reproduced by virtual loudspeaker array. *Building and environment*, 94, 883-890.





## ANNEXE A : PHOTOS TIRÉES DES ESSAIS

### A.I Mesure des propriétés des matériaux



Figure 52 – Système de mesure de la résistivité au passage de l'air statique.



Figure 53 – Mise en place d'un échantillon de laine de verre dans le porte-échantillon pour la mesure de la résistivité au passage de l'air statique.

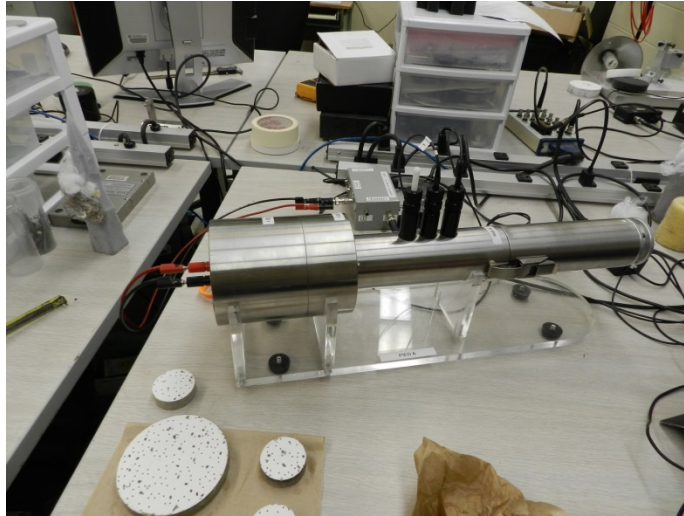


Figure 54 – Tube d'impédance à trois microphones, de diamètre 44,5 mm.

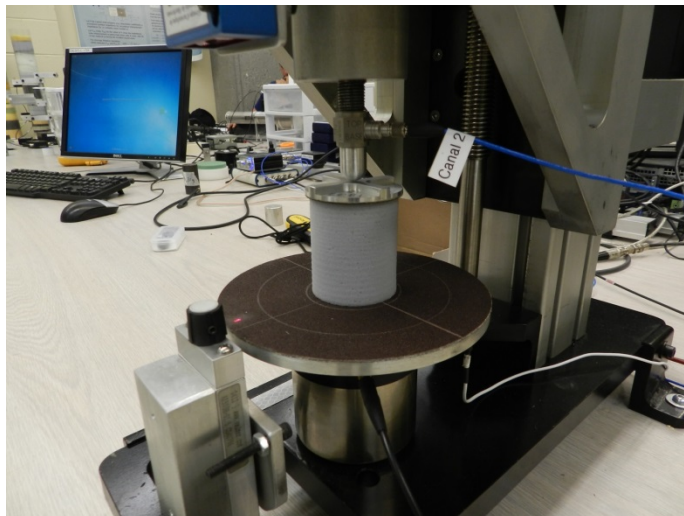
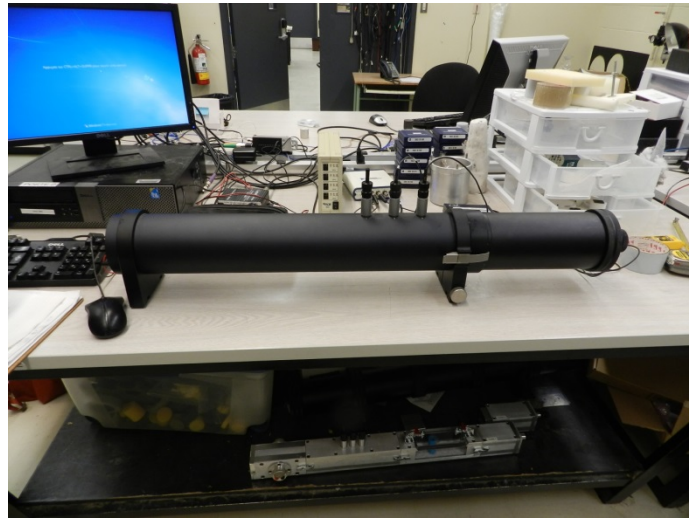
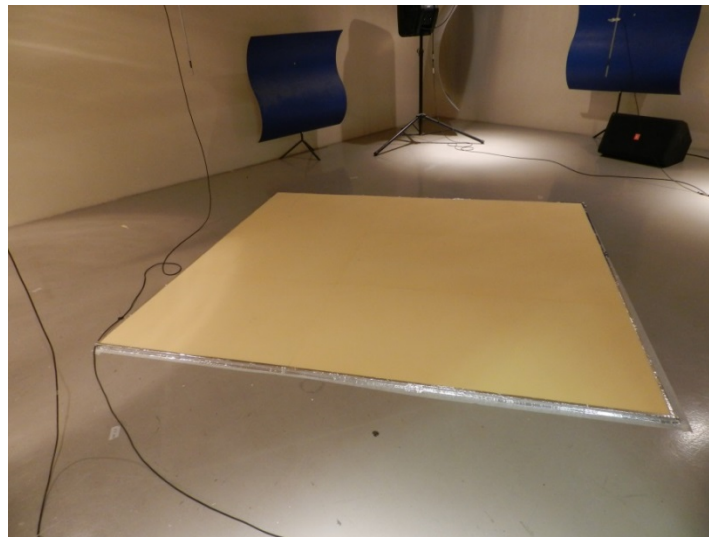


Figure 55 – Exemple de test à l'analyseur mécanique quasi-statique pour la mesure du module d'Young, du coefficient de Poisson et du facteur d'amortissement.

