



HAL
open science

Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales - Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation

Philippe Glé

► **To cite this version:**

Philippe Glé. Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales - Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation. Acoustique [physics.class-ph]. INSA de Lyon, 2013. Français. NNT: . tel-00923665

HAL Id: tel-00923665

<https://theses.hal.science/tel-00923665>

Submitted on 3 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MÉMOIRE de THÈSE

Thèse préparée au

Laboratoire Génie Civil et Bâtiment
Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État

Présentée devant

l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État
Ecole Doctorale: Mécanique, Energétique, Génie civil et Acoustique
Spécialité Acoustique

Par

Philippe GLÉ

Pour l'obtention du grade de Docteur

**Acoustique des Matériaux du Bâtiment
à base de
Fibres et Particules Végétales**

-

Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation

Soutenu le 15 Février 2013

Devant la Commission d'Examen

JURY

M. Christophe LANOS	Professeur	Rapporteur
M. Philippe LECLAIRE	Professeur	Rapporteur
M. Francesco ASDRUBALI	Professeur	Examinateur
M. Jean-Louis GUYADER	Professeur	Examinateur
M. Kirill-V. HOROSHENKOV	Professeur	Examinateur
M. Laurent ARNAUD	Docteur HDR	Directeur de thèse
M. Emmanuel GOURDON	Docteur	Co-directeur de thèse

*A Céline,
à la PhiCél qui nous lie,
et qui bientôt deviendra Corde,
pour Ensemble gravir les Montagnes de la Vie*

Résumé

Dans le bâtiment, de nouvelles réglementations thermiques sont mises en place afin de répondre à des problématiques d'économie d'énergie, et font apparaître de nouveaux types de matériaux. Cela ne doit pas se faire au détriment des propriétés acoustiques. Les matériaux à base de particules et fibres végétales, tels que le béton de chanvre et les laines chanvre/lin, sont caractérisés par des propriétés multifonctionnelles de haut niveau et constituent des solutions parfaitement adaptées à ce contexte.

L'objectif de ce travail de thèse est d'explorer les propriétés acoustiques de ces matériaux, et plus particulièrement de mettre en évidence la contribution de leurs différentes échelles de porosité à la dissipation acoustique. A cette fin, les propriétés physiques et acoustiques de laines végétales, de chènevottes et de bétons de chanvre ont été caractérisées, et analysées en s'appuyant sur la théorie des matériaux poreux à simple et multiple échelle, développée dans la littérature.

La campagne expérimentale a permis de souligner les performances acoustiques élevées de ces matériaux, pouvant être contrôlées par des leviers d'action relatifs au choix de leurs constituants et de leur mise en œuvre. Il est de plus montré qu'étant donné le gradient de perméabilité existant entre les micropores (pores intrafibres, intraparticules et intraliants) et les mésopores (pores interfibres et interparticules), seuls les mésopores participent à la dissipation acoustique. Dans ce cadre, des modèles semi-phénoménologiques sont utilisés afin de prédire les propriétés acoustiques à partir des paramètres de base des constituants.

Cette modélisation est finalement exploitée à travers une optimisation des propriétés acoustiques des matériaux à partir de leur formulation, leur structure multicouche et leur géométrie de surface. Des méthodes de caractérisation des matériaux par mesures acoustiques sont également proposées afin de réaliser un contrôle de qualité des granulats de chanvre.

Mots clés : Chènevotte, Béton de Chanvre, Particules Végétales, Matériaux Poreux, Propriétés Acoustiques, Multi-échelle, Multifonctionnel

Abstract

Acoustics of Building Materials based on Plant Fibers and Particles : Tools for Characterization, Modelling and Optimization

New thermal regulations are currently implemented in buildings in order to save energy, leading to new kinds of materials. However, noise annoyance should not be neglected. Materials based on plant particles and fibers, such as hemp concrete and hemp/flax wools, are characterized by high-level multifunctional properties and are suitable solutions in this context.

The aim of this thesis is to investigate the acoustical properties of these materials, and to highlight their multiscale behaviour. For this purpose, the physical and acoustical properties of plant wools, shiv and hemp concretes were characterized, and analyzed using the theory of acoustics in single and multiscale porous media.

Our experimental program showed that the high-level acoustical properties of these materials can be controlled by the characteristics of their constituents and their manufacturing process. It is further highlighted that, given the permeability contrast existing between micropores (intrafiber, intraparticle, and intrabinder pores) and mesopores (interfiber or interparticle pores), only mesopores do take part in the acoustical dissipation. In this context, semi-phenomenological models have been used to predict the acoustical properties from the basic parameters of wools, shiv and hemp concretes.

This model is finally used to show that the acoustical properties of these materials can be optimized using their formulation, multilayer structure and surface geometry ; and to realize a quality check of hemp aggregates characteristics.

Keywords : Shiv, Hemp Concrete, Plant Particles, Porous Media, Acoustical Properties, Multiscale, Multifunctional

Remerciements

Cela fait un peu plus de trois ans que j'ai débuté cette thèse, entrant ainsi dans le monde de la recherche pour étudier un sujet des plus passionnants, les propriétés acoustiques des matériaux biosourcés. Je voudrais à présent exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à mes travaux.

En premier lieu, je tiens à remercier mes encadrants. Merci à Emmanuel pour sa grande disponibilité, ses remarques toujours constructives et son soutien sans faille. Merci à Laurent de m'avoir donné l'opportunité de faire cette thèse, d'avoir partagé son expertise dans le domaine, de m'avoir guidé avec des conseils avisés et de s'être montré disponible.

Je remercie également tous les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail, les rapporteurs Christophe LANOS et Philippe LECLAIRE ainsi que les examinateurs Francesco ASDRUBALI, Jean-Louis GUYADER et Kirill-V. HOROSHENKOV.

Une mention spéciale à Kirill-V. HOROSHENKOV et à Amir KHAN, qui m'ont accueilli chaleureusement à l'Université de Bradford, aidé à caractériser les chènevottes et à les modéliser à partir de leur distribution de taille de pore.

Merci à Claire THOUMINOT et Olivier BÉHÉREC de nous avoir donné la chance de travailler avec des chènevottes tracées. Merci aussi à eux pour les échanges que l'on a pu avoir, et qui m'ont apporté de nombreux éclairages sur l'aspect botanique du chanvre.

Une phobie récurrente des chercheurs est de voir des années de travaux rester oubliées. Grâce à la collaboration initiée avec le groupe Schiever, des laines végétales ont été utilisées afin de concevoir un faux plafond à vocation acoustique. Merci à tous les partenaires de ce projet pour leur investissement.

Les microscopes et le pycnomètre du LEHNA m'ont été particulièrement utiles, merci à tout le personnel de ce laboratoire et particulièrement à Jean-Philippe BEDELL, de m'y avoir accueilli.

Je voudrais remercier Fabien, François-Xavier et Luc, de la société Matelys, pour m'avoir aidé à modéliser les bétons de chanvre multicouches. Bien que cet échange ait eu lieu tardivement, il m'a

démontré l'efficacité de ce trio de choc. J'espère que d'autres occasions nous permettront de travailler ensemble.

Merci à tous les étudiants de TFE/Master que j'ai eu l'occasion de côtoyer : Yannick et Quentin avec qui j'ai eu la chance de travailler, Benjamin, Malvina, Rafik, Gilles, Mohamed et Jean-René.

Je remercie l'équipe logistique de l'ENTPE pour tous les services rendus : Italo, Christopher, Joseph, Gilles et tous les autres. Merci aussi à Joachim pour l'assistance technique Labview.

À la direction de la recherche, je tiens à remercier Luc DELATTRE et Francette PIGNARD pour leur disponibilité, leur écoute et leur suivi tout au long de cette thèse. Au sein du laboratoire, merci aux directeurs Dominique DUMORTIER et Claude-Henri LAMARQUE pour leur soutien, à Marie-Claude pour ses multiples expertises linguistiques, aux Monique(s) pour le côté administratif et à tous les chercheurs : Mathieu, Cathy, Raphael & Cie pour les bons moments passés ensemble.

Je voudrais remercier toute l'équipe "chanvre" du labo, notamment Fred, cet homme multifonctionnel ayant des performances à la fois originales et de haut niveau, et, bien sûr, Etienne, camarade depuis déjà 6 ans, et qui restera Fort et Vert...

La vie en open space pendant trois ans fut une expérience intense, stimulant particulièrement l'imagination. Je garderai de très bons souvenirs du B002 et réserve encore quelques surprises à ses pensionnaires. Merci en tout cas à tous pour l'ambiance : Marj', Thibaud, Popo, Akim, Julio², Rikky, Céline, Guillaume, Marion, Flo, Scoobi, Manolis, Cyrille, Thierry, Niko, Eric, Jean, Coralie, Sophie & Cie. Bon courage aux doctorants pour la suite, à qui j'associe Gaëlle, ma co-doctorante sous la houlette d'Emmanuel, avec qui on s'est serré les coudes pendant ces trois dernières années. Merci aussi à tous les autres doctorants de l'ENTPE pour les séances de futsal du vendredi midi, le moment de décompression tant attendu de la semaine.

Merci à tous les collègues et amis avec qui je partage une passion commune pour la montagne et l'escalade, nos sorties passées et à venir sont des moments de ressource et d'expression devenus indispensables.

Si je me suis lancé dans l'aventure de la thèse, c'est en grande partie grâce à Murray HODGSON, à Vancouver. Je voudrais donc le remercier de m'avoir initié à la recherche.

Je voudrais clôturer ces remerciements par les personnes qui me sont chères. Je remercie profondément mes parents, mes frères et ma sœur, pour leur présence et leur soutien inconditionnel. Je remercie également Hélène et André, les relecteurs en chef, avec un *bis* pour André, le monsieur bricolage à qui j'ai eu recours pour développer un certain nombre de dispositifs expérimentaux.

La dernière personne que je souhaite remercier n'est pas la moindre, et loin de là. Tu as toujours été présente pour m'aider, me motiver, et me redonner confiance. C'est avec joie que j'achève cette thèse aujourd'hui, Céline, car les projets qui vont suivre, nous allons pouvoir les vivre pleinement ensemble.

Liste des symboles

Symboles latins

A	Aire des particules	(m^2)
c	Célérité du son	$(m.s^{-1})$
c_0	Célérité du son dans l'air libre	$(m.s^{-1})$
C	Concentration	$(kg.m^{-3})$
C_p, C_v	Capacité calorifique de l'air respectivement à pression et volume constants	$(J.K^{-1}.kg^{-1})$
D	Fonction des effets de diffusion en pression	(m^2)
e	Épaisseur de l'échantillon	(m)
$e(s)$	Fonction de densité de probabilité	
E	Module d'Young	(Pa)
\bar{E}	Épaisseur moyenne des particules	(m)
$E(s)$	Fonction de distribution des tailles de pores	
f	Fréquence	(Hz)
f_0	Fréquence de respiration	(Hz)
f_c	Fréquence critique	(Hz)
f_r	Fréquence de compression	(Hz)
F	Fonction de correction de viscosité	
F_d	Fonction de diffusion de la pression	
HR	Humidité relative	$(\%)$
\vec{I}	Intensité acoustique	$(Pa.m.s^{-1})$
\Im	Partie imaginaire d'un nombre complexe	
j	$\sqrt{-1}$	
J_0, J_1	Fonctions de Bessel de première espèce d'ordre 0 et 1	

k	Nombre d'onde	$(rad.m^{-1})$
\vec{k}	Vecteur d'onde	$(rad.m^{-1})$
k_0	Nombre d'onde de l'air libre	$(rad.m^{-1})$
K	Module d'incompressibilité dynamique	(Pa)
l	Largeur des particules	(m)
L	Longueur des particules	(m)
L/l	Ratio longueur/largeur des particules	
M	Masse	(kg)
n	Facteur de forme des particules	
N_{Pr}	Nombre de Prandtl de l'air	
p	Surpression acoustique	(Pa)
p_{value}	Seuil de signification observé	
P_0	Pression à l'équilibre de l'air	(Pa)
r	Rayon des pores	(m)
R	Coefficient de réflexion acoustique	
R_f	Rayon des fibres	(m)
R_p	Rayon des particules	(m)
R_w	Indice d'affaiblissement acoustique pondéré	(dB)
\Re	Partie réelle d'un nombre complexe	
R^2	Coefficient de regression	
s, s'	Facteurs de forme des pores	
S	Surface	(m^2)
t	Variable temporelle	(s)
T	Température acoustique	(K)
Tr	Coefficient de transmission	
T_J	Rapport entre les fonctions de Bessel de première espèce d'ordre 1 et 0	
T_R	Temps de réverbération	(s)
$[T]$	Matrice de transfert	
TL	Indice d'affaiblissement acoustique (transmission loss)	(dB)
\vec{u}	Déplacement	(m)
\vec{v}	Vitesse acoustique	$(m.s^{-1})$
V	Volume	(m^3)
Z_0	Impédance caractéristique de l'air libre	$(Pa.m^{-1}.s)$
Z_c	Impédance caractéristique	$(Pa.m^{-1}.s)$
Z_s	Impédance de surface	$(Pa.m^{-1}.s)$

Symboles grecs

α	Coefficient d'absorption acoustique	
α_∞	Tortuosité	
α_w	Coefficient d'absorption acoustique pondéré	
β	Paramètre d'homogénéisation	
γ	Rapport des capacités calorifiques de l'air	
δ_t	Epaisseur de couche limite thermique	(m)
δ_v	Epaisseur de couche limite visqueuse	(m)
ϵ	Somme des carrés des écarts normalisée	
η	Coefficient d'amortissement structural	
θ	Angle d'incidence d'une onde	(rad)
Θ	Perméabilité dynamique thermique	(m^2)
Θ_0	Perméabilité thermique statique	(m^2)
κ	Conductivité thermique de l'air	($W.m^{-1}.K^{-1}$)
λ	Longueur d'onde	(m)
Λ	Longueur caractéristique visqueuse	(m)
Λ'	Longueur caractéristique thermique	(m)
μ	Viscosité de cisaillement de l'air	($Pa.s$)
ν	Coefficient de Poisson	
ξ	Viscosité de volume de l'air	($Pa.s$)
π	Constante ($\approx 3,14$)	
Π	Perméabilité dynamique visco-inertielle	(m^2)
Π_0	Perméabilité visqueuse statique	(m^2)
ρ	Densité dynamique	($kg.m^{-3}$)
ρ_0	Masse volumique de l'air au repos	($kg.m^{-3}$)
ρ_s	Masse surfacique des particules	($kg.m^{-2}$)
ρ_v	Masse volumique apparente	($kg.m^{-3}$)
$\rho_{squelette}$	Masse volumique de squelette	($kg.m^{-3}$)
σ	Résistance au passage à l'air	($N.m^{-4}.s$)
σ_s	Ecart-type de $\psi(s)$	(ψ -unités)
τ	Facteur de transmission acoustique	
ϕ	Porosité	
Φ	Fraction volumique	
$\psi(s)$	Opposé du logarithme à base 2 de s	(ψ -unités)
$\bar{\psi}(s)$	Moyenne de $\psi(s)$	(ψ -unités)
ω	Pulsation	($rad.s^{-1}$)

ω_d	Fréquence caractéristique des effets de diffusion de pression	$(rad.s^{-1})$
ω_{dec}	Fréquence de découplage	$(rad.s^{-1})$
ω_t	Fréquence caractéristique des effets thermiques	$(rad.s^{-1})$
ω_v	Fréquence caractéristique des effets visco-inertiels	$(rad.s^{-1})$
Ω	Teneur en eau massique	

Acronymes

<i>2C2E</i>	Construction Chanvre et Economie d'Energie
<i>ANOVA</i>	ANalysis Of VAriance
<i>CenC</i>	Construire en Chanvre
<i>CREPIM</i>	Centre de Recherche et d'Etude sur les Procédés d'Ignifugation des Matériaux
<i>ENTPE</i>	Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
<i>ERP</i>	Etablissement Recevant du Public
<i>FDGEDA</i>	Fédération Départementale des Groupes d'Etude et de Développement Agricole
<i>FNPC</i>	Fédération Nationale des Producteurs de Chanvre
<i>HAC</i>	Homogénéisation Auto-Cohérente
<i>HSP</i>	Homogénéisation des Structures Périodiques
<i>LCDA</i>	La Chanvrière de L'Aube
<i>LEHNA</i>	Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés
<i>LGCB</i>	Laboratoire Génie-Civil et Bâtiment
<i>MEDDE</i>	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie
<i>MEEDM</i>	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer
<i>PREBAT</i>	Programme national de Recherche et d'expérimentation sur l'Énergie dans les BÂTiments
<i>VER</i>	Volume Élémentaire Représentatif

Table des matières

Introduction générale	1
I Etat de l'art : Propriétés acoustiques des éco-matériaux et présentation des matériaux à base de chanvre	5
1 Propriétés acoustiques des éco-matériaux utilisés dans la construction	5
1.1 Les éco-matériaux dans la construction	5
1.2 Propriétés acoustiques des éco-matériaux	8
1.3 Les éco-matériaux acoustiques, des matériaux poreux	13
2 Le chanvre : de la plante aux co-produits	15
2.1 De la plante à la chènevotte et aux fibres	16
2.2 Des particules de chanvre aux chènevottes	21
2.3 Des fibres aux laines	25
3 Le béton de chanvre	28
3.1 Modes de fabrication et formulations du béton de chanvre	28
3.2 Description des liants	29
3.3 Caractéristiques des bétons de chanvre	31
3.4 Propriétés multiphysiques des bétons de chanvre	34
4 Conclusion	39
II Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales	41
1 Laines végétales	41
1.1 Description des échantillons	42

Table des matières

1.2	Masses volumiques de squelette et porosités mesurées	44
1.3	Résistivités	46
1.4	Propriétés acoustiques	46
2	Chènevottes	47
2.1	Origine des chènèvottes utilisées dans le cadre de la thèse	48
2.2	Granulométries des chènèvottes	49
2.3	Gamme de masses volumiques apparentes testées	54
2.4	Masses volumiques de squelette et porosités	55
2.5	Résistivités	56
2.6	Tortuosités	60
2.7	Propriétés acoustiques	61
3	Liants	64
3.1	Liants utilisés dans le cadre de la thèse	65
3.2	Echantillons de liant pur fabriqués	65
3.3	Masses volumiques de squelette et porosités	66
3.4	Résistivités	67
3.5	Propriétés acoustiques	67
4	Bétons de chanvre	68
4.1	Bétons de chanvre réalisés dans le cadre de cette thèse	68
4.2	Porosités	72
4.3	Résistivités	77
4.4	Propriétés acoustiques	79
5	Conclusion	83
III Phénomènes de dissipation acoustique dans un matériau poreux		85
1	Grandeurs fondamentales intrinsèques au matériau poreux	85
1.1	Présentation du problème	85
1.2	Effets de dissipation pour un matériau poreux à squelette rigide	87
1.3	Propriétés intrinsèques d'un matériau poreux	90
2	Vers une description de plus en plus précise des matériaux poreux à simple échelle	92
2.1	Théorie de Biot pour les matériaux poroélastiques	93
2.2	Modèles fluide-équivalent généralisés	94
2.3	Modèles adaptés à la microstructure du squelette	99
3	Modélisation des matériaux poreux multi-échelles	107
3.1	Modèles prenant en considération les distributions de taille de pores	107

3.2	Théorie de la double-porosité	110
4	Modélisation des matériaux multicouches	113
4.1	Principe	114
4.2	Matrices de transfert dans le cas d'un matériau poreux	114
4.3	Méthode de résolution	115
5	Conclusion	116
IV Modélisation des propriétés acoustiques des matériaux à base de fibres et		
particules végétales		117
1	Modélisation des laines végétales	117
1.1	Description du matériau	117
1.2	Modélisation des propriétés acoustiques	118
1.3	Analyse des paramètres acoustiques	125
2	Modélisation des chènevottes	131
2.1	Description du matériau	131
2.2	Des propriétés acoustiques aux paramètres acoustiques	132
2.3	Des paramètres acoustiques aux paramètres microstructuraux	139
2.4	Synthèse de la méthode de modélisation	146
3	Modélisation des bétons de chanvre	148
3.1	Description du matériau	148
3.2	Modélisation multi-échelle	148
3.3	Modélisation à partir des paramètres de base	155
4	Conclusion	164
V Valorisation des résultats et optimisation des propriétés		
1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre		167
1.1	Optimisation de la formulation	168
1.2	Optimisation par une structure multicouche	172
1.3	Optimisation de la géométrie de surface	184
2	Caractérisation des granulats de chanvre en fonction des paramètres de culture et d'environnement	192
2.1	Présentation de la démarche et du cadre d'étude	193
2.2	Sensibilité des propriétés des chènevottes aux paramètres de culture . . .	199
2.3	Sensibilité des propriétés des chènevottes aux paramètres d'environnement	204
2.4	Synthèse des résultats	206

Table des matières

3	Application à la conception de panneaux acoustiques bio-sourcés pour une galerie commerciale	209
3.1	Diagnostic acoustique d'une galerie commerciale représentative	209
3.2	Développement d'un prototype multicouche ignifugé	211
3.3	Pistes envisagées pour l'optimisation du matériau	216
4	Conclusion	218
	Conclusion générale et perspectives	219
	Références bibliographiques	223
	Annexe A : Métrologie	1
1	Caractérisation des paramètres acoustiques des matériaux poreux	1
1.1	Porosité	1
1.2	Résistivité	4
1.3	Tortuosité	5
1.4	Longueur caractéristique visqueuse	8
1.5	Longueur caractéristique thermique et perméabilité thermique	8
2	Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux	9
2.1	En incidence normale en tube de Kundt	9
2.2	En champ diffus dans les chambres réverbérantes	18
	Annexe B : Compléments de caractérisation	21
3	Granulométrie des chènevottes	21
3.1	Courbes granulométriques	21
3.2	Convergence de la granulométrie	27
4	Cinétique de séchage des liants	32
5	Cinétique de séchage des bétons de chanvre	33
	Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique	35
6	Propriétés acoustiques des chènevottes	35
6.1	Technique de caractérisation choisie	35
6.2	Propriétés acoustiques caractérisées	41
7	Propriétés acoustiques des bétons de chanvre	51
7.1	Effet du liant	51
7.2	Effet de la chènevotte	52

Annexe D : Compléments de modélisation	55
8 Propriétés acoustiques des laines végétales	55
9 Propriétés acoustiques des chènevottes	60
10 Propriétés acoustiques des bétons de chanvre	74
Annexe E : Applications	77
11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC	77
11.1 Sensibilité des propriétés des chènevottes aux paramètres de culture . . .	77
11.2 Sensibilité des propriétés des chènevottes aux paramètres d'environnement	107
12 Caractérisation des panneaux acoustiques bio-sourcés	126

Table des matières

Introduction générale

Contexte

Dans le domaine du bâtiment, on attend des matériaux utilisés, aussi bien au niveau de la rénovation que de la construction neuve, qu'ils soient de plus en plus performants et respectueux de l'environnement. Dans cette logique, le groupe 1 du Grenelle de l'Environnement a revu à la hausse les exigences en termes d'isolation thermique des matériaux de construction, et a émis le vœu qu'ils soient autant que possible d'origine naturelle et puissent servir de puits de carbone [gt1 2008].

Parallèlement à cela, par souci du coût global d'un bâtiment, on recherche de façon croissante à utiliser des matériaux multifonctionnels, efficaces d'un point de vue mécanique, thermique et acoustique, plutôt qu'une juxtaposition de matériaux répondant chacun à l'une de ces trois fonctions. Or, il s'avère que les matériaux les plus performants en acoustique et en thermique sont de nature poreuse, d'une part car l'air est l'un des meilleurs isolants thermiques après le vide, et d'autre part car les pores dissipent les ondes acoustiques via des phénomènes visco-inertiels et thermiques.

Certains matériaux bio-sourcés, tels que le béton de chanvre, peuvent à la fois être qualifiés d'éco-matériaux : étant d'origine naturelle, recyclable, renouvelable et stockant du carbone, mais aussi de multifonctionnels : leur importante porosité étant à l'origine de performances thermique et acoustique de haut niveau. Ces matériaux constituent donc une solution pertinente vers laquelle de nombreux acteurs se tournent dans ce contexte du bâtiment en pleine évolution.

Au sein du LGCB à l'ENTPE, de nombreux travaux [Arnaud & Cerezo 2001, Cerezo 2005, Samri 2008, Arnaud & Gourlay 2011] réalisés sur le béton de chanvre ont permis de souligner un comportement mécanique original (légèreté et fort taux de déformation admissible), ainsi

que des propriétés très intéressantes en isolation thermique et en absorption acoustique. Dans la thèse de [Cerezo 2005], une approche globale du comportement acoustique de ce matériau a été réalisée à l'aide de modèles semi-phénoménologiques, mais n'a pas permis d'expliquer le comportement observé lors des expériences.

En effet, le béton de chanvre, en raison de sa nature composite et de son origine naturelle, est caractérisé par une microstructure poreuse multi-échelle, composée de pores allant du micromètre au centimètre, répartis entre les particules, au sein des particules et au sein du liant. Or, les modèles classiques acoustiques, dits “simple porosité”, ne peuvent être appliqués qu'à condition que les hétérogénéités du matériau soient du même ordre de grandeur. Dans le cas où les dimensions des pores sont distribuées autour de deux tailles caractéristiques très différentes, des phénomènes de diffusion de pression peuvent apparaître [Olny & Boutin 2003], on parle alors de “double porosité”.

Objectifs de la thèse

Les bétons de chanvre, et plus généralement les matériaux à base de particules et fibres végétales utilisés dans le bâtiment, présentent des intérêts incontestables d'un point de vue acoustique. Outre leurs hautes performances, ces matériaux font intervenir de nombreux paramètres au niveau du choix des constituants et du mode de mise en œuvre, permettant de contrôler, via leur microstructure poreuse, leurs propriétés multiphysiques.

Toutefois, l'optimisation de ces matériaux ne peut se faire sans une compréhension précise des phénomènes de dissipation qui y siègent. On se propose donc, dans cette thèse, en utilisant à la fois une approche expérimentale et théorique, de mettre en évidence les relations qui existent entre les paramètres descriptifs de ces matériaux et leurs propriétés acoustiques à l'échelle macroscopique.

La modélisation des propriétés acoustiques des matériaux à base de particules et fibres végétales permet de répondre à deux problématiques que nous avons souhaité explorer. D'une part, le contrôle en amont des performances en absorption et en isolation peut s'ouvrir sur une démarche de conception de “matériau sur mesure” vis-à-vis de spectres de bruit rencontrés *in situ*. D'autre part, la modélisation peut contribuer, par analyse inverse à partir de mesures acoustiques, à un contrôle de qualité du matériau. Ce second aspect de caractérisation est particulièrement intéressant dans la mesure où les granulats de chanvre sont caractérisés par une grande variabilité, liée à leurs paramètres de culture et au climat sous lequel ils ont été produits. Des mesures acoustiques, dans ce contexte, constituent un nouvel outil pour étudier

les effets de ces paramètres sur la morphologie et la microstructure finale des particules.

Démarche de la thèse et structure du mémoire

Les travaux réalisés pendant cette thèse sont présentés à travers les cinq chapitres de ce mémoire. Ces chapitres reprennent les grands axes de travail schématisés à la Figure 1.

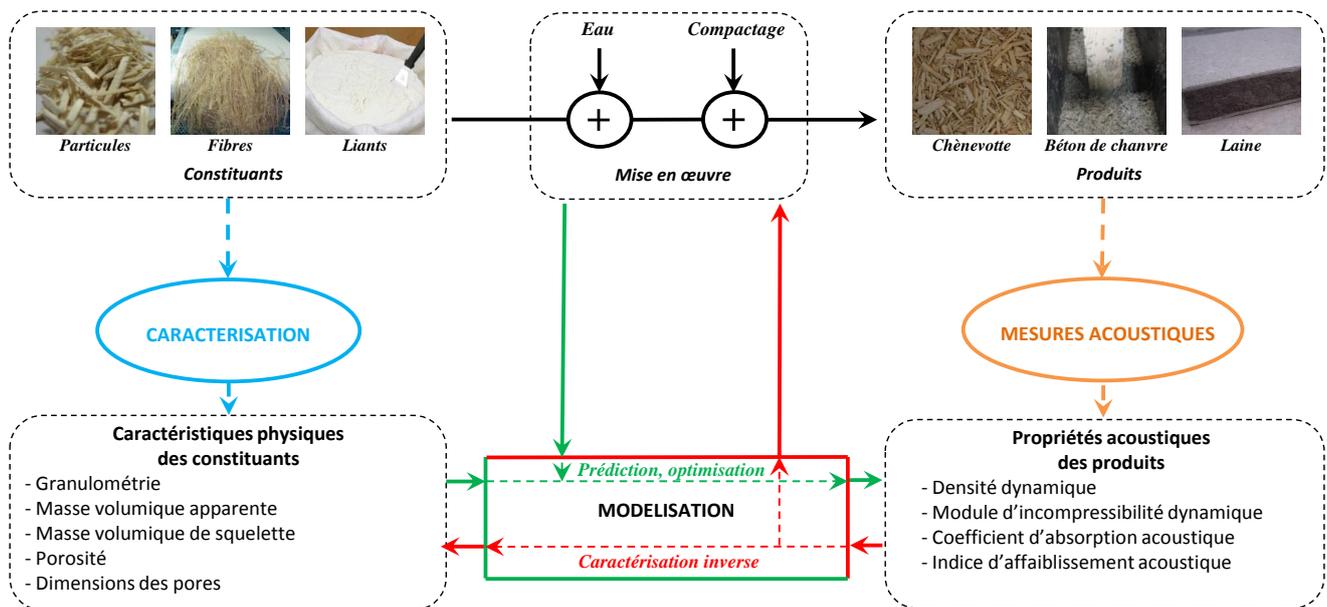


Figure 1 – Démarche de la thèse

Le premier chapitre permet de planter le décor en présentant un état de l'art sur les propriétés acoustiques des éco-matériaux. Un zoom est réalisé sur les matériaux à base de chanvre, et tout particulièrement sur le passage des constituants (fibres, particules et liants) aux produits (chênevottes, laines végétales et bétons de chanvre).

Le deuxième chapitre s'attaque aux axes de caractérisation des constituants et de mesures des propriétés acoustiques des produits. Les caractéristiques de ces protagonistes sont alors passées au crible à l'aide de mesures acoustiques et non-acoustiques. Les propriétés de laines végétales, chênevottes et bétons de chanvre sont analysées et se déclinent sur une gamme particulièrement large.

Le troisième chapitre offre un panorama historique des contributions des chercheurs à la description des milieux poreux en acoustique et sert de base au quatrième chapitre, dans lequel les résultats expérimentaux et les développements théoriques sont confrontés pour résoudre l'intrigue, et mettre en évidence les comportements caractéristiques de chacun des matériaux.

Le cinquième chapitre de cette thèse exploite l'axe de modélisation suivant ses deux directions. Tout d'abord, trois modes d'optimisation des propriétés acoustiques y sont explorés : la formulation des matériaux, leur structure et leur géométrie. Ensuite, s'appuyant sur une caractérisation inverse, une méthode de contrôle de qualité des particules de chanvre est illustrée et appliquée à des chènevottes tracées.

Chapitre I

Etat de l'art : Propriétés acoustiques des éco-matériaux et présentation des matériaux à base de chanvre

Ce premier chapitre présente le contexte général dans lequel s'insère la thèse.

Nous définirons premièrement la notion d'éco-matériaux, puis nous passerons en revue leurs principaux avantages et perspectives. Nous nous concentrerons alors plus particulièrement sur les éco-matériaux utilisés en acoustique, en donnant un aperçu des principaux travaux de la littérature qui leur sont consacrés et permettent de mieux connaître leur diversité et leur gamme de propriétés.

Dans un second temps, nous introduirons le matériau phare de cette étude, le chanvre. L'histoire, le mode et les paramètres de culture de la plante, ainsi que les caractéristiques de ses co-produits, fibres et particules, seront rappelés. Nous nous attacherons ensuite à décrire le passage de ces matières premières aux matériaux finis que sont la chènevotte, les laines et les bétons de chanvre, et nous rappellerons les différentes caractéristiques et propriétés multiphysiques de ces matériaux.

1 Propriétés acoustiques des éco-matériaux utilisés dans la construction

1.1 Les éco-matériaux dans la construction

Le terme "éco-matériau" est employé dans le domaine de l'aménagement et de la construction pour qualifier un matériau dont l'utilisation a des répercussions positives sur l'environnement. De nombreuses discussions ont eu lieu sur la définition officielle de ce terme, sans toutefois

Chapitre I. Etat de l'art : Propriétés acoustiques des éco-matériaux et présentation des matériaux à base de chanvre

aboutir à un *consensus*. On peut malgré tout citer une définition donnée par [Esnault *et al.* 2010] :

“Est éco-matériau un produit dont les processus de production, de transport, de mise en œuvre, de vie en œuvre, de fin vie, présentent globalement, face à des matériaux classiques, des performances environnementales supérieures en termes de consommation d'énergie non renouvelable, de consommation de ressources naturelles, d'émissions de gaz à effet de serre, et qui ne remettent pas en cause la santé des occupants et des professionnels assurant leur mise en œuvre.”

Ce type de matériau s'est considérablement développé ces dernières années et peut être décliné à travers quatre grandes catégories [Asdrubali 2011].

- Les matériaux d'origine naturelle, comme les fibres de provenance végétale ou animale, les produits dérivés du bois, la terre ...
- Les matériaux recyclés, dont font partie la cellulose, et de nombreux matériaux à base de déchets de moquette ou de pneus.
- Les matériaux composites tels que les fibres naturelles renforcées à l'aide de résines polymères.
- Les murs et toitures végétalisés.

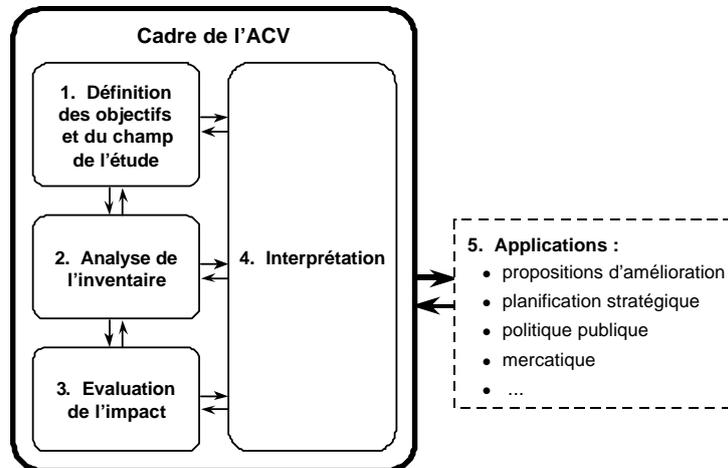
Toutefois, étant donné l'utilisation abusive de cette expression, par exemple dans le cas où un très faible pourcentage de matériau naturel est utilisé, il est primordial de se baser sur des Analyses du Cycle de Vie (ACV) complètes de ces matériaux.

L'ACV est un outil développé dès 1997, et dont l'application est cadrée au niveau international par la série des normes ISO 14040 “Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre” [Boeglin & Veillet 2005]. L'ACV de vie d'un produit prend en considération toute la vie de ce produit “du berceau à la tombe” et permet ainsi de quantifier de façon globale ses impacts. Elle se fait en suivant les 4 étapes décrites Figure I.1.

Une fois les objectifs et le cadre d'étude définis (Etape 1), les flux de matières et d'énergies entrants et sortants sont calculés sur le cycle de vie d'une unité fonctionnelle du produit (Etape 2), puis les impacts environnementaux globaux dus à ces flux sont évalués (Etape 3). En général, on retient pour un matériau des impacts environnementaux tels que l'effet de serre et l'épuisement des ressources naturelles en précisant par exemple la quantité de CO_2 stockée ou émise par le produit ainsi que la quantité d'énergies non-renouvelables consommée. L'ACV permet finalement, par comparaison à d'autres produits, de mettre en valeur les avantages des éco-matériaux (Etape 4).

Les éco-matériaux peuvent jouer un rôle fondamental dans le domaine de la construction pour les années à venir, en permettant de réduire significativement l'empreinte écologique des bâtiments. Ils présentent effectivement les avantages de :

I.1 Propriétés acoustiques des éco-matériaux utilisés dans la construction



(rq : les applications ne rentrent pas dans le champ d'application des normes)

Figure I.1 – Les 4 étapes de l'ACV [Boeglin & Veuillet 2005]

- demander peu d'énergie au niveau de leur fabrication, mise en œuvre, et recyclage,
- être fabriqués à partir de ressources renouvelables et disponibles sur le territoire, et valoriser des sous-produits,
- émettre le moins de gaz à effet de serre possible sur leur durée de vie,
- ne pas avoir d'impact négatif sur la santé.

Dans le cas des éco-matériaux d'origine végétale ou animale, dits "bio-sourcés", l'intérêt est encore plus grand dans la mesure où ces derniers mobilisent des ressources systématiquement renouvelables, permettent un développement de filières locales, et, dans le cas des matériaux d'origine végétale, stockent du dioxyde de carbone.

Partant du constat que les performances acoustiques des éco-matériaux étaient très peu connues, [Arlaud & Desarnaulds 2005, Desarnaulds *et al.* 2005] dressent une comparaison des propriétés de ces matériaux par rapport aux matériaux plus industrialisés (tels que les laines minérales, le polystyrène ...). Il a ainsi été montré que des éco-matériaux (tels que cellulose, laine de mouton, fibres de chanvre, lin, coco, bois, liège, brique d'argile poreuse et briques de chanvre) peuvent être aussi performants que ces matériaux industrialisés, pour des applications aussi bien au niveau de l'isolation aux bruits aériens, de l'isolation aux bruits de chocs et de l'absorption acoustique.

Si ces matériaux présentent du point de vue environnemental et acoustique un très fort potentiel dans le domaine du bâtiment, quelques faiblesses limitent leur utilisation et leur développement. Pour commencer, les éco-matériaux sont généralement développés suivant un processus non industriel, et manquent de visibilité devant la forte concurrence des matériaux

bien ancrés dans le marché. Pour l'exemple du chanvre, d'après [Grosselin 2011], seulement 5 000 tonnes de laines de chanvre sont vendues par an par rapport à 2 millions de tonnes de laines de verre et de roche. Par conséquence directe, ces matériaux ne sont pas encore connus par tous les maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage du bâtiment.

Cependant, les pouvoirs politiques sont conscients des multiples intérêts de ces matériaux et en encouragent fortement le développement. Par exemple, le Grenelle de l'environnement a pour conséquence une politique d'investissement public et privé mobilisant 440 milliards d'euros à l'horizon 2020, ce qui représente plus de 535 000 emplois [Grosselin 2011]. Il faut donc s'attendre à ce que les éco-matériaux prennent une place grandissante dans le monde du bâtiment.

Du côté de la recherche, un important travail est aujourd'hui nécessaire afin d'assurer une bonne utilisation de ces éco-matériaux. Cette thèse y concourt, en tentant d'apporter une meilleure compréhension des propriétés acoustiques des matériaux à base de chanvre.

1.2 Propriétés acoustiques des éco-matériaux

1.2.1 Les éco-matériaux au service de la qualité acoustique des bâtiments

Dans le domaine du bâtiment, les matériaux utilisés doivent répondre à différentes contraintes. Un matériau doit tout d'abord présenter des propriétés mécaniques suffisamment importantes pour assurer la durabilité structurelle du bâtiment. Ensuite, les matériaux doivent répondre à des impératifs à la fois économiques et écologiques, en permettant de limiter les pertes de chaleur, afin de réduire la consommation liée au chauffage. La qualité acoustique des bâtiments constitue une troisième exigence associée au confort des occupants. Si elle est tout aussi importante que les deux précédentes, elle demeure bien souvent négligée.

En outre, les français attribuent une valeur importante et croissante au "droit au calme" dans leur cadre de vie, et deviennent de plus en plus exigeants en matière d'isolation acoustique. Lors d'une enquête menée par le MEEDM (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer) en 2010, 66% des français interrogés ont déclarés être gênés par le bruit à leur domicile [Bedeau *et al.* 2010]. Les principales sources de nuisances sont d'après cette même enquête les bruits dus aux transports (54%) et les bruits du voisinage (21%). De plus, ces nuisances ont des effets incontestables sur notre santé, entraînant des troubles du sommeil, une diminution des performances au travail et une augmentation du stress [afs 2004].

Comme on le verra dans la Section 3, l'utilisation de matériaux multifonctionnels, tels que le béton de chanvre, permet d'associer à la fois de bonnes propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques, et peut régler de nombreux problèmes de nuisances sonores dans les bâtiments.

I.1 Propriétés acoustiques des éco-matériaux utilisés dans la construction

On distingue deux grands types de considérations au niveau de la qualité acoustique d'un bâtiment :

- l'isolation acoustique correspond aux moyens utilisés pour contrôler la transmission d'énergie acoustique d'une pièce à une autre, le plus souvent dans le but de réduire au maximum les niveaux de bruits transmis.
- la correction acoustique, pour sa part, fait référence à tous les moyens mis en œuvre afin de contrôler la réponse d'une pièce à une excitation acoustique provenant de la même pièce, par exemple dans l'optique d'y contrôler les niveaux de bruits et l'intelligibilité.

On considère dans cette thèse uniquement le mode de transmission aérien, dans lequel la structure est mise en vibration par l'onde acoustique se propageant dans l'air. Les bruits dits solidiens, provenant d'un impact réalisé directement au niveau de la structure ne seront donc pas traités.

Suivant les objectifs visés, l'isolation ou la correction acoustique, les moyens peuvent être très différents. Ainsi, on privilégiera une structure massive et imperméable pour une bonne isolation, alors que l'on utilisera des matériaux poreux et perméables pour la correction acoustique.

Les performances des matériaux du bâtiment sont donc généralement décrites par deux grandeurs, l'indice d'affaiblissement acoustique noté TL (Transmission Loss), et le coefficient d'absorption acoustique noté α .

Ces grandeurs dépendent du type d'excitation. On considère en général des ondes planes (les ondes arrivent toutes avec une même incidence, normale ou oblique par rapport au matériau), ou un champ diffus (les ondes arrivent suivant toutes les incidences). L'indice d'affaiblissement et l'absorption acoustique peuvent être définis dans le cas d'ondes planes à partir des représentations de la Figure I.2.

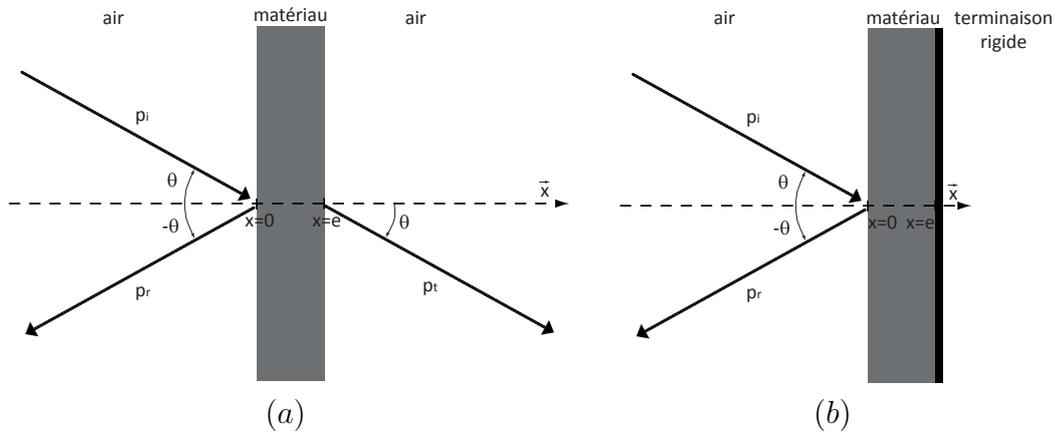


Figure I.2 – Ondes incidentes, réfléchies et transmises pour un matériau soumis à une onde acoustique d'incidence θ

Indice d'affaiblissement acoustique On considère une onde plane se propageant dans l'air dans une direction caractérisée par un angle θ par rapport à la normale au matériau (Figure I.2 (a)). Cette onde incidente est décrite par sa pression p_i variable de la position et du temps. Suite à la rencontre avec le matériau, cette onde donne naissance à une onde réfléchie dans l'air de pression p_r et à une onde dans le matériau. L'énergie de cette onde est partiellement dissipée, et donne naissance à une onde transmise dans l'air de l'autre côté du matériau, et de pression p_t .

L'indice d'affaiblissement du matériau est alors défini à partir du facteur de transmission τ par la relation suivante :

$$TL(\theta) = -10 \log \tau(\theta) \quad (\text{I.1})$$

$$\tau(\theta) = \frac{I_t(\theta)}{I_i(\theta)} = \left| \frac{p_t(\theta, x = e)}{p_i(\theta, x = 0)} \right|^2 \quad (\text{I.2})$$

I_i et I_t faisant respectivement référence aux intensités incidente au matériau et transmise par ce dernier.

TL est par conséquent positif et exprimé en décibels (dB). L'indice d'affaiblissement en champ diffus TL_d est obtenue par intégration sur toutes les incidences (généralement, de $\theta_{min} = 0^\circ$ à $\theta_{max} = 90^\circ$) :

$$TL_d = -10 \log \frac{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \tau(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos \theta \sin \theta d\theta} \quad (\text{I.3})$$

Coefficient d'absorption acoustique On définit généralement le coefficient d'absorption acoustique d'un matériau en le considérant juxtaposé à une terminaison rigide ayant pour but d'imposer une condition limite de vitesse normale nulle. Cela est illustré à la Figure I.2 (b). En reprenant les mêmes notations que précédemment, cette grandeur est calculée en fonction du coefficient de réflexion R du matériau :

$$\alpha(\theta) = 1 - |R(\theta)|^2 \quad (\text{I.4})$$

$$R(\theta) = \frac{p_r(\theta, x = 0)}{p_i(\theta, x = 0)} \quad (\text{I.5})$$

De même que pour l'indice d'affaiblissement, le coefficient d'absorption en champ diffus α_d

I.1 Propriétés acoustiques des éco-matériaux utilisés dans la construction

est trouvé par intégration :

$$\alpha_d = \frac{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \alpha(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos \theta \sin \theta d\theta} \quad (\text{I.6})$$

L'absorption est comprise par définition entre 0 pour des matériaux parfaitement réfléchissants et 1 pour des matériaux totalement absorbants.

1.2.2 Propriétés acoustiques des matériaux d'origine naturelle

Les éco-matériaux d'origine naturelle, obtenus à partir de ressources végétales, animales ou minérales, peuvent être employés sous forme brute, comme c'est le cas pour le bois, mais sont plus généralement utilisés sous forme de granulats ou fibres. On considère dans cette thèse qu'une "fibre" est caractérisée par une forme proche d'un cylindre allongé, de section circulaire, et de faible rayon ($< 50 \mu m$). On considère qu'un "granulat" ou une "particule" est de forme *a priori* quelconque et de dimensions caractéristiques supérieures au rayon des fibres ($> 50 \mu m$).

Les fibres et granulats sont soit utilisés en vrac, soit tissés (fibres uniquement), soit consolidés à l'aide d'un liant (colle, ciment). Un aperçu des matériaux d'origine naturelle qui ont fait l'objet d'études acoustiques est présenté par la suite afin de montrer leur gamme de propriétés. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive mais de quelques recherches proches de ce qui a été réalisé dans cette thèse.

Pour commencer, les produits dérivés du bois sont des éco-matériaux connus depuis relativement longtemps pour leurs performances en acoustique. Effectivement, [Burd 1984] présente les propriétés en absorption et isolation de dalles de particules de bois liées avec du ciment d'une épaisseur de 25 à 125 mm. Il s'avère que ces panneaux sont à la fois d'excellents absorbants et de bons isolants une fois combinés avec une couche d'enduit, ce qui leur confère un champ d'application relativement large.

Les propriétés acoustiques de laines de bois et de particules de bois sont présentées et modélisées dans un autre article par [Wassilief 1996]. Les résultats montrent que le comportement des fibres et particules de bois dépendent grandement de la résistance au passage à l'air des matériaux, elle-même étant contrôlée par la densité apparente de ces derniers.

Les fibres et particules de bois et de chanvre ayant des caractéristiques similaires, ces deux études présentent à la fois que les performances acoustiques des fibres, particules et bétons de chanvre sont de haut niveau, et peuvent être contrôlées en amont par leur densité.

D'autres leviers d'action ont été mis en évidence par [Oldham et al. 2011] dans le cas des matériaux à base de fibres naturelles pour lesquels les propriétés sont contrôlées à la fois par

la densité des matériaux et le diamètre des fibres. Les meilleurs absorbants de cette étude sont ceux réalisés avec des fibres de faible diamètre et pouvant atteindre d'importantes densités.

Enfin, la grande diversité des ressources naturelles est sans cesse démontrée au travers de multiples études réalisées en acoustique, mettant en jeu des matériaux de plus en plus originaux et performants. On peut citer à titre d'exemple les panneaux de particules de paille de riz présentés par [Yang *et al.* 2003], et les tiges de roseau étudiées par [Oldham *et al.* 2011]. Dans ce dernier cas, la configuration des tiges, créant des pores à la fois entre elles, et à l'intérieur de ces dernières confère au matériau une absorption très forte aux basses fréquences.

Concernant les matériaux à base de chanvre, on note également l'existence de plusieurs catégories de pores, à différentes échelles, dans les particules et fibres, entre ces dernières et éventuellement dans le liant. On verra dans les Chapitres III et IV que cette particularité conduit à des phénomènes qui n'existent pas dans les matériaux classiques et implique des propriétés acoustiques différentes. Les résultats expérimentaux obtenus sur ces matériaux seront détaillés dans la suite du Chapitre I et dans le Chapitre II.

1.2.3 Propriétés acoustiques des matériaux recyclés

Les études décrivant les propriétés acoustiques des matériaux recyclés sont venues plus tardivement, à partir des années 2000, mettant en évidence des leviers d'action similaires au cas des matériaux d'origine naturelle.

De nombreuses références présentent les propriétés acoustiques de matériaux à base de déchets de pneus. Les pneus peuvent effectivement être recyclés sous forme de granulats de différentes dimensions, qui une fois liés, servent à fabriquer des panneaux acoustiques. Ces matériaux ont été caractérisés par [Swift *et al.* 1993, Yang *et al.* 2004] et ont des propriétés de très bon niveau en absorption. Elles sont contrôlées notamment par la granulométrie des particules et la quantité de liant.

La ouate de cellulose est un autre matériau recyclé bien connu pour ses vertus en acoustique. [Neithalath *et al.* 2004] ont caractérisé l'absorption de ce matériau en fonction du dosage, et pour trois types de ouates, sous forme de fibres, de paquets et d'un mélange des deux. Le choix du type de ouate s'avère être un nouveau levier d'action permettant d'améliorer sensiblement l'absorption, cela d'autant plus pour de forts dosages en ouate de cellulose et dans le cas où la ouate est sous forme de paquets.

Enfin, les matériaux fabriqués à partir de déchets de pneus ou de moquette en utilisant des liants moussants présentent de grandes qualités acoustiques [Benkreira *et al.* 2011]. L'étude montre que la maîtrise de la réaction chimique à l'origine de ce matériau permet de contrôler

I.1 Propriétés acoustiques des éco-matériaux utilisés dans la construction

la porosité, les tailles de pores du matériau, et l'ouverture des pores, afin de développer des produits dont les performances peuvent être ciblées aussi bien en absorption acoustique qu'en isolation thermique.

1.3 Les éco-matériaux acoustiques, des matériaux poreux

Les paragraphes précédents ont pu donner un bref aperçu de la gamme des éco-matériaux pouvant être utilisés à des fins acoustiques. Force est de constater que la majorité de ces matériaux est caractérisée par une grande porosité. Cette porosité permet en effet aux ondes acoustiques de pénétrer dans le matériau avant d'y être dissipées par des effets visco-inertiels et thermiques qui seront présentés dans le Chapitre III. Avant d'aller plus loin dans la description des matériaux étudiés dans le cadre de cette thèse, il est donc important de définir les principales caractéristiques des matériaux poreux.

1.3.1 Porosité

Les matériaux poreux sont constitués de deux phases. Une phase solide constitue le squelette du matériau, il peut s'agir d'une matrice continue (milieux réticulaires) ou discontinue (milieux granulaires et fibreux). L'autre phase est une phase fluide que l'on considère généralement comme étant saturée d'air.

La porosité, notée ϕ , quantifie le volume d'air au sein d'un matériau.

$$\phi = \frac{V_{air}}{V_{total}} = \frac{V_{total} - V_{squelette}}{V_{total}} \quad (I.7)$$

V_{air} et $V_{squelette}$ font respectivement référence aux volumes occupés par l'air et par le squelette. V_{total} est le volume total de ce matériau.

Toutes les matières dites solides sont poreuses, leur porosité allant de moins de 10% pour les métaux à plus de 99% pour des mousses ou des matériaux fibreux. On distingue cependant différentes catégories de porosités au sein d'un même matériau :

- la porosité “occluse” caractérise le volume des pores du matériau ne communiquant pas avec l'extérieur,
- la porosité dite “ouverte” ou “connectée” caractérise le volume des pores qui sont ouverts sur l'extérieur,
- la porosité “totale” est la somme des deux porosités précédentes.

En acoustique, on s'intéresse plus particulièrement à la porosité “ouverte”, car c'est la seule qui joue un rôle dans le cas d'un squelette rigide et imperméable. On inclut donc dans le volume

du squelette le volume des pores fermés.

1.3.2 Teneur massique en eau

Les éco-matériaux, étant le plus souvent très poreux et perméables, sont particulièrement sensibles à l'eau, si bien qu'en présence d'une humidité relative importante, une quantité non-négligeable d'eau liquide peut se retrouver au sein du réseau poreux de ces derniers. On définit alors la teneur en eau massique Ω telle que :

$$\Omega = \frac{M_{eau}}{M_{squelette}} \quad (\text{I.8})$$

M_{eau} et $M_{squelette}$ étant respectivement la masse d'eau contenue dans le matériau et la masse de la phase solide de ce dernier.

1.3.3 Masse volumique apparente et masse volumique de squelette

La masse volumique de squelette, notée $\rho_{squelette}$, est la masse volumique de la phase solide d'un matériau poreux. Elle se distingue de la masse volumique apparente, notée ρ_v . Elle décrit un matériau dans son état anhydre ($\Omega = 0$) suivant la relation suivante :

$$\rho_{squelette} = \frac{M_{squelette}}{V_{squelette}} \quad (\text{I.9})$$

Grâce aux définitions de la porosité et de la masse volumique de squelette, on peut relier ces grandeurs par l'équation suivante qui s'avère très utile pour décrire l'évolution de la porosité en fonction de la masse volumique apparente d'un matériau :

$$\phi = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_{squelette}} \quad (\text{I.10})$$

1.3.4 Résistivité

La résistivité, notée σ , est un paramètre qui caractérise la résistance exercée par le squelette sur un fluide sous forme de frottements de nature visqueuse. σ joue un rôle primordial dans les mécanismes de dissipation acoustique au sein des poreux comme on le verra dans les Chapitres III et IV. Cette grandeur est inversement proportionnelle à la perméabilité Π_0 qui vérifie la loi de Darcy :

$$\sigma = \frac{\mu}{\Pi_0} \quad (\text{I.11})$$

$$\phi \vec{v} = -\frac{\Pi_0}{\mu} \vec{\nabla} p \quad (\text{I.12})$$

Avec \vec{v} la vitesse du fluide, $\vec{\nabla} p$ le gradient de pression et μ la viscosité dynamique du fluide. Dans cette thèse, le fluide en question est l'air ($\mu_{air} = 1,82 \cdot 10^{-5} Pa.s$ à $20^\circ C$).

1.3.5 Tortuosité

Enfin, la tortuosité α_∞ caractérise la sinuosité du réseau poreux. Elle est définie dans le Chapitre III par l'Equation III.40. Elle vaut 1 dans le cas de pores cylindriques orientés perpendiculairement à la surface du matériau et augmente avec l'inclinaison des pores et avec leur sinuosité.

D'autres paramètres sont également utilisés afin de décrire un matériau poreux à vocation acoustique et seront introduits au Chapitre III.

2 Le chanvre : de la plante aux co-produits

Le chanvre est une plante annuelle comprenant différentes sous-espèces. Déjà utilisé depuis l'an 5 000 avant J.C. en Chine, il fait son apparition en France au début du Moyen-Age. Sa culture se développe jusqu'à atteindre son apogée au XIX^e siècle, la surface de chanvre cultivée est alors de plus de 175 000 *ha* [Bouloc 2006]. Il est à ce moment utilisé principalement pour fabriquer des voiles et du cordage pour la marine, des vêtements et du papier. Son déclin est alors amorcé par l'arrivée de la machine à vapeur et de nouveaux concurrents tels que le coton et les fibres synthétiques. En 1961, la culture du chanvre est règlementée avec la convention sur les stupéfiants. L'activité redémarre alors progressivement en France.

De nos jours, la culture de chanvre connaît un nouvel essor, principalement en Europe avec 15 000 *ha*, au Canada avec une surface de 6 000 *ha*, et en Chine avec 65 000 *ha* (Chiffres de [Bouloc 2006]). La France est un des pays moteurs de la culture avec une surface cultivée d'approximativement 10 000 *ha*, ce qui correspond à environ 0,03% de la surface agricole utile et ne compromet donc pas les surfaces agricoles à vocation alimentaire. L'espèce utilisée pour les applications industrielles, le Cannabis Sativa L., doit comporter moins de 0,2% de THC (Tétrahydrocannabinol, substance psychotrope) pour satisfaire la réglementation européenne

de 2008 et pouvoir être cultivé. Un aperçu plus détaillé de l'histoire du chanvre industriel est donné dans [Bouloc 2006].

2.1 De la plante à la chènevotte et aux fibres

2.1.1 Culture, récolte et utilisations du chanvre

La culture du chanvre se déroule d'avril à septembre. Les graines sont semées début avril, la floraison commence fin juillet et se termine à la mi-août. Les graines atteignent leur maturité vers mi-septembre, soit environ 40 jours après la pleine floraison (Figure I.3 (a)). Les tiges de chanvre ont habituellement une hauteur comprise entre 2 et 4 m à maturité avec un diamètre moyen de 0,5 à 3 cm [Bouloc 2006].

Il existe deux modes de récolte. Le premier a pour but de récupérer uniquement la paille (tige) de la plante et est réalisé avant maturité des grains, fin août. Ce type de récolte est appelé "non-battu", la plante est coupée à la faucheuse, disposée en andains et mise en balles cylindriques à la presse.

Le second permet de récupérer les graines et la paille séparément à maturité des graines fin-septembre. Ce type de récolte appelé "battu" car une moissonneuse batteuse permet de récupérer les graines. Les étapes suivantes sont semblables au mode non battu.

Après la coupe des tiges, la paille peut être soit laissée sur le sol à la merci des conditions climatiques, soit immergée, pendant 10 à 20 jours, de sorte à "lessiver" les tiges de chanvre. Ce procédé, appelé rouissage, est utilisé afin de faciliter le défibrage (séparation chènevotte-fibres) et donne au chanvre une couleur qui vire vers le brun. Le rouissage peut aussi être réalisé sur pied, avant la coupe.

Les rendements généralement obtenus sont de 0,8 à 1 t/ha pour les graines de chanvre (appelées chènevis) et de 7 à 10 t/ha pour la paille (40% de fibres et 60% de bois) [Bouloc 2006]. Si traditionnellement, le chanvre était principalement cultivé pour ses fibres, aujourd'hui, tous les produits du chanvre sont valorisés à travers un grand nombre d'applications :

- Les fibres de chanvre (Figure I.3 (d)) proviennent de la partie extérieure de la tige (Figure I.3 (b)), le phloème, et servent à réaliser des renforts dans des matériaux composites plastiques utilisés dans de nombreux domaines (automobile, mobilier), des laines isolantes dans le bâtiment, des papiers (papier bible, papier cigarette) et du textile.
- La chènevotte (Figure I.3 (c)) provient du bois, le xylème, il s'agit de la partie intérieure de la tige, découpée en particules ; elle est utilisée en vrac comme litière d'animaux pour ses fortes capacités d'absorption, et dans le bâtiment sous forme de granulats pour les bétons de chanvre.

I.2 Le chanvre : de la plante aux co-produits

- Le chènevis est utilisé dans les marchés de l'alimentation, animale et humaine, et pour la cosmétique.
- Les poussières issues du processus de défibrage sont valorisées sous forme de litière ou pour du chauffage.

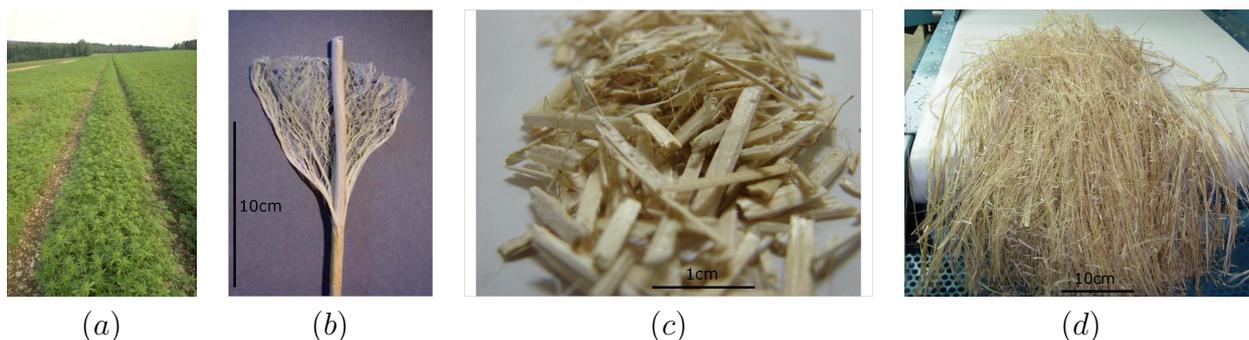


Figure I.3 – Une culture de chanvre [CenC] (a), une tige de chanvre laissant apparaître bois et fibres [Wikipedia] (b), la chènevotte (c) et les fibres (d)

Dans le cadre de cette thèse, nous nous focalisons uniquement sur les fibres de chanvre et sur les chènevottes.

2.1.2 Influence des paramètres de culture et d'environnement sur les propriétés du chanvre

Les modes de culture et de récolte du chanvre, présentés dans le paragraphe précédent, conditionnent grandement les rendements, mais aussi les caractéristiques des différents produits du chanvre [Bouloc 2006]. Il est possible de répertorier par ordre chronologique les différents paramètres de culture, du semis du chanvre à sa récolte, et de discuter de leur influence sur la morphologie des plantes.

Tout commence généralement par le choix de la variété utilisée. Les variétés disponibles sur le marché diffèrent principalement par leur précocité. On qualifie ainsi de “précoce” ou “tardive” une variété selon la date de son stade de pleine floraison. Or, il a été montré que le choix de la variété influe grandement sur les rendements en paille et en graines, mais aussi, légèrement sur le diamètre des tiges à leur base [Bouloc 2006]. Pour 20 variétés de chanvre cultivées dans les mêmes conditions, les diamètres de tiges obtenus s'étagent de 6 à 9 mm.

Viennent ensuite les paramètres relatifs au semis. Premièrement, une date de semis tardive entraîne une chute du rendement en paille. En outre, une densité de semis importante donne lieu à une augmentation de la densité à la levée (exprimée en nombre de pieds par m^2). Elle crée une compétition pour l'ensoleillement, l'eau et l'azote présents dans le sol, et limite par conséquent

Chapitre I. Etat de l'art : Propriétés acoustiques des éco-matériaux et présentation des matériaux à base de chanvre

la croissance de la plante en termes de hauteur et diamètre. [Schäfer & Honermeier 2006] ont abordé les effets de la densité et de la date de semis sur la morphologie du chanvre. Les résultats montrent qu'une densité de semis importante entraîne une diminution de l'épaisseur des couches caractéristiques et du diamètre des pores au sein des tiges.

L'utilisation d'azote permet de favoriser le développement de la plante dans le cas où les ressources du sol ne sont pas suffisamment abondantes. Outre le fait de rendre les tiges plus vertes et donner lieu à un défibrage plus difficile, l'azote donne aux plantes des hauteurs plus importantes, et par conséquent des tiges de diamètres supérieurs.

Concernant la récolte, la date choisie et le rouissage sont les deux paramètres clés. La date de récolte, sauf dans le cas d'une récolte très précoce, a une influence assez limitée sur le rendement en paille, et sur la morphologie des tiges. Le rouissage a en revanche un rôle fondamental, il facilite grandement le défibrage, en "lessivant" les pectines qui constituent le liant entre le bois et les fibres de la tige. Ce "lessivage" est réalisé par de nombreux micro-organismes (bactéries et champignons) qui se développent au sein de la plante, et entraînent une perte de matière et donc une modification de la microstructure des fibres et particules de chanvre. Ce phénomène est influencé par l'ensoleillement, la température et l'humidité relative ambiantes.

Au-delà de la récolte, le chanvre récolté subit l'opération de défibrage qui consiste à séparer les fibres du bois de la tige, ce qui peut se faire à l'aide de rouleaux cannelés, ou de broyeurs à marteaux, ou d'une turbine. Ces modes de séparation ont des répercussions sur la morphologie des particules, mais à notre connaissance, aucune étude comparative n'a été réalisée à ce sujet.

Les propriétés du chanvre dépendent dans un second temps des paramètres d'environnement. On entend par paramètres d'environnement la qualité du sol et les conditions météorologiques subies par les plantes. Concernant la qualité du sol, les effets sont de même nature que ceux de l'azote ajouté. Les conditions météorologiques ont pour leur part un effet tout aussi marqué et une sécheresse peut entraîner des tiges moins hautes et de plus faibles diamètres [Schäfer & Honermeier 2006].

L'ensemble de ces paramètres de culture et d'environnement a des répercussions peu connues sur les caractéristiques des fibres et des particules de chanvre, mais ont pu être étudiés à l'aide de mesures réalisées dans le cadre de cette thèse, présentées dans le Chapitre V.

2.1.3 Caractéristiques des particules et fibres de chanvre

Microstructure De nombreuses études ont permis de mieux connaître la microstructure des fibres et particules de chanvre.

Des images de sections de tiges de chanvre provenant de La Chanvrière de l'Aube (LCDA)

I.2 Le chanvre : de la plante aux co-produits

ont été observées par [Vignon *et al.* 1995, Garcia-Jaldon *et al.* 1998] au microscope à balayage électronique et mettent en évidence des dimensions caractéristiques de pores comprises entre 10 et 60 μm . L'épaisseur des parois des capillaires du bois des particules de chanvre est de l'ordre de 1 μm . Comme le montre la Figure I.4 (b), les pores du bois des particules sont de différentes catégories :

- les vaisseaux principaux (vessels) de 20 à 60 μm de diamètre, et 70 à 400 μm de long,
- les vaisseaux secondaires (woody fibres) de 10 à 30 μm de diamètre et d'une longueur de 200 à 600 μm ,
- les cellules parenchymes (parenchyma cells) de 10 à 20 μm de diamètre et d'une longueur de 50 à 140 μm .

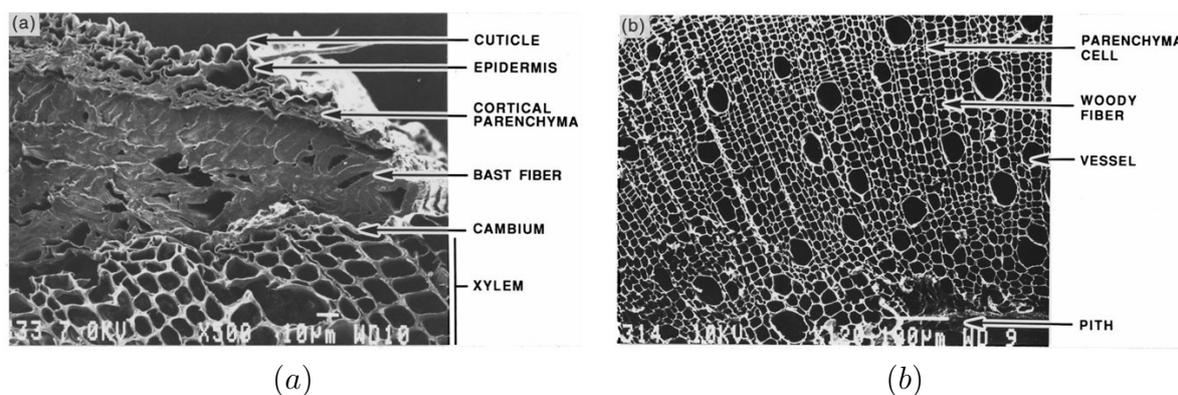


Figure I.4 – Section d'une tige de chanvre observée au microscope à balayage électronique [Garcia-Jaldon *et al.* 1998], vue globale (a) et vue du bois (b)

Toujours d'après cette étude, les fibres de chanvre (bast fibers) ont un diamètre allant de 20 à 40 μm et une longueur de 5 à 55 mm . Comme le montre la Figure I.4 (a), les fibres sont caractérisées par un vide central appelé "lumen", et dont la dimension est comprise entre 0,5 et 10 μm [Placet *et al.* 2012].

La présence de pores au sein des particules et des fibres de chanvre peut être à l'origine de propriétés fondamentalement différentes des particules et fibres non poreuses. L'objectif majeur de cette thèse est de comprendre le rôle de chacune des échelles de porosité, afin de pouvoir prédire et optimiser les propriétés de ces matériaux avec précision. Notre analyse à ce sujet sera présentée dans le Chapitre IV.

Des images des particules issues de chènevottes utilisées dans le cadre de la thèse ont également été prises au laboratoire LEHNA de l'ENTPE à l'aide d'un binoculaire. Pour ce faire, une section fine ($< 1 mm$) a été prélevée sur une particule à l'aide d'une lame de rasoir et a été positionnée entre deux lames de verre. L'image est présentée à la Figure I.5. On y constate

une distribution très similaire à [Garcia-Jaldon *et al.* 1998] avec des vaisseaux principaux légèrement plus gros (de 30 à 100 μm) et des vaisseaux secondaires de mêmes dimensions (de 10 à 30 μm). Ces caractéristiques paraissent donc relativement constantes d'une chènevotte à l'autre.

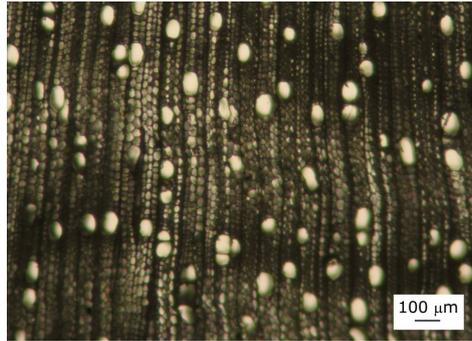


Figure I.5 – Section d'une particule de chanvre observée au binoculaire du LEHNA (ENTPE)

Porosité La porosité des particules est mentionnée dans de nombreuses références, mais rares sont les cas où cette dernière est quantifiée. [Cerezo 2005] donne une première valeur de 78% (méthode non précisée), et conclut que la porosité des particules est majoritairement ouverte. Les mesures de [Ceyte 2008] par tomographie ont permis de mettre en évidence une porosité totale des particules de 57%, répartie entre les petits pores (49%) et les plus grands pores (8%). Cette valeur obtenue par analyse d'images ne permet pas de distinguer les pores ouverts des pores fermés. Les fibres, pour leur part, sont beaucoup moins poreuses. Leur porosité peut être estimée comme étant le rapport entre les surfaces du lumen et de la fibre, variant de 2 à 16,2% d'après [Placet *et al.* 2012].

Masse volumique Etant donnée la forte porosité des particules, il est judicieux de connaître à la fois la masse volumique apparente des particules, et la masse volumique de la matière qui constitue leur squelette appelée "masse volumique de squelette". [Cerezo 2005] donne une valeur de masse volumique apparente des particules de 320 kg.m^{-3} (méthode non précisée), ce qui correspond à une masse volumique de squelette de 1450 kg.m^{-3} .

Des mesures par porosimétrie à air réalisées préalablement à cette thèse sur trois chènevottes [Glé 2009, Glé *et al.* 2011] ont mis en évidence des masses volumiques de squelette beaucoup plus faibles, comprises entre 800 et 1000 kg.m^{-3} . La large gamme couverte par ce paramètre est expliquée grâce aux résultats présentés dans le Chapitre II.

Les fibres de chanvre ont pour leur part une masse volumique de squelette de l'ordre de

I.2 Le chanvre : de la plante aux co-produits

1480 $kg.m^{-3}$ d'après [Garcia-Jaldon *et al.* 1998]. Des mesures au pycnomètre au toluène par [Collet 2004] ont permis de caractériser une masse volumique de squelette de 1498 $kg.m^{-3}$, ce qui confirme cet ordre de grandeur.

Composition chimique [Garcia-Jaldon *et al.* 1998, Vignon *et al.* 1995] ont également permis de connaître les quantités d'éléments présents dans le chanvre. Les fibres et les particules sont essentiellement composées de cellulose, d'hémicellulose, de pectines et de lignines. Des différences sont présentes principalement au niveau des quantités de pectine et de lignine comme le montre le Tableau I.1.

	Cellulose	Hémicelluloses	Pectines	Lignines	Autres
Fibres	55%	16%	18%	4%	7%
Particules	48%	12%	6%	28%	6%

Tableau I.1 – Composition chimique des particules et fibres de chanvre (pourcentages massiques) [Garcia-Jaldon *et al.* 1998, Vignon *et al.* 1995]

Des analyses chimiques similaires ont été reproduites par [Diquélou 2012] sur trois chènevottes d'origines différentes, et ont abouti aux mêmes ordres de grandeur.

2.2 Des particules de chanvre aux chènevottes

2.2.1 Caractéristiques des chènevottes

Les caractéristiques des chènevottes ne sont pas homogènes à l'échelle des particules. Il est donc primordial, pour définir une chènevotte, de parler en termes de volume élémentaire représentatif, un volume au-delà duquel les caractéristiques ne dépendent pas du volume de l'échantillon. Les différences existant au niveau des particules sont alors distribuées de façon stable. Ces différences existent au niveau de la dimension des particules, mais aussi des porosités et des densités.

Granulométrie Traditionnellement, la caractérisation granulométrique de matériaux granulaires est effectuée à l'aide de tamis à mailles carrées. Cet essai a été réalisé pour la chènevotte dans plusieurs études [Cerezo 2005, Gourlay 2008]. Cette technique permet de quantifier les différences de granulométrie existant entre les chènevottes mais ne fournit pas de réelles indications sur les dimensions des particules. En effet, comme on le voit sur la Figure I.3 (b), ces dernières ont une forme de parallélépipède et un tamisage traditionnel ne permet pas de caractériser.

tériser leur plus grande dimension, mais uniquement la dimension de leur plus petite section, comme cela a été montré par [Fernelund 1998].

Des résultats plus précis ont toutefois été obtenus par [Ceyte 2008] qui a développé une méthode de caractérisation de la granulométrie de la chènevotte par analyse d'images en deux dimensions. Dans cette étude, les volumes élémentaires représentatifs du chanvre en termes de longueur et largeur de particules (basés sur des écarts de 5%) sont évalués sur trois chènevottes à partir de leurs courbes granulométriques. D'après ces résultats, 400 à 1 800 particules sont nécessaires afin d'assurer la représentativité d'un échantillon de chènevotte. Ce nombre de particules correspond à des masses de l'ordre de 2 à 4 *g*.

Des mesures de microtomographie ont également été réalisées sur des particules de chanvre, et ont permis de déterminer leur épaisseur. Cette analyse n'a pas pu être appliquée sur des échantillons représentatifs mais a permis de déterminer des épaisseurs moyennes comprises entre 0,4 et 0,7 *mm* selon la chènevotte avec des écarts-types de l'ordre de 0,3%.

Masse volumique La masse volumique apparente des chènevottes non compactées varie en fonction des granulats (origine, granulométrie). Une étude sur dix chènevottes différentes a montré que cette masse volumique "intrinsèque" peut varier de 60 à 110 *kg.m*⁻³ [Gourlay 2008]. La mesure consiste à faire foisonner les particules dans un plateau puis à les verser délicatement dans un seau de 5 litres de sorte que l'empilement soit le plus naturel possible.

Cependant, à partir de cette disposition initiale des particules, la masse volumique apparente de la chènevotte peut varier considérablement par un simple réarrangement des particules, ce qui explique que l'on puisse arriver à des masses volumiques de l'ordre de 150 à 160 *kg.m*⁻³.

Porosité Du fait de la nature granulaire de la chènevotte, la porosité de cette dernière est distribuée sur deux échelles, comme cela est représenté Figure I.6 :

- entre les particules avec une porosité que l'on appellera "porosité interparticule" et notera ϕ_{inter} par la suite, avec

$$\phi_{inter} = \frac{V_{total} - V_{particules}}{V_{total}} \quad (I.13)$$

V_{total} étant le volume apparent de la chènevotte et $V_{particules}$ le volume apparent des particules,

- au sein des particules avec une porosité que l'on appellera "porosité intraparticule" qui a

été discutée précédemment et que l'on notera $\phi_{intra\ chanvre}$:

$$\phi_{intra\ chanvre} = \frac{V_{particules} - V_{squelette}}{V_{particules}} \quad (I.14)$$

$V_{squelette}$ est ici le volume du squelette des particules.

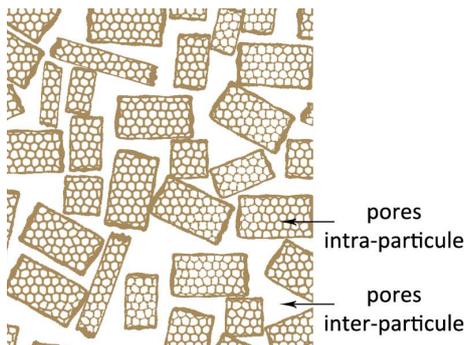


Figure I.6 – Schéma représentant les deux échelles de porosité de la chènevotte (vue des sections des particules)

La porosité totale d'une chènevotte peut par conséquent s'exprimer en fonction des porosités interparticule et intraparticule :

$$\phi = \frac{V_{total} - V_{squelette}}{V_{total}} = \phi_{inter} + (1 - \phi_{inter})\phi_{intra} \quad (I.15)$$

Pour une masse volumique de chènevotte de 130 kg.m^{-3} , [Cerezo 2005] donne une porosité totale de 91%, dont deux tiers sont dus à la porosité interparticule, et un tiers à la porosité intraparticule. Plus généralement, les porosités totales dépendent à la fois de l'origine de la chènevotte et de sa densité apparente. Les valeurs mesurées dans [Glé 2009, Glé *et al.* 2011] pour trois chènevottes sont par exemple comprises entre 80 et 90%.

Sensibilité des particules à la vapeur d'eau Les particules de chanvre étant très poreuses, elles sont particulièrement sensibles à l'eau et à la vapeur d'eau. Des travaux cités dans [Cerezo 2005] ont montré que la teneur en eau massique varie de façon monotone de 0% à 35% pour des humidités relatives allant de 0 à 95% (voir Figure I.11). [Magniont 2010] a également réalisé des mesures similaires et a trouvé des teneurs massiques en eau variant entre 0 et 20% pour des humidités relatives comprises entre 0 et 90%.

D'autres mesures ont été menées afin de connaître la teneur en eau massique à la sortie du sac de chanvre par [Gourlay 2008]. Il s'avère d'après ces résultats qu'à la sortie du sac, la teneur en eau est généralement comprise entre 10,5 et 12,5%.

Ainsi, pour des chènevottes stockées sous une humidité relative de 50%, la teneur en eau massique n'excède pas 10%, et, en se plaçant dans le cas le plus défavorable avec une densité de chènevotte très importante de 150 kg.m^{-3} , le volume d'eau correspond à 1,5% du volume total, ce qui reste relativement faible par rapport aux volumes occupés par l'air et le squelette solide mais doit toutefois être pris en considération.

2.2.2 Propriétés multiphysiques des chènevottes

Propriétés mécaniques La chènevotte est tout d'abord caractérisée par un comportement mécanique très ductile puisque des tests en compression ont montré qu'une chènevotte peut atteindre un taux de déformation allant jusqu'à 75% sans rupture avec une masse volumique initiale de 130 kg.m^{-3} [Cerezo 2005, Arnaud & Gourlay 2011]. Cela est illustré par la Figure I.7.

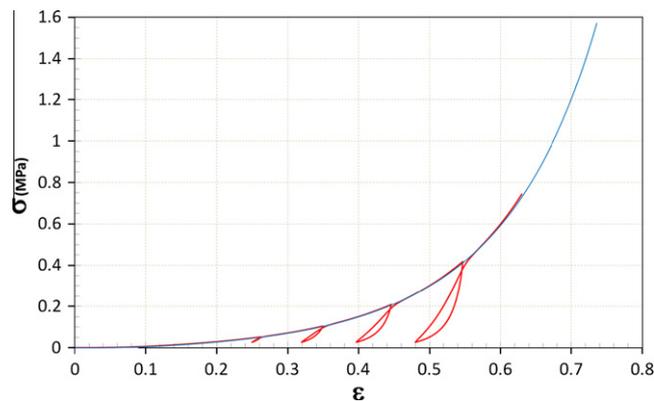


Figure I.7 – Essai de compression simple et de compression cyclique sur chanvre sec, contrainte en fonction du taux de déformation [Cerezo 2005, Arnaud & Gourlay 2011]

Propriétés thermiques Des mesures de conductivité thermique présentées par [Cerezo 2005] ont montré que la chènevotte est caractérisée par une conductivité allant de 48 à $58 \text{ mW.m}^{-1}.K^{-1}$ pour des masses volumiques respectivement de 110 et 150 kg.m^{-3} . La chènevotte pure se classe donc parmi les très bons isolants thermiques. Sa conductivité est plus importante dans le cas des faibles densités pour lesquelles la chènevotte est la plus poreuse.

D'autres mesures ont été réalisées par [Magniont 2010] et montrent une conductivité thermique d'environ $54 \text{ mW.m}^{-1}.K^{-1}$ pour des masses volumiques de chènevotte de 135 et 165 kg.m^{-3} .

Propriétés acoustiques La chènevotte peut être utilisée sans liant à des fins thermique et acoustique, par exemple, déversée en vrac entre les solives au niveau des planchers et plafonds. Il est donc important de connaître son comportement acoustique ainsi que les différents facteurs susceptibles de le moduler.

A notre connaissance, les seules études qui ont porté sur les propriétés acoustiques de la chènevotte à ce jour sont celles qui ont précédé cette thèse, et sont présentées dans [Glé 2009, Glé *et al.* 2011]. Les mesures d'absorption acoustique réalisées portent sur trois granulométries de chènevotte notées G1, G2 et G3 de la plus grossière à la plus fine, testées avec trois masses volumiques allant de 102 à 153 $kg.m^{-3}$. Elles ont été effectuées en incidence normale avec des échantillons d'une épaisseur de 10 *cm* sur une gamme fréquentielle allant de 150 à 2000 *Hz*.

Les mesures ont été réalisées sur trois échantillons afin d'évaluer la reproductibilité de la caractérisation. On constate d'après la Figure I.8 (a) que la représentativité du volume est assurée, avec moins de 5% de variation de l'absorption acoustique entre échantillons. De plus, les particules de fines granulométries (G3) sont légèrement plus performantes aux basses fréquences, et à moyennes fréquences, tandis que les granulométries G1 et G2, étant très proches, confèrent approximativement la même absorption aux chènevottes. Enfin, la Figure I.8 (b) montre qu'une augmentation de la densité apparente a pour effet de décaler les pics d'absorption vers les basses fréquences et de rendre globalement la chènevotte plus absorbante; cet effet de densité est beaucoup plus marqué que celui de la granulométrie. De plus, on note dans toutes les configurations, un excellent niveau d'absorption acoustique avec $\alpha > 0,5$ pour des fréquences supérieures à 300 *Hz*.

2.3 Des fibres aux laines

De nombreux matériaux (tissus, laines, composites ...) peuvent être développés à partir des fibres végétales. On se concentre ici sur le cas des laines utilisées pour des applications thermiques et acoustiques dans le bâtiment.

2.3.1 Modes de fabrication des laines végétales

Les laines végétales sont issues de deux grands modes de fabrication.

Thermoliage Le principal mode de fabrication développé pour les laines consiste à utiliser des fibres dites thermoliantes ou thermofusibles. Ces fibres, de type polyester et polyéthylène, représentent une proportion de l'ordre de 10 à 20% en masse dans le matériau et sont constituées de deux couches concentriques. La couche extérieure (gaine) est dimensionnée de sorte à avoir

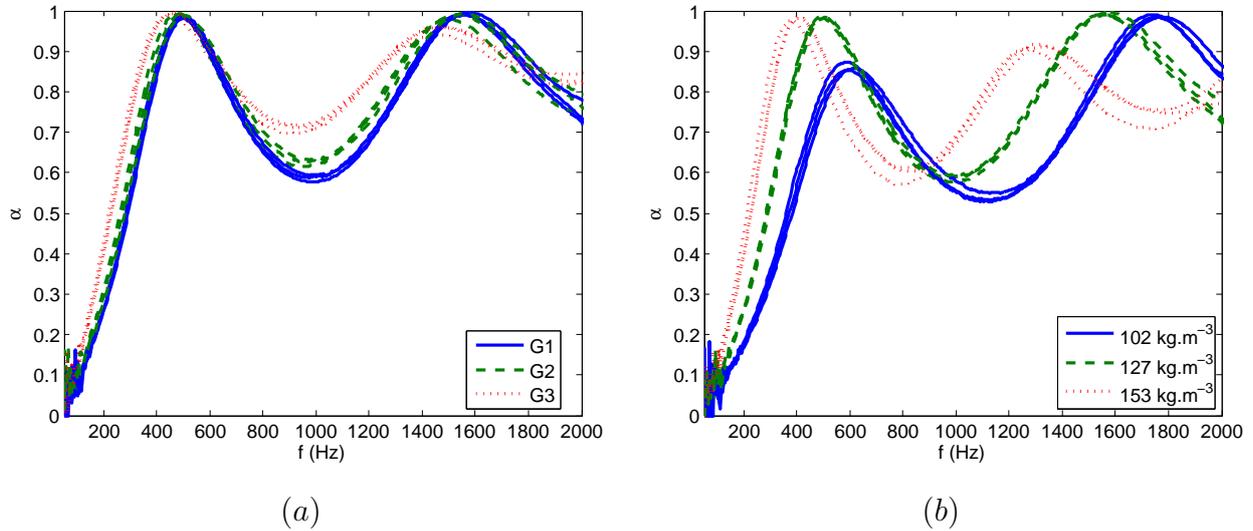


Figure I.8 – Effet de la granulométrie ($G1 > G2 > G3$) de la chènevotte sur l'absorption acoustique pour une masse volumique apparente de 127 kg.m^{-3} (a), et de la densité apparente de la chènevotte G1 sur son absorption acoustique (b)

un point de fusion situé à plus basse température que la partie intérieure (âme) de la fibre. Ainsi, mélangé aux fibres que l'on cherche à assembler (fibres végétales, animales ...), l'échauffement puis le refroidissement de l'ensemble permettent de coller les fibres liantes les unes aux autres (Figure I.9 (a)). Les laines fabriquées par thermoliage sont principalement utilisées dans le bâtiment pour l'isolation thermique.

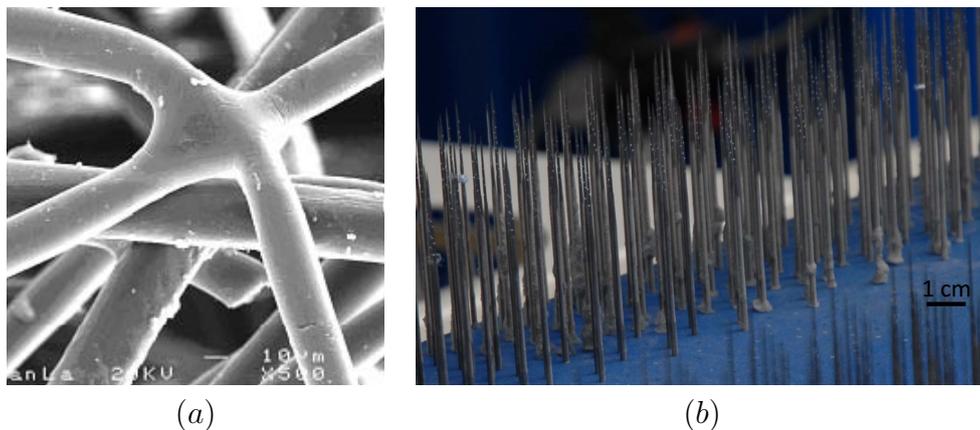


Figure I.9 – Contact entre fibres fusibles observé au MEB sur une laine de chanvre [Collet 2004] (a), et aiguilles utilisées dans les chaînes de fabrication par aiguilletage (b)

Aiguilletage Une autre technique de mise en œuvre des fibres est l'aiguilletage qui consiste à traverser la nappe de fibres avec un ensemble d'aiguilles crantées (voir Figure I.9 (b)), ce qui a pour effet de les enchevêtrer les unes aux autres. Cette technique ne requiert pas de fibres fusibles et permet de fabriquer des tapis pouvant être utilisés comme sous-couche dans le bâtiment pour isoler des bruits d'impacts.

2.3.2 Caractéristiques des laines

Masse volumique Les laines thermoliées ont une masse volumique qui peut varier de 20 à plus de 100 $kg.m^{-3}$, sur une épaisseur généralement comprise entre 4 et 20 cm . En ce qui concerne les tapis aiguilletés, la fonction recherchée étant différente, l'épaisseur est réduite entre 5 mm et 1 cm , et la masse volumique peut atteindre plus de 250 $kg.m^{-3}$.

Porosité La nature fibreuse des laines leur confère une très grande porosité, qui est directement corrélée à la densité du matériau. La porosité des laines peut effectivement varier entre 83% pour une masse volumique de 250 $kg.m^{-3}$ et 99% pour une masse volumique de 20 $kg.m^{-3}$. La valeur donnée par [Collet 2004] de 97% pour 38 $kg.m^{-3}$ correspond à cette gamme.

2.3.3 Propriétés multiphysiques des laines de chanvre

Propriétés mécaniques Les propriétés mécaniques de laines de chanvre de 25 à 75 $kg.m^{-3}$ ont été étudiées par [Arnaud & Cerezo 2001]. L'effet de la compression effectuée pour le conditionnement des laines a premièrement été abordé et il a été montré que la recouvrance des laines suite à compression (c.-à-d. leur capacité à se décompresser) est plus faible pour les laines de faible densité avec une diminution de l'épaisseur de 8% suite à une compression de 67% du matériau. En traction, les laines de 75 $kg.m^{-3}$ résistent à des contraintes allant jusqu'à 235 kPa . Ces propriétés sont très intéressantes mais restent assez éloignées de l'excellente résistance à la traction intrinsèque aux fibres qui est de l'ordre de 600 MPa d'après [Placet *et al.* 2012]. Cela s'explique par une moindre résistance des fibres fusibles assurant la cohésion du matériau.

Propriétés acoustiques La laine de chanvre est un matériau fibreux très poreux. Ce matériau est donc caractérisé par une forte absorption acoustique comme le montrent les mesures réalisées par [Oldham *et al.* 2011]. En revanche, à notre connaissance, peu de données existent dans la littérature au niveau de l'indice d'affaiblissement de ce matériau.

Propriétés thermiques [Collet 2004] a étudié la conductivité thermique d'une laine de chanvre d'une masse volumique de 40 kg.m^{-3} en fonction de l'humidité relative. La conductivité thermique de cette laine est de $42 \text{ mW.m}^{-1}.K^{-1}$ pour une humidité relative de 0% et augmente jusqu'à $51 \text{ mW.m}^{-1}.K^{-1}$ pour une humidité relative de 80%. Ceci correspond aux valeurs obtenues par [Arnaud & Cerezo 2001] : de 39 à $70 \text{ mW.m}^{-1}.K^{-1}$ pour des laines d'une masse volumique allant respectivement de 22,3 à 80 kg.m^{-3} , mais est légèrement en-deçà des conductivités caractérisées par [Monnet 1999], comprises entre 49,6 et $72,7 \text{ mW.m}^{-1}.K^{-1}$ pour des masses volumiques allant de 38 à $68,2 \text{ kg.m}^{-3}$.

3 Le béton de chanvre

Le béton de chanvre résulte du mélange de la chènevotte avec un liant. Les premières utilisations du béton de chanvre en tant que matériau du bâtiment datent d'une vingtaine d'années.

En 2007, d'après l'association "Construire en chanvre" [CenC], plus de 3000 chantiers ont eu recours au béton de chanvre, ce qui témoigne d'un essor rapide de ce matériau. De nombreux bâtiments, tels que des maisons individuelles ont ainsi été construites en béton de chanvre, mais ce matériau a également été utilisé pour des constructions publiques comme par exemple la Maison de l'Habitat, un bâtiment de 5 étages, construit à Clermont Ferrand [Bevan & Woolley 2008].

La résistance des bâtiments en béton de chanvre à l'épreuve du temps est pour l'instant assez peu connue, n'ayant pas le recul nécessaire. La durée de vie théorique du matériau a toutefois été fixée à 100 ans pour son Analyse de Cycle de Vie [Boutin *et al.* 2005], soit la même durée de vie que le béton cellulaire et les briques en terre cuite, caractéristique de matériaux particulièrement durables.

3.1 Modes de fabrication et formulations du béton de chanvre

Le béton de chanvre est soit fabriqué à la bétonnière ou au malaxeur pour être ensuite banché, soit utilisé sous forme de briques préfabriquées, soit mis en œuvre par projection. Ces modes sont illustrés à la Figure I.10. La projection permet de mettre en œuvre le béton avec moins d'eau, ce qui accélère son temps de séchage [Elfordy *et al.* 2008]. Mais, dans les trois cas, le béton de chanvre assure un rôle d'enveloppe, étant non porteur (cf. Section 3.4.1). Il est donc utilisé en tant que matériau de remplissage d'une structure porteuse type ossature bois.

Les règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre [RP2 2006] constituent un document de référence par rapport aux performances du béton de chanvre. Ces règles

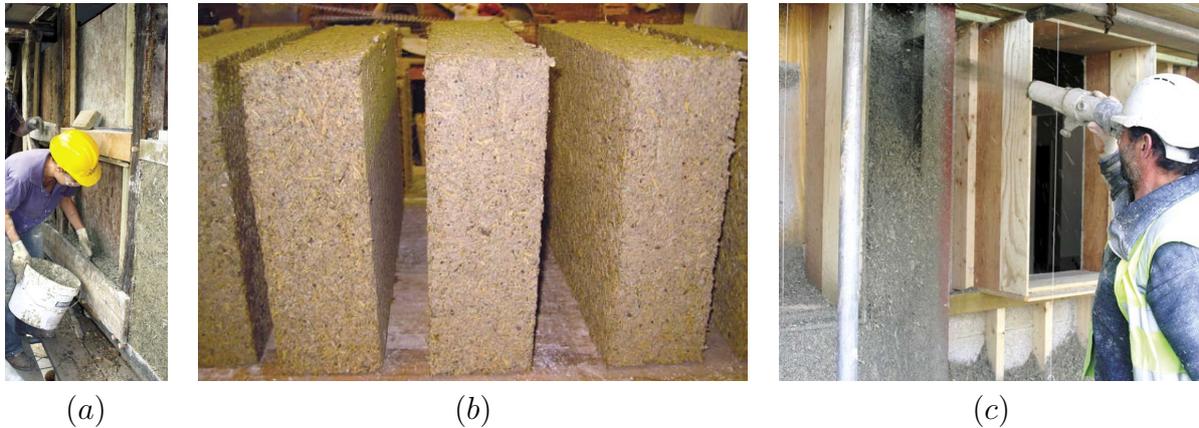


Figure I.10 – Les principaux modes de mise en œuvre : Le banchage (a), les briques préfabriquées (b) et la projection (c) [Bevan & Woolley 2008]

distinguent quatre formulations différentes de béton de chanvre en fonction de son utilisation : les formulations “toit”, “mur”, “enduit” et “sol”. Les caractéristiques et valeurs mécaniques seuils de ces mélanges sont présentées dans le Tableau I.2 (NB : les dosages sont donnés à titre d'exemple pour un liant Tradical® PF70).

Formulation		Toit	Mur	Enduit	Sol
Dosages ($kg.m^{-3}$)	Chanvre	100	100	100	100
	Eau	100	220	800	275
	Liant	200	350	500	500
Masse volumique apparente sèche ($kg.m^{-3}$)		250	420	800	500
Module élastique (28 jours) (MPa)		>3	>15	>20	>15
Résistance compression (28 jours) (MPa)		>0,05	>0,2	>0,3	>0,3

Tableau I.2 – Caractéristiques des formulations données par les règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre [RP2 2006]

3.2 Description des liants

Avant de décrire les caractéristiques des bétons de chanvre, il est fondamental de bien connaître ses constituants, en particulier le liant utilisé, dont nous n'avons pas encore parlé.

3.2.1 Les différentes natures de liant

Les règles professionnelles autorisent l'utilisation de plusieurs types de liant [RP2 2006]. Les caractéristiques des liants les plus souvent utilisés sont donc décrites dans la suite.

La chaux aérienne La chaux aérienne $Ca(OH)_2$ provient d'un calcaire très pur. Elle s'obtient à partir d'une hydratation de la chaux vive CaO lors d'une réaction appelée extinction de la chaux vive. Ce type de chaux doit son appellation à sa prise qui se réalise, en présence d'eau, avec le CO_2 de l'air suivant la réaction $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$. Cette prise appelée "prise aérienne" est lente, faisant progressivement évoluer les propriétés mécaniques des matériaux pendant plusieurs mois, pour se stabiliser seulement après plusieurs années.

La chaux hydraulique La chaux hydraulique est extraite de calcaires argileux contenant des silicates. Elle est obtenue grâce à une réaction entre la chaux CaO et les silicates SiO_2 , qui donnent les silicates calciques C_2S et C_3S (C et S font partie des notations cimentières : $A = Al_2O_3$, $C = CaO$, $F = Fe_2O_3$, $H = H_2O$, $S = SiO_2$ et $\bar{S} = SO_3$). La prise se fait alors dans un premier temps par une réaction entre les silicates calciques et de l'eau, qui donne des silicates de calcium hydratés CSH : C_2S et $C_3S + H \rightarrow CSH$. Dans un second temps, ces hydrates sont carbonatés par le CO_2 présent dans l'air.

L'indice d'hydraulicité de la chaux définit le rapport d'argile par rapport à la chaux dans le liant, cet indice est compris entre 0 pour une chaux purement aérienne et 0,5 pour une chaux très hydraulique.

Le ciment Le ciment est un liant hydraulique qui nécessite pour sa fabrication plus d'éléments que la chaux aérienne. En plus de la chaux et de la silice, de l'alumine A , de l'oxyde de fer F , et du trioxyde de soufre \bar{S} sont utilisés.

Ces différents oxydes sont alors cuits à $1450^\circ C$ sous forme d'un mélange, appelé cru, de calcaire (80%) et d'argile ou koalin (20%). De la cuisson des oxydes résulte le clinker. Les principaux composants du clinker sont alors le silicate tricalcique C_3S , le silicate bicalcique C_2S , l'aluminate tricalcique C_3A , et l'alumino-ferrite tétracalcique C_4AF .

Le ciment est ensuite obtenu par un mélange de clinker broyé et de sulfate de calcium (gypse). On peut également trouver dans les ciments courants : des laitiers de haut fourneau, de la fumée de silice, des pouzzolanes, des cendres volantes siliceuses et calciques, des schistes calcinés, des calcaires et d'autres additifs.

3.2.2 Caractéristiques des liants

Il existe une bibliographie relativement riche sur la structure poreuse des pâtes de liants.

Porosité L'effet de la quantité d'eau de malaxage sur la microstructure poreuse des pâtes de liant à base de chaux a été investigué par [Arandigoyen *et al.* 2005]. Cette étude est basée

sur des mesures de porosités accessibles au mercure et à l'eau. Les résultats montrent que la porosité du liant augmente avec la quantité d'eau de malaxage utilisée, entraînant une porosité accessible au mercure variant entre 54% et 66%. En ce qui concerne la taille des pores, si on ne prend pas en compte les pores dus aux bulles d'air emprisonnées lors de la fabrication, la taille moyenne des pores varie de 0,5 à 1 μm et augmente linéairement avec la quantité d'eau introduite.

Une étude a permis d'identifier les effets de la teneur en ciment dans un mortier (mélange liant + sable) à base de chaux [Mosquera *et al.* 2006]. Il a ainsi été montré expérimentalement que la porosité et la taille des pores sont des fonctions décroissantes de cette teneur en ciment. La porosité des échantillons passe effectivement de 26 à 18% pour des tailles maximales de pores passant de 15 μm à 0,15 μm . En outre, une chaux hydraulique a également été testée et présente des propriétés intermédiaires à celles de la chaux aérienne pure et du ciment.

Des essais menés par [Goyer 2007] à l'ENTPE ont permis de caractériser la microstructure du liant Tradical[®] PF70 utilisé dans le cadre de la thèse. La porosité de ce liant a été évaluée à 54% (porosité accessible au mercure) et à 61% (porosité accessible à l'eau) avec des pores dont la dimension caractéristique est comprise entre 0,4 et 0,7 μm .

Sensibilité à la vapeur d'eau L'humidité relative a une influence notable sur la teneur en eau des liants. Cette teneur massique a été évaluée par [Cerezo 2005] pour des humidités relatives allant de 0 à 95%, sur un liant T70 (mélange de chaux aérienne, hydraulique et pouzzolanique). Comme on le voit Figure I.11, en dessous de 50% d'humidité relative, la teneur en eau du liant est inférieure à 5%, et moins importante que dans la chènevotte. En revanche, pour des humidités relatives de 95%, la teneur en eau atteint 55%; ce comportement s'explique par une plus forte condensation capillaire dans le liant étant donnée sa taille de pores plus étroite. Pour d'importantes humidités relatives, les teneurs en eau peuvent en conséquence engendrer une baisse de la porosité, et entraîner une variation significative des propriétés acoustiques des liants et des bétons de chanvre.

3.3 Caractéristiques des bétons de chanvre

Masse volumique Comme le montre le Tableau I.2, la gamme de masses volumiques apparentes du béton de chanvre est étendue de 250 à 800 $kg.m^{-3}$ en fonction du dosage en liant, pour les formulations recommandées par les règles professionnelles [RP2 2006]. Cette densité reste, dans tous les cas, comprise entre la masse volumique de la chènevotte, de l'ordre de 100 $kg.m^{-3}$, et la masse volumique du liant pouvant dépasser 1900 $kg.m^{-3}$.

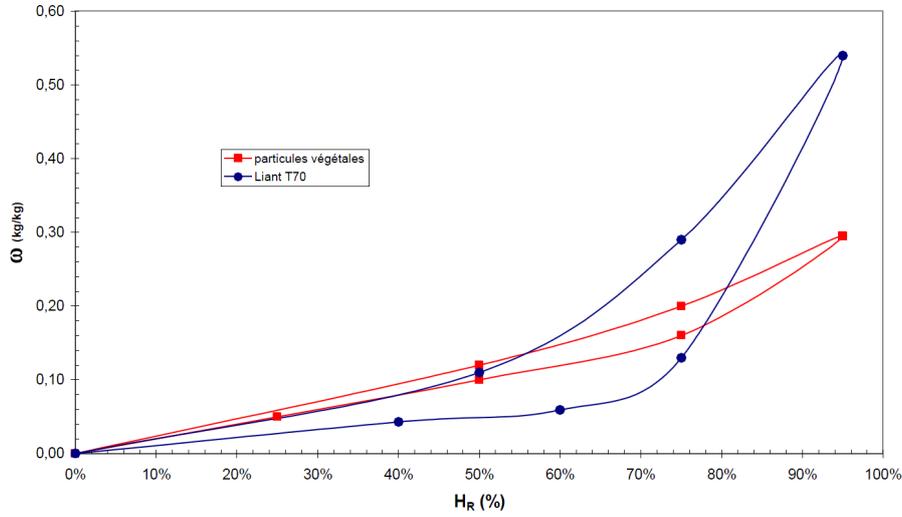


Figure I.11 – Courbes de sorption et désorption du liant T70 pur et des particules de chanvre [Cerezo 2005]

En ce qui concerne la densité moyenne du squelette du béton de chanvre, des mesures ont été réalisées par [Collet 2004] au pycnomètre au toluène, et ont permis de déterminer une masse volumique de squelette de 1800 kg.m^{-3} pour des masses volumiques apparentes de l'ordre de 390 à 425 kg.m^{-3} et une masse volumique de squelette de 2128 kg.m^{-3} pour une densité apparente de 785 kg.m^{-3} . [Evrard 2008] a, de son côté, mesuré une masse volumique de squelette de 1660 kg.m^{-3} pour un béton de chanvre de formulation "mur" d'une masse volumique apparente de 440 kg.m^{-3} grâce à un pycnomètre à hélium.

