

Numéro d'ordre : 42233

UNIVERSITÉ DE LILLE 1

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR
MICRO ET NANO-TECHNOLOGIES ACOUSTIQUE ET TÉLÉCOMMUNICATIONS

T H È S E

pour obtenir le grade de

Docteur

Mention : Acoustique

Présentée et soutenue par

Emmanuel ATTAL

Caractérisation et optimisation d'assemblages d'éléments de murs végétalisés par méthodes acoustique et vibratoire

Thèse préparée à

L'INSTITUT D'ELECTRONIQUE, DE MICROÉLECTRONIQUE ET DE NANOTECHNOLOGIE

Soutenue le 14 décembre 2016 devant la commission d'examen :

Jury :

<i>Président</i>	Nicolas DAUCHEZ	Professeur, Laboratoire Roberval, UT de Compiègne
<i>Rapporteurs</i>	Olivier DAZEL	Professeur, LAUM, Université du Maine
	Benoit GAUVREAU	Chargé de Recherche HDR, IFSTTAR, Nantes
<i>Examineurs</i>	Jocelyne COUTTE	Maître de Conférence, LGCgE, Université d'Artois
	Catherine LAVANDIER	Professeur, ETIS, Université de Cergy-Pontoise
<i>Co-encadrant</i>	Nicolas CÔTÉ	Enseignant-Chercheur, IEMN-ISEN, Lille
<i>Directeur de thèse</i>	Bertrand DUBUS	Directeur de Recherche CNRS, IEMN, Lille
<i>Invité</i>	Patrice ANDRÉ	Ingénieur ADEME, Valbonne



Beethoven, Prélude n^o2 Op.39

A mes parents,

Cette thèse a été soutenue par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise d'Energie (ADEME), le Groupe YNCREA (HEI-ISA-ISEN) et l'Institut du Développement Durable et Responsable (IDDR) de l'Université Catholique de Lille ainsi que la région Hauts de France

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à mon Directeur de Thèse Bertrand DUBUS, Directeur de Recherche CNRS, tant pour la formation et la rigueur scientifique qu'il m'a apporté tout au long de cette thèse que pour le soutien important par ses encouragements, sa patience, ses attitudes toujours positive et ses qualités humaines.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à mon co-encadrant Nicolas Côté, Enseignant-Chercheur à l'ISEN, qui est à l'origine du financement de cette thèse, pour son encadrement, la compétence dans le domaine du traitement du signal sonore qu'il m'a transmise, son investissement dans la mise en place du dispositif expérimental, ainsi que pour les nombreuses discussions et observations positives que nous avons pu avoir tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont ensuite à Nicolas DAUCHEZ, Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne pour avoir accepté de présider mon jury de thèse, mais aussi pour m'avoir invité à son laboratoire afin de valider mes travaux de recherche en lien avec ma thèse.

Je tiens à remercier mes rapporteurs Olivier DAZEL, Professeur à l'Université du Maine et Benoît GAUVREAU, Chargé de Recherche à l'IFSTTAR pour leur examen attentif du manuscrit et les conseils mentionnés dans leur rapport afin d'améliorer la qualité de ce mémoire .

Je remercie également les autres membres du jury : Patrice ANDRÉ, ingénieur ADEME, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux, Jocelyne COUTTE, Maître de Conférence au LGCgE et Catherine LAVANDIER, Professeur à l'ETIS pour avoir examiné mon mémoire.

Je remercie aussi toute l'équipe du département Acoustique avec laquelle j'ai eu l'occasion d'interagir et plus particulièrement Christian GRANGER, Ingénieur de Recherche CNRS qui m'a formé au début de ma thèse aux techniques instrumentales de laboratoire et m'a également apporté toute sa compétence sur de nombreux aspects scientifiques. Un grand merci à Gerard HAW, Enseignant Chercheur qui a été le principal acteur en matière de fabrication des pièces mécaniques, et sans qui ce travail aurait difficilement pu aboutir.

Bien entendu, je tiens à exprimer ma reconnaissance aux Doctorants, Ingénieurs de Recherche et Stagiaires qui ont partagé mon bureau durant ces trois années et avec lesquels j'ai beaucoup échangé et appris.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'Université du Maine, qui m'a permis d'acquérir des connaissances approfondies en acoustique, durant mes études de Master.

Mes remerciements vont à tous mes amis qui m'ont soutenu : Gaël, Jocelyn, Jérôme, Geoffroy, Amandine, Yann, Emily, Julien, Geoffrey, Christophe, et toutes les autres personnes qui malheureusement ne seront pas mentionnées étant donné qu'elles sont nombreuses.

Enfin, le plus important : j'exprime ma reconnaissance, toute mon affection et ma gratitude à ma famille qui bien que située à l'autre bout de la France a été très présente pour m'encourager et me soutenir moralement. Merci infiniment à mon père Jacques ATTAL pour son éclairage et son aide sur de nombreux aspects scientifiques, merci à ma mère pour son soutien permanent et à ma sœur pour son écoute et ses encouragements.

Liste des symboles

Notations	Unités	Description
a	Rayon du tube d'impédance	(m)
A	Coefficient d'absorption en énergie	
c_0	Célérité du son dans l'air	($m.s^{-1}$)
c_c	Célérité dans la couche d'adaptation	($m.s^{-1}$)
c_{eff}	Célérité effective du son dans le milieu considéré	($m.s^{-1}$)
c_f	Célérité du son dans le fusain	($m.s^{-1}$)
c_m	Célérité moyenne dans la paroi	($m.s^{-1}$)
d	Épaisseur de l'échantillon	(m)
d_c	Épaisseur de la couche d'adaptation	(m)
d_f	Épaisseur de la couche de fusain	(m)
d_t	Épaisseur totale de la paroi	(m)
D_a, D_b	Épaisseur de la cavité d'air entre la face arrière de l'échantillon et le microphone C	(m)
\mathcal{D}	Coefficient de diffusion en énergie	
f	Fréquence	(Hz)
f_0	Fréquence de résonance de la couche en quart de longueur d'onde	(Hz)
f_{min}	Fréquence minimale d'utilisation du tube d'impédance	(Hz)
f_{max}	Fréquence maximale d'utilisation du tube d'impédance	(Hz)
H_{12I}, H_{12II}	Fonction de transfert entre le microphone A et B pour la calibration des microphones	
H_{13I}, H_{13II}	Fonction de transfert entre le microphone A et C pour la calibration des microphones	
$H_{12}(D_i)$	Fonction de transfert entre le microphone A et B pour la mesure directe sur l'échantillon	
$H_{13}(D_i)$	Fonction de transfert entre le microphone A et C pour la mesure directe sur l'échantillon	
$\Im m()$	Partie imaginaire	
j	Nombre complexe	
k	Nombre d'onde	($rad.m^{-1}$)
k_0	Nombre d'onde dans l'air	($rad.m^{-1}$)
k_c	Nombre d'onde dans la couche d'adaptation	($rad.m^{-1}$)
k_{eff}	Nombre d'onde effectif	($rad.m^{-1}$)
k_f	Nombre d'onde dans le fusain	($rad.m^{-1}$)
l	Distance entre l'échantillon et le microphone B	(m)
l'	Distance entre le microphone A et les haut-parleurs	(m)
L	Longueur du tube d'impédance	(m)
p_{max}	Amplitude maximale de la pression dans le tube	(Pa)
p_{min}	Amplitude minimale de la pression dans le tube	(Pa)

$P_i(x)$	Pression acoustique en x, (i=1 ; 2)	(Pa)
P_1, P_2	Pressions mesurées par les microphones A et B	(Pa)
r_∞	Coefficient de réflexion en pression (terminaison anéchoïque)	
r_{rigide}	Coefficient de réflexion en pression (terminaison rigide)	
$r_{\text{rigide+air}}$	Coefficient de réflexion en pression en présence d'une cavité d'air	
\mathcal{R}	Coefficient de réflexion en énergie	
$\Re()$	Partie réelle	
s	Espacement entre les microphones A et B	(m)
S_A, S_B, S_C	Sensibilités des microphones A, B et C	(V.Pa ⁻¹)
t_∞	Coefficient de transmission en pression en terminaison anéchoïque	
TOS	Taux d'Ondes Stationnaires	
\mathcal{T}	Coefficient de transmission en énergie	
$T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$	Paramètres de la matrice de transfert	
$V_A^I, V_B^I, V_A^{II}, V_B^{II}$	Tensions aux bornes des microphones A et B (calibration)	(V)
V_f	Volume du feuillage	(m ³)
$V_i(x)$	Vitesse acoustique en x, (i=1 ; 2)	(m.s ⁻¹)
V_{total}	Volume total de l'échantillon	(m ³)
Z_2	Impédance caractéristique de la seconde couche d'adaptation	(Rayls)
Z_c	Impédance caractéristique de la couche d'adaptation	(Rayls)
Z_{eff}	Impédance caractéristique effective	(Rayls)
Z_f	Impédance caractéristique du fusain	(Rayls)
Z_{opt}	Impédance caractéristique optimale	(Rayls)
Z_s	Impédance de surface de l'échantillon	(Rayls)
α_∞	Coefficient de dissipation en terminaison anéchoïque	
α_{rigide}	Coefficient d'absorption en terminaison rigide	
η_f	Fraction volumique de feuillage (densité foliaire)	
λ	Longueur d'onde	(m)
ρ_0	Masse volumique de l'air	(kg.m ⁻³)
ρ_{eff}	Masse volumique effective	(kg.m ⁻³)
ρ_f	Masse volumique du feuillage	(kg.m ⁻³)
ρ_{sm}	Masse volumique statique de l'ensemble air-feuilles	(kg.m ⁻³)
σ	Résistance au passage de l'air	(N.m ⁻⁴ .s)
τ_∞	Tortuosité	
ϕ_f	Porosité du feuillage	
φ_r	Phase du coefficient de réflexion en pression (terminaison rigide)	(rad)
χ_{eff}	Module de compressibilité effectif	(Pa ⁻¹)
ω	Pulsation	(rad.s ⁻¹)

Table des matières

Introduction Générale	1
1 Contexte et état de l'art	3
1.1 Introduction	4
1.2 Les parois végétalisées	4
1.2.1 Historique des parois végétalisées	4
1.2.2 Apports attendus des parois végétalisées	5
1.2.3 Types de parois végétalisées existantes	6
1.2.4 Les parois végétalisées verticales avec plante grimpante	7
1.2.5 Les parois complexes végétalisées verticales avec substrat mince	8
1.2.6 Les parois complexes végétalisées verticales avec substrat dans des modules alvéolaires	8
1.2.7 Les parois complexes végétalisées verticales avec substrat dans des cages métalliques	9
1.3 Généralités sur les propriétés acoustiques des parois	10
1.3.1 Définition des grandeurs acoustiques caractéristiques d'une paroi	10
1.3.2 Interaction onde plane - paroi infinie	10
1.3.3 Méthodes de caractérisation des propriétés acoustiques d'une paroi	12
1.4 Propriétés acoustiques et vibratoires de parois végétalisées	20
1.4.1 Propriétés acoustiques du feuillage	20
1.4.2 Propriétés vibratoires des feuillages	23
1.4.3 Propriétés acoustiques des substrats	24
1.4.4 Propriétés acoustiques d'ensembles composés de végétal et de substrat	26
1.5 Conclusion du Chapitre	33
2 Mise en place du banc expérimental et validations	35
2.1 Introduction	36
2.2 Définition du cahier des charges	36
2.2.1 Banc de mesure	36
2.2.2 Méthodologie de conception et de validation du banc de mesure	38
2.3 Dispositif de caractérisation acoustique des échantillons	39
2.3.1 Dimensionnement et mise en place du tube d'impédance	39
2.3.2 Fonctionnement du programme d'automatisation du banc acoustique	41

2.3.3	Principes théoriques de détermination des paramètres acoustiques	45
2.3.4	Validation du dispositif développé	49
2.4	Dispositif de caractérisation vibratoire des échantillons	56
2.4.1	Principe de fonctionnement et mise en oeuvre du vibromètre laser à balayage	57
2.4.2	Couplage du vibromètre laser à balayage au tube d'impédance	58
2.4.3	Caractérisations vibratoire et acoustique d'échantillons de mousse de mélamine	59
2.5	Conclusion du chapitre	66
3	Caractérisations acoustique et vibratoire d'échantillons de type feuillage	67
3.1	Introduction	68
3.2	Protocole expérimental	68
3.3	Caractérisation vibratoire des feuilles	71
3.4	Mesure des paramètres acoustiques effectifs des feuillages	76
3.4.1	Matrice de transfert du feuillage	76
3.4.2	Détermination des paramètres effectifs du feuillage	77
3.5	Coefficients acoustiques de parois constituées de feuillage	87
3.5.1	Coefficients de réflexion et d'absorption acoustique de paroi en terminaison rigide	87
3.5.2	Coefficients de réflexion et de dissipation de paroi en terminaison anéchoïque	92
3.6	Caractérisations vibratoire et acoustique d'échantillons de feuillage	96
3.7	Calcul des coefficients acoustiques des parois à partir des propriétés effectives	99
3.8	Conclusion du chapitre	101
4	Caractérisation des propriétés effectives et des paramètres acoustiques d'échantillons de substrat	103
4.1	Introduction	104
4.2	Propriétés effectives des substrats	104
4.2.1	Cas de la Fibre de coco	104
4.2.2	Cas de la Perlite	110
4.2.3	Cas de la Tourbe de coco	115
4.3	Mesure des coefficients acoustiques des échantillons de substrats	120
4.3.1	Cas de la fibre de coco	120
4.3.2	Cas de la perlite	123
4.3.3	Cas de la tourbe de coco	125
4.4	Conclusion du chapitre	128
5	Étude et optimisation de l'assemblage d'éléments individuels constituant un mur végétalisé	129
5.1	Introduction	130
5.2	Etude de la superpositions de feuillage et de substrat	130
5.2.1	Cas de la superposition de fusain et de fibre de coco	131
5.2.2	Cas de la superposition de fusain et de perlite	133
5.2.3	Cas de la superposition du fusain et de la tourbe de coco	136
5.3	Modélisation et optimisation du coefficient de réflexion d'une paroi végétalisée	138
5.3.1	Modélisation de la superposition d'une couche de feuillage de fusain sur substrat absorbant	139

5.3.2	Modélisation d'un bi-couche sur substrat absorbant	141
5.3.3	Généralisation à un multicouche sur substrat absorbant	143
5.4	Conclusion du chapitre	143
Conclusion		145
Bibliographie		155
A	Liste des contributions scientifiques	157
B	Indice d'affaiblissement acoustique et isolement de paroi	159
C	Validation du calcul des paramètres acoustiques effectifs sur un tronçon d'air	161
C.1	Paramètres effectifs mesurés sur un tronçon d'air de 16 cm	161
C.1.1	Matrice de transfert mesurée	161
C.1.2	Paramètres effectifs calculés pour le tronçon d'air	163
D	Effet des branches sur l'absorption acoustique des feuillages	165
E	Comparaison entre simulations et mesures acoustiques d'échantillons de fusain	167
F	Effet de l'humidité sur les coefficients acoustiques d'échantillons de substrats	169
F.0.1	Effet de l'humidité sur la fibre de coco	169
F.0.2	Effet de l'humidité sur la perlite	171

Introduction Générale

La qualité de l'environnement sonore est une préoccupation européenne majeure sur les plans sanitaire, environnemental social et donc aussi économique. Les sources de bruit sont multiples (transports, industries, voisinage, activités anthropiques...). Afin de réduire les gênes occasionnées par ces différents types de nuisances sonores, le cadre réglementaire européen issu de la directive européenne 2002/49/CE du 25 juin 2002 a été transposé en droit français. Il vise à évaluer les gênes ressenties au niveau des grandes agglomérations et celles engendrées par les grandes infrastructures de transports (grands axes routiers et ferroviaires, grands aéroports). Ce cadre réglementaire comprend :

- la réalisation de cartes de bruit stratégiques qui permettent d'évaluer l'exposition sonore des populations sur un territoire étendu,
- l'adoption de plans d'actions (dénommés Plans de Prévention du Bruit dans l'Environnement) qui ont pour rôle de réduire les zones exposées à des bruits excessifs¹ et de protéger les zones calmes.

Pour améliorer la qualité de l'air, les pouvoirs publics favorisent l'implantation d'espaces végétalisés en ville. L'aménagement de tels espaces dans notre environnement présentent de multiple avantages, particulièrement dans les zones à fortes densités de population : ils produisent de l'oxygène, filtrent l'air, servent d'habitat pour la faune et la flore, donc contribuent à la biodiversité ainsi qu'à la régulation du climat en emmagasinant de l'humidité² et réduisent potentiellement les nuisances sonores. Les Parois Complexes Végétalisées (PCV), en particulier les murs (PCV verticales) (Fig. 1) et les toitures (PCV horizontales), sont une solution efficace pour augmenter la surface de végétaux en ville. Ils sont composés d'un couvert végétal (plantes), d'un support de culture (substrat, eau) et d'une structure permettant de maintenir l'ensemble des éléments (structure métallique, géotextile ou film horticole, grillage). Les travaux de recherche ont montré que les PCV en extérieur permettent d'améliorer l'isolation acoustique [1–4] et thermique [5, 6] des bâtiments ou de réduire le bruit engendré par les infrastructures de transport, en plus de l'intérêt écologique qu'elles pourraient éventuellement apporter. Les PCV peuvent également être disposées à l'intérieur de bâtiments ou halls afin de modifier la qualité acoustique des salles. L'étude de leurs propriétés acoustiques a fait l'objet de nombreux travaux ces dernières années pour caractériser principalement l'absorption et la diffusion acoustique des feuillages et substrats qui les composent. Cette thèse, réalisée à l'IEMN avec le soutien de l'ADEME et du groupe YNCREA (HEI-ISA-ISEN), se situe dans la continuité de ces travaux. Elle a pour objectif d'apporter un éclairage sur les phénomènes physiques à l'origine des propriétés acoustiques mesurées, de manière à proposer des stratégies d'optimisation de ces PCV Verticales.

1. Ces zones concernent en particulier les points noirs du bruit routier et ferroviaire répertoriés dans « la résorption des points noirs du bruit routier et ferroviaire », rapport de Claude Lamure à la ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement édité par le conseil général des ponts et chaussées (1998).

2. La végétalisation et le reboisement des villes et leur abords sont des stratégies possibles pour lutter contre les îlots de chaleur urbains.



FIGURE 1 – Exemple de Paroi Complexe Végétalisée extérieure, d'après [7]

Ce manuscrit est organisé autour de cinq chapitres.

- Le premier chapitre introduit un état de l'art sur les propriétés acoustiques et vibratoires des parois végétalisées et des éléments (feuillage, substrat) qui les composent. Il décrit également les différentes méthodes pouvant être appliquées dans le but de caractériser ces parois.
- Le second chapitre présente le dispositif expérimental mis en place pour mesurer les caractéristiques acoustiques et vibratoires d'échantillons de types plantes, substrats ou plantes superposé au substrat. Il détaille les différentes étapes de conception, de développement et de validation du dispositif.
- Le troisième chapitre explique le procédé de fabrication d'échantillons de deux types de feuillages (laurier et fusain) ainsi que leurs caractérisations acoustiques (paramètres effectifs du milieu, propriétés acoustiques des parois) et vibratoire.
- Le quatrième chapitre porte sur la caractérisation des paramètres effectifs et des propriétés acoustiques de trois différents types de substrat : la perlite, la fibre de coco et la tourbe de coco.
- Le dernier chapitre aborde la caractérisation acoustique de parois constituées par la superposition du feuillage et de substrat. Les modèles et dispositifs de caractérisation développés dans ce travail y sont utilisés pour optimiser les performances acoustiques de paroi complexe végétalisée (PCV).

Chapitre 1

Contexte et état de l'art

Sommaire

1.1	Introduction	4
1.2	Les parois végétalisées	4
1.2.1	Historique des parois végétalisées	4
1.2.2	Apports attendus des parois végétalisées	5
1.2.3	Types de parois végétalisées existantes	6
1.2.4	Les parois végétalisées verticales avec plante grimpante	7
1.2.5	Les parois complexes végétalisées verticales avec substrat mince	8
1.2.6	Les parois complexes végétalisées verticales avec substrat dans des modules alvéolaires	8
1.2.7	Les parois complexes végétalisées verticales avec substrat dans des cages métalliques	9
1.3	Généralités sur les propriétés acoustiques des parois	10
1.3.1	Définition des grandeurs acoustiques caractéristiques d'une paroi	10
1.3.2	Interaction onde plane - paroi infinie	10
1.3.3	Méthodes de caractérisation des propriétés acoustiques d'une paroi	12
1.4	Propriétés acoustiques et vibratoires de parois végétalisées	20
1.4.1	Propriétés acoustiques du feuillage	20
1.4.2	Propriétés vibratoires des feuillages	23
1.4.3	Propriétés acoustiques des substrats	24
1.4.4	Propriétés acoustiques d'ensembles composés de végétal et de substrat	26
1.5	Conclusion du Chapitre	33

1.1 Introduction

Ce chapitre présente une synthèse des travaux bibliographiques relatifs aux propriétés acoustiques des murs végétalisés et des éléments qui les composent ¹. Il s'organise autour de trois parties :

- une présentation du contexte historique, des typologies de parois végétalisées et des apports attendus,
- un rappel sur les méthodes de mesures acoustiques pouvant être appliquées aux parois végétalisées,
- une synthèse des travaux acoustiques et vibratoires existants ayant été réalisés sur des parois végétalisées ou encore sur des éléments les constituant (feuillage, substrat ou combinaison des deux ²).

1.2 Les parois végétalisées

1.2.1 Historique des parois végétalisées

L'histoire des parois végétalisées est ancienne. L'historienne Stéphanie Dalley [8,9] indique que les jardins suspendus de Babylone présentaient une architecture composée de végétal autour des toitures (cf. Fig. 1.1). Le premier prototype moderne de mur végétalisé a été développé par S. H. White de l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign en 1938 [10]. Une « végétalisation extensive des toitures » a vu le jour en Allemagne au milieu des années 80 et y a connu un très important développement. Au milieu des années 90, près de 15% des toitures-terrasses nouvellement créées en Allemagne étaient végétalisées [11]. En 1988, le botaniste P. Blanc [12] a déposé son premier brevet d'invention de mur végétalisé (installé au Musée des Sciences et de l'Industrie de Paris). Dans les années 2000, l'architecte J. F. Daures, a cherché à adapter les murs végétalisés à de nouvelles fonctionnalités comme l'amélioration des performances thermiques et acoustiques [13–15]. Il est l'auteur de deux brevets sur le mur végétal : « structure modulaire pour l'aménagement d'une paroi sensiblement verticale d'un bâti pour la réception de végétaux », déposé en 2003, puis « paroi végétalisée et éléments constitutifs » déposé en 2008. Depuis les années 2000, de nombreuses entreprises (Canevaflor, les jardins de Babylones, MurMure végétal, Optigreen, Vertige, Un jardin sur le toit ...) développent et commercialisent différents types de murs et toits végétalisés [7, 15–18].

1. De nombreux travaux ont également été réalisés sur des toits végétalisés. Ils ne sont pas discutés dans ce manuscrit qui s'intéresse aux parois verticales

2. La structure des parois végétalisées peut également avoir un impact sur ses performances acoustiques. Cet effet n'est pas abordé dans cette thèse.



FIGURE 1.1 – Les Jardins suspendus de Babylone, d’après [19]

1.2.2 Apports attendus des parois végétalisées

Les principaux apports attendus des parois végétalisées pour l’environnement concernent l’amélioration de la qualité de l’air en ville, la réduction des charges thermiques à l’intérieur des bâtiments, la réduction de l’effet d’îlot de chaleur urbain et la réduction des nuisances sonores en ville [4].

Apports sur la qualité de l’air

Les projets de recherches menés sur la qualité de l’air en ville en présence de murs végétalisés montrent qu’un des principaux avantages de la végétation est l’amélioration de la qualité de l’air urbain par sa dépollution. La contribution essentielle du végétal vient de sa capacité à fixer plusieurs polluants. Ainsi, Yang et al [20] estiment que les toitures végétalisées sont capables de fixer $85 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de polluants divers. Lors de leur étude, ils ont utilisé un modèle de dépôt sec avec les données de pollution atmosphérique réelle mesurées sur une année. Thoennesen [21] a réalisé une étude qui met en évidence le rôle de la végétalisation des façades dans le piégeage des polluants issus de la circulation routière (d’après Köhler [22]). Son travail a concerné une façade de lierre d’un bâtiment à plusieurs étages dans une rue à grande circulation du centre-ville de Düsseldorf en Allemagne. L’analyse de la poussière des polluants accumulée sur la façade a montré que la végétation constitue un piège à poussières efficace. La plus forte concentration de polluants a été relevée sur le feuillage à une hauteur de deux mètres au-dessus de la chaussée. La concentration des polluants augmente tout au long de la période de croissance des végétaux.

Apports thermiques

Les apports thermiques des parois végétalisées peuvent être constatés à plusieurs échelles : celles du bâtiment, du quartier et de la ville, etc. De nombreuses études ont souligné l’influence des parois végétalisées sur la performance énergétique des bâtiments et en particulier sur le confort d’été [23–26]. La présence des végétaux intercepte le rayonnement solaire reçu par l’enveloppe extérieure du bâtiment et atténue notablement la température de surface. En été, cette contribution se traduit par une baisse de la demande énergétique associée à la climatisation dans une construction végétalisée par rapport à une construction ordinaire. Par exemple Kenai [5, 6, 27] a constaté un gain

énergétique à hauteur de 80% comparativement à une maison ordinaire non isolée située à Lille. Cette réduction spectaculaire est expliquée par la réduction des températures de surface pendant les journées bien ensoleillées. En hiver, la présence des parois végétalisées contribue à l'amélioration de la résistance thermique de l'enveloppe extérieure en diminuant l'effet du vent. A l'échelle du quartier ou de la ville, cette interception du rayonnement solaire permet de lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain. A l'inverse, la présence des végétaux sur les façades les plus exposées au soleil peut influencer négativement la demande énergétique pendant l'hiver. En empêchant les parois bien exposées au soleil de profiter des apports énergétiques solaires.

Les phénomènes physiques qui influent le plus sur l'apport thermique des végétaux sont :

- l'isolation thermique par la végétation et le substrat [28],
- l'interception du rayonnement solaire par photosynthèse,
- la réduction des échanges infrarouges (qui réduit les déperditions thermiques nocturnes),
- l'atténuation de l'effet du vent (principalement en hiver),
- l'évapotranspiration (rafraîchissement par chaleur latente en été pour les murs végétalisés régulièrement irrigués, ayant un substrat),
- modification de l'albedo.

Apports acoustiques

De nombreuses études ont été menées sur le rôle acoustique des différents éléments de parois végétales, notamment sur les substrats ou les feuillages (voir § 1.4). Ces campagnes de mesures et simulations numériques ont montré que le feuillage et le substrat peuvent contribuer à l'absorption ou l'affaiblissement acoustiques.

Cette thèse s'inscrit dans cette thématique. Les principaux travaux de recherche sur les performances acoustiques des murs végétalisés sont présentés plus en détail dans les sections qui suivent.

1.2.3 Types de parois végétalisées existantes

Cette section décrit la géométrie des différents types de parois végétalisées ainsi que les fonctions des éléments qui les composent. On distingue deux types de systèmes de parois complexes végétalisées.

- i) Les parois horizontales³ (toitures végétales) qui ont fait l'objet d'études sur leurs propriétés acoustiques (transmission, absorption, perte par insertion) [29–32].
- ii) Les parois verticales qui peuvent être :
 1. une façade sur laquelle pousse une plante grimpante,
 2. un mur végétalisé vertical avec un substrat mince,
 3. un mur végétalisé vertical avec substrat dans des modules alvéolaires,
 4. une paroi végétalisée verticale avec substrat dans des cages métalliques.

3. Comme indiqué précédemment, ces parois ne sont pas étudiées en détail dans ce travail

Ces différentes parois constituent des murs intérieurs ou extérieurs de bâtiments ou des écrans antibruit en bordure de route. Il est intéressant de noter que le mur végétalisé avec substrat est désolidarisé de son support (mur, façade) pour éviter tout risque de condensation, par nécessité de laisser une lame d'air entre les deux éléments. Cette lame d'air a généralement une épaisseur de 10 cm pour préserver au mieux le mur porteur de l'humidité, tout en permettant au mur végétal de jouer son rôle d'isolant thermique.

La revue bibliographique qui suit présente tout d'abord les différents types de parois complexes végétalisées verticales existantes, puis les travaux qui ont été menés dans le but de caractériser leurs propriétés acoustiques. L'application directe de ce travail est focalisé sur les parois végétalisées verticales.

1.2.4 Les parois végétalisées verticales avec plante grimpante

Ce type de paroi consiste en un mur sur lequel pousse une plante grimpante, dont les racines sont ancrées dans le sol. Un exemple est donné en Fig. 1.2. Plusieurs familles de plantes grimpantes sont à considérer :

- les plantes grimpantes quadrilles de type passiflore, clématite ou vigne dont les petits rameaux qui se tortillent et s'accrochent aux murs,
- les plantes grimpantes à crampons de type bignone ou lierre qui s'accrochent au mur par leur ventouse,
- les plantes grimpantes volubiles de type jasmin d'été, houblon, chèvrefeuille ou glycine dont les serments très vigoureux entourent les obstacles.



FIGURE 1.2 – Représentation d'un mur végétalisé avec plantes grimpantes, d'après [33]

1.2.5 Les parois complexes végétalisées verticales avec substrat mince

Le principe de ces parois est d'enraciner la végétalisation dans un support mince, généralement un feutre de polyamide, (Fig. 1.3). Elles sont souvent utilisées pour habiller un mur existant, mais peuvent également être autoportées et prendre place sur une structure indépendante.



FIGURE 1.3 – Représentation d'une paroi végétalisée avec substrat mince, d'après [15]

Les composants principaux de ce type d'aménagement sont :

- une structure métallique (aluminium, acier galvanisé, acier inoxydable, ...) autoportante ou chevillée sur un support,
- un système d'étanchéité empêchant tout passage d'eau derrière le mur végétal,
- un substrat mince de plantation (feutre polyamide, fibre hydrofile) imputrescible,
- un système d'arrosage intégré (tuyaux micro-goutteurs),
- un système de récupération des eaux en partie basse.

1.2.6 Les parois complexes végétalisées verticales avec substrat dans des modules alvéolaires

Un exemple de ce type de paroi végétalisée est représenté à la Fig. 1.4. Les composants principaux de ce type de paroi sont :

- une structure métallique fixée au mur support,
- une lame d'air entre le mur et les modules,
- des modules alvéolaires (inclinés ou non) qui peuvent être de différentes natures (polypropylène expansé, céramique, béton) et sont généralement inclinés à 10° pour permettre la plantation de végétaux peu adaptés à la croissance en position verticale,
- le substrat de plantation (argile expansé, roche volcanique, tourbe, terre végétale, céramique...),
- un système d'arrosage intégré (tuyaux micro-goutteurs),
- un système de récupération des eaux en partie basse.



FIGURE 1.4 – Représentation et illustration d’une paroi végétalisée avec modules alvéolaires, d’après [15]

1.2.7 Les parois complexes végétalisées verticales avec substrat dans des cages métalliques

La Fig. 1.5 montre un exemple de paroi végétalisée utilisant une cage métallique [15].

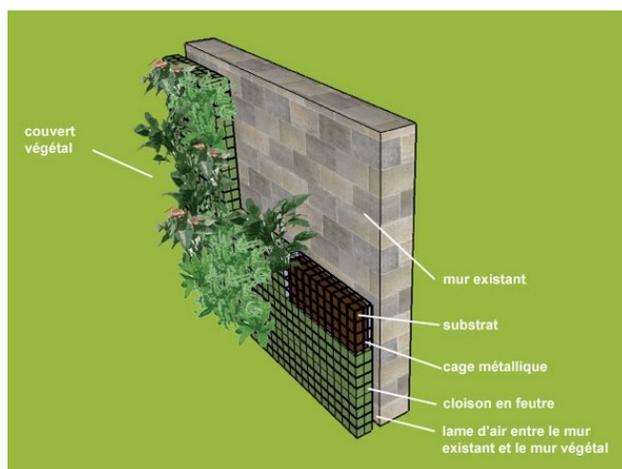


FIGURE 1.5 – Représentation d’une paroi végétalisée avec substrat en cage métallique, d’après [15]

Les composants présents dans ce type de paroi sont [12, 34] :

- un substrat situé dans un feutre irrigué régulièrement par une solution nutritive (eau et sels nutritifs) qui coule par gravité et capillarité dans un bac de stockage/récupération,
- une cage métallique, fabriquée généralement en acier galvanisé ou acier inoxydable, maintenant le substrat dans une position verticale,
- une lame d’air entre la façade et le « jardin vertical » permettant l’aération et la désolidarisation du système et évitant tout risque de condensation,
- une plante s’insérant dans le substrat en racine nue (la terre présente dans les racines doit être enlevée avant implantation dans le substrat),
- un système d’irrigation composé de tuyaux micro-goutteurs dont l’apport en eau est piloté par un automate.

1.3 Généralités sur les propriétés acoustiques des parois

1.3.1 Définition des grandeurs acoustiques caractéristiques d'une paroi

Dans cette partie, il est supposé que les phénomènes physiques sont harmoniques en $e^{+j\omega t}$ où t est le temps et ω la pulsation. Deux configurations sont considérées pour la définition des grandeurs acoustiques : le cas d'une onde acoustique incidente plane et le cas d'un champ acoustique diffus constitué par exemple d'une somme d'ondes planes de directions distribuées aléatoirement. La première configuration peut être réalisée expérimentalement en tube d'impédance quand la direction d'incidence est normale à la paroi ou en salle anéchoïque avec un système de haut-parleurs lorsque la direction d'incidence est quelconque. La seconde configuration est obtenue en salle réverbérante où le champ diffus constitue le champ incident. Dans ce cas, la paroi à caractériser peut être installée sur le sol⁴ pour la mesure du coefficient d'absorption en incidence aléatoire, ou entre une chambre réverbérante et une chambre anéchoïque pour la mesure en transmission [35].

1.3.2 Interaction onde plane - paroi infinie

L'interaction d'une onde incidente plane avec une paroi infinie est caractérisée par l'apparition d'ondes acoustiques réfléchies et transmises. Celles-ci peuvent être décomposées en une contribution spéculaire (ondes planes dont les directions sont données par les lois de Snell-Descartes) et une contribution diffusée dans les autres directions. La Fig. 1.6 illustre schématiquement la décomposition énergétique de cette interaction.

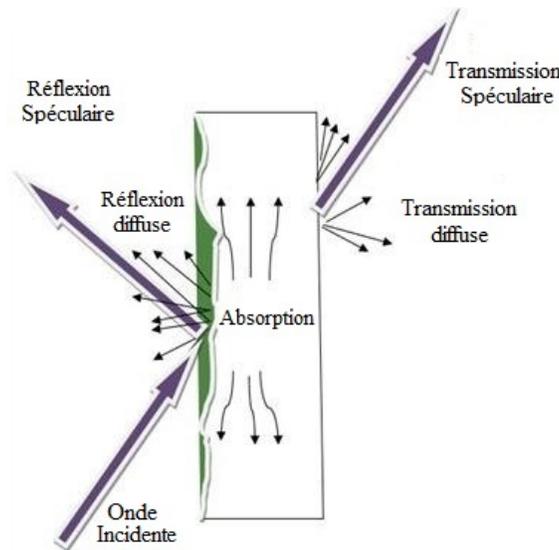


FIGURE 1.6 – Représentation schématique d'une interaction onde acoustique - paroi infinie

Le bilan énergétique de cette interaction peut s'écrire sous la forme suivante

$$E_i = E_r + E_t + E_a + E_d, \quad (1.1)$$

où E_i correspond à l'énergie de l'onde incidente, E_r et E_t sont les énergies réfléchie et transmise

4. Il convient de noter que le sol peut avoir une influence sur l'hygrométrie du substrat ou la répartition du feuillage

à travers la paroi dans les directions spéculaires, E_a l'énergie absorbée par la paroi et E_d l'énergie diffusée par la paroi⁵. En normalisant par rapport à E_i , cette expression devient

$$1 = \mathcal{R} + \mathcal{A} + \mathcal{T} + \mathcal{D} \quad (1.2)$$

où les coefficients de réflexion $\mathcal{R} = \frac{E_r}{E_i}$, d'absorption, $\mathcal{A} = \frac{E_a}{E_i}$, de transmission $\mathcal{T} = \frac{E_t}{E_i}$ et de diffusion $\mathcal{D} = \frac{E_d}{E_i}$ en énergie sont compris entre 0 et 1. La part d'énergie qui n'est ni transmise ni réfléchie, ni diffusée est absorbée. Ce phénomène est caractérisé par le coefficient \mathcal{A} . En fonction de sa nature, un échantillon peut à la fois absorber et diffuser. On peut alors définir un coefficient d'absorption en énergie apparent \mathcal{A}_{app} qui représente la somme des énergies absorbée et diffusée normalisées par rapport à l'énergie de l'onde incidente :

$$\mathcal{A}_{app} = \frac{E_a + E_d}{E_i} = \mathcal{A} + \mathcal{D} = 1 - \mathcal{R} - \mathcal{T}. \quad (1.3)$$

Ces coefficients d'absorption peuvent s'exprimer en dB :

$$\mathcal{A}^{dB} = 10 \log_{10}(\mathcal{A}) = 10 \log_{10}(1 - \mathcal{R} - \mathcal{T} - \mathcal{D}), \quad (1.4)$$

$$\mathcal{A}_{app}^{dB} = 10 \log_{10}(\mathcal{A}_{app}) = 10 \log_{10}(1 - \mathcal{R} - \mathcal{T}). \quad (1.5)$$

Ces deux coefficients sont égaux en l'absence de diffusion ($\mathcal{D}=0$). Enfin, dans le cas où la face arrière de la paroi est parfaitement réfléchissante ($\mathcal{T}=0$), on a :

$$\mathcal{A}^{dB} = 10 \log_{10}(1 - \mathcal{R} - \mathcal{D}), \quad (1.6)$$

$$\mathcal{A}_{app}^{dB} = 10 \log_{10}(1 - \mathcal{R}). \quad (1.7)$$

Pour les ondes monochromatiques planes incidentes, réfléchies et transmises dans la direction spéculaire, l'amplitude complexe de la pression acoustique p et le module de l'intensité acoustique I (énergie transportée par unité de surface et par unité de temps) sont reliées par

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c_0}. \quad (1.8)$$

ρ_0 et c_0 sont respectivement la masse volumique (kg m^{-3}) et la célérité du son dans l'air (m s^{-1}). Les coefficients de réflexion et de transmission en pression sont respectivement définis par

$$r = \frac{p_r}{p_i}, \quad (1.9)$$

et

$$t = \frac{p_t}{p_i}, \quad (1.10)$$

où p_i , p_r et p_t sont les amplitudes des pressions associées aux ondes incidente, réfléchie et transmise respectivement. On en déduit :

5. L'onde acoustique peut être diffusée lors de la réflexion en face avant de la paroi de la traversée de la paroi et de la transmission en face arrière.

$$\mathcal{R} = r^2, \tag{1.11}$$

$$\mathcal{T} = t^2. \tag{1.12}$$

A partir des Eq. (1.3), (1.9) et (1.11), il est possible d'exprimer le coefficient d'absorption apparent en fonction du coefficient de réflexion en onde plane, lorsque $T = 0$ sous la forme

$$\alpha = \mathcal{A}_{app} = 1 - r^2 = 1 - \mathcal{R} = 1 - \left(\frac{p_r}{p_i}\right)^2 \tag{1.13}$$

Dans la suite de la thèse, ce coefficient d'absorption \mathcal{A}_{app} est noté α dans le cas de l'incidence normale.

1.3.3 Méthodes de caractérisation des propriétés acoustiques d'une paroi

La section précédente a défini les principales grandeurs acoustiques caractéristiques d'une paroi. Les principales méthodes de mesures utilisées pour caractériser ces grandeurs peuvent être distinguées en fonction de leur incidence aléatoire, oblique ou normale. L'objectif de cette partie est donc de recenser ces méthodes de mesures, ainsi que les hypothèses sur lesquelles elles reposent.

Mesure des propriétés acoustiques de parois en incidence normale

Diverses méthodes de détermination des coefficients acoustiques d'une paroi en incidence normale (hypothèse d'onde plane) ont été développées. Les plus répandues, qui consistent à mesurer les coefficients de réflexion et d'absorption en utilisant un tube de Kundt, sont décrites dans les normes ISO 10534-1 [36] et ISO 10534-2 [37]. La première méthode mesure la position des ventres et les noeuds de pression appelés respectivement p_{\max} et p_{\min} à partir d'une sonde microphonique mobile qui se déplace le long de l'axe central du tube (Fig. 1.7). Les amplitudes de la pression en ces points permettent de déterminer le Taux d'Ondes Stationnaires (TOS) (rapport de la mesure du maximum de pression sur le minimum de pression) puis d'en déduire les coefficients de réflexion et d'absorption. La seconde méthode, basée sur les travaux de Chung et Blaser [38], nécessite de déterminer la fonction de transfert entre deux microphones localisés en deux emplacements distincts du tube, comme illustré en Fig. 1.8. Le coefficient d'absorption est ensuite déduit de la fonction de transfert mesurée. La mesure en tube de Kundt repose sur une hypothèse d'onde plane qui n'est possible qu'en dessous d'une fréquence limite dépendant du diamètre du tube. La précision des mesures est étroitement liée à la précision de la calibration des microphones. Pour améliorer la précision de la mesure, en réduisant les erreurs de phases, Han [39] a proposé d'effectuer la calibration des microphones au niveau de la terminaison rigide (Fig. 1.9). En procédant de la sorte, il montre qu'il n'est pas nécessaire de faire usage de matériau absorbant pour la calibration.

Prisutova [41–43] a étendu la bande de fréquences des mesures d'absorption en tube de Kundt, jusqu'à 3 fois la fréquence de coupure classique d'onde plane. Pour cela, elle a développé une approche basée sur la transformée de Fourier spatiale des pressions acoustiques relevées en différentes positions axiales (Fig. 1.10).

Cette approche basée sur la décomposition modale permet de séparer les champs modaux incidents et réfléchis et donc de remonter aux coefficients acoustiques associés.

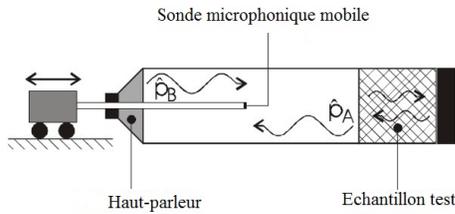


FIGURE 1.7 – Configuration de mesure du coefficient d'absorption avec une sonde microphonique mobile, d'après [40]

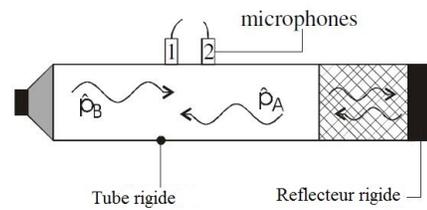


FIGURE 1.8 – Configuration de mesure du coefficient d'absorption par la méthode des deux microphones, d'après [40]

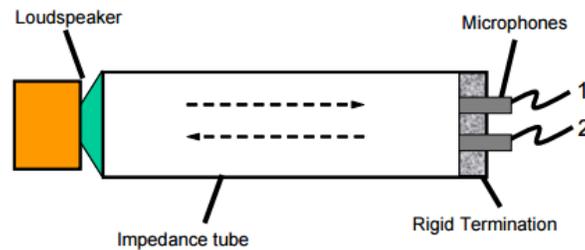


FIGURE 1.9 – Configuration de mesure utilisée pour la calibration des microphones au niveau de la terminaison rigide, d'après [39]

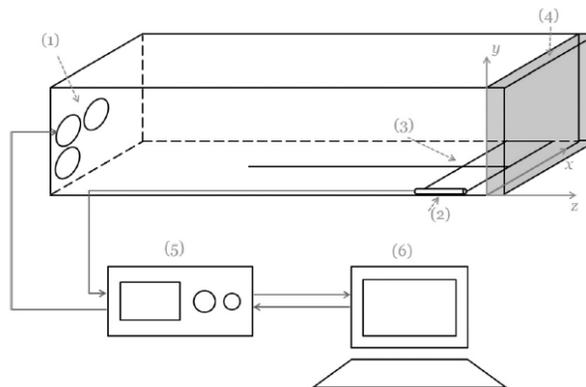


FIGURE 1.10 – Configuration de mesure du coefficient d'absorption étendu aux hautes fréquences, d'après [41] (1) haut parleurs (2) microphones mobile suivant la section du tube (3) support microphone (4) échantillon (5) analyseur de signal (6) PC

D'autres méthodes s'affranchissant des microphones, ont été développées en utilisant un vibromètre laser à balayage. Ainsi Vuye *et al* [44–46] et Fulbert *et al* [47] déterminent les coefficients de réflexion et d'absorption d'un échantillon à partir de la modulation locale de l'indice de réfraction du milieu propagatif par effet acousto-optique (Fig. 1.11).

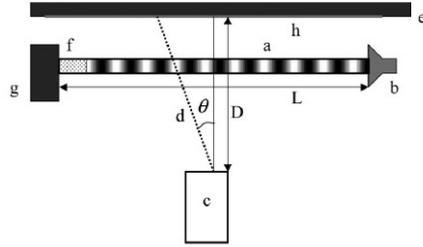


FIGURE 1.11 – Configuration de mesure de l’absorption acoustique à partir d’un tube de Kundt couplé à un vibromètre laser, d’après [45]

La mesure en tube de Kundt peut également apporter des informations sur les propriétés effectives de l’échantillon étudié (voir § 2.3.3). Dans cette description, on identifie le milieu hétérogène à un fluide acoustique homogène équivalent. Les propriétés acoustiques de ce fluide sont appelées propriétés effectives. Ainsi, la méthode à deux microphones et deux cavités développée par Utsuno [48] est basée sur les mesures d’impédance de surface⁶ obtenues pour deux cavités d’air de différentes épaisseurs, entre l’échantillon de référence et un piston arrière rigide (se déplaçant dans le tube).

Song et Bolton [49, 50] ont proposé la mesure de la transmission acoustique en tube de Kundt par une méthode à quatre microphones basée sur la détermination des fonctions de transfert entre chaque microphone en condition de terminaison anéchoïque. Le principe de cette méthode est illustré en Fig. 1.12. A partir des fonctions de transfert, les pressions et vitesses sont calculées sur les deux faces de l’échantillon. La matrice de transfert [T] de l’échantillon est ensuite reconstruite et les coefficients de transmission et réflexion en terminaison anéchoïque sont déterminés. Le rapport technique de Brüel et Kjaer [51] détaille les étapes permettant d’aboutir à l’expression des paramètres de la matrice de transfert.

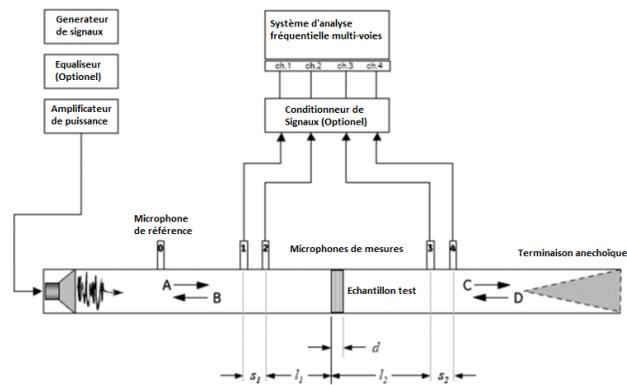


FIGURE 1.12 – Configuration de mesure de la transmission acoustique par la méthode des quatre microphones, d’après [49]

6. L’impédance de surface est définie au § 2.3.3

Iwase *et al* [52, 53] ont mis en place la méthode à trois microphones en tube de Kundt dont le principe consiste à mesurer l'impédance de surface de l'échantillon (voir § 2.3.3) ainsi qu'une fonction de transfert entre les pressions mesurées de part et d'autre de l'échantillon. Dans cette expérience, un premier microphone est positionné sur une tige mobile devant l'échantillon, le second microphone sur la face avant de l'échantillon et le troisième microphone au niveau de la face arrière de l'échantillon à la surface de la terminaison rigide (cf. Fig. 1.13).

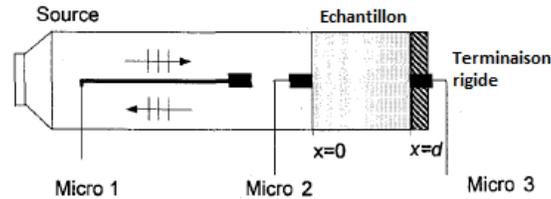


FIGURE 1.13 – Configuration de la méthode des trois microphones mise en place par Iwase, d'après [53]

Salissou *et al* [53–55], ont repris les travaux menés par Song et Bolton [49, 50] et par Iwase *et al* [52, 53] pour développer la méthode à trois microphones et deux cavités qui permet de d'établir la matrice de transfert $[T]$ d'un échantillon quelconque (symétrique ou non) tout en s'affranchissant d'une terminaison anéchoïque. Il est ainsi possible de caractériser les propriétés effectives d'un échantillon et de caractériser les grandeurs acoustiques à partir de la matrice de transfert, quelle que soit la terminaison, rigide ou anéchoïque.

Munjal *et al* [56] et Pédrosa *et al* [57] ont élaboré une technique de mesure de la perte par transmission à partir de deux sources sonores placées dans un tube (Fig. 1.14). Le banc expérimental mis en œuvre est composé de quatre microphones et de deux sources sonores inclinées aux deux extrémités du tube⁷. L'échantillon étudié est placé au centre. La mesure repose sur l'évaluation des fonctions de transfert entre chaque couple de microphones en faisant fonctionner la source S1 seule, puis la source S2 seule. Ces configurations permettent ainsi d'obtenir la matrice de transfert de l'échantillon et d'en déduire le coefficient de transmission pour chaque face de l'échantillon.

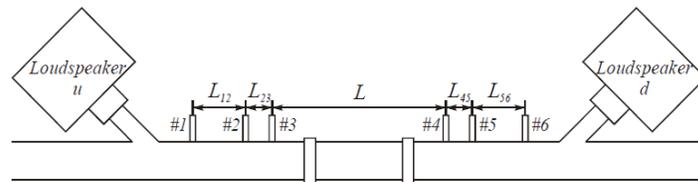


FIGURE 1.14 – Configuration de mesure de la méthode des deux sources, d'après [57]

7. Bien que la source soit inclinée, l'onde générée dans le tube est plane dès lors qu'elle a parcouru l'équivalent d'une fois le diamètre du tube

Pour élargir la gamme de fréquences d'étude et s'affranchir d'un tube de Kundt, Grosso *et al* [58] ont mis au point deux méthodes permettant de réaliser des mesures d'impédance acoustique sur une gamme de 100 Hz à 10 kHz en incidence normale. La première méthode utilise une sonde PU « Pression-Vitesse », dispositif constitué de capteurs espacés d'une faible distance pour mesurer l'intensité acoustique locale. La sonde est positionnée près de la surface de l'échantillon à tester (Fig. 1.15). L'impédance de surface est estimée à partir du rapport de la pression acoustique sur la vitesse particulaire. La mesure se fait en deux temps : (i) sans échantillon (en « champ libre »), puis (ii) avec échantillon. Cette méthode permet également de supprimer les réflexions indésirables à partir d'un fenêtrage temporel (limitant la mesure aux fréquences supérieures à 100 Hz) ou d'un filtre à moyenne glissante dans l'espace des fréquences. Elle est utilisable pour des échantillons de grande taille (surface supérieure à $1,5 \text{ m}^2$). Cette méthode ne nécessite pas de salle test spécifique et présente l'intérêt d'autoriser des mesures in-situ (méthode non destructive).

La deuxième méthode appelée « scan and paint system » est issue de la méthode PU. Les propriétés d'absorption acoustique d'un échantillon sont visualisées en établissant une cartographie *via* un balayage de cet échantillon avec la sonde.

Tijs *et al* [59] ont amélioré la méthode PU en analysant le front d'onde pour tenir compte de la présence du capteur dans le champ proche de la source et de l'échantillon étudié. Cette méthode, qui nécessite plusieurs mesures d'intensité acoustique, permet d'estimer par moyennage le coefficient d'absorption de matériaux.

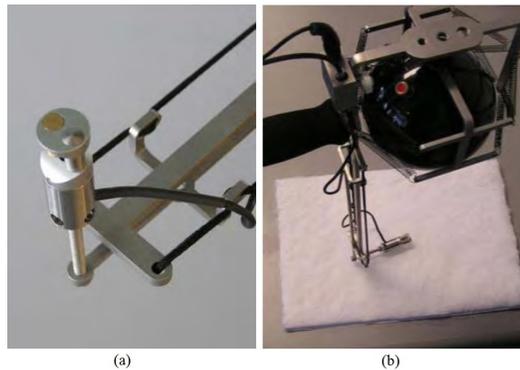


FIGURE 1.15 – (a) sonde PU et (b) dispositif complet de mesure d'impédance (source et sonde), d'après [58]

Mesure des propriétés acoustiques de parois en incidence oblique

Plusieurs méthodes permettant d'évaluer les grandeurs acoustiques en fonction de l'angle d'incidence ont été proposées. Ainsi, la méthode d'Allard et Sieben [60] est mise en oeuvre en milieu extérieur sur de grands échantillons, sous incidence normale ou oblique. Le signal d'excitation utilisé est harmonique et la mesure est effectuée en régime stationnaire. Son principe est basé sur la mesure d'impédance de surface en « champ libre » à partir de deux microphones proches de l'échantillon (Fig. 1.16).

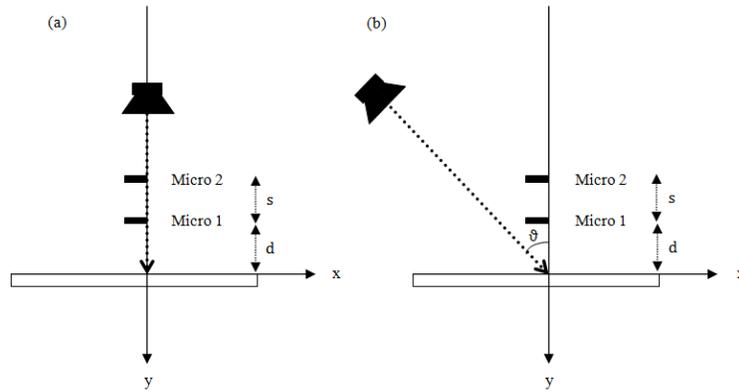


FIGURE 1.16 – Schéma de principe de la mesure d'impédance en incidences normale (a) et oblique (b), d'après [60]

Cette approche présente de nombreux avantages : (1) résultats très proches de ceux obtenus en tube de Kundt [36, 37] dans le cas d'une incidence normale; (2) possibilité de s'affranchir de la chambre anéchoïque pour effectuer la mesure en incidence oblique; (3) effets des dimensions latérales finies de l'échantillon négligeables contrairement à d'autres méthodes. Cette procédure est transposable en salle anéchoïque, comme l'ont montré Dupont [61] et Connelly [29]. Il est intéressant de noter qu'à partir de l'impédance mesurée, il est possible d'obtenir le coefficient de réflexion, puis d'en déduire le coefficient d'absorption (cf. Eq. 1.13).

Vorlander et Mommertz [62] puis Hargreaves et al [63] ont développé une technique de mesure de la diffusion pour un échantillon en incidence oblique en salle anéchoïque. Cette mesure est effectuée à l'aide d'un goniomètre semi-circulaire composé de plusieurs microphones et localisé au-dessus d'une table tournante circulaire où est positionné l'échantillon test (Fig. 1.17). La source délivrant un signal sonore (impulsionnel ou bruit blanc) est successivement positionnée en différents points de la salle. Le niveau sonore relevé par chaque microphone est utilisé pour déterminer le coefficient de diffusion.

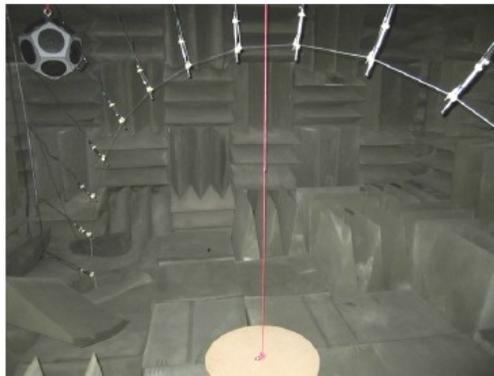


FIGURE 1.17 – Dispositif utilisant un goniomètre semi-circulaire pour la mesure du coefficient de diffusion en salle anéchoïque, d'après [64]

Brutel-Vuilmet [65] a mis en place deux méthodes de caractérisation de la transmission acoustique en fonction de l'angle d'incidence. La première nécessite un local d'émission réverbérant couplé à un local de réception semi-anéchoïque par l'intermédiaire de la paroi à caractériser. Elle utilise la phonoscopie (caméra acoustique) pour réaliser des cartographies des pressions incidente et transmise à travers la paroi, dont est déduit le coefficient de transmission (Fig. 1.18). La seconde approche met en œuvre un pavillon acoustique à section carrée, dont la surface d'entrée correspond à celle du haut-parleur. Ce pavillon est utilisé pour façonner le front d'onde rayonné par le haut-parleur, de manière à obtenir en sortie des ondes planes dans une direction spécifique. L'expérimentation est conduite avec le haut-parleur et le pavillon placés dans un local émetteur, les microphones positionnés face à la paroi d'étude (côté émission) et le microphone mesurant la pression transmise dans le local de réception (Fig. 1.19).

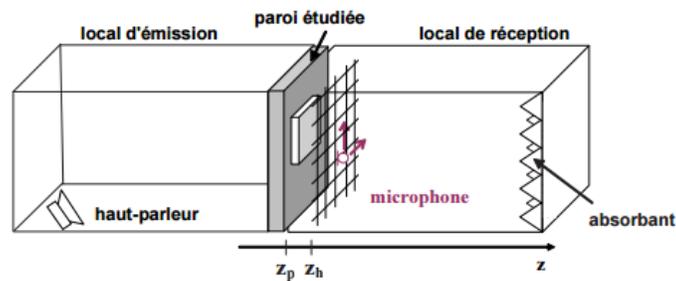


FIGURE 1.18 – Configuration de mesure du coefficient de transmission d'une paroi par caméra acoustique, d'après [65]

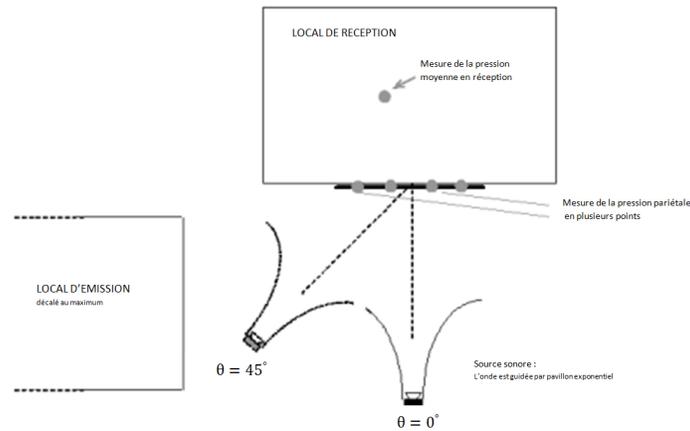


FIGURE 1.19 – Configuration de mesure du coefficient de transmission en incidence oblique utilisant un pavillon acoustique, d'après [65]

Mesure des propriétés acoustiques de parois en incidence aléatoire (régime diffus)

Le coefficient d'absorption acoustique d'une paroi en champ diffus est mesuré suivant la norme ISO 354 [66] à partir du relevé des durées de réverbération avec et sans échantillon. Le champ acoustique est dit diffus lorsqu'il peut être représenté par une infinité d'ondes dont les directions de propagation sont uniformément distribuées dans un angle solide 4π . Cette approche, basée sur la théorie de Sabine suppose que l'énergie en tout point de la salle est identique, hypothèse qui n'est jamais complètement vérifiée, en particulier en basses fréquences. Cette méthode présente cependant quelques inconvénients : elle requiert une salle réverbérante de très grand volume pour éviter les fréquences propres de la salle ; la taille de l'échantillon testé doit être suffisamment grande de manière à modifier significativement les durées de réverbération.

Le coefficient de diffusion acoustique peut également être mesuré en salle réverbérante suivant la norme ISO 17497-1 [67] (Fig. 1.20).



FIGURE 1.20 – Configuration de mesure avec table tournante permettant la mesure des coefficients d'absorption et diffusion, d'après [68]

Basée sur les travaux de Vorlander et Mommertz [69], cette méthode permet de mesurer le coefficient d'absorption acoustique spéculaire, en éliminant les composantes diffuses du signal réfléchi. Elle est basée sur la mesure d'une moyenne synchronisée des signaux effectués pour différentes orientations de la paroi posée sur une table tournante [68]. Les mesures de durées de réverbération sont réalisées successivement avec (T_1) et sans échantillon (T_2) pour une table immobile (cf. ISO 354 [66]), puis pour une table en rotation (T_3 et T_4). Le coefficient d'absorption Sabine se déduit à partir de

$$\alpha_s = 0,16 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (1.14)$$

où V est le volume de la salle en m^3 et S est la surface de l'échantillon en m^2 .

Le coefficient de diffusion s'exprime alors sous la forme

$$\mathcal{D} = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (1.15)$$

où α_{spec} est le coefficient d'absorption spéculaire donné par

$$\alpha_{spec} = \frac{0,16V}{S} \left(\frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_3} \right). \quad (1.16)$$

Ducourneau [70] a proposé de mesurer la diffusion acoustique d'une paroi dans un local réverbérant en fonction de l'angle d'incidence de la source, en utilisant une antenne acoustique (Fig. 1.21). Celle-ci assure un rôle de filtrage spatial qui permet d'atténuer fortement les réflexions provenant des parois de la salle pour ne conserver que les réflexions diffuses.

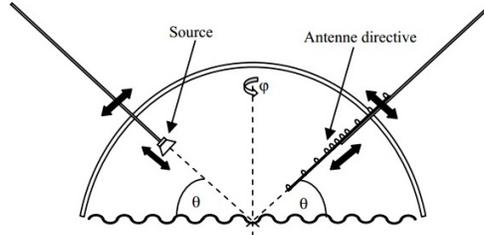


FIGURE 1.21 – Configuration de mesure du coefficient de diffusion d'une paroi à l'aide d'une antenne acoustique en local réfléchissant, d'après [70]

1.4 Propriétés acoustiques et vibratoires de parois végétalisées

Cette section présente un état de l'art des caractérisations acoustiques réalisées sur des éléments constitutifs de parois végétalisées.

1.4.1 Propriétés acoustiques du feuillage

Les premiers travaux de caractérisation acoustique de feuillage ont été conduits en milieu extérieur par Aylor [71–73] qui a étudié l'atténuation du son lors de sa propagation en présence de blé ou de roseau. Il en a déduit qu'à haute fréquence (> 1 kHz) celle-ci est principalement due au phénomène de diffusion par les feuilles (prépondérant par rapport à l'absorption).

Martens [74] a mesuré le coefficient de réflexion acoustique de feuilles en salle anéchoïque. Il a ainsi montré que la géométrie et la masse de la feuille sont des facteurs prépondérants, surtout en hautes fréquences, lorsque la longueur d'onde devient comparable aux dimensions de la feuille.

Plus récemment, dans le cadre du projet européen HOSANNA [75–77], des caractérisations acoustiques de feuillages ont été conduites en salle réverbérante, en salle anéchoïque, en tube de Kundt et en espace extérieur. Ainsi Horoshenkov *et al* [78–80] ont réalisé des mesures d'absorption acoustique en tube de Kundt sur une plage fréquentielle allant de 50 Hz à 1600 Hz, pour cinq types de plantes. Leur étude montre que les paramètres ayant la plus grande influence sur l'absorption sont l'humidité, la résistance d'écoulement, la porosité de la plante. D'autres paramètres comme la surface ou le poids de la feuille ont un effet moindre sur l'absorption. En supposant que le comportement acoustique d'une plante peut être décrit par un modèle de milieu poreux à squelette rigide, les paramètres du modèle de Miki [81] ont été déterminés pour le milieu végétal. Les expressions du nombre d'onde moyen et de l'impédance du milieu ont ainsi été obtenues. Par ailleurs cette étude a également montré que l'absorption acoustique dépend de la densité surfacique de feuillage et de l'angle d'orientation de la feuille par rapport à l'onde incidente.

L'effet de l'épaisseur de feuillage sur l'absorption acoustique a également été étudié expérimentalement dans le cadre du projet européen HOSANNA (cf Fig. 1.22) [82]. Ces mesures ont montré que l'ajout de feuilles supplémentaires ne constitue pas un simple effet additif (par rapport à l'épaisseur existante), mais qu'elle modifie aussi le spectre d'absorption acoustique. Le coefficient d'absorption est corrélé à l'épaisseur des feuilles et à la densité foliaire. Pour des densités foliaires élevées, l'absorption acoustique est aussi liée à la vibration des feuilles et leur diffusion.

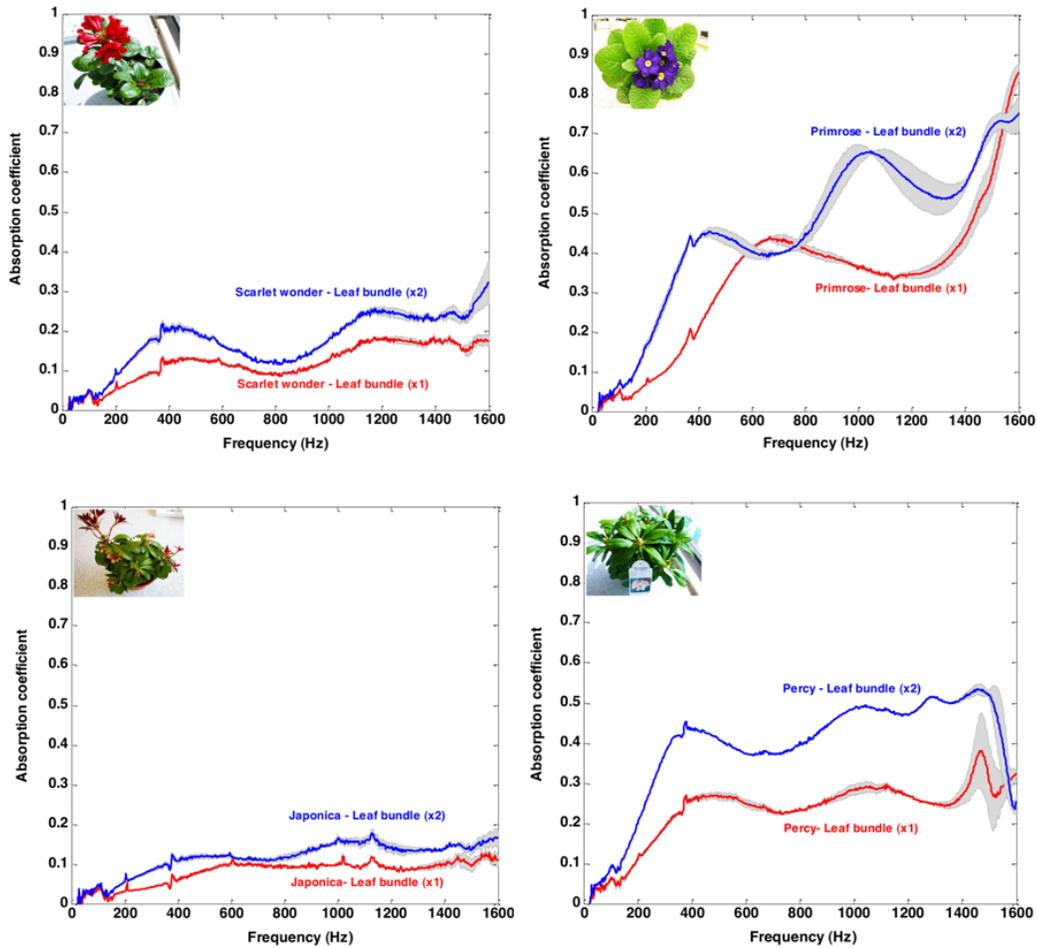


FIGURE 1.22 – Moyenne (ligne) et écart-type (zone grisée) du coefficients d'absorption acoustique de diverses plantes pour une épaisseur donnée (ligne rouge), deux fois cette épaisseur (ligne bleu) [82]

Lorsque la surface des feuilles diminue, le coefficient d'absorption mesuré présente une plus forte variabilité. Le comportement des feuilles y est modélisé sous la forme d'effets thermo-visqueux dans une couche poreuse acoustique équivalente [83]. Les résultats de simulation montrent que ce modèle donne des résultats corrects tant que les feuilles sont suffisamment petites par rapport à la longueur d'onde et que les effets de diffusion peuvent être négligés. L'apparente contradiction entre ces résultats et ceux de Aylor [72], s'explique par les différences de taille des feuilles et de fréquences étudiées.

Smyrnova *et al* [64] ont réalisé des mesures de diffusion acoustique en fonction de l'angle d'incidence en salle anéchoïque en utilisant la méthode de la norme ISO 17497-2 [84]. Ils ont montré que les plantes diffusent principalement à moyennes et hautes fréquences (au dessus de 500 Hz) et que la dimension des feuilles, la présence de tiges et l'angle d'incidence de la source sonore influent sur la diffusion.

Hong-Seok *et al* [68] ont également effectué des mesures d'absorption (Fig. 1.24) et de diffusion (Fig. 1.25) sur table tournante pour plusieurs types de feuillages (buis, houx et lierre), et différentes fractions volumiques (densités foliaires) en salle réverbérante (Fig. 1.23). Pour le lierre, les effets de diffusion ne se manifestent pas en dessous de 1000 Hz quelle que soit la densité de feuillage considérée. Au delà de cette fréquence, son coefficient de diffusion augmente avec la fréquence pour atteindre 0,5 à 5000 Hz. Les effets de diffusion apportés par le buis et le houx sont quasiment nuls jusqu'à 4000 Hz (Fig. 1.25). Par ailleurs, comme pour la diffusion, le coefficient d'absorption est assez élevé pour le lierre et augmente lorsque la densité de feuilles est plus importante. Il augmente avec la fréquence, passant de 0,2 (630 Hz) à 0,55 (4000 Hz). Pour les autres feuillages, le coefficient d'absorption reste faible, de l'ordre de 0,2 à 4000 Hz (Fig. 1.24).