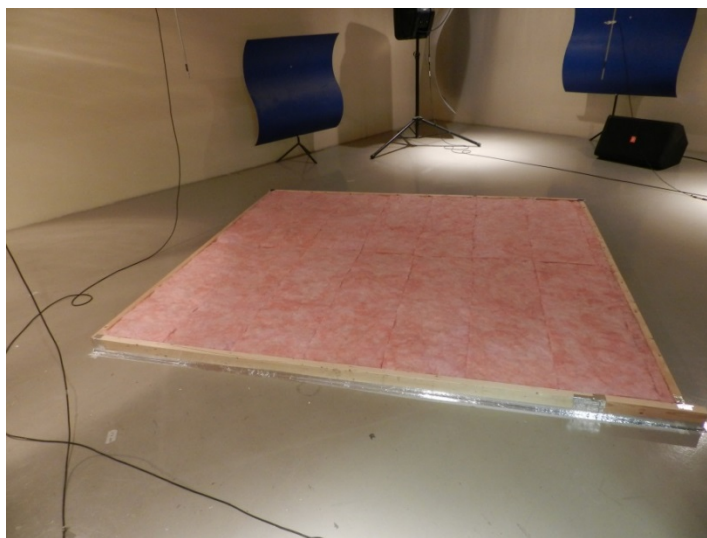


**Figure 56 – Tube d'impédance à trois microphones, de diamètre 100 mm.**

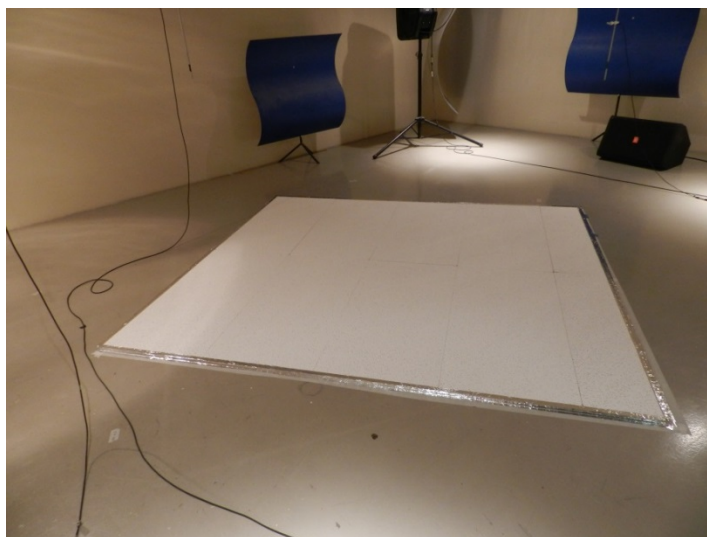
## **A.II Tests en chambre réverbérante**



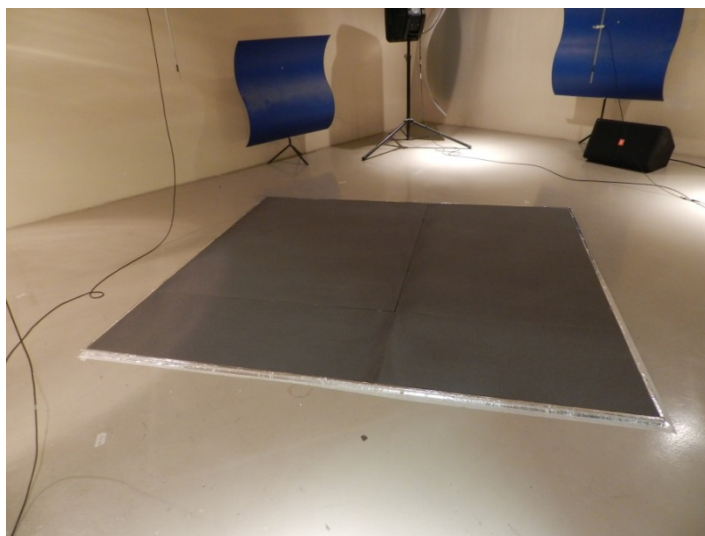
**Figure 57 – Test de la mousse de mélamine en chambre réverbérante.**



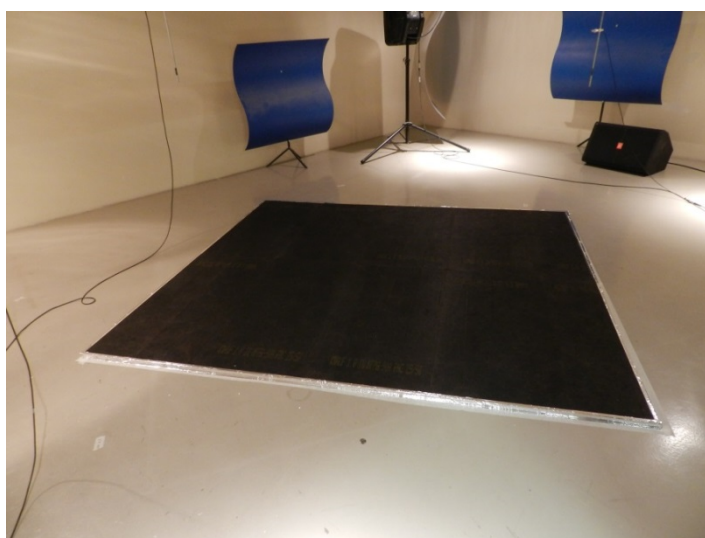
**Figure 58 – Test de la laine de verre en chambre réverbérante.**