Porosité La microstructure des bétons de chanvre est relativement complexe car elle associe la microstructure du liant, la microstructure des particules et les vides interparticules. On peut ainsi distinguer trois principales échelles de porosité au sein d'un béton de chanvre, représentées sur la Figure I.12 :

- la "porosité intraliant" $\phi_{intra \text{ liant}}$, avec des pores de l'ordre de $1 \mu\text{m}$,

$$\phi_{intra \text{ liant}} = \frac{V_{liant} - V_{squelette \text{ liant}}}{V_{liant}} \quad (\text{I.16})$$

$V_{squelette \text{ liant}}$ étant le volume de squelette du liant

- la "porosité intraparticule" $\phi_{intra \text{ chanvre}}$, avec des pores de 10 à $60 \mu\text{m}$,

$$\phi_{intra \text{ chanvre}} = \frac{V_{particules} - V_{squelette \text{ chanvre}}}{V_{particules}} \quad (\text{I.17})$$

$V_{squelette \text{ chanvre}}$ étant le volume de squelette des particules

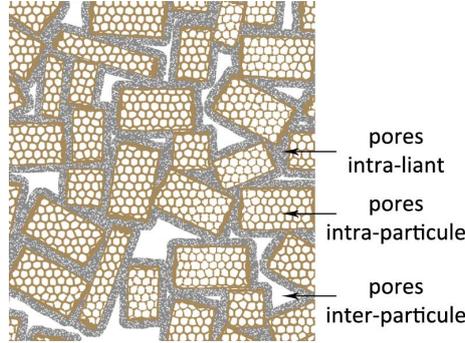


Figure I.12 – Schéma représentant les trois échelles de porosité des bétons de chanvre (vue des sections des particules)

- la “porosité interparticule” ϕ_{inter} , dont les pores ont une dimension de 1 *mm* à 1 *cm*,

$$\phi_{inter} = \frac{V_{total} - V_{particules} - V_{liant} + V_{particules \cap liant}}{V_{total}} \quad (I.18)$$

$V_{particules}$ et V_{liant} correspondant respectivement aux volumes apparents des particules et du liant dans le béton de chanvre. $V_{particules \cap liant}$ correspond au volume éventuellement occupé à la fois par les particules et le liant, dans le cas où le liant pénétrerait dans les pores intraparticules. Ce volume particulièrement difficile à évaluer sera discuté à partir de nos résultats expérimentaux dans le Chapitre IV.

La porosité du béton de chanvre dépend également de façon directe de sa formulation, pouvant varier de la porosité du liant à celle beaucoup plus élevée de la chènevotte. [Collet 2004] a ainsi déterminé pour un enduit chaux-chanvre une porosité de 63% et pour une formulation “mur” une porosité de 76 à 78%. Les bétons de chanvre caractérisés par [Cerezo 2005] ont pour leur part une porosité allant de 77% pour une formulation “dalle” à 80% pour une formulation “toit”.

Sensibilité à la vapeur d’eau Les analyses développées par [Cerezo 2005] ont permis de montrer que la teneur en eau contenue dans les bétons de chanvre Ω_{beton} peut être estimée à partir de celles du liant Ω_{liant} et celle de la chènevotte $\Omega_{chanvre}$ dans les mêmes conditions d’humidité relative. Cela est démontré par l’Equation I.19 obtenue par la technique d’homogénéisation auto-cohérente (HAC). Ainsi, les teneurs en eau mesurées sont comprises entre 3 et 7% pour une humidité relative de 50%, et sont dans ce cas plus importantes pour les formulations riches en chènevotte. Elles atteignent 40% pour une humidité relative de 95%.

$$\Omega_{beton} = \frac{C_{liant}}{\rho_{beton}} \Omega_{liant} + \frac{C_{chanvre}}{\rho_{beton}} \Omega_{chanvre} \quad (I.19)$$

C_{liant} et $C_{chanvre}$ sont les concentrations de liant et de chanvre dans le béton de chanvre, exprimées en $kg.m^{-3}$, et ρ_{beton} la masse volumique du béton de chanvre.

Lorsque les matériaux sont soumis à des fluctuations d'humidité relative, ces teneurs en eau se stabilisent après une durée relativement longue, puisque 50 jours environ sont nécessaires pour arriver à des variations journalières de masse inférieures à 1% lorsque l'humidité relative varie par pas de 25% à une température de 20°C.

Des mesures similaires ont été réalisées par [Collet 2004] et les mêmes ordres de grandeur ont été mesurés.

3.4 Propriétés multiphysiques des bétons de chanvre

3.4.1 Propriétés mécaniques

Les tests réalisés par [Cerezo 2005] en mécanique ont permis de souligner un comportement élasto-plastique et des performances modestes : résistance en compression variant de 0,25 à 1,15 MPa et module d'Young allant de 4 à 160 MPa suivant la formulation utilisée. Par conséquent, le béton de chanvre ne peut être utilisé en tant que matériau porteur. En revanche, ce matériau est très intéressant car il est doté d'un comportement très ductile, pouvant supporter des taux de déformations allant de 4 à 15% suivant la formulation.

Des résultats en compression présentés par [Gourlay 2009] confirment des performances modérées avec une résistance en compression comprise entre 0,4 et 0,6 MPa et un module d'Young allant de 25 à 50 MPa pour des bétons de chanvre d'une masse volumique de l'ordre de 400 $kg.m^{-3}$ de formulation "mur". Il est montré, de plus, que la granulométrie de la chènevotte utilisée a un effet marqué à la fois sur la durée de la prise et sur les propriétés mécaniques finales des bétons de chanvre. Ainsi, un béton réalisé à partir de plus petites particules est caractérisé par une durée de prise plus longue (réaction retardée par une plus faible porosité), et de meilleures performances mécaniques (les petites particules étant mieux enrobées par le liant).

3.4.2 Propriétés thermiques

Le béton de chanvre est un matériau particulièrement isolant, ce qu'il doit à son importante porosité. [Cerezo 2005] a effectivement mesuré des conductivités thermiques de 60 à 200 $mW.m^{-1}.K^{-1}$ suivant la formulation. Cette conductivité est sujette à de grandes variations lorsque le matériau est exposé à l'humidité, puisque les conductivités sèches sont de 20 à 50% inférieures aux conductivités des matériaux soumis à une humidité relative de 50 à 75%. Les

mesures réalisées par [Collet 2004] confirment ces valeurs.

[Samri 2008, Gourlay 2009] ont en outre mis en évidence des transferts hygrothermiques qui se manifestent sous la forme de diffusion de vapeur d'eau à travers le matériau et de changement de phase vapeur/liquide. Ces phénomènes constituent un avantage majeur pour le béton de chanvre qui permet, contrairement à des matériaux traditionnels tels que béton cellulaire et la terre cuite, de réguler la température et l'humidité relative dans un bâtiment, et par conséquent de réaliser des économies d'énergie tout en améliorant le confort.

Dans le Tableau I.3, les propriétés des matériaux traditionnellement utilisés dans le bâtiment [Couasnet 2005] sont présentées et comparées aux propriétés des laines, chènevottes et bétons de chanvre présentées précédemment.

On remarque que les atouts de ces matériaux sont principalement leur faible conductivité thermique, leur importante perméabilité à la vapeur d'eau, et leur faible masse volumique. Les performances mécaniques restent en revanche très modestes.

Matériaux	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Perméabilité vapeur d'eau ($10^{-11}kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$)	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	Contrainte traction (MPa)	Contrainte compression (MPa)	Module élastique (MPa)
Acier	52	-	7800	360	-	210000
Aluminium	230	-	2700	170	80 à 160	71000
Béton	1,75	0,6	2450	-	25 à 80	23000
Bois	0,05 à 0,29	1,3 à 2,1	400 à 1000	10	10	10
Caoutchouc	0,23	-	1200 à 1500	-	-	200
Enduit monocouche	1,15	0,5 à 1,3	1500	2	15	8000
Laine minérale	0,04	10 à 17	100	0,002	0,004	-
Liège	0,04	1,0	250	0,6	0,3	23000
Panneaux de bois	0,16	0,4	800	-	50	11000
Pierre naturelle	3,5	0,2 à 1,0	2750	0,5 à 30	5 à 300	23000
Plâtre	0,48	2,7	1000	1 à 3	12	1450
Polystyrène	0,042	0,6	14	28	28	2600
Terre cuite	1,15	0,2 à 0,4	2000 à 2500	4 à 18	12,5 à 80	700 à 4000
Verre	1,15	-	2700	20	1000	62500
PVC	0,21	0,1	1350	40	-	2450
Laines de chanvre	0,039 à 0,073	-	20 à 250	0,235	-	-
Chênevottes	0,048 à 0,058	-	60 à 160	-	0,05 à 0,25	1 à 4
Bétons de chanvre	0,06 à 0,15	1,5 à 2,0	200 à 800	-	0,05 à 1	1 à 100

Tableau I.3 – Comparaison des propriétés multiphysiques des matériaux du bâtiment [Cousnet 2005] à celles des laines de chanvre, chènevottes et bétons de chanvre [Arnaud & Cerezo 2001, Collet 2004, Cerezo 2005, Samri 2008, Monnet 1999, Magniont 2010]

3.4.3 Propriétés acoustiques

Les premières mesures acoustiques réalisées sur les bétons de chanvre sont celles présentées par [Cerezo 2005]. Elles ont montré que les bétons de chanvre, du fait de leur importante porosité ouverte, sont caractérisés par des coefficients d'absorption acoustique compris entre 0,3 à 0,9 sur la gamme de fréquences étudiée de 100 à 2000 Hz . Cette absorption est plus intéressante que pour de nombreux matériaux traditionnels du bâtiment tels que les bétons cellulaires dont la porosité est principalement fermée. De plus, la formulation et l'épaisseur des échantillons peuvent être utilisées comme leviers de pilotage des propriétés acoustiques. Ainsi, la position des pics d'absorption est décalée vers les basses fréquences et le niveau global d'absorption est atténué pour de forts dosages en liant. En outre, l'augmentation de l'épaisseur entraîne une atténuation des pics d'absorption sans grande modification du niveau d'absorption global.

Des résultats ont en parallèle été publiés par [Bütschi *et al.* 2004] concernant l'isolation phonique de briques de bétons de chanvre de 31 cm d'épaisseur et d'une masse volumique de l'ordre de 700 kg.m^{-3} . Les indices d'affaiblissement trouvés vont de 43 dB pour le béton brut à 47 dB pour du béton enduit sur les deux faces.

Les propriétés acoustiques des bétons de chanvre ont également été caractérisées dans [Glé 2009, Glé *et al.* 2011]. Grâce à ces études, différents leviers de contrôle de l'absorption acoustique des bétons ont pu être mis en évidence. Ils sont relatifs aux caractéristiques des constituants et au mode de mise en œuvre.

Influence des constituants L'effet de la granulométrie de la chènevotte a été observé sur les propriétés acoustiques des bétons de chanvre d'une formulation "mur". Si des différences sont observables entre les absorptions acoustiques des chènevottes pures (voir Figure I.8 (a)), ces spécificités s'effacent dans le béton de chanvre devant les autres paramètres de fabrication qui s'avèrent beaucoup plus influents.

Trois types de liants (Liant A : chaux aérienne, Liant B : chaux hydraulique et Liant C : ciment) ont été utilisés avec ces chènevottes afin de connaître leur impact sur l'absorption acoustique des bétons réalisés. Comme illustré Figure I.13 (a), les bétons fabriqués à base de chaux (Liants A et B) présentent des coefficients d'absorption acoustique globalement meilleurs que ceux des bétons à base de ciment (liant C). Cela est notamment attribué au fait que la porosité ouverte est plus importante dans les bétons à base de chaux. Le choix du liant peut donc contribuer à optimiser la formulation du matériau.

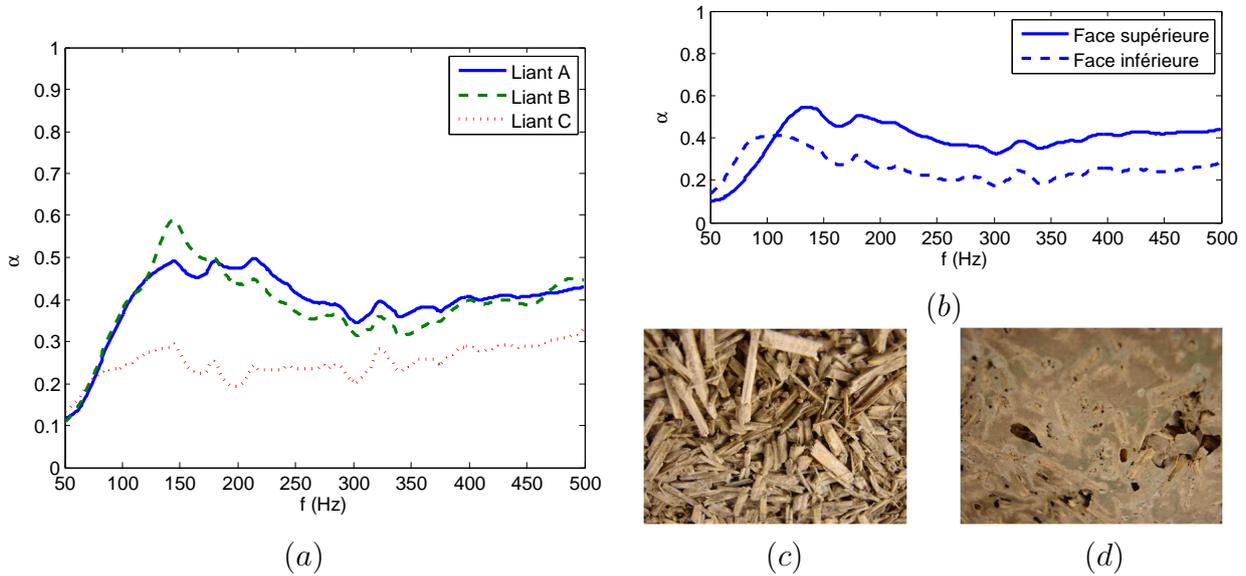


Figure I.13 – Effet du choix du liant (a), et d'un excès d'eau (b) sur l'absorption acoustique d'un béton de chanvre (Formulation "mur") et photographies des faces supérieure (c) et inférieure (d) dans le cas de l'excès d'eau

Influence de la mise en œuvre Des différences considérables ont été observées sur les courbes d'absorption acoustique des faces d'un même échantillon et ont été imputées à la quantité d'eau de gâchage introduite lors de la fabrication. Lorsqu'un excès d'eau par rapport à la quantité nécessaire à la prise du liant est introduit, le mélange devient mousseux et moins dense. Dans ce cas, on observe une concentration plus importante de liant dans la partie inférieure des échantillons : une couche fine de liant peut alors se former au niveau de la surface de contact avec le moule de l'échantillon. En conséquence, l'absorption acoustique de la face inférieure s'en trouve significativement altérée.

La Figure I.13 (b) permet de confronter les états de surface et les absorptions acoustiques des faces supérieures et inférieures d'un béton de chanvre réalisé avec un excès d'eau. On se rend compte que dans ce cas (Figure I.13 (d)), le réseau poreux de la face inférieure est partiellement obstrué par le liant, et que son absorption acoustique baisse de 40% en conséquence. Dans le cas normal, aucune différence significative n'est remarquable entre les faces des échantillons et entre leurs absorptions acoustiques.

D'autres paramètres de mise en œuvre peuvent avoir de grandes répercussions sur la microstructure des bétons de chanvre, et donc sur leurs propriétés acoustiques, mais n'ont pas fait l'objet d'études systématiques. C'est le cas notamment du mode de fabrication (banchage/projection) entraînant des orientations de particules différentes, des concentrations relatives utilisées, et de la masse volumique du matériau réalisé. Les effets de ces paramètres ont

pu être observés expérimentalement au cours de cette thèse et seront discutés dans le Chapitre II. Les propriétés des bétons de chanvre peuvent enfin être contrôlées en ayant recours à des structures multicouches type enduit/béton/enduit, ou des géométries de surface irrégulière. Ces deux modes d'optimisation seront investigués dans le Chapitre V.

4 Conclusion

Nous avons vu dans ce premier chapitre que les matériaux à base de particules et fibres végétales constituent une réponse adéquate aux problématiques environnementales actuelles, et peuvent être utilisés sous de nombreuses formes dans le bâtiment. Du point de vue acoustique, ils présentent deux avantages majeurs :

- premièrement, les performances acoustiques de ces matériaux sont du même niveau, voire supérieures à celles des matériaux traditionnellement utilisés de telle sorte que leur diversité permet de répondre à de nombreuses problématiques acoustiques, en absorption, en isolation aux bruits aériens et/ou en isolation aux bruits de choc,
- deuxièmement, la spécificité d'une majorité de ces matériaux est d'avoir des performances qui peuvent être maîtrisées en amont par leur mode de fabrication et les propriétés des constituants, ce qui permet de les dimensionner en fonction des utilisations auxquelles elles sont destinées.

A partir de la culture du chanvre, une gamme de produits très variée peut être produite. Les laines de chanvre, les chènevottes et les bétons de chanvre sont à la fois caractérisés par une microstructure complexe et des propriétés multiphysiques de bon niveau. Tous ces matériaux sont dotés d'une grande porosité ouverte allant d'environ 75% pour les bétons de chanvre jusqu'à plus de 99% pour les laines. Cette porosité leur confère un caractère très isolant en thermique, mais des propriétés mécaniques plutôt modestes. En acoustique, les résultats publiés dans la littérature ont démontré les bonnes propriétés de ces matériaux en absorption, mais aucun résultat n'est donné en ce qui concerne leur indice d'affaiblissement.

Le comportement acoustique des matériaux à base de particules et fibres végétales présente donc un fort potentiel, et de nombreuses questions restent à être étudiées afin d'optimiser leur utilisation. L'objectif de cette thèse est d'y répondre à partir d'investigations expérimentales et de modélisations des phénomènes de dissipation acoustique. Dans le Chapitre II, les caractéristiques des échantillons étudiés sont présentées, et dans les chapitres suivants, leurs propriétés acoustiques seront discutées et analysées.

**Chapitre I. Etat de l'art : Propriétés acoustiques des éco-matériaux et
présentation des matériaux à base de chanvre**

Chapitre II

Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

Ce deuxième chapitre présente les principaux échantillons caractérisés pendant cette thèse. Le parti pris de notre travail est d'étudier à la fois les matériaux finis (laines et bétons de chanvre) et les matières premières (chènevottes et liants) de sorte à pouvoir expliquer les performances des matériaux finis en fonction de celles de leurs composants et du mode de mise en œuvre. Une large gamme de matériaux a donc été testée afin de constituer une base de données aussi complète que possible, indispensable pour la phase de modélisation.

Nous présenterons ainsi dans un premier temps les laines étudiées, puis les chènevottes, les liants et les bétons de chanvre. Dans chacun des cas, l'origine, le mode de fabrication des matériaux, et les grandeurs caractérisées seront présentées. La densité apparente des matériaux, leur porosité et résistance au passage à l'air ont été déterminées. De plus, une analyse granulométrique et des mesures de tortuosité ont été menées pour les échantillons de chènevottes, et un suivi du séchage a été réalisé pour les échantillons de liant et de bétons de chanvre.

Les propriétés acoustiques mesurées sont ensuite présentées pour les différents matériaux. Une première analyse des résultats est effectuée afin de discuter des principaux leviers d'action mis en évidence, en se basant sur les grandeurs caractérisées préalablement. Dans le Chapitre [IV](#), cette analyse sera approfondie en s'appuyant sur la théorie des matériaux poreux.

1 Laines végétales

Les laines végétales se différencient des laines minérales industrielles à plusieurs niveaux. Elles sont caractérisées comme on l'a vu dans le Chapitre [I](#) par des dimensions plus importantes, par une porosité intrafibre et par une origine naturelle source d'importante variabilité. Les mesures et modélisations réalisées dans cette thèse visent à comprendre les effets de chacune

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

de ces caractéristiques sur leurs performances acoustiques.

1.1 Description des échantillons

Une première série de laines végétales issues des chaînes de production de la société Laroche S.A. (fabricant de lignes d'usine textile) ont été caractérisées lors de cette thèse. Il s'agit d'échantillons prototypes, n'étant pas fabriqués suivant un process industriel. Ces matériaux issus de différents modes de fabrication, avec différentes densités et diverses fibres végétales permettent d'accéder à un bon aperçu de la gamme des propriétés acoustiques des laines végétales. Leurs principales caractéristiques sont décrites dans les paragraphes suivants.

Chanvre vert Il s'agit d'une laine de chanvre fabriquée à partir de fibres vertes (non rouies), grâce au procédé de thermoliage présenté Chapitre I, Section 2.3.1. Le terme "Bico" fait référence aux fibres bicomposantes thermofusibles à base de polyester ou polyéthylène.

Désignation	Chanvre vert
Fabrication	Thermolié
Composition	Fibres de chanvre (85%) + Bico (15%)
Épaisseur (<i>mm</i>)	100
Masse vol. ($kg.m^{-3}$)	$20,8 \pm 0,8$



Tableau II.1 – Caractéristiques de la laine de chanvre vert

Chanvre-chènevotte Lors du défilage de la plante séchée de chanvre, il est généralement difficile de complètement séparer fibres et particules, si bien qu'il peut rester un certain nombre de particules au sein des fibres. Dans le cas des échantillons suivants, on teste un mélange d'une même concentration de fibres et de chènevotte, ce qui permet d'étudier l'impact des particules dans les fibres. Ces mélanges sont testés avec des échantillons de deux épaisseurs de densités différentes.

Désignation	Chanvre-chènevotte
Fabrication	Thermolié
Composition	Fibres de chanvre (40%) + Chènevotte (40%) + Bico (20%)
Épaisseur (<i>mm</i>)	20 - 50
Masse vol. ($kg.m^{-3}$)	$125,6 \pm 0,6 - 56,5 \pm 1,0$



Tableau II.2 – Caractéristiques de la laine de chanvre-chènevotte

Chanvre aiguilleté Le mode d'aiguilletage permet d'arriver à des densités très importantes, comme le montre ce feutre de chanvre. Ce matériau est en revanche caractérisé par une forte hétérogénéité en termes de densité avec des différences de près de 40% entre échantillons.

Désignation	Chanvre aiguilleté
Fabrication	Aiguilletage
Composition	Fibres de chanvre (100%)
Epaisseur (<i>mm</i>)	8
Masse vol. ($kg.m^{-3}$)	$95,3 \pm 18,6$



Tableau II.3 – Caractéristiques du feutre de chanvre aiguilleté

Chanvre-lin Le lin est une fibre de diamètre voisin du chanvre, mais de plus courte longueur ; les deux types de fibre sont combinés au sein de l'échantillon Chanvre-lin.

Désignation	Chanvre lin
Fabrication	Thermolié
Composition	Fibres de chanvre (45%) + Fibres de lin (45%) + Bico (10%)
Epaisseur (<i>mm</i>)	100
Masse vol. ($kg.m^{-3}$)	$31,8 \pm 1,1$



Tableau II.4 – Caractéristiques de la laine de chanvre lin

Lin Le lin a également été testé seul, grâce à trois types d'échantillons : en couche de 50 *mm* traité au feu, en couche de 50 *mm* non traité au feu, et en couche de 100 *mm* non traité au feu.

Désignation	Lin
Fabrication	Thermolié
Composition	Fibres de lin (88%) + Bico (12%)
Epaisseur (<i>mm</i>)	50 - 50 - 100
Masse vol. ($kg.m^{-3}$)	$32,6 \pm 0,6$ - $31,9 \pm 4,1$ - $45,9 \pm 2,6$



Tableau II.5 – Caractéristiques de la laine de lin

Lin aiguilleté Comme dans le cas du chanvre, le lin peut être aiguilleté et atteindre de fortes densités. On constate dans ce cas une bonne homogénéité de la masse volumique (variation de l'ordre de 2,5% seulement) due à une meilleure répartition des fibres lors de la fabrication.

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

Désignation	Lin aiguilleté
Fabrication	Aiguilleté et thermolié
Composition	Fibres de lin (88%) + Bico (12%)
Epaisseur (<i>mm</i>)	8
Masse vol. ($kg.m^{-3}$)	$252,2 \pm 3,3$



Tableau II.6 – Caractéristiques du feutre de lin aiguilleté

Lin tricouche Un matériau constitué de trois couches de différentes densités, à base de fibres de lin, a également pu être testé. Les couches denses extérieures sont appelées “parements” et la couche intérieure est appelée “isolant”.

Désignation	Lin tricouche
Fabrication parement	Aiguilleté et thermolié
Composition parement	Fibres de lin (85%) + Bico (15%)
Epaisseur parement (<i>mm</i>)	5
Masse vol. parement ($kg.m^{-3}$)	$178,5 \pm 2,5$
Fabrication isolant	Thermolié
Composition isolant	Fibres de lin (50%) + Bico (50%)
Epaisseur isolant (<i>mm</i>)	40
Masse vol. isolant ($kg.m^{-3}$)	$78,0 \pm 1,0$
Masse vol. globale ($kg.m^{-3}$)	$90,9 \pm 2,8$



Tableau II.7 – Caractéristiques de la plaque de lin tricouche

Jute Des laines réalisées à partir de jute ont également été caractérisées.

Désignation	Jute
Fabrication	Aiguilleté et thermolié
Composition	Fibres de jute (70%) + Bico (30%)
Epaisseur (<i>mm</i>)	10
Masse vol. ($kg.m^{-3}$)	$159,7 \pm 7,9$



Tableau II.8 – Caractéristiques du feutre de jute

1.2 Masses volumiques de squelette et porosités mesurées

La porosité des laines a été caractérisée via la mesure de leur densité de squelette $\rho_{squelette}$. Les laines étant très poreuses, nous avons utilisé la technique de mesure la plus précise à notre disposition. La densité de squelette a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à azote de

marque Quantachrome [Qua 2009], décrit en Annexe 1.1. Les résultats ont été moyennés sur trois mesures sur une masse de 5 g de matériau, et sont donnés dans le Tableau II.9.

Désignation	Masse volumique de squelette ($kg.m^{-3}$)	Porosité (%)
Chanvre vert	1003 ± 32	97,9 ± 0,1
Chanvre-chènevotte (5 cm)	1089 ± 6	94,8 ± 0,0
Chanvre-chènevotte (2 cm)	1338 ± 6	90,6 ± 0,0
Chanvre aiguilleté	1424 ± 5	93,3 ± 0,0
Chanvre-lin	1073 ± 13	97,0 ± 0,0
Lin (10 cm)	1287 ± 10	96,4 ± 0,0
Lin (5 cm)	1297 ± 14	97,5 ± 0,0
Lin traité feu (5 cm)	1069 ± 6	97,0 ± 0,0
Lin aiguilleté	1522 ± 1	83,4 ± 0,0
Lin tricouche parement	1542 ± 13	88,3 ± 0,1
Lin tricouche isolant	1368 ± 15	94,3 ± 0,0
Lin tricouche	1426 ± 14	93,6 ± 0,1
Jute	1470 ± 4	89,1 ± 0,0

Tableau II.9 – Masse volumique de squelette et porosité des laines étudiées (moyennes et intervalles de confiance sur trois mesures)

Les densités de squelette des laines sont comprises entre 1000 et 1550 $kg.m^{-3}$. Les écarts-types obtenus sur ces mesures sont inférieurs à 3% pour la masse volumique de squelette et inférieurs à 0,1% pour la porosité, ce qui garantit la précision de la mesure.

On voit sur ce tableau que certaines de ces densités sont très proches des valeurs de densité de squelette des fibres données dans la littérature à respectivement 1500, 1540 et 1440 $kg.m^{-3}$ pour le chanvre, le lin et le jute [Horrocks & Anand 2000]. C'est le cas pour le Chanvre aiguilleté, le Lin aiguilleté, le parement du Lin tricouche et le jute.

Dans les autres cas, la densité de squelette est plus faible que la densité des fibres. Pour les échantillons chanvre-chènevotte, la présence de la chènevotte, de densité de squelette inférieure à celle des fibres, explique la différence observée. Pour les autres échantillons (chanvre-lin et lin), il semblerait que les fibres thermofusibles aient un effet plus marqué. Ne connaissant pas la masse volumique de squelette des fibres thermofusibles utilisées, cela n'a pu être vérifié. Toutefois, si on se base sur la masse volumique de squelette des fibres de polyester, soit 1350 $kg.m^{-3}$ d'après [Oldham *et al.* 2011], les valeurs déterminées restent inexplicables.

Pour finir, on note une différence sensible entre les échantillons de lin traités et non traités. Le produit retardateur de flamme utilisé a pour effet de diminuer la densité de squelette, ce qui pourrait être expliqué par le développement d'une porosité fermée suite au traitement.

1.3 Résistivités

Les résistivités des laines ont été caractérisées d'après la norme ISO 9053, sur des échantillons de 10 *cm* de diamètre. La technique et le dispositif de mesure sont présentés en Annexe 1.2. Pour chaque matériau, les mesures ont été réalisées sur les deux faces de trois échantillons. Les moyennes des résistivités sont présentées dans le Tableau II.10.

Désignation	Masse vol. ($kg.m^{-3}$)	Résistivité ($N.m^{-4}.s$)
Chanvre vert	20,8	1030
Chanvre-chênevotte (5 <i>cm</i>)	56,5	3670
Chanvre-chênevotte (2 <i>cm</i>)	125,6	21400
Chanvre aiguilleté	95,3	11900
Chanvre-lin	31,8	2100
Lin (10 <i>cm</i>)	45,9	6690
Lin (5 <i>cm</i>)	32,6	4270
Lin traité feu (5 <i>cm</i>)	31,9	4330
Lin aiguilleté	252,2	322700
Lin tricouche parement	178,5	89400
Lin tricouche isolant	78,0	18000
Lin tricouche	90,9	34500
Jute	159,7	40400

Tableau II.10 – Résistivités des laines étudiées

La résistivité de ces matériaux est très variable, couvrant une gamme allant de 1000 à 320 000 $N.m^{-4}.s$. Les différences entre matériaux sont cohérentes et peuvent être principalement expliquées par les différences de densité, mais aussi par le diamètre des fibres utilisées, et le mode de fabrication des laines. Ces valeurs expérimentales seront comparées à une modélisation dans le Chapitre IV en prenant ces divers facteurs en considération.

1.4 Propriétés acoustiques

Les absorptions acoustiques et indices d'affaiblissement des laines ont été caractérisés en incidence normale avec un tube de Kundt B&K Type 4106. La méthode à trois microphones sans cavité développées par [Iwase *et al.* 1998] et présentée en Annexe 2.1.2 a été utilisée. Pour chaque type de laine, les propriétés ont été évaluées sur trois échantillons. Les résultats sont présentés en Annexe 8. Dans tous les cas, on constate que les propriétés acoustiques sont très proches d'un échantillon à l'autre, ce qui prouve que les matériaux sont particulièrement homogènes à ce niveau.

Une comparaison de ces performances est finalement présentée à la Figure II.1. Cette comparaison n'est pas impartiale, les épaisseurs des matériaux étant différentes, mais donne un

aperçu de la gamme d'absorption et d'isolation des laines.

D'après ces mesures, on constate que des absorptions très élevées peuvent être atteintes pour le lin, le chanvre et les mélanges chanvre-chènevotte et chanvre-lin. Le matériau Lin tricouche semble par ailleurs présenter le meilleur compromis entre épaisseur et absorption acoustique. Ce matériau, pour cette raison, fait l'objet de développements supplémentaires au Chapitre V.

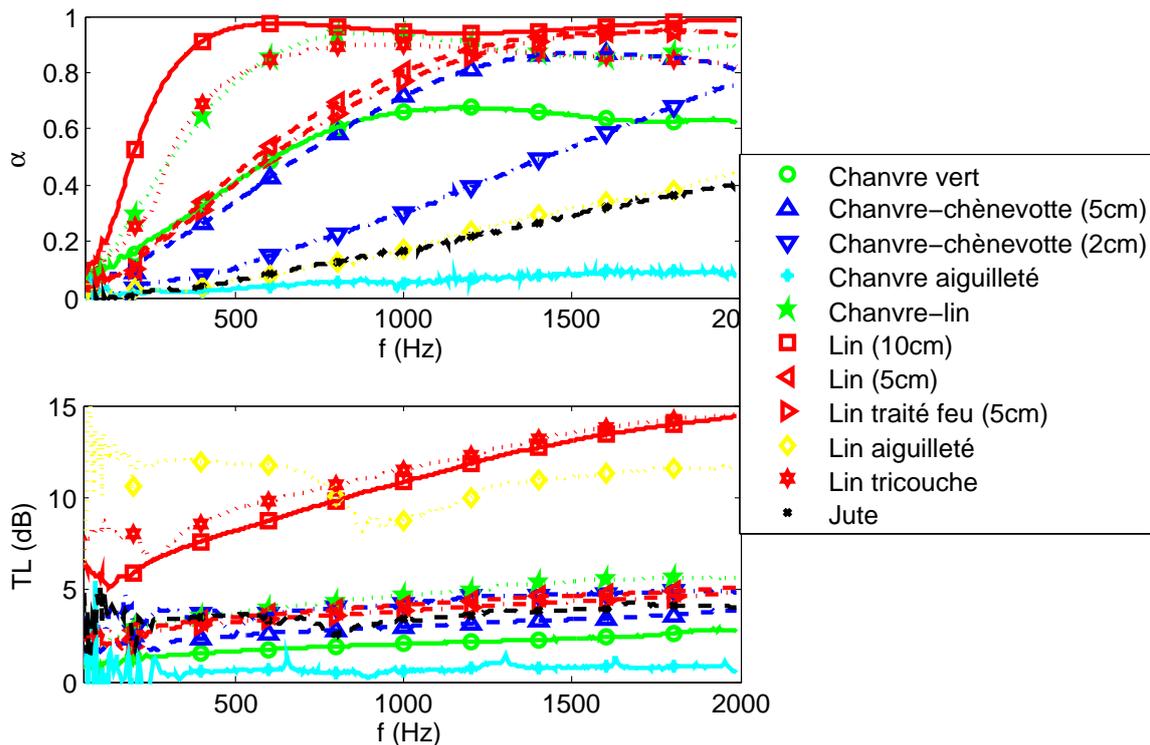


Figure II.1 – Comparaison des absorptions acoustiques et des indices d'affaiblissement moyens des laines testées

En conclusion, on constate que les laines étudiées dans cette thèse offrent une gamme très complète de propriétés acoustiques, à la fois en matière d'absorption et d'indice d'affaiblissement. Ces résultats viennent donc conforter les remarques faites dans le premier chapitre, au sujet de la polyvalence des matériaux d'origine naturelle.

2 Chènevottes

Les chènevottes constituent un matériau granulaire devant son caractère original et innovant aux particules de chanvre. Ces particules sont à la fois poreuses, fortement anisotropes et dotées de dimensions assez largement distribuées, ce qui confère aux chènevottes une microstructure particulièrement complexe.

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

Le comportement acoustique des particules de chanvre n'a jamais été étudié auparavant ; la compréhension de ce comportement est toutefois un enjeu fondamental pour le décryptage des propriétés acoustiques des bétons de chanvre, la chènevotte jouant un rôle clef dans la dissipation au sein de ce matériau.

Un nombre conséquent de chènevottes a donc été sélectionné afin de balayer une gamme de propriétés la plus large possible. Les caractéristiques et propriétés acoustiques de ces chènevottes ont été caractérisées et sont présentées dans cette section. L'analyse de ces résultats expérimentaux nous livre les premières informations sur le comportement acoustique des chènevottes, et sera complétée par les modélisations du Chapitre IV.

2.1 Origine des chènevottes utilisées dans le cadre de la thèse

Les chènevottes peuvent se différencier par un grand nombre de facteurs : elles peuvent être issues de diverses variétés, et être cultivées, récoltées et transformées suivant différentes techniques (cf. Section 2.1.1, Chapitre I). Dans un premier temps, 10 chènevottes provenant de 5 chanvrières différentes ont été étudiées de façon approfondie afin de comprendre leur comportement acoustique ; elles sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

Le comportement acoustique d'autres chènevottes tracées par la FNPC (Fédération Nationale des Producteurs de Chanvre) a été analysé dans le but de caractériser les particules et de discuter de l'influence des paramètres de culture (dosage en azote, densité de semis, variétés utilisées, rouissage . . .), de récolte (date de récolte) et d'environnement (conditions météorologiques) sur leur microstructure. Ces résultats seront présentés dans le Chapitre V.

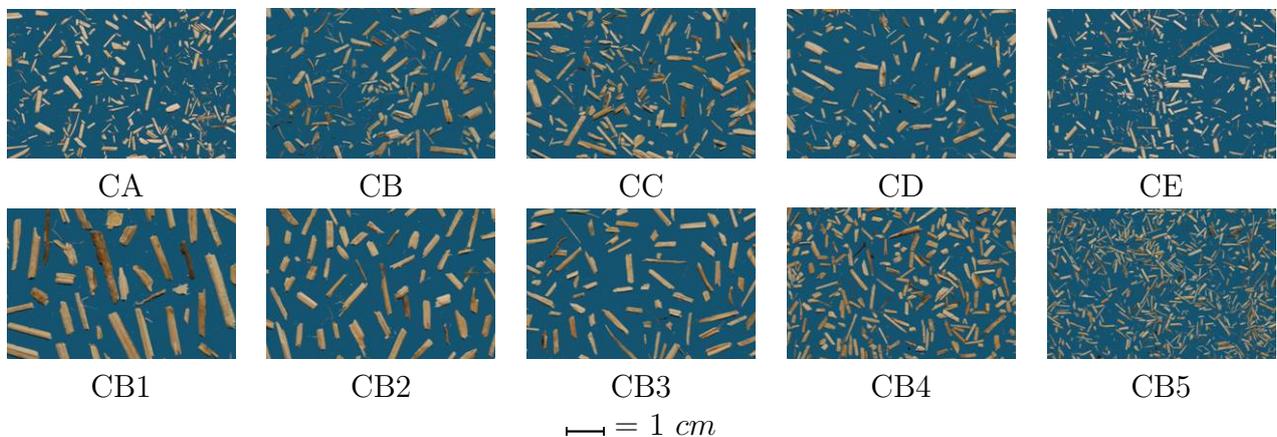


Figure II.2 – Photographies des chènevottes

Chanvre Chanvribat-LCDA (CA) La chènevotte Chanvribat-LCDA est récoltée par La Chanvrière de l'Aube. Les plants y sont récoltés à maturité et transformés par un broyeur à marteaux.

Chanvre BAFA (CB) La chènevotte BAFA est récoltée en Allemagne, où elle est rouie sur pied et transformée à l'aide d'une moissonneuse batteuse. Cette chènevotte est caractérisée par une granulométrie étendue. Cette propriété a été exploitée afin d'étudier l'influence des dimensions des particules sur les propriétés acoustiques. Le chanvre CB a donc été étudié sous sa forme naturelle et sous 5 autres formes tamisées notées CB1 à CB5, obtenues par un procédé standard de tamisage à l'aide de tamis de sections carrées dont les dimensions sont données dans le tableau II.11.

Chanvres	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5
Section du tamis supérieur (<i>mm</i>)	-	4	3,15	2,5	1,6
Section du tamis inférieur (<i>mm</i>)	4	3,15	2,5	1,6	-

Tableau II.11 – Dimension des tamis utilisés pour les chènevottes CB1 à CB5

Chanvre Hemcore (CC) La chènevotte Hemcore a été cultivée en Grande Bretagne, où les plants sont rouis sur champ et transformés par un broyeur à marteaux.

Chanvre Eurochanvre (CD) La chènevotte Eurochanvre est récoltée en Franche-Comté. Nous n'avons pas d'informations vis-à-vis de son rouissage.

Chanvre FNPC (CE) Une des chènevottes tracées par la FNPC a été étudiée en fonction de sa densité : la chènevotte FNPC-F17-50. Elle n'est pas rouie.

Le travail de caractérisation des chènevottes CA, CB et CC est inclus dans le programme de recherche 2C2E PREBAT. Les chènevottes ont été photographiées et sont présentées Figure II.2.

2.2 Granulométries des chènevottes

Comme pour tout autre matériau granulaire, il est essentiel de connaître les distributions granulométriques des particules afin de pouvoir discuter de l'effet de ce paramètre sur les propriétés acoustiques macroscopiques.

Les particules de chanvre sont globalement de forme parallélépipédique. Effectivement, comme le montre la Figure II.3, la forme des particules est particulièrement bien décrite par

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

un parallélépipède, de longueur L , largeur $l \ll L$ et épaisseur E . La longueur des particules correspond pour la plupart d'entre elles à la dimension longitudinale de la plante dont elles sont issues, tandis que leur épaisseur correspond à la dimension radiale de la plante.

Pour ce type de granulat, en toute rigueur, il faudrait réaliser une étude granulométrique d'un volume représentatif de particules de chanvre en trois dimensions. Ceci s'avère difficile avec les outils à notre disposition dans le laboratoire, et les méthodes telles que la tomographie, généralement appliquée sur un faible volume, posent le problème de la représentativité de l'échantillon [Ceyte 2008]. Nous avons donc opté pour l'analyse granulométrique en deux dimensions (Longueur et largeur) par analyse d'images 2D, en se basant sur la méthode initialement développée par [Ceyte 2008] à l'ENTPE.

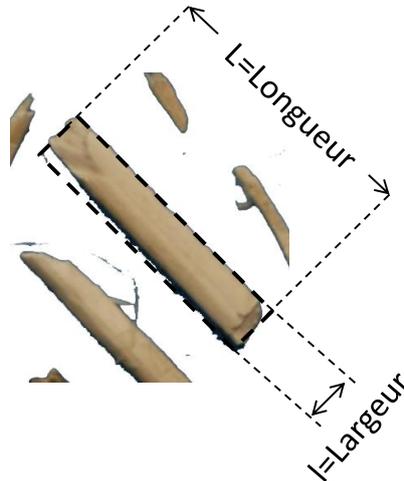


Figure II.3 – Description simplifiée d'une particule de chanvre

Protocole de mesure

- Une masse (fixée par défaut à 5 g de sorte à assurer la représentativité de l'échantillon, les chènevottes étant inconnues) de chaque chènevotte a été prélevée de façon aléatoire, et déversée sur des feuilles de papier carton coloré enduit de colle, de sorte à ce que les particules reposent sur leur plus grande section et qu'il n'y ait pas d'intersection entre les particules (Entre 1 et 4 feuilles ont été utilisées en fonction de la chènevotte).
- Des photographies de ces feuilles ont alors été réalisées avec un appareil reflex numérique Nikon D200 monté sur trépied, dans une direction perpendiculaire aux feuilles et avec une résolution maximale. On obtient des images similaires à celle présentée Figure II.4 (a).
- Les images ont alors été traitées sous Matlab[®] : le fond coloré est retiré, l'image est convertie en noir et blanc (Figure II.4 (b)), les pixels blancs contigus sont alors identifiés

comme appartenant à une même particule. Cela permet d'identifier le nombre de particules par feuille, leur surface et dimensions (longueur et largeur représentées Figure II.4 (c)). L'élanement des particules (rapport longueur sur largeur) est alors évalué.

- Enfin, les données des différentes feuilles sont synthétisées sous forme de courbes granulométriques, les moyennes et écarts types des paramètres morphologiques sont calculés, ainsi que la masse surfacique des chènevottes (rapport entre la masse déversée sur les feuilles et la surface cumulée des particules).

Les limites de cette méthode sont d'une part de ne donner aucune indication quant à l'épaisseur des particules, ce qui pourra être complété grâce aux mesures acoustiques dans le Chapitre IV, et d'autre part un temps de mise en place des particules relativement long.

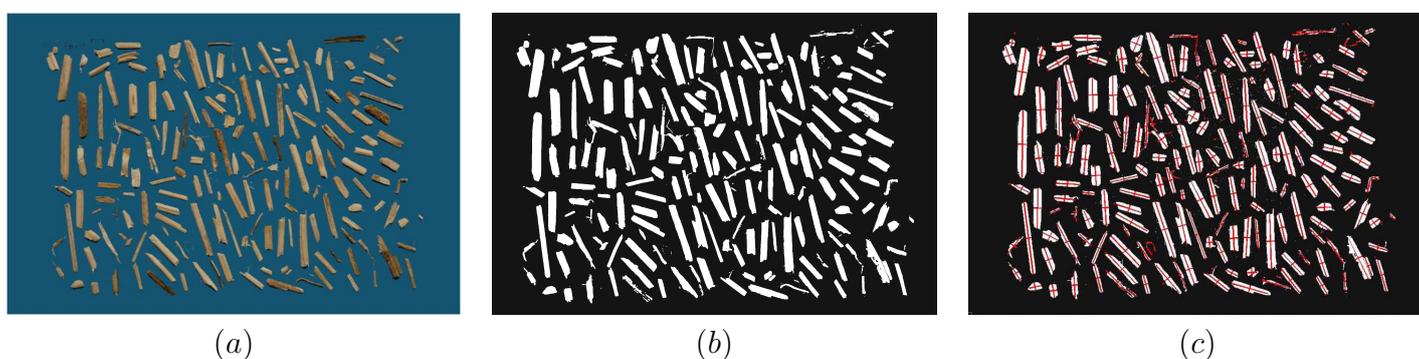


Figure II.4 – Caractérisation de la granulométrie des chènevottes avec image initiale (a), image convertie en noir et blanc (b) et détermination des longueur et largeur de chaque particule (c)

Résultats Les paramètres déterminés sur les chènevottes sont synthétisés dans le Tableau II.12.

Chanvres		CA	CB	CC	CD	CE	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5
Nombre particules		4110	2542	1797	3860	8583	243	720	1268	3080	10928
A (mm^2)	Moy.	6,72	10,21	12,01	6,76	4,17	62,81	31,25	21,55	10,96	3,93
	Ec.-Type	8,90	16,13	14,65	7,99	4,81	60,71	20,54	13,54	6,75	3,23
L (mm)	Moy.	4,61	5,82	6,17	4,81	3,77	15,76	10,93	9,68	6,16	4,14
	Ec.-Type	3,09	4,79	4,07	3,16	2,54	11,51	5,87	5,12	3,09	2,37
l (mm)	Moy.	1,30	1,53	1,71	1,32	1,08	3,44	2,87	2,31	1,89	1,06
	Ec.-Type	0,78	1,02	1,00	0,73	0,63	2,03	1,26	0,92	0,75	0,63
L/l	Moy.	3,97	4,33	3,92	3,93	4,01	4,87	4,24	4,90	3,67	4,50
	Ec.-Type	2,34	2,95	2,09	2,18	3,00	2,89	2,40	3,34	2,43	2,99
ρ_s ($kg.m^{-2}$)		0,181	0,193	0,232	0,192	0,140	0,328	0,222	0,183	0,148	0,117

Tableau II.12 – Tableau de synthèse des mesures de granulométrie réalisées sur les chènevottes, les paramètres déclinés sont l'aire des particules A, leur longueur L, largeur l, élanement L/l et masse surfacique ρ_s . Dans chaque cas les moyennes (Moy.) et les écarts-types (Ec.-Type) sont précisés.

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

Les courbes en pourcentage de surface passante données Figure II.5 permettent d'approfondir la comparaison entre les granulométries des chènevottes.

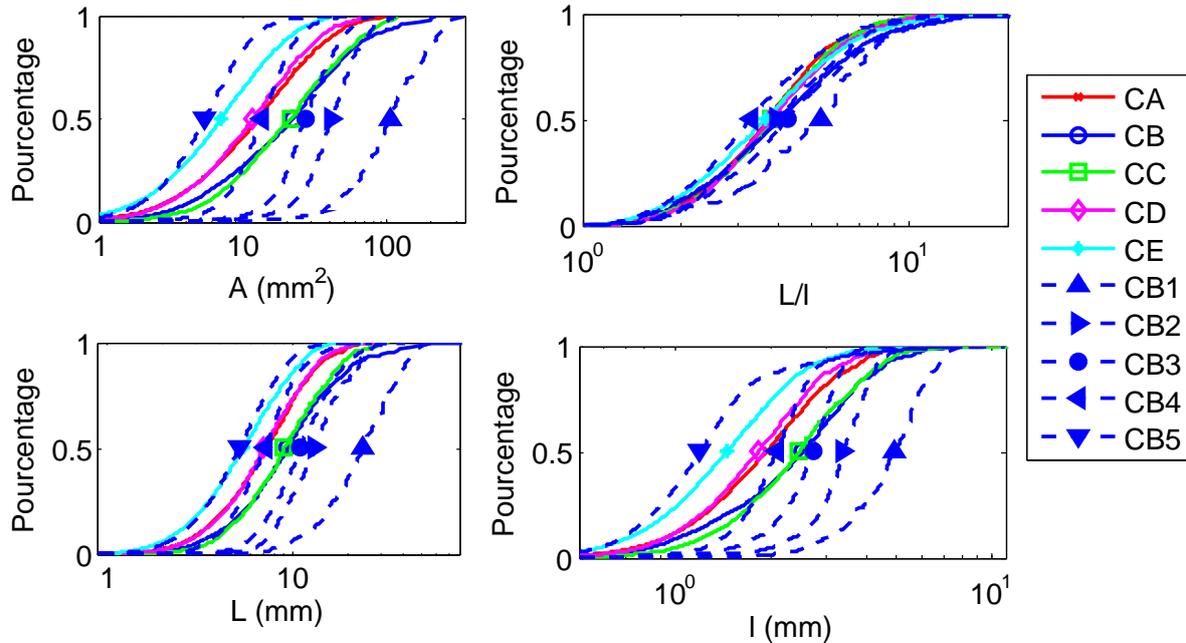


Figure II.5 – Granulométries des chènevottes en pourcentage de surface passante

Il apparaît finalement en observant à la fois le tableau récapitulatif et les graphes que les chènevottes étudiées se distinguent bien en termes d'aires, de longueurs et de largeurs moyennes des particules. Parmi les cinq chènevottes brutes, la chènevotte CE est de loin la plus fine, suivent CA et CD qui ont des granulométries très proches, puis CB et CC également du même ordre de grandeur (CB restant légèrement plus étalée que CC). Les chènevottes tamisées apparaissent quant à elles de façon étagée, balayant largement la gamme de distribution décrite par les chènevottes brutes. En observant les écarts-types des distributions, on remarque globalement que les granulométries dont les dimensions moyennes sont plus grandes, sont aussi celles qui sont les plus étendues.

Une caractéristique de l'élanement L/l est également mise en évidence par nos mesures. Ce paramètre reste particulièrement stable d'une chènevotte à une autre, avec des variations cantonnées à $\pm 10\%$. Ce paramètre peut donc être vu comme une constante morphologique des particules. Quel que soient l'origine et le mode de traitement des chènevottes (coupe des tiges, défibrage) les particules gardent donc une distribution de forme caractéristique, leurs dimensions suivant une loi homothétique.

La masse volumique surfacique des particules varie entre environ 0,1 et 0,3 kg.m^{-3} et paraît

nettement corrélée aux dimensions moyennes des particules. Cela peut se comprendre dans la mesure où les particules les plus grandes sont généralement issues du bas de la tige, où elles sont également plus épaisses. Ce paramètre sera discuté davantage dans le Chapitre IV où il sera mis en relation avec la densité apparente des particules et leur épaisseur moyenne.

Modélisation des distributions Pour finir, les distributions caractérisées par l'expérience précédente ont été confrontées à des modèles de distribution. [Horoshenkov *et al.* 2007] montrent que les distributions log-normales donnent généralement de très bonnes approximations pour les matériaux granulaires. Les superpositions des histogrammes expérimentaux et des lois log-normales correspondantes sont données en Annexe 3.1, et pour illustration, l'exemple de la modélisation de la chènevotte CA est présenté Figure II.6.

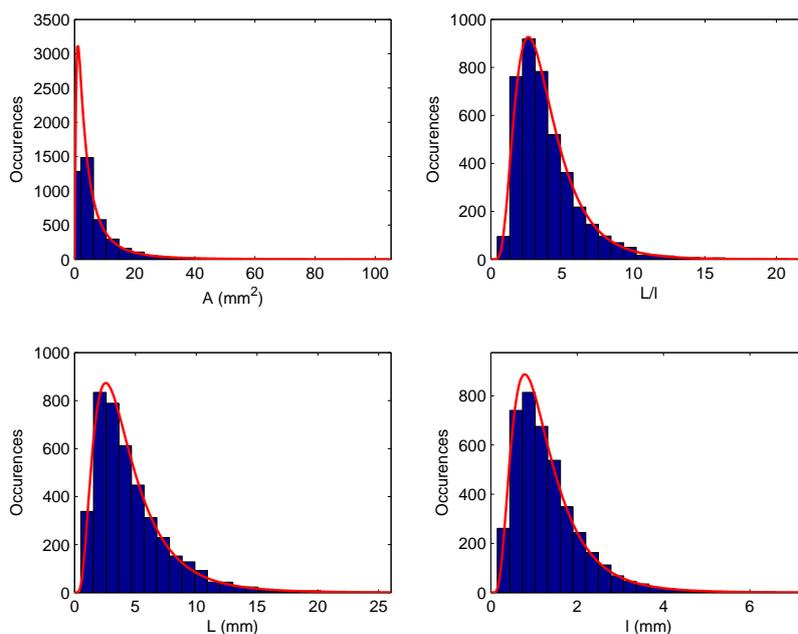


Figure II.6 – Granulométrie de la chènevotte CA (histogramme) approchée par une loi de distribution log-normale.

L'accord entre les granulométries des particules de chanvre et les lois log-normales est très satisfaisant aussi bien en ce qui concerne les longueurs, les largeurs et les élancements des particules pour les cinq chènevottes non tamisées CA à CE. Pour les chènevottes CB1 à CB5, le tamisage éloigne les particules de cette distribution, et restreint cette dernière entre les dimensions imposées par les tamis. Les paramètres des distributions modélisées (moyenne et écart-type du logarithme des grandeurs considérées) sont synthétisés au Tableau II.13.

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

Chanvres		CA	CB	CC	CD	CE	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5
A ($\log(mm^2)$)	Moy.	1,30	1,63	1,92	1,38	0,94	3,14	2,99	2,71	2,14	1,06
	Ec.-Type	1,12	1,18	1,11	1,06	0,985	1,96	1,29	1,10	0,86	0,82
L ($\log(mm)$)	Moy.	1,33	1,52	1,63	1,38	1,13	2,35	2,20	2,11	1,69	1,26
	Ec.-Type	0,63	0,70	0,64	0,63	0,62	1,07	0,70	0,61	0,54	0,57
l ($\log(mm)$)	Moy.	0,10	0,23	0,38	0,14	-0,07	0,93	0,90	0,71	0,55	-0,06
	Ec.-Type	0,58	0,62	0,56	0,53	0,53	0,92	0,66	0,60	0,47	0,48
L/l	Moy.	1,24	1,29	1,24	1,24	1,20	1,42	1,31	1,41	1,14	1,33
	Ec.-Type	0,52	0,59	0,49	0,51	0,58	0,59	0,52	0,59	0,54	0,59

Tableau II.13 – Tableau de synthèse des paramètres des distributions log-normales des chènevottes. Dans chaque cas les moyennes (Moy.) et les écarts-types (Ec.-Type) sont précisés.

Etude de la représentativité des échantillons Comme l’indique le Tableau II.12, les caractérisations de granulométries ont porté sur un nombre important de particules, allant jusqu’à plus de 10 000 pour la chènevotte CB5. Il a donc été décidé d’exploiter cette base de données conséquente afin d’étudier la représentativité des chènevottes étudiées.

Ainsi, l’analyse granulométrique a été effectuée pour des groupes multiples de cent particules tirées de façon aléatoire parmi les particules caractérisées. Pour chacun des groupes, l’erreur a été évaluée à l’aide de la somme normalisée des carrés des écarts par rapport à la granulométrie complète. Il est ainsi possible d’étudier la convergence de la granulométrie en termes de longueur, largeur, élancement et aire en fonction du nombre de particules considérées. Les résultats sont présentés en Annexe 3.2 et l’exemple de la chènevotte CB5, avec laquelle le plus grand nombre de particules a été caractérisé, est donné à la Figure II.7.

Les courbes montrent que l’erreur moyenne par rapport aux distributions de largeur, longueur, aire ou élancement, est systématiquement en dessous de 5% pour des échantillons de plus de 1000 particules. Ces résultats sont en accord avec [Ceyte 2008], selon qui 400 à 1800 particules peuvent être nécessaires afin d’assurer la représentativité à 5% des distributions granulométriques (cf. Section 2.2.1 du Chapitre I). De plus, on constate au niveau des courbes de convergence, que pour la majorité des chènevottes, un plus grand nombre de particules est nécessaire afin qu’un échantillon soit représentatif en terme de largeur (ce n’est pas le cas pour la chènevotte CA).

2.3 Gamme de masses volumiques apparentes testées

Les chènevottes retenues dans le cadre de cette thèse ont été testées dans une gamme de densités telle que les particules ne soient pas comprimées et que leur arrangement soit “naturel” (arrangement obtenu par déversement des particules et non en plaçant ces dernières une à une).

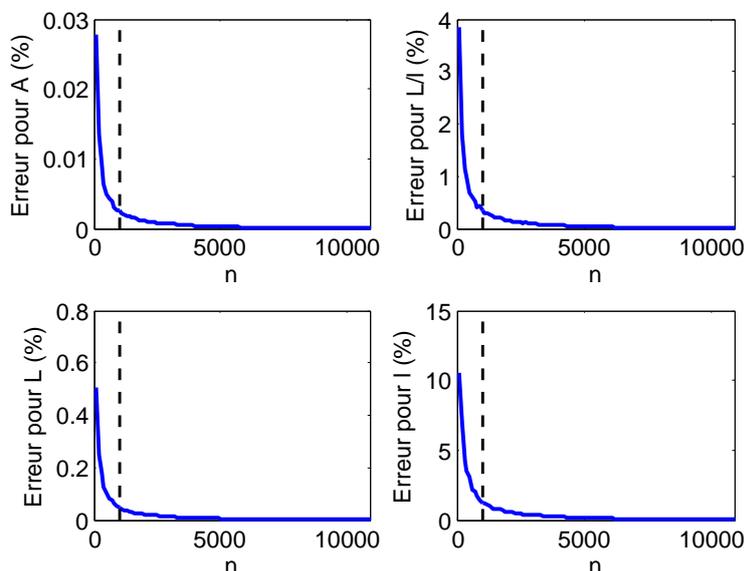


Figure II.7 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CB5, les pointillés correspondent à un échantillon de 1000 particules

Les chènevottes ont été caractérisées en fonction de leur masse volumique apparente par palier de $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ entre leur masse volumique minimale ρ_{min} , obtenue pour un empilement lâche dans le porte-échantillon, et leur masse volumique maximale ρ_{max} , obtenue par réarrangement des particules sous vibration jusqu'à stabilisation. Ces masses volumiques sont données dans le Tableau II.14.

Chanvres	CA	CB	CC	CD	CE	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5
$\rho_{min} \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$	100	100	100	100	100	80	90	90	100	110
$\rho_{max} \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$	150	140	160	140	140	120	130	130	140	150

Tableau II.14 – Gamme de masses volumiques testée sur chaque chènevotte

On constate d'après ces résultats, et en se focalisant sur les chènevottes CB1 à CB5, que les particules de plus petites dimensions atteignent plus facilement des densités élevées. Ces particules s'arrangent plus facilement, et, comme on le verra par la suite, elles sont dotées d'une densité apparente plus importante.

2.4 Masses volumiques de squelette et porosités

La porosité des chènevottes a également été caractérisée grâce au pycnomètre à azote. Les mesures ont été répétées à cinq reprises sur des échantillons d'une masse supérieure à 10 g , de

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

sorte à obtenir des mesures aussi représentatives que possible.

Les résultats moyennés et les écarts-types sont présentés dans le Tableau II.15.

Chanvres	CA	CB	CC	CD	CE	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5
$\rho_{squelette} (kg.m^{-3})$	964	1213	1104	1118	803	1211	1244	1246	1234	1260
Ecart-type ($kg.m^{-3}$)	2	10	7	6	3	16	8	12	11	11

Tableau II.15 – Masses volumiques de squelette des chènevottes

Pour les chènevottes testées, la masse volumique de squelette varie de 800 à plus de 1200 $kg.m^{-3}$. On note que pour la chènevotte CB, la densité de squelette varie peu en fonction de la granulométrie des particules. Ce paramètre semble donc uniquement dépendre des paramètres de culture, de récolte et d'environnement du chanvre. En particulier, il a été observé que les densités de squelette sont très sensibles au rouissage de la plante, qui consiste à laisser les tiges de chanvre subir les précipitations et l'ensoleillement pendant quelques semaines de sorte à faciliter leur défibrage. Il en résulte un lessivage des pectines contenues dans la plante et une perte de matière, ce qui rend le volume du squelette plus faible et la densité de squelette plus importante. Ces effets sont bien détectés par les mesures comme le montrent ces résultats, puisque les chènevottes rouies CB, CB1 à CB5 et CC présentent des densités de squelette plus importantes que les chènevottes non rouies CA et CE. En ce qui concerne la chènevotte CD, nous n'avons aucune information par rapport au rouissage.

Connaissant la masse volumique de squelette $\rho_{squelette}$, il est possible de calculer la porosité totale de la chènevotte en fonction de la masse volumique apparente ρ_v de cette dernière grâce à l'Equation I.10.

Les résultats sont présentés en fonction de la densité apparente des chènevottes sur la Figure II.8. On remarque que leur porosité est particulièrement importante, globalement comprise entre 80 et 95%.

2.5 Résistivités

La résistivité des chènevottes a été caractérisée dans un premier temps suivant le protocole de la norme ISO9053 et a été étudiée sous différents angles :

- pour une chènevotte de masse volumique fixée, différentes mesures de résistivité ont été réalisées, afin de quantifier l'influence de la position des particules, de leur orientation, et de l'épaisseur de l'échantillon,
- ensuite, pour une chènevotte donnée, l'influence de la densité de l'échantillon a été observée,

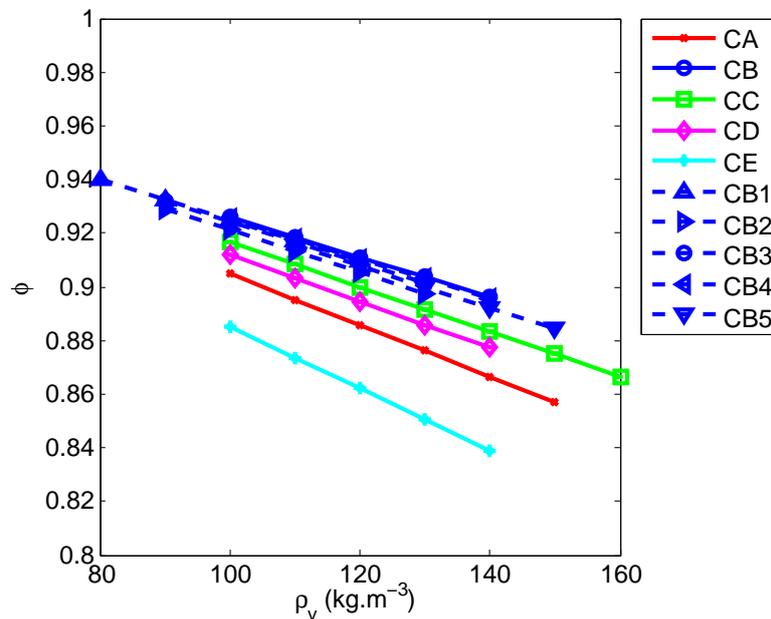


Figure II.8 – Porosité des chènevottes en fonction de leur masse volumique apparente

- enfin, les résistivités de chènevottes de différentes origines et granulométries ont été évaluées.

Influence de la position des particules Il a été constaté lors de mesures préliminaires, que la façon de verser les particules et de les secouer une fois en place dans le porte échantillon avait une influence non négligeable sur les résultats obtenus. Quatre protocoles différents ont donc été testés et comparés sur une chènevotte CA de masse volumique 130 kg.m^{-3} (cette configuration présente des caractéristiques intermédiaires vis-à-vis des autres échantillons) :

- Protocole P1 : les particules sont séparées les unes des autres par vibration sur une plaque horizontale, après quoi elles sont versées dans le porte échantillon du banc de perméabilité en glissant sur la plaque inclinée,
- Protocole P2 : les particules attrapées grappe par grappe sont relâchées dans le récipient,
- Protocole P3 : les particules sont placées dans le récipient selon le protocole P2, puis réarrangées par 3 rotations du récipient autour d'un axe horizontal,
- Protocole P4 : les particules sont placées dans un porte-échantillon grillagé en forme de double-berceau de sorte à placer les particules dans une direction parallèle au flux (L'arrangement "naturel" obtenu dans les protocoles 1 à 3 place les particules dans une direction perpendiculaire au flux). La hauteur de l'ensemble est alors ajustée pour chaque protocole par vibrations horizontales.

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

Pour ces mesures, afin de limiter l'effet de la distribution radiale de la porosité des échantillons sur leur résistivité, des porte-échantillons d'un diamètre de l'ordre de 10 *cm* ont été utilisés. Pour les protocoles P1 à P3, la chènevotte a été déposée dans un cylindre à fond grillagé de 93 *mm* de diamètre (Figure II.9 (a)) et dans le cas du protocole P4, le double-berceau (Figure II.9 (b)) a un diamètre de 10 *cm*.

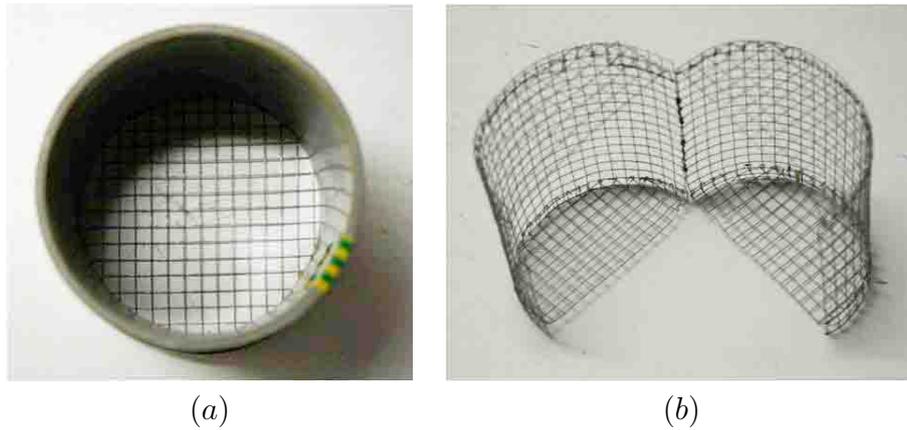


Figure II.9 – Porte-échantillon (a) et double-berceau (b) utilisés pour les mesures de résistivité sur les chènevottes

Enfin, une épaisseur de 10 *cm* a été choisie afin de réduire l'incertitude de mesure (inversement proportionnelle au différentiel de pression mesuré). Dans chaque cas, trois échantillons ont été testés, les résultats obtenus ont été moyennés et sont présentés dans le Tableau II.16.

Protocole	Résistivité ($N.m^{-4}.s$)
P1	3300 ± 100
P2	2733 ± 50
P3	2667 ± 150
P4	1367 ± 50

Tableau II.16 – Résistivité des chènevottes en fonction de la position des particules

Tout d'abord, les résultats montrent un écart du protocole P1 par rapport aux protocoles P2 à P3, qui est dû à une répartition moins homogène de la chènevotte dans les cas P2 et P3, et qui se traduit par des zones où la chènevotte est moins dense, ce qui fait globalement chuter la résistivité.

De plus, le protocole P4 présente des résultats bien différents, les résistivités mesurées étant plus de deux fois plus faibles que dans les autres cas. L'écoulement est effectivement moins résistif lorsque les particules sont orientées dans le sens de l'écoulement, par analogie avec les matériaux fibreux [Tarnow 1996a].

Le protocole P1 a donc été choisi pour les mesures suivantes, étant plus pratique à réaliser, donnant des répartitions homogènes des particules, et étant plus proche du mode de fabrication du béton de chanvre.

Influence de la masse volumique de la chènevotte L'influence de la masse volumique a été observée sur l'ensemble des chènevottes pour leur gamme de masses volumiques respective précisée Tableau II.14. Pour ce faire, une seconde technique de caractérisation, basée sur une estimation basses-fréquences à partir des propriétés acoustiques, a été utilisée et est présentée en Annexe 1.2. Cette méthode a été comparée avec les mesures directes suivant la norme ISO9053, comme cela est illustré Figure II.10 (a).

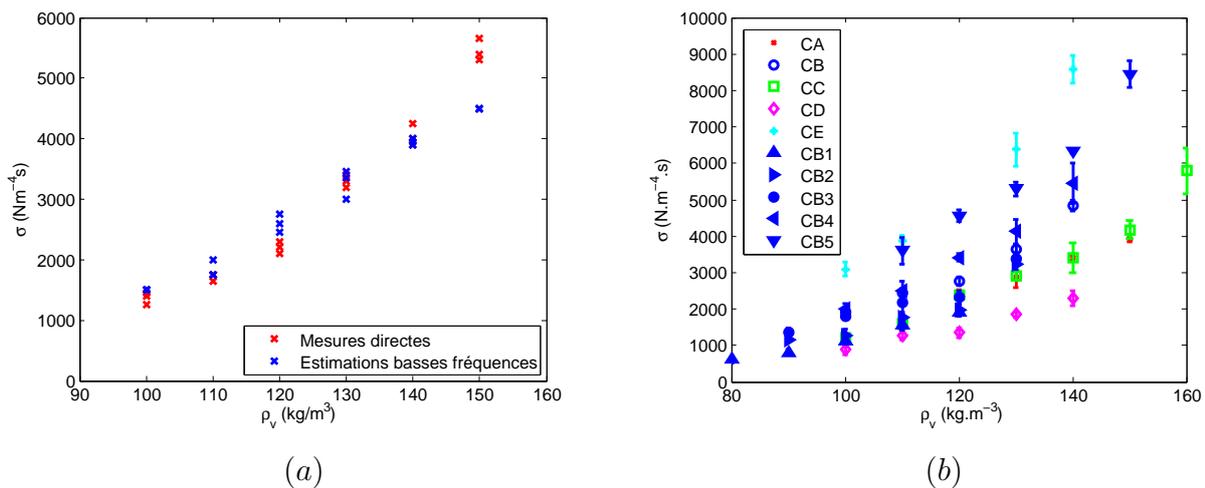


Figure II.10 – Comparaison des mesures directes de résistivité de la chènevotte CA et des estimations basses fréquences (a) et résistivités des chènevottes en fonction de leur masse volumique apparente (b)

On constate que les estimations sont tout à fait cohérentes par rapport aux mesures directes. De plus, l'estimation acoustique présente l'avantage de déterminer la résistivité et les propriétés acoustiques dans la même configuration de chènevotte, ce qui permet de gagner de la précision sur les modélisations.

L'évolution de la résistivité pour l'ensemble des chènevottes est donnée Figure II.10 (b). Les valeurs de résistivité sont comprises entre 500 et 9000 $N.m^{-4}.s$, ce qui représente une large gamme de variation. L'expérience est de plus caractérisée par une bonne reproductibilité puisque les écarts-types sont dans tous les cas inférieurs à 10%. Enfin, on note que la résistivité des chènevottes augmente avec la masse volumique en suivant une évolution non-linéaire.

Influence de la granulométrie et origine de la chènevotte Les influences de la granulométrie et de l'origine des chènevottes peuvent également être discutées sur la base des résultats présentés Figure II.10.

On constate des écarts importants entre les résistivités des différentes chènevottes. Il est possible d'interpréter ces différences en fonction des dimensions caractéristiques des granulats de chanvre données dans le Tableau II.12. Le fait que la résistivité soit plus importante dans le cas de la chènevotte CE s'explique par exemple par les plus faibles dimensions de ses particules. De même, pour les chènevottes tamisées CB1 à CB5, on constate que la résistivité est d'autant plus importante que les particules sont fines.

D'autres paramètres interviennent, notamment la densité apparente des particules qui a un effet direct sur la porosité interparticule. Ce paramètre peut expliquer les différences de résistivité existant entre chènevottes de granulométries proches telles que les chènevottes CA et CD.

L'analyse de l'évolution de la résistivité de la chènevotte sera approfondie grâce à une modélisation présentée dans le Chapitre IV.

2.6 Tortuosités

La tortuosité s'avère être un paramètre clé pour la chènevotte, ce matériau étant constitué de granulats particulièrement anisotropes. Sa caractérisation est toutefois moins accessible que celle de la porosité ou de la résistivité, reposant généralement sur l'utilisation d'ultrasons [Allard & Atalla 2009]. N'étant pas équipé de moyen de caractérisation directe de la tortuosité à l'ENTPE, nous avons toutefois eu la chance d'utiliser les moyens expérimentaux de l'université de Bradford.

Les tortuosités des chènevottes ont donc été caractérisées à l'aide de la méthode de temps de vol décrite en Annexe 1.3. Les mesures ont été effectuées dans les mêmes conditions que pour les propriétés acoustiques, dans un porte-échantillon cylindrique de 10 *cm* de diamètre, et avec une hauteur de 5 *cm*. Les moyennes et écarts-types obtenus pour trois répétitions de ces mesures sont présentés Figure II.11.

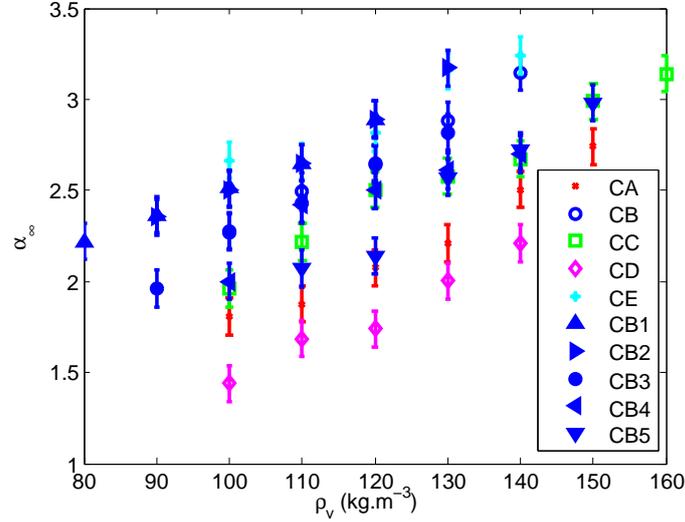


Figure II.11 – Tortuosité des chènevottes en fonction de leur masse volumique apparente

Les tortuosités sont comprises entre 1 et 3,5, et sont croissantes en fonction de la densité. Ces valeurs sont très importantes par rapport aux matériaux usuels (laines minérales, granulats sphériques) dont la tortuosité dépasse rarement 1,5 [Boutin & Geindreau 2008]. De telles valeurs de tortuosité ont toutefois déjà été observées pour des granulats parallélépipédiques par [Comiti & Renaud 1988] et s’expliquent par la forme des particules, et leur orientation face au flux acoustique, rendant le cheminement poreux très sinueux.

2.7 Propriétés acoustiques

Les propriétés acoustiques des 10 chènevottes ont enfin été caractérisées. Etant donné la dimension des particules et leur anisotropie, des expériences préliminaires ont été réalisées afin d’assurer la précision et la représentativité des résultats. La dimension du tube de Kundt, la méthode de caractérisation, la disposition de la chènevotte, son épaisseur optimale, et sa teneur en eau, sont des critères qui s’avèrent fondamentaux pour la chènevotte, et qui ont pu être pris en considération grâce à une série d’expériences présentées en Annexe 6.

Les mesures ont finalement été effectuées grâce au tube de Kundt de 10 *cm* de diamètre, tenu verticalement, et avec la méthode à trois microphones sans cavité [Iwase *et al.* 1998]. L’épaisseur testée est de 5 *cm*. Les résultats sont présentés dans cette section sous deux axes d’observation, en fonction de la densité apparente pour une même chènevotte, puis en fonction de la chènevotte pour une densité apparente fixée.

2.7.1 En fonction de la masse volumique apparente des chènevottes

Les propriétés acoustiques, en absorption et transmission, sont présentées sur les Figures C.6 à C.15 en Annexe 6. La Figure II.12 est donnée ci-dessous pour la chènevotte CA à titre d'exemple. Sur ces figures, les propriétés sont représentées sous forme des moyennes et écarts-types obtenus pour chaque configuration, les mesures ayant été répétées à trois reprises.

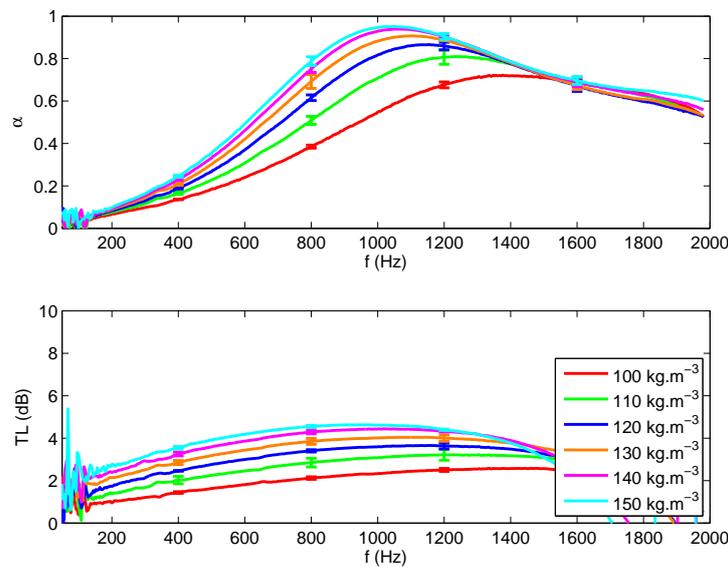


Figure II.12 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CA en fonction de sa masse volumique apparente

Au niveau de l'absorption acoustique des chènevottes, le coefficient d'absorption acoustique α est caractérisé pour l'ensemble des échantillons par l'existence d'un seul pic sur la gamme de fréquences étudiée. Ce pic d'absorption est situé de 800 à 1200 Hz et atteint des valeurs comprises entre 0,6 et 1. Aux basses fréquences, l'absorption tend vers 0, car la longueur d'onde est alors très grande devant les dimensions caractéristiques de l'échantillon. Autour de 2000 Hz , les courbes forment une sorte de plateau dont les valeurs vont de 0,4 à 0,8. On peut s'attendre à ce que ce plateau corresponde à un creux entre les pics successifs d'absorption.

On se rend compte que l'absorption acoustique est fortement impactée par la densité apparente des chènevottes. Des changements apparaissent essentiellement aux fréquences localisées avant le pic d'absorption. On voit que dans cette gamme fréquentielle, l'absorption augmente progressivement avec la densité apparente, et que le pic d'absorption se translate vers les basses fréquences. Au-delà du pic, les courbes semblent converger.

Cette amplification de l'absorption est due à une modification de l'arrangement des parti-

cules. En densifiant la chènevotte, les particules se resserrent, entraînant alors une diminution de la porosité interparticule et de la taille des pores interparticules ainsi qu'une augmentation de la résistivité et de la tortuosité du matériau. Or, la tortuosité a un effet particulièrement marqué sur la position des pics d'absorption.

Concernant l'indice d'affaiblissement acoustique TL , on remarque que les valeurs sont relativement faibles, et n'excèdent pas 7 dB aux fréquences considérées. Cela s'explique par les fortes perméabilités à l'air des chènevottes, et la faible épaisseur testée lors des mesures. Dans le bâtiment, les épaisseurs couramment utilisées sont de l'ordre de 20 à 30 cm . De plus, si l'on utilise du béton enduit sur chaque face au lieu de la chènevotte, la perméabilité devient alors beaucoup plus faible, ce qui permet d'atteindre des valeurs d'indice d'affaiblissement suffisantes. Cela sera discuté sur la base d'échantillons multicouches caractérisés pendant cette thèse et présentés au Chapitre V.

Avec l'augmentation de la densité apparente, l'indice d'affaiblissement acoustique est systématiquement amélioré sur toutes les fréquences. Cela est dû à une augmentation de la résistivité causée par le rapprochement des particules. L'allure quant à elle reste globalement la même quelle que soit la densité apparente.

2.7.2 En fonction de l'origine de la chènevotte et de sa granulométrie

Les courbes d'absorption et d'indice d'affaiblissement sont présentées de sorte à observer l'effet de la chènevotte à densité fixe sur les Figures C.16 à C.24 en Annexe 6. Les résultats pour la masse volumique de 120 kg.m^{-3} sont donnés Figure II.13 afin d'illustrer nos analyses.

Plusieurs points intéressants sont mis en évidence par ces courbes. En premier lieu, on constate que l'origine et la granulométrie de la chènevotte ont un effet aussi important que la densité apparente. De plus, les propriétés acoustiques de la chènevotte semblent être sensibles sur toute la gamme de fréquences ; en particulier, les courbes d'absorption ne convergent pas à hautes fréquences.

Ces différences proviennent des spécificités des chènevottes, c'est à dire de leur granulométrie, leur densité de squelette, leur densité apparente de particules et leur porosité intraparticule. Le problème est que tous ces paramètres varient d'une chènevotte à l'autre si bien qu'il est difficile d'interpréter l'effet intrinsèque de chacun sur les propriétés acoustiques. Malgré tout, les chènevottes tamisées à partir de la chènevotte CB permettent de s'affranchir de l'effet de la densité de squelette, cette dernière étant constante sur les échantillons CB1 à CB5 (Voir Section 2.4).

On constate que l'absorption de ces chènevottes tamisées devient plus importante sur toute

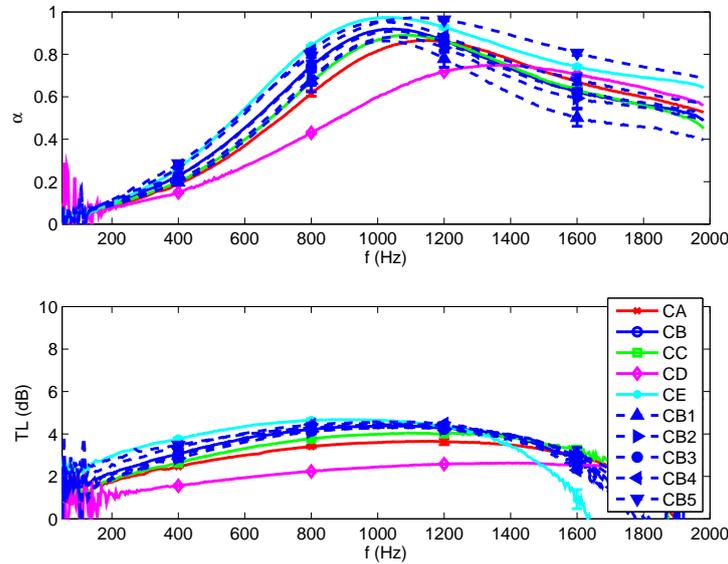


Figure II.13 – Propriétés acoustiques des chènevottes pour $\rho_v = 120kg.m^{-3}$

la gamme de fréquences avec de plus fines particules. Ces différences s'expliquent par une augmentation de la résistivité avec les particules fines. La position du pic d'absorption reste globalement la même, car l'augmentation de résistivité est compensée par la variation des autres paramètres, et en particulier par la diminution de la tortuosité.

Au niveau de l'indice d'affaiblissement, les chènevottes tamisées sont caractérisées par les mêmes performances. De même que pour la position du pic d'absorption, il semble que l'augmentation de résistivité liée à la dimension des particules est complètement compensée par la variation des autres paramètres. Ce point sera analysé lors de la modélisation dans le Chapitre IV.

Si on considère l'ensemble des chènevottes, les performances les plus extrêmes sont obtenues par les chènevottes CD et CE. CE est caractérisée à la fois par la meilleure absorption et le meilleur indice d'affaiblissement, ce qui s'explique principalement par sa fine granulométrie. Les performances moins intéressantes de CD sont, elles, principalement dues à sa faible résistivité.

3 Liants

Afin d'explorer les propriétés acoustiques d'une large gamme de bétons de chanvre, 5 liants de natures différentes ont été sélectionnés. Leurs compositions et leurs caractéristiques sont présentées dans cette section.

3.1 Liants utilisés dans le cadre de la thèse

Chaux Tradical® PF70 (LA) Le liant LA est un mélange de 75% de chaux aérienne, de 15% de chaux hydraulique et de 10% de chaux pouzzolanique.

Chaux Tradical® PF80M (LB) Ce liant LB est composé à 65% de liant Tradical PF80 (ce liant étant lui même constitué de 80% de chaux aérienne et de 15% de liants hydrauliques), et de 35% de charges minérales (incuits de calcaire avec une granulométrie étagée).

Ciment Schwenk® (LC) Ce liant LC est un ciment de Portland ne contenant pas d'aluminate tricalcique C_3A et très peu d'oxyde d'alumine $A = Al_2O_3$.

Chaux Tradical® H98 (LD) Le liant LD est une chaux aérienne très pure (95%).

Chaux Saint-Astier® NHL 3.5 (LE) Enfin, le liant LE est une chaux naturelle hydraulique d'indice d'hydraulicité 0,35.

Le travail de caractérisation de ces liants est inclus dans le programme de recherche 2C2E PREBAT.

3.2 Echantillons de liant pur fabriqués

Il est possible de caractériser les propriétés des poudres de liant, toutefois, il est plus intéressant de tester directement les pâtes de liant prises après réaction avec l'eau. Effectivement, au sein du béton de chanvre, le liant, s'il a correctement fait sa prise, devrait avoir des caractéristiques plus proches des pâtes de liant que des poudres. Les paramètres caractérisés sur les pâtes de liant pourront donc, dans la phase de modélisation, aider à comprendre les propriétés des bétons de chanvre.

En réalité, la prise du liant peut être considérablement altérée par la chènevotte au sein du béton de chanvre. Il a été montré par [Diquélou 2012] qu'une interaction chimique a lieu entre les extractibles dans l'eau des particules et le liant, et a pour conséquence de retarder la prise, voire de l'empêcher à proximité des particules.

Des éprouvettes de liant pur ont été réalisées à partir des 5 poudres, en suivant les concentrations données Tableau II.17. Ces concentrations notées C sont exprimées en $kg.m^{-3}$ et correspondent au rapport de la masse de constituant introduit dans la gâchée sur le volume de matériau fabriqué. Trois éprouvettes cylindriques, d'un diamètre de 46 mm et d'une hauteur de 50 mm ont ainsi été fabriquées avec chacun des liants.

Code	C_{liant}^0 ($kg.m^{-3}$)	C_{eau} ($kg.m^{-3}$)	ρ_{totale} ($kg.m^{-3}$)
LA	867	566	1432
LB	1247	502	1749
LC	1609	517	2126
LD	710	742	1452
LE	1092	597	1689

Tableau II.17 – Concentrations utilisées pour la fabrication des liants (C_{liant}^0 et C_{eau} correspondent respectivement aux concentrations en poudre de liant et en eau, ρ_{totale} correspond à la masse volumique des échantillons juste après fabrication)

Ce tableau montre que chacun des liants a été réalisé avec des quantités d'eau différentes. En effet, cette quantité a dû être ajustée afin d'obtenir une consistance similaire d'un liant à un autre. Des photos des éprouvettes sont présentées Figure II.14. On constate sur ces images prises une semaine après fabrication (conservation à $T=20^\circ C$ et $HR=50\%$), que certains échantillons, notamment le liant LD, présentent un retrait au niveau du diamètre de plus d'un millimètre. Leur cinétique de séchage a été observée et est présentée en Annexe 4.

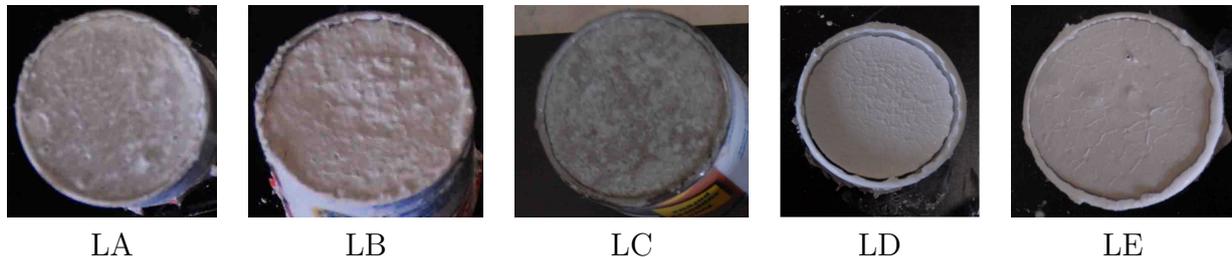


Figure II.14 – Photographie des échantillons de liant une semaine après fabrication

3.3 Masses volumiques de squelette et porosités

Les densités de squelette des poudres de liants $\rho_{grains\ liant}$ et des échantillons stabilisés $\rho_{squelette\ liant}$ ont été caractérisées et sont données avec la porosité des liants $\phi_{intra\ liant}$ dans le Tableau II.18.

On constate ici que les masses volumiques des grains de liant sont très proches ($\pm 10\%$), à l'exception de celle du liant LC supérieure aux autres. De même, les masses volumiques des squelettes des bétons stabilisés sont toutes très proches. Des différences sont néanmoins visibles au niveau des masses volumiques apparentes des liants, et par conséquent au niveau de leurs porosités. Les valeurs extrêmes sont obtenues par le liant LC qui est le moins poreux et le plus dense, et le liant LD qui est le plus poreux et léger.

Code	$\rho_{stabilise}$ ($kg.m^{-3}$)	$\rho_{grains\ liant}$ ($kg.m^{-3}$)	$\rho_{squelette\ liant}$ ($kg.m^{-3}$)	$\phi_{intra\ liant}$ (%)
LA	1050	2730	2250	54
LB	1300	2670	2460	47
LC	1910	3250	2580	26
LD	970	2420	2380	59
LE	1260	2710	2480	49

Tableau II.18 – Masses volumiques de squelette et porosités des liants

3.4 Résistivités

Les liants sont des matériaux très peu perméables à l'air. Des mesures ont été réalisées afin de déterminer les résistivités des échantillons mais n'ont pas permis d'obtenir des résultats fiables. Lorsqu'un matériau aussi imperméable est testé sur le banc de perméabilité, le débit qui passe en périphérie de l'échantillon devient prépondérant. De même, l'estimation basses fréquences à partir des propriétés acoustiques n'a pu donner de résultat précis. Toutefois, l'ordre de grandeur des résistivités rencontré lors de ces caractérisations dépasse $10^7 N.m^{-4}.s$. Des estimations plus précises seront données dans la suite de la thèse, par inversion des modèles acoustiques.

3.5 Propriétés acoustiques

Les échantillons de liant pur réalisés à partir des 5 poudres de liant utilisées ont été testés afin de savoir quel était le comportement de ces matériaux vis à vis des ondes acoustiques. Les absorptions acoustiques et indices d'affaiblissement ont été caractérisés avec le tube de Kundt de 46 mm de diamètre. Dans le cas du liant, utiliser un tube de plus petit diamètre ne pose effectivement pas de problème car la dimension des hétérogénéités est beaucoup plus faible que celle des particules de chanvre. Ces mesures ont été réalisées pour chaque liant sur chacune des faces des trois échantillons de 5 cm d'épaisseur. Les résultats sont donnés Figure II.15.

Comme on s'en rend compte sur le premier graphe, ces matériaux sont complètement réfléchissants, le coefficient d'absorption acoustique ne dépassant pas 0,1 sur la gamme de fréquences allant de 200 à 4300 Hz. De plus, tous les liants sont caractérisés par des valeurs d'absorption similaires. Ce comportement n'est pas étonnant. En effet, bien que les pâtes de liant soient poreuses, avec une porosité pouvant atteindre 60 %, la taille des pores de l'ordre de 1 μm reste beaucoup trop faible pour que les ondes acoustiques puissent s'y dissiper.

Des mesures réalisées dans [Glé 2009] avaient mis en évidence une absorption légèrement supérieure dans le cas du liant LA, avec des coefficients d'absorption de l'ordre de 0,1 à 2000 Hz. Cette différence est due au fait que les échantillons testés dans [Glé 2009] étaient caractérisés

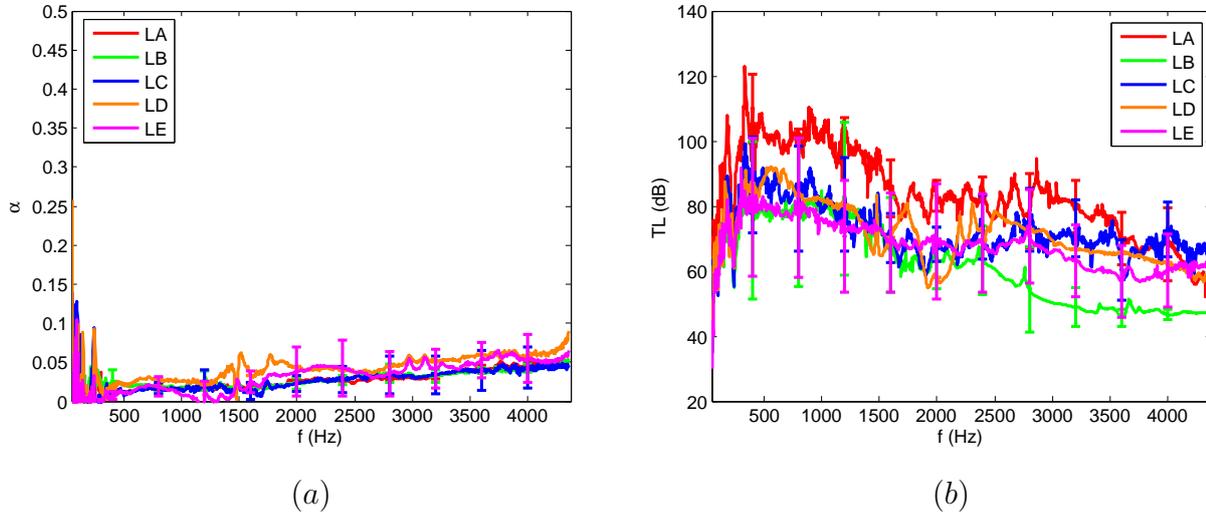


Figure II.15 – Absorptions acoustiques mesurées sur les échantillons de liant stabilisés

par une porosité plus importante.

Etant donné ce comportement réfléchissant et l'importante densité apparente des liants, leur indice d'affaiblissement est particulièrement élevé par rapport à celui des chènevottes pour une même épaisseur. On voit effectivement que les valeurs moyennes caractérisées oscillent entre 60 et 100 *dB* pour une épaisseur de seulement 5 *cm* de matériau.

Des écarts significatifs peuvent être observés entre les échantillons d'un même liant. Pour des matériaux aussi imperméables, il est difficile d'assurer une parfaite étanchéité en périphérie des échantillons, et des fuites peuvent alors entraîner une chute de l'indice d'affaiblissement mesuré. Les mesures présentées pour ces matériaux doivent donc être interprétées avec précaution.

4 Bétons de chanvre

4.1 Bétons de chanvre réalisés dans le cadre de cette thèse

Pendant la thèse, différentes formulations de béton de chanvre ont été réalisées afin de mettre en évidence les effets des constituants, et de la mise en œuvre du matériau. En particulier, trois séries de formulations ont permis d'investiguer :

- l'effet des liants et chènevottes utilisés sur les propriétés d'une formulation "Mur" de béton de chanvre, avec 15 gâchées réalisées à partir de 3 chènevottes (CA, CB et CC) et des 5 liants. Ces formulations sont notées "5L3C" et présentées au Tableau II.19 et à la Figure II.17,

- l’effet de la densité des bétons de chanvre d’une formulation “Mur” avec 6 gâchées à partir de liant LA et de chanvre CA (Formulations notées “Densité” présentées au Tableau II.20 et à la Figure II.18),
- l’effet de la formulation sur les propriétés de bétons de chanvre fabriqués à partir de liant LA et de chanvre CA suivant 9 concentrations différentes (Formulations notées “Dosage liant” présentées Tableau II.21 et Figure II.19).

La formulation “Mur” a donc été étudiée avec une attention particulière durant cette thèse. C’est en effet celle qui est la plus pratiquée sur chantier, mais aussi, du fait des concentrations en chanvre et en liant, celle qui donne aux bétons de chanvre des propriétés à mi-chemin entre celles des chènevottes et celles des liants.

Les échantillons ont été réalisés dans une bétonnière à pales fixes et à tambour rotatif. Le mode de réalisation est basé sur les “Règles professionnelles d’exécution d’ouvrages en béton de chanvre” [RP2 2006]. Il est décliné en 5 étapes :

1. L’eau est introduite dans la bétonnière,
2. Tout le liant y est ajouté,
3. L’ensemble est malaxé environ 3 minutes de sorte à obtenir une barbotine homogène (Figure II.16 (a)),
4. La chènevotte est alors introduite progressivement en veillant à désolidariser les paquets de particules,
5. Le mélange est malaxé environ 5 minutes, avec une inclinaison maximale du tambour, jusqu’à obtenir un mélange bien homogène (Figure II.16 (b)).



Figure II.16 – Fabrication des échantillons de béton de chanvre, préparation du liant (a), mélange homogène de béton de chanvre (b) et fabrication des échantillons (c)

Lors de la fabrication, deux comportements particuliers ont été observés :

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

- avec le liant LD, le mélange chaux-chanvre s’est révélé pour toutes les chènevottes très dense, le liant formant une pâte très visqueuse imperméabilisant les échantillons,
- avec le liant LB, le mélange était au contraire liquide, et le liant donnait l’impression de ne pas se dissoudre dans l’eau. Ce phénomène est probablement dû aux charges minérales (des incuits de calcaires) qui composent ce liant.

Les formulations “5L3C” ont été réalisées avec un même ratio massique Liant/Chanvre. Toutefois, les concentrations de constituants ne sont pas exactement les mêmes entre formulations car la quantité d’eau a été adaptée au couple de matières premières. Les échantillons ont été, dans ce cas compactés avec une même contrainte de l’ordre de $0,05\text{ MPa}$, ce qui est habituellement réalisé pour les éprouvettes destinées aux essais mécaniques. Pour les autres formulations, la masse initiale nécessaire a été évaluée et ajustée de sorte à atteindre des concentrations cibles en matières premières.

Par la suite, les bétons de chanvre sont référencés par un code précisé dans les Tableaux II.19 à II.21, de sorte à alléger les notations. Les grandeurs $C_{chanvre}$, C_{liant}^0 , C_{eau} et ρ_{totale} font respectivement référence aux concentrations en chènevotte, en liant et en eau lors de la gâchée et à la masse volumique des échantillons juste après fabrication.

Pour les échantillons issus des formulations “5L3C”, un suivi de la cinétique de séchage a été réalisé et est discuté en Annexe 5.



Figure II.17 – Photographie des échantillons de béton de chanvre “5L3C”

II.4 Bétons de chanvre

Formulation	Code	$C_{chanvre}$ ($kg.m^{-3}$)	C_{liant}^0 ($kg.m^{-3}$)	C_{eau} ($kg.m^{-3}$)	ρ_{totale} ($kg.m^{-3}$)	Remarques
	CA-LA	130	259	372	761	
	CA-LB	120	240	306	666	
	CA-LC	117	235	346	698	Excès d'eau
	CA-LD	118	237	403	758	
	CA-LE	128	256	359	743	
Mur	CB-LA	118	236	295	649	
	CB-LB	110	221	238	569	
	CB-LC	116	232	253	600	
	CB-LD	110	220	409	738	Excès d'eau
	CB-LE	104	209	267	581	Manque d'eau
	CC-LA	130	261	328	719	
	CC-LB	117	234	245	595	
	CC-LC	123	246	253	622	
	CC-LD	123	246	404	774	
	CC-LE	111	223	258	592	Excès d'eau

Tableau II.19 – Concentrations et masses volumiques initiales des bétons de chanvre “5L3C”

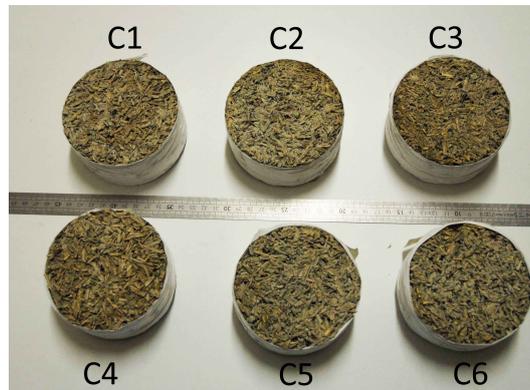


Figure II.18 – Photographie des échantillons de béton de chanvre “Densité”

Formulation	Compacité	Code	$C_{chanvre}$ ($kg.m^{-3}$)	C_{liant}^0 ($kg.m^{-3}$)	C_{eau} ($kg.m^{-3}$)	ρ_{totale} ($kg.m^{-3}$)	Remarques
Mur	1.00	C1	90	180	266	536	
	1.11	C2	100	200	295	595	
	1.22	C3	110	220	325	655	
	1.33	C4	120	240	355	715	
	1.44	C5	130	260	384	774	
	1.51	C6	136	272	402	810	

Tableau II.20 – Concentrations et masses volumiques initiales des bétons de chanvre “Densité”. Les valeurs données pour la compacité correspondent au rapport entre la concentration de chanvre utilisée et la concentration de chanvre de la formulation C1.

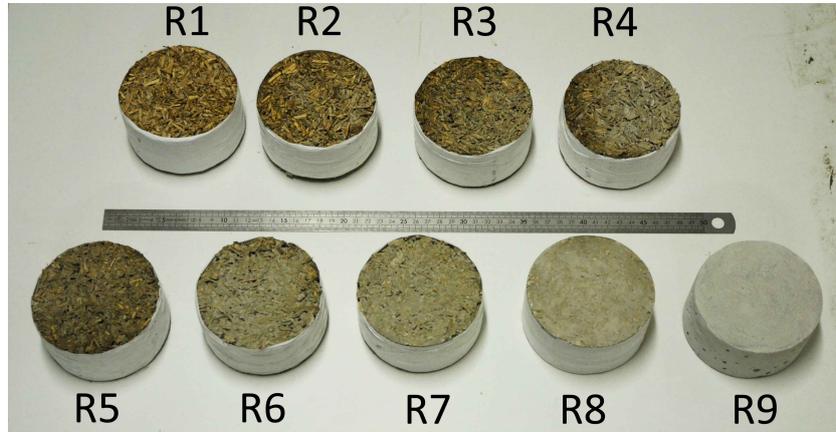


Figure II.19 – Photographie des échantillons de béton de chanvre “Dosage liant”

Formulation	Ratio L/C	Code	$C_{chanvre}$ ($kg.m^{-3}$)	C_{liant}^0 ($kg.m^{-3}$)	C_{eau} ($kg.m^{-3}$)	ρ_{totale} ($kg.m^{-3}$)	Remarques
Chènevotte	0	0	110	0	0	110	
Toit	0.5	R1	110	55	171	336	
Toit	1	R2	110	110	223	443	
Mur	1.5	R3	110	165	275	550	
Mur	2	R4	110	220	327	657	humide
Mur	2.5	R5	110	275	329	714	
Mur	3	R6	110	330	382	822	humide
Enduit	4	R7	110	440	450	1000	
Enduit	6	R8	110	660	570	1340	saturation
Liant pur	∞	R9	0	900	854	1754	vibration

Tableau II.21 – Concentrations et masses volumiques initiales des bétons de chanvre “Dosage liant”

4.2 Porosités

4.2.1 Masses volumiques de squelette et porosités

Des mesures directes de porosité ont été réalisées sur des éprouvettes de béton de chanvre. Le dispositif utilisé est un porosimètre fonctionnant par comparaison de volume [Leclaire *et al.* 2003] qui est décrit en Annexe 1.1, équipé d’un porte échantillon cylindrique d’environ 3 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur.