FIGURE 1.23 – Echantillons des trois types de plantes caractérisées : a) buis avec 100% de couverture végétale ; b) houx avec 100% de couverture végétale ; c) étalage de lierre de 200 mm d'épaisseur, d'après [68]

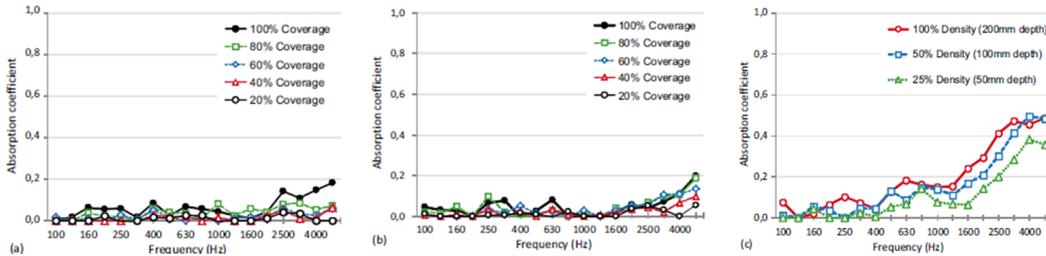


FIGURE 1.24 – Coefficients d'absorption acoustique du buis a) du houx b) et du lierre c) pour différents pourcentages de recouvrement, d'après [68]

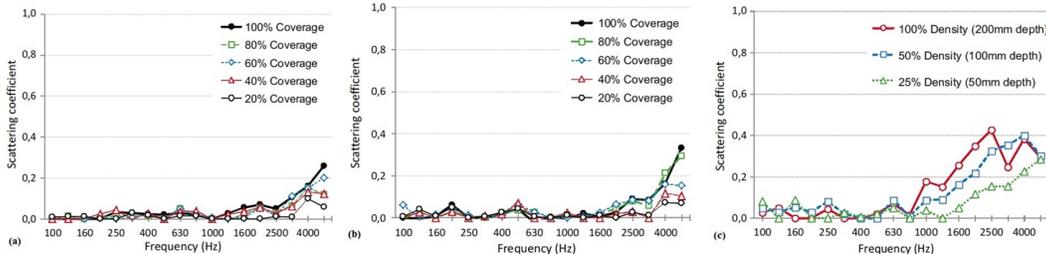


FIGURE 1.25 – Coefficients de diffusion a) du buis b) du houx c) du lierre en fonction du pourcentage de recouvrement, d'après [68]

1.4.2 Propriétés vibratoires des feuillages

Les premiers travaux sur la vibration de végétaux ont été effectués au moyen d'un vibromètre laser à effet doppler par Martens [85, 86] qui a étudié expérimentalement la vibration de différentes variétés de feuilles encastrées ou suspendues. Les feuilles suspendues ont des amplitudes de vitesse vibratoire moins élevées que les feuilles encastrées. Les nervures et les veines des feuilles étudiées ont une amplitude vibratoire beaucoup plus faible que les autres parties de la feuille. D'un point de vue théorique, les nervures de la feuille peuvent être assimilées à des barres et la surface de la feuille à une membrane. Les fréquences de résonance obtenues expérimentalement ont été comparées aux modèles analytiques de membranes et de plaques [87]. L'auteur montre que les fréquences de résonance obtenues dans le cadre de feuilles bi-encastrées varient de manière conséquente d'une espèce de feuille à une autre pour un même diamètre. Par exemple, pour un rayon de 25 mm, les fréquences de résonance des feuilles de « Sparmane d'Afrique » varient entre 151 Hz et 193 Hz, tandis que pour des feuilles de « Caoutchouc », ces fréquences sont comprises entre 385 Hz et 450 Hz. Dans le cas des feuilles suspendus, Martens montre que les quatre premiers modes de vibration d'une feuille apparaissent à 110 Hz, 180 Hz, 275 Hz et 432 Hz. Les feuilles flexibles et possédant peu de nervures présentent un comportement proche d'une membrane. Logiquement, les feuilles rigides et nervurées ont un comportement intermédiaire entre ceux de la plaque et de la membrane.

Tang *et al* [88] ont effectué des mesures des modes de vibration de feuilles en salle anéchoïque à partir d'accéléromètres de faibles masses, positionnés sur les feuilles. Les fréquences de résonance trouvées sont similaires à celles de l'étude de Martens [85].

Magal *et al* [89] se sont intéressés à la propagation d'onde le long de feuilles en différentes zones (nervures centrale et secondaire, régions où aucune nervure n'est présente) en utilisant deux vibromètres laser à effet Doppler. Ils ont montré que les nervures jouent un rôle prépondérant dans cette propagation.

Der Loughian *et al* [90–92] ont travaillé sur la vibration d'une plante excitée mécaniquement à l'aide d'un pot vibrant (Fig. 1.26). Celui-ci impose à la base de la tige une force ponctuelle harmonique, mesurée au cours de l'essai par un capteur de force. Tous les essais sont filmés par une caméra rapide. Les expériences réalisées concernent le domaine fréquentiel allant de 1 Hz à 40 Hz. Ces essais montrent que les modes propres de la plante sont liés à sa structure et répartis en trois zones bien distinctes : modes de tige, modes d'apex (extrémité d'une tige) et modes de feuille.

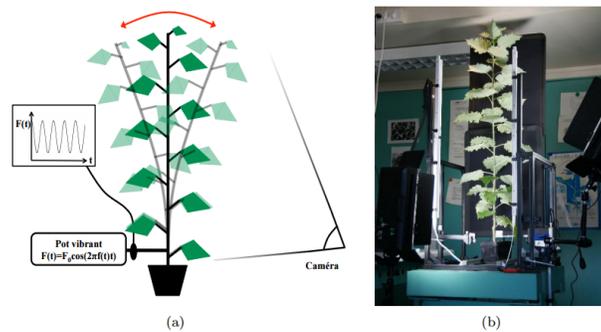


FIGURE 1.26 – (a) Schéma de principe et (b) dispositif de mesure de la vibration d'une plante excitée par un pot vibrant, d'après [90]

Une étude vibratoire de feuille a également été réalisée en salle anéchoïque dans le programme européen HOSANNA [93]. Elle combine une mesure vibratoire par un vibromètre laser à effet Doppler et une mesure acoustique (Fig. 1.27) avec l'objectif de déterminer la densité effective d'une feuille en flexion sur une branche, paramètre pouvant permettre d'effectuer la transition entre les mesures acoustiques « globales » et vibratoires « locales ».



FIGURE 1.27 – Dispositif de mesure de la vibration d'une feuille excitée par une onde sonore au moyen d'un vibromètre laser, d'après [93]

1.4.3 Propriétés acoustiques des substrats

Cette partie résume les travaux de caractérisation acoustique conduits sur des substrats de types poreux.

Cheal *et al* [94] ont étudié l'absorption d'un sol en terre en fonction de la profondeur et de l'humidité (Fig. 1.28). L'évolution du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence est illustrée en Fig. 1.29 pour différentes profondeurs et différents taux d'humidité. Les résultats montrent que le coefficient d'absorption acoustique augmente légèrement avec l'épaisseur de la terre comme dans les travaux précédents de Bérengier *et al* [95] et Attenborough *et al* [96]. Cependant l'accroissement de l'absorption acoustique admet une épaisseur limite d'environ $5 \cdot 10^{-2}$ m au delà de laquelle les effets ne se manifestent quasiment plus. L'absorption acoustique diminue considérablement avec le taux d'humidité. En effet, l'ajout d'eau réduit la taille des pores de la terre et modifie ainsi le coefficient d'absorption acoustique dans un rapport de 1 à 5 entre le sol sec et le sol mouillé. La diminution relative de l'absorption due à l'humidité peut s'avérer dans la plupart des cas indépendante de la fréquence.



FIGURE 1.28 – Dispositif de mesure du coefficient d'absorption de la terre , d'après [94]

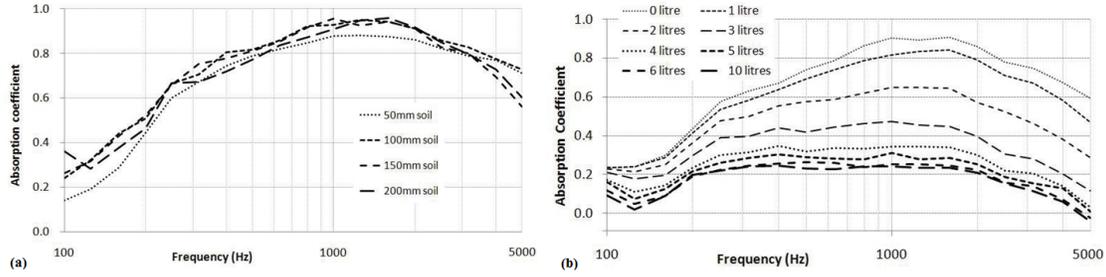


FIGURE 1.29 – Coefficient d’absorption de la terre pour différentes profondeurs (a) et différents taux d’humidité (b), d’après [94]

Le rapport technique du programme européen HOSANNA réalisée par Kang *et al* [77] traite de l’absorption acoustique d’un sol sableux (Fig. 1.30). Le fait d’humidifier le substrat diminue considérablement son coefficient d’absorption [82]. Un modèle de type milieu poreux donne des résultats très proches de ceux mesurés en tube de Kundt [77,83].

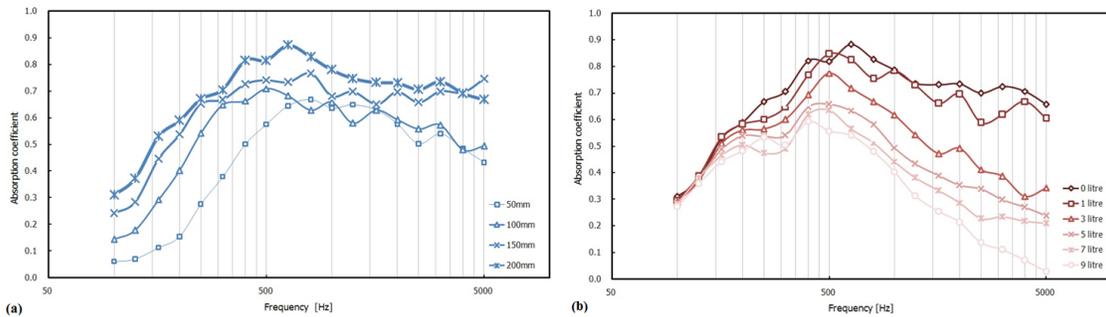


FIGURE 1.30 – Coefficient d’absorption du sol sableux pour différentes profondeurs (a) et différents taux d’humidité (b), d’après [77]

Chabriac *et al* [97] ont évalué les performances acoustiques de différents substrats végétaux particuliers (chanvre, écorce de tournesol, sureau, lin et paille de colza) pour l’isolation phonique de bâtiments. Les propriétés effectives (module de compressibilité et densité effective) ainsi que l’absorption acoustique mesurées en tube de Kundt montrent que ces substrats particuliers ont des propriétés physiques proches de celle des milieux poreux. Le modèle de Champoux-Allard-Johnson [98,99] apparaît très bien adapté à leur description.

Glé [100–103] a caractérisé et modélisé les propriétés effectives d’échantillons de bétons de chanvre fabriqués suivant différentes formulations. Ses travaux ont montré que les propriétés acoustiques évoluent très sensiblement en fonction du liant utilisé. Les mesures d’absorption et de transmission montrent qu’une augmentation de la résistance au passage de l’air σ implique une baisse de l’absorption acoustique mais une amélioration de l’indice d’affaiblissement ⁸.

8. La définition de l’indice d’affaiblissement est rappelée dans l’annexe B

1.4.4 Propriétés acoustiques d'ensembles composés de végétal et de substrat

Les ensembles composés de végétal et de substrat peuvent prendre la forme d'un substrat recouvert de feuilles posées, d'un substrat dans lequel poussent les plantes ou d'une véritable paroi verticale intégrant des végétaux nourris par un substrat adapté.

Effet d'une feuille posée sur un substrat

Ding *et al* [104] ont mesuré le coefficient d'absorption d'une feuille seule combinée successivement à une mousse de mélamine ou une mousse armaflex supposées représenter des substrats. Si la présence d'une feuille présente semble accroître l'absorption acoustique d'un tel système pour des fréquences allant de 100 Hz à 2000 Hz, elle fait chuter de manière importante cette absorption au delà de 2500 Hz (Fig. 1.31). Un modèle numérique a été développé pour décrire le substrat seul puis le substrat combiné à la feuille en considérant le modèle de Biot [105, 106]. Les paramètres non acoustiques (densité effective ρ_{eff} (cf.§ 2.3.3), porosité ϕ (cf.§ 3.2), tortuosité τ_{∞} et de la résistance au passage de l'air σ) mesurés à part, peuvent être déduit des équations [107] :

$$\sigma = -\frac{1}{\phi} \lim_{\omega \rightarrow 0} \Im m(\rho_{\text{eff}} \omega) \quad (1.17)$$

$$\tau_{\infty} = \frac{1}{\rho_0} \left(\Re(\rho_{\text{eff}}) - \sqrt{\Im m(\rho_{\text{eff}}^2) - \left(\frac{\sigma \phi}{\omega}\right)^2} \right) \quad (1.18)$$

Les résultats mesurés sont en bon accord avec ceux utilisés par le modèle numérique.

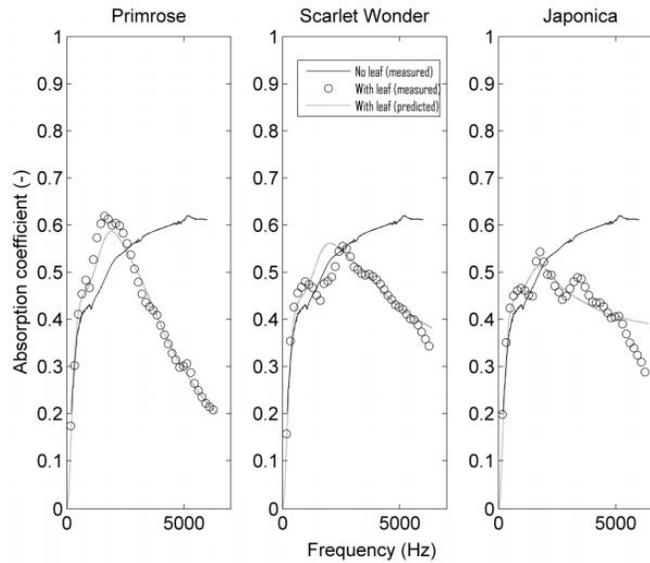


FIGURE 1.31 – Spectre du coefficient d'absorption d'une feuille sur un substrat absorbant, d'après [104]

Effet de plantes posées au sol sur un substrat

Asdrubali et D'Alessandro [108, 109] ont effectué des mesures d'absorption en tube de Kundt puis en salle réverbérante d'un substrat composite (tourbe de coco et perlite), combiné à diverses espèces de plantes tropicales. Les auteurs montrent qu'au delà de 1000 Hz, le substrat peut absorber 80% de l'énergie acoustique incidente. L'absorption peut augmenter plus ou moins rapidement avec la fréquence suivant la plante.

Horoshenkov [78] a mis en évidence l'intérêt d'utiliser un substrat composé de matériaux synthétiques combiné au feuillage, plutôt qu'un sol argileux, pour améliorer l'absorption acoustique sur une large bande de fréquence comme le montre la Fig. 1.32.

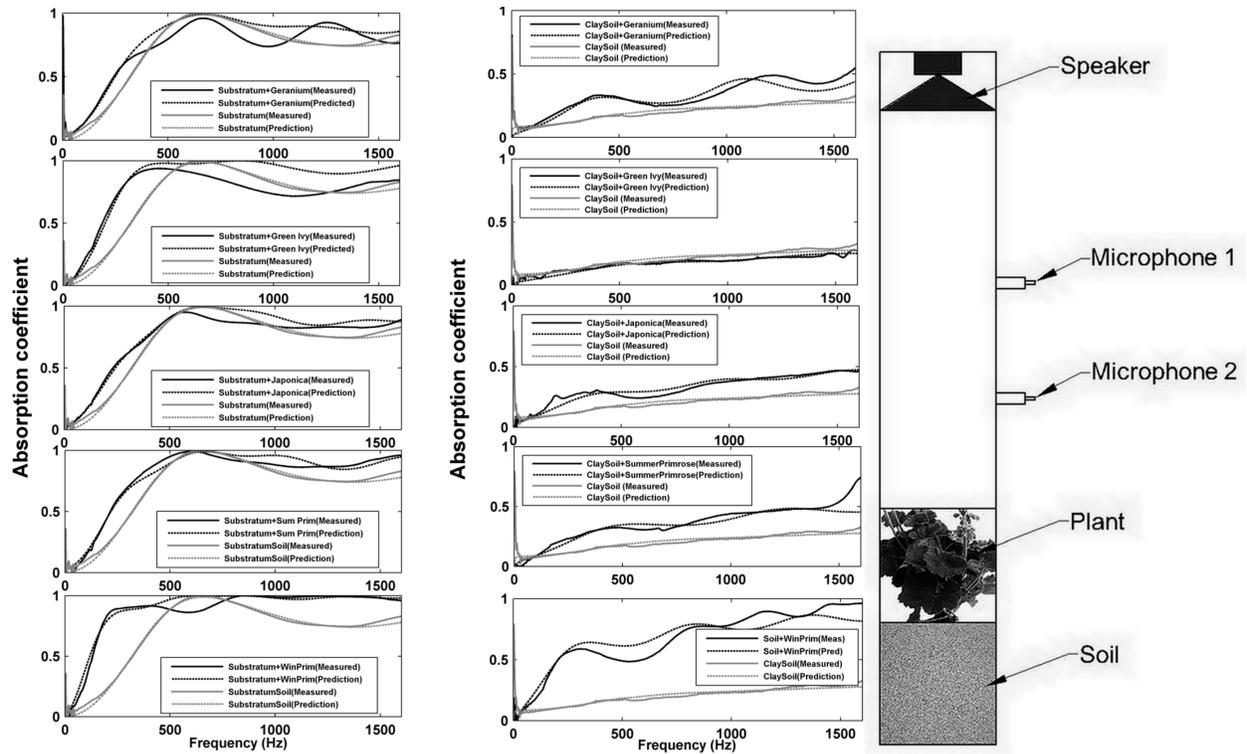


FIGURE 1.32 – Spectre du coefficient d'absorption acoustique d'un système plante+substrat caractérisé en tube de Kundt, d'après [78]

Guillaume *et al* [110] ont effectué des mesures d'impédance à partir de la méthode proposée par Allard [60] sur plusieurs types de sols en extérieur : gazon synthétique (parfaitement plat), pelouse (plate) et sur un terrain naturel (rugueux et hétérogène). Dans cette étude, les mesures d'impédances ont été effectuées en hiver et en été. Le principe de cette étude consiste à effectuer un « calage » du modèle d'impédance en ajustant les valeurs de la résistance au passage de l'air et de l'épaisseur pour au final déterminer l'absorption acoustique de la surface active du milieu. Les résultats obtenus montrent qu'entre l'été et l'hiver, la résistance au passage de l'air augmente, en raison de l'augmentation de l'humidité, tandis que l'épaisseur effective diminue. Par conséquent, la variation de l'amplitude de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence est plus importante en hiver qu'en été. Le modèle de Miki [81] qui permet de déterminer l'impédance et le nombre d'onde du sol apparaît parfaitement adapté.

L'atténuation du niveau sonore d'une onde acoustique se propageant parallèlement au sol peut atteindre 10 dB au niveau des moyennes fréquences (entre 500 et 1000 Hz) pour des distances entre 50 et 500 m.

Van Renterghem *et al* [111] ont mesuré en espace extérieur les effets de transmission acoustique à travers des haies de buissons posées au sol d'épaisseurs variant entre 1,7 et 2,2 m. Les sources de bruit étaient des véhicules légers roulant en moyenne à 50 km h^{-1} . Les résultats obtenus montrent que les branches et tiges des feuilles atténuent le bruit des voitures aux alentours de 5 kHz, avec des pertes d'insertion entre 2 et 10 dB suivant l'épaisseur de la haie. Les effets de sol sont plus importants dans l'atténuation du bruit que ceux du feuillage, particulièrement en basses fréquences.

L'influence du taux de remplissage de plantes recouvrant le substrat sur l'absorption a été abordé par Yang *et al* [68,94]. Dans le cadre de ce travail, des mesures réalisées en salle réverbérante ont montré que le coefficient d'absorption acoustique d'un substrat de terre, intégralement recouvert de plantes, présente une absorption nettement améliorée sur la plage [100 Hz – 1000 Hz]. Au delà de cette fréquence les plantes semblent produire l'effet inverse (Fig. 1.33) comme dans les travaux de Ding [104].

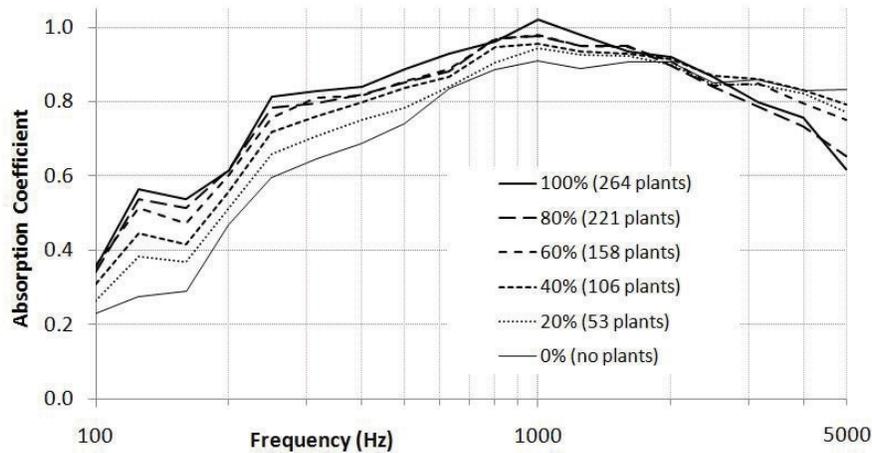


FIGURE 1.33 – Variation du coefficient d'absorption acoustique de systèmes superposant plantes et substrat pour différents taux de remplissage, d'après [68]

Une étude sur la diffusion acoustique par des arbustes plantés sur du sable (Fig. 1.34) a été réalisée en salle réverbérante dans le cadre du projet HOSANNA [77]. Cette expérience avait pour but de mesurer les effets de diffusion acoustique en fonction de l'augmentation progressive du nombre d'arbustes. Dans les basses fréquences, le coefficient de diffusion reste relativement faible (de l'ordre de 0,1) quel que soit le taux de remplissage. A partir de 500 Hz, une augmentation progressive de ce coefficient est observée jusqu'à atteindre 0,9 à 5000 Hz. Entre 500 Hz et 5000 Hz le coefficient de diffusion moyen dépend peu du taux de remplissage (0,43 pour 40%, 0,44 pour 60% et 0,48 pour 100%), comme le montre la Fig. 1.35. La comparaison de ces résultats avec les mesures de Hong-Seok *et al* [68] (voir § 1.4.1) sur le buis et le houx montre que l'ajout de feuillage a peu d'influence sur la diffusion acoustique d'un système plante-substrat, et que le sol y joue un rôle majeur.

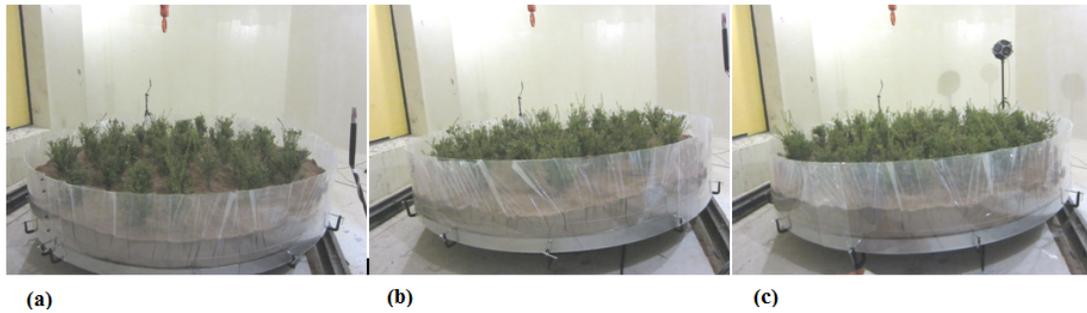


FIGURE 1.34 – Dispositif de mesure de la diffusion d’arbustes dans le sable pour différents taux de remplissage : (a) 40% soit 28 arbustes ; (b) 60% soit 42 arbustes ; (c) 100% soit 70 arbustes, d’après [77]

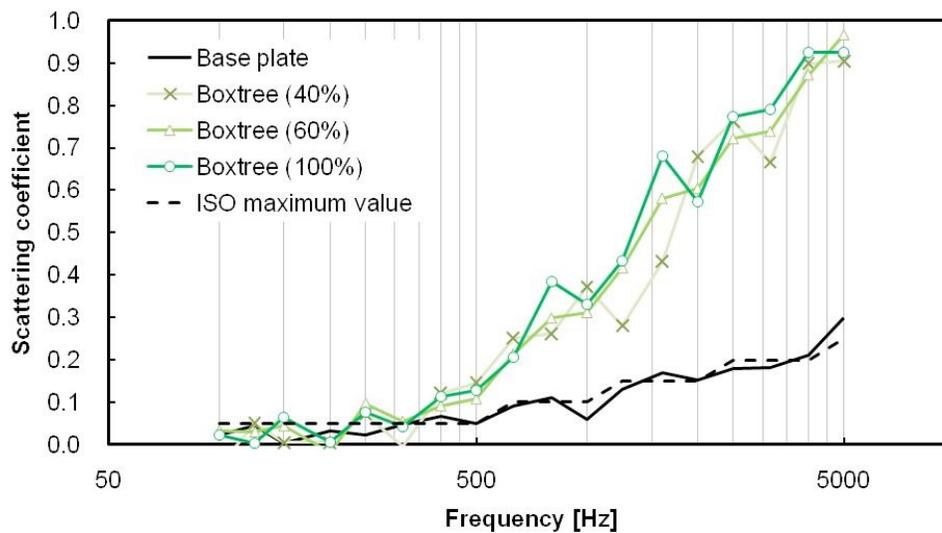


FIGURE 1.35 – Variation du coefficient de diffusion d’un système végétal-substrat pour différents taux de remplissage, d’après [77]

Effet des parois végétalisées (système plantes-substrat) verticales

Wong *et al* [112] ont évalué les pertes par insertion de huit parois végétalisées (plantes et substrat dans des pots) situées en ville (Fig. 1.36), pour une gamme de fréquence s’étendant de 65 à 10000 Hz. Cette étude a montré que les pertes par insertion sont plus importantes en moyenne (entre 125 et 1250 Hz), et très hautes fréquences (entre 4000 et 10 000 Hz) où elles varient entre 5 et 10 dB (Fig. 1.37). La majeure partie de l’atténuation à basses et moyennes fréquences est attribuée aux effets d’absorption des substrats qui composent ces murs. A plus hautes fréquences, la diffusion des plantes apporte une faible contribution à l’atténuation. Une autre campagne de mesure réalisée en chambre réverbérante par les mêmes auteurs porte sur l’effet du taux de remplissage de plantes (43%, 71% et 100%) installées sur une paroi verticale de 10 étages. Peu de variations sont constatées sur l’absorption acoustique lorsque le pourcentage de plantes varie.

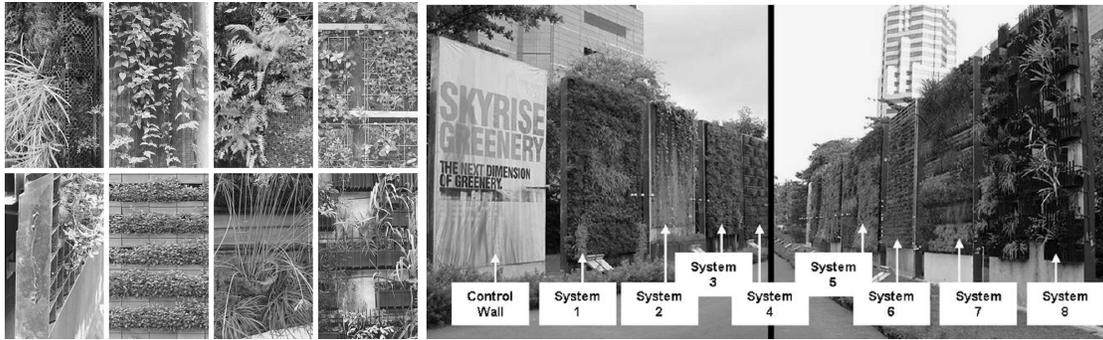


FIGURE 1.36 – parois végétalisées verticales étudiées par Wong *et al*, d'après [112].

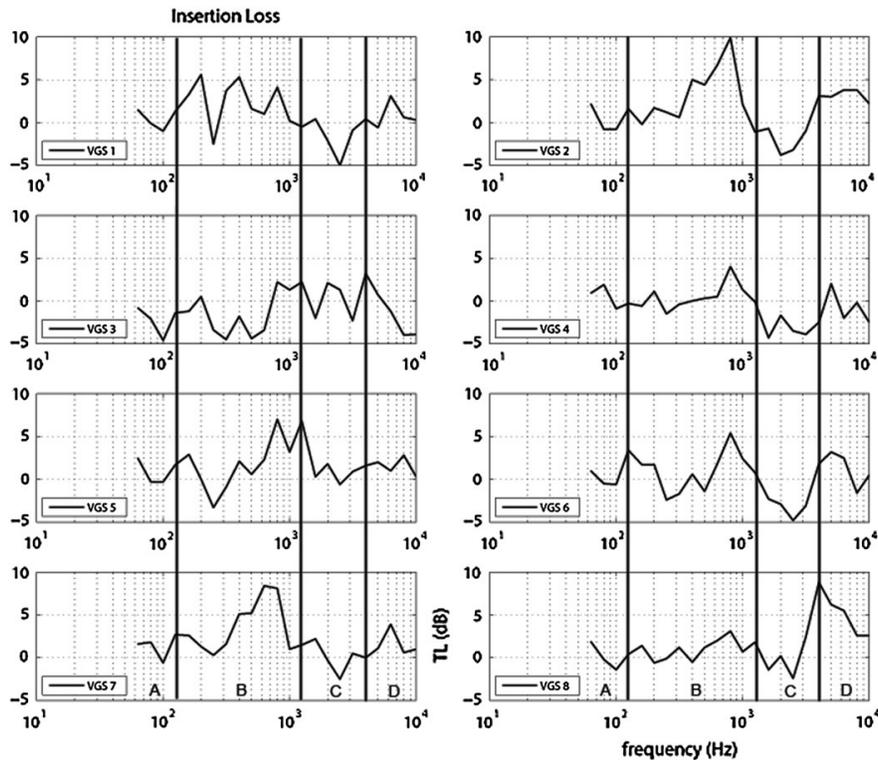


FIGURE 1.37 – Variation des indices d'affaiblissements mesurés sur les huit parois végétalisées, d'après [112]

Azkorra *et al* [1] ont effectué des mesures acoustiques sur une paroi constituée de modules de polyéthylène recyclé (600 x 400 x 80 mm), chaque unité étant remplie d'un substrat recyclable de fibre de coco. Les mesures d'isolement⁹ sont effectuées sur la paroi située entre deux locaux contigus. L'indice d'affaiblissement est peu élevé (16,4 dB à 500 Hz) mais reste significatif. La mesure en salle réverbérante a mis en évidence une baisse de la durée de réverbération en présence de la paroi de 9,43 s à 4,7 à 500 Hz), donnant une absorption $\alpha = 0,36$.

9. Les définitions de l'isolement acoustique et de l'indice d'affaiblissement acoustique sont rappelées en annexe B

Plus récemment, Thomazelli *et al* [113] ont étudié les performances d'isolement et d'absorption acoustique de systèmes modulaires de parois végétalisées. Ces systèmes sont constitués de panneaux de contreplaqués plastifiés, sur lesquels neuf sacs géotextiles sont positionnés. Les sacs contiennent un mélange de substrat (fibre de coco, portions granulaires et fibreuses du mésocarpe de noix de coco, perlite), ainsi qu'une sélection de plantes (*Callisia* rampante). Les mesures d'absorption effectuées en salle réverbérante ont été conduites suivant différentes configurations : (i) plaque de base et sacs géotextiles, (ii) plaque de base, sacs géotextiles et substrat, (iii) plaque de base, sacs géotextiles, substrat et plantes. Pour des fréquences supérieures à 1000 Hz, les coefficients d'absorption sont pratiquement constants et supérieurs à 0,5 (pouvant atteindre 1, dans la configuration (iii)). Pour la configuration (ii), les résultats obtenus pour les panneaux supportés par tasseaux en bois présentent une augmentation du coefficient d'absorption acoustique entre 200 et 630 Hz. Concernant les mesures d'affaiblissement acoustique réalisées en façade des murs végétalisés, l'isolement suivant l'indicateur standard $D_{2m,nT}$ est amélioré de 2 dB, par rapport aux autres configurations, donnant ainsi un isolement standard de 33 dB.

Une méthode d'évaluation à tiers d'échelle a été développée par Connelly [114] afin de mesurer les effets de diffusion des substrats et des espèces végétales. Une série de mesures a été réalisée pour quantifier l'absorption des parois végétalisées en variant le type de support, le substrat, la teneur en humidité et les espèces de plantes, afin de déterminer les paramètres qui ont le plus d'impact sur l'absorption et la diffusion des murs végétalisés. Les mesures ont porté sur la permutation de plusieurs murs végétalisés de 132 m² installés dans une salle de théâtre conçue pour des ateliers interactifs. Des critères acoustiques tels que le bruit de fond, le temps de réverbération et l'intelligibilité ont ensuite été mesurés puis modélisés pour une salle de 60 m² dédiée à la parole. Les parois étudiées sont constituées d'un substrat recouvert de plantes diverses. A partir des résultats obtenus, la surface foliaire a été jugée plus pertinente que les caractéristiques géométriques de la plante pour prédire l'absorption et la couverture foliaire globale plus pertinente pour caractériser la diffusion à haute fréquence. Mesures et calculs ont montré que la paroi végétalisée réduit le temps de réverbération et que l'intelligibilité d'un discours peut être affectée à proximité de la paroi.

Shimizu *et al* [115] ont évalué l'absorption et la transmission acoustiques en salle réverbérante dans le cas d'une paroi végétalisée composée d'un mélange de matière organique (fibre de coco) et inorganique (perlite) et de plantes. Ses résultats ont montré que l'augmentation de l'absorption acoustique réduit de manière conséquente le son diffracté par les bords du mur et améliore donc l'affaiblissement acoustique. Les mesures réalisées en extérieur indiquent qu'un écran antibruit végétalisé de hauteur limitée présente une efficacité réduite vis à vis des effets de diffraction. L'isolement est cependant amélioré à faible hauteur à distance suffisante de l'écran.

Lunain *et al* [2, 116, 117] ont effectué des mesures acoustiques au voisinage d'un mur végétalisé constitué des éléments suivants (Fig. 1.38) :

- un ensemble de cellules en acier galvanisé de dimensions totales 1940 x 1920 x 340 mm,
- une toile en polypropylène imputrescible,
- un substrat de plantation composé de matières organiques et végétales, d'épaisseur 200 mm,
- différents végétaux choisis suivant les conditions climatiques du lieu d'installation (le mur comporte 39 espèces différentes et 5945 plantes au total),
- un système d'irrigation.

Deux types d'expérimentations ont été réalisés : la mesure du niveau sonore d'un bruit routier en deux points de mesure situés aux 1^{er} et 2^{ème} étage respectivement (PF1 et PF2) d'un bâtiment situé en face du mur végétal (Fig. 1.39). Les mesures étaient effectuées en continu pendant une semaine complète avant, puis après la mise en place du mur végétal ; la mesure du niveau sonore d'une source de bruit rose pour trois positions de la source et avec sept positions de récepteurs (Fig. 1.39). Les gains acoustiques mesurés en présence du mur sont relativement faibles voire insignifiants pour les configurations où la source est proche du récepteur. Lorsque la source est plus éloignée, la réduction des niveaux sonores est réduite en moyenne fréquence (400 - 2500 Hz) et plus importante (suivant la bande de tiers d'octave concernée) en haute fréquence (3 150 à 20 000 Hz).



FIGURE 1.38 – Paroi végétalisée étudiée dans [2]

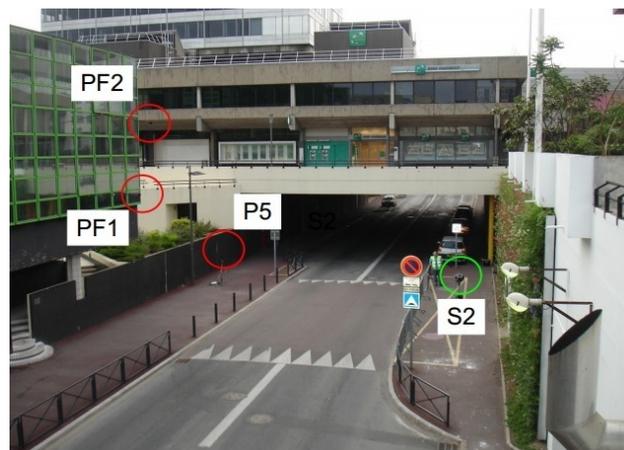


FIGURE 1.39 – Mesure in-situ d'un mur végétalisé sur le site. Emplacement de la source et des points de mesures d'après [2]

1.5 Conclusion du Chapitre

Deux communautés séparées de chercheurs se sont intéressées au comportement mécanique des parois végétalisées en étudiant, d'une part, la vibration des feuilles et branches et, d'autre part, l'absorption et la diffusion acoustiques de parois constituées de feuillage et/ou de substrats. Une synthèse des résultats obtenus dans les bandes d'octave de la gamme audible est présentée dans le Tab. 1.1.

Fréquence centrale de la bande d'octave (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Feuillages										
Résonances vibratoires	Flexion et torsion (feuilles et branches)		-			membrane (feuilles)			-	
Coefficient d'absorption	-	0 -0,005	0,02-0,1	0,05 -0,25	0,1-0,45	0,1-0,65	0,1-0,8	-	-	-
Coefficient de diffusion	-	-	0 - 0,05	0 - 0,1	0 - 0,15	0 - 0,2	0 - 0,35	0 - 0,5	-	-
Substrats										
Coefficient d'absorption	-	-	0,05 - 0,4	0,05 - 0,9	0,2 - 0,95	0,55 - 1	0,6 - 0,9	0,5 - 0,85	0,65 - 1	-

TABLEAU 1.1 – Synthèse des propriétés vibratoires et acoustiques (absorption) publiées sur les feuillages et les substrats

Les expériences vibratoires sur le feuillage mettent en évidence des résonances de flexion et de torsion des branches dans les deux premières bandes (31,5 et 63 Hz), les résonances de flexion et de torsion des feuilles étant situées généralement en dessous de 20 Hz. Ces résonances mécaniques n'entraînent aucun effet notable sur l'absorption et la diffusion acoustiques. On peut raisonnablement supposer qu'à ces fréquences, le couplage fluide-structure est très faible car les longueurs d'onde sont beaucoup plus grandes que les dimensions caractéristiques des feuilles et des branches. L'augmentation de la fréquence est accompagnée d'un accroissement du couplage fluide-structure et donc d'une augmentation notable du coefficient d'absorption à partir de la bande 250 Hz et du coefficient de diffusion à partir de la bande 1000 Hz. Dans ces bandes, un comportement vibratoire « moyennes fréquences » pour les branches et des résonances de membrane des feuilles sont observés.

Les expériences conduites sur les substrats ont mis en évidence l'existence d'une absorption acoustique élevée de la bande 250 Hz à la bande 8000 Hz qui peut être fortement réduite en présence d'humidité. L'utilisation de mélanges de substrats permet de limiter l'effet de l'humidité sur l'absorption acoustique.

Pour interpréter ces résultats, le comportement acoustique des feuillages et des substrats est le plus souvent décrit par un modèle de milieu poreux à squelette immobile (modèles de Delany-Bazley-Miki ou de Champoux-Allard-Johnson). Si ce choix semble bien adapté au cas des substrats, il est plus surprenant pour les feuillages dont les vibrations sont présentes dans toute la bande audible.

Pour éclaircir ce lien entre les propriétés acoustiques et vibratoires des feuillages, il semble naturel de chercher à coupler deux des principales méthodes de mesure décrites dans ce chapitre : la caractérisation acoustique par tube d'impédance et la caractérisation vibratoire par vibrométrie laser. Le développement et la validation d'un dispositif expérimental de ce type fait l'objet du second chapitre de ce mémoire.

Mise en place du banc expérimental et validations

Sommaire

2.1	Introduction	36
2.2	Définition du cahier des charges	36
2.2.1	Banc de mesure	36
2.2.2	Méthodologie de conception et de validation du banc de mesure	38
2.3	Dispositif de caractérisation acoustique des échantillons	39
2.3.1	Dimensionnement et mise en place du tube d'impédance	39
2.3.2	Fonctionnement du programme d'automatisation du banc acoustique	41
2.3.3	Principes théoriques de détermination des paramètres acoustiques	45
2.3.4	Validation du dispositif développé	49
2.4	Dispositif de caractérisation vibratoire des échantillons	56
2.4.1	Principe de fonctionnement et mise en oeuvre du vibromètre laser à balayage	57
2.4.2	Couplage du vibromètre laser à balayage au tube d'impédance	58
2.4.3	Caractérisations vibratoire et acoustique d'échantillons de mousse de mélamine	59
2.5	Conclusion du chapitre	66

2.1 Introduction

Ce chapitre présente les étapes successives ayant conduit au développement d'un banc expérimental spécifique de caractérisation vibro-acoustique d'échantillons de Parois Complexes Vegetalisées (PCV) à partir d'un tube à impédance. Le dispositif présenté doit permettre de caractériser, pour un même échantillon, i) les **coefficients acoustiques** caractérisant l'interaction de l'onde avec l'échantillon (impédance de surface Z_s , coefficients de réflexion, d'absorption et de transmission (cf. Chapitre 1)); ii) les **propriétés effectives** (impédance caractéristique Z_{eff} , nombre d'onde, masse volumique et module de compressibilité) de milieux constituant ces parois (substrat, plantes); iii) le **champ vibratoire** à la surface des échantillons. Ce chapitre est organisé en trois parties :

- La première partie de ce chapitre présente le dispositif expérimental conçu et mis œuvre pour répondre aux objectifs énoncés préalablement ainsi que la méthodologie qui a été adoptée pour y parvenir ;
- La seconde partie rappelle les bases théoriques concernant la mise en œuvre d'un tube d'impédance. Le dimensionnement, le mode de fonctionnement et les étapes de validation de ce dispositif y sont détaillés ;
- La troisième partie décrit le principe de fonctionnement du vibromètre laser à balayage, son couplage avec le tube d'impédance et sa mise en œuvre pour la caractérisation vibratoire d'un échantillon de mousse acoustique.

2.2 Définition du cahier des charges

2.2.1 Banc de mesure

Le banc expérimental à mettre en place doit permettre d'effectuer à la fois des mesures acoustiques et vibratoires sur des feuillages et des substrats. Le montage retenu est illustré aux Figs. 2.1 et 2.2. La particularité de ce dispositif est de coupler un tube d'impédance et un vibromètre laser à balayage. Le tube est en acier inoxydable. Sa section circulaire a un diamètre interne de 192 mm. Sa longueur est de 1,90 m et son épaisseur est de 15 mm. Une de ses extrémités est terminée par un élément cylindrique en PVC où sont répartis sur un même plan quatre haut-parleurs large-bande identiques de 50 mm de diamètre (Visaton FRS). Cette extrémité est également munie d'un trou central fermé par un disque en verre blanc de 10 mm d'épaisseur qui permet le passage du faisceau laser utilisé pour cartographier la vitesse vibratoire de l'échantillon. Une terminaison rigide est positionnée à l'autre extrémité. Suivant le type d'expérimentation, cette terminaison peut être un piston en Téflon de 61 mm d'épaisseur et de même section que le tube (Fig. 2.1 (b)) ou un disque en inox vissé en son extrémité (Fig. 2.1 (c)). Le piston peut être déplacé le long du tube. Les mesures de la pression acoustique sont réalisées avec trois microphones électrostatiques de 3,8 mm de diamètre (Sennheiser MKE 2P). Deux de ces microphones situés respectivement à 800 et 900 mm de l'extrémité du tube (côté piston) permettent de déterminer les coefficients de réflexion et d'absorption ainsi que l'impédance de surface, suivant la norme ISO 10534-2 [37].



FIGURE 2.1 – Tube à impédance couplé au vibromètre laser à balayage pour les caractérisations acoustique et vibratoire.

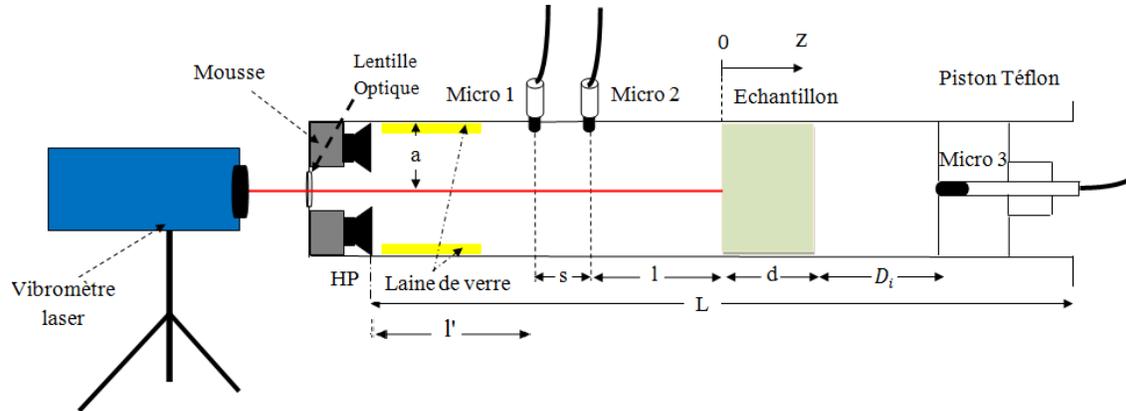


FIGURE 2.2 – Configuration de mesure des paramètres acoustiques, des propriétés effectives (cf. § 2.3.4) de l'échantillon et de la vitesse vibratoire de la surface de l'échantillon

Le troisième microphone, localisé au centre du piston, est utilisé avec les deux autres microphones pour déterminer la matrice de transfert $[T]$ de l'échantillon suivant la méthode à deux cavités mise en place par Salissou [53–55]. Ce microphone permet également de mesurer le champ de pression à la surface de l'échantillon. Les trois microphones sont reliés à trois entrées d'une carte d'acquisition (RME Fireface 802) connectée à un ordinateur qui contrôle les entrées/sorties du système. Le signal d'excitation est généré par le système de commande du vibromètre laser à balayage puis envoyé vers un amplificateur (Bruel et Kjaer de type 2706). La méthode de mesure repose sur l'hypothèse que l'onde se propageant dans le tube est plane, ce qui limite la plage fréquentielle de mesure à la bande [100 Hz-1000 Hz] (cf. § 2.3.1), ces limites dépendent des dimensions du tube, des espacements entre les différents éléments du tube, des réponses en fréquence des transducteurs (haut-parleurs, microphones) mais également du milieu à caractériser. Pour certains échantillons, cette bande sera notablement réduite (cf. chapitres 3 et 4). La caractérisation du champ vibratoire de la surface de l'échantillon est directement obtenue avec le vibromètre laser à balayage. Elle peut être réalisée dans la même configuration que celle utilisée pour les mesures acoustiques.

2.2.2 Méthodologie de conception et de validation du banc de mesure

La conception du banc expérimental s'est effectuée en plusieurs phases.

- En premier lieu, un banc de mesure permettant de caractériser les coefficients d'absorption et de réflexion par la méthode ISO 10534-1 [36] a été mis en place. Cette méthode consiste à relever le Taux d'Ondes Stationnaires (rapport du maximum de pression sur le minimum de pression) le long du tube, puis d'en déduire les coefficients de réflexion et d'absorption de l'échantillon étudié. Les résultats fournis par cette méthode, donnés au § 2.3.4, servent de référence. Cette méthode, bien que fiable, reste difficilement automatisable et fastidieuse en raison du temps qu'elle nécessite pour obtenir l'ensemble des mesures.
- L'automatisation de la mesure est possible avec la méthode de la fonction de transfert utilisant deux microphones [37]. Cette méthode a été programmée en utilisant le logiciel Matlab (détaillé dans le § 2.3.2), puis validée à partir d'un signal harmonique pas à pas¹. Le signal harmonique pas à pas est un signal qui donne des résultats fiables, mais qui requiert un temps d'acquisition élevé et une quantité importante de données à stocker. Par conséquent, d'autres signaux ont été utilisés : le sinus glissant et bruit blanc gaussien. Ces deux signaux permettent une mesure beaucoup plus rapide et efficace de matériaux absorbants. Cependant, leur utilisation pour mesurer les coefficients acoustiques de charges moins absorbantes voire réfléchissantes (piston rigide en Téflon ou couvercle en Inox), donne des résultats bruités présentant des fluctuations très importantes. Dans le cas du sinus glissant, la durée du signal réduite à mesure que la fréquence du signal généré augmente peut expliquer cette difficulté. Il est alors préférable d'utiliser un traitement adapté à des signaux non stationnaires comme la distribution de Wigner-Ville pour palier ces problèmes. Dans le cas d'un bruit blanc gaussien, l'utilisation de plusieurs séquences de bruit blanc permet de moyennner les réponses des microphones et d'améliorer le rapport signal sur bruit de la mesure.
- A la suite de ce travail, la méthode à trois microphones, à une cavité et à deux cavités [54, 55] a été mise en œuvre afin d'obtenir la matrice de transfert et d'en déduire les paramètres effectifs du milieu et les coefficients acoustiques de la paroi (cf. § 1.3.3). Les résultats de validation de toutes ces méthodes sont expliqués et développés dans le § 2.3.4.
- Parallèlement à ce travail, les résultats d'expériences acoustiques ont été confrontés à ceux des expériences vibratoires *via* le vibromètre laser à blayage conduites sur les échantillons tests (cf. § 2.4.3).

1. le signal harmonique pas à pas délivre des sons purs de durées définies. Ce signal génère successivement plusieurs sons purs à partir d'un incrément fréquentiel défini, démarrant ainsi de la fréquence minimale jusqu'à la fréquence maximale

2.3 Dispositif de caractérisation acoustique des échantillons

2.3.1 Dimensionnement et mise en place du tube d'impédance

Le tube en acier inoxydable utilisé pour les essais acoustiques et vibratoires est constitué de trois tronçons de 60 cm chacun : le premier tronçon contient les quatre haut-parleurs ; le second tronçon présente trois emplacements pour l'insertion des microphones ; le dernier tronçon permet d'insérer les échantillons, via un porte-échantillon ainsi que le piston rigide coulissant (intégrant le troisième microphone). Ce tube présente l'avantage d'être épais, lourd et rigide, limitant ainsi les interactions sonores avec l'environnement extérieur susceptibles de perturber les mesures dans la bande [100 Hz - 1 kHz]. Ses diamètres externe et interne sont choisis pour permettre la mesure d'une surface de feuillage suffisamment étendue pour être représentative. Ils sont respectivement de 22,4 cm et de 19,2 cm. L'extrémité avant comporte quatre haut-parleurs large bande et une charge réfléchissante couplée à une mousse de 2 cm d'épaisseur (Fig. 2.2). Ce dispositif permet d'absorber l'onde arrière des haut-parleurs et donc de limiter son re-rayonnement. Un revêtement de laine de verre est disposé devant les haut-parleurs sur 40 cm de la paroi interne du tube, afin de réduire les résonances de la colonne d'air (tout en évitant d'obstruer la fenêtre optique prévue pour les mesures vibratoires). Pour faciliter l'insertion des échantillons, deux porte-échantillons en matériau plastique (ertalon) ont été fabriqués. Leurs longueurs respectives sont de 8 cm et 16 cm (voir Fig. 2.3) et diamètres externe et interne, de 19,2 et 18,4 cm respectivement. Le tube étant disposé horizontalement, il s'avère nécessaire de maintenir verticales les surfaces de l'échantillon de substrat ou de feuillage. A l'une des extrémités du porte échantillon, un morceau de tulle à maillage fin est ajouté de manière à maintenir le milieu étudié à la verticale. La circonférence du tulle est tendue par un joint qui permet de palier les fuites d'air susceptibles d'introduire un biais dans les mesures acoustiques. Les effets de ce porte-échantillon sur la mesure acoustique sont étudiés au § 2.3.4.

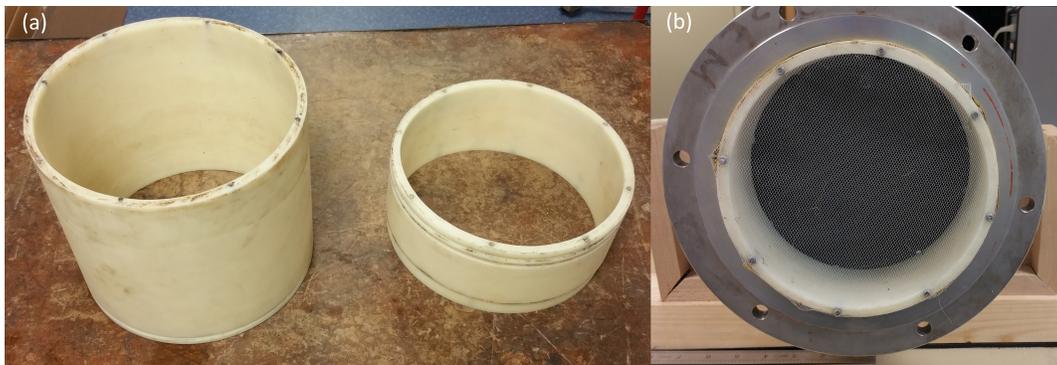


FIGURE 2.3 – (a) Porte-échantillons de 8 et 16 cm de longueur, (b) porte-échantillon introduit dans le tube

La fréquence de coupure haute est déterminée par le passage d'une propagation en onde plane à une propagation multimode dans le tube. Elle peut être calculée à partir de la solution de l'équation de Helmholtz en coordonnées cylindriques (R, ψ, z) qui s'écrit pour la pression acoustique dans le cas monochromatique [118] :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \Psi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 \right) p(R, \Psi, z, t) = 0, \forall R \geq a, \forall \Psi \in [0, 2\pi], \forall z > 0, \forall t > 0, \quad (2.1)$$

où

$$p(R, \Psi, z, t) = P(R, \Psi, z) e^{j\omega t} \quad (2.2)$$

est la pression acoustique et

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0} \quad (2.3)$$

est le nombre d'onde et c_0 la célérité du son dans l'air.

:

La solution générale de l'Eq. (2.1) s'écrit :

$$P(R, \Psi, z) = A J_\nu(k_w R) \left(e^{-j\nu\Psi} + r e^{j\nu\Psi} \right) e^{-jk_z z}, \quad (2.4)$$

où

$$k_w^2 = k_0^2 - k_z^2 \quad (2.5)$$

et

$$\vec{k}_0 = k_R \vec{u}_R + k_\Psi \vec{u}_\Psi + k_z \vec{u}_z. \quad (2.6)$$

J_ν est la fonction de Bessel cylindrique de première espèce d'ordre ν . La condition de Neuman est imposée sur le rayon interne du tube :

$$\frac{\partial P(R, \Psi, z)}{\partial R} = 0, \quad R = a, \forall \Psi \in [0, 2\pi], \forall z > 0, \quad (2.7)$$

où a est le rayon du cylindre. En reportant l'équation du champ Eq. (2.4) dans la condition aux limites Eq. (2.7), on obtient :

$$\frac{\partial P(R, \Psi, z)}{\partial R} = A k_w J'_\nu(k_w a) \left(e^{-j\nu\Psi} + r e^{j\nu\Psi} \right) e^{-jk_z z} = 0, \forall \Psi \in [0, 2\pi], \forall z > 0. \quad (2.8)$$

Les modes de propagation doivent donc vérifier :

$$J'_\nu(k_w a) = 0, \text{ soit } k_w a = \chi_{\nu m}, \quad (2.9)$$

où $\chi_{\nu m}$ est le $(m+1)^{\text{ème}}$ zéro de J'_ν et le $(m+1)^{\text{ème}}$ extrémum de J_ν . La condition d'existence d'un unique mode de propagation (onde plane) est $k_0 a < \chi_{10} \simeq 1,84$, ce qui donne une fréquence

maximale d'étude :

$$f_{max} = \frac{1,84c_0}{2\pi a}. \quad (2.10)$$

Pour la géométrie retenue, $a = 96$ mm et donc $f_{max} = 1037$ Hz. La fréquence d'étude minimale dépend de la méthode de mesure employée. Dans le cas de la méthode de l'exploration de l'onde stationnaire, deux maxima de pression consécutifs doivent pouvoir être mesurés le long du tube de longueur L . Cette condition s'écrit

$$f_{min} = \frac{3c_0}{4L}. \quad (2.11)$$

Soit pour la géométrie considérée ($L = 1,91$ m), $f_{min} = 134$ Hz. Dans le cas de la méthode des deux microphones, la fréquence d'étude minimale est conditionnée par la distance s séparant les microphones qui doit être supérieure à approximativement 1% de la longueur d'onde [37, 50] soit

$$f_{min} = \frac{c_0}{100s}. \quad (2.12)$$

En prenant $s = 10$ cm, on obtient $f_{min} = 34$ Hz². Cette distance doit également être inférieure à une demi longueur d'onde sur toute la bande de fréquence étudiée pour éviter toute indétermination (division par zéro dans l'Eq. (2.52)). Pour $s = 10$ cm, cette valeur correspond à 61% de la demi longueur d'onde à 1037 Hz.

Concernant les mesures de transmission acoustique avec la méthode des deux cavités (cf. § 1.3.3), pour minimiser les erreurs de mesure il est important que les dimensions des deux cavités D_1 et D_2 respectent la condition

$$|D_1 - D_2| < \frac{c_0}{2f_{max}} \quad (2.13)$$

Soit pour le dispositif considéré, $|D_1 - D_2| < 16,4$ cm, pour $f_{max} = 1037$ Hz

2.3.2 Fonctionnement du programme d'automatisation du banc acoustique

Cette section est organisée en trois parties : la première décrit l'ensemble de la chaîne de mesure acoustique ; la seconde explique la procédure de calibration ; la dernière présente les étapes de fonctionnement de la partie logicielle permettant d'automatiser cette chaîne.

2. Les haut-parleurs conditionnent également la mesure acoustique en basses fréquences. Dans le dispositif développé, la réponse des haut-parleurs ne permet pas de réaliser des mesures à des fréquences inférieures à 100 Hz.

Description de la chaîne de mesure

Le dispositif expérimental acoustique est représenté sur la Fig. 2.4. Les mesures acoustiques sont effectuées à l'aide d'une carte son RME Fireface 802. Cette carte son dispose de quatre entrées XLR permettant de connecter les microphones. Dans le cas présent, trois entrées XLR sont utilisées. La sortie USB de la carte son est directement reliée à un PC qui contrôle les entrées/sorties et gère à la fois le signal émis ainsi que l'enregistrement du signal reçu par les microphones. Ce processus est géré par un programme réalisé sous Matlab (détail dans le § 2.3.2). L'entrée d'un amplificateur B&K est reliée à une des sorties de la carte son. Enfin, la sortie de l'amplificateur B&K alimente directement les quatre haut-parleurs.

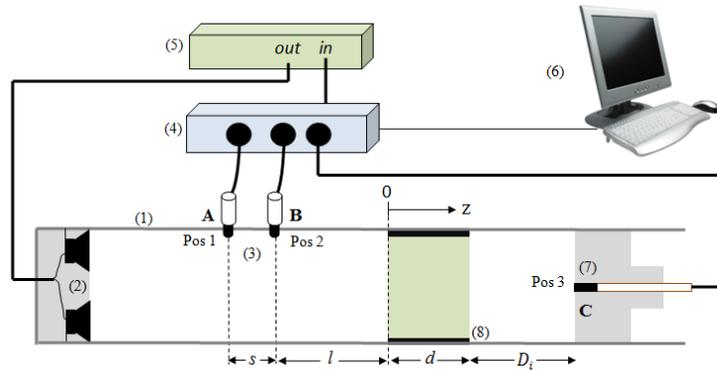


FIGURE 2.4 – Représentation schématique du dispositif expérimental acoustique : (1) tube en acier, (2) charge cylindrique contenant les 4 haut-parleurs, (3) microphones, (4) carte son, (5) amplificateur, (6) PC, (7) microphone monté sur piston mobile, (8) échantillon test inséré dans le porte-échantillon.

Procédure de calibration du dispositif

Les microphones utilisés ne présentant pas des caractéristiques identiques, il est nécessaire d'effectuer une calibration pour compenser leur différence de sensibilité en amplitude et en phase [37]. Pour ce faire, une mesure du rapport de sensibilité est effectuée entre les microphones A et B, puis entre les microphones A et C (le microphone A étant celui de référence). Cette procédure nécessite d'insérer une charge qui soit la plus absorbante possible (mousse anéchoïque) afin d'éviter les réflexions parasites pouvant perturber la calibration. Une mousse de mélamine absorbante issue d'un panneau « BBA PLUS 120 » commercialisée par la société Sonatech, d'épaisseur 36 cm a été utilisée. Trois tronçons de 12 cm d'épaisseurs ont été découpés et superposés afin de former une épaisseur totale de 36 cm. Le piston rigide est positionné derrière la mousse de mélamine avec le microphone A positionné en position 1 et le microphone B en position 2. Une première mesure acoustique est effectuée pour obtenir la fonction de transfert H_{12I} . La même opération est répétée en permutant les positions des deux microphones pour obtenir la fonction de transfert H_{12II} . Ces fonctions de transfert correspondent aux rapports des tensions entre les microphones B et A notés respectivement V_B^I et V_A^I pour la première configuration, et V_B^{II} et V_A^{II} pour la seconde configuration. Elles peuvent être exprimés en fonction des sensibilités (S_A, S_B) et des pressions (P_1, P_2) mesurées par les microphones par les relations :

$$H_{12I} = \frac{V_B^I}{V_A^I} = \frac{S_B P_2}{S_A P_1}, \quad (2.14)$$

$$H_{12II} = \frac{V_B^{II}}{V_A^{II}} = \frac{S_B P_1}{S_A P_2}. \quad (2.15)$$

A partir de ces expressions, le rapport des sensibilités des microphones (nécessaire pour effectuer les mesures acoustiques sur les échantillons tests) est obtenu en effectuant la moyenne géométrique de deux fonctions de transfert soit

$$\frac{S_B}{S_A} = \sqrt{H_{12I} H_{12II}}. \quad (2.16)$$

Une procédure similaire est appliquée pour obtenir le rapport des sensibilités entre les microphones A et C

$$\frac{S_C}{S_A} = \sqrt{H_{13I} H_{13II}}. \quad (2.17)$$

Fonctionnement du programme d'automatisation du banc

L'architecture du programme développé est présenté à la Fig. 2.5. Il s'organise comme suit :

- A Choix du signal d'excitation parmi ceux de types chirp (linéaire, quadratique ou exponentiel), sinus harmonique pas à pas et signal aléatoire (bruit blanc). Il est également possible d'augmenter le nombre de répétitions de la mesure afin d'accroître le rapport signal sur bruit.
- B Choix entre les trois méthodes de caractérisation acoustique :
 - (i) mesure des coefficients d'absorption, de réflexion et d'impédance de surface en application de la norme ISO 10534-2 [37]. Cette méthode nécessite deux mesures pour calibrer les deux microphones et une troisième pour caractériser l'échantillon (cf. 2.3.2).
 - (ii) mesure de transmission par la méthode à une cavité (valable seulement sur un échantillon symétrique). La procédure de calibration (voir § 2.3.2) nécessite quatre séries de mesures auxquelles s'ajoute une cinquième mesure après insertion d'une cavité d'air entre l'échantillon et le piston rigide.
 - (iii) détermination de la matrice de transfert d'un échantillon quelconque (symétrique ou non). Cette dernière méthode nécessite quatre mesures pour calibrer les trois microphones et deux mesures en présence de l'échantillon avec deux cavités d'air d'épaisseurs différentes.
- C Les enregistrements des réponses des trois microphones au moment de la génération du signal puis traitement des signaux temporels comprenant également un fenêtrage temporel (transformée de Fourier des signaux enregistrés, obtention des fonctions de transfert entre chaque microphone. Cette procédure est appliquée pour la calibration et la (les) mesure(s) directe(s) sur l'échantillon.
- D La dernière partie du programme propose soit d'effectuer une nouvelle mesure sur un autre ou le même échantillon, soit de mettre fin au programme.

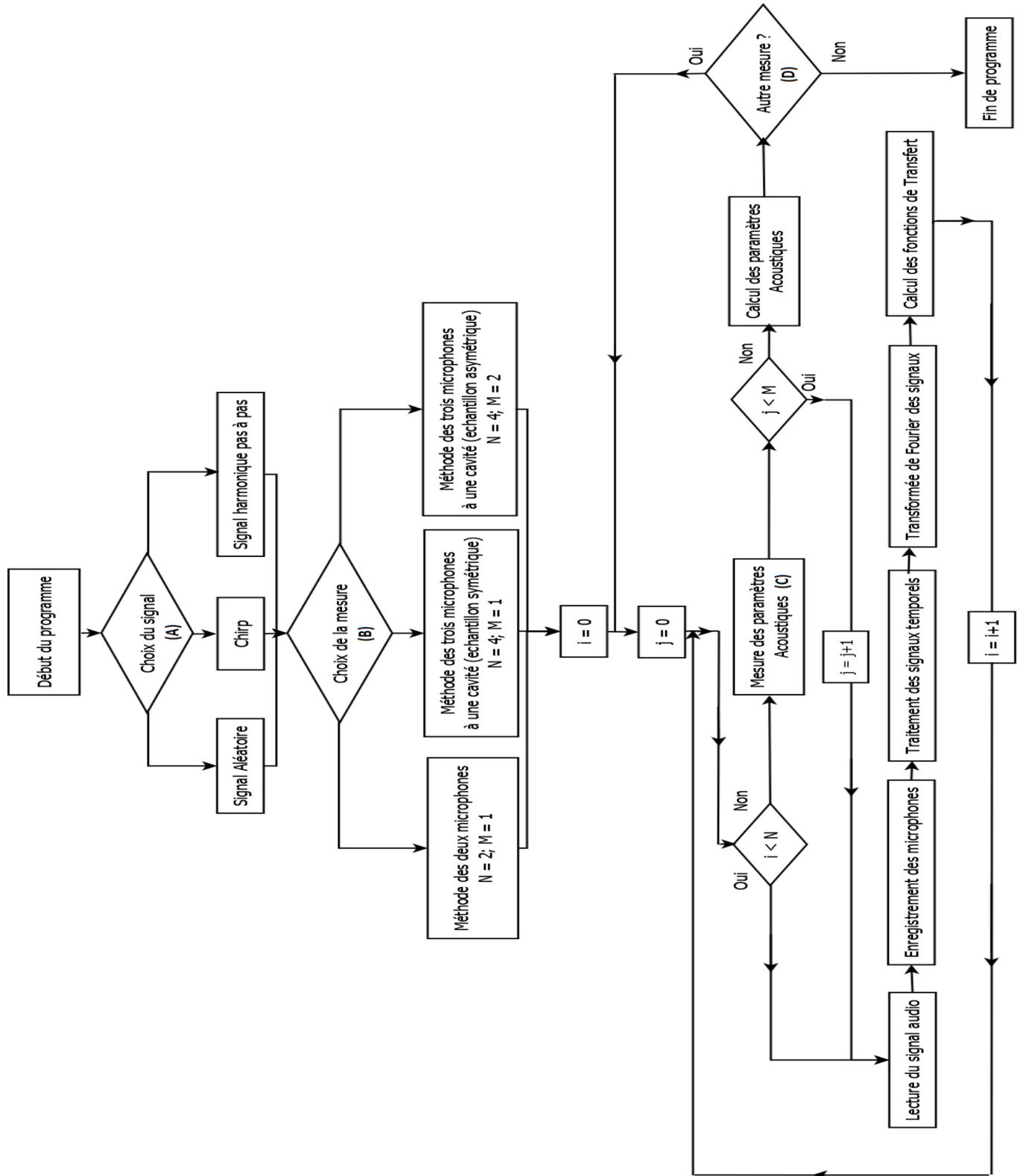


FIGURE 2.5 – Diagramme représentant le programme développé pour les mesures des paramètres acoustiques

2.3.3 Principes théoriques de détermination des paramètres acoustiques

Établissement de la matrice de transfert d'un échantillon

La matrice de transfert d'un échantillon quelconque, symétrique ou non symétrique, est établie à partir des pressions et vitesses sur chacune des faces. Expérimentalement, ces pressions et vitesses sont déduites des mesures des fonctions de transfert entre chaque microphone (A, B et C), pour deux cavités d'air de différentes épaisseurs D_1 et D_2 : $H_{12}(D_1)$, $H_{13}(D_1)$, $H_{12}(D_2)$ et $H_{13}(D_2)$.

Les champs de pression et de vitesse acoustiques sur les faces de l'échantillon en $x=0$ et $x=d$ peuvent s'écrire pour la cavité d'épaisseur D_i (où $i=1$ ou 2) sous la forme :

$$P_i(0) = -2je^{jkl} \frac{H_{12}(D_i) \sin(k(l+s)) - \sin(kl)}{H_{12}(D_i) e^{-jks} - 1}, \quad (2.18)$$

$$V_i(0) = \frac{2e^{jkl} H_{12}(D_i) \cos(k(l+s)) - \cos(kl)}{\rho_0 c_0 H_{12}(D_i) e^{-jks} - 1}, \quad (2.19)$$

$$P_i(d) = -2je^{jkl} \frac{H_{13}(D_i) \sin(ks) \cos(kD_i)}{H_{12}(D_i) e^{-jks} - 1}, \quad (2.20)$$

$$V_i(d) = \frac{2e^{jkl} H_{13}(D_i) \sin(ks) \sin(kD_i)}{\rho_0 c_0 H_{12}(D_i) e^{-jks} - 1}. \quad (2.21)$$

La matrice de transfert de l'échantillon est définie par :

$$\begin{bmatrix} P_i(0) \\ V_i(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i(d) \\ V_i(d) \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

En regroupant dans un seul système, les expressions (2.22) pour les deux cavités 1 et 2, on obtient

$$\begin{bmatrix} P_1(0) \\ V_1(0) \\ P_2(0) \\ V_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & 0 & 0 \\ T_{21} & T_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_{11} & T_{12} \\ 0 & 0 & T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(d) \\ V_1(d) \\ P_2(d) \\ V_2(d) \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

La résolution de ce système d'équations à quatre inconnues permet d'établir les expressions générales des paramètres de la matrice de transfert sous la forme

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{P_1(d)V_2(d) - P_2(d)V_1(d)} \begin{bmatrix} P_1(0)V_2(d) - P_2(0)V_1(d) & P_2(0)V_1(d) - P_1(0)V_2(d) \\ V_1(0)V_2(d) - V_2(0)V_1(d) & P_1(d)V_2(0) - P_2(d)V_1(0) \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Les termes apparaissant dans le membre de droite sont déterminés à partir des fonctions de transfert mesurées et des Eqs. (2.18) à (2.21).

Détermination des coefficients acoustiques de l'échantillon

La matrice de transfert de l'échantillon permet de calculer les coefficients de réflexion et transmission pour diverses terminaisons : terminaison rigide, terminaison anéchoïque et cavité d'air suivie d'une terminaison rigide.