**Figure 59 – Test de la tuile de plafond en chambre réverbérante.**



**Figure 60 – Test de la mousse PU en chambre réverbérante.**



**Figure 61 – Test des panneaux de fibre de verre compressée (RPL) en chambre réverbérante.**

#### A.IV Tests sous excitations champ diffus synthétique

##### A.IV.I Mesures en conditions contrôlées (chambre anéchoïque)

##### A.IV.II Mesures dans un petit local de travail



Figure 62 – Mesures pour le cas de la laine de roche dans le local du « LCMA ».

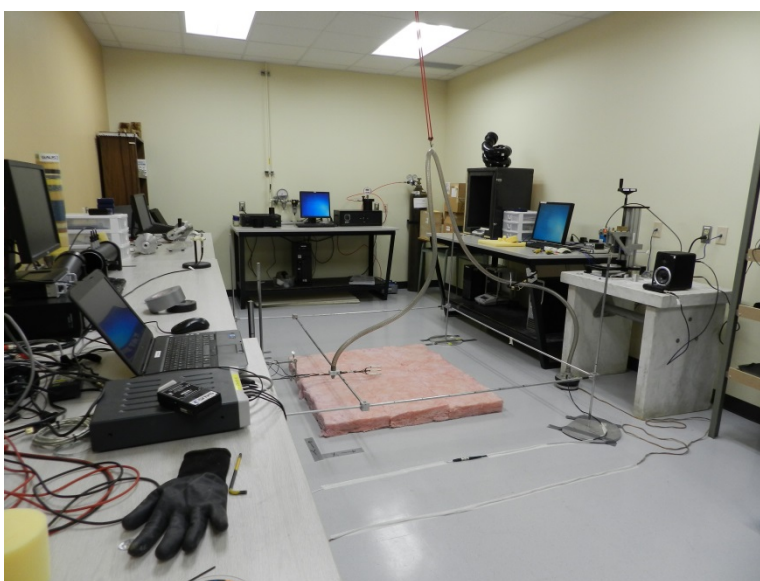
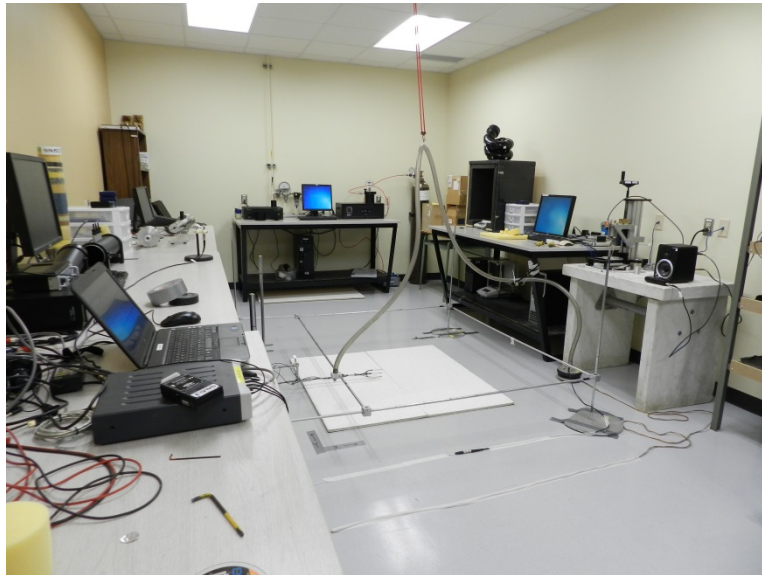
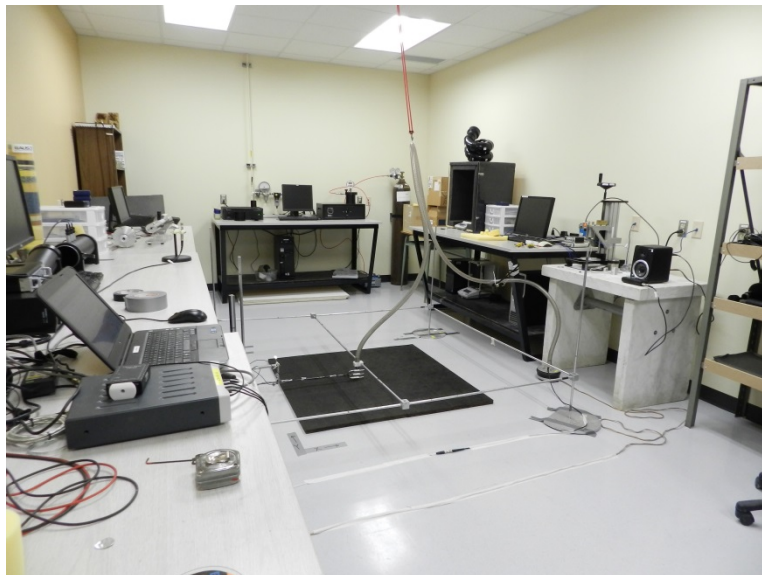


Figure 63 – Mesures pour le cas de la laine de verre dans le local du « LCMA ».