Pour chaque formulation, trois échantillons de cette dimension ont donc été fabriqués, et testés après stabilisation. Les résultats sont synthétisés dans les tableaux suivants, par les valeurs de porosité et de masse volumique de squelette des bétons de chanvre $\rho_{squelette\ beton}$ exprimées en $kg.m^{-3}$.

Code	$\rho_{stabilise}$ ($kg.m^{-3}$)	$\rho_{squelette\ beton}$ ($kg.m^{-3}$)	Porosité (%)
CA-LA	433	1732	75,0
CA-LB	379	1294	70,7
CA-LC	383	1404	72,7
CA-LD	380	1350	71,9
CA-LE	402	1291	68,9
CB-LA	411	1924	78,6
CB-LB	351	1956	82,1
CB-LC	374	2015	81,4
CB-LD	353	1646	78,6
CB-LE	339	1832	81,5
CC-LA	436	1598	72,7
CC-LB	365	1516	75,9
CC-LC	401	1538	73,9
CC-LD	392	1375	71,5
CC-LE	353	1455	75,7

Tableau II.22 – Masses volumiques de squelette des bétons de chanvre “5L3C”

Formulations “5L3C” On peut constater dans le Tableau II.22 que la densité du squelette des bétons de chanvre est fortement corrélée à la densité de squelette des chènevottes respectives (plus le squelette de la chènevotte est dense, plus celui du béton de chanvre sera dense). Pour rappel, les masses volumiques de squelette mesurées sur les chènevottes sont de $964\ kg.m^{-3}$ pour CA, $1213\ kg.m^{-3}$ pour CB et $1104\ kg.m^{-3}$ pour CC (voir Tableau II.15).

Le liant a un effet moins prononcé sur cette densité, ce qui s’explique par le fait que la masse volumique de squelette des liants est toujours la même quelle que soit sa nature, approximativement $2400\ kg.m^{-3}$. Seule la configuration CA-LA se démarque des autres bétons réalisés avec la chènevotte CA. Il semblerait donc que la microstructure de ce liant LA au sein de ce mélange, soit différente de celles des autres configurations, étant en particulier caractérisée par une porosité plus importante. Ce phénomène peut s’expliquer par un comportement différent au niveau de l’interaction chimique entre le liant et la chènevotte.

Formulations “Densité” Les données présentées dans le Tableau II.23 ont été obtenues sur des échantillons provenant d’une même gâchée, mais compactés sous différentes contraintes. Elles montrent, suivant la densité finale des échantillons, des variations de porosité dans une gamme de l’ordre de 14% tandis que la densité de squelette varie de moins de 3% pour cette gâchée. En outre, l’expérience prouve que la microstructure du liant reste la même au sein de ces différents échantillons, et que la prise du liant n’est pas affectée par le compactage dans

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

Code	$\rho_{stabilise}$ ($kg.m^{-3}$)	$\rho_{squelette\ beton}$ ($kg.m^{-3}$)	Porosité (%)
C1	282	1575	82,1
C2	312	1583	80,3
C3	353	1585	77,7
C4	381	1577	75,8
C5	416	1582	73,7
C6	440	1531	71,3

Tableau II.23 – Masses volumiques de squelette des bétons de chanvre “Densité”

cette gamme de densités et de porosités. La conclusion est donc que la densité de squelette est indépendante de la densité apparente des bétons de chanvre d’une gâchée, ce qui permet de calculer la porosité :

$$\forall \rho, \phi(\rho, gachee) = 1 - \frac{\rho}{\rho_{squelette\ beton}(gachee)} \quad (II.1)$$

On remarque ici par rapport à la première gâchée, qu’à partir d’une même formulation (ratio Liant/Chanvre de 2) avec le liant LA et le chanvre CA, on passe de 1732 (Tableau II.22) à environ $1580\ kg.m^{-3}$. Cette différence n’est pas expliquée par les concentrations en matières premières qui sont les mêmes dans les deux cas, mais provient probablement du conditionnement (les échantillons de la série “Densité” ont été stockés un mois à $T=20\ ^\circ C$, $HR=50\%$, soit la moitié du temps de conditionnement de la première série).

Code	$\rho_{stabilise}$ ($kg.m^{-3}$)	$\rho_{squelette\ beton}$ ($kg.m^{-3}$)	Porosité (%)
R1	180	823	78,1
R2	239	1033	76,9
R3	299	1194	75,0
R4	350	1344	74,0
R5	416	1499	72,2
R6	474	1516	68,7
R7	597	1670	64,3
R8	775	1787	56,6
R9	944	2484	62,0

Tableau II.24 – Masses volumiques de squelette des bétons de chanvre “Dosage liant”

Formulations “Dosage liant” Pour cette troisième série de formulations dont les résultats sont présentés Tableau II.24, on constate une augmentation progressive de la densité de squelette en fonction de la concentration en liant. La formulation R9 correspond à du liant pur

LA, et présente la densité de squelette maximale pour les bétons de chanvre. En revanche, la formulation R1, qui correspond à un ratio Liant/Chanvre de 0,5, présente une masse volumique plutôt inattendue, puisqu'inférieure à la densité de squelette de la chènevotte pure.

Cela pourrait s'expliquer de deux façons :

- le liant bouche une partie des pores intraparticules initialement accessibles dans la chènevotte comme cela est illustré Figure II.20, et par conséquent, amplifie artificiellement le volume de squelette, égal à la somme du volume du squelette du chanvre et de celui des pores bouchés par le liant dans les particules,
- le liant dans le béton de chanvre est caractérisé par un squelette moins dense que s'il était fabriqué de façon isolée, du fait des conditions de prise différentes dans le béton où le liant est entouré de beaucoup d'air et de chènevotte.

Une observation de la microstructure des échantillons issus de ces formulations, par exemple au microscope à balayage électronique, permettrait de confirmer ces hypothèses.

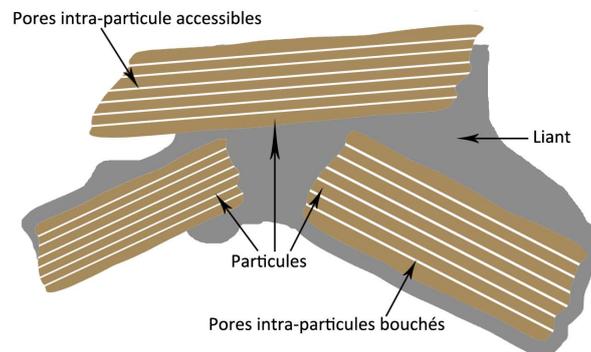
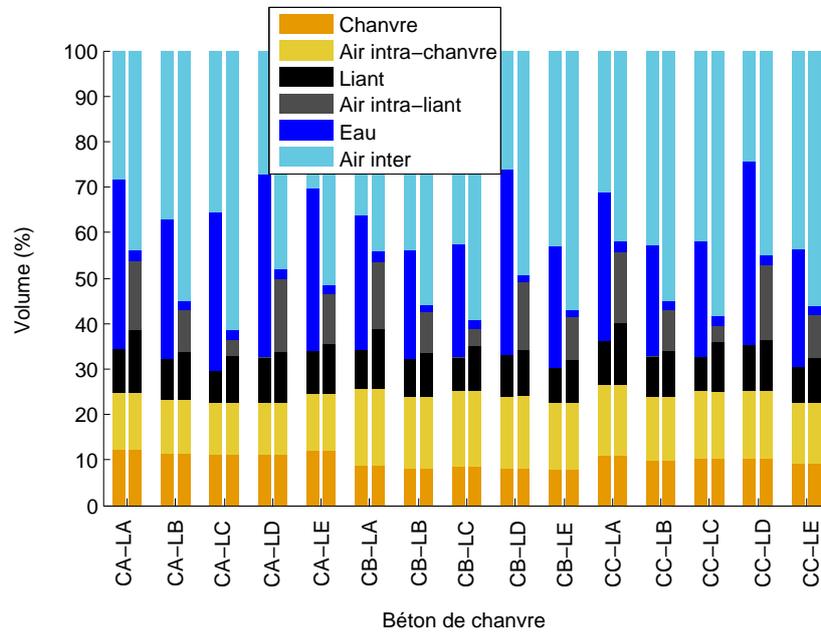


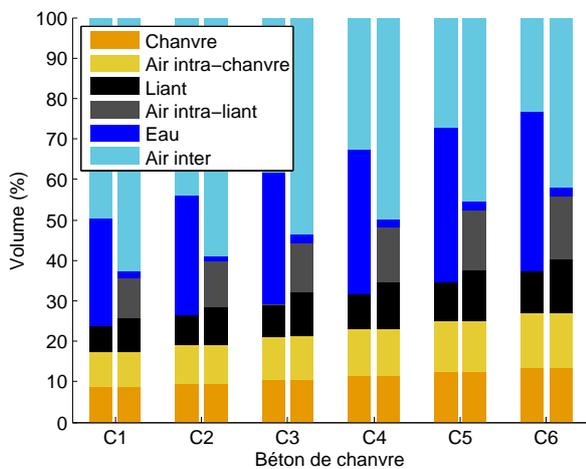
Figure II.20 – Schéma illustrant le cas d'une porosité intraparticule partiellement accessible dans le béton de chanvre

4.2.2 Répartition des volumes

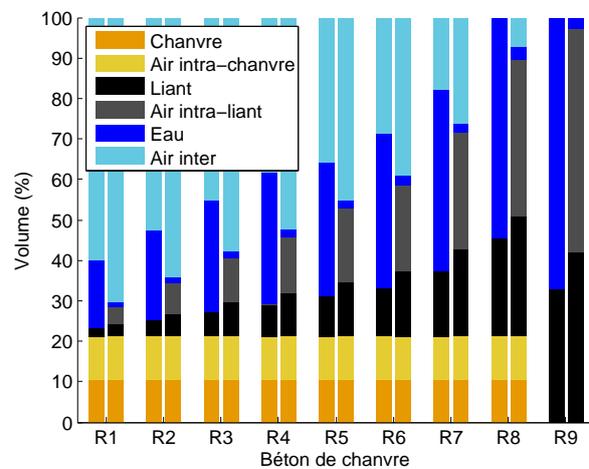
A condition de connaître les concentrations de chaque constituant, leurs densités apparentes et densités de squelette respectives, il est possible de représenter la fraction volumique que représente chacun des constituants pour chacune des formulations. Cela est présenté pour les trois séries de formulation sur la Figure II.21. Les densités apparentes des particules de chanvre utilisées pour ce calcul sont celles présentées au Chapitre IV, déduites des mesures acoustiques.



(a)



(b)



(c)

Figure II.21 – Répartitions des volumes des différentes phases des bétons de chanvre des formulations “5L3C” (a), “Densité” (b) et “Dosage liant” (c) aux stades de fabrication (gauche) et stabilisé (droite)

Les graphiques présentent les distributions de volume en fonction de la formulation. Le volume global de chaque béton de chanvre est décomposé en six sous-volumes :

- le volume du squelette de la chènevotte,
- le volume du squelette de liant (ou volume de poudre de liant au stade de fabrication),
- le volume d’eau,

- le volume d’air intrachanvre,
- le volume d’air intraliant,
- le volume d’air inter (volume d’air interparticule différent du volume d’air intraliant).

Pour chaque formulation, les distributions volumiques sont présentées sur les graphes au stade de fabrication et au stade stabilisé. On constate que le volume occupé par le liant augmente légèrement entre l’état initial et l’état stabilisé, suite à la prise de ce dernier.

Au niveau des volumes d’air, on peut remarquer que pour les formulations peu dosées en liant type “Toit” et “Mur”, la porosité des matériaux est essentiellement (jusqu’à 70%) composée par l’air inter présent en dehors des particules et du liant. Les volumes d’air dans le liant et dans le chanvre sont alors du même ordre de grandeur, représentant chacun 10% du volume total du matériau. En revanche, pour les formulations riches en liant, la porosité est cette fois-ci contenue dans le liant.

4.3 Résistivités

Les résistivités des échantillons de béton de chanvre ont été estimées lors des mesures au tube de Kundt, grâce à l’estimation basses fréquences à partir des propriétés acoustiques. De même que pour la chènevotte, ce procédé a été préféré à une évaluation directe suivant la norme ISO9053, dans la mesure où il permet de mesurer la résistivité dans les mêmes conditions que les propriétés acoustiques, sans manipulation supplémentaire de l’échantillon, et permet de préserver les plus fragiles d’entre eux.

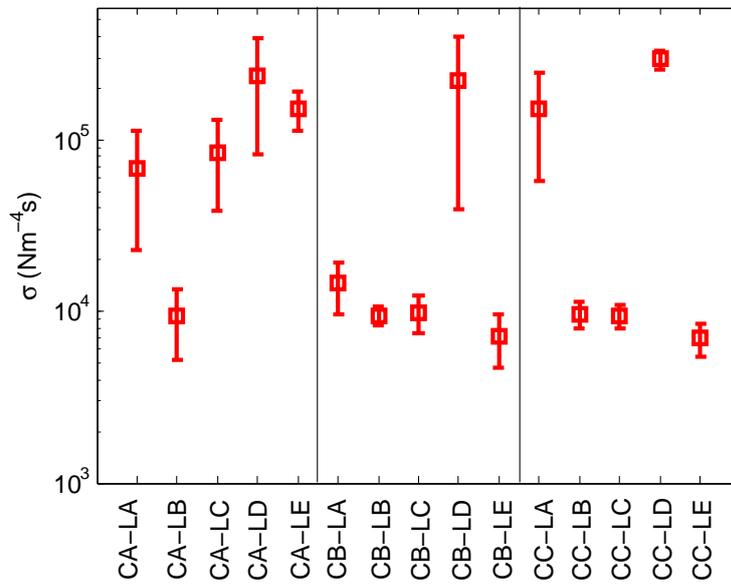
Formulations “5L3C” On constate d’après les résultats présentés Figure II.22 (a) que la présence du liant entraîne de grandes différences de résistivité entre les échantillons de béton de chanvre. En effet, on a vu Figure II.10 que les chènevottes CA, CB et CC ont des résistivités qui restent du même ordre de grandeur à densité apparente fixée (variations inférieures à 50%). Pour les bétons de chanvre, on peut observer un facteur de 20 entre les résistivités, ces dernières allant de moins de $10000 \text{ N.m}^{-4}.s$ à plus de $200000 \text{ N.m}^{-4}.s$, alors que les concentrations en constituants restent proches.

On remarque en outre que :

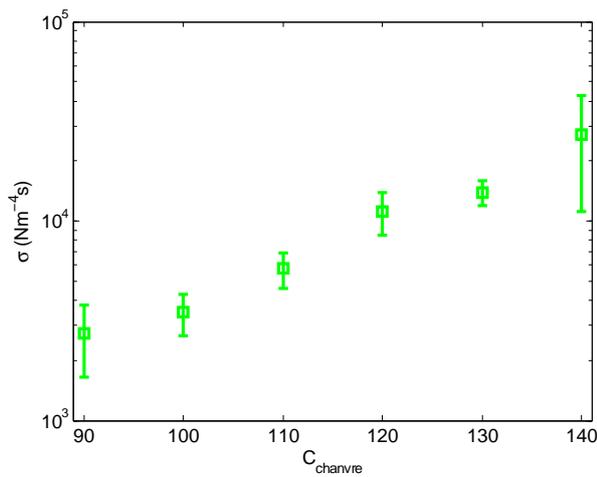
- les bétons de chanvre fabriqués avec le liant LD ont un caractère très imperméable. On peut constater visuellement que les échantillons ont des pores très refermés,
- avec le liant LA, les résistivités sont également importantes, tout en restant inférieures à celles du liant LD,

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

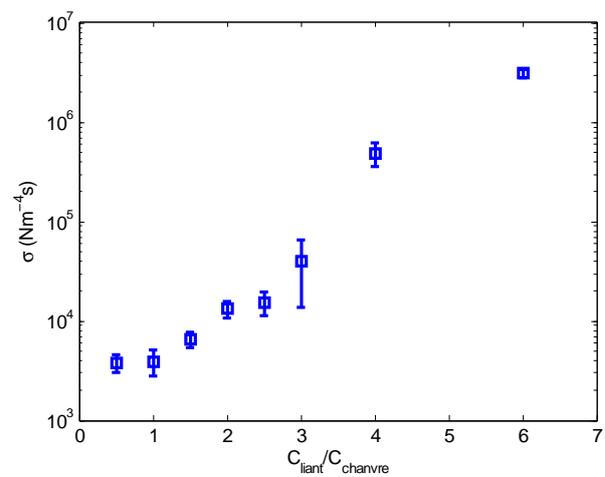
- les bétons issus du liant LB sont peu résistifs, le liant n’ayant pas réellement pris (pou-drage). On est dans ce cas assez proche d’une configuration de chènevotte,
- enfin, les liants LC et LE donnent avec le chanvre CA d’importantes résistivités, et sont très perméables dans les autres cas.



(a)



(b)



(c)

Figure II.22 – Résistivités des bétons de chanvre des formulations “5L3C” (a), “Densité” (b) et “Dosage liant” (c)

Formulations “Densité” Pour ces formulations, on constate Figure II.22 (b) que les matériaux restent perméables, et montrent une augmentation non linéaire de la résistivité en fonction de la concentration en chanvre. Le comportement observé est donc proche de celui de la chènevotte pure.

Formulations “Dosage liant” L’influence de la concentration en liant sur la résistivité est beaucoup plus forte que celle de la densité, puisqu’on peut relever un facteur de l’ordre de 10^3 entre les résistivités présentées Figure II.22 (c). On obtient en effet des matériaux très imperméables ($\sigma > 500\,000\text{ N.m}^{-4}\text{s}$) à partir d’un ratio Liant/Chanvre de 4. La résistivité semble par ailleurs converger pour de fortes concentrations en liant vers $10^7\text{ N.m}^{-4}\text{s}$, soit l’ordre de grandeur trouvé pour la résistivité du liant pur.

4.4 Propriétés acoustiques

Les caractérisations des propriétés acoustiques des bétons de chanvre ont été effectuées en tube de Kundt à l’aide de la méthode à trois positions de microphones sans cavité [Iwase *et al.* 1998]. L’épaisseur des échantillons testés a été fixée à 5 cm pour permettre une comparaison entre les propriétés des chènevottes et celles des liants. Toutefois, le caractère imperméable du béton de chanvre, d’autant plus fort lorsque ce dernier est dense ou chargé en liant, a rendu dans certains cas impossible la mesure de la densité dynamique et du module d’incompressibilité dynamique. Cela explique les forts écarts types sur certains des graphes qui suivent.

4.4.1 Effet des constituants - Formulations “5L3C”

Les résultats obtenus ont été comparés de sorte à mettre en évidence les effets des constituants sur les échantillons des formulations “5L3C”, et sont présentés en Annexe 7.

Les propriétés acoustiques ont été mesurées sur chaque face des échantillons. Les moyennes et écarts-types présentés indiquent que la majorité des échantillons présentent une absorption et un indice d’affaiblissement acoustiques similaires sur leurs deux faces, notamment aux basses fréquences ($f < 1000\text{ Hz}$) où les courbes sont quasiment confondues. Une attention particulière avait effectivement été donnée lors de la fabrication, afin d’éviter le cas d’une concentration trop importante en eau observée dans [Glé *et al.* 2011].

Les propriétés acoustiques sont comparées dans un premier temps à chènevotte fixée, puis à liant fixé de sorte à analyser respectivement l’effet du liant et celui de la chènevotte.

Effet du liant Afin d'illustrer l'effet du liant, les résultats obtenus à partir de la chènevotte CB sont présentés sur la Figure II.23 (voir autres courbes en Annexe 7).

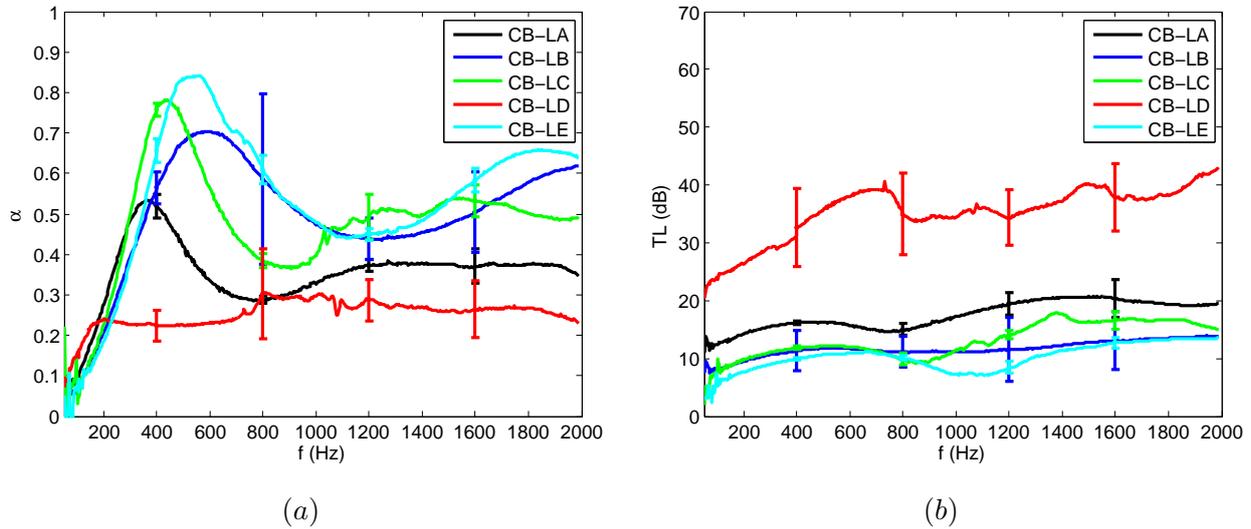


Figure II.23 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec de la chènevotte CB

L'effet du liant est indiscutable sur l'absorption acoustique du béton de chanvre. En effet, pour chacune des chènevottes utilisées, les propriétés acoustiques évoluent très sensiblement en fonction du liant choisi. On note ainsi que :

- Les bétons les moins performants en absorption sont systématiquement ceux fabriqués avec le liant LD. L'absorption acoustique est alors quasiment constante en fonction de la fréquence, valant environ 25%. Ces propriétés sont dues aux caractères dense et imperméable du liant LD.
- Les liants LA et LC offrent aux bétons des propriétés acoustiques intermédiaires. La courbe d'absorption atteint alors 50 à 60% au niveau de son premier pic à 400 Hz.
- Le liant LE et surtout le liant LB donnent des bétons de chanvre très performants et dont l'absorption acoustique peut dépasser 80% au niveau du premier pic, situé vers 500 Hz. Ces liants permettent de garder une porosité très ouverte dans le matériau, et donc une faible résistivité (cf. Figure II.22).

En matière d'indice d'affaiblissement, on constate une inversion systématique des performances par rapport à l'absorption acoustique. Ceci s'explique par le fait que cette grandeur est fortement corrélée à la résistivité des matériaux. Or, pour la gamme de résistivités rencontrée dans les bétons de chanvre, une augmentation de résistivité implique une baisse de l'absorption acoustique.

Pour l'épaisseur et les fréquences considérées, il faut noter que ces valeurs d'indice d'affaiblissement sont très intéressantes à partir de 20 dB d'atténuation. Ici, cette performance est atteinte pour les bétons fabriqués à partir du liant LD.

Effet de la chènevotte L'effet de la chènevotte est illustré à partir des propriétés des bétons de chanvre réalisés avec le liant LC Figure II.24 (voir autres courbes en Annexe 7).

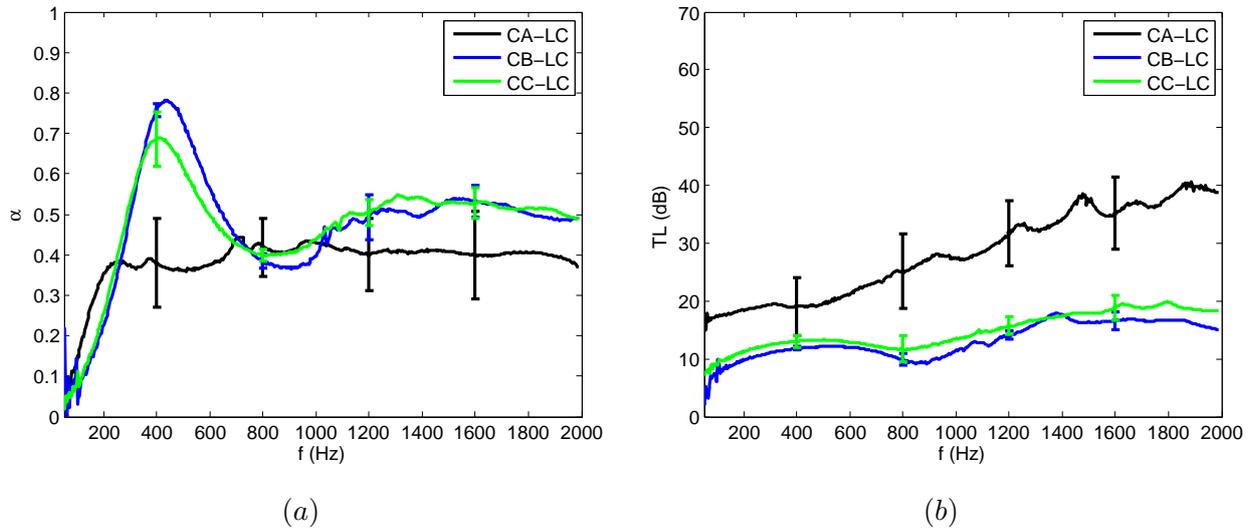


Figure II.24 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec du liant LC

L'effet de la chènevotte apparait moins clairement que celui du liant. Pour les bétons à base de liant LD, cet effet est invisible, mais ce n'est pas le cas avec les autres liants. Ainsi, dans trois cas, avec les liants LB, LC et LE, les bétons fabriqués avec les chènevottes CB et CC ont des absorptions acoustiques plus élevées. Enfin, avec le liant LA, seule la chènevotte CB confère au béton une meilleure absorption. Lors de la caractérisation des chènevottes, on avait pu observer de très faibles différences entre les propriétés acoustiques, la chènevotte CB étant légèrement plus performante que les deux autres. Les différences observées sur les bétons sont donc majoritairement dues au liant et à la fabrication (quantité d'eau introduite et compactage), masquant les singularités des chènevottes. Cela confirme les observations réalisées par [Glé *et al.* 2011] mentionnées dans la Section 3.4.3 du Chapitre I.

4.4.2 Effet de la densité - Formulations "Densité"

L'effet de la densité est très visible sur l'absorption du béton de chanvre, de façon similaire aux propriétés de la chènevotte. On constate ainsi qu'une augmentation de la densité entraîne un

décalage net des pics d'absorption vers les basses fréquences, une baisse de l'absorption globale et un gain de l'indice d'affaiblissement (cf. Figure II.25).

Concernant l'indice d'affaiblissement, on constate que peu importe la densité, l'isolement reste faible et inférieur à 20 dB sur toutes les fréquences. Les formulations "Mur" avec ce liant ne permettent donc pas d'atteindre une atténuation importante.

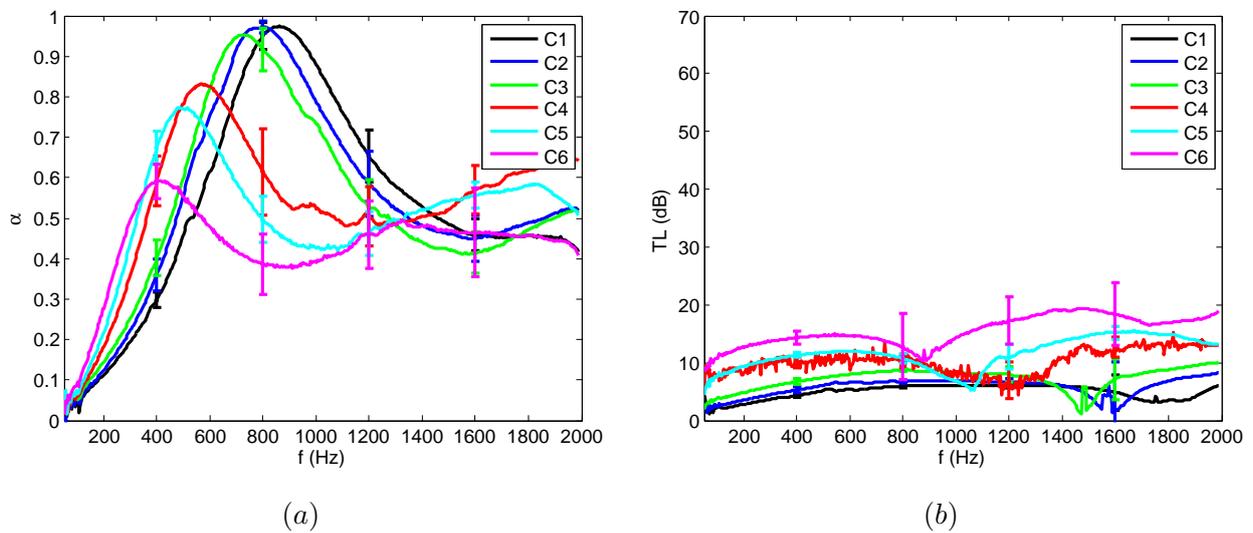


Figure II.25 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés en fonction de leur masse volumique apparente

4.4.3 Effet de la concentration en liant- Formulations "Dosage liant"

De même, l'effet de la concentration en liant est très marqué sur les courbes Figure II.26, où l'on passe progressivement d'une absorption quasi-nulle pour le liant pur à une absorption très importante pour les formulations proches de la chènevotte pure.

Avec la première série de formulations (liant LA - chanvre CA), on arrive à des indices d'affaiblissement de l'ordre de 40 dB avec un ratio Liant/Chanvre de 4 (R7).

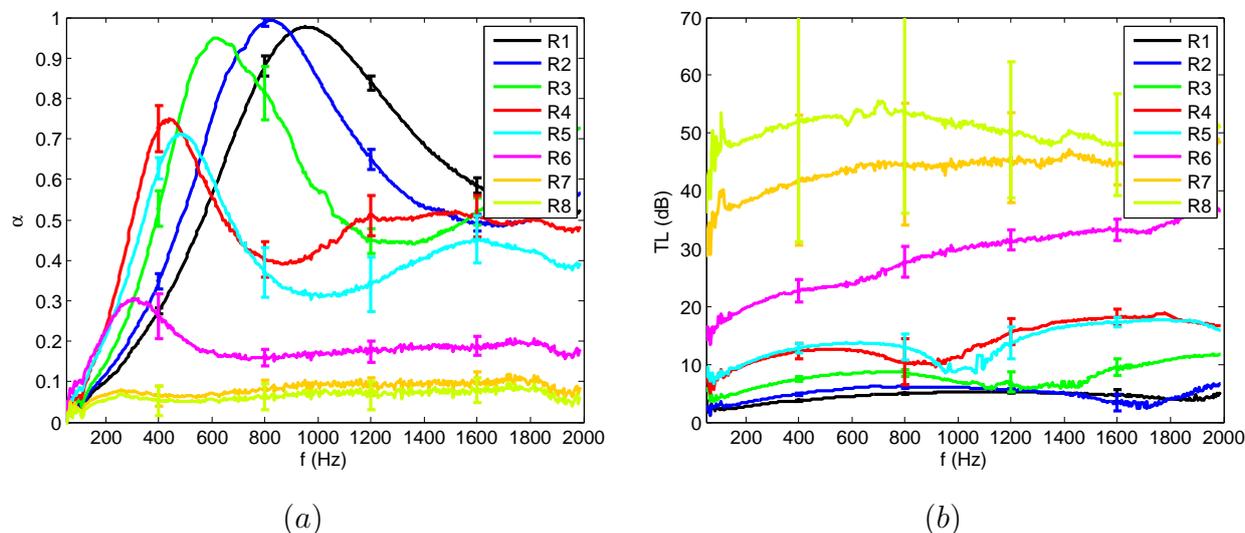


Figure II.26 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés en fonction de leur concentration en liant

5 Conclusion

Les échantillons de laines, de chènevottes, de liants, et de bétons de chanvre étudiés dans cette thèse ont été introduits dans ce deuxième chapitre.

Les laines mettent en jeu différentes fibres végétales et des masses volumiques allant de 20 à 250 kg.m^{-3} . Leur porosité reste très importante, supérieure à 80% même dans le cas des échantillons aiguilletés. En revanche, leur résistivité atteint $320\,000 \text{ N.m}^{-4}.s$ pour les plus denses, ce qui est élevé par rapport aux matériaux généralement utilisés à des fins d'absorption acoustique. Cette diversité confère aux laines une gamme très large d'absorptions et d'indices d'affaiblissement.

Au niveau des chènevottes, une analyse granulométrique a permis une étude fine des dimensions et de la forme des granulats. Les particules sont modélisées par des parallélépipèdes et il est montré que leurs dimensions peuvent être très fidèlement représentées par une distribution log-normale. De plus, l'élanement des particules semble être une constante quelle que soit la chènevotte étudiée. La masse volumique de squelette des chènevottes varie de 800 à plus de 1200 kg.m^{-3} , et est plus importante dans le cas des chènevottes rouies. En conséquence, leurs porosités sont supérieures à 80% et leurs résistivités restent faibles (500 à $9000 \text{ N.m}^{-4}.s$). On note pour les chènevottes une absorption acoustique élevée et un indice d'affaiblissement modeste, ces deux propriétés étant grandement modulées à la fois par la densité apparente, et par les caractéristiques des particules.

Chapitre II. Caractérisation expérimentale des matériaux à base de fibres et particules végétales

Relativement aux chènevottes, les liants sont peu poreux, et fortement imperméables. Ils sont en outre caractérisés par différentes densités en fonction de leurs natures, et donnent leurs spécificités aux bétons de chanvre. En effet, les bétons de chanvre ont une densité de squelette qui varie progressivement de celle de la chènevotte à celle du liant en fonction des concentrations considérées. Il en va de même pour leur résistivité si bien que leur gamme de propriétés acoustiques est très étendue, et essentiellement contrôlée par la concentration en liant et la densité du matériau, les effets liés à la granulométrie et à l'origine de la chènevotte étant partiellement masqués.

Ce spectre de propriétés, pour les laines, les chènevottes et les bétons de chanvre, et les leviers d'action associés impliquent une large gamme de performances acoustiques et d'applications. Toutefois, afin de connaître plus précisément le mode de fonctionnement de chacun des matériaux et de pouvoir maîtriser leurs propriétés acoustiques en fonction des paramètres fondamentaux qui les caractérisent, une modélisation des phénomènes de dissipation est nécessaire.

Chapitre III

Phénomènes de dissipation acoustique dans un matériau poreux

Les phénomènes acoustiques au sein des milieux poreux ont intéressés un grand nombre de chercheurs, dont Rayleigh, Kirchhoff et Biot. Nombreux modèles ont été développés et permettent aujourd’hui une description très précise des mécanismes de dissipation.

Dans ce chapitre, on se propose dans un premier temps d’expliciter les modes de dissipation existant dans les milieux poreux à vocation acoustique, et de présenter les grandeurs fondamentales qui permettent de les caractériser. Dans un second temps vient une revue des différents types de modèles pouvant être utilisés afin de prédire ces grandeurs acoustiques.

1 Grandeurs fondamentales intrinsèques au matériau poreux

1.1 Présentation du problème

Considérons un matériau poreux soumis à une onde acoustique, et vérifiant les hypothèses suivantes :

- le matériau poreux est homogène et isotrope, saturé par un fluide (de l’air),
- on fait l’hypothèse d’un “squelette rigide” qui n’est pas mis en vibration par les ondes acoustiques. Cette hypothèse peut être formulée d’après [Zwikker *et al.* 1941] pour des fréquences supérieures à la fréquence caractéristique de découplage ω_{dec} (cf. Section 2.1 où cette fréquence sera explicitée et le cas d’un squelette élastique déformable sera abordé),
- les pores constituent un réseau interconnecté et ouvert sur l’extérieur, de plus, ils peuvent être décrits par une même dimension caractéristique,

Chapitre III. Phénomènes de dissipation acoustique dans un matériau poreux

- la dimension caractéristique des pores est supposée faible par rapport à la dimension caractéristique de l'onde, c.-à-d. la longueur d'onde λ définie Equation III.4,
- on se place dans le cadre de l'acoustique linéaire, si bien que l'on ne considère que les petites variations des grandeurs acoustiques autour de leur valeur à l'équilibre, et que par conséquent, les grandeurs du deuxième ordre sont négligées devant celle du premier ordre.

On s'intéresse au cas d'une onde plane harmonique, caractérisée par une dépendance temporelle en $e^{j\omega t}$, avec $\omega = 2\pi f$ la pulsation de l'onde acoustique et f sa fréquence. Le système de coordonnées cartésiennes $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ d'origine O est utilisé, de telle sorte que le matériau, d'épaisseur e , soit centré sur l'axe $(O\vec{x})$, et que l'interface du fluide et du milieu poreux corresponde au plan $(\vec{y}O\vec{z})$. Cette configuration est illustrée Figure III.1.

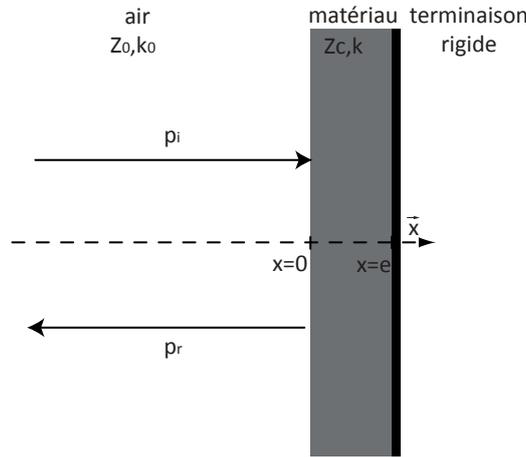


Figure III.1 – Un milieu poreux soumis à une onde acoustique plane se propageant en incidence normale dans la direction \vec{x} , et adossé à une terminaison rigide

Les deux grandeurs fondamentales qui caractérisent l'onde acoustique, définies en un point $M(x, y, z)$ du fluide et à l'instant t sont la pression acoustique $p(M, t)$ (plus précisément la surpression ou variation de pression par rapport à la pression d'équilibre) et la vitesse acoustique $\vec{v}(M, t)$.

Dans le cadre de nos hypothèses, pour une onde se propageant dans la direction \vec{n} sans réflexion, pression et vitesse peuvent s'écrire dans le matériau :

$$p(M, t) = Ae^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM})} \tag{III.1}$$

$$\vec{v}(M, t) = \frac{A\vec{n}}{Zc} e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{OM})} \tag{III.2}$$

A étant l'amplitude de la pression acoustique et \vec{k} le vecteur d'onde..

III.1 Grandeurs fondamentales intrinsèques au matériau poreux

L'impédance caractéristique Z_c d'un milieu (notée Z_0 pour l'air) est définie comme le rapport entre pression acoustique et vitesse acoustique dans ce milieu.

$$Z_c = \frac{p(M, t)}{\vec{v}(M, t) \cdot \vec{n}} \quad (\text{III.3})$$

Le nombre d'onde k d'un matériau (notée k_0 pour l'air libre) est la norme de \vec{k} . k est relié à la célérité de l'onde c et à la longueur d'onde λ par la relation :

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{III.4})$$

Les grandeurs Z_c et k sont des propriétés que l'on peut qualifier d'"intrinsèques" à un milieu, car elles ne dépendent pas de son épaisseur et permettent, dans le contexte de matériau à squelette rigide, de connaître complètement ses propriétés macroscopiques telles que son coefficient d'absorption acoustique α et son indice d'affaiblissement TL .

Considérons par exemple le cas fréquent d'une incidence normale. Soit $\vec{n} = \vec{x}$, et e l'épaisseur du matériau adossé à une terminaison d'impédance caractéristique infinie. On a alors :

$$\alpha = 1 - |R|^2 = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \right|^2 \quad (\text{III.5})$$

Z_s est l'impédance de surface du matériau, définie à partir des propriétés intrinsèques par la relation :

$$Z_s = \frac{p}{\vec{v} \cdot \vec{x}} \Big|_{x=0} = -jZ_c \cot ke \quad (\text{III.6})$$

1.2 Effets de dissipation pour un matériau poreux à squelette rigide

Contrairement à ce qui est considéré dans de nombreux problèmes de mécanique des fluides, l'air (ou le fluide) saturant un matériau poreux ne peut pas être traité en tant que fluide parfait. En effet, il est nécessaire de prendre en compte à la fois la viscosité de cisaillement μ , et la conductivité thermique κ de l'air. Il est de plus supposé compressible, sans quoi la propagation serait compromise.

Dans le cas fréquemment rencontré d'un squelette rigide, deux effets indépendants sont à l'origine de la dissipation des ondes acoustiques : les effets visco-inertiels et les effets thermiques.

1.2.1 Dissipation par les effets visco-inertiels

L'air est modélisé par un fluide newtonien, sa viscosité dépend donc uniquement de sa température et de sa pression. L'équation du mouvement dans ces conditions est l'équation de Navier-Stokes [Bruneau 1998], qui fait intervenir la vitesse et la pression acoustique :

$$\mu\Delta\vec{v} + (\mu + \xi)\vec{\nabla}(\text{div}(\vec{v})) - \rho_0\frac{\delta\vec{v}}{\delta t} = \vec{\nabla}p \quad (\text{III.7})$$

Avec ξ le coefficient de viscosité de volume de l'air et ρ_0 sa masse volumique au repos.

Lorsque la séparation d'échelles entre la dimension des pores et celle de la longueur d'onde est bien respectée, on montre [Olny 1999] que l'écoulement peut être vu au premier ordre comme incompressible à l'échelle des pores, ce qui se traduit par $\text{div}(\vec{v}) = 0$.

L'équation de Navier-Stokes est finalement constituée de trois termes :

1. $(\vec{\nabla}p)$ décrit la sollicitation acoustique par le gradient de pression,
2. $(\mu\Delta\vec{v})$ décrit les effets visqueux qui en découlent,
3. $(-\rho_0\frac{\delta\vec{v}}{\delta t})$ décrit les effets inertiels.

La résolution de cette équation, dans le cas d'un pore cylindrique, fait intervenir des fonctions de Bessel et une épaisseur de la couche limite visqueuse δ_v , homogène à une longueur :

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0\omega}} \quad (\text{III.8})$$

δ_v s'interprète comme l'épaisseur du pore sur laquelle la condition limite d'adhérence du fluide sur le squelette se fait ressentir. La comparaison de δ_v au rayon r du pore met en évidence deux comportements asymptotiques, décrits dans le Tableau III.1.

Pour des fréquences inférieures à la fréquence caractéristique visco-inertielle $\omega_v = \frac{\mu}{\rho_0 r^2}$, les phénomènes de viscosité sont prépondérants devant les effets inertiels, l'épaisseur de couche limite est alors importante devant le rayon du pore. Dans ce cas, l'écoulement est de type Poiseuille et le profil des vitesses est parabolique dans la section du pore.

Aux plus hautes fréquences, l'écoulement devient purement inertiel. L'effet d'adhérence du fluide est limité à une très faible épaisseur, et dans tout le reste de la section du pore, le profil

III.1 Grandeurs fondamentales intrinsèques au matériau poreux

δ_v/r	$\delta_v \ll r$	$\delta_v \gg r$
Fréquences correspondantes	$\omega \gg \frac{\mu}{\rho_0 r^2}$	$\omega \ll \frac{\mu}{\rho_0 r^2}$
Equation du mouvement	$-\rho_0 \frac{\delta \vec{v}}{\delta t} \approx \vec{\nabla} p$	$\mu \Delta \vec{v} \approx \vec{\nabla} p$
Type d'écoulement	Régime inertiel	Régime visqueux

Tableau III.1 – Comportements asymptotiques dans un pore cylindrique en fonction de la valeur de l'épaisseur de couche limite visqueuse

de vitesse est plan.

Ces profils sont illustrés sur la Figure III.2, pour trois valeurs du ratio r/δ_v .

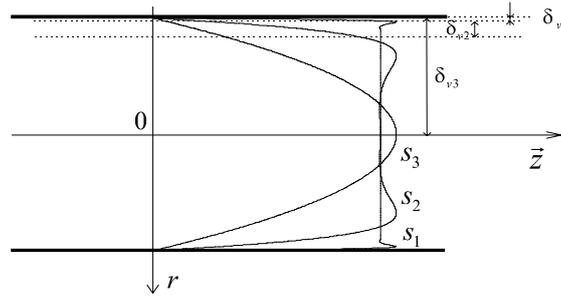


Figure III.2 – Evolution du profil des vitesses dans la section d'un pore cylindrique en fonction de l'épaisseur de la couche limite visqueuse [Oly 1999], pour $S_1 = 100$, $S_2 = 10$, $S_3 = 1$ avec $S = r/\delta_v$

1.2.2 Dissipation par les effets thermiques

Au niveau thermique, la température de l'air dans les pores est couplée à la pression acoustique par l'équation de la chaleur :

$$\kappa \Delta T - \rho_0 C_p \frac{\delta T}{\delta t} = -\frac{\delta p}{\delta t} \quad (\text{III.9})$$

T est la température acoustique de l'air (soit sa variation de température autour de la température d'équilibre) et C_p est la capacité calorifique de l'air.

De façon analogue aux effets visco-inertiels, trois termes peuvent être interprétés dans cette équation :

1. $(-\frac{\delta p}{\delta t})$ décrit la sollicitation émanant de la variation de pression au cours du temps,

Chapitre III. Phénomènes de dissipation acoustique dans un matériau poreux

2. $(\kappa\Delta T)$ correspond aux effets de conduction thermique,
3. $(-\rho_0 C_p \frac{\delta T}{\delta t})$ correspond aux effets inertiels thermiques.

On peut introduire l'épaisseur de couche limite thermique δ_t , aussi homogène à une longueur, et qui permet cette fois de décrire le profil de la température au sein d'un pore cylindrique :

$$\delta_t = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho_0 C_p \omega}} \quad (\text{III.10})$$

Les phénomènes thermiques asymptotiques, mis en évidence à partir de l'épaisseur de couche limite thermique, sont décrits dans le Tableau III.2.

δ_t/r	$\delta_t \ll r$	$\delta_t \gg r$
Fréquences correspondantes	$\omega \gg \frac{\kappa}{\rho_0 C_p r^2}$	$\omega \ll \frac{\kappa}{\rho_0 C_p r^2}$
Equation de la chaleur	$-\rho_0 C_p \frac{\delta T}{\delta t} \approx -\frac{\delta p}{\delta t}$	$\kappa \Delta T \approx -\frac{\delta p}{\delta t}$
Type d'écoulement	Régime adiabatique	Régime conductif

Tableau III.2 – Comportements asymptotiques dans un pore cylindrique en fonction de la valeur de l'épaisseur de couche limite thermique

Ainsi, le profil de température est régi par la conduction thermique de l'air pour les fréquences inférieures à la fréquence caractéristique thermique $\omega_t = \frac{\kappa}{\rho_0 C_p r^2}$. En considérant comme condition limite une température acoustique nulle sur les parois du squelette, on montre alors que le profil de température est parabolique dans le pore et suit une évolution isotherme.

Aux fréquences supérieures à ω_t , les phénomènes sont très rapides, de telle sorte que plus aucun échange thermique n'est réalisé entre le fluide et le squelette du matériau poreux, et le comportement devient adiabatique.

1.3 Propriétés intrinsèques d'un matériau poreux

Nous avons défini au début de cette section l'impédance caractéristique Z_c et le nombre d'onde k comme étant des propriétés intrinsèques du matériau poreux. Ces grandeurs sont effectivement nécessaires et suffisantes à la description complète du comportement acoustique d'un matériau poreux d'épaisseur connue.

III.1 Grandeurs fondamentales intrinsèques au matériau poreux

Toutefois, d'autres grandeurs sont plus généralement utilisées, étant reliées plus directement aux phénomènes de dissipation visco-inertiels et thermiques.

Pour commencer, la grandeur traditionnellement utilisée pour discuter des effets visco-inertiels est la perméabilité dynamique visco-inertielle Π définie à partir de la vitesse macroscopique $\langle \vec{v} \rangle$ dans la loi de Darcy généralisée :

$$\Pi = -\frac{\mu \langle \vec{v} \rangle}{\vec{\nabla} p} \quad (\text{III.11})$$

La densité dynamique ρ est définie à partir de cette perméabilité dynamique par :

$$\rho = \frac{\mu}{j\omega\Pi} \quad (\text{III.12})$$

De façon similaire, on a recours pour les effets thermiques à la perméabilité dynamique thermique Θ définie à partir de la température macroscopique $\langle T \rangle$:

$$\Theta = \frac{\kappa \langle T \rangle}{j\omega p} \quad (\text{III.13})$$

Le module d'incompressibilité thermique K du matériau poreux est défini à partir de la densité macroscopique du fluide $\langle \rho \rangle$:

$$K = \rho_0 \frac{p}{\langle \rho \rangle} \quad (\text{III.14})$$

De plus, K peut être relié à la perméabilité dynamique thermique grâce à :

$$K = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[\gamma - j(\gamma - 1) \frac{\Theta}{\phi \delta_t^2} \right]^{-1} \quad (\text{III.15})$$

P_0 est la pression de l'air à l'équilibre et $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ est le rapport des capacités calorifiques de l'air à pression (C_p) et à volume (C_v) constants.

Ces propriétés intrinsèques ρ et K sont directement intégrées à l'équation de propagation de l'onde acoustique. En effet, en partant de l'équation de conservation donnée Equation III.16,

et en intégrant la définition des grandeurs acoustiques Π et Θ données aux Equations III.11 et III.13 ou aux Equations III.12 et III.14, on aboutit respectivement aux Equations III.17 et III.18.

$$j\omega \langle \rho \rangle + \rho_0 \operatorname{div}(\langle \vec{v} \rangle) = 0 \quad (\text{III.16})$$

$$j\omega \frac{\phi}{\gamma P_0} \left(\gamma - j(\gamma - 1) \frac{\Theta}{\phi \delta_t^2} \right) p - \frac{\Pi}{\mu} \Delta p = 0 \quad (\text{III.17})$$

$$\Delta p + \omega^2 \frac{\rho}{K} p = 0 \quad (\text{III.18})$$

Par analogie entre l'Equation III.18 et l'équation de propagation en champ libre, on peut définir la célérité c des ondes acoustiques dans le milieu poreux :

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (\text{III.19})$$

Cette célérité, contrairement à la célérité des ondes dans un milieu non dissipatif, dépend de la fréquence et est directement modulée par les effets de dissipation visco-inertiels et thermiques. Par définition du nombre d'onde Equation III.4, et sachant que $Zc = \rho c$, l'introduction de la célérité met en évidence les relations de passage entre les couples de propriétés intrinsèques (k, Zc) et (ρ, K) :

$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho}{K}} \quad (\text{III.20})$$

$$Zc = \omega \sqrt{\rho K} \quad (\text{III.21})$$

2 Vers une description de plus en plus précise des matériaux poreux à simple échelle

Nous avons présenté dans la section précédente les phénomènes acoustiques au sein des pores cylindriques. Ces pores idéaux, caractérisés par une seule dimension, le rayon du cylindre, peuvent servir de référence afin de décrire des matériaux dont la taille des pores reste du même ordre de grandeur. Les matériaux, dits dans ce cas "à simple échelle", peuvent être décrits en fonction de la complexité de la forme des pores et des propriétés du squelette grâce aux modèles

présentés dans cette section.

2.1 Théorie de Biot pour les matériaux poroélastiques

Les premières réflexions sur les rôles respectifs et les interactions des phases fluides et solides d'un matériau poreux ont été menées par [Zwikker & Kosten 1949]. On leur doit entre autres, la définition de la notion de fréquence de découplage des matériaux poreux ω_{dec} , pour laquelle les forces d'inertie et de friction appliquées au squelette du matériau s'égalisent et au-delà de laquelle on peut considérer que les ondes acoustiques ne mettent pas le squelette en vibration.

$$\omega_{dec} = \frac{\sigma\phi^2}{\rho_1} \quad (\text{III.22})$$

ρ_1 est la masse volumique apparente du matériau poreux.

Un peu plus tard, [Biot 1956a, Biot 1956b] posent les bases de la théorie poroélastique. Biot décrit le matériau poreux via ses deux phases couplées, le fluide et le solide, et démontre que trois ondes peuvent se propager :

- une onde de compression dans la phase fluide,
- une onde de compression dans la phase solide,
- une onde de cisaillement dans la phase solide.

L'équation de propagation, donnée dans le cas du squelette rigide par l'Equation III.18, devient un système faisant intervenir les déplacements de la phase fluide \vec{u}_f et solide \vec{u}_s :

$$-\omega^2(\rho_{11}\vec{u}_s + \rho_{12}\vec{u}_f) = (P - N)\vec{\nabla}(\text{div}(\vec{u}_s)) + N\Delta\vec{u}_s + Q\vec{\nabla}(\text{div}(\vec{u}_f)) \quad (\text{III.23})$$

$$-\omega^2(\rho_{22}\vec{u}_f + \rho_{12}\vec{u}_s) = R\vec{\nabla}(\text{div}(\vec{u}_f)) + Q\vec{\nabla}(\text{div}(\vec{u}_s)) \quad (\text{III.24})$$

N est le module de cisaillement du matériau poreux, qui s'exprime en fonction du module d'Young E du matériau et de son coefficient de Poisson ν par la relation $N = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

Les autres coefficients élastiques dynamiques P , Q et R dépendent des modules d'incompressibilité dynamique de la phase fluide K_f , de la matière constituant la phase solide K_s , et du matériau en s'affranchissant de l'effet du fluide K_b .

$$P = \frac{(1 - \phi)(1 - \phi - K_b/K_s)K_s + \phi K_s K_b/K_f}{1 - \phi - K_b/K_s + \phi K_s/K_f} + 4/3N \quad (\text{III.25})$$

$$Q = \frac{(1 - \phi - K_b/K_s)\phi K_s}{1 - \phi - K_b/K_s + \phi K_s/K_f} \quad (\text{III.26})$$

$$R = \frac{\phi^2 K_s}{1 - \phi - K_b/K_s + \phi K_s/K_f} \quad (\text{III.27})$$

Les densités dynamiques de Biot ρ_{11} , ρ_{12} et ρ_{22} sont calculées à partir de la masse volumique apparente du matériau ρ_1 et des paramètres visco-inertiels du matériau poreux :

$$\rho_{11} = \rho_1 + \rho_0 \phi (\alpha_\infty - 1) - j\sigma \phi^2 \frac{F(\omega)}{\omega} \quad (\text{III.28})$$

$$\rho_{12} = -\rho_0 \phi (\alpha_\infty - 1) + j\sigma \phi^2 \frac{F(\omega)}{\omega} \quad (\text{III.29})$$

$$\rho_{22} = \rho_0 \phi \alpha_\infty - j\sigma \phi^2 \frac{F(\omega)}{\omega} \quad (\text{III.30})$$

α_∞ est la tortuosité du matériau et F correspond à la fonction de correction de viscosité de Biot pour les effets visco-inertiels (cf. Section 2.2.1).

Dans cette thèse, nous nous appuyons essentiellement sur des modèles dits “fluide-équivalent” reposants sur l’hypothèse de squelette rigide. Nous verrons effectivement dans le Chapitre IV que cette hypothèse est vérifiée pour la majorité des laines, chènevottes et bétons de chanvre testés. Ces modèles vont maintenant être présentés à travers deux catégories : les modèles fluide-équivalent généralisés décrivant le matériau à partir de la géométrie des pores et les autres modèles partant des paramètres du squelette.

2.2 Modèles fluide-équivalent généralisés

Dans un premier temps, nous allons considérer les modèles décrivant le matériau à partir de la géométrie des pores, modèles qui ont intégré, au cours du temps, des formes de pores de plus en plus complexes.

2.2.1 Travaux initiaux dans le cas de pores cylindriques

Les premières modélisations physiques du comportement acoustique dans les milieux poreux sont attribuées à [Zwikker & Kosten 1949]. Les auteurs ont considéré des matériaux constitués

III.2 Vers une description de plus en plus précise des matériaux poreux à simple échelle

de pores cylindriques parallèles de section circulaire, étant ouverts sur l'extérieur mais non interconnectés.

S'inspirant des travaux de [Kirchhoff 1868] selon lesquels les effets thermiques et les effets visco-inertiels sont respectivement décrits par le module d'incompressibilité et la densité dynamique du matériau, Zwikker et Kosten décrivent de façon indépendante ces deux effets de dissipation.

Ils aboutissent ainsi à ce premier système d'équations décrivant le comportement du matériau poreux :

$$\rho = \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} \left[1 - \frac{2}{u\sqrt{-j}} \frac{J_1(u\sqrt{-j})}{J_0(u\sqrt{-j})} \right]^{-1} \quad (\text{III.31})$$

$$K = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[1 + \frac{2(\gamma - 1)}{\sqrt{N_{Pr} u \sqrt{-j}}} \frac{J_1(\sqrt{N_{Pr} u \sqrt{-j}})}{J_0(\sqrt{N_{Pr} u \sqrt{-j}})} \right]^{-1} \quad (\text{III.32})$$

$u = \sqrt{\frac{8\omega\rho_0\alpha_\infty}{\sigma\phi}}$, tandis que J_0 et J_1 sont respectivement les fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1 et N_{Pr} le nombre de Prandtl de l'air.

Ce modèle est basé sur une géométrie simpliste par rapport à des matériaux réels, mais Zwikker et Kosten partent de l'hypothèse que ce modèle peut être adapté aux configurations plus complexes en réinterprétant les paramètres.

Les trois paramètres sont la porosité ϕ , la résistivité σ et la tortuosité α_∞ . La tortuosité est introduite afin de prendre en compte l'augmentation du gradient de pression, et donc de la densité dynamique, qui se manifeste dans le cas de pores inclinés d'un angle θ par rapport à la normale au matériau (Elle vaut alors $1/\cos^2(\theta)$).

Quelques années après Zwikker et Kosten, [Biot 1956b] réalise des travaux similaires sur les matériaux à pores cylindriques. Il utilise toutefois un formalisme différent en introduisant la notion de fonction de correction des effets visqueux notée F . F est complexe et permet de quantifier la différence entre les forces visqueuses à une certaine fréquence, et l'écoulement statique type Poiseuille, son module évolue donc entre 1 à basses fréquences et $+\infty$ à hautes fréquences. La densité dynamique du matériau poreux s'écrivant à partir de cette fonction, bien qu'étant exprimée différemment, est équivalente à celle de Zwikker et Kosten :

$$\rho = \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} \left[1 - j \frac{\sigma \phi}{\rho_0 \alpha_\infty \omega} F(u) \right] \quad (\text{III.33})$$

$$F(u) = -\frac{1}{4} \frac{u \sqrt{-j} T_J(u \sqrt{-j})}{1 - 2 T_J(u \sqrt{-j}) / (u \sqrt{-j})} \quad (\text{III.34})$$

$$T_J(u \sqrt{-j}) = \frac{J_1(u \sqrt{-j})}{J_0(u \sqrt{-j})} \quad (\text{III.35})$$

En outre, Biot remarque qu'une grande analogie existe entre les expressions de cette fonction dans le cas des pores circulaires et des fentes. En particulier, on peut retrouver le comportement de pores type fentes en utilisant un rayon équivalent corrigé valant $4/3a_1$, avec a_1 la demi-ouverture de la fente.

2.2.2 Intégration des effets de forme des pores

Suite aux premiers modèles développés par Zwikker et Kosten et par Biot, de nombreux autres modèles similaires ont vu le jour.

A partir des observations de Biot, [Allard *et al.* 1990] généralisèrent les modèles initialement dédiés aux pores circulaires en introduisant un facteur de forme s , capable de décrire des pores cylindriques de section quelconque. Les expressions de la densité dynamique et du module d'incompressibilité dynamique se réécrivent de cette façon dans le modèle dit de Biot-Allard :

$$\rho = \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} \left[1 - j \frac{\sigma \phi}{\rho_0 \alpha_\infty \omega} F(su) \right] \quad (\text{III.36})$$

$$K = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[\gamma - (\gamma - 1) \left(1 - j \frac{\sigma \phi}{\rho_0 \alpha_\infty N_{Pr} \omega} F\left(\sqrt{N_{Pr}} su\right) \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (\text{III.37})$$

[Attenborough 1987] a présenté un modèle similaire, mais il a été montré que pour donner des prédictions exactes dans le cas de géométries connues (pores triangulaires, rectangulaires...), le facteur de forme utilisé doit être corrigé en fonction de la fréquence [Stinson & Champoux 1991].

La description des effets visco-inertiels a été sensiblement améliorée par les travaux de [Johnson *et al.* 1987] qui, pour décrire de façon exacte le comportement hautes fréquences, ont introduit la notion de longueur caractéristique visqueuse Λ .

[Johnson *et al.* 1987] donnent aussi une définition générale de la tortuosité, correspondant plus exactement à la limite hautes fréquences de la tortuosité dynamique $\frac{\phi \rho}{\rho_0}$.

III.2 Vers une description de plus en plus précise des matériaux poreux à simple échelle

Finalement, la densité dynamique ρ s'exprime ainsi :

$$\rho = \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} \left[1 - j \frac{\sigma \phi}{\rho_0 \alpha_\infty \omega} F_J(\omega) \right] \quad (\text{III.38})$$

$$F_J(\omega) = \sqrt{1 + j \frac{4\mu \alpha_\infty^2 \rho_0 \omega}{\Lambda^2 \sigma^2 \phi^2}} \quad (\text{III.39})$$

La tortuosité d'un matériau poreux, notée α_∞ , a été introduite afin d'expliquer la différence observée entre la perméabilité des matériaux réels et leur modélisation basée sur des pores cylindriques non inclinés. C'est un paramètre qui prend en compte la sinuosité du chemin poreux moyen dans lequel les ondes se propagent. En effet, du fait de la présence de matière, l'onde est contrainte par la géométrie du réseau de pores et est déviée de sa trajectoire normale. Elle est définie pour un matériau par l'Equation III.40.

$$\alpha_\infty = \frac{\frac{1}{V} \int_V v^2 dV}{\left(\frac{1}{V} \int_V \vec{v} dV \right)^2} \quad (\text{III.40})$$

V est un volume élémentaire représentatif du matériau et \vec{v} la vitesse d'écoulement du fluide dans le matériau.

On présente quelquefois le concept de tortuosité par la simplification $\alpha_\infty \approx \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^2$, où l_1 l'épaisseur du matériau suivant la direction de propagation, et l_2 la longueur du trajet poreux moyen suivant cette même dimension. Cette relation illustre les propriétés de la tortuosité qui est par définition supérieure à 1, et converge vers l'unité pour des matériaux très poreux.

La longueur caractéristique visqueuse Λ d'un matériau poreux est un paramètre introduit par [Johnson *et al.* 1987] pour caractériser les effets visco-inertiels à hautes fréquences. Sa définition physique est donnée par l'Equation III.41 :

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int_{S_p} \vec{v}^2 dS_p}{\int_{V_p} \vec{v}^2 dV_p} \quad (\text{III.41})$$

S_p correspond à la surface latérale des pores.

Cette longueur est homogène à une distance, et s'exprime en mètres. En général, dans le cas d'un matériau dont les pores sont de dimension homogène, on se sert de Λ comme estimation du rayon de l'étranglement de ces pores.

2.2.3 Pores à section variable

La description des effets thermiques, dans les modèles d'Attenborough et de Biot-Allard, s'appuie sur le facteur de forme des effets visqueux. [Champoux & Stinson 1992] montrèrent toutefois que, dans le cas de matériaux dont la section des pores varie dans l'épaisseur du matériau, ces modèles ne donnent pas de prédiction satisfaisante.

Effectivement, les effets thermiques sont plus importants au niveau des élargissements de section des pores où la porosité du matériau est concentrée. Les auteurs proposent donc de remplacer s par un second facteur de forme s' dans le module d'incompressibilité dynamique afin de décrire ces effets thermiques.

Puis, reprenant le formalisme de Johnson *et al.*, [Champoux & Allard 1991] introduisent une longueur caractéristique thermique Λ' . Le module d'incompressibilité dynamique devient :

$$K = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[\gamma - (\gamma - 1) \left(1 - j \frac{8\kappa}{\Lambda'^2 C_p \rho_0 \omega} \sqrt{1 + j \frac{\Lambda'^2 C_p \rho_0 \omega}{16\kappa}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (\text{III.42})$$

La longueur caractéristique thermique est définie de façon purement géométrique par l'Equation III.43. Par analogie avec Λ , Λ' donne une estimation de la taille des élargissements des pores. Λ' est par conséquent supérieur ou égal à Λ .

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{\int_{S_p} dS_p}{\int_V dV} \quad (\text{III.43})$$

2.2.4 Dernières corrections analytiques des modèles

Le modèle constitué par les travaux de Johnson *et al.* pour les effets visco-inertiels, et ceux de Champoux et Allard pour les effets thermiques, peut donner des prédictions précises pour une majorité de matériaux poreux à simple échelle. Toutefois, afin de découpler totalement l'analyse des effets thermiques vis-à-vis des effets visco-inertiels, [Lafarge *et al.* 1997] introduisent dans le module d'incompressibilité dynamique un nouveau paramètre : la perméabilité thermique statique Θ_0 . Ils définissent ce paramètre en totale analogie avec la perméabilité visqueuse statique $\Pi_0 = \mu/\sigma$.

Le module d'incompressibilité dynamique s'écrit alors :

$$K = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[\gamma - (\gamma - 1) \left(1 - j \frac{8\kappa}{\Theta_0 C_p \rho_0 \omega} \sqrt{1 + j \frac{4\Theta_0^2 C_p \rho_0 \omega}{\kappa \phi^2 \Lambda'^2}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (\text{III.44})$$

La perméabilité thermique statique Θ_0 correspond à la limite basses fréquences de la perméabilité thermique dynamique Θ . Elle s'exprime par conséquent en m^2 . Physiquement, la perméabilité thermique peut s'interpréter comme la facilité du matériau à être traversé par un flux thermique. Elle est supérieure ou égale à la perméabilité visqueuse Π_0 .

Enfin, notons que [Pride *et al.* 1993, Lafarge 1993] ont apporté deux autres corrections pour les basses fréquences des grandeurs acoustiques à l'aide des paramètres p et p' . Ils permettent respectivement de rendre compte de l'inertie dynamique et thermique du fluide aux basses fréquences.

2.2.5 Fréquences de transition des effets visco-inertiels et thermiques

Comme présenté à la Section 1.2 pour des pores cylindriques circulaires, les effets visqueux et inertiels sont séparés par une fréquence caractéristique notée ω_v . Cette fréquence peut également être définie dans le cas de matériaux à géométrie plus complexe. Avec le modèle de Johnson *et al.*, mais aussi ceux de Biot-Allard et de Zwikker et Kosten, ω_v s'exprime par :

$$\omega_v = \frac{\sigma \phi}{\rho_0 \alpha_\infty} \quad (\text{III.45})$$

De même, pour les effets thermiques, on introduit une fréquence de transition entre les régimes isothermes et adiabatiques. Elle s'écrit dans le cas du modèle de Lafarge *et al.* :

$$\omega_t = \frac{\kappa \phi}{\Theta_0 \rho_0 C_p} \quad (\text{III.46})$$

2.3 Modèles adaptés à la microstructure du squelette

Un second type d'approche a été largement développé afin de décrire le comportement acoustique d'un poreux, s'appuyant sur une description non plus de la géométrie des pores, mais de la géométrie du squelette. Dans ce cas, on ne considère plus des paramètres tels que la taille des pores, mais uniquement des paramètres relatifs à la microstructure du squelette.

La microstructure des matériaux poreux se différencie grandement selon la catégorie à laquelle appartient le matériau : réticulaire, granulaire ou fibreux. Par conséquent, les modèles élaborés suivant cette approche descriptive du squelette sont très différents d'une catégorie à l'autre.

Les granulaires et fibreux se distinguent particulièrement de la première catégorie car ils résultent d'un assemblage de plusieurs particules, et sont caractérisés par un squelette discontinu. Ce dernier peut alors être décrit plus facilement, à partir des dimensions et formes des particules (granulats ou fibres).

Enfin, les deux descriptions possibles, à partir des pores et à partir du squelette, ne sont pas cloisonnées. Elles sont intimement liées par des relations de passage entre les paramètres relatifs aux pores à ceux relatifs au squelette.

2.3.1 Approche micro-macro

De nombreux travaux ont permis d'établir un lien entre les grandeurs acoustiques macroscopiques et les paramètres microscopiques en s'appuyant sur des méthodes de résolution numérique. La procédure est présentée dans [Perrot 2006] comme étant la suivante :

1. La géométrie du squelette est idéalisée, et est décrite par ses caractéristiques géométriques (dimensions des fibres ou cellules, diamètre des pores ...),
2. Des simulations en éléments finis sont réalisées afin de déterminer les limites asymptotiques du champ de vitesse acoustique au sein de la géométrie considérée,
3. Les paramètres acoustiques tels que σ , α_∞ et Λ sont alors déterminés par intégration du champ de vitesse sur le volume représentatif correspondant à la géométrie, à l'aide respectivement des Equations I.12, III.40 et III.41. D'autres paramètres tels que ϕ et Λ' sont calculés directement, connaissant les volumes et surfaces des phases fluides et solides.
4. Les paramètres acoustiques sont finalement utilisés dans les modèles fluide-équivalent présentés Section 2.2.

Ce type d'approche est particulièrement instructif, permettant d'identifier et d'optimiser de façon indépendante les effets dus à chacune des caractéristiques géométriques du matériau. Cela n'est pas possible en travaillant uniquement à partir des paramètres acoustiques, ces derniers dépendant généralement de plusieurs paramètres microscopiques. On peut citer par exemple les travaux de [Perrot *et al.* 2008], considérant un arrangement hexagonal de fibres, qui ont permis de mettre en évidence l'influence de la section des fibres, de leur écartement, et de la taille des pores sur l'absorption acoustique. Cette analyse a permis en outre de remonter

aux configurations de fibres conduisant à une absorption optimale. Cette approche a également été appliquée à des mousses métalliques perforées [Chevillotte *et al.* 2010], et a permis de comprendre l'impact de la taille des pores et des perforations sur l'absorption acoustique.

Toutefois, ce type de modélisation, que l'on peut qualifier d'approche micro-macro hybride numérique/semi-phénoménologique, présente deux inconvénients majeurs. Les modélisations nécessitent d'une part de mettre en œuvre des calculs relativement lourds. D'autre part, il est nécessaire de pouvoir identifier une cellule représentative, et de la décrire par ses caractéristiques géométriques. Ce second point pose problème dans le cas des matériaux à base végétale, l'origine naturelle apportant une grande variabilité aux fibres ou granulats constituant le squelette comme nous l'avons vu par exemple avec la granulométrie de la chènevotte. Si cette non-régularité apporte une richesse pour les propriétés acoustiques, elle rend difficile l'identification des paramètres clés.

Dans cette thèse, nous prenons donc le parti d'une approche macro-micro, permettant de mettre en évidence, *a posteriori*, les paramètres microscopiques et les relations existant entre ces paramètres microscopiques et les paramètres acoustiques.

2.3.2 Modèles fibreux

Les modèles initialement développés pour les matériaux fibreux ont principalement été de nature empirique, décrivant les propriétés acoustiques à partir d'un paramètre clé : la résistivité.

Le modèle empirique de [Delany & Bazley 1970] est ainsi resté une référence pour les matériaux fibreux ayant porosité proche de 1. Ses expressions sont données aux Equations III.47 et III.48 et sont valables pour des matériaux fibreux dont la porosité est proche de 1 et la résistivité vérifie $0,01 < \rho_0 f / \sigma < 1,00$. Le modèle de Delany-Bazley est principalement basé sur le comportement d'échantillons de laines minérales (laines de verre et laines de roche) dont les diamètres de fibres sont généralement compris entre 1 et 10 μm . Il a fait l'objet d'adaptations pour des matériaux de type mousse [Dunn & Davern 1986, Wu 1988], et pour une plus grande gamme fréquentielle [Mechel 1976]. D'autre part, une correction a été apportée par [Miki 1990] afin que les prédictions des modèles restent cohérentes d'un point de vue physique dans le cas de structures multicouches.

$$Zc = \rho_0 c_0 \left[1 + 0,057 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.754} - j0,087 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] \quad (\text{III.47})$$

$$k = \frac{w}{c_0} \left[1 + 0,0978 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.700} - j0,189 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right] \quad (\text{III.48})$$

Chapitre III. Phénomènes de dissipation acoustique dans un matériau poreux

D'autres modèles empiriques ont été développés par [Voronina 1994, Voronina 1995], en faisant intervenir à la fois la résistivité et la porosité ϕ du matériau, et ont permis de souligner le rôle significatif de la taille des fibres sur les propriétés acoustiques.

Le modèle de [Garai & Pompoli 2005] découle de ce constat, et a permis d'adapter les prédictions de Delany et Bazley à des fibres de diamètres supérieurs. Les nouvelles relations empiriques sont données Equations III.49 et III.50. En effet, dans le cas de fibres de polyester, Garai et Pompoli constatent que les prédictions du modèle de Delany et Bazley ne sont pas satisfaisantes. Ils décident donc de développer ce nouveau modèle sur la base de 38 échantillons différents, constitués de fibres de polyester de diamètre compris entre 18 et 48 μm et d'environ 55 mm de longueur. Dans ce second modèle, aucune restriction n'est donnée en termes de fréquences. Toutefois, [Oldham *et al.* 2011] remarquent que les comparaisons sont faites avec l'expérimental sur la gamme $0,05 < \rho_0 f / \sigma < 8,4$ et que les modélisations sont peu satisfaisantes pour les fréquences minimales et maximales de cette gamme. Notons que les fibres de chanvre présentent des caractéristiques similaires aux fibres de polyester, et que le modèle de Garai et Pompoli semble leur être particulièrement bien adapté.

$$Zc = \rho_0 c_0 \left[1 + 0,078 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.623} - j0,074 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.660} \right] \quad (\text{III.49})$$

$$k = \frac{w}{c_0} \left[1 + 0,121 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.53} - j0,159 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.571} \right] \quad (\text{III.50})$$

Une description des matériaux fibreux a été réalisée par Tarnow à l'aide d'une méthode auto-cohérente appliquée à des fibres parallèles de même rayon r , placées de façon régulière ou aléatoire dans l'espace. Il s'est intéressé aux cas d'un flux parallèle (noté //), et perpendiculaire (noté \perp), par rapport aux fibres, en s'appuyant sur les polygones de Voronoï. Il a dérivé des relations pour les résistivités correspondantes dans [Tarnow 1996a], ainsi que des relations analytiques itératives pour la densité dynamique [Tarnow 1997] et le module d'incompressibilité dynamique [Tarnow 1996b] du matériau.

Dans les modèles développés pour les matériaux fibreux, le lien micro-macro est souvent établi par une relation entre la résistivité, le rayon des fibres et la porosité. On identifie donc les paramètres microscopiques des fibreux comme étant le rayon des fibres R_f , et la masse volumique de squelette $\rho_{squelette}$ de ces dernières (directement liée à la porosité par la relation $\phi = 1 - \rho_v / \rho_{squelette}$). Les relations issues de la littérature sont synthétisées dans le Tableau III.3. On note en particulier que tous les modèles sont des fonctions de $1/R_f^2$. Dans les cas

III.2 Vers une description de plus en plus précise des matériaux poreux à simple échelle

où la résistivité est fonction de la masse volumique apparente, pour les modèles de Bies et Hansen ou de Garai et Pompoli, les expressions ont été ré-exprimées en fonction de la porosité, considérant des masses volumiques de squelette de respectivement 2600 kg.m^{-3} et 1350 kg.m^{-3} , correspondant aux matériaux étudiés par ces auteurs [Oldham *et al.* 2011].

Auteurs	Modèle
[Mechel 1976] $R_f \in [3;5] \mu m$	$\sigma = 10,56\mu \frac{(1-\phi)^{1,531}}{R_f^2 \phi^3}$
[Mechel 1976] $R_f \in [10;15] \mu m$	$\sigma = 6,8\mu \frac{(1-\phi)^{1,296}}{R_f^2 \phi^3}$
[Bies & Hansen 1980]	$\sigma = 7,25\mu \frac{(1-\phi)^{1,53}}{R_f^2}$
[Garai & Pompoli 2005] $R_f \in 10\text{-}25 \mu m$	$\sigma = 9,55\mu \frac{(1-\phi)^{1,404}}{R_f^2}$
[Tarnow 1996a] // (idéal)	$\sigma = 4\mu \frac{1-\phi}{R_f^2 [\ln(1/(1-\phi)) - 1,500 + 2(1-\phi)]}$
[Tarnow 1996a] // (aléatoire)	$\sigma = 4\mu \frac{1-\phi}{R_f^2 [1,280 \ln(1/(1-\phi)) - 1,474 + 2(1-\phi)]}$
[Tarnow 1996a] \perp (idéal)	$\sigma = 4\mu \frac{1-\phi}{R_f^2 [\ln((1-\phi)^{-1/2}) - 0,750 + (1-\phi) - 0,250(1-\phi)^2]}$
[Tarnow 1996a] \perp (aléatoire)	$\sigma = 4\mu \frac{1-\phi}{R_f^2 [0,640 \ln(1/(1-\phi)) - 0,737 + (1-\phi)]}$

Tableau III.3 – Modèles de résistivité de la littérature pour les matériaux fibreux.

2.3.3 Modèles granulaires

Les matériaux granulaires ont longtemps été décrits à l'aide des modèles présentés à la Section 2.2, en considérant comme paramètres d'entrée les caractéristiques du réseau poreux. Dans ce contexte, de nombreuses relations entre les paramètres microscopiques des granulates et les paramètres acoustiques ont été développées. [Attenborough 1993] établit ainsi des relations reliant d'une part la résistivité à la dimension des granulates et porosité du matériau, et d'autre part, la tortuosité à la porosité, faisant intervenir un facteur de forme n .

Des particules non-sphériques ont également été étudiées par [Comiti & Renaud 1988]. Dans ce cas, il est montré que la forme des particules est prise en compte par un facteur de forme p dépendant de la longueur e et de la dimension de la section a de ces particules.

Chapitre III. Phénomènes de dissipation acoustique dans un matériau poreux

Les travaux de [Prieur du Plessis & Woudberg 2008] ont permis d'établir une autre expression de la résistivité. Il s'agit d'une validation théorique de l'équation d'Ergun souvent utilisée dans le domaine de la chimie et des poudres afin de prédire la variation de pression de part et d'autre de particules. Cette équation a été généralisée par Prieur du Plessis et Woudberg à toute la gamme de porosités pour des particules de bois, en s'appuyant sur un modèle auto-cohérent de motif cubique.

Voronina et Horoshenkov ont développé pour leur part, un modèle empirique fournissant une description complète des matériaux granulaires [Voronina & Horoshenkov 2003]. La limite basses fréquences de leur modèle conduit à une autre équation pour la résistivité.

Umnova *et al.* et Boutin et Geindreau ont proposé deux modélisations théoriques des milieux granulaires. [Umnova *et al.* 2000] considèrent un mélange de particules sphériques de même rayon R_p . Ces particules correspondent à une fraction volumique Φ d'une cellule sphérique de rayon b . Ils aboutissent par homogénéisation auto-cohérente à l'Equation III.51 pour la densité dynamique.

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \frac{1 - \phi}{\phi} \left(1 + \frac{3}{2} (\Phi^{-1} - 1) \frac{A_1 e^{2s(\Phi^{-1/3} - 1)} + A_2}{B_1 e^{2s(\Phi^{-1/3} - 1)} - B_2} \right) \right] \quad (\text{III.51})$$

$$A_1 = (s\Phi^{-1/3} - 1)(s^2 + 3s + 3) \quad (\text{III.52})$$

$$A_2 = (s\Phi^{-1/3} + 1)(s^2 - 3s + 3) \quad (\text{III.53})$$

$$B_1 = (s\Phi^{-1/3} - 1)(-s^2(\Phi^{-1} - 1) + 3s + 3) \quad (\text{III.54})$$

$$B_2 = (s\Phi^{-1/3} + 1)(s^2(\Phi^{-1} - 1) + 3s - 3) \quad (\text{III.55})$$

Dans ce modèle, $s = \sqrt{\frac{\rho_0 \omega}{j\mu} R_p^2}$ et $\Phi = \left(\frac{R_p}{b}\right)^3$. Cependant, Umnova *et al.* doivent ajuster la fraction volumique Φ (normalement $1 - \phi$) à $\frac{3}{\sqrt{2\pi}}(1 - \phi)$ afin d'obtenir plus de précision vis-à-vis des prédictions numériques de résistivité.

Dans [Boutin & Geindreau 2010], la cellule d'homogénéisation considérée est aussi sphérique de rayon R_p/β , β étant un paramètre compris entre 0 et 1. Ils aboutissent, en utilisant à la fois les outils de l'homogénéisation auto-cohérente et de l'homogénéisation des structures périodiques, à une description complète du matériau granulaire, donnée par les Equations III.56 et III.57, reposant sur les deux paramètres R_p et β . Trois conditions aux limites sont considérées pour cette cellule, une en pression notée p (la contrainte dans le fluide à la frontière de la cellule correspond à la pression du milieu équivalent dit de Darcy), une en flux notée v (la vitesse à l'échelle microscopique correspond à la vitesse d'écoulement du milieu équivalent de Darcy) et une dernière en irrotationnel notée c (l'écoulement devient irrotationnel à la frontière de la

III.2 Vers une description de plus en plus précise des matériaux poreux à simple échelle

cellule).

$$\rho = \frac{\mu}{j\omega\delta_v^2} \left[1 - \frac{3}{x_v^2} \frac{Ax_v + B \tanh(x_v(\beta - 1))}{ax_v + b \tanh(x_v(\beta - 1))} \right] \quad (\text{III.56})$$

$$K = \frac{\gamma p_0}{\phi} \left[\gamma - j\omega\rho_0(\gamma - 1) \frac{C_p \delta_t^2 \Theta}{\kappa\phi} \right]^{-1} \quad (\text{III.57})$$

La perméabilité thermique dynamique Θ vaut :

$$\Theta = 1 - \beta^3 + 3 \frac{\beta^2}{x_t} \left(\frac{1 + x_t \tanh(x_t(\beta - 1))}{x_t + \tanh(x_t(\beta - 1))} - 1 \right) \quad (\text{III.58})$$

Les paramètres A , B , a et b dépendent de la fréquence et sont donnés pour l'approche en pression p par les équations suivantes :

$$A = (3 + (\beta x_v)^2)(1 + x_v^2/6) - 3\beta(1 + x_v^2/2) \quad (\text{III.59})$$

$$B = (3 + (\beta x_v)^2)(1 + x_v^2/2) - 3\beta x_v^2(1 + x_v^2/6) \quad (\text{III.60})$$

$$a = \frac{3 + (\beta x_v)^2}{3} - 3\beta - (1 + x_v^2/6) \frac{2}{\beta} + \frac{4}{\cosh(x_v(\beta - 1))} \quad (\text{III.61})$$

$$b = (3 + (\beta x_v)^2) - \beta x_v^2 - (1 + x_v^2/2) \frac{2}{\beta} \quad (\text{III.62})$$

$\delta_v = \sqrt{\frac{\mu}{j\omega\rho_0}}$ et $\delta_t = \sqrt{\frac{\kappa}{j\omega\rho_0 C_p}}$ sont respectivement les épaisseurs de couche limite visqueuse et thermique. $x_v = \frac{R_p}{\beta\delta_v}$, $x_t = \frac{R_p}{\beta\delta_t}$ et β peut être relié à la porosité par $\beta = (1 - \phi)^{1/3}$.

Umnova *et al.* et Boutin et Geindreau ont également mis en évidence des relations de passage entre les paramètres de base des milieux granulaires et les paramètres acoustiques classiques. Ces relations sont données dans les Tableaux III.4 à III.6.

Les propriétés acoustiques des matériaux granulaires sphériques sont donc complètement décrites à partir du rayon des granulats R_p et de la porosité ϕ . Toutefois, force est de constater que dans le cas de granulats non sphériques, peu de relations ont été développées, les adaptations étant réalisées moyennant l'introduction de facteurs de forme déterminés empiriquement.

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre II, la forme des particules de chanvre est plus proche du parallélépipède que de la sphère et a de grandes incidences sur les propriétés acoustiques. D'autres approches ont été réalisées sur des granulats de type disque, elliptique ou parallélépipédique [Malinouskaya *et al.* 2009] en s'appuyant sur des prédictions numériques du champ de vitesse. Il a alors été montré que d'autres paramètres géométriques peuvent être

Auteurs	Modèle
[Attenborough 1993]	$\sigma = \frac{27\mu}{R_p^2} \frac{(1-\phi)^2}{\phi^{3.5}}$
[Prieur du Plessis & Woudberg 2008]	$\sigma = \frac{A\mu(1-\phi)^2}{(\frac{4}{3}\pi)^{2/3} R_p^2 \phi^3}$
	$A = \frac{25.4\phi^3}{(1-\phi)^{2/3}(1-(1-\phi)^{1/3})(1-(1-\phi)^{2/3})^2}$
[Voronina & Horoshenkov 2003]	$\sigma = \frac{100\mu(1-\phi)^2(1+\phi)^5}{\phi R_p^2}$
[Umnova <i>et al.</i> 2000]	$\sigma = \frac{9\mu}{2 \frac{\phi^2}{(1-\phi)(1-\Phi)\Omega} R_p^2}$
	$\Omega = \frac{5}{5-9\Theta^{1/3}+5\Theta-\Theta^2} \quad \Phi = \frac{3}{\sqrt{2}\pi}(1-\phi)$
[Boutin & Geindreau 2010] _p	$\sigma = \frac{3\beta^2\mu}{(-1+\frac{2+3\beta^5}{\beta(3+2\beta^5)})R_p^2} \quad \beta = (1-\phi)^{1/3}$
[Boutin & Geindreau 2010] _v	$\sigma = \frac{18\beta^2\mu}{(4\frac{1-\beta}{\beta}-5\frac{(1-\beta^2)^2}{1-\beta^5})R_p^2}$
[Boutin & Geindreau 2010] _c	$\sigma = \frac{45\beta^2\mu}{2\frac{5-9\beta+5\beta^3-\beta^6}{\beta}R_p^2}$

Tableau III.4 – Modèles de résistivité de la littérature pour les matériaux granulaires.

Auteurs	Modèle
[Attenborough 1993]	$\alpha_\infty = \phi^{-n}$
[Comiti & Renaud 1988]	$\alpha_\infty = (1 - p \ln(\phi))^2 \quad p = e^{-0.55+0.18\frac{e}{a}}$
[Umnova <i>et al.</i> 2000]	$\alpha_\infty = 1 + \frac{1-\phi}{2\phi}$
[Boutin & Geindreau 2010]	$\alpha_\infty = \frac{3-\phi}{2}$

Tableau III.5 – Modèles de tortuosité de la littérature pour les matériaux granulaires.

III.3 Modélisation des matériaux poreux multi-échelles

Auteurs	Modèle
[Umnova <i>et al.</i> 2000]	$\Lambda = \frac{4(1-\Phi)\phi\alpha_\infty}{9(1-\phi)} R_p$
[Boutin & Geindreau 2010] _{pc}	$\Lambda = \frac{4\phi\alpha_\infty}{9(1-\phi)} R_p$
[Boutin & Geindreau 2010] _v	$\Lambda = \frac{4\phi\alpha_\infty}{9(1-\phi)} \frac{1}{1+\beta^4} R_p$
[Boutin & Geindreau 2010]	$\Lambda' = \frac{2\phi}{3(1-\phi)} R_p$
[Boutin & Geindreau 2010]	$\Theta_0 = \frac{(5-9\beta+5\beta^3-\beta^6)R_p^2}{15(1-\beta^3)\beta^3}$

Tableau III.6 – Modèles de longueurs caractéristiques visqueuse et thermique et de perméabilité thermique de la littérature pour les matériaux granulaires.

utilisés afin de prédire les paramètres acoustiques, comme par exemple le facteur de sphéricité des particules égal au ratio S_v/S , S_v étant la surface de la sphère de même volume que la particule, et S la surface de la particule. Un des enjeux du Chapitre IV est donc de mettre en évidence les paramètres géométriques fondamentaux qui gouvernent les propriétés acoustiques des chènevottes.

3 Modélisation des matériaux poreux multi-échelles

L'utilisation des modèles mentionnés dans la Section 2.2 nécessite que le matériau soit à "simple échelle". Si ce n'est pas le cas, pour des matériaux dits "multi-échelles" dont les tailles de pores sont distribuées autour de plusieurs dimensions caractéristiques, d'autres modèles présentés dans les paragraphes suivants peuvent être utilisés.

3.1 Modèles prenant en considération les distributions de taille de pores

[Yamamoto & Turgut 1998, Horoshenkov *et al.* 2007] se sont intéressés à des matériaux caractérisés par un ensemble de pores de dimension s , distribuée entre un minimum s_{min} et un maximum s_{max} . On note $E(s)$ la fonction de distribution de taille de pores; $E(s)$ est égal à la proportion volumique que représentent les pores d'une dimension inférieure ou égale à s . La fonction de densité de probabilité $e(s)$ associée à s est alors $e(s) = dE(s)/ds$.

3.1.1 Distribution arbitraire

Dans le cas d'une distribution quelconque, les propriétés acoustiques s'expriment à partir de la fonction de densité de probabilité $e(s)$. La densité dynamique et le module d'incompressibilité dynamique sont exprimés à partir de la fonction de correction de la viscosité F par les Equations III.63 et III.64 [Horoshenkov *et al.* 2007].

$$\rho = \frac{\alpha_\infty}{\phi} \left[\rho_0 + \frac{\sigma\phi}{j\omega\alpha_\infty} F(\omega) \right] \quad (\text{III.63})$$

$$K = \frac{\gamma p_0}{\phi} \left[\gamma - \frac{\rho_0(\gamma - 1)}{\rho_0 + \frac{\sigma\phi}{jN_{Pr}\omega\alpha_\infty} F(N_{Pr}\omega)} \right]^{-1} \quad (\text{III.64})$$

Avec :

$$F(\omega) = -\frac{j\omega\rho_0\alpha_\infty I(\omega)}{\sigma\phi(1 - I(\omega))} \quad (\text{III.65})$$

$$I(\omega) = 1 - \frac{j\omega\rho_0}{\mu} \int_0^{+\infty} s^2 e(s) \bar{\xi} \left(\sqrt{-j} \sqrt{\frac{\rho_0\omega}{\mu}} s \right) ds \quad (\text{III.66})$$

Comme le montrent les Equations III.65 et III.66, F dépend à la fois de la distribution de taille des pores et d'une fonction $\bar{\xi}$ dépendant de la forme des pores. Il suffit alors pour utiliser ce modèle de choisir la forme qui se rapproche le plus des pores du matériau (circulaire, triangulaire, fente) et de caractériser la distribution de taille de pores.

3.1.2 Distribution log-normale

Une distribution log-normale est investiguée par [Horoshenkov *et al.* 2007]. Une distribution de pores est dite log-normale si le logarithme de la dimension considérée, $\psi = -\log_2(s)$, suit une loi de distribution normale, et est complètement décrit par sa moyenne $\bar{\psi}$ et son écart type σ_s .

La fonction de densité de probabilité associée à la loi log-normale est donnée par :

$$e(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} e\left(-\frac{(\psi-\bar{\psi})^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (\text{III.67})$$

Dans ce cadre bien précis, [Horoshenkov *et al.* 2007] ont développé les Equations III.65 et III.66, puis recherché les limites asymptotiques basses et hautes fréquences de la fonction de

III.3 Modélisation des matériaux poreux multi-échelles

viscosité F . Ils ont alors construit une approximation de F basée sur ces limites basses et hautes fréquences à l'aide d'un approximant de Padé. La fonction approximée \tilde{F} est donnée dans l'Equation III.68.

$$\tilde{F}(\omega) = \frac{1 + \theta_3 \epsilon(\omega) + \theta_1 \epsilon(\omega)^2}{1 + \theta_3 \epsilon(\omega)} \quad (\text{III.68})$$

$$\epsilon(\omega) = \sqrt{\frac{j\omega\rho_0\alpha_\infty}{\sigma\phi}} \quad (\text{III.69})$$

Les paramètres θ_1 et θ_3 sont des facteurs de forme dépendant de la géométrie des pores. Ils ont été évalués pour trois formes caractéristiques : circulaire, triangulaire et fente. On suppose dans cette thèse une forme circulaire de pores de telle sorte que $\theta_1 = (4/3)e^{4d^2} - 1$, $\theta_2 = (1/\sqrt{2})e^{3d^2/2}$ avec $d = \sigma_s \log(2)$ et $\theta_3 = \frac{\theta_1}{\theta_2}$.

Par rapport au modèle de distribution quelconque de taille de pores, ce modèle présente l'avantage d'être très simple d'utilisation, car la distribution de taille de pores est uniquement décrite par l'écart-type σ_s . De plus, il s'avère que la taille de pores de nombreux matériaux poreux, tout particulièrement des matériaux granulaires, peut être décrite de façon satisfaisante par ce genre de distribution [Horoshenkov *et al.* 2007].

Enfin, dans le cas d'un matériau ayant des pores de forme circulaire, [Horoshenkov 1996] a établi une relation permettant d'évaluer la résistivité à partir du rayon des pores r et des Equations III.70 et III.71, où r_{eff} est la dimension des pores homogènes équivalents.

$$\sigma = \frac{8\alpha_\infty\mu}{\phi r_{eff}^2} \quad (\text{III.70})$$

$$r_{eff}^2 = \int_0^{+\infty} r^2 e(r) dr = \bar{r}^2 e^{2d^2} \quad (\text{III.71})$$

Ce modèle peut être particulièrement adapté à la description de la chènevotte, car, comme cela a été mis en évidence dans le Chapitre II, les distributions des dimensions des particules de chanvre sont très proches de distributions log-normales. Cela conduit à suggérer que la distribution de taille de pores est aussi log-normale d'après [Hwang & Choi 2006]. L'approche log-normale a donc été appliquée aux chènevottes avec l'objectif de comprendre l'articulation entre la distribution de taille de particules et la distribution de taille de pores. Les résultats obtenus sont présentés en Annexe 9.

3.2 Théorie de la double-porosité

Des distributions de taille de pores ont fait l'objet de développements particuliers, notamment dans le cas où deux dimensions caractéristiques de pores existent dans un matériau, qualifié alors de matériau "à double porosité".

3.2.1 Définitions

La double porosité a été décrite par les méthodes d'homogénéisation des structures périodiques [Sanchez-Palencia 1980]. On doit à [Olny & Boutin 2003] son application au cas de l'acoustique.

Dans un milieu à double porosité, on appelle les grands pores des mésopores, on y fait référence avec l'indice p ; et on appelle les petits pores des micropores, d'indice m . Le matériau global, d'indice dp , est assimilable à un matériau doté de mésopores et dont le squelette est doté de micropores, et est illustré par la Figure III.3.

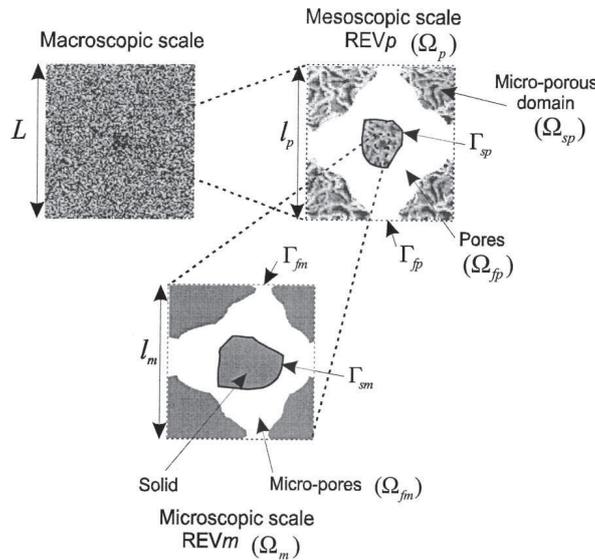


Figure III.3 – Représentation d'un milieu à double porosité [Olny & Boutin 2003]

La théorie développée par Olny et Boutin repose sur les hypothèses suivantes :

- la longueur d'onde doit être plus grande que les hétérogénéités à l'échelle des pores dans la gamme fréquentielle étudiée,
- le domaine constitué par les micropores doit être suffisamment perméable aux ondes acoustiques,
- la séparation d'échelles doit être suffisamment importante entre les dimensions caractéristiques des pores l_p et des micropores l_m , c.-à-d. $l_p/l_m > 10$.

Deux cas sont alors distingués suivant le contraste de perméabilité existant entre les réseaux microscopiques et mésoscopiques : les cas de faible et de fort contraste présentés dans les paragraphes suivants.

3.2.2 Cas de faible contraste de perméabilité

Dans le cas où les dimensions mésoscopiques et microscopiques sont telles que $l_p/l_m \approx 10$, le contraste de perméabilité entre les deux milieux est dit faible. Les propriétés acoustiques du milieu à double porosité (ρ_{dp}, K_{dp}) sont déduites de celles des réseaux de pores microscopiques (ρ_p, K_p) et mésoscopiques (ρ_m, K_m) grâce aux Equations III.72 et III.73.

$$\rho_{dp} = \left[\frac{1}{\rho_p} + (1 - \phi_p) \frac{1}{\rho_m} \right]^{-1} \quad (\text{III.72})$$

$$K_{dp} = \left[\frac{1}{K_p} + (1 - \phi_p) \frac{1}{K_m} \right]^{-1} \quad (\text{III.73})$$

Ces équations montrent que dans le contexte de faible contraste, les deux réseaux de pores agissent en parallèle. Pour les effets visco-inertiels, [Oly & Boutin 2003] montrent que la présence des micropores se manifeste uniquement pour les hautes fréquences, au-delà de la fréquence caractéristique visco-inertielle ω_{vp} du domaine mésoporeux, par une augmentation de la perméabilité.

3.2.3 Cas de fort contraste de perméabilité

En revanche, si les dimensions des réseaux de pores sont très différentes, telles que $l_p/l_m \approx 1000$, le matériau à double porosité est caractérisé par un phénomène qui n'existe pas dans les matériaux à simple échelle. Les propriétés acoustiques données aux Equations III.74 et III.75 font en effet intervenir une fonction de diffusion de pression F_d qui donne lieu à trois situations suivant la fréquence.

$$\rho_{dp} = \left[\frac{1}{\rho_p} + (1 - \phi_p) \frac{1}{\rho_m} \right]^{-1} \quad (\text{III.74})$$

$$K_{dp} = \left[\frac{1}{K_p} + (1 - \phi_p) \frac{F_d \left(\omega \frac{P_0}{\phi_m K_m} \right)}{K_m} \right]^{-1} \quad (\text{III.75})$$

Avec :

$$F_d(\omega) = 1 - j \frac{\omega}{\omega_d} \frac{D(\omega)}{D(0)} \quad (\text{III.76})$$

$$D(\omega) = \frac{D(0)}{j \frac{\omega}{\omega_d} + \left(1 + j \frac{M_d \omega}{2 \omega_d}\right)^{1/2}} \quad (\text{III.77})$$

$D(0)$ est la valeur statique de $D(\omega)$ pouvant être estimée par la relation $D(0) = O\left((1 - \phi_p)l_p^2\right)$, et ω_d est la fréquence caractéristique des effets de diffusion de pression :

$$\omega_d = \frac{(1 - \phi_p)P_0}{\phi_m \sigma_m D(0)} \quad (\text{III.78})$$

M_d est un facteur de forme défini par $M_d = \frac{8D(0)}{\Lambda_d^2(1-\phi_p)}$ où $\Lambda_d = \frac{2V_{sp}}{S_{sp}}$ avec V_{sp} le volume occupé par le domaine mésoporeux et S_{sp} l'aire de l'interface entre les milieux microporeux et mésoporeux à l'échelle d'un volume représentatif mésoscopique.

Les situations rencontrées sont les suivantes :

- aux basses fréquences, pour $\omega \ll \omega_d$, tout se passe comme dans le cas d'un faible contraste de perméabilité, la pression est uniforme dans le matériau, la fonction de diffusion de la pression F_d étant alors égale à 1,
- aux fréquences voisines de ω_d , un phénomène de diffusion de pression des pores vers les micropores intervient, ce qui entraîne un déphasage entre les pressions à l'échelle des micropores et des mésopores, et par conséquent une dissipation supplémentaire,
- à hautes fréquences, lorsque $\omega \gg \omega_d$, la pression devient nulle dans les micropores et ces derniers ne participent plus à la dissipation acoustique, F_d est alors égale à 0.

Les phénomènes qui ont lieu autour de ω_d sont d'un grand intérêt, dans la mesure où ils entraînent une augmentation significative de l'absorption acoustique par rapport au milieu microporeux. Ils ont été investigués dans [Olny 1999, Sgard *et al.* 2005] en développant des matériaux poreux perforés, pouvant être qualifiés de double poreux artificiels.

Toutefois, les matériaux à double porosité naturelle ont rarement été étudiés en acoustique. Cette configuration se rencontre avec des mousses réticulées [Jaouen & Becot 2010, Pispola *et al.* 2007]. Les pores de la mousse testée par Jaouen et Becot sont caractérisés par les dimensions $l_m \approx 3\mu m$ et $l_p \approx 16\mu m$. Le modèle a alors été appliqué avec succès en faible contraste de perméabilité. [Pispola *et al.* 2007] ont appliqué la théorie de la double porosité à des mousses extrudées à partir de déchets textiles, et ont comparés les prédictions de ce modèle à celles obtenues grâce

au modèle de distribution arbitraire de taille de pores. Il a ainsi été mis en évidence que les deux approches peuvent être appliquées sur certaines catégories de matériaux, et donner des prédictions fidèles aux propriétés mesurées sur la mousse.

La double porosité a ensuite été étudiée par [Venegas & Umnova 2011] au sein des matériaux granulaires. Les deux cas de contraste sont étudiés successivement en décrivant les propriétés acoustiques de la perlite expansée (faible contraste) et du charbon actif (fort contraste). La théorie de la double porosité prédit de façon satisfaisante les propriétés acoustiques des granulaires poreux. Un phénomène reste toutefois inexpliqué pour le charbon actif dont la partie réelle du module d'incompressibilité dynamique est inférieure à la limite théorique donnée par le modèle. Ces travaux ont également mis en évidence une nette augmentation de l'absorption acoustique aux basses fréquences due à l'existence des micropores.

Tous les matériaux étudiés dans le cadre de cette thèse sont caractérisés par deux voire trois tailles de pores caractéristiques. La théorie de la double porosité est par conséquent l'outil fondamental sur lequel on va s'appuyer dans la suite afin de comprendre les mécanismes de dissipation au sein des laines végétales, des chènevottes et des bétons de chanvre. Cette thèse constitue en outre une ouverture intéressante de la théorie de la double porosité à de nouvelles catégories de matériaux. La question des propriétés acoustiques des fibres poreuses n'a par exemple jamais été posée auparavant, à notre connaissance.

4 Modélisation des matériaux multicouches

Nous avons vu dans ce chapitre que les propriétés acoustiques des matériaux poreux homogènes peuvent être prédites à partir de paramètres descriptifs de la géométrie des pores ou du squelette (cas des modèles fluide-équivalent), et descriptifs des propriétés structurelles du squelette (cas des modèles poroélastiques), grâce à des modèles semi-phénoménologiques ou empiriques.