Coefficients de réflexion et d'absorption acoustique, et impédance de surface en terminaison rigide

La solution de l'équation de propagation d'onde plane (en amont de l'échantillon) s'écrit :

$$P_i(z) = e^{-jkz} + r_i e^{jkz}, \quad (2.25)$$

$$V_i(z) = \frac{e^{-jkz} - r_i e^{jkz}}{\rho_0 c_0}, \quad (2.26)$$

où P_i est la pression acoustique, V_i la vitesse acoustique particulière et r_i le coefficient de réflexion dans le cas de la cavité arrière i . La pression et la vitesse sur la face amont d'un échantillon d'épaisseur d peuvent être exprimés comme suit :

$$P_i(0) = 1 + r_i, \quad (2.27)$$

$$V_i(0) = \frac{1 - r_i}{\rho_0 c_0}, \quad (2.28)$$

$$P_i(d) = 2t_i e^{-jk(d+D_i)} \cos(kD_i), \quad (2.29)$$

$$V_i(d) = 2jt_i e^{-jk(d+D_i)} \sin(kD_i). \quad (2.30)$$

Dans le cas où l'échantillon d'étude est collé à une terminaison rigide $D_i = 0$, les Eqs. (2.29) et (2.30) deviennent :

$$P_i(d) = 2t_i e^{-jkd}, \quad (2.31)$$

$$V_i(d) = 0. \quad (2.32)$$

Le coefficient de réflexion en terminaison rigide r_{rigide} est obtenu par report des Eqs. (2.27), (2.28) et (2.32) dans le système matriciel (2.22)

$$r_{\text{rigide}} = \frac{T_{11} - \rho_0 c_0 T_{21}}{T_{11} + \rho_0 c_0 T_{21}}. \quad (2.33)$$

Le coefficient d'absorption dans le cas d'une terminaison rigide se déduit du coefficient de réflexion précédent

$$\alpha_{\text{rigide}} = 1 - |r_{\text{rigide}}|^2 = 1 - \left| \frac{T_{11} - \rho_0 c_0 T_{21}}{T_{11} + \rho_0 c_0 T_{21}} \right|^2. \quad (2.34)$$

De la même manière, l'impédance de surface Z_s (définie comme le rapport de la pression acoustique sur la vitesse acoustique) sur la face avant de l'échantillon en incidence normale s'obtient en combinant (2.27), (2.28) et (2.32) avec (2.22) :

$$Z_s = \frac{P_i(0)}{V_i(0)} = \frac{T_{11}}{T_{21}} = \rho_0 c_0 \frac{1 + r_{\text{rigide}}}{1 - r_{\text{rigide}}}. \quad (2.35)$$

Les coefficients d'absorption et de réflexion peuvent également être obtenus par la méthode de l'exploration de l'onde stationnaire. Comme dans le dispositif précédent, l'échantillon est positionné à une extrémité du tube (condition rigide en face arrière) et une onde stationnaire est établie dans le tube. Les amplitudes de pression maximale P_{max} et minimale P_{min} de l'onde stationnaire sont relevées avec un microphone dans la partie centrale du tube. Le rapport entre P_{max} et P_{min} donne le Taux d'Ondes Stationnaires (TOS). Le coefficient de réflexion en est déduit par l'équation

$$|r_{\text{rigide}}| = \frac{TOS - 1}{TOS + 1}. \quad (2.36)$$

Réflexion, transmission et dissipation en terminaison anéchoïque

Dans le cas d'une terminaison anéchoïque, les champs de pression et de vitesse s'écrivent en aval de l'échantillon :

$$P_i(z) = t_i e^{-jkz}, \quad (2.37)$$

$$V_i(z) = \frac{t_i e^{-jkz}}{\rho_0 c_0}. \quad (2.38)$$

Les coefficients de réflexion r_∞ , de transmission t_∞ et de dissipation α_∞ en terminaison anéchoïque sont obtenus par substitution des expressions (2.27), (2.28), (2.37) et (2.38) dans le système (2.22) :

$$r_\infty = \frac{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c_0} - \rho_0 c_0 T_{21} - T_{22}}{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c_0} + \rho_0 c_0 T_{21} + T_{22}}, \quad (2.39)$$

$$t_\infty = \frac{2e^{jkd}}{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c_0} + \rho_0 c_0 T_{21} + T_{22}}, \quad (2.40)$$

d'où

$$\alpha_\infty = 1 - |r_\infty|^2 - |t_\infty|^2. \quad (2.41)$$

Réflexion en présence de cavité d'air

En présence d'une cavité d'air d'épaisseur D , le système matriciel se met sous la forme

$$\begin{bmatrix} P_i(0) \\ V_i(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(k_0 D) & j\rho_0 c_0 \sin(k_0 D) \\ \frac{j \sin(k_0 D)}{\rho_0 c_0} & \cos(k_0 D) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i(d+D) \\ V_i(d+D) \end{bmatrix}, \quad (2.42)$$

où $\begin{bmatrix} \cos(k_0 D) & j\rho_0 c_0 \sin(k_0 D) \\ \frac{j \sin(k_0 D)}{\rho_0 c_0} & \cos(k_0 D) \end{bmatrix}$ représente la matrice de transfert de la cavité d'air. Les conditions aux limites sur la face arrière de la cavité s'écrivent :

$$P_i(d+D) = 2t_i e^{-jk_0(d+D)}, \quad (2.43)$$

$$V_i(d+D) = 0. \quad (2.44)$$

La résolution du système d'Eqs. (2.42) combiné avec les conditions (2.43) et (2.44) permet d'obtenir le coefficient de réflexion $r_{\text{rigide+air}}$ de l'échantillon, séparé d'une condition rigide par une cavité d'air :

$$r_{\text{rigide+air}} = \frac{\rho_0 c_0 T_{11} - (\rho_0 c_0)^2 T_{21} + j \tan(k_0 D_i) [T_{12} - \rho_0 c_0 T_{22}]}{\rho_0 c_0 T_{11} + (\rho_0 c_0)^2 T_{21} + j \tan(k_0 D_i) [T_{12} + \rho_0 c_0 T_{22}]}, \quad (2.45)$$

Lorsque l'épaisseur de la cavité d'air tend vers 0, l'Eq. (2.33) obtenue en terminaison rigide est retrouvée.

Détermination des paramètres acoustiques effectifs de l'échantillon

La détermination des paramètres dépendant uniquement du matériau de l'échantillon (effectifs) est présentée dans cette partie. Sous l'hypothèse d'un échantillon symétrique, la matrice de transfert obtenue dans la section précédente se met sous la forme :

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_{eff} d) & jZ_{eff} \sin(k_{eff} d) \\ \frac{j \sin(k_{eff} d)}{Z_{eff}} & \cos(k_{eff} d) \end{bmatrix}. \quad (2.46)$$

Il est alors possible de déterminer le nombre d'onde effectif k_{eff} et l'impédance caractéristique effective Z_{eff} (différente de l'impédance de surface Z_s), de l'échantillon à partir des équations suivantes³ :

$$k_{eff} = \frac{\arccos(T_{11})}{d}, \quad (2.47)$$

3. Il convient de noter que, lorsque T_{11} est complexe, la fonction $\arccos(T_{11})$ s'exprime à l'aide du logarithme complexe qui est défini sur $\mathbb{C} \setminus \mathbb{R}^-$. Ce choix est susceptible de produire des discontinuités à la traversée de la coupure.

$$Z_{eff} = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{21}}} = jZ_s \tan(k_{eff}d). \quad (2.48)$$

où k_{eff} et Z_{eff} sont des grandeurs complexes. Le nombre d'onde comprend une partie réelle (exprimée en rad m^{-1}) qui régit la variation spatiale de la phase du signal acoustique et une partie imaginaire (exprimée en Np m^{-1}) qui traduit l'atténuation de l'amplitude de l'onde plane durant sa propagation dans le matériau. Cette atténuation provient des différents types de pertes pouvant exister dans l'échantillon (pertes visco-élastique, thermo-visqueuses, ...).

La célérité effective du son c_{eff} dans le matériau est obtenue par la relation :

$$c_{eff} = \frac{2\pi fd}{\arccos(T_{11})}. \quad (2.49)$$

Z_{eff} et c_{eff} permettent alors d'obtenir la masse volumique effective ρ_{eff} et le module de compressibilité effectif χ_{eff} du matériau *via* les équations :

$$\rho_{eff} = \frac{Z_{eff}}{c_{eff}}, \quad (2.50)$$

$$\chi_{eff} = \frac{1}{Z_{eff}c_{eff}}. \quad (2.51)$$

2.3.4 Validation du dispositif développé

La validation du dispositif s'est effectuée en plusieurs temps :

- la caractérisation acoustique d'une terminaison fortement réfléchissante en Téflon,
- la détermination de l'influence des porte-échantillons,
- la caractérisation d'un échantillon absorbant en mousse de mélamine⁴.

Validation dans le cas d'une charge réfléchissante

Le module du coefficient de réflexion de la charge en téflon est compris entre 0,95 et 0,98 sur la bande de fréquence [100 Hz-1000 Hz] (Fig. 2.6). Le coefficient d'absorption reste très faible, toujours inférieur à 0,07 (Fig. 2.7). Ces valeurs permettent de quantifier l'influence du dispositif de mesure (incertitude expérimentale) lorsque l'échantillon présente un coefficient de réflexion proche de 1 et un coefficient d'absorption très faible.

4. Il est important de noter que toutes les mesures acoustiques présentées dans cette section ont été réalisées avec le piston en Téflon. Dans le §2.4.2, nous présenterons des résultats acoustiques et vibratoires obtenus avec une terminaison en inox.

La réalisation des mesures acoustiques d'échantillons de type substrat ou feuillage en fonction de leur épaisseur nécessite l'utilisation de porte-échantillons ayant pour fonction de faciliter l'insertion et le positionnement des échantillons dans le tube. L'épaisseur des échantillons doit être suffisamment importante pour avoir des effets acoustiques observables en basses fréquences (entre 100 Hz et 300 Hz). Les épaisseurs choisies sont respectivement de 8 et 16 cm. Pour évaluer les effets des porte-échantillons sur la mesure acoustique, des essais ont été effectués pour trois configurations avec terminaison en Téflon :

- porte-échantillon de 8 cm d'épaisseur sans tissu en tulle ⁵,
- porte-échantillon de 16 cm d'épaisseur sans tissu en tulle,
- porte-échantillon de 16 cm d'épaisseur avec tissu en tulle.

Les mesures des coefficients de réflexion et d'absorption acoustique de chacune de ces configurations (réalisées avec un sinus pas à pas) sont présentées aux Figs. 2.6 et 2.7. Les résultats obtenus sur les deux portes-échantillons sans tulle montrent globalement une légère baisse du module du coefficient de réflexion (de [0,96 ; 0,988] à [0,93 ; 0,988]) et une augmentation du coefficient d'absorption (de [0,01 ; 0,07] à [0 ; 0,14]). Pour le porte-échantillon de 16 cm comportant des morceaux de tulle à chacune de ses extrémités, le module du coefficient de réflexion varie entre 0,90 et 0,98 ; le coefficient d'absorption entre 0,04 et 0,14. Ces courbes montrent au final que le porte-échantillon (avec ou sans tulle) n'aura qu'un faible impact sur les mesures dans le cas d'échantillons de feuillage ou de substrat suffisamment absorbants ($\alpha > 0,2$).

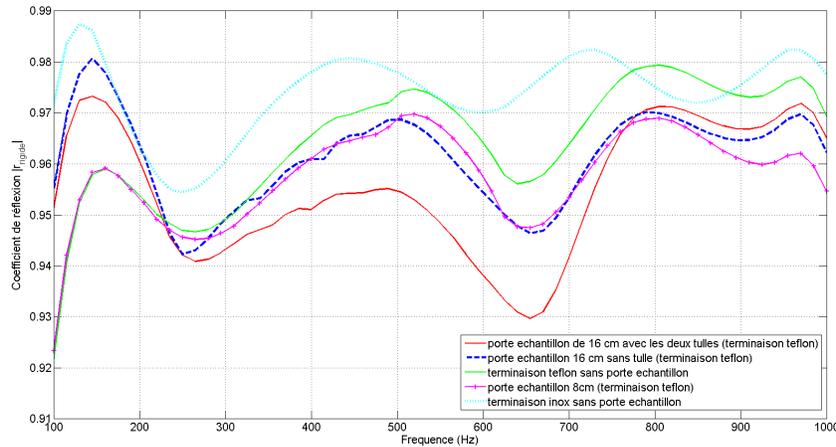


FIGURE 2.6 – Variation du module du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence mesurée avec terminaison en téflon ou en inox, avec et sans porte-échantillon

5. Le tissu de tulle permet de maintenir la planéité et la verticalité des surfaces des échantillons de feuillage et de substrat.

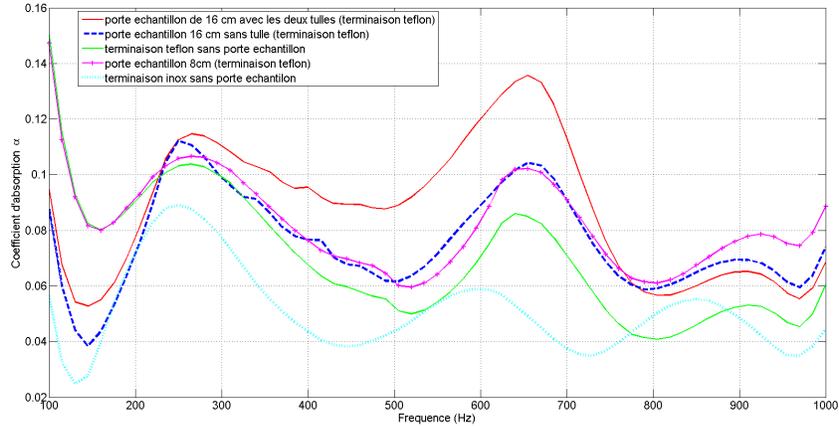


FIGURE 2.7 – Variation du coefficient d’absorption acoustique mesuré en terminaison téflon et inox avec et sans porte échantillon

Validation dans le cas d’un échantillon absorbant

Mise en place de la méthode de l’exploration de l’onde stationnaire

Les propriétés acoustiques de la mousse de mélamine ont été caractérisées par plusieurs méthodes. La première ayant été mise en œuvre et servant de référence est celle de l’exploration de l’onde stationnaire en tube d’impédance (Fig. 2.8) [36] (cf. § 1.3.3). Les résultats de mesure sont représentés aux Figs. 2.9 et 2.11 pour le coefficient d’absorption acoustique et le module du coefficient de réflexion acoustique en terminaison rigide Téflon (dans ce cas). La comparaison de cette mesure avec les données du fournisseur mesurées en salle réverbérante (cf. § 1.3.3) montre une évolution similaire de ce coefficient avec la fréquence et présente un décalage quasi-constant (Fig. 2.9). La caractérisation en salle réverbérante est utilisée pour des échantillons de grande surface et en incidence aléatoire, contrairement aux mesures en tube qui sont adaptées à des échantillons de taille réduite et sont réalisées en incidence normale. Par ailleurs, les mesures en salle réverbérante prennent en compte des effets de bord qui peuvent conduire à une absorption plus élevée (supérieure à 1 pour certaines fréquences comme le montre la Fig. 2.9). Pour ces raisons, la comparaison avec les données du fournisseur peut être considérée comme satisfaisante. Les perturbations en basses fréquences (en dessous de 200 Hz) sont liées aux conditions aux limites latérales (effets de bord de l’échantillon⁶).

6. Des mesures conduites sur ces échantillons ayant été progressivement rabotés sur leur pourtour montrent que cette modification influence fortement l’existence et la position de ces perturbations.

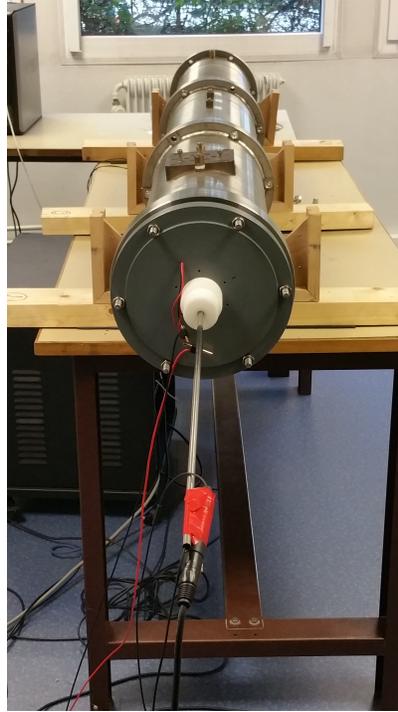


FIGURE 2.8 – Dispositif de caractérisation du coefficient d'absorption acoustique par la méthode de l'exploration de l'onde stationnaire [36]

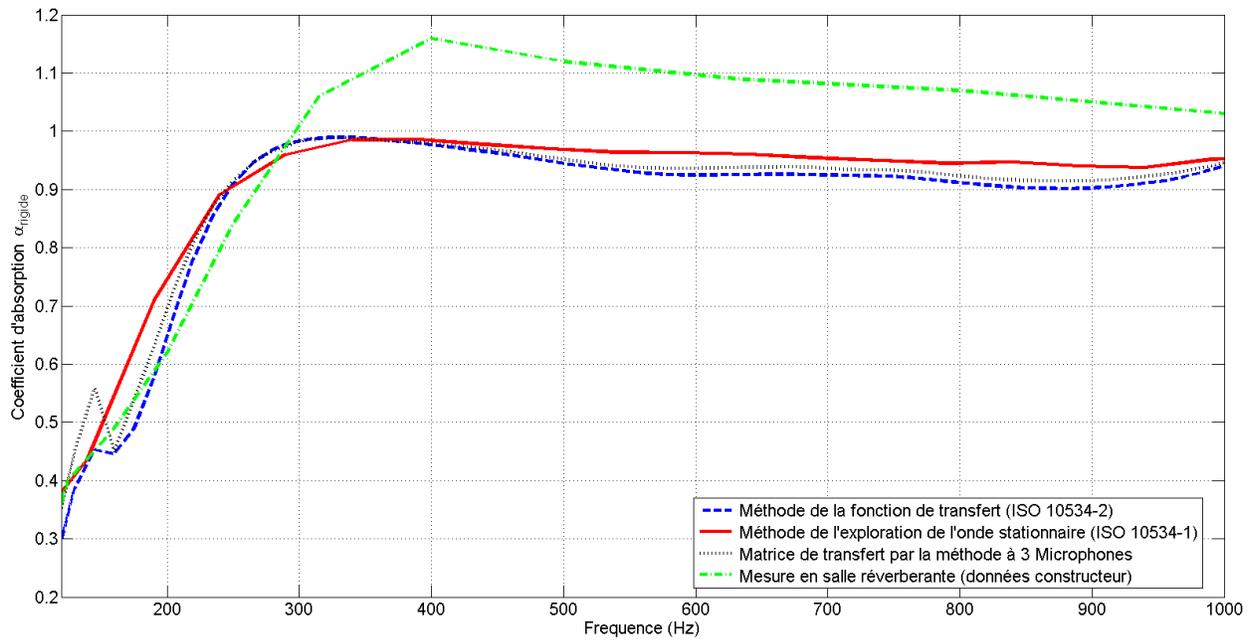


FIGURE 2.9 – Comparaison des méthodes de mesure du coefficient d'absorption d'une mousse de mélamine de 12 cm d'épaisseur

Mise en place de la méthode de la fonction de transfert

La méthode des deux microphones issue de la norme ISO 10534-2 [37] a également été mise en place. En plus de sa rapidité, cette méthode permet d’obtenir plus facilement la phase du coefficient de réflexion dans le tube, contrairement à la méthode précédente. Le coefficient de réflexion complexe se déduit de la fonction de transfert entre les microphones par la relation :

$$r_{\text{rigide}} = e^{2jkl} \frac{H_{12}(D_i)e^{jks} - 1}{1 - H_{12}(D_i)e^{-jks}}. \quad (2.52)$$

Le coefficient d’absorption est déduit de l’Eq. (2.34).

Cette méthode a été validée en vérifiant tout d’abord que les résultats de caractérisation acoustique (coefficient d’absorption et module du coefficient de réflexion) obtenus sur un échantillon de mousse de mélamine d’épaisseur 12 cm correspondaient aux résultats obtenus par la méthode de l’exploration de l’onde stationnaire [36] (Fig. 2.9). Par la suite, les résultats de mesure du coefficient d’absorption acoustique sur un échantillon de mélamine de 5 cm d’épaisseur ont été comparés aux mesures effectuées sur le même échantillon au laboratoire Roberval de l’Université de Technologie de Compiègne avec un tube de Kundt de marque Mecanum (d’environ 10 cm de diamètre, donc moins limité en hautes fréquences). Cette comparaison montre une très bonne correspondance entre ces mesures sur la bande de fréquence [100 Hz-1000 Hz] (Fig. 2.10).

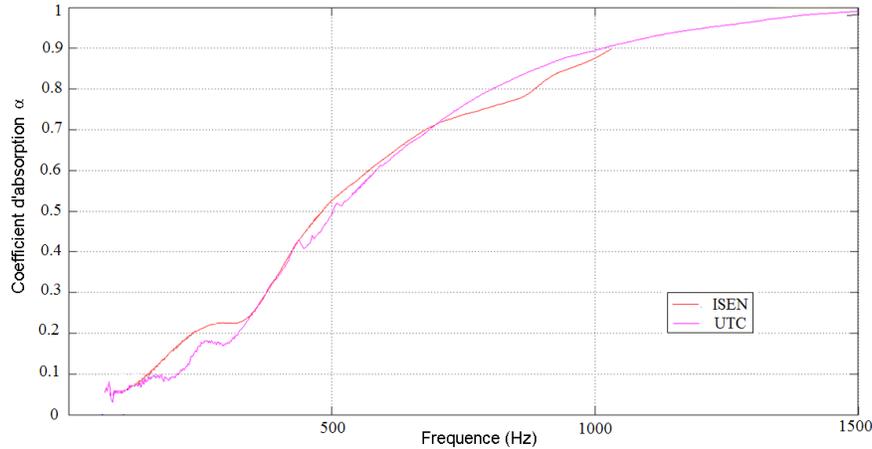


FIGURE 2.10 – Comparaison des coefficients d’absorption acoustique mesurés avec le tube de Kundt standard de l’UTC et le banc de mesure développé à l’ISEN pour une mousse de mélamine de 5 cm d’épaisseur (terminaison en inox dans les deux cas)

Mise en place de la méthode à trois microphones et deux cavités

La méthode à trois microphones et deux cavités permet d’obtenir la matrice de transfert de l’échantillon et d’en déduire les coefficients de réflexion et d’absorption (cf. § 1.3.3). Cette méthode, valable pour des échantillons symétriques et non symétriques (voir § 2.3.3), a été testée dans le cas d’un échantillon de mousse de mélamine d’épaisseur 12 cm. Les coefficients de réflexion et d’absorption sont obtenus à partir des Eqs. (2.33) et (2.34) et des termes de la matrice de transfert de la mélamine (Figs. 2.12 et 2.13). La mesure des coefficients d’absorption et de réflexion a tout d’abord été effectuée par la méthode des deux microphones, puis de la méthode à trois microphones et deux cavités. L’échantillon n’est pas déplacé entre ces mesures. Le piston rigide est situé contre la

mélamine dans la première configuration, puis déplacé afin de créer deux cavités différentes dans la seconde configuration. Les Figs. 2.9 et 2.11 montrent qu'un très bon accord est obtenu entre ces deux types de mesures sur le même échantillon. La très légère erreur de mesure résulte de l'incertitude sur la localisation exacte du piston rigide.

Les Figs. 2.12 et 2.13 présentent la variation des termes de la matrice de transfert de l'échantillon calculés à partir des mesures acoustiques. Elles montrent que :

- les paramètres T_{11} et T_{22} sont quasiment identiques, ce qui indique que cet échantillon peut être considéré comme symétrique ;
- les courbes ne sont pas de type sinus ou cosinus et présentent des parties imaginaires non nulles. Ceci indique que la mousse atténue l'onde sonore. Quand la partie imaginaire est faible, la variation de ces paramètres avec la fréquence tend vers des sinus ou cosinus classiques. Quand elle est élevée, cette variation est de type sinus ou cosinus hyperboliques.

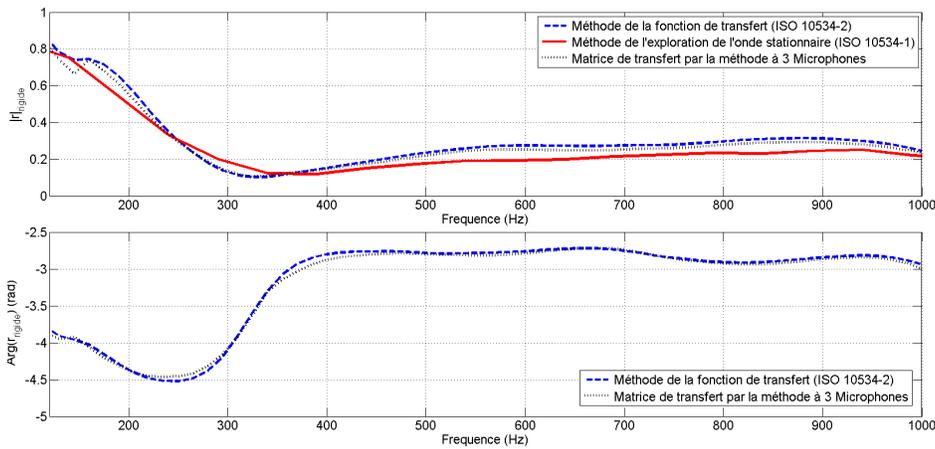


FIGURE 2.11 – Comparaison des méthodes de mesure du coefficient de réflexion d'une mousse de mélamine de 12 cm d'épaisseur

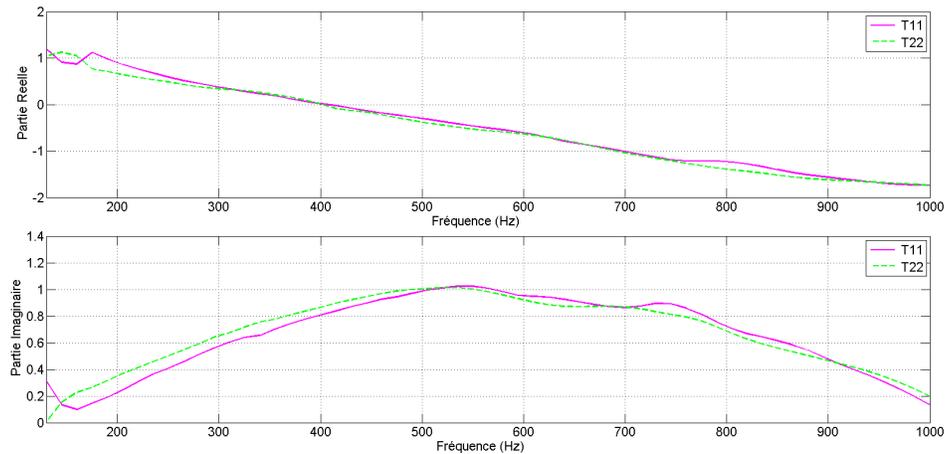


FIGURE 2.12 – Variation des parties réelle et imaginaire de T_{11} et T_{22} avec la fréquence pour un échantillon de mousse de mélamine d'épaisseur 12 cm

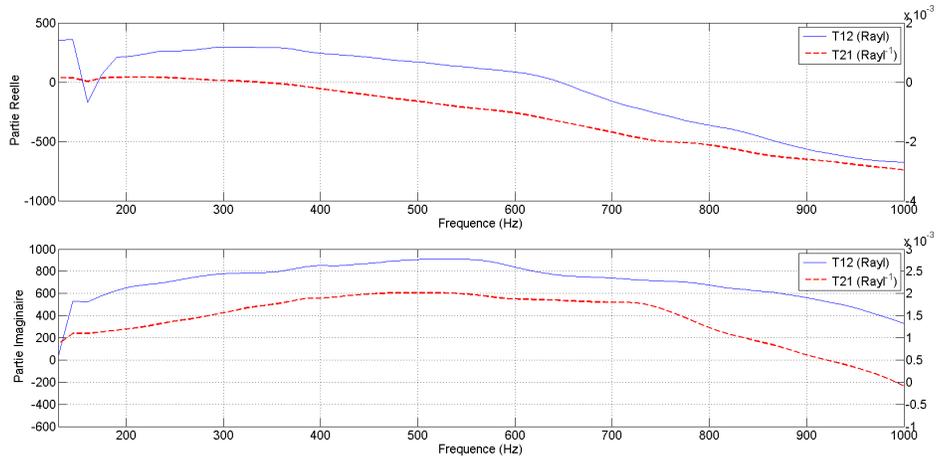


FIGURE 2.13 – Variation des parties réelle et imaginaire de T_{12} et T_{21} avec la fréquence pour un échantillon de mousse de mélamine d'épaisseur 12 cm

La connaissance de la matrice de transfert de la mélamine permet ensuite d'obtenir ses paramètres effectifs (cf § 2.3.3) : nombre d'onde (Fig. 2.14), impédance effective (Fig. 2.15) et célérité effective (Fig. 2.16).

La partie réelle de la célérité effective augmente avec la fréquence de 150 m s^{-1} à 220 Hz jusqu'à 217 m s^{-1} à 1000 Hz. Il est intéressant de noter que la résonance apparaissant à la fréquence 310 Hz (Fig. 2.11) correspond au mode d'épaisseur en $\frac{\lambda}{4}$, la célérité associée à cette fréquence correspondant à 148 m s^{-1} . La partie imaginaire du nombre d'onde, qui traduit l'atténuation dans la mélamine, croît également avec la fréquence. L'impédance effective de la mélamine présente une partie réelle qui décroît de 760 Rayl (à 200 Hz) à 490 Rayl (à 1 kHz) ; sa partie imaginaire reste comprise entre -100 et -200 Rayl sur la gamme [200 Hz-1000 Hz].

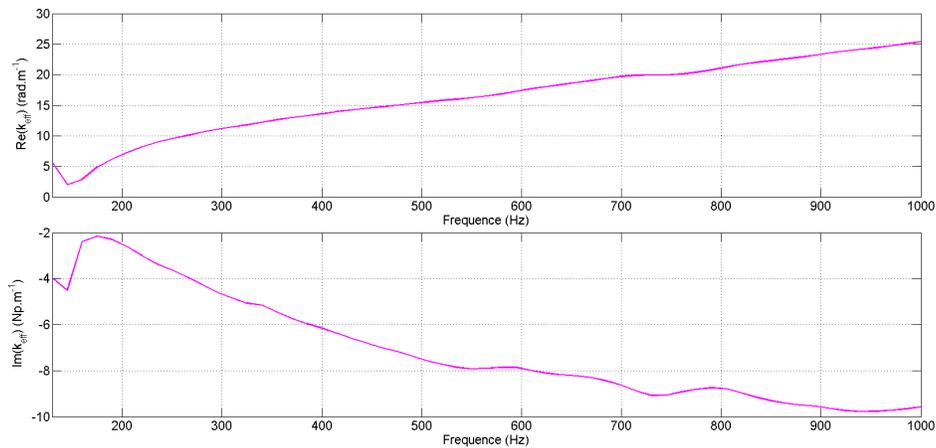


FIGURE 2.14 – Variation avec la fréquence des parties réelle et imaginaire du nombre d'onde effectif mesurées pour mousse de mélamine de 12 cm d'épaisseur

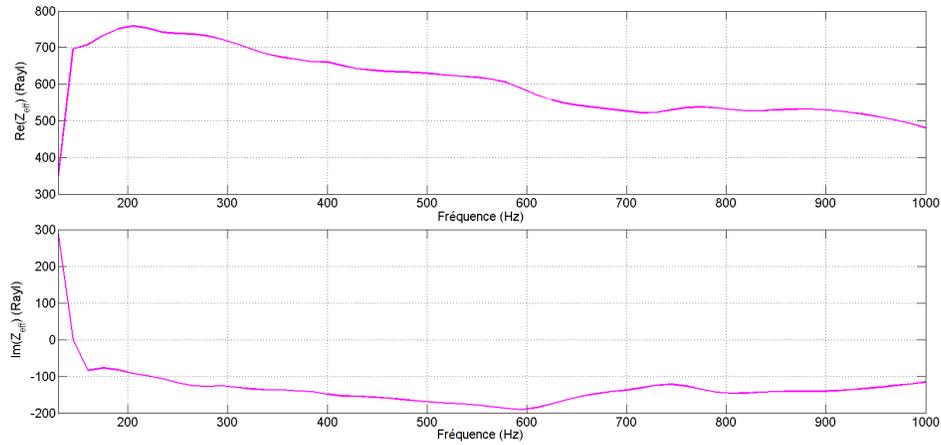


FIGURE 2.15 – Variation avec la fréquence des parties réelle et imaginaire de l'impédance effective mesurée sur la mousse de mélamine de 12 cm d'épaisseur

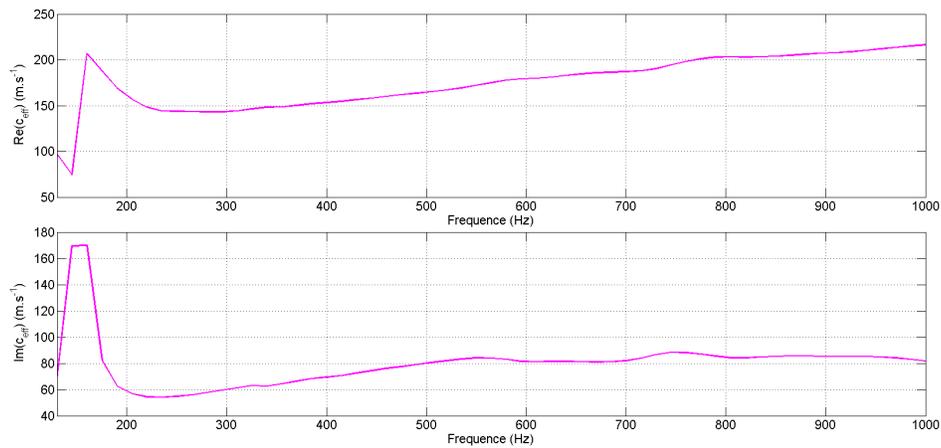


FIGURE 2.16 – Variation avec la fréquence des parties réelle et imaginaire de la célérité effective mesurée sur la mousse de mélamine de 12 cm d'épaisseur

2.4 Dispositif de caractérisation vibratoire des échantillons

La mesure du champ vibratoire d'un échantillon est réalisée avec un vibromètre laser à balayage 1D PSV-400 de la société POLYTEC. Ce dispositif contient une carte d'acquisition permettant de choisir le signal d'excitation et d'enregistrer les réponses de capteurs externes à ces signaux (accéléromètres, thermomètres, microphones...). Ces mesures sont réalisées après plusieurs étapes de mise en œuvre : positionnement du vibromètre ; paramétrage du maillage ; définition du signal à envoyer.

2.4.1 Principe de fonctionnement et mise en oeuvre du vibromètre laser à balayage

Cette section résume les étapes à réaliser (présentées dans le manuel technique du vibromètre laser [119]) pour mesurer le champ vibratoire d'une surface.

- Le champ de vision de la caméra du vibromètre laser doit recouvrir l'intégralité de la surface test. Cela nécessite d'effectuer les réglages du positionnement de la sonde laser de manière à être le plus en face possible de l'objet à mesurer. Ainsi, la sonde laser peut balayer l'intégralité de la surface exposée à la caméra, en fonction du maillage qui a été défini.

Il est également important de positionner le vibromètre laser à balayage pour avoir un retour de signal optique suffisant qui garantit une mesure correcte. Suivant la température extérieure, la source lumineuse peut fonctionner suivant un seul mode (la température est constante et le signal reste toujours maximal) ou suivant deux modes (la sonde laser devient sensible aux petites fluctuations de température). Dans le deuxième cas, des effets d'interférence entraînent l'apparition de zones présentant des maxima et minima de retour de signal. La notice technique d'utilisation du vibromètre laser à balayage précise la distance optimale entre la sortie laser et l'objet étudié [120] :

$$D_{optimale} = 99\text{mm} + (n \times l), \quad (2.53)$$

où $n = 0, 1, 2, \dots$ et $l = 204\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ dans le cas du vibromètre PSV-400. Le dernier réglage optique à réaliser concerne la focalisation du laser à la surface de l'objet.

- La seconde étape, l'alignement 2D, consiste à définir quatre ou cinq points dans le plan de l'objet étudié pour délimiter la surface à caractériser⁷. Lorsque l'alignement est effectué, cette surface peut être maillée. Plusieurs possibilités s'offrent à l'utilisateur : un maillage adapté à une géométrie simple (carré, cercle, ellipse, ...) ou un maillage par points défini par l'utilisateur. Le vibromètre laser à balayage effectue alors une mesure vibratoire en chaque point du maillage. De manière optionnelle, il est possible de déterminer la distance entre les différents points du maillage et le vibromètre laser à l'aide du télémètre intégré dans l'appareil. Finalement, plusieurs focalisations sont effectuées en différents endroits de l'objet étudié pour optimiser le retour optique en tout point du maillage.
- Les paramètres relatifs à la génération du signal d'excitation sont définis dans la dernière étape. Le logiciel offre le choix entre la mesure d'une déformée de structure à une fréquence particulière (mode « fastscan ») et la cartographie du champ vibratoire en fonction de la fréquence.

7. Un alignement 3 D peut être utilisé pour des géométries de forme plus complexe. Cet alignement fonctionne de la même manière que l'alignement 2D mais est applicable pour la définition d'un volume donné. Il permet de visualiser la structure en 3D mais également de connaître la distance entre le laser et les différents points du maillage de l'objet.

2.4.2 Couplage du vibromètre laser à balayage au tube d'impédance

Réglage de l'amplitude du signal d'excitation

Ce paragraphe détaille les réglages de la chaîne de mesure (décrite au § 2.2) constituée du générateur du vibromètre laser à balayage, de l'amplificateur Bruel et Kjaer 2706 qui alimente les haut-parleurs, de la carte RME Fireface 802 et des microphones MKE-2P. Pour effectuer cette calibration, un échantillon test en polystyrène de 1,5 cm d'épaisseur a été utilisé. Cet échantillon est percé en son centre de manière à introduire un microphone MKE 2P et un sonomètre à l'intérieur du tube. Pour un signal sinusoïdal de fréquence 1000 Hz (seule fréquence où aucune pondération n'est appliquée pour le sonomètre configuré en dB(A)), le niveau sonore relevé sur le sonomètre est de 89 dB SPL et la valeur de la pression relevée sur le microphone de 61 mPa. L'amplitude du signal délivré est de 1 V.

Position du vibromètre par rapport à l'échantillon situé dans le tube

La caméra disponible sur le vibromètre laser ne peut pas être utilisée pour le positionnement car la fenêtre optique du tube n'est pas suffisamment large pour laisser passer simultanément le faisceau du vibromètre laser et le champ de la caméra. Par conséquent, un réglage spécifique en trois étapes a été réalisé :

- Dans un premier temps, le centre de l'échantillon est repéré en utilisant un porte-échantillon contenant une feuille circulaire ajustée au diamètre du tube sur laquelle le centre de la feuille et un maillage circulaire sont représentés. Le maillage est défini à l'aide du logiciel du vibromètre en déplaçant progressivement le point central du laser jusqu'à ce qu'il coïncide avec le centre de la feuille.
- Dans un deuxième temps, la distance où le retour optique est maximal est recherchée en coulissant le porte-échantillon le long du tube. Lorsque cette distance est trouvée, une auto-focalisation du laser sur le porte échantillon est effectuée pour optimiser la résolution du spot laser.
- Finalement, le porte-échantillon contenant la feuille de papier est enlevé du tube puis remplacé par l'échantillon test à l'endroit où la focalisation a été réalisée.

2.4.3 Caractérisations vibratoire et acoustique d'échantillons de mousse de mélamine

Afin de mieux comprendre le lien entre les caractéristiques acoustiques de l'échantillon et sa réponse vibratoire, le dispositif expérimental représenté à la Fig. 2.17 a été mis en place. Deux mousses de mélamine d'épaisseurs respectives 9 et 12 cm ont été étudiées. Dans cette configuration, le microphone **C** est positionné sur la face avant de l'échantillon, alors que les microphones **A** et **B** sont situés en amont de l'échantillon pour mesurer les coefficients d'absorption et de réflexion par la méthode exposée au § 1.3.3. Une terminaison en inox⁸ vissée à l'extrémité du tube est utilisée lors de cette expérimentation.

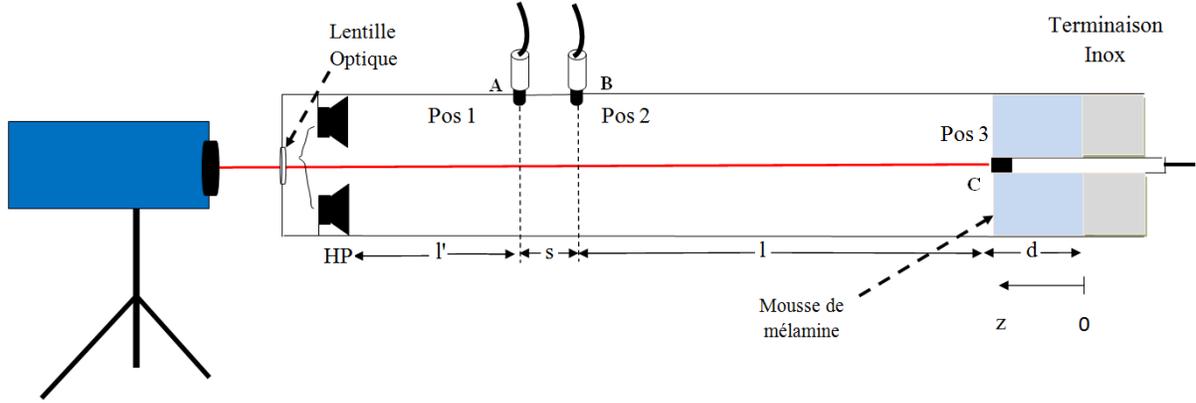


FIGURE 2.17 – Dispositif de caractérisations acoustique et vibratoire des échantillons de mousse de mélamine

L'expérience est réalisée en deux temps :

- La mesure simultanée de la pression et de la vitesse vibratoire sur la face avant de l'échantillon à l'aide du microphone **C**⁹ et du vibromètre laser à balayage respectivement. Les Figs. 2.19 (a) et 2.20 (a) présentent la variation du module de la vitesse vibratoire avec la fréquence en différents points de la face avant de l'échantillon (définis à la Fig. 2.18) pour des épaisseurs de 9 et 12 cm respectivement.
- La mesure des coefficients acoustiques (réflexion, absorption et impédance de surface) par la méthode de la norme ISO 10534-2 [37] (§ 1.3.3) à l'aide des microphones **A** et **B**, (Figs. 2.22 à 2.24).

Les Figs. 2.19 (a) et 2.20 (a) mettent en évidence un ensemble de résonances dont les fréquences sont séparées de 76 Hz environ : 161,3 ; 239,4 ; 312,5 ; 390 et 465,6 Hz pour l'épaisseur de 12 cm et 158 ; 236,9 et 311,3 Hz pour l'épaisseur de 9 cm. Une résonance, chaque fois que la variation de phase le long du tube (1 aller-retour), atteint un multiple de 2π , $\varphi = 2n\pi$. Le bouclage de phase permet d'écrire :

$$2(k_0 d_{cav} + k_{eff} d) = 2 \left(\frac{\omega d_{cav}}{c_0} + \frac{\omega d}{c_{eff}} \right) = 2n\pi \quad (2.54)$$

8. La mesure du coefficient de réflexion de cette terminaison est présentée en Fig. 2.6 et 2.7.

9. Pour quantifier la pression mesurée par le microphone **C**, la pression mesurée par ce microphone à 1000 Hz (61 mPa) est normalisée par rapport à la pression relevée par le sonomètre (89 dB soit $p_{ref} = 0,564$ Pa).

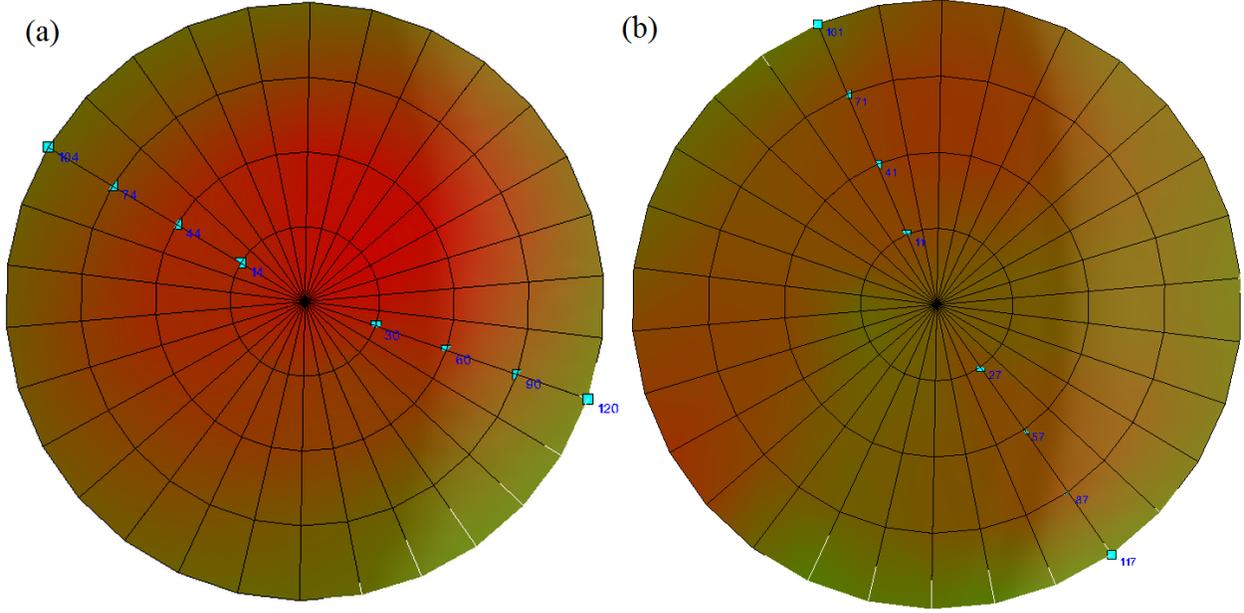


FIGURE 2.18 – Localisation des points de mesure de la vitesse vibratoire (a) sur la mousse de mélamine de 9 cm (b) sur la mousse de mélamine de 12 cm

où $d_{cav} = l' + s + l$ est la longueur de la cavité totale avant. La simplification de l'Eq. (2.54), permet d'aboutir à l'expression du décalage des résonances donné par :

$$\Delta f = \frac{1}{2} \left(\frac{c_0 c_{eff}}{d_{cav} c_{eff} + d c_0} \right) = 81 Hz \quad (2.55)$$

quand l'épaisseur de la cavité d'air entre l'échantillon et les haut-parleurs $d_{cav} = 1,78$ m, l'épaisseur de l'échantillon $d = 0,12$ m, $c_0 = 330$ m s⁻¹ et $c_{eff} = 150$ m s⁻¹. Ces résonances peuvent donc être associées aux modes présentant un nombre entier de demi longueurs d'onde pour l'ensemble cavité d'air et échantillon. A plus hautes fréquences, pour l'échantillon d'épaisseur 9 cm, les résonances de l'échantillon apparaissent et se couplent avec les résonances de cavité, ce qui complique l'interprétation (modes à 405,6; 511,3; 609,1; 670,6 et 938,4 Hz). Pour isoler les résonances de l'échantillon seul, il est donc nécessaire d'éliminer les modes de la cavité d'air par normalisation. Pour cela, la vitesse acoustique à la surface (mesurée par le microphone **C**) et l'impédance de surface (mesurée par les microphones **A** et **B**). La vitesse vibratoire en chaque point de la surface est ensuite normalisée à la vitesse acoustique à la surface. Les résultats de cette normalisation sont donnés aux Figs. 2.19 (b) et 2.20 (b) pour les différents points du maillage. Finalement, la vitesse vibratoire moyenne de la surface est calculée et normalisée à la vitesse acoustique à la surface. Cette vitesse vibratoire moyenne normalisée est présentée à la (Fig. 2.21)

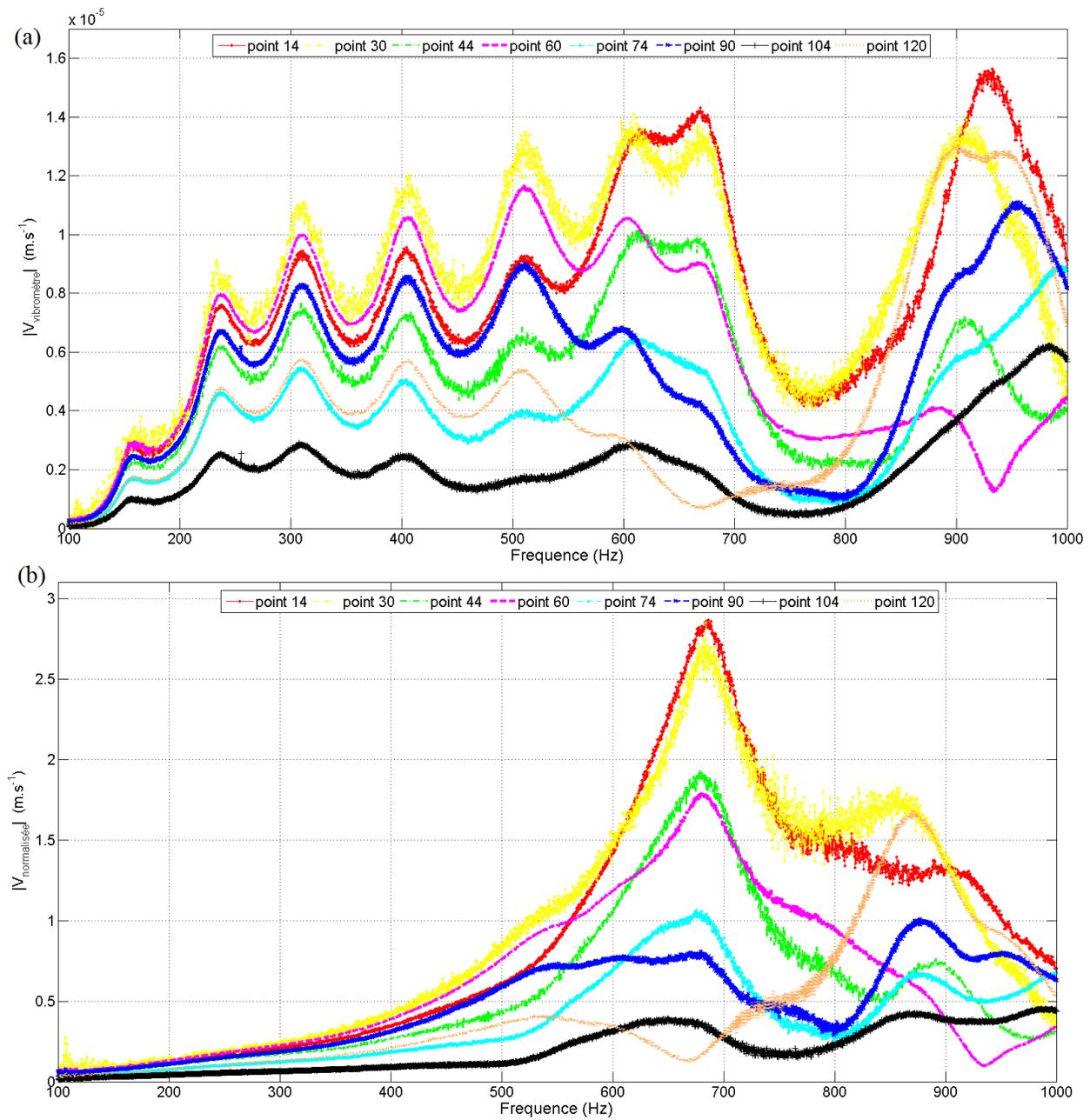


FIGURE 2.19 – Variation du module de la vitesse vibratoire d'un échantillon de mélamine d'épaisseur 9 cm avant (a) et après (b) normalisation

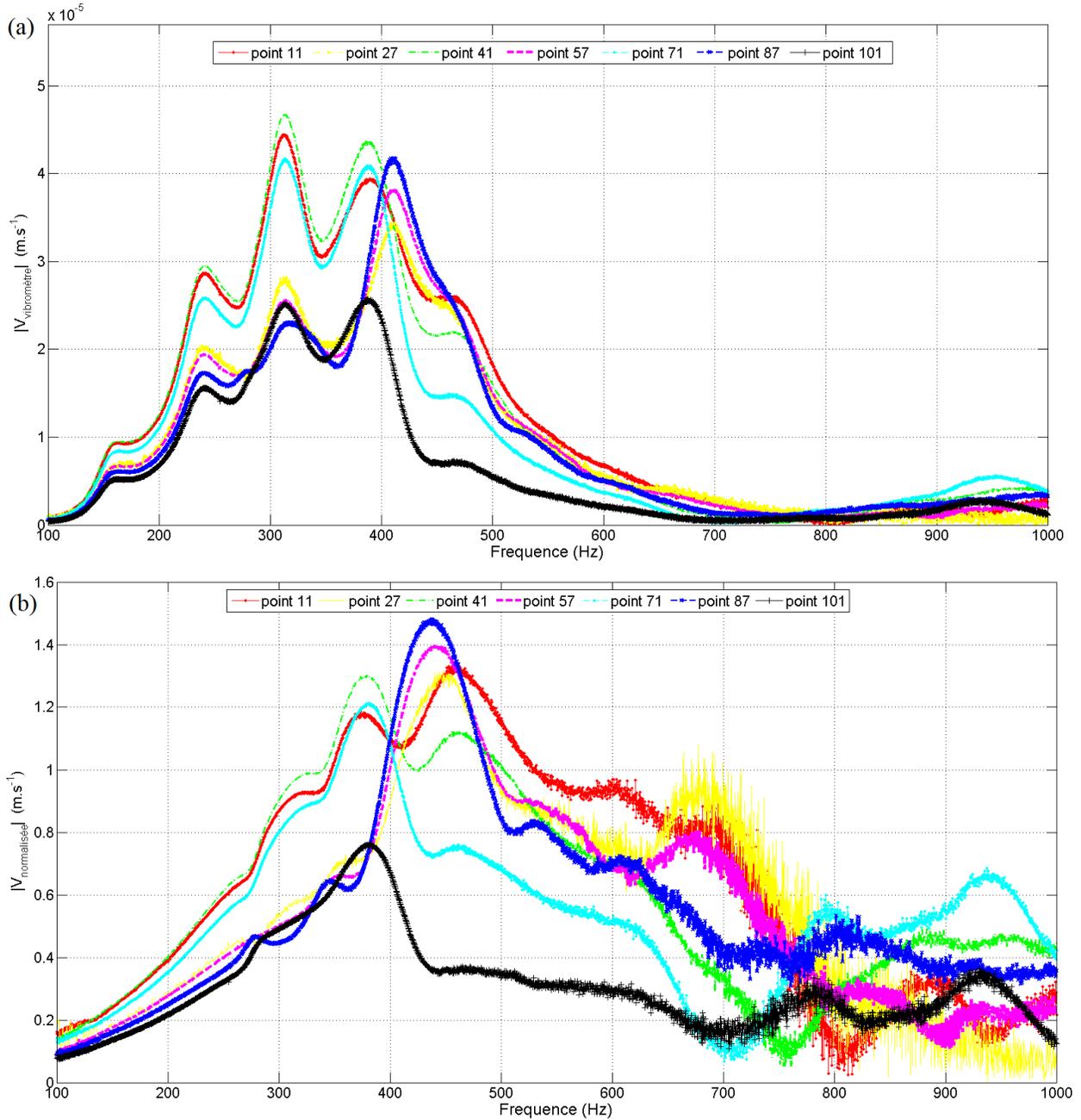


FIGURE 2.20 – Variation du module de la vitesse vibratoire d'un échantillon de mélamine d'épaisseur 12 cm avant (a) et après (b) normalisation

Globalement, la normalisation de la vitesse vibratoire mesurée par le vibromètre laser atténue les résonances de la cavité d'air et permet ainsi l'identification des fréquences de résonance de l'échantillon. Ces fréquences sont plus clairement isolées sur le spectre de la vitesse vibratoire moyenne normalisée (Fig. 2.21) que sur celles des vitesses vibratoires normalisées en chaque point (Figs. 2.19(b) et 2.20(b)). Les principales fréquences de résonances identifiées sont : 685 et 875 Hz pour l'échantillon d'épaisseur 9 cm et 440 Hz pour l'échantillon d'épaisseur 12 cm.

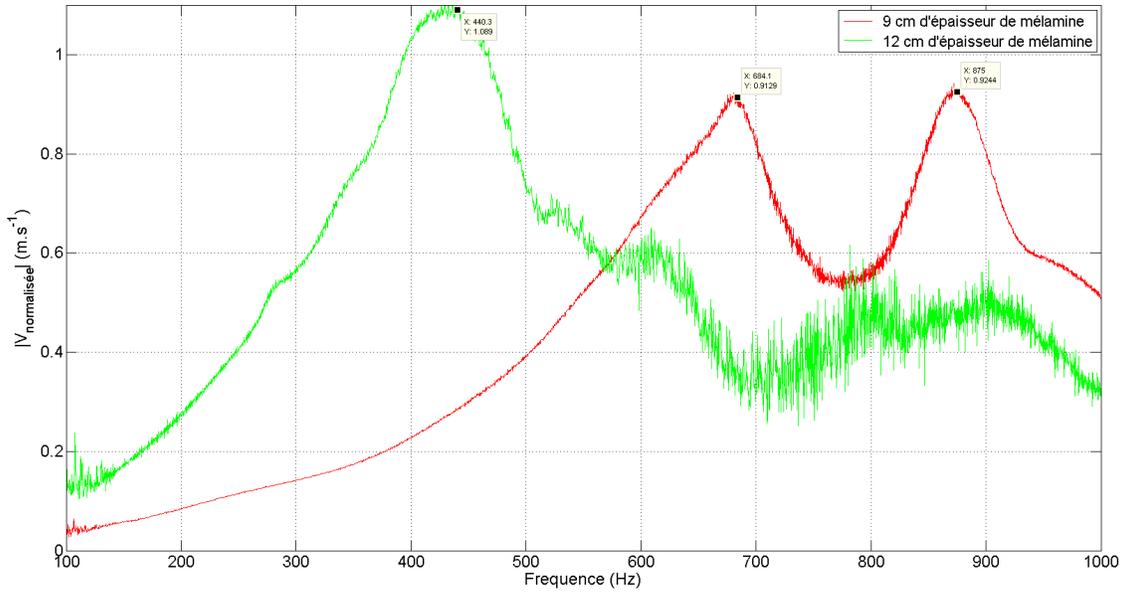


FIGURE 2.21 – Variation du module de la vitesse vibratoire (moyenne normalisée avec la fréquence d'échantillons de mélamine d'épaisseur 9 et 12 cm

La confrontation de ces résultats aux mesures des coefficients acoustiques (Figs. 2.22 à 2.24), montre que les résonances de l'échantillon apparaissent en des points spécifiques : minima des modules du coefficient de réflexion et de l'impédance de surface; variation rapide des phases du coefficient de réflexion et de l'impédance de surface ainsi que du coefficient d'absorption.

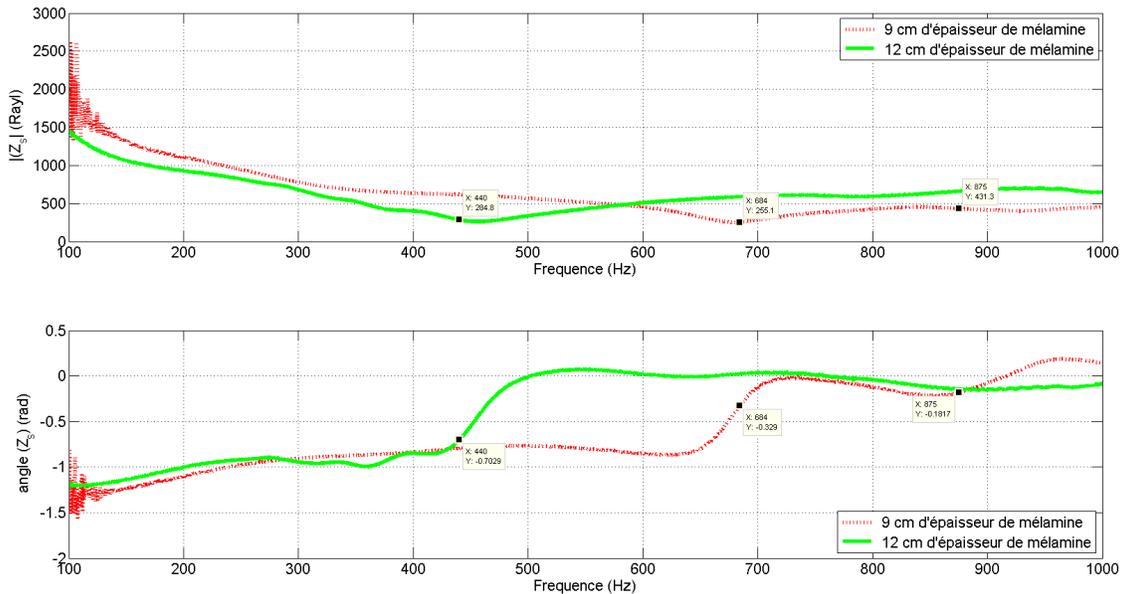


FIGURE 2.22 – Variation des module et phase de l'impédance de surface avec la fréquence d'échantillons de mélamine d'épaisseur 9 et 12 cm

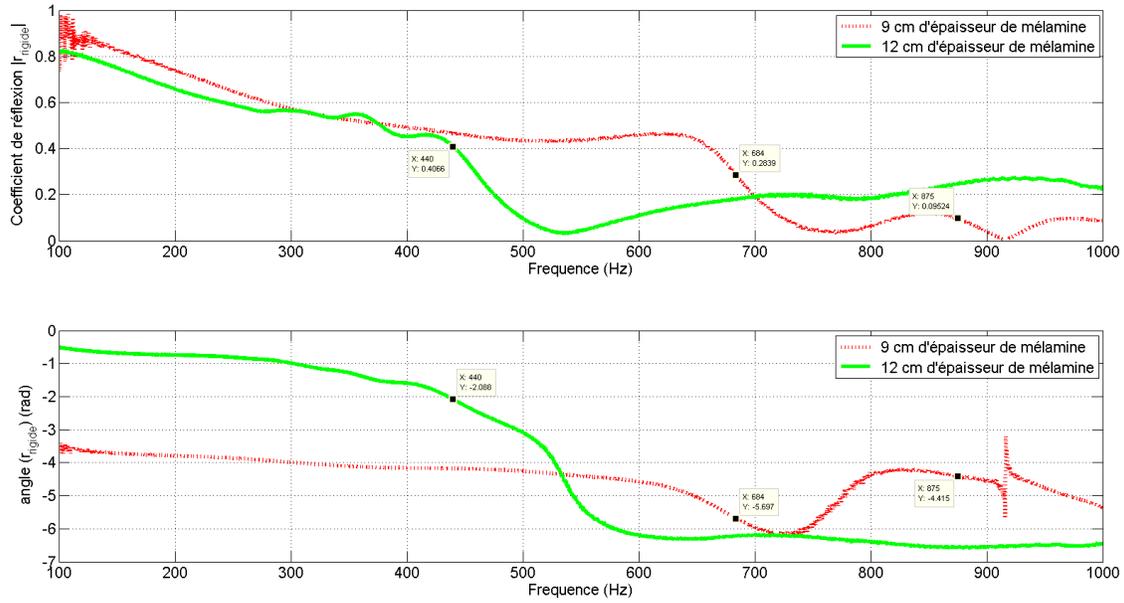


FIGURE 2.23 – Variation des module et phase du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence d'échantillons de mélamine d'épaisseur 9 et 12 cm

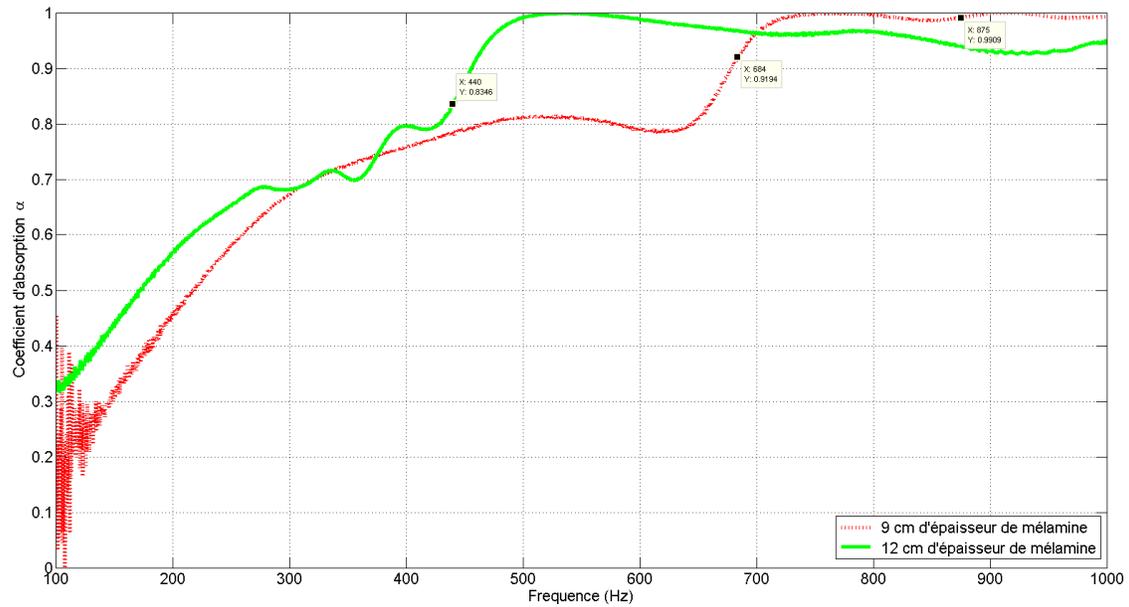


FIGURE 2.24 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence d'échantillons de mélamine d'épaisseur 9 et 12 cm

Les déformées à la surface de l'échantillon aux fréquences de résonance sont présentées aux Figs. 2.25 et 2.26. Dans le cas de la mousse de mélamine de 9 cm d'épaisseur, la résonance à 684 Hz présente une symétrie de révolution et correspond principalement à un mode radial (0,1). Les points 104 et 120 situés à la périphérie de l'échantillon ne se déplacent quasiment pas. A 875 Hz, le mouvement de l'ensemble de la surface de l'échantillon combine des déplacements caractéristiques du mode plan (0,0) et du mode radial (0,1), les bords de l'échantillon se déplaçant tout autant que les autres points (Fig. 2.25). Pour la mousse de 12 cm d'épaisseur, une résonance est mise en évidence à la fréquence 440 Hz. La déformée associée, représentée à la Fig. 2.26, combine les déplacements du mode plan (0,0) et le mode circonférentiel (1,0).

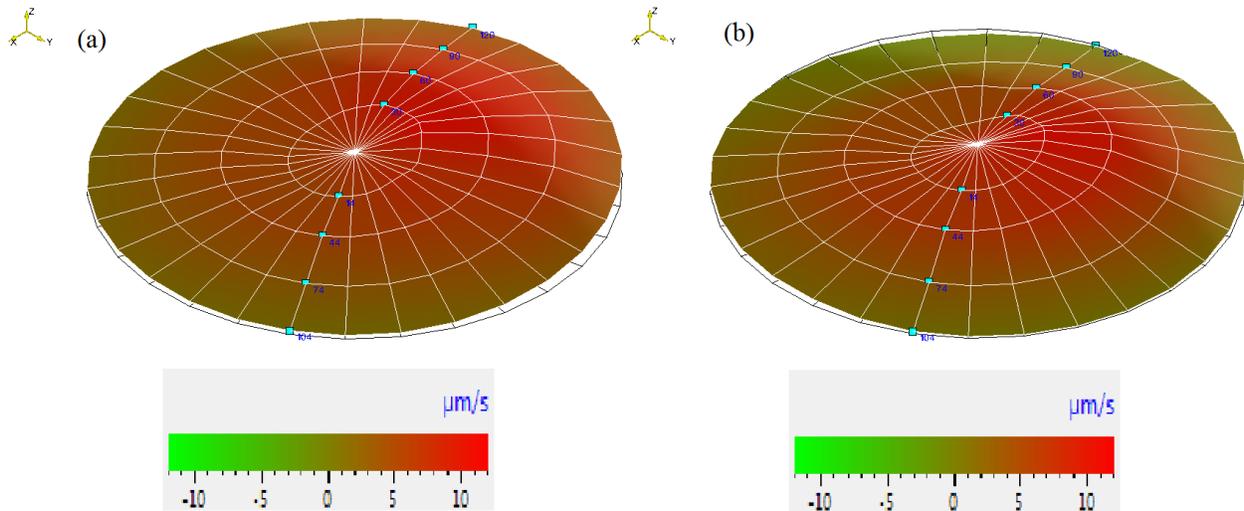


FIGURE 2.25 – Champ de vitesse vibratoire de la surface de l'échantillon de mousse de mélamine d'épaisseur 9 cm : (a) 684,7 Hz ; (b) 875 Hz

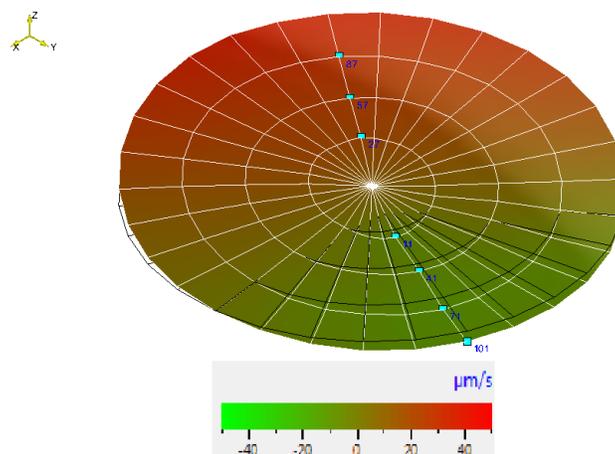


FIGURE 2.26 – Champ de vitesse vibratoire de la surface de l'échantillon de mousse de mélamine d'épaisseur 12 cm à 440 Hz

2.5 Conclusion du chapitre

Le dispositif expérimental mis en œuvre couplant les caractérisations acoustique (absorption, réflexion) et vibratoire et permettant la détermination des propriétés effectives (nombre d'onde, célérité et impédance effective) a été validé sur différents types d'échantillons de mousse de mélamine. Dans le cas de la méthode à trois microphones et deux cavités, un très bon accord a pu être établi en comparaison avec les méthodes ISO de référence. Les résultats de validation pour une mousse de mélamine d'épaisseur donnée ont cependant montré de légères différences au niveau des coefficients de réflexion et d'absorption acoustique en terminaison rigide. Quatre raisons essentielles peuvent expliquer ces différences :

- la géométrie de l'échantillon : deux échantillons de mélamine de même épaisseur de géométries très proches peuvent présenter des conditions aux limites latérales suffisamment différentes pour présenter des coefficients acoustiques nettement différents à certaines fréquences. Cette difficulté peut être résolue en utilisant un mode de découpe de l'échantillon plus précis de type jet d'eau.
- la position de l'échantillon : lorsque l'échantillon est caractérisé une première fois puis ressorti avant d'être ré-introduit une nouvelle fois, les résultats de mesure peuvent varier.
- le choix de la terminaison arrière : la terminaison peut être plus ou moins rigide suivant le matériau utilisé (inox ou téflon). Cette flexibilité induit un décalage de la fréquence de résonance de l'échantillon observé sur les mesures.
- la qualité de l'interface entre l'échantillon et la terminaison rigide : la comparaison des coefficients d'absorption mesurés par la méthode à trois microphones et deux cavités et celle de la norme ISO 10534-2 montre, que même si l'échantillon n'est pas déplacé, le mouvement du piston rigide par rapport à l'échantillon présente des incertitudes de position pouvant entraîner une erreur de mesure sur les coefficients acoustiques.

Pour rendre la mesure vibratoire exploitable, il est nécessaire d'éliminer les résonances parasites de la colonne d'air. Ce résultat est obtenu en normalisant la vitesse vibratoire locale ou moyenne de la surface de l'échantillon (mesurée avec le vibromètre laser) à la vitesse vibratoire dans l'air sur l'interface déduite des mesures acoustiques. Les résonances de l'échantillon sont alors isolées et identifiées. Leurs fréquences de résonance coïncident avec les minima des spectres du coefficient de réflexion (module) et de l'impédance de surface (module) et avec les variations rapides du coefficient d'absorption et des phases du coefficient de réflexion de l'impédance de surface. Les déformées de ces résonances correspondent à des modes simples (mode radial) ou complexes (mode plan associant un mode radial ou circonférentiel) de l'échantillon. Ce banc expérimental est utilisé dans les chapitres suivants pour caractériser les paramètres effectifs de milieux plus complexes de type feuillage et substrat.

Caractérisations acoustique et vibratoire d'échantillons de type feuillage

Sommaire

3.1	Introduction	68
3.2	Protocole expérimental	68
3.3	Caractérisation vibratoire des feuilles	71
3.4	Mesure des paramètres acoustiques effectifs des feuillages	76
3.4.1	Matrice de transfert du feuillage	76
3.4.2	Détermination des paramètres effectifs du feuillage	77
3.5	Coefficients acoustiques de parois constituées de feuillage	87
3.5.1	Coefficients de réflexion et d'absorption acoustique de paroi en terminaison rigide	87
3.5.2	Coefficients de réflexion et de dissipation de paroi en terminaison anéchoïque	92
3.6	Caractérisations vibratoire et acoustique d'échantillons de feuillage	96
3.7	Calcul des coefficients acoustiques des parois à partir des propriétés effectives	99
3.8	Conclusion du chapitre	101

3.1 Introduction

La présentation et la validation du banc expérimental ont été abordées dans le chapitre précédent. Rappelons que ce banc permet de mesurer les paramètres acoustiques effectifs du milieu constituant l'échantillon (nombre d'onde, impédance caractéristique) qui sont théoriquement indépendants de l'épaisseur de l'échantillon. Ce dispositif permet également d'évaluer les grandeurs acoustiques caractéristiques d'une PCV : coefficients de réflexion et d'absorption en condition de terminaison arrière rigide, coefficients de réflexion, de transmission et de dissipation en condition arrière anéchoïque ou en présence d'une cavité d'air derrière l'échantillon (cf.§ 2.3.3). La mesure vibratoire de la surface de l'échantillon est réalisée grâce à une fenêtre optique permettant le passage du faisceau d'un vibromètre laser à balayage et d'une normalisation éliminant les résonances de la cavité d'air (cf.§ 2.4.3). Les caractérisations acoustique et vibratoire de deux types de feuillage sont présentées dans ce chapitre qui s'organise en six parties :

- la présentation des échantillons de feuillage étudiés,
- la caractérisation vibratoire des feuilles hors tube d'impédance,
- la caractérisation et l'analyse des paramètres acoustiques effectifs de ces échantillons (nombre d'onde, impédance caractéristique),
- la mesure des coefficients acoustiques (absorption, réflexion, transmission),
- la confrontation des mesures vibratoires et acoustiques,
- la comparaison des coefficients acoustiques estimés à partir des paramètres effectifs avec les résultats de mesures.