**Figure 64 – Mesures pour le cas de la tuile de plafond dans le local du ‘LCMA’.**



**Figure 65 – Mesures pour le cas du panneau de fibre de verre comprimée dans le local du « LCMA ».**

**A.IV.III Mesures dans un atelier de fabrication (Faculté de génie mécanique)**

Figure 66 – Mesures pour le cas de la mousse de mélamine dans le local « atelier ».

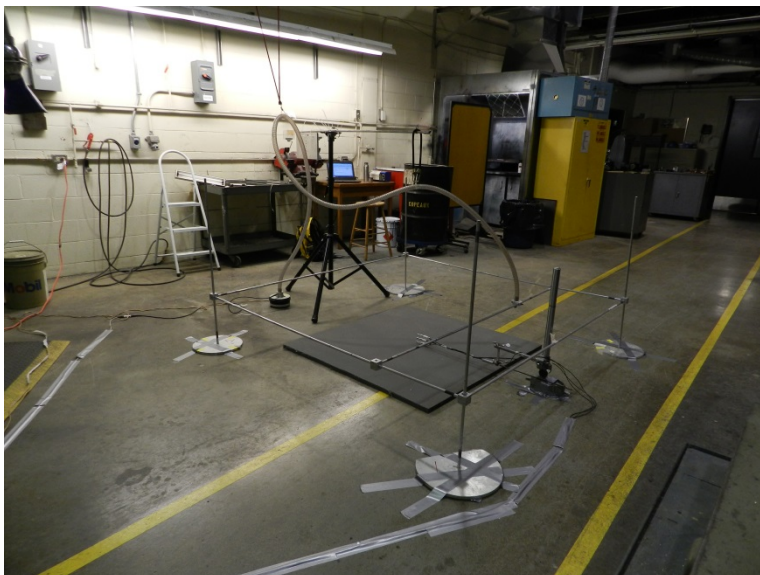


Figure 67 – Mesures pour le cas de la mousse PU dans le local « atelier ».



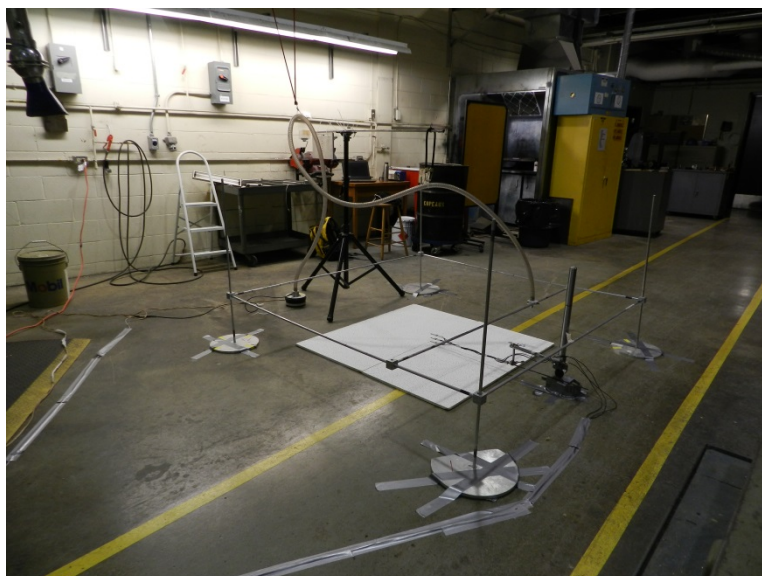


Figure 68 – Mesures pour le cas de la tuile de plafond dans le local « atelier ».