Les propriétés acoustiques des matériaux à structure multicouche peuvent elles aussi être prédites, mais leur calcul s'avère automatiquement plus compliqué dans la mesure où les propriétés de toutes les couches doivent être prises en compte ainsi que le couplage entre les couches successives. Une méthode a été développée afin de décrire ce type de matériaux à l'aide d'une matrice de transfert résultant des propriétés de l'ensemble des couches. Les matériaux composés de couches fluide-équivalent, élastique, poroélastique ont été successivement traités grâce aux contributions de [Brekhovskikh 1960, Folds & Loggins 1977, Scharnhorst 1983, Brouard *et al.* 1995]. A l'heure actuelle, cette méthode fait toujours l'objet de travaux dans le

but d'intégrer de nouvelles configurations telles que les plaques perforées [Atalla & Sgard 2007].

4.1 Principe

Nous nous appuyons dans cette thèse sur la méthode de la matrice de transfert décrite dans [Allard & Atalla 2009]. Nous considérons une structure composée de n couches supposées homogènes, isotropes, et de dimensions latérales infinies. La structure multicouche est représentée à la Figure III.4. On décrit le champ acoustique existant en tout point M du matériau, en réponse à une onde plane d'incidence θ , par un vecteur $\mathbf{V}(M)$ et on définit pour chaque couche i une matrice de transfert $[T_i]$ telle que :

$$\mathbf{V}(M_{2i-1}) = [T_i]\mathbf{V}(M_{2i}) \quad (\text{III.79})$$

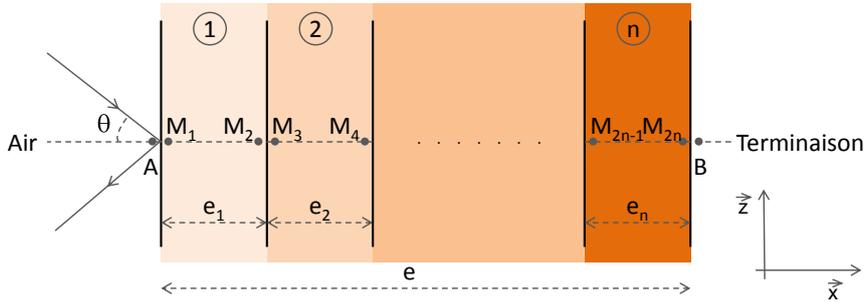


Figure III.4 – Représentation de la structure multicouche considérée

4.2 Matrices de transfert dans le cas d'un matériau poreux

Nous nous intéressons uniquement dans cette thèse à des couches de matériaux poreux, caractérisées par un comportement fluide-équivalent ou poroélastique. D'autres comportements peuvent être pris en compte et sont décrits dans [Allard & Atalla 2009].

4.2.1 Cas d'une couche de fluide-équivalent

Dans le cas d'une couche poreuse dotée d'un comportement fluide-équivalent, le champ acoustique est décrit par la pression acoustique $p(M)$ et la composante $v_x(M)$ de la vitesse acoustique selon l'axe \vec{x} :

$$\mathbf{V}(M) = \begin{bmatrix} p(M) \\ v_x(M) \end{bmatrix} \quad (\text{III.80})$$

La couche poreuse est pour sa part caractérisée par sa densité dynamique ρ et la composante selon l'axe \vec{x} du nombre d'onde $k_x = (k^2 - k^2 \sin^2(\theta))^{1/2}$, et on a :

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(k_x e) & j \frac{\omega \rho}{k_x} \sin(k_x e) \\ j \frac{k_x}{\omega \rho} \sin(k_x e) & \cos(k_x e) \end{bmatrix} \quad (\text{III.81})$$

4.2.2 Cas d'une couche poroélastique

Afin de prendre en compte les trois ondes de Biot dans le cas d'un matériau poroélastique (une onde de compression dans la phase solide et dans la phase fluide et une onde de cisaillement dans la phase solide), le vecteur $\mathbf{V}(M)$ s'écrit :

$$\mathbf{V}(M) = \begin{bmatrix} v_z^s(M) \\ v_x^s(M) \\ v_x^f(M) \\ \sigma_{xx}^s(M) \\ \sigma_{zx}^s(M) \\ \sigma_{xx}^f(M) \end{bmatrix} \quad (\text{III.82})$$

Les exposants f et s font respectivement référence aux propriétés des phases fluides et solides, $v_i(M)$ ($i \in \{x; z\}$) est la composante selon l'axe \vec{i} de la vitesse de la phase en M , et $\sigma_{ij}(M)$ ($((i, j) \in \{x; z\}^2)$) est la composante ij du tenseur des contraintes de la phase.

Dans ce cas, la matrice $[T]$ est une matrice 6×6 dont les termes sont présentés dans [\[Allard & Atalla 2009\]](#).

4.3 Méthode de résolution

Le calcul des propriétés acoustiques d'une structure multicouche grâce à la méthode de la matrice de transfert repose sur le processus suivant :

1. Evaluation de la matrice de transfert de chaque couche composant le matériau,

2. Calcul des matrices d'interface permettant d'assurer la continuité des grandeurs acoustiques entre deux couches successives,
3. Evaluation de la matrice de transfert globale par compilation de toutes les matrices de transfert et d'interface,
4. Résolution du problème en fixant une condition limite à l'extrémité du matériau, on considère généralement :
 - une terminaison rigide d'impédance infinie (vitesses des phases nulles en M_{2n}),
 - une terminaison semi-infinie, dite anéchoïque (l'impédance caractéristique devient égale à $Z_0 = \rho_0 c_0$),
5. Calcul des propriétés acoustiques $\alpha(\theta)$ ou $TL(\theta)$ et, dans le cas d'un champ diffus, intégration grâce aux Equations I.6 et I.3.

Cette méthode pose certains problèmes d'intégration à hautes fréquences mais est pertinente à plusieurs points de vue. Elle est particulièrement rapide par rapport à une résolution numérique et sa forme analytique permet d'utiliser facilement des modèles fluide-équivalent. Enfin, de nombreuses extensions réalisées par [Ghinet & Atalla 2001, Vigran 2010] peuvent être intégrées afin de prendre en compte les effets de dimensions finies des échantillons.

5 Conclusion

Le début de ce chapitre a permis de présenter les principaux effets de dissipation existant dans un matériau poreux. Ainsi, sous l'hypothèse de squelette rigide, un matériau poreux dissipe uniquement l'énergie acoustique grâce à des effets visco-inertiels et thermiques et est complètement caractérisé par deux grandeurs, sa densité dynamique et son module d'incompressibilité dynamique. Ces deux effets sont caractérisés en particulier par leurs régimes asymptotiques respectifs existant aux basses et hautes fréquences par rapport aux fréquences de transition.

Différentes approches ont été développées dans la littérature afin de modéliser ces propriétés acoustiques. Les modèles, de complexité croissante, peuvent être très lourds à mettre en œuvre mais permettent de retranscrire de façon très précise les phénomènes physiques. Ils s'appuient sur différents paramètres, décrivant le matériau poreux à partir de la géométrie des pores ou du squelette suivant l'approche choisie, ce qui s'avère particulièrement utile dans l'optique de modéliser le comportement des matériaux à partir de leurs paramètres fondamentaux.

Enfin, des modèles ont également été développés dans le cas de matériaux multi-échelles, et multicouches, ce qui va s'avérer particulièrement utile dans les Chapitres IV et V afin d'analyser le comportement acoustique des matériaux à base de fibres et particules végétales.

Chapitre IV

Modélisation des propriétés acoustiques des matériaux à base de fibres et particules végétales

Il a été montré dans le Chapitre II qu'à la fois la large gamme de constituants et de mise en œuvre des laines végétales, des chènevottes et des bétons de chanvre permet de couvrir un spectre considérable de propriétés acoustiques. L'étendue de ce spectre donne un champ d'application relativement large à ces matériaux, et notamment la possibilité de les dimensionner en fonctions des caractéristiques de bruit *in situ*. A cette fin, il est fondamental de pouvoir prédire *a priori*, c.-à-d. avant fabrication, le comportement acoustique du matériau.

Pour ce faire, dans ce quatrième chapitre, les grandeurs acoustiques observées expérimentalement sur les matériaux sont analysées afin de comprendre les mécanismes de dissipation en jeu. Une attention particulière est portée à la mise en évidence des éventuels comportements multi-échelles, tous ces matériaux faisant intervenir différentes tailles caractéristiques de pores. Les propriétés acoustiques des laines végétales, des chènevottes et des bétons de chanvre sont ainsi tour à tour expliquées à partir des paramètres acoustiques introduits dans les chapitres précédents.

De plus, afin d'approfondir la connaissance de ces matériaux, et de rendre la prédiction des propriétés acoustiques accessible à partir des paramètres microstructuraux des constituants et des paramètres de mise en œuvre, des relations sont établies entre ces paramètres, les paramètres acoustiques et les propriétés acoustiques macroscopiques.

1 Modélisation des laines végétales

1.1 Description du matériau

Les laines végétales ont été testées dans une configuration telle que les fibres restent perpendiculaires au flux acoustique. Comme cela a été discuté lors de la présentation des modèles

fibreuse, de nombreuses approches peuvent être employées afin de prédire le comportement acoustique de ces matériaux. Plusieurs d'entre elles ont été exploitées pour les laines dans cette section.

Ces laines sont composées de fibres d'origine naturelle. Par rapport à des fibres issues d'un processus industriel, bien connues en acoustique, telles que les fibres minérales (laines de roche ou laines de verre), ces fibres se distinguent à différents niveaux :

- Une masse volumique de squelette de l'ordre de 1000 à 1500 $kg.m^{-3}$, plus faible que les laines minérales dont la masse volumique de squelette avoisine 2600 $kg.m^{-3}$,
- leur porosité, discutée dans la Section 2.1.3 du Chapitre I, avec un lumen central qui peut représenter jusqu'à 16% de la surface de la section de la fibre,
- leurs dimensions plus importantes avec un diamètre de 20 à 40 μm , par rapport à 1 à 10 μm pour les laines minérales. De plus leur origine végétale leur confère en termes de dimension une plus grande variabilité que les fibres minérales qui sont calibrées dans les chaînes de fabrication.

Ces trois différences peuvent avoir des effets sur les propriétés acoustiques des laines végétales, et induire un comportement différent de celui qui est observé sur les laines minérales. L'utilisation des modèles présentés en début de chapitre va permettre de discuter de chacun de ces effets.

1.2 Modélisation des propriétés acoustiques

1.2.1 Analyse physique

Validité de l'hypothèse de squelette rigide Nous avons modélisé les laines végétales à partir de l'approche générale de Biot. A cette fin, la fréquence de découplage $f_{dec} = \frac{\omega_{dec}}{2\pi}$ introduite par Zwicker et Kosten et définie Equation III.22 a été évaluée pour les différents matériaux. Ces données sont présentées Tableau IV.1.

Au vu de ces résultats, on constate que les fréquences de découplage sont comprises entre 40 et 900 Hz . Certains des matériaux sont donc susceptibles d'être affectés par des comportements poro-élastiques aux basses fréquences dans la gamme étudiée [150 ; 2000 Hz]. Toutefois, après observation des propriétés acoustiques caractérisées en incidence normale (cf. Annexe 8), on ne remarque pas de phénomène de résonance particulièrement marqué.

Il a donc été décidé de modéliser ces matériaux fibreux à l'aide de modèles fluide-équivalent basés sur l'hypothèse de squelette rigide. Dans les cas les plus critiques, pour les échantillons Lin aiguilleté, Lin tricouche et Jute, une modélisation poroélastique serait plus appropriée. Ce type de modélisation a été réalisé pour des échantillons tricouches à la Section 3 du Chapitre

Désignation	f_{dec} (Hz)
Chanvre vert	42
Chanvre-chènevotte (5 cm)	58
Chanvre-chènevotte (2 cm)	124
Chanvre aiguilleté	108
Chanvre-lin	64
Lin (10 cm)	133
Lin (5 cm)	125
Lin traité feu (5 cm)	125
Lin aiguilleté	882
Lin tricouche parement	396
Lin tricouche isolant	205
Jute	224

Tableau IV.1 – Fréquences de découplage $f_{dec} = \omega_{dec}/(2\pi)$ des laines étudiées

V.

Discussion sur le comportement double porosité des laines végétales Afin d'utiliser des modèles acoustiques adéquats, la question d'un comportement en double-porosité se pose. Etant donnée la porosité des fibres végétales, il est nécessaire d'évaluer les dimensions caractéristiques des pores existant entre les fibres et au sein de ces dernières.

Notre discussion s'appuie dans la suite sur les paramètres des fibres de chanvre. Les fibres de lin et de jute ayant des caractéristiques proches de celles des fibres de chanvre (cf. Tableau IV.7), leur comportement acoustique est par conséquent similaire. Le diamètre moyen des fibres de chanvre peut être estimé à $d_{fibre} = 30 \mu m$, et celui du lumen à $d_{lumen} = 5 \mu m$ d'après la revue bibliographique de [Placet *et al.* 2012].

Dans ces conditions, en faisant l'hypothèse que les fibres sont régulièrement espacées, comme cela est représenté à la Figure IV.1, qu'elles sont incompressibles (elles ne s'écrasent pas pour de fortes densités apparentes), et que leur masse volumique de squelette est de $\rho_{squelette} = 1500 \text{ kg.m}^{-3}$, on peut estimer l'espacement interfibres d par la relation suivante :

$$d = \sqrt{\frac{\pi(d_{fibre}^2 - d_{lumen}^2)}{4(1 - \phi)}} = \sqrt{\rho_{squelette} \frac{\pi(d_{fibre}^2 - d_{lumen}^2)}{4\rho_v}} \quad (\text{IV.1})$$

L'espacement d et l'espacement corrigé d' introduits sur la Figure IV.1 ont donc été évalués pour la gamme de densités rencontrée sur les laines et sont présentés Tableau IV.2.

De plus, ces dimensions conduisent à une porosité intrafibre de 2,8% et aux porosités totale

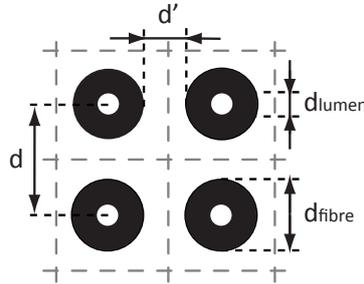


Figure IV.1 – Représentation du milieu fibreux

ϕ et interfibre ϕ_{inter} présentées Tableau IV.2.

ρ_v ($kg.m^{-3}$)	10	20	30	40	50	100	150	200	300	400
d (μm)	321	227	185	161	144	102	82,9	71,8	58,6	50,8
d' (μm)	291	197	155	131	114	71,5	52,9	41,8	28,6	20,8
d'/d_{lumen}	58	39	31	26	23	14	11	8	6	4
ϕ_{inter} (%)	99,3	98,6	97,9	97,3	96,6	93,1	89,7	86,3	79,4	72,6
ϕ (%)	99,3	98,7	98,0	97,3	96,7	93,3	90,0	86,7	80,0	73,3

Tableau IV.2 – Evaluation de l'espacement interfibre et des porosités dans les laines de chanvre

En se basant sur ces données, et en reprenant le formalisme de [Oly & Boutin 2003], on peut estimer le rapport des longueurs caractéristiques du réseau mésoscopique (réseau de pores interfibres) et du réseau microscopique (réseau de pores intrafibre) par $l_p/l_m \approx d'/d_{lumen}$. On voit que ce rapport est compris entre 4 et 60 en fonction de la densité de la laine.

Dans le cas où le rapport d'échelles est inférieur à 10, pour les masses volumiques $\rho_v \geq 150$ $kg.m^{-3}$, il n'y a pas séparation d'échelles et donc pas lieu d'utiliser une approche en double porosité.

Dans les cas de faible densité, ce rapport indique un faible contraste de perméabilité entre les deux réseaux de pores. On peut par conséquent utiliser l'approche double porosité pour rendre compte du comportement du matériau, grâce aux Equations IV.2 et IV.3.

$$\rho_{laines} = \left[\frac{1}{\rho_{inter}} + (1 - \phi_{inter}) \frac{1}{\rho_{intra}} \right]^{-1} \quad (IV.2)$$

$$K_{laines} = \left[\frac{1}{K_{inter}} + (1 - \phi_{inter}) \frac{1}{K_{intra}} \right]^{-1} \quad (IV.3)$$

Analyse physique du comportement double porosité Dans l'optique de repérer d'éventuelles simplifications pour la modélisation des laines végétales, il est intéressant de savoir quels

IV.1 Modélisation des laines végétales

régimes gouvernent la dissipation acoustique dans chacun des réseaux de pores dans la gamme de fréquences étudiée. Les fréquences de transition ω_v et ω_t ont donc été estimées, en approximant les pores par des pores cylindriques de rayon r , ce qui conduit à [Olny 1999] :

$$\omega_v = \frac{8\mu}{\rho_0 r^2} \quad (\text{IV.4})$$

$$\omega_t = \frac{8\kappa}{\rho_0 C_p r^2} \quad (\text{IV.5})$$

Les fréquences de transition obtenues sont données Tableau IV.3 pour le réseau interfibre. Elles valent pour le réseau intrafibre $f_{v \text{ intra}} = 3,12 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ et $f_{t \text{ intra}} = 4,40 \cdot 10^6 \text{ Hz}$.

$\rho_v \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$	10	20	30	40	50	100	150	200	300	400
$f_{v \text{ inter}} \text{ (Hz)}$	922	2012	3235	4583	6053	15263	27907	44710	95349	181110
$f_{t \text{ inter}} \text{ (Hz)}$	1298	2833	4556	6455	8525	21497	39306	62972	134294	255084

Tableau IV.3 – Evaluation des fréquences de transition du réseau interfibre

Ces résultats indiquent que :

- dans les pores interfibres :
 - dans le cas des faibles densités, tous les régimes (visqueux/inertiel, isotherme/adiabatique) peuvent être rencontrés,
 - pour les plus fortes densités, le comportement est visqueux et isotherme,
- dans les pores intrafibres, le comportement est dans tous les cas visqueux et isotherme.

Par conséquent, les contributions du milieu intrafibre peuvent être approximées par les limites asymptotiques basses fréquences de la densité dynamique (modèle de Johnson *et al.*) et du module d'incompressibilité dynamique :

$$\rho_{intra} \approx \frac{\rho_0 \alpha_{\infty \text{ intra}}}{\phi_{intra}} - j \frac{\sigma_{intra}}{\omega} \quad (\text{IV.6})$$

$$K_{intra} \approx \frac{P_0}{\phi_{intra}} \quad (\text{IV.7})$$

En réinjectant ces approximations dans les Equations IV.2 et IV.3 on obtient alors :

$$\rho_{laines} \approx \left[\frac{1}{\rho_{inter}} + (1 - \phi_{inter}) \frac{\frac{\rho_0 \alpha_{\infty intra}}{\phi_{intra}} + j \frac{\sigma_{intra}}{\omega}}{\left(\frac{\rho_0 \alpha_{\infty intra}}{\phi_{intra}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{intra}}{\omega} \right)^2} \right]^{-1} \quad (IV.8)$$

$$K_{laines} \approx \left[\frac{1}{K_{inter}} + (1 - \phi_{inter}) \frac{\phi_{intra}}{P_0} \right]^{-1} \quad (IV.9)$$

Or, sachant que $\sigma_{inter} \ll \sigma_{intra}$, que $K_{inter} \in [P_0/\phi_{inter}; \gamma P_0/\phi_{inter}]$, avec $\phi_{inter} = O(1)$, et que $\phi_{intra} = 2,8\%$, on trouve finalement :

$$\rho_{laines} \approx \rho_{inter} \quad (IV.10)$$

$$K_{laines} \approx K_{inter} \quad (IV.11)$$

Ainsi, du fait du régime d'écoulement visqueux dans les pores intrafibres, et de la faible porosité intrafibre, les effets visco-inertiels et thermiques des laines végétales peuvent être approximés par ceux existant dans le milieu poreux interfibre.

Finalement, quelle que soit la configuration de laine étudiée, une modélisation simple échelle peut être utilisée afin de décrire son comportement acoustique. Les paramètres acoustiques à utiliser dans le cas des masses volumiques $\rho_v \geq 150 \text{ kg.m}^{-3}$ correspondent aux paramètres acoustiques macroscopiques du matériau à double porosité. Dans le cas des faibles masses volumiques $\rho_v \leq 150 \text{ kg.m}^{-3}$, les différences entre les paramètres acoustiques des laines et ceux de son réseau interfibre sont très faibles, avec en particulier des différences de porosité n'excédant pas 0,5% (voir Tableau IV.2). Ces différences sont de l'ordre de grandeur de l'incertitude de mesure, en conséquence, les paramètres macroscopiques ρ et K caractérisés sur les laines peuvent aussi être directement utilisés afin de modéliser les propriétés acoustiques de ces matériaux.

Ce résultat permet de simplifier considérablement la modélisation des laines. En outre, il fournit des indications vis-à-vis de l'évolution de leur comportement acoustique en fonction de l'humidité relative. D'après [Evrard 2008], l'eau de condensation présente dans les matériaux poreux soumis à une importante humidité relative est concentrée dans les pores de plus faible dimension, soit dans le cas des laines végétales dans les pores intrafibres. Dans ce cadre, en supposant que la dimension des fibres reste constante (pas de dilatation), la géométrie des pores interfibres, et en conséquence, les propriétés acoustiques de ces matériaux, restent inchangées.

Fréquences caractéristiques des laines végétales Les fréquences de transition sont évaluées à partir des Equations III.45 et III.46 en s'appuyant sur les paramètres acoustiques caractérisés sur les laines (les tortuosités et les perméabilités thermiques ont été caractérisées de façon indirecte d'après la méthode présentée en Annexe 1.1.2 et les résultats sont présentés Section 1.3.2). Elles sont synthétisées dans le Tableau IV.4.

Désignation	f_v (Hz)	f_t (Hz)
Chanvre vert	142	103
Chanvre-chènevotte (5 cm)	417	213
Chanvre-chènevotte (2 cm)	2067	482
Chanvre aiguilleté	1166	337
Chanvre-lin	273	217
Lin (10 cm)	871	427
Lin (5 cm)	563	351
Lin traité feu (5 cm)	567	463
Lin aiguilleté	18363	260
Lin tricouche parement	7039	610
Lin tricouche isolant	2250	220
Jute	3506	618

Tableau IV.4 – Fréquences de transition des effets visco-inertiels et thermiques des laines étudiées

On constate sur ce tableau que les fréquences de transition réelles sont bien inférieures aux premières estimations du Tableau IV.3. Cela s'explique par l'hypothèse de pore cylindrique considérée et par l'estimation du rayon des pores en fonction de la porosité, mais ne remet pas en cause les remarques qui ont été faites sur le comportement du matériau.

Pour tous les matériaux, les fréquences de transition visco-inertiels et thermiques sont situées dans la gamme fréquentielle étudiée, ou très proche de cette dernière. Les propriétés acoustiques doivent en conséquence être prédites en prenant tous les effets en compte.

1.2.2 Application des modèles et pertinence

Utilisation des modèles spécifiques aux matériaux fibreux Dans un premier temps, les modèles de Delany et Bazley, Garai et Pompoli, et de Tarnow ont été directement appliqués aux laines à partir des porosités et résistivités présentées au Chapitre II. Dans le cas du modèle de Tarnow, le rayon équivalent des fibres a été calculé en inversant le modèle de résistivité présenté par [Tarnow 1996a] pour la configuration “ \perp aléatoire”, il est donné dans le Tableau III.3.

Avant de présenter les résultats, la gamme de validité [f_{min} ; f_{max}] du modèle de Delany et Bazley est présentée pour chaque matériau dans le Tableau IV.5.

Chapitre IV. Modélisation des propriétés acoustiques des matériaux à base de fibres et particules végétales

Désignation	f_{min} (Hz)	f_{max} (Hz)
Chanvre vert	9	856
Chanvre-chènevotte (5 cm)	31	3055
Chanvre-chènevotte (2 cm)	178	17816
Chanvre aiguilleté	99	9913
Chanvre-lin	17	1747
Lin (10 cm)	56	5573
Lin (5 cm)	36	3561
Lin traité feu (5 cm)	36	3609
Lin aiguilleté	2689	268919
Lin tricouche parement	750	75000
Lin tricouche isolant	150	15000
Jute	336	33640

Tableau IV.5 – Gamme de validité du modèle de Delany et Bazley

Il apparaît d’après ce tableau que le Lin aiguilleté, les basses fréquences pour le Jute et le Lin tricouche, et les hautes fréquences pour le Chanvre vert et le Chanvre Lin, sortent du cadre de validité des travaux de Delany et Bazley. On peut donc s’attendre dans ces cas à des modélisations moins satisfaisantes.

Les résultats des modélisations sont comparés aux mesures effectuées en incidence normale sur les Figures D.1 à D.11 en Annexe 8, une illustration est donnée Figure IV.2 pour l’échantillon Chanvre vert. Concernant l’absorption acoustique, on constate que les trois modèles utilisés donnent des prédictions similaires. Ces prédictions sont fidèles à $\pm 10\%$ aux mesures effectuées. Toutefois, elles sous-estiment de près de 15% l’absorption dans le cas des échantillons de Lin et de Chanvre-chènevotte.

Au niveau de l’indice d’affaiblissement, les modèles sont également satisfaisants avec des prédictions précises à $\pm 2dB$ pour la plupart des échantillons. Les prédictions des différents modèles divergent toutefois dans le cas des laines ayant une forte résistivité. Dans ces cas, bien que les mesures restent encadrées par les prédictions, des différences allant jusqu’à 5 dB sont observées. L’échantillon Lin tricouche est concerné, et fera l’objet de développements complémentaires dans le Chapitre V.

On note que la gamme de validité restreinte du modèle de Delany et Bazley se ressent particulièrement sur l’indice d’affaiblissement du Lin aiguilleté, surestimé par le modèle, mais n’est pas visible dans les autres cas. Enfin, on conclut que l’ensemble des laines végétales peuvent être décrites de façon relativement satisfaisante à partir de leur résistivité et, dans le cas du modèle de Tarnow, de leur porosité.

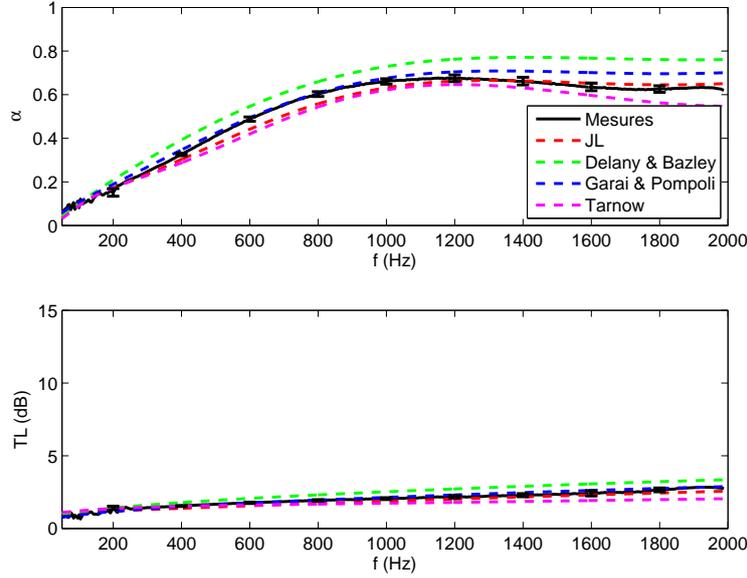


Figure IV.2 – Modélisation de l’absorption acoustique et de l’indice d’affaiblissement de l’échantillon Chanvre vert

Utilisation des modèles généralisés Dans un second temps, le modèle qui associe les travaux de Johnson *et al.* pour les effets visco-inertiels et ceux de Lafarge *et al.* pour les effets thermiques (modèle noté “JL”) a été appliqué aux matériaux fibreux. Pour ce faire, les paramètres α_∞ , Λ , Λ' et Θ_0 qui n’ont pu être caractérisés par des méthodes non-acoustiques ont été caractérisés indirectement via les densités dynamiques et modules d’incompressibilité dynamiques mesurés en utilisant les équations analytiques développées par [Panneton & Olny 2006, Olny & Panneton 2008] et présentées en Annexe 1.

Les résultats sont comparés aux mesures et prédictions précédentes sur les Figures D.1 à D.11. Les prédictions de ce modèle sont plus précises que celles obtenues grâce aux modèles fibreux. Toutefois, étant donné la nécessité de caractériser ces 4 paramètres supplémentaires, l’utilisation d’un tel modèle n’est pas forcément justifiée.

1.3 Analyse des paramètres acoustiques

La détermination et l’analyse des paramètres acoustiques peuvent s’avérer instructives à deux égards. Elles permettent, en premier lieu, de mieux connaître les phénomènes de dissipation au sein du poreux. Les paramètres déterminés ont par exemple été exploités au début de cette section afin de connaître les fréquences de transition des effets visco-inertiels et thermiques. Leur second intérêt est d’apporter une meilleure connaissance de la microstructure du matériau, à la fois au niveau des pores et du squelette. En ce sens, l’évaluation des paramètres acoustiques

permet une caractérisation indirecte de cette microstructure.

1.3.1 Exploitation des modèles de résistivité

Nous avons identifié dans le Tableau III.3 un certain nombre de modèles de la littérature permettant de prédire la résistivité des fibreux en fonction de leur porosité et rayon de fibre. Ces modèles ont été inversés, connaissant résistivités et porosités des matériaux, afin de retrouver une estimation du diamètre des fibres végétales. Les données obtenues à partir des différents modèles sont présentées Tableau IV.6.

Au niveau des modèles de Tarnow, seuls les modèles “ \perp ” ont été exploités, étant donné la configuration perpendiculaire des fibres végétales par rapport au flux acoustique.

Désignation	Mechel [6 ;10]	Mechel [10 ;20]	Bies et Hansen	Garai et Pompoli	Tarnow “ \perp (id.)”	Tarnow “ \perp (al.)”
Chanvre vert	51	63	41	59	76	63
Chanvre-chènevotte (5 cm)	52	59	40	55	73	58
Chanvre-chènevotte (2 cm)	39	41	28	37	54	42
Chanvre aiguilleté	34	38	26	35	48	38
Chanvre-lin	42	51	33	48	62	51
Lin (10 cm)	29	35	23	33	42	34
Lin (5 cm)	25	30	20	29	37	30
Lin traité feu (5 cm)	31	37	24	35	45	37
Lin aiguilleté	17	17	11	14	23	17
Lin tricouche	26	28	19	26	36	28
Jute	32	34	23	30	44	34

Tableau IV.6 – Diamètres, en μm , des fibres des échantillons, estimés à partir des modèles de résistivité

Plusieurs observations peuvent être réalisées à partir de ces données :

- Les diamètres obtenus avec le modèle de Tarnow “ \perp idéal” sont les plus élevés et dépassent souvent de plus de 10 μm les autres prédictions. Cela s’explique par le fait que l’écoulement dans la configuration idéale mise en équation par Tarnow se fait beaucoup moins facilement que dans le cas réel où les fibres sont irrégulièrement espacées et offrent des passages privilégiés [Tarnow 1996a]. Les diamètres estimés à partir de ce modèle sont par conséquent surévalués.
- *A contrario*, les modèles de Mechel [6 ;10] et de Bies et Hansen donnent les prédictions les plus faibles. Ces modèles sont empiriques et basés sur des laines minérales dont le diamètre de fibre n’excède pas 10 μm , ce qui explique l’écart au niveau de l’estimation du diamètre des fibres végétales de plus grandes dimensions.

- Enfin, les modèles de Tarnow “ \perp aléatoire”, de Mechel [10;20] et de Garai et Pompoli donnent des prédictions beaucoup plus rapprochées, et cohérentes vis-à-vis des ordres de grandeur attendus. Ces modèles sont donc les plus adaptés pour décrire la résistivité des laines végétales.

En se focalisant dorénavant uniquement sur les prédictions de ces trois modèles, il est intéressant de comparer les diamètres obtenus pour chacun des échantillons. Il s'avère que les dimensions relatives aux fibres de chanvre sont de l'ordre de 40 à 60 μm tandis que celles des fibres de lin et de jute sont estimées entre 15 et 35 μm . Une synthèse des diamètres des fibres végétales étudiées dans la littérature est présentée par [Olesen & Plackett 1999] et restituée Tableau IV.7. Cette synthèse est en accord avec les diamètres déterminés pas [Collet 2004] pour le chanvre, entre 15 et 60 μm . On se rend compte d'après ces données que les estimations des diamètres des fibres par la résistivité des laines donnent des valeurs légèrement supérieures aux diamètres moyens des fibres unitaires. Cela peut provenir du fait que les fibres ne sont pas unitaires mais forment un faisceau de plusieurs fibres. Le Chanvre vert, non roui, et dont les fibres sont par conséquent moins bien séparées, est par ailleurs l'échantillon dont le diamètre de fibre estimé est le plus important.

Fibres	Diamètre moyen (μm)	Gamme de variation (μm)
Chanvre	25	[10 ; 50]
Lin	19	[5 ; 38]
Jute	20	[10 ; 25]

Tableau IV.7 – Synthèse des diamètres des fibres végétales donnés dans la littérature [Olesen & Plackett 1999]

On conclut que la présence des fibres bi-composantes et de la chènevotte ne semble pas modifier fondamentalement le comportement des laines. Pour les fibres bi-composantes, cela s'explique par leur plus faible dosage relativement aux fibres végétales dans les laines, et par un diamètre et une masse volumique de squelette proches des fibres végétales (respectivement de l'ordre de 30 μm et 1350 $kg.m^{-3}$ si on considère des fibres de polyester). Dans le cas de la chènevotte cela est inattendu dans la mesure où dans les échantillons Chanvre-chènevotte, les deux types de particules ont une concentration massique identique. Cela s'explique néanmoins par la différence de taille des particules. Comme on le verra dans la Section 2, à porosité équivalente, la chènevotte est beaucoup plus perméable que les laines de chanvre. Ainsi, si on raisonne en écoulement en série, le flux dans le matériau Chanvre-chènevotte reste gouverné par les caractéristiques des fibres.

Les résistivités calculées à l'aide du modèle de Tarnow “ \perp aléatoire” à partir de deux diamètres (50 μm et 30 μm correspondant respectivement aux valeurs moyennes du Tableau

IV.6 pour les fibres de chanvre et les fibres de lin et jute) sont présentées Figure IV.3.

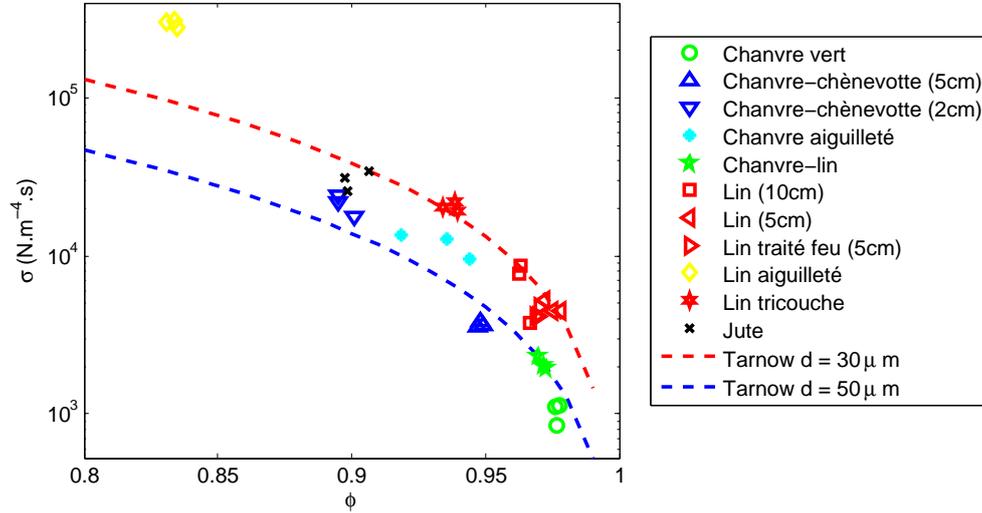


Figure IV.3 – Modélisation des résistivités des échantillons à l'aide du modèle de Tarnow \perp aléatoire

On constate qu'à l'exception du Lin aiguilleté dont le diamètre de fibre est beaucoup plus faible, les deux modélisations rassemblent les deux groupes d'échantillons caractérisés par leur nature de fibre.

1.3.2 Analyse des autres paramètres visco-inertiels et thermiques

Comme nous venons de le voir, la résistivité d'une laine végétale peut être modélisée à partir du rayon des fibres qui la constituent et de sa porosité. Tout porte à croire qu'il en est de même avec les autres paramètres : tortuosité, longueur caractéristique visqueuse et thermique et perméabilité thermique. Cependant, ces paramètres étant moins souvent utilisés que la résistivité pour modéliser les matériaux fibreux, peu de relations ont été développées dans la littérature afin de les prédire.

On s'appuie ici sur les développements présentés dans [Allard & Atalla 2009] pour le calcul de la longueur caractéristique dans le cas d'un matériau fibreux. Dans le cas où la porosité du matériau est proche de 1, il est montré que $\Lambda = \frac{1}{2\pi R_f L}$ avec R_f le rayon des fibres, et L la longueur cumulée des fibres par unité de volume du matériau fibreux. En ré-exprimant L en fonction de la porosité, on trouve :

$$\Lambda = \frac{R_f}{2(1 - \phi)} \quad (\text{IV.12})$$

IV.1 Modélisation des laines végétales

De plus, pour des matériaux tels que des fibreux, de nombreuses études ont montré que les longueurs visqueuse et thermique sont proportionnelles, et on fait pour cette raison souvent l'hypothèse que $\Lambda' = 2\Lambda$ ou $\Lambda' = 3\Lambda$ [Allard & Atalla 2009, Allard & Champoux 1992, Castagnède *et al.* 2000]. On considère donc pour cette première approche que $\Lambda' = 2\Lambda$ ce qui implique que :

$$\Lambda' = 2\Lambda = \frac{R_f}{1 - \phi} \quad (\text{IV.13})$$

Enfin, dans le but d'arriver à une estimation de la perméabilité thermique, on fait l'hypothèse d'un facteur de forme $M' = \frac{8\Theta_0}{\phi\Lambda'^2} = 1$, ce qui est valable pour des pores cylindriques circulaires. Par conséquent, on trouve :

$$\Theta_0 = \frac{\phi R_f^2}{8(1 - \phi)^2} \quad (\text{IV.14})$$

Ces trois modèles simplifiés ont été appliqués aux laines végétales en considérant toujours les mêmes diamètres caractéristiques des fibres ($30 \mu\text{m}$ et $50 \mu\text{m}$). Les résultats sont présentés aux Figures IV.4 à IV.6.

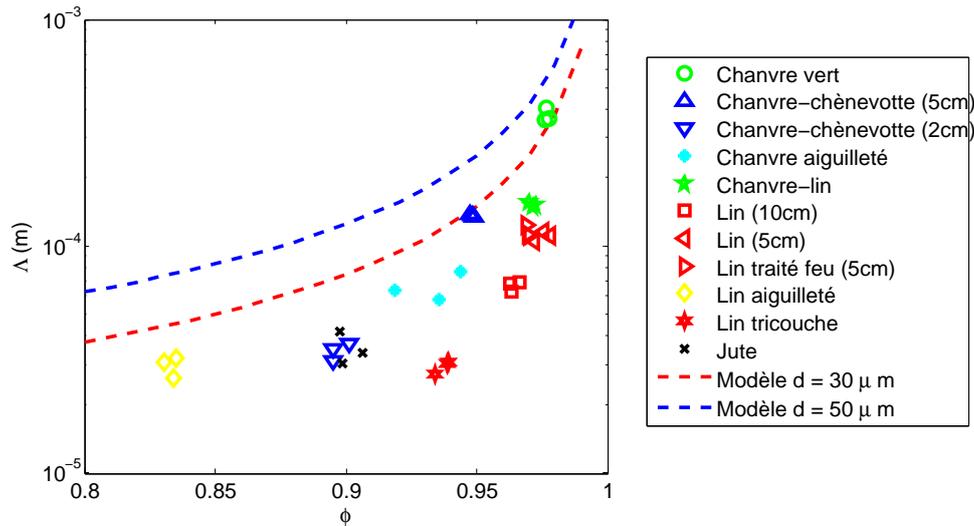


Figure IV.4 – Modélisation des longueurs caractéristiques visqueuses des échantillons

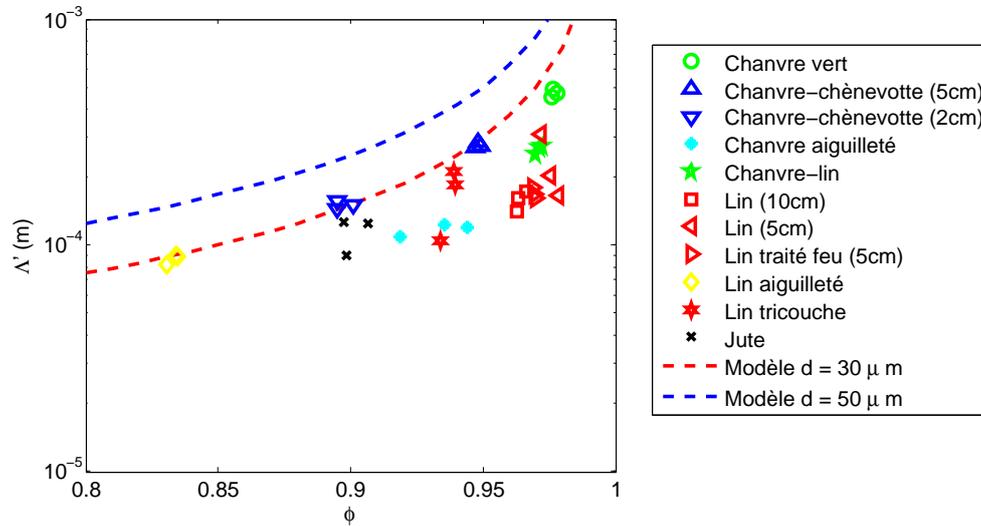


Figure IV.5 – Modélisation des longueurs caractéristiques thermiques des échantillons

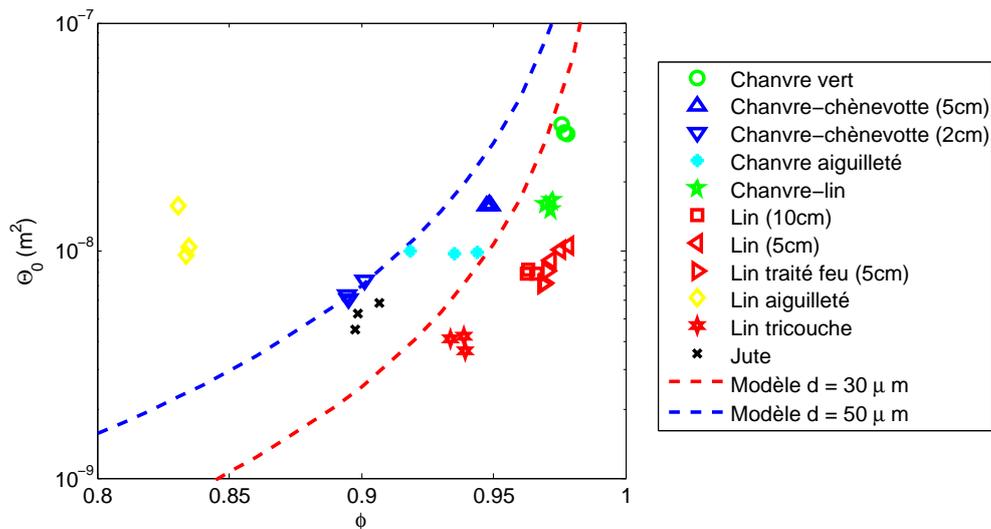


Figure IV.6 – Modélisation des perméabilités thermiques des échantillons

Dans le cas des longueurs visqueuses et thermiques, les tendances des modèles correspondent aux mesures réalisées, bien qu'on observe un rapport de 2 entre les longueurs caractéristiques visqueuses modélisées et caractérisées. En revanche, pour les faibles porosités (cas du Lin aiguilleté), on note un rapport de 10 entre la modélisation de la perméabilité thermique et les valeurs expérimentales. Ceci indique que, dans ces cas, l'hypothèse des pores cylindriques circulaires n'est plus valable, et le facteur de forme M' est plus grand que l'unité. Cela se comprend dans la mesure où avec la baisse de la porosité, les fibres se rapprochent les unes des autres en

donnant aux pores un caractère de plus en plus tortueux.

2 Modélisation des chènevottes

Nous avons montré dans la Section 1 que les laines végétales diffèrent des laines minérales par leurs dimension, porosité et variabilité, mais leurs propriétés acoustiques peuvent être décrites grâce à des modèles relativement simples, à partir de leurs porosités et résistivités.

Nous allons à présent aborder le cas des chènevottes. Ces matériaux sont caractérisés par des propriétés bien différentes des laines qui sont fibreuses, les particules de chanvre faisant de la chènevotte, de par leurs formes et dimensions, un milieu granulaire atypique.

2.1 Description du matériau

Les chènevottes sont loin d'être des matériaux granulaires ordinaires, tels que le sable ou des billes de verre. Elles s'en différencient par trois caractéristiques fondamentales :

- une porosité intraparticule importante dépassant 50%, avec des tailles de pores de l'ordre de 10 à 60 μm , ce qui peut entraîner un comportement en double porosité,
- une forme de particules parallélépipédique, entraînant un comportement anisotrope pour les chènevottes (voir par exemple les mesures de résistivité réalisées Section 2.5, Chapitre II), et engendrant de grandes différences par rapport à des granulats sphériques,
- des dimensions de particules très hétérogènes, comme le montre les distributions de taille de particules présentées Section 2.2 au Chapitre II.

Les propriétés acoustiques mesurées sur les chènevottes ont été analysées de façon systématique, et confrontées aux prédictions théoriques des modèles présentés au Chapitre III. Ainsi, l'effet dû à chacune des caractéristiques mentionnées ci-dessus a pu être discuté, et quantifié à la fois sur les propriétés et sur les paramètres acoustiques.

Cette analyse est réalisée en deux temps. Premièrement, on a mis en évidence le fait que l'utilisation de modèles classiques simple échelle ne permet pas de modéliser le comportement acoustique des chènevottes. Les résultats expérimentaux peuvent en revanche être expliqués par la théorie de la double porosité, permettant de lier les propriétés acoustiques macroscopiques aux propriétés des réseaux inter- et intraparticule. Dans un second temps, les paramètres acoustiques sont comparés à ceux prédits par les modèles granulaires dans le but d'identifier les meilleurs descripteurs à l'échelle des particules. Une partie des résultats présentés dans cette section a été publiée dans [Glé *et al.* 2012].

2.2 Des propriétés acoustiques aux paramètres acoustiques

Une première approche de modélisation des chènevottes est présentée dans [Glé *et al.* 2011] sans prendre en considération le comportement double porosité. Nous développons ici une analyse plus complète du matériau, et améliorons significativement les premières modélisations réalisées.

2.2.1 Analyse physique des propriétés acoustiques et interprétations

Mise en évidence d'un comportement multi-échelle Dans le cadre de cette thèse, une observation très originale a été faite à partir des nombreuses caractérisations des propriétés acoustiques réalisées sur les chènevottes. Cette observation est illustrée Figure IV.7 pour la chènevotte *CA* de masse volumique $\rho_v = 130 \text{ kg.m}^{-3}$.

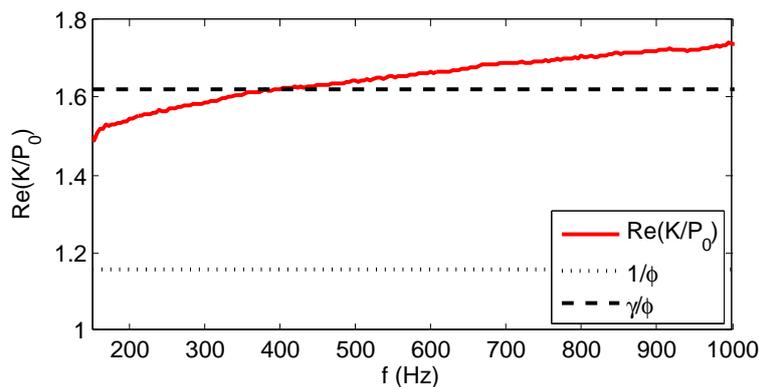


Figure IV.7 – Partie réelle du module d'incompressibilité dynamique normalisé K/P_0 comparé aux limites asymptotiques théoriques $1/\phi$ et γ/ϕ , pour la chènevotte *CA* ($\rho_v = 130 \text{ kg.m}^{-3}$)

En comparant sur cette figure la partie réelle du module d'incompressibilité dynamique normalisé K/P_0 à ses limites asymptotiques théoriques, qui sont $1/\phi$ à basses fréquences (régime isotherme) et γ/ϕ à hautes fréquences (régime adiabatique), on constate qu'au-delà de 400 *Hz*, la grandeur mesurée dépasse les deux valeurs théoriques entre lesquelles elle est sensée évoluer.

En élargissant l'analyse aux autres chènevottes présentées au Chapitre II (cf. Figure IV.8), on constate que le dépassement a lieu pour tous les échantillons, mais de façon plus ou moins marquée. En particulier, pour les chènevottes plus denses et celles constituées de plus petites particules (*CE* et *CB5*), le dépassement est significativement plus faible. Enfin, ces remarques peuvent également être faites aux Figures 19, 20 et 21 de [Glé *et al.* 2011] où la partie réelle mesurée est sous-estimée par la modélisation en simple porosité.

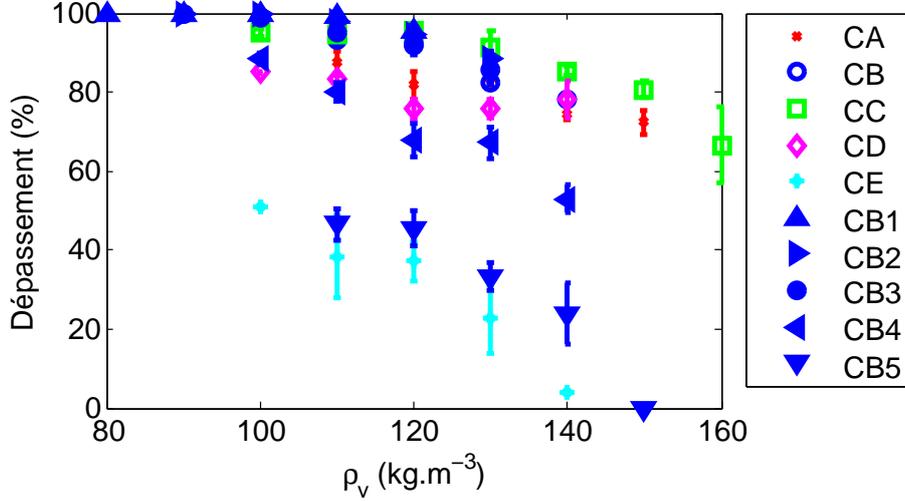


Figure IV.8 – Pourcentage de la gamme fréquentielle pour laquelle K/P_0 dépasse γ/ϕ exprimé en % de la plage expérimentale totale, pour les 10 chènevottes étudiées en fonction de leur masse volumique apparente.

L'observation systématique de ce dépassement sur les différents échantillons écarte l'hypothèse de l'erreur expérimentale de mesure du module d'incompressibilité. De plus, la porosité ouverte ϕ a été évaluée avec une précision de moins de 1% et ne peut expliquer les différences observées, correspondant à un biais de porosité allant jusqu'à plus de 10%.

On arrive donc à la conclusion que l'utilisation des modèles poreux classiques ne permet pas de modéliser les propriétés acoustiques à partir de la porosité ouverte des chènevottes. Afin de mieux comprendre le comportement observé, nous l'avons confronté à la théorie de la double porosité développée par [Olny & Boutin 2003].

Interprétations en double porosité Comme pour les laines, dans le cas d'un milieu à double porosité, les propriétés acoustiques du matériau sont calculées en fonction des propriétés du milieu microscopique, ici les pores intraparticulaires, et des propriétés du milieu mésoscopique, ici les pores interparticules.

Les pores interparticules de la chènevottes ont une dimension l_{inter} de l'ordre de 1 mm à 1 cm, et les pores intraparticulaires sont pour leur part caractérisés par une dimension l_{intra} de l'ordre de 10 à 60 μm . Par conséquent, le rapport d'échelles l_{inter}/l_{intra} est compris entre environ 15 et 1000, et correspond au cadre de validité de la double porosité.

De plus, considérant que la taille caractéristique des hétérogénéités au niveau mésoscopique est celle des particules, d'une longueur $L \approx 1$ cm, la gamme de validité de la modélisation est limitée à hautes fréquences par $f_{max} = c_0/(2\pi L) \approx 5400$ Hz, ce qui nous permet d'utiliser le

modèle sur la gamme de fréquences la plus problématique en acoustique du bâtiment [JOR 1999, JOR 2003], de 100 à 5000 Hz .

Différents scénarios sont possibles étant donnée la gamme estimée pour le rapport d'échelles :

- cas d'un rapport d'échelles de l'ordre de 10 : il y a faible contraste de perméabilité et la partie réelle du module d'incompressibilité dynamique normalisé, d'après l'Equation III.73, reste comprise entre $1/\phi$ et γ/ϕ ,
- cas d'un rapport d'échelles de l'ordre de 1000 : il y a fort contraste de perméabilité, la fonction de diffusion F_d est nulle pour $f > f_d$, l'Equation III.75 donne $1/\phi_{inter} < Re(K/P_0) < \gamma/\phi_{inter}$, ϕ_{inter} étant la porosité interparticule, nécessairement inférieure à la porosité totale ϕ .

La description de la chènevotte par la théorie de la double porosité avec fort contraste de perméabilité permet donc d'expliquer le dépassement observé expérimentalement. Le rapport d'échelles l_{inter}/l_{intra} des chènevottes testées est par conséquent plutôt de l'ordre de 1000.

Dans la suite de la thèse, nous allons utiliser ce modèle double porosité afin de prédire les propriétés acoustiques de la chènevotte. La théorie de la double porosité a déjà été appliquée à des matériaux granulaires par [Venegas & Umnova 2011]. Toutefois, à notre connaissance, la chènevotte est le premier matériau d'origine naturelle à être décrit par une modélisation double porosité avec fort contraste de perméabilité, dans la gamme de fréquences $f > f_d$.

2.2.2 Modélisation des propriétés acoustiques

Validité de l'hypothèse de squelette rigide Avant toute chose, il est nécessaire de savoir s'il faut prendre ou non en considération les effets de dissipation dus à l'élasticité du squelette. Pour ce faire, la fréquence de découplage f_{dec} de Zwicker et Kosten a été évaluée dans chacune des configurations testées. Les résultats sont regroupés sur la Figure IV.9.

Dans tous les cas, les fréquences de découplage sont en-deçà de 10 Hz , ce qui permet de valider l'hypothèse de squelette rigide pour les chènevottes. La dissipation acoustique dans les chènevottes peut donc être modélisée en décrivant les effets visco-inertiels et thermiques.

Simplifications du modèle double porosité Nous nous plaçons dans le cadre du modèle double porosité avec fort contraste. Etant donné les observations précédentes, nous faisons l'hypothèse que la fonction F_d est nulle. Cette hypothèse est validée dans la suite en mettant en évidence l'adéquation entre la porosité effective du matériau déterminée à partir du module d'incompressibilité, et l'évolution théorique de la porosité interparticule. Suivant cette hypothèse, les Equations générales III.74 et III.75 sont considérablement simplifiées.

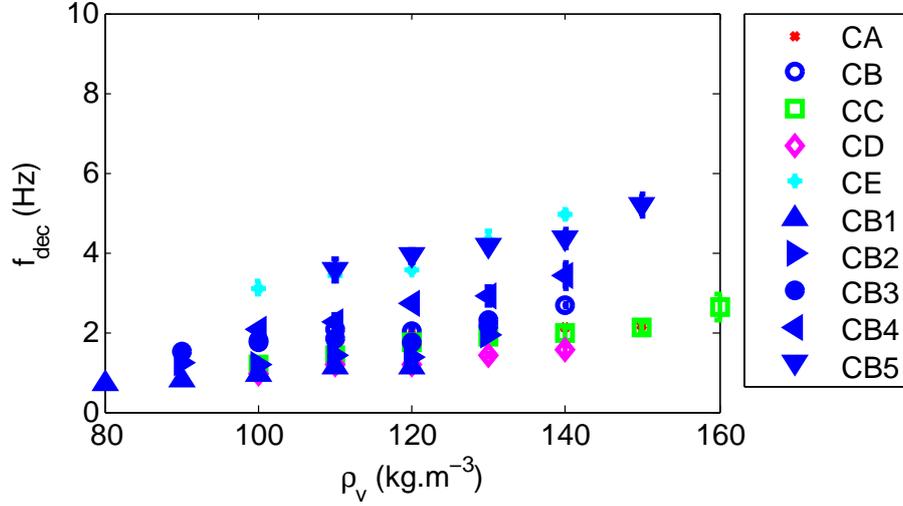


Figure IV.9 – Fréquences de découplage f_{dec} (Hz) des chènevottes caractérisées

D'une part, le module d'incompressibilité dynamique de la chènevotte est directement approché par celui de ses pores interparticules, et il en est de même pour la densité dynamique :

$$f > f_d \quad \Rightarrow \quad \sigma_{intra} > \frac{P_0}{\phi_{intra}\omega l_{inter}^2} > 80000 N.m^{-4}.s \quad (IV.15)$$

La fréquence caractéristique des effets visco-inertiels $\omega_{v \ intra}$ vérifie donc :

$$\omega_{v \ intra} = \frac{\sigma_{intra}\phi_{intra}}{\rho_0\alpha_{\infty \ intra}} = O(\sigma_{intra}) > 80000 rad.s^{-1} \quad (IV.16)$$

Cela montre donc que le comportement au sein des pores intraparticules est purement visqueux, et que, par analogie avec le cas des fibres végétales discuté Section 1.2.1, le flux dans la chènevotte en vrac est gouverné par les pores interparticules.

Finalement, le comportement de la chènevotte est décrit de façon simplifiée par les Equations IV.17 et IV.18.

$$\rho \approx \rho_{inter} \quad (IV.17)$$

$$K \approx K_{inter} \quad (IV.18)$$

De même que dans le cas des fibres, en supposant que les particules ne se dilatent pas sous l'effet de l'humidité relative, ce résultat indique que les propriétés acoustiques des chènevottes ne sont pas altérées par l'eau libre présente dans les pores intraparticules. Cela est confirmé

par les résultats expérimentaux présentés en Annexe 6.1.5.

Modèles choisis pour décrire les propriétés acoustiques des pores interparticules

Les fréquences caractéristiques visco-inertielles et thermiques f_v et f_t ont été évaluées pour les chènevottes caractérisées afin de déterminer les comportements prédominants au sein des pores interparticules. Ne connaissant que la porosité totale et la résistivité des matériaux, les autres paramètres ont été caractérisés de façon indirecte à partir de la densité dynamique et du module d'incompressibilité dynamique (cela sera explicité avec plus de détails dans les paragraphes suivants). Les fréquences caractéristiques sont présentées Figure IV.10.

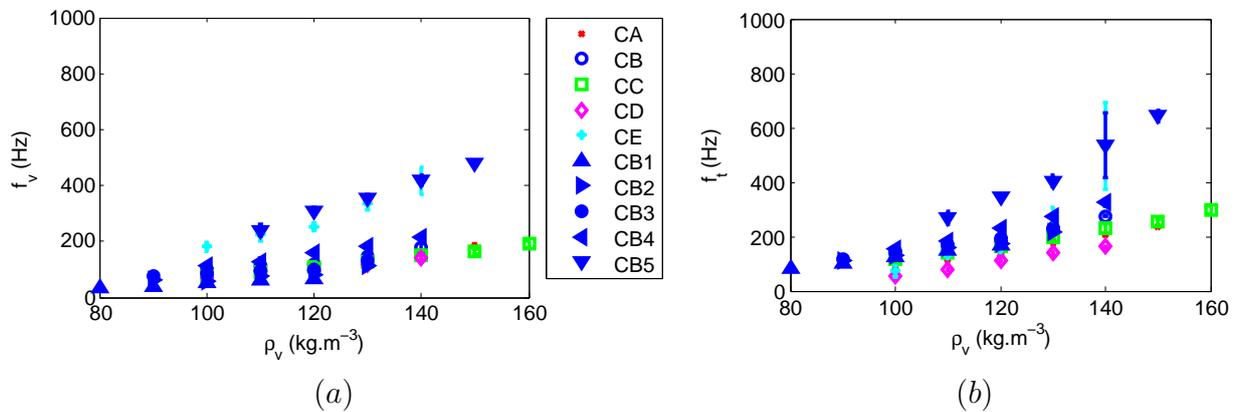


Figure IV.10 – Fréquences caractéristiques visco-inertielles (a) et thermiques (b) des chènevottes caractérisées

Ces fréquences varient entre 40 et 700 Hz , et sont pour la plupart comprises dans la gamme fréquentielle expérimentale [50 ; 2000 Hz]. Tous les régimes doivent donc être pris en compte dans la modélisation.

De nombreux modèles de la littérature pourraient être utilisés afin de prédire les propriétés de la chènevotte. Toutefois, l'obstacle principal à la modélisation est qu'un des paramètres fondamentaux, la porosité interparticule est inconnu. De nombreuses méthodes de mesure directe de ce paramètre ont été testées (voir Section 2.3.1) mais aucune n'a pu aboutir à des résultats à la fois représentatifs et suffisamment précis.

La porosité interparticule a finalement été estimée de façon indirecte à partir des propriétés acoustiques. Etant trop proche de la fréquence de transition des effets thermiques, les estimations asymptotiques à partir de la partie réelle du module d'incompressibilité dynamique ou de la partie imaginaire de l'impédance de surface présentées dans [Jaouen 2011] n'ont pas donné de résultat satisfaisant. Finalement, nous avons opté pour une inversion de la porosité interparticule à partir du modèle de Zwikker et Kosten, faisant ainsi l'hypothèse de pores cylindriques.

Cette hypothèse peut paraître réductrice par rapport à la géométrie des pores, mais elle présente l'avantage d'éviter l'introduction d'inconnues supplémentaires (longueur caractéristique thermique, perméabilité thermique ...).

En ce qui concerne les effets visco-inertiels, la tortuosité et la longueur caractéristique visqueuse sont des paramètres indispensables à la prédiction de la densité dynamique des bétons de chanvre, comme cela a été montré dans [Glé *et al.* 2011]. Ainsi, dans le but de développer une approche valable aussi bien pour les chènevottes que pour les bétons de chanvre, nous avons choisi d'utiliser le modèle de [Johnson *et al.* 1987].

Il faut cependant noter que le modèle proposé par [Horoshenkov *et al.* 2007], décrivant les propriétés acoustiques à l'aide de la distribution log-normale de taille de pores des matériaux, constitue une alternative particulièrement adaptée à notre problématique. C'est également le cas du modèle granulaire de [Boutin & Geindreau 2010] décrivant les propriétés uniquement à partir de deux paramètres relatifs aux granulats sphériques. Ces deux approches sont comparées aux modèles de Johnson *et al.* et Zwikker et Kosten en Annexe 9.

Les expressions des modèles utilisés ici sont rappelées aux Equations IV.19 et IV.20.

$$\rho = \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi_{inter}} \left[1 - j \frac{\sigma \phi_{inter}}{\rho_0 \alpha_\infty \omega} \sqrt{1 + j \frac{4\mu \alpha_\infty^2 \rho_0 \omega}{\Lambda^2 \sigma^2 \phi_{inter}^2}} \right] \quad (\text{IV.19})$$

$$K = \frac{\gamma P_0}{\phi_{inter}} \left[1 + 2(\gamma - 1) \frac{T_J(\sqrt{N_{Pr} u \sqrt{-j}})}{\sqrt{N_{Pr} u \sqrt{-j}}} \right]^{-1} \quad (\text{IV.20})$$

Dans ces équations, tous les paramètres acoustiques font référence aux pores interparticules. Toutefois, afin d'alléger les notations, l'indice *inter* est uniquement utilisé pour la porosité interparticule afin de différencier cette dernière de la porosité totale des chènevottes. T_J est le rapport entre les fonctions de Bessel d'ordre 1 et 0 ($T_J(x) = J_1(x)/J_0(x)$), et u est défini par l'Equation IV.21.

$$u = \sqrt{\frac{8\alpha_\infty \rho_0 \omega}{\sigma \phi_{inter}}} \quad (\text{IV.21})$$

En synthèse, nous notons que ces deux modèles requièrent 4 paramètres : la porosité interparticule ϕ_{inter} , la résistivité σ , la tortuosité α_∞ et la longueur visqueuse Λ .

Méthode de caractérisation des paramètres acoustiques Les paramètres acoustiques sont déterminés à l'aide d'une méthode de caractérisation indirecte basée sur les équations présentées par [Panneton & Olmy 2006]. Cette méthode conduit généralement à des résultats précis

Chapitre IV. Modélisation des propriétés acoustiques des matériaux à base de fibres et particules végétales

d'une part car elle est basée sur les équations analytiques exactes des paramètres acoustiques obtenues à partir du modèle de Johnson *et al.*, et d'autre part car elle peut être appliquée sur toute la gamme de fréquences expérimentale. De plus, cette méthode indirecte a été privilégiée car elle permet de caractériser les paramètres de la chènevottes dans la configuration pour laquelle les propriétés acoustiques ont été évaluées, et permet ce faisant de s'affranchir de l'incertitude relative à la position et l'orientation des particules.

La résistivité σ des chènevottes est connue à partir de la limite basses fréquences de la densité dynamique, et son estimation a été validée par comparaison avec des mesures directes (voir Chapitre II, Section 2.5). La tortuosité α_∞ a été mesurée directement par la méthode du temps de vol (voir Chapitre II, Section 2.6). A partir de ces données, pour chaque chènevotte caractérisée, le protocole suivant est mené afin d'évaluer les autres paramètres :

1. Détermination de la porosité interparticule ϕ_{inter} par méthode des moindres carrés afin de minimiser l'écart entre le module d'incompressibilité dynamique mesuré et celui modélisé par le modèle de Zwikker et Kosten,
2. Evaluation de la longueur visqueuse Λ suivant l'Equation IV.22.

$$\Lambda = \frac{\alpha_\infty}{\phi_{inter}} \sqrt{\frac{2\rho_0\mu}{\omega\Im(\rho)\left(\rho_0\frac{\alpha_\infty}{\phi_{inter}} - \Re(\rho)\right)}} \quad (\text{IV.22})$$

\Re et \Im correspondent respectivement aux parties réelle et imaginaire d'un nombre complexe.

Validation expérimentale Ce protocole a été appliqué sur toutes les configurations étudiées de chènevottes, soit plus de 50 cas. Les prédictions ont dans chaque cas conduit à des résultats proches à $\pm 5\%$ des propriétés acoustiques mesurées (α et TL). Une comparaison entre les résultats expérimentaux et les modélisations est donnée pour trois chènevottes caractéristiques à la Figure IV.11. Les paramètres acoustiques utilisés dans ces cas sont présentés au Tableau IV.8 et soulignent de larges gammes de variation.

Chènevotte	ϕ_{inter}	$\sigma(N.m^{-4}.s)$	α_∞	$\Lambda(\mu m)$
<i>CC</i> ($\rho_v = 100kg.m^{-3}$)	0,79	1230	1,96	359
<i>CA</i> ($\rho_v = 130kg.m^{-3}$)	0,75	3090	2,19	210
<i>CB5</i> ($\rho_v = 150kg.m^{-3}$)	0,77	9290	2,95	87

Tableau IV.8 – Paramètres acoustiques utilisés pour la modélisation des chènevottes

Sur la base des trois exemples présentés, on constate que l'absorption acoustique, la densité

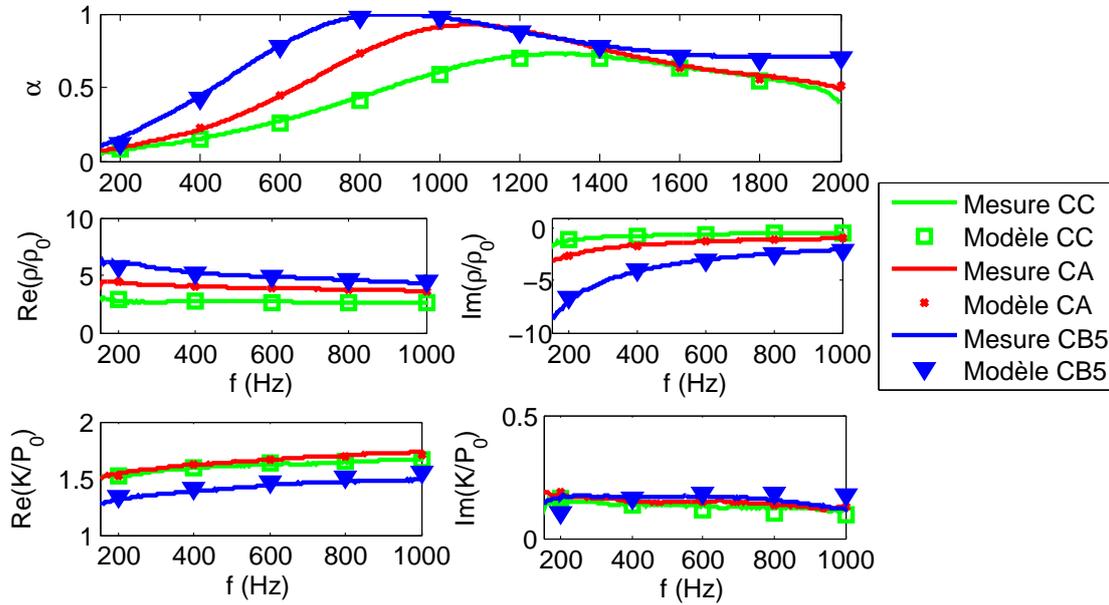


Figure IV.11 – Comparaison des propriétés acoustiques mesurées et modélisées pour trois chènevottes caractéristiques.

dynamique et le module d'incompressibilité dynamique modélisés sont précis à $\pm 5\%$. L'hypothèse de fort contraste de perméabilité permet donc de modéliser de façon satisfaisante les propriétés acoustiques des chènevottes.

2.3 Des paramètres acoustiques aux paramètres microstructuraux

L'analyse du comportement de la chènevotte nous a permis de construire des relations entre ses propriétés acoustiques et ses paramètres acoustiques. Nous avons ainsi pu déterminer certains paramètres acoustiques des chènevottes de façon indirecte à partir des propriétés mesurées.

Dans cette section, nous étudions l'évolution de ces paramètres en fonction de la densité et de la granulométrie des chènevottes, et cherchons à les exploiter afin d'en tirer des informations sur la microstructure des particules de chanvre. L'objectif est d'être capable de prédire les propriétés acoustiques de la chènevotte directement à partir de ses paramètres microstructuraux.

2.3.1 Porosité interparticule

Comme nous l'avons vu précédemment, la porosité interparticule est un paramètre fondamental vis-à-vis du comportement de la chènevotte, et qui, à notre connaissance n'est pas

déterminé de façon représentative par des méthodes de mesure directe.

En effet, les méthodes de pycnométrie à eau ne sont pas adaptées, car on observe une saturation rapide des pores intraparticules et un gonflement des particules sous l'effet de l'eau. Une pycnométrie par intrusion de mercure pourrait donner de bons résultats mais est inopérante dans la mesure où elle entraîne une modification de la structure due à la pression. Les méthodes de densité tapée restent approximatives et peu adaptées à des granulats aussi légers [Buczek & Geldart 1986] et l'analyse par tomographie est performante [Ceyte 2008] mais est rarement accessible dans un laboratoire classique.

La méthode de caractérisation acoustique utilisée dans cette thèse peut donc être appliquée dans d'autres contextes, étant rapide, représentative, non destructive et plus accessible.

Détermination de la masse volumique apparente des particules La porosité interparticule ϕ_{inter} doit suivre par définition une évolution linéaire par rapport à la masse volumique apparente de la chènevotte, donnée par l'Equation IV.23, où $\rho_{particule}$ est la masse volumique apparente des particules.

$$\phi_{inter} = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_{particule}} \quad (IV.23)$$

Cette relation reste valable tant que les particules ne sont pas écrasées, ce qui est le cas pour nos échantillons car les chènevottes ont simplement été versées et secouées. Il est donc possible de déterminer à partir des mesures de porosité interparticule la masse volumique apparente des particules. Cela a été réalisé à l'aide d'une méthode des moindres carrés permettant de minimiser les différences entre les porosités interparticules expérimentales et celles obtenues via l'Equation IV.23. Le critère minimisé est la somme des carrés des écarts normalisés ϵ donné Equation IV.24 où y_{exp} et y_{cal} correspondent respectivement aux valeurs expérimentales et calculées.

$$\epsilon = \sum_{\rho_v} \left(\frac{y_{exp}(\rho_v) - y_{cal}(\rho_v)}{y_{exp}(\rho_v)} \right)^2 \quad (IV.24)$$

Les masses volumiques apparentes estimées suivant cette méthode sont données Table IV.9 avec leurs coefficients de corrélation R^2 et les porosités expérimentales sont comparées à leur évolution théorique à la Figure IV.12.

On constate sur cette figure que de faibles différences existent entre les estimations de porosité et la relation linéaire. Cependant, les bonnes corrélations (coefficients R^2 supérieurs à 0,9) obtenues confirment l'applicabilité de l'Equation IV.23 et donc, la validité de l'inversion.

Chanvres	CA	CB	CC	CD	CE	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5
$\rho_{particule}$ ($kg.m^{-3}$)	523	460	486	605	499	362	425	463	531	633
R^2 (ϕ_{inter})	0,95	0,92	0,99	0,83	0,98	0,88	0,91	0,83	0,93	0,98
ϕ_{intra}	0,457	0,621	0,560	0,459	0,379	0,701	0,658	0,628	0,570	0,498
\bar{E} (mm)	0,346	0,419	0,477	0,317	0,280	0,905	0,523	0,395	0,279	0,184

Tableau IV.9 – Masses volumiques apparentes des chènevottes

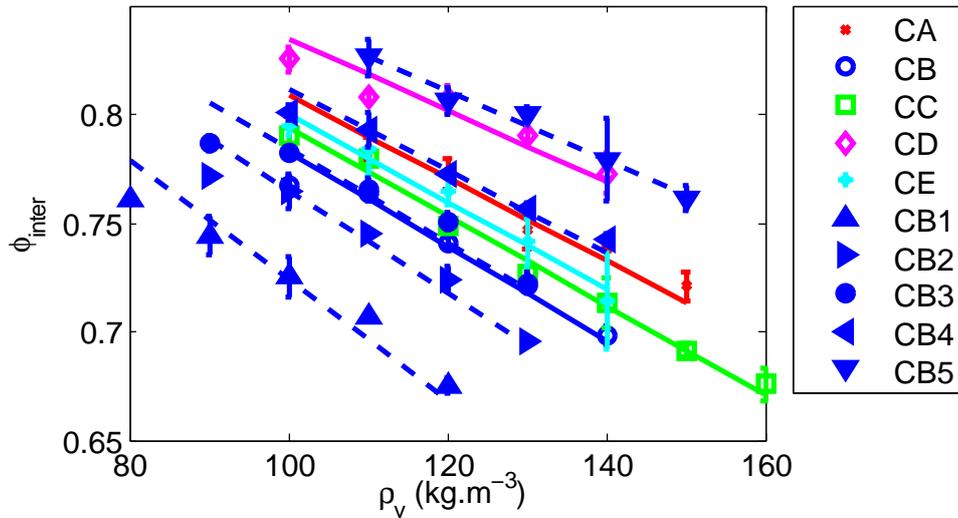


Figure IV.12 – Evolution des porosités interparticules en fonction de la masse volumique apparente, résultats expérimentaux et modélisation

Les valeurs de la porosité interparticulaire sont comprises entre 65 et 85%, soit environ 20% de moins que la porosité totale des chènevottes. Effectivement, les masses volumiques apparentes se situent entre 360 et 630 $kg.m^{-3}$ ce qui est très en-deçà des masses volumiques de squelette comprises entre 800 et 1300 $kg.m^{-3}$. Cela est dû à l'importante porosité intraparticulaire des chènevottes ϕ_{intra} .

Détermination de la porosité intraparticulaire La porosité intraparticulaire peut être évaluée d'après l'Equation IV.25 et est donnée au Tableau IV.9 pour les 10 chènevottes.

$$\phi_{intra} = 1 - \frac{\rho_{particule}}{\rho_{squelette}} \quad (IV.25)$$

Les résultats donnent des porosités intraparticulaires comprises entre 38 et 70%, ce qui encadre la valeur obtenue par [Ceyte 2008] par tomographie. De plus, on constate qu'à la fois la densité apparente et la porosité interparticulaire sont fortement corrélées à la granulométrie pour les chènevottes CB1 à CB5. Cela peut être attribué au fait que les particules de petites dimensions

proviennent en grande partie du haut des tiges de chanvre où ces dernières sont moins poreuses et plus denses. Ce phénomène n'a à notre connaissance pas été explicité dans la littérature, et il serait intéressant de coupler cette analyse à des observations au microscope ou au tomographe.

Détermination de l'épaisseur moyenne des particules Enfin, en combinant les résultats obtenus pour la masse volumique apparente $\rho_{particule}$ et ceux pour la masse volumique surfacique ρ_s obtenus par analyse d'images présentés Chapitre II, Section 2.2, il est possible d'estimer l'épaisseur moyenne des particules \bar{E} par l'Equation IV.26. Les valeurs déterminées sont données au Tableau IV.9.

$$\bar{E} = \rho_s / \rho_{particule} \quad (\text{IV.26})$$

Les épaisseurs moyennes varient entre 0,2 et 0,9 mm et correspondent aux ordres de grandeur obtenus à l'aide d'un pied à coulisse sur des échantillons peu représentatifs. Dans [Ceyte 2008], l'épaisseur des particules est prise par défaut à 0,5 mm pour toutes les chènevottes considérées. Bien que la valeur de 0,5 mm corresponde à la moyenne de la gamme de chènevottes considérée dans la thèse, nos résultats montrent que l'épaisseur moyenne des particules peut grandement varier d'une chènevotte à une autre et que retenir cette valeur par défaut peut constituer une grosse approximation de l'épaisseur moyenne réelle.

Il s'avère finalement que l'estimation acoustique de la porosité interparticule est très riche d'enseignement au niveau de la microstructure de la chènevotte. Cette dernière donne en effet accès à la masse volumique apparente des particules, à la porosité intraparticule et à l'épaisseur moyenne des particules, trois données fondamentales susceptibles d'apporter une meilleure compréhension des phénomènes acoustiques, thermiques et mécaniques au sein de la chènevotte.

2.3.2 Résistivité

Afin de modéliser l'évolution des résistivités caractérisées sur les chènevottes, les modèles de résistivité développés pour les matériaux granulaires, introduits au Chapitre III, ont été exploités.

A cette fin, les porosités interparticules ont été calculées d'après l'Equation IV.23, et pour chaque chènevotte, un rayon équivalent $R_{particule}$ a été recherché par une méthode des moindres carrés (Equation IV.24). Il s'avère que la plupart des modèles peuvent donner par cette méthode des prédictions satisfaisantes, comme le montrent les moyennes des coefficients R^2 obtenus sur les dix chènevottes Tableau IV.10.

Les modèles de [Priour du Plessis & Woudberg 2008] et de [Boutin & Geindreau 2010] v

IV.2 Modélisation des chènevottes

sont les plus adaptés aux chènevottes d'après ces résultats, et sont retenus pour la suite de l'analyse. Leurs prédictions étant très proches, seules celles obtenues avec le modèle de Boutin et Geindreau v sont comparées aux valeurs expérimentales Figure IV.13 (a). Une autre confrontation de ces données est présentée Figure IV.13 (b), où la perméabilité visqueuse normalisée par le rayon équivalent des particules $\Pi_0/R_{particule}^2$ est tracée en fonction de la porosité interparticule.

Modèles	R^2 moyens
[Attenborough 1993]	0,956
[Prieur du Plessis & Woudberg 2008]	0,961
[Voronina & Horoshenkov 2003]	0,705
[Umnova <i>et al.</i> 2000]	0,936
[Boutin & Geindreau 2010] p	0,931
[Boutin & Geindreau 2010] v	0,963
[Boutin & Geindreau 2010] c	0,934

Tableau IV.10 – Moyennes des coefficients de détermination R^2 obtenus pour la modélisation de la résistivité des chènevottes

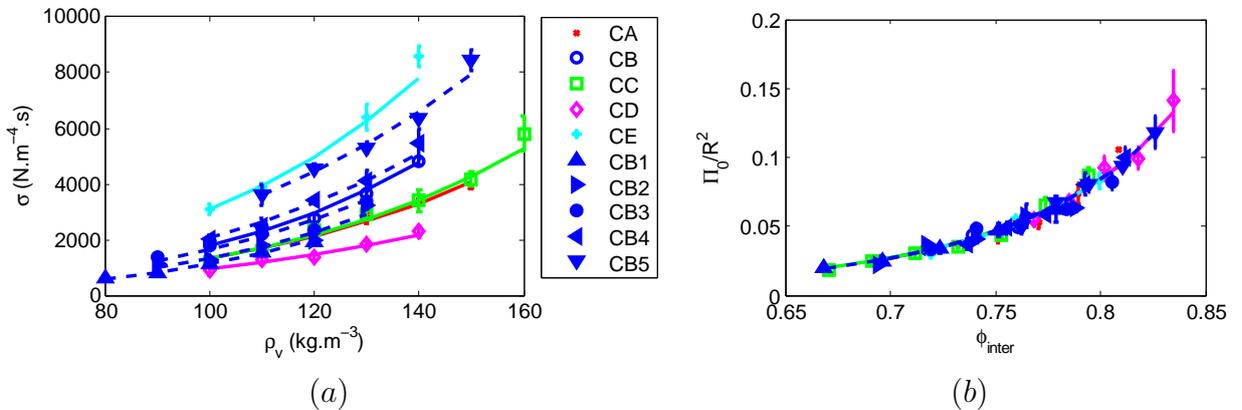


Figure IV.13 – Evolution des résistivités des chènevottes en fonction de leur masse volumique apparente (a) et des perméabilités normalisées en fonction de leur porosité interparticule (b), résultats expérimentaux et modélisation

Sur la Figure IV.13 (a), on observe d'une part que le comportement des chènevottes est restitué avec une précision de $\pm 5\%$ par les modélisations, et d'autre part, que ce comportement est équivalent à celui de granulats sphérique de rayon $R_{particule}$. En effet, cela est particulièrement bien visible Figure IV.13 (b) où la normalisation du modèle forme une courbe unique en fonction de la porosité interparticule, autour de laquelle toutes les valeurs expérimentales sont regroupées.

Chapitre IV. Modélisation des propriétés acoustiques des matériaux à base de fibres et particules végétales

Les rayons équivalents $R_{particule}(\sigma)$ et les coefficients de détermination des modèles sont présentés pour chaque chènevotte Tableau IV.11.

Chanvres	CA	CB	CC	CD	CE	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5
$R_{particule}(\sigma)$ (DP&W)	280	282	305	281	195	498	364	294	220	152
R^2 (DP&W)	0,971	0,980	0,968	0,966	0,950	0,991	0,915	0,927	0,974	0,970
$R_{particule}(\sigma)$ (B&G _v)	384	389	421	384	268	688	502	404	302	208
R^2 (B&G _v)	0,971	0,980	0,974	0,970	0,956	0,987	0,920	0,921	0,978	0,974

Tableau IV.11 – Rayons équivalents des particules estimés par les modèles de résistivité [Prieur du Plessis & Woudberg 2008] (DP&W) et [Boutin & Geindreau 2010]_v (B&G_v)

Les coefficients sont tous supérieurs à 0,9 et confirment la validité de la modélisation dans les deux cas. De plus, les rayons équivalents donnent une information en cohérence vis-à-vis de la granulométrie des particules, mais, étant donnée la forme parallélépipédique et la distribution de ces dernières, l'interprétation de ce rayon n'est pas triviale. Toutefois, en guise de première approche, une régression linéaire a été effectuée entre ces rayons et l'épaisseur moyenne des particules \bar{E} donnée Tableau IV.9. Les relations obtenues sont données Equations IV.27 et IV.28 pour les deux modèles.

$$R_{particule}(DP\&W) = 0.462\bar{E} + 97.10^{-6} \quad (R^2 = 0,936) \quad (IV.27)$$

$$R_{particule}(B\&G_v) = 0.642\bar{E} + 130.10^{-6} \quad (R^2 = 0,939) \quad (IV.28)$$

Ces régressions montrent donc qu'il existe une relation entre le rayon équivalent des particules et leurs caractéristiques granulométriques et encouragent des approfondissements permettant de déterminer cette dernière. De plus, on constate que les valeurs des rayons équivalents sont très proches de celles des épaisseurs moyennes. Les particules reposent majoritairement sur leur grande section, en conséquence de quoi le flux acoustique, en incidence normale, est perpendiculaire à cette section. L'épaisseur des particules est dans ce cas la grandeur la plus caractéristique de l'écoulement visqueux au sein de la chènevotte.

2.3.3 Tortuosité

Les modèles de tortuosité présentés Tableau III.5 ont ensuite été comparés aux tortuosités des chènevottes obtenues par mesure du temps de vol (voir Chapitre II, Section 2.6). Les modèles de [Boutin & Geindreau 2010] et [Umnova *et al.* 2000] ont été appliqués dans un premier temps. Ces modèles étant uniquement adaptés aux granulats sphériques, leurs prédictions sous-estiment de près de 50% les tortuosités expérimentales (cf. Figure IV.14).

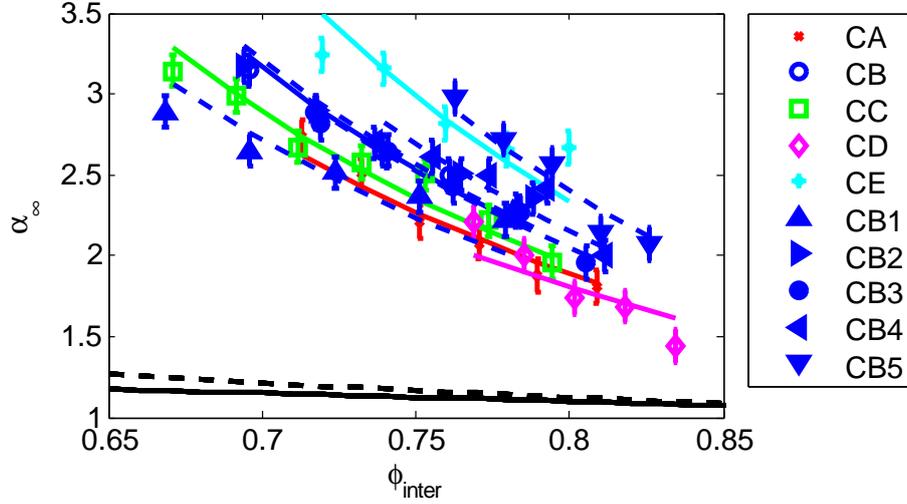


Figure IV.14 – Tortuosité des chènevottes en fonction de la porosité interparticulaire, les modèles sphériques de [Umnova *et al.* 2000] (- -) et [Boutin & Geindreau 2010] (-) sont ajoutés pour comparaison

Le modèle empirique de [Attenborough 1993] a été utilisé dans un second temps, et a permis, grâce à son facteur de forme n , de prendre en compte la forme des granulats. n a été déterminé par la méthode des moindres carrés, ses valeurs et les coefficients de détermination associés sont donnés pour les chènevottes au Tableau IV.12.

Chanvres	CA	CB	CC	CD	CE	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5
n	2,85	3,23	2,98	2,65	3,80	2,80	3,27	3,22	3,44	3,93
R^2	0,953	0,958	0,935	0,760	0,404	0,570	0,852	0,966	0,739	0,928

Tableau IV.12 – Facteurs de forme n des particules et coefficients de détermination associés

Les facteurs de forme obtenus sont compris entre 2,5 et 4. Les coefficients R^2 sont moins élevés que pour la résistivité, mais restent acceptables pour la plupart des chènevottes, CE et $CB1$ étant les moins bien modélisées. De plus, les facteurs de forme mettent clairement en évidence le fait qu'à porosité fixée, la tortuosité des chènevottes constituées de petites particules est plus élevée, les facteurs de forme étant plus importants. Ceci est d'ailleurs confirmé par la Figure IV.14.

Les facteurs de forme n ont été analysés afin de les mettre en relation avec les paramètres granulométriques. En effet, [Comiti & Renaud 1988] ont par exemple suggéré qu'une relation empirique existait entre le facteur de forme p du modèle et les dimensions des particules étudiées. Malheureusement, pour la chènevotte, aucun lien n'a à ce jour pu être mis en évidence. Ce point figure parmi nos perspectives de recherche.

2.3.4 Longueur caractéristique visqueuse

Enfin, les longueurs caractéristiques visqueuses ont à leur tour été analysées. Les trois modèles de la littérature présentés Tableau III.6 donnent des résultats très similaires. Le modèle de [Boutin & Geindreau 2010]_v est donc choisi afin de garder une cohérence vis-à-vis des modèles de résistivité.

Dans un premier temps, les modélisations ont été réalisées en se basant sur les rayons équivalents estimés à partir des résistivités $R_{particule}(\sigma)$. Les longueurs visqueuses modélisées ont dans ce cas surestimé significativement les valeurs expérimentales, preuve que les modèles sphériques ne sont pas adaptés aux particules de chanvre pour la longueur caractéristique visqueuse.

Le modèle de [Boutin & Geindreau 2010]_v a toutefois été réutilisé en déterminant un nouveau rayon équivalent $R_{particule}(\Lambda)$ par une méthode des moindres carrés. Ces rayons et les coefficients de détermination sont donnés dans le Tableau IV.13 et les modélisations sont présentées Figure IV.15.

Chanvres	CA	CB	CC	CD	CE	CB1	CB2	CB3	CB4	CB5
$R_{particule}(\Lambda)$ (μm)	84	75	86	94	30	220	123	97	60	26
R^2	0,577	0,433	0,387	0,706	0,015	0,842	0,555	0,538	0,550	0,262

Tableau IV.13 – Rayons équivalents des particules estimés à partir des longueurs caractéristiques visqueuses

Les rayons obtenus sont beaucoup plus faibles que les rayons estimés par la résistivité mais suivent exactement la même tendance. Une régression linéaire a donc été effectuée afin de relier $R_{particule}(\Lambda)$ à l'épaisseur moyenne des particules \bar{E} , et est donnée à l'Equation IV.29.

$$R_{particule}(\Lambda) = 0.260\bar{E} - 18.10^{-6} \quad (R^2 = 0,906) \quad (\text{IV.29})$$

La Figure IV.15 (b) fait apparaître la courbe maîtresse de la longueur visqueuse normalisée en fonction de la porosité interparticule, et on peut constater que même en réadaptant le rayon équivalent des chènevottes, le modèle n'est pas complètement satisfaisant, sous-estimant de jusqu'à 50% la longueur caractéristique visqueuse pour les plus fortes porosités.

2.4 Synthèse de la méthode de modélisation

En résumé, d'après les résultats précédents, les propriétés acoustiques des chènevottes peuvent être modélisées en deux étapes à partir de 4 paramètres de base, selon le schéma donné Figure IV.16 :

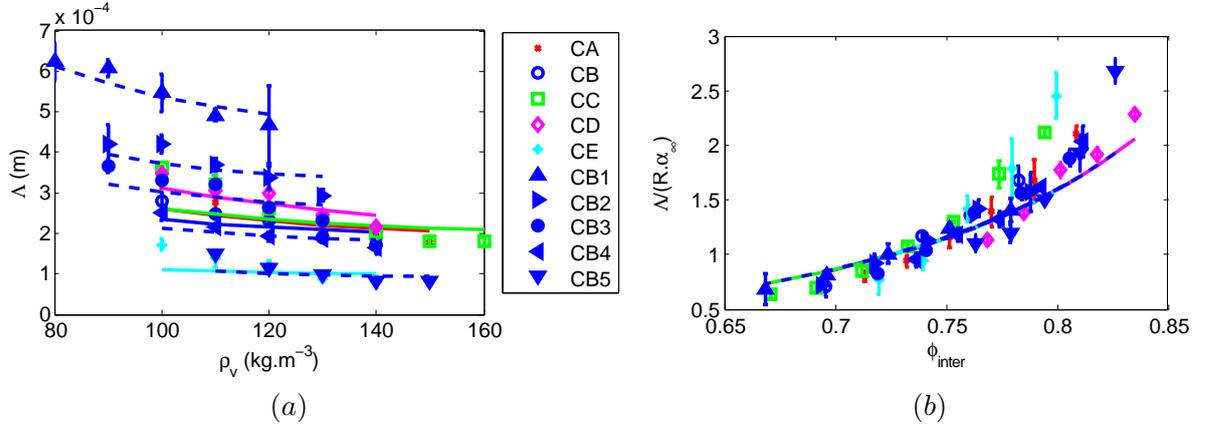


Figure IV.15 – Evolution des longueurs caractéristiques visqueuses des chènevottes en fonction de leur masse volumique apparente (a) et des longueurs caractéristiques visqueuses normalisées $\Lambda/(R_{particule}\alpha_\infty)$ en fonction de leur porosité interparticulaire (b), résultats expérimentaux et modélisation

1. Les paramètres acoustiques (ϕ_{inter} , σ , α_∞ et Λ) sont dans un premier temps évalués à partir de la masse volumique apparente des chènevottes ρ_v , la masse volumique apparente des particules $\rho_{particule}$, l'épaisseur moyenne des particules \bar{E} (qui permet de retrouver les rayons équivalents $R_{particule}(\sigma)$ et $R_{particule}(\Lambda)$ d'après les Equations IV.28 et IV.29), et le facteur de forme n ,
2. Les propriétés acoustiques sont ensuite prédites à l'aide des modèles de Johnson *et al.* et de Zwicker et Kosten.

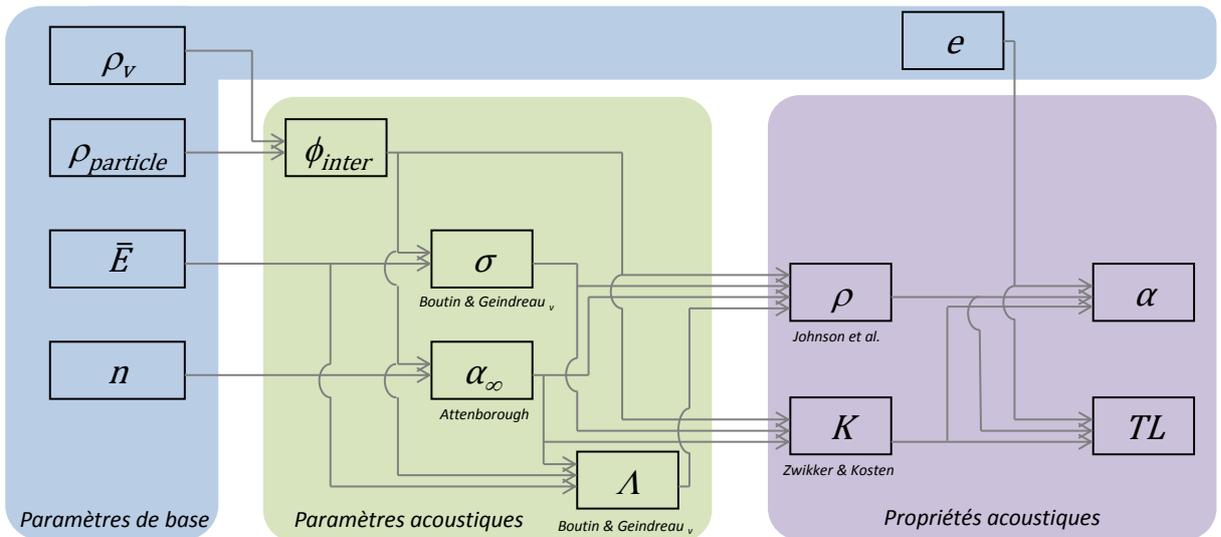


Figure IV.16 – Diagramme présentant le processus de modélisation des chènevottes

3 Modélisation des bétons de chanvre

Dans la section précédente, des relations entre les paramètres microstructuraux des particules et les propriétés acoustiques de la chènevotte ont été mises en évidence. Il s'agit maintenant de procéder de façon analogue afin de pouvoir expliquer les propriétés acoustiques des bétons de chanvre en fonction des paramètres microstructuraux des constituants et des paramètres de mise en œuvre.

Le béton de chanvre peut être considéré comme un arrangement de particules de chanvre entre lesquelles on a placé du liant. En conséquence, nous nous sommes basés sur les résultats obtenus dans le cas de la chènevotte afin de modéliser le béton de chanvre.

3.1 Description du matériau

Comme indiqué au Chapitre II, ce matériau est caractérisé par trois échelles de porosité différentes, une due aux particules de chanvre, une due au liant et la dernière due au mélange de la chènevotte et du liant. La difficulté de modéliser les propriétés acoustiques des bétons de chanvre consiste donc principalement à savoir quelles échelles de porosité participent à la dissipation acoustique. On notera dans la suite $l_{intra\ liant}$ la dimension caractéristique des pores dans le liant, $l_{intra\ particule}$ la dimension caractéristique des pores intraparticules et l_{inter} la dimension des pores interparticules des bétons de chanvre.

On a vu que dans le cas des chènevottes, assimilables à des bétons de chanvre sans liant, les pores intraparticules ne jouent pas de rôle significatif sur les propriétés acoustiques dans le domaine fréquentiel considéré. Mais, est-ce aussi le cas des bétons de chanvre dans lesquels la présence de liant peut se répercuter sur le contraste de perméabilité entre les échelles de porosité ?

Concernant le liant, les caractérisations présentées au Chapitre II ont mis en lumière un caractère imperméable et réfléchissant. L'exploitation de ces résultats et des modèles poreux va nous aider à savoir si la porosité intraliant joue un rôle vis-à-vis des propriétés acoustiques des bétons de chanvre.

3.2 Modélisation multi-échelle

3.2.1 Modélisation des liants

Avant de traiter le cas du béton de chanvre, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement des liants étudiés dans cette thèse. Les porosités des 5 liants étudiés ont été présentées à la

IV.3 Modélisation des bétons de chanvre

Section 3.3 du Chapitre II, et sont comprises entre 25 et 60%. En revanche, ces matériaux présentent une résistivité supérieure à $10^7 N.m^{-4}.s$. La valeur de ce paramètre est donc trop élevée pour être déterminée à l'aide des méthodes de caractérisation utilisées pour les autres matériaux.

Pour des matériaux aussi résistifs, le comportement du poreux est purement visqueux ($\omega \ll \omega_v$ avec $\omega_v = \frac{\sigma\phi}{\rho_0\alpha_\infty}$) et principalement gouverné par la résistivité. En effet, d'après des simulations réalisées avec le modèle de Zwikker et Kosten présenté aux Equations III.32 et III.32, avec une porosité de 0,5 et une résistivité de $10^7 N.m^{-4}.s$, l'absorption acoustique varie de moins de 2% pour une tortuosité comprise entre 1 et 5. Le comportement d'un tel matériau peut en conséquence être modélisé par des pores cylindriques circulaires droits, en négligeant les effets de la tortuosité devant ceux de la résistivité.

Les liants ont donc été décrits à l'aide du modèle de Zwikker et Kosten, en fixant $\alpha_\infty = 1$, et en évaluant la résistivité par moindres carrés en minimisant la différence entre absorptions acoustiques modélisée et mesurée. Les résistivités ont été moyennées pour chaque type de liant sur les trois échantillons, et sont données au Tableau IV.14.

Code	Résistivité ($10^6 N.m^{-4}.s$)	r (μm)
LA	125	1,51
LB	135	1,71
LC	143	3,11
LD	56	2,12
LE	201	1,99

Tableau IV.14 – Résistivités des liants estimées à l'aide du modèle de Zwikker et Kosten, et rayon équivalent des pores r

Les résistivités obtenues sont de l'ordre de $10^8 N.m^{-4}.s$, ce qui reflète le comportement très imperméable des liants aux ondes acoustiques. De telles résistivités s'expliquent à la fois par la faible porosité des liants mais aussi par la faible dimension des pores. Le rayon des pores r peut par ailleurs être estimé, toujours en considérant des pores cylindriques grâce à la relation $r = \sqrt{\frac{8\alpha_\infty\mu}{\sigma\phi}}$ (voir Equation III.70), et est calculé dans le Tableau IV.14 pour les 5 types de liant. On se rend compte que cette dimension est effectivement de l'ordre de 1 μm quelle que soit la nature du liant.

Ce résultat a été validé en utilisant d'autres modèles tel que le modèle de Johnson *et al.*. Ainsi, en supposant que le liant fait une prise correcte dans le béton de chanvre, les pores intraliants ont peu de raison de participer à la dissipation acoustique dans le béton de chanvre, le contraste de perméabilité entre le liant et les pores interparticules étant très faible. Cette conjecture va être confirmée dans le paragraphe suivant.

3.2.2 Analyse du comportement multi-échelle

Les bétons de chanvre possèdent trois dimensions caractéristiques de pores dont on peut retenir les propriétés suivantes :

- $l_{intra\ liant} \approx 1\mu m$,
- $l_{intra\ particule} \approx 10$ à $60\ \mu m$. De plus, l’analyse des propriétés acoustiques des chènevottes a démontré l’existence d’un fort contraste de perméabilité entre les pores interparticules et intraparticules, dans la plage fréquentielle $w > w_d$,
- peu de données sont connues en ce qui concerne les pores interparticules des bétons de chanvre, une simple estimation visuelle conduit à $l_{inter} \geq 1mm$ pour la majorité des échantillons.

A partir de ces données, les premières estimations des contrastes de perméabilités sont $l_{intra\ liant}/l_{inter} \leq 10^{-3}$ et $l_{intra\ particule}/l_{inter} \leq 6.10^{-2}$. Il semble donc y avoir un fort contraste de perméabilité vis-à-vis du liant, tandis que le contraste avec les pores intraparticules reste intermédiaire.

Afin de palier à ce manque de données nous empêchant de conclure sur le comportement multi-échelle des bétons de chanvre, leurs propriétés acoustiques ont été analysées de façon analogue à celles de la chènevotte. Dans un premier temps, la partie réelle du module d’incompressibilité dynamique normalisé K/P_0 a systématiquement été comparée à ses limites asymptotiques basses et hautes fréquences théoriques $1/\phi$ et γ/ϕ respectivement, ϕ étant la porosité ouverte des bétons de chanvre.

Le même constat que pour les chènevottes a été effectué, et est illustré Figure IV.17 pour le béton de chanvre R2 des formulations “Dosage liant”.

On voit dans ce cas, représentatif des autres échantillons, que la partie réelle mesurée dépasse la limite supérieure théorique dès $400\ Hz$. Cela nous donne la preuve que les pores ouverts du béton de chanvre ne participent pas tous à la dissipation acoustique. Toutefois, il ne s’agit que d’une preuve qualitative, qui ne permet pas de savoir quels pores participent à la dissipation.