3.2 Protocole expérimental

La préparation des échantillons tests de feuillage est décrite dans cette section. Deux types de feuillages sont étudiés : le fusain japonais et le laurier palme caucasica¹. La Fig. 3.1 représente respectivement une feuille de fusain et une feuille de laurier. Leurs dimensions sont relevées sur dix feuilles choisies aléatoirement. Les valeurs extrémales de ces dimensions caractéristiques (longueur D_f , largeur d_f , épaisseurs e_{base} et e_{pointe}) sont répertoriées dans le Tab. 3.1.

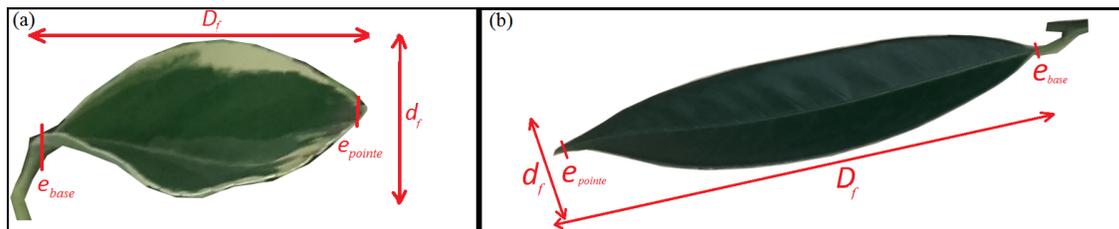


FIGURE 3.1 – Géométrie et dimensions caractéristiques de feuilles de fusain (a) et de laurier (b)

1. Ces deux feuillages ne sont pas utilisés dans la réalisation de murs végétalisés mais ont été choisis en raison de leur disponibilité

Deux épaisseurs d'échantillon (8 cm et 16 cm) de fraction volumique de feuilles η_f (1% ; 3% et 5%) sont utilisées pour chaque feuillage. La fraction volumique est définie comme le pourcentage entre le volume de feuilles V_f et le volume total de l'échantillon V_{total}

$$\eta_f = \frac{V_f}{V_{total}}. \quad (3.1)$$

Dans la suite du manuscrit, le terme « densité foliaire » sera utilisé pour désigner la fraction volumique de feuille. La porosité du feuillage ϕ_f peut être déduite de la densité foliaire par l'équation

$$\phi_f = \frac{V_{total} - V_f}{V_{total}} = 1 - \eta_f. \quad (3.2)$$

Type	d_f (mm)	D_f (mm)	e_{pointe} (mm)	e_{base} (mm)
fusain	[23,95-35]	[41,7-60,01]	[0,26-0,38]	[0,96-1,31]
laurier	[20,30-34,50]	[80,5-121,4]	[0,20-0,45]	[1,5-2,4]

TABLEAU 3.1 – Dimensions extrémales des feuilles de fusain et laurier (mesures effectuées sur 10 feuilles de chaque espèce)

Pour chaque densité foliaire et chaque épaisseur d'échantillon, le volume de feuilles est évalué en immergeant les feuilles dans l'eau et en relevant l'élévation de la hauteur d'eau à l'aide d'une éprouvette graduée. Les feuilles sont séchées puis ensuite pesées. Le Tab. 3.2 présente les volumes et masses de feuilles correspondant aux six échantillons de référence.

		épaisseur 8 cm			épaisseur 16 cm		
Densité foliaire η_f		1%	3%	5%	1%	3%	5%
Porosité ϕ_f		99%	97%	95%	99%	97%	95%
fusain	masse (g)	21,4	65,43	105,8	40,9	119	213,3
	volume (ml)	20	60	100	40	120	200
laurier	masse (g)	19	48,5	78	37,1	97,3	154,2
	volume (ml)	20	60	100	40	120	200

TABLEAU 3.2 – Masse et volume du feuillage des différents échantillons

Les porte-échantillons contenant le feuillage sont présentés aux Figs. 3.2 et 3.3 respectivement pour les échantillons de fusain et de laurier de densités foliaires 1%, 3% et 5%. Pour chaque échantillon, les mesures acoustiques sont répétées après extraction et brassage du feuillage puis réinsertion dans le porte-échantillon.

Avant de présenter les résultats acoustiques obtenus sur ces échantillons, les mesures vibratoires réalisées à l'extérieur du tube sur les deux types de feuille sont présentées et analysées dans la section qui suit.

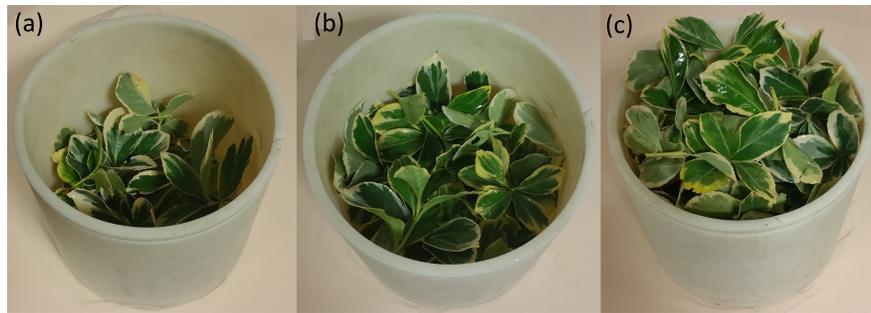


FIGURE 3.2 – Échantillons de fusain de 16 cm d'épaisseur de densité foliaire (a) 1%, (b) 3% et (c) 5%



FIGURE 3.3 – Échantillons de laurier de 16 cm d'épaisseur de densité foliaire (a) 1%, (b) 3% et (c) 5%

3.3 Caractérisation vibratoire des feuilles

Cette partie présente les mesures vibratoires réalisées à l'extérieur du tube sur des feuilles de fusain et de laurier accrochées à leur branche d'origine. Les travaux précédents (chapitre 1) ont montré que les principales résonances de flexion et de torsion des feuilles sont situées à des fréquences inférieures à 100 Hz. Une étude similaire est présentée pour les deux types de feuilles utilisées dans nos échantillons pour des fréquences variant de 1 à 100 Hz. Dans chacun des cas, une branche contenant la feuille est encastrée sur un support. Cette branche est excitée à proximité de la tige par un pot vibrant (Fig. 3.4). Le Tab. 3.3 indique les dimensions des feuilles et branches (épaisseur $e_{branche}$, longueur $L_{branche}$) utilisées.

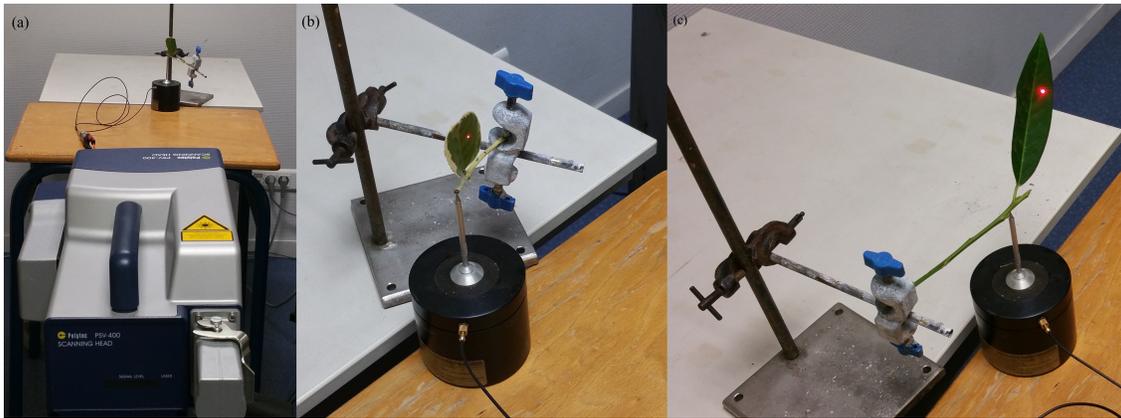


FIGURE 3.4 – Dispositif de mesure de la vibration par vibromètre laser à balayage d'une feuille excitée par un pot vibrant : a) vue générale ; dispositif d'excitation de la feuille b) de fusain c) de laurier.

Type	d_f (mm)	D_f (mm)	$e_{branche}$ (mm)	$L_{branche}$ (mm)
fusain	35	50	2,6	101
laurier	33	116	5	129

TABLEAU 3.3 – Dimensions des feuilles de fusain et de laurier caractérisées par pot vibrant

Les caractérisations vibratoires ont été effectuées dans une salle ne présentant aucun traitement acoustique particulier. L'échantillon et le pot vibrant sont positionnés sur deux tables très proches l'une de l'autre sans contact de manière à réduire au mieux la transmission vibratoire *via* les supports. Dans cette expérimentation, l'amplitude d'excitation du pot vibrant est réglée sur 1 V, la résolution fréquentielle est de 62,5 mHz et le gain de l'amplificateur est de 18 dB. La sensibilité de la sonde laser a été optimisée à $20 \text{ mm s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ dans le cas de la feuille de laurier et à $5 \text{ mm s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ pour la feuille de fusain. La réponse vibratoire du pot vibrant à vide (Fig. 3.5) au niveau de la pointe met en évidence une fréquence de résonance au voisinage de 90 Hz.

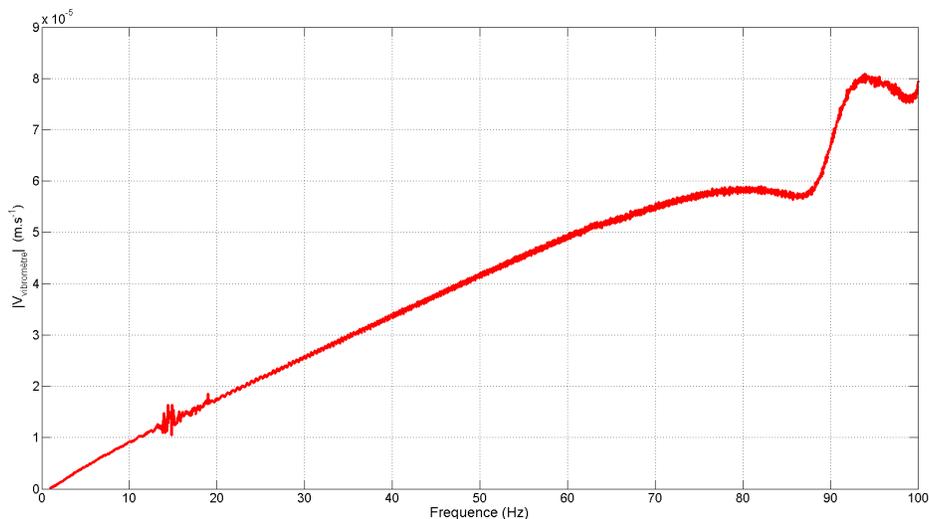


FIGURE 3.5 – Mesure de la vitesse vibratoire au niveau de la pointe du pot vibrant à vide

La localisation des points de mesure et les spectres vibratoires associés à chacun de ces points sont représentés aux Figs. 3.6 pour le fusain et 3.7 pour le laurier. La moyenne et l'écart-type évalués sur l'ensemble de ces points² du spectre de la vitesse pour une seule configuration de mesure (de manière à ne pas modifier les conditions aux limites d'encastrement) sont présentés respectivement aux Figs. 3.8 et 3.9.

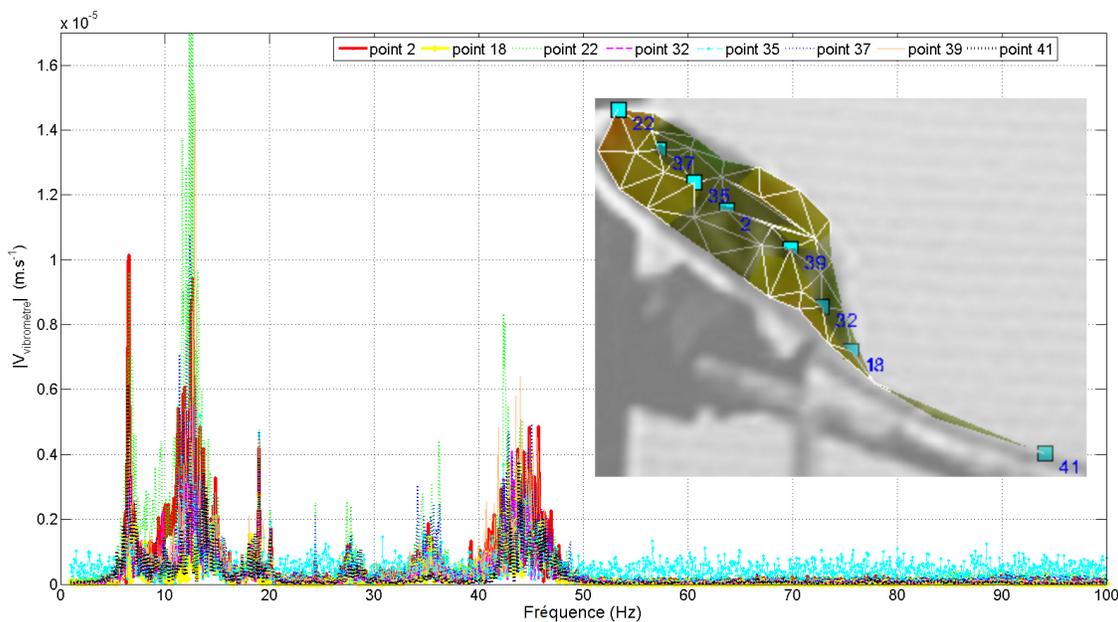


FIGURE 3.6 – Mesure de la vibration d'une feuille de fusain : maillage et spectre des vitesses mesurées en différents points

2. chaque mesure effectuée avec le vibromètre correspond systématiquement à la moyenne de trois mesures successives

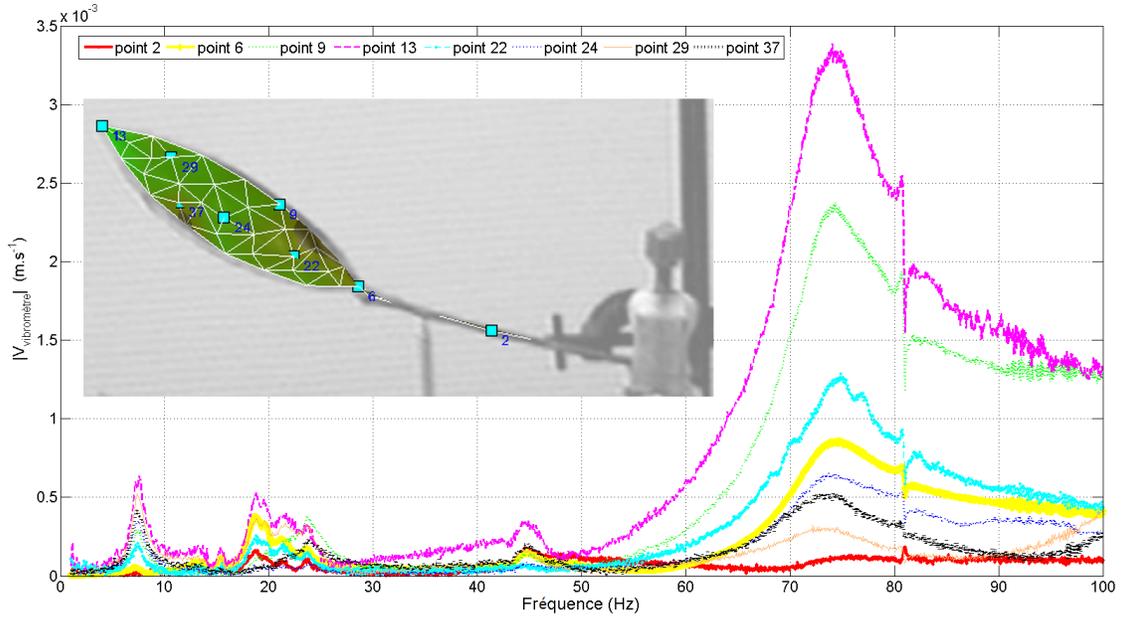


FIGURE 3.7 – Mesure de la vibration d’une feuille de laurier : maillage et spectre des vitesses mesurées en différents points

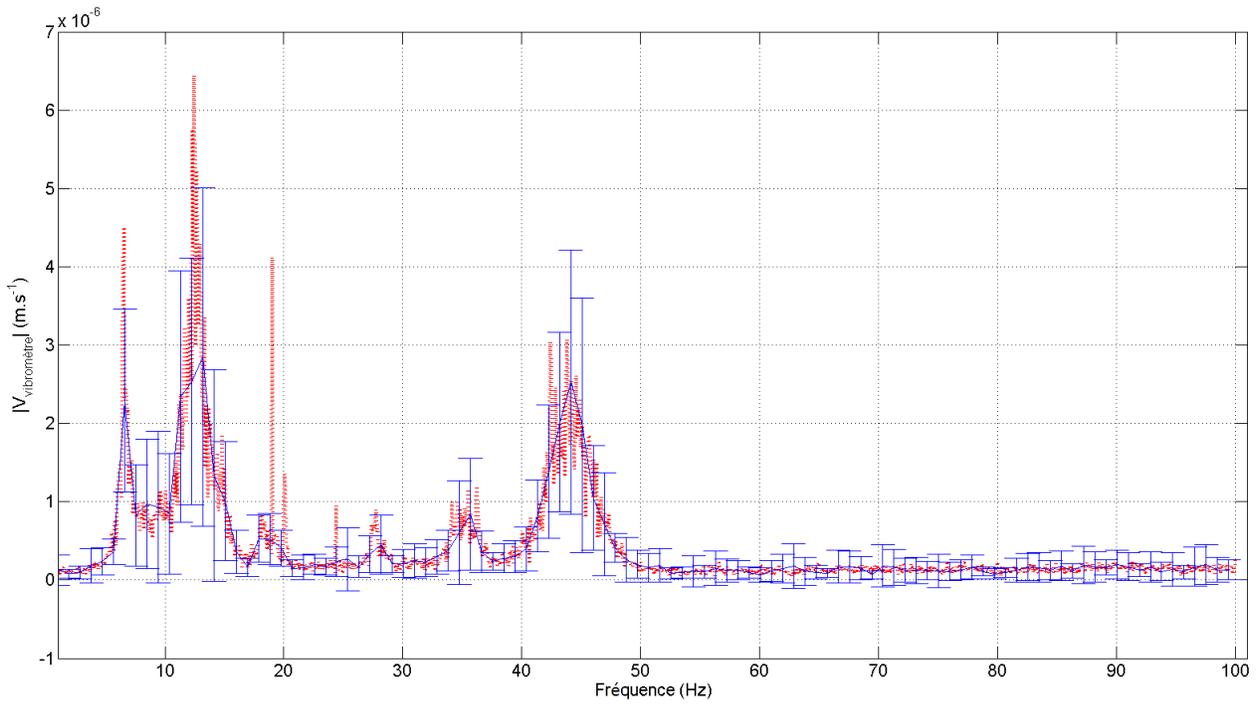


FIGURE 3.8 – Moyenne et écart-type du spectre du module de la vitesse vibratoire mesurée sur une feuille de fusain

Dans le cas de la feuille de fusain, les résonances apparaissent à 6,56 Hz ; 12,5 Hz ; 19 Hz ; 25 Hz ; 36 Hz et 44 Hz. Aucune résonance n'est observée au dessus de 44 Hz. Les déformées associées à ces résonances (Fig. 3.10) mettent en évidence les différents modes identifiés à partir des animations à l'écran : mode de tige entraînant la feuille à 6,56 Hz ; mode de torsion de la feuille à 12,5 Hz ; mode de branche déplaçant l'ensemble des points de la feuille et la tige en phase à 19 Hz. A plus hautes fréquences, les résonances correspondent à des vibrations plus complexes de l'ensemble feuille-tige-branche.

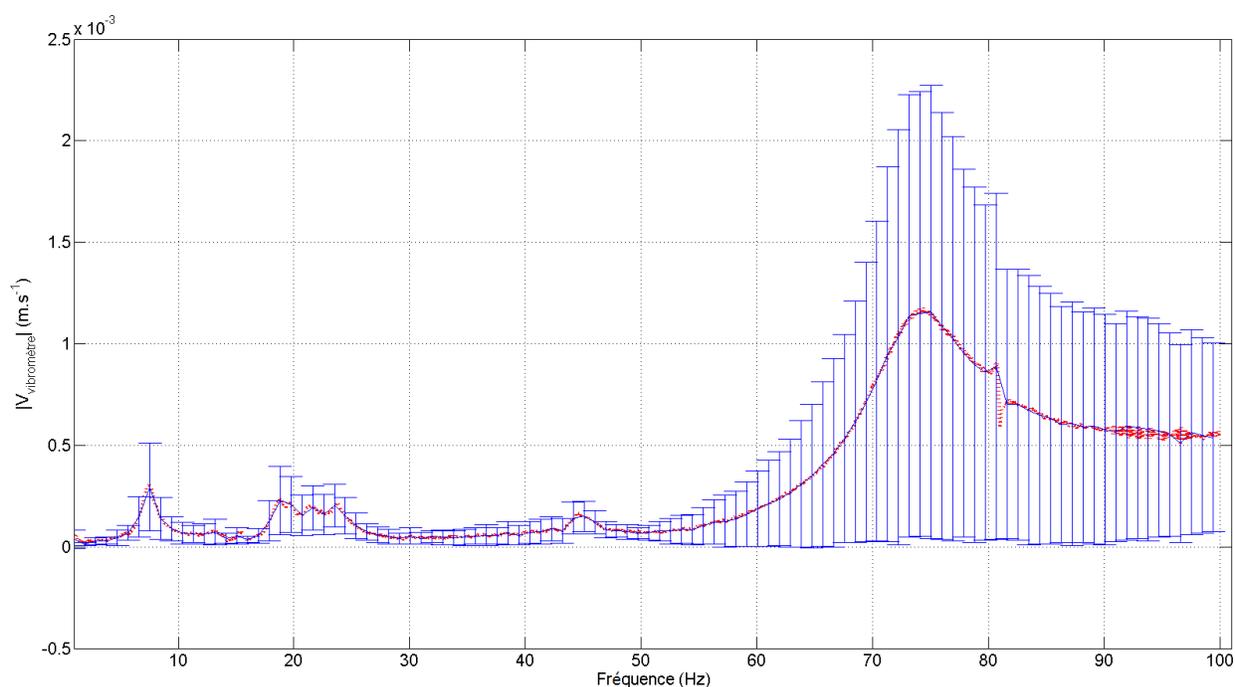


FIGURE 3.9 – Moyenne et écart-type du spectre du module de la vitesse vibratoire mesurée sur une feuille de laurier

Dans le cas du laurier, les résonances sont localisées aux fréquences de 7 Hz ; 19 Hz ; 45 Hz et 74 Hz. Les trois premiers modes situés à des fréquences similaires à celles des résonances de la feuille de fusain, sont également des modes de branche (7 Hz) ou d'ensemble feuille-tige-branche (19 Hz et 45 Hz) (cf. animations des déformées). Le mode à 74 Hz met en jeu des amplitudes vibratoires beaucoup plus élevées : la déformée associée ne permet pas d'identifier précisément ce mode. Globalement, les résonances des modes de feuilles et de branches sont situées dans la gamme 5-40 Hz. Ces résultats sont comparables à ceux trouvés dans la littérature pour les modes de flexion et de torsion [90–92].

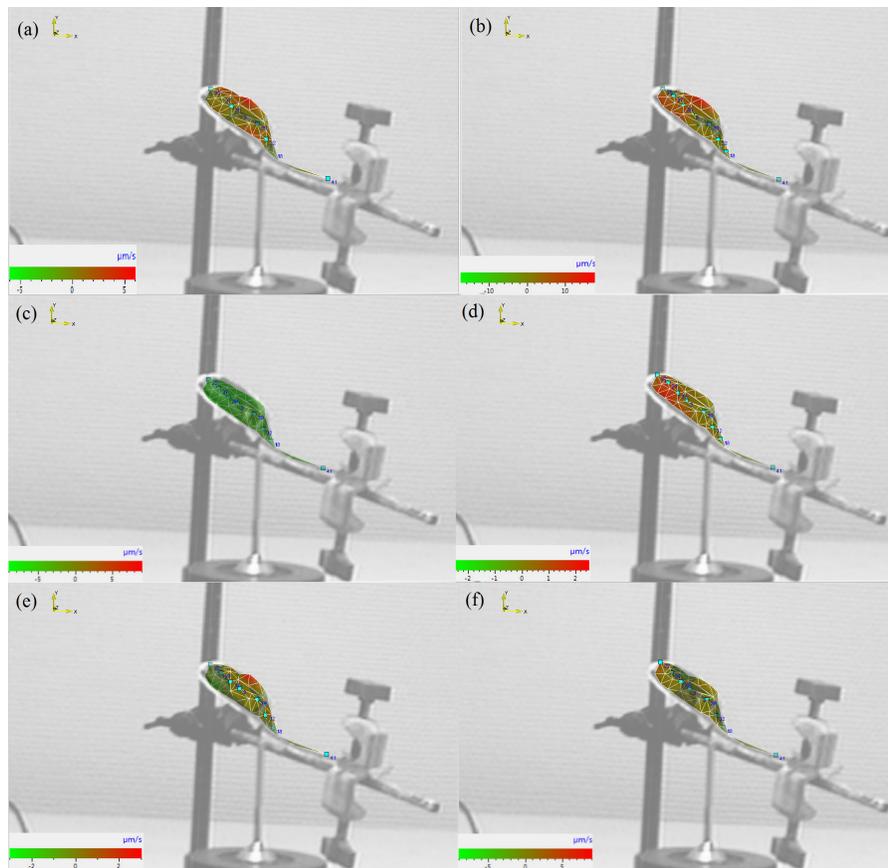


FIGURE 3.10 – Champs de déplacement aux fréquences de résonances de la feuille de fusain : (a) 6,56 Hz (b) 12,5 Hz (c) 19 Hz (d) 25 Hz (e) 36 Hz et (f) 44 Hz

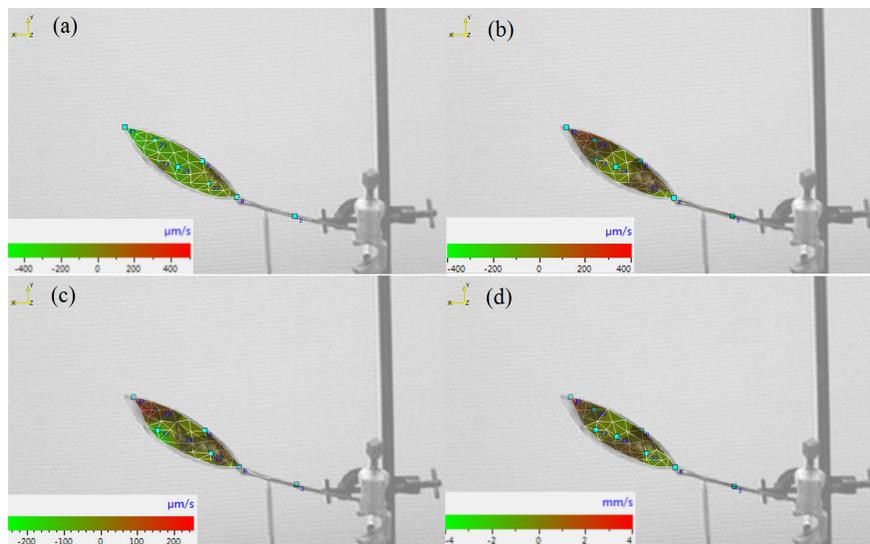


FIGURE 3.11 – Champs de déplacement aux fréquences de résonance de la feuille de laurier (a) 7 Hz (b) 19 Hz (c) 45 Hz (d) 74 Hz

3.4 Mesure des paramètres acoustiques effectifs des feuillages

3.4.1 Matrice de transfert du feuillage

Les spectres mesurés des paramètres T_{11} et T_{22} sont présentés aux Figs. 3.12 et 3.13 respectivement, pour des échantillons de fusain. Les traits et barres d'erreurs correspondent respectivement aux valeurs moyennes et écart-types sur cinq relevés après brassage du feuillage. Les valeurs obtenues pour T_{11} et T_{22} sont suffisamment proches pour pouvoir assimiler le feuillage à un milieu symétrique. Les Figs. 3.14 et 3.15 présentées à titre indicatif sont nécessaires à la détermination de l'impédance effective du feuillage (cf. § 2.3.3).

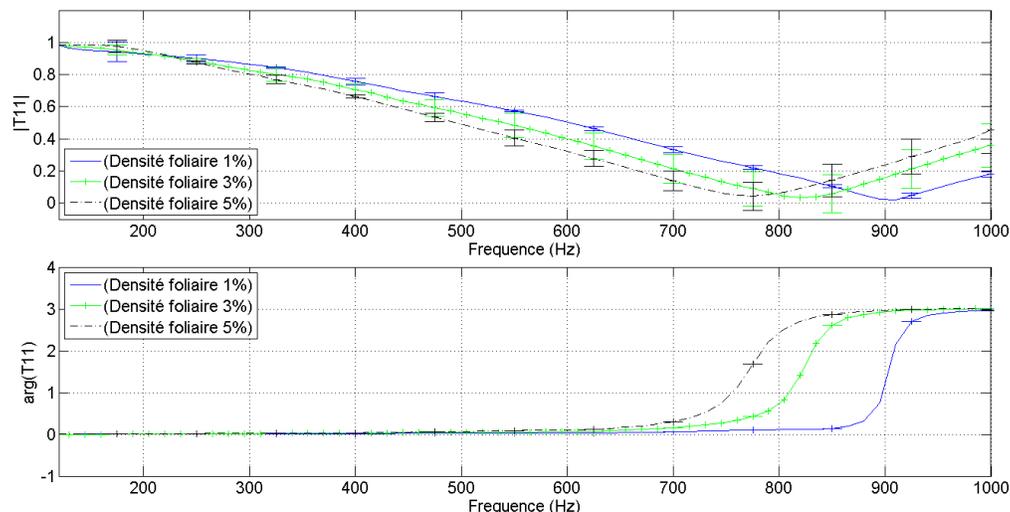


FIGURE 3.12 – Module et phase du paramètre T_{11} pour un échantillon de fusain d'épaisseur 8 cm

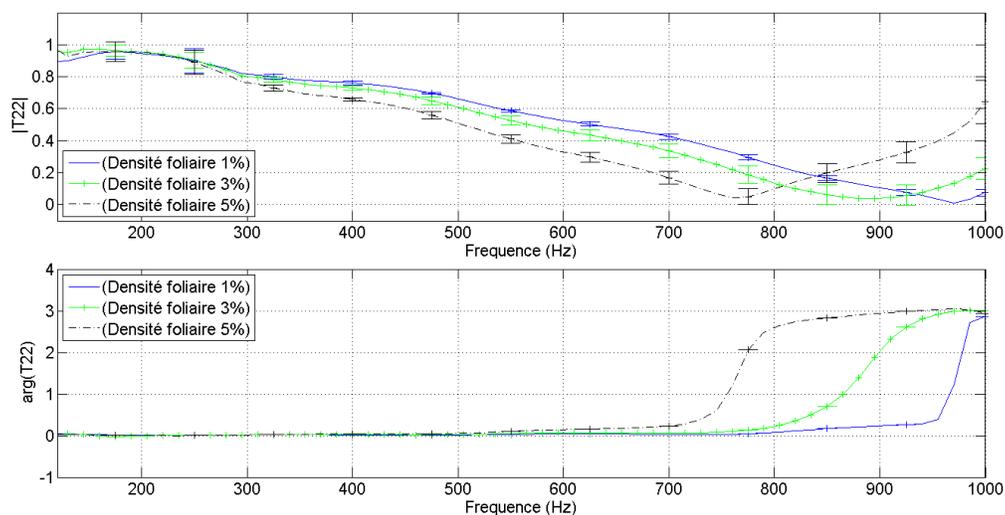
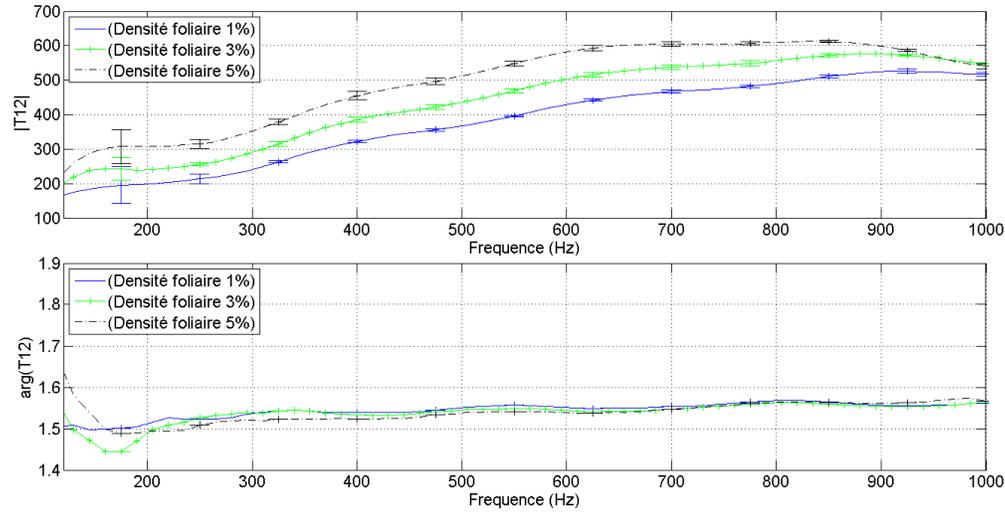
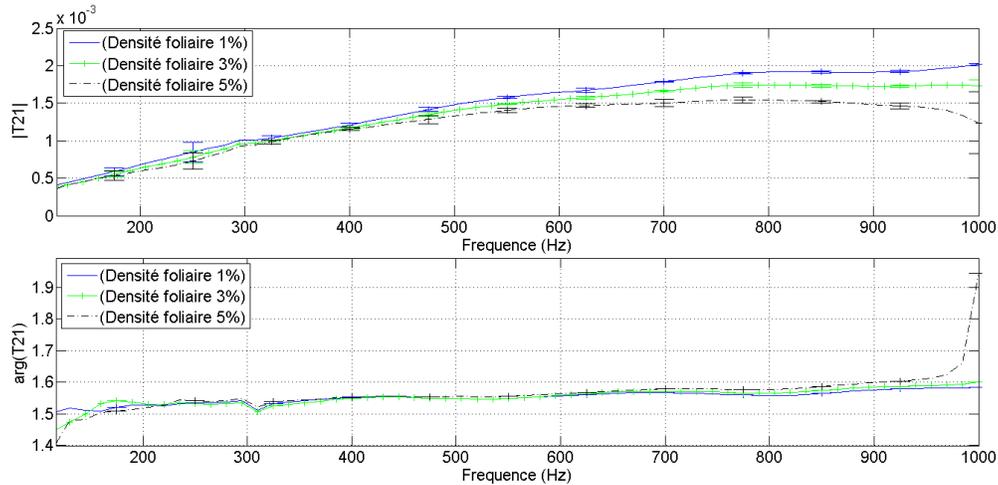


FIGURE 3.13 – Module et phase du paramètre T_{22} pour un échantillon de fusain d'épaisseur 8 cm


 FIGURE 3.14 – Module et phase du paramètre T_{12} pour 8 cm d'épaisseur de fusain

 FIGURE 3.15 – Module et phase du paramètre T_{21} pour 8 cm d'épaisseur de fusain

3.4.2 Détermination des paramètres effectifs du feuillage

Les paramètres acoustiques effectifs mesurés du feuillage que sont le nombre d'onde k_{eff} et l'impédance caractéristique Z_{eff} sont présentés dans ce paragraphe. La célérité, la compressibilité et la masse volumique effective du feuillage sont déduites de ces grandeurs³.

Nombre d'onde dans le feuillage

Les variations du nombre d'onde effectif avec la fréquence présentées aux Figs. 3.16 et 3.17 sont calculées à partir du paramètre T_{11} de la matrice de transfert pour chaque densité foliaire et pour un échantillon de 8 cm d'épaisseur (Eq. 2.47). Deux comportements différents sont observés dans la bande de fréquence étudiée :

3. En raison du nombre important de résultats associés à ce chapitre, certaines figures ont été reportées en annexe.

- En dessous de 200 Hz, les courbes présentent des variations rapides et une augmentation de l'écart-type. Cet effet peut provenir des conditions latérales de tenue de l'échantillon comme indiqué précédemment (§ 2.5) ou de la difficulté à extraire des propriétés effectives d'un échantillon de dimension très faible par rapport à la longueur d'onde. Ces effets basses fréquences ont également été mis en évidence par Salissou [54].
- Au dessus de 200 Hz, l'évolution de la partie réelle du nombre d'onde est linéaire avec la fréquence. Ces résultats montrent que le feuillage est un milieu non dispersif avec une faible atténuation de l'ordre de 0,19 à 0,6 Np m⁻¹ pour le fusain et de 0,45 à 0,8 Np m⁻¹ pour le laurier. Cette atténuation augmente avec la densité foliaire.

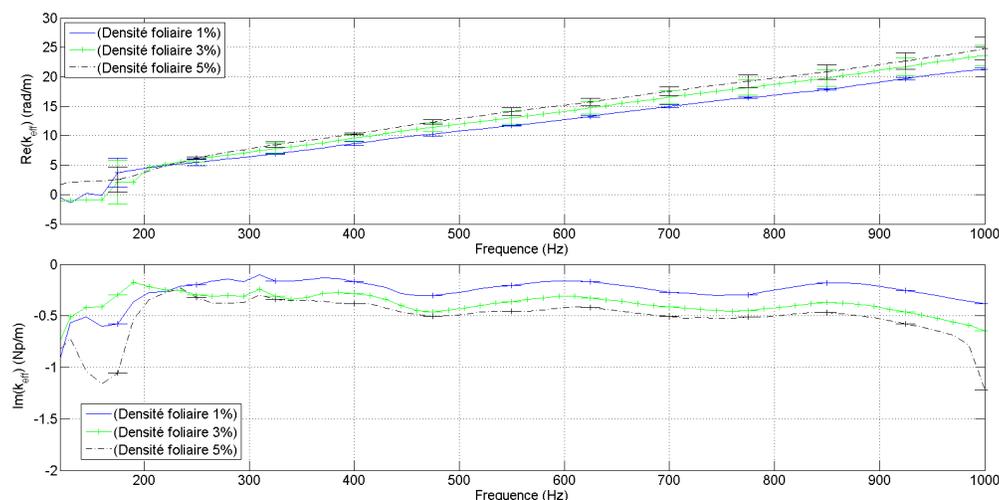


FIGURE 3.16 – Variations des parties réelle et imaginaire du nombre d'onde effectif k_{eff} avec la fréquence pour des densités foliaires de fusain de 1%, 3% et 5% (mesures effectuées sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur)

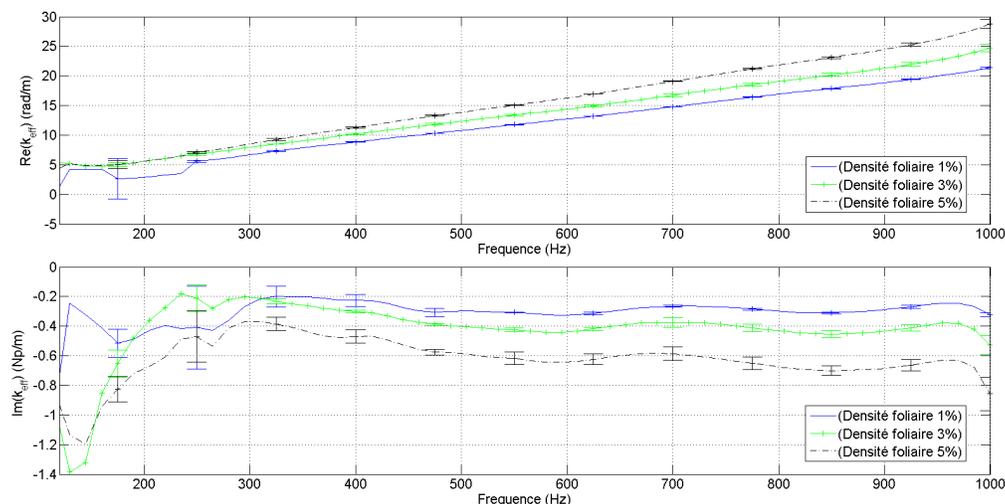


FIGURE 3.17 – Variations des parties réelle et imaginaire du nombre d'onde effectif k_{eff} avec la fréquence pour des densités foliaires du laurier de 1%, 3% et 5% (mesures effectuées sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur)

Célérité effective dans le feuillage

La célérité effective c_{eff} (§ 2.3.3) dans le feuillage est présentée aux Figs. 3.18 et 3.19 pour les feuilles de fusain et de laurier respectivement. Ces figures sont issues des mesures sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur. Les célérités effectives obtenues pour des échantillons de 16 cm d'épaisseur donnent des résultats très proches.

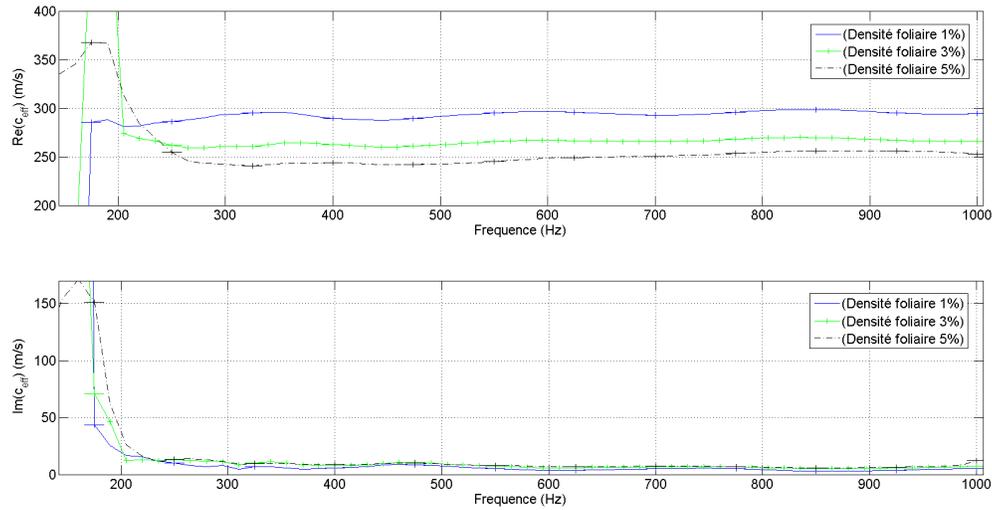


FIGURE 3.18 – Variation des parties réelle et imaginaire de la célérité effective du son c_{eff} dans le fusain pour des densités foliaires de 1%, 3% et 5% (mesures effectuées sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur)

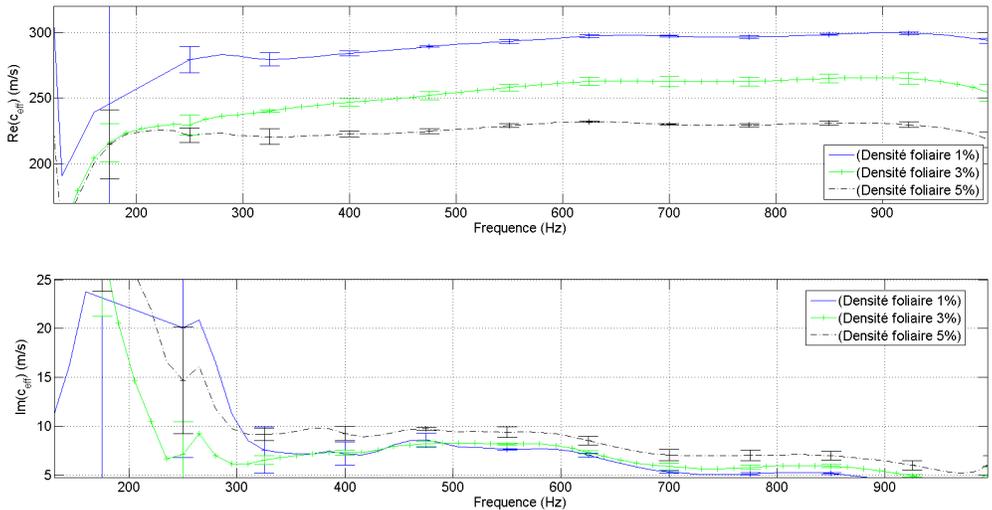


FIGURE 3.19 – Variation des parties réelle et imaginaire de la célérité effective du son c_{eff} dans le laurier pour des densités foliaires de 1%, 3% et 5% (mesures effectuées sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur)

Les résultats confirment que le feuillage est un milieu non dispersif, la célérité effective n'évoluant quasiment pas avec la fréquence dans la bande 200-1000 Hz. Lorsque la densité foliaire augmente, la partie réelle de la célérité effective diminue, passant de façon similaire pour les deux types de feuillage d'environ 300 ms^{-1} pour une densité foliaire de 1% à 240 ms^{-1} pour une densité foliaire de 5%. La présence de feuillage ralentit donc l'onde sonore et ce ralentissement augmente avec la densité foliaire. Le rapport de la partie imaginaire sur la partie réelle de la célérité effective évolue entre 2% et 5% ce qui correspond à un facteur de perte pouvant varier entre 4 et 10%. Les évolutions de la partie réelle de la célérité effective en fonction de la densité foliaire sont présentées dans la Fig. 3.20 pour le fusain et le laurier. Entre 0% et 5%, ces évolutions peuvent être approchées par les expressions quadratiques

$$c_{eff}(\eta_f) = 327,8168 - 3266,81\eta_f + 31884\eta_f^2 \quad (3.3)$$

pour le fusain et

$$c_{eff}(\eta_f) = 328,2651 - 3430,31\eta_f + 28348\eta_f^2 \quad (3.4)$$

pour le laurier.

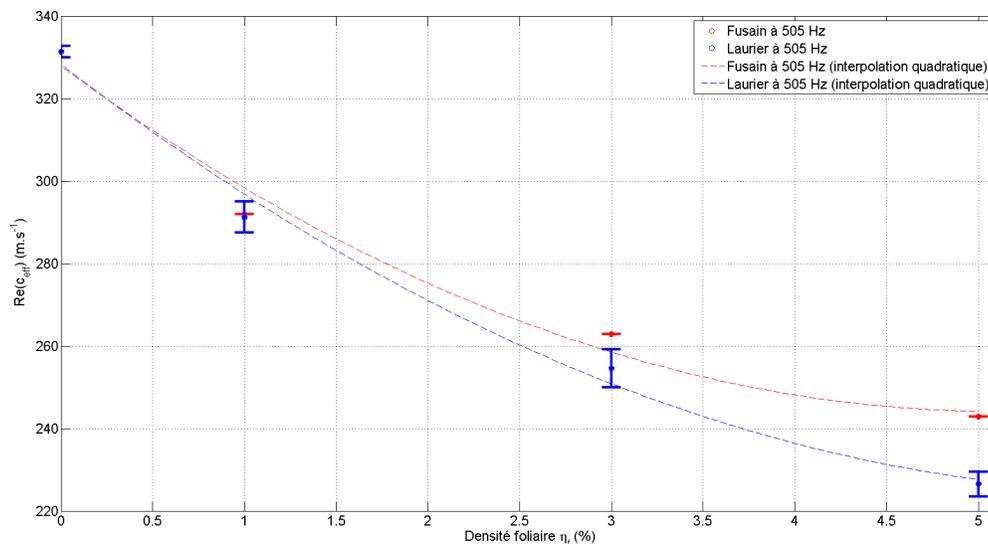


FIGURE 3.20 – Évolution de la partie réelle de la célérité effective du son c_{eff} dans le fusain et le laurier avec la densité foliaire à 505 Hz (mesures effectuées sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur pour 5 différents arrangements de feuillage)

Impédance effective du feuillage

Les parties réelle et imaginaire de l'impédance effective Z_{eff} (cf. Eq. 2.48) sont présentées aux Figs. 3.21 et 3.22 pour le fusain et le laurier respectivement.

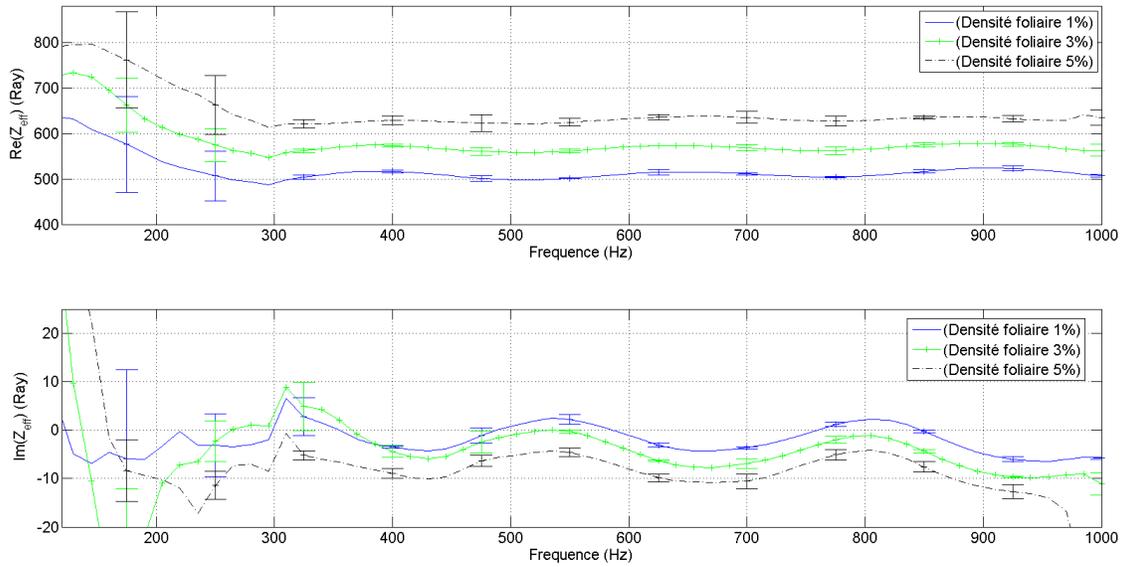


FIGURE 3.21 – Variation des parties réelle et imaginaire de l'impédance effective dans le fusain pour des densités foliaires de 1%, 3% et 5% (mesures effectuées sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur)

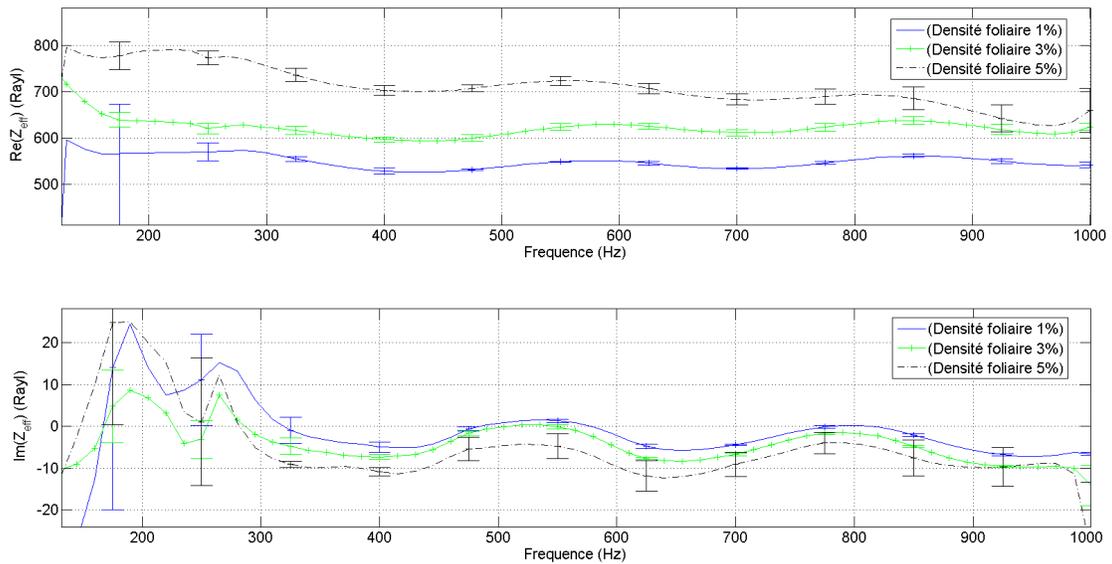


FIGURE 3.22 – Variation des parties réelle et imaginaire de l'impédance effective dans le laurier, pour des densités foliaires de 1%, 3% et 5% (mesure effectuée sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur)

L'impédance effective est fortement liée à la densité foliaire, passant de 510 à 700 Rayl lorsque la densité foliaire varie de 1% à 5%. Ces valeurs sont supérieures à l'impédance de l'air qui vaut approximativement 408 Rayl. Ainsi, pour une densité foliaire de 3%, la valeur moyenne de l'impédance effective (partie réelle) est de 560 Rayl dans la bande 250-1000 Hz. Elle correspond à une augmentation relative de 37% par rapport à l'impédance caractéristique de l'air. Le rapport de la partie imaginaire de l'impédance sur la partie réelle varie entre 0 et 2%.

La variation de la partie réelle de l'impédance avec la densité foliaire représentée pour le fusain et le laurier à 505 Hz (Fig. 3.23) peut être décrite par les équations

$$Z_{eff}(\eta_f) = 415,9653 + 6842\eta_f - 56325\eta_f^2 \quad (3.5)$$

dans le cas du fusain et

$$Z_{eff}(\eta_f) = 423,6759 + 8823\eta_f - 62107\eta_f^2 \quad (3.6)$$

dans le cas du laurier.

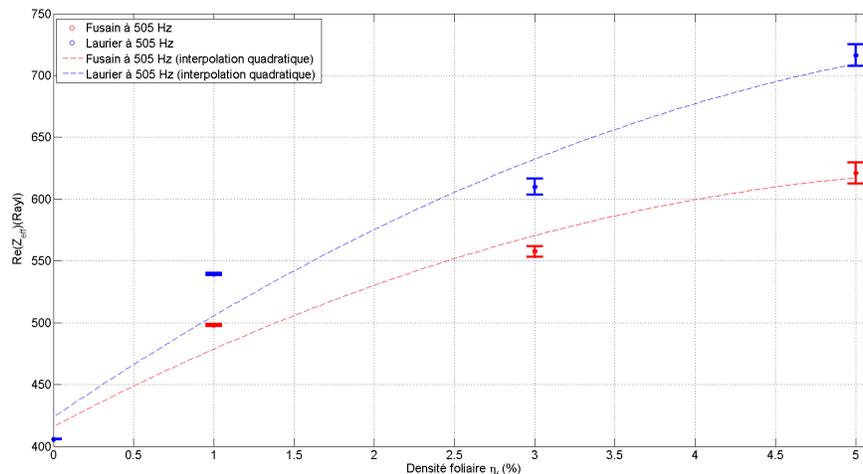


FIGURE 3.23 – Évolution de la partie réelle de l'impédance effective Z_{eff} du fusain et du laurier avec le densité foliaire à 505 Hz (mesures effectuées sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur pour 5 différents arrangements de feuillage)

Compressibilité et masse volumique effectives du feuillage

Les Figs. 3.24 et 3.25 présentent les variations des parties réelles de la compressibilité effective (cf. Eq. 2.51) obtenue pour les deux types de feuillages.

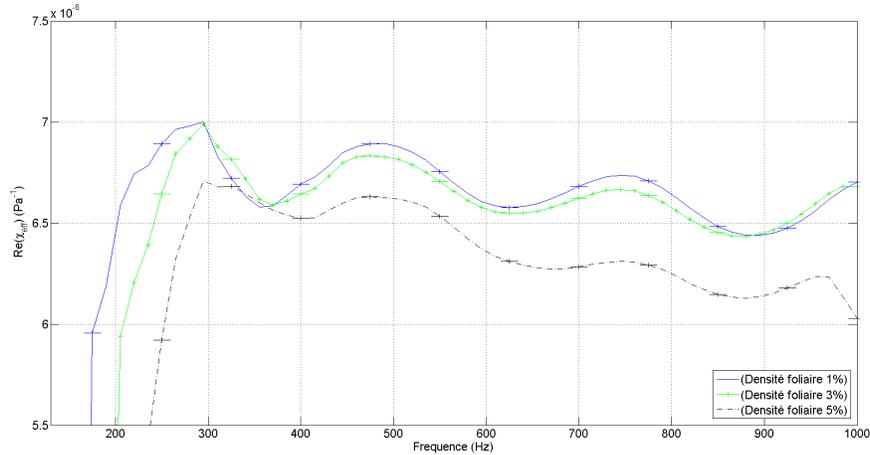


FIGURE 3.24 – Variation de la partie réelle de la compressibilité effective χ_{eff} du fusain pour des densités foliaires de 1%, 3% et 5%

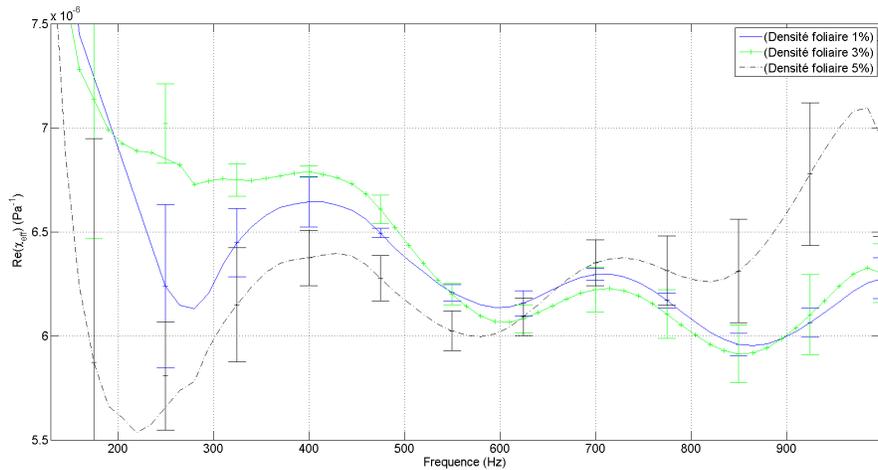


FIGURE 3.25 – Partie réelle de la compressibilité effective χ_{eff} du feuillage de laurier pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

Comparée à l'air qui présente une compressibilité effective d'environ $7,36 \cdot 10^{-6} Pa^{-1}$, la compressibilité du feuillage diminue lorsque la densité foliaire augmente, passant d'environ $6,76 \cdot 10^{-6} Pa^{-1}$ pour 1% à environ $6,23 \cdot 10^{-6} Pa^{-1}$ pour 5%.

Ces résultats montrent que la densité foliaire a une faible influence sur la compressibilité effective, la variation relative observée étant de l'ordre d'une à deux fois la variation relative du volume d'air pouvant être comprimé (Fig. 3.26).

La compressibilité effective du fusain est plus proche de celle de l'air que celle du laurier. La loi d'évolution de ce paramètre peut être donnée par l'équation

$$\chi_{\text{eff}}(\eta_f) = (0,007347 - 0,0334 \eta_f + 0,39 \eta_f^2) 10^{-3} \quad (3.7)$$

pour le fusain et

$$\chi_{\text{eff}}(\eta_f) = (0,007277 - 0,0616 \eta_f + 0,81 \eta_f^2) 10^{-3} \quad (3.8)$$

pour le laurier.

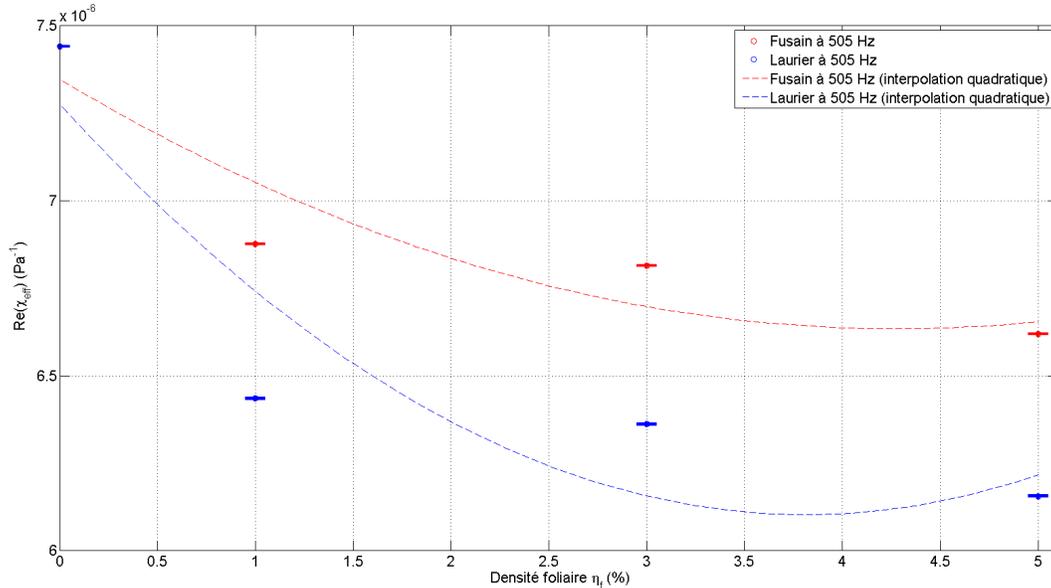


FIGURE 3.26 – Évolution de la partie réelle de la compressibilité effective avec la densité foliaire à une fréquence de 505 Hz (mesures effectuées sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur pour 5 différents arrangements de feuillage)

Les masses volumiques effectives des deux types de feuillages sont présentées aux Figs. 3.27 et 3.28. Une augmentation significative de la masse volumique est observée par rapport à celle de l'air. Elle atteint 80% lorsque la densité foliaire est de 5%. Ce résultat confirme que l'effet principal du feuillage sur la propagation d'une onde sonore est un effet de masse ajoutée dû à la vibration des feuilles qui se couple à l'onde aérienne.

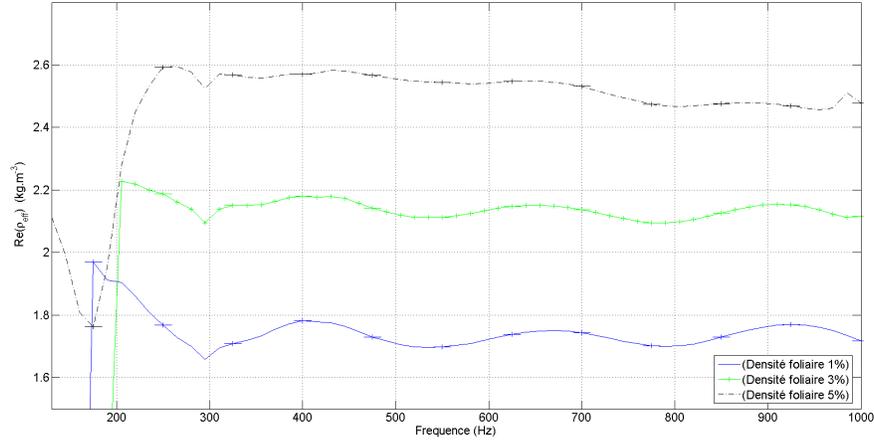


FIGURE 3.27 – Variation de la partie réelle de la masse volumique effective ρ_{eff} du fusain pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

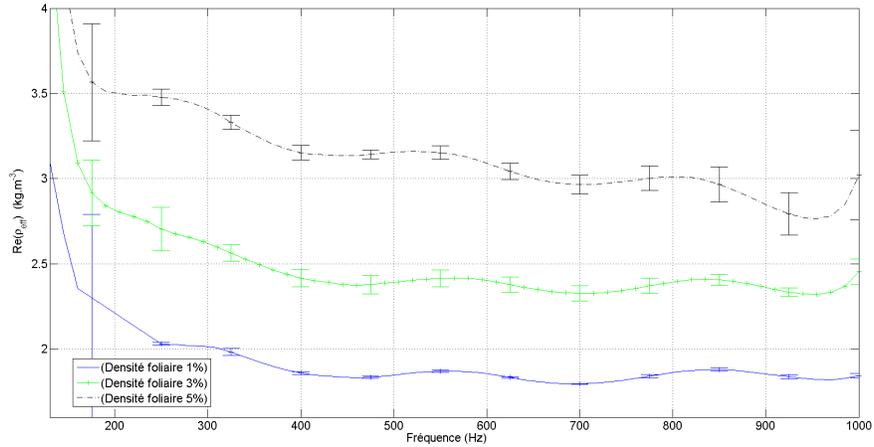


FIGURE 3.28 – Variation de la partie réelle de la masse volumique effective ρ_{eff} de laurier pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

La Fig. 3.29 présente l'évolution de la masse volumique effective en fonction de la densité foliaire. L'évolution de ce paramètre peut être représenté par

$$\rho_{eff}(\eta_f) = 1,2697 + 37,55 \eta_f - 244 \eta_f^2 \quad (3.9)$$

dans le cas du fusain et par

$$\rho_{eff}(\eta_f) = 1,2951 + 43,83 \eta_f - 142 \eta_f^2 \quad (3.10)$$

dans le cas du laurier.

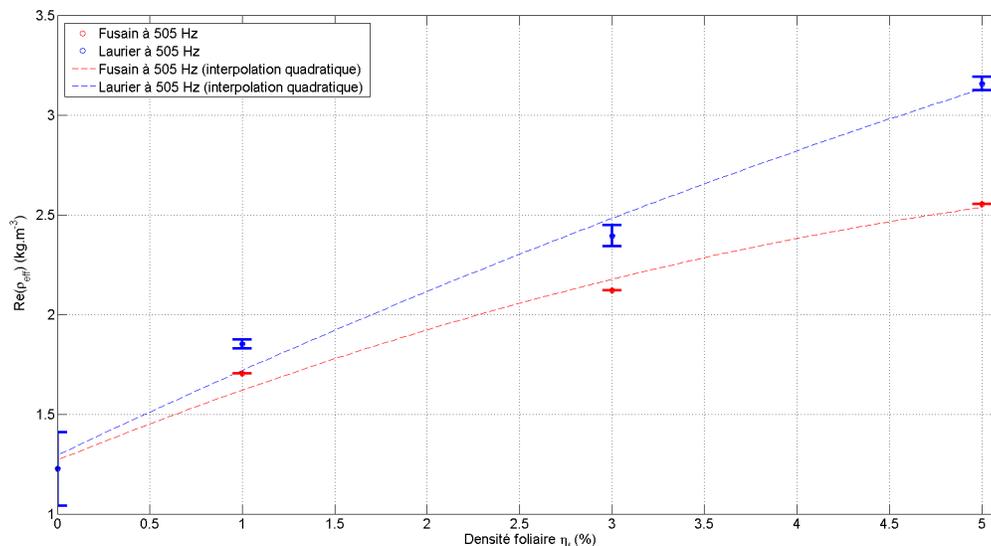


FIGURE 3.29 – Évolution de la partie réelle de la masse volumique effective ρ_{eff} avec la densité foliaire à la fréquence de 505 Hz (mesures effectuées sur des échantillons de 8 cm d'épaisseur pour 5 différents arrangements de feuillage)

La masse volumique effective du milieu ρ_{eff} pouvant être comparée à la masse volumique statique moyenne ρ_{sm} de l'ensemble feuillage + air est donnée par la relation :

$$\rho_{sm} = (1 - \eta_f)\rho_0 + \eta_f\rho_f \quad (3.11)$$

où ρ_f est la masse volumique statique du feuillage. Ces comparaisons (Tab. 3.4) montrent que la masse volumique effective ne correspond qu'à une faible part de la masse volumique statique moyenne. Cette différence traduit le faible couplage entre l'onde acoustique et la vibration du feuillage.

Type d'Echantillon		Masse volumique statique de l'air (kg m ⁻³)	Masse volumique statique des feuilles (kg m ⁻³)	Masse volumique statique moyenne (kg m ⁻³)	Masse volumique effective (kg m ⁻³)
air	100 %	1,28	0	1,28	1,28
fusain + air	1%	1,28	1070	11,97	1,705
	3%	1,28	1090,5	33,95	2,12
	5%	1,28	1058	54,12	2,55
laurier + air	1%	1,28	950	10,77	1,85
	3%	1,28	808,3	25,48	2,39
	5%	1,28	780	40,22	3,16

TABLEAU 3.4 – Masses volumiques effectives et masses volumiques statiques des différents échantillons

3.5 Coefficients acoustiques de parois constituées de feuillage

Les coefficients d'absorption et de réflexion acoustique mesurés sur des parois constituées de fusain ou de laurier sont présentés dans cette section. L'effet de l'épaisseur de l'échantillon et de la densité foliaire γ sont également étudiés.

3.5.1 Coefficients de réflexion et d'absorption acoustique de paroi en terminaison rigide

L'échantillon de feuillage en condition arrière rigide correspond au cas où le couvert végétal est positionné contre un mur supposé rigide et sans substrat. Dans cette situation, aucune énergie n'est transmise et toute l'énergie qui n'est pas réfléchi est absorbée par l'échantillon. Les mesures des coefficients de réflexion et d'absorption acoustique réalisées sur les échantillons de feuillages d'épaisseur 8 et 16 cm sont présentées aux Figs. 3.30 à 3.37.

Contrairement au cas de l'échantillon de mousse de mélamine (Fig. 2.11) pour lequel des variations rapides de la phase du coefficient de réflexion apparaissent aux fréquences de résonance de l'échantillon, une variation régulière de la phase du coefficient de réflexion est observée sur toute la bande de fréquence dans le cas du feuillage (Figs. 3.31, 3.33, 3.35 et 3.37). Cette variation monotone peut résulter des nombreuses résonances associées aux modes de résonances de feuilles et branches. Pour des échantillons d'épaisseur 8 cm et de densité foliaire inférieure à 5%, l'absorption acoustique mesurée est similaire (Fig. 3.30 et 3.34) à celles du porte-échantillon sans feuillage (Fig. 2.6). Ces mesures ne peuvent donc être considérées comme significatives.