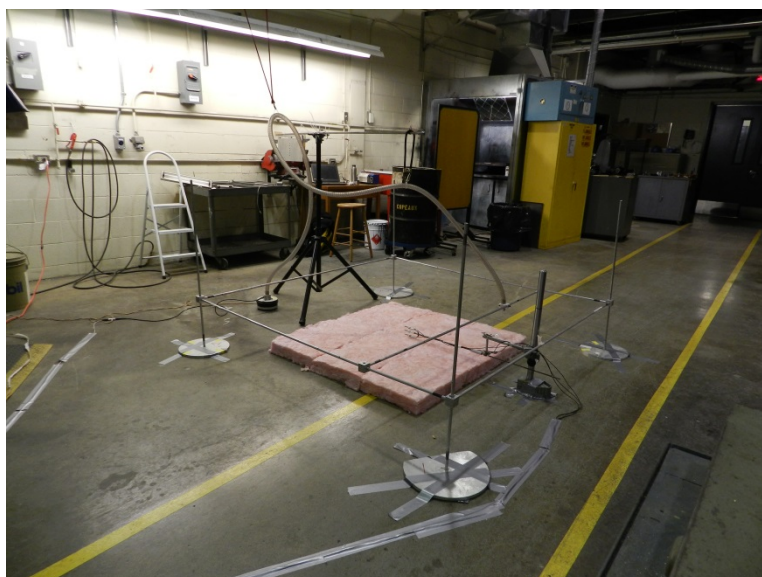
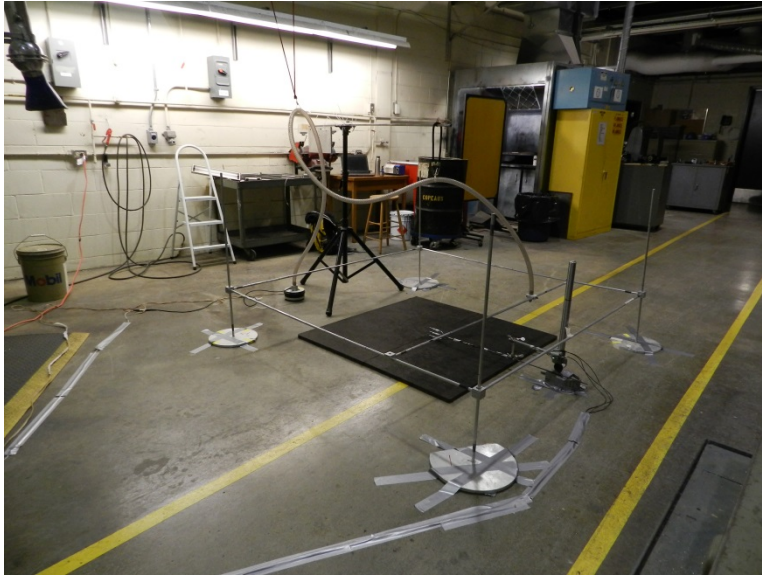


Figure 69 – Mesures pour le cas de la laine de verre dans le local « atelier ».



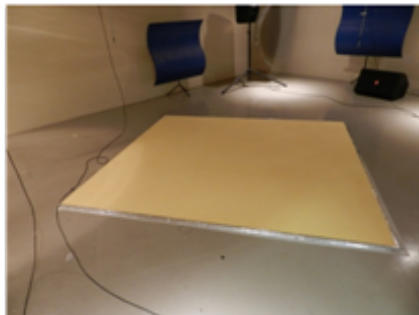
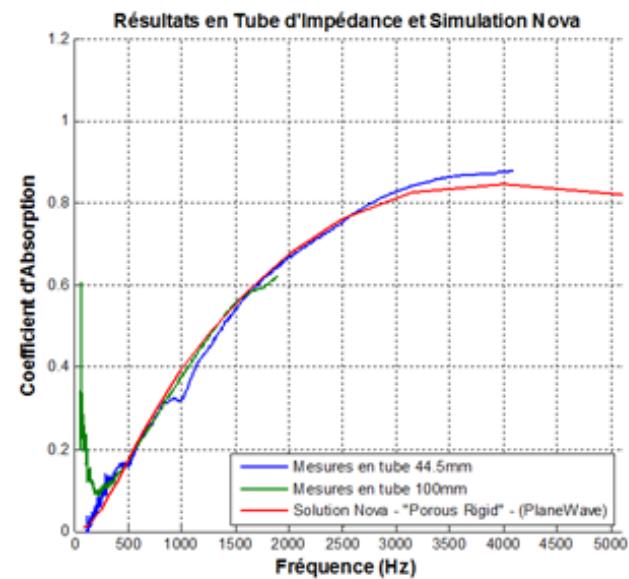
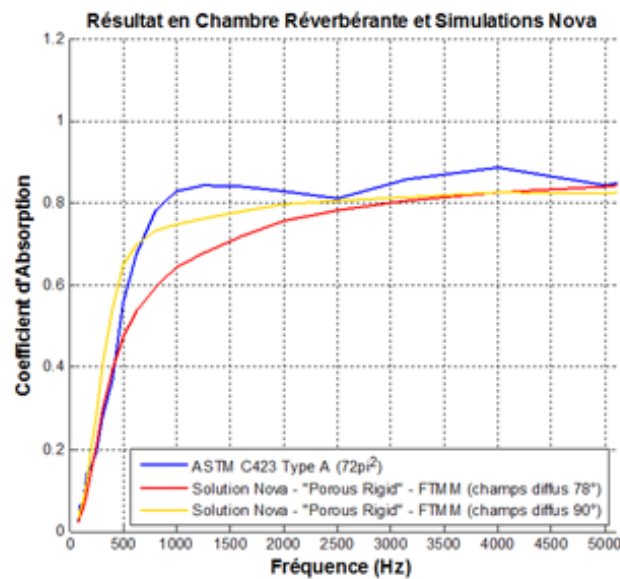
**Figure 70 – Mesures pour le cas du panneau de fibre de verre compressée dans le local « atelier ».**



**Figure 71 – Mesures pour le cas de la laine de roche dans le local « atelier ».**

## ANNEXE B : RÉSULTATS DES MESURES COMPLÉMENTAIRES

### B.I Résultats de caractérisation des matériaux en laboratoire



	Mesurée	Simulée (Nova)	Propriétés mécaniques	
Densité (kg/m³) :	6.11 ± 0.01	6.11	Module de Young (kPa):	24.33 ± 3.40
Porosité :	0.982 ± 0.006	0.982	Coefficient de Poisson:	0.39 ± 0.047
Résistivité (Ns/m4) :	7 920 ± 346	7 920	Coefficient d'amortissement:	0.04 ± 0.003
Tortuosité :		1.00004		
Longueur Caractéristique Visqueuse (µm) :		132.65		
Longueur Caractéristique Thermique (µm) :		149.92		

Figure 72 – Résultats complets de caractérisation de la mousse de mélamine.