Trois hypothèses sont envisagées :

1. Seuls les pores intraparticules ne participent pas, la porosité jouant réellement un rôle dans la dissipation acoustique (dite “porosité active”) devient alors :

$$\phi_{active} = 1 - \frac{C_{liant}}{\rho_{squelette\ liant}} - \frac{C_{chanvre}}{\rho_{particule}} \quad (IV.30)$$

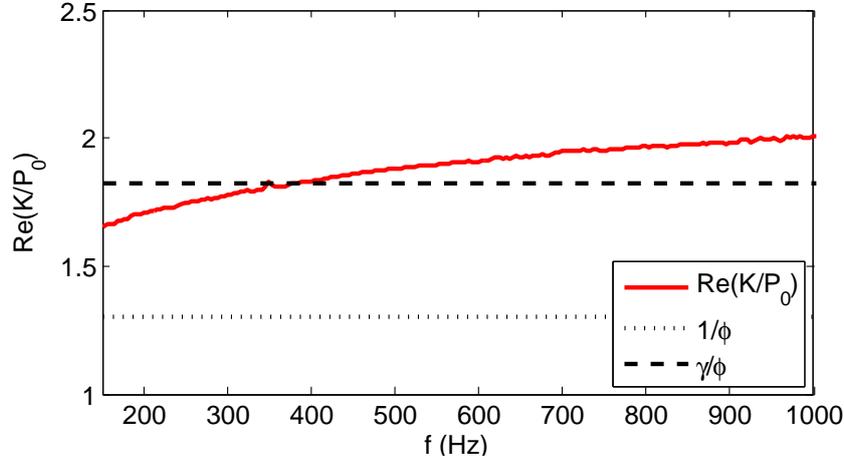


Figure IV.17 – Partie réelle du module d’incompressibilité dynamique normalisé K/P_0 comparé aux limites asymptotiques théoriques $1/\phi$ et γ/ϕ , pour le béton de chanvre R2 (Formulations “Dosage liant”)

2. Seuls les pores intraliants ne participent pas, la porosité active est alors calculée par :

$$\phi_{active} = 1 - \frac{C_{liant}}{\rho_{apparent\ liant}} - \frac{C_{chanvre}}{\rho_{squelette\ chanvre}} \quad (IV.31)$$

3. Ni les pores intraliants, ni les intraparticules ne participent, la porosité active devient :

$$\phi_{active} = 1 - \frac{C_{liant}}{\rho_{apparent\ liant}} - \frac{C_{chanvre}}{\rho_{particule}} \quad (IV.32)$$

$\rho_{squelette}$ et $\rho_{apparent}$ faisant respectivement référence aux masses volumiques de squelette et apparente des constituants.

Connaissant les dosages des constituants, leurs masses volumiques de squelette et apparente, ces trois hypothèses ont pu être confrontées aux résultats expérimentaux et sont illustrées à la Figure IV.18 dans le même cas (“Dosage liant” - R2).

Ce graphe montre que les deux premières hypothèses ne sont pas admissibles. De même que pour la chènevotte, les seuls pores qui participent dans le matériau sont donc les pores interparticules, les deux autres échelles étant masquées par contraste de perméabilité.

Les propriétés acoustiques du béton de chanvre peuvent donc être calculées comme les propriétés acoustiques du réseau de pores interparticules, par des modèles classiques en simple porosité. Notons toutefois que la validité de ce résultat dépend directement de la précision de la mesure du module d’incompressibilité dynamique, qui, comme on l’a souligné dans le Chapitre II, est très bruitée dans le cas des échantillons les plus imperméables, notamment les ratios L/C supérieurs à 3 des formulations “Dosage liant”.

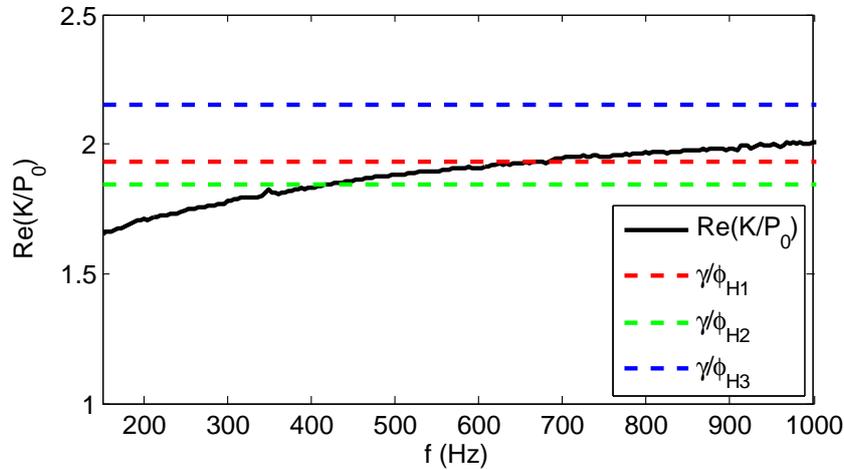


Figure IV.18 – Partie réelle du module d’incompressibilité dynamique normalisé K/P_0 comparé à la limite asymptotique hautes fréquences théorique γ/ϕ , suivant les trois hypothèses explorées, pour le béton de chanvre R2 (Formulations “Dosage liant”)

3.2.3 Modélisation des propriétés acoustiques

Fréquences caractéristiques La modélisation des bétons de chanvre est réalisée suivant la même procédure que pour les chènevottes. Dans un premier temps, la fréquence de découplage a été évaluée pour chaque échantillon (voir Tableaux IV.15 à IV.17). Bien que ces matériaux soient plus résistifs que les chènevottes, leurs masses volumiques plus importantes entraînent des fréquences de découplage inférieures à 20Hz , ce qui permet de formuler une fois de plus l’hypothèse de squelette rigide.

Les fréquences caractéristiques visco-inertielles et thermiques sont données dans les Tableaux IV.15 à IV.17. Pour les trois séries, et pour la majorité des formulations, ces fréquences se situent dans la gamme fréquentielle expérimentale, si bien que tous les effets doivent être considérés. En ce qui concerne les formulations R8 et R9 de la série “Dosage liant”, le caractère imperméable des échantillons n’a pas permis la caractérisation des paramètres acoustiques, et donc des fréquences caractéristiques.

Modèles utilisés et caractérisation des paramètres acoustiques Comme cela a été précisé dans les paragraphes précédents, la chènevotte peut être considérée comme un béton de chanvre de référence, sans liant. Afin de pouvoir comparer les résultats des chènevottes et des bétons de chanvre, il a donc été choisi d’utiliser le même modèle, à savoir, le modèle de [Johnson *et al.* 1987] pour les effets visco-inertiels et le modèle de [Zwikker *et al.* 1941] pour les effets thermiques. Ces modèles sont présentés Section 2.2.2 aux Equations IV.19 et IV.20.

IV.3 Modélisation des bétons de chanvre

Code	f_{dec} (Hz)	f_v (Hz)	f_t (Hz)
CA-LA	6	2313	324
CA-LB	3	286	309
CA-LC	15	2585	448
CA-LD	12	2970	345
CA-LE	9	2349	299
CB-LA	8	2850	548
CB-LB	8	1112	329
CB-LC	16	2970	273
CB-LD	1	212	335
CB-LE	2	275	252
CC-LA	2	307	297
CC-LB	11	1575	308
CC-LC	8	1164	218
CC-LD	2	203	257
CC-LE	2	183	255

Tableau IV.15 – Fréquences caractéristiques des bétons de chanvre “5L3C”

Code	f_{dec} (Hz)	f_v (Hz)	f_t (Hz)
C1	1	73	200
C2	1	88	214
C3	1	120	236
C4	1	196	264
C5	2	221	283
C6	2	357	263

Tableau IV.16 – Fréquences caractéristiques des bétons de chanvre “Densité”

Code	f_{dec} (Hz)	f_v (Hz)	f_t (Hz)
R1	2	159	244
R2	1	117	236
R3	1	125	250
R4	2	156	237
R5	1	120	161
R6	1	115	31
R7	2	678	199

Tableau IV.17 – Fréquences caractéristiques des bétons de chanvre “Dosage liant”

Les paramètres acoustiques, c.-à-d. la porosité interparticule ϕ_{inter} , la résistivité σ , la tortuosité α_∞ et la longueur caractéristique visqueuse Λ , sont déterminés suivant l’approche suivante :

1. Estimation de σ grâce à la limite basses fréquences de la partie imaginaire de la densité dynamique,

2. Evaluation du ratio $\alpha_\infty/\phi_{inter}$ d'après l'Equation 18, α_∞ étant initialement inconnu,
3. Détermination de Λ suivant l'Equation IV.22, à partir de σ et de $\alpha_\infty/\phi_{inter}$,
4. Calcul de ϕ_{inter} par inversion de la partie réelle du module d'incompressibilité dynamique mesuré, suivant le modèle de Zwicker et Kosten.

Validation expérimentale La modélisation est effectuée pour tous les échantillons et est présentée sur les Figures IV.19 et IV.20 pour l'absorption et l'indice d'affaiblissement acoustiques des bétons de chanvre des séries "Densité" et "Dosage liant". Les modélisations relatives à la série "5L3C" sont présentées en Annexe 10.

Sur ces graphes, les propriétés acoustiques mesurées sont comparées aux modélisations réalisées à partir des paramètres acoustiques moyens de chaque formulation.

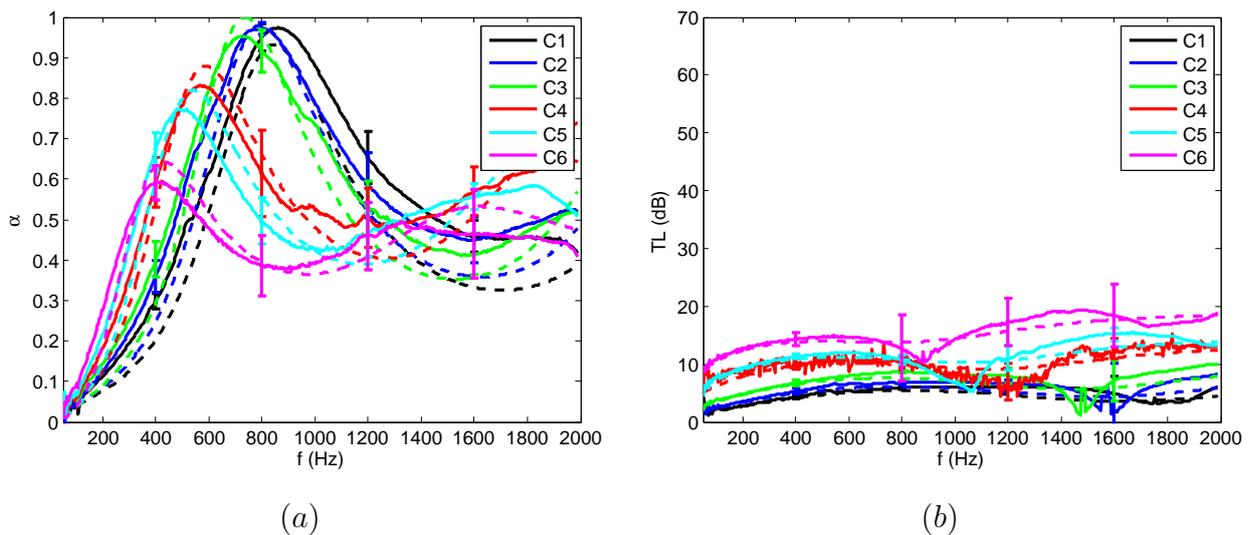


Figure IV.19 – Comparaison des mesures (—) et modélisations (- -) de l'absorption acoustique (a) et de l'indice d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre de la série "Densité"

On constate que les modélisations suivent bien les tendances données à la fois par les absorptions acoustiques et les indices d'affaiblissement. Toutefois, il est clair que les modélisations sont moins précises ici que pour les chènevottes (voir Figure IV.11).

Cela s'explique premièrement par le fait que les paramètres acoustiques sont obtenus plus difficilement dans le cas des bétons de chanvre, les mesures de la densité dynamique et du module d'incompressibilité dynamique étant rendues délicates par le caractère plus imperméable des bétons de chanvre.

A cette difficulté s'ajoute le caractère hétérogène des bétons de chanvre. Comme on l'a vu dans la Section 4.4 du Chapitre II, les écarts-types inter-échantillons sont bien plus impor-

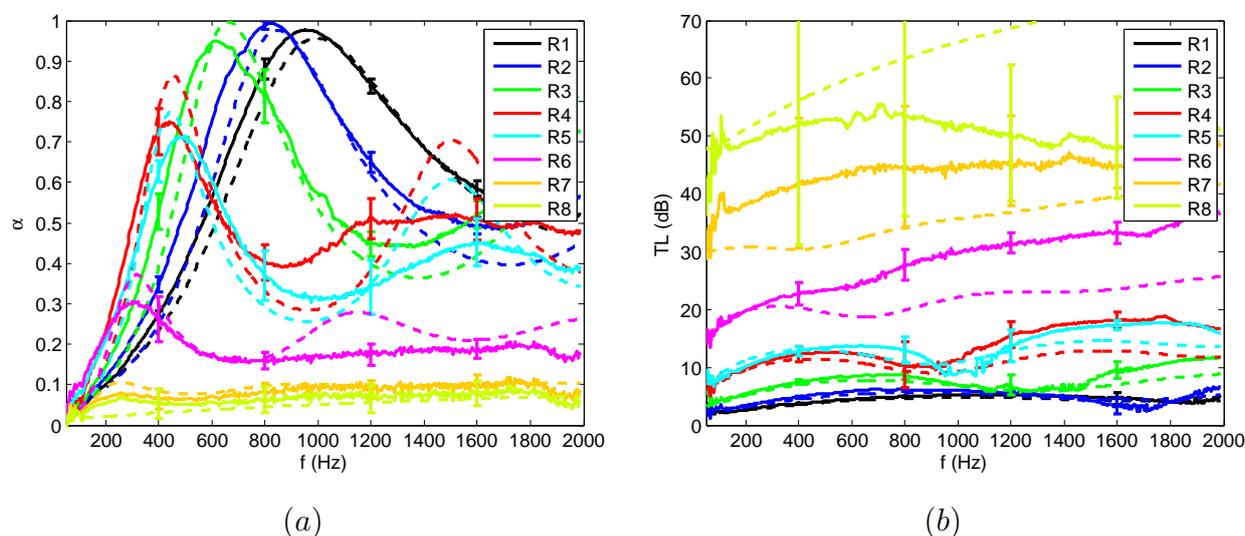


Figure IV.20 – Comparaison des mesures (—) et modélisations (- -) de l’absorption acoustique (a) et de l’indice d’affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre de la série “Dosage liant”

tants pour les bétons qui, à l’échelle des échantillons testés de 10 *cm* de diamètre et 5 *cm* d’épaisseur, s’avèrent moins homogènes que les échantillons de chènevotte. Cette hétérogénéité, principalement attribuable à une répartition inégale du liant dans les pores du matériau, a pour conséquence d’éloigner les propriétés acoustiques de l’échantillon de béton de chanvre de celles prédites par les modèles fluide-équivalent correspondant à un matériau parfaitement homogène.

Ce caractère hétérogène se voit particulièrement bien sur les propriétés acoustiques des échantillons plus denses ou comprenant un fort dosage en liant, ces dernières devenant discontinues et s’éloignant de la tendance lissée des modèles.

3.3 Modélisation à partir des paramètres de base

Les paramètres acoustiques caractérisés sur les bétons de chanvre ont ensuite été analysés afin de comprendre davantage le fonctionnement des bétons de chanvre à l’échelle microscopique. Pour chaque paramètre, des modèles ont été construits en s’appuyant sur les caractéristiques des liants et des chènevottes déterminées préalablement, et ont été confrontés aux résultats expérimentaux.

3.3.1 Porosité interparticule

La porosité interparticule est la porosité que l’on peut qualifier d’active ou d’effective dans le béton de chanvre, étant l’échelle de porosité où se jouent tous les phénomènes de dissipa-

tion visco-inertielle et thermique. Cette porosité correspond au volume d'air dans le béton de chanvre, différent des pores intraparticules et des pores intraliants. Elle peut donc se calculer en connaissant les dosages en chanvre et liant dans le béton, grâce à l'Equation IV.33.

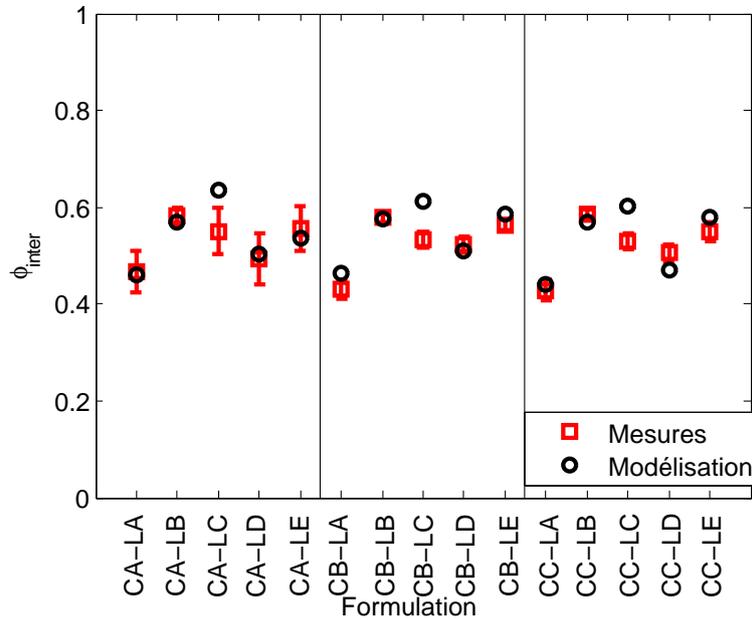
$$\phi_{inter} = 1 - \frac{C_{liant}}{\rho_{apparent\ liant}} - \frac{C_{chanvre}}{\rho_{particule}} \quad (IV.33)$$

$C_{chanvre}$ correspond à la concentration en chanvre utilisée lors de la fabrication, C_{liant} à la concentration en liant pris (évaluée à partir de la masse volumique stabilisée), $\rho_{particule}$ à la masse volumique apparente des particules évaluée Section 2.3.1. Les masses volumiques des liants ont été évaluées sur les échantillons de pâtes de liant pur (voir Tableau II.18). Cependant, ceci constitue une hypothèse de départ, la masse volumique des liants à l'état pur pouvant être différente de celle du liant en contact avec la chènevotte dans le béton de chanvre.

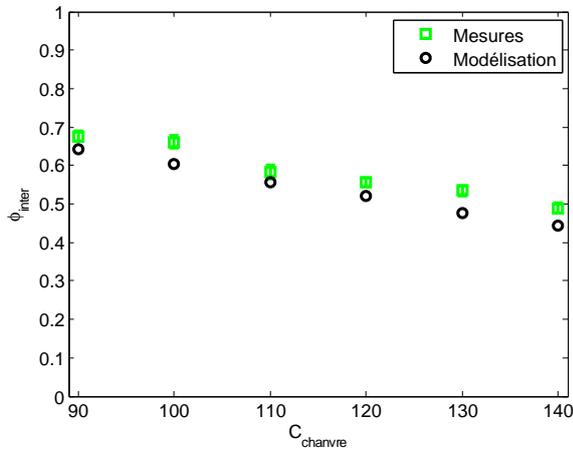
Les prédictions obtenues à partir de l'Equation IV.33 sont comparées aux résultats expérimentaux sur la Figure IV.21.

On constate que cette relation permet de prédire de façon satisfaisante les porosités interparticules de nombreuses configurations. Pour les formulations "5L3C", les bétons sont modélisés convenablement à l'exception des cas CA-LC, CB-LC et CC-LC dont les porosités sont surestimées par les modèles. Ces différences peuvent être expliquées par une fermeture de pores interparticules par le liant dans le béton de chanvre, rendant la densité apparente du liant dans le béton plus faible que celle du liant pur. On remarque que le liant utilisé dans ces trois cas est le liant LC à base de ciment, qui est connu pour avoir une porosité plus fermée que les autres liants à base de chaux (cf. [Goyer 2007]).

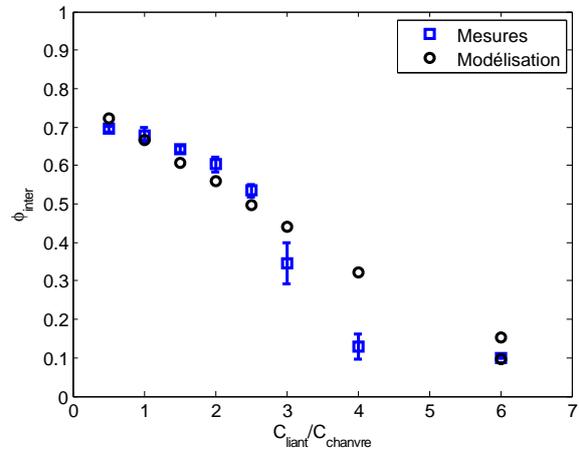
Pour les formulations "Densité", le modèle décrit une évolution de la porosité en accord à $\pm 5\%$ avec les résultats expérimentaux. Cependant, on constate pour les formulations riches en liant dans les cas "Dosage liant", que le modèle surestime de 10 à 20% les porosités actives pour des ratios L/C de 3 et 4. On peut donner la même explication que précédemment, car plus le liant est présent dans le matériau, plus il peut avoir tendance à boucher les pores interparticules. Toutefois, étant données les fortes concentrations de liant pour ces bétons, l'incertitude de mesure est également mise en cause. En effet, les matériaux étant très résistifs, la partie réelle très bruitée du module d'incompressibilité dynamique n'a pas permis d'effectuer une caractérisation précise de la porosité interparticule. Cela se confirme dans la suite par les modélisations effectuées pour les résistivités.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.21 – Modélisation de la porosité interparticule des bétons de chanvre “5L3C” (a), “Densité” (b) et “Dosage liant” (c)

3.3.2 Résistivité

La résistivité reste pour les bétons de chanvre un paramètre clé gouvernant à la fois l’absorption acoustique et l’indice d’affaiblissement. Le Chapitre III et l’analyse des propriétés des fibreux et des chènevottes ont montré que la résistivité dépend à la fois de la porosité et de la dimension caractéristique des fibres ou particules.

Chapitre IV. Modélisation des propriétés acoustiques des matériaux à base de fibres et particules végétales

Le béton de chanvre n'est pas un matériau granulaire au sens strict, mais, étant composé de granulats de chanvre entourés de liant, il peut être considéré de façon simplifiée comme tel. Les modèles granulaires de résistivité ont donc été comparés aux résistivités caractérisées sur les bétons de chanvre.

Le modèle utilisé à cette fin est celui de [Prieur du Plessis & Woudberg 2008], donné Tableau III.4, faisant intervenir la porosité interparticule ϕ_{inter} et le rayon de la particule R_{beton} . Le béton de chanvre est donc considéré comme un ensemble de granulats représentatifs, chacun étant composé d'une particule de chanvre entourée de couches homogènes concentriques de liant et d'air comme cela est illustré à la Figure IV.22.

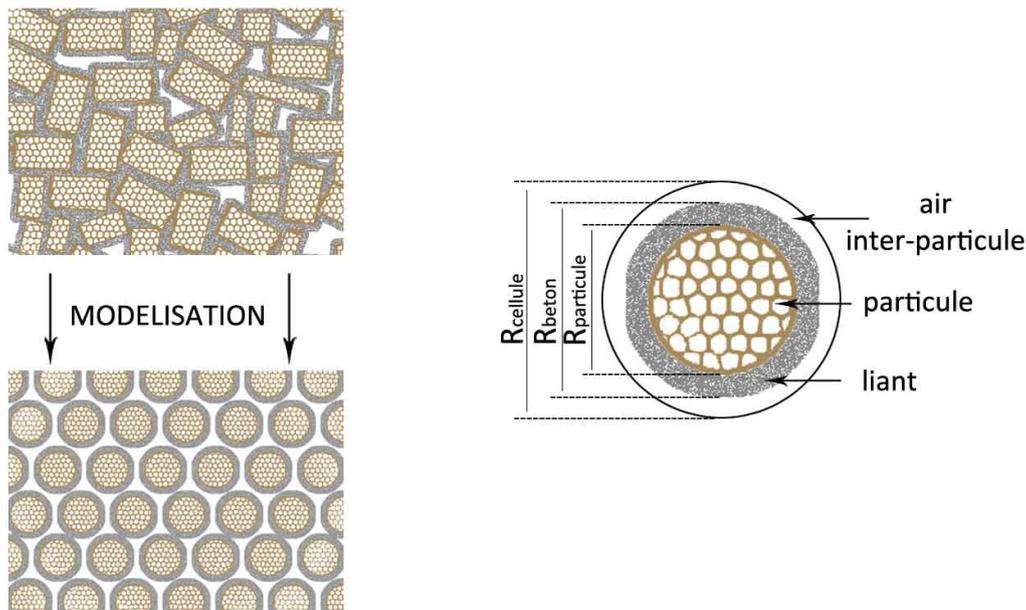


Figure IV.22 – Modélisation du béton de chanvre par un milieu granulaire équivalent (gauche) et zoom sur un granulat équivalent de béton de chanvre (droite)

Le milieu granulaire équivalent est caractérisé par une porosité interparticule ϕ_{inter} , et par une dimension R_{beton} dépendant à la fois du rayon des particules de chanvre utilisées $R_{particule}$ et de la quantité de liant.

Considérons les milieux granulaires équivalents du béton de chanvre et de la chènevotte correspondante, soit $R_{cellule}$ la dimension de la cellule élémentaire de ces matériaux, cette dimension peut être reliée aux porosités interparticules de la chènevotte et du béton de chanvre par respectivement :

IV.3 Modélisation des bétons de chanvre

$$\phi_{inter} = \frac{R_{cellule}^3 - R_{bdc}^3}{R_{cellule}^3} \quad (IV.34)$$

$$\phi_{inter\ chanvre} = \frac{R_{cellule}^3 - R_{particule}^3}{R_{cellule}^3} \quad (IV.35)$$

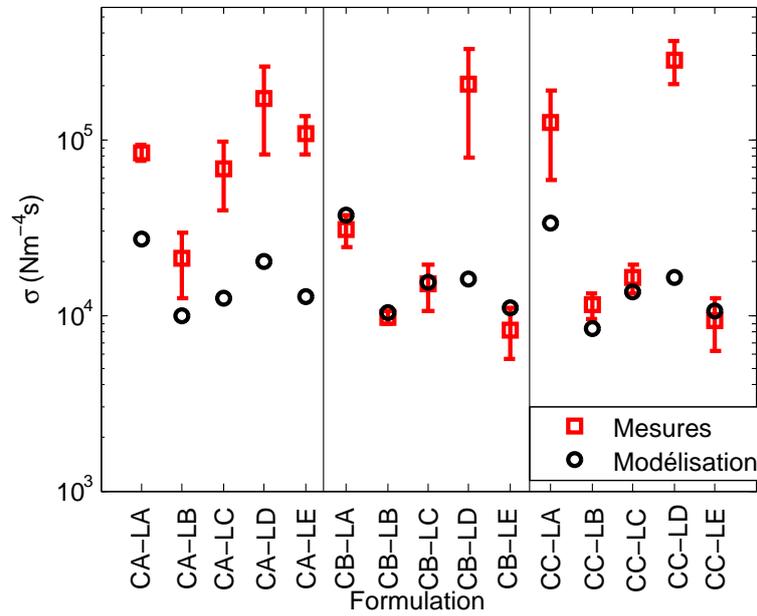
Or, on passe de la configuration de la chènevotte à celle du béton de chanvre correspondant en ajoutant du liant, dans un volume global fixé, le volume de la cellule. La dimension $R_{cellule}$ est donc constante, ce qui implique que :

$$R_{beton} = \frac{(1 - \phi_{inter})^{1/3}}{(1 - \phi_{inter\ chanvre})^{1/3}} R_{particule} = \frac{(1 - \phi_{inter})^{1/3}}{\left(\frac{C_{chanvre}}{\rho_{particule}}\right)^{1/3}} R_{particule} \quad (IV.36)$$

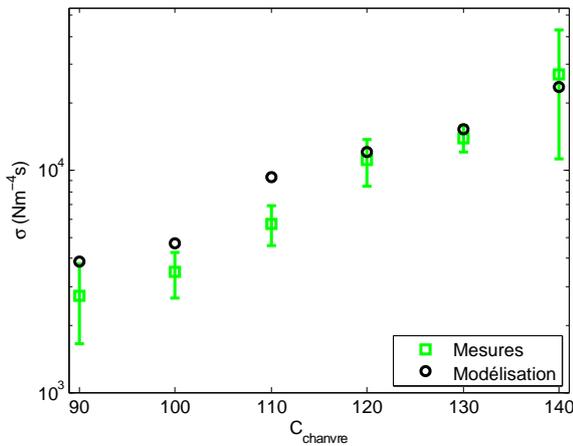
Le rayon des particules équivalentes de béton de chanvre R_{beton} a donc été évalué à partir de celui des particules de chènevotte $R_{particule}$ lui même déterminé à la Section 2.3.2 à partir des résistivités des chènevottes. Pour le calcul, on a considéré que la porosité interparticule à prendre en compte est celle déterminée expérimentalement, accessible aux ondes acoustiques. Les résultats obtenus sont présentés Figure IV.23 pour les trois séries de formulations testées.

On constate que sur l'ensemble des échantillons, l'approche granulaire reste valable pour des résistivités allant jusqu'à environ $30000 N.m^{-4}s$ (voir Figure IV.22), rencontrées notamment dans le cas des formulations "Densité", et "Dosage liant" ($L/C \leq 3$). Dans ce cas, les prédictions sont particulièrement justes à la fois au niveau de la tendance et des valeurs.

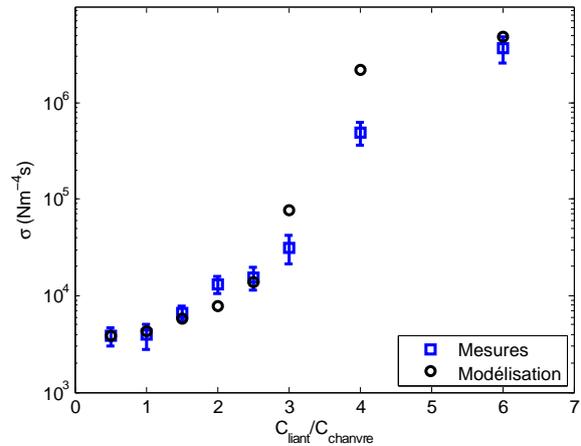
En revanche, de fortes différences sont observées pour les échantillons plus résistifs, le rapport entre la valeur expérimentale et la valeur prédite allant jusqu'à 10. Certains des pores interparticules peuvent être partiellement obstrués par le liant à l'image de la Figure IV.24, ce qui entraîne une augmentation de la résistivité par rapport au cas modélisé dans lequel tous les pores interparticules participent à l'écoulement du flux acoustique. Ce type de comportement explique les sous-estimations du modèle dans le cas des matériaux de résistivité moyenne (Cas de 8 formulations "5L3C").



(a)



(b)



(c)

Figure IV.23 – Modélisation de la résistivité des bétons de chanvre “5L3C” (a), “Densité” (b) et “Dosage liant” (c)

Dans le cas des ratios L/C importants, les différences de résistivités observées peuvent être expliquées par l’incertitude de mesure de la porosité interparticule. En effet, la sous-estimation de la porosité interparticule mise en évidence par le modèle à la Figure IV.21 (c) conduit directement à une surestimation de la résistivité.

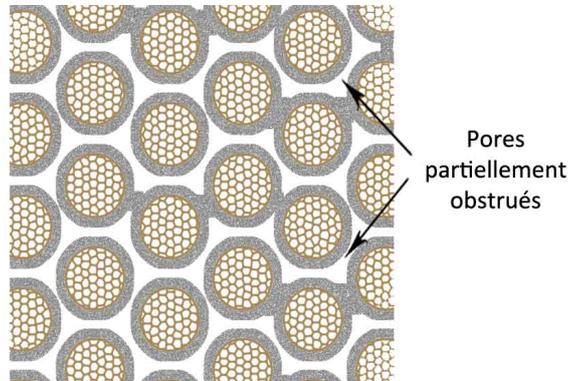


Figure IV.24 – Illustration de l’obstruction des pores interparticules par le liant. Représentation de la situation réelle dans le cas d’une obstruction partielle des pores

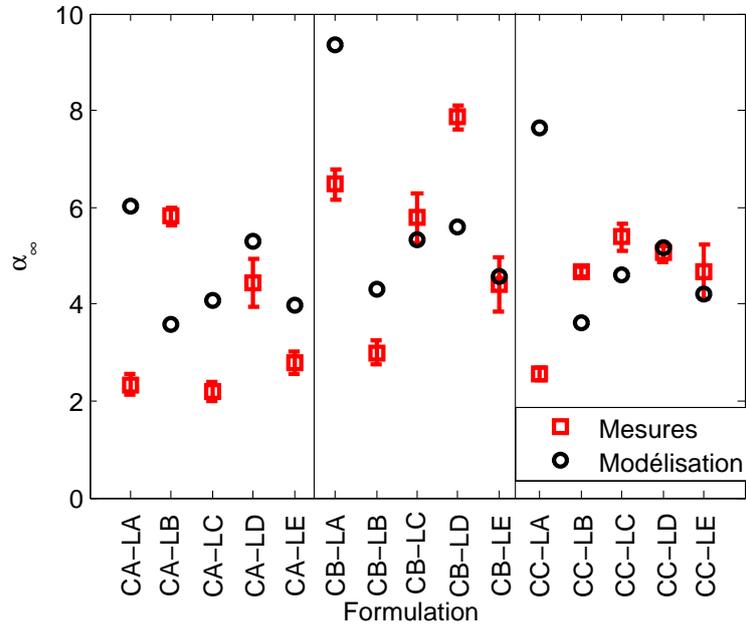
3.3.3 Tortuosité

Dans la Section 2.3.3, des facteurs de forme ont été utilisés afin de prendre en compte la forte tortuosité de la chènevotte, due principalement à la forme parallélépipédique de ses particules.

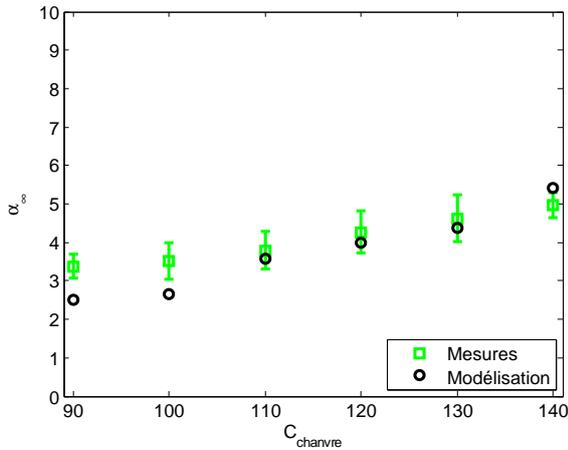
Bien que le modèle utilisé, c.-à-d. le modèle de [Attenborough 1993] donné Tableau III.4, soit empirique, il a été appliqué au cas du béton de chanvre par adaptation de la porosité interparticule, et en utilisant le facteur de forme de la chènevotte correspondante. Les tortuosités expérimentales, caractérisées à partir de la densité dynamique, sont comparées à ce modèle sur la Figure IV.25.

En premier lieu, on constate que les tortuosités caractérisées sont importantes, atteignant plus de 10 pour les forts dosages en liants. Cela peut s’expliquer premièrement par la tortuosité importante de la chènevotte. Cette dernière est en outre amplifiée par le liant ayant pour effet de complexifier le réseau poreux dans le béton de chanvre. Ainsi, on remarque sans surprise que la tortuosité des bétons de chanvre est à la fois une fonction croissante de la densité du matériau et du ratio L/C.

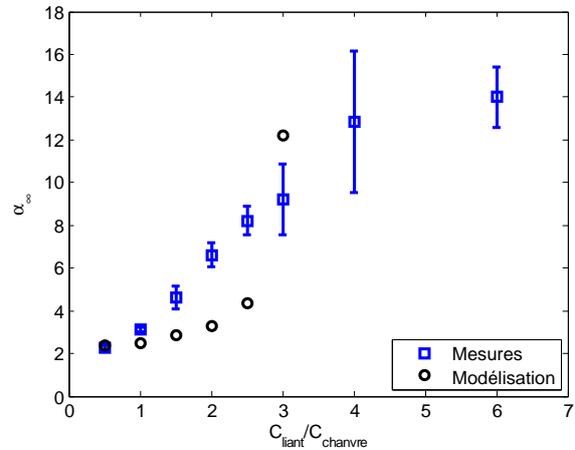
Au niveau de la modélisation, dans le cas des formulations “Densité” et pour les faibles ratios L/C des formulations “Dosage liant”, les prédictions restent précises à 15%. Dans les autres cas, les prédictions sont beaucoup moins cohérentes avec l’expérimental. Les bétons de chanvre sont caractérisés, pour ces formulations, par une microstructure bien différente des chènevottes pour lesquelles les facteurs de forme empiriques ont été établis, ce qui explique que le modèle ne soit plus valable.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.25 – Modélisation de la tortuosité des bétons de chanvre “5L3C” (a), “Densité” (b) et “Dosage liant” (c)

3.3.4 Longueur caractéristique visqueuse

Les longueurs caractéristiques visqueuses caractérisées sont enfin comparées aux prédictions du modèle granulaire de [Boutin & Geindreau 2010] v , précédemment utilisé pour les chènevottes. Ce modèle présenté au Tableau III.6, a été utilisé de façon analogue au modèle de résistivité en adaptant le rayon équivalent de sorte à prendre en compte la présence du liant. Le

IV.3 Modélisation des bétons de chanvre

rayon équivalent R_{beton} a donc été calculé à partir de l'Equation IV.36, en utilisant les rayons $R_{particule}$ des chènevottes correspondantes présentés dans le Tableau IV.13.

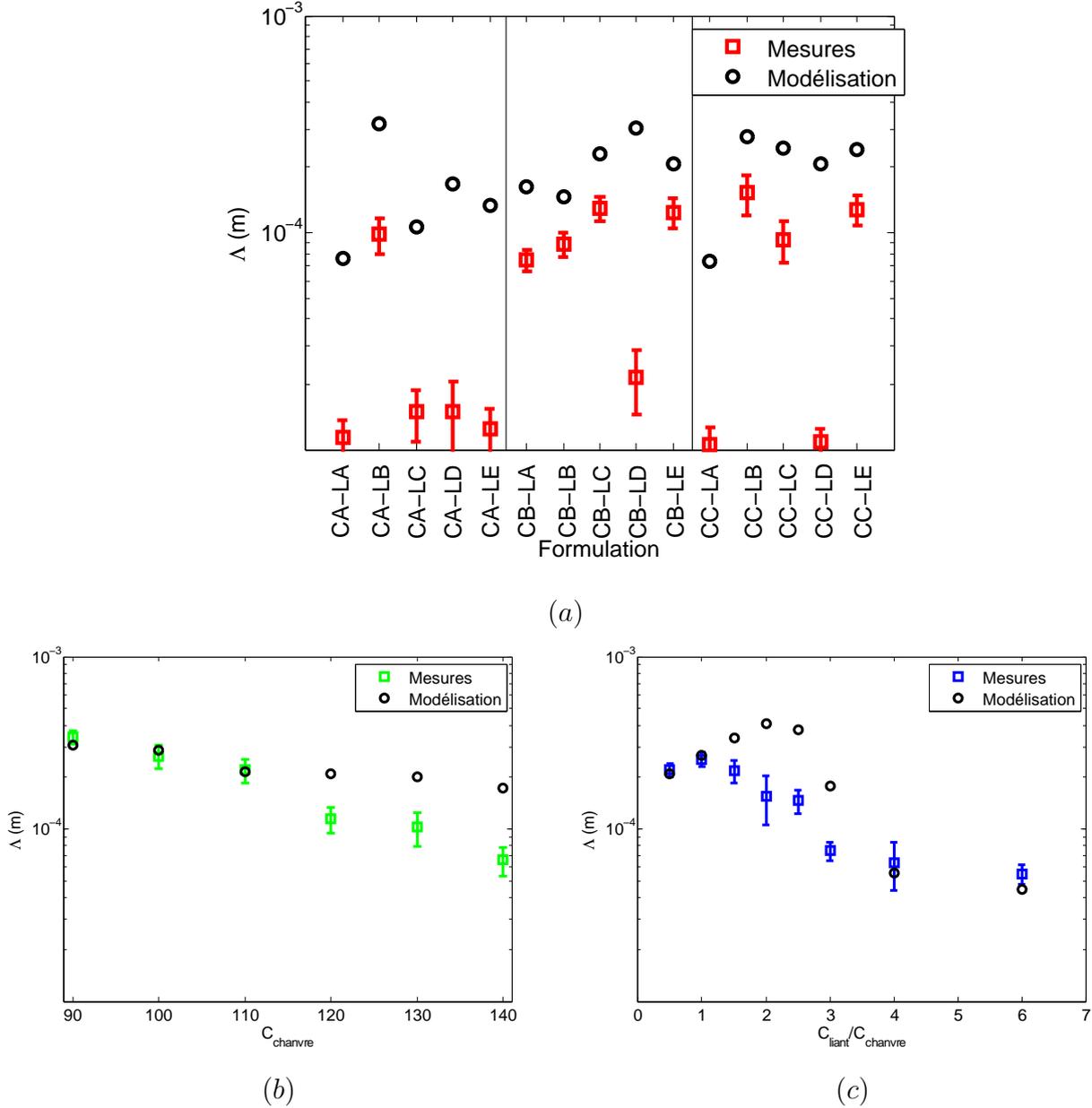


Figure IV.26 – Modélisation de la longueur caractéristique visqueuse des bétons de chanvre “5L3C” (a), “Densité” (b) et “Dosage liant” (c)

Les résultats présentés Figure IV.26 montrent que les longueurs visqueuses évoluent entre 10^{-5} et $5 \cdot 10^{-4}$ m et décroissent avec la densité du matériau et le dosage en liant. Au niveau des formulations “5L3C”, les longueurs visqueuses évoluent comme l'inverse de la résistivité. On a

par exemple $\Lambda \leq 3.10^{-5} m$ pour les matériaux ayant une résistivité $\sigma \geq 10^5 N.m^{-4}s$.

On remarque Figure IV.26 que les prédictions sont satisfaisantes à $\pm 5\%$ uniquement dans le cas des configurations très proches de l'état de la chènevotte (c.-à-d. pour de faibles densités ou de faibles ratios L/C) ou de l'état du liant (pour de forts ratios L/C). Dans tous les cas intermédiaires, les longueurs visqueuses prédites surestiment significativement (d'un rapport allant jusqu'à 10) les valeurs caractérisées. Cela est dû à une répartition irrégulière du liant autour des particules dans le matériau réel, ayant pour conséquence de réduire la dimension des étranglements des pores interparticules.

On remarque aussi Figure IV.26 (c) que la modélisation de la longueur visqueuse devient physiquement incohérente puisqu'elle suggère que Λ augmente lorsque le ratio L/C passe de 1 à 2. Or, la dimension des pores, et par conséquent Λ décroissent nécessairement avec ce paramètre, le volume des pores étant progressivement comblé par le liant. Dans le modèle utilisé, la longueur visqueuse est multiple de la tortuosité, comprise entre seulement 1 et 1,5 pour les granulats sphériques. Il n'est donc pas adapté aux tortuosités beaucoup plus importantes du béton de chanvre, ce qui explique les tendances erronées.

4 Conclusion

Les propriétés acoustiques des matériaux à base de fibres et particules végétales étudiés dans cette thèse ont été analysées et exploitées à partir des modèles acoustiques. Selon la complexité des matériaux et les gammes de fréquences considérées, les approximations réalisées permettent de mettre en évidence les paramètres acoustiques les plus importants.

Les laines végétales peuvent être modélisés de façon satisfaisante à partir des propriétés des pores interfibres et à l'aide de modèles empiriques classiques. L'évaluation du rayon des fibres est rendue possible à partir de la résistivité des laines et donne des résultats en accord avec la littérature. En revanche, les autres paramètres acoustiques sont moins évidents à modéliser.

Pour les chènevottes, en raison du fort contraste de perméabilité existant entre les pores intra- et interparticule, seuls les pores interparticules participent à la dissipation acoustique. Les propriétés acoustiques ont été modélisées grâce à quatre paramètres (ϕ_{inter} , σ , α_∞ et Λ) avec les modèles de Johnson *et al.* et de Zwikker et Kosten. L'évolution de ces paramètres acoustiques est analysée à partir de modèles granulaires, mais a permis de montrer que le comportement est très différent de celui rencontré avec des granulats sphériques : les tortuosités des chènevottes étant plus élevées et leurs longueurs visqueuses beaucoup plus faibles. Finalement, quatre paramètres de base permettent d'expliquer le comportement acoustique de la chène-

votte : la masse volumique apparente de la chènevotte ρ_v , la masse volumique apparente des particules $\rho_{particule}$, l'épaisseur moyenne des particules \bar{E} , et le facteur de forme n . Un apport important de ce travail est que ces paramètres de base, ainsi que d'autres informations telles que la porosité intraparticule, peuvent être déterminés à partir des propriétés acoustiques. La caractérisation acoustique des chènevottes permet donc un contrôle de qualité des granulats de chanvre particulièrement instructif qui sera exploité afin de mettre en évidence les effets des paramètres de culture du chanvre sur les propriétés des particules dans le Chapitre V.

Enfin, le comportement du béton de chanvre est étudié en s'appuyant sur les observations faites sur les chènevottes et les liants. Dans ce matériau à trois échelles, il est montré que pour la majorité des formulations, seuls les pores interparticules participent à la dissipation acoustique. Les paramètres acoustiques sont modélisés à l'aide de corrections des modèles granulaires utilisés pour les chènevottes, permettant d'intégrer le rôle du liant. Ainsi, on note que la porosité interparticule des bétons de chanvre peut être prédite avec précision dans tous les cas à l'exception des bétons fabriqués avec du ciment, et que la résistivité dans les bétons de chanvre est artificiellement amplifiée par un colmatage des pores dû au liant. Enfin, l'évolution des tortuosités et longueurs visqueuses des bétons de chanvre n'a pas pu être prédite convenablement étant donné que la microstructure de ces matériaux est principalement façonnée par le liant.

Chapitre V

Valorisation des résultats et optimisation des propriétés

Le cinquième chapitre de cette thèse exploite les résultats de la modélisation obtenus dans le Chapitre IV suivant ses deux axes.

Trois leviers d'optimisation des propriétés acoustiques des bétons de chanvre sont tout d'abord investigués, au niveau expérimental et théorique : la formulation du matériau, sa structure et sa géométrie.

La modélisation acoustique est ensuite mise au service de la caractérisation de chènevottes tracées, afin de discuter de l'impact des paramètres de culture et d'environnement sur les propriétés des particules de chanvre.

Enfin, le développement d'un matériau à base de fibres végétales, dimensionné pour la correction acoustique d'une galerie commerciale, est présenté.

1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

La performance acoustique des laines, chènevottes et bétons de chanvre peut permettre de répondre à de nombreuses problématiques de gêne sonore dans notre vie quotidienne. Toutefois, l'utilisation de ces matériaux sous leur forme brute peut ne pas convenir aux spectres de bruits rencontrés *in situ* et une optimisation des propriétés acoustiques devient alors indispensable.

Comme nous l'avons souligné en introduction, les matériaux poreux offrent de nombreux leviers d'optimisation vis-à-vis de leurs propriétés acoustiques. Nous nous proposons dans cette section d'exploiter dans un premier temps les modélisations réalisées au Chapitre IV afin de déterminer les formulations optimales au sens de l'absorption et de l'indice d'affaiblissement acoustique.

D'autres modes d'optimisation se prêtent particulièrement bien aux bétons de chanvre,

l'utilisation de structure multicouche et le recours à une géométrie de surface irrégulière. Ces modes ont été explorés à la fois au niveau théorique et expérimental et seront présentés dans la suite de ce chapitre.

1.1 Optimisation de la formulation

Un premier mode d'optimisation consiste à s'appuyer sur les leviers d'action mis en évidence aux Chapitres I et II. On a effectivement constaté d'une part, des effets relatifs aux propriétés des constituants (granulométrie de la chènevotte, type de liant), et d'autre part des effets relatifs à la mise en œuvre (concentrations des constituants, compacité finale du matériau).

Grâce à la modélisation réalisée au Chapitre IV, des relations ont permis de relier quantitativement les paramètres caractérisant ces leviers d'action aux propriétés acoustiques macroscopiques des matériaux. Six paramètres ont ainsi été identifiés comme "paramètres de base" des bétons de chanvre : les concentrations en chanvre $C_{chanvre}$ et en liant C_{liant} , les masses volumiques apparentes des particules $\rho_{particule}$ et du liant $\rho_{apparent\ liant}$, l'épaisseur moyenne des particules \bar{E} et le facteur de forme des particules n .

Les relations entre le facteur de forme n et la granulométrie ne sont pas encore clairement établies, toutefois, les autres paramètres de base peuvent être facilement contrôlés au stade de la fabrication afin d'optimiser les performances finales d'un béton de chanvre. L'objet de cette partie est à la fois de montrer la plage de propriétés acoustiques accessible par cette optimisation, et d'identifier les paramètres de base optimaux au sens de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement acoustique.

1.1.1 De la variabilité des paramètres de base à la variabilité des propriétés acoustiques

Variabilité des paramètres de base A partir des résultats des chapitres précédents, une gamme de variabilité représentative des paramètres de base des bétons de chanvre est synthétisée dans le Tableau V.1.

Le spectre de propriétés acoustiques correspondant aux gammes de paramètres décrites dans ce tableau a été évaluée par tirage aléatoire. Ce type d'évaluation a été choisi afin de caractériser complètement la distribution des propriétés acoustiques.

Evaluation de la variabilité des propriétés acoustiques Les résultats du Chapitre IV ont montré que les relations développées entre les paramètres de base et les paramètres acoustiques restent valides dans le cas des chènevottes ou des bétons de chanvre faiblement dosés en liant

V.1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

Paramètres	Gamme [min ; max]	Unité
$C_{chanvre}$	[100 ; 150]	$kg.m^{-3}$
$\rho_{particule}$	[400 ; 600]	$kg.m^{-3}$
\bar{E}	[0,2 ; 0,5]	mm
n	[2 ; 3]	
C_{liant}	[0 ; 900]	$kg.m^{-3}$
$\rho_{apparent\ liant}$	[1000 ; 2000]	$kg.m^{-3}$

Tableau V.1 – Gammes couvertes par les paramètres des bétons de chanvre

(Ratio $L/C \leq 2$). Cela correspond d'ailleurs aux formulations les plus souvent réalisées dans le bâtiment. En conséquence, deux cas sont considérés dans la suite : le cas d'une chènevotte et le cas d'un béton de chanvre "Mur" ($L/C = 2$). Dans ces deux cas, des épaisseurs de 20 *cm* et de 30 *cm* sont retenues comme étant représentatives des épaisseurs rencontrées *in situ*.

La variabilité des propriétés acoustiques est observée en s'appuyant sur deux indicateurs :

- le coefficient d'absorption de Sabine α_w déterminé en conformité avec la norme ISO 11654 à partir de l'absorption acoustique α modélisée,
- l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré R_w déterminé d'après la norme ISO 717-1 à partir de l'indice d'affaiblissement acoustique TL modélisé.

La pertinence physique de ces indicateurs ne fait pas *consensus* chez les acousticiens mais ils restent des indicateurs de référence et permettent de comparer facilement différents matériaux.

La variabilité des propriétés acoustiques est évaluée sur la base d'un tirage aléatoire d'un million d'échantillons. Le processus de calcul est le suivant :

1. Tirage aléatoire selon une loi de distribution uniforme des paramètres de base, considérés indépendants, dans la gamme définie,
2. Evaluation des paramètres acoustiques par les relations du Chapitre IV,
3. Calcul des propriétés acoustiques en incidence normale, puis intégration en champ diffus (Equations I.6 et I.3),
4. Calcul de α_w et de R_w .

Les nuages de points obtenus dans les deux cas sont présentés Figure V.1. Ces nuages sont discrétisés de façon régulière, en conséquence de la définition du coefficient de Sabine (arrondi à 0,05) et de l'indice d'affaiblissement pondéré (arrondi à 1 *dB*).

Ces deux figures remettent en évidence la large gamme de propriétés acoustiques qui caractérise les bétons de chanvre : α_w est compris entre 0,8 et 0,95 pour les chènevottes et entre 0,35 et 0,95 pour les bétons de chanvre, et R_w varie de 6 à 34 *dB* pour les chènevottes et de 9 à 52 *dB* pour les bétons de chanvre. L'effet de l'augmentation de l'épaisseur de 20 à 30 *cm* est

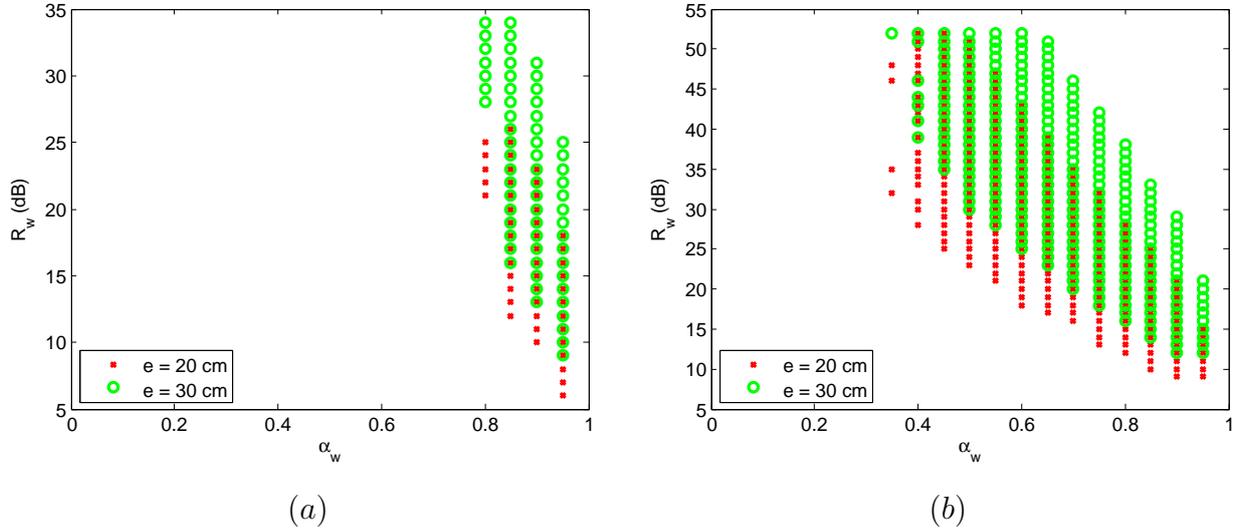


Figure V.1 – Gamme de propriétés acoustiques de la chènevotte (a) et des bétons de chanvre “Mur” (b)

particulièrement marqué sur l’indice d’affaiblissement maximal atteint par le béton de chanvre qui évolue de 0 à 13 dB en conséquence (gain de 7 à 10 dB pour la chènevotte).

D’autre part, la forme des nuages obtenus et les positions des valeurs optimales illustrent clairement la difficulté de trouver un optimum valable à la fois en absorption et en affaiblissement acoustique. Les valeurs optimales situées à la limite du nuage pour α_w et R_w importants, et constituent ce que l’on appelle un front de Pareto.

1.1.2 Identification des paramètres de base optimaux

Les résultats précédents ont été exploités afin de déterminer les densités de probabilité des paramètres de base associés aux performances acoustiques en absorption et en isolation. Ces dernières sont présentées sur les Figures V.2 et V.3.

Une absorption maximale est atteinte pour de faibles concentrations en chanvre et en liant, de fortes densités apparentes pour les particules et le liant, et des particules d’épaisseur plus importante. Au contraire, l’indice d’affaiblissement est maximal pour les fortes concentrations et faibles densités apparentes des constituants, avec une faible épaisseur de particules.

Pour le facteur de forme, de façon moins nette que pour les autres paramètres, les indicateurs d’absorption et d’indice d’affaiblissement acoustiques sont plus importants pour n faible. Une augmentation du facteur de forme n conduit effectivement à une augmentation de la tortuosité mais aussi de façon indirecte à une augmentation de la longueur visqueuse, réduisant globalement les effets de dissipation visco-inertielle dans le matériau.

V.1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

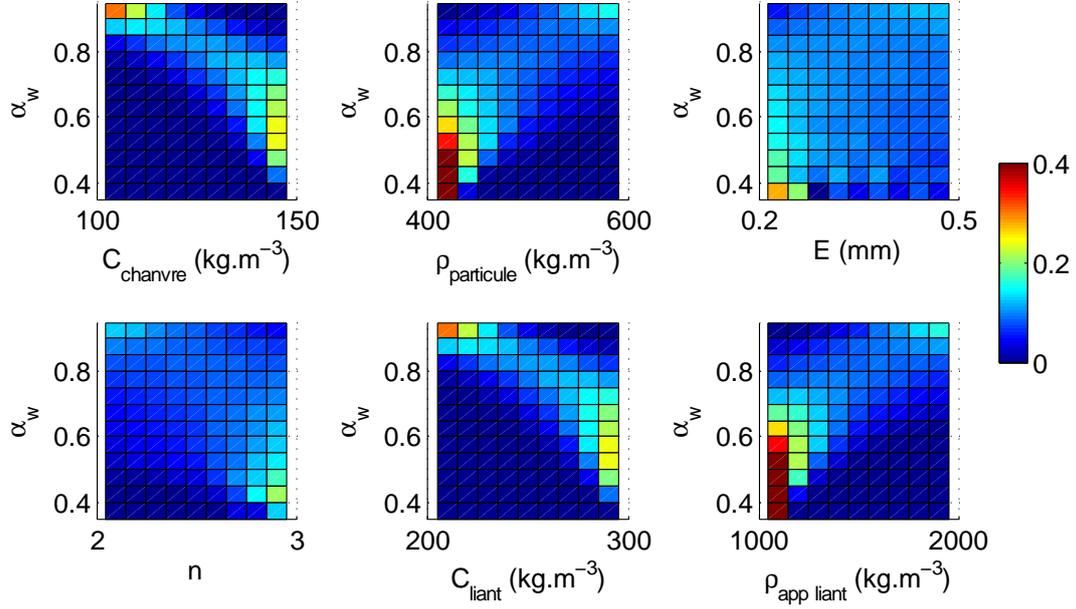


Figure V.2 – Densité de probabilité des paramètres de base associés à l’absorption α_w pour les bétons de chanvre “Mur” de 20 cm d’épaisseur

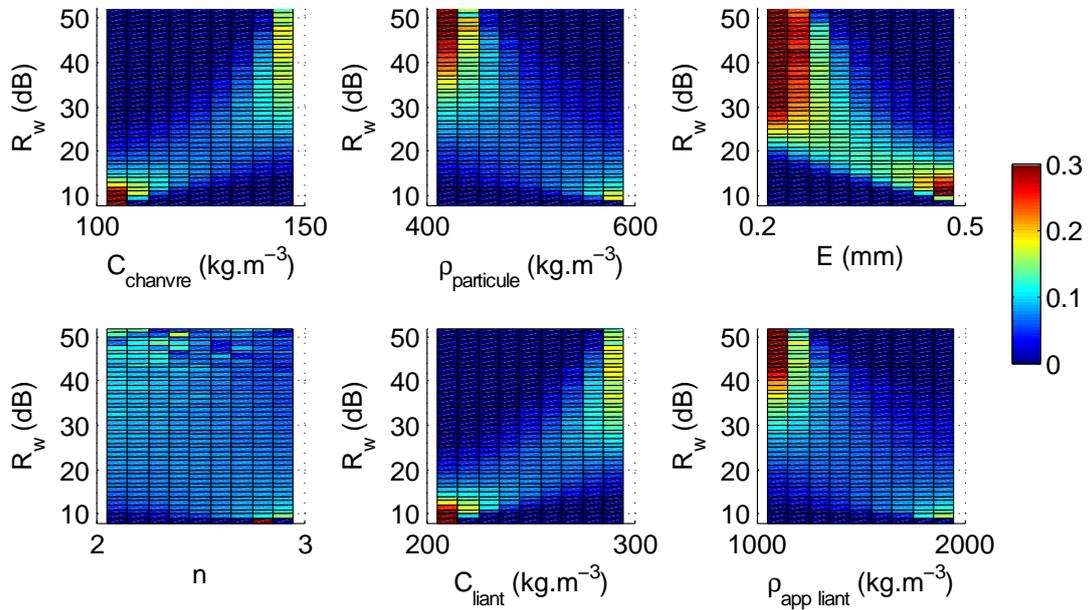


Figure V.3 – Densité de probabilité des paramètres de base associés à l’indice pondéré R_w pour les bétons de chanvre “Mur” de 20 cm d’épaisseur

Un comportement antagoniste est donc observé entre l’absorption acoustique et l’indice d’affaiblissement pour tous les paramètres de base à l’exception du facteur de forme n .

1.1.3 Conclusion

Les résultats obtenus soulignent l'amplitude des propriétés acoustiques des bétons de chanvre, atteinte en matière d'absorption et d'indice d'affaiblissement. Ces matériaux peuvent être très performants en absorption, le coefficient α_w pouvant atteindre 0,95, ou en isolation avec un indice R_w supérieur à 50 *dB* avec des épaisseurs de 20 ou 30 *cm*. De fortes relations d'antagonisme existent toutefois entre ces deux propriétés.

Il reste essentiel de bien connaître la problématique de bruit à laquelle le matériau est destiné. Nous avons considéré dans cette partie des indicateurs pondérés sur une large gamme de fréquences. L'optimisation conduira à des résultats différents si par exemple on s'intéresse à une gamme fréquentielle plus restreinte.

1.2 Optimisation par une structure multicouche

Dans le cas des bétons de chanvre stratifiés, dits "multicouches", du type enduit/béton-de-chanvre/enduit, les enduits apportent une durabilité (protection vis-à-vis de l'eau et des impacts) et un certain esthétisme. En outre, les propriétés acoustiques d'un béton de chanvre enduit peuvent se révéler fort différentes des propriétés acoustiques du matériau initial. L'utilisation d'une structure multicouche apparaît alors comme un moyen d'optimisation des propriétés acoustiques des matériaux à part entière qu'il est important de maîtriser.

Afin de comprendre les phénomènes liés à ces matériaux et de connaître leurs performances, trois échantillons de bétons de chanvre enduits ont été caractérisés pendant cette thèse et leurs comportements ont été modélisés.

1.2.1 Approche expérimentale

Présentation des échantillons réalisés Trois échantillons multicouches de dimensions $1m \times 1,40m$ destinés à être placés entre deux salles réverbérantes pour des mesures d'indice d'affaiblissement acoustique en champ diffus ont été réalisés dans cette thèse afin d'investiguer expérimentalement le potentiel de ce levier d'action. Les étapes de fabrication et d'expérimentation ont été réalisées en collaboration avec Quentin Perrin, étudiant en Master à l'ENTPE [[Perrin 2011](#)].

Les configurations des trois échantillons étudiés sont représentatives de murs réels (l'épaisseur reste toutefois limitée afin d'accélérer leur séchage). De plus, leurs caractéristiques ont été choisies afin de mettre en évidence l'effet de la densité (cf. Chapitres II et IV), l'effet de l'ossature bois, l'effet des différents types d'enduits et de leurs états de surface.

V.1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

Ils ont été fabriqués suivant les étapes suivantes :

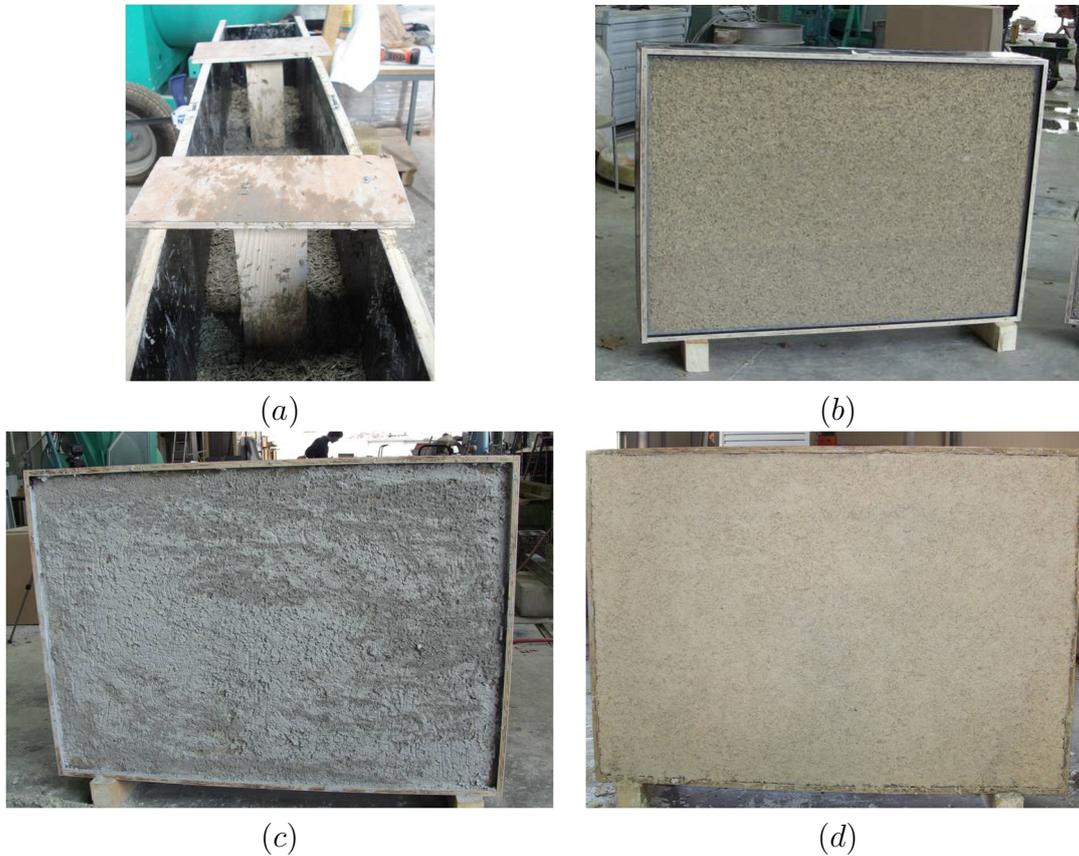


Figure V.4 – Fabrication des échantillons multicouches : Banchage (a), échantillon banché (b), dégrossis (c) et échantillon final (d)

1. Une couche de béton de chanvre de 20 cm d'épaisseur a tout d'abord été réalisée par banchage (voir Figure V.4 (a)). Cette couche a été réalisée suivant la formulation "Mur" avec un liant LA et une chènevotte CA. Les concentrations en constituants sont donnés au Tableau V.3.
2. Après séchage des échantillons, afin d'assurer l'adhérence entre le béton de chanvre et l'enduit, une couche d'environ 5 mm de dégrossis a été mise en œuvre (voir Figure V.4 (c)). Il s'agit d'un mélange de sable et de liant LA (de même formulation que l'enduit "Extérieur") projeté à la truelle, donnant une surface rugueuse aux échantillons sur laquelle l'enduit s'accroche plus facilement.
3. Les couches d'enduit ont été ajoutées de chaque côté du béton de chanvre (voir Figure V.4 (d)). Les caractéristiques des différentes couches mises en œuvre sont décrites dans le Tableau V.2. L'enduit "Intérieur" (noté int.) a été réalisé avec le liant LB et la chènevotte

Chapitre V. Valorisation des résultats et optimisation des propriétés

CA suivant un ratio L/C de 6. L'enduit "Extérieur" (noté ext.) a pour sa part été réalisé avec le liant LA et du sable suivant un ratio L/S (Liant/Sable) de 1/6.

4. Un des enduits "Intérieur" a été taloché afin de pouvoir observer l'effet de la finition des enduits sur leur indice d'affaiblissement et absorption acoustique.
5. Des échantillons témoins des différentes couches, d'une épaisseur de 5 cm et d'un diamètre de 10 cm, ont été fabriqués afin d'être caractérisés en incidence normale en tube de Kundt. Leurs caractéristiques sont données au Tableau V.8.

	Multicouche homogène 1	Multicouche homogène 2	Multicouche ossature
1,5 cm	Enduit int. taloché	Enduit int. non taloché	Enduit int. non taloché
0,5 cm	Dégrossis	Dégrossis	Dégrossis
20 cm	Béton	Béton	Béton + ossature
0,5 cm	Dégrossis	Dégrossis	Dégrossis
1,5 cm	Enduit ext. taloché	Enduit ext. taloché	Enduit int. taloché

Tableau V.2 – Présentation des échantillons caractérisés.

L'ossature bois du troisième échantillon multicouche est constituée de deux poteaux de section $60 \times 80 \text{ mm}^2$ espacés de 60 cm et centrés au milieu de la couche de béton de chanvre.

Echantillons	$C_{chanvre}$ (kg.m^{-3})	C_{liant}^0 (kg.m^{-3})	C_{eau} (kg.m^{-3})	ρ_{totale} (kg.m^{-3})	$\rho_{beton\ stabilise}$ (kg.m^{-3})
Multicouche homogène 1	130	260	333	723	427
Multicouche homogène 2	146	292	373	810	464
Multicouche ossature	138	276	354	769	458

Tableau V.3 – Formulations des couches de bétons de chanvre mises en œuvre.

Méthode de caractérisation utilisée Les caractérisations acoustiques ont été effectuées avant et après la pose des couches d'enduit, ce qui nous a permis de quantifier plus facilement la contribution des enduits à la performance globale des échantillons. Leur indice d'affaiblissement a été caractérisé en champ diffus en les plaçant entre deux chambres réverbérantes de l'ENTPE.

Pour ce faire, nous avons suivi les préconisations des normes en vigueur, ISO 140-1 et ISO 140-3, bien que le volume des salles réverbérantes ($\approx 38 \text{ m}^3$) soit inférieur au volume recommandé (50 m^3). Les mesures ont été réalisées dans les deux sens de propagation, et moyennées dans chaque cas à partir de trois positions de microphones et deux positions de source. Le schéma du dispositif ainsi que la méthode de mesure sont présentés en Annexe 2.2.2.

V.1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

Il est à noter que les échantillons ont été placés dans un porte-échantillon en bois, afin de faciliter leur mise en place. L'étanchéité entre le cadre en bois a alors été réalisée avec un joint silicone (voir Figure V.5).

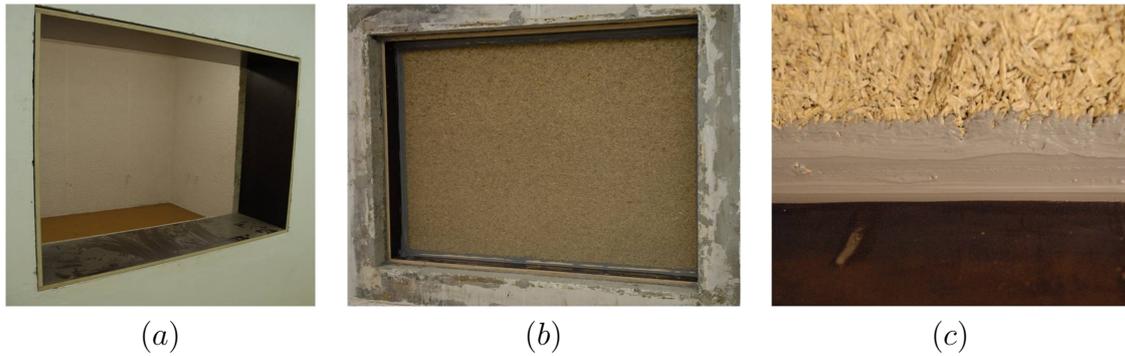


Figure V.5 – Mise en place de l'échantillon entre les chambres réverbérantes : Porte-échantillon vide (a), échantillon mis en place (b), et joint silicone (c)

Caractérisation des échantillons de bétons de chanvre non enduits Les courbes des affaiblissements caractérisés sont données par tiers d'octave à la Figure V.6. Le comportement résonnant à basses fréquences est attribué aux modes de la salle, le champ pouvant y être qualifié de diffus uniquement pour des fréquences supérieures à 300 Hz.

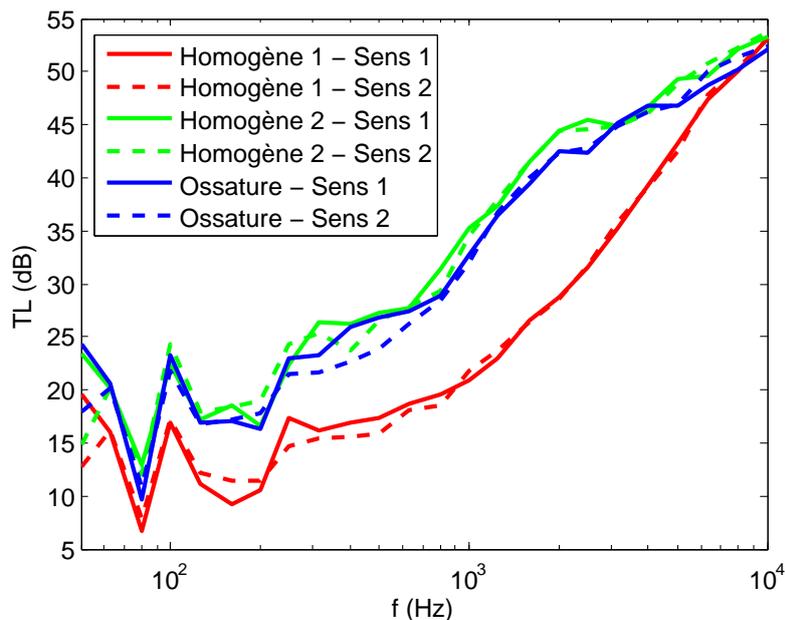


Figure V.6 – Indice d'affaiblissement mesuré sur les bétons de chanvre non enduits

Echantillons	R_w (dB) - Sens 1	R_w (dB) - Sens 2
Multicouche homogène 1	22	22
Multicouche homogène 2	32	32
Multicouche ossature	31	30

Tableau V.4 – Indices d'affaiblissement pondérés R_w des bétons de chanvre non enduits.

Au-delà de 300 Hz , l'indice d'affaiblissement des bétons de chanvre reste croissant mais est caractérisé par une légère augmentation de la pente aux alentours de 1000 Hz .

Les résultats obtenus peuvent être interprétés à partir de deux phénomènes caractéristiques des matériaux élastiques [Bruneau 1998, Allard & Atalla 2009] :

- Un phénomène de coïncidence entre les ondes de flexion dans le matériau, et les ondes acoustiques dans l'air dans le cas d'une excitation en champ oblique ou diffus : Ce phénomène entraîne l'apparition d'une résonance du matériau autour de la fréquence dite "critique" f_c définie Equation V.1, accompagnée d'une chute de l'indice d'affaiblissement. La pente de l'indice d'affaiblissement passe alors en théorie de 6 $dB/octave$ pour $f \leq f_c$ à 9 $dB/octave$ pour $f \geq f_c$.

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_v e}{D}} \quad \text{avec} \quad D = \frac{Ee^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{V.1})$$

E est le module d'Young du matériau poreux et ν son coefficient de Poisson.

- Un phénomène de compression de la phase solide, caractéristique des matériaux souples, autour de la fréquence f_r définie Equation V.2.

$$f_r = \frac{1}{4e} \sqrt{\frac{\Re(K_c)}{\rho_v}} \quad \text{avec} \quad K_c = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (\text{V.2})$$

Les fréquences critiques f_c et de compression f_r des couches de béton de chanvre ont été estimées à partir des propriétés mécaniques de bétons de chanvre de formulations voisines, caractérisés par [Cerezo 2005]. Elles sont présentées au Tableau V.5. Les fréquences critiques des couches de béton de chanvre sont de l'ordre de 1500 Hz , et les fréquences de compression sont situées autour de 500 Hz . L'inflexion observée autour de 1000 Hz correspond au phénomène de résonance critique dans les bétons de chanvre. La fréquence de compression ne ressort pas significativement des mesures réalisées. Ces analyses pourront être étayées grâce aux modélisations réalisées à la Section 1.2.2.

On constate que les performances des matériaux en transmission présentées Figure V.6 sont fortement corrélées à leur masse volumique dans la gamme de fréquences intermédiaire [100 ; 5000 Hz] (loi de masse) mais que l'effet de l'ossature n'est pas significatif. Cela s'explique

V.1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

Echantillons	ρ_v ($kg.m^{-3}$)	$\rho_{squelette}$ ($kg.m^{-3}$)	E (MPa)	ν	f_c (Hz)	f_r (Hz)
Béton homogène 1	427	1600	20	0,1	1465	547
Béton homogène 2	454	1600	20	0,1	1511	531
Béton ossature	458	1600	20	0,1	1517	528
Enduit ext. - Dégrossis	1660	2700	200	0,2	8995	9147
Enduit int. taloché	820	2150	200	0,2	6322	13014
Enduit int. non taloché	760	2200	200	0,2	6086	13518

Tableau V.5 – Caractéristiques mécaniques des couches des bétons de chanvre et enduits et fréquences critiques et de compression correspondantes.

par le fait que le contraste entre les caractéristiques du bois ($\rho_{bois} \approx 550 kg.m^{-3}$) et du béton de chanvre formulé est trop faible, et on peut supposer que l'effet de l'ossature serait plus marqué pour une densité de béton de chanvre plus faible. L'équivalence des résultats dans les deux sens testés montre le caractère réciproque des échantillons [Song & Bolton 2000].

Les indicateurs pondérés R_w ont été calculés sur la base de ces mesures et sont résumés dans le Tableau V.4. Les valeurs obtenues sont modérées vis-à-vis des isolements acoustiques standardisés préconisés dans les bâtiments, de l'ordre de 50 dB [JOR 1999]. Toutefois, pour cette épaisseur de 20 cm, d'après les résultats de la Section 1.1, ces valeurs pourraient être optimisées et atteindre 50 dB (voir Figure V.1). Des résultats expérimentaux réalisés par [Bütschi et al. 2004] ont par ailleurs mis en évidence des indices pondérés de 43 dB pour des bétons de chanvre de 31 cm d'épaisseur.

Caractérisation des échantillons de bétons de chanvre enduits Une fois enduits, les échantillons ont été testés à nouveau dans les deux sens. Les résultats sont synthétisés dans la Figure V.7, et les valeurs moyennées de R_w sont données dans le Tableau V.6.

Echantillons	R_w (dB) - Sens 1	R_w (dB) - Sens 2
Multicouche homogène 1	39	39
Multicouche homogène 2	41	40
Multicouche ossature	39	39

Tableau V.6 – Indices d'affaiblissement pondérés R_w des bétons de chanvre enduits.

Les couches d'enduit apportent un gain d'environ 10 dB à l'indice d'affaiblissement pondéré des bétons de chanvre, et offrent aux matériaux des propriétés beaucoup plus adaptées à une application dans le bâtiment. Ces performances pourraient encore être optimisées via le choix de la formulation ou l'augmentation de l'épaisseur du mur. Par exemple pour une épaisseur de 31 cm, l'indice d'affaiblissement pondéré des bétons de chanvre enduits sur chaque face testés

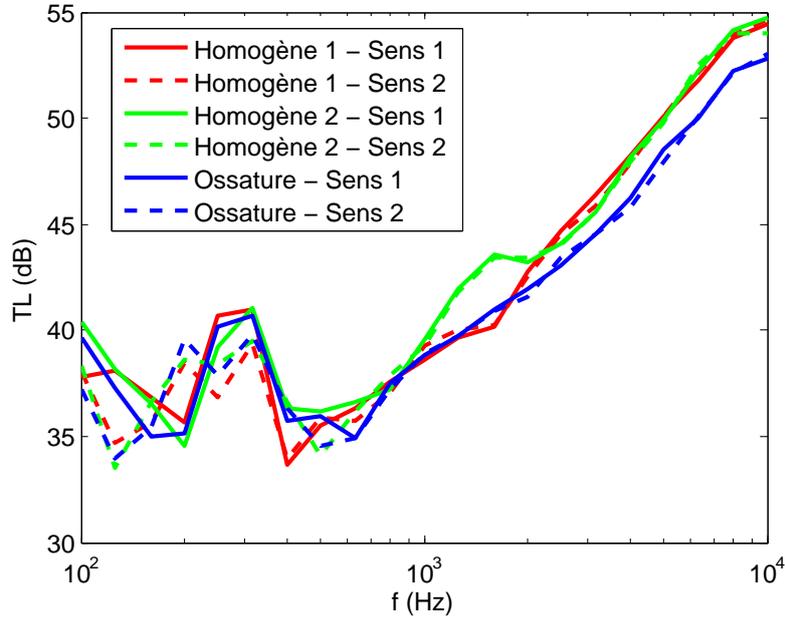


Figure V.7 – Indice d'affaiblissement mesuré sur les bétons de chanvre enduits

par [Bütschi *et al.* 2004] vaut 47 dB.

De nouveau, on ne remarque pas d'effet propre à l'ossature et une équivalence des résultats dans les deux sens. Toutefois, une résonance supplémentaire est remarquée par rapport aux bétons de chanvre non-enduits, entre 400 et 600 Hz. Il s'agit d'un comportement analogue au phénomène de "respiration" caractérisant les systèmes "masse-ressort-masse". Ce phénomène bien connu dans le cas d'une paroi double, constituée de deux parois séparées par une couche d'air [Fahy & Gardonio 2007], a également été observé pour des structures multicouches où un matériau poreux élastique est placé entre deux parois [Bolton *et al.* 1996, Dijkmans & Vermeir 2010]. La fréquence dite de respiration f_0 à laquelle ce phénomène se produit peut être évaluée par la relation :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{eM_{eq}}} \quad \text{avec} \quad M_{eq} = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \quad (\text{V.3})$$

M_{eq} est la masse surfacique équivalente du matériau calculée à partir des masses surfaciques des parements M_1 et M_2 , E est le module d'Young du matériau élastique placé entre les parois et e est son épaisseur.

Les fréquences de respiration des bétons de chanvre enduits ont été évaluées selon cette relation en considérant que chaque paroi est constituée par les couches d'enduit et de dégrossis (En première approche, les caractéristiques du dégrossis ont été prises égales à celles de l'enduit

V.1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

connexe, données au Tableau V.5). Les fréquences de respiration calculées sont données Tableau V.7 et comprises entre 480 et 570 Hz , ce qui coïncide avec les observations expérimentales. Toutefois, ce phénomène se produit à la même fréquence que le phénomène de compression de la couche de béton de chanvre centrale discuté précédemment. La contribution de chacune des résonances reste donc inconnue à ce stade mais sera analysée par la modélisation multicouche à la Section 1.2.2.

Echantillons	f_0 (Hz)
Multicouche homogène 1	480
Multicouche homogène 2	493
Multicouche ossature	567

Tableau V.7 – Fréquences de respiration calculées pour les bétons de chanvre enduits.

Un deuxième phénomène de résonance, moins marqué, est visible à la Figure V.7 entre 1500 et 2000 Hz . Il ne s’agit pas des fréquences critiques des enduits (6000 Hz pour les enduits intérieurs et 9000 Hz pour l’enduit extérieur), mais d’un multiple de la fréquence de compression de la couche centrale de béton de chanvre.

Ces observations expérimentales ont pu être confrontées aux modélisations réalisées avec la méthode de la matrice de transfert.

1.2.2 Modélisation des matériaux

Le programme AlphaCell[®] , développé par F-X. Bécot, F. Chevillotte et L. Jaouen de la société Matelys - Acoustique & Vibrations [Becot *et al.* 2011], a été utilisé pour modéliser les propriétés acoustiques des bétons de chanvre enduits. Ce programme a été optimisé afin de minimiser les difficultés liées au conditionnement de matrices, rencontrées à hautes fréquences et a fait l’objet de validations sur la base de nombreux travaux de la littérature.

Caractéristiques des couches Les paramètres acoustiques (ϕ_{inter} , σ , α_∞ et Λ) des différentes couches étudiées ont été caractérisés sur les échantillons témoins en suivant le protocole appliqué sur les autres échantillons de bétons de chanvre, présenté au Chapitre IV (α_∞ et Λ ont respectivement été fixées à 5 et 10 μm pour les enduits, dont la forte résistivité a rendue la caractérisation délicate). Les valeurs retenues sont synthétisées au Tableau V.8. Les paramètres mécaniques utilisés sont ceux présentés dans le Tableau V.5.

Résultats et interprétations Les modélisations ont été réalisées en considérant dans un premier temps que les matériaux ont un comportement fluide-équivalent, puis elles ont été

Echantillons	ϕ_{inter}	σ ($N.m^{-4}s$)	α_{∞}	Λ (μm)
Béton homogène 1	0,49	27 000	4,4	50
Béton homogène 2	0,46	40 000	4,7	30
Béton ossature	0,46	40 000	4,6	30
Enduit ext. - Dégrossis	0,38	1.10^7	5	10
Enduit int. taloché	0,62	1.10^7	5	10
Enduit int. non taloché	0,66	1.10^7	5	10

Tableau V.8 – Paramètres acoustiques des couches des bétons de chanvre et enduits.

répétées pour un comportement élastique et poroélastique. Les prédictions sont données pour les six couches seules à la Figure V.8.

Pour les couches d'enduits, on constate que l'indice d'affaiblissement est principalement gouverné par le comportement mécanique du matériau. Le milieu poreux apporte toutefois une dissipation supplémentaire pour des fréquences supérieures à $200 Hz$, augmentant en conséquence l'indice d'affaiblissement de jusqu'à $10 dB$. Pour l'enduit extérieur, la modélisation met en évidence une résonance autour de $9000 Hz$ qui correspond à la fois au phénomène de compression et de flexion du matériau (cf. Tableau V.5). Ce n'est cependant pas le cas pour les modélisations des deux enduits intérieurs, pour lesquelles les fréquences critiques normalement présentes autour de $6000 Hz$ sont masquées par la fréquence de compression à $13\ 000 Hz$. Le phénomène de compression est donc bénéfique pour les enduits intérieurs, dont l'effet de résonance critique, pénalisant pour l'indice d'affaiblissement, est annihilé.

Pour les couches de bétons de chanvre, les comportements fluide-équivalent et élastique sont davantage couplés, contrôlant respectivement l'indice d'affaiblissement aux basses ($f \leq 500 Hz$) et hautes ($f \geq 500 Hz$) fréquences. Dans ce cas, le milieu poreux apporte une dissipation supplémentaire du même ordre de grandeur que pour l'enduit (jusqu'à $10 dB$) tout en amortissant les résonances élastiques. La première résonance qui apparaît correspond au phénomène de compression de la phase solide du matériau à environ $500 Hz$. Les suivantes sont la fréquence critique ($\approx 1500 Hz$) et des multiples de la fréquence de compression. Les prédictions de l'indice d'affaiblissement suivent les tendances expérimentales à $\pm 10 dB$ avec ces premières estimations des paramètres acoustiques et mécaniques, mais font apparaître des résonances plus marquées que celles observées au niveau expérimental. Une analyse plus approfondie ne pourrait être réalisée qu'à condition de caractériser les paramètres mécaniques des couches de ces échantillons.

Les modélisations ont ensuite été réalisées pour les trois échantillons multicouches en considérant un comportement poroélastique, et sont présentées à la Figure V.9.

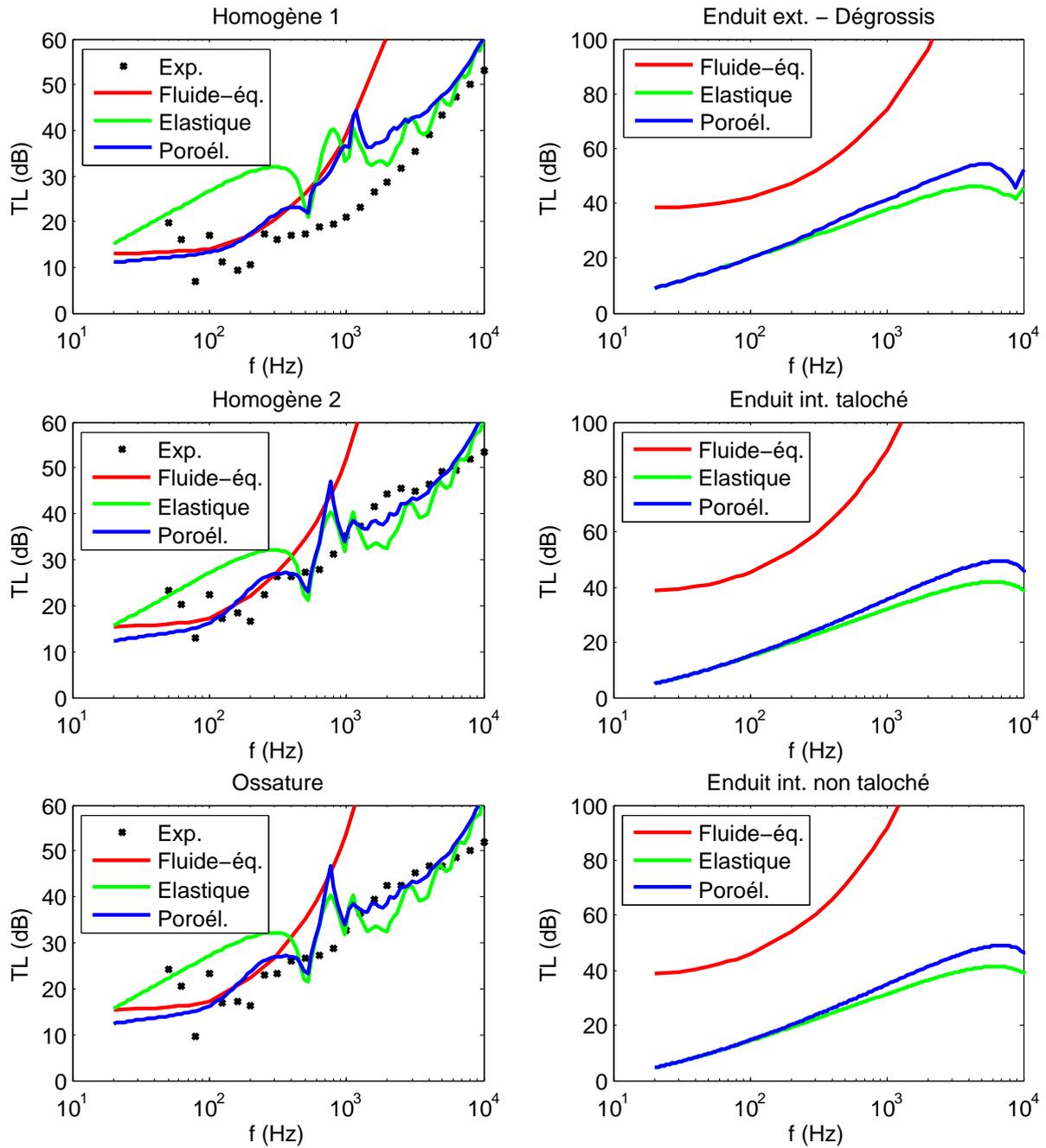


Figure V.8 – Modélisation de l'indice d'affaiblissement des couches de bétons de chanvre et d'enduits en considérant des comportements fluide-équivalent, élastique et poroélastique.

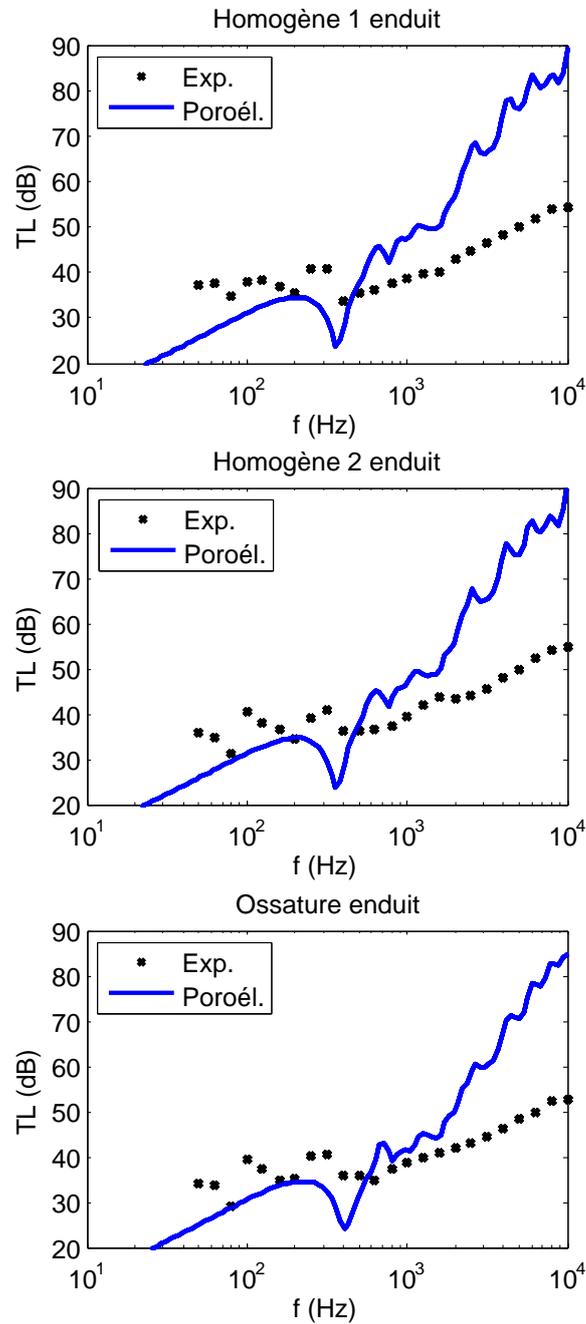


Figure V.9 – Modélisation de l'indice d'affaiblissement des bétons de chanvre enduits en considérant un comportement poroélastique.

V.1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

Les prédictions font apparaître une première résonance très marquée autour de 400 Hz et une série de résonances d'importance secondaire. Le fait que cette fréquence soit légèrement plus importante dans le cas de l'échantillon "Ossature enduit" est caractéristique d'un phénomène de respiration (cf. Tableau V.7). Les fréquences $2f_0$ et $3f_0$ multiples de la fréquence de respiration présentent également des résonances. Au-delà de ces premières fréquences, on constate une inflexion de l'indice d'affaiblissement ainsi qu'une période plus importante entre les fréquences de résonance. Il semblerait alors que le phénomène de compression de la couche de béton se répercute sur le comportement global du matériau. Enfin, on constate vis-à-vis des résultats expérimentaux une divergence au-dessus de 2000 Hz . L'origine de cet écart n'a pas pu être expliquée par les modèles, il pourrait provenir en revanche de transmissions parasites se produisant entre le moule et le béton de chanvre, ou entre le moule et le porte-échantillon.

La Figure V.10 présente dans le cas de l'échantillon de béton de chanvre "Ossature enduit" des simulations complémentaires réalisées afin de visualiser la contribution des dissipations visco-inertielles et thermiques au sein de chaque couche à la dissipation globale.

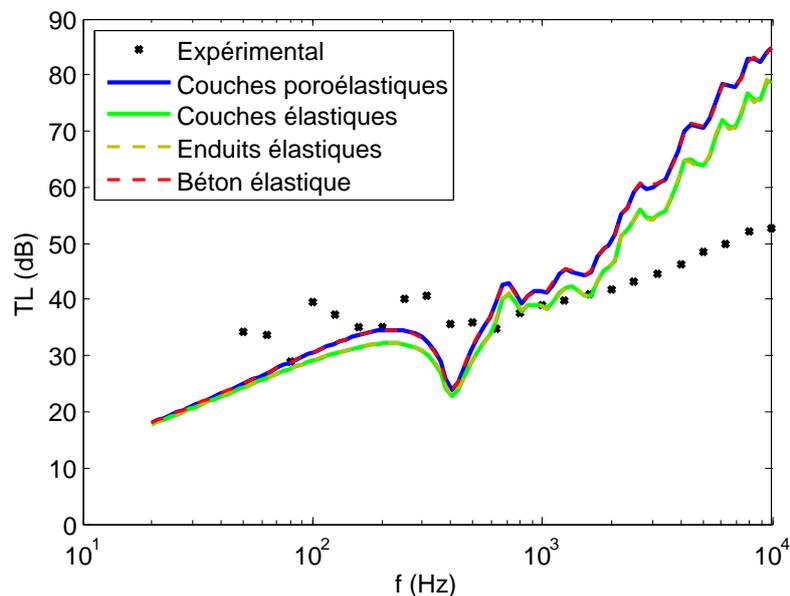


Figure V.10 – Modélisation de l'indice d'affaiblissement du béton de chanvre enduit "Ossature" en considérant des comportements élastique ou poroélastique pour les différentes couches.

Ce graphique permet de conclure que le comportement de la couche de béton de chanvre est purement élastique et que la dissipation due au milieu poreux dans les enduits apporte entre 5 et 10 dB à l'indice d'affaiblissement du multicouche au-dessus de 1000 Hz .

1.2.3 Conclusion

L'utilisation d'une structure multicouche permet d'augmenter significativement l'indice d'affaiblissement du béton de chanvre, le rendant suffisamment important pour répondre à de nombreuses problématiques de bruit dans le bâtiment. Nos résultats montrent que les bétons de chanvre enduits sont toutefois pénalisés par un phénomène de respiration dû à l'élasticité de la couche de béton de chanvre qui est difficilement évitable.

Notons pour finir que bien que le mode d'optimisation multicouche ait été dans cette thèse uniquement discuté à des fins d'isolement, il peut aussi être utilisé pour optimiser l'absorption acoustique des bétons de chanvre en créant par exemple des adaptations d'impédance. [Flores 2012] a ainsi montré qu'en jouant sur la densité de deux couches de chènevottes, un gain de l'absorption moyenne de 5% est déjà possible (voir Figure V.11). De plus, cette absorption acoustique peut être optimisée davantage en ayant recours à un gradient de propriétés continu.

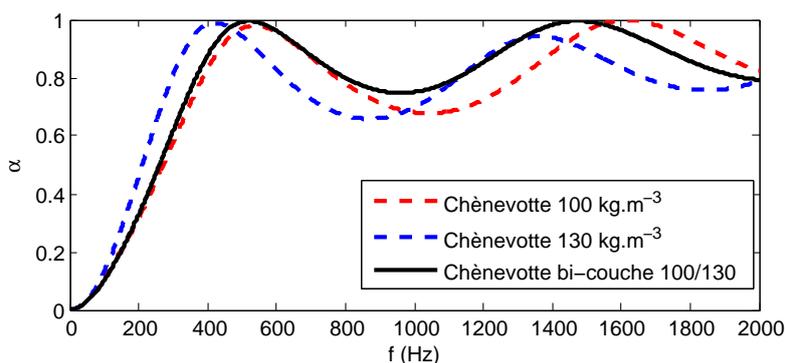


Figure V.11 – Gain d'absorption acoustique apporté par une structure bicouche [Flores 2012].

1.3 Optimisation de la géométrie de surface

Une autre solution d'optimisation des propriétés acoustiques que le traitement par structure multicouche ou par gradient de propriétés dans l'épaisseur du matériau consiste à travailler sur sa géométrie.

L'absorption acoustique d'un matériau poreux peut par exemple être significativement augmentée par des perforations permettant de mettre en jeu les phénomènes de double porosité [Olny & Boutin 2003, Sgard *et al.* 2005, Redon & Bouchareb 2005]. La perforation des matériaux présente néanmoins l'inconvénient de réduire significativement l'indice d'affaiblissement acoustique. Ceci peut être évité en insérant dans les perforations des inclusions de

matériaux poreux avec lesquelles les propriétés d'isolation du matériau sont garanties tout en mettant en jeu les phénomènes de diffusion de pression dus à la double porosité [Seppi 2009, Gourdon & Seppi 2010].

Suivant une idée similaire, des travaux ont été réalisés par [Lagarrigue *et al.* 2012] sur des matériaux poreux dotés d'inclusions solides creuses, placées de façon régulière dans le matériau. Ils ont montré que la dissipation acoustique est amplifiée par le piégeage de modes entre les inclusions et la terminaison rigide, et à l'intérieur de ces dernières, entraînant une forte absorption aux basses fréquences.

Nous nous sommes intéressés dans cette thèse à l'effet d'irrégularités en surface des bétons de chanvre. L'intérêt de ce mode d'optimisation a été étudié pour le béton de chanvre à la fois au niveau expérimental et théorique.

1.3.1 Théorie sur les phénomènes de localisation dans les cavités de matériaux poreux

Depuis une quinzaine d'année, plusieurs travaux ont montré l'intérêt d'une géométrie irrégulière sur l'absorption acoustique. A volume équivalent, les irrégularités de surface confèrent à un matériau poreux une dissipation acoustique plus importante [Hébert *et al.* 2009]. Cet amortissement peut être expliqué par deux phénomènes :

- la présence d'irrégularités entraîne une augmentation de la densité modale, notamment aux basses fréquences [Sapoval *et al.* 1997], favorisant ainsi la dissipation pour des géométries fractales,
- certains de ces modes sont localisés au niveau des cavités, à proximité de la frontière du matériau poreux [Sapoval *et al.* 2008], permettant un couplage entre les modes dans le milieu véhiculant l'onde incidente et les modes dans le matériau poreux, on parle alors de localisation.

Ces phénomènes ont été investigués numériquement par [Kubytskyi *et al.* 2012] qui ont montré que, dans le cas d'un matériau poreux peu absorbant, l'effet des irrégularités est plus marqué que pour un matériau de forte absorption.

1.3.2 Application au béton de chanvre

L'investigation de ces phénomènes de localisation au sein des bétons de chanvre a été réalisée en collaboration avec Yannick Debrabant, étudiant en Master [Debrabant 2010].

Résultats expérimentaux L'effet des irrégularités sur l'absorption acoustique a été évalué sur la base de trois géométries de complexité croissante représentées à la Figure V.12. Ces géométries, choisies symétriques pour des commodités expérimentales (augmentation de la gamme de validité de la mesure en tube de Kundt), et basées sur un motif fractal, ont dans un premier temps été appliquées à des mousses. Les résultats obtenus ont révélé que la deuxième géométrie présentait de meilleures performances. Ils ont permis de montrer que si un maximum d'irrégularités entraîne un maximum de modes localisés [Félix *et al.* 2007], cela n'entraîne pas pour autant un maximum d'absorption acoustique. L'optimisation de l'absorption acoustique doit donc s'appuyer sur une modélisation systématique des géométries, et d'un outil type "algorithme génétique".

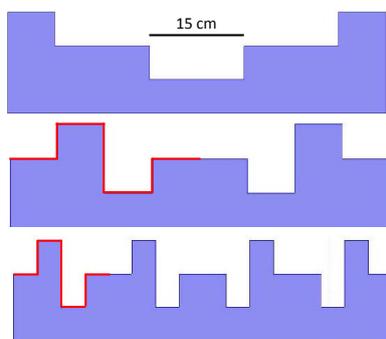


Figure V.12 – Géométries étudiées et motif fractal associé [Debrabant 2010]

La deuxième géométrie a donc été retenue afin d'observer l'effet de telles irrégularités sur un béton de chanvre. Deux échantillons ont été fabriqués à cette fin, un échantillon à géométrie irrégulière et un échantillon considéré comme référence de volume égal mais avec une surface plane. Ces échantillons ont été moulés avec un compactage de $0,05 \text{ MPa}$. La formulation "Mur" a été utilisée avec une chènevotte CA et un liant LA, les concentrations sont donnés dans le Tableau V.9.

Echantillons	$C_{chanvre}$ ($kg.m^{-3}$)	C_{liant}^0 ($kg.m^{-3}$)	C_{eau} ($kg.m^{-3}$)	ρ_{totale} ($kg.m^{-3}$)	$\rho_{stabilise}$ ($kg.m^{-3}$)
Echantillon plat de référence	133	266	393	793	435
Echantillon à géométrie irrégulière	124	248	367	739	405

Tableau V.9 – Concentrations utilisées pour la fabrication des bétons de chanvre de référence et à géométrie irrégulière.

Afin d'assurer la représentativité des échantillons tout en minimisant la quantité de béton de chanvre à fabriquer, il a été choisi de travailler en incidence normale avec un tube de Kundt

V.1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

de grandes dimensions présenté en Annexe 2.1.4, et donc avec des échantillons de section carrée et de 60 *cm* de côté (cf. Figure V.13).

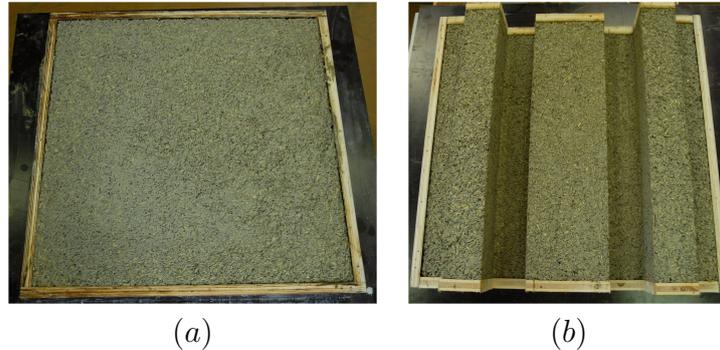


Figure V.13 – Photographies des échantillons réalisés : Échantillon plat de référence (a) et échantillon à géométrie irrégulière (b)

Les absorptions mesurées sur les deux échantillons sont présentées à la Figure V.14 (a). La plage de fréquences investiguée a été contrainte par la géométrie du tube à la gamme [30 ; 550 *Hz*]. Sur cette figure, des différences sont visibles entre les absorptions acoustiques des deux faces de l'échantillon plat. Ces dernières sont dues à la phase initiale de séchage des échantillons pendant laquelle tout excès d'eau apporté à la formulation entraîne une migration du mélange liant-eau vers le fond de l'échantillon. Ce fluage donne à la face inférieure une résistivité plus importante, et lui confère des propriétés acoustiques différentes de la face supérieure (voir Figure I.13 (b)). Afin de comparer les deux échantillons dans les mêmes conditions de fabrication, il faut donc comparer l'absorption acoustique de l'échantillon irrégulier à l'absorption acoustique de la face inférieure (face B) de l'échantillon plat de référence.