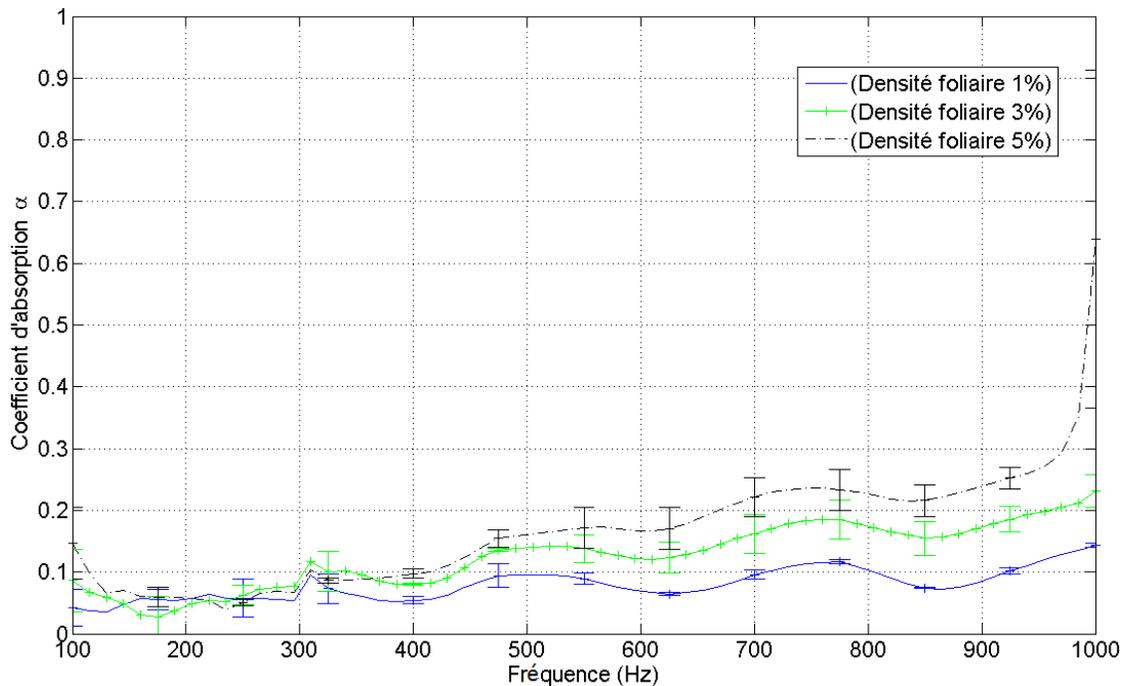


FIGURE 3.30 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence mesuré sur un échantillon de fusain d'épaisseur 8 cm pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

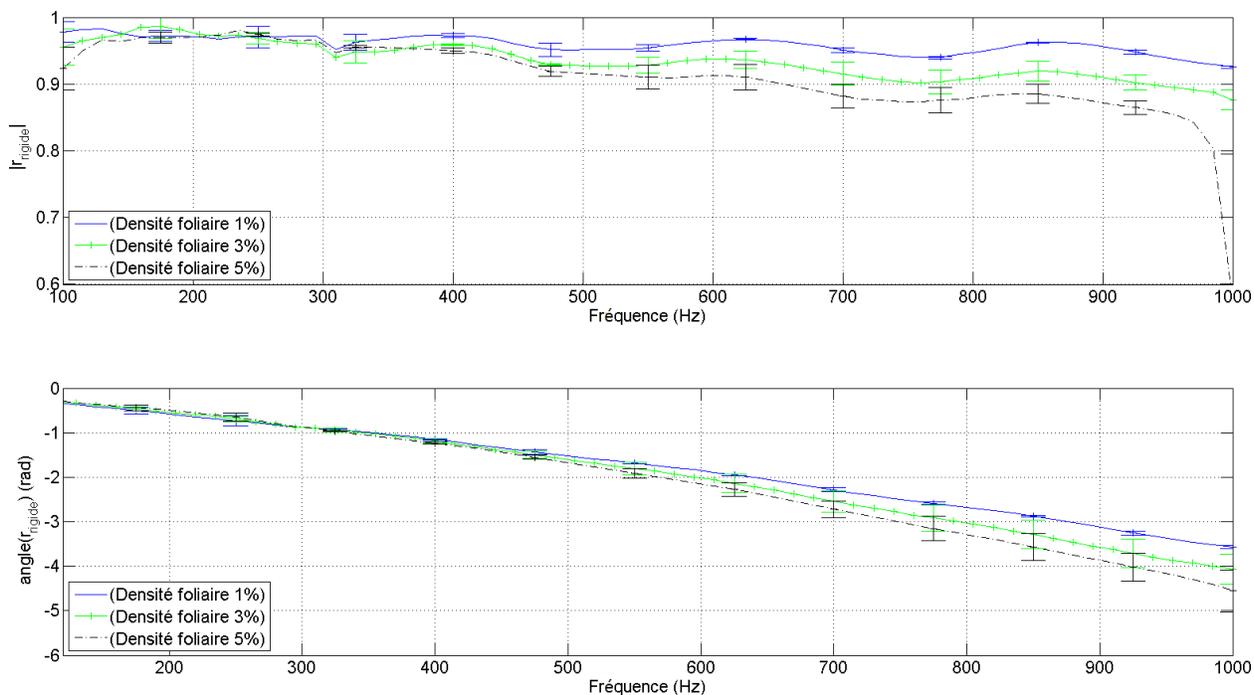


FIGURE 3.31 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence mesuré sur un échantillon de fusain d'épaisseur 8 cm pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire (terminaison rigide)

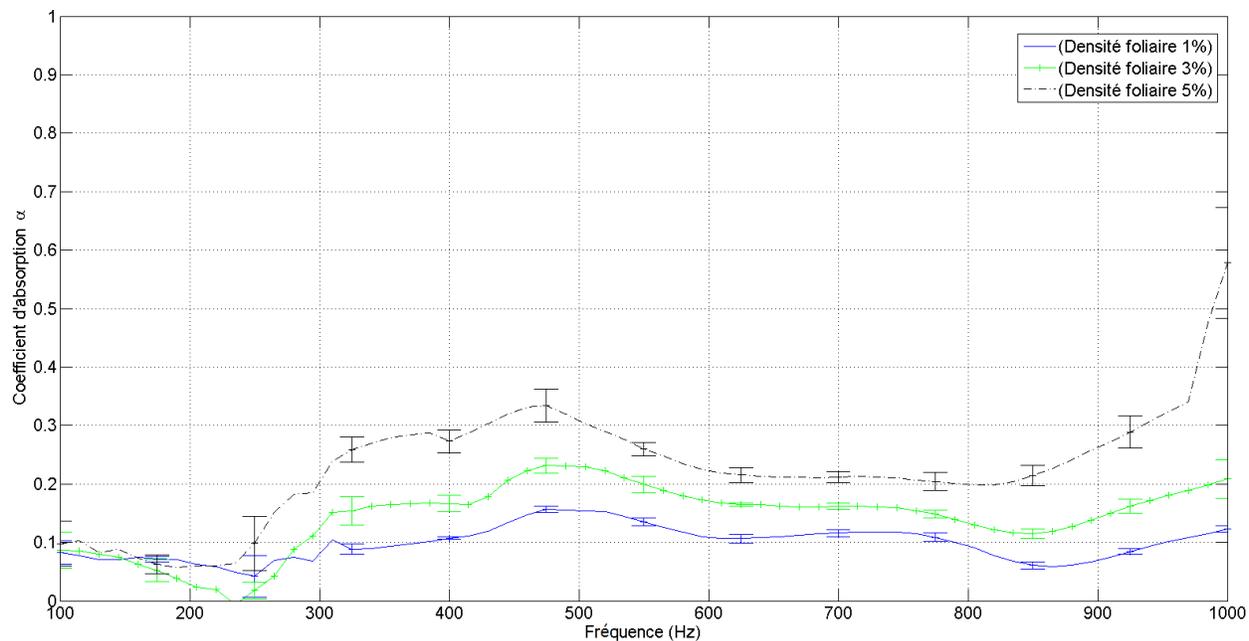


FIGURE 3.32 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence mesuré sur un échantillon de fusain d'épaisseur 16 cm pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

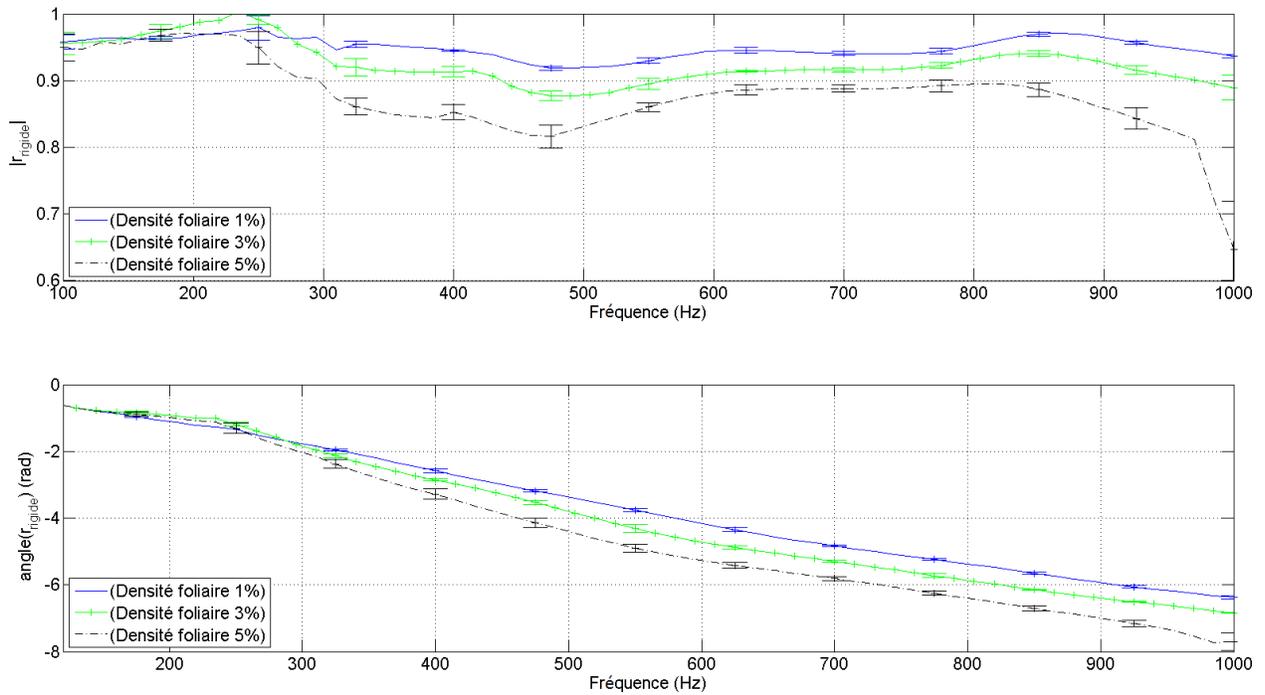


FIGURE 3.33 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence mesuré sur un échantillon de fusain d'épaisseur 16 cm pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire (terminaison rigide)

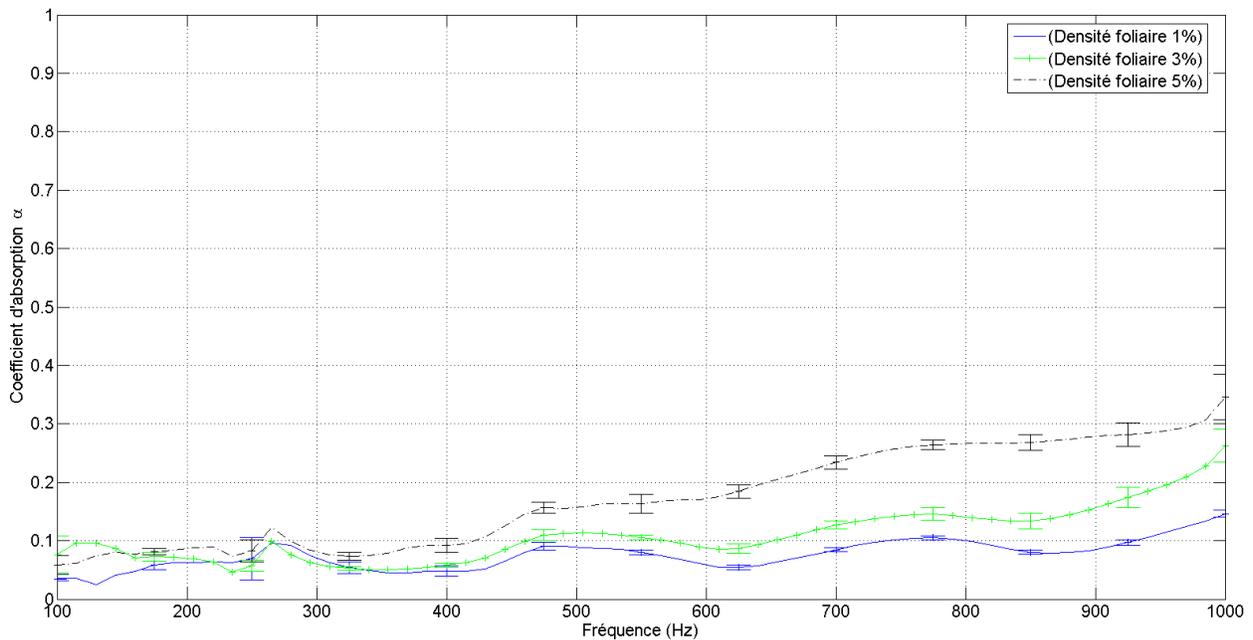


FIGURE 3.34 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence mesuré sur un échantillon de laurier d'épaisseur 8 cm pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

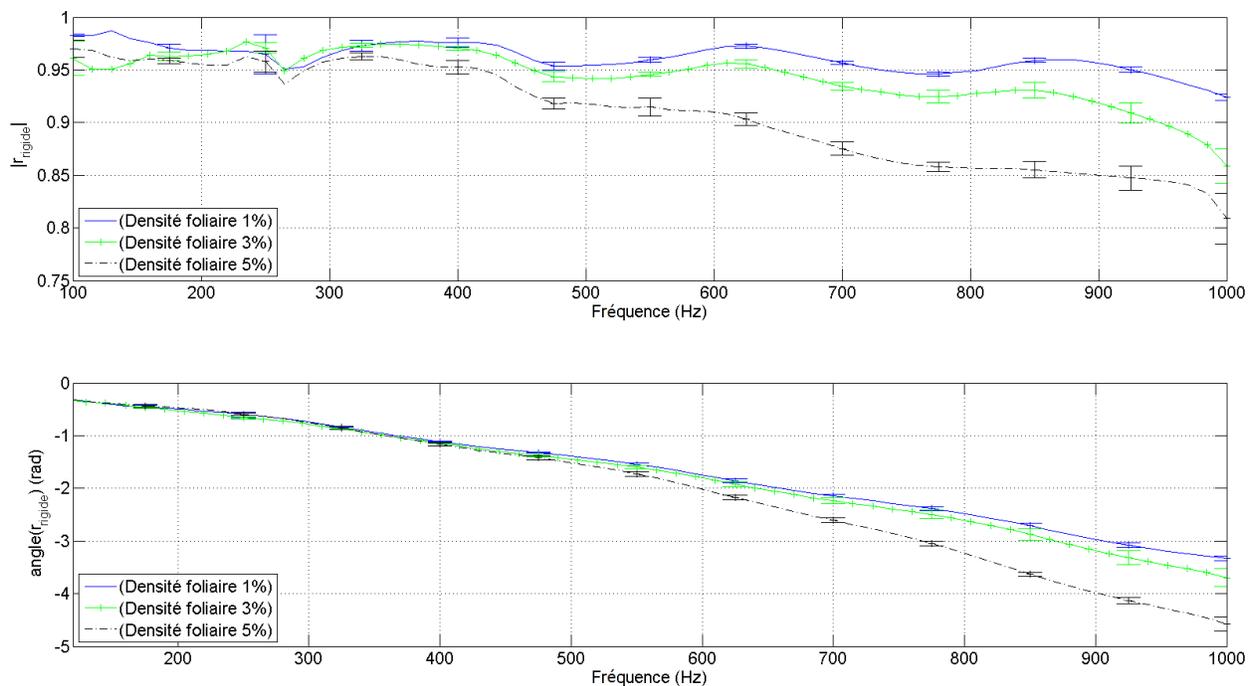


FIGURE 3.35 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence mesuré sur un échantillon de laurier d'épaisseur 8 cm pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire (terminaison rigide)

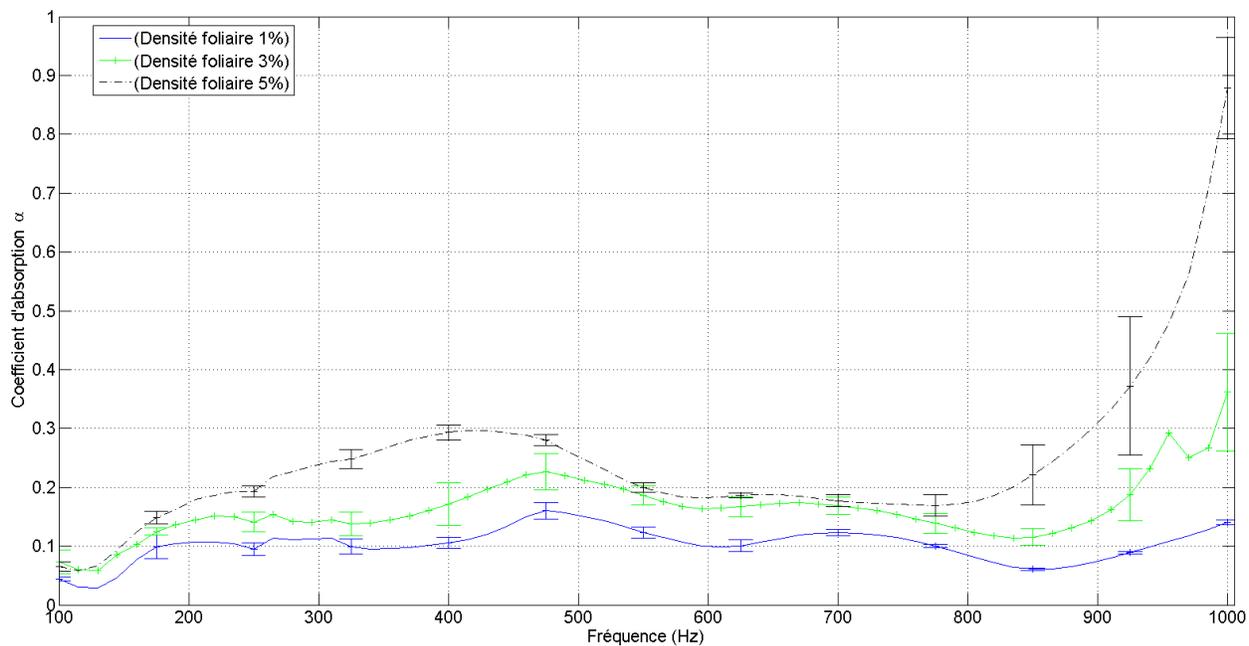


FIGURE 3.36 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence mesuré sur un échantillon de laurier d'épaisseur 16 cm pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

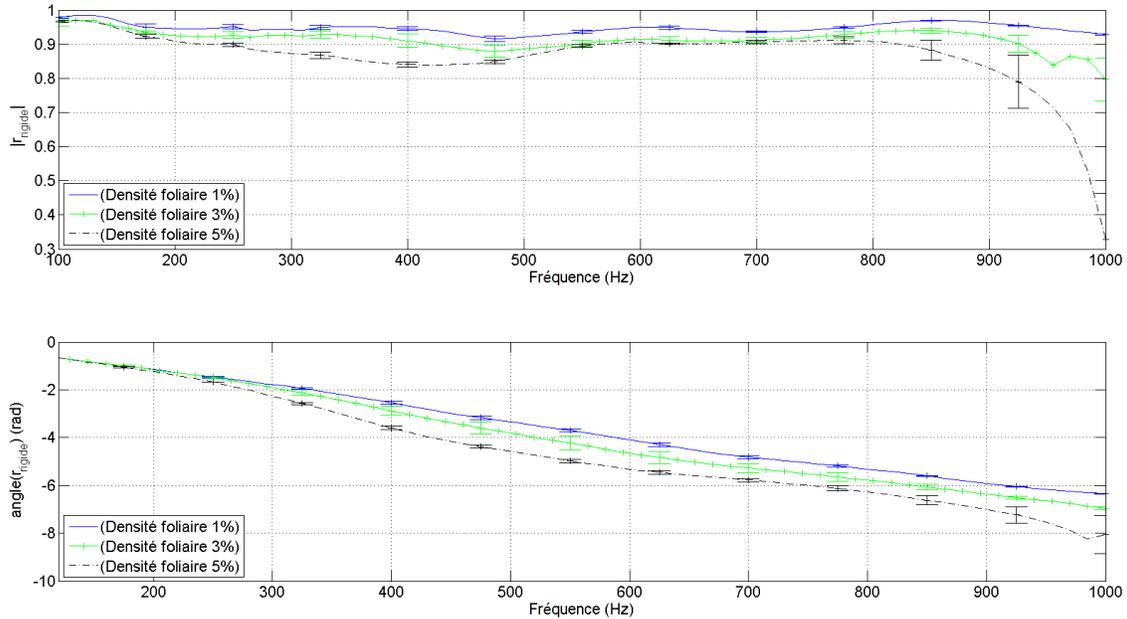


FIGURE 3.37 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence mesuré sur un échantillon de laurier d’épaisseur 16 cm pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire (terminaison rigide)

Les échantillons d’épaisseur 8 cm de densité foliaire 5% présentent une absorption significative de 0,1 à 100 Hz à 0,5 à 1000 Hz. La mesure réalisée pour 1% de densité foliaire sur les échantillons d’épaisseur 16 cm confirment également que les effets d’absorption ne sont pas significatifs pour ce pourcentage. Néanmoins, l’accroissement de la densité foliaire permet d’obtenir une absorption plus élevée, typiquement 0,3 à 250 Hz pour une densité foliaire de 5%. Les absorptions acoustiques obtenues pour le laurier sont plus faibles que pour le fusain. En ce qui concerne la répétabilité des mesures, les écart-types sur l’absorption et la réflexion acoustique ne sont globalement pas très élevés d’une mesure à une autre sauf au voisinage des résonances de l’échantillon (voir § 3.7). Un comportement anormal des coefficients acoustiques en hautes fréquences est cependant mis en évidence.

A l’heure actuelle nous ne pouvons pas affirmer avec certitude l’origine de ce phénomène. Cependant deux possibilités pouvant justifier ce résultat sont proposées :

- La présence d’un mode d’ordre supérieur à mesures que la densité foliaire augmente, venant se superposer avec le mode plan, ce qui pourrait expliquer l’allure des déformées obtenues (voir §.3.6).
- La présence d’une résonance à la fréquence correspondante à $\frac{3\lambda}{4}$.

3.5.2 Coefficients de réflexion et de dissipation de paroi en terminaison anéchoïque

Le coefficient de réflexion acoustique du feuillage en terminaison anéchoïque peut être calculé à partir des paramètres acoustiques effectifs et de l'Eq. (2.39) (voir § 2.3.3). Les Figs. 3.38 à 3.41 présentent l'évolution de ce paramètre en fonction de la fréquence pour le fusain et le laurier et pour des épaisseur de 8 et 16 cm. La Fig. 3.38 montre que le module du coefficient de réflexion augmente de façon régulière avec la fréquence pour l'échantillon de fusain d'épaisseur 8 cm. Les valeurs obtenues varient de 0,05 à 100 Hz à 0,25 à 800 Hz pour 1% de densité foliaire, et de 0,18 à 100 Hz jusqu'à 0,43 à 490 Hz pour 5% de densité foliaire. Les courbes obtenues sur un échantillon de laurier d'épaisseur de 8 cm (Fig. 3.40) conservent une tendance identique avec un léger décalage des maxima de réflexion vers les basses fréquences lorsque la densité foliaire augmente.

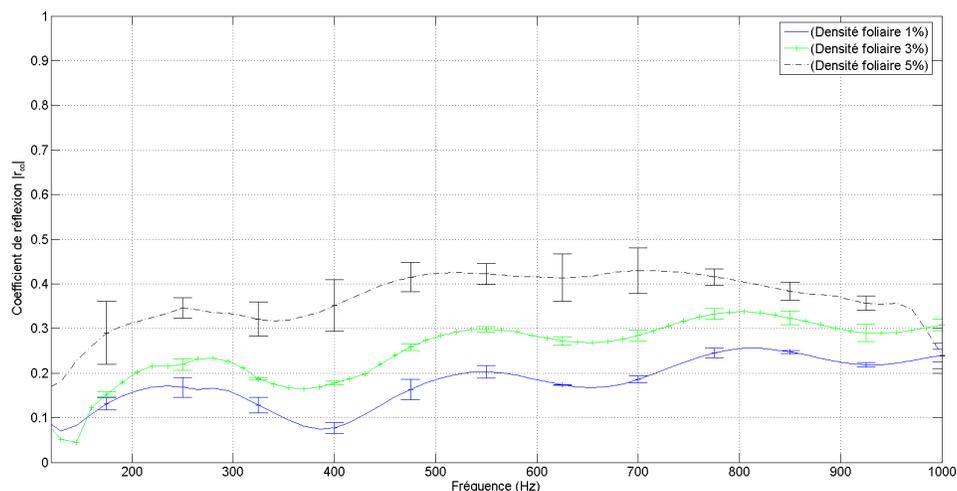


FIGURE 3.38 – Variation du module du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence calculé pour des échantillons de fusain d'épaisseur 8 cm en terminaison anéchoïque pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

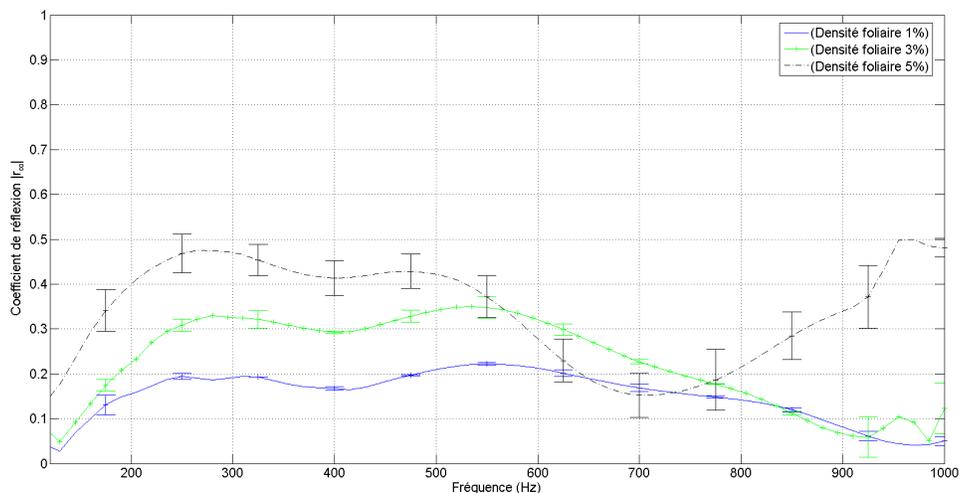


FIGURE 3.39 – Variation du module du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence calculé pour des échantillons de fusain d'épaisseur 16 cm en terminaison anéchoïque pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

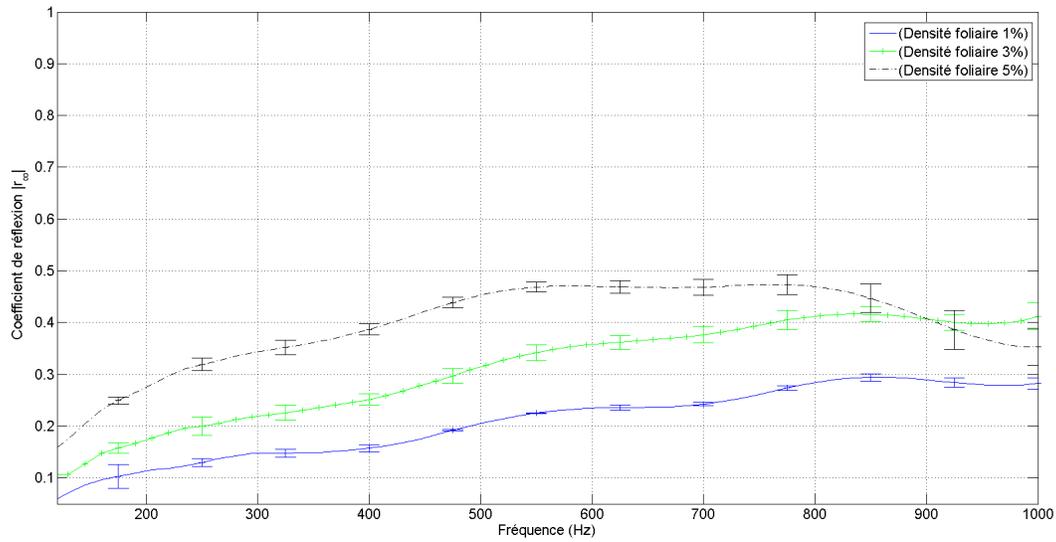


FIGURE 3.40 – Variation du module du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence calculé pour des échantillons de laurier d'épaisseur 8 cm en terminaison anéchoïque pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

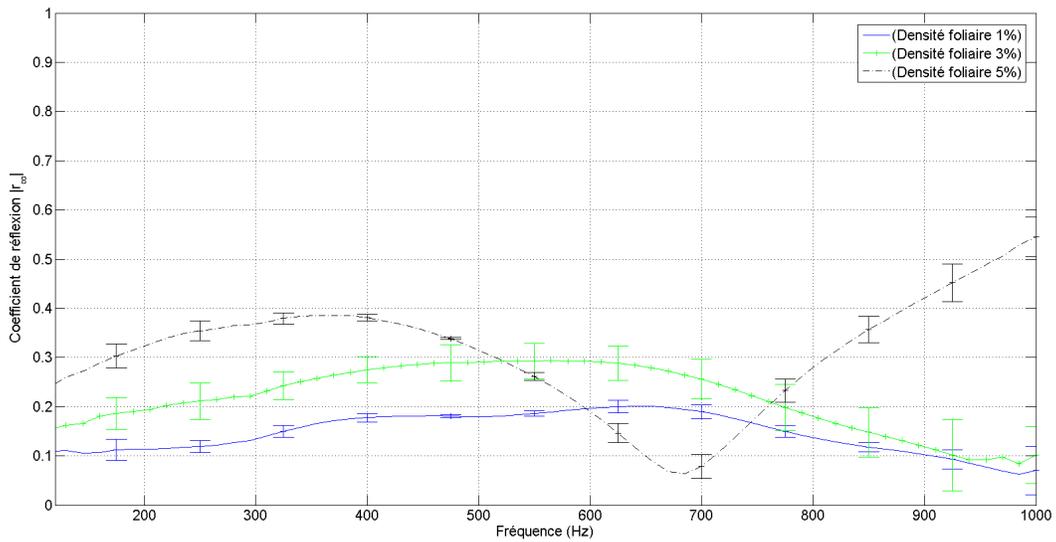


FIGURE 3.41 – Variation du module du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence calculé pour des échantillons de laurier d'épaisseur 16 cm en terminaison anéchoïque pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

L'accroissement de l'épaisseur de 8 à 16 cm modifie considérablement le comportement du coefficient de réflexion de par la présence du mode de résonance de la paroi en demi-longueur d'onde dans la gamme de fréquence étudiée (Fig. 3.39). Ce phénomène qui apparaît à 980, 950 et 770 Hz pour des densités foliaires respectives de 1, 3 et 5%, se manifeste par une forte diminution du coefficient de réflexion qui traduit la transparence associée à la résonance de la paroi en demi longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$. Un comportement similaire est obtenu dans le cas du laurier (Figs. 3.41) avec des résonances de parois situées à 980, 900 et 680 Hz pour les densités foliaires respectives de 1, 3 et 5%.

Le coefficient de dissipation acoustique de la paroi en terminaison anéchoïque (cf. § 2.3.3) représente le taux d'énergie absorbée par la paroi qui n'est donc ni transmise⁴ ni réfléchi. Les Figs. 3.42 à 3.44 présentent l'évolution du coefficient de dissipation avec la fréquence pour des parois de fusain (8 et 16 cm d'épaisseur) et de laurier (16 cm d'épaisseur). Les résultats sur le laurier d'épaisseur 8 cm ne sont pas présentés car la dissipation y est trop faible. Globalement, les coefficients de dissipation obtenus sont 2 à 3 fois plus faibles que les coefficients d'absorption obtenus en terminaison rigide. Ce résultat est logique dans la mesure où le réflecteur arrière oblige l'onde à traverser au minimum deux fois la paroi, ce qui augmente l'énergie dissipée. On remarque également qu'aucun effet particulier n'est observé sur le coefficient de dissipation aux fréquences correspondant aux fréquences de résonances de paroi en demi-longueur d'onde.

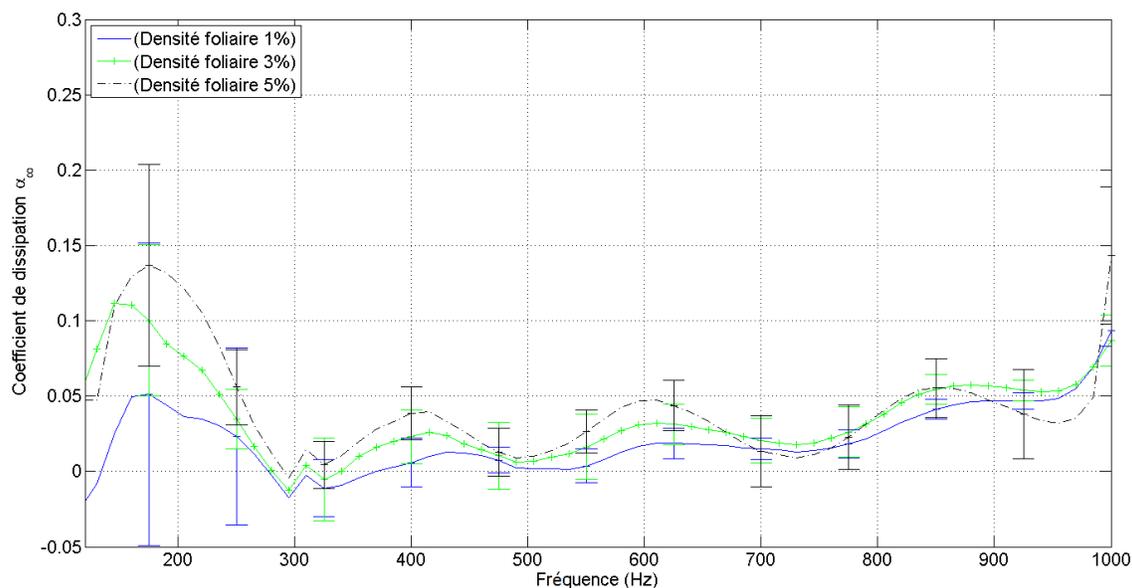


FIGURE 3.42 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence calculé pour des échantillons de fusain d'épaisseur 8 cm en terminaison anéchoïque pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

4. La transmission du son à travers le feuillage étant très proche de 1, cette grandeur n'a pas été représentée.

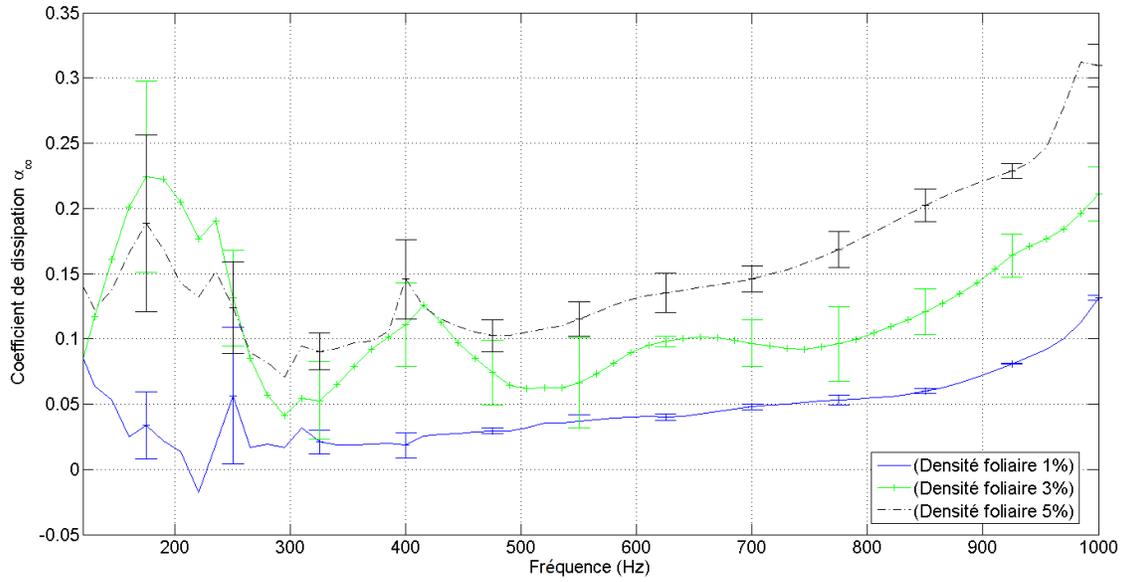


FIGURE 3.43 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence calculé pour des échantillons de fusain d'épaisseur 16 cm en terminaison anéchoïque pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

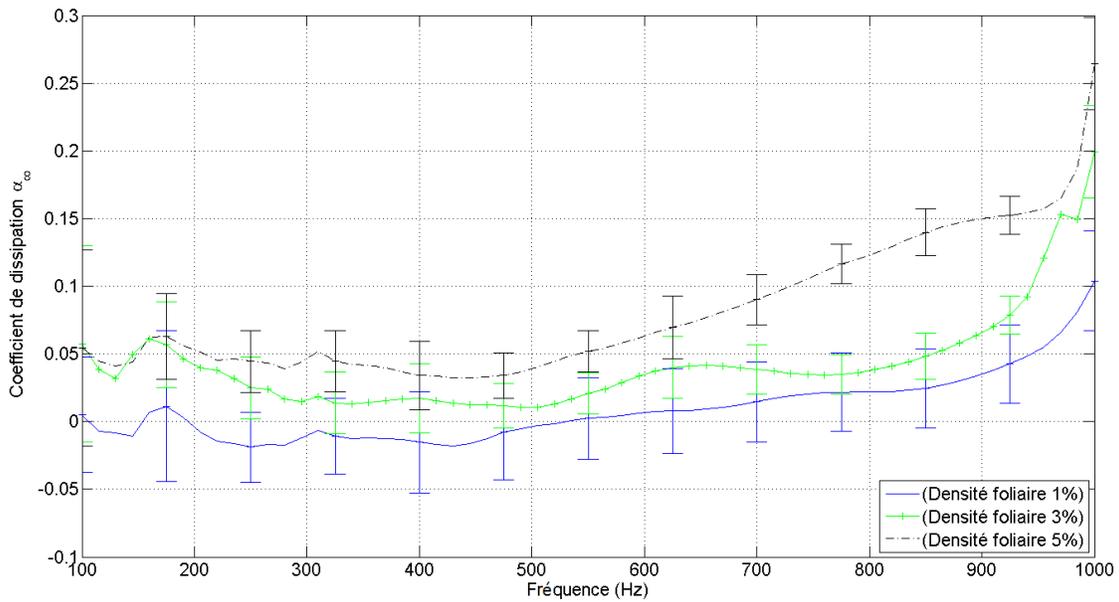


FIGURE 3.44 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence calculé pour des échantillons de laurier d'épaisseur 16 cm en terminaison anéchoïque pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

3.6 Caractérisations vibratoire et acoustique d'échantillons de feuillage

Le dispositif couplant mesures acoustique et vibratoire présenté au chapitre 2 est utilisé pour caractériser la vitesse vibratoire de la surface d'un échantillon de fusain japonais en condition de face arrière rigide (terminaison en Téflon). L'épaisseur de l'échantillon est de 8 cm et les différentes densités foliaires sont de 1%, 3% et 5%. Les mesures sont réalisées dans la même plage fréquentielle que précédemment.

Les Figs. 3.45 à 3.47 présentent respectivement les variations de l'impédance de surface Z_s (amplitude et phase), du coefficient de réflexion (amplitude et phase) et du coefficient d'absorption (cf. § 2.3.3) en fonction de la fréquence pour un seul échantillon de feuillage et des densités foliaires de 1%, 3% et 5%. De manière générale, le coefficient d'absorption augmente sur l'ensemble de la gamme de fréquence. Ces valeurs sont comparables aux coefficients d'absorption les plus élevés obtenus dans le projet européen HOSANNA [82] pour des échantillons de plantes d'épaisseurs et de densité foliaires similaires (cf. Fig. 1.22).

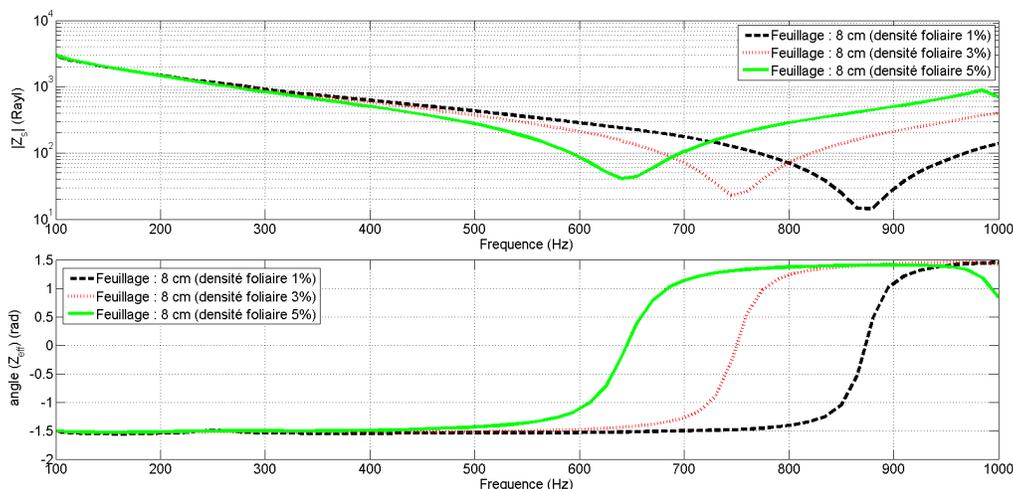


FIGURE 3.45 – Module et phase de l'impédance de surface d'un échantillon de fusain de 8 cm d'épaisseur pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

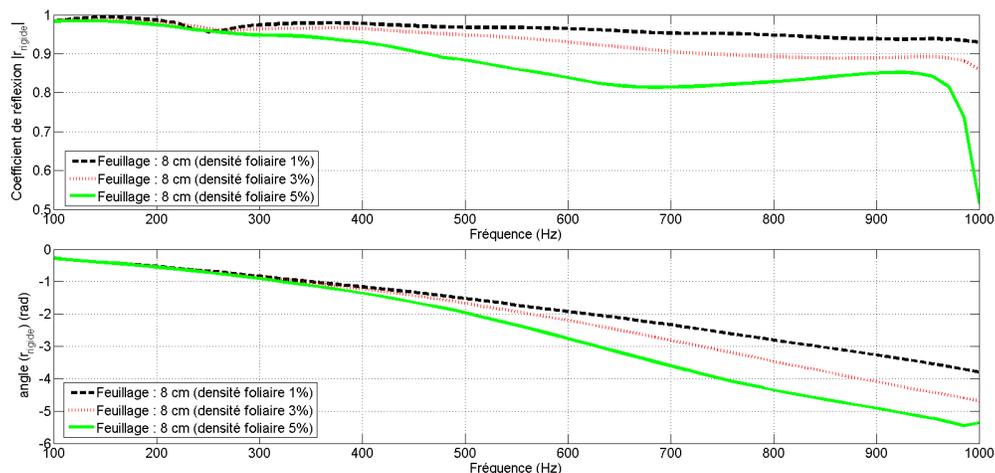


FIGURE 3.46 – Module et phase du coefficient de réflexion d'un échantillon de fusain de 8 cm d'épaisseur pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

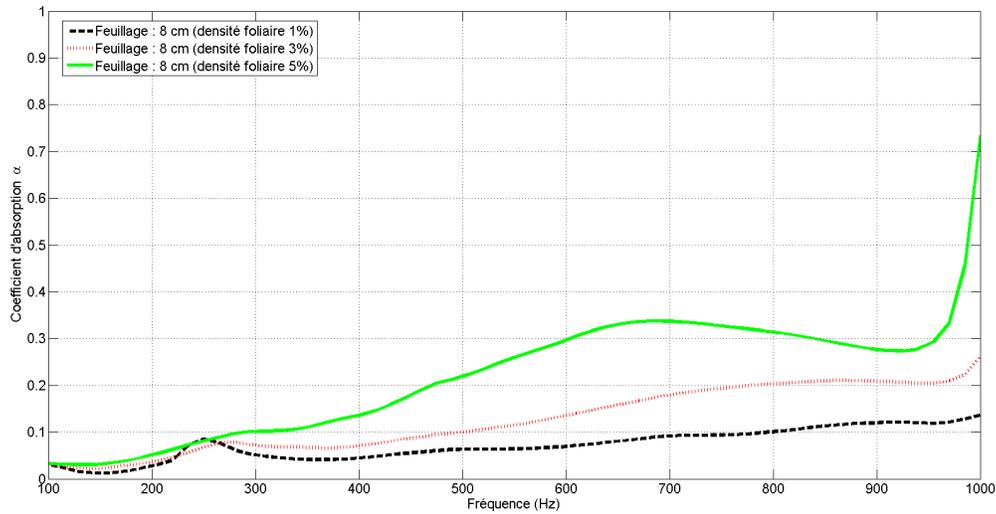


FIGURE 3.47 – Coefficient d'absorption d'un échantillon de fusain de 8 cm d'épaisseur pour 1%, 3% et 5% de densité foliaire

Le spectre de la vitesse vibratoire normale moyenne de tous les points de la surface est présentée à la Fig. 3.48 pour les trois densités foliaires.

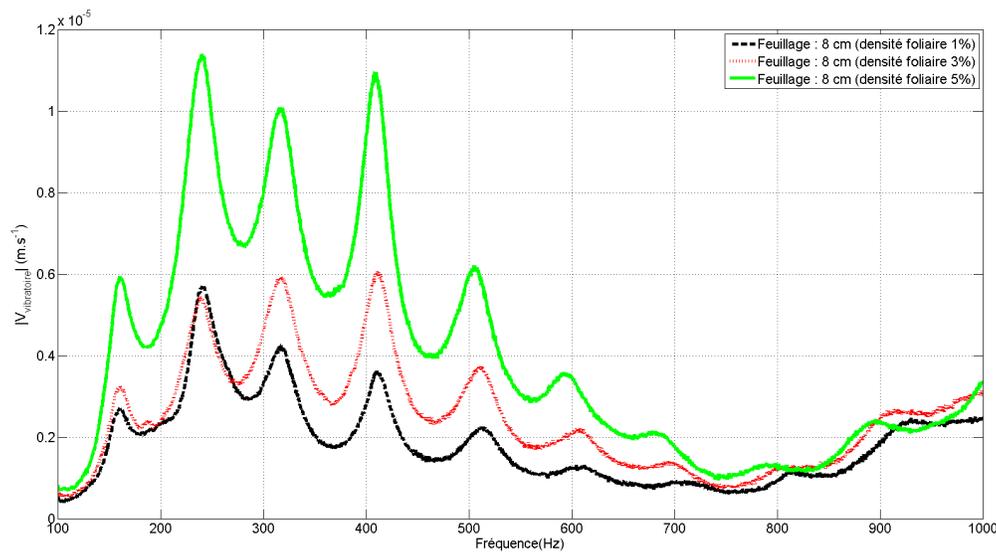


FIGURE 3.48 – Spectre de la moyenne du module de la vitesse vibratoire (non normalisée) de la surface de l'échantillon de fusain d'épaisseur 8 cm

Comme montré précédemment (§ 2.4.3), les pics de résonance régulièrement espacés correspondent aux modes de résonance de la colonne d'air. La normalisation par rapport à la vitesse vibratoire dans l'air à la surface (Fig. 3.49) met en évidence les résonances de l'échantillon à 930 Hz, 830 Hz et 662 Hz (très amortie) pour des densités foliaires de 1%, 3% et 5% respectivement.

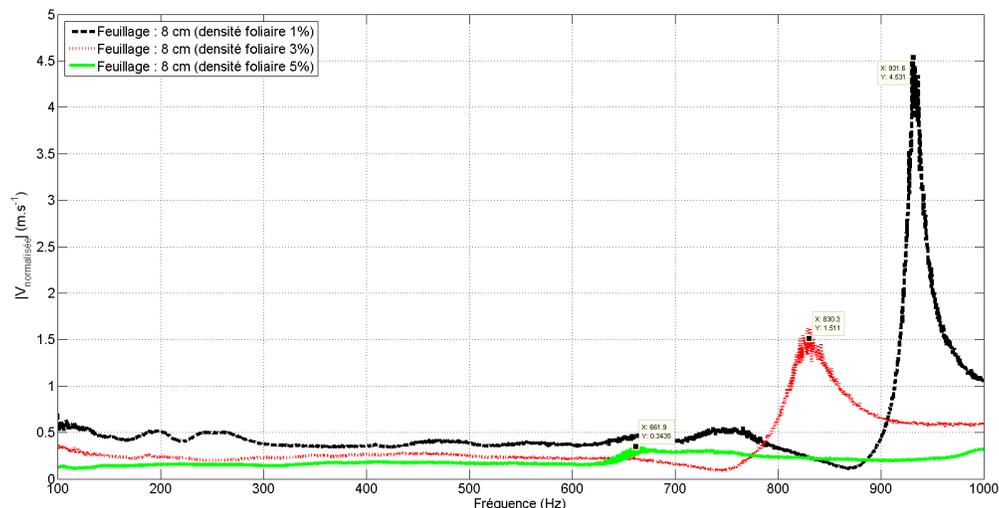


FIGURE 3.49 – Spectre de la moyenne du module de la vitesse vibratoire de la surface de l'échantillon de fusain d'épaisseur 8 cm

Les déformées (Fig. 3.50) suggèrent qu'il s'agit d'un mode (0,2) dont l'amplitude vibratoire et la fréquence de résonance diminuent quand la densité foliaire augmente. Cependant, seule la résonance à 662 Hz (densité foliaire de 5%) coïncide avec les extréma des modules de l'impédance de surface, des coefficients de réflexion et d'absorption et avec une forte variation de la phase de l'impédance de surface. Pour les autres densités foliaires, les fortes variations des coefficients acoustiques avec la fréquence ne sont pas directement corrélées aux résonances de l'échantillon.

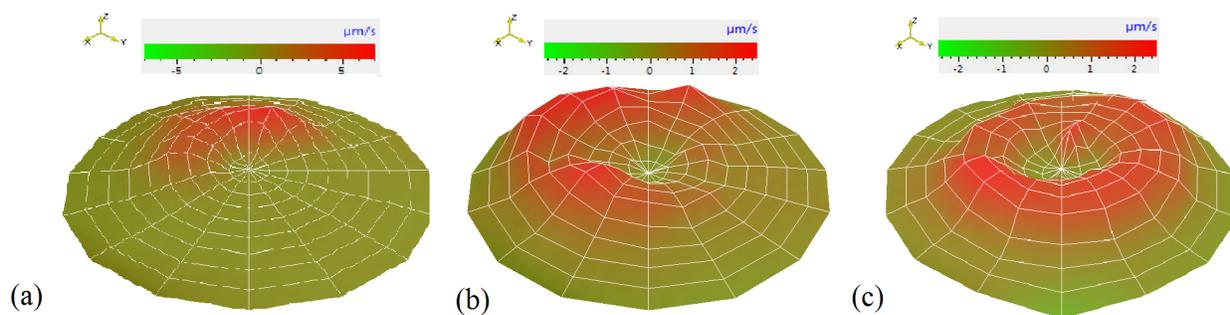


FIGURE 3.50 – Champ de vitesse vibratoire de la surface de l'échantillon de fusain d'épaisseur 8 cm aux fréquences et densités foliaires : (a) 930 Hz (1%), (b) 830 Hz (3%) et (c) 662 Hz (5%).

3.7 Calcul des coefficients acoustiques des parois à partir des propriétés effectives

Les résultats obtenus dans les précédents chapitres ont montré que le feuillage pouvait être représenté comme un milieu effectif homogène et symétrique, quelle que soit la densité foliaire. Dans cette partie, la possibilité de prévoir les coefficients acoustiques de paroi (absorption, réflexion, dissipation), à partir des paramètres effectifs déterminés précédemment (impédance et nombre d'onde effectif) est étudiée. Elle repose sur la comparaison des mesures des coefficients acoustiques pour des échantillons de feuillage d'épaisseur 16 cm, avec les coefficients calculés à partir des paramètres effectifs obtenus pour une épaisseur de 8 cm. La matrice de transfert globale de 16 cm est soit calculée directement à partir des paramètres effectifs mesurés sur cette même épaisseur, soit déduite de la mise en série de deux matrices de transfert caractérisées sur des échantillons de 8 cm⁵. Le cas d'une densité foliaire de 5% est représenté aux Figs. 3.51 à 3.53.

Trois observations découlent de cette comparaison :

- les tendances globales obtenues avec les deux méthodes de calcul sont en bon accord avec les mesures réalisées pour une densité foliaire de 5% pour les fréquences comprises entre 200 Hz et 950 Hz,
- comme attendu, l'accord entre mesure et estimation est meilleur lorsque l'épaisseur de l'échantillon caractérisé coïncide avec l'épaisseur utilisée pour déterminer les constantes effectives.
- les estimations obtenues pour 1% et 3% de densité foliaires (voir annexe E) sont moins précises que celles obtenues pour 5% mais restent tout de même acceptables.

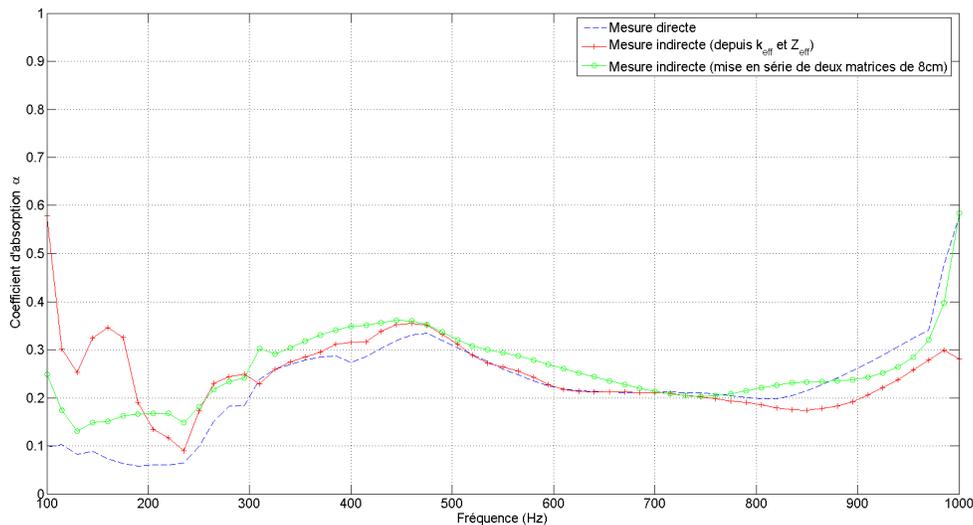


FIGURE 3.51 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence pour un échantillon de fusain d'épaisseur 16 cm en terminaison rigide pour 5% de densité foliaire (trois techniques de mesures)

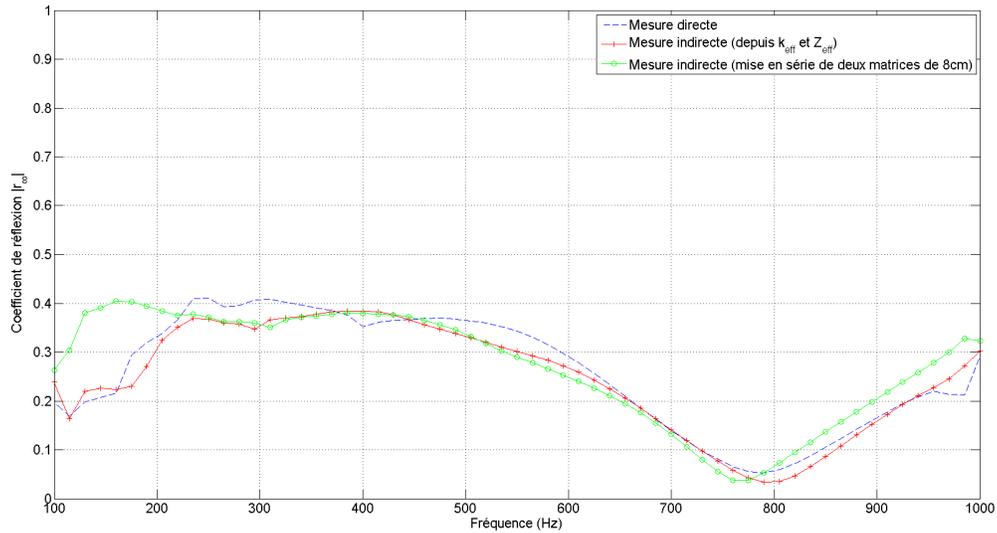


FIGURE 3.52 – Variation du coefficient de réflexion avec la fréquence pour un échantillon de fusain d'épaisseur 16 cm en terminaison anéchoïque pour 5% de densité foliaire (trois techniques de mesures)

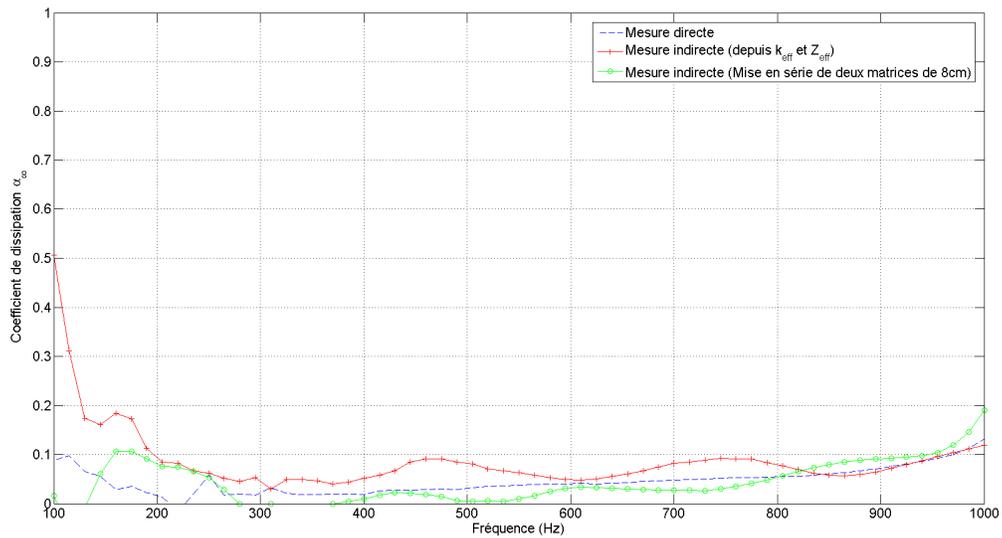


FIGURE 3.53 – Variation du coefficient de dissipation avec la fréquence pour un échantillon de fusain d'épaisseur 16 cm en terminaison anéchoïque pour 5% de densité foliaire (trois techniques de mesures)

3.8 Conclusion du chapitre

Les mesures acoustiques et vibratoires conduites dans ce chapitre permettent d'identifier plusieurs mécanismes physiques importants de l'interaction onde acoustique-feuillage dans la gamme [200-1000 Hz].

- Le milieu constitué par l'ensemble air-feuillage présente des propriétés acoustiques effectives variant peu pour le type de feuillage étudié avec la fréquence dans la bande [200 Hz-1000 Hz]. L'onde s'y propageant peut être considérée comme non dispersive. Ce milieu est caractérisé par une augmentation importante de la masse volumique (qui peut atteindre trois fois celle de l'air) et une quasi-stabilité de la compressibilité adiabatique. L'effet principal du feuillage sur la propagation est donc un effet de masse ajoutée due à la vibration des feuilles qui se couple à l'onde aérienne.
- L'inertie apportée par la vibration des feuillages conduit à un ralentissement de l'onde acoustique. Sa célérité diminue avec l'accroissement de la densité foliaire : de 330 m s^{-1} dans l'air à 290, 260 et 240 m s^{-1} environ pour des densités foliaires de 1, 3 et 5 % respectivement. Les deux types de feuillage étudiés présentent une évolution similaire de la célérité avec la densité foliaire.
- L'effet combiné de l'augmentation de la masse volumique et de la diminution de la célérité avec la densité foliaire conduit globalement à une augmentation de l'impédance effective du milieu. Ainsi, par exemple l'impédance effective voisine de 400 Rayl dans l'air atteint 620 Rayl dans le fusain et 720 Rayl dans le laurier pour une densité foliaire de 5 %.
- L'atténuation augmente également avec la densité foliaire : de 0,19 à $0,6 \text{ Np m}^{-1}$ pour le fusain et de 0,45 à $0,8 \text{ Np m}^{-1}$ pour le laurier. Les valeurs des célérités effectives mesurées indiquent que les facteurs de pertes associés à cette atténuation sont compris entre 4 et 10 %. Par ailleurs, les résonances mécaniques des feuillages dans cette gamme de fréquences présentent des coefficients de qualité de l'ordre de 50 soit des facteurs de pertes de 2 %. Cette comparaison suggère que l'atténuation dans le feuillage ne provient pas uniquement de la vibration des feuilles pour la gamme de fréquence étudiée.

Les deux méthodes développées au chapitre précédent ont été mises en œuvre pour caractériser les coefficients acoustiques (réflexion, absorption, transmission, dissipation, impédance de surface) d'échantillons de feuillages de fusain et de laurier en condition de terminaison arrière rigide ou anéchoïque.

Les coefficients d'absorption acoustique mesurés augmentent avec la densité foliaire et avec l'épaisseur de l'échantillon. Ils présentent des valeurs similaires à celles reportées dans la littérature (0,6 à 800 Hz pour une densité foliaire de 5%) (cf. Fig 1.22 [82]). Les résonances de l'échantillon de feuillage sont visibles sur les spectres du coefficient de réflexion, de l'impédance de surface et de l'amplitude vibratoire moyenne de la surface de l'échantillon. Elles ne sont cependant pas clairement corrélées aux augmentations rapides du coefficient d'absorption comme dans le cas des échantillons de mousse de mélamine (chapitre 2).

Globalement, les résultats des mesures directes des coefficients acoustiques et de leur estimation à partir de la mesure de la matrice de transfert sont en bon accord, y compris lorsque l'échantillon à caractériser a une épaisseur différente de celle de l'échantillon utilisé pour identifier les paramètres effectifs du milieu. De ce fait, ces paramètres effectifs peuvent constituer une base de données pour estimer et optimiser les coefficients acoustiques de parois végétalisées composites (cf. chapitre 4).

Caractérisation des propriétés effectives et des paramètres acoustiques d'échantillons de substrat

Sommaire

4.1	Introduction	104
4.2	Propriétés effectives des substrats	104
4.2.1	Cas de la Fibre de coco	104
4.2.2	Cas de la Perlite	110
4.2.3	Cas de la Tourbe de coco	115
4.3	Mesure des coefficients acoustiques des échantillons de substrats	120
4.3.1	Cas de la fibre de coco	120
4.3.2	Cas de la perlite	123
4.3.3	Cas de la tourbe de coco	125
4.4	Conclusion du chapitre	128

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux propriétés effectives et aux paramètres acoustiques de trois types de substrats : la perlite, la fibre de coco et la tourbe de coco. Ces substrats considérés ont été fournis par le Laboratoire de Recherche Centrale (LRC) situé à Nara (Japon) dans le cadre d'une collaboration. Ce chapitre est organisé en deux parties :

- La première partie présente les propriétés effectives (cf. §2.3.3 , chapitre 2) mesurés sur les trois types de substrats,
- La seconde partie décrit la mesure des coefficients acoustiques (cf. §2.3.3, chapitre 2) réalisées pour différentes densités et épaisseurs de substrat.

Les mesures sont répétées pour cinq arrangements différents pour chaque échantillon. Les figures présentent la moyenne et l'écart-type de ces cinq mesures. Pour éviter de surcharger le chapitre, seuls les résultats relatifs à 16 cm d'épaisseur sont présentés. D'autres caractérisations en fonction du taux d'humidité sont présentés en Annexe F.

4.2 Propriétés effectives des substrats

4.2.1 Cas de la Fibre de coco

Cette fibre végétale est issue du fruit du cocotier. Il s'agit de la protection qui entoure la noix de coco sous la coque lisse. Ce type de matériau possède les propriétés suivantes :

- une bonne isolation thermique,
- une imputrescibilité naturelle et une bonne protection vis à vis des champignons et des insectes,
- une bonne teneur à l'humidité et une capacité à sécher rapidement après avoir été mouillé.

Les paramètres effectifs de la fibre de coco ont été estimés pour trois densités fibreuses (15, 30 et 65%) et deux épaisseurs (8 et 16 cm). Un exemple d'échantillon de fibre introduit dans le tube est présentée à la Fig. 4.1. Les différentes proportions de fibre dans le porte-échantillon sont données au tableau 4.1.

Epaisseur	8 cm			16 cm		
Fraction volumique de fibre	15%	30%	65%	15%	30%	65%
Masse (g)	25	50	110	50	100	220

TABLEAU 4.1 – Masse de fibre de coco et fraction volumique de fibre (appelée densité fibreuse) pour différentes épaisseurs d'échantillons



FIGURE 4.1 – Échantillon de fibre de coco de densité fibreuse 65% et d'épaisseur 16 cm

Matrice de transfert des échantillons de fibre de coco

Les paramètres de la matrice de transfert de l'échantillon constitué de 65% de fibre de coco et d'épaisseur 16 cm sont présentés aux Figs. 4.2 et 4.3¹. La Fig. 4.2 montre clairement que les paramètres T_{11} et T_{22} sont identiques et donc que la fibre de coco peut être considérée comme un matériau symétrique. Les valeurs de T_{11} et T_{22} relatives aux autres échantillons montrent que l'échantillon reste symétrique quelle que soit la densité fibreuse ou l'épaisseur.

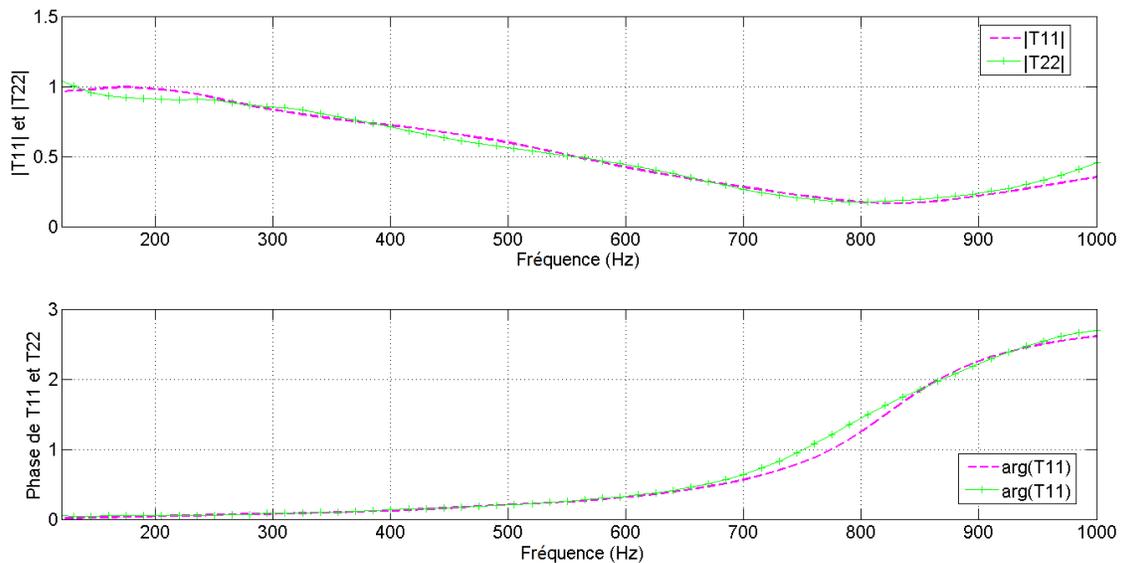


FIGURE 4.2 – Variation des module et phase des paramètres T_{11} et T_{22} avec la fréquence d'un échantillon de fibre de coco d'épaisseur 16 cm et de densité fibreuse 65%

1. Les paramètres T_{12} et T_{21} sont représentés à titre indicatif, mais ne permettent pas d'apporter des informations supplémentaires quant aux propriétés de la fibre de coco. Ces paramètres sont juste nécessaires pour la détermination de l'impédance effective)

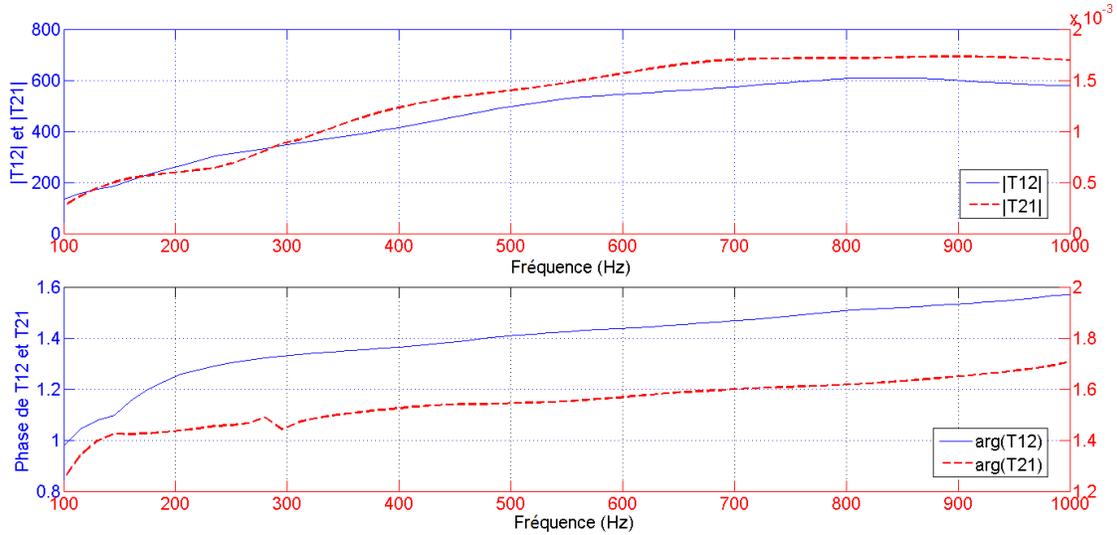


FIGURE 4.3 – Variation des module et phase des paramètres T_{12} et T_{21} avec la fréquence d'un échantillon de fibre de coco d'épaisseur 16 cm et de densité fibreuse 65%

Évolution du nombre d'onde effectif en fonction de la densité de fibre de coco

Le nombre d'onde effectif est déduit des paramètres de la matrice de transfert à partir de l'Eq. (2.47). Deux cas de figure sont examinés : l'évolution de ce paramètre lorsque l'épaisseur varie et que la densité fibreuse reste constante (Fig. 4.4) et celle lorsque l'épaisseur est fixée et que la densité fibreuse varie (Fig. 4.5).