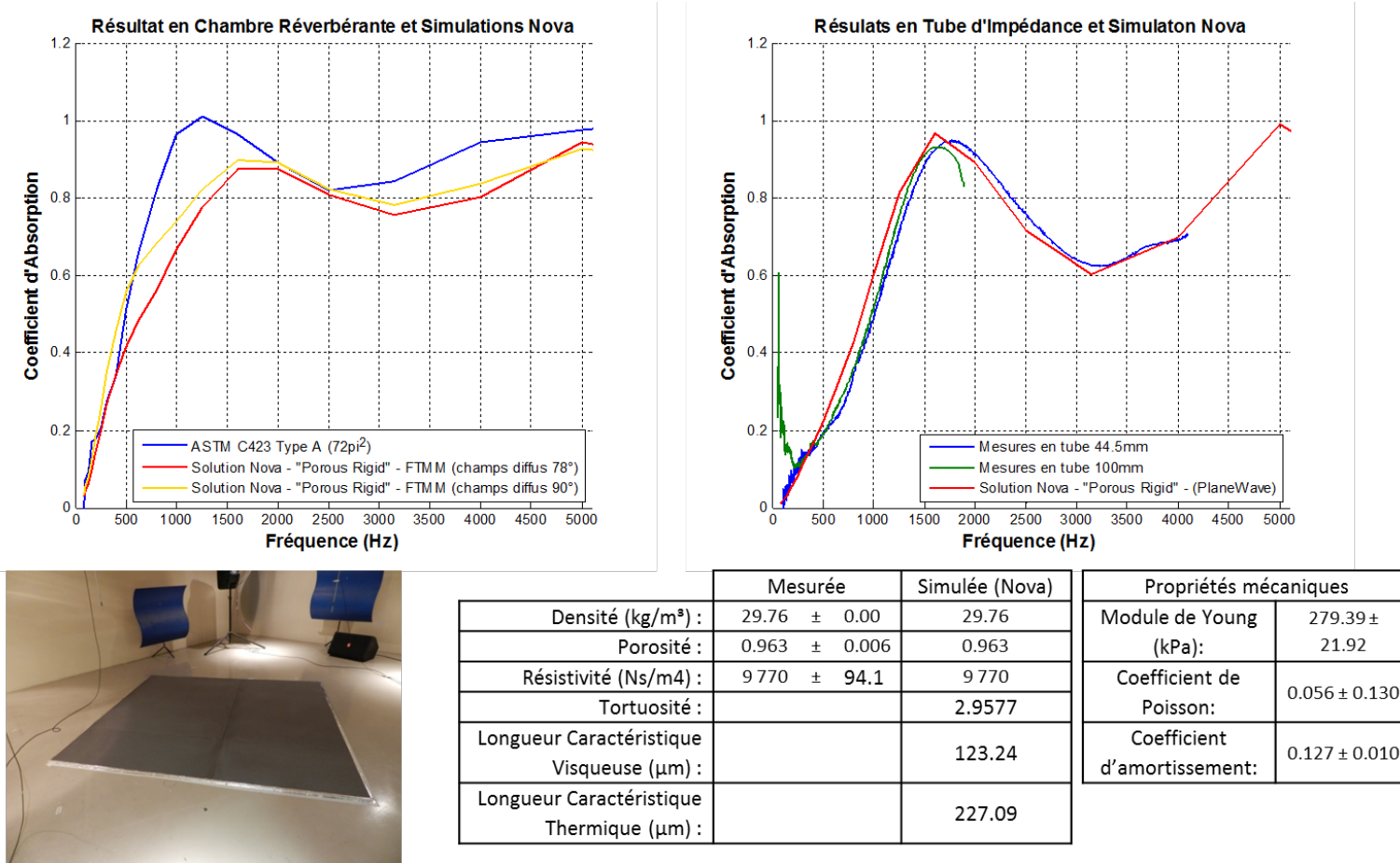
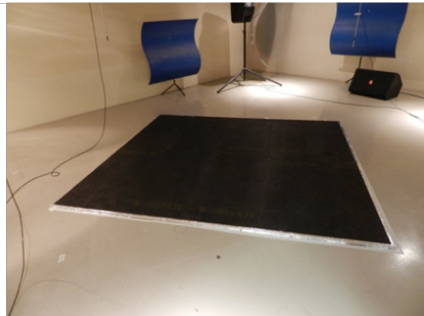
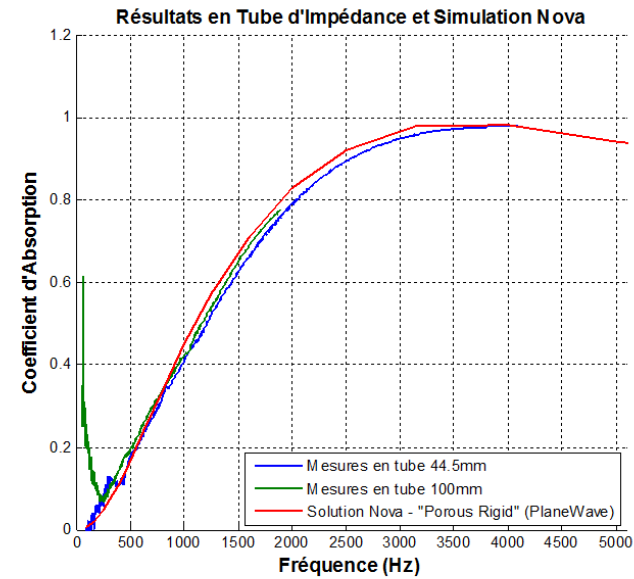
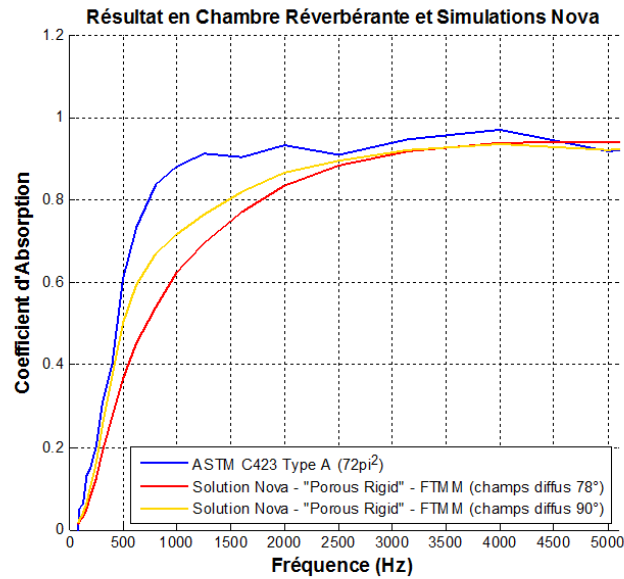