Les résultats expérimentaux mettent en évidence une augmentation de 40% à 80% de l'absorption acoustique due aux irrégularités pour des fréquences supérieures à 250 *Hz*. L'augmentation de l'absorption s'avère pour le béton de chanvre plus importante que pour les mousses testées par [Debrabant 2010] caractérisées par une augmentation inférieure à 30%. Ce résultat est confirmé par les travaux de [Kubytskyi *et al.* 2012], il peut s'expliquer par le fait que plus le matériau est réfléchissant, plus l'amplitude des ondes réfléchies est importante, et plus ces dernières vont entraîner des interférences destructives, entraînant une augmentation du coefficient d'absorption acoustique de référence.

Notons toutefois qu'une partie de l'augmentation observée est expliquée par des paramètres acoustiques différents dans le cas des deux échantillons. Effectivement, bien qu'ayant exercé une contrainte égale sur les deux échantillons, la géométrie du coffrage de l'échantillon irrégulier a contraint le matériau et a entraîné une diminution de sa masse volumique de 7% par rapport

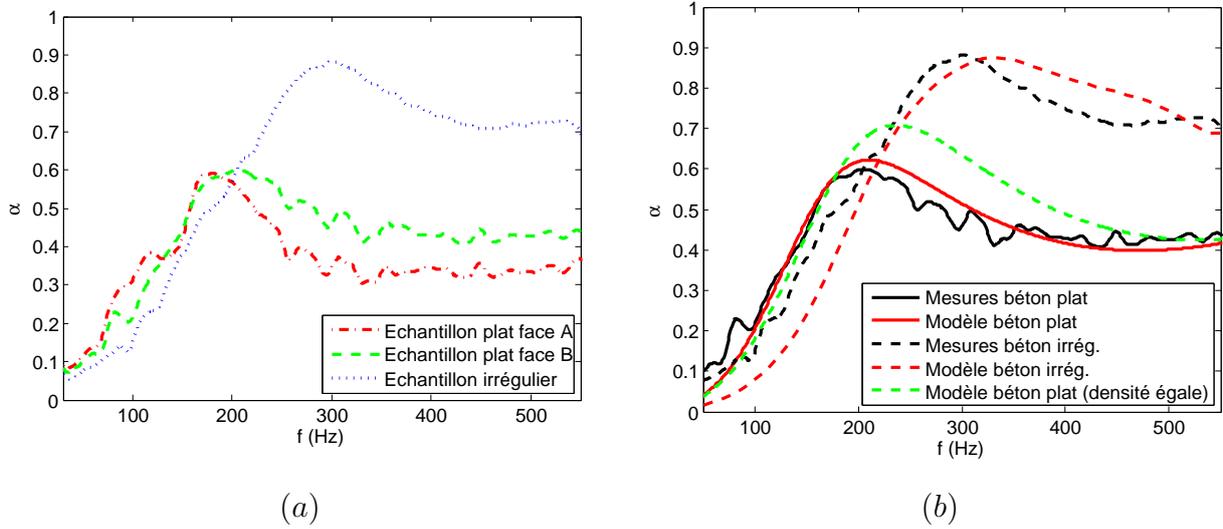


Figure V.14 – Effet de la géométrie irrégulière sur l’absorption acoustique des bétons de chanvre : Expérimentation (a) et modélisation (b)

à l’échantillon plat (voir Tableau V.9). Une comparaison sans biais a toutefois pu être réalisée à partir des absorptions acoustiques modélisées.

Modélisation Les modélisations d’échantillons de forme irrégulière ne peuvent être réalisées directement à partir des solutions analytiques des modèles acoustiques. Le code éléments finis NOVA[®] a donc été utilisé. Ce code repose sur la formulation (u,p) introduite par [Atalla *et al.* 2001], qui présente l’avantage d’intégrer directement le couplage entre des cellules composées de matériaux poreux de nature différente, ou d’air.

Les échantillons ayant été réalisés à partir de la même gâchée que les formulations “Densité”, leurs paramètres acoustiques ont été directement déduits des propriétés des échantillons de 10 cm de diamètre de masse volumique correspondante. Ils sont donnés dans le Tableau V.10.

Echantillons	ϕ_{inter}	σ ($N.m^{-4}s$)	α_{∞}	Λ (μm)
Echantillon plat de référence	0,51	20 000	4,6	80
Echantillon à géométrie irrégulière	0,54	15 000	4,5	100

Tableau V.10 – Paramètres acoustiques des bétons de chanvre de référence et à géométrie irrégulière.

Les modélisations réalisées sont présentées Figure V.14 (b). On constate que l’écart entre les modélisations et les grandeurs expérimentales reste globalement inférieur à 10%, ce qui permet de valider la modélisation en éléments finis. De plus, les prédictions présentées montrent qu’à densité apparente égale, la présence d’irrégularités entraîne une augmentation de l’absorption

V.1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

acoustique comprise entre 50 et 75% au-dessus de 300 Hz , ce qui permet de souligner l'intérêt de ce mode d'optimisation.

Optimisation de la géométrie par algorithme génétique La géométrie abordée au niveau expérimental constitue une première approche des phénomènes de localisation. Le modèle étant validé pour le béton de chanvre, des simulations ont été répétées afin de déterminer les géométries de bétons de chanvre conduisant aux absorptions acoustiques optimales. L'analyse se base sur les propriétés du béton de chanvre irrégulier présentées Tableau V.10.

L'optimisation a été réalisée en utilisant un algorithme génétique. On considère le matériau tel qu'il est décrit Figure V.15, constitué d'une série de chromosomes correspondant aux colonnes de l'échantillon. Chaque chromosome est doté d'autant de nombres qu'il y a de couches dans le matériau. Ces nombres valent 0 dans le cas où la cellule est constituée d'air et 1 pour le béton de chanvre. Le nombre de chromosomes a été fixé à 16, avec 3 couches de matériau afin de limiter le temps nécessaire pour l'optimisation.

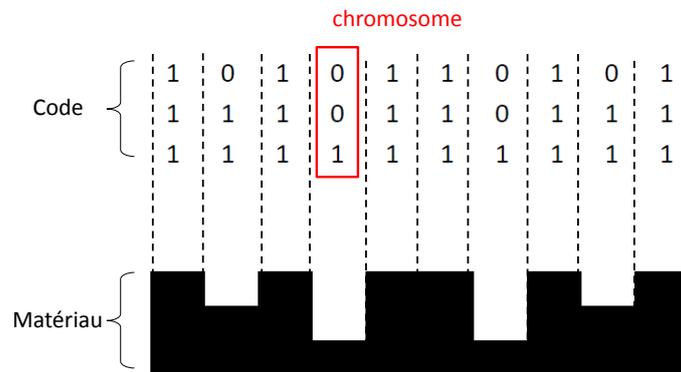


Figure V.15 – Codage du matériau à géométrie irrégulière pour l'optimisation génétique (1=matériau poreux, 0=air) [Debrabant 2010]

Le processus de l'algorithme, détaillé dans [Debrabant 2010], est le suivant :

1. Une génération initiale de n échantillons est constituée (n a été pris égal à 8 dans la suite).
2. Les propriétés de ces échantillons sont évaluées en calculant leur absorption acoustique. Le critère retenu est de maximiser $\int_{50Hz}^{550Hz} \alpha(f)df$. On retient alors les $n/2$ meilleurs échantillons pour la suite.
3. Ces échantillons "parents" sont alors croisés afin de donner $n/2$ "enfants". Pour ce faire, 5 ($\approx 0,3 \times 16$) chromosomes sont choisis aléatoirement dans chaque "parent" et sont échangés. Une mutation suivant une probabilité de 1/1000 est également introduite.

4. La nouvelle génération est composée par les $n/2$ parents et leurs $n/2$ enfants. A ce stade, on recommence un nouveau cycle (Etapas 2 et 3) et ce jusqu'à convergence des résultats. 200 générations se sont avérées suffisantes pour atteindre la convergence.

Deux types de géométries ont été considérés pour l'optimisation :

- Une géométrie type “créneau” a tout d'abord été envisagée, dans ce cas, l'algorithme empêche (aux stades 1 et 3) les cellules des échantillons de se trouver en position de porte-à-faux.
- Une seconde géométrie “libre” autorise les porte-à-faux.

Les résultats de l'optimisation sont présentés sur les Figures V.16 et V.17 pour l'optimisation “libre”.

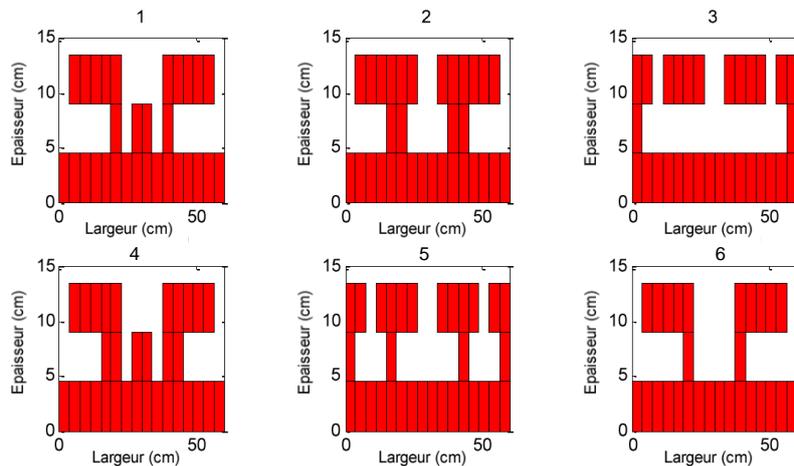


Figure V.16 – Configurations optimales trouvées dans le cas de la géométrie libre [Debrabant 2010]

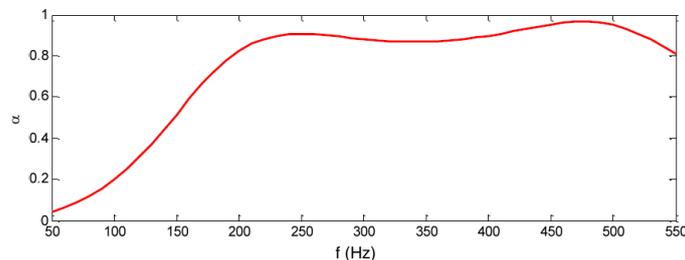


Figure V.17 – Absorption acoustique de la configuration optimale trouvée dans le cas de la géométrie libre [Debrabant 2010]

On constate que les géométries obtenues font naturellement apparaître des formes de résonateurs connues pour apporter une augmentation de l'absorption acoustique aux basses fréquences. L'absorption du meilleur échantillon est ainsi supérieure à 0,8 pour toutes les fréquences situées

V.1 Optimisation acoustique des bétons de chanvre

au-dessus de 200 Hz . En revanche, il faut reconnaître que ce genre de géométrie est difficilement concevable en béton de chanvre.

Pour l'optimisation "créneau", les géométries optimales obtenues sont présentées aux Figures V.18 et V.19. Dans ce cas, les matériaux réalisent une adaptation d'impédance progressive sur les trois couches. L'absorption acoustique du meilleur échantillon est inférieure aux basses fréquences, étant privée de l'effet résonateur apporté par les porte-à-faux, et baisse globalement de 9% par rapport à l'optimisation précédente. Toutefois, les géométries obtenues peuvent être plus aisément réalisées en béton de chanvre.

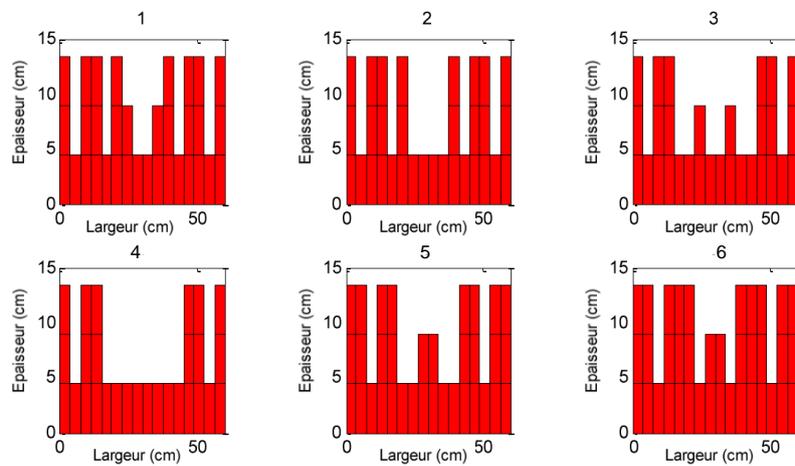


Figure V.18 – Configurations optimales trouvées dans le cas de la géométrie créneau [Debrabant 2010]

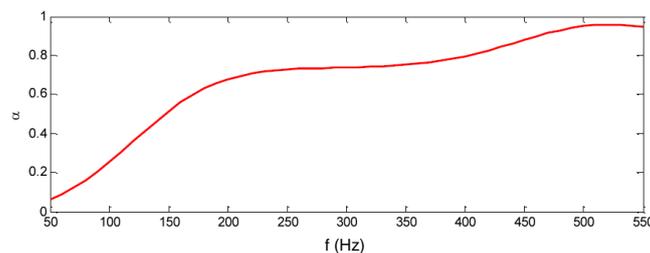


Figure V.19 – Absorption acoustique de la configuration optimale trouvée dans le cas de la géométrie créneau [Debrabant 2010]

1.3.3 Conclusion

Les résultats obtenus montrent que les effets de localisation dans les cavités de bétons de chanvre peuvent optimiser, à quantité de matériau égale, leur absorption acoustique. L'augmentation apportée atteint 80% pour certaines fréquences, faisant des irrégularités un levier

d'action essentiel pour des applications type murs antibruit.

Un algorithme génétique permet de montrer la diversité des géométries optimales pour l'absorption acoustique, mettant en évidence des formes caractéristiques de résonateurs et d'adaptations d'impédance.

2 Caractérisation des granulats de chanvre en fonction des paramètres de culture et d'environnement

L'utilisation de granulats d'origine naturelle tels que les particules de chanvre pose un certain nombre de questions liées à leur variabilité. Cette dernière se manifeste au niveau de la granulométrie, de la porosité intraparticule, et entraîne inéluctablement une incertitude sur les performances mécaniques, thermiques et acoustiques des bétons de chanvre. Afin de garantir un certain niveau de propriétés, cette incertitude doit être mesurée et maîtrisée (cf. règles professionnelles [RP2 2006]). Il est donc fondamental de connaître l'influence des paramètres de culture du chanvre sur les caractéristiques de la chènevotte.

A cette fin, un premier moyen est l'observation de la morphologie des particules par analyse granulométrique. Néanmoins, cette méthode ne permet pas de connaître les paramètres microstructuraux des particules, comme leur porosité intraparticule, et leur densité apparente. On se propose donc dans cette section de compléter cette caractérisation par une méthode innovante : l'analyse des propriétés acoustiques des chènevottes.

Les paramètres de culture peuvent être distingués suivant trois catégories :

- Les paramètres d'environnement : les conditions météorologiques et les propriétés du sol,
- Les paramètres de semis : la variété choisie, la date de semis, la densité du semis, et la quantité d'engrais utilisée,
- Les paramètres de récolte : la date de récolte, le type de récolte, le mode de défilage et d'obtention des particules.

Tous ces paramètres ont un effet notable sur les rendements de la plante [Bouloc 2006], si bien que ces derniers sont adaptés en fonction du produit prioritairement recherché (fibres, paille ou graines). Afin de connaître les répercussions de ces paramètres de culture sur les caractéristiques et propriétés acoustiques des granulats, encore peu connues à l'heure actuelle, des chènevottes tracées par la Fédération Nationale des Producteurs de Chanvre (FNPC) ont été caractérisées. L'analyse de leurs propriétés acoustiques nous a permis, de discuter de l'influence de chaque paramètre de culture sur les paramètres de base des particules de chanvre.

2.1 Présentation de la démarche et du cadre d'étude

2.1.1 Conditions de culture et de récolte des chènevottes

Les chènevottes recueillies grâce à la FNPC nous ont permis d'étudier 8 paramètres de culture, appelés "variables explicatives" dans la suite. Leurs effets sur la microstructure des particules ont pu être observés en les déclinant suivant différentes variations appelées "modalités" :

- Variable "Année de culture" : 2009, 2010 et 2011, trois années donnant lieu à différents paramètres d'environnement (climat et sol),
- Variable "Variété" : Epsilon 68 (E68), Férimon (F12), Fédora 17 (F17) (*Réf.*), Féline 32 (F32), Futura 75 (F75), Santhica 27 (S27), et Uso 31 (Uso31),
- Variable "Date semis" : usuelle (*Réf.*) et tardive,
- Variable "Densité semis" : 25, 50 (*Réf.*) 75, 100 ou 125 $kg.ha^{-1}$,
- Variable "Azote" : quantités de 0, 100 (*Réf.*) ou 150 unités d'azote,
- Variable "Date récolte" : stades de floraison, de fin de floraison et de maturité des graines (*Réf.*),
- Variable "Rouissage" : durées échelonnées entre 0 (*Réf.*) et 40 jours,
- Variable "Position tiges" : mixte (*Réf.*), haut ou bas des tiges.

Toutes les combinaisons de ces modalités n'ont pas pu être testées. La chènevotte de référence (notée *Réf.*) est de variété F17, avec une densité de semis de 50 $kg.ha^{-1}$, une quantité d'azote de 100 unités, récoltée dans son intégralité à maturité des graines et non rouie.

Les échantillons sont présentés dans la sous-section suivante. Les Tableaux V.11 à V.13 indiquent pour chaque année les modalités et les rendements correspondants aux échantillons.

Variété	Date semis	Densité semis ($kg.ha^{-1}$)	Azote (unités)	Date récolte	Rouissage (jours)	Position tiges	Nombre pieds/m ²	Hauteur tiges (cm)	Paille ($t.ha^{-1}$)	Fibre ($t.ha^{-1}$)
Uso 31	22-avr	25	100	mat. F17	-	Mixte	98	143	4,75	1,89
Uso 31	22-avr	50	100	mat. F17	-	Mixte	162	143	5,81	2,4
Uso 31	22-avr	75	100	mat. F17	-	Mixte	222	148	6,74	2,89
F17	22-avr	25	100	mat. F17	-	Mixte	97	165	6	1,98
F17	22-avr	50	100	mat. F17	-	Mixte	176	149	6,01	2,14
F17	22-avr	75	100	mat. F17	-	Mixte	207	155	6,9	2,58
F32	22-avr	25	100	mat. F17	-	Mixte	89	172	6,18	2,16
F32	22-avr	50	100	mat. F17	-	Mixte	178	160	7,27	2,72
F32	22-avr	75	100	mat. F17	-	Mixte	185	150	7,3	2,87
F17	22-avr	50	0	mat. F17	-	Mixte	167	77	1,47	0,5
F17	22-avr	50	150	mat. F17	-	Mixte	184	149	6,51	2,22
F17	22-avr	50	100	10-juil	-	Mixte	201	134	7,04	2,15
F17	22-avr	50	100	20-août	-	Mixte	175	130	5,52	1,61
F17	22-avr	50	100	mat. F17	10	Mixte	188	133	5,03	1,55
F17	22-avr	50	100	mat. F17	20	Mixte	182	127	4,25	1,12
F17	22-avr	50	100	mat. F17	-	Haut	196	77	1,96	0,69
F17	22-avr	50	100	mat. F17	-	Bas	196	69	4,2	1,41

Tableau V.11 – Paramètres de culture et rendements des chènevottes tracées par la FNPC en 2009. Les paramètres différents de la situation de référence (surlignée) sont repérés en gras.

V.2 Caractérisation des granulats de chanvre en fonction des paramètres de culture et d'environnement

Variété	Date semis	Densité semis ($kg.ha^{-1}$)	Azote (unités)	Date récolte	Rouissage (jours)	Position tiges	Nombre pieds/m ²	Hauteur tiges (cm)	Paille ($t.ha^{-1}$)	Fibre ($t.ha^{-1}$)
Uso 31	21-avr	25	100	mat. F17	-	Mixte	83	230	8,59	3,64
Uso 31	21-avr	50	100	mat. F17	-	Mixte	115	218	9,52	4,35
Uso 31	21-avr	75	100	mat. F17	-	Mixte	149	204	8,52	4,11
F17	21-avr	25	100	mat. F17	-	Mixte	83	248	9,40	3,36
F17	21-avr	50	100	mat. F17	-	Mixte	156	224	9,51	3,66
F17	21-avr	75	100	mat. F17	-	Mixte	183	213	9,45	3,92
F32	21-avr	25	100	mat. F17	-	Mixte	115	235	10,11	3,87
F32	21-avr	50	100	mat. F17	-	Mixte	142	220	9,49	3,91
F32	21-avr	75	100	mat. F17	-	Mixte	229	208	10,00	4,44
F17	21-avr	50	0	mat. F17	-	Mixte	180	191	7,57	2,62
F17	21-avr	50	150	mat. F17	-	Mixte	107	219	9,70	3,51
F17	21-avr	50	100	10 juillet	-	Mixte	146	196	7,92	2,74
F17	21-avr	50	100	20 août	-	Mixte	141	215	9,79	3,44
F17	21-avr	50	100	mat. F17	10	Mixte	122	211	7,92	2,26
F17	21-avr	50	100	mat. F17	20	Mixte	95	219	8,27	2,16
F17	21-avr	50	100	mat. F17	-	Haut	106	114	2,61	1,00
F17	21-avr	50	100	mat. F17	-	Bas	106	109	6,57	2,48
Uso 31	04-juin	70	70	mat. F17	-	Mixte	124	133	3,32	1,40
F12	04-juin	70	70	mat. F17	-	Mixte	162	130	4,26	1,66
F17	04-juin	70	70	mat. F17	-	Mixte	155	125	4,25	1,66
S27	04-juin	70	70	mat. F17	-	Mixte	198	153	5,33	2,22
F32	04-juin	70	70	mat. F17	-	Mixte	198	153	5,03	2,04
E68	04-juin	70	70	mat. F17	-	Mixte	167	153	5,85	2,12
F75	04-juin	70	70	mat. F17	-	Mixte	161	163	6,15	2,29

Tableau V.12 – Paramètres de culture et rendements des chènevottes tracées par la FNPC en 2010. Les paramètres différents de la situation de référence (surlignée) sont repérés en gras.

Variété	Date semis	Densité semis ($kg \cdot ha^{-1}$)	Azote (unités)	Date récolte	Rouissage (jours)	Position tiges	Nombre pieds/m ²	Hauteur tiges (cm)	Paille ($t \cdot ha^{-1}$)	Fibre ($t \cdot ha^{-1}$)
F17	18-mai	25	100	mat. F17	-	Mixte		146	4,5	1,6
F17	18-mai	50	100	mat. F17	-	Mixte		129	5,1	1,9
F17	18-mai	75	100	mat. F17	-	Mixte		124	4,9	2,0
F17	18-mai	100	100	mat. F17	-	Mixte		120	5,1	2,1
F17	18-mai	125	100	mat. F17	-	Mixte		114	4,7	2,3
F17	18-mai	50	100	mat. F17	10	Mixte		120	4,6	1,6
F17	18-mai	50	100	mat. F17	20	Mixte		119	4,5	1,5
F17	18-mai	50	100	mat. F17	30	Mixte		118	4,0	1,2
F17	18-mai	50	100	mat. F17	40	Mixte		126	3,7	1,0

Tableau V.13 – Paramètres de culture et rendements des chènevottes tracées par la FNPC en 2011. Les paramètres différents de la situation de référence (surlignée) sont repérés en gras.

2.1.2 Protocole de caractérisation

Explication de la démarche Des mesures de porosité ont tout d'abord été réalisées sur les échantillons afin de déterminer la masse volumique de squelette $\rho_{squelette}$ des particules. Pour chaque échantillon, une masse de 12 g a été testée afin d'assurer la représentativité de la caractérisation. La mesure a été reproduite à trois reprises.

Les propriétés acoustiques (α , ρ , K , TL) ont ensuite été caractérisées sur chaque chènevotte en tube de Kundt. Ces mesures ont été effectuées sur des échantillons d'une épaisseur de 5 cm et d'une masse volumique de 110 $kg.m^{-3}$. Cette masse volumique de référence a été choisie car c'est une des seules densités admissibles par l'ensemble des chènevottes considérées. Les mesures ont été répétées pour toutes les modalités avec trois échantillons, de sorte à évaluer l'incertitude de mesure due à l'arrangement des particules.

Les propriétés acoustiques ont été exploitées grâce aux résultats présentés dans la Section 2 du Chapitre IV. Les paramètres acoustiques de ces échantillons (ϕ_{inter} , σ , α_{∞} , Λ) ont ainsi pu être déterminés ainsi que les paramètres de base correspondants ($\rho_{particule}$, R , ϕ_{intra} , n).

Enfin, dans le but de connaître l'effet des paramètres de culture ou d'environnement considérés sur les paramètres de base et les paramètres acoustiques, une analyse de variance (ANOVA : ANalysis Of VAriance) a été réalisée. Cette analyse consiste à faire l'hypothèse qu'une variable explicative n'a pas d'effet sur le paramètre à expliquer ("hypothèse nulle"). On appelle alors seuil de signification observé, noté p_{value} , la probabilité d'observer les valeurs prises par le paramètre à expliquer, l'hypothèse nulle étant considérée vraie. Généralement, il est considéré que pour $p_{value} < 0,05$, l'effet de la variable explicative est significatif (l'hypothèse nulle est rejetée), et que pour $p_{value} > 0,05$, l'effet n'est pas significatif (l'hypothèse nulle ne peut être rejetée et on ne peut pas conclure). Il faut noter que cette analyse nécessite d'avoir des résultats pour plusieurs échantillons et n'a donc pas été réalisée pour la densité de squelette, un seul échantillon étant testé.

Illustration pour le cas de l'effet de la masse volumique sur la chènevotte de référence Cette démarche est illustrée ici dans le cas de la chènevotte de référence de l'année 2009. Les propriétés acoustiques de cette chènevotte ont été caractérisées pour 5 masses volumiques allant de 100 à 140 $kg.m^{-3}$. Ces mesures permettent donc d'observer l'effet de la densité de la chènevotte sur ses propriétés acoustiques, sur ses paramètres acoustiques, et sur les paramètres de base de la chènevotte. Les résultats sont présentés sur la Figure V.20, organisée en trois niveaux avec les propriétés acoustiques mesurées (a), les paramètres acoustiques (b) et les paramètres de base (c).

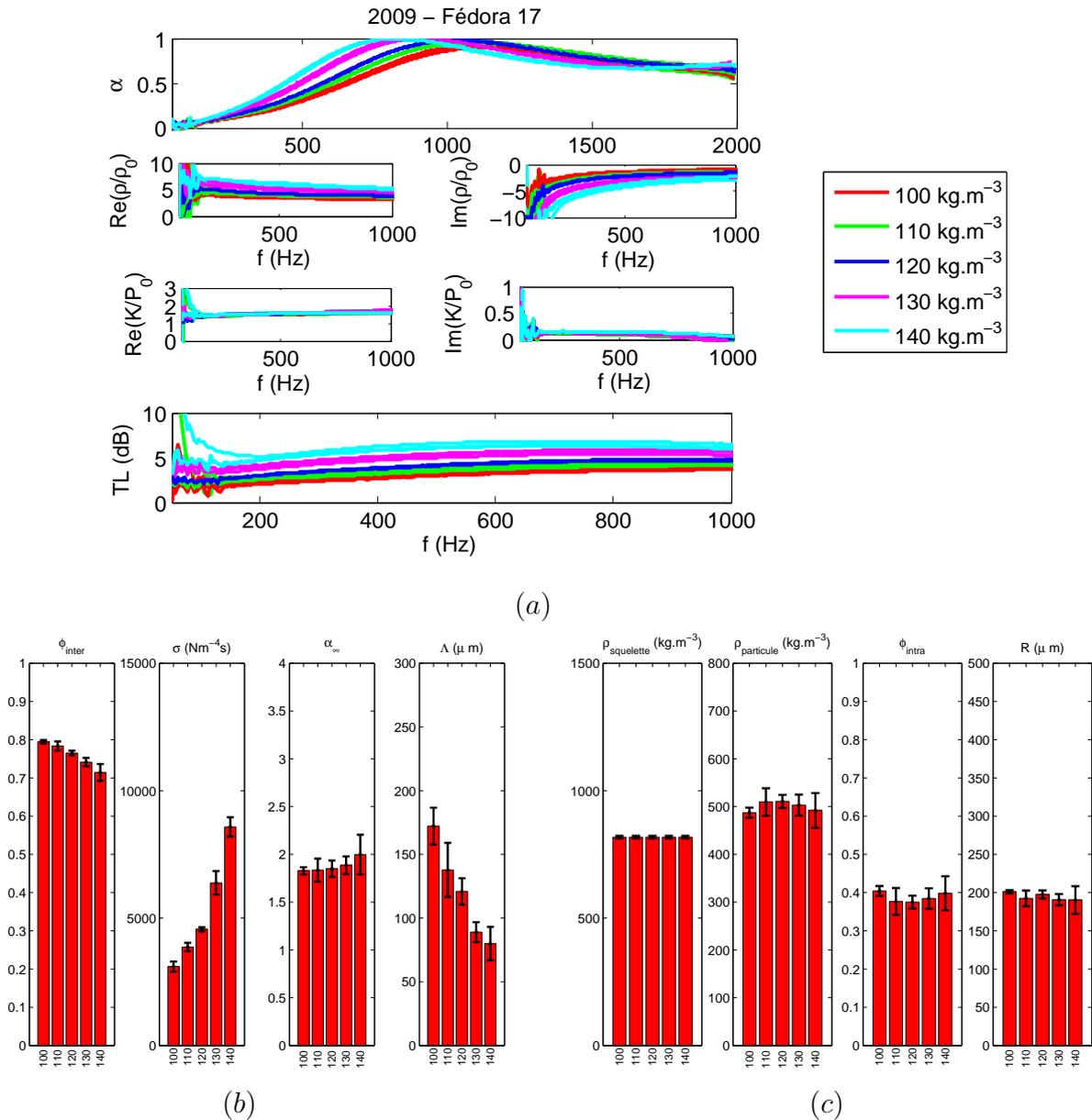


Figure V.20 – Propriétés acoustiques de la chènevotte de référence de l’année 2009 en fonction de sa masse volumique apparente

On voit sur ce graphe que la masse volumique a un effet très marqué sur les propriétés acoustiques, entraînant un déplacement du premier pic de l’absorption acoustique α de 200 Hz vers les basses fréquences et augmentant l’indice d’affaiblissement TL de 5 dB. Les paramètres acoustiques évoluent en conséquence avec une baisse de la porosité interparticule ϕ_{inter} et de la longueur visqueuse Λ , et une augmentation de la résistivité σ et de la tortuosité α_∞ . Du point de vue des paramètres de base, on ne constate pas ici d’évolution significative. Cela

V.2 Caractérisation des granulats de chanvre en fonction des paramètres de culture et d'environnement

s'explique par le fait que la même chènevotte a été utilisée dans une gamme de densités pour laquelle les particules ne sont pas écrasées. La caractérisation acoustique nous indique que la masse volumique apparente des particules est approximativement 500 kg.m^{-3} , que la porosité intraparticule est d'environ 40%, et que la dimension équivalente des granulats est de l'ordre de $200 \mu\text{m}$. Cette dimension équivalente peut être directement reliée à l'épaisseur moyenne des particules d'après l'Equation IV.27.

Les seuils de signification sont donnés dans le Tableau V.14. L'ANOVA confirme nos premières observations, les effets de la densité apparente n'étant pas significatifs pour $\rho_{particule}$, ϕ_{intra} et R , et significatifs pour ϕ_{inter} , σ et Λ . Toutefois, dans ce cas, l'importance de l'écart-type pour les tortuosités ne permet pas de conclure.

	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ
<i>pvalue</i>	0,70	0,69	0,63	<0,001	<0,001	0,48	<0,001

Tableau V.14 – Seuils de signification observés pour l'effet de la masse volumique apparente de chènevotte

Les résultats obtenus pour les autres chènevottes sont présentés dans la suite du rapport, en analysant dans un premier temps l'effet des paramètres de culture, puis celui des paramètres d'environnement.

2.2 Sensibilité des propriétés des chènevottes aux paramètres de culture

2.2.1 Effet de la variété du chanvre

Cette variable a tout d'abord été étudiée grâce aux chènevottes de 2009 et 2010, suivant trois modalités (F17, F32 et Uso31) et pour trois densités de semis ($25, 50$ et 75 kg.ha^{-1}). Les résultats sont présentés en Annexe 11 sur les Tableaux E.1 et E.2, les Figures E.1 à E.3 et les Figures E.12 à E.14.

A densité de semis fixée, il n'y a pas de tendance stable entre les variétés. Les propriétés acoustiques caractérisées sont très proches d'une modalité à une autre. F17 se démarque légèrement avec un rayon équivalent plus important. Cela peut s'expliquer par un diamètre de tige plus grand pour cette variété. En effet, d'après [Bouloc 2006], la variété influe sur le rendement en paille, meilleur dans le cas d'une variété tardive, et sur le diamètre des tiges. Or, d'après une étude réalisée par la FDGEDA (Fédération Départementale des Groupes d'Etude et de Développement Agricole) de l'Aube, le classement des variétés étudiées dans l'ordre croissant

du diamètre de leurs tiges est : Uso31, F12, F32, F75, E68, et F17 (S27 n'étant pas classé dans cette étude).

Cette analyse a été complétée par la caractérisation de sept modalités (E68, F12, F17, F32, F75, S27 et Uso31) en semis tardif, présentée à la Figure E.11. Avec ces semis tardifs, contrairement au semis usuels, les plantes n'ont pas forcément atteint leur état de maturité habituel si bien que des différences peuvent apparaître en fonction de la précocité de la variété. L'ordre de précocité des variétés étudiées, de la plus précoce à la plus tardive, est : Uso31, F12, F17, F32 et S27, E68, F75. Cet ordre a été repris dans les graphes de sorte à faciliter la lecture.

Au premier abord, on ne note pas d'effet significatif de la précocité des variétés, mais un comportement différent pour la variété F17 par rapport aux six autres, avec une densité de squelette plus importante et un rayon équivalent plus faible. Toutefois, si l'on exclut la variété F17 de l'analyse, la densité de squelette des particules semble augmenter pour les variétés les plus tardives. Ces résultats sont confortés par les rendements de l'année 2010, qui indiquent que la variété F17 est caractérisée par les hauteurs de tiges les plus faibles dans le cas de ces semis tardifs.

Les seuils de signification sont donnés Tableau V.15, et confirment, en particulier, les effets significatifs de la variété sur la dimension des particules, la tortuosité et la longueur visqueuse.

	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ
2009 - Semis usuel	0,911	0,738	0,183	0,823	0,174	0,004	<0,001
2010 - Semis usuel	0,010	0,001	0,001	0,010	0,006	<0,001	<0,001
2010 - Semis tardif	0,443	0,492	<0,001	0,421	0,539	<0,001	0,018

Tableau V.15 – Seuils de signification observés pour l'effet de la variété du chanvre

2.2.2 Effet de la date de semis

L'effet de cette variable peut être observé sur les variétés F17, F32 et Uso31 sur les Figures E.15 à E.17 et sur le Tableau E.2. On constate premièrement que la densité de squelette est plus faible de 7 à 20% dans le cas des semis tardifs, de même, on note que les densités apparentes de particules sont plus importantes de 10% et que les porosités intraparticules sont approximativement deux fois plus faibles.

Cela pourrait être interprété par le fait que dans le cas tardif, les tiges n'ont pas atteint leur maturité, et sont caractérisées par un réseau de capillaires moins développé. En conséquence, on note dans le cas des semis tardifs des porosités interparticules plus élevées, des résistivités et des tortuosités plus faibles et des longueurs visqueuses plus importantes. Ces différences ont

V.2 Caractérisation des granulats de chanvre en fonction des paramètres de culture et d'environnement

des conséquences marquées sur les propriétés acoustiques, avec une plus faible absorption aux basses fréquences et un plus faible indice d'affaiblissement pour les semis tardifs.

Le Tableau V.16 présente les seuils de signification correspondants. On constate que les effets sont significatifs pour tous les paramètres, et en particulier les porosités ϕ_{intra} et ϕ_{inter} .

	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ
F17	0,018	0,008	0,074	0,014	0,063	0,701	0,018
F32	0,266	0,075	<0,001	0,242	0,004	0,005	0,038
Uso31	0,007	<0,001	0,001	0,010	<0,001	0,002	0,585

Tableau V.16 – Seuils de signification observés pour l'effet de la date de semis du chanvre

Afin de confirmer ces interprétations, il serait intéressant de croiser ces résultats avec l'observation de sections de particules au microscope.

2.2.3 Effet de la densité de semis

Cet effet a été étudié dans un premier temps sur les chènevottes de 2009 et 2010, pour les variétés F17, F32 et Uso31, suivant les modalités 25, 50 et 75 $kg.ha^{-1}$ (voir Figures E.4 à E.6 et Figures E.18 à E.20). Puis, l'analyse a été approfondie grâce à cinq modalités (25, 50, 75, 100 et 125 $kg.ha^{-1}$) sur les chènevottes de 2011 pour la variété F17 (Figure E.25). On remarque de façon quasi-systématique que le rayon équivalent des particules diminue légèrement avec la densité de semis du chanvre, entraînant une augmentation de la résistivité. Les seuils de signification indiquent d'ailleurs des effets significatifs pour R et σ (cf. Tableau V.17).

Cela peut s'expliquer par le fait qu'une forte densité de semis multiplie le nombre de pieds de chanvre par unité de surface, et en conséquence, limite la hauteur des plantes. Ces deux phénomènes sont confirmés par les tableaux de rendements présentés en début de section. Pour de fortes densités de semis, les plantes doivent d'autant plus se partager les ressources disponibles dans le sol (eau et azote), et donnent des tiges moins hautes et plus fines [Bouloc 2006], ce qui se répercute directement sur la dimension des particules.

En outre, on observe une augmentation de la densité de squelette des particules avec la densité de semis de l'ordre de 10%, accompagnée par une augmentation de la porosité intraparticule. Ces différences traduisent une modification de la microstructure de la chènevotte avec la densité de semis. Plusieurs origines peuvent être envisagées, à savoir une compensation des apports solaires par des capillaires plus importants, ou encore un développement plus important des capillaires dans le cas des tiges de faible hauteur, moins de matière étant nécessaire à la résistance mécanique de la plante.

	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ
2009	0,313	0,458	0,403	0,370	0,145	0,029	0,646
2010	0,272	0,300	<0,001	0,267	<0,001	0,171	0,343
2011	0,948	0,396	0,001	0,929	0,429	0,587	0,047

Tableau V.17 – Seuils de signification observés pour l’effet de la densité de semis du chanvre

2.2.4 Effet de la quantité d’azote

Cette variable est étudiée grâce aux chènevottes de 2009 et 2010 avec les trois modalités (Nulle :0 unités, Moyenne :100 unités et Forte :150 unités) et les résultats sont présentés Figures E.7 et E.21.

Pour les chènevottes de 2009, on peut constater que l’apport d’azote entraîne des tortuosités et longueurs visqueuses plus importantes, ainsi qu’une porosité intraparticule et une densité de squelette plus faibles. Les rendements relatifs à cette année indiquent que les tiges sont deux fois plus hautes pour le chanvre fertilisé, avec un nombre de pieds stable par unité de surface. Ces effets restent peu significatifs à l’exception de l’effet sur la dimension des particules R comme le montre le Tableau V.18.

Pour l’année 2010, l’azote a pour effet de mettre en concurrence les plantes les unes avec les autres, et entraîne une forte réduction du nombre de pieds par unité de surface. La hauteur des tiges reste pour sa part relativement stable. Cela se traduit dans ce cas par des paramètres caractérisés proches entre les cas fertilisé et non fertilisé.

	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ
2009	0,095	0,184	0,010	0,080	0,199	0,119	0,618
2010	0,276	0,065	0,459	0,272	0,051	0,242	0,041

Tableau V.18 – Seuils de signification observés pour l’effet de la quantité d’azote utilisée

2.2.5 Effet du stade de récolte

Les trois modalités étudiées (Floraison, Fin-Floraison et Maturité graines) des années 2009 et 2010 sont présentées sur les Figures E.8 et E.22. On peut remarquer que la densité apparente des particules est légèrement plus faible pour les chènevottes récoltées à maturité (effet particulièrement significatif en 2009, cf. Tableau V.19). Cette différence de densité implique une porosité interparticule ainsi qu’une longueur visqueuse plus faibles, et entraîne un décalage de l’absorption vers les basses fréquences et une augmentation de l’indice d’affaiblissement.

D’un point de vue agronomique, ces résultats indiquent que la microstructure des tiges continue légèrement à évoluer après le stade de floraison. Cette évolution peut être liée à la

V.2 Caractérisation des granulats de chanvre en fonction des paramètres de culture et d'environnement

surcharge due au développement des graines de chanvre.

	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ
2009	0,001	0,018	0,304	0,002	0,001	0,107	0,118
2010	0,603	0,539	0,016	0,599	0,079	0,228	0,007

Tableau V.19 – Seuils de signification observés pour l'effet de la date de récolte

2.2.6 Effet de l'origine des particules dans les tiges

Pour étudier cette variable explicative, les propriétés des chènevottes constituées par le bas de la tige, le haut de la tige ou son intégralité ont été comparées et sont présentées sur les Figures E.9 et E.23. On constate une très légère augmentation de la résistivité pour les particules issues du haut de la plante, accompagnée par une baisse de la tortuosité et de la longueur visqueuse. Ces différences s'expliquent par des rayons équivalents plus petits en haut de tiges, la section de cette dernière y étant plus faible. Ces résultats sont cependant significatifs au sens de l'ANOVA pour l'année 2010 (voir Tableau V.20).

	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ
2009	0,120	0,283	0,014	0,102	0,227	0,805	0,670
2010	0,015	0,016	0,175	0,015	0,657	0,002	0,002

Tableau V.20 – Seuils de signification observés pour l'effet de l'origine des particules dans les tiges

2.2.7 Effet du rouissage

Le rouissage est enfin étudié à travers trois modalités pour les chènevottes de 2009 et 2010 : Nul, Moyen et Long (voir Figures E.10 et E.24). On constate qu'il entraîne une forte augmentation de la porosité intraparticule et une légère augmentation de la densité apparente des particules. De plus, le rouissage est le paramètre qui a l'effet le plus marqué sur la densité de squelette des chènevottes. D'après le Tableau V.21, on remarque que les seuls paramètres sur lesquels le rouissage n'a pas systématiquement d'effet significatif sont R , ϕ_{inter} et σ .

Le rouissage consiste en un lessivage des pectines contenues dans les tiges de chanvre par fermentation [Bouloc 2006], et s'accompagne systématiquement d'une perte de matière. L'augmentation de la densité de squelette est une conséquence de la réduction du volume du squelette suite à cette perte de matière.

Il est aussi intéressant de noter que le processus de rouissage est stabilisé dès 10 jours d'immersion des chènevottes. Cette observation est confirmée par des durées de rouissages très

longues, allant jusqu'à 40 jours avec les cinq modalités des chènevottes de 2011 (voir Figure E.26). Ce rouissage prolongé a toutefois pour conséquence de faire chuter les rendements en paille et en fibres.

	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ
2009	0,212	<0,001	0,012	0,202	0,110	0,168	0,040
2010	0,018	0,001	0,019	0,021	0,120	0,032	0,007
2011	0,153	<0,001	0,024	0,171	0,532	<0,001	<0,001

Tableau V.21 – Seuils de signification observés pour l'effet du rouissage

2.3 Sensibilité des propriétés des chènevottes aux paramètres d'environnement

2.3.1 Evolution sur les années 2009 à 2011

Quatre types d'échantillons ont été cultivés avec les mêmes modalités sur ces trois années, et leurs propriétés sont comparées sur les Figures E.27 à E.30. On remarque sur ces figures que des différences notables existent entre les propriétés des chènevottes cultivées durant ces trois années. Les chènevottes de l'année 2010 se distinguent particulièrement des deux autres années.

En effet, ces dernières sont caractérisées par un rayon équivalent et une densité apparente de particule plus faibles et une porosité intraparticule plus importante. Cela se traduit sur les paramètres acoustiques avec une résistivité et une tortuosité plus importantes, ainsi qu'une porosité interparticule plus faible (effets significatifs pour la majorité des cas, cf. Tableau V.22). Ces différences sont également très nettement marquées du point de vue des propriétés acoustiques, avec pour les chènevottes de 2010, un pic d'absorption situé à plus basses fréquences et un meilleur indice d'affaiblissement sur la gamme étudiée.

	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ
F17-25	0,291	0,457	0,855	0,261	0,039	0,006	0,930
F17-50	0,010	0,026	0,010	0,014	0,002	0,006	0,141
F17-75	<0,001	<0,001	0,421	<0,001	0,018	0,005	0,107
Rouissage-moyen	0,362	0,397	0,001	0,342	0,166	<0,001	0,022

Tableau V.22 – Seuils de signification observés pour l'effet des paramètres d'environnement (de 2009 à 2011)

V.2 Caractérisation des granulats de chanvre en fonction des paramètres de culture et d'environnement

2.3.2 Evolution sur les années 2009 et 2010

Les mêmes tendances ont été observées sur les Figures E.32 à E.43 comparant les propriétés de douze types d'échantillons de chènevottes de même modalités cultivées en 2009 et 2010. Les seuils de signification sont donnés Tableau V.23.

	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ
F32-25	0,449	0,463	0,198	0,458	0,171	<0,001	0,055
F32-50	0,666	0,892	0,004	0,671	0,008	0,003	0,215
F32-75	0,088	0,224	0,001	0,094	0,011	<0,001	0,095
Uso31-25	0,025	0,034	0,192	0,016	0,013	<0,001	0,003
Uso31-50	0,077	0,012	0,002	0,068	0,001	0,001	0,093
Uso31-75	0,627	0,323	0,420	0,587	0,264	<0,001	0,003
Standard-bas	0,738	0,267	0,026	0,824	0,128	0,001	0,063
Standard-haut	0,183	0,665	0,918	0,186	0,452	0,185	0,973
Stade-floraison	0,002	0,140	0,006	0,002	0,003	<0,001	0,203
Fin-floraison	0,002	0,011	0,005	0,003	<0,001	<0,001	0,397
Zéro-azote	0,161	0,412	0,300	0,159	0,923	0,001	0,008
Azote-élevé	0,195	0,404	0,570	0,187	0,469	0,015	0,198

Tableau V.23 – Seuils de signification observés pour l'effet des paramètres d'environnement (de 2009 à 2010)

2.3.3 Interprétation des différences

Les échantillons de 2009, 2010 et 2011 sont issus d'environnements de croissance différents, les échantillons n'ayant pas été cultivés sur le même sol et avec les mêmes conditions météorologiques (cf. Tableaux V.24 à V.26).

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Cumulé
2009	65.8	23.4	24.8	57.8	48.6	57.0	24.6	7.4	28.2	44.8	382.4
2010	35.8	63.4	76.2	11.4	37.3	86.4	6.6	27	39.1	64.5	447.7
2011	57.7	40	16.8	7.3	5.8	45.3	49.4	100.7	48.7	25.5	397.2

Tableau V.24 – Bilan des précipitations (en *mm*) sur les années 2009 à 2011

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Cumulé
2009	2.1	4.9	8.0	12.0	15.4	18.2	19.7	21.0	17.4	13.2	131.8
2010	1.8	5.1	7.9	11.7	13.6	18.7	21.5	19.0	16.1	12.3	127.6
2011	5.5	7.4	9.4	14.4	16.3	18.2	18.1	19.5	18.2	13.9	140.9

Tableau V.25 – Bilan des températures (en °C) sur les années 2009 à 2011

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Cumulé
2009	84	98	185	157	198	253	221	260	217	132	1803
2010	84	85	140	263	214	214	271	177	214	156	1819
2011	72	55	176	264	276	187	195	187	195	141	1746

Tableau V.26 – Bilan de l'ensoleillement (en h) sur les années 2009 à 2011

On constate d'après ces tableaux, si l'on cumule les hauteurs de précipitations sur les dix premiers mois de chaque année, que globalement l'année 2010 était plus humide que 2009 et 2011, tandis que l'année 2011 était plus chaude et moins ensoleillée. L'augmentation des précipitations pourrait être à l'origine des différences observées sur les chènevottes de l'année 2010. On remarque par ailleurs que pour cette année, les plantes se sont beaucoup plus développées, comme l'indiquent la hauteur des tiges ainsi que les rendements en paille et en fibres, tout en étant moins nombreuses (cf. nombre de pieds au m^2).

Effectivement, d'après [Bouloc 2006], les ressources en eau constituent, avec les éléments fertilisants, les éléments les plus importants pour le développement du chanvre, si bien qu'un manque d'eau lors de la période de croissance active de la plante se ressent sur le rendement en paille.

En 2010, le développement des plantes s'est donc fait suivant des conditions plus propices qu'en 2009 et 2011. L'augmentation significative de la hauteur des tiges a entraîné une densité apparente moyenne de particule plus faible et une porosité intraparticule plus importante, caractéristique des bas de tiges. La baisse de porosité interparticule en conséquence est à l'origine des différences mises en évidence au niveau des propriétés acoustiques.

2.4 Synthèse des résultats

Une synthèse est présentée sur le Tableau V.27. Les effets significatifs des paramètres de culture et d'environnement du chanvre sur ses rendements, les paramètres de base des particules, et les paramètres et propriétés acoustiques des chènevottes y sont présentés.

Du point de vue des propriétés acoustiques, on constate globalement que quatre facteurs ont une influence significative : la météo (effet année), les dates de semis et de récolte, et la densité apparente de la chènevotte. Tous les autres facteurs ont des effets sur certains des paramètres, mais ne sont pas clairement visibles sur l'absorption et l'affaiblissement acoustique.

Plus généralement, des effets très marqués sur les paramètres de base des particules ont été soulignés. Ces effets ne se manifestent pas forcément en acoustique mais peuvent être significatifs sur les propriétés thermiques et mécaniques des chènevottes. En plus des quatre effets discutés précédemment, on retient particulièrement l'influence du rouissage sur la densité de squelette,

V.2 Caractérisation des granulats de chanvre en fonction des paramètres de culture et d'environnement

la densité apparente ainsi que la porosité intraparticule des chènevottes.

Pour conclure, on peut noter que la démarche appliquée dans cette section constitue une application très intéressante de la modélisation des propriétés acoustiques des chènevottes, donnant accès aux paramètres de base des particules, et ouvrant la voie à un contrôle de qualité plus précis qu'une simple analyse granulométrique. Toutefois, certains résultats mériteraient des investigations complémentaires de la microstructure des particules par imagerie, par exemple à l'aide d'un microscope ou d'un tomographe.

	Rendements			Param. de base			Param. acou.			Prop. acou.				
	Nb pieds/m ²	Haut. tiges	Rdt paille	Rdt fibre	$\rho_{squelette}$	$\rho_{particule}$	ϕ_{intra}	R	ϕ_{inter}	σ	α_{∞}	Λ	α	TL
Année	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Variété	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Date semis	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓
Densité semis	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Quantité azote	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓
Date récolte	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Position tiges	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗
Rouissage	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗
Densité apparente	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tableau V.27 – Synthèse des effets des paramètres de culture et d’environnement sur les propriétés de la chènevotte

3 Application à la conception de panneaux acoustiques bio-sourcés pour une galerie commerciale

Au cours de cette thèse, nous avons travaillé avec le groupe industriel Schiever, société anonyme, acteur de la grande distribution exploitant des enseignes comme Atac, Maximarché et Auchan, dans le cadre de la construction d'un nouveau centre commercial Auchan à Sens, sur la conception de faux plafonds acoustiques à base de fibres végétales.

Ce projet revêt un caractère particulièrement innovant, car de tels matériaux n'avaient à notre connaissance jamais été utilisés dans un ERP (Etablissement Recevant du Public). Effectivement, leur utilisation dans ce cadre nécessite à la fois une certaine résistance au feu, résistance à la flexion et absorption acoustique. La combinaison de ces propriétés multiphysiques se heurte à plusieurs difficultés : d'une part, l'optimisation d'une de ses propriétés se fait généralement au détriment d'une autre, et d'autre part, les fibres végétales telles que le chanvre sont particulièrement inflammables.

Ce projet associe Schiever, l'ENTPE, l'association Construire en Chanvre, des fabricants de laines de chanvre et la société CREPIM (Centre de Recherche et d'Etude sur les Procédés d'Ignifugation des Matériaux). Le projet s'est déroulé en trois étapes :

- nous avons tout d'abord réalisé un diagnostic acoustique pour connaître les spécificités du spectre de bruit à traiter,
- un *consensus* a été trouvé sur la configuration du matériau permettant de répondre aux principales contraintes d'utilisation,
- la configuration multicouche choisie a fait l'objet de développements afin d'obtenir une résistance au feu, une résistance en flexion et une absorption acoustique suffisantes.

Les objectifs fixés ont pu être atteints. La galerie commerciale, dotée d'un faux-plafond acoustique lin-chanvre, a été inaugurée le 24 octobre 2012. Les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce projet sont synthétisés dans cette section, et sont détaillés dans [Arnaud *et al.* 2011].

3.1 Diagnostic acoustique d'une galerie commerciale représentative

3.1.1 Présentation et intérêt du site

Afin d'évaluer les besoins en termes de correction acoustique, nous nous sommes rendus dans une galerie similaire : la galerie commerciale Auchan inaugurée en 2009 à Vineuil, près de Blois. Elle compte 50 enseignes, réparties sur une surface utile de 7500 m^2 .

Un plan de cette galerie est donné Figure V.21 (a).

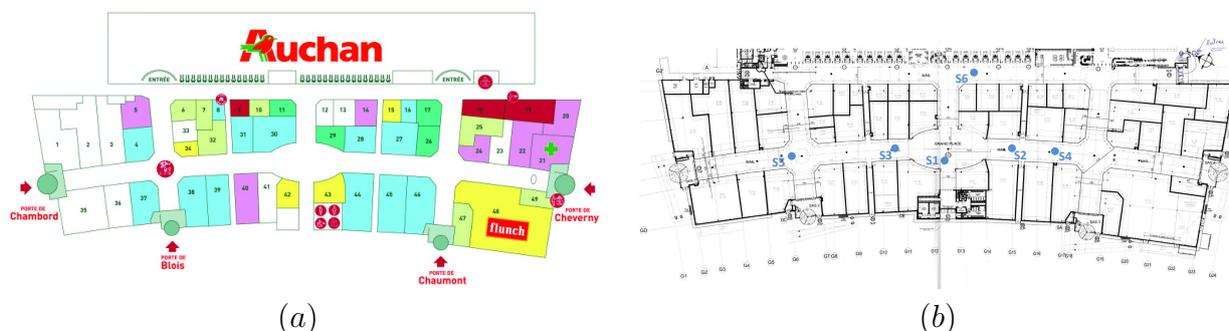


Figure V.21 – Plan de la galerie commerciale de Vineuil (a) et positions des mesures de spectres de bruit (b)

3.1.2 Diagnostic acoustique

Afin de se trouver dans une condition de forte fréquentation, ce diagnostic acoustique a été réalisé en week-end, le samedi 27 février 2010.

Temps de réverbération Nous avons réalisé les mesures de temps de réverbération à l'aide d'un sonomètre BlueSOLO 01dB[®] au niveau de la "Grand Place" située au centre de la galerie commerciale (cf. Figure V.21 (b)). Ces mesures ont été effectuées avec 5 positions de microphone et 4 positions pour la source de bruit. Certaines mesures ont été difficiles à exploiter, le niveau d'émission de la source étant limité et le volume de la salle important.

Les temps de réverbération obtenus moyennés sur les octaves 500, 1000 et 2000 Hz sont compris entre 1,5 et 3 s selon les positions. Aucune réglementation du temps de réverbération n'existe pour cette catégorie de bâtiment. Il est donc laissé à la discrétion du maître d'ouvrage. Dans notre cas, nos mesures indiquent toutefois des temps de réverbération intermédiaires entre ceux préconisés pour une bonne intelligibilité (1,2 s pour les locaux d'enseignement [JOR 2003]) et ceux qui peuvent être atteints dans les salles de spectacles.

Spectres et niveaux de bruit caractéristiques Des mesures de spectre de bruit ont été réalisées à six positions caractéristiques de la galerie marchande présentées Tableau V.28 et Figure V.21 (b).

Les acquisitions, d'une durée de 10 min , ont été enregistrées à l'aide d'une carte Symphonie 01dB[®] permettant une capture des fréquences allant jusqu'à 20 000 Hz . Les spectres sont présentés par tiers d'octave entre 100 et 5000 Hz sur la Figure V.22.

V.3 Application à la conception de panneaux acoustiques bio-sourcés pour une galerie commerciale

Spectres	Description position	Bruits caractéristiques
S1	Place centrale galerie	Café, musique, sèche-main toilettes
S2	Allée principale	Passages, musique
S3	Allée principale	Passages, musique
S4	Allée principale	Passages, musique
S5	Place latérale	Entrée galerie, manège, passage, musique
S6	Caisses Auchan	Bips caisses, alarmes, passage, musique

Tableau V.28 – Caractéristiques des points de mesure du spectre de bruit

Les spectres mettent en évidence des niveaux compris entre 40 et 65 dB , plus importants aux basses fréquences, en particulier en dessous de 200 Hz . Ces niveaux restent homogènes à 5 dB près sur les 6 points testés à partir de 250 Hz . Toutefois, des différences sont remarquées pour les basses fréquences, avec des niveaux globalement plus importants pour les points S1, S2, S5 et S6. Cette différence s’explique par une fréquentation plus importante et des bruits d’équipements supplémentaires (sèche-main, manège, caisses).

Discussion du mode de traitement le plus adapté De tels spectres de bruit ne peuvent être amortis qu’avec des matériaux suffisamment absorbants sur une large gamme de fréquences. L’utilisation de matériaux poreux constitue donc une solution adaptée.

Suivant ce principe, la volonté du groupe Schiever a été d’utiliser un matériau acoustique à base de fibres végétales, se rapprochant au maximum des performances des absorbants commercialisés à base de fibres minérales. Le critère retenu pour évaluer l’absorption acoustique est d’atteindre un coefficient pondéré α_w proche de 0,9.

3.2 Développement d’un prototype multicouche ignifugé

3.2.1 Choix de la configuration du matériau

Etant donnée le mode de pose prévu en faux-plafond, une contrainte fondamentale a été d’identifier des matériaux présentant une résistance suffisante à la flexion. Sur la base des 11 échantillons de laines végétales présentés à la Section 1 du Chapitre II, le choix a porté sur la configuration du matériau “Lin tricouche” caractérisée à la fois par une absorption acoustique et une résistance à la flexion élevée.

Cette structure tricouche, parement/isolant/parement a donc été retenue pour la suite, mais a été réalisée à partir de fibres de chanvre et de lin.

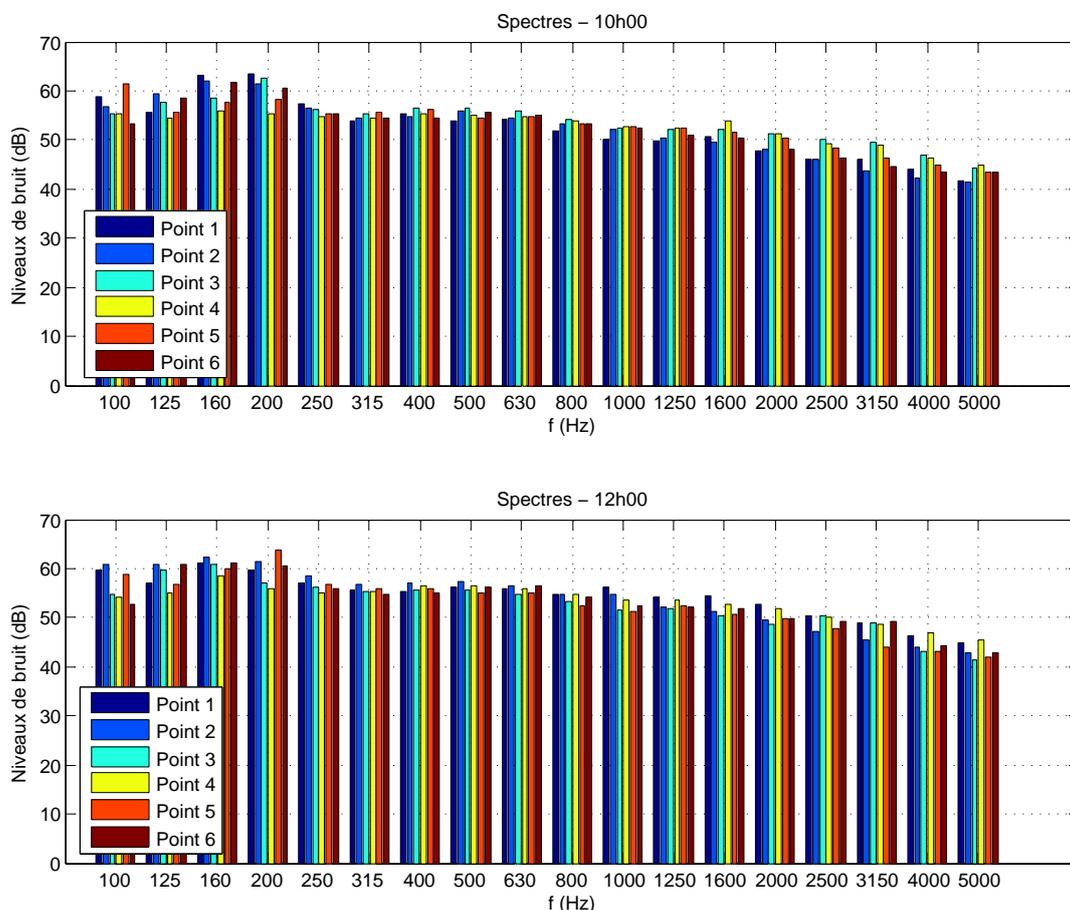


Figure V.22 – Spectres de bruit mesurés

3.2.2 Premiers échantillons tricouches non ignifugés

Présentation des prototypes La première vague d'échantillons a été fabriquée par le groupe Laroche à partir de fibres de chanvre vert (notées V) ou de fibres de chanvre brunies par le rouissage (notées B). Quatre configurations tricouches (notées VVV, VBV, BVB et BBB) constituées avec ces fibres, ont été caractérisées et sont présentées Figure V.23.

Caractéristiques des échantillons Le Tableau V.29 synthétise les caractéristiques des échantillons. Les porosités et résistivités ont été directement mesurées sur les échantillons et les tortuosités, ainsi que les longueurs visqueuses et thermiques ont été caractérisées indirectement grâce à la méthode présentée par [Panneton & Olny 2006, Olny & Panneton 2008]. Les modules d'Young, coefficients de Poisson et coefficients d'amortissement structural (η) ont été approxi-més à partir de mesures réalisées avec un pot vibrant par [Amri 2012] suivant la technique de

V.3 Application à la conception de panneaux acoustiques bio-sourcés pour une galerie commerciale

la masse résonnante [Jaouen 2003, Renault 2008].

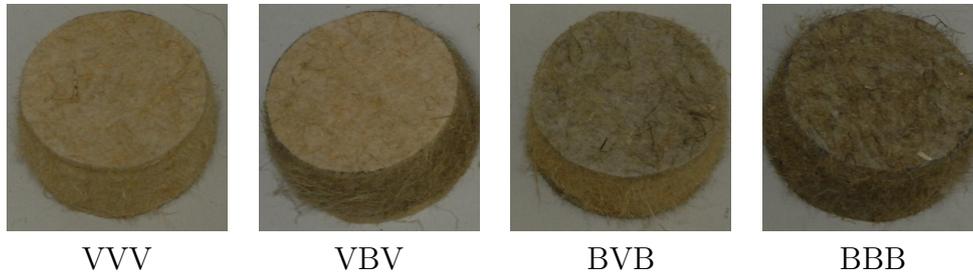


Figure V.23 – Première série d'échantillons tricouches chanvre réalisés

Couche	e (mm)	ρ_v ($kg.m^{-3}$)	ϕ	σ ($N.m^{-4}s$)	α_∞	Λ (μm)	Λ' (μm)	E (MPa)	ν	η
B (par ^t)	5	178,5	0,881	55 000	1,1	35	120	10	0,1	0,1
V (par ^t)	5	214,7	0,857	60 000	1,1	30	100	10	0,1	0,1
B (isol.)	40	79,8	0,947	10 500	1,04	75	150	1	0,05	0,05
V (isol.)	40	73,2	0,951	8 000	1,03	80	185	1	0,05	0,05

Tableau V.29 – Caractéristiques des couches

Le module d'Young de l'isolant est de l'ordre de 1 MPa et son coefficient de Poisson est très proche de 0, ce qui est caractéristique des matériaux fibreux de faibles densités, comme la laine de verre [Tarnow 2005]. D'après les calculs réalisés par [Amri 2012], ces propriétés permettent de limiter suffisamment la flèche pour des plaques de dimensions $600 \times 1200 \text{ mm}^2$.

Caractérisation de l'absorption acoustique L'absorption acoustique a tout d'abord été caractérisée en incidence normale sur des échantillons circulaires de 10 cm de diamètre. Les performances mesurées sont présentées Figure V.24 (a).

On constate que les configurations testées ont une absorption acoustique supérieure à 0,8 dès 600 Hz et présentent des performances proches à $\pm 5\%$. Le rouissage des fibres ne joue donc pas de rôle fondamental dans ce cas. On note également qu'une résonance mécanique apparaît pour des fréquences comprises entre 400 et 600 Hz . Le calcul des fréquences de respiration $f'_0 = f_0/2$ et de compression de l'isolant $f'_r = f_r/2$ indique qu'il s'agit d'un phénomène de respiration ($f'_0 \in [540; 600Hz]$). La variabilité de la fréquence de résonance peut quant à elle être attribuée à des conditions de montage différentes d'un échantillon à un autre. Le calcul de la fréquence de compression des échantillons donne des valeurs $f'_r \in [700; 730Hz]$. Cela est confirmé par nos résultats expérimentaux puisque pour ces fréquences, une résonance de faible amplitude est visible sur la courbe d'absorption de certains échantillons.

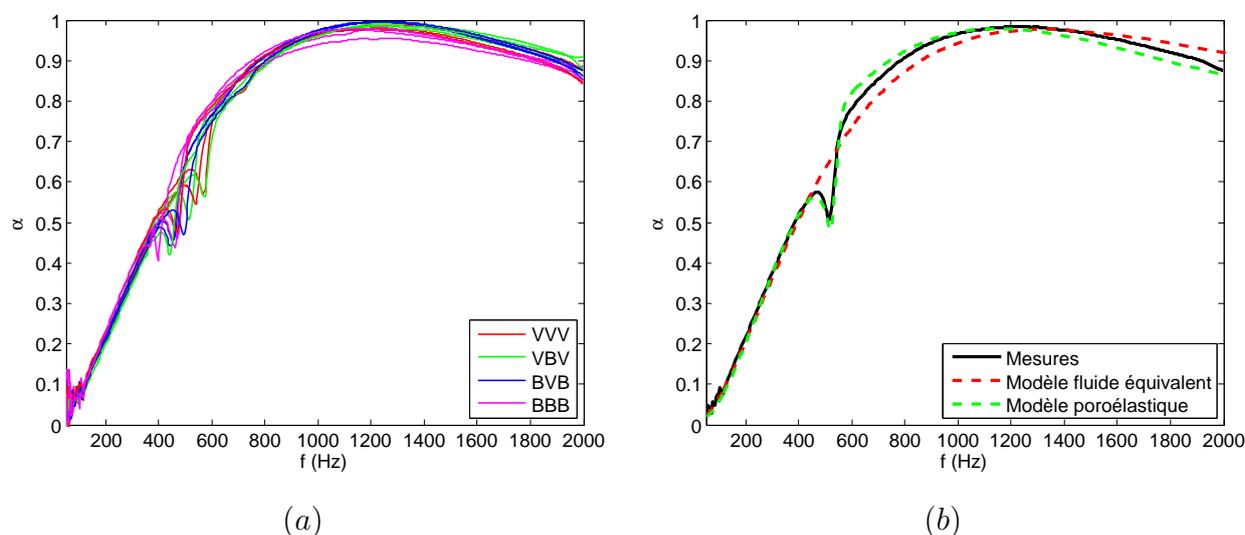


Figure V.24 – Absorption acoustique des échantillons multicouches en incidence normale : Expérimentation (a) et modélisation (b)

Les mesures ont également été réalisées en champ diffus dans une salle réverbérante de l’ENTPE. La salle et le protocole de mesure sont présentés en Annexe 2.2.1. Les résultats sont restitués en Annexe 12 sur les Figures E.44 à E.46 en tiers d’octave. Les mesures montrent que l’échantillon VBV est caractérisé par des performances légèrement supérieures aux autres configurations, ce qui est aussi visible au-dessus de 1500 Hz sur la Figure V.24 (a).

Modélisation poroélastique multicouche Une modélisation poroélastique a ensuite été réalisée à partir de la méthode de la matrice de transfert afin d’analyser le comportement du matériau et de valider les paramètres acoustiques et élastiques. Le modèle utilisé pour la phase fluide est le modèle de [Johnson *et al.* 1987, Champoux & Allard 1991] à 5 paramètres. Un exemple est présenté Figure V.24 (b) pour la configuration BVB.

La modélisation réalisée met en évidence un phénomène de respiration coïncidant avec la fréquence de résonance expérimentale et permet en particulier de valider la valeur choisie pour le module d’Young de la couche d’isolant. On constate en outre qu’entre cette fréquence de résonance et 1200 Hz , la dissipation mécanique amène un gain d’absorption acoustique allant jusqu’à 5%, le premier pic d’absorption étant décalé vers les basses fréquences.

3.2.3 Échantillons ignifugés

Problématique du traitement au feu des panneaux acoustiques Suite à ces premiers prototypes et étant donné que les échantillons étaient destinés à un établissement ERP, il s’est

V.3 Application à la conception de panneaux acoustiques bio-sourcés pour une galerie commerciale

avéré indispensable de traiter les laines végétales vis-à-vis du feu, les fibres de chanvre ainsi que les fibres thermofusibles étant particulièrement inflammables. En effet, la réglementation ERP impose que les matériaux soit de catégorie M1 (B-s3,d0) [Capon & Khelifi 2012], alors que les parements et isolants bruts sont seulement classés M4.

Le traitement au feu des fibres d'origine naturelle a été réalisé par le groupe CREPIM. Il faut noter que la nature des matériaux et l'application visée ont constitué en soit une innovation technologique. La solution retenue a été de pulvériser une solution de composés azotés et phosphorés en surface des échantillons. Ce traitement s'est révélé particulièrement efficace puisque les échantillons sont passés du classement M4 au classement M1 [Capon & Khelifi 2012].

Toutefois, il nous a semblé essentiel de vérifier que les performances acoustiques des matériaux traités ne soient pas dégradées, les retardateurs de flamme se développant sous forme réticulée à l'intérieur des matériaux fibreux et pouvant entraîner une imperméabilisation des échantillons.

Effet du traitement au feu sur les caractéristiques des couches Les échantillons traités ont été réalisés par les groupes CAVAC et EcoTechnilin. L'isolant est constitué de fibres de chanvre et le parement est réalisé à partir de fibres de chanvre et de lin. Les caractéristiques des couches sont données avant et après traitement sur le Tableau V.30. Il faut noter que seules les couches extérieures exposées aux flammes (c.-à-d. les parements) ont été traitées.

Couche	e (mm)	ρ_v (kg.m ⁻³)	ϕ	σ (N.m ⁻⁴ s)	α_∞	Λ (μ m)	Λ' (μ m)	E (MPa)	ν	η
Par ^t normal	5,5	323	0,798	150 000	1,15	30	50	15	0,1	0,15
Par ^t traité	6	331	0,793	130 000	1,15	30	50	15	0,1	0,15
Isol.	50	38,0	0,976	2100	1,05	205	300	1	0,05	0,15

Tableau V.30 – Effet de l'ignifugation sur les caractéristiques des couches

On remarque que le traitement par pulvérisation entraîne un gonflement du parement d'environ 9% de son épaisseur ainsi qu'une légère augmentation de sa masse volumique. La résistivité du parement traité est toutefois inférieure à la résistivité de référence, ce qui s'explique d'une part par l'augmentation de l'épaisseur, mais qui indique également que le traitement au feu n'imperméabilise pas le matériau.

Effet du traitement au feu sur les propriétés acoustiques des échantillons La Figure V.25 présente l'absorption acoustique mesurée sur les prototypes traités et non traités en incidence normale, et les modélisations correspondantes. Pour la modélisation, l'amortissement

structural de l'isolant a été augmenté de 0,05 à 0,15 afin d'être en accord avec l'amplitude de la résonance expérimentale. Cette différence de comportement peut provenir des conditions de couplage différentes entre ce cas (couches liées par des points de colle localisés) et le tricouche précédent (couplage sur toute la surface par des fibres thermofusibles).

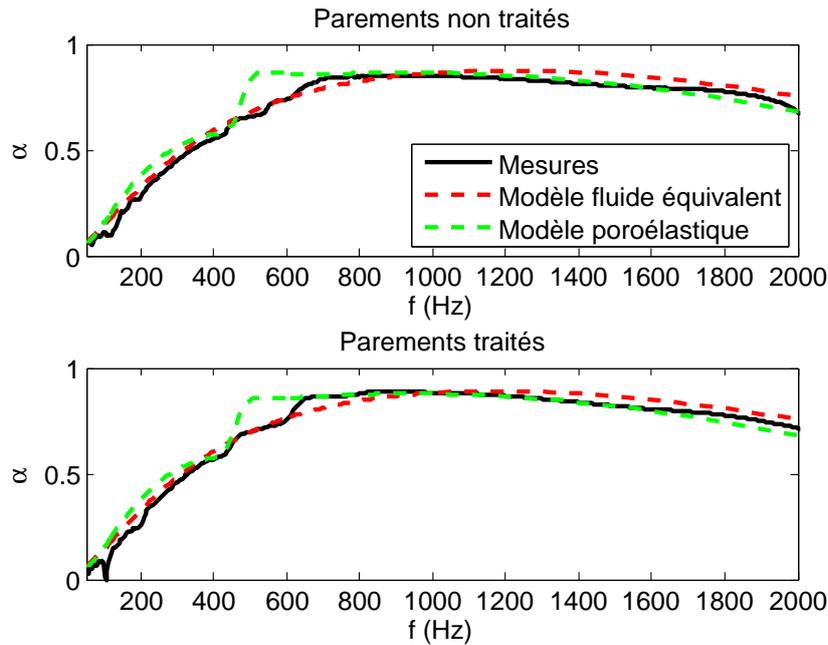


Figure V.25 – Effet de l'ignifugation sur l'absorption acoustique en incidence normale

On constate grâce à ces résultats que le traitement au feu ne détériore pas l'absorption sur la gamme fréquentielle testée. Au contraire, grâce à la légère baisse de la résistivité du parement, l'absorption acoustique du prototype ignifugé est améliorée de 5% entre 600 et 1600 Hz .

3.3 Pistes envisagées pour l'optimisation du matériau

A partir de ces performances "initiales" du prototype ignifugé, et afin d'atteindre des performances optimisées en absorption acoustique, deux pistes ont été envisagées.

3.3.1 Effet de l'épaisseur d'isolant

En premier lieu, nous avons étudié l'intérêt de faire varier l'épaisseur de l'isolant dans une gamme allant de 2 à 10 cm . Des modélisations ont donc été réalisées avec le modèle poroélastique en champ diffus, en utilisant les paramètres du Tableau V.30.

Les résultats présentés Figure V.26 (a) montrent qu'une augmentation de l'épaisseur de l'isolant entraîne un décalage de l'absorption acoustique du multicouche vers les basses fré-

V.3 Application à la conception de panneaux acoustiques bio-sourcés pour une galerie commerciale

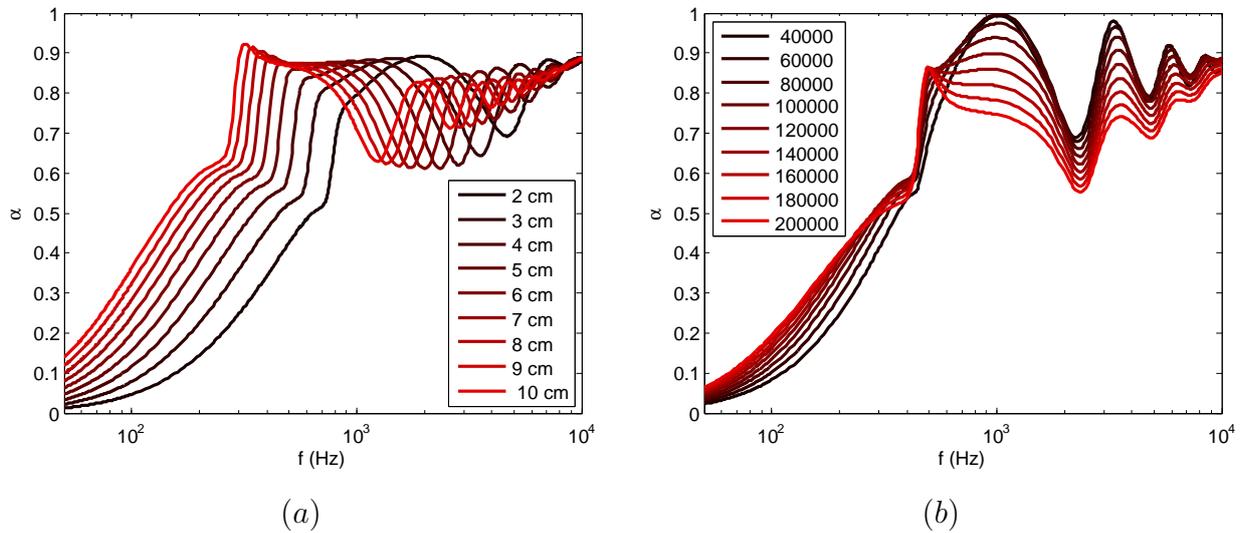


Figure V.26 – Effet de l'épaisseur de l'isolant (a) et de la résistivité des parements (b) sur l'absorption acoustique en champ diffus du tricouche ignifugé (Les résistivités de la légende sont exprimées en $N.m^{-4}.s$)

quences. A partir d'une épaisseur de 7 cm, avec les caractéristiques retenues, le coefficient α_w devient supérieur ou égal à 0,75.

3.3.2 Effet de la résistivité des parements

Au niveau des parements, différents moyens d'optimisation sont également possibles. De tels panneaux sont souvent perforés afin de piéger les ondes acoustiques aux basses fréquences. Dans le cas présent, cela n'est pas réalisable, car l'isolant n'est pas prévu pour résister au feu et serait localement apparent. Le levier d'action principal lié aux parements est donc de faire évoluer la résistivité de ces couches. Des simulations faisant varier la résistivité des parements de 40 000 à 200 000 $N.m^{-4}.s$ montrent cet effet sur la Figure V.26 (b).

Augmenter la résistivité des parements permet d'après ces résultats de gagner en absorption aux basses fréquences ($f \leq 600 Hz$), mais dégrade les performances pour les fréquences plus importantes. Dans la configuration présentée, pour une épaisseur d'isolant de 5 cm, une résistivité située autour de 100 000 $N.m^{-4}.s$ conduit à une absorption α_w de 0,75. Enfin, en partant sur une épaisseur de 7 cm d'isolant, l'absorption α_w vaut 0,8 pour des résistivités de parement allant de 40 000 à 120 000 $N.m^{-4}.s$.

4 Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer l'intérêt de la modélisation des propriétés acoustiques des laines végétales, chènevottes et bétons de chanvre pour deux catégories d'applications.

D'une part, la modélisation ouvre la voie de l'optimisation des propriétés acoustiques de ces matériaux. Le contrôle de la formulation du matériau et des propriétés des constituants peut ainsi conduire à des propriétés acoustiques de haut niveau, avec une absorption α_w allant jusqu'à 0,95 et un indice d'affaiblissement dépassant 50 *dB* pour une épaisseur de 30 *cm*. L'absorption acoustique peut de plus être optimisée en utilisant une géométrie irrégulière entraînant des phénomènes de localisation. Ce mode d'optimisation peut entraîner une augmentation de l'absorption acoustique des bétons de chanvre supérieure à 50%, à volume de matériau égal. Nos travaux ont montré que, pour sa part, l'indice d'affaiblissement peut être amélioré par l'ajout d'enduits, qui, pour une épaisseur de seulement 2 *cm*, amènent un gain de l'ordre de 10 *dB*.

L'optimisation par structure multicouche a par ailleurs fait l'objet d'une application grandeur nature pour les laines végétales. Nos travaux ont contribué à concevoir un panneau chanvre-lin acoustique destiné au faux-plafond d'une galerie commerciale, relevant le défi de combiner à la fois résistance en flexion, résistance au feu (classement M1) et absorption acoustique.

D'autre part, la modélisation peut aussi être exploitée à des fins de contrôle de qualité de la chènevotte. Nous appuyant sur la caractérisation acoustique de chènevottes tracées entre 2009 et 2011 par la FNPC, nous avons analysé les effets des paramètres de culture et des paramètres d'environnement sur les caractéristiques des particules. Nos résultats montrent que le rouissage, les dates de semis et de récolte et la météo ont les effets les plus significatifs, se répercutant à la fois sur les caractéristiques des particules, et sur les paramètres et propriétés acoustiques des chènevottes.

Les applications présentées n'ont pu être explorées qu'à travers l'étude d'un nombre limité d'expérimentations. Nos résultats doivent être complétés par certains approfondissements, notamment en confrontant le contrôle de qualité acoustique à une méthode par imagerie 3D.

Conclusion générale et perspectives

Contributions de ce travail de thèse

Nous nous sommes intéressés, durant cette thèse, aux propriétés acoustiques de matériaux du bâtiment à base de fibres et particules végétales. Ces matériaux sont caractérisés par une microstructure poreuse multi-échelle à l'origine de propriétés acoustiques de haut niveau, mais dont le comportement n'avait, jusqu'à maintenant, jamais été expliqué.

Nos travaux se sont déroulés en trois phases : une phase d'expérimentation, une phase de modélisation et une phase d'application du modèle à des fins d'optimisation et de caractérisation inverse. Durant ces phases, nous nous sommes focalisés sur les propriétés de laines végétales, chènevottes et bétons de chanvre.

Les résultats expérimentaux ont, dans un premier temps, mis en évidence une gamme de propriétés acoustiques très étendue, résultant à la fois de la variabilité intrinsèque aux constituants et des leviers d'action mobilisables lors de la mise en œuvre. Les chènevottes et les laines végétales sont caractérisées par des porosités supérieures à 80%, qui leur confèrent une absorption acoustique élevée. Les propriétés des bétons de chanvre sont plus modérées en absorption, mais significativement meilleures en isolation, la concentration en liant gouvernant la résistivité de ces matériaux et les propriétés qui en découlent.

La phase de modélisation a été déclinée en deux étapes dans le but d'établir des relations entre paramètres de base du matériau et propriétés acoustiques macroscopiques. Cette thèse a permis de montrer que du point de vue de leurs comportements multi-échelles, les laines, chènevottes et bétons de chanvre ont une caractéristique commune : leurs propriétés acoustiques peuvent être approchées par celles de leur réseau de pores respectivement interfibres et interparticules. Le lien entre paramètres acoustiques et propriétés acoustiques a donc pu être établi en s'appuyant sur des modèles "simple porosité" adaptés. Il a ainsi été montré que les laines végétales peuvent être modélisées de façon satisfaisante à l'aide de modèles empiriques repo-

sant uniquement sur leur résistivité, tandis que les chènevottes et bétons de chanvre requièrent la connaissance de quatre paramètres : porosité, résistivité, tortuosité et longueur visqueuse. L'évolution de ces paramètres acoustiques a ensuite été investiguée. Dans le cas des laines, la résistivité peut être prédite à condition de connaître le diamètre et la densité de squelette des fibres, ainsi que la densité apparente du matériau. Pour la chènevotte, nous avons montré que les paramètres acoustiques se démarquent des tendances de matériaux granulaires sphériques, notamment à cause de la forte anisotropie des particules. Quatre paramètres de base, dont un facteur de forme empirique, permettent toutefois de prendre ces effets en considération. Les relations mises en évidence pour la chènevotte ont été étendues au cas du béton de chanvre, mais se sont avérées moins pertinentes pour des concentrations importantes en liant ($L/C \geq 2$).

Cette modélisation a été exploitée dans un premier temps afin d'explorer trois leviers d'optimisation. Nous avons montré que le contrôle des paramètres de base peut permettre d'atteindre une absorption α_w de 0,95 et un indice d'affaiblissement R_w de 50 dB pour un béton de chanvre de 30 cm d'épaisseur. Peuvent s'ajouter à cela un gain en absorption dû aux phénomènes de localisation et un gain en indice d'affaiblissement et/ou absorption dû à une structure multicouche. Ces modes d'optimisation sont également adaptés aux laines végétales pour lesquelles une application dans une galerie commerciale a pu voir le jour dans le cadre d'un partenariat avec le groupe industriel Schiever. Dans un second temps, en nous appuyant sur les résultats de la modélisation, nous avons réalisé un contrôle de qualité des chènevottes en fonction des paramètres de culture et d'environnement du chanvre. Des mesures acoustiques ont ainsi dévoilé des effets marqués du rouissage, des dates de semis et de récolte, et de la météo sur les caractéristiques des particules et les propriétés acoustiques des chènevottes.

Perspectives de recherche

Ce travail de thèse nous a permis de répondre à un certain nombre de questions vis-à-vis du comportement acoustique des matériaux à base de fibres et particules végétales, mais en a soulevé de nouvelles, offrant ainsi plusieurs perspectives de recherche :

- Il s'est avéré, durant la phase expérimentale, qu'un excès d'eau a un effet significatif sur les propriétés acoustiques des bétons de chanvre. Le contrôle de ce paramètre pourrait constituer un levier d'action supplémentaire, il serait donc intéressant de connaître son effet sur la microstructure du liant et le comportement multi-échelle du matériau.
- Les propriétés et paramètres acoustiques relatifs aux bétons de chanvre fortement concen-

trés en liant sont caractérisés dans cette thèse par des écarts-types particulièrement élevés, ce qui limite leur analyse et leur modélisation. Ceci peut en partie être attribué à la forte hétérogénéité du réseau poreux dans ce cas de figure. Pour contourner cette difficulté, une solution serait de caractériser des échantillons de plus grande dimension, plus représentatifs, grâce à des méthodes en champ libre.

- Certaines de nos interprétations ont été limitées par notre méconnaissance de la microstructure des particules de chanvre. Une confrontation des résultats de la caractérisation inverse et d'une technique d'imagerie 3D permettrait dans ce contexte de valider certaines de nos hypothèses et de donner plus de crédit au contrôle de qualité acoustique.
- Le lien entre les paramètres de base des particules de chanvre et les paramètres acoustiques d'une chènevotte est en grande partie subordonné à l'anisotropie des particules. Le parti pris de cette thèse a été de se concentrer sur le comportement des chènevottes et bétons de chanvre dans le cas où les particules sont orientées perpendiculairement au flux acoustique, ce qui a permis de dégager de nombreux résultats intéressants. A présent, il pourrait être intéressant d'étudier de façon systématique, en s'appuyant sur une approche micro-macro, l'effet de l'anisotropie sur les paramètres et propriétés acoustiques en fonction de la direction du flux acoustique.
- Au niveau de l'optimisation, les phénomènes de localisation peuvent jouer un rôle majeur pour les matériaux comme le béton de chanvre. Toutefois, leur connaissance reste à l'heure actuelle très limitée et ils méritent d'être investigués davantage.

L'ensemble des perspectives soulevées constituent à la fois des challenges expérimentaux et théoriques pour les personnes qui souhaiteront poursuivre ces travaux de thèse et faire évoluer les propriétés acoustiques des matériaux à base de fibres et particules végétales, contribuant ainsi à leur donner la place qu'ils méritent dans le domaine du bâtiment.

Références bibliographiques

- [afs 2004] *Impacts sanitaires du bruit. Etat des lieux. Indicateurs bruit-santé*. Rapport technique, Afsse, 2004.
- [Allard & Atalla 2009] J-F. Allard et N. Atalla. *Propagation of sound in porous media : Modelling sound absorbing materials*, second edition. Wiley, 2009.
- [Allard & Champoux 1992] J-F. Allard et Y. Champoux. *New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91 (6), p. 3346–3353, 1992.
- [Allard *et al.* 1990] J-F. Allard, C. Depollier, J. Nicolas, W. Lauriks et A. Cops. *Propriétés acoustiques des matériaux poreux saturés d'air et théorie de Biot*. *J. Acoustique*, vol. 3, p. 28–30, 1990.
- [Allard *et al.* 1998] J-F. Allard, M. Henry, J. Tizianel, L. Kelders et W. Lauriks. *Sound propagation in air-saturated random packings of beads*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104 (4), p. 2004–2007, 1998.
- [Amri 2012] M. Amri. *Optimisation des performances acoustiques de laines d'origines naturelles, Travail de Fin d'Études*. ENTPE, 69 p., 2012.
- [Arandigoyen *et al.* 2005] M. Arandigoyen, J-L. Perez Bernal, M-A. Bello Lopez et J-I. Alvarez. *Lime-pastes with different kneading water : Pore structure and capillary porosity*. *Applied Surface Science*, vol. 252, p. 1449–1459, 2005.
- [Arlaud & Desarnaulds 2005] B. Arlaud et V. Desarnaulds. *Caractérisation acoustique des matériaux dits de développement durable*. In *Journée SSA*, 2005.
- [Arnaud & Cerezo 2001] L. Arnaud et V. Cerezo. *Qualification physique des matériaux de construction à base de chanvre - Rapport final - Programme de juin 1998 à août 2001*. Contrat de recherche CNRS 071462, 96 p., 2001.
- [Arnaud & Gourlay 2011] L. Arnaud et E. Gourlay. *Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes*. *Construction and Building Materials*, vol. 28, p. 50–56, 2011.

- [Arnaud *et al.* 2011] L. Arnaud, P. Glé et E. Gourdon. *Rapport des travaux réalisés pour le groupe Schiever*. Contrat de recherche CNRS, 80 p., 2011.
- [Asdrubali 2011] F. Asdrubali. *Green and sustainable porous materials for noise control in buildings : a state of the art*. In Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials, 2011.
- [Atalla & Sgard 2007] N. Atalla et F. Sgard. *Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models*. Journal of Sound and Vibration, vol. 303, p. 195–208, 2007.
- [Atalla *et al.* 2001] N. Atalla, R. Panneton, F. Sgard et X. Olny. *Acoustic absorption of macro-perforated porous materials*. Journal of Sound and Vibration, vol. 243, no. 4, p. 659–678, 2001.
- [Attenborough 1987] K. Attenborough. *On the acoustic slow wave in air-filled granular media*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 81, no. 1, p. 93–102, 1987.
- [Attenborough 1993] K. Attenborough. *Models for the acoustical properties of air-saturated granular media*. Acta Acustica, vol. 1, p. 213–226, 1993.
- [Becot *et al.* 2011] F-X. Becot, L. Jaouen et F. Chevillotte. Alphacell. Matelys - Acoustique & Vibrations, 2011.
- [Bedeau *et al.* 2010] L. Bedeau, J. Piquandet, S. Duhautbois et E. Jönsson. *Les français et les nuisances sonores. Principaux résultats - Mai 2010*. Rapport technique, MEEDM, 2010.
- [Benkreira *et al.* 2011] H. Benkreira, A. Khan et K-V. Horoshenkov. *Sustainable Acoustic and Thermal Insulation Materials from Elastomeric Waste Residues*. Chemical Engineering Science, vol. 66, p. 4157–4171, 2011.
- [Beranek 1942] L. Beranek. *Acoustic impedance of porous materials*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 13, p. 248–260, 1942.
- [Bevan & Woolley 2008] R. Bevan et T. Woolley. Hemp lime construction, a guide to building with hemp lime composites. IHS BRE Press, 2008.
- [Bies & Hansen 1980] D-A. Bies et C-H. Hansen. *Flow resistance information for acoustical design*. Applied Acoustics, vol. 13, p. 357–391, 1980.
- [Biot 1956a] M-A. Biot. *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I Low-frequency range*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 28, p. 168–178, 1956.
- [Biot 1956b] M-A. Biot. *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II High-frequency range*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 28, p. 179–191, 1956.
- [Boeglin & Veuillet 2005] N. Boeglin et D. Veuillet. *Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)*. Rapport technique, ADEME, 2005.
- [Bolton *et al.* 1996] J-S. Bolton, N m. Shiau et Y-J. Kang. *Transmission through multi-panel structure lined with elastic porous materials*. Journal of Sound and Vibration, vol. 191(3), p. 317–347, 1996.

- [Boulloc 2006] P. Boulloc. Le chanvre industriel : production et utilisations. Numéro ISBN 2-85557-130-8. Editions France Agricole, 2006.
- [Boutin & Geindreau 2008] C. Boutin et C. Geindreau. *Estimates and bounds of dynamic permeability of granular media*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 124, no. 6, p. 3576–3593, 2008.
- [Boutin & Geindreau 2010] C. Boutin et C. Geindreau. *Periodic homogenization and consistent estimates of transport parameters through sphere and polyhedron packings in the whole porosity range*. Physical Review E, vol. 82-036313, 18 p., 2010.
- [Boutin et al. 2005] M-P. Boutin, C. Flamin, S. Quinton et G. Gosse. *Analyse du cycle de vie : Compounds thermoplastiques chargés fibres de chanvre et Mur en béton de chanvre banché sur ossature bois*. Rapport d'Étude INRA Lille, Réf. MAP 04 B1 0501., 32 p., 2005.
- [Brekhovskikh 1960] L-M. Brekhovskikh. Waves in layered media. Academic Press, New York, 1960.
- [Brouard et al. 1995] B. Brouard, D. Lafarge et J-F. Allard. *A general method of modelling sound propagation in layered media*. Journal of Sound and Vibration, vol. 183(1), p. 129–142, 1995.
- [Brown 1980] R. Brown. *Connection between formation factor of electrical resistivity and fluid solid coupling factor in Biot's equation for acoustic waves in fluid-filled porous media*. Geophysics, vol. 45, p. 1269–1275, 1980.
- [Bruneau 1998] M. Bruneau. Manuel d'acoustique fondamentale. Hermes, 1998.
- [Bütschi et al. 2004] P-Y. Bütschi, C. Deschenaux, B. Miao et N-K. Srivastava. *Caractérisation d'une maçonnerie composée d'éléments en aggloméré de chanvre*. Revue canadienne de génie civil, vol. 31 (3), p. 526–529, 2004.
- [Buczek & Geldart 1986] B. Buczek et D. Geldart. *Determination of the Density of Porous Particles using Very Fine Dense Powders*. Powder Technology, vol. 45, p. 173–176, 1986.
- [Burd 1984] A-N. Burd. *Acoustic applications of wood wool cement slabs*. Applied Acoustics, vol. 17, p. 439–451, 1984.
- [Capon & Khelifi 2012] G. Capon et S. Khelifi. *Traitement au feu de panneaux isolants acoustiques en fibres de chanvre*. In Constructions et bioressources 2012, Sens, 2012.
- [Castagnède et al. 2000] B. Castagnède, A. Aknine, B. Brouard et V. Tarnow. *Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials*. Applied Acoustics, vol. 61, p. 173–182, 2000.
- [CenC] CenC. Construire en chanvre. <http://www.construction-chanvre.asso.fr/>.
- [Cerezo 2005] V. Cerezo. *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*. Thèse de doctorat, Ecole doctorale MEGA, Lyon, 2005.
- [Ceyte 2008] I. Ceyte. *Béton de chanvre, définition des caractéristiques mécaniques de la chènevotte, Travail de Fin d'Études*. ENTPE, 155 p., 2008.

- [Champoux & Allard 1991] Y. Champoux et J-F. Allard. *Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media*. Applied Physics, vol. 70, p. 1975–1979, 1991.
- [Champoux & Stinson 1992] Y. Champoux et M-R. Stinson. *On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 92 (2), no. 2, p. 1120–1131, 1992.
- [Champoux *et al.* 1991] Y. Champoux, M-R. Stinson et G-A. Daigle. *Air-based system for the measurement of porosity*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 89(2), p. 910–916, 1991.
- [Chevillotte *et al.* 2010] F. Chevillotte, C. Perrot et R. Panneton. *Microstructure based model for sound absorption predictions of perforated closed-cell metallic foams*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 128 (4), p. 1766–1776, 2010.
- [Collet 2004] F. Collet. *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*. Thèse de doctorat, INSA Rennes, 2004.
- [Comiti & Renaud 1988] J. Comiti et M. Renaud. *A new model for determining mean structure parameters of fixed beds from pressure drop measurements : Application to beds packed with parallelepipedal particles*. Chemical Engineering Science, vol. 44(7), p. 1539–1545, 1988.
- [Couasnet 2005] Y. Couasnet. Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction. Editions du moniteur, 2005.
- [Debrabant 2010] Y. Debrabant. Phénomène de localisation dans des cavités de mur poreux à géométrie irrégulière. Mémoire de Master, MEGA ENTPE, 2010.
- [Delany & Bazley 1970] M-E. Delany et E-N. Bazley. *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*. Applied Acoustics, vol. 3, p. 105–116, 1970.
- [Desarnaulds *et al.* 2005] V. Desarnaulds, E. Costanzo, A. Carvalho et B. Arlaud. *Sustainability of acoustic materials and acoustic characterization of sustainable materials*. In ICSV 12, Lisbon, Portugal, 2005.
- [Dijckmans & Vermeir 2010] A. Dijckmans et G. Vermeir. *Sound transmission through finite light-weight multilayered structure with thin air layers*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 128(6), p. 3513–3524, 2010.
- [Diquélou 2012] Y. Diquélou. *The impact of hemp shiv on cement setting and hardening : The influence of extracts and study of the interface*. In 13th International inorganic-bonded fiber composites conference IIBCC, Canberra, Australia, 2012.
- [Dunn & Davern 1986] I-P. Dunn et W-A. Davern. *Calculation of acoustic impedance of multilayer absorbers*. Applied Acoustics, vol. 19, p. 321–334, 1986.
- [Elfordy *et al.* 2008] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller et L. Goudet. *Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hemcrete”) manufactured by a projection process*. Construction and Building Materials, vol. 22, p. 2116–2123, 2008.

- [Esnault *et al.* 2010] P. Esnault, Y. Commin et A. Vannini. Les écomatériaux dans l'aménagement et la construction en Ile-De-France. Contribution à leur caractérisation, catalogue et potentialités de développement de filières. 2010.
- [Evrard 2008] A. Evrard. *Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Louvain, 2008.
- [Fahy & Gardonio 2007] F-J. Fahy et P. Gardonio. Sound and structural vibration. Second edition : Radiation, transmission and response. Academic Press, Oxford, 2007.
- [Fellah *et al.* 2003] Z-E-A. Fellah, S. Berger, W. Lauriks, C. Depollier, C. Aristegui et J-Y. Chapelon. *Measuring the porosity and the tortuosity of porous materials via reflected waves at oblique incidence*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 113(5), p. 2424–2433, 2003.
- [Fernlund 1998] J-M-R. Fernlund. *The effect of particle form on sieve analysis : a test by image analysis*. Engineering Geology, vol. 50, p. 111–124, 1998.
- [Ferrero & Sacerdote 1951] M. A. Ferrero et G-G. Sacerdote. *Parameters of sound propagation in granular absorption materials*. Acustica, vol. 1, p. 135–142, 1951.
- [Félix *et al.* 2007] S. Félix, M. Asch, M. Filoche et B. Sapoval. *Localization and damping in irregular acoustic cavities*. Journal of Sound and Vibration, vol. 299, p. 965–976, 2007.
- [Flores 2012] G. Flores. *Optimisation des propriétés acoustiques de matériaux du bâtiment à base de particules végétales, Travail de Fin d'Études*. ENTPE, 138 p., 2012.
- [Folds & Loggins 1977] D. Folds et C-D. Loggins. *Transmission and reflection of ultrasonic waves in layered media*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 62, p. 1102–1109, 1977.
- [Garai & Pompoli 2005] M. Garai et F. Pompoli. *A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications*. Applied Acoustics, vol. 66 (12), p. 1383–1352, 2005.
- [Garcia-Jaldon *et al.* 1998] C. Garcia-Jaldon, D. Dupeyre et M-R. Vignon. *Fibres from semi-retted hemp bundles by steam explosion treatment*. Biomass and Bioenergy, vol. 14 (3), p. 251–260, 1998.
- [Garnier 2000] P. Garnier. Le séchage des matériaux poreux - approche expérimentale et approche théorique par homogénéisation des structures périodiques. Mémoire de Master, MEGA ENTPE, 2000.
- [Ghinet & Atalla 2001] S. Ghinet et N. Atalla. *Sound transmission loss of insulating complex structures*. Canadian Acoustics, vol. 29, p. 26–27, 2001.
- [Glé *et al.* 2011] P. Glé, E. Gourdon et L. Arnaud. *Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity*. Applied Acoustics, vol. 72, p. 249–259, 2011.
- [Glé *et al.* 2012] P. Glé, E. Gourdon et L. Arnaud. *Modelling of the acoustical properties of hemp particles*. Construction and Building Materials, 2012.

- [Glé 2009] P. Glé. Caractérisation acoustique des matériaux du bâtiment à base de particules végétales présentant plusieurs échelles de porosité. Mémoire de Master, MEGA ENTPE, 2009.
- [Gourdon & Seppi 2010] E. Gourdon et M. Seppi. *On the use of porous inclusions to improve the acoustical response of porous materials : Analytical model and experimental verification*. Applied Acoustics, vol. 71, p. 283–298, 2010.
- [Gourlay 2008] E. Gourlay. *Caractérisation de la chènevotte et influence des caractéristiques de la chènevotte sur celles des bétons de chanvre-chaux*. Rapport de Stage MSP, 39 p., 2008.
- [Gourlay 2009] E. Gourlay. De la chènevotte au béton de chanvre, optimisation des propriétés mécaniques et hygrothermiques. Mémoire de Master, MEGA ENTPE, 2009.
- [Goyer 2007] S. Goyer. *Caractérisation des propriétés microstructurales et hydriques des bétons légers*. Master recherche MEGA, Lyon, 110 p., 2007.
- [Grosselin 2011] J-M. Grosselin. *Le développement industriel des filières stratégiques de l'économie verte. La filière "Matériaux bio-sourcés & construction"*. In Premières Assises Constructions & Bioressources, 2011.
- [gt1 2008] *Le Grenelle de l'Environnement - Rapport de synthèse du groupe 1 : Lutter contre les changements climatiques et maîtriser l'énergie*. Rapport technique, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2008.
- [Hébert *et al.* 2009] B. Hébert, B. Sapoval et S. Russ. *Experimental study of a fractal acoustical cavity*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 105 (3), p. 1567–1574, 2009.
- [Horoshenkov *et al.* 2007] K-V. Horoshenkov, K. Attenborough et S-N. Chandler-Wilde. *Padé approximants for the acoustical properties of rigid frame porous media with pore size distributions*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 104, no. 3, p. 1198–1209, 2007.
- [Horoshenkov 1996] K-V. Horoshenkov. *Control of traffic noise in city streets*. Thèse de doctorat, University of Bradford, 1996.
- [Horoshenkov 2006] K-V. Horoshenkov. *Characterization of acoustic porous materials*. Proceedings of the Institute of Acoustics, 24 p., 2006.
- [Horrocks & Anand 2000] A-R. Horrocks et S-C. Anand. Handbook of technical textiles. Woodhead publishing limited, 2000.
- [Hwang & Choi 2006] S-I. Hwang et S-I. Choi. *Use of a lognormal distribution model for estimating soil water retention curves from particle size distribution data*. Journal of Hydrology, vol. 323, p. 325–334, 2006.
- [Iwase *et al.* 1998] T. Iwase, Y. Izumi et R. Kawabata. *A new measuring method for sound propagation constant by using sound tube without any air spaces back of a test material*. Internoise 98, Christchurch, New Zealand, 4 p., 1998.