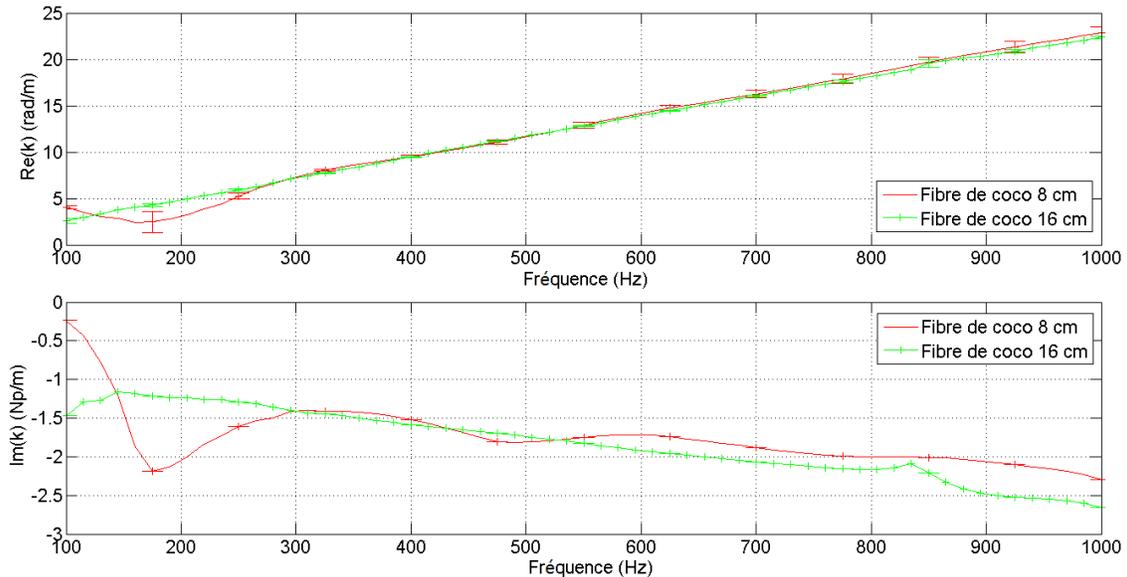


FIGURE 4.4 – Variation des parties réelle et imaginaire du nombre d'onde avec la fréquence pour des échantillons de fibre de coco de 8 cm et 16 cm d'épaisseur et de 65% de densité fibreuse

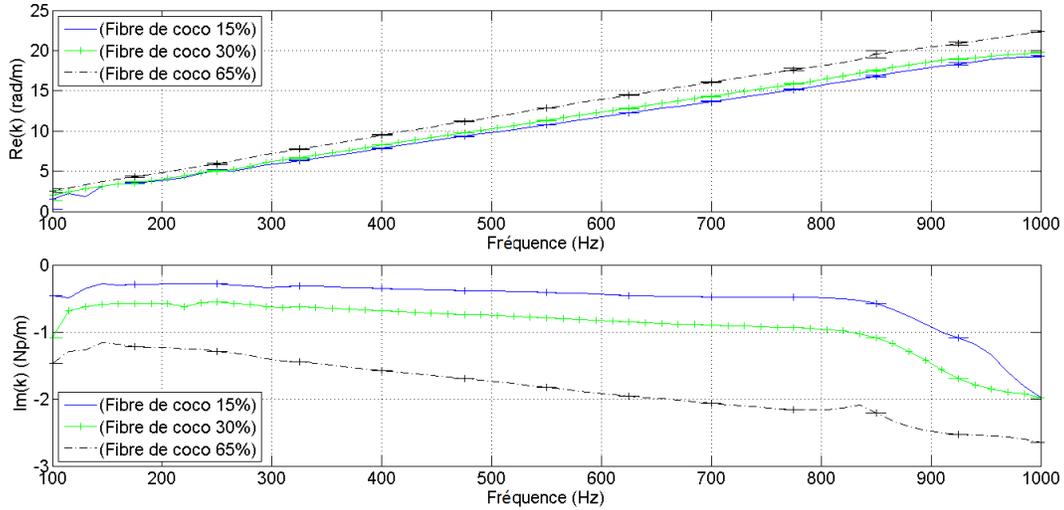


FIGURE 4.5 – Variation des parties réelle et imaginaire du nombre d’onde effectif avec la fréquence pour un échantillon de fibre de coco de 16 cm d’épaisseur et de densité fibreuse de 15%, 30% et 65%

Ces résultats (Fig. 4.4) montrent que pour une même densité, les nombres d’onde relatifs aux diverses épaisseurs sont globalement identiques sauf sur la bande [100 Hz-250 Hz]. D’autre part, la pente de la partie réelle augmente quand la densité de fibre augmente (Fig. 4.5). Nous pouvons noter que les résultats pour des densités fibreuses de 15% et 30% sont proches l’atténuation restant faible (inférieure à 1 Np m^{-1}) et quasi constante dans la bande [100 Hz-800 Hz]. Pour une densité fibreuse de 65%, l’atténuation est plus élevée et augmente continûment avec la fréquence.

Évolution de la célérité effective en fonction de la densité de fibre de coco

La célérité effective des échantillons de fibre de coco déduite du nombre d’onde est représentée en Fig. 4.6 pour les trois densités fibreuses.

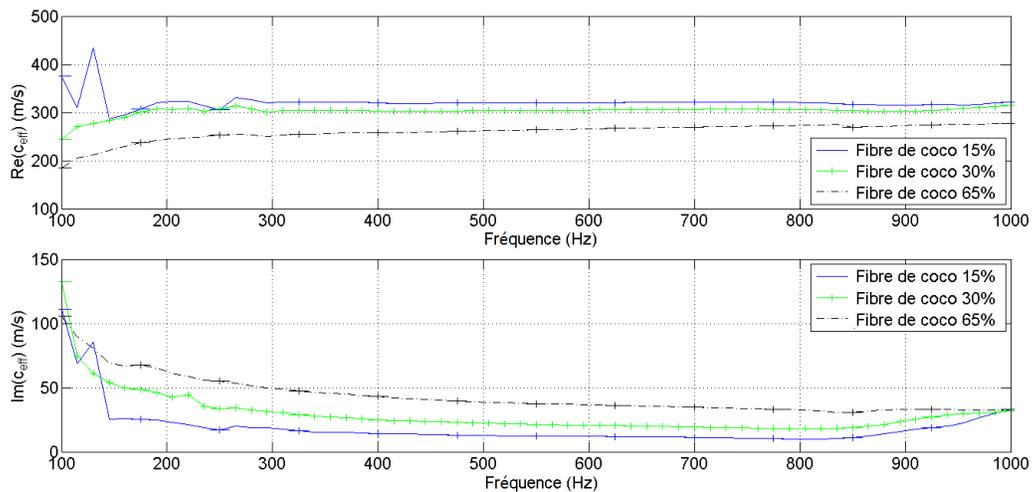


FIGURE 4.6 – Variation des parties réelle et imaginaire de la célérité effective avec la fréquence pour des échantillons de fibre de coco de 16 cm et de densité fibreuse 15%, 30% et 65%

Les résultats obtenus sont similaires à ceux du feuillage (cf §3.4.2, chapitre 3) : la fibre de coco apparaît comme un milieu non dispersif. La partie réelle de la célérité décroît avec la densité fibreuse pour atteindre environ 270 m s^{-1} pour une densité fibreuse de 65%. Le rapport de la partie imaginaire sur la partie réelle de la vitesse compris entre 5 et 25% est plus élevé que dans le cas du feuillage (qui variait entre 2 et 5%).

Évolution de l'impédance, de la masse volumique et de la compressibilité effectives de la fibre de coco en fonction de la densité fibreuse

L'impédance caractéristique effective et les parties réelles de la compressibilité et de la masse volumique effectives sont présentées aux Figs. 4.7, 4.8 et 4.9 respectivement. Les ordres de grandeurs de ces différents paramètres sont également comparables à ceux obtenus pour le feuillage (cf. §3.4.2 et §3.4.2 : augmentation de l'impédance caractéristique avec la densité fibreuse entre 450 et 600 Rayl; faible diminution de la compressibilité effective, accroissement important de la masse volumique effectives. Il convient cependant de noter que ces valeurs sont obtenus pour des densités fibreuses beaucoup plus importantes que les densités foliaires étudiées au chapitre 3. Nous pouvons également noter à 900 Hz, l'apparition d'une perturbation au niveau de la mesure pouvant être liée à l'apparition d'un mode d'ordre supérieur.

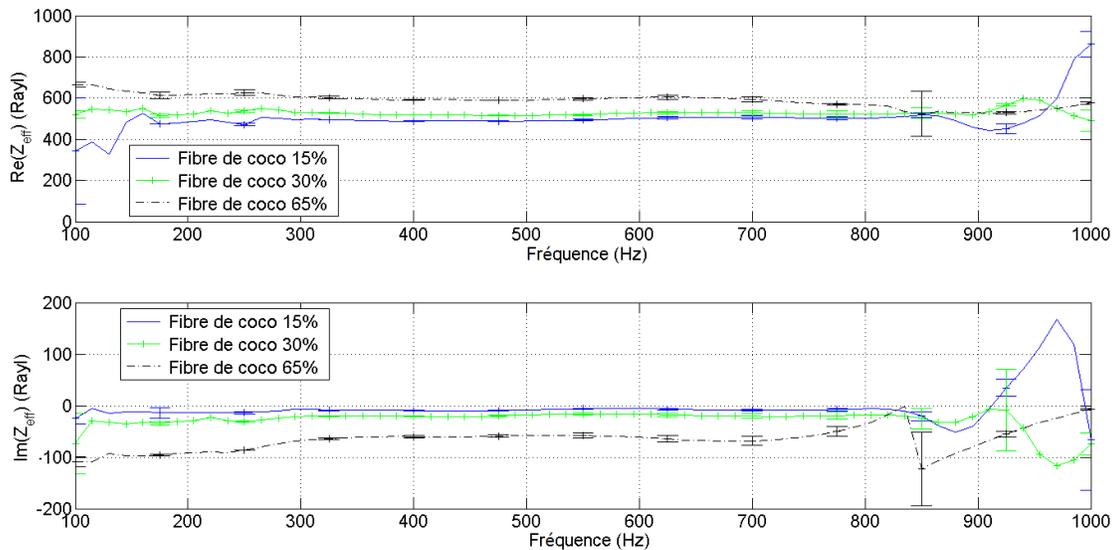


FIGURE 4.7 – Variation des parties réelle et imaginaire de l'impédance caractéristique effective de l'échantillon de fibre de coco d'épaisseur 16 cm et de densité fibreuse 15%, 30% et 65%

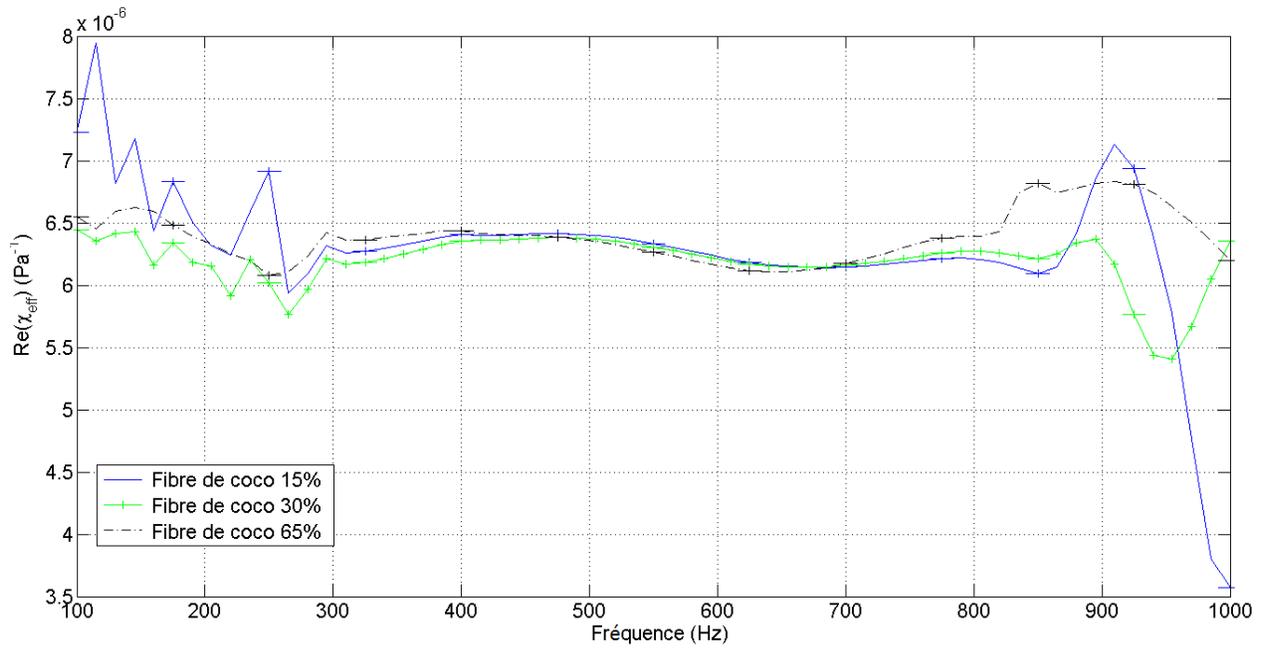


FIGURE 4.8 – Variation de la partie réelle de la compressibilité effective d'un échantillon de fibre de coco d'épaisseur 16 cm et de densité fibreuse 15%, 30% et 65%

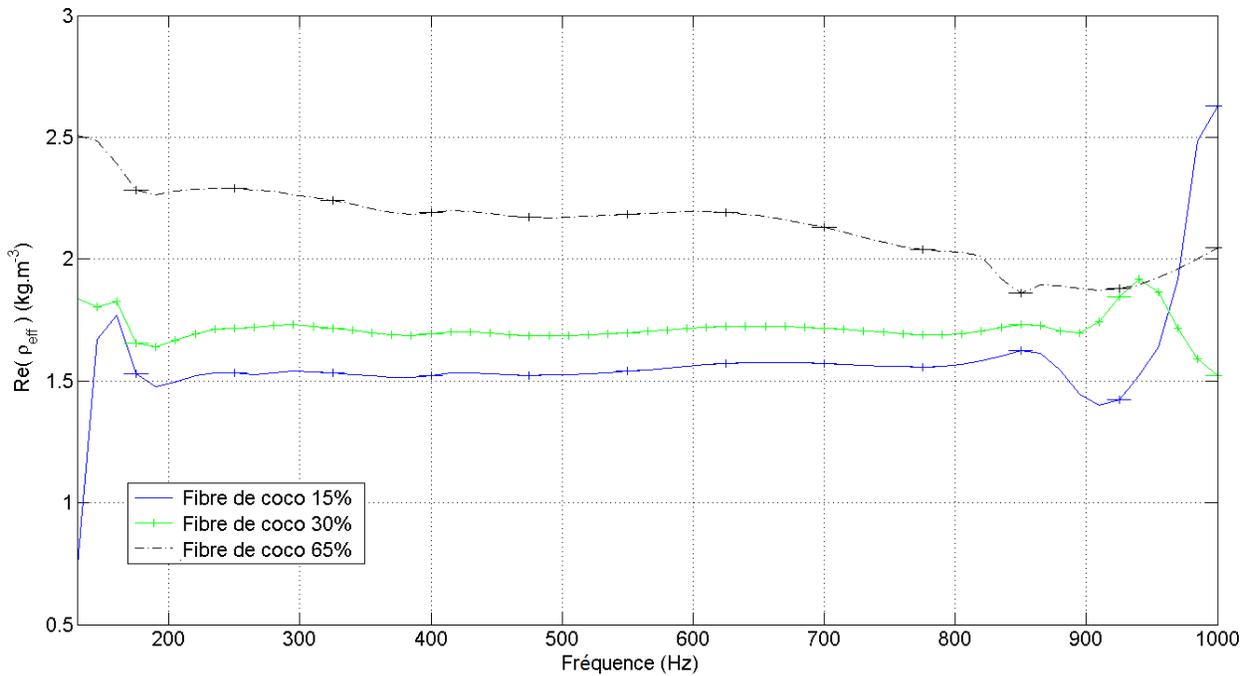


FIGURE 4.9 – Variation de la partie réelle de la masse volumique effective d'un échantillon de fibre de coco d'épaisseur 16 cm et de densité fibreuse 15%, 30% et 65%

4.2.2 Cas de la Perlite

La perlite est une roche volcanique silicieuse de couleur blanche concassée puis calibrée par granulométrie. Elle contient de l'eau expansée industriellement par un traitement thermique (1200 °C). Sur le plan chimique, elle est constituée de silice, d'alumine, d'oxyde de fer, d'oxyde de titane, de chaux, de magnésie, d'oxyde de sodium et de potassium. Sous l'effet de la chaleur, les grains de perlite augmentent de volume et une multitude de cavités fermées apparaissent à l'intérieur des grains. Elle a une très grande capacité de rétention d'eau (4 à 5 fois son poids). Elle est utilisée pure ou mixte pour la culture sur substrat.



FIGURE 4.10 – Échantillon de perlite d'épaisseur 16 cm

Les paramètres effectifs de la perlite sont évalués pour des épaisseurs de 8 cm et 16 cm, les échantillons remplissant intégralement le porte-échantillon (Fig. 4.10). Les masses mesurées pour les deux épaisseurs sont respectivement de 596 g et de 1186 g pour 8 et 16 cm. Ces valeurs sont équivalentes à une masse volumique de 300 kg m^{-3} environ.

Matrice de transfert des échantillons de perlite

Les paramètres de la matrice de transfert de l'échantillon de perlite d'épaisseur 16 cm sont présentés aux Figs. 4.11 et 4.12. La Fig. 4.11 montre que les paramètres T_{11} et T_{22} sont quasiment identiques pour les fréquences comprises entre 100 Hz et 600 Hz. Au delà de cette fréquence, une différence apparaît entre T_{11} et T_{22} qui croît avec la fréquence.

L'origine de cet effet est difficile à identifier. Elle pourrait être liée à une dissymétrie des surfaces avant et arrière de l'échantillon lorsqu'il est positionné horizontalement. Par ailleurs, les paramètres T_{11} et T_{22} présentent des allures en cosinus hyperbolique et non en cosinus, liées à la présence d'une atténuation élevée.

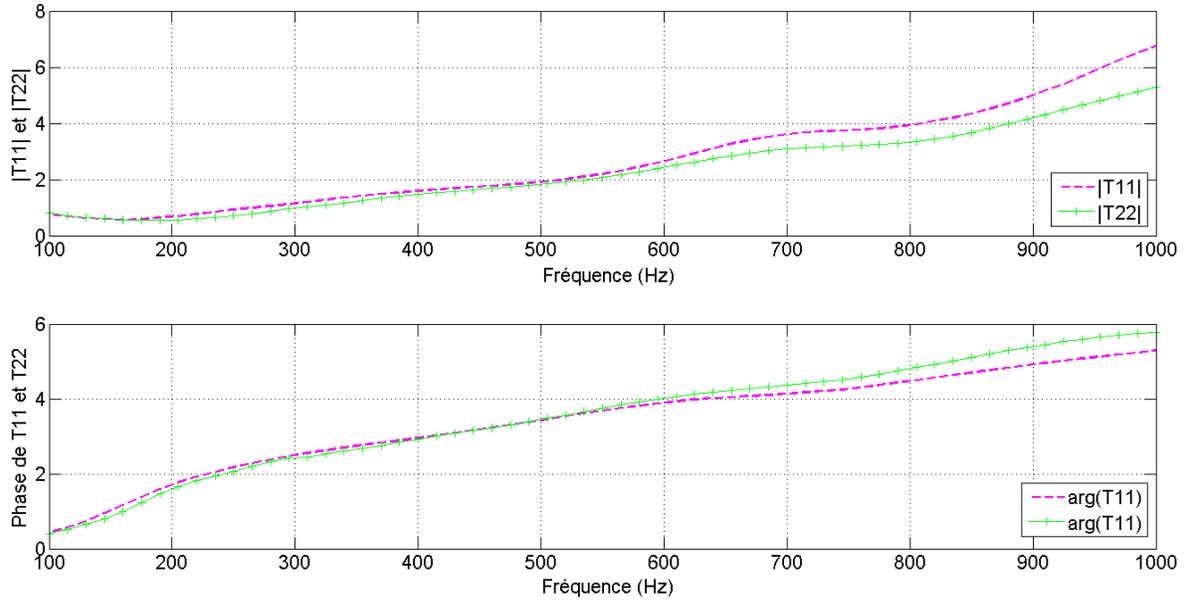


FIGURE 4.11 – Variation des module et phase des paramètres T_{11} et T_{22} avec la fréquence pour l'échantillon de perlite d'épaisseur 16 cm

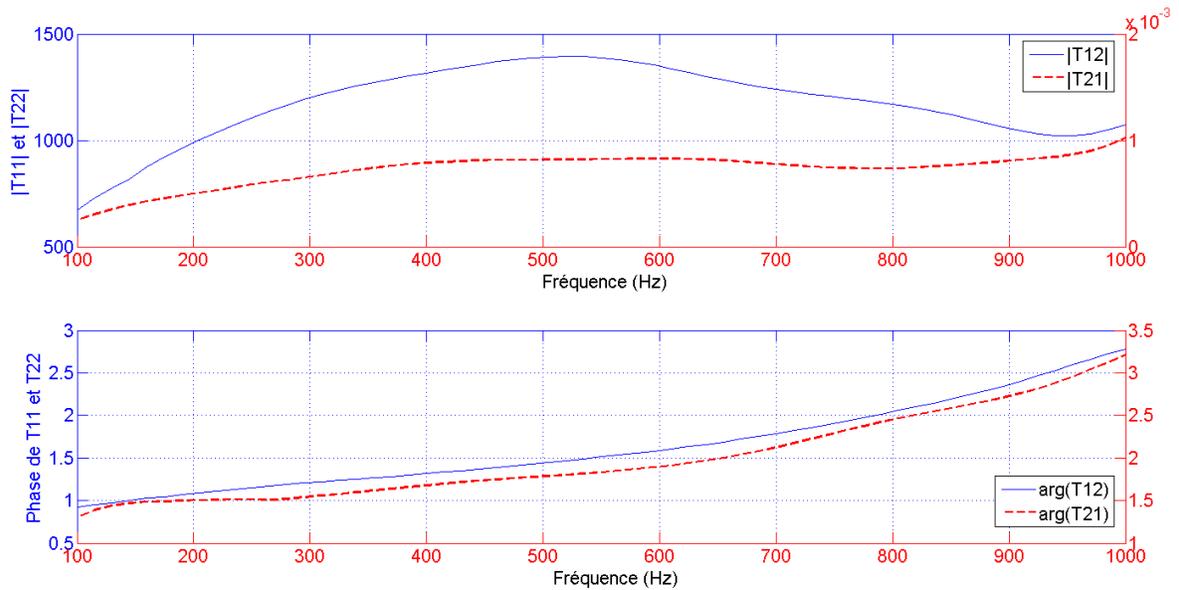


FIGURE 4.12 – Variation des module et phase des paramètres T_{12} et T_{21} avec la fréquence pour l'échantillon de perlite d'épaisseur 16 cm

Nombre d'onde dans la perlite pour différentes épaisseurs

Le nombre d'onde effectif calculé à partir de la matrice de transfert (cf. Eq. 2.47) déterminée pour des échantillons de perlite d'épaisseurs 8 et 16 cm est représenté à la Fig. 4.13. Les parties réelles du nombre d'onde sont assez proches, mais les parties imaginaires diffèrent fortement au fur et à mesure que la fréquence augmente. L'atténuation mesurée varie entre 3 et 11 Np m⁻¹ pour 8 cm d'épaisseur et entre 3 et 15 Np m⁻¹ pour 16 cm. Comparée aux milieux étudiés précédemment, l'atténuation de la perlite est beaucoup plus importante, pouvant atteindre 7 à 8 fois la valeur obtenue pour une densité de fibre de 65%.

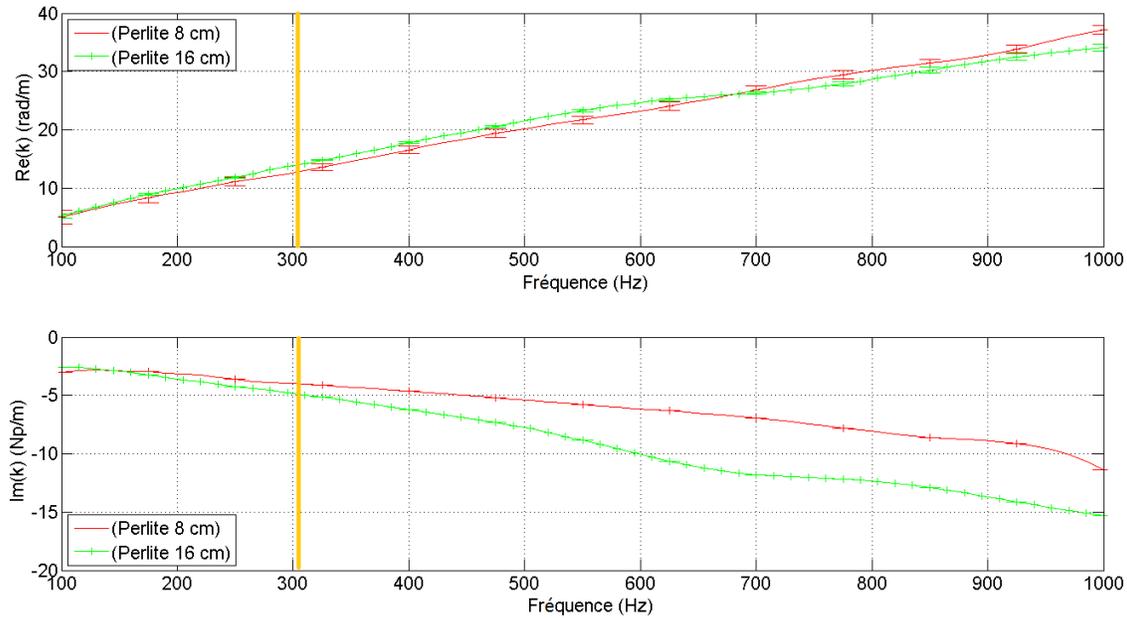


FIGURE 4.13 – Variation des parties réelle et imaginaire du nombre d'onde avec la fréquence pour des échantillons de perlite d'épaisseur 8 et 16 cm. La fréquence maximale en onde plane est indiquée par des traits verticaux

Célérité dans la perlite pour différentes épaisseurs

Les parties réelle et imaginaire de la célérité effective de ces deux échantillons sont présentées à la Fig. 4.14. Ces courbes montrent que la perlite est un milieu dispersif. La propagation dans ce milieu est beaucoup plus lente que dans le feuillage ou dans la fibre de coco, avec des valeurs de la partie réelle variant entre 100 et 160 m s⁻¹. La fréquence maximale de propagation en onde plane dans ce milieu peut être calculée à partir de l'Eq. (2.10) : des fréquences maximales de 305 et 488 Hz sont obtenues pour des célérités de 100 et 160 m s⁻¹ respectivement. Au delà de ces fréquences, la propagation dans l'échantillon peut être multimode et l'identification des paramètres effectifs devient impossible. Le rapport entre les parties imaginaire et réelle de la célérité montre que les pertes sont élevées en-dessous de 300 Hz. Leur interprétation à plus hautes fréquences est difficile. De ce fait, seules les valeurs inférieures à 300 Hz seront analysées dans la suite de cette section.

Le substrat se comporte comme un milieu dispersif présentant une vitesse du son 3 à 4 fois inférieure à la vitesse du son dans l'air. Il présente des pertes internes élevées caractérisées par un rapport partie imaginaire sur partie réelle de la célérité du son variant entre 33% et 75%.

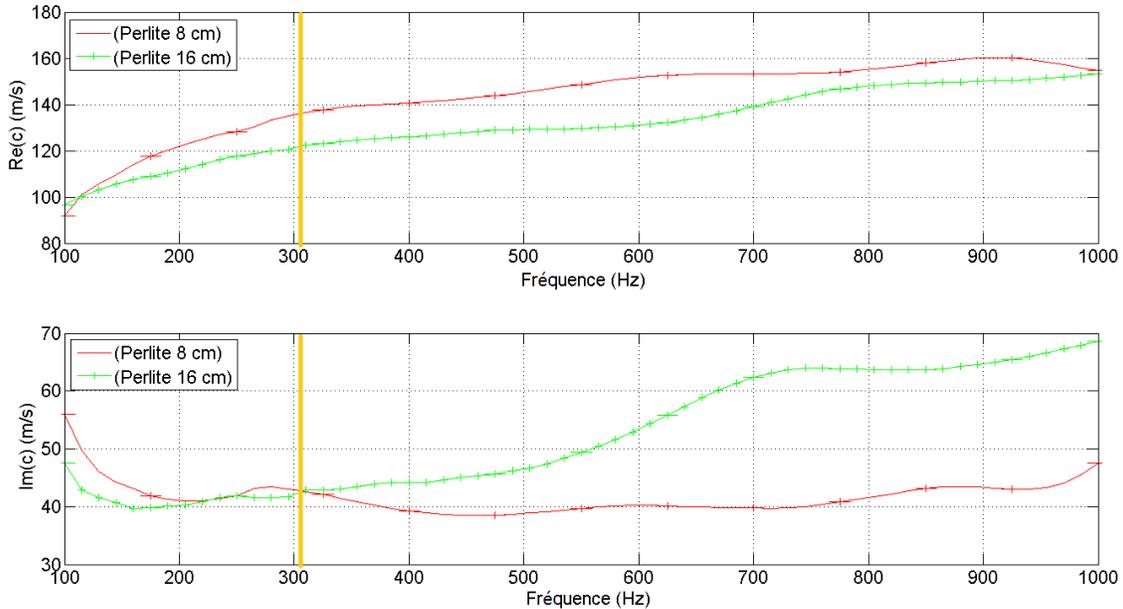


FIGURE 4.14 – Variation des parties réelle et imaginaire de la célérité avec la fréquence pour des échantillons de perlite d'épaisseurs 8 et 16 cm. La fréquence maximale en onde plane est indiquée par des traits verticaux

Évolution de l'impédance, de la masse volumique et de la compressibilité effectives de la perlite pour différentes épaisseurs

Les parties réelle et imaginaire de l'impédance caractéristique effective de la perlite sont présentées à la Fig. 4.15. En dessous de 300 Hz, la partie réelle de l'impédance est 3,5 fois plus élevée que celle de l'air. Le rapport de la partie imaginaire sur la partie réelle varie entre 15 et 25%. Cette impédance est beaucoup plus importante que celle du feuillage ou de la fibre de coco.

Les parties réelles de la masse volumique et de la compressibilité effectives de la perlite sont représentés respectivement aux Figs. 4.16 et 4.17. En dessous de 300 Hz, les valeurs sont de l'ordre de 10 kg m^{-3} pour la masse volumique et de $5,3 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$ pour la compressibilité. Les masses volumiques effectives de ce milieu sont de l'ordre de 4 à 5 fois plus élevées que celle de la fibre de coco.

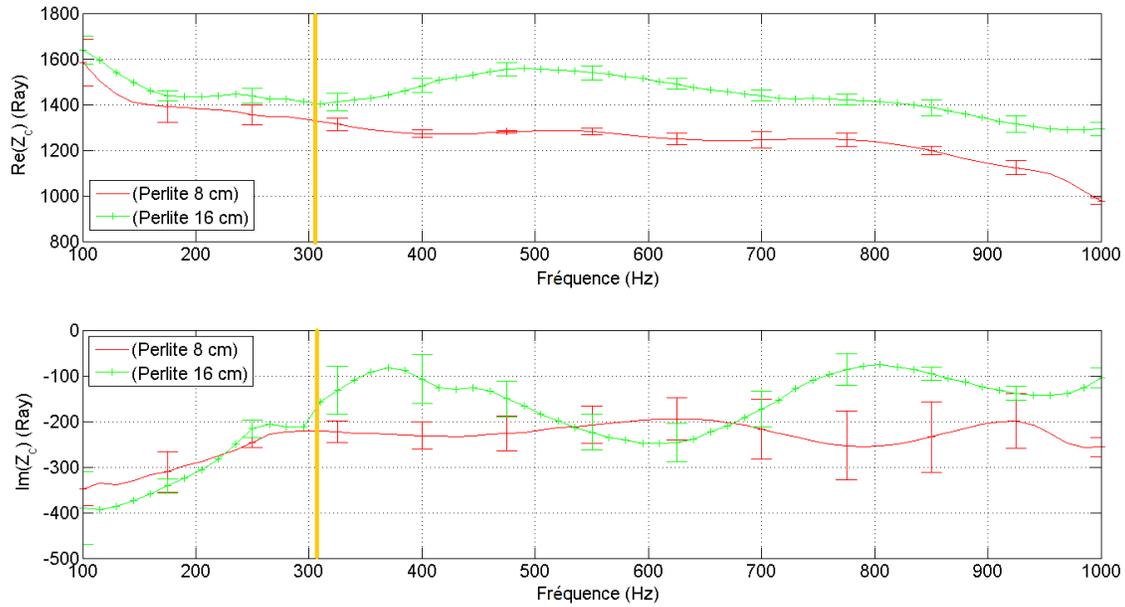


FIGURE 4.15 – Variation des parties réelle et imaginaire de l'impédance caractéristique effective avec la fréquence pour des échantillons de perlite d'épaisseurs 8 et 16 cm. La fréquence maximale en onde plane est indiquée par des traits verticaux

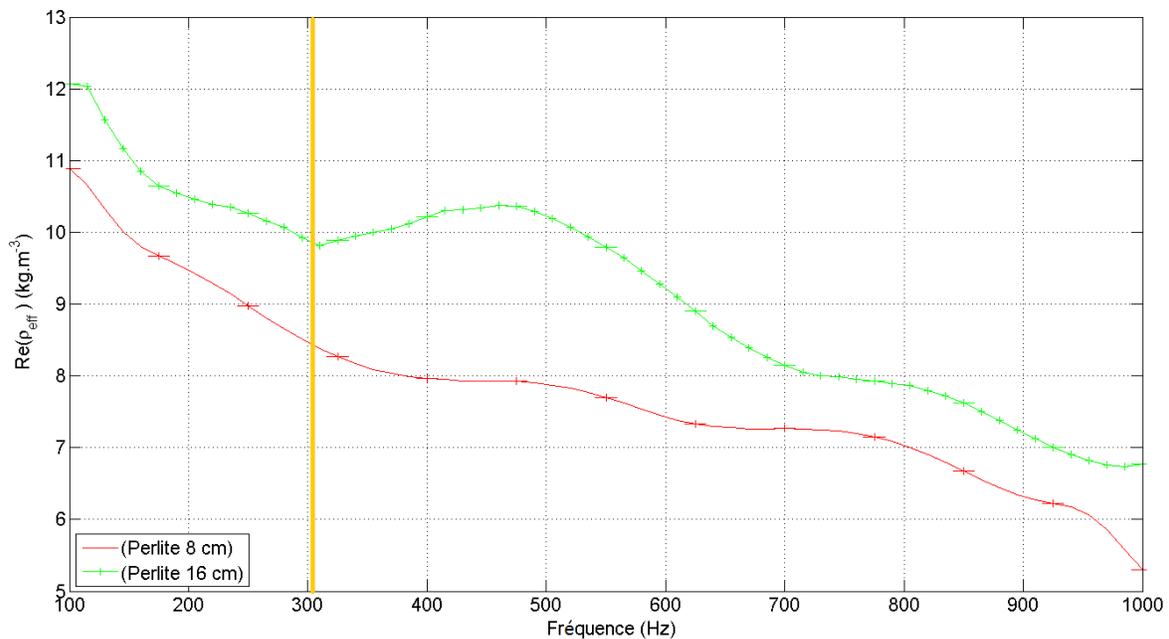


FIGURE 4.16 – Variation de la partie réelle de la masse volumique effective avec la fréquence pour des échantillons de perlite d'épaisseurs 8 et 16 cm. La fréquence maximale en onde plane est indiquée par des traits verticaux

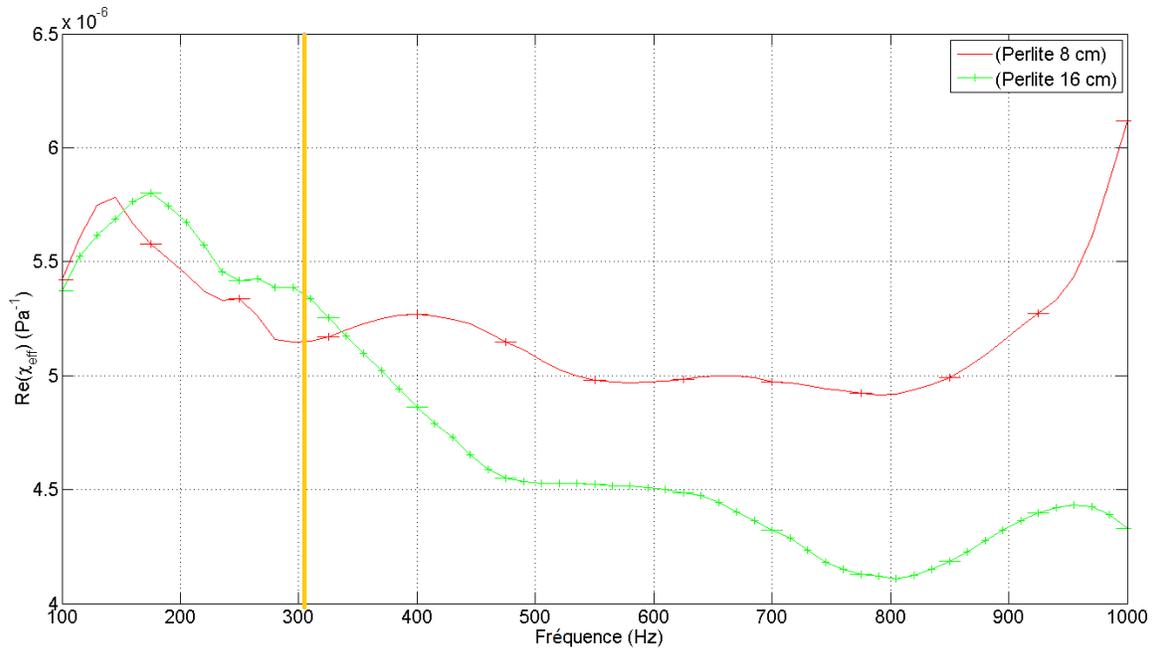


FIGURE 4.17 – Variation de la partie réelle de la compressibilité effective avec la fréquence pour des échantillons de perlite d'épaisseurs 8 et 16 cm. La fréquence maximale en onde plane est indiquée par des traits verticaux

4.2.3 Cas de la Tourbe de coco

La tourbe de coco est un déchet résiduel de la transformation de la noix de coco. Elle est produite à partir de l'écorce. Elle contient davantage de lignine que d'autres fibres végétales (comme le lin ou le coton), ce qui la rend plus résistante et ainsi ralentit sa décomposition. Par ailleurs, la tourbe de coco présente les avantages suivants :

- aération élevée même lorsqu'elle est humide,
- bonne rétention d'eau et capacité à absorber 9 fois son propre volume en eau sans être détrempée,
- absorption très rapide de l'eau quand elle est séchée,
- uniformité de la propagation d'eau qui empêche l'apparition d'endroits secs lorsqu'elle se dessèche et évite sa rétractation [121].

Les paramètres intrinsèques de la tourbe de coco ont été évalués pour des échantillons d'épaisseur 8 et 16 cm, en considérant que le volume de tourbe de coco est égal au volume interne du porte-échantillon. Les masses mesurées sont respectivement de 311 g pour 8 cm d'épaisseur et de 625 g pour 16 cm. Ces valeurs équivalent à une masse volumique d'environ 157 kg m^{-3} .



FIGURE 4.18 – Échantillon de tourbe de coco d'épaisseur 16 cm

Matrice de transfert des échantillons de tourbe de coco

Les paramètres de la matrice de transfert de l'échantillon de tourbe de coco d'épaisseur 16 cm sont présentés en Figs. 4.11 et 4.12. La Fig. 4.11 montre qu'au delà de 200 Hz les parties réelle et imaginaire des paramètres T_{11} et T_{22} présentent des différences importantes. Les résonances marquées dans la gamme [400 Hz-600 Hz] rendent ces paramètres non symétriques et leur interprétation délicate.

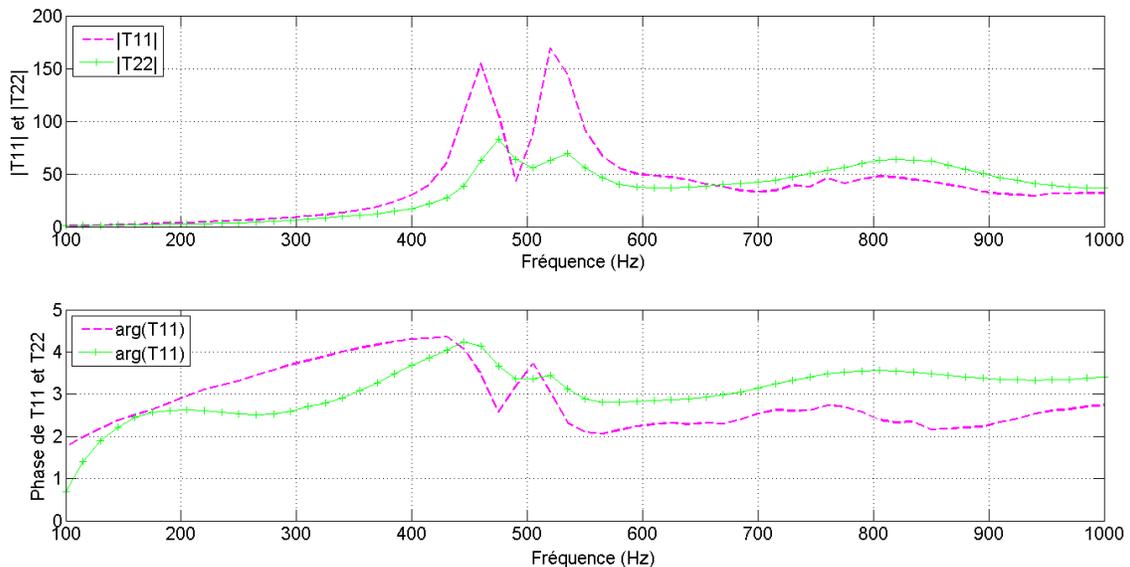


FIGURE 4.19 – Variation des module et phase des paramètres T_{11} et T_{22} avec la fréquence pour l'échantillon de la tourbe de coco d'épaisseur 16 cm

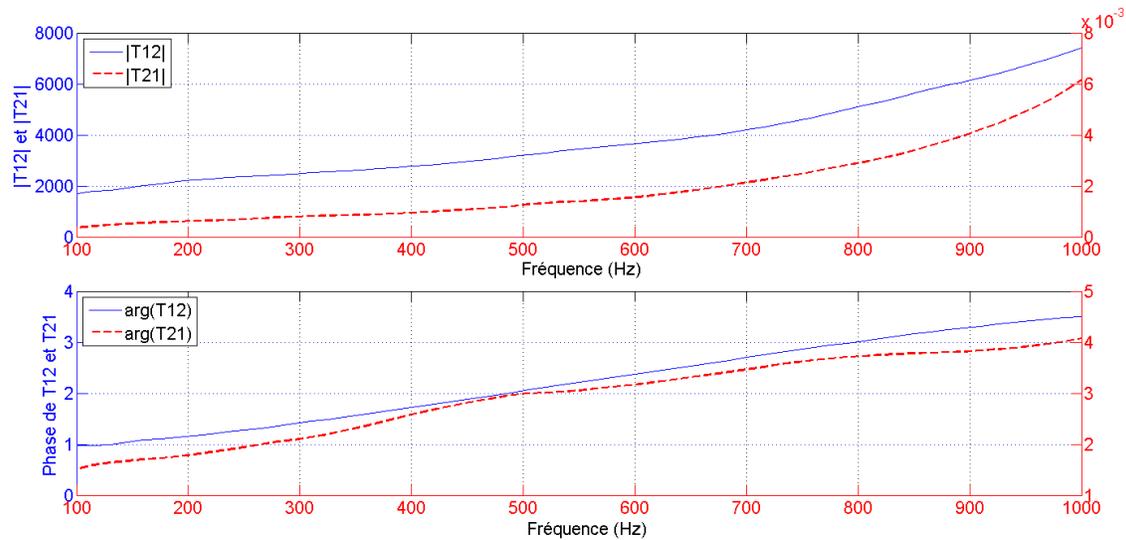


FIGURE 4.20 – Variation des module et phase des paramètres T_{12} et T_{21} avec la fréquence pour l'échantillon de la tourbe de coco d'épaisseur 16 cm

Nombre d'onde effectif pour différentes épaisseurs de tourbe de coco

La Fig. 4.21 présente l'évolution du nombre d'onde effectif en fonction de la fréquence pour des échantillons de tourbe de coco d'épaisseur 8 et 16 cm. Les nombres d'onde effectifs sont différents pour les épaisseurs de 8 et 16 cm au dessus de 400 Hz pour la partie réelle et sur tout le spectre pour la partie imaginaire.

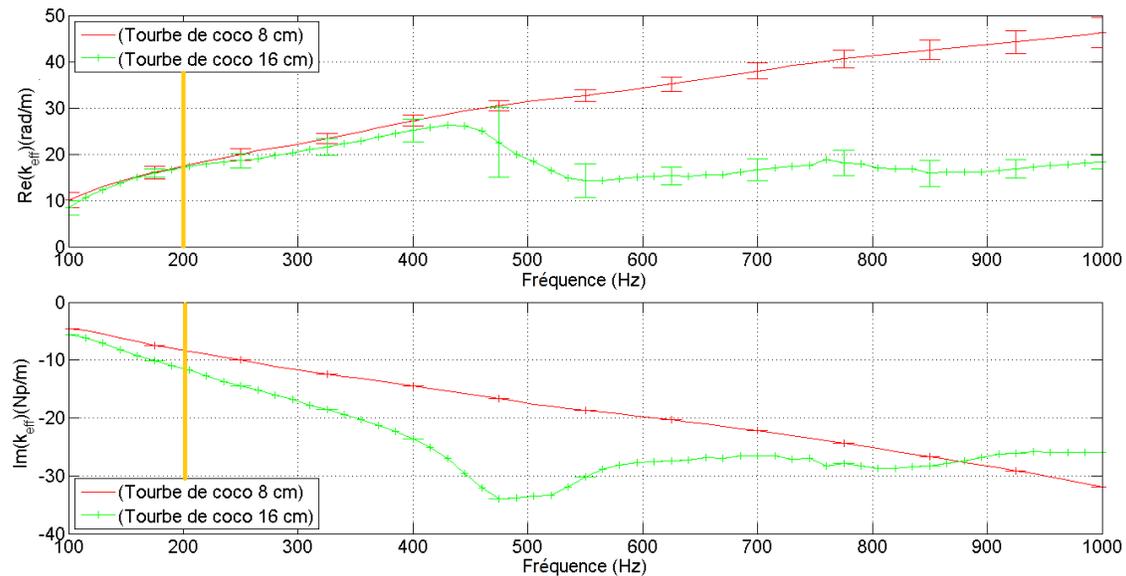


FIGURE 4.21 – Variation des parties réelle et imaginaire du nombre d'onde avec la fréquence pour l'échantillon de la tourbe de coco d'épaisseurs 8 et 16 cm. La fréquence maximale en onde plane est indiquée par des traits verticaux

Célérité pour différentes épaisseurs de tourbe de coco

Les parties réelle et imaginaire de la célérité effective sont présentées à la Fig. 4.22. Elles montrent que la partie réelle de la célérité varie entre 50 et 110 ms^{-1} , une valeur très faible par rapport à celle de l'air. La fréquence maximale garantissant une propagation monomode est de 183 Hz (cf. Eq.2.10).

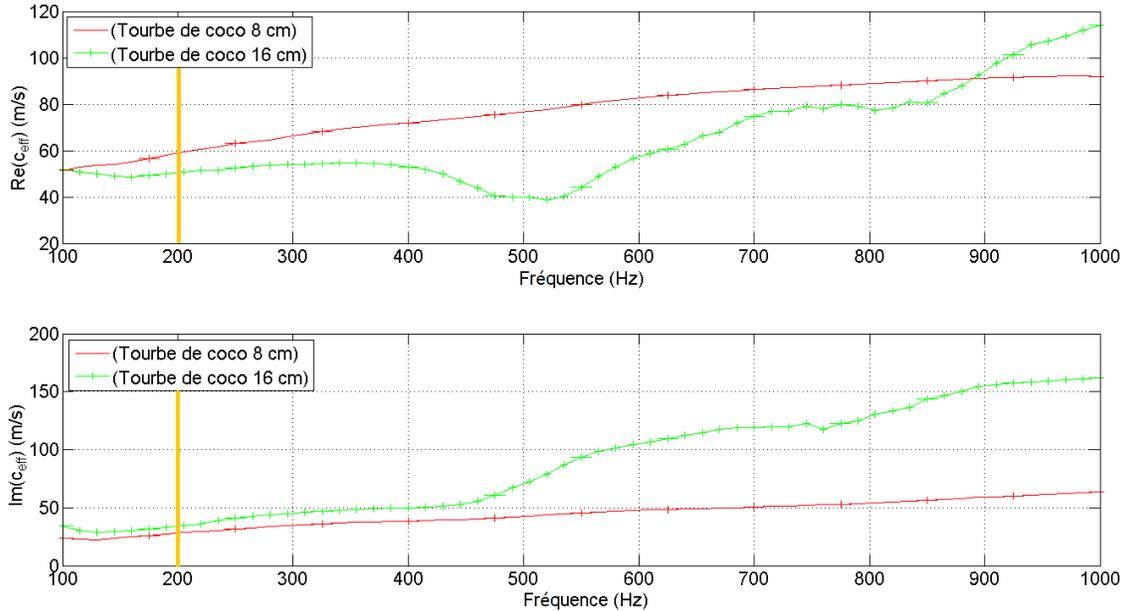


FIGURE 4.22 – Variation des parties réelle et imaginaire de la célérité avec la fréquence pour des échantillons de tourbe de coco d'épaisseur 8 et 16 cm. La fréquence maximale en onde plane est indiquée par des traits verticaux

La différence des paramètres effectifs obtenus pour des épaisseurs de 8 et 16 cm (Fig. 4.19 et 4.20), particulièrement au-dessus de 200 Hz peut donc être due à une propagation de type multimode dans l'échantillon de tourbe de coco. En dessous de 200 Hz, la partie réelle de la célérité est d'environ 50 ms^{-1} . Enfin, le rapport de la partie imaginaire sur la partie réelle est de l'ordre de 50%.

Impédance, masse volumique et compressibilité effectives pour différentes épaisseurs de tourbe de coco en fonction de l'épaisseur

La variation avec la fréquence de l'impédance caractéristique (parties réelle et imaginaire), de la masse volumique (partie réelle) et compressibilité (partie réelle) effectives sont présentées aux Figs. 4.23, 4.24 et 4.25, respectivement, pour des échantillons d'épaisseurs 8 et 16 cm. Comme indiqué précédemment, seules les valeurs obtenues pour des fréquences inférieures à 200 Hz peuvent être considérées comme significatives. Pour l'impédance caractéristique, la partie réelle est comprise entre 1500 et 2000 Rayl et le rapport de la partie imaginaire sur la partie réelle varie entre 0 et 35%. Les résultats obtenus sur l'impédance montrent de nettes différences de comportement qui semble présenter des résonances dans le cas de l'épaisseur de 16 cm. La masse volumique et la compressibilité effectives sont de l'ordre de 20 à 30 kg m^{-3} et de 8 à 12.10⁻⁵ Pa^{-1} respectivement.

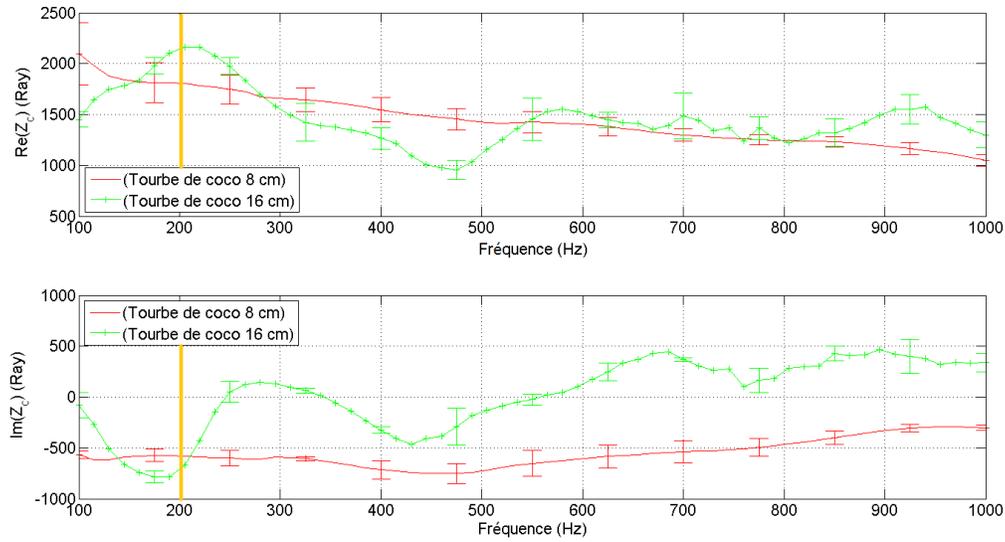


FIGURE 4.23 – Variation des parties réelle et imaginaire de l'impédance effective avec la fréquence pour des échantillons de tourbe de coco d'épaisseur 8 et 16 cm. La fréquence maximale en onde plane est indiquée par des traits verticaux

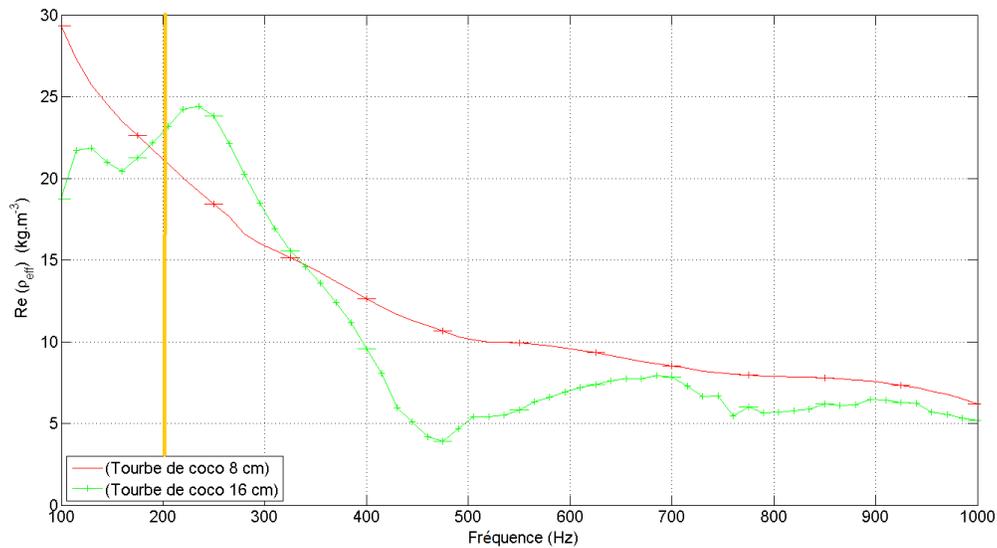


FIGURE 4.24 – Variation de la partie réelle de la masse volumique effective avec la fréquence pour des échantillons de tourbe de coco d'épaisseur 8 et 16 cm. La fréquence maximale en onde plane est indiquée par des traits verticaux

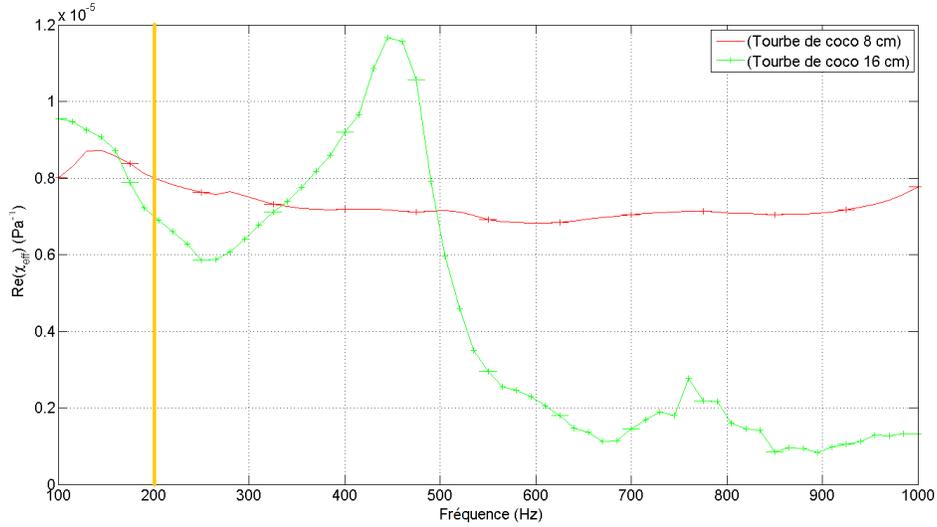


FIGURE 4.25 – Variation de la partie réelle de la compressibilité effective avec la fréquence pour des échantillons de tourbe de coco d'épaisseur 8 et 16 cm. La fréquence maximale en onde plane est indiquée par des traits verticaux

4.3 Mesure des coefficients acoustiques des échantillons de substrats

4.3.1 Cas de la fibre de coco

Les coefficients d'absorption, de réflexion, de transmission et de dissipation d'échantillons d'épaisseurs 8 et 16 cm en terminaison rigide et ou anéchoïque sont présentées aux Figs. 4.26 à 4.29.

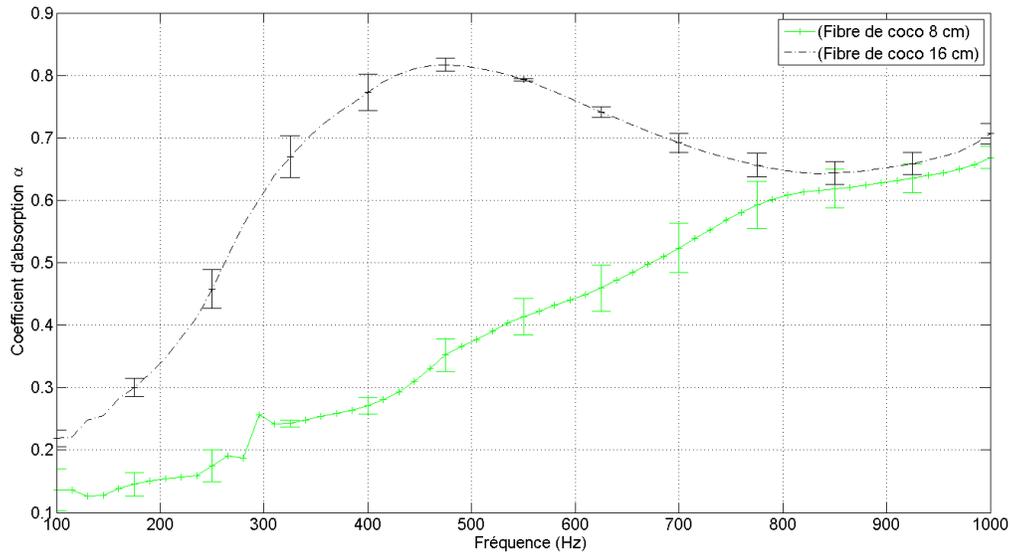


FIGURE 4.26 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence pour des échantillons contenant 65% de fibre de coco d'épaisseurs 8 et 16 cm en terminaison rigide

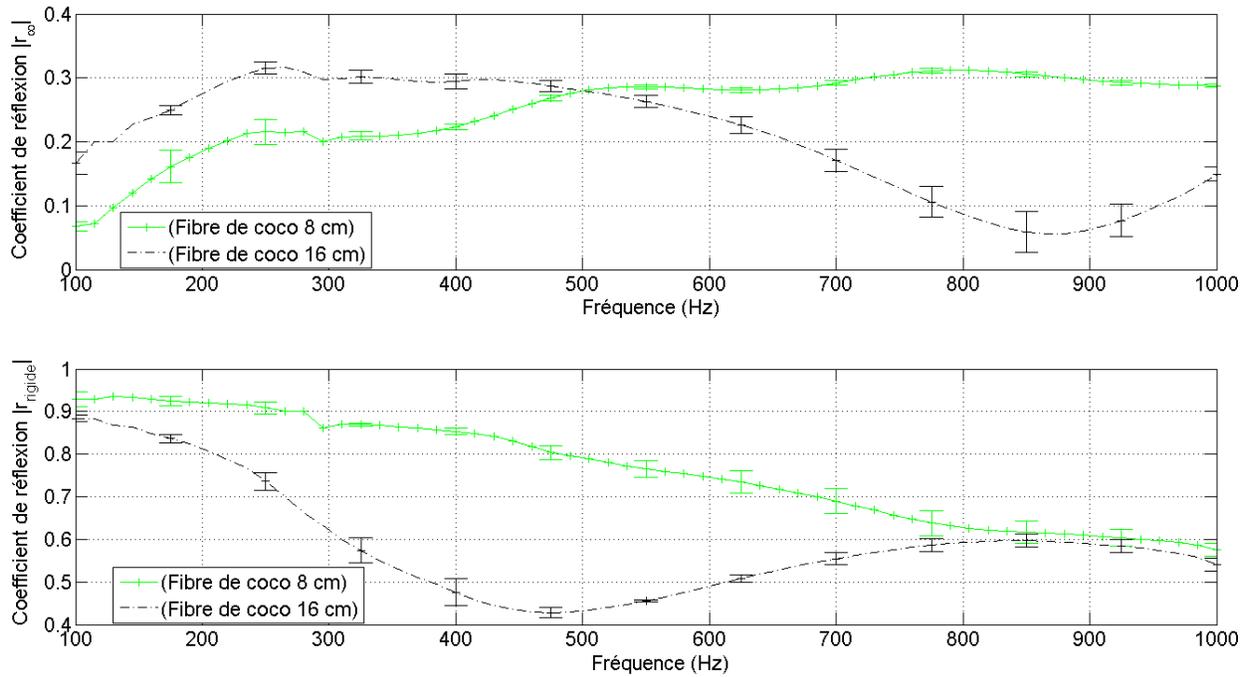


FIGURE 4.27 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence pour des échantillons contenant 65% de fibre de coco d'épaisseurs 8 et 16 cm en terminaisons anéchoïque et rigide

Plusieurs points peuvent être soulignés :

- Comme attendu, le coefficient de réflexion est plus élevé dans le cas de la terminaison rigide ($0,4 < r < 0,9$) que dans le cas de la terminaison anéchoïque ($0,05 < r < 0,3$) (Fig. 4.27). Ce faible coefficient de réflexion dans le cas anéchoïque et le fort coefficient de transmission associé (entre 0,65 et 0,85) (Fig. 4.28), s'expliquent par l'impédance caractéristique de la fibre de coco (entre 500 et 600 Rayl) assez proche de celle de l'air.
- Dans le cas de l'épaisseur de 16 cm, des résonances sont observées sur les coefficients de réflexions aux fréquences 450 Hz (terminaison rigide) et 840 Hz (terminaison anéchoïque). Elles correspondent respectivement aux modes d'épaisseurs en quart et demi longueur d'onde $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$ et $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ de la paroi.
- Une augmentation importante du coefficient d'absorption est observée à la résonance en $\frac{\lambda}{4}$ dans le cas de la terminaison rigide. Par contre aucun effet notable n'apparaît sur le coefficient de dissipation en terminaison anéchoïque à la résonance en $\frac{\lambda}{2}$. Globalement, les coefficients d'absorption et de dissipation sont plus élevés ici que dans le cas du feuillage (Figs. 3.32, 3.36, 3.43 et 3.44). Ce résultat s'explique par des pertes internes plus élevées (13 à 29% pour la fibre de coco, 2 à 5% pour le feuillage).

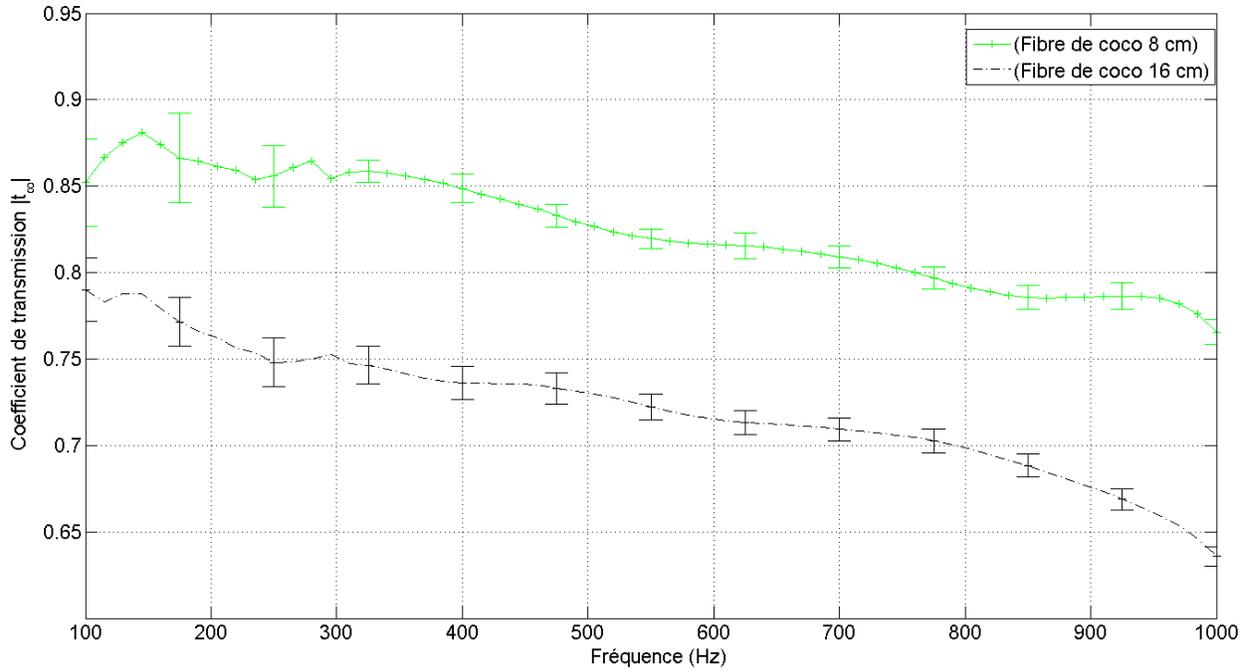


FIGURE 4.28 – Variation du coefficient de transmission acoustique avec la fréquence pour des échantillons contenant 65% de fibre de coco pour 8 et 16 cm d'épaisseur en terminaison anéchoïque

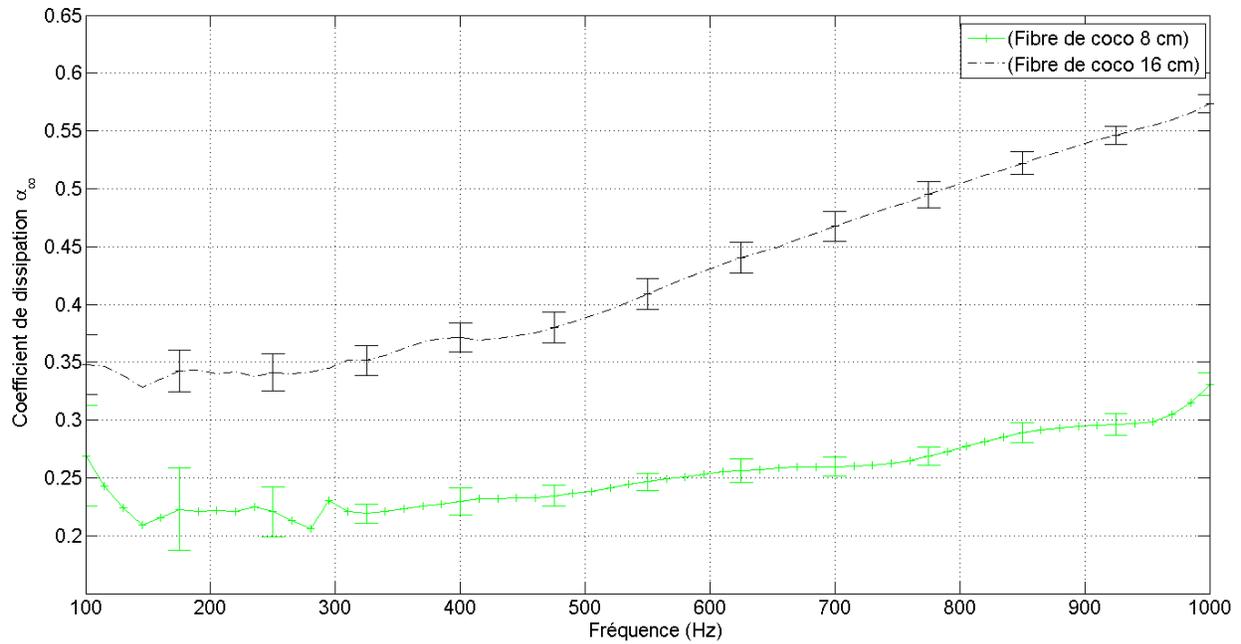


FIGURE 4.29 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence pour des échantillons contenant 65% de fibre de coco pour 8 et 16 cm d'épaisseur en terminaison anéchoïque

4.3.2 Cas de la perlite

Les coefficients d'absorption et de réflexion acoustiques en terminaison rigide sont présentés aux Figs. 4.30 et 4.31 pour des échantillons de perlite d'épaisseurs 8 cm et 16 cm.

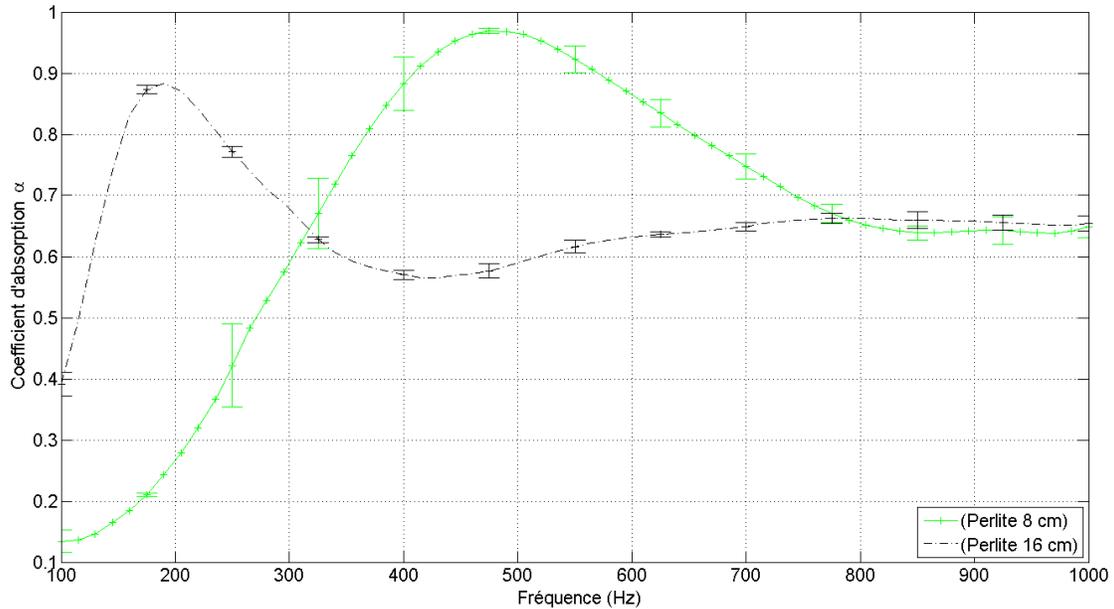


FIGURE 4.30 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence pour des échantillons de perlite d'épaisseur 8 et 16 cm en terminaison rigide

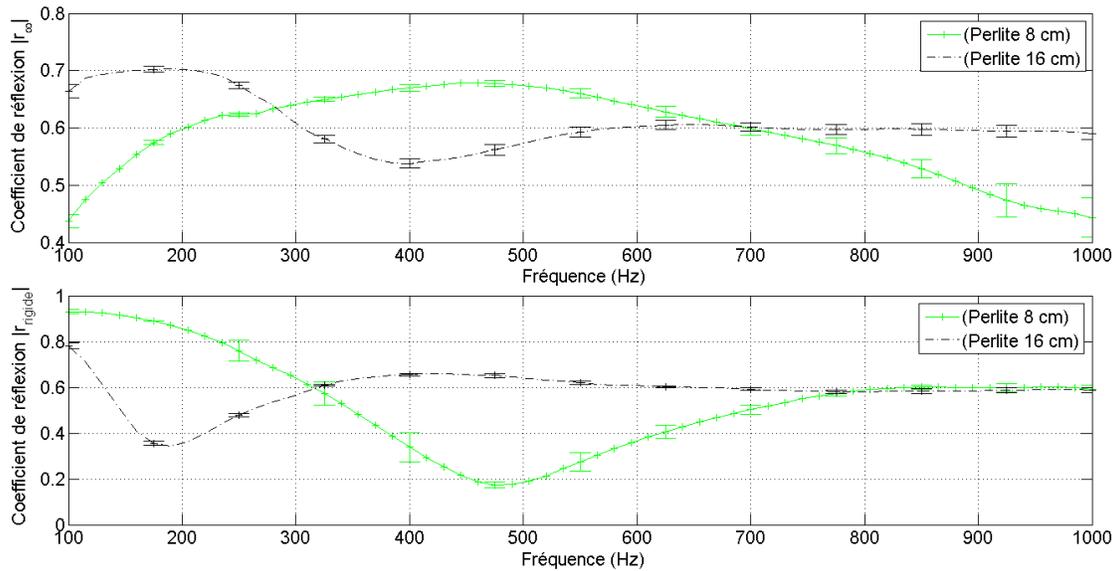


FIGURE 4.31 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence pour des échantillons de perlite d'épaisseur 8 et 16 cm en terminaisons anéchoïque et rigide

Une résonance est obtenue à 450 Hz (resp. 190 Hz) pour l'échantillon d'épaisseur 8 cm (resp. 16 cm) qui correspond approximativement à une résonance en épaisseur en quart de longueur d'onde. Dans le cas de la terminaison anéchoïque, les résonances en demi longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$ apparaissant sur le coefficient de réflexion sont situées à 1000 Hz et 400 Hz pour des épaisseurs de 8 et 16 cm respectivement.