Figure 73 – Résultats complets de caractérisation de la mousse PU.



	Mesurée	Simulée (Nova)	Propriétés mécaniques	
Densité (kg/m³) :	66.46 ± 0.01	66.46	Module de Young (kPa):	108.36 ± 24.12
Porosité :	0.958 ± 0.004	0.958	Coefficient de Poisson:	0 (fibreux)
Résistivité (Ns/m4) :	22 200 ± 580	22 200	Coefficient d'amortissement:	0.054 ± 0.023
Tortuosité :		1.00		
Longueur Caractéristique Visqueuse (µm) :		57.56		
Longueur Caractéristique Thermique (µm) :		115.12		

Figure 74 – Résultats complets de caractérisation du panneau de fibre de verre compressée (RPL).

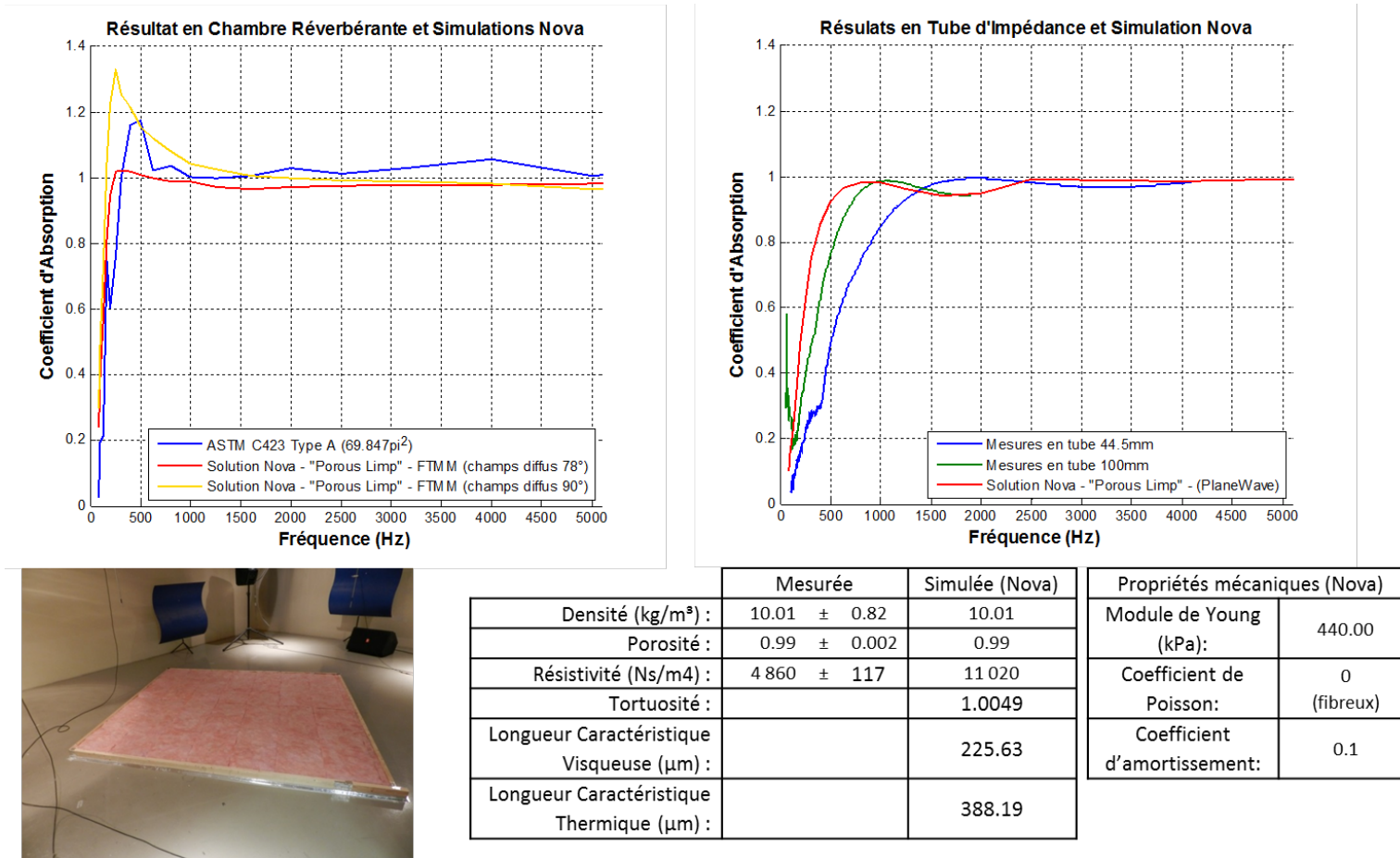
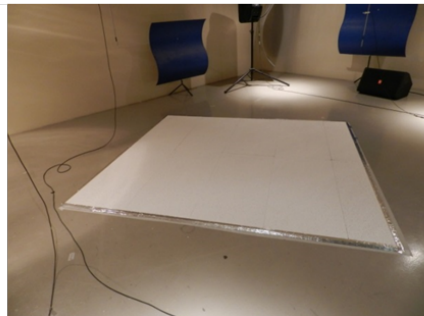