- [Jaouen & Becot 2010] L. Jaouen et F-X. Becot. *Indirect acoustical characterization of foams with two scales of porosity, case of micro-scale characteristic length of the order of 1 micron*. In ICSV 17, Cairo, Egypt, 2010.
- [Jaouen 2003] L. Jaouen. *Contribution à la caractérisation mécanique de matériaux poro-visco-élastiques en vibro-acoustique*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 2003.
- [Jaouen 2011] L. Jaouen. *Characterization of acoustic and elastic parameters of porous media*. In SAPEM, 2011.
- [Johnson et al. 1987] D-L. Johnson, J. Koplik et R. Dashen. *Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media*. Fluid Mechanics, vol. 176, p. 379–402, 1987.
- [JOR 1999] *Arrêté du 30 juin 1999 relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation*. Journal officiel de la République Française, 1999.
- [JOR 2003] *Arrêté du 25 avril 2003 relatif à la limitation du bruit dans les établissements d'enseignement*. Journal officiel de la République Française, 2003.
- [Kirchhoff 1868] G. Kirchhoff. *Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung*. Annalen der Physik and Chemie, vol. 134, p. 177–193, 1868.
- [Kubytskyi et al. 2012] V. Kubytskyi, M. Filoche et B. Sapoval. *Increased absorption due to localized resonances*. In Internoise 2012, New-York, 2012.
- [Lafarge et al. 1997] D. Lafarge, P. Lemarinier, J-F. Allard et V. Tarnow. *Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 102, no. 4, p. 1995–2006, 1997.
- [Lafarge 1993] D. Lafarge. *Propagation du son dans les matériaux poreux à structure rigide saturés par un fluide viscothermique*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 1993.
- [Lagarrigue et al. 2012] C. Lagarrigue, O. Dazel, J-P. Groby et V. Tournat. *Parametric study of a metaporous made of solid inclusions embedded in a rigid frame porous material*. In Acoustics 2012, Nantes, France, 6 p., 2012.
- [Latour et al. 1995] L-L. Latour, R-L. Kleinberg, P-P. Mitra et C-H. Sotak. *Pore-size distributions and tortuosity in heterogeneous porous media*. Journal of Magnetic Resonance, Series A, vol. 112, p. 83–91, 1995.
- [Leclaire et al. 1996] P. Leclaire, L. Kelders, W. Lauriks, C. Glorieux et J. Thoen. *Determination of the viscous characteristic length in air-filled porous materials by ultrasonic attenuation measurements*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 99(4), p. 1944–1948, 1996.
- [Leclaire et al. 2003] P. Leclaire, O. Umnova, K-V. Horoshenkov et L. Maillet. *Porosity measurement by comparison of air volumes*. Review of scientific instruments, vol. 74 (3), p. 1366–1370, 2003.
- [Magniont 2010] C. Magniont. *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.

- [Malinouskaya *et al.* 2009] I. Malinouskaya, V-V. Mourzenko, J-F. Thovert et P-M. Adler. *Random packings of spiky particles : Geometry and transport properties*. Physical Review E, vol. 80, 011304, 16 p., 2009.
- [Mechel 1976] F-P. Mechel. *Ausweitung der Absorberformel von Delany und Bazley zu tiefen Frequenzen*. Acustica, vol. 35, p. 210–213, 1976.
- [Miki 1990] Y. Miki. *Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models*. Journal of the Acoustical Society of Japan (E), vol. 11 (1), p. 19–24, 1990.
- [Monnet 1999] H. Monnet. *Caractérisation thermique et mécanique de la laine de chanvre, Travail de Fin d'Études*. ENTPE, 136 p., 1999.
- [Montillet & Coq 2001] A. Montillet et L. Le Coq. *Characteristics of fixed beds packed with anisotropic particles—Use of image analysis*. Powder Technology, vol. 121, no. 2-3, p. 138 – 148, 2001.
- [Mosquera *et al.* 2006] M-J. Mosquera, B. Silva, B. Prieto et E. Ruiz-Herrera. *Addition of cement to lime-based mortars : Effect on pore structure and vapor transport*. Cement and Concrete Research, vol. 36, p. 1635–1642, 2006.
- [Neithalath *et al.* 2004] N. Neithalath, J. Weiss et J. Olek. *Acoustic performance and damping behavior of cellulose-cement composites*. Cement and Concrete Composites, vol. 26, p. 359–370, 2004.
- [Nemec & Levec 2005] D. Nemec et J. Levec. *Flow through packed bed reactors : 1. Single-phase flow*. Chemical Engineering Science, vol. 60, no. 24, p. 6947 – 6957, 2005.
- [Oldham *et al.* 2011] D-J. Oldham, C-A. Egan et R-D. Cookson. *Sustainable acoustic absorbers from the biomass*. Applied Acoustics, vol. 72, p. 350–363, 2011.
- [Olesen & Plackett 1999] P-O. Olesen et D-V. Plackett. *Perspectives on the performance of natural plant fibres*. In Essentials for the Future, 7 p., 1999.
- [Olivieri *et al.* 2006] O. Olivieri, J-S. Bolton et T. Yoo. *Measurement of transmission loss of materials using a standing wave tube*. In Internoise, Honolulu, USA, 2006.
- [Olny & Boutin 2003] X. Olny et C. Boutin. *Acoustic wave propagation in double porosity media*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 114, no. 1, p. 73–89, 2003.
- [Olny & Panneton 2008] X. Olny et R. Panneton. *Acoustical determination of the parameters governing thermal dissipation in porous media*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 123, no. 2, p. 814–824, 2008.
- [Olny 1999] X. Olny. *Absorption acoustique des milieux à simple et double porosité. Modélisation et validation expérimentale*. Thèse de doctorat, Ecole doctorale MEGA, Lyon, 1999.
- [Panneton & Olny 2006] R. Panneton et X. Olny. *Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 119, no. 4, p. 2027–2040, 2006.

- [Panneton 2009] R. Panneton. *Normal incidence sound transmission loss evaluation by upstream surface impedance measurements*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 125(3), p. 1490–1497, 2009.
- [Perrin 2011] Q. Perrin. *Caractérisation de l'indice d'affaiblissement acoustique d'un matériau du bâtiment à base de particules végétales : le béton de chanvre*. Mémoire de Master, MEGA ENTPE, 2011.
- [Perrot *et al.* 2008] C. Perrot, F. Chevillotte et R. Panneton. *Bottom-up approach for microstructure optimization of sound absorbing materials*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 124 (2), p. 940–948, 2008.
- [Perrot 2006] C. Perrot. *Microstructure et Macro-Comportement Acoustique : Approche par reconstruction d'une Cellule Élémentaire Représentative*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke - ENTPE, 2006.
- [Pispola *et al.* 2007] G. Pispola, K-V. Horoshenkov et A. Khan. *Comparison of two modeling approaches for highly heterogeneous porous media*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 121, no. 2, p. 961–966, 2007.
- [Placet *et al.* 2012] V. Placet, F. Trivaudey, O. Cisse, V. Gucheret-Retel et M-L. Boubakar. *Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres : A morphological, structural or ultrastructural effect ?* Composites : Part A, vol. 43, p. 275–287, 2012.
- [Pride *et al.* 1993] S-R. Pride, F-D. Morgan et A-F. Gangi. *Drag forces of porous-medium acoustics*. Physical Review B, vol. 47, p. 4964–4975, 1993.
- [Priour du Plessis & Woudberg 2008] J. Priour du Plessis et S. Woudberg. *Pore-scale derivation of the Ergun equation to enhance its adaptability and generalization*. Chemical Engineering Science, vol. 63, no. 9, p. 2576 – 2586, 2008.
- [Qua 2009] Quantachrome Instruments. *Operation manual for Ultrapycnometer 1000e, Micro-Ultrapycnometer 1000e, Ultrapyc 1200e, Micro-Ultrapyc 1200e ; v 4.02*, 2009.
- [Redon & Bouchareb 2005] E. Redon et A. Bouchareb. *Etude expérimentale de l'absorption acoustique de matériaux à macro-porosité fractale*. In 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes, 2005.
- [Renault 2008] A. Renault. *Caractérisation mécanique dynamique de matériaux poro-visco-élastiques*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, 2008.
- [RP2 2006] RP2C - Commission « Règles Professionnelles Construction Chanvre ». *Règles professionnelles d'exécution de murs en béton de chanvre*, 2006.
- [Salissou & Panneton 2010] Y. Salissou et R. Panneton. *Wideband characterization of the complex wave number and characteristic impedance of sound absorbers*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 128(5), p. 2868–2876, 2010.
- [Samri 2008] D. Samri. *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*. Thèse de doctorat, Ecole doctorale MEGA, Lyon, 2008.

- [Sanchez-Palencia 1980] E. Sanchez-Palencia. *Non-homogeneous media and vibration theory, lecture notes in physics*. Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- [Sapoval *et al.* 1997] B. Sapoval, O. Haerberlé et S. Russ. *Acoustical properties of irregular and fractal cavities*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 102 (4), p. 2014–2019, 1997.
- [Sapoval *et al.* 2008] B. Sapoval, S. Félix et M. Filoche. *Localisation and damping in resonators with complex geometry*. *European Physical Journal Special Topics*, vol. 161, p. 225–232, 2008.
- [Scharnhorst 1983] K-P. Scharnhorst. *Properties of acoustic and electromagnetic transmission coefficients and transfer matrices of multilayered plates*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 74, p. 1883–1886, 1983.
- [Schäfer & Honermeier 2006] T. Schäfer et B. Honermeier. *Effect of sowing date and plant density on the cell morphology of hemp (*Cannabis sativa L.*)*. *Industrial Crops and Products*, vol. 23, p. 88–98, 2006.
- [Seppi 2009] M. Seppi. *Numerical and analytical vibro-acoustic modelling of porous materials : the Cell Method for poroelasticity and the case of inclusions*. Thèse de doctorat, Università di Bologna, 2009.
- [Sgard *et al.* 2005] F-C. Sgard, X. Olny, N. Atalla et F. Castel. *On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials*. *Applied Acoustics*, vol. 66, p. 625–651, 2005.
- [Song & Bolton 2000] B-H. Song et J-S. Bolton. *A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107(3), p. 1131–1152, 2000.
- [Stinson & Champoux 1991] M-R. Stinson et Y. Champoux. *Propagation of sound and the assignment of shape factors in model porous materials having simple pore geometries*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91 (2), no. 2, p. 685–695, 1991.
- [Swift *et al.* 1993] M-J. Swift, P. Bris et K-V. Horoshenkov. *Acoustic absorption in recycled rubber granulate*. *Applied Acoustics*, vol. 57, p. 203–212, 1993.
- [Tarnow 1996a] V. Tarnow. *Airflow resistivity of models of fibrous acoustic materials*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 100(6), p. 3706–3713, 1996.
- [Tarnow 1996b] V. Tarnow. *Compressibility of air in fibrous materials*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99 (5), p. 3010–3017, 1996.
- [Tarnow 1997] V. Tarnow. *Calculation of the dynamic air flow resistivity of fiber materials*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 102 (3), p. 1680–1688, 1997.
- [Tarnow 2005] V. Tarnow. *Dynamic measurements of the elastic constants of glass wool*. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 118 (6), p. 3672–3678, 2005.
- [Umnova *et al.* 2000] O. Umnova, K. Attenborough et K-M. Li. *Cell model calculations of dynamic drag parameters in packings of spheres*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, no. 6, p. 3113–3119, 2000.

- [Umnova *et al.* 2005] O. Umnova, K. Attenborough, H-C. Shin et A. Cummings. *Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials*. Journal of Applied Acoustics, vol. 66, p. 607–624, 2005.
- [Venegas & Umnova 2011] R. Venegas et O. Umnova. *Acoustical properties of double porosity granular materials*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 130 (5), p. 2765–2776, 2011.
- [Vignon *et al.* 1995] M-R. Vignon, C. Garcia-Jaldon et D. Dupeyre. *Steam explosion of woody hemp chènevotte*. Int. J. Biol. Macromol., vol. 17 (6), p. 395–404, 1995.
- [Vigran 2010] T-E. Vigran. *Sound transmission in multilayered structures - Introducing finite structural connections in the transfer matrix method*. Applied Acoustics, vol. 71 (1), p. 39–44, 2010.
- [Voronina & Horoshenkov 2003] N. Voronina et K-V. Horoshenkov. *A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media*. Applied Acoustics, vol. 64, p. 415–432, 2003.
- [Voronina 1994] N. Voronina. *Acoustic properties of fibrous materials*. Applied Acoustics, vol. 42, p. 165–174, 1994.
- [Voronina 1995] N. Voronina. *Empirical Model of Sound Propagation Through a Fibrous Material*. Applied Acoustics, vol. 48 (2), p. 121–132, 1995.
- [Wassilief 1996] C. Wassilief. *Sound absorption of wood-based materials*. Applied Acoustics, vol. 48, p. 339–356, 1996.
- [Wikipedia] Wikipedia. Chanvre. fr.wikipedia.org/wiki/Chanvre.
- [Wu 1988] Q. Wu. *Empirical relations between acoustical properties and flow resistivity of porous plastic open cell foams*. Applied Acoustics, vol. 25, p. 141–148, 1988.
- [Yamamoto & Turgut 1998] T. Yamamoto et A. Turgut. *Acoustic wave propagation through porous media with arbitrary pore size distributions*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 83 (5), p. 1744–1751, 1998.
- [Yang *et al.* 2003] H-S. Yang, D-J. Kim et H-J. Kim. *Rice straw wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials*. Bioresource Technology, vol. 86, p. 117–121, 2003.
- [Yang *et al.* 2004] H-S. Yang, D-J. Kim, Y-K. Lee, H-J. Kim, J-Y. Jeon et C-W. Kang. *Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials*. Bioresource Technology, vol. 95, p. 61–65, 2004.
- [Zwikker & Kosten 1949] C. Zwikker et C-W. Kosten. *Sound Absorbing Materials*. Elsevier, New-York, 174 p., 1949.
- [Zwikker *et al.* 1941] C. Zwikker, J. Van Den Eijk et C-W. Kosten. *Absorption of sound by porous materials. Part III*. Physica, vol. VIII, p. 1094–1101, 1941.

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'ETAT

NOM : GLÉ

DATE de SOUTENANCE : 15/02/2013

Prénoms : Philippe, Jean-François

TITRE : Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales : Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2013-ENTPE-0001

Ecole doctorale : MEGA

Spécialité : Acoustique

Cote B.I.U. - /

et bis

CLASSE :

RESUMÉ :

Dans le bâtiment, de nouvelles réglementations thermiques sont progressivement mises en place afin de répondre à des problématiques d'économie d'énergie, faisant apparaître de nouveaux types de matériaux. Cela ne doit toutefois pas se faire au détriment de leurs propriétés acoustiques. Les matériaux à base de particules et fibres végétales, tels que le béton de chanvre et les laines de chanvre/lin, sont caractérisés par des propriétés multifonctionnelles de haut niveau et constituent des solutions parfaitement adaptées à ce contexte.

L'objectif de ce travail de thèse est d'explorer les propriétés acoustiques de ces matériaux, et plus particulièrement de mettre en évidence la contribution de leurs différentes échelles de porosité à la dissipation acoustique. A cette fin, les propriétés physiques et acoustiques de laines végétales, de chènevottes et de bétons de chanvre ont été caractérisées, et analysées en s'appuyant sur la théorie des matériaux poreux à simple et multiple échelle, développée dans la littérature.

La campagne expérimentale a permis de souligner les performances acoustiques élevées de ces matériaux, ces dernières peuvent être contrôlées par une série de leviers d'action relatifs au choix de leurs constituants et de leur mode de mise en œuvre. Il est de plus montré qu'étant donné le gradient de perméabilité existant entre les micropores (pores intrafibres, intraparticules et intraliants) et les mésopores (pores interfibres et interparticules), seuls les mésopores participent à la dissipation acoustique. Dans ce cadre, des modèles semi-phénoménologiques sont utilisés afin de prédire les propriétés acoustiques à partir des paramètres de base de chaque constituant.

Cette modélisation est finalement exploitée à travers une optimisation des propriétés acoustiques de ces matériaux à partir de leur formulation, leur structure multicouche et leur géométrie de surface. Des méthodes de caractérisation des matériaux par mesures acoustiques sont également proposées afin de réaliser un contrôle de qualité des granulats de chanvre.

MOTS-CLÉS :

Chènevotte, Béton de Chanvre, Particules Végétales, Matériaux Poreux, Propriétés Acoustiques, Multi-échelle, Multifonctionnel

Laboratoire de recherche : Laboratoire Génie Civil et Bâtiment

Directeur de thèse: Laurent ARNAUD

Codirection : Emmanuel GOURDON

Président de jury :

Composition du jury :

Christophe LANOS

Professeur

Rapporteur

Philippe LECLAIRE

Professeur

Rapporteur

Francesco ASDRUBALI

Professeur

Examineur

Jean-Louis GUYADER

Professeur

Examineur

Kirill-V. HOROSHENKOV

Professeur

Examineur

Laurent ARNAUD

Docteur HDR

Directeur de thèse

Emmanuel GOURDON

Docteur

Co-directeur de thèse

ANNEXES de THÈSE

Thèse préparée au

Laboratoire Génie Civil et Bâtiment
Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État

Présentée devant

l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État
Ecole Doctorale: Mécanique, Energétique, Génie civil et Acoustique
Spécialité Acoustique

Par

Philippe GLÉ

Pour l'obtention du grade de Docteur

**Acoustique des Matériaux du Bâtiment
à base de
Fibres et Particules Végétales**

-

Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation

Soutenue le 15 Février 2013

Devant la Commission d'Examen

JURY

M. Christophe LANOS	Professeur	Rapporteur
M. Philippe LECLAIRE	Professeur	Rapporteur
M. Francesco ASDRUBALI	Professeur	Examinateur
M. Jean-Louis GUYADER	Professeur	Examinateur
M. Kirill-V. HOROSHENKOV	Professeur	Examinateur
M. Laurent ARNAUD	Docteur HDR	Directeur de thèse
M. Emmanuel GOURDON	Docteur	Co-directeur de thèse

Annexe A : Métrologie

1 Caractérisation des paramètres acoustiques des matériaux poreux

1.1 Porosité

1.1.1 Caractérisation directe

Mesure de porosité traditionnelle La méthode traditionnellement utilisée à l'ENTPE afin de mesurer la porosité est celle basée sur les travaux de [Beranek 1942], et optimisée par [Champoux *et al.* 1991], qui permet de mesurer la porosité ouverte en imposant un différentiel de pression de part et d'autre de l'échantillon. La mesure de la porosité ouverte est basée sur la loi de Boyle-Mariotte qui stipule que, s'il n'y a pas de changement de température durant le temps de l'observation, le produit du volume V et de la pression P d'un gaz réel est constant.

On place un échantillon de volume connu V_{total} dont on recherche la porosité, dans une enceinte hermétique et calorifugée, qui permet de garantir des conditions isothermes. Le volume de l'enceinte est appelé V_0 , et un piston fixé sur son côté supérieur permet de réduire ce volume d'une valeur ΔV connue, ce qui entraîne une variation de pression ΔP mesurée à l'aide d'un capteur différentiel de pression. On a alors d'après Boyle-Mariotte :

$$P_0 V_0 = (P_0 + \Delta P)(V_0 - \Delta V) \quad (1)$$

On effectue alors deux mesures :

- Une mesure de calibration sans échantillon, qui permet de déterminer le volume V_0 de l'enceinte, par la relation suivante :

$$V_0 = \Delta V_1 \frac{\Delta P_1 + P_0}{\Delta P_1} \quad (2)$$

- Une seconde mesure avec échantillon qui permet d'évaluer le volume $V_{squelette}$ du squelette du matériau :

$$V_{squelette} = V_0 - \Delta V_2 \frac{\Delta P_2 + P_0}{\Delta P_2} \quad (3)$$

On en déduit alors la porosité ouverte ϕ grâce à la relation :

$$\phi = \frac{V_{total} - V_{squelette}}{V_{total}} \quad (4)$$

Le schéma du dispositif décrit par [Champoux *et al.* 1991] est donné Figure A.1.

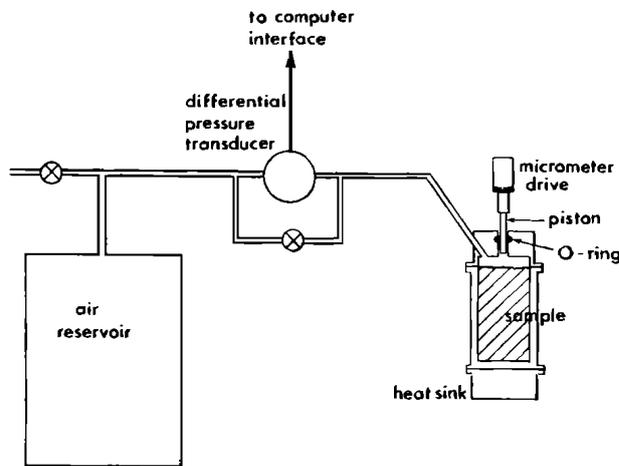


Figure A.1 – Schéma du dispositif permettant de mesurer la porosité [Champoux *et al.* 1991]

Mesure de porosité par comparaison de volumes d'air Un second dispositif plus récent a également été utilisé. Le dispositif de mesure utilisé est une amélioration de celui présenté par [Leclaire *et al.* 2003], qui a été fabriqué à l'université de Bradford. L'originalité de ce dispositif, qui est présenté Figure A.2, est de réaliser une comparaison directe des volumes d'air de deux porte-échantillons placés dans les mêmes conditions de température.

La mesure est réalisée en deux étapes, il s'agit tout d'abord d'équilibrer les volumes des deux porte-échantillons. Dans un second temps, on place l'échantillon de volume connu dans l'enceinte de droite puis on mesure le volume de son squelette en équilibrant le volume d'air des deux enceintes à l'aide de seringues graduées. Les volumes d'air sont comparés en appliquant une dépression via un tube en "U" vertical connecté aux deux porte-échantillons et rempli d'eau.

Ce dispositif permet d'effectuer des mesures plus rapides de la porosité, mais son inconvénient est que les échantillons utilisés sont de plus faibles dimensions, et par conséquent moins représentatifs du matériau étudié.

1 Caractérisation des paramètres acoustiques des matériaux poreux

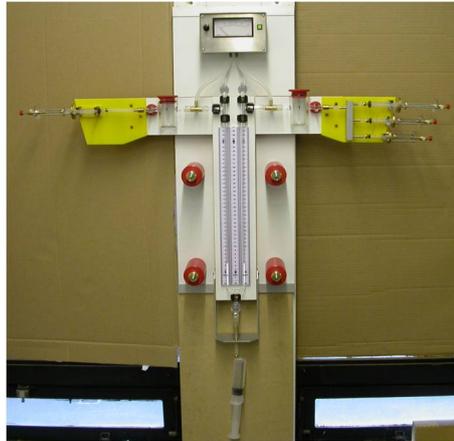


Figure A.2 – Photographie du dispositif de mesure de porosité par comparaison de volumes d'air

Pycnométrie à azote Enfin, on a eu recours à un troisième dispositif de mesure de la porosité. Il s'agit d'un pycnomètre à azote industriel, le modèle ULTRAPYC 1200e de marque Quantachrome® présenté Figure A.3.

Le principe de la mesure est exactement le même que dans le cas de la première méthode. Il s'en différencie toutefois par le fluide utilisé, de l'azote, ce qui garantit que le gaz est sec et non réactif avec les échantillons testés. La porosité accessible à l'azote est identique à celle de l'air, ce dernier étant composé de près de 80% d'azote, et ayant des particules de dimension très proche (oxygène et azote ont des numéros atomiques voisins).

Ce dispositif est par ailleurs équipé de capteurs très sensibles permettant de limiter l'erreur sur la détermination des volumes à moins de 0,03%.



Figure A.3 – Photographie du pycnomètre à azote

1.1.2 Caractérisation indirecte

Les mesures de porosité classiques permettent de caractériser la porosité accessible à l'air. Cependant, dans le cas de la chènevotte ou du béton de chanvre, le comportement multi-échelle repose essentiellement sur la porosité interparticule. Dans ce cas, des évaluations indirectes de la porosité s'imposent.

La porosité peut être estimée, soit à partir des limites asymptotiques basses ou hautes fréquences du module d'incompressibilité dynamique, soit à partir de la limite basse fréquence de l'impédance de surface. Les relations sont données aux Equations 5 à 7.

$$\phi = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{P_0}{\Re(K)} \quad (5)$$

$$\phi = \lim_{\omega \rightarrow +\infty} \frac{\gamma P_0}{\Re(K)} \quad (6)$$

$$\phi = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{P_0}{e\omega\Im(Zs)} \quad (7)$$

Ces méthodes, à la fois accessibles et rapides, peuvent toutefois conduire à des estimations peu précises de la porosité.

1.2 Résistivité

1.2.1 Caractérisation directe

La mesure de la résistivité se fait par application d'un débit d'air Q d'un côté du matériau à caractériser de surface S et d'épaisseur e , et par mesure de la différence de pression ΔP existant entre les deux côtés de l'échantillon. La résistivité σ vaut alors :

$$\sigma = \frac{S \cdot \Delta P}{Q \cdot e} \quad (8)$$

Le dispositif est schématisé Figure A.4.

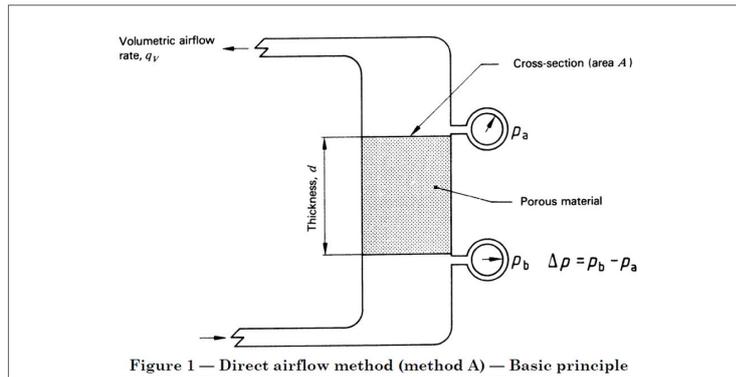


Figure A.4 – Schéma du dispositif de mesure de la résistivité donnée dans la norme ISO9053

1.2.2 Caractérisation indirecte

La résistivité peut également être caractérisée indirectement en tube de Kundt dans les mêmes conditions que l'absorption et l'indice d'affaiblissement acoustique en incidence normale. Cette méthode de caractérisation a été utilisée dans la thèse, dans le cas où l'on souhaitait éviter la manipulation des échantillons, principalement pour les chènevottes et les bétons de chanvre.

1 Caractérisation des paramètres acoustiques des matériaux poreux

Analytiquement, d'après les relations du modèle de Johnson *et al* [Johnson *et al.* 1987] Equation 10, on peut calculer la valeur de la résistivité connaissant préalablement la porosité ϕ et la tortuosité α_∞ [Panneton & Oly 2006].

$$\sigma = \omega \sqrt{\Im(\rho)^2 - \left(\Re(\rho) - \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} \right)^2} \quad (9)$$

On remarque dans cette équation que σ est uniquement fonction de deux grandeurs : ρ et le ratio $\frac{\alpha_\infty}{\phi}$.

Pour rappel, l'équation de la densité dynamique équivalente est définie de façon analytique par Johnson *et al* :

$$\rho(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[1 - \frac{j\sigma\phi}{\omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + j \frac{4\alpha_\infty^2 \mu \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right] \quad (10)$$

Qui se met sous la forme :

$$\rho(\omega) = \frac{\sigma}{j\omega} \left[\frac{j\omega}{\omega_v} + \sqrt{1 + \frac{jM\omega}{2\omega_v}} \right] \quad (11)$$

Avec $M = \frac{8\alpha_\infty \mu}{\phi \sigma \Lambda^2}$ et $\omega_v = \frac{\sigma \phi}{\rho_0 \alpha_\infty}$.

Cette forme présente l'avantage de mettre en évidence les limites asymptotiques du modèle. En effet, on voit clairement apparaître la limite hautes fréquences de la partie réelle : $\rho_0 \alpha_\infty \phi$, et la limite basses fréquences de la partie imaginaire $-\frac{\sigma}{\omega}$.

C'est justement cette limite basses fréquences qui permet, lorsque l'on ne connaît pas la tortuosité, une estimation de la résistivité. Cette estimation est valable pour des fréquences suffisamment basses par rapport à la fréquence caractéristique visqueuse ω_v et par rapport à la fréquence $2\omega_v/M$. On obtient alors directement l'estimation grâce à la valeur limite suivante :

$$\sigma = \lim_{\omega \rightarrow 0} -\omega \Im(\rho) \quad (12)$$

1.3 Tortuosité

1.3.1 Caractérisation directe

A partir de la conductivité électrique Un grand nombre de méthodes sont présentées dans la bibliographie afin de déterminer ce paramètre. Parmi ces dernières, on peut citer la mesure par résistivité électrique [Brown 1980] qui est une des plus anciennes. Elle consiste à immerger le matériau poreux dans un fluide de conductivité Σ_0 et de le faire traverser par un courant électrique. A condition que le squelette du matériau poreux ne soit pas conducteur, lorsque le matériau est saturé par le fluide, sa conductivité équivalente est directement reliée à la tortuosité.

$$\Sigma = \phi \frac{\Sigma_0}{\alpha_\infty} \quad (13)$$

A partir d'analyse chromatographique ou de résonance magnétique nucléaire La diffusion de particules dans les matériaux poreux se comporte de façon analogue à la conductivité électriques. La tortuosité peut ainsi être évaluée à partir d'analyse chromatographique ou de résonance magnétique nucléaire [Latour *et al.* 1995]. Si D_0 est le coefficient de diffusion des particules en champ libre, la diffusion dans le matériau poreux vaut :

$$D = \phi \frac{D_0}{\alpha_\infty} \quad (14)$$

A partir d'ultrasons Des techniques ultrasonores permettent également de remonter à la tortuosité. Une des méthodes consiste à mesurer la vitesse de propagation du son dans le matériau [Allard *et al.* 1998, Umnova *et al.* 2005], la célérité des ondes acoustiques vérifiant à hautes fréquences l'Equation 15. La validité de cette mesure est limitée par le phénomène de diffraction à des fréquences de l'ordre de 100kHz.

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \left(\frac{c_0}{c(\omega)} \right)^2 = \alpha_\infty \quad (15)$$

Nous avons utilisé dans le cadre de cette thèse une méthode basée sur ce principe, reposant sur la mesure du temps de vol d'une impulsion ultrasonore. Cette méthode consiste à évaluer le retard entre l'onde incidente et l'onde transmise dans le matériau poreux à l'aide d'une courte impulsion ultrasonore centrée sur 48000 Hz.

Le dispositif est présenté Figure A.5. L'échantillon d'épaisseur e est placé dans un tube entre deux microphones 1/4 de pouces dont les extrémités sont alignées sur l'axe du tube. Après émission d'une impulsion, le retard entre les signaux reçus par ces deux microphones est évalué et permet de connaître le temps de vol de l'onde acoustique dans l'échantillon Δt . Une mesure à vide permet de trouver la célérité des ondes acoustiques c_0 . La tortuosité peut alors être calculée par l'Equation 16.

$$\alpha_\infty = \frac{c_0 \Delta t}{e} \quad (16)$$

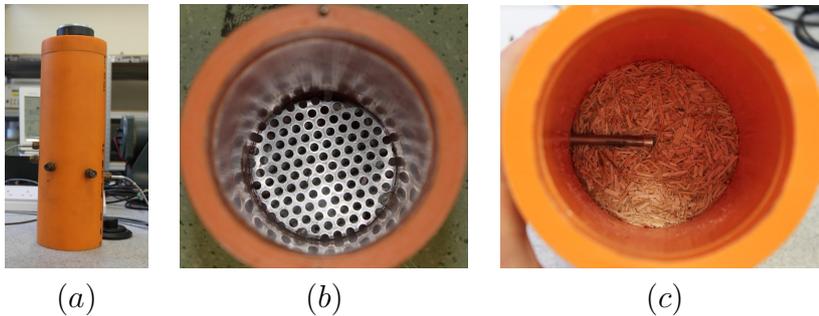


Figure A.5 – Dispositif de mesure de la tortuosité par évaluation du temps de vol (Université de Bradford) : Photo du dispositif complet avec microphones et source en position (a), grillage “transparent” utilisé afin de maintenir la chènevotte en position (b), et vue de la chènevotte mise en place (c)

Cette méthode permet de déterminer la tortuosité d'un matériau avec une précision de l'ordre de 4-5% [Horoshenkov 2006].

1 Caractérisation des paramètres acoustiques des matériaux poreux

Toujours en ultrasons, Fellah *et al.* [Fellah *et al.* 2003] ont développés une méthode qui permet de retrouver la tortuosité et la porosité à partir des ondes réfléchies sous deux angles d'incidence.

1.3.2 Caractérisation indirecte

Méthode asymptotique Au dessus d'une certaine fréquence de l'ordre de la fréquence caractéristique visqueuse f_v , [Voronina & Horoshenkov 2003] ont observé que la partie réelle de l'impédance caractéristique devient constante, et dépend uniquement de la porosité et de la tortuosité du matériau.

Ainsi, si la porosité est connue, la tortuosité peut être dérivée de la limite asymptotique suivante :

$$\lim_{\omega \rightarrow +\infty} \frac{\Re(Z_c)}{Z_0} = \frac{\sqrt{\alpha_\infty}}{\phi} \quad (17)$$

Cette méthode donne de bons résultats pour les matériaux de faible résistivité, tels que les granulats en vrac, pour lesquels f_v est suffisamment faible [Horoshenkov 2006].

Méthode analytique Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé des estimations indirectes basées sur la densité dynamique des échantillons de chanvre et de béton de chanvre, initialement présentées par [Panneton & Olny 2006].

Analytiquement, d'après les relations du modèle de Johnson *et al.*, on peut remonter à la tortuosité en fonction de la porosité, de la résistivité et de la densité dynamique grâce à l'Equation 18 :

$$\alpha_\infty = \frac{\phi}{\rho_0} \left[\Re(\rho) - \sqrt{\Im(\rho)^2 - \frac{\sigma^2}{\omega^2}} \right] \quad (18)$$

Cette relation est directement dérivée des expressions des parties réelles et imaginaires de la densité dynamique données par le modèle de Johnson *et al.* En outre, si l'on ne connaît pas la porosité, cette relation permet d'évaluer le rapport α_∞/ϕ , le seul paramètre nécessaire étant la résistivité.

Cette détermination conduit à des résultats valides sur la plage de fréquences sur laquelle la tortuosité calculée reste constante [Panneton & Olny 2006].

Méthode par extrapolation Dans le cas où la résistivité d'un matériau n'est pas connue, [Panneton & Olny 2006] proposent une méthode de détermination de la tortuosité par extrapolation à hautes fréquences. Effectivement, dans la mesure où la fréquence caractéristique visqueuse vérifie $\omega \gg \omega_v$, l'expression 19 est vérifiée.

$$\Sigma = \frac{\phi}{\rho_0} [\Re(\rho) + \Im(\rho)] = \alpha_\infty \left(1 - \sqrt{\frac{1}{M} \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right)^{-3/2}} \right) \quad (19)$$

Dans ce cas, α_∞ correspond à l'ordonnée à l'origine de la fonction affine de Σ en fonction de $\omega^{-3/2}$. La condition d'application de cette méthode est que $\omega \geq \omega_v$, ce qui est vérifié lorsque $\omega > \sqrt[3]{m^2}$, m étant la pente de la fonction $\Sigma = f(\omega^{-3/2})$.

1.4 Longueur caractéristique visqueuse

1.4.1 Caractérisation directe

Les principales méthodes qui permettent de déterminer Λ sont ultrasonores. On peut citer la méthode initiale proposée par [Johnson *et al.* 1987] qui repose sur la mesure de l'atténuation dans le matériau poreux saturé d'hélium. D'autres méthodes plus accessibles sont généralement utilisées, notamment la méthode de la pente qui permet de trouver Λ , connaissant au préalable Λ' , grâce à la limite haute fréquence du nombre d'onde du matériau [Leclaire *et al.* 1996] :

$$\lim_{\omega \rightarrow +\infty} k = \sqrt{\alpha_\infty} \frac{\omega}{c_0} \left[1 + (1-j) \frac{\delta_v}{2} \left(\frac{1}{\Lambda} + \frac{\gamma-1}{\sqrt{N_{Pr}} \Lambda'} \right) \right] \quad (20)$$

Λ est alors obtenu en évaluant la pente de la fonction affine de la partie réelle de l'indice de réfraction $\left(\frac{\Re(k)}{\omega/c_0} \right)$ en fonction de $\omega^{-1/2}$.

De plus, en répétant la mesure dans deux fluides différents, il est possible de déterminer à la fois Λ et Λ' grâce à cette méthode dite dans ce cas méthode des deux pentes.

1.4.2 Caractérisation indirecte

Méthode analytique Par analogie avec la tortuosité, on peut caractériser de façon indirecte la longueur visqueuse en utilisant le modèle de Johnson *et al.* Une fois la densité dynamique mesurée, on peut en effet retrouver analytiquement ce paramètre grâce à l'Equation 21 [Panneton & Olny 2006] :

$$\Lambda = \frac{\alpha_\infty}{\phi} \sqrt{\frac{2\rho_0\mu}{\omega \Im(\rho) (\rho_0 \frac{\alpha_\infty}{\phi} - \Re(\rho))}} \quad (21)$$

Il est intéressant de noter que cette longueur peut être caractérisée en connaissant uniquement la tortuosité réduite, c.-à-d. le rapport $\frac{\alpha_\infty}{\phi}$.

Méthode par extrapolation Dans le cas d'une fréquence ω suffisamment basse par rapport à ω_v , et dans le processus de caractérisation par extrapolation expliqué Section 1.3.2, il est également possible de déterminer Λ grâce à la relation suivante :

$$\Lambda = -mb \sqrt{\frac{8\mu\rho_0^3}{\sigma^4\phi^4}} \quad (22)$$

m est la pente et b l'ordonnée de la régression linéaire effectuée pour trouver la tortuosité.

1.5 Longueur caractéristique thermique et perméabilité thermique

1.5.1 Caractérisation directe

La longueur caractéristique thermique peut être déterminée, comme on l'a vu précédemment, d'après la méthode des deux pentes [Leclaire *et al.* 1996]. La perméabilité thermique reste en

2 Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux

revanche particulièrement difficile à caractériser. Ce paramètre peut être caractérisé via la constante de piégeage, déterminée par résonance magnétique nucléaire [Lafarge *et al.* 1997].

1.5.2 Caractérisation indirecte

Par analogie avec les travaux de [Panneton & Olny 2006] pour la détermination de α_∞ et Λ , [Olny & Panneton 2008] proposent une méthode indirecte permettant de retrouver analytiquement les valeurs de Λ' et de Θ_0 à partir du module d'incompressibilité dynamique mesuré. Les expressions sont dérivées du modèle de Lafarge *et al.* :

$$\Lambda' = \delta_t \sqrt{2 \left[-\Im \left(\left(\frac{1 - \phi K / (\gamma P_0)}{1 - \phi K / P_0} \right)^2 \right) \right]^{-1}} \quad (23)$$

$$\Theta_0 = \phi \frac{\delta_t^2}{2} \left[-\Re \left(\left(\frac{1 - \phi K / (\gamma P_0)}{1 - \phi K / P_0} \right)^2 \right) \right]^{-1/2} \quad (24)$$

2 Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux

2.1 En incidence normale en tube de Kundt

Les méthodes de caractérisation utilisées dans le cadre de cette thèse reposent pour la plupart sur l'utilisation de tubes de Kundt. Il s'agit donc de caractérisations qui se font en incidence normale. Ce dispositif présente à nos yeux les avantages suivants :

- Les échantillons testés sont de faibles dimensions, les manipulations sont donc plus aisées que dans les chambres anéchoïques et réverbérantes où il faut mobiliser des surfaces importantes de matériau.
- Les mesures sont en général plus précises et offrent une très bonne reproductibilité.
- Grâce au même dispositif, à la fois l'absorption acoustique, l'indice d'affaiblissement acoustique et les propriétés intrinsèques des matériaux peuvent être déterminées.

2.1.1 Mesure de l'absorption acoustique en incidence normale

Dans le tube à ondes stationnaires, dans le domaine fréquentiel dans lequel l'hypothèse d'ondes planes est respectée, c'est à dire sous la fréquence d'apparition du premier mode oblique, la surpression acoustique peut s'exprimer sous la forme de la somme d'une pression incidente et d'une pression réfléchie :

$$p = p_i + p_r = p_0 e^{j(\omega t - k_0 x)} + R p_0 e^{j(\omega t + k_0 x)} \quad (25)$$

p_0 représente l'amplitude de l'onde incidente, ω la pulsation, k le nombre d'onde de l'air et R le coefficient de réflexion défini comme le rapport entre la pression incidente et la pression réfléchie au niveau de la surface de l'échantillon exposée directement aux ondes.

Ainsi, à condition que la terminaison adossée à l'échantillon soit dotée d'une impédance infinie (terminaison dite rigide), il est possible de déterminer le coefficient d'absorption α d'un matériau à partir des mesures de pression en deux positions p_1 et p_2 situées en amont de l'échantillon. Le dispositif expérimental peut donc être schématisé par la Figure A.6.

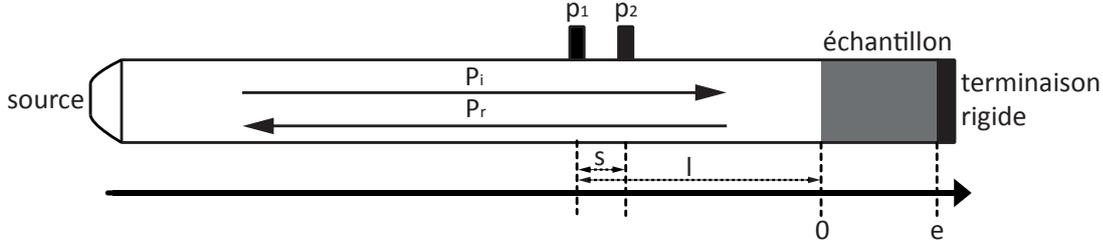


Figure A.6 – Schéma d'un tube à ondes stationnaires

On peut écrire dans ce contexte :

$$p_1 = p_0 e^{j(\omega t + k_0 l)} + R p_0 e^{j(\omega t - k_0(l-s))} \quad (26)$$

$$p_2 = p_0 e^{j(\omega t + k_0(l-s))} + R p_0 e^{j(\omega t - k_0 l)} \quad (27)$$

En posant $H_{12} = \frac{p_2}{p_1}$, fonction de transfert entre les positions 1 et 2, on a :

$$R = \frac{H_{12} - e^{-jk_0 s}}{e^{jk_0 s} - H_{12}} e^{2jk_0 l} \quad (28)$$

L'impédance de surface Z_s définie comme le rapport entre la pression et l'amplitude de la vitesse au niveau de la surface de l'échantillon exposée aux ondes acoustiques, peut être exprimée en fonction de R par la relation :

$$Z_s = \frac{P}{\vec{v} \cdot \vec{n}} = Z_0 \frac{1 + R}{1 - R} \quad (29)$$

Enfin, le coefficient d'absorption acoustique α est calculé à partir de R :

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (30)$$

2.1.2 Mesures des propriétés intrinsèques en incidence normale

Il existe une littérature relativement riche sur les méthodes de caractérisation des propriétés intrinsèques, seules les méthodes utilisées dans le cadre de la thèse sont présentées dans la suite.

Méthode des deux épaisseurs Cette méthode repose sur la mesure de l'impédances de surface d'un matériau sous deux épaisseurs différentes [Ferrero & Sacerdote 1951]. Les impédances

2 Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux

de surface mesurées peuvent s'écrire sous la forme :

$$Z_{s_i} = -jZ_c \cot(ke_i), i \in [1; 2] \quad (31)$$

Ainsi, dans le cas particulier où $e_2 = 2e_1$, il est possible de remonter au nombre d'onde k et à l'impédance caractéristique Z_c grâce aux équations suivantes :

$$Z_c = \sqrt{Z_{s_1}(2Z_{s_2} - Z_{s_1})} \quad (32)$$

$$k = \frac{1}{2je_1} \ln \left(\frac{1 + Z_c/Z_{s_1}}{1 - Z_c/Z_{s_1}} \right) \quad (33)$$

Cette méthode présente l'inconvénient de nécessiter deux échantillons du matériau à caractériser, mais reste facilement applicable dans le cas de matériaux granulaires.

Méthode des deux plénums La méthode des plénums, également appelée méthode double cavité, consiste à mesurer l'impédance de surface d'un échantillon adossé à deux cavités de longueurs différentes $e_{plenum\ 1}$ et $e_{plenum\ 2}$ comme l'illustre la Figure A.7. Les impédances de surface mesurées peuvent s'exprimer grâce au report d'impédance [Dunn & Davern 1986] à partir du nombre d'onde et de l'impédance caractéristique du matériau et des impédances de surface des cavités $Z_{s_{plenum\ 1}}$ et $Z_{s_{plenum\ 2}}$.

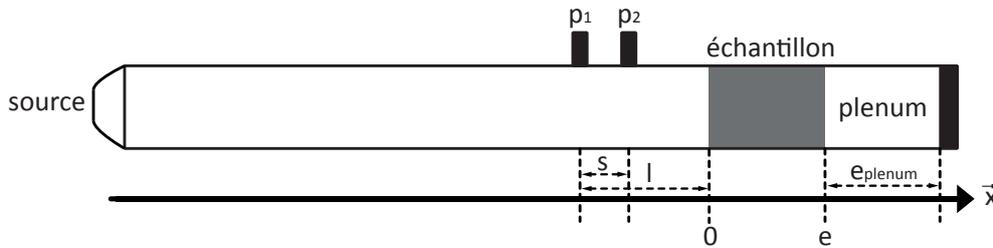


Figure A.7 – Schéma de la méthode de double cavité

On a effectivement :

$$Z_{s_i} = Z_c \frac{Z_c - jZ_{s_{plenum\ i}} \cot(ke)}{Z_{s_{plenum\ i}} - jZ_c \cot(ke)}, i \in [1; 2] \quad (34)$$

Avec :

$$Z_{s_{plenum\ i}} = -jZ_0 \cot(k_0 e_{plenum\ i}), i \in [1; 2] \quad (35)$$

Une fois ces deux impédances de surface mesurées, on peut remonter à k et Z_c grâce aux relations suivantes :

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_{s_1} Z_{s_2} (Z_{s_{plenum\ 1}} - Z_{s_{plenum\ 2}}) - Z_{s_{plenum\ 1}} Z_{s_{plenum\ 2}} (Z_{s_1} - Z_{s_2})}{(Z_{s_{plenum\ 1}} - Z_{s_{plenum\ 2}}) - (Z_{s_1} - Z_{s_2})}} \quad (36)$$

$$k = \frac{1}{2je} \ln \left(\frac{(Z_{s_{plenum\ 1}} + Z_c)(Z_{s_{plenum\ 1}} - Z_c)}{(Z_{s_1} - Z_c)(Z_{s_{plenum\ 1}} + Z_c)} \right) \quad (37)$$

Par commodité, il est possible de choisir pour un des plénums une épaisseur nulle. Dans ce cas, l'impédance de surface de ce plénum étant infinie, les équations deviennent :

$$Z_c = \sqrt{Z_{s_1} Z_{s_2} - Z_{s_{plenum\ 2}} (Z_{s_1} - Z_{s_2})} \quad (38)$$

$$k = \frac{1}{2je} \ln \left(\frac{Z_{s_1} + Z_c}{Z_{s_1} - Z_c} \right) \quad (39)$$

Cette méthode, relativement facile à mettre en œuvre, est une méthode de référence pour la caractérisation des matériaux. Cependant, elle demande une précision particulière sur le réglage de l'épaisseur des cavités.

Méthode des trois positions sans cavité Contrairement aux méthodes à deux épaisseurs ou à deux plénums présentées précédemment, cette méthode ne requiert qu'une configuration de matériau. Une position supplémentaire de microphone est située à l'arrière de l'échantillon comme le montre la Figure A.8.

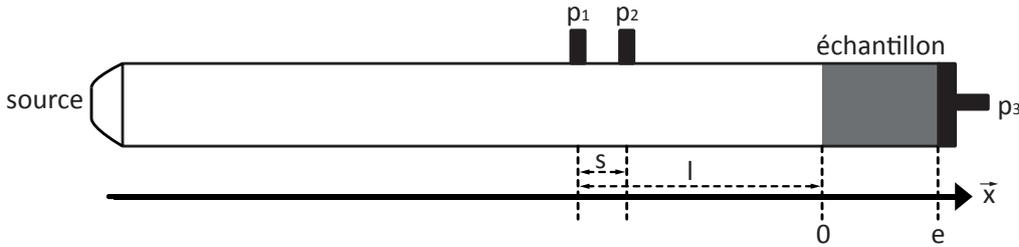


Figure A.8 – Schéma de la méthode à trois positions sans cavité

En reprenant le formalisme introduit au paragraphe 2.1.1, on peut écrire que la pression dans le tube est de la forme :

$$p = p_0 e^{j(\omega t - k_0 x)} + R p_0 e^{j(\omega t + k_0 x)}, x \leq 0 \quad (40)$$

$$p = A e^{j(\omega t - kx')} + B e^{j(\omega t + kx')}, 0 \leq x \leq e \quad (41)$$

Or, l'échantillon est supposé adossé à une terminaison rigide d'impédance infinie, ce qui implique une vitesse normale nulle au niveau de cette terminaison, et donc que $A = B$ si on

2 Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux

considère par commodité une origine placée en $x = e$ ($x' = x - e$).

La troisième position de micro permet donc de mesurer p_3 qui peut s'exprimer sous la forme :

$$p_3 = 2Ae^{j\omega t} \quad (42)$$

Enfin, en considérant une continuité de la pression en $x = 0$, on a :

$$p(x = 0) = p_0(1 + R)e^{j\omega t} = 2A \cos(ke)e^{j\omega t} \quad (43)$$

On peut ainsi remonter à k en appliquant la relation :

$$k = \frac{1}{e} \arccos \left(\frac{(1 + R)p_0}{2A} \right) \quad (44)$$

Or comme :

$$p_2 = p_0(e^{jk_0(l-s)} + Re^{-jk_0(l-s)})e^{j\omega t} \quad (45)$$

k peut s'exprimer grâce à la fonction de transfert H_{32} :

$$k = \frac{1}{e} \arccos \left(\frac{(1 + R)H_{32}}{e^{jk_0(l-s)} + Re^{-jk_0(l-s)}} \right) \quad (46)$$

Z_c est obtenu pour sa part à partir de k et de l'impédance de surface :

$$Z_c = jZ_s \tan(ke) \quad (47)$$

Cette méthode développée initialement par [Iwase *et al.* 1998] en utilisant des sondes à l'intérieur du tube d'impédance, a été adaptée pour des microphones situés à l'extérieur du tube [Salissou & Panneton 2010].

Méthode des quatre positions Une alternative développée par [Song & Bolton 2000] repose sur l'évaluation des termes de la matrice de transfert décrite Chapitre III, Section 4.2.1. Cette méthode est basée sur la mesure de la pression en quatre points, répartis de part et d'autre de l'échantillon. Le protocole expérimental est présenté Figure A.9. Une source génère des ondes planes en amont de l'échantillon, et une terminaison *a priori* quelconque est placée à son aval.

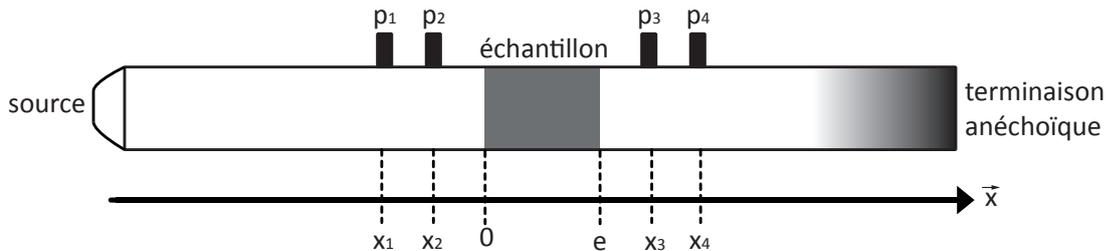


Figure A.9 – Schéma de la méthode à quatre microphones

Annexe A : Métrologie

La pression dans le tube s'exprime sous la forme :

$$p = Ae^{j(\omega t - k_0 x)} + Be^{j(\omega t + k_0 x)}, x \leq 0 \quad (48)$$

$$p = Ce^{j(\omega t - k_0 x)} + De^{j(\omega t + k_0 x)}, e \leq x \quad (49)$$

On peut alors retrouver les amplitudes en mesurant les pressions aux quatre positions, afin de connaître la pression en tout point du tube :

$$A = \frac{j(p_1 e^{jk_0 x_2} - p_2 e^{jk_0 x_1})}{2 \sin(k_0(x_1 - x_2))} \quad (50)$$

$$B = \frac{j(p_2 e^{-jk_0 x_1} - p_1 e^{-jk_0 x_2})}{2 \sin(k_0(x_1 - x_2))} \quad (51)$$

$$C = \frac{j(p_3 e^{jk_0 x_4} - p_4 e^{jk_0 x_3})}{2 \sin(k_0(x_3 - x_4))} \quad (52)$$

$$D = \frac{j(p_4 e^{-jk_0 x_4} - p_3 e^{-jk_0 x_3})}{2 \sin(k_0(x_3 - x_4))} \quad (53)$$

La matrice de transfert $[T]$ est définie par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ V \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ V \end{bmatrix}_{x=e} \quad (54)$$

Si on considère que le matériau possède des propriétés de symétrie, d'homogénéité et de réciprocité, on a alors :

$$T_{11} = T_{11} \quad (55)$$

$$T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} = 1 \quad (56)$$

On peut donc exprimer les termes de la matrice de transfert $[T]$ à partir des équations 54 et 55 :

$$T_{11} = \frac{p(x=e)V(x=e) + p(x=0)V(x=0)}{p(x=0)V(x=e) + p(x=e)V(x=0)} \quad (57)$$

$$T_{12} = \frac{p(x=0)^2 - p(x=e)^2}{p(x=0)V(x=e) + p(x=e)V(x=0)} \quad (58)$$

$$T_{21} = \frac{V(x=0)^2 - V(x=e)^2}{p(x=0)V(x=e) + p(x=e)V(x=0)} \quad (59)$$

$$T_{22} = \frac{p(x=e)V(x=e) + p(x=0)V(x=0)}{p(x=0)V(x=e) + p(x=e)V(x=0)} \quad (60)$$

2 Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux

Or, pour tout matériau homogène et isotrope on a :

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(ke) & j\rho_0 c_0 \sin(ke) \\ \frac{j \sin(ke)}{\rho_0 c_0} & \cos(ke) \end{bmatrix} \quad (61)$$

k et Z_c peuvent donc être déterminés par les relations suivantes :

$$k = \frac{1}{e} \arccos(T_{11}) \quad (62)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{21}}} \quad (63)$$

2.1.3 Mesure de l'indice d'affaiblissement en incidence normale

Dans un tube d'impédance, en absence de réflexion au niveau de la terminaison située en aval de l'échantillon, comme l'illustre la Figure A.10, le facteur de transmission τ est défini comme le rapport entre l'intensité acoustique transmise et l'intensité incidente :

Lorsque l'on résonne en pression, on utilise le coefficient de transmission Tr défini par :

$$Tr = \frac{p_t}{p_i} \quad (64)$$

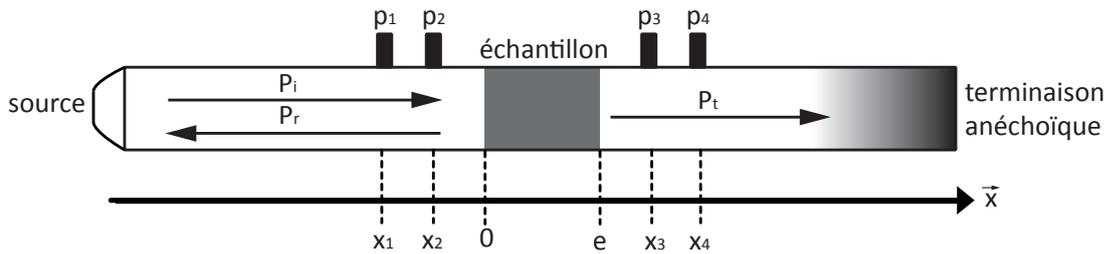


Figure A.10 – Schéma de la méthode à quatre microphones

L'indice d'affaiblissement TL (Transmission Loss en anglais) est alors défini par :

$$TL = -10 \log(\tau) = -10 \log(|Tr|^2) \quad (65)$$

En s'appuyant sur les notations du paragraphe 2.1.2, on a alors $D = 0$, $Tr = C/A$ et :

$$p(x = 0) = A + RA \quad (66)$$

$$V(x = 0) = \frac{A - RA}{\rho_0 c_0} \quad (67)$$

$$p(x = e) = Tr e^{-jk_0 e} \quad (68)$$

$$V(x = e) = \frac{Tr e^{-jk_0 e}}{\rho_0 c_0} \quad (69)$$

$$(70)$$

On peut donc montrer [Song & Bolton 2000], par définition de la matrice de transfert donnée Equation 54, que dans ce cas :

$$Tr = \frac{2e^{jk_0 e}}{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c_0} + \rho_0 c_0 T_{21} + T_{22}} \quad (71)$$

En réinjectant l'Equation 61 dans l'Equation 71, on obtient alors une expression du coefficient de transmission Tr en fonction du nombre d'onde k et de l'impédance caractéristique Z_c :

$$Tr = \frac{2e^{jk_0 e}}{2 \cos(ke) + j \sin(ke) \left(\frac{Z_c}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z_c} \right)} \quad (72)$$

Cette relation permet donc de déterminer T à partir de k et Z_c indépendamment de la technique de caractérisation choisie afin d'obtenir ces grandeurs. Cependant, il faut bien garder en tête le fait que cette relation est uniquement valable pour des matériaux symétriques, homogènes et isotropes, propriétés dont découlent les calculs liés à la matrice de transfert.

D'autres méthodes permettent l'évaluation du coefficient de transmission pour des matériaux quelconques. On peut citer par exemple les méthodes à deux charges qui consistent à réaliser les mesures aux quatre positions présentées Figure A.9 en utilisant deux terminaisons d'impédance différente [Olivieri *et al.* 2006]. Ces mesures demandent un temps d'exécution plus important. Une alternative basée sur la mesure de trois impédances de surface a toutefois été développée par [Panneton 2009].

2.1.4 Présentation des tubes de Kundt du laboratoire

Petit tube de 46 mm de diamètre Ce tube de Kundt a été développé à l'ENTPE dans le but de caractériser les matériaux sur la gamme de fréquences caractéristique du bâtiment. Ses dimensions permettent effectivement d'accéder aux propriétés acoustiques pour des fréquences comprises entre 200 et 4300 Hz.

Sur ce tube, présenté Figure A.11, un microphone un quart de pouce B&K type 4178, équipé d'un préamplificateur B&K type 2633, est utilisé. Il peut être placé en quatre positions sur la partie supérieure du tube, et en une position à son extrémité. Ces différentes positions

2 Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux

permettent la détermination du coefficient d'absorption acoustique α , mais également la mesure de l'indice d'affaiblissement TL , de la densité dynamique ρ et du module d'incompressibilité dynamique K . Le haut parleur du tube de Kundt est alimenté par un amplificateur B&K type 2706. Un amplificateur B&K type 2690 traite les signaux reçus par le microphone. Enfin, une carte National Instruments NI PXI-1031 génère les signaux d'entrée.

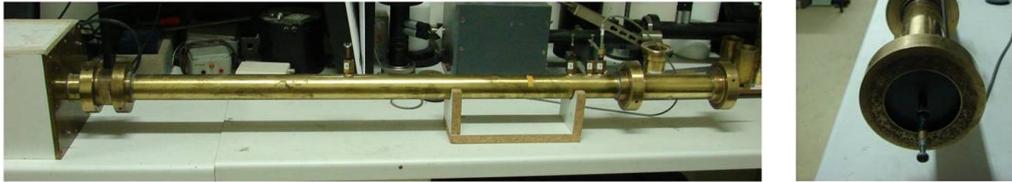


Figure A.11 – Tube de Kundt de 46 mm de diamètre

Tube B&K Type 4106 de 100 mm de diamètre Le tube de diamètre 100 mm, présenté Figure A.12, est un tube de Kundt commercialisé par le groupe Bruel & Kjaer®. Le microphone utilisé est de même dimension, et peut être positionné de façon similaire au tube de 46 mm, en amont de l'échantillon. L'extrémité du tube a de plus été équipée d'une terminaison en plexiglas afin d'accueillir le microphone, permettant d'appliquer la méthode à trois positions sans cavité. La gamme de validité de la mesure est restreinte dans ce cas entre 50 et 2000 Hz. Le microphone, l'amplificateur et la carte sont communes à ces deux tubes de Kundt.



Figure A.12 – Tube de Kundt de 100 mm de diamètre

Tube de grandes dimensions Le grand tube de Kundt est un tube à base carrée de 60 cm de côté, et de 5,5 m de longueur comme le montre la Figure A.13. Il est équipé de quatre haut-parleurs identiques, de 20 cm de diamètre, de marque Visaton®, montés en parallèle-série. Un microphone un demi pouce et d'un préamplificateur de marque Scirus® sont utilisés sur ce dispositif. Le microphone est déplacé à l'intérieur du tube avec une précision de 0,1 mm, à l'aide d'un axe de guidage motorisé pas à pas. Les grandes dimensions de ce tube permettent des caractérisations des matériaux acoustiques à basses fréquences, entre 30 et 570 Hz si le matériau est symétrique, et entre 30 et 285 Hz dans les autres cas.

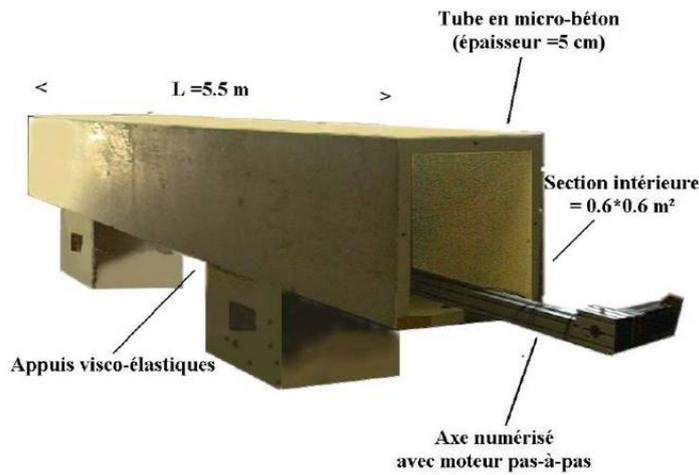


Figure A.13 – Tube de Kundt de grandes dimensions [Olny 1999]

2.2 En champ diffus dans les chambres réverbérantes

2.2.1 Mesure de l'absorption acoustique en champ diffus

La caractérisation de l'absorption acoustique peut être réalisée en appliquant la théorie statistique de Sabine dans une salle réverbérante. Cette méthode est d'ailleurs utilisée afin d'évaluer les performances des matériaux acoustiques commercialisés. Elle fait l'objet de la norme NF EN ISO 354 (Mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante) et de la norme NF EN ISO 11654 (Evaluation de l'absorption acoustique). Les échantillons à tester sont alors généralement disposés sur le sol, comme cela est illustré sur la Figure A.14.

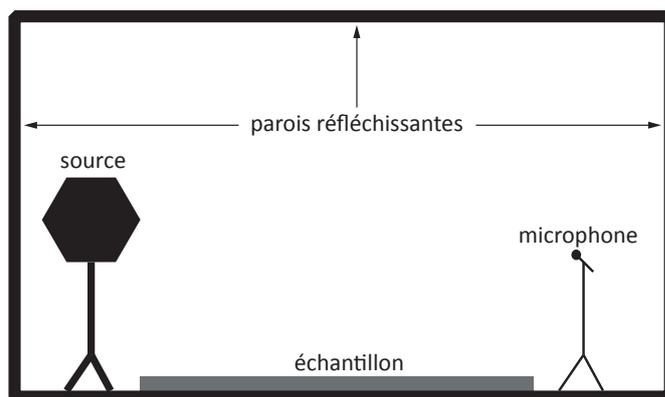


Figure A.14 – Schéma de la mesure de l'absorption acoustique en salle réverbérante

La norme NF EN ISO 354 stipule :

- les caractéristiques de la salle réverbérante : son volume (supérieur à 150 m^3), sa forme et son aire d'absorption équivalente,

2 Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux

- la disposition des échantillons à tester : leur surface (entre 10 et 12 m^2) et emplacement (distants de plus de 75 cm des parois),
- le type d'excitation : nombre de positions pour la source, type de bruit (interrompu ou impulsif),
- le protocole d'acquisition : nombre et position des points de mesure, résolution fréquentielle (généralement en tiers d'octave de 100 Hz à 5000 Hz)

La première étape consiste à mesurer les temps de réverbération de la salle à vide T_{R1} , et de la salle avec les échantillons T_{R2} . Ensuite, les aires d'absorption équivalentes A_i doivent être calculées :

$$A_i = \frac{55,3V}{c_i T_i} - 4V m_i \quad (73)$$

V est le volume de la salle réverbérante vide (en m^3), c_i la vitesse de propagation du son dans l'air au moment des mesures (en $m.s^{-1}$) et m_i le coefficient d'atténuation de puissance (en m^{-1}) calculé suivant la norme ISO 9613-1.

Le coefficient d'absorption acoustique de l'échantillon testé vaut alors :

$$\alpha_s = \frac{A_2 - A_1}{S} = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_{R2}} - \frac{1}{c_1 T_{R1}} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (74)$$

S est la surface couverte par les échantillons.

Dans des conditions stables de pression, température et humidité relative, on a donc :

$$\alpha_s = \frac{55,3V}{c} \left(\frac{1}{T_{R2}} - \frac{1}{T_{R1}} \right) \quad (75)$$

2.2.2 Mesure de l'indice d'affaiblissement en champ diffus

La mesure de l'indice d'affaiblissement peut être réalisée dans des conditions de champ diffus entre deux chambres réverbérantes. Cette mesure fait l'objet des normes NF EN ISO 140-1 et NF EN ISO 140-3 (Mesurage de l'isolement acoustique des immeubles et des éléments de construction. Partie 1 : Spécifications relatives aux laboratoires sans transmission latérale. Partie 3 : Mesurage en laboratoire de l'affaiblissement des bruits aériens par des éléments de construction).

La norme NF EN ISO 140-1 préconise pour les salles réverbérantes un volume minimal de 50 m^3 et une différence d'au moins 10% des volumes de chacune des salles. Il est également nécessaire d'être dans le cadre de validité de l'hypothèse de champ diffus, en introduisant si besoin des diffuseurs.

Ainsi, en absence de transmission latérale, les sons sont uniquement transmis d'une salle à une autre par l'échantillon, comme le montre la Figure A.15, et l'indice d'affaiblissement TL est donné par la relation :

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (76)$$

L_1 et L_2 sont les niveaux moyens de pression acoustique mesurés respectivement dans la salle d'émission et la salle de réception, S est la surface de l'échantillon et A est l'aire d'absorption équivalente de la salle de réception calculée conformément au paragraphe 2.2.1.

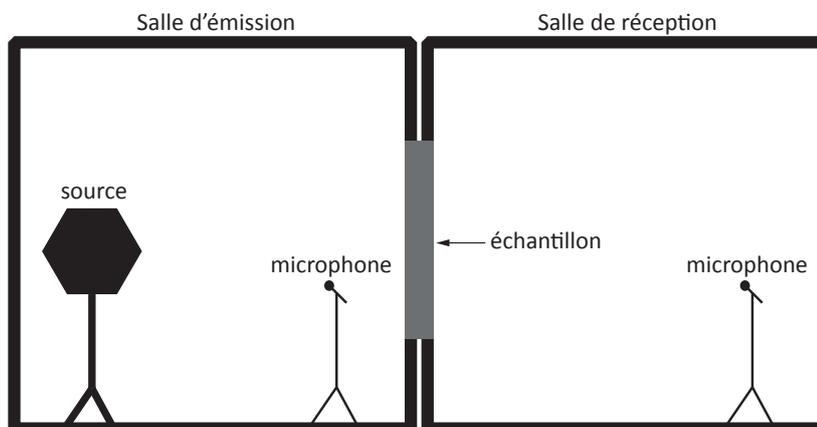


Figure A.15 – Schéma de la mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique en salles réverbérantes

La mesure doit être réalisée de telle sorte que le son généré permette de recouvrir d'au moins 15 dB le niveau de bruit de fond mesuré sur l'ensemble du spectre fréquentiel étudié. De plus, il est recommandé de réaliser les mesures en cinq emplacements minimum par salle, à une distance de plus de 70 cm des parois des salles et de plus de 1 m de l'échantillon.

Annexe B : Compléments de caractérisation

3 Granulométrie des chènevottes

3.1 Courbes granulométriques

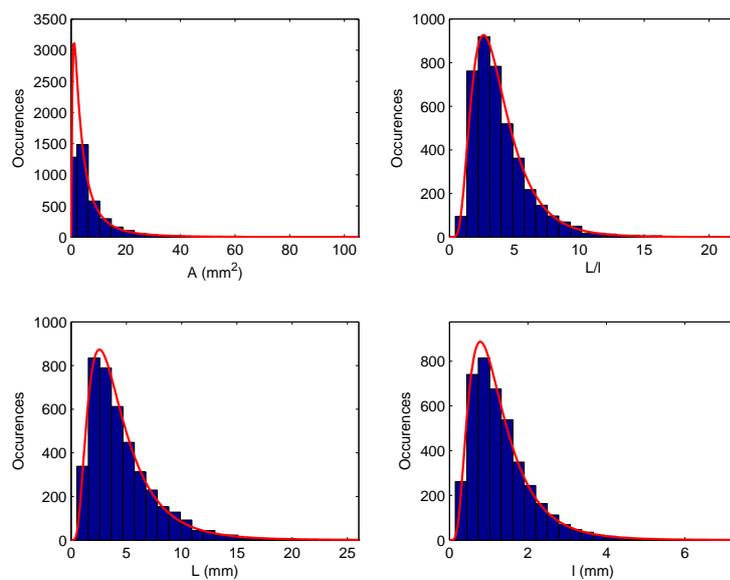


Figure B.1 – Granulométrie de la chènevotte CA, histogramme en occurrence et loi log-normale associée.

Annexe B : Compléments de caractérisation

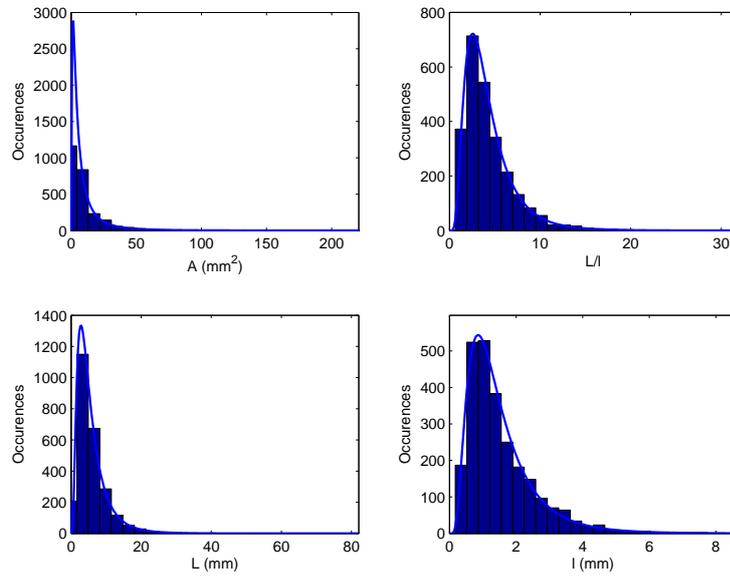


Figure B.2 – Granulométrie de la chènevotte CB, histogramme en occurrence et loi log-normale associée.

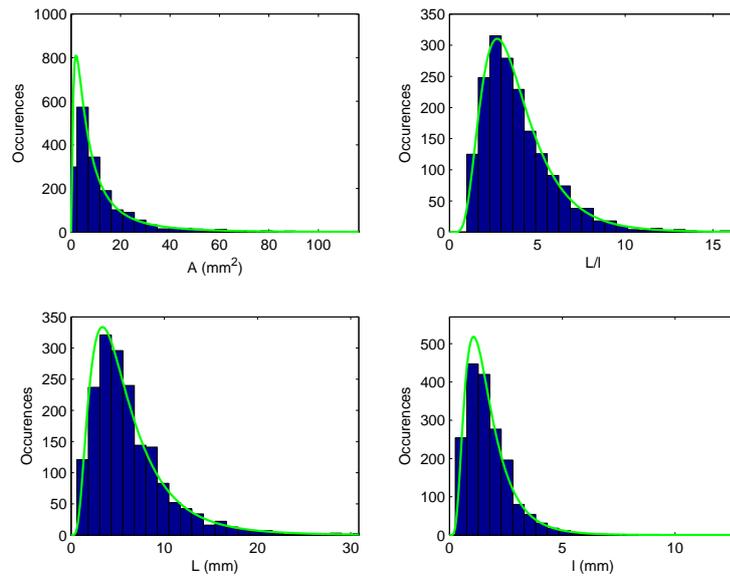


Figure B.3 – Granulométrie de la chènevotte CC, histogramme en occurrence et loi log-normale associée.

3 Granulométrie des chènevottes

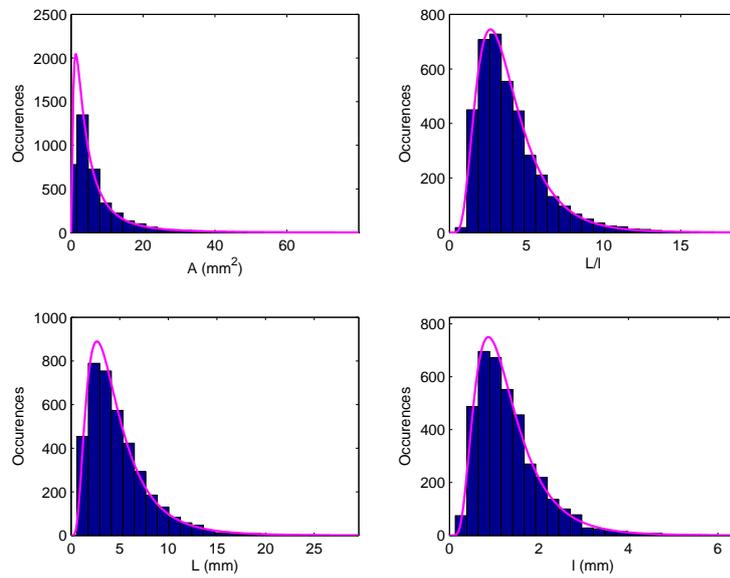


Figure B.4 – Granulométrie de la chènevotte CD, histogramme en occurrence et loi log-normale associée.

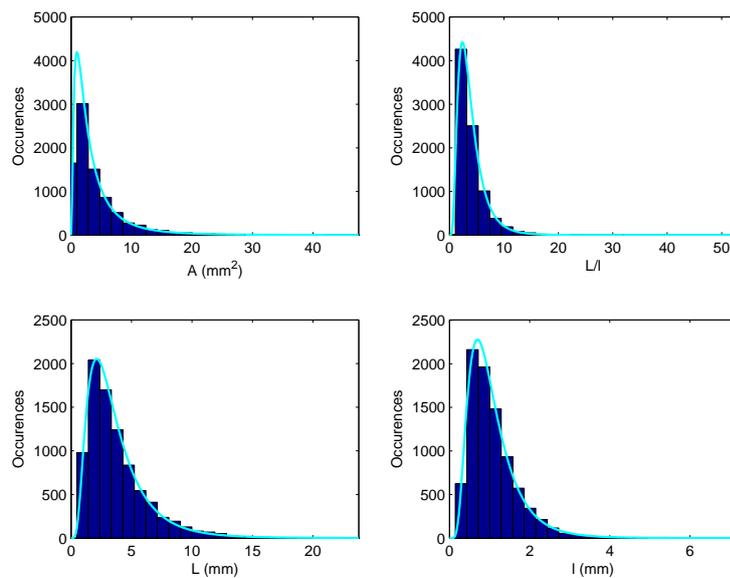


Figure B.5 – Granulométrie de la chènevotte CE, histogramme en occurrence et loi log-normale associée.

Annexe B : Compléments de caractérisation

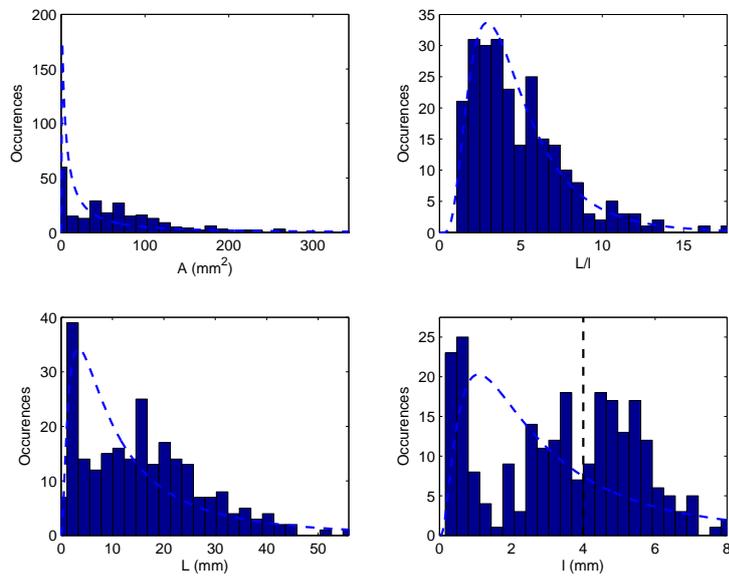


Figure B.6 – Granulométrie de la chènevotte CB1, histogramme en occurrence et loi log-normale associée. Les pointillés représentent les dimensions imposées par les tamis.

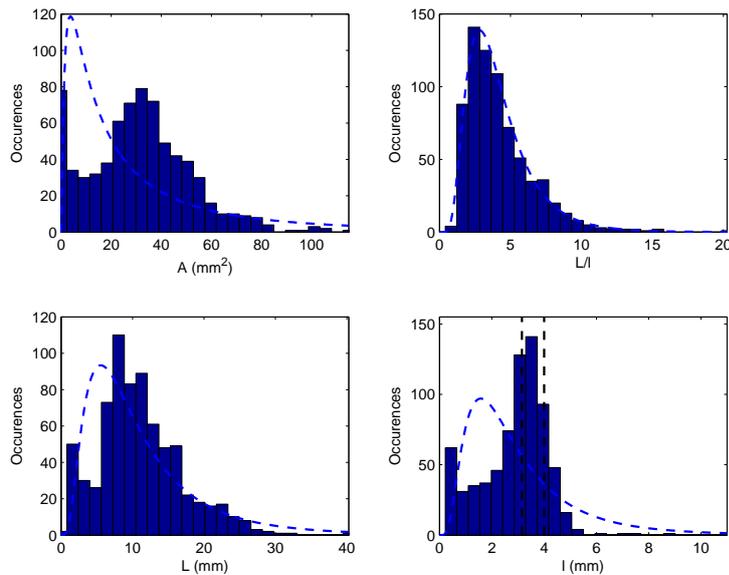


Figure B.7 – Granulométrie de la chènevotte CB2, histogramme en occurrence et loi log-normale associée. Les pointillés représentent les dimensions imposées par les tamis.

3 Granulométrie des chènevottes

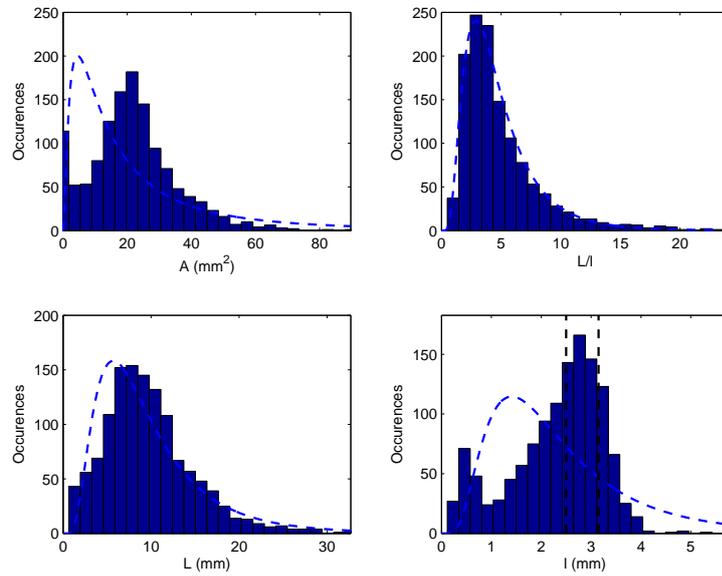


Figure B.8 – Granulométrie de la chènevotte CB3, histogramme en occurrence et loi log-normale associée. Les pointillés représentent les dimensions imposées par les tamis.

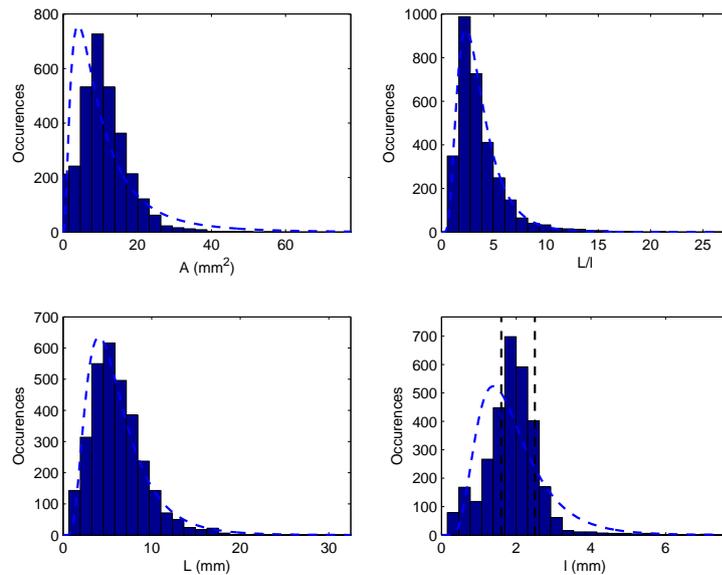


Figure B.9 – Granulométrie de la chènevotte CB4, histogramme en occurrence et loi log-normale associée. Les pointillés représentent les dimensions imposées par les tamis.

Annexe B : Compléments de caractérisation

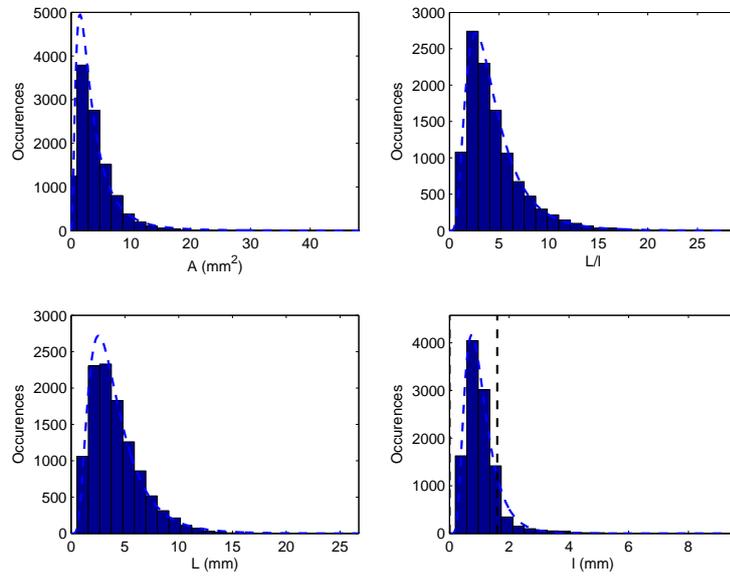


Figure B.10 – Granulométrie de la chènevotte CB5, histogramme en occurrence et loi log-normale associée. Les pointillés représentent les dimensions imposées par les tamis.

3.2 Convergence de la granulométrie

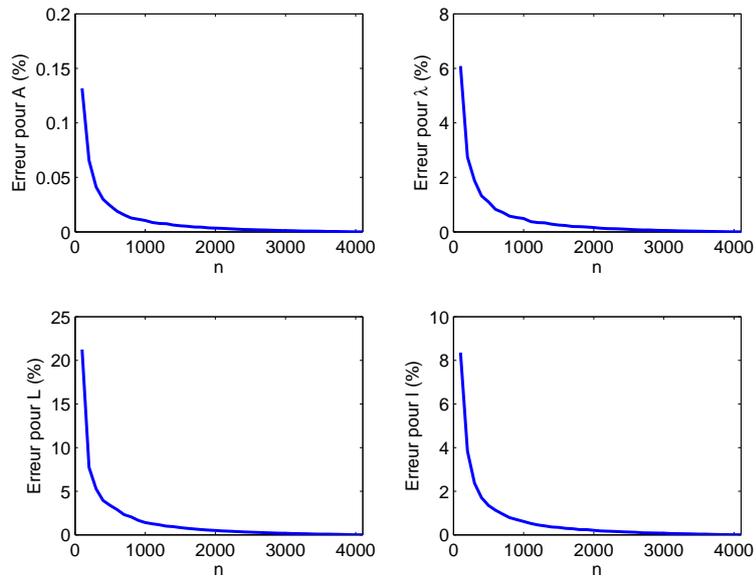


Figure B.11 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CA

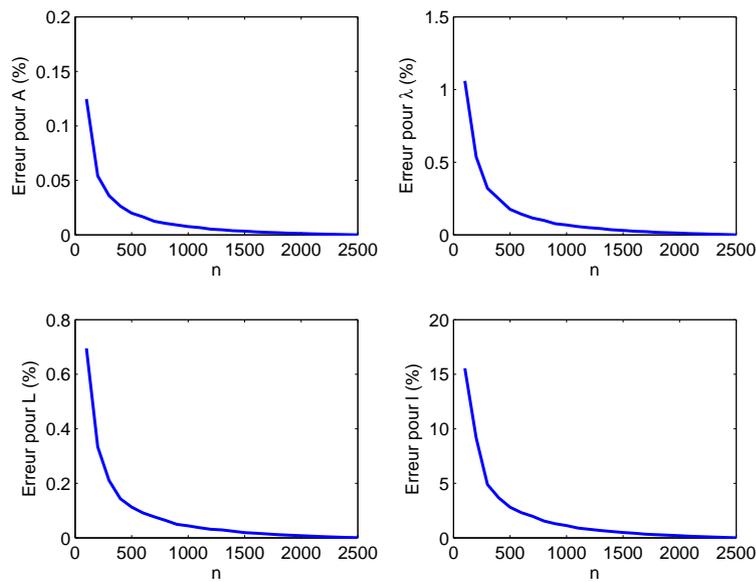


Figure B.12 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CB

Annexe B : Compléments de caractérisation

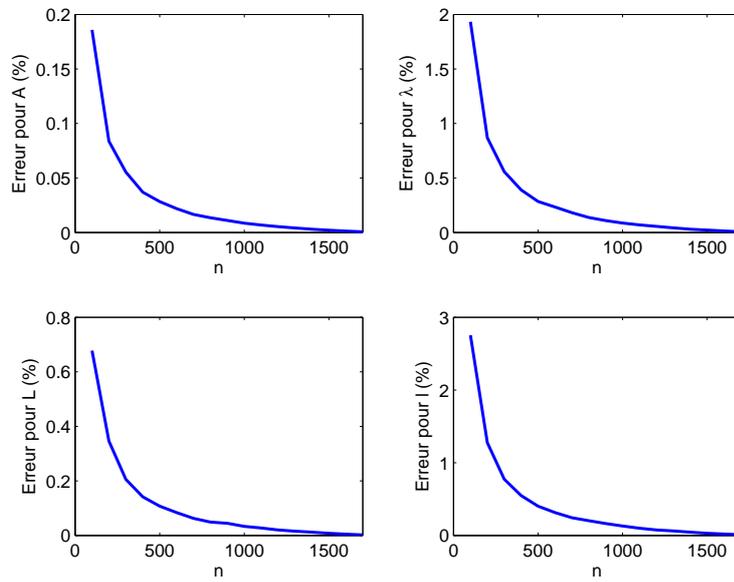


Figure B.13 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CC

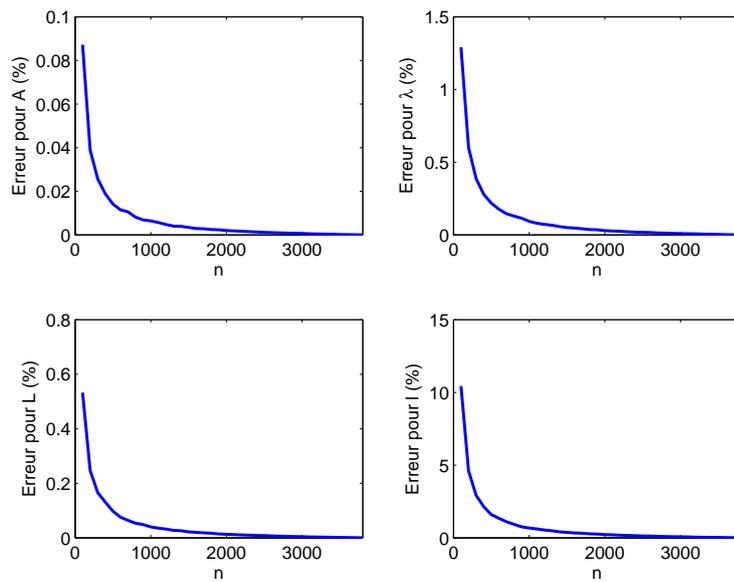


Figure B.14 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CD

3 Granulométrie des chènevottes

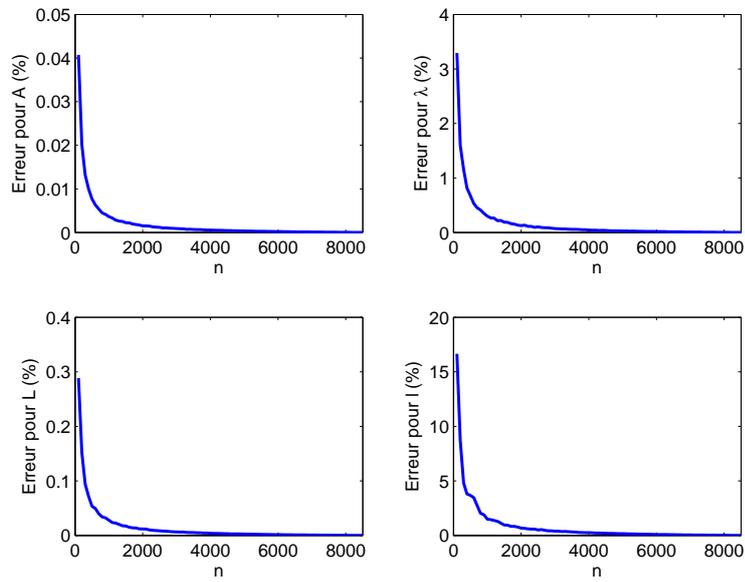


Figure B.15 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CE

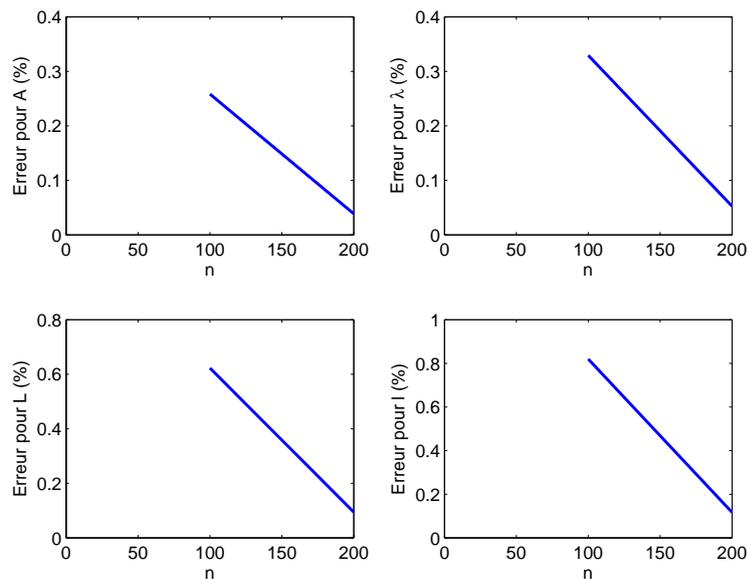


Figure B.16 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CB1

Annexe B : Compléments de caractérisation

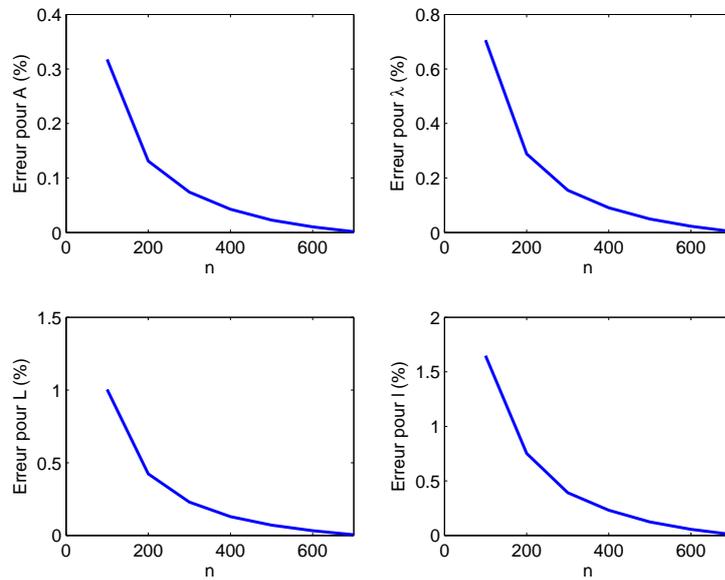


Figure B.17 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CB2

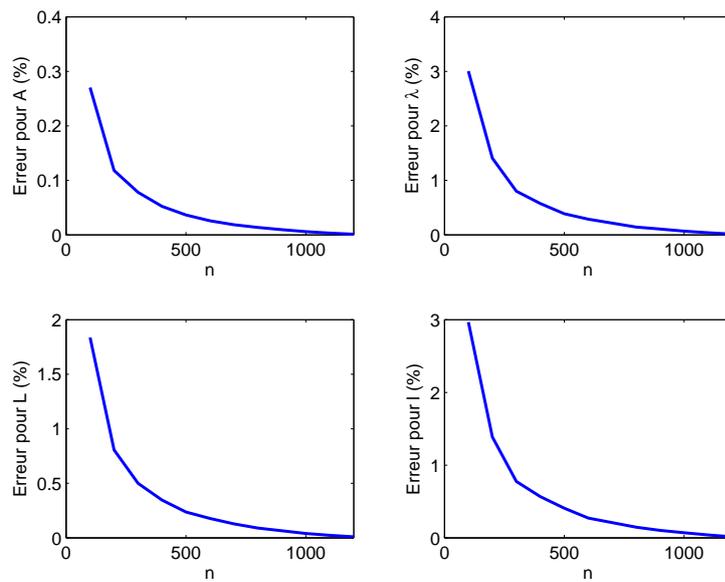


Figure B.18 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CB3

3 Granulométrie des chènevottes

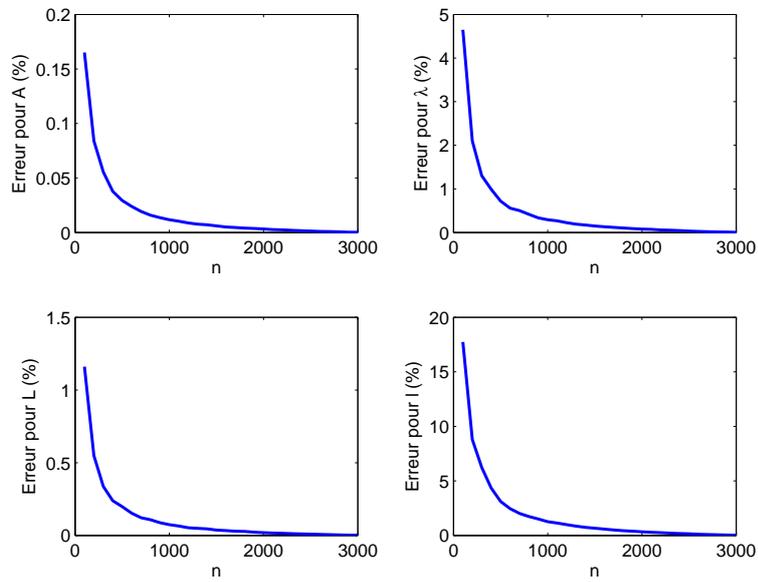


Figure B.19 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CB4

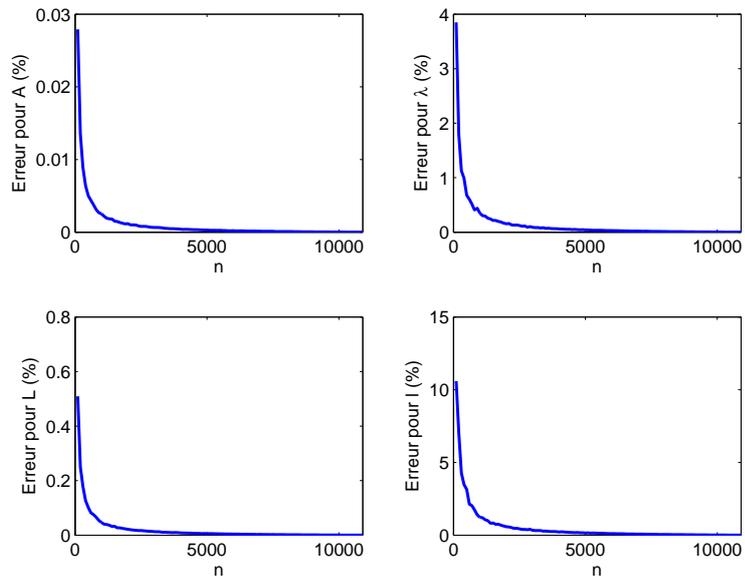


Figure B.20 – Convergence de la granulométrie de la chènevotte CB5

4 Cinétique de séchage des liants

Les échantillons de liant ont été stockés dans une salle à température et humidité relative contrôlées ($T=20\text{ °C}$ et $HR=50\%$) jusqu'à stabilisation de leur masse volumique. Les masses volumiques ont été relevées afin d'observer les cinétiques de séchage des liants, représentées sur la Figure B.21.

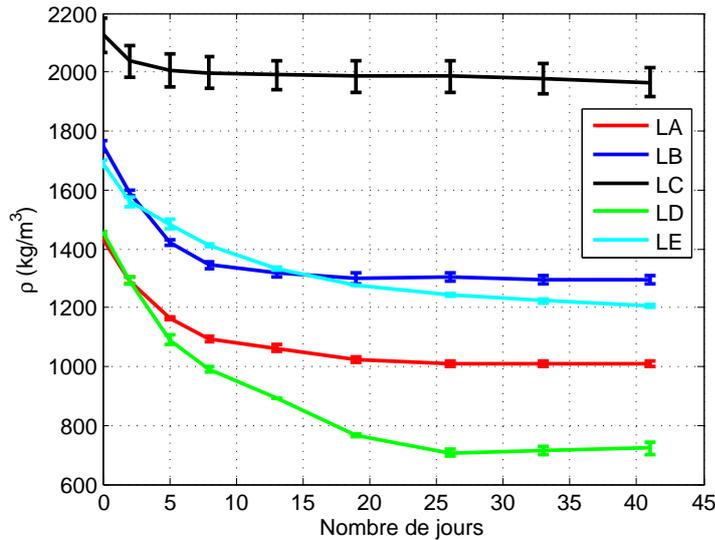


Figure B.21 – Cinétiques de séchage des liants

Ces évolutions peuvent être expliquées à partir des analyses présentées par [Garnier 2000], mettant en évidence trois phases :

1. Séchage à vitesse constante au niveau de la partie extérieure de l'échantillon appelée "zone diffusionnelle". La partie située à l'intérieur de l'échantillon reste caractérisée par la teneur en eau initiale.
2. Décroissance de la vitesse de séchage avec l'apparition d'une "zone sèche" en surface de l'échantillon, migration de la zone diffusionnelle et disparition progressive de la "zone à teneur en eau initiale".
3. Disparition complète de la "zone à teneur en eau initiale" et propagation de la "zone sèche".

Les travaux effectués par [Cerezo 2005] ont mis en évidence des temps de séchage beaucoup plus longs, de l'ordre de deux ans, pour des liants T70 et Tradichanvre (composés essentiellement de chaux aérienne et hydraulique). L'accélération du processus de séchage dans notre cas est due à la plus faible dimension des échantillons, et au retrait du moule dès le début de la prise du matériau, une semaine après fabrication.

On constate que les liants se distinguent clairement par leurs masses volumiques initiales et stabilisées, et par la durée de stabilisation de ces dernières. En particulier, la première phase de séchage est beaucoup plus rapide pour le clinker LC que pour la chaux aérienne LD. La densité de tous les liants se stabilise après 25 jours, à l'exception de celle du liant LE.

De plus, on constate en observant les écarts-types de la Figure B.21 que les échantillons fabriqués à partir d'un même liant présentent des variations de masse volumique inférieure à 5%, ce qui témoigne de l'homogénéité du matériau.

5 Cinétique de séchage des bétons de chanvre

Pour les formulations "5L3C", un suivi de masse a été réalisé afin de connaître davantage la cinétique de séchage des échantillons, pour pouvoir par la suite anticiper le temps de séchage après fabrication. De telles mesures ont déjà été réalisées par [Cerezo 2005] sur des éprouvettes de dimensions plus importantes (diamètre de 16 cm et hauteur de 32 cm).

Après fabrication, les échantillons ont donc été stockés 2 mois dans une salle climatisée à $T=20\text{ °C}$ et $HR=50\%$. Leur cinétique de séchage s'est déroulée en deux temps : durant les 20 premiers jours, ils ont été stockés horizontalement, la face supérieure jouant le rôle de surface d'évaporation, puis au delà de cette durée, ils ont été partiellement démoulés et posés sur la tranche afin de laisser les deux faces accessibles à l'air. L'évolution de la masse volumique moyenne des échantillons est présentée à la Figure B.22.