Comme dans le cas de la fibre de coco, aucune augmentation du coefficient de dissipation n'est observé à ces fréquences (cf. Fig. 4.33). La transmission acoustique est également plus faible sur 16 cm que sur 8 cm (cf. Fig. 4.32) On peut remarquer que les modules des coefficients de réflexion en terminaisons rigide et anéchoïque coïncident au-dessus de 600 Hz pour l'échantillon de 16 cm d'épaisseur. Ce résultat indique que, dans la bande [600 Hz-1000 Hz], 36% de l'énergie est réfléchi par la paroi quelle que soit la terminaison et que les 64% d'énergie absorbé par la paroi en terminaison rigide sont exactement équilibrés par la somme des énergies transmises (entre 0 et 2%) et dissipée (entre 62 et 64%). Pour cette épaisseur, on peut donc supposer que la quasi-totalité de l'énergie acoustique pénétrant dans le substrat est absorbée par l'échantillon lors de la première traversée et que l'amplitude de l'onde atteignant la face arrière est négligeable. De ce fait, la condition aux limites sur la face arrière n'a aucune influence sur le coefficient d'absorption acoustique.

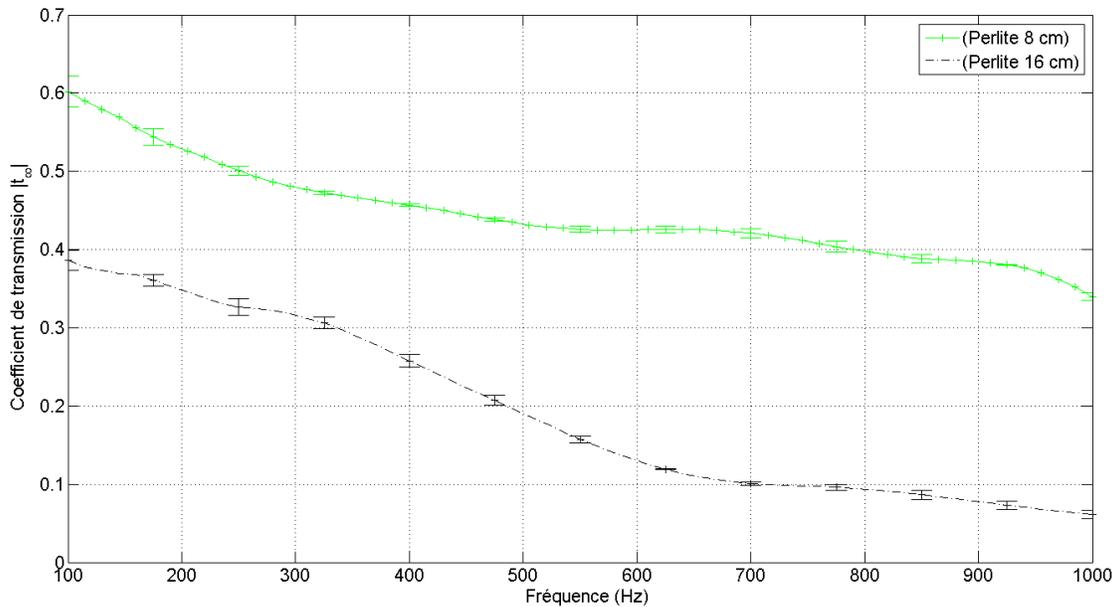


FIGURE 4.32 – Variation du coefficient de transmission acoustique avec la fréquence, pour des échantillons de perlite d'épaisseur 8 et 16 cm en terminaison anéchoïque

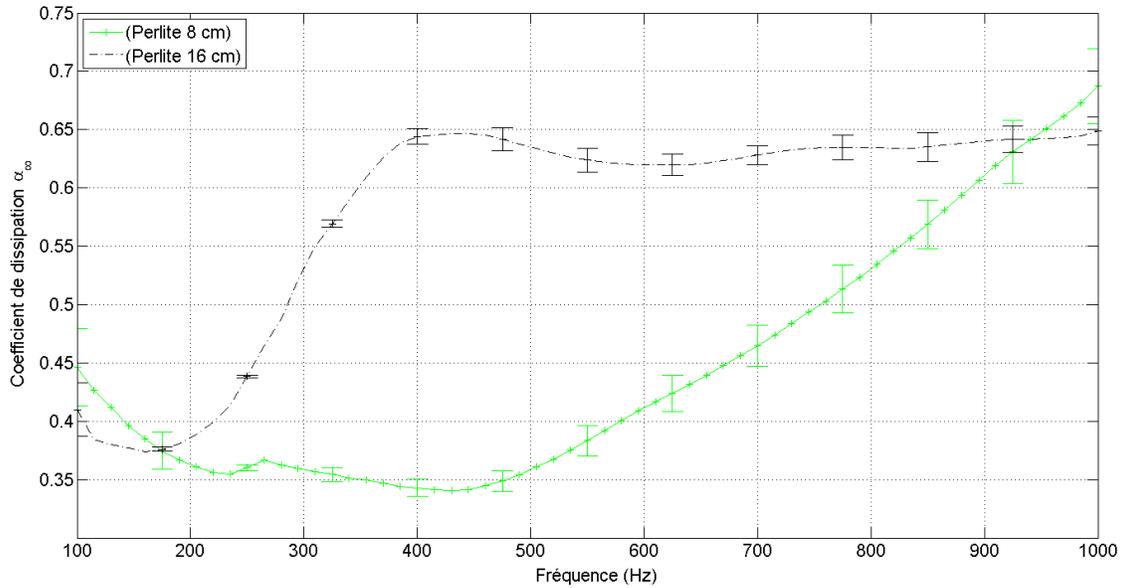


FIGURE 4.33 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence pour des échantillons de perlite d'épaisseur 8 et 16 cm en terminaison anéchoïque

4.3.3 Cas de la tourbe de coco

Les coefficients d'absorption, de réflexion, de transmission et de dissipation acoustique sont présentés aux Figs. 4.34 à 4.37 pour des échantillons de tourbe de coco d'épaisseur 8 et 16 cm en terminaisons rigide ou anéchoïque. Les coefficients de réflexion élevés entre 0,5 et 0,8 (Fig. 4.35) traduisent le fort contraste d'impédance caractéristique entre l'air ($\simeq 400$ Rayl) et la tourbe de coco (entre 1000 et 2000 Rayl). La comparaison des coefficients de réflexion en terminaisons rigide et anéchoïque montrent que les coefficients de réflexion sont identiques au-dessus de 430 Hz pour l'épaisseur de 8 cm et au-dessus de 150 Hz pour l'épaisseur de 16 cm. Ainsi, pour l'épaisseur de 8 cm, l'énergie réfléchie par la paroi (entre 25 et 36% de l'énergie incidente) est la même au-dessus de 430 Hz pour les deux terminaisons, tandis que l'énergie absorbée en terminaison rigide (entre 64 et 75%) est égale à la somme de l'énergie transmise (entre 0 et 3%) et de l'énergie dissipée (entre 61 et 75%) en terminaison anéchoïque. Le même effet est observé au-dessus de 150 Hz pour l'épaisseur de 16 cm : l'énergie réfléchie (entre 26 et 61% de l'énergie totale) ne dépend pas de la terminaison ; l'énergie absorbée en terminaison rigide (entre 40 et 73%) est approximativement égale à la somme de l'énergie transmise (inférieure à 2%) et de l'énergie dissipée (entre 47 et 72%). Comme dans le cas de la perlite, cet effet indique qu'au-dessus de la fréquence indiquée, la totalité de l'énergie acoustique entrant dans l'échantillon est dissipée avant d'atteindre la face arrière. Les fréquences limites sont plus basses dans le cas de la tourbe de coco car les pertes internes y sont plus élevées que dans la perlite.

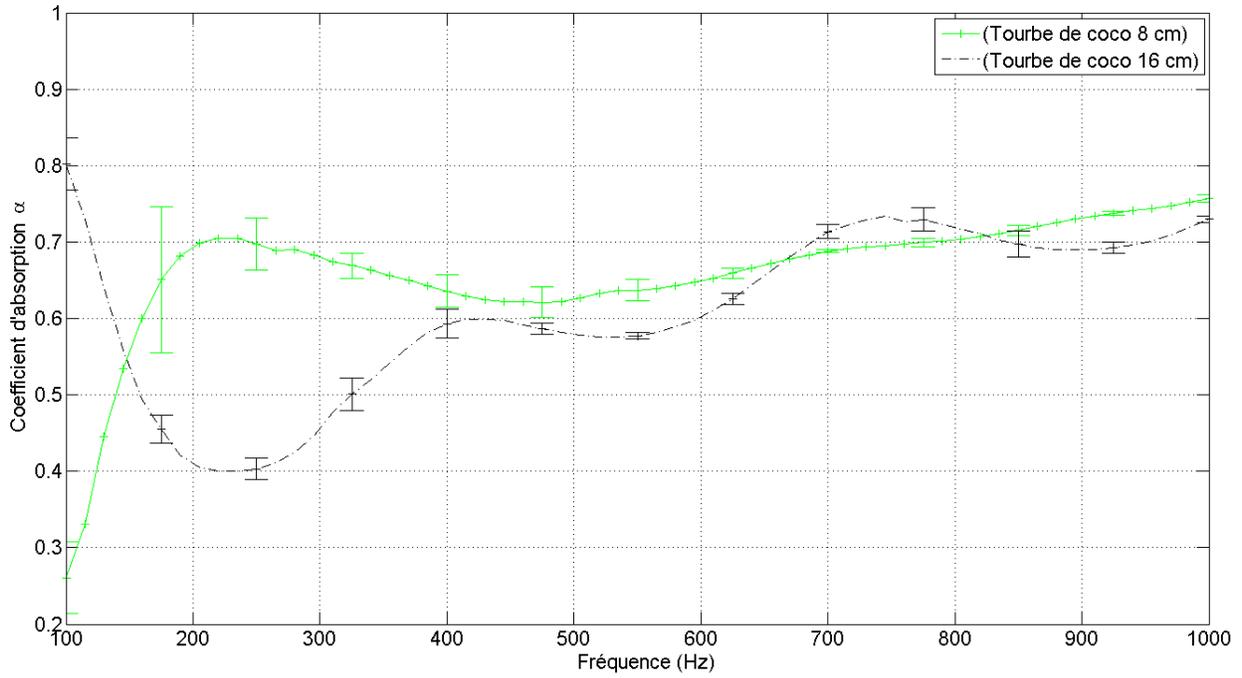


FIGURE 4.34 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence pour des échantillons de tourbe de coco d'épaisseurs 8 et 16 cm en terminaison rigide

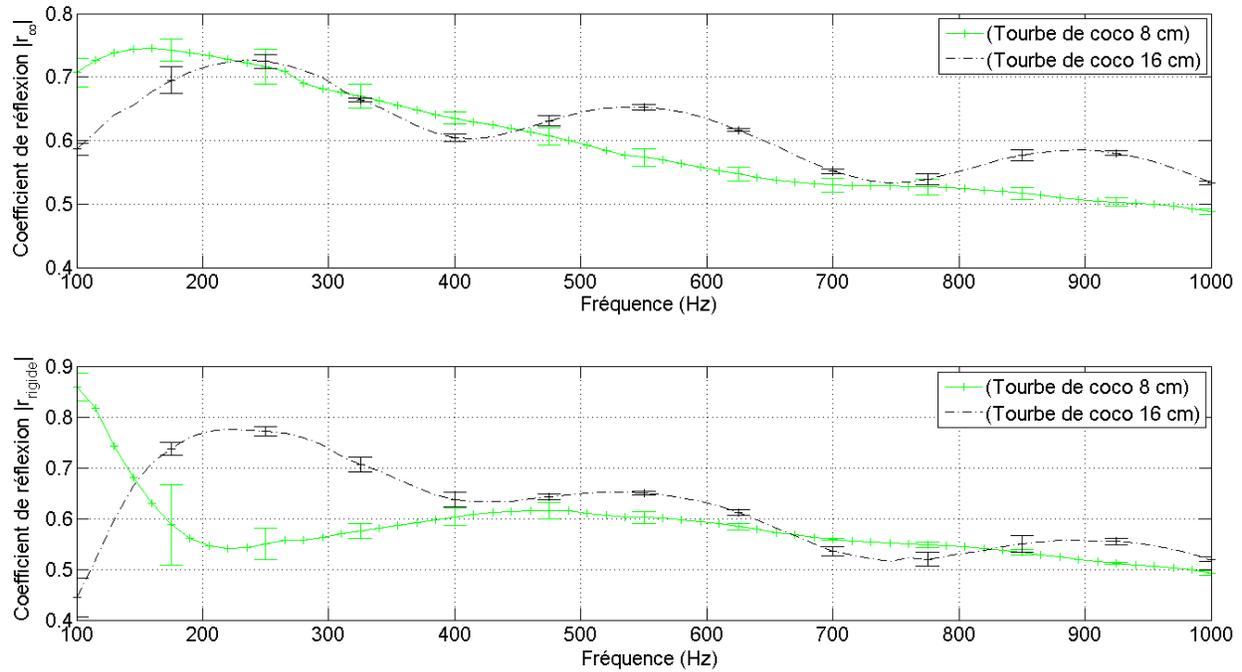


FIGURE 4.35 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence, pour des échantillons de tourbe de coco d'épaisseur 8 et 16 cm en terminaisons anéchoïque et rigide

4.3. MESURE DES COEFFICIENTS ACOUSTIQUES DES ÉCHANTILLONS DE SUBSTRATS

Pour une vitesse effective d'environ 60 ms^{-1} (cf Fig. 4.22), les résonances en épaisseur de la tourbe de coco sont situées à 187 Hz (16 cm) et 375 Hz (8 cm) pour la terminaison rigide (mode en $\frac{\lambda}{4}$) et à 375 Hz (16 cm) et 750 Hz (8 cm) pour la terminaison anéchoïque. Les minima sur le spectre du coefficient de réflexion au voisinage de ces fréquences sont très peu marqués à cause du fort contraste d'impédance et de la forte absorption. Sur les spectres des coefficients d'absorption (Fig. 4.34) et de dissipation (Fig. 4.37), seule la résonance à 375 Hz est visible pour l'échantillon de 16 cm d'épaisseur.

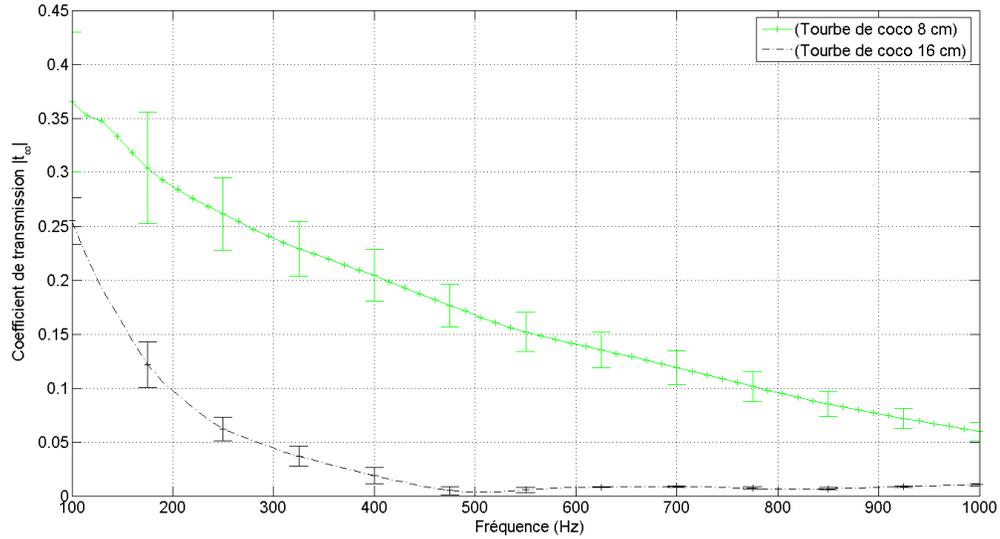


FIGURE 4.36 – Variation du coefficient de transmission acoustique avec la fréquence, pour des échantillons de tourbe de coco d'épaisseur 8 et 16 cm en terminaison anéchoïque

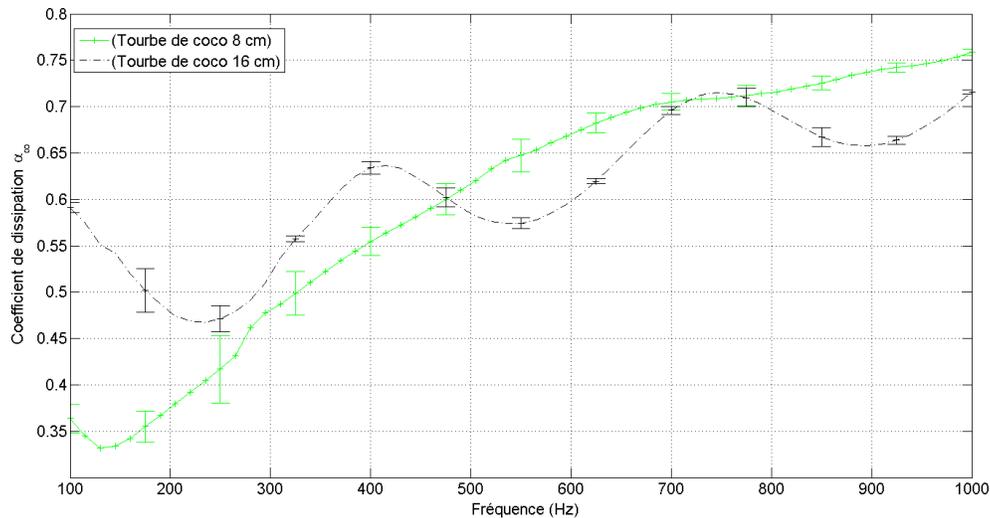


FIGURE 4.37 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence, pour des échantillons de tourbe de coco d'épaisseur 8 et 16 cm en terminaison anéchoïque

4.4 Conclusion du chapitre

L'étude des substrats utilisés dans les parois végétalisées met en évidence deux catégories :

- des substrats de type fibreux comme la fibre de coco dont les propriétés effectives non dispersives sont proches de celles des feuillages, à l'exception du facteur de perte qui est plus élevé,
- des substrats de type poreux comme la perlite ou la tourbe de coco dont les propriétés effectives dispersives sont caractérisées par des célérités très basses, des impédances caractéristiques et des facteurs de pertes élevés.

Leur utilisation dans les parois végétalisées fait apparaître deux effets qui n'avaient pas été observés pour les feuillages.

- l'apparition de résonances en épaisseur de l'échantillon dans la bande de fréquence étudiée qui résulte des faibles valeurs de célérité. A ces résonances sont associées des augmentations notables du coefficient d'absorption en terminaison rigide,
- l'absorption élevée des ondes acoustiques dans l'échantillon qui peut absorber l'onde durant son premier trajet aller et éliminer les ondes réfléchies. Cet effet entraîne l'apparition d'une fréquence limite sur le spectre d'absorption au delà de laquelle le coefficient d'absorption est indépendant de la condition aux limites en face arrière.

Dans le chapitre qui suit, les propriétés acoustiques de ces substrats sont exploités avec celles des feuillages étudiés précédemment (cf. chapitre 3 pour concevoir et optimiser des parois végétalisées complexes associant feuillages et substrats).

Étude et optimisation de l'assemblage d'éléments individuels constituant un mur végétalisé

Sommaire

5.1	Introduction	130
5.2	Etude de la superpositions de feuillage et de substrat	130
5.2.1	Cas de la superposition de fusain et de fibre de coco	131
5.2.2	Cas de la superposition de fusain et de perlite	133
5.2.3	Cas de la superposition du fusain et de la tourbe de coco	136
5.3	Modélisation et optimisation du coefficient de réflexion d'une paroi végétalisée	138
5.3.1	Modélisation de la superposition d'une couche de feuillage de fusain sur substrat absorbant	139
5.3.2	Modélisation d'un bi-couche sur substrat absorbant	141
5.3.3	Généralisation à un multicouche sur substrat absorbant	143
5.4	Conclusion du chapitre	143

5.1 Introduction

Pour réaliser des parois acoustiques optimisées à partir de matériaux naturels, en particulier végétalisés, il importe que ces parois tendent vers deux conditions idéales : i) une faible réflexion pour limiter le niveau sonore côté source et ii) une forte absorption pour réduire l'énergie sonore transmise côté récepteur. Cependant, les substrats ont une impédance caractéristique beaucoup plus élevée que celle de l'air et nécessitent donc une couche d'adaptation. Celle-ci peut être réalisée par le feuillage compte tenu des propriétés décrites aux chapitres 3 et 4. Selon les cas, l'adaptation, pourra être conçue soit avec un système mono-couche simple à réaliser, soit avec un système multi-couche plus encombrant mais pouvant offrir des performances supérieures.

- La première partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de la superposition de feuillage et de substrat. La mise en cascade des matrices de transfert y est comparée aux données expérimentales sur des systèmes combinant feuillage et substrat. Cette vérification est fondamentale pour développer la méthode d'optimisation des propriétés acoustiques de murs végétalisés.
- La seconde partie présente une approche simplifiée permettant de déterminer à partir de la fréquence centrale et de la bande passante souhaitée, la configuration d'adaptation présentant le coefficient de réflexion le plus faible. Cette modélisation est un point de départ pour optimiser les structures en fonction du cahier des charges acoustique du mur végétalisé à réaliser.

5.2 Etude de la superpositions de feuillage et de substrat

Les grandeurs acoustiques (absorption, réflexion, transmission et dissipation) étudiées dans cette partie résultent de l'association d'un feuillage (fusain) d'épaisseur 8 cm pouvant présenter différentes densités foliaires et d'un substrat d'épaisseur 8 cm également (perlite, tourbe de coco ou fibre de coco). Les coefficients d'absorption et de dissipation acoustiques obtenus par la mesure et le calcul (via une mise en cascade des matrices de transfert) sont analysés. En ce qui concerne les coefficients de transmission et réflexion, seules les mesures acoustiques sont présentées. Pour l'ensemble des figures, la courbe en pointillés noirs représente la mesure obtenue sur le substrat seul, les courbes en traits continus colorés représentent les grandeurs mesurées et celles en tirets correspondent aux grandeurs calculées.

5.2.1 Cas de la superposition de fusain et de fibre de coco

Les mesures sont effectuées sur la superposition de fibre de coco de densité fibreuse de 65% et de fusain de densité foliaire de 1%, 3% et 5%. La Fig. 5.1 présente le coefficient d'absorption de l'ensemble des configurations étudiées. Plusieurs résultats sont à souligner :

- sur la plage de fréquence [100 Hz-650 Hz], la présence de feuillage améliore nettement l'absorption acoustique jusqu'à environ deux fois la valeur mesurée pour le substrat seul, tandis que sur la plage fréquentielle [650 Hz-1000 Hz] , la présence de fusain semble au contraire réduire l'absorption. Ce résultat déjà reporté dans la littérature peut s'expliquer par la présence d'une résonance en quart de longueur d'onde pour l'ensemble fusain + fibre de coco située vers 405 Hz, si l'on considère les célérités effectives voisines de 260 m s^{-1} pour ces deux milieux (cf. chapitre 3 et 4). Par contre aucun effet d'adaptation d'impédance n'est attendu dans ce cas, car le fusain et la fibre de coco ont des impédances effectives similaires, de l'ordre de 600 Rayl (cf. chapitre 3 et 4),
- les coefficients d'absorption mesurés et calculés sont en bon accord au dessus de 300 Hz avec une erreur relative inférieure à 8% pour chacune des courbes,
- l'accroissement de la densité foliaire déplace les résonances vers les basses fréquences, augmente le coefficient d'absorption en-dessous de 550 Hz et le diminue au-dessus de 550 Hz.

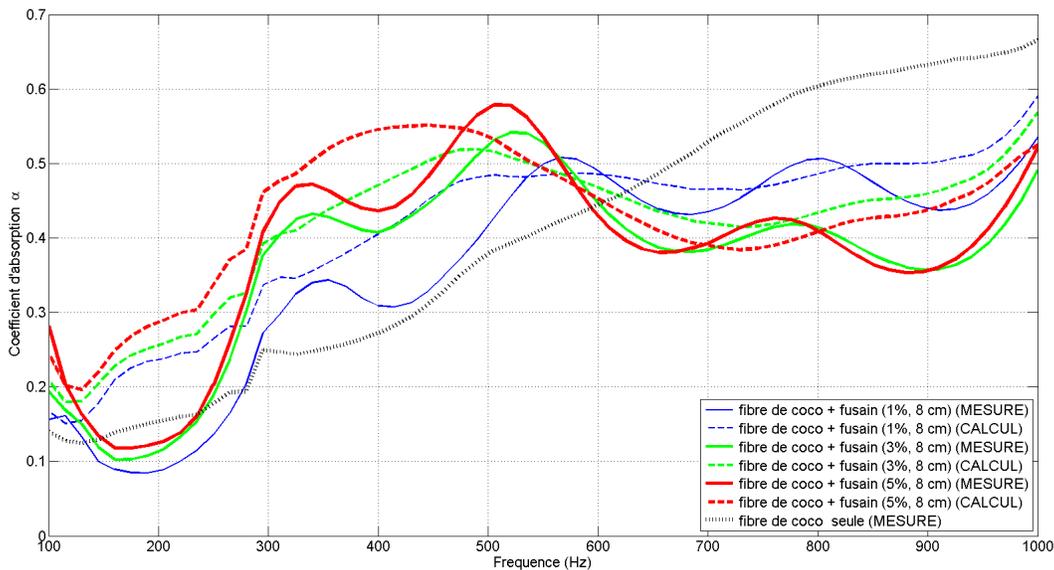


FIGURE 5.1 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence pour la superposition de fusain (8 cm) et de fibre de coco (8 cm) en terminaison rigide

La Fig. 5.2 présente les modules des coefficients de réflexion pour des échantillons composés de la superposition fusain-fibre de coco pour des terminaisons anéchoïque (Fig. 5.2 (a)) et rigide (Fig. 5.2 (b)). Le décalage entre les extrema du module du coefficient de réflexion obtenus en terminaisons rigide et anéchoïque est clairement visible. L'accroissement de la densité foliaire de 1% à 3% a un impact plus important sur le coefficient de réflexion que l'augmentation de 3% à 5%. Comme attendu, le coefficient de réflexion obtenu en terminaison anéchoïque est plus faible que celui obtenu en terminaison rigide. Par ailleurs, l'augmentation de l'épaisseur totale (ajout de fusain sur la fibre de coco) a tendance à augmenter le nombre de résonances dans la gamme étudiée (décalage des fréquences de résonances vers les basses fréquences).

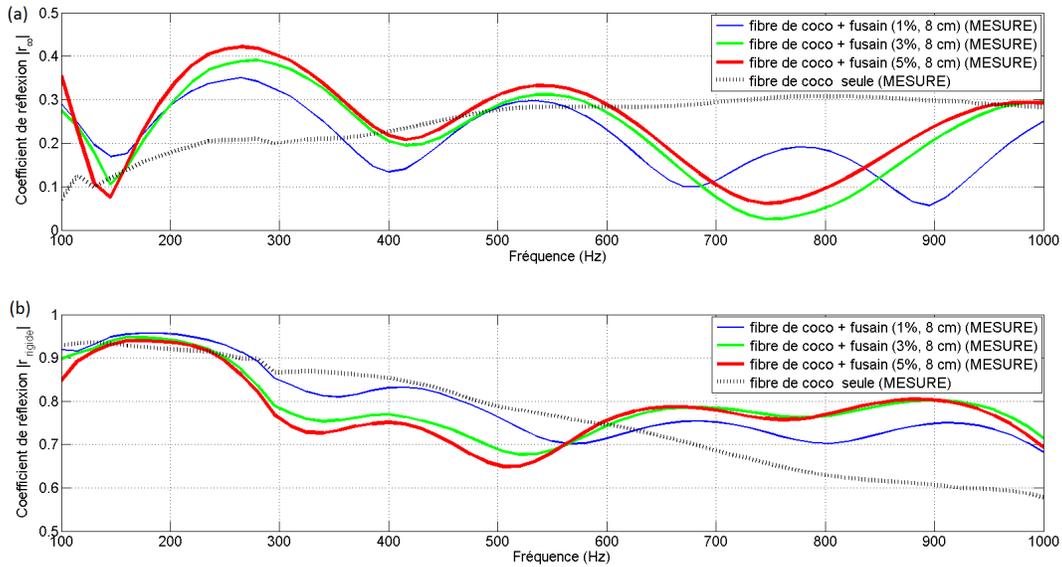


FIGURE 5.2 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence pour la superposition de fusain (8 cm) et de fibre de coco (8 cm) en terminaisons anéchoïque (a) et rigide (b)

Les coefficients de transmission de ces échantillons sont montrés à la Fig. 5.3. Globalement, l'ajout d'un feuillage sur le substrat fait chuter le coefficient de transmission, cette baisse étant de l'ordre de 0,1 sur la majorité du spectre étudié. La transmission de l'onde à travers la paroi reste cependant élevée ($0,65 < |t_\infty| < 0,8$).

Le coefficient de dissipation des mêmes assemblages (Fig. 5.4) varie entre 0,2 et 0,5 pour les fréquences allant de 100 Hz à 1000 Hz. Cependant, les écarts entre les valeurs mesurées et celles calculées sont notables pour des fréquences supérieures à 250 Hz, de l'ordre de 0,1. Cette différence, qui est également présente sur les spectres des coefficients de réflexion et de transmission (non présentés), reste à expliquer.

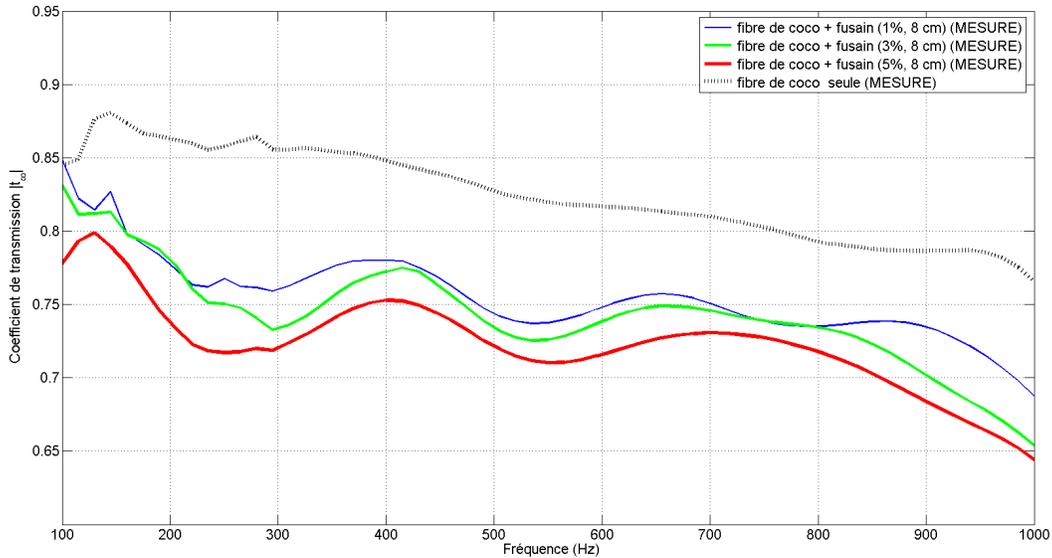


FIGURE 5.3 – Variation du coefficient de transmission acoustique avec la fréquence de la superposition de fusain (8 cm) et de fibre de coco (8 cm) en terminaison anéchoïque

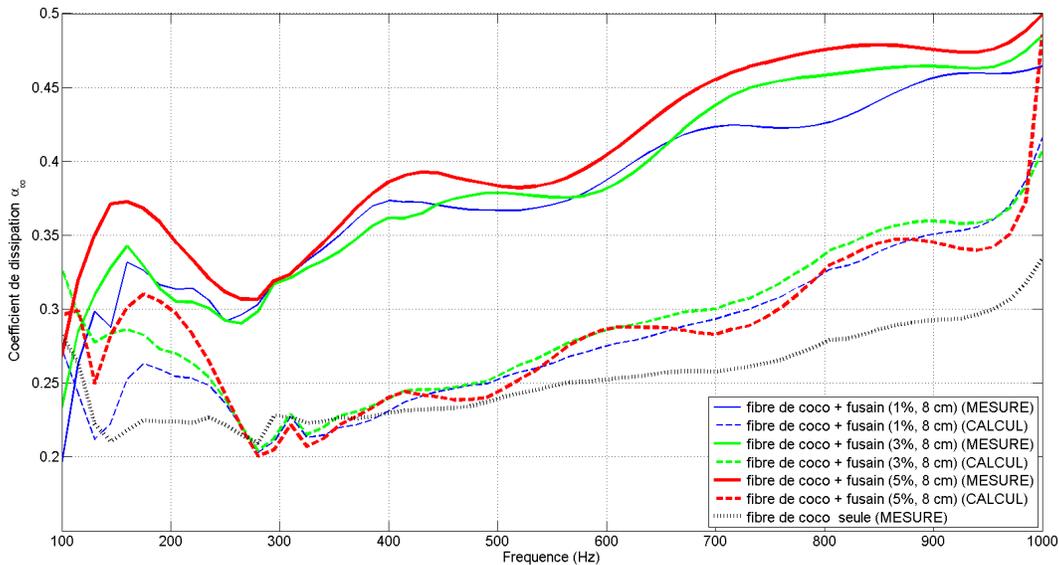


FIGURE 5.4 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence pour la superposition de fusain (8 cm) et de fibre de coco (8 cm) en terminaison anéchoïque

5.2.2 Cas de la superposition de fusain et de perlite

La même procédure est réalisée sur des échantillons constitués de la superposition de 8 cm de fusain et de 8 cm de perlite. Les spectres des coefficients d'absorption acoustique mesuré et calculé en terminaison rigide sont présentés à la Fig. 5.5. Comme indiqué dans le chapitre précédent, la perlite est un matériau absorbant dont l'échantillon d'épaisseur 8 cm présente une résonance à 430 Hz en terminaison rigide.

Cette figure met en évidence que l'adaptation d'impédance quart d'onde s'effectue partiellement entre les couche de fusain et de perlite ($Z_f \simeq 630 \text{ Rayl}$, $\sqrt{Z_{air}Z_{perlite}} = \sqrt{405 * 1280} = 720 \text{ Rayl}$) à la fréquence de 810 Hz ($\frac{c_f}{4d_f}$), où Z_f est l'impédance caractéristique du fusain, c_f , sa célérité et d_f son épaisseur. Cette adaptation améliore nettement l'absorption acoustique au-dessus de 600 Hz . L'accord entre coefficients d'absorption mesurés et calculés s'améliore quand la densité foliaire augmente. Les coefficients de réflexion mesurés en terminaisons anéchoïque (Figs. 5.6 (a)) et rigide (5.6 (b)) présentent des minima associés aux résonances en épaisseur de la paroi, similaires à ceux observés dans le cas précédent (fusain+fibre de coco).

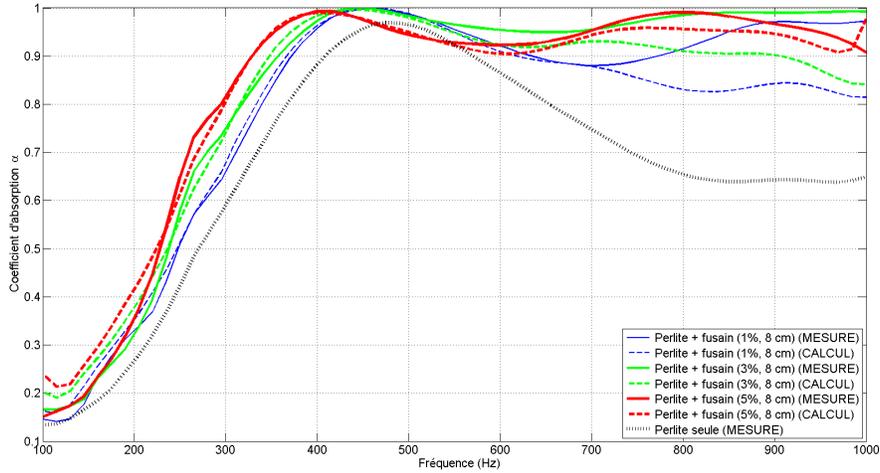


FIGURE 5.5 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence pour la superposition de fusain (8 cm) et de perlite (8 cm) en terminaison rigide

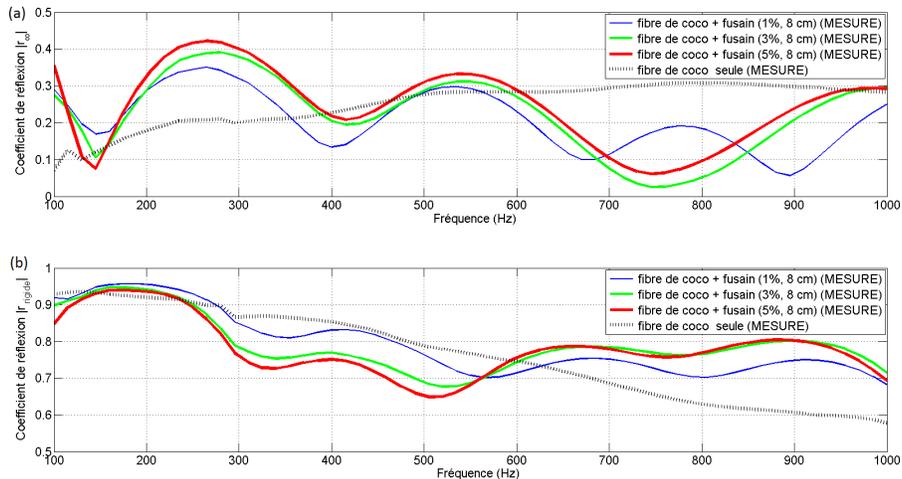


FIGURE 5.6 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence pour la superposition de fusain (8 cm) et de perlite (8 cm) en terminaisons anéchoïque (a) et rigide (b)

La présence de fusain réduit le coefficient de transmission (Fig. 5.7) de 0,1 à 0,15 sur toute la bande de fréquence. Le coefficient de dissipation (Fig. 5.8) est lui fortement augmenté entre 600 et 1000 Hz grâce à l'adaptation d'impédance quart d'onde mentionnée précédemment.

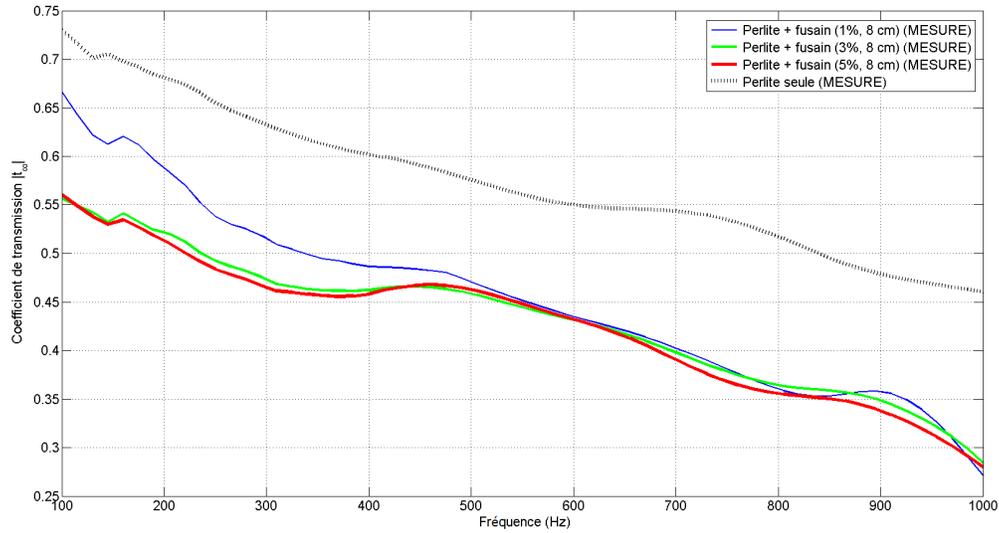


FIGURE 5.7 – Variation du coefficient de transmission acoustique avec la fréquence pour la superposition de fusain (8 cm) et de perlite (8 cm) en terminaison anéchoïque

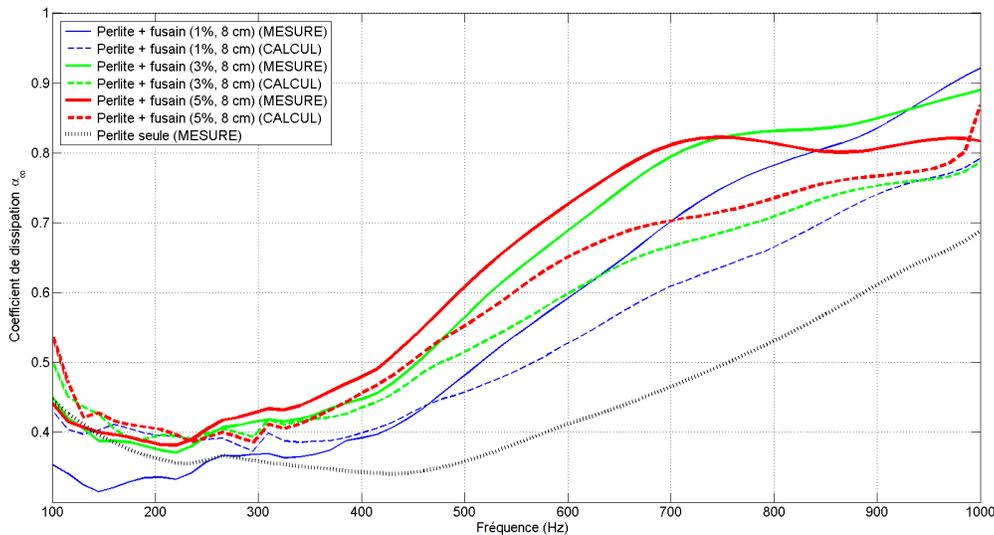


FIGURE 5.8 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence pour la superposition de fusain (8 cm) et de perlite (8 cm) en terminaison anéchoïque

5.2.3 Cas de la superposition du fusain et de la tourbe de coco

Les courbes noires des figures (Fig. 5.9 (a) et rigide Fig. 5.9 (b)), correspondent à la tourbe de coco seule, en réflexion anéchoïque puis rigide. Elles présentent la même allure avec un niveau d'amplitude et d'oscillation à 15% près, ce qui signifie que le matériau absorbe quasiment l'onde acoustique quelle que soit la terminaison de l'échantillon (peu de réflexion sur la face arrière). Les autres courbes (bleues, vertes et rouges obtenues avec superposition de feuillage à 1, 3 et 5%) confirment cette tendance.

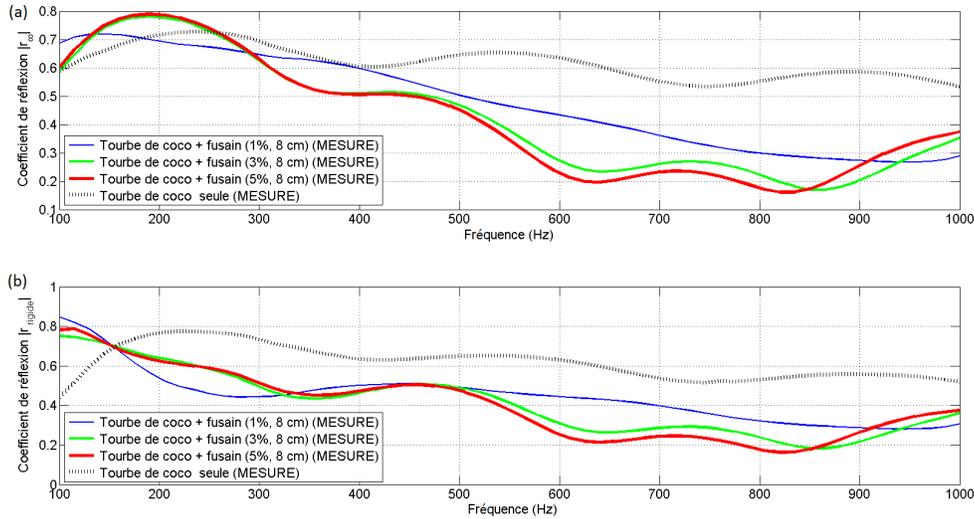


FIGURE 5.9 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence de la superposition de fusain (8 cm) et de tourbe de coco (8 cm) en terminaison anéchoïque (a) et rigide (b)

Le coefficient de réflexion respectif ne dépend plus que de l'impédance de surface de la face avant et non plus de la terminaison ($r_{\infty} = r_{rigide}$). On constate, en outre, que la courbe bleue à 1% perturbe légèrement le coefficient de réflexion de la tourbe de coco seule. Par contre les courbes vertes et rouges montrent une décroissance un peu plus marquée du pouvoir réflecteur, mais surtout, de façon surprenante, des valeurs quasi identiques. Les densités foliaires de 3 et 5 % sont « perçues en surface » de la même manière par l'onde acoustique. Ceci est dû à l'entassement au cours du remplissage des feuilles dans le tube qui obstrue, de manière quasi identique, la face avant du porte échantillon. De plus, ce tassement de feuilles en surface est non contrôlable d'une préparation à l'autre ce qui laisse prévoir un désaccord potentiel entre mesures et calculs, basés sur des pourcentages volumétriques et non surfaciques.

Les variations des coefficients d'absorption et dissipation acoustique en fonction de la fréquence sont illustrées aux Fig. 5.10 et 5.11. Tout comme la superposition de la fibre de coco au feuillage, un décalage entre les valeurs mesurées et calculées est mis en évidence. Ce décalage pouvant certainement être dû à une adaptation d'impédance moins bonne entre les deux milieux étant donné qu'ils ont des impédances relativement proches.

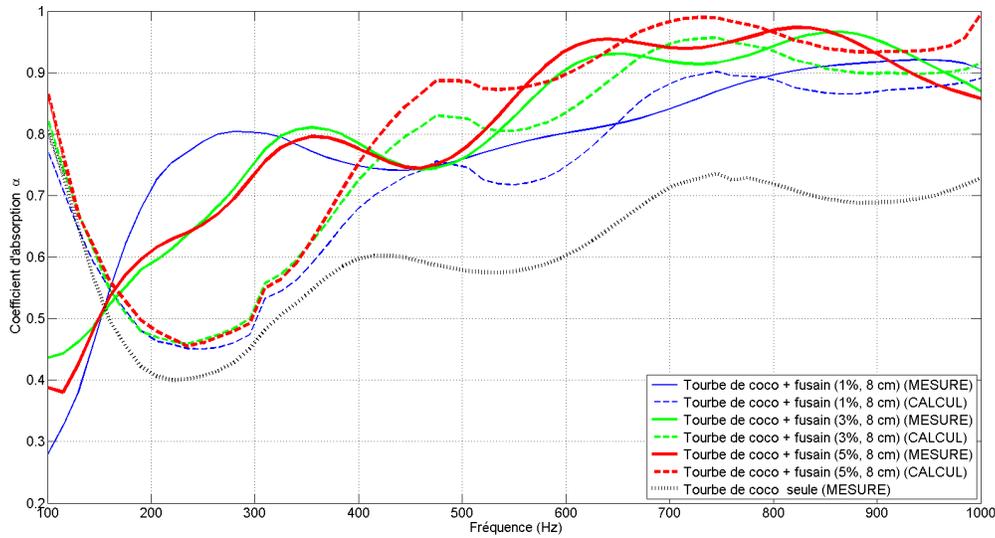


FIGURE 5.10 – Variation du coefficient d’absorption acoustique avec la fréquence pour la superposition de fusain (8 cm) et de tourbe de coco (8 cm) en terminaison rigide

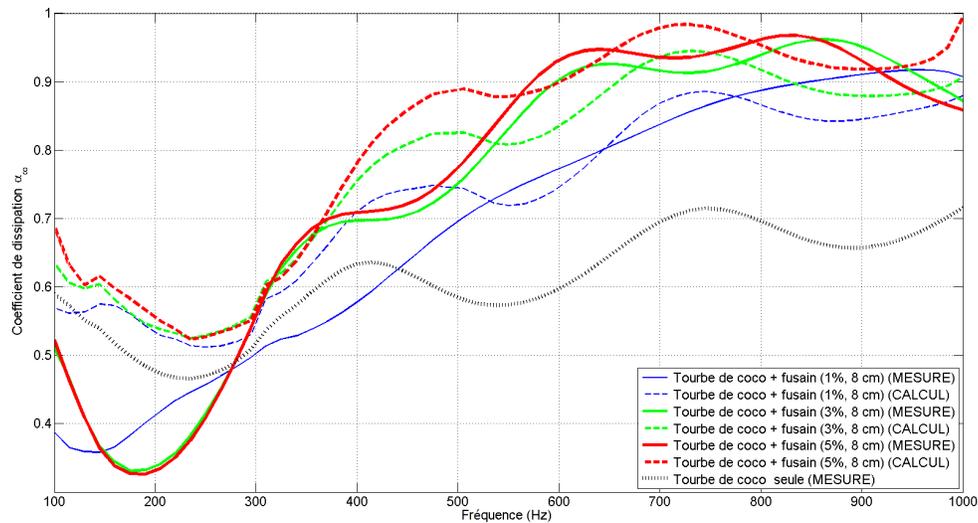


FIGURE 5.11 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence de la superposition de fusain (8 cm) et de tourbe de coco (8 cm) en terminaison anéchoïque

Les coefficients de transmission en terminaison anéchoïque (Fig. 5.12) sont peu sensibles (courbes vertes et rouges identique avec la courbe noire), quelles que soient les densités de feuilles appliquées devant la tourbe de coco. Une légère augmentation a été observée avec 1%. Il s’agit très probablement d’une meilleure adaptation d’impédance du feuillage (intermédiaire entre celle de l’air et de la tourbe de coco). En accord avec ce qui a été supposé précédemment, le feuillage à 3 ou 5% (faiblement absorbant) ne présente qu’une rupture d’impédance de surface sensible au compactage dans le porte-échantillon et affiche en l’occurrence les mêmes caractéristiques que celles de la tourbe de coco seule.

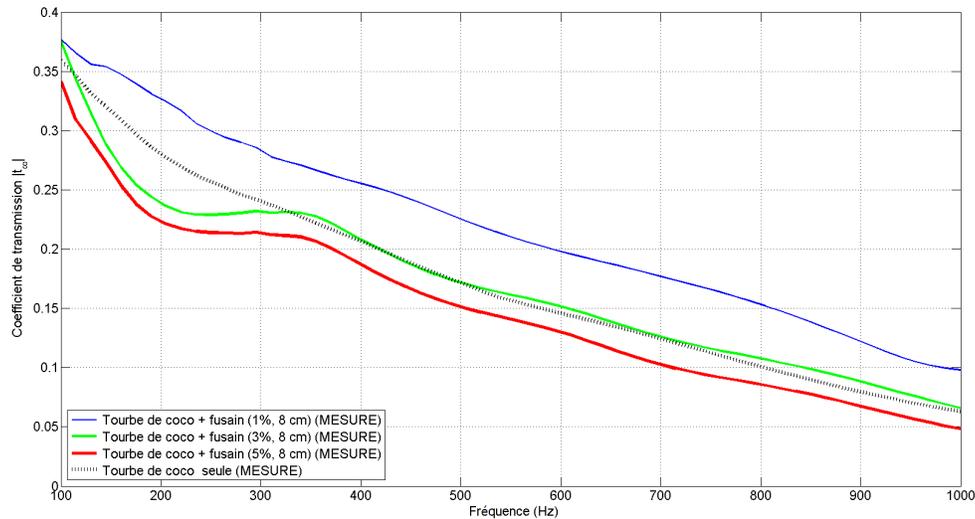


FIGURE 5.12 – Variation du coefficient de transmission acoustique avec la fréquence pour la superposition de fusain (8 cm) et de tourbe de coco (8 cm) en terminaison anéchoïque

5.3 Modélisation et optimisation du coefficient de réflexion d'une paroi végétalisée

Le problème du calcul direct des coefficients d'absorption, de transmission et de dissipation peut être résolu par une approche de matrices de transfert (fonctions de la fréquence), à une ou plusieurs couches. Cette méthode est utilisée pour trouver les épaisseurs et la nature des matériaux permettant de réaliser une adaptation optimale qui minimise le coefficient de réflexion. Dans ce but, un modèle simplifié moyennant les caractéristiques physique de chacune des couches est mis en œuvre de manière à déterminer les paramètres de départ de la modélisation et à optimiser ces paramètres en utilisant la réponse en fréquence calculée à partir du système matriciel. La suite de cette partie traite d'abord de la modélisation d'une couche d'adaptation sur un substrat de manière à préciser l'épaisseur fixant la fréquence centrale du minimum de réflexion. Le cas de deux couches d'adaptation sur substrat qui permet d'élargir la bande passante est abordé dans un second temps.

5.3.1 Modélisation de la superposition d'une couche de feuillage de fusain sur substrat absorbant

L'adaptation d'impédance à une couche est considéré pour un substrat supposé d'impédance et de célérité réelles et indépendantes de la fréquence. Le problème est traité en supposant le substrat infini pour pouvoir négliger les ondes réfléchies par la face arrière. Comme montré précédemment, cette absence de réflexion peut être obtenue avec un milieu suffisamment absorbant, dont la célérité est plus faible que dans le feuillage et l'impédance plus forte. Le substrat de perlite semble donc être un bon candidat pour réaliser cette modélisation. L'impédance Z_s en face avant de la couche s'écrit :

$$Z_s = Z_c \frac{Z_{\text{perlite}} \cos(k_c d_c) + j Z_c \sin(k_c d_c)}{Z_c \cos(k_c d_c) + j Z_{\text{perlite}} \sin(k_c d_c)}, \quad (5.1)$$

où Z_{perlite} est l'impédance caractéristique de la perlite et Z_c , $k_c = \frac{\omega}{c_c}$, c_c et d_c sont respectivement l'impédance caractéristique, le nombre d'onde, la célérité et l'épaisseur de la couche d'adaptation. Le coefficient de réflexion en pression est déduit de l'expression :

$$r_{\text{rigide}} = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \quad (5.2)$$

où Z_0 est l'impédance caractéristique de l'air. Dans la suite, la fréquence de résonance f_0 de la couche est fixée arbitrairement à 500 Hz. Le terme $k_c d_c$ est égal à $\frac{\pi f}{2f_0}$, où f est la fréquence. L'impédance caractéristique de la perlite est fixée à 1280 Rayl (Fig. 4.15). La Fig. 5.13 présente l'évolution du module du coefficient de réflexion en fonction de l'impédance caractéristique d'une couche d'adaptation d'épaisseur égale à un quart de longueur d'onde soit $d_c = \frac{c_c}{4f_0}$.

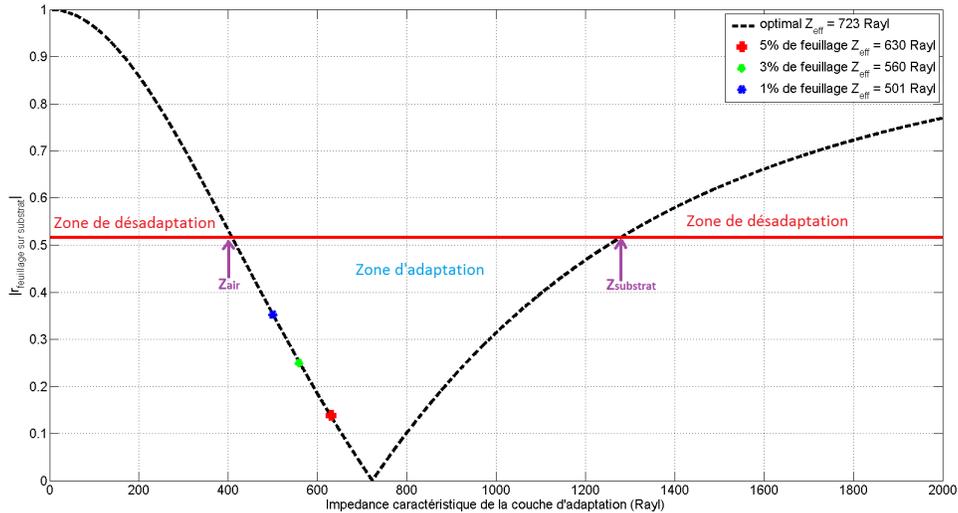


FIGURE 5.13 – Évolution du module du coefficient de réflexion en fonction de l'impédance caractéristique pour une couche d'épaisseur égale au quart de longueur d'onde. Cas d'une couche optimale et de couches de fusain de densités foliaires égales à 1, 3 et 5%

La valeur minimale du module du coefficient de réflexion est obtenue pour une impédance caractéristique optimale Z_{opt} égale à :

$$Z_{opt} = \sqrt{Z_0 Z_{perlite}} = \sqrt{408 * 1280} = 723 \text{ Rayl} \quad (5.3)$$

Si la couche d'adaptation est constituée de fusain d'impédance caractéristique égale à 630, 570 et 500 Rayl pour les densités foliaires de 5, 3 et 1% respectivement (et une épaisseur restant égale au quart de longueur d'onde dans le fusain), le module du coefficient de réflexion est réduit par rapport à la valeur en l'absence de couche mais ne s'annule pas. Ainsi le module du coefficient de réflexion, initialement égal à 0,51 en l'absence de couche (Fig. 5.14) chute à 0,1, 0,25 et 0,35 pour des densités foliaires de 5%, 3% et 1% respectivement.

La Fig. 5.14 représente la variation du module du coefficient de réflexion global en fonction de la fréquence pour une couche d'épaisseur égale au quart de la longueur d'onde à 500 Hz, cette couche pouvant être optimale ou constituée de fusain de densité foliaire égale à 1, 3 ou 5%. La bande d'adaptation est définie comme la bande de fréquence dans laquelle le module du coefficient de réflexion est inférieure à une valeur objective. Cette bande est maximale quand l'adaptation est optimale. L'augmentation de la densité foliaire est accompagnée d'une baisse de module du coefficient de réflexion global sur toute la bande étudiée et par une augmentation de la bande d'adaptation.

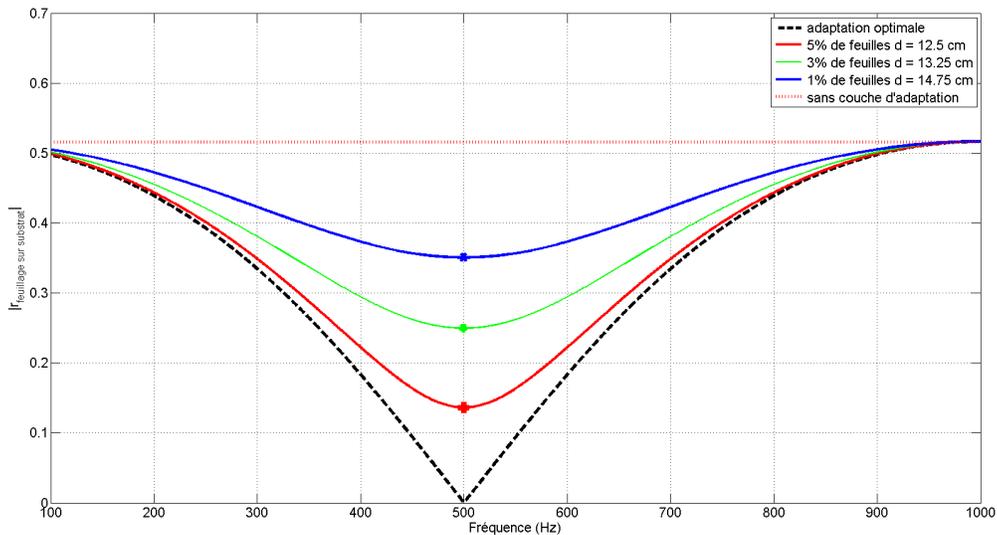


FIGURE 5.14 – Variation du coefficient de réflexion avec la fréquence pour une couche d'épaisseur égale au quart de la longueur d'onde. Cas d'une couche optimale et de couches de fusain de densités foliaires égales à 1, 3 et 5%

Le Tab. 5.1 précise les valeurs des bandes d'adaptation correspondant à des modules du coefficient de réflexion de 0,1, 0,2 et 0,3 pour les différentes couches d'adaptation considérées. Comme attendu, la bande d'adaptation croît lorsque l'impédance caractéristique de la couche d'adaptation s'approche de la valeur optimale.

Coefficient de réflexion visé : r_{rigide}	Bande d'adaptation (%)			
	Fusain (1%)	Fusain (3%)	Fusain (5%)	Optimale
0,1	-	-	-	21,2
0,2	-	-	33,2	44
0,3	-	43	64	70

TABLEAU 5.1 – Largeur des bandes d'adaptation présentant un coefficient de réflexion inférieur à 0,1, 0,2 et 0,3 pour différentes couches d'adaptation sur substrat de perlite

5.3.2 Modélisation d'un bi-couche sur substrat absorbant

Dans cette partie, un modèle à deux couches sur substrat est étudié pour augmenter la bande d'adaptation. Ce dispositif consiste à mettre en cascade deux couches quart-d'onde possédant des impédances intermédiaires entre l'air et le substrat. On suppose que la première couche est constituée de fusain (impédance caractéristique Z_f , célérité c_f , nombre d'onde $k_f = \frac{\omega}{c_f}$ et épaisseur d_f).

La seconde couche à optimiser a les caractéristiques suivantes : impédance caractéristique Z_2 , célérité c_2 , nombre d'onde $k_2 = \frac{\omega}{c_2}$ et épaisseur d_2 . Le substrat est constitué de perlite. Les impédances optimales des couches permettant d'annuler le coefficient de réflexion sont calculées à partir de l'équation 5.4 :

$$Z_s = Z_f \frac{Z_{s2} \cos(k_f d_f) + j Z_f \sin(k_f d_f)}{Z_f \cos(k_f d_f) + j Z_{s2} \sin(k_f d_f)} \quad (5.4)$$

avec :

$$Z_{s2} = Z_2 \frac{Z_{\text{perlite}} \cos(k_2 d_2) + j Z_2 \sin(k_2 d_2)}{Z_2 \cos(k_2 d_2) + j Z_{\text{perlite}} \sin(k_2 d_2)} \quad (5.5)$$

et :

$$Z_2 = Z_f \sqrt{\frac{Z_{\text{perlite}}}{Z_0}} \quad (5.6)$$

La fréquence de référence f_0 est fixée à 500 Hz. L'impédance de la première couche doit être supérieure à celle de l'air et inférieure à celle de la perlite. Le fusain de densité foliaire 5% qui a une impédance caractéristique de 630 Rayl et une célérité de 250 m s⁻¹ est choisi.

Dans ce cas, l'impédance caractéristique optimale de la seconde couche d'adaptation obtenue par annulation du coefficient de réflexion à la fréquence f_0 est de 1116 Rayl. L'impédance de cette seconde couche, qui peut être constituée d'un matériau poreux à optimiser, est la variable d'ajustement du problème.

La Fig. 5.15 présente la variation du module du coefficient de réflexion global pour trois choix de seconde couche d'adaptation :

- une couche d'impédance 1116 Rayl qui annule le module du coefficient de réflexion à 500 Hz
- une couche d'impédance 1060 Rayl qui donne un module du coefficient de réflexion constant sur une large bande de fréquence autour de 500 Hz
- une couche de 913 Rayl pour laquelle apparaissent deux minima du coefficient de réflexion situé de part et d'autre de la fréquence de 500 Hz.

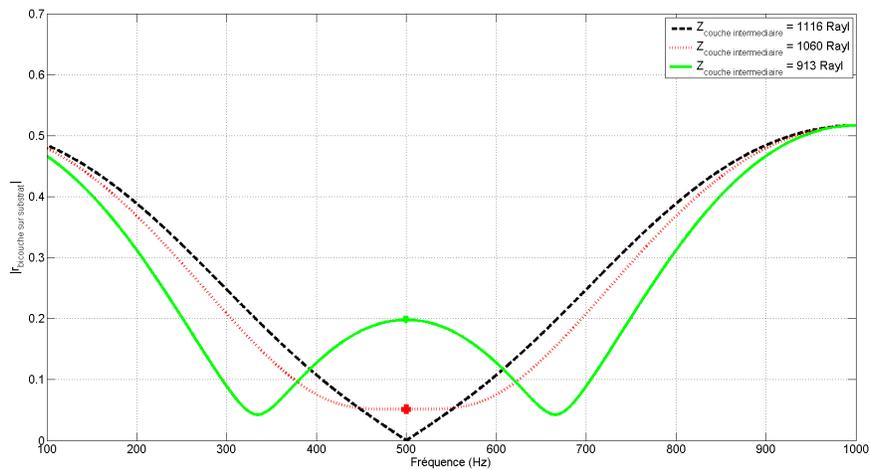


FIGURE 5.15 – Évolution du module du coefficient de réflexion global en fonction de la fréquence pour un bi-couche

Cette évolution du comportement similaire au comportement du couplage entre deux résonateurs [122] est caractéristique du couplage entre les couches d'adaptation. Le premier cas correspond à des couches « sous couplées », le second à un couplage « critique » qui maximise la bande et le troisième à des couches « sur-couplées ». Le Tab. 5.2 donne les caractéristiques des bandes d'adaptation de ces différents systèmes bi-couche pour des coefficients de réflexion visés de 0,1, 0,2 et 0,3. Comme attendu, la largeur de bande est maximale dans le cas du couplage critique (1060 Rayl) pour tous les coefficient de réflexion visés, tandis que le système sur-couplé est caractérisé par deux bandes étroites distinctes symétriques par rapport à $f_0 = 500$ Hz. De manière générale, les systèmes bi-couche augmentent notablement les bandes d'adaptation par rapport aux systèmes à une seule couche d'adaptation (cf. Tab. 5.1). Ils apportent également davantage de souplesse dans la conception de l'adaptation. Pour un système mono-couche, le choix du matériau est critique et doit simultanément respecter des contraintes de célérité et d'impédance caractéristiques. La disponibilité de ce matériau n'est donc pas garantie. Pour le système à deux couches, la première couche peut être choisie librement à condition que son impédance soit

supérieure à celle de l'air.

Ce choix offre une plus grande liberté dans la détermination de l'impédance de la deuxième couche qui optimise l'adaptation et la bande passante. Une autre possibilité pour élargir la bande passante consiste à désaccorder les fréquences de résonance des deux couches par valeurs inférieures et supérieures par rapport à la fréquence centrale sans modifier leurs impédances respectives. Les résultats obtenus sont alors moins bons que ceux obtenus avec des couches accordées et ne sont donc pas présentés dans ce mémoire.

Coefficient de réflexion visé : r_{rigide}	Bande d'adaptation (%) fonction du coefficient de réflexion souhaité		
	$Z_{\text{couche}} = 913 \text{ Rayl}$	$Z_{\text{couche}} = 1060 \text{ Rayl}$	$Z_{\text{couche}} = 1116 \text{ Rayl}$
0,1	-	50,4	38
0,2	99,6	78,4	67,2
0,3	118	102,4	94,4

TABLEAU 5.2 – Largeur des bandes d'adaptation présentent pour un coefficient de réflexion inférieur à 0,1, 0,2 et 0,3 pour différents systèmes bi-couche sur substrat de perlite

5.3.3 Généralisation à un multicouche sur substrat absorbant

Il est possible de généraliser conceptuellement ces modèles en empilant plusieurs couches en quart de longueur d'onde de matériaux d'impédances progressives croissantes à partir de celle de l'air jusqu'à celle du substrat. Dans ce cas, il est possible d'élargir d'avantage la bande passante en fonction du nombre de couches tout en optimisant la hauteur des rebonds du coefficient de réflexion dans la bande d'utilisation, rebonds qui sont d'autant plus nombreux que le nombre de couches est élevé.

5.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis d'identifier deux phénomènes principaux pouvant être utilisés pour optimiser le coefficient d'absorption ou de réflexion acoustiques d'une paroi végétalisée en terminaison rigide :

- la résonance en épaisseur de la paroi dont la fréquence est donnée par $\frac{c_m}{4d_{\text{tot}}}$ où c_m est la célérité moyenne dans la paroi et d_{tot} l'épaisseur totale,
- l'adaptation quart-d'onde entre l'air et le substrat utilisant une ou plusieurs couches dont la fréquence centrale est définie par $\frac{c_c}{4d_c}$ où c_c est la célérité effective dans la couche d'adaptation et d_c son épaisseur.

On remarquera que la résonance en épaisseur est située à une fréquence inférieure à la fréquence centrale de l'adaptation ($d_{\text{tot}} > d_c$ et $c_m < c_c$).

Les Figs 5.16 et 5.17 présentent les coefficients d'absorption de parois constituées de couches d'adaptation quart d'onde mono-couches et bicouches étudiées dans ce chapitre superposées sur une couche de perlite d'épaisseur 8 cm en terminaison rigide. Elles sont caractérisées par une forte interaction entre les effets de résonance en épaisseur et ceux d'adaptation d'impédance entre l'air

et le substrat. Cette interaction ne permet pas une interprétation physique aussi directe que dans le cas où la couche de substrat est d'épaisseur infinie et ne présente pas de résonance (§ 5.3). La résonance en quart de longueur d'onde de la couche, initialement voisine de 500 Hz pour le substrat seul (Fig. 4.30), se décale vers les basses fréquences (suite à l'augmentation de l'épaisseur totale) pour atteindre 300 Hz (resp. 220-230 Hz) avec une (resp. deux) couche(s) d'adaptation. Des résonances en épaisseur d'ordre supérieur sont également visibles vers 650 Hz (Fig. 5.16), 500 et 750 Hz (Fig. 5.17).

L'élargissement de la bande d'adaptation est bien observé lorsque l'impédance se rapproche de l'adaptation optimale pour la paroi à une seule couche d'adaptation (Fig. 5.16). Cet élargissement est moins visible dans le cas de la paroi à deux couches d'adaptation de par la présence d'harmoniques du mode d'épaisseur (Fig. 5.17). Plus généralement, ces résultats illustrent l'effet des résonances de paroi et des couches d'adaptation d'impédance sur l'absorption acoustique. Ils expliquent plusieurs résultats expérimentaux de la littérature [78, 108, 109] et démontrent l'intérêt d'une démarche d'optimisation globale.

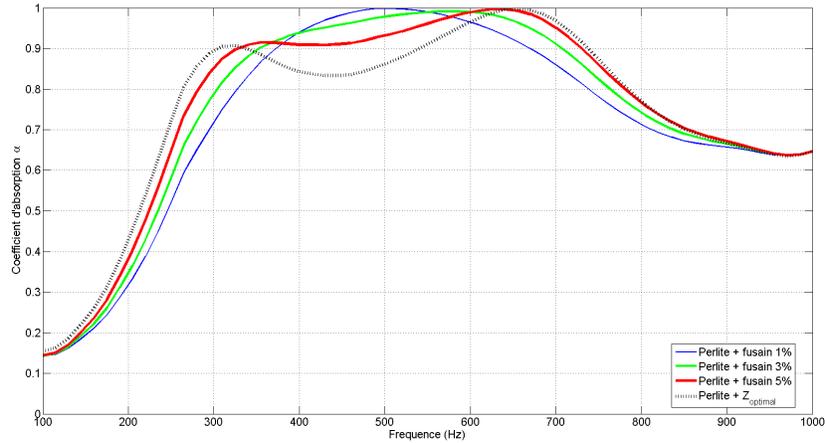


FIGURE 5.16 – Évolution du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence pour un mono-couche d'adaptation quart d'onde sur une couche de perlite de 8 cm d'épaisseur

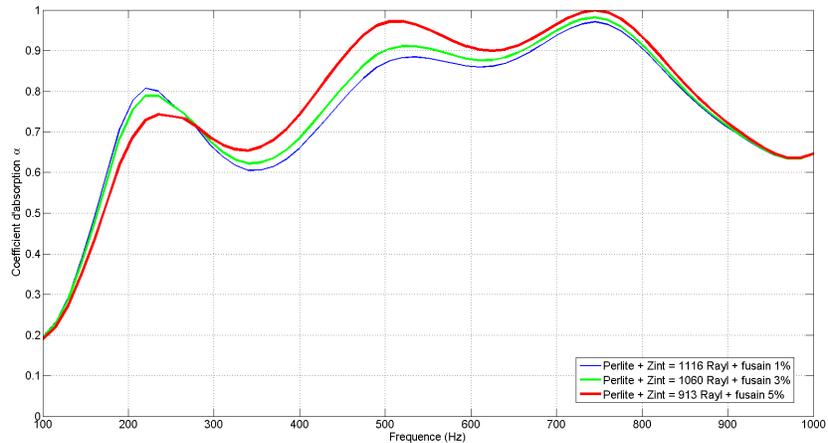


FIGURE 5.17 – Évolution du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence pour un bi-couche d'adaptation quart d'onde sur une couche de perlite de 8 cm d'épaisseur

Conclusion générale et perspectives

Les travaux réalisés dans cette thèse avaient comme objectifs l'identification des phénomènes physiques à l'origine des propriétés acoustiques des feuillages et des substrats, ainsi que la mise en place de stratégies d'optimisation acoustique de parois complexes végétalisées.