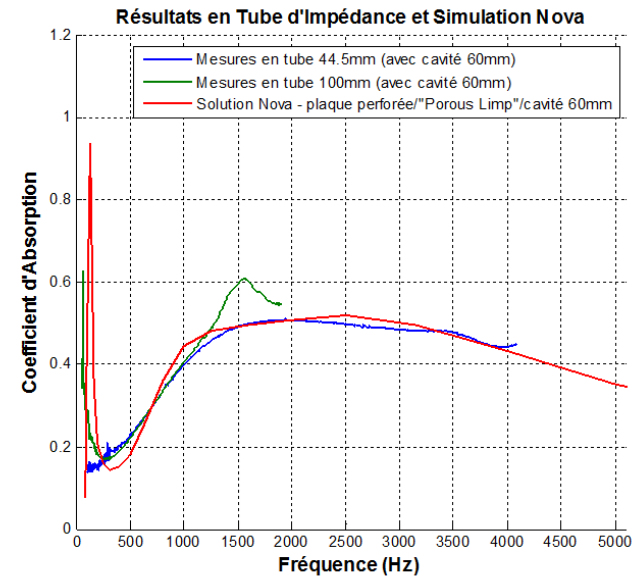
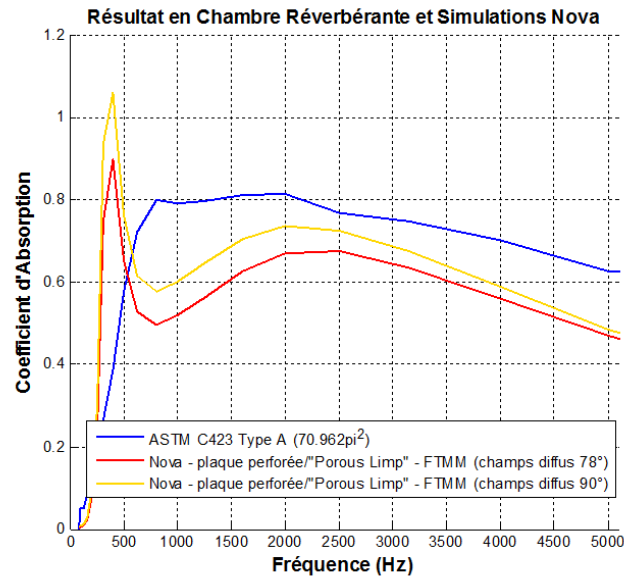


Figure 75 – Résultats complets de caractérisation de la laine de verre.



	Mesurée	Simulée (Nova)	Propriétés mécaniques	
Densité (kg/m³) :	210.46 ± 0.06	210.5	Module de Young (GPa):	1.45
Porosité :	0.825 ± 0.006	0.825		
Résistivité (Ns/m4) :	1 220 000 ± 23 900	890 000	Coefficient de Poisson:	N/A
Tortuosité :		8.00		
Longueur Caractéristique Visqueuse (µm) :		25.00	Coefficient d'amortissement:	0,2
Longueur Caractéristique Thermique (µm) :		60.00		

Figure 76 – Résultats complets de caractérisation de la tuile de plafond.