L'interaction d'une onde acoustique avec le feuillage peut être caractérisée par les propriétés des champs acoustiques et par les vibrations des feuilles. Il nous a donc semblé naturel de coupler deux méthodes de mesures : une caractérisation acoustique utilisant un tube d'impédance et une mesure vibratoire mettant en œuvre un vibromètre laser à balayage. Ce dispositif expérimental couplé a été développé puis validé sur des échantillons de mousse de mélamine. L'exploitation des mesures vibratoires a nécessité l'élimination des résonances de la colonne d'air, résultat obtenu en normalisant la vitesse vibratoire de surface de l'échantillon (mesurée avec le vibromètre laser), par la vitesse vibratoire de l'air à la surface déduite des mesures acoustiques. Une corrélation a été établie entre les résonances des réponses vibratoires normalisées, les minima du coefficient de réflexion (en module) et les maxima de la dérivée fréquentielle du coefficient d'absorption. Les déformées aux fréquences de résonance correspondent à des modes simples (mode radial) ou complexes (mode plan associant un mode radial ou circonférentiel) de l'échantillon. L'application de ce dispositif aux échantillons de feuillage (laurier et fusain) a montré que leurs résonances sont visibles sur les spectres du coefficient de réflexion et sur l'amplitude vibratoire moyenne de la surface de l'échantillon mais qu'elles ne sont pas clairement corrélées aux maxima de la dérivée fréquentielle du coefficient d'absorption.

La deuxième partie de ce travail de thèse s'est focalisée sur la détermination des propriétés effectives et des coefficients acoustiques d'échantillons de feuillage et de substrat. Pour cela, le banc expérimental a été étendu à la méthode des trois microphones et deux cavités. Appliquée à deux types de feuillages (fusain et laurier) et trois densités foliaires différentes, cette méthode a permis de constater que le milieu air-feuillage présente des propriétés acoustiques effectives variant peu avec la fréquence dans la bande [200 Hz-1000 Hz]. Ce milieu effectif est caractérisé par une augmentation importante de la masse volumique (qui peut atteindre trois fois celle de l'air) et une stabilité de la compressibilité adiabatique. L'effet principal du feuillage sur la propagation acoustique est donc celui d'une masse ajoutée due à la vibration des feuilles qui se couple à l'onde aérienne, l'inertie apportée par la vibration des feuillages entraînant un ralentissement de l'onde acoustique et donc à une perte énergétique. La célérité diminue avec l'accroissement de la densité foliaire de façon similaire pour les deux types de feuillage étudiés. L'effet combiné de l'augmentation de la masse volumique et de la diminution de la célérité avec la densité foliaire conduit globalement à une augmentation de l'impédance caractéristique effective du milieu. L'atténuation et les facteurs de pertes augmentent également avec la densité foliaire pour les deux feuillages étudiés. La comparaison avec les mesures vibratoires suggère que l'atténuation de l'énergie sonore dans le feuillage ne provient pas uniquement de la vibration des feuilles.

La suite de ce travail s'est focalisée sur la caractérisation des propriétés effectives et des coefficients acoustiques (réflexion, absorption, dissipation, transmission) de trois types de substrats : la fibre de coco, la perlite et la tourbe de coco. De par sa nature fibreuse, la fibre de coco est un milieu non dispersif présentant des propriétés acoustiques très proches de celles du feuillage. Par contre, les propriétés acoustiques mesurées pour la perlite et la tourbe de coco dépendent de la fréquence et sont similaires à celles des matériaux poreux. Ils présentent en particulier des facteurs

de perte élevés. Cependant, la faible célérité des ondes dans ces substrats permet une propagation multimode dans le tube d'impédance à partir de 200 Hz (tourbe de coco) ou 300 Hz (perlite) qui rend l'interprétation des résultats de mesures difficile. Cette faible célérité conduit également à l'apparition de résonances en épaisseur des échantillons. Le coefficient d'absorption de la paroi est notablement augmenté au voisinage des fréquences de résonance.

L'étude des propriétés acoustiques d'échantillons constitués de la superposition d'une couche de feuillage et d'une couche de substrat a mis en évidence une augmentation du coefficient d'absorption acoustiques résultant des résonances de l'échantillon et de l'adaptation d'impédance entre l'air et le substrat apporté par la couche de feuillage. Une démarche d'optimisation de l'adaptation d'impédance a été conduite dans le cas d'une seule couche d'adaptation (fusain) et de deux couches d'adaptation (fusain + poreux). Elle a mis en évidence une stratégie possible d'optimisation de l'absorption acoustique dans une bande de fréquence déterminée.

Bien que les résultats décrits précédemment aient permis d'avancer dans la compréhension de l'acoustique des parois végétalisées, un certain nombre de questions posées au démarrage de ce travail ou apparues au cours de la thèse restent ouvertes. Un ensemble de questions concernent les limitations du dispositif de mesure développé et la transposition des résultats de mesure à une paroi végétalisée réelle. Le diamètre du tube d'impédance a été choisi initialement pour pouvoir caractériser des échantillons de feuillages ayant une surface et un nombre de feuilles suffisant pour être représentatifs. De ce fait, le tube est peu adapté pour caractériser des milieux à célérité lente comme la perlite ou la tourbe de coco pour lesquels la fréquence de coupure est très basse. Les solutions possibles sont l'utilisation d'un tube de diamètre plus faible ou la mise en place d'une méthode de caractérisation adaptée à la propagation multimode. De manière plus générale, la caractérisation des propriétés acoustiques des feuillages et substrats au dessus de 1000 Hz reste à traiter.

La géométrie du tube d'impédance limitée latéralement influe également sur la vibration de l'échantillon en particulier au voisinage des résonances. La condition mécanique sur la périphérie de l'échantillon contraint la vibration de l'échantillon et modifie donc l'amplitude et la fréquence des modes vibratoires qui détermine en partie les propriétés acoustiques. De ce fait, la question de la contribution des résonances observées aux propriétés acoustiques de parois réelles devra être traitée.

Concernant les mécanismes de couplage entre onde acoustique et vibration de feuilles, les travaux réalisés ont permis d'identifier les effets principaux à partir d'une approche phénoménologique. Les tendances observées (augmentation de la masse volumique, stabilité de la compressibilité, dissipation due partiellement à la vibration du feuillage) peuvent servir de point de départ pour construire un modèle physique basé sur la structure du feuillage pour prédire les effets acoustiques observés, et à terme, intégrer la structure fine des plantes (géométrie et propriétés dynamiques des feuilles nervurées, tiges et branches) dans l'optimisation de la paroi végétalisée. Enfin, l'approche analytique d'optimisation des parois végétalisées proposées dans ce travail pourrait être ultérieurement complétée par une approche numérique consistant à coupler le calcul des caractéristiques acoustiques par matrice de transfert à un algorithme d'optimisation.

Bibliographie

- [1] Z. Azkorra, G.Pérez, J.Coma, L.F. Cabeza, S.Bures, J.E.Álvaro, A. Erkoreka, and M. Urrestarazu. Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. *Applied Acoustics.*, 89 :46–56, 2015.
- [2] D. Lunain, J. C. Caspal, and E. Consolen. Synthèse et bilan d’activité 2010-2013, orsi rp3-s10006 plume. Technical report, CETE Méditerranée, 2013.
- [3] T. Van. Renterghem, B. Altreuther, J. Defrance, K. Attenborough, S. Taherzadeh, I. Bashir, Y. Smyrnova C. Cheal H. Yang, J. Kang, K. V. Horoshenkov, and A. Khan. Acoustical shielding by hedges and shrubs. Technical report, HOSANNA - Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means, 2013.
- [4] G.Guillaume and B.Gauvreau. Rôle du végétal dans le développement urbain durable : une approche par les enjeux liés à la climatologie, l’hydrologie, la maîtrise de l’énergie et les ambiances : Évaluation de l’impact de revêtements végétaux sur les ambiances sonores. Technical report, IFSTTAR, 2013.
- [5] M. A. Kenai. *Caractérisation, Analyse et Modélisation des échanges énergétiques entre un mur végétalisé intensif et son environnement*. PhD thesis, Université d’Artois, Septembre 2016.
- [6] M. A. Kenai, L. Libessart, S. Lassue, and D. Defer. Performance energetique des parois végétalisées. In *XIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois Sur la Thermique des Systèmes*, 2015.
- [7] JardinsdeBabylone. www.jardinsdebabylone.fr/projects/mur-vegetal-murs-vegetaux/ubisoft/. Consulté le : 10-10-2016.
- [8] S.Dalley. *The Mystery of the Hanging Garden of Babylon : An Elusive World Wonder Traced*. Oxford university press., 2013.
- [9] Nick Green. Les jardins suspendus de babylone - arte documentaire aout 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=BtPDK16A5xY>, 2015.
- [10] R. L. Hindle. A vertical garden : origins of the vegetation-bearing architectonic structure and system (1938). *Stud. Hist. Gard. Des. Landscapes*, 32(2) :99–110, 2012.

- [11] M. Bouattour et F. Alain. La végétalisation des bâtiments. Technical report, DREIF - Direction Régionale de l'Équipement Ile de France, EPA - l'Environnement Protection Agency., 2009.
- [12] P. Blanc. Le mur végétal une approche scientifique et artistique. www.murvegetalpatrickblanc.com. consulté le : 2016-10-10.
- [13] Jean-François Daures. *Architecture Vegetale*. Eyrolles, ISBN 978-2-212-12674-7, 2011.
- [14] GreenWall. www.greenwall.fr/. Consulté le : 10-10-2016.
- [15] Mur Mure VEGETAL. Mur mure vegetal. www.murmurevegetal.com/plantes-mur-vegetal. Consulté le : 10-10-2016.
- [16] Optigreen. L'alliance optigreen est spécialisée dans la réalisation de toitures végétales de tous types et de toutes tailles. www.optigreen.fr/SystemSolutions/Facade-Jardin.html. Consulté le : 10-10-2016.
- [17] S. Demguilhem. Vertige. www.vert-tige.eu/fr/realisations-toitures-vegetalisees/vertige/26-immeuble-36-ponts-toulouse-31.html. Consulté le : 02-11-2016.
- [18] J. B. Wasselin. Un jardin sur le toit. www.unjardinsurletoit.com/toiture-vegetale.html. Consulté le : 02-11-2016.
- [19] Les sept merveilles du monde. http://www.histoire-fr.com/sept_merveilles_du_monde_2.htm. Consulté le : 10-10-2016.
- [20] J. Yang, Q. Yu, and P. Gong. Quantifying air pollution removal by green roofs in chicago. *Atmospheric Environment*, 42 :7266–7273, 2008.
- [21] M. Thoennesen. Elementdynamik in fassadenbegrünendem wilden wein. *Kölner Geograph. Arbeiten Heft*, 78 :1–110, 2002.
- [22] M. Köhler. Green facades : a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11 :423–436, 2008.
- [23] E. Alexandri et P. Jones. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Build. Environ*, 43 :480–493, 2006.
- [24] C. Y. Cheng, K. K. S.Cheung, and L. M. Chu. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Build. Environ*, 45 :1779–1787, 2010.
- [25] N. H. Wong, A. Y. K. Tan, P.Y. Tan, K. Chiang, and N.C. Wong. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Build. Environ*, 45 :411–420, 2010.
- [26] K.L.Getter, D.Bradley Rowe, and B.M.Cregg. Solar radiation intensity influences extensive green roof plant communities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8 :269–281, 2009.
- [27] M. A. Kenai, L. Libessart, S. Lassue, and D. Defer. An experimental investigation of the thermal effects of green walls : impact of plants obscuration on energy balance. In *9th International Energy Forum on Advanced Building Skins*, 2014.

- [28] R. Djedjig. *Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain*. PhD thesis, Université de la Rochelle, Decembre 2013.
- [29] M.R. Connelly. *Acoustical characteristics of vegetated roofs-contributions to the ecological performance of buildings and the urban soundscape*. PhD thesis, University of british columbia (Vancouver), 2011.
- [30] T.Van. Renterghem ans M. Hornikx, J. Forssen, and D Botteldooren. The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Build. Environ*, 61 :34–44, 2012.
- [31] H.S. Yang, J. Kang, and M.S.Choi. Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. *Build. Environ*, 50 :44–55, 2012.
- [32] G. Guillaume, B. Gauvreau, and P.L'Hermitte. Estimation expérimentale des propriétés acoustiques de surfaces végétalisées : influence de la variabilité spatiale et de la configuration de mesure. In *12 ème Congrès Français d'Acoustique, Poitiers, France*, 2014.
- [33] News jardin TV. [/www.newsjardintv.com/question-du-jour/LE-LIERRE-ABIME-T-IL-LES-MURS.html](http://www.newsjardintv.com/question-du-jour/LE-LIERRE-ABIME-T-IL-LES-MURS.html). Consulté le : 10-10-2016.
- [34] C. Moss. Réaliser un mur végétal. www.chiloe-moss.com/mur-vegetal/realiser-un-mur-vegetal.html. Consulté le : 10-10-2016.
- [35] Norme ISO-151861. Acoustics : Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity part 3 : Laboratory measurements at low frequencies. 2002.
- [36] Norme ISO-10534-1. Acoustique : Détermination du facteur d'absorption et de l'impédance acoustique à l'aide d'un tube d'impédance, partie 1 : Méthode du taux d'ondes stationnaires. 1996.
- [37] ISO 10534-2. Acoustique : Détermination du facteur d'absorption et de l'impédance acoustique à l'aide d'un tube d'impédance, partie 2 : Méthode de la fonction de transfert. 1996.
- [38] J. Y. Chung and D. A. Blaser. Transfer function method of measuring in duct acoustic properties i. *J.Acoust.Soc.Am.*, 68(3) :907–913, 1980.
- [39] J. Han, D. W. Herrin, and A. F. Seybert. Accurate measurement of small absorption coefficients. In *SAE Noise and Vibration conference, St. Charles, Illinois*, 2007.
- [40] Microflow. Acoustic impédance measurement. Technical report, 2006.
- [41] J.Prisutova and K.Horoshenkov. A method to determine the acoustic reflection and absorption coefficients of porous media by using modal dispersion in a waveguide. *J. Acoust. Soc. Am*, 136(6) :2947–2958, 2014.
- [42] J. Prisutova. *Sound propagation air-filled pipes with inhomogeneities*. PhD thesis, University of Sheffield, October 2015.
- [43] J. Prisutova, K.V. Horoshenkov, B. Brouard, and J.P. Groby. An application of normal mode decomposition to measure the acoustical properties of low growing plants in a broad frequency range. *Applied Acoustics.*, In Press :1–12, 2016.

-
- [44] S. Vanlanduit, J. Vanherzeele, P. Guillaume, and G. D. Sitter. Absorption measurement of acoustic materials using a scanning laser doppler vibrometer. *J. Acoust. Soc. Am.*, 117(3) :1168–1172, March 2005.
- [45] C. Vuye, S. Vanlanduit, J. Vanherzeele, and P. Guillaume. Measurement of normal and oblique incidence absorption using a scanning laser doppler vibrometer. In *19th International Congress on Acoustics, Madrid, Espagne, 2007*.
- [46] C. Vuye, S. Vanlanduit, J. Vanherzeele, and P. Guillaume. Measurement of normal and oblique incidence absorption coefficients using a scanning laser doppler vibrometer. In *19th International Congress on acoustics, Madrid Spain, 2007*.
- [47] M. Fulbert, E. Redon, Q. Leclère, and E. Gourdon. Analyse expérimentale par vibrométrie laser des propriétés acoustiques des cavités irrégulières. In *13ème Congrès Français d'Acoustique, Le Mans, France, 2016*.
- [48] H. Utsuno, T. Tanaka, T. Fujikawa, and A. F. Seybert. Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 86(2) :637–643, 1989.
- [49] B. H. Song and J. S. Bolton. A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 107(3) :1131–1152, 2000.
- [50] ASTM E2611-09. Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method, "american society for testing and materials". 2009.
- [51] Bruel & Kjaer. Product data : Impedance tube kit and transmission loss tube kit. Technical report, 2014.
- [52] T. Iwase, N. Chikamatsu, and M. Hosokawa. An evaluation method of sound insulation characteristics of plate using small area test material and transfer function analysis. In *Internoise 1997, Budapest, Hongrie*, pages 1445–1448, 1997.
- [53] Y. Salissou, R. Panneton, and O. Doutres. Complement to standard method for measuring normal incidence sound transmission loss with three microphones. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(3) :216–222, 2012.
- [54] SALISSOU. *Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux à cellules ouvertes et à matrice rigide ou souple*. PhD thesis, Université de Sherbrooke, Avril 2009.
- [55] O. Doutres, R. Panneton, and Y. Salissou. An additional configuration to standard astm e2611-09 for measuring the normal incidence sound transmission loss in a modified impedance tube. In *Proceedings of Acoustics Nantes Conference*, August 2012.
- [56] M. L. Munjal and A. G. Doige. Theory of a two source-location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element. *J. Sound. Vibr.*, 141(2) :323–333, 1990.

- [57] A. M. Pedrosa, F. D. Denia, and F. J. Fuenmayor. Experimental measurement of acoustic properties by a two source method with simultaneous excitation. In *18th Internatinal Congress on Sound and Vibration (ICSV), Rio de Janero, Bresil, 2011*.
- [58] A. Grosso, E. Tijs, and B. Zajamsek. An in-situ impedance measurement set-up for high sound pressure level. In *American Marketing Association Conferences, Arnhem, Pays-Bas*, pages 100–104, 2013.
- [59] E. Tijs and E. Druyvesteyn. An intensity method for measuring absorption properties in situ. *Acta Acustica united with Acustica*, 98 :342–353(12), March 2012.
- [60] J. F. Allard and B. Sieben. Measurements of acoustic impedance in a free field with two microphones and a spectrum analyzer. *J. Acoust. Soc. Am.*, 77(4) :1617–1618, Decembre 1985.
- [61] T Dupont. *Transparence et absorption acoustiques des structures microperforées*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), 2002.
- [62] M. Vorlander and E. Mommertz. Measurement of scattering coefficients of surfaces in the reverberation chamber and in the free field. In *Proc 15th, Internat Congress on Acoustics, Trondheim, Norvege, 1995*.
- [63] T.J. Hargreaves, T.J. Cox, Y.W. Lam, and P.D. Antonio. Surface diffusion coefficients for room acoustics : Free-field measures. *J. Acoust. Soc. Am*, 108(4) :1710–1720, 2000.
- [64] Y. Smyrnova, J. Kang, C. Blackford, and C. Cheal. Diffusion coefficient of vegetation : measurements and simulation. In *Proceedings of the Acoustics*, pages 4089–4095, Nantes, France, 2012.
- [65] C Brutel-Vuilmet. *Prise en compte de l'angle d'incidence dans la caractérisation en laboratoire de la transmission acoustique des éléments de façade*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), 2005.
- [66] Norme ISO 354. Acoustique - mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante. 2003.
- [67] ISO 17497-2. Acoustics : Sound scattering properties of surfaces, part 1 : Measurement of the random incidence scattering coefficient in a reverberation room. 2012.
- [68] H. Seok, J. Yang, and C. Cheal. Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation. *Acustica United Acta with Acustica*, 99(3) :379–388, 2013.
- [69] M. Vorlander and E. Mommertz. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Applied Acoustics*, 60(2) :187–199, 2000.
- [70] J. Ducourneau, A. Faiz, and J. Chatillon. Nouvelle méthode de mesure du coefficient de diffusion acoustique des parois à relief dans des locaux industriels. In *10ème Congrès Français d'Acoustique*, Lyon, France, 2010.
- [71] D.E. Aylor. Some physical and psychological aspects of noise attenuation by vegetation. In *Forest Service NE general technical report - Upper Darby (25)*, 1977.

- [72] D.E. Aylor. Sound transmission through vegetation in relation to leaf area density, leaf width, and breadth of canopy. *J. Acoust. Soc. Am*, 51 :411–414, 1972.
- [73] D.E. Aylor. Noise reduction by vegetation and ground. *J. Acoust. Soc. Am*, 51 :197–205, 1971.
- [74] M.J.M. Martens, P.P.J. Serverens, H.A.W. Van Wissen, and L.A.M.V.D. Heijden. Acoustic reflection characteristics of deciduous plant leaves. *Environ. Exper. Bot*, 25(3) :285–292, 1985.
- [75] J. Kang, H. Yang, Y. Smyrnova, C. Cheal, K. Attenborough, S. Taherzadeh, T. Van Renterghem, D. Botteldooren, L. Ding, K.V. Horoshenkov, H. Benkreira, and A. Khan. Theoretical models and / or empirical formulae for predicting acoustic performance of vegetation relating to application in an urban context. Technical report, HOSANNA - Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means, 2011.
- [76] T. Van Renterghem, B. Altreuther, J. Defrance, K. Attenborough, S. Taherzadeh, I. Bashir, Y. Smyrnova, C. Cheal, H. Yang, J. Kang, K. V. Horoshenkov, and A. Khan. Technical report on acoustical shielding by hedges and shrubs - hosanna. Technical report, HOSANNA - Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means, 2012.
- [77] J.Y. Jeon, P.J. Lee, and Y.H. Kim. Identification of acoustic properties of ground and vegetation. Technical report, HOSANNA - Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means, 2011.
- [78] K.V. Horoshenkov, A. Khan, and H. Benkreira. Acoustics properties of low growing plants. *J. Acoust. Soc. Am*, 133 :2554–2565, 2013.
- [79] J. Prisutova, K.V. Horoshenkov, J. P. Groby, and B. Brouard. The frequency and angular dependence of the absorption coefficient of common types of living plants. In *Internoise*, Melbourne, Australia, 2014.
- [80] K. V. Horoshenkov. Porous material characterisation via acoustical methods. In *22 th International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy*, 2015.
- [81] Y. Miki. Acoustic properties of porous materials-generalization of empirical models. *J. Acoust. Soc. Jpn*, 11(1) :25–28, 1990.
- [82] K. V. Horoshenkov, H. Benkreira, A. Khan, S. Taherzadeh, J. Kang, H. Yang, Y. Smyrnova, and C. Cheal. Theoretical models and / or empirical formulae for predicting acoustic performance of vegetation relating to application in an urban context. Technical report, HOSANNA - Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means, 2013.
- [83] K.V. Horoshenkov and M.J. Swift. The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *J. Acoust. Soc. Am*, 110(5) :2371–2378, 2001.
- [84] Norme ISO 17497-2. Acoustics measurement of the directional diffusion coefficient in a free field. 2005.

-
- [85] M.J.M. Martens. *Physical methods in plant science, Laser doppler vibrometer measurements of leaves*. Springer-Verlag, 1990.
- [86] M.J.M. Martens and A. Michelsen. Absorption of acoustic energy by plant leaves. *J. Acoust. Soc. Am*, 69(1) :303–306, 1981.
- [87] P.M. Morse and K.U. Ingrad. *Theoretical acoustics*. McGraw-Hill, 1968.
- [88] S.H.Tang, P.P.Ong, and H.S.Woon. Monte carlo simulation of sound propagation through leafy foliage using experimentally obtained leaf resonance parameters. *J.Acoust.Soc.Am.*, 80(6) :1740–1744, 1986.
- [89] C.Magal, M.Schöller, J.Tautz, and J.Casas. The role of leaf structure in vibration propagation. *J.Acoust.Soc.Am.*, 108(5) :2412–2418, 2000.
- [90] C. D. Loughian. *Effets de la dynamique sur la croissance du peuplier en réponse à une stimulation mécanique externe*. PhD thesis, École Polytechnique, October 2012.
- [91] C. D. Loughian, J. M. Allain, E. D. Langre, and B. Moulia. Caractérisation vibratoire d’une plante : Expériences et calculs. In *20 ème Congrès Français de Mécanique*, Besançon, France, 2011.
- [92] C. D. Loughian, L. Tadrist, J. M. Allain, J. Diener, B. Moulia, and E.D.Langre. Measuring local and global vibration modes in model plants. *Comptes Rendus Mecanique*, 342(1) :1–7, 2013.
- [93] J. Kang, H. Yang, Y. Smyrnova, C. Cheal, J. Forssén, K. Attenborough, S. Taherzadeh, T. Van. Renterghem, D. Botteldooren, and A. Mandon. Acoustical characterisation of tsb species. Technical report, HOSANNA - Holistic and sustainable abatement of noise by optimized combinations of natural and artificial means, 2011.
- [94] C. Cheal, H. Seok Yang, J. Kang, and Y. Smyrnova. Experimental study on the effects of vegetation coverage and soil depth and water content on sound absorption. In *6th forum acusticum, Aalborg, Danemark*, 2011.
- [95] M. Bérengier, M.R. Stinson, G.A. Daigle, and J.F. Hamet. Porous road pavements : Acoustical characterization and propagation effects. *J. Acoust. Soc. Am*, 101(1) :155–162, 1997.
- [96] K. Attenborough, K.M. Li, and K.V. Horoshenkov. Predicting outdoor sound. *Taylor & Francis*, 2006(a).
- [97] P. A. Chabriac, E. Gourdon, A. Fabbri P. Gle, and H. Lenormand. Agricultural by-products for building insulation : Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters. *Construction and Building Materials*, 112 :158–167, 2016.
- [98] D. L. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J.Fluid Mech*, 176 :379–402, 1987.
- [99] Y. Champoux and J. F. Allard. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air saturated porous media. *J. Appl. Phys*, 70(4) :1975–1979, 1991.

-
- [100] Glé. P. *Acoustics of Building Materials based on Plant Fibers and Particles : Tools for Characterization, Modelling and Optimization*. Phd theses, INSA de Lyon, February 2013.
- [101] P. Glé, E. Gourdon, and L. Arnaud. Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoustics*, 72(5) :249–259, 2011.
- [102] E. Gourlay, P P. Glé, L. Arnaud, and E. Gourdon. Propriétés multiphysiques des bétons de chanvre. *Matériaux & Techniques*, 99(6) :625–631, 2011.
- [103] P. Glé, E. Gourdon, and L. Arnaud. Modelling of the acoustical properties of hemp particles. *Construction and Building Materials*, 37 :801–811, 2012.
- [104] L. Ding, T. Van Renterghem, D. Botteldooren, K.V. Horoshenkov, and A. Khan. Sound absorption of porous substrates covered by foliage : Experimental results and numerical predictions. *J. Acoust. Soc. Am*, 134(6) :4599–4609, 2013.
- [105] M.A.Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid.i. low-frequency range. *J.Acoust.Soc.Am.*, 28(2) :168–178, 1956.
- [106] M.A.Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid.ii. high-frequency range. *J.Acoust.Soc.Am.*, 28(2) :179–191, 1956.
- [107] O. Doutres, Y. Salissou, N. Atalla, and R. Panneton. Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. *Applied Acoustics*, 71(6) :506–509, 2010.
- [108] F. Asdrubali, F. D. Alessandro, and N. Mencarelli. Sound absorption properties of tropical plants for indoor applications. In *The 21st International Congress on Sound and Vibration, Beijing, China*, 2014.
- [109] F. D’Alessandro, F. Asdrubali, and N. Mencarelli. Experimental evaluation and modelling of the sound absorption properties of plants for indoor acoustic applications. *Build. Environ*, 94 :913–923, 2015.
- [110] G. Guillaume, O. Faure, B. Gauvreau, F. Junker, and M. Berengier. Estimation of impedance model input parameters from in situ measurements : Principles and applications. *Applied Acoustics.*, 95 :27–36, 2015.
- [111] T. Van . Renterghem, K.Attenborough, M.Maennel, J. Defrance, K.Horoshenkov, J.Kang, I.Bashir, S.Taherzadeh, B. Altreuther, A.Khan, Y.Smyrnova, and H.S.Yang. Measured light vehicle noise reduction by hedges. *Applied Acoustics*, 78 :19–27, 2014.
- [112] N.H. Wong, A.Y.K. Tan, P.Y. Tan, K.Chiang, and N.C. Wong. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Build. Environ*, 45 :411–420, 2010.
- [113] R. Thomazelli, F. Caetano, and S. Bertoli. Acoustic properties of green walls : Absorption and insulation. In *22nd International Congress on Acoustics*, Buenos Aires, Argentina, 2016.
- [114] M. Connelly, D. Bolbolan, M. Akbarnejad, and S. Daneshpanah. Sound absorption and scattering properties of living walls : Applications to room acoustics. *Canadian Acoustics*, 44(3), 2016.

- [115] T.Shimizu, T.Matsuda, Y. Nishibe, M.Tempo, K.Yoshitani, and Y.Azumi. Suppression of diffracted sounds by green walls. *J.Noise.Control.Engr.*, 64(2) :142–152, 2016.
- [116] D. Lunain, D. Ecotièrè, and B. Gauvreau. In-situ evaluation of the acoustic efficiency of a green wall in urban areas. In *Internoise*, Hamburg, Germany, 2016.
- [117] Canevaflor. Canevaflor le spécialiste des murs végétalisés dépolluants. www.canevaflor.com, 2013.
- [118] C.Potel and M.Bruneau. *Acoustique générale*. Ellipses, ISBN 2-7298-2805-2, 2006.
- [119] Polytec. *Software Manual Polytec Scanning Vibrometer Software 9.0*.
- [120] Polytec. *Hardware Manual Polytec Scanning Vibrometer*.
- [121] J.C. Leroux. Rapport de mesures : Jungle art. Technical report, Centre de Transfert de Technologie du Mans, 2012.
- [122] V. Romero Garcia, G. Theocharis, O. Richoux, A. Merkel, V. Tournat, and V. Pagneux. Perfect and broadband acoustic absorption by vertically coupled sub-wavelength resonators. *Sci. Rep.*, 6 :19519, 2016.

Liste des contributions scientifiques

Article en revue internationale

T. Shimizu, E. Attal, B. Dubus, Study of the influence of substrate on the sound insulation performance of green noise barriers, *Build. Environ* (En préparation).

Article en revue nationale

E. Attal, N. Côté, G. Pot, T. Shimizu et B. Dubus, « Caractérisation acoustique d'éléments constitutifs de murs végétalisés », *Acoustique & Technique* **82**, 12-16 (2016).

Conférences internationales avec actes

E. Attal, N. Côté, G. Haw, G. Pot, C. Vasseur, C. Granger, C. Croëne, B. Dubus, « Experimental characterization of foliage and substrate samples by the three-microphone two-load method », *Internoise, Hamburg, Germany* (2016).

E. Attal, N. Côté, G. Haw, C. Granger, B. Dubus, « Combined acoustic and laser vibration characterizations of acoustic foam samples and green wall elements inside an acoustic impedance tube », *Internoise, San Francisco, USA* (2015).

Conférence nationale avec acte

E. Attal, N. Côté, G. Haw, C. Granger, B. Dubus « Caractérisation acoustique et vibratoire d'échantillons inhomogènes de types feuillage ou substrat ». *Congrès Français d'Acoustique, Le Mans* (2016).

Journées d'étude

E. Attal, « Développement d'une méthode de caractérisation acoustique de Parois Complexes Végétalisées », *Doctoriales, Lille, poster* (2015).

E. Attal, « Développement d'une méthode de caractérisation acoustique de Parois Complexes Végétalisées (PCV) en fonction de l'angle et de la fréquence de l'onde incidente », *Journées doctorant ADEME, Angers, poster* (2014).

Indice d'affaiblissement acoustique et isolement de paroi

L'isolement acoustique entre deux locaux correspond à la différence arithmétique entre le niveau de pression acoustique L_1 entre le local émission et le niveau de pression acoustique L_2 dans le local réception.

On distingue trois types d'isolement entre locaux :

- L'isolement acoustique brut entre les locaux : $D = L_1 - L_2$ en décibels (dB). Cet isolement dépend des caractéristiques du local réception,
- L'isolement acoustique normalisé entre les locaux : $D_n = L_1 - L_2 - 10 \log_{10} \frac{A}{A_0}$ en dB ; A est l'aire d'absorption équivalente en m^2 constatée dans le local de réception lors des essais. Elle est déterminée en utilisant la formule de Sabine (cf. Eq. 1.14, §. 1.3.3), après avoir mesuré la durée de réverbération du local réception. A_0 est une aire d'absorption équivalente de référence, prise égale à $10 m^2$, sauf indication contraire dans un règlement ou une prescription contractuelle. Le terme correctif utilisé correspond à une évaluation de la différence de niveau L_2 lorsque l'aire d'absorption varie de A à A_0 ,
- L'isolement acoustique standardisé entre les locaux : $D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{T}{T_0}$ en dB ; T est la durée de réverbération en seconde constatée dans le local de réception lors des essais. T_0 est une durée de réverbération de référence prise égale à 0,5 seconde. En France jusqu'au 1^{er} janvier 2000, cet isolement standardisé était appelé « isolement acoustique normalisé ». Le nouveau vocabulaire à utiliser résulte d'une harmonisation européenne.
- L'indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi : $R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{A}{S}$ en dB, A est l'absorption équivalente du local de réception et S, la surface de la paroi de séparation entre les locaux. L'indice d'affaiblissement acoustique est mesuré en laboratoire conçu de telle sorte qu'il n'y ait pas de transmissions latérales ou parasites entre locaux (voir Fig B.1)

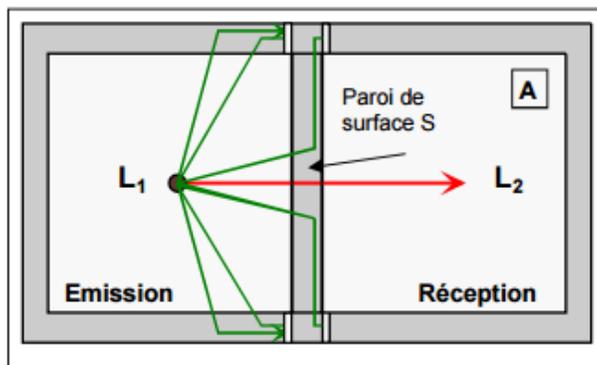


FIGURE B.1 – Pour la mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi, les transmissions latérales sont neutralisées

Validation du calcul des paramètres acoustiques effectifs sur un tronçon d'air

C.1 Paramètres effectifs mesurés sur un tronçon d'air de 16 cm

Les résultats de mesure des paramètres effectifs caractérisés sur un tronçon d'air de 16 cm d'épaisseur obtenues à partir de trois mesures et d'un calcul de la moyennes et de l'écart-types sont présentés. Elles servent à valider la détermination des paramètres effectifs par comparaison aux valeurs connus de la célérité du son et de l'impédance caractéristique de l'air.

C.1.1 Matrice de transfert mesurée

Les paramètres mesurés de la matrice de transfert sont présentés aux figure C.1 à C.4. Les variations des modules de T_{11} (Fig. C.1) et T_{22} (Fig. C.2) avec la fréquence sont de forme cosinusoïdale et strictement identiques. La fréquence $f=510$ Hz d'annulation de T_{11} et T_{22} correspond à $f = \frac{c_0}{4d}$ où c_0 est la célérité expérimentale mesurée, déduite de T_{11} (Fig. C.6). Les variations des modules de T_{12} (Fig. C.3) et T_{21} (Fig. C.4) avec la fréquence sont de type sinus. Leur phase est quasi-constante et proche de $\frac{\pi}{2}$.

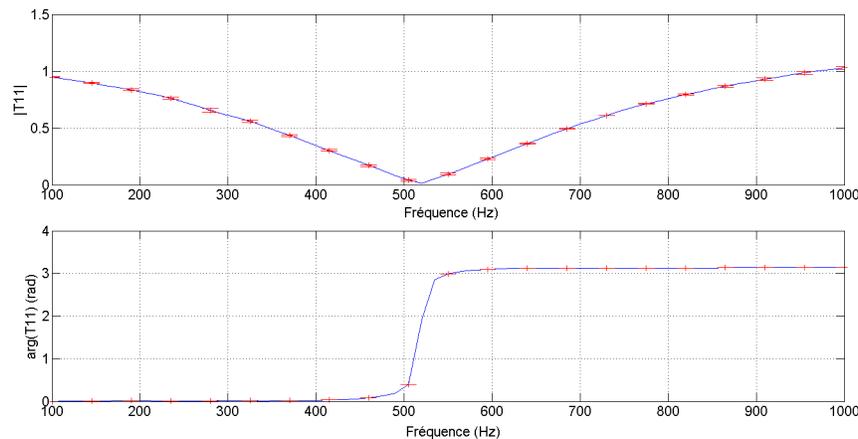


FIGURE C.1 – Variation de T_{11} (module et phase) avec la fréquence d'un tronçon d'air de 16 cm

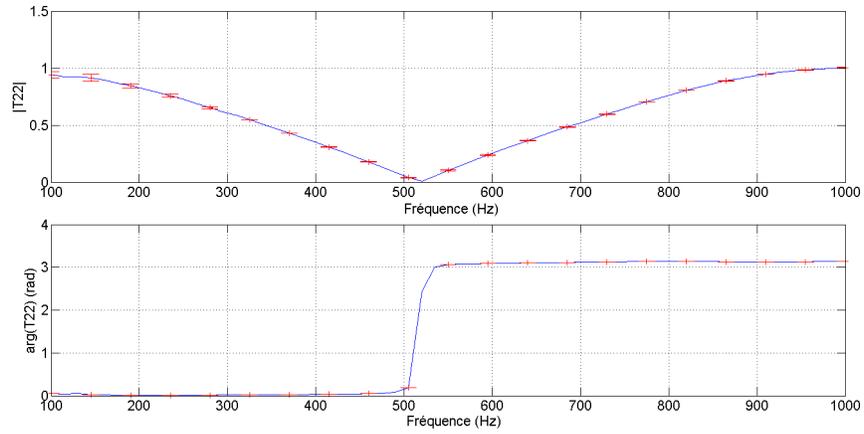


FIGURE C.2 – Variation de T_{22} (module et phase) avec la fréquence d'un tronçon d'air de 16 cm

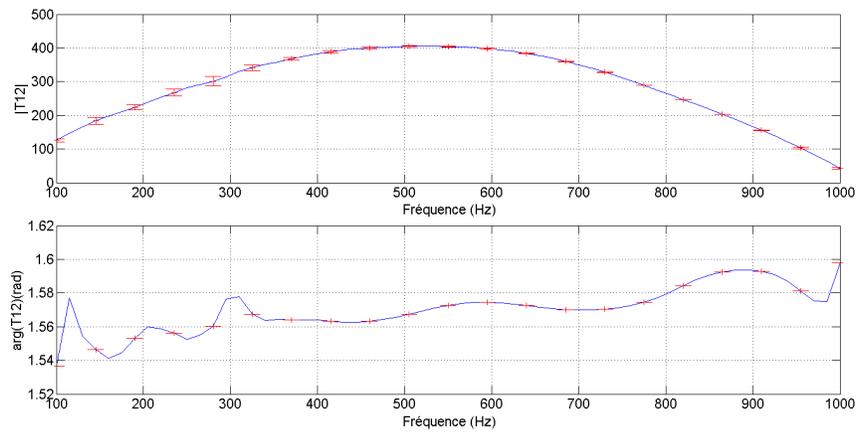


FIGURE C.3 – Variation de T_{12} (module et phase) avec la fréquence d'un tronçon d'air de 16 cm

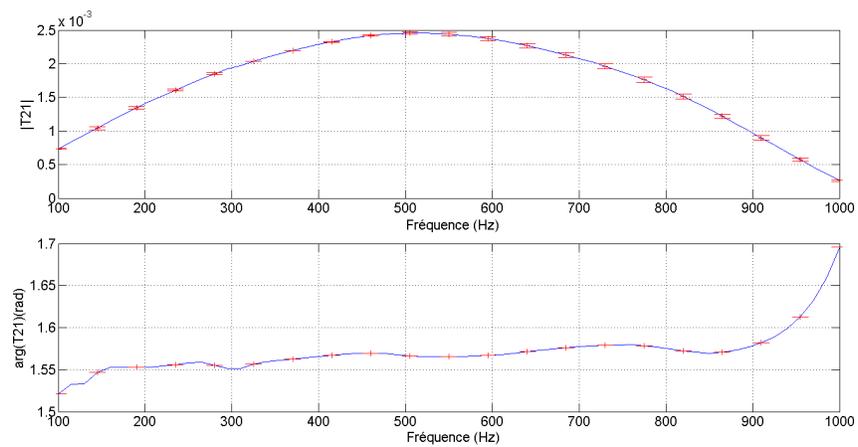


FIGURE C.4 – Variation de T_{21} (module et phase) avec la fréquence d'un tronçon d'air de 16 cm

C.1.2 Paramètres effectifs calculés pour le tronçon d'air

Nombre d'onde effectif

La figure C.5 présente les parties réelles et imaginaires du nombre d'onde du tronçon d'air, déduit des termes T_{11} et T_{22} . Les parties réelles se superposent parfaitement. Aux alentours de 950 Hz, les paramètres T_{11} et T_{22} présentent des valeurs légèrement supérieures à 1 qui se traduisent par une faible atténuation sur la partie imaginaire du nombre d'onde. Le léger plateau visible au niveau de la mesure du paramètre T_{22} en dessous de 150 Hz (Fig. C.2) est probablement à l'origine de l'erreur de mesure présente dans cette gamme de fréquence.

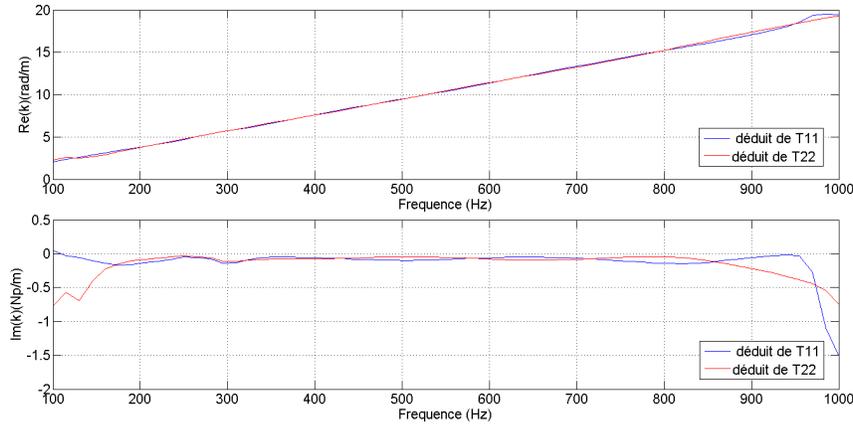


FIGURE C.5 – Spectre des parties réelles et imaginaires du nombre d'onde effectif calculé à partir des termes T_{11} et T_{22} d'un tronçon d'air de 16 cm

Célérité du son effective

La partie réelle de la célérité effective obtenue (Fig. C.6), présente une valeur constante égale à 335 m s^{-1} . Cette valeur est proche de la célérité de l'air (sec) égale à 343 m s^{-1} à 20° C . La partie imaginaire de la célérité reste faible sauf dans les bandes mentionnées précédemment (fréquences inférieures à 150 Hz et supérieures à 950 Hz où le module de T_{11} et T_{22} est proche de 1).

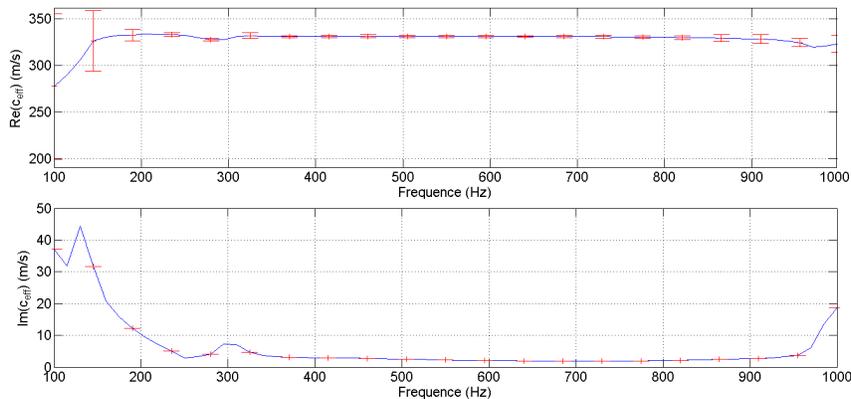


FIGURE C.6 – Spectre des parties réelles et imaginaires de la célérité effective de l'air calculée à partir d'un tronçon d'air de 16 cm

Impédance caractéristique effective

L'impédance de l'air est déterminée à partir des mesures des paramètres T_{12} et T_{21} . Cette mesure oscille entre 403 et 412 Rayl, des valeurs très proches de l'impédance caractéristique de l'air à 20° C égale à 408 Rayl. Les écart-types obtenus sont beaucoup plus importants ce jusqu'à 320 Hz, comparativement aux autres paramètres présentés précédemment.

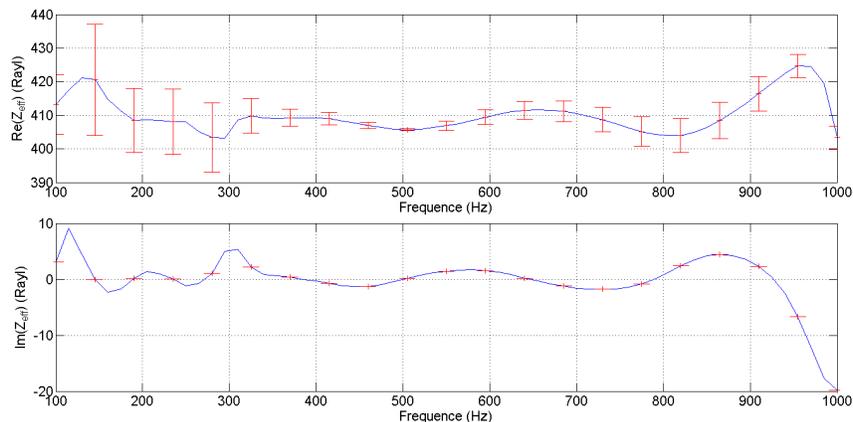


FIGURE C.7 – Spectre des parties réelle et imaginaire de l'impédance caractéristique effective de l'air calculée à partir d'un tronçon d'air de 16 cm

Effet des branches sur l'absorption acoustique des feuillages

L'absorption des feuillages en présence de branches est comparé aux mesures présentées dans le chapitre 3 pour une densité foliaire de 1% de feuilles et une épaisseur de 16 cm. Cette situation où peu de feuilles sont présentes est la plus favorable pour la mise en évidence des effets des branches. Les résultats sont présentés aux figures D.1 pour le fusain et D.2 pour le laurier. Elles montrent que les branches n'améliorent que très faiblement l'absorption acoustique.

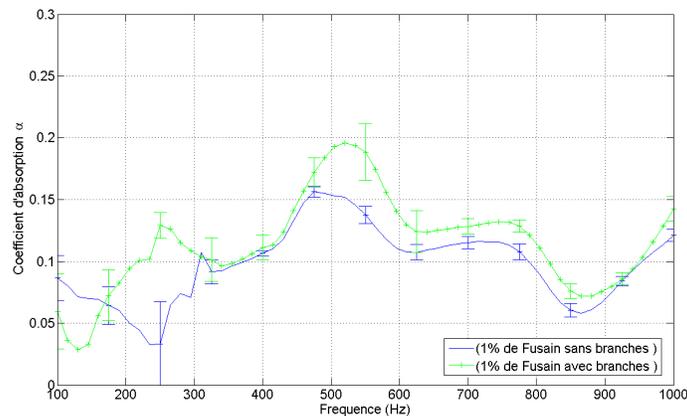


FIGURE D.1 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence pour un échantillon de fusain de densité foliaire 1% et d'épaisseur 16 cm avec et sans branches

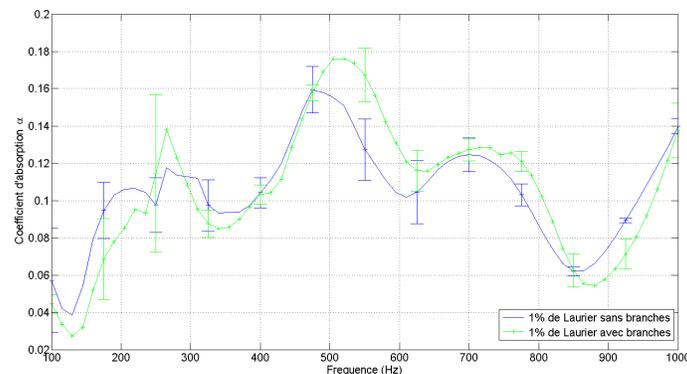


FIGURE D.2 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence pour un échantillon de laurier de densité foliaire 1% et d'épaisseur 16 cm avec et sans branches

Comparaison entre simulations et mesures acoustiques d'échantillons de fusain

Les courbes E.1 à E.4 complètent les résultats de mesures sur les feuillages présentés dans la section 3.7. Elles comparent les mesures directes et indirecte (via la matrice de transfert) des coefficients d'absorption et de réflexion d'échantillons de fusain d'épaisseur 16 cm et de densité foliaire 1 et 3%. Les estimations présentent les mêmes caractéristiques que celles obtenues pour une densité foliaire de 5% (meilleur accord au dessus de 20 Hz et lorsqu'il n'y a pas de mises en série des matrices). L'accord est cependant moins bon que dans le cas de la densité foliaire de 5%.

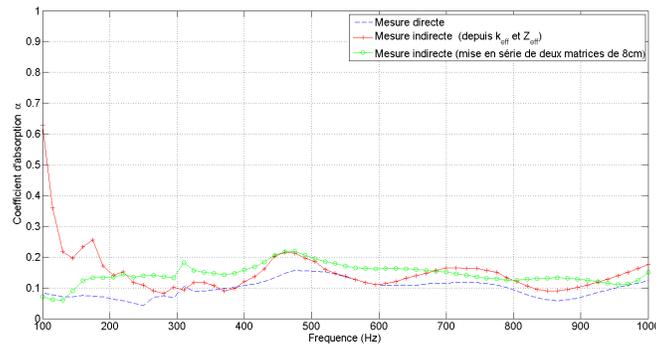


FIGURE E.1 – Mesure et Prédiction du coefficient d'absorption acoustique de 16 cm d'épaisseur de fusain pour 1%, densité foliaire

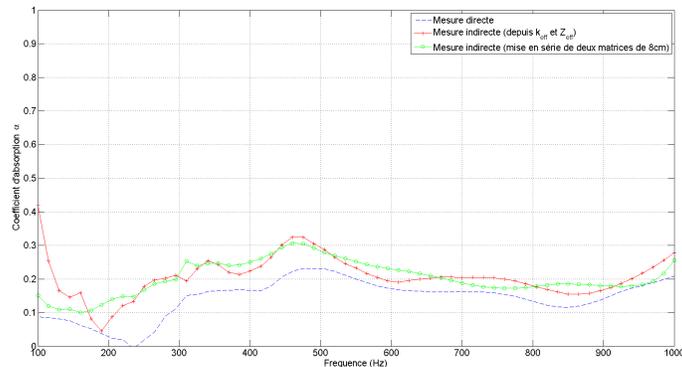


FIGURE E.2 – Mesure et Prédiction du coefficient d'absorption acoustique de 16 cm d'épaisseur de fusain pour 3%, densité foliaire

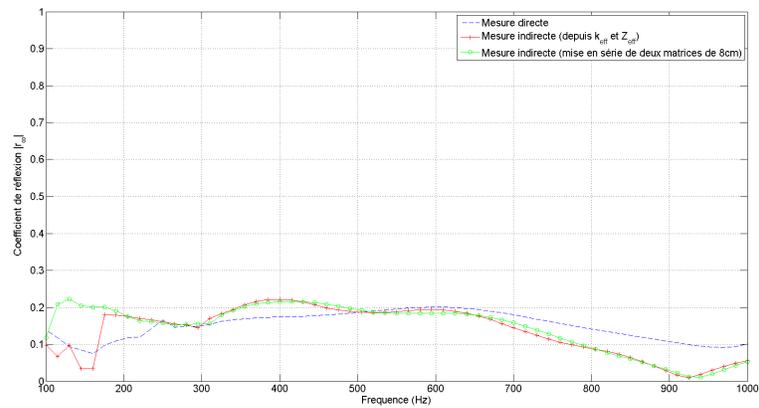


FIGURE E.3 – Mesure et Prévion du coefficient de réflexion anechoïque de 16 cm d'épaisseur de fusain pour 1%, densité foliaire

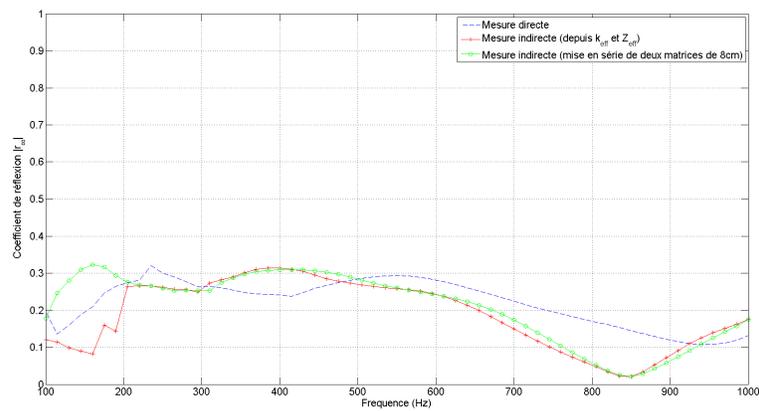


FIGURE E.4 – Mesure et Prévion du coefficient de réflexion anechoïque de 16 cm d'épaisseur de fusain pour 3%, densité foliaire

Effet de l'humidité sur les coefficients acoustiques d'échantillons de substrats

Les mesures des coefficients acoustiques des substrats ont également été réalisées fonction de l'humidité. Cette partie présente les résultats obtenus pour des échantillons de fibre de coco et de perlite.

F.0.1 Effet de l'humidité sur la fibre de coco

Les propriétés acoustiques de la fibre de coco sont mesurées pour un taux d'humidité de 30%. La fibre de coco est séchée au four à 130°C pendant une durée de 15 heures. La masse de fibre de coco sèche dans le porte échantillon de 16 cm (4L) est de 102 g. Un taux d'humidité de 30% équivaut pour cet échantillon à une masse totale (eau + fibre de coco) de 132,6 g. Les mesures des coefficients acoustiques de ce substrat sont présentés aux Figs. F.1 à F.4. Cette mesure suffit à justifier que les grandeurs acoustiques mesurées sont très proches de celles de la fibre de coco sèche (§ 4.3.1) ce qui indique que la présence d'eau n'a quasiment aucun effet sur les propriétés acoustiques de ce substrat.

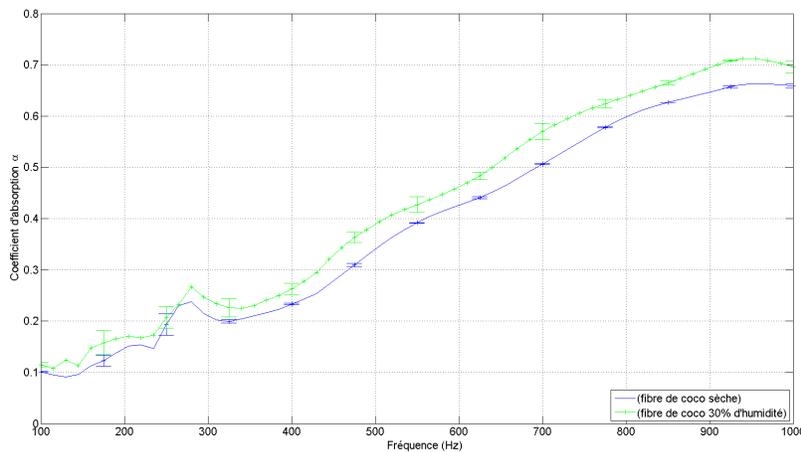


FIGURE F.1 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 8 cm et de densité fibreuse 65% en terminaison rigide pour des taux d'humidité de 0 et 30% d'humidité

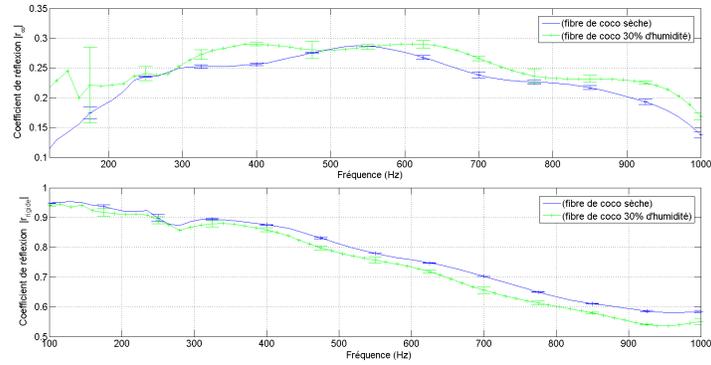


FIGURE F.2 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 8 cm et de densité fibreuse 65% en terminaison anéchoïque et rigide pour des taux d'humidité de 0 et 30% d'humidité

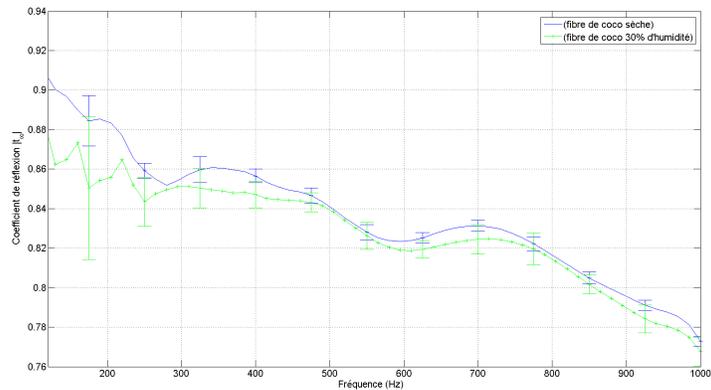


FIGURE F.3 – Variation du coefficient de transmission acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 8 cm et de densité fibreuse 65% en terminaison anéchoïque pour des taux d'humidité de 0 et 30% d'humidité

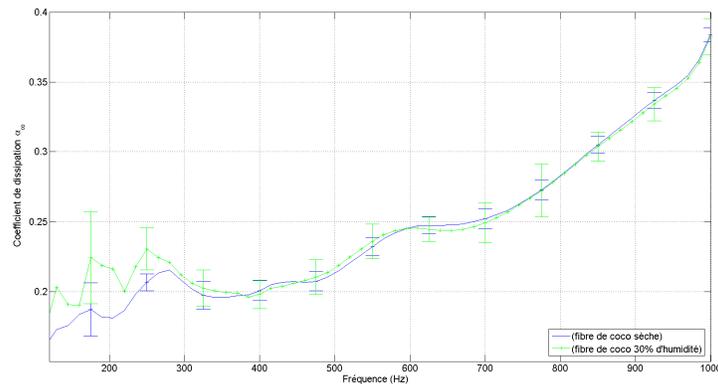


FIGURE F.4 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 8 cm et de densité fibreuse 65% en terminaison anéchoïque pour des taux d'humidité de 0 et 30% d'humidité

F.0.2 Effet de l'humidité sur la perlite

Les coefficients acoustiques d'échantillons de perlite ont été caractérisés pour des taux d'humidité de 15% et 30 % et des épaisseurs de 8 et 16 cm. Le Tab. F.1 présente les masses des échantillons pour les différents taux d'humidité. Les Figs. F.5 à F.12 montrent que le taux d'humidité a un effet important sur les coefficients acoustiques, en particulier en décalant la fréquence de résonance du pic d'absorption associé à la résonance en quart de longueur d'onde vers les hautes fréquences. Ce décalage de fréquence de résonances est d'environ 5 Hz par % d'humidité. L'origine de ce comportement reste à identifier.

Perlite	épaisseur (cm)	Substrat sec	Substrat (20% d'humidité)	Substrat (30% d'humidité)
	8	658	757	855
	16	1220	1464	1586

TABLEAU F.1 – Masse de la perlite en fonction de l'épaisseur et de l'humidité

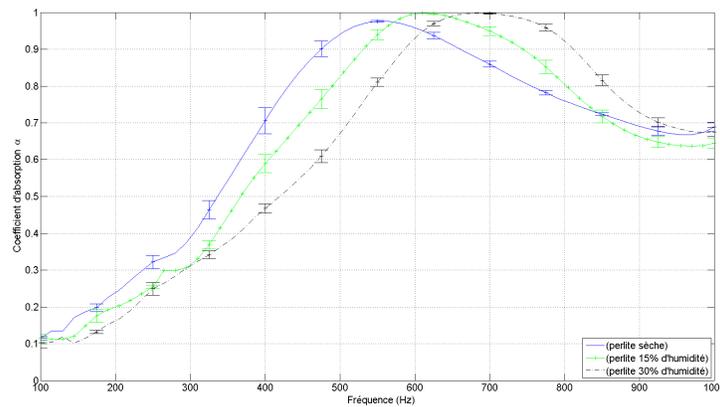


FIGURE F.5 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 8 cm et de perlite en terminaison rigide pour des taux d'humidité de 0, 15 et 30% d'humidité

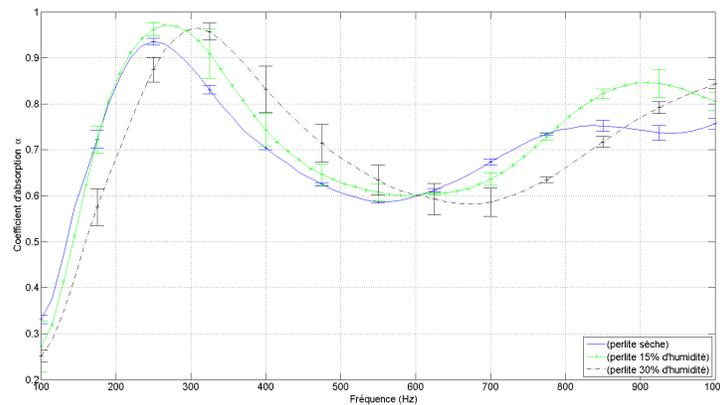


FIGURE F.6 – Variation du coefficient d'absorption acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 16 cm et de perlite en terminaison rigide pour des taux d'humidité de 0, 15 et 30% d'humidité

ANNEXE F. EFFET DE L'HUMIDITÉ SUR LES COEFFICIENTS ACOUSTIQUES
D'ÉCHANTILLONS DE SUBSTRATS

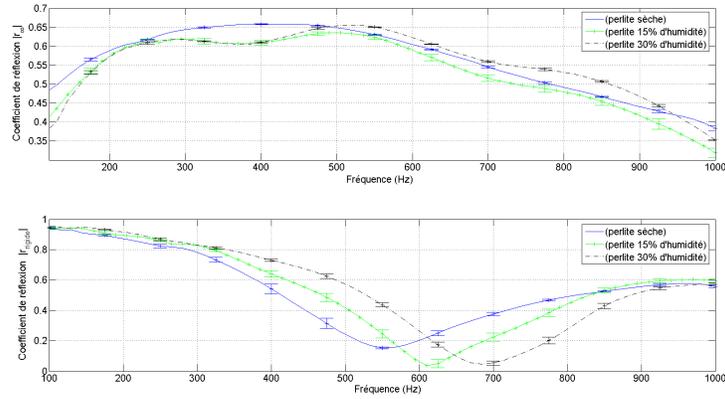


FIGURE F.7 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 8 cm et de perlite en terminaison anéchoïque et rigide pour des taux d'humidité de 0, 15 et 30% d'humidité

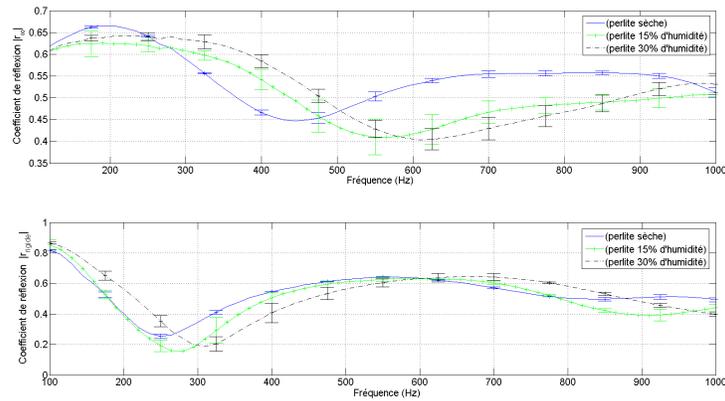


FIGURE F.8 – Variation du coefficient de réflexion acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 16 cm et de perlite en terminaison anéchoïque et rigide pour des taux d'humidité de 0, 15 et 30% d'humidité

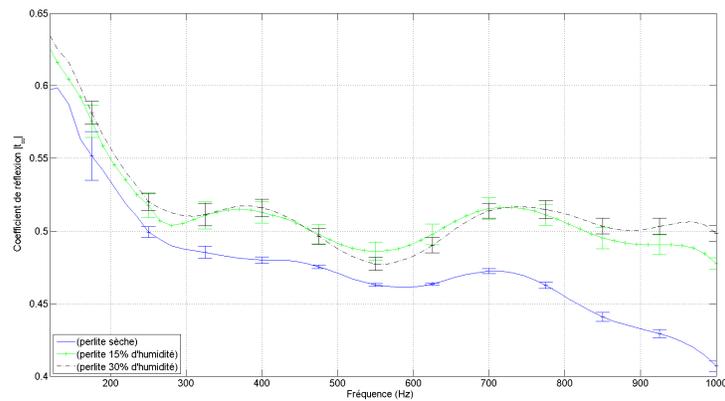


FIGURE F.9 – Variation du coefficient de transmission acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 8 cm et de perlite en terminaison anéchoïque pour des taux d'humidité de 0, 15 et 30% d'humidité

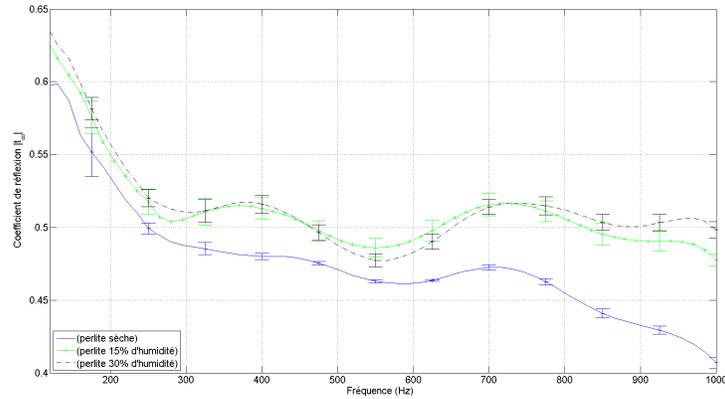


FIGURE F.10 – Variation du coefficient de transmission acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 16 cm et de perlite en terminaison anéchoïque pour des taux d'humidité de 0, 15 et 30% d'humidité

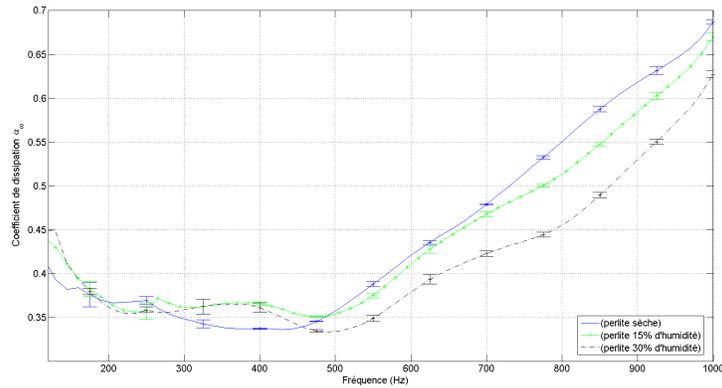


FIGURE F.11 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 8 cm et de perlite en terminaison anéchoïque pour des taux d'humidité de 0, 15 et 30% d'humidité

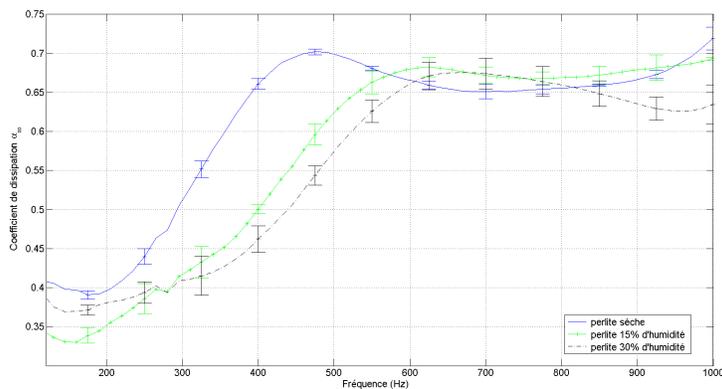


FIGURE F.12 – Variation du coefficient de dissipation acoustique avec la fréquence d'un échantillon d'épaisseur de 16 cm et de perlite en terminaison anéchoïque pour des taux d'humidité de 0, 15 et 30% d'humidité

Abstract

Establishment of green walls in urban areas is supported by the public administration as it improves air quality, fosters biodiversity and mitigates urban heat island effects. Contribution of green walls to urban soundscape due to their acoustic absorption and scattering properties has also been demonstrated by recent works. However, physical phenomena behind these acoustical properties are not yet fully understood and constitutes the purpose of this thesis. In this work, a new experimental setup coupling acoustical measurements with an impedance tube and vibration measurements with a scanning laser vibrometer is developed to characterize simultaneously acoustical and vibrational properties of foliage and substrates used in green walls in the 100 Hz-1000 Hz frequency range. This setup is used to characterize acoustic coefficients (absorption, reflection, transmission...), effective physical properties (speed of sound, characteristic impedance...) and vibrational response of foliage (spindle and bay) substrate (perlite, coco fiber, coco peat) samples. Results reveal acoustic properties of each medium (low internal losses and nondispersive propagation properties for foliage, higher internal losses and dispersive propagation properties for substrates) et highlight the close link between vibrational resonances and acoustic coefficients of walls. Acoustic properties of samples constituted by the superposition of foliage and substrate layers are finally studied. Results demonstrate that the increase of absorption coefficient comes from both wall thickness resonances and impedance matching between air and substrate provided by the foliage layer. A method for optimizing acoustic absorption in a given frequency range is also proposed.

Résumé

L'implantation de parois végétalisées dans les zones urbaines est encouragée par les pouvoirs publics car elle contribue à l'amélioration de la qualité de l'air, favorise la biodiversité et atténue les effets d'îlot de chaleur urbain. L'apport acoustique de ces parois végétalisées est mis en évidence par des études récentes. Les phénomènes physiques à l'origine de leur propriétés acoustiques restent cependant insuffisamment compris et font l'objet de ce travail de thèse. Dans ce but, un dispositif expérimental original couplant mesures acoustiques via un tube à impédance et mesures vibratoires à l'aide d'un vibromètre laser à balayage est développé pour caractériser simultanément les propriétés acoustiques et vibratoires des feuillages et substrats qui composent ces parois dans la gamme 100 Hz-1000 Hz. Ce dispositif caractérise les coefficients acoustiques (absorption, réflexion, transmission...), les propriétés physiques effectives (célérité, impédance caractéristique...) et la réponse vibratoire d'échantillons de feuillages (fusain et laurier) et de substrats (perlite, fibre de coco, tourbe de coco). Les résultats obtenus mettent en évidence les propriétés acoustiques de chaque milieu et soulignent le lien étroit entre résonances vibratoires et propriétés acoustiques des parois. Enfin, l'étude acoustique d'échantillons superposant les couches de feuillage et de substrat montre une augmentation du coefficient d'absorption due aux résonances en épaisseur de la paroi et à l'adaptation d'impédance entre l'air et le substrat apportée par la couche de feuillage. Une stratégie d'optimisation de l'absorption acoustique dans une bande de fréquence donnée est également proposée.

MOTS-CLÉS : Acoustique, Vibration, Mur végétalisé, Feuillage, Substrats, Optimisation, Tube à impédance, Vibromètre laser