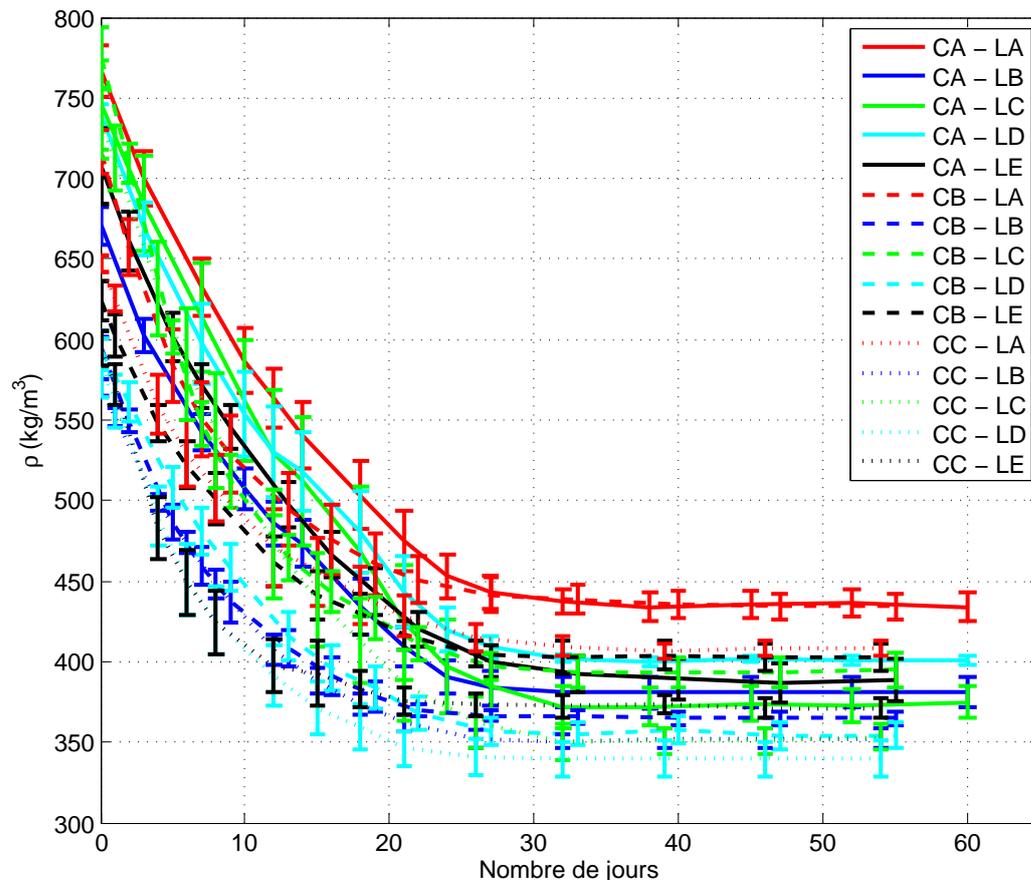


Figure B.22 – Cinétique de séchage des bétons de chanvre "5L3C"

Annexe B : Compléments de caractérisation

Le graphe montre que les échantillons de même nature présentent des masses volumiques relativement proches, puisque les écart-types sont faibles devant les masses volumiques moyennes observées ($< 4\%$). On peut constater que les échantillons stabilisés ont des masses volumiques comprises entre 340 et 440 $kg.m^{-3}$. Les liants LA et LC confèrent aux bétons de chanvre les plus grandes masses volumiques, autour de 400 $kg.m^{-3}$, et les bétons fabriqués avec les trois autres liants sont plus légers, d'une densité de l'ordre de 380 $kg.m^{-3}$.

Pour ce qui est de l'évolution de la masse volumique, on constate qu'elle se fait selon une décroissance quasiment linéaire pendant une vingtaine de jours, ce qui correspond à la phase de séchage à vitesse constante décrite par [Garnier 2000]. Au delà de ces vingt jours, les densités convergent rapidement vers leur valeur stabilisée. Ainsi, au bout de trente jours, la masse volumique est quasiment constante. De même que pour les échantillons de liant, la rapidité de ce séchage est due à la faible épaisseur des échantillons, et au fait que leurs deux faces aient été exposées à l'air libre dans la salle climatisée.

Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique

6 Propriétés acoustiques des chènevottes

6.1 Technique de caractérisation choisie

6.1.1 Choix du tube de Kundt

Plusieurs tubes de Kundt étant à notre disposition au laboratoire, des essais ont été réalisés avec chacun d'entre eux afin de voir lequel était le plus adapté à la caractérisation des chènevottes. Ce test a été réalisé pour une masse volumique apparente intermédiaire (127 kg.m^{-3}) et sur deux granulométries de chènevottes. Les tubes testés sont le tube B&K Type 4106 de 10 cm de diamètre et un tube développé par le laboratoire de 46 mm de diamètre. Etant données leurs dimensions, ils sont respectivement caractérisés par des gammes fréquentielles de $[50 ; 2000 \text{ Hz}]$ et de $[200 ; 4300 \text{ Hz}]$. Les résultats sont présentés Figure [C.1](#).

On voit sur ces courbes que dans le cas de la fine granulométrie, les courbes d'absorption coïncident. Ce n'est plus le cas avec la granulométrie de référence de plus grande dimension. Les différences observées dans le deuxième cas proviennent d'un état surcomprimé de la chènevotte par rapport à l'état de référence qu'elle aurait en absence de contraintes radiales au niveau de la périphérie de l'échantillon. Concrètement, les conditions limites imposées par le tube en périphérie de l'échantillon se traduisent par une augmentation de la résistivité des échantillons. Cela est prouvé par les valeurs de résistivité mesurées avec des porte-échantillons de différentes dimensions, suivant la norme ISO 9053, et présentées Tableau [C.1](#).

Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique

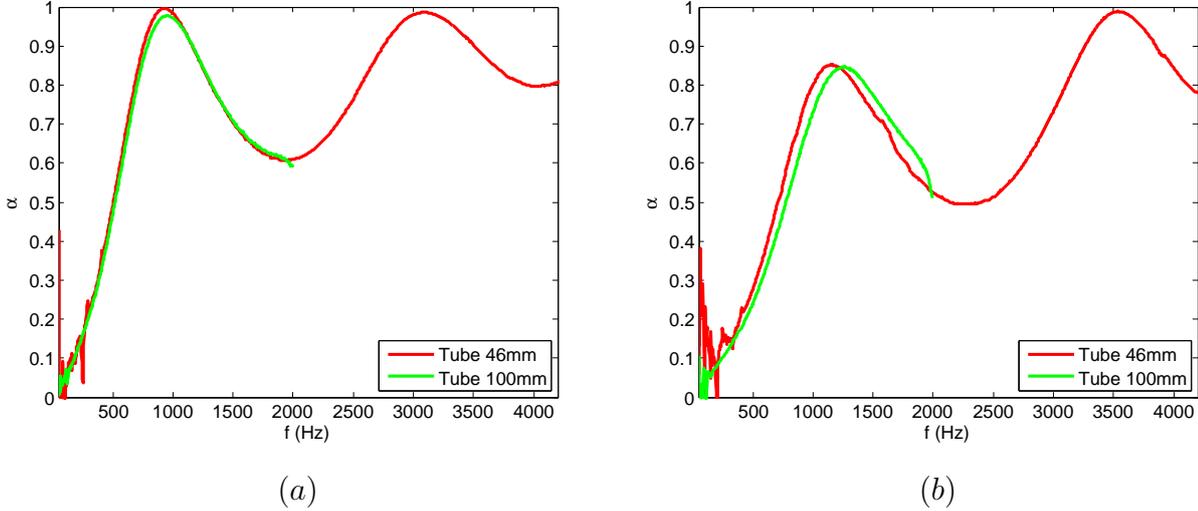


Figure C.1 – Absorption de la chènevotte en fonction du diamètre du tube de Kundt : Granulométrie fine (a) et Granulométrie de référence (b)

Granulométrie	ρ ($kg.m^{-3}$)	Résistivité 46 mm ($N.m^{-4}.s$)	Résistivité 100 mm ($N.m^{-4}.s$)
Référence	102	2500 ± 200	2267 ± 200
	153	11000 ± 600	5783 ± 500
	102	5000 ± 400	4317 ± 200
Fine	127	10800 ± 500	7000 ± 300
	153	23400 ± 600	14800 ± 600

Tableau C.1 – Résistivité mesurée en fonction du diamètre du porte-échantillon

En effet, les résistivités évaluées dans le porte échantillon de 46 mm de diamètre sont presque deux fois plus importantes, pour les fortes densités apparentes que celles évaluées avec le porte échantillon de 100 mm.

Cette observation a déjà été faite par différents auteurs cités dans [Nemec & Levec 2005], qui expliquent que l'existence d'une paroi autour de particules en vrac implique d'une part une perturbation de la distribution radiale de porosité, et d'autre part, une contribution non-négligeable de cette paroi à la résistivité dans le cas d'un ratio faible entre la dimension du tube et celles des particules. Pour s'affranchir de ce biais expérimental, les auteurs préconisent l'utilisation d'un récipient au moins 10 fois plus grand que le diamètre des particules.

En conséquence, les caractérisations des chènevottes ont été réalisées sur le tube de 10 cm de diamètre. Cela a pour inconvénient de réduire significativement la gamme fréquentielle mais s'est avéré indispensable pour assurer la fiabilité des mesures.

6.1.2 Méthode de caractérisation

Plusieurs méthodes ont été développées afin de caractériser les propriétés intrinsèques des matériaux en tube d'impédance. Ces méthodes ont été appliquées pour une configuration de chènevotte CA de masse volumique 130 kg.m^{-3} , dans l'optique de les comparer et de choisir la plus optimale en termes de facilité et rapidité de mise en œuvre, traitement de données, et précision. Les résultats obtenus sont donnés Figure C.2.

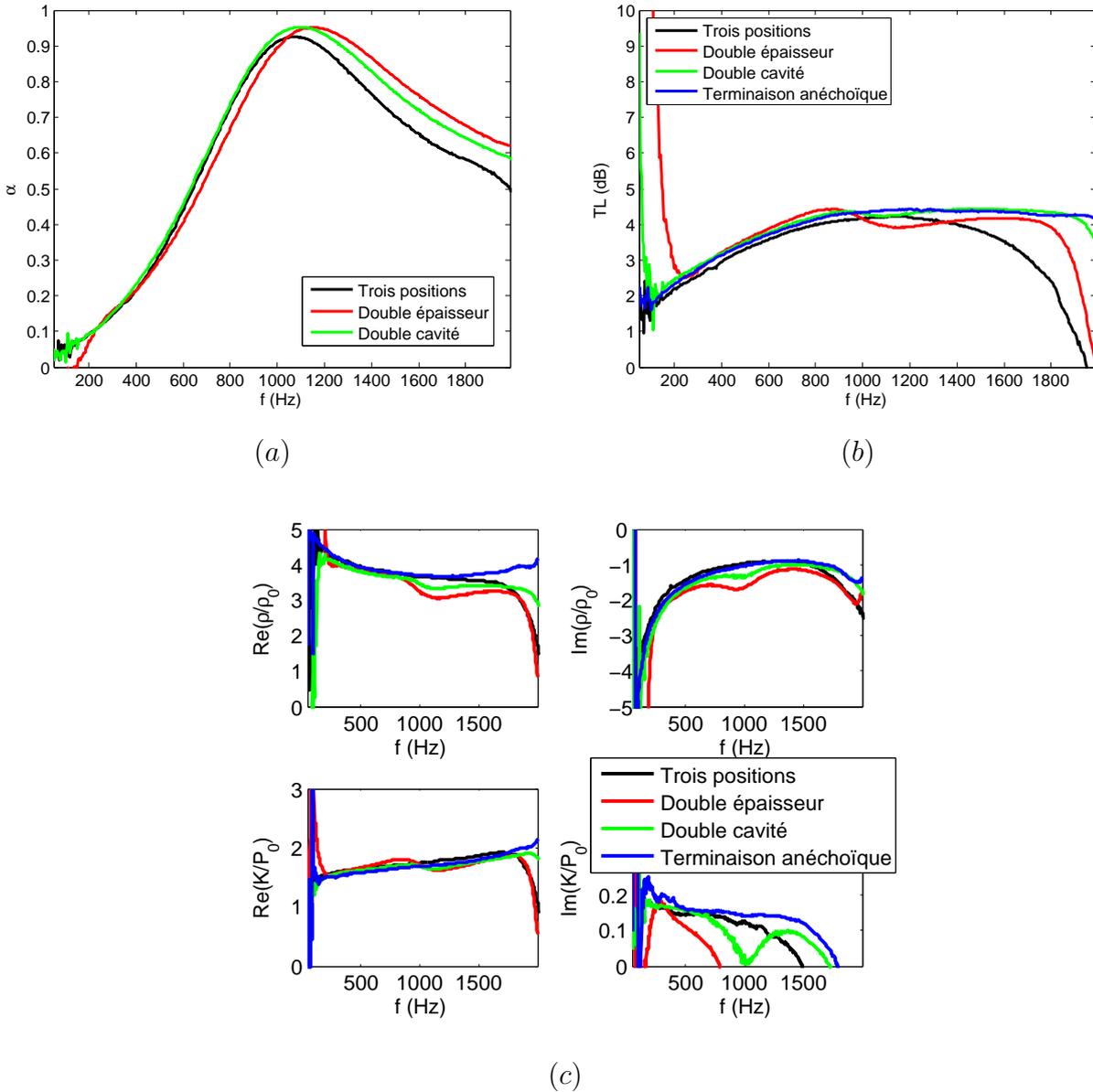


Figure C.2 – Absorptions acoustiques (a), indices d'affaiblissement acoustique (b), densités dynamiques et modules d'incompressibilité dynamiques (c) mesurés en fonction de la méthode de caractérisation

Les courbes d'absorptions obtenues sont présentées pour les trois méthodes pour lesquelles

Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique

l'échantillon repose sur une terminaison rigide. Les différences observées proviennent d'un arrangement différent d'une caractérisation à une autre, l'échantillon étant re-préparé pour chaque mesure.

Au niveau des propriétés intrinsèques et de l'indice d'affaiblissement, on remarque que les quatre méthodes testées donnent des résultats relativement proches. Toutefois, les mesures réalisées avec les méthodes "Double épaisseur" et "Double plénum" sont caractérisées par une résonance située autour de 1000 Hz . La mesure en "Double épaisseur" donne de plus des résultats douteux aux fréquences inférieures à 300 Hz (Indice d'affaiblissement et partie réelle du module d'incompressibilité dynamique décroissants). Pour finir, aux fréquences supérieures à 1500 Hz , toutes les méthodes semblent être affectées par une seconde résonance.

Au vu de ces résultats, et après avoir pris conscience des manipulations à réaliser pour chaque méthode, il a finalement été décidé d'utiliser la méthode "Trois microphones". Ses principaux avantages sont les suivants :

- Rapidité et simplicité de mise en œuvre (pas besoin de grille, le matériau étant déposé directement sur la terminaison rigide),
- Caractérisation d'un seul échantillon (ce n'est pas le cas de la méthode "Double épaisseur"),
- Mesure de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement sans déplacer l'échantillon,
- Précision des résultats.

6.1.3 Choix de l'épaisseur optimale pour les caractérisations

L'épaisseur a un impact sur les propriétés acoustiques, en particulier sur l'absorption et l'indice d'affaiblissement de la chènevotte et des bétons de chanvre. Ce n'est normalement pas le cas pour leur densité dynamique et leur module d'incompressibilité, ces grandeurs étant intrinsèques aux matériaux. Toutefois, les méthodes de caractérisation s'avèrent plus ou moins précises en fonction des caractéristiques des échantillons, et leur épaisseur doit être correctement choisie afin de permettre une caractérisation de qualité.

Une chènevotte CA de masse volumique 127 kg.m^{-3} a donc été testée sous différentes épaisseurs comprises entre 1 et 20 cm . Les résultats sont présentés sur la Figure C.3.

On constate en premier lieu que l'épaisseur agit de manière très sensible sur la chènevotte dont l'absorption passe de 0,1 à 0,9 et l'indice d'affaiblissement passe de 1 à 10 dB en moyenne sur la plage de fréquences considérée. On note également sur les quatre grandeurs présentées une résonance autour de 800 Hz . Cette dernière provient de la terminaison utilisée pour ces mesures, trop souple, ce qui a été corrigé pour les mesures suivantes.

De plus, en ce qui concerne la densité dynamique et le module d'incompressibilité dynamique mesurés, plusieurs autres observations peuvent être faites. Premièrement, on constate que, pour les faibles épaisseurs (typiquement pour 1 et 2 cm), les mesures sont plus bruitées et sortent de l'enveloppe constituée par les autres mesures. Deuxièmement, on remarque que les courbes sont caractérisées par une seconde résonance, qui est translatée vers les basses fréquences à mesure que l'épaisseur augmente. Cette résonance a une origine mécanique et correspond au phénomène de compression décrit par l'Equation V.2.

Finalement, seules les mesures sur des épaisseurs de 3, 4 et 5 cm donnent des résultats satisfaisants, étant peu affectés par cette résonance, tout en étant suffisamment épais pour éviter le bruitage. C'est l'épaisseur de 5 cm qui a été retenue, afin d'assurer une représentativité maximale de la chènevotte, et de limiter l'effet de la distribution axiale de porosité, qui peut se ressentir sur des épaisseurs allant jusqu'à 8 fois le rayon équivalent des particules d'après

[Montillet & Coq 2001] (Ce critère est donc respecté si on considère une épaisseur de 0,5 mm pour les particules).

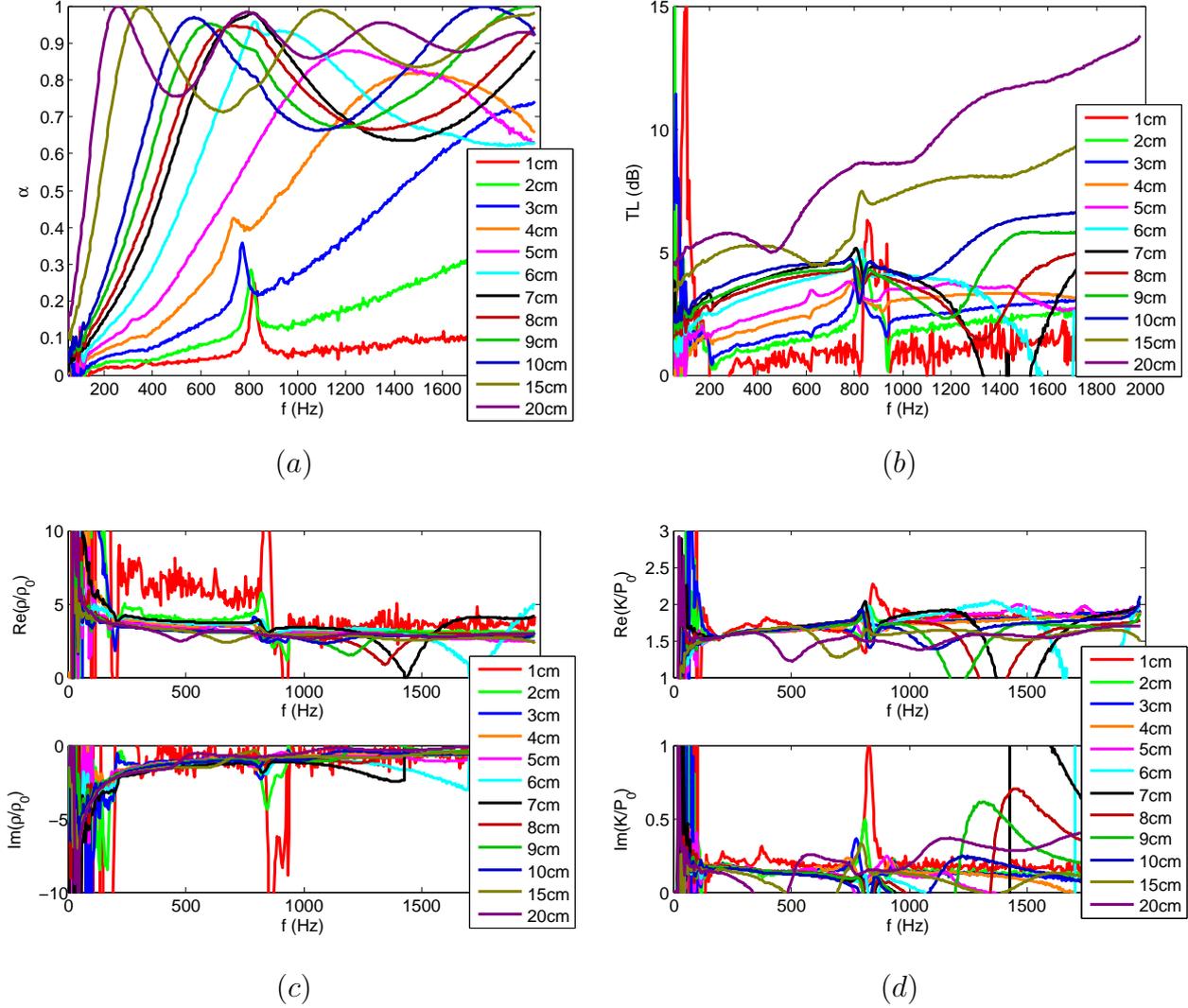


Figure C.3 – Effet de l'épaisseur sur l'absorption acoustique (a), l'indice d'affaiblissement acoustique (b), la densité dynamique (c) et le module d'incompressibilité dynamique (d) de la chènevotte

6.1.4 Positionnement des particules

On a abordé lors de la présentation des chènevottes caractérisées pendant la thèse, au Chapitre II, Section 2.5, l'influence du positionnement des particules sur la résistivité des chènevottes. Cet effet a également été observé sur les propriétés acoustiques en testant des échantillons de chènevotte de 130 kg.m^{-3} préparés suivant les 4 protocoles P1 à P4 décrits Chapitre II, Section 2.5. La comparaison des protocoles P1 à P3 est réalisée sur une épaisseur de 5 cm à la Figure C.4 (a), tandis que le protocole P4 est comparé au protocole P1 pour une épaisseur de 10 cm à la Figure C.4 (b).

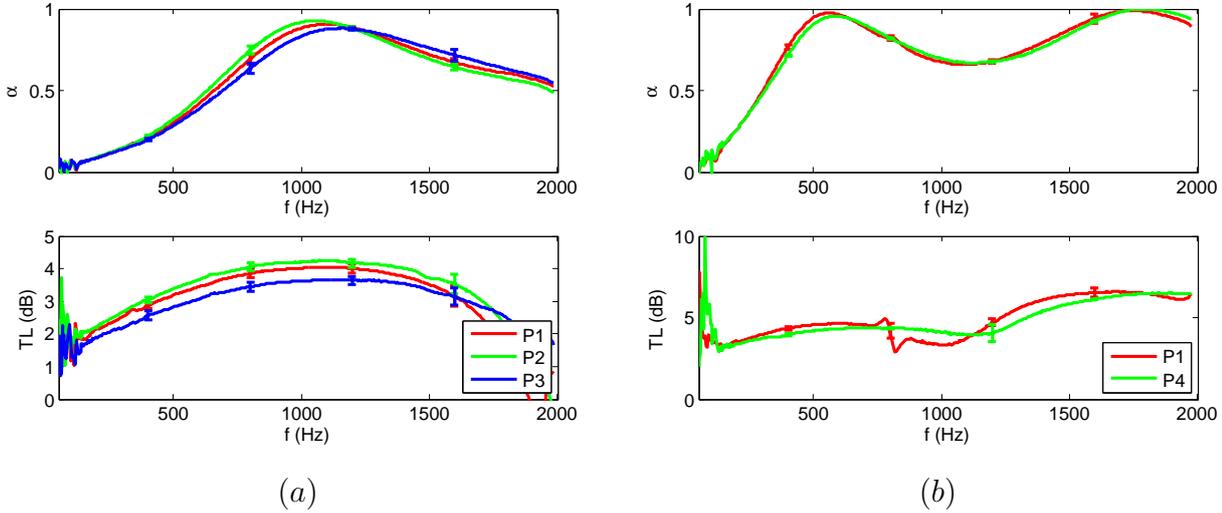


Figure C.4 – Effet de la mise en œuvre des particules sur les propriétés acoustiques de la chènevotte sur 5 cm (a) et 10 cm (b)

On constate que le mode de mise en œuvre des particules se répercute sur les propriétés acoustiques, notamment au niveau de la pente de l'absorption aux basses fréquences. Toutefois, étant données les différences observées sur les résistivités, on aurait pu s'attendre à des variations plus marquées.

6.1.5 Effet de la teneur en eau de la chènevotte dans les conditions de laboratoire

Comme cela a été discuté dans la Section 2.2.1 du Chapitre I, la chènevotte peut être caractérisée par une teneur massique en eau importante, allant jusqu'à 10% pour de fortes humidités relatives. Nous avons donc réalisé une série de mesures afin de connaître l'impact de cette teneur en eau sur les propriétés acoustiques.

A cette fin, un échantillon de chènevotte CA de 50 g, stocké dans les conditions de laboratoire (HR \approx 35% et T \approx 24 °C), a été caractérisé au tube de Kundt dans son état d'équilibre, et dans un état déshydraté.

L'état déshydraté a été obtenu après 8 jours passé en étuve à 50 °C, afin d'assurer l'évaporation de toute l'eau libre présente dans le matériau. Suite à cet étuvage, la masse de l'échantillon est passée de 50,0 g à 46,8 g, ce qui correspond à une teneur en eau initiale de 6,4 %. Les propriétés acoustiques ont été caractérisées sur les échantillons de référence et déshydraté à trois reprises en remettant en place la chènevotte, dans le tube de 10 cm et sur une même épaisseur de 5 cm, ce qui correspond à une masse volumique de 127 kg.m⁻³ pour l'état de référence. Les résultats sont présentés sur la Figure C.5.

On constate que l'absorption acoustique et l'indice d'affaiblissement acoustique sont légèrement plus faibles dans le cas de la chènevotte déshydratée. Les différences les plus importantes restent inférieures à 0,05 en termes d'absorption et à 0,5 dB pour l'indice d'affaiblissement, et sont donc de l'ordre de grandeur des incertitudes de mesure liées à la variabilité d'arrangement des particules.

A ce titre, sachant qu'au cours de nos expériences, la différence de teneur en eau entre

6 Propriétés acoustiques des chènevottes

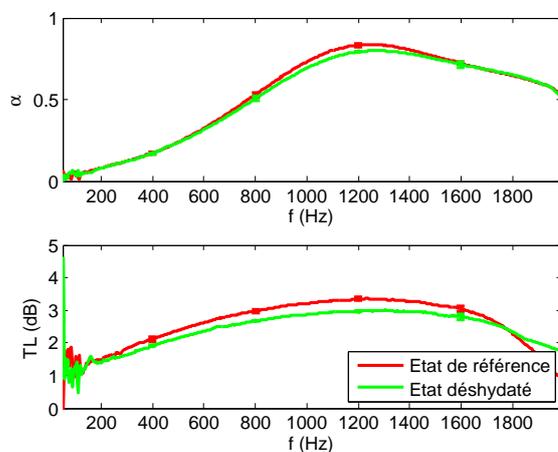


Figure C.5 – Effet de la teneur en eau sur les propriétés acoustiques de la chènevotte

deux chènevottes est rarement (voire jamais) aussi élevée que dans ce cas, nous avons décidé de ne pas prendre ce facteur en considération et de comparer des chènevottes de même masse volumique non déshydratées. Cela présente l'avantage de caractériser les échantillons dans un état représentatif des conditions *in situ*.

6.2 Propriétés acoustiques caractérisées

6.2.1 En fonction de la masse volumique apparente

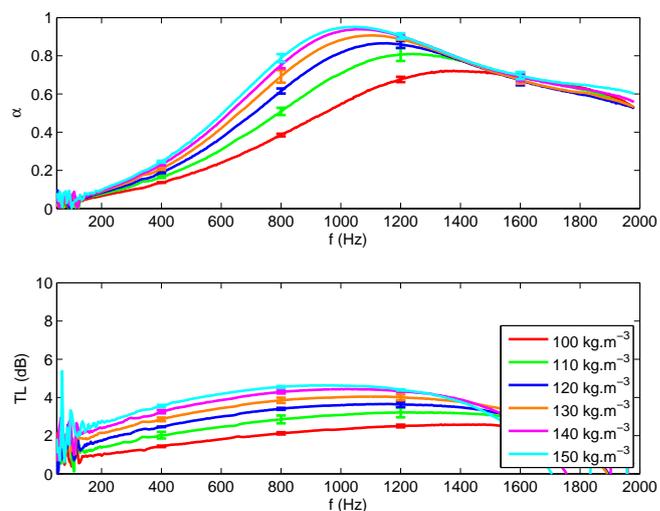


Figure C.6 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CA en fonction de sa masse volumique apparente

Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique

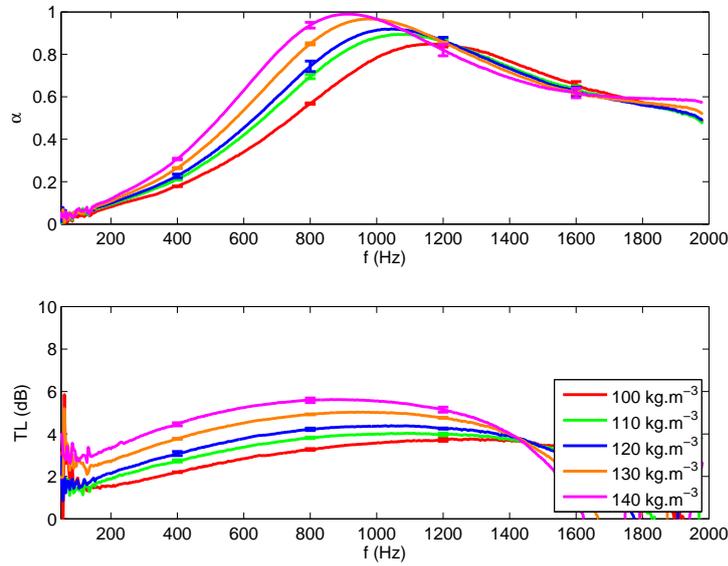


Figure C.7 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CB en fonction de sa masse volumique apparente

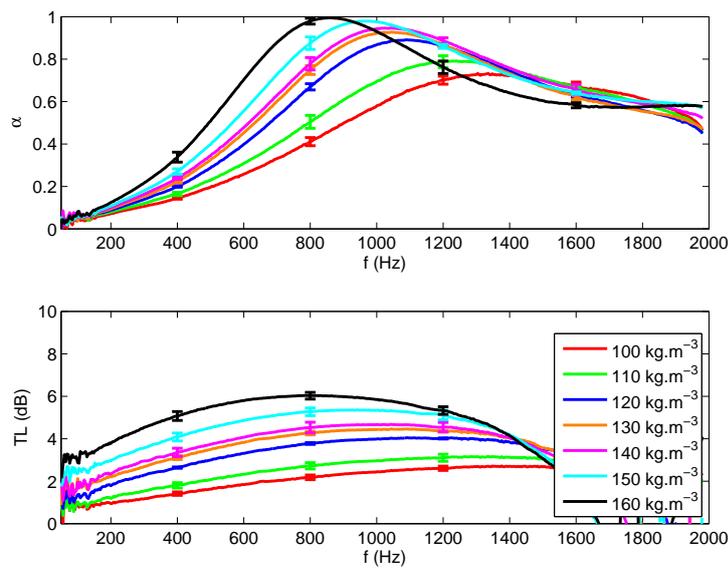


Figure C.8 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CC en fonction de sa masse volumique apparente

6 Propriétés acoustiques des chènevottes

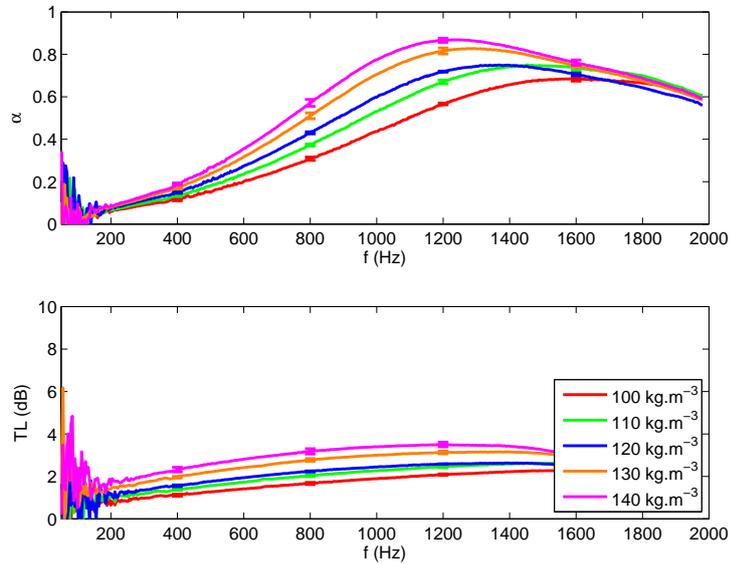


Figure C.9 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CD en fonction de sa masse volumique apparente

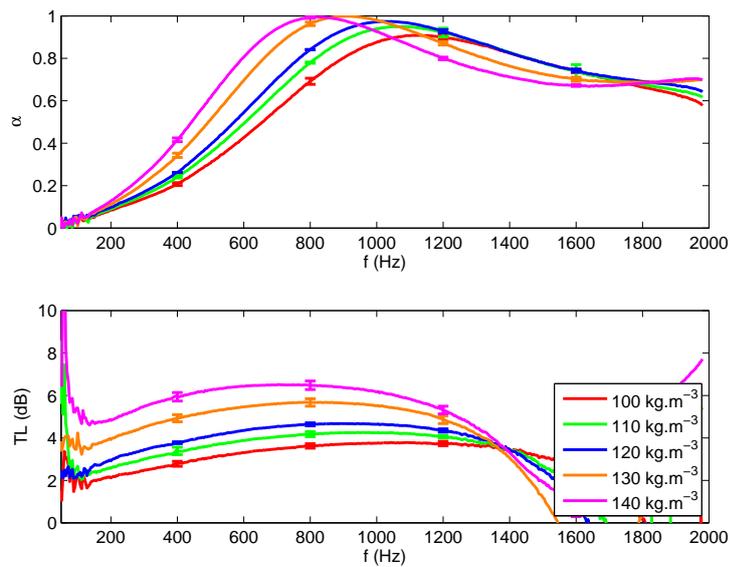


Figure C.10 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CE en fonction de sa masse volumique apparente

Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique

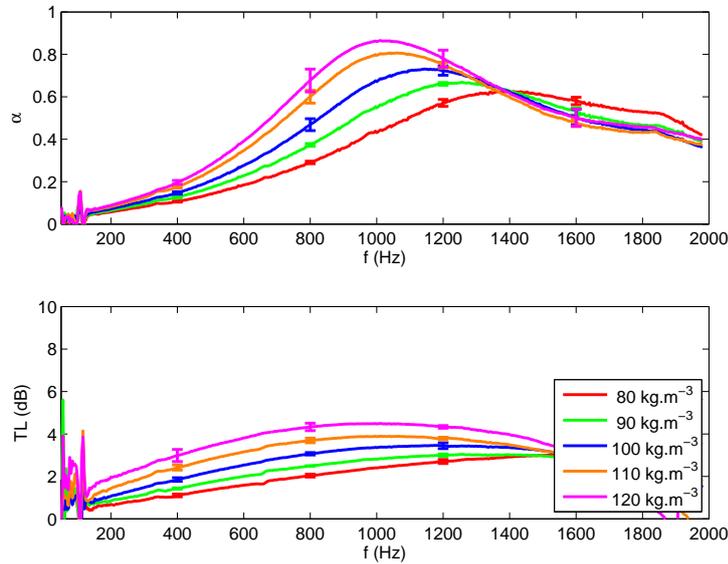


Figure C.11 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CB1 en fonction de sa masse volumique apparente

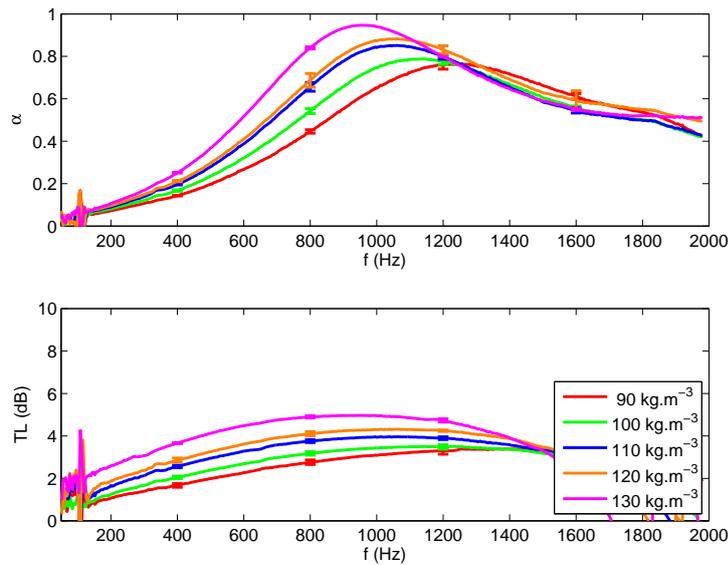


Figure C.12 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CB2 en fonction de sa masse volumique apparente

6 Propriétés acoustiques des chènevottes

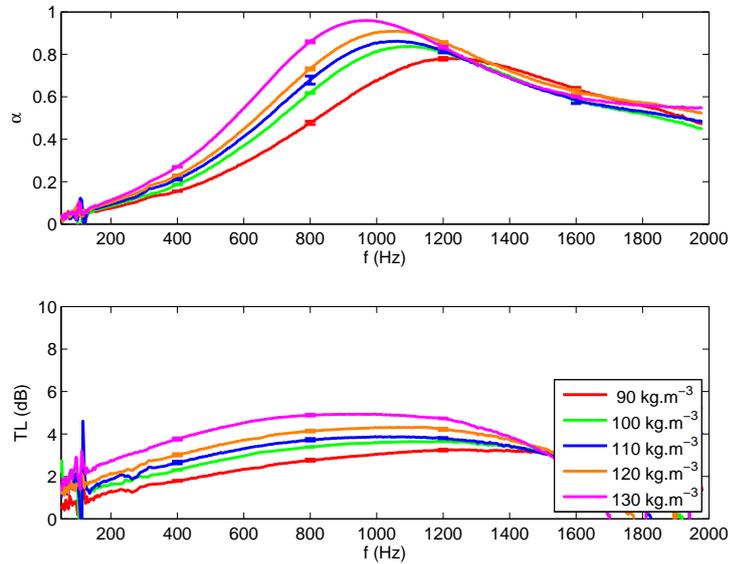


Figure C.13 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CB3 en fonction de sa masse volumique apparente

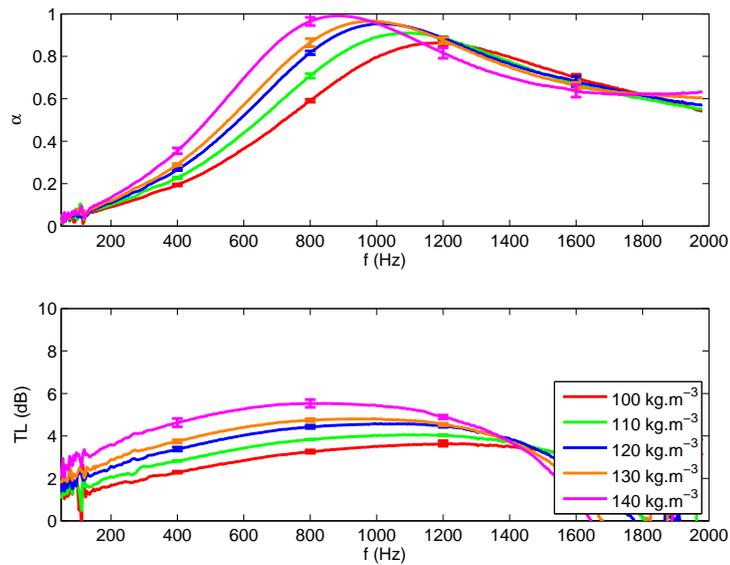


Figure C.14 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CB4 en fonction de sa masse volumique apparente

Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique

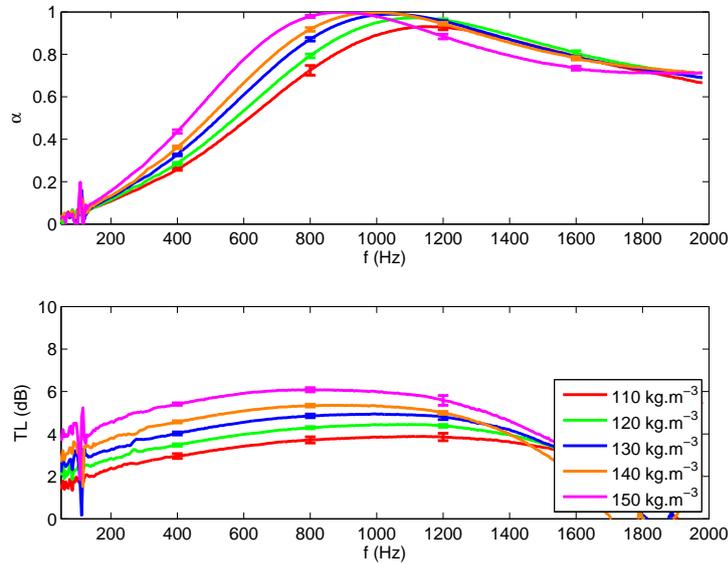


Figure C.15 – Propriétés acoustiques de la chènevotte CB5 en fonction de sa masse volumique apparente

6.2.2 En fonction de l'origine de la chènevotte et de sa granulométrie

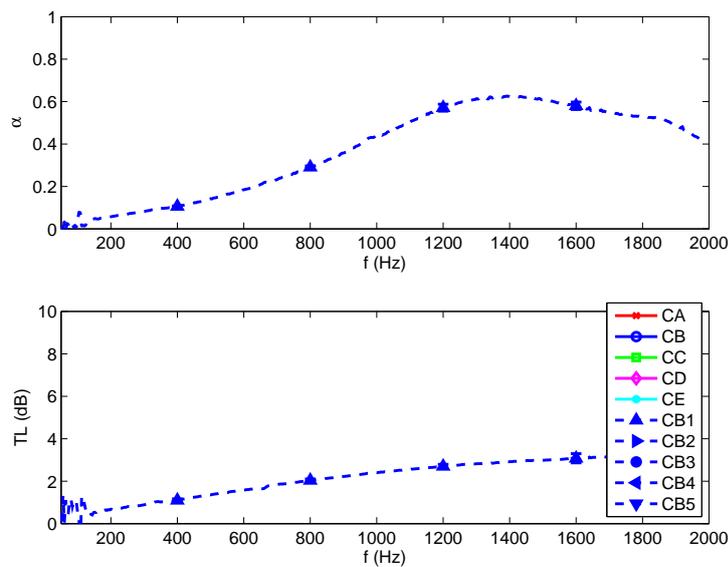


Figure C.16 – Propriétés acoustiques des chènevottes pour $\rho = 80 \text{ kg.m}^{-3}$

6 Propriétés acoustiques des chènevottes

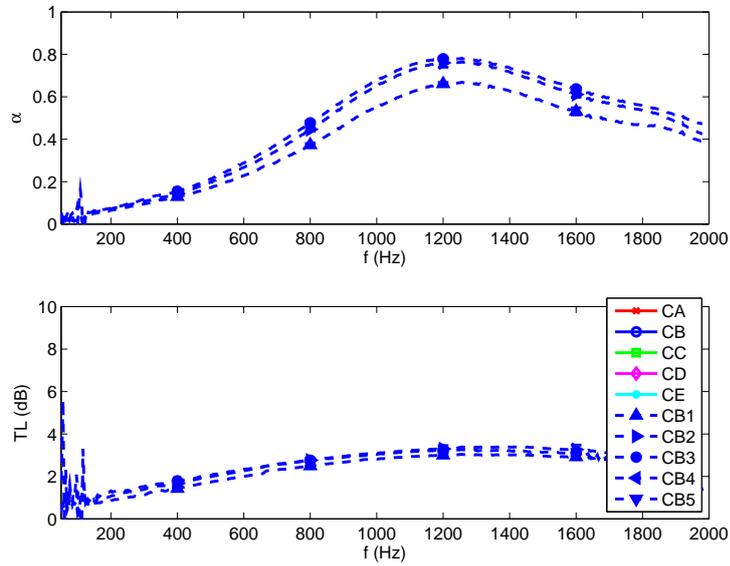


Figure C.17 – Propriétés acoustiques des chènevottes pour $\rho = 90kg.m^{-3}$

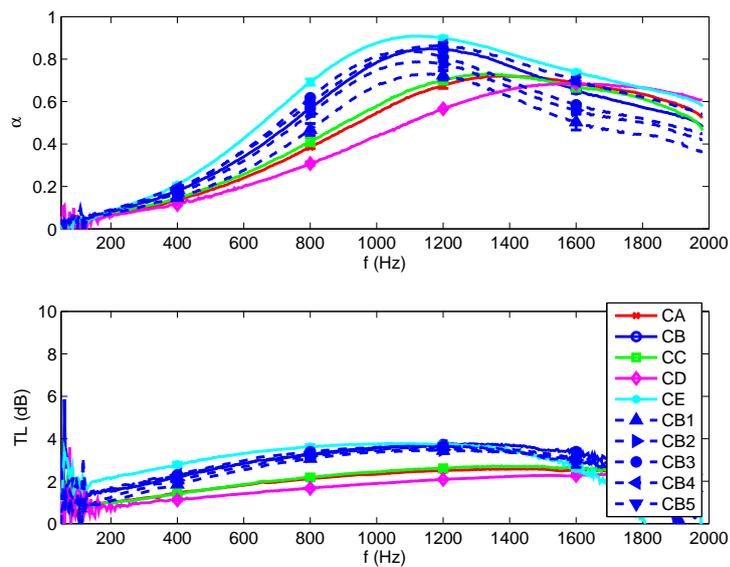


Figure C.18 – Propriétés acoustiques des chènevottes pour $\rho = 100kg.m^{-3}$

Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique

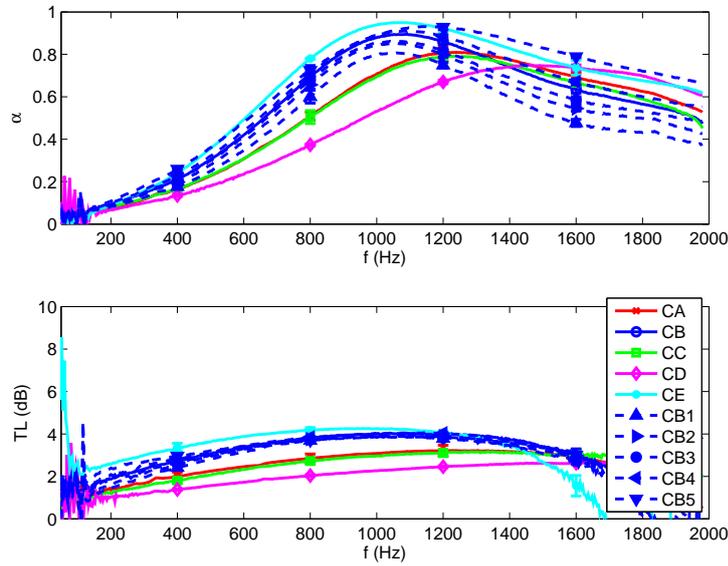


Figure C.19 – Propriétés acoustiques des chènevottes pour $\rho = 110 \text{kg.m}^{-3}$

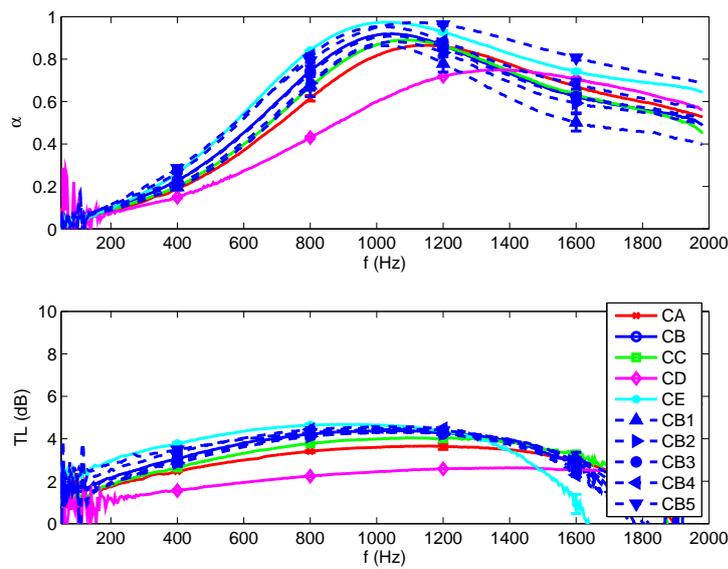


Figure C.20 – Propriétés acoustiques des chènevottes pour $\rho = 120 \text{kg.m}^{-3}$

6 Propriétés acoustiques des chènevottes

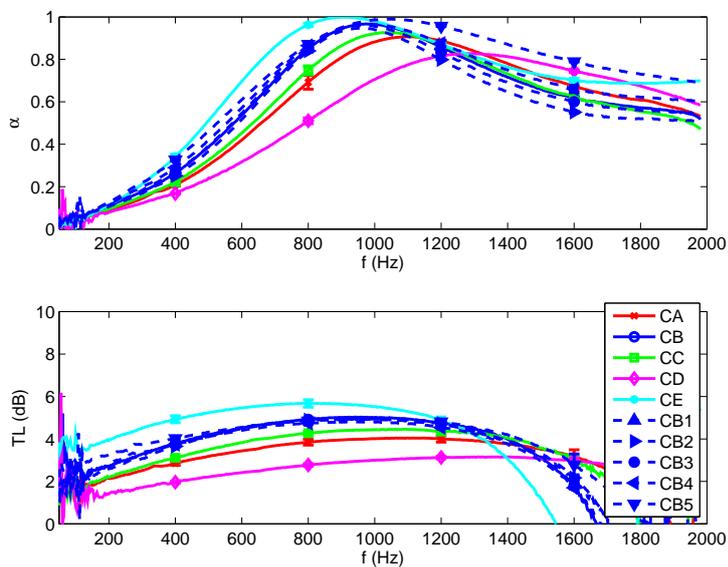


Figure C.21 – Propriétés acoustiques des chènevottes pour $\rho = 130\text{kg.m}^{-3}$

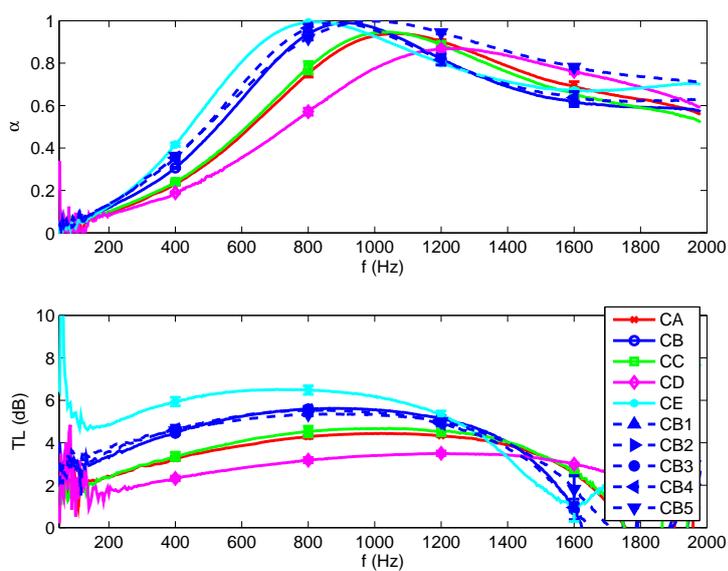


Figure C.22 – Propriétés acoustiques des chènevottes pour $\rho = 140\text{kg.m}^{-3}$

Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique

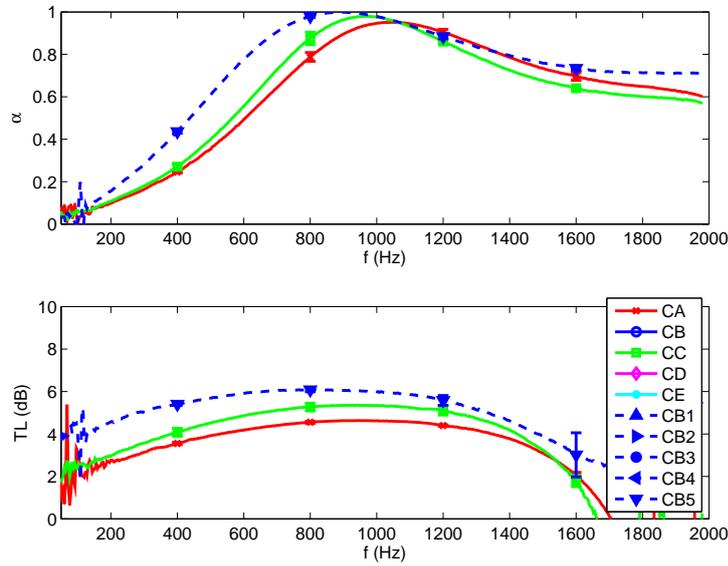


Figure C.23 – Propriétés acoustiques des chènevottes pour $\rho = 150 \text{kg.m}^{-3}$

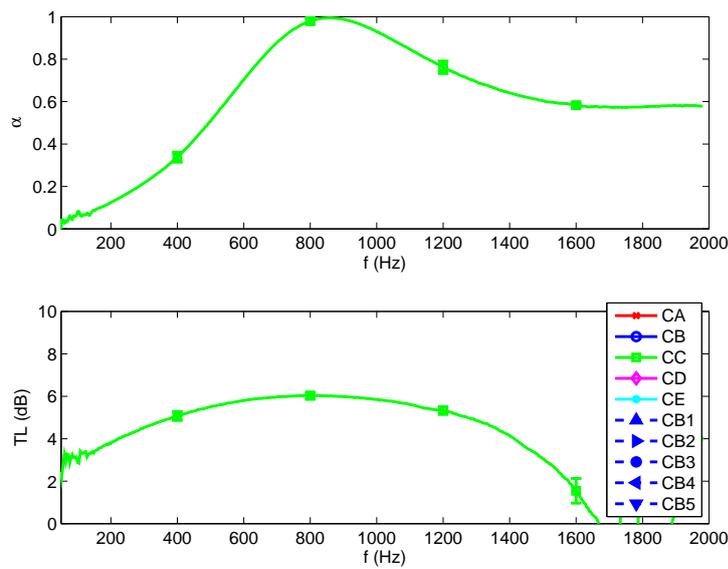


Figure C.24 – Propriétés acoustiques des chènevottes pour $\rho = 160 \text{kg.m}^{-3}$

7 Propriétés acoustiques des bétons de chanvre

7.1 Effet du liant

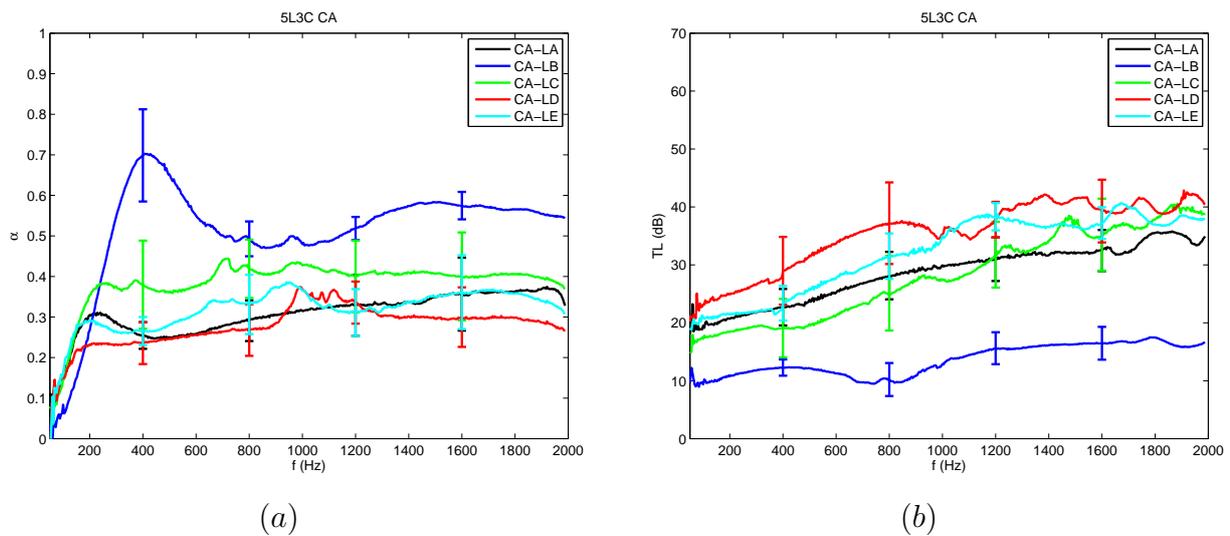


Figure C.25 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec de la chènevotte CA

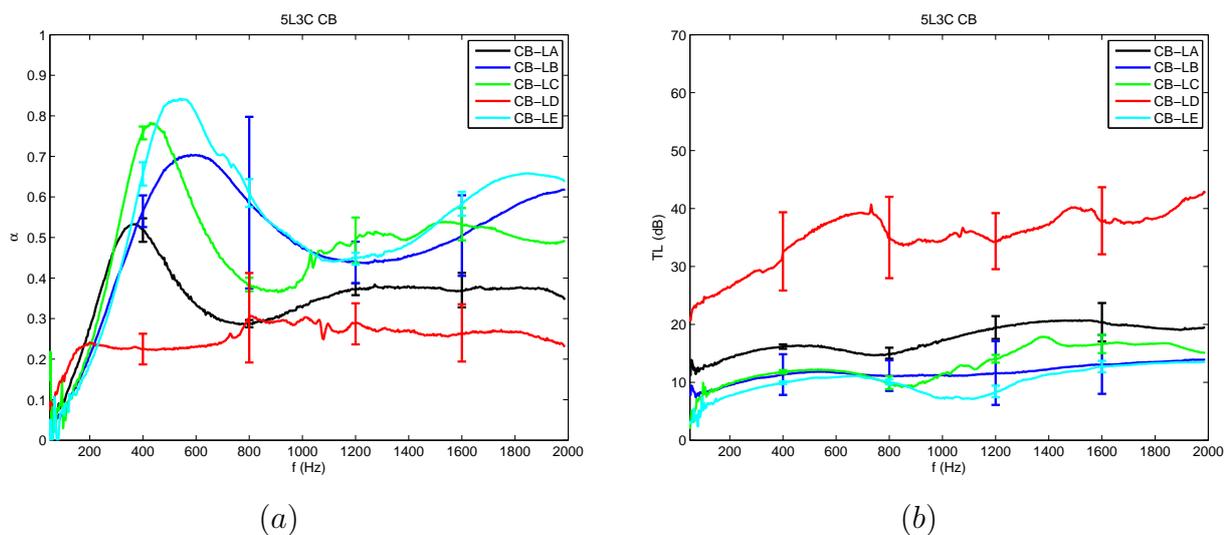


Figure C.26 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec de la chènevotte CB

Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique

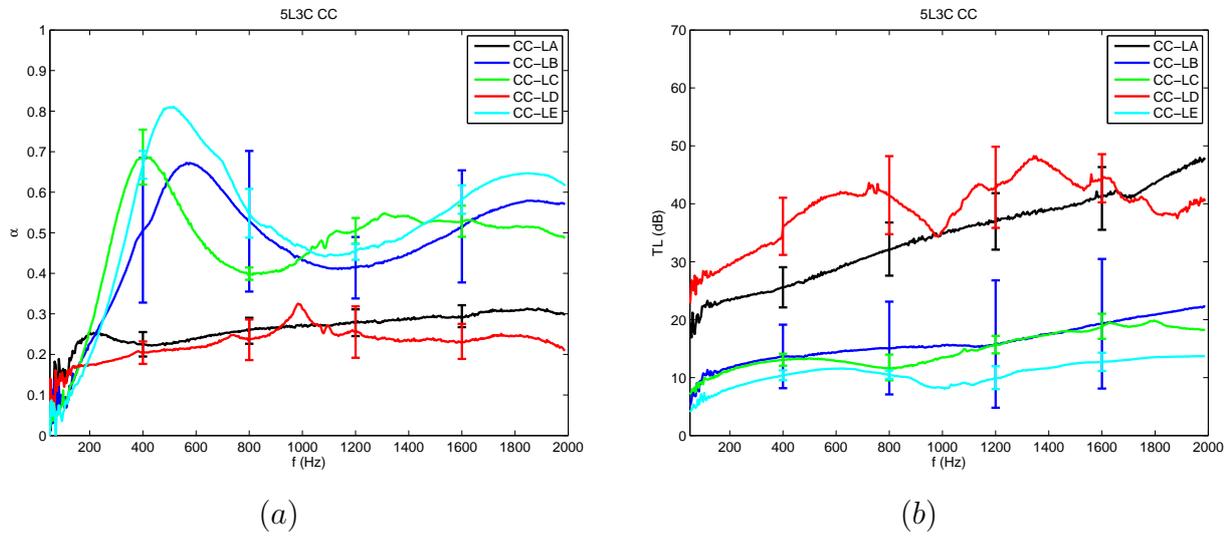


Figure C.27 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec de la chènevotte CC

7.2 Effet de la chènevotte

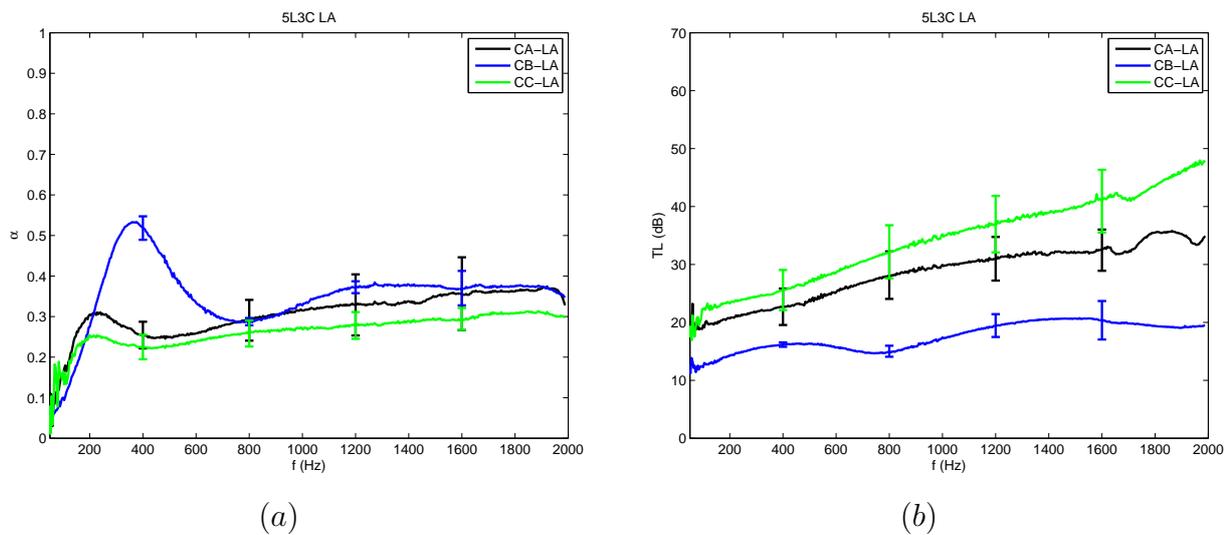


Figure C.28 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec du liant LA

7 Propriétés acoustiques des bétons de chanvre

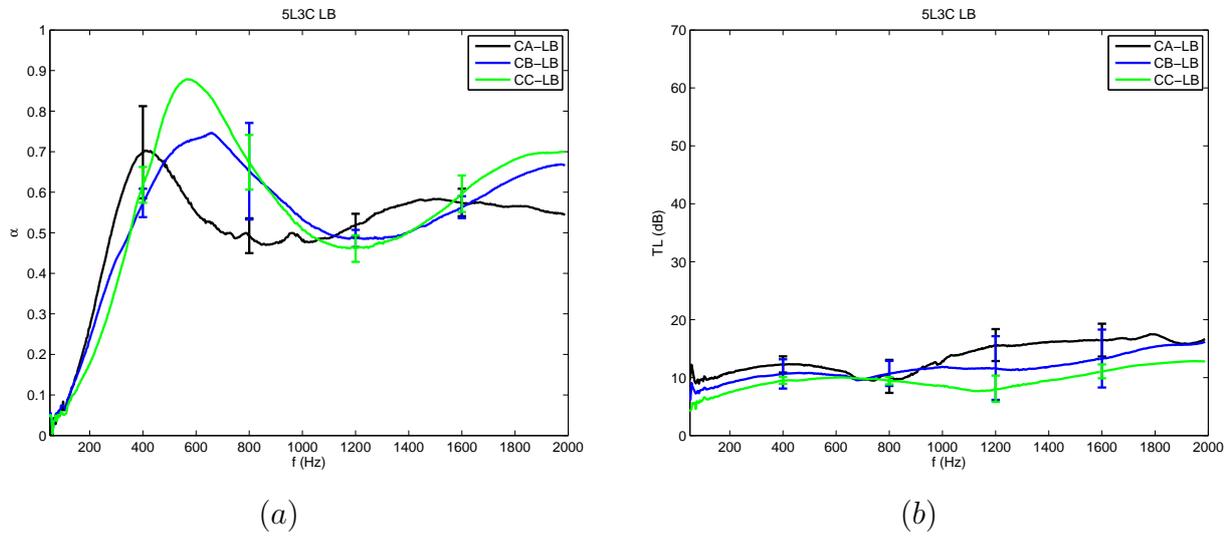


Figure C.29 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec du liant LB

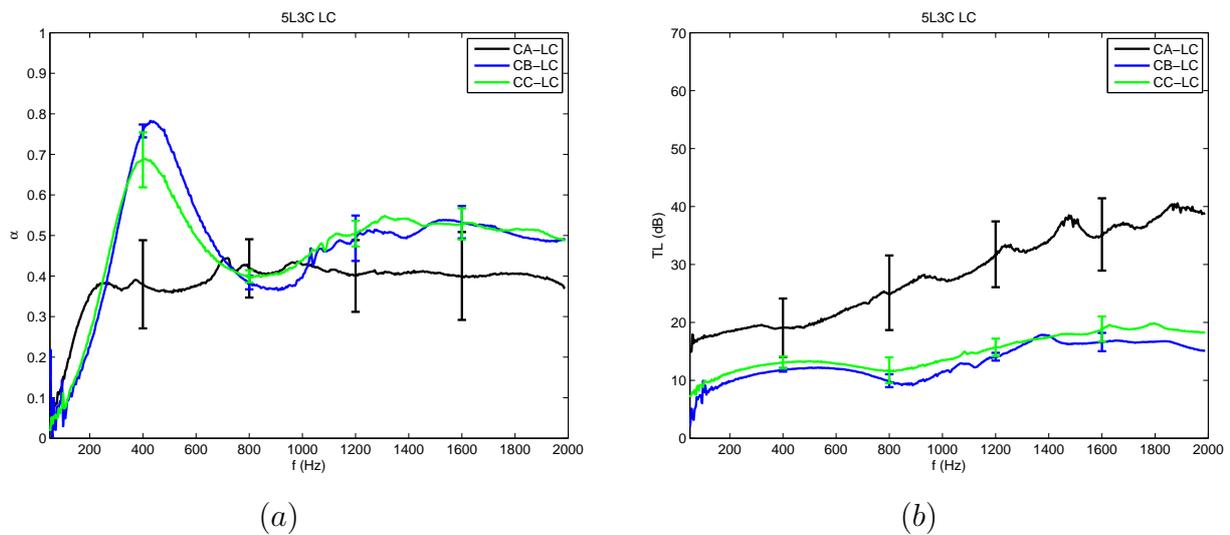


Figure C.30 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec du liant LC

Annexe C : Compléments de caractérisation acoustique

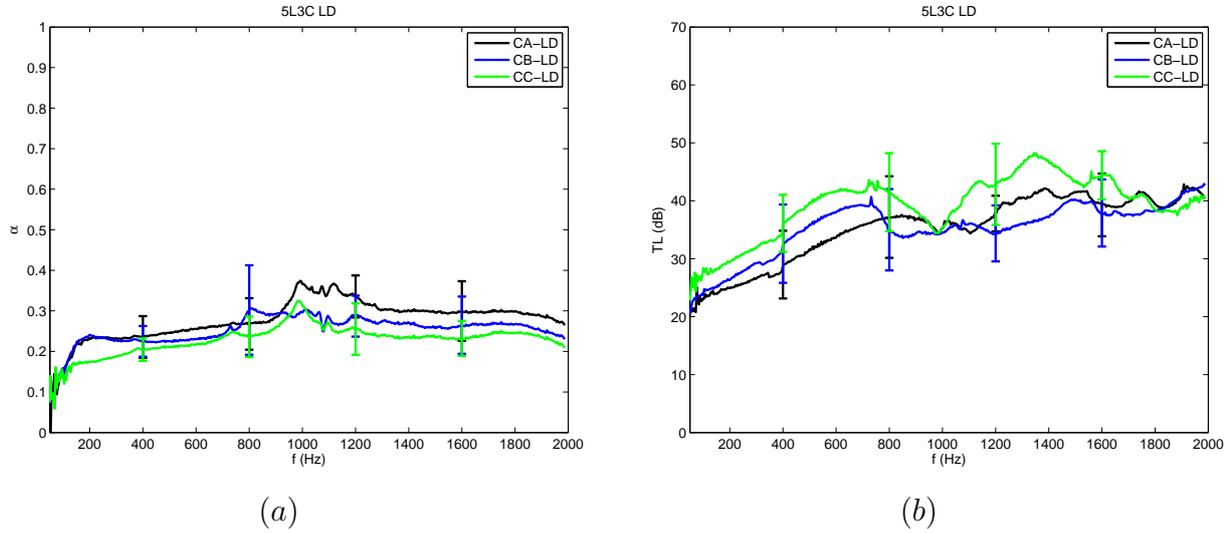


Figure C.31 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec du liant LD

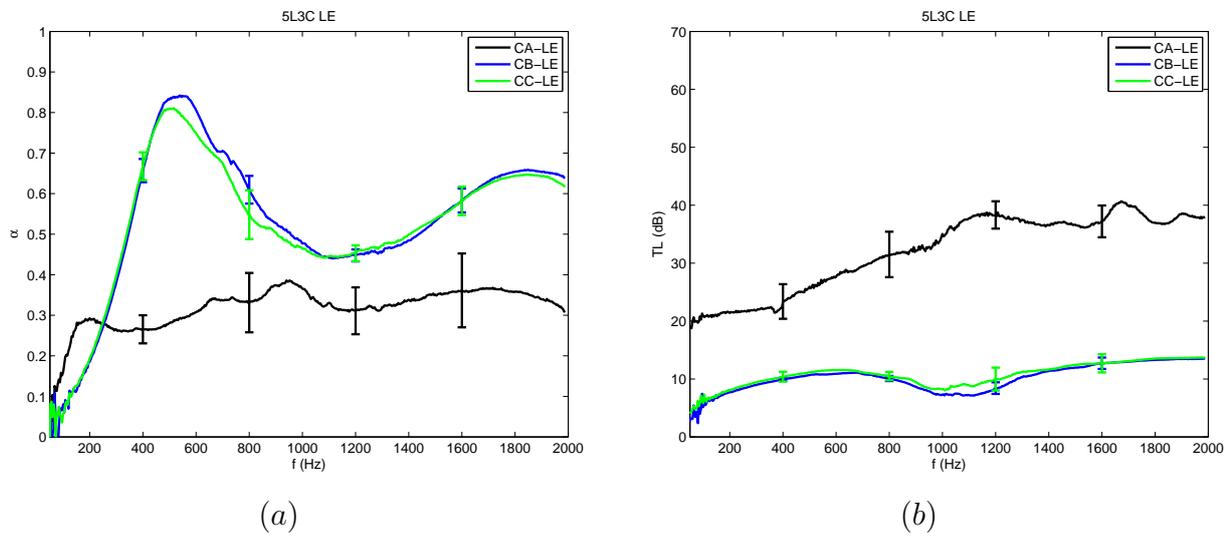


Figure C.32 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec du liant LE

Annexe D : Compléments de modélisation

8 Propriétés acoustiques des laines végétales

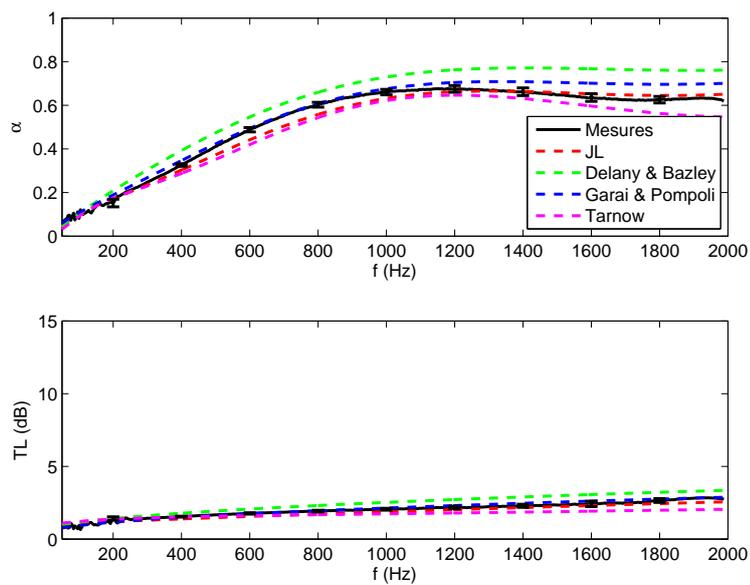


Figure D.1 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Chanvre vert

Annexe D : Compléments de modélisation

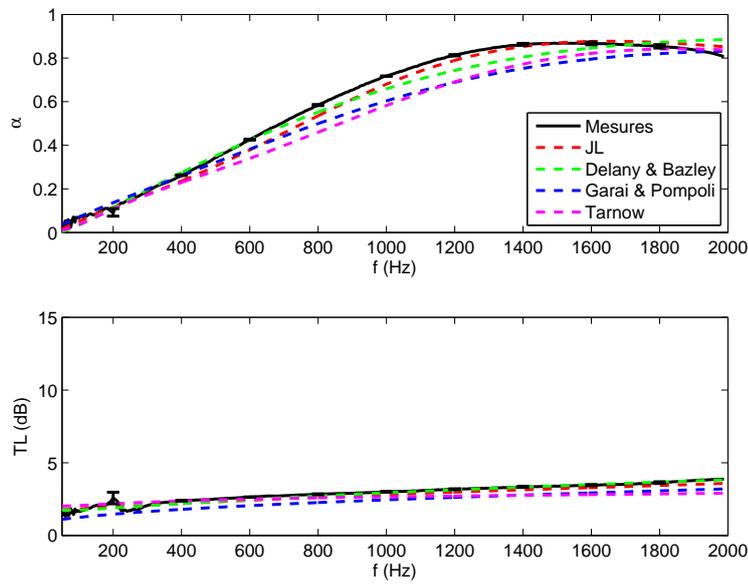


Figure D.2 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Chanvre-chênevotte (5cm)

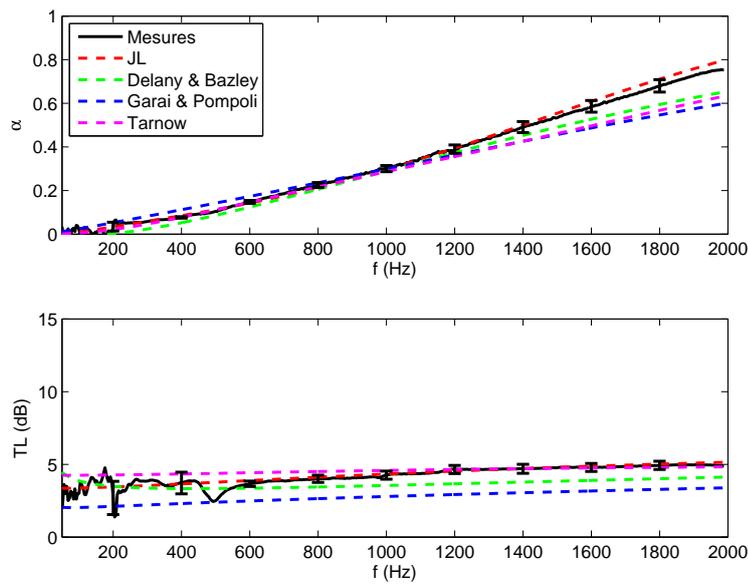


Figure D.3 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Chanvre-chênevotte (2cm)

8 Propriétés acoustiques des laines végétales

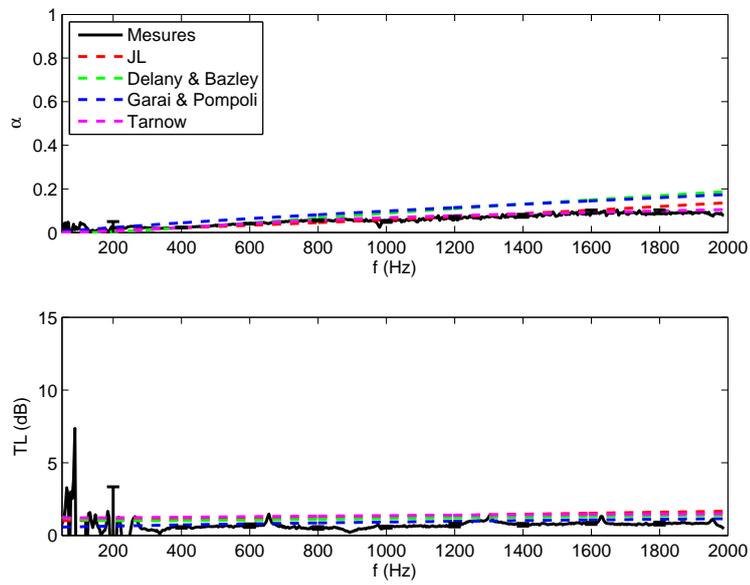


Figure D.4 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Chanvre aiguilleté

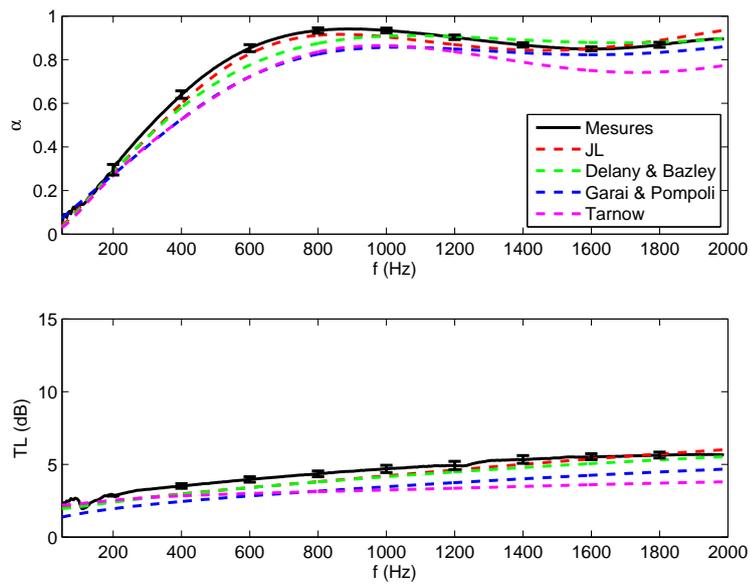


Figure D.5 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Chanvre-lin

Annexe D : Compléments de modélisation

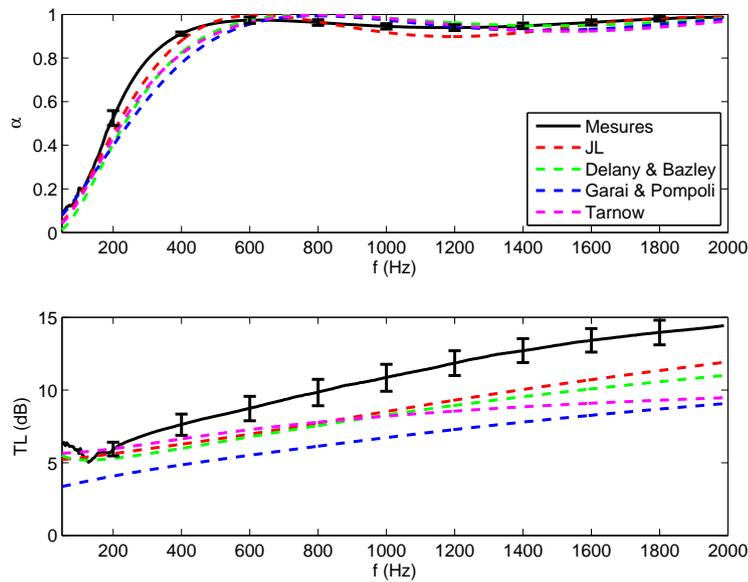


Figure D.6 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Lin (10cm)

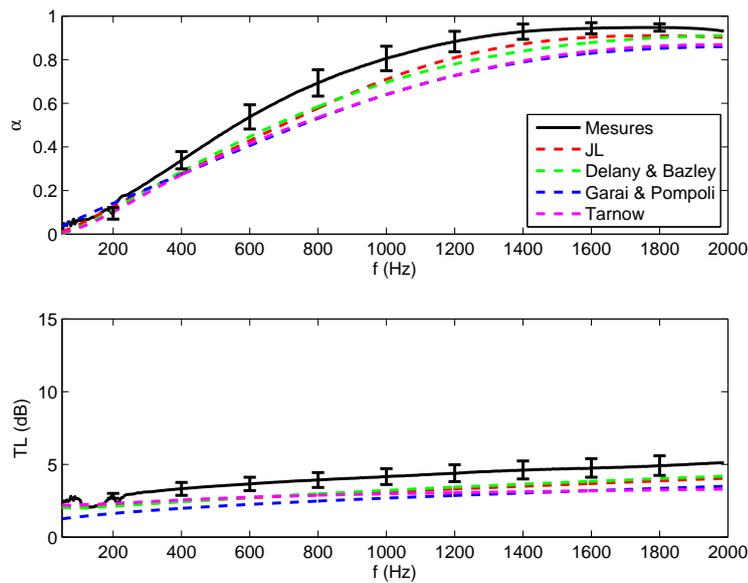


Figure D.7 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Lin (5cm)

8 Propriétés acoustiques des laines végétales

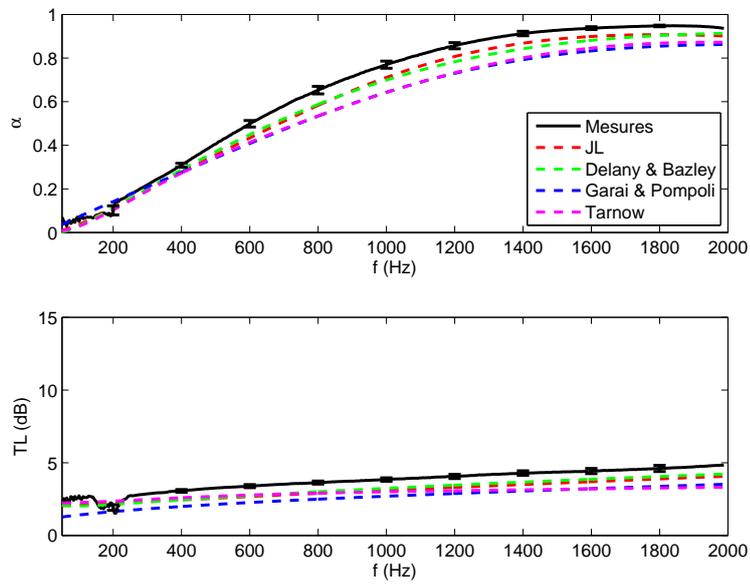


Figure D.8 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Lin traité au feu (5cm)

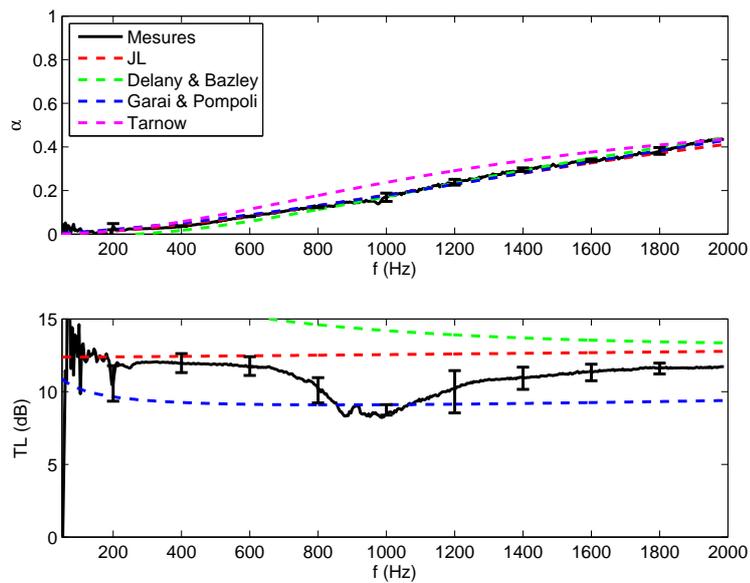


Figure D.9 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Lin aiguilleté

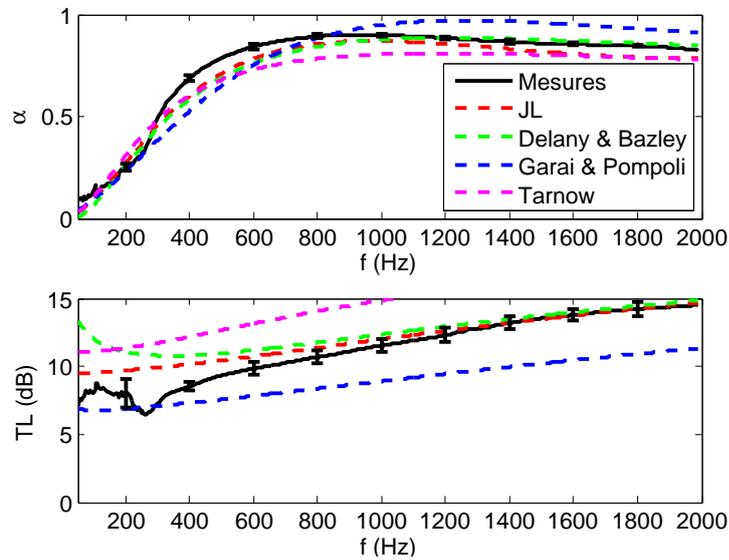


Figure D.10 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Lin tricouche

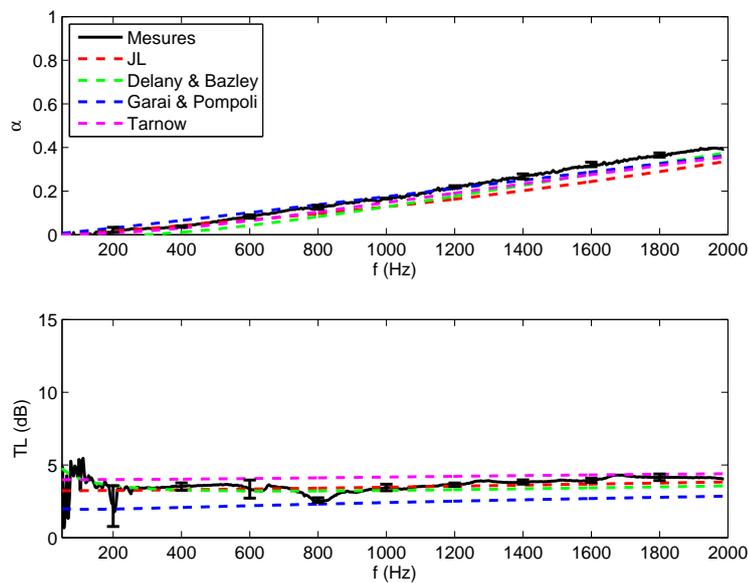


Figure D.11 – Modélisation de l'absorption acoustique et de l'indice d'affaiblissement de l'échantillon Jute

9 Propriétés acoustiques des chènevottes

Dans le Chapitre IV, les propriétés acoustiques de la chènevotte ont été modélisées en s'appuyant sur la théorie de la double porosité, et sur les modèles développés par [Johnson *et al.* 1987, Zwikker *et al.* 1941]. La chènevotte est toutefois un matériau granulaire, et nous avons constaté

grâce aux résultats du Chapitre II, Section 2.2, que les dimensions des particules de chanvre suivent de très près des lois de distribution log-normales.

Nous avons donc entrepris de comparer trois approches différentes permettant de modéliser ce matériau :

1. L'approche présentée dans le Chapitre IV,
2. Le modèle granulaire développé par [Boutin & Geindreau 2010] pour des granulats sphériques de même dimension,
3. Le modèle proposé par [Horoshenkov *et al.* 2007] pour des matériaux présentant une distribution log-normale de taille de pores.

A partir de nos résultats expérimentaux, et des prédictions obtenues grâce à ces trois approches, nous avons montré que la forme des particules et la distribution de taille de pores sont deux paramètres fondamentaux qui gouvernent les propriétés acoustiques de la chènevotte. En outre, nos analyses ont mis en évidence des relations entre les distributions de taille de particules et les distributions de taille de pores.

La démarche adoptée et les résultats obtenus sont présentés dans l'article suivant, actuellement en cours de review pour la revue *JASA*.

The effect of particle shape and size distribution on the acoustical properties of a mixture of hemp particles

Philippe Glé,^{a)} Emmanuel Gourdon,^{b)} and Laurent Arnaud
DGCB, ENTPE - Université de Lyon, 69518 VAULX-EN-VELIN Cedex, FRANCE.

Kirill-V. Horoshenkov and Amir Khan
School of Engineering, University of Bradford, BRADFORD BD7 1DP, UK.

Hemp concrete is an attractive alternative to traditional materials used in building construction. It has a very low environmental impact and it is characterized by high thermal insulation. The shape of hemp aggregates is parallelepiped and individual hemp particles in a mixture can be organized in a plurality of ways to create a considerable proportion of open pores with a complex connectivity pattern which acoustical properties have never been examined systematically. Therefore, this paper is focused on the fundamental understanding of the relations between the particle shape and size distribution, pore size distribution, and the acoustical properties of the resultant porous material mixture. The sound absorption and the transmission loss of various hemp aggregates is characterized using laboratory experiments and three theoretical models. These models are used to relate the particle size distribution to the pore size distribution. It is shown that the shape of particles and the pore size distribution are two main characteristics which control the observed acoustical behavior.

PACS numbers: 43.55.Ev

I. INTRODUCTION

There is an increasing demand for alternative materials for building insulation. These are needed to meet more stringent requirements for limited environmental impact and enhanced material multifunctionality. Hemp concrete is a mix of shredded hemp stems (shiv) and a suitable binder, which can come in the form of lime mortar or ordinary cement paste. Its life cycle analysis¹ shows that 1 m² of hemp concrete layer having a width of 26 cm encased in a timber frame stores 35.5 kg of carbon dioxide over a reference period of 100 years. As a result, this material has a very high ecological value. Hemp concrete features very interesting mechanical^{2,3}, thermal⁴ and acoustical characteristics⁵, which renders it truly multi-functional.

The acoustical behavior of hemp concrete has already received some attention. The effect of the binder on the acoustic absorption performance of hemp concrete was reported in Ref.³. The effect of the material density, type of binder, and water content on the acoustical properties of hemp concrete was discussed in Ref.⁵. A model has been developed to predict the acoustical properties of consolidated samples of hemp concrete⁵. The porous microstructure of hemp concrete is quite complex, because it is composite and has a natural origin. Therefore, pores have dimensions distributed through three scales, with the inter-particle pores having a size ranging from 1 to 10 mm, intra-particle pores having sizes varying between 10 and 60 μm ⁶, and with intra-binder pores having a characteristic size of 1 μm . In⁷, it is shown that the contrast of permeability existing between the inter-particle

pores and the intra-particle pores is high enough so that only the inter-particle pores take part in acoustical dissipation.

On the other hand, the acoustical properties of shiv (loose hemp particle mix) have not received a sufficient attention. Hemp particles have a parallelepiped shape which enables the particles to mix in a plurality of ways affecting strongly the resultant material porosity and pore size distribution⁸. The acoustical properties of materials composed of parallelepipedical shapes can be markedly different from those composed of spherical aggregates which can be predicted by a number of models^{9,10}. In the case of granular media with a particle size distribution and a non-spherical shape, not much has been done.

The influence of the particle shape on the acoustical properties of loose particle mix is also a key question. Usually, non-spherical shape of particles is considered empirically and using a shape factor¹¹. Numerical works have been realized by defining the shape and configuration of non-spherical particles, for instance with spiky particles¹². However, parallelepiped shape such as hemp particles have not been investigated.

The purpose of this paper is to study systematically the particle size distribution, particle shape, and multi-scale porosity of shiv and link them theoretically to the measured acoustical properties. The paper consists of three sections. The results of materials characterization are presented in Sec. II. Sec. III compares three modeling approaches which are used to predict the observed acoustical behavior. It is shown how some of these models could be used to invert the non-acoustical properties from the measured acoustical data. Finally, the effects of the shape and particle size distribution are analysed in Sec. IV and conclusions are drawn in Sec. V.

^{a)}Electronic address: philippe.gle@entpe.fr

^{b)}LTDS UMR CNRS 5513

II. MATERIALS CHARACTERIZATION

A. Materials and preparation

Five hemp particle mixes were studied in this work. These are products from 5 hemp cultures which differ in terms of the frame density, particle dimensions and porosity of the resultant granular mix (data from Ref.⁷).

The acoustical and non-acoustical properties of the five granular mixes have been determined as a function of the granular mix density (ρ) which was varied between ρ_{min} and ρ_{max} by changing the compaction ratio. The material specimen was prepared by depositing loose particles in the sample holder, which was held vertically and shaken to achieve the desired material density and specimen thickness. The diameter (100 mm) and the thickness (50 mm) of the samples have been chosen to ensure a low ratio between the characteristic sizes of the particles and the tested sample, so that the properties of the granular mixes are not affected by the shape and size of the container. Table I presents a summary of the basic properties for the five granular mixes which were adopted for this work.

B. Acoustical properties

The different shiv were tested in a Bruel and Kjaer impedance tube Type 4106 with the diameter of 100 mm. This tube provided the data on the surface acoustic impedance and absorption coefficient in the frequency range of 50 - 2000 Hz. Measurements were repeated three times in each configuration to ensure the reproducibility of the experiment.

The material specimens were characterized using a three-microphone method¹³ to determine intrinsic (characteristic) properties of the porous medium: the equivalent dynamic density ρ_{eq} , which accounts for the visco-inertial effects and the equivalent bulk modulus K_{eq} , which accounts for the thermal effects. These two frequency-dependent properties describe fully the acoustic material behavior, and enable to compute the sound absorption coefficient (α) and sound transmission loss (TL) as a function of the specimen thickness. The fundamental viscous and thermal parameters can be determined from these intrinsic properties, using the indirect characterization relationships developed by Oluy and Panneton^{14,15}.

C. Non-acoustical properties

1. Particles size distribution

Hemp particle shape can be assumed to be close to parallelepiped so that it makes sense to measure the particle size distribution in terms of the particle length, width and thickness. A practical method of image analysis originally developed by Ceyte¹⁶ was adopted for this purpose. Samples of 5 g of each mix, which corresponds to a number N of particles ranging between 1797 and

8583 (see Table I), have been randomly extracted and deposited on colored paper sheets, so that particles were rested on their biggest facet and were not in contact with each other. Good-quality digital photographs of these particles were taken and analysed using the Image Processing Toolbox in Matlab. Image were first converted in black and white, then the particles (being less dark than the paper) were detected as areas consisting of adjacent white pixels. They were counted and their width W and length L were measured automatically with the Toolbox. The equivalent radius R was calculated as the radius of a circle with the same area. The slenderness L/W of particles (ratio length to width) was also determined. This analysis required at least 1800 particles for the measured data to converge within the tolerance of $\pm 1\%$.

The probability density function was calculated for each of the above parameters $X \in (R; W; L; L/W)$ expressed in mm. These data were expressed on the logarithmic scale in terms of $\psi = -\log_2 X$. The mean ($\bar{\psi} - \log_2 \bar{X}$) and standard deviation (σ_p) were subsequently calculated. It was found that the particle size distribution obeys closely a log-normal distribution, i.e.

probability density function $e(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} e^{-\frac{(\psi - \bar{\psi})^2}{2\sigma_p^2}}$,

where $\psi = -\log_2 X$, $\bar{\psi}$ is the mean of ψ and σ_p is its standard deviation expressed in ψ -units. These data and the corresponding log-normal distributions fit are shown in Fig. 1 for shiv *SA*. Table I presents a summary of the mean and standard deviation calculated for the log-normal distribution which fits the probability density function for the four geometrical characteristics of the 5 types of shiv studied in this work. This table also presents the mean determined as a linear measure for each of the four characteristics describing the particle dimensions and geometry.

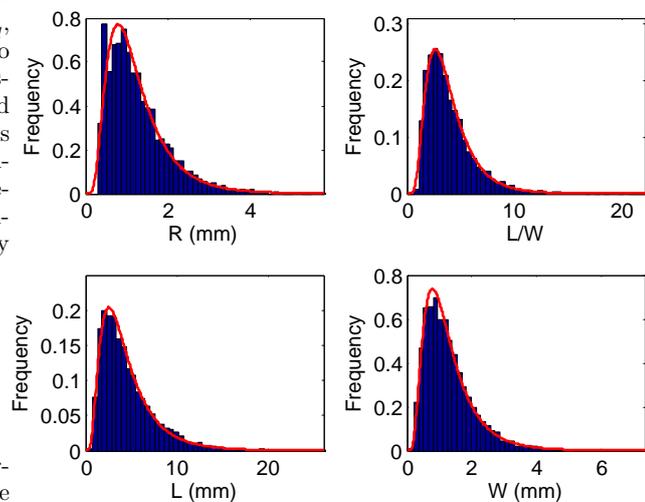


FIG. 1. Particle size distribution of shiv *SA*, frequency and associated log-normal distribution

Annexe D : Compléments de modélisation

TABLE I. Characteristics of shiv

Shiv		SA	SB	SC	SD	SE
Origin		France	Germany	U.K.	France	France
Application		Sale	Sale	Sale	Sale	Research
ρ_{min}	(kg m ⁻³)	100	100	100	100	100
ρ_{max}	(kg m ⁻³)	150	140	160	140	140
ρ_{frame}	(kg m ⁻³)	1050	1350	1200	1140	870
$\rho_{particle}$	(kg m ⁻³)	523	460	486	605	499
$R_{particle}$	(mm)	0.244	0.242	0.263	0.252	0.170
N		4110	2542	1797	3860	8583
\bar{R}	(mm)	1.08	1.27	1.48	1.13	0.90
$\sigma_p(R)$	(ψ -units)	0.81	0.85	0.80	0.76	0.71
\bar{L}	(mm)	3.80	4.56	5.08	3.96	3.10
$\sigma_p(L)$	(ψ -units)	0.90	1.00	0.93	0.91	0.89
\bar{W}	(mm)	1.10	1.26	1.47	1.15	0.93
$\sigma_p(W)$	(ψ -units)	0.84	0.89	0.81	0.76	0.77
L/W		3.44	3.61	3.46	3.44	3.33
$\sigma_p(L/W)$	(ψ -units)	0.75	0.84	0.71	0.74	0.84

These results enable to compare the size of the particles in each of the five shiv. The values for the log-normal mean size shown in Table I suggest that shiv *SE* is composed of the smallest particles while shiv *SC* is composed of the largest particles. It appears that slenderness and standard deviation do not depend significantly on the particle size so that it is possible to assume that the shape of hemp particles and width of the particle size distribution are relatively independent of the shiv mix.

2. Pore size distribution

Pore size distribution is one of the key non-acoustical properties which controls the acoustical behavior of porous media¹⁷. It is common to use a water suction method^{17,18} to measure pore size distribution of materials with open, interconnected pores. However, this method is impractical in the case of a hemp particle mix because hemp particles are micro-porous and lighter than water. Particles of hemp can be displaced from their original positions because of their positive buoyancy and can swell once they become wet. In order to overcome this problem, an image analysis method was used to determine the pore size distribution.

For this purpose, digital photographs of the upper face of three samples of each of the 5 shiv types were prepared. Each of these samples was representative of the corresponding shiv. It had the diameter of 100 mm and the height of 50 mm which was assumed as sufficient to represent a plurality of pore sizes and shapes found in a typical hemp particle mix. The pore size distribution has been analysed using Matlab Image Processing Toolbox. Pores were identified as the adjacent pixels located between the particles, their area a is evaluated and their radius is calculated as $r = \sqrt{a/\pi}$ (with $\pi \approx 3.14$). This step proved to be much more complicated than the particle size measurement since the contrast of colour between particles and pores is very low and the particles can have different colors. Fig. 2 shows that the detection of pores

is very sensitive to the chosen threshold in the colour contrast.

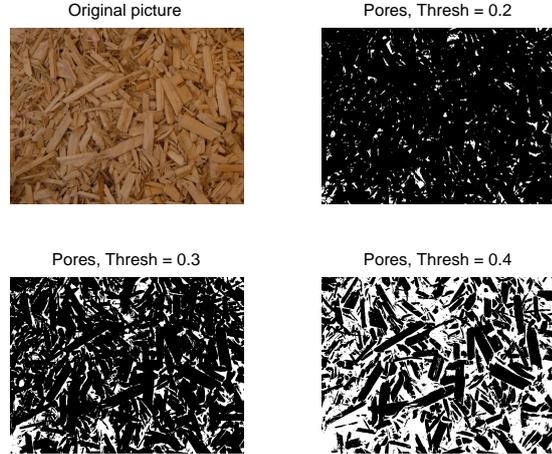


FIG. 2. Effect of the threshold (*Thresh*) on the detection of pores (Pores are detected in white and particles in black)

The pore size distribution for shiv *SA* with density $\rho = 130 \text{ kg m}^{-3}$ is shown in Fig. 3. This figure also shows the log-normal distribution which was fitted to the experimental data. A comparison of the experimentally derived pore size distribution for this and for the other materials shows that it is approximately log-normal. As a result, it is possible to suggest that if a material composed of parallelepiped particles which size and slenderness are characterized with a log-normal size distribution, then its pore size distribution is also log-normal. This finding is discussed in more details in Sec. III.

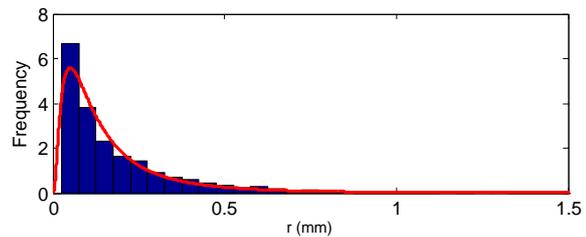


FIG. 3. Pore size distribution of shiv *SA* with density $\rho = 130 \text{ kg m}^{-3}$. Frequency and associated log-normal distribution

The parameters of the distributions are presented for all shiv Fig. 4 for threshold *Thresh* = 0.2. For these value of the threshold, the pores in the image appear well separated and can be used for the optical analysis. It appears that the measurement uncertainties here are high. Besides, one can expect that the mean pore sizes decrease with density and it is not clear with these results, because of the uncertainties. For a shiv and a given density the upper surface aspect can change by as much

9 Propriétés acoustiques des chènevottes

as 20% which is comparable with the effect of the density variation and it is not necessary representative of the configuration of the particles inside the bed. Consequently, an acoustical measurement of these parameters is proposed in Section III.B to yield more representative data.

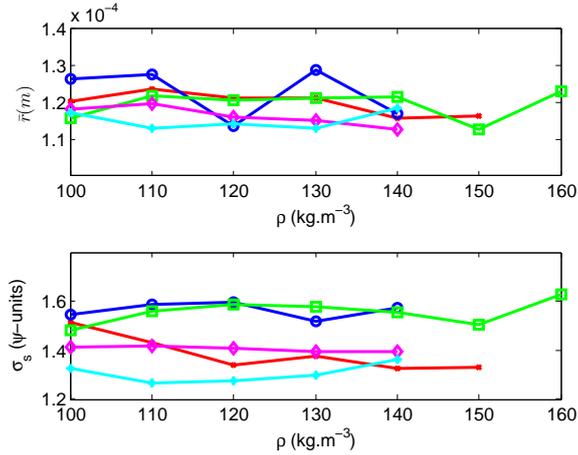


FIG. 4. The characteristic pore size \bar{r} (top) and standard deviation σ_s (bottom) derived from image analysis data for the shiv SA (\times), SB (\circ), SC (\square), SD (\diamond), SE ($+$)

3. Inter-particle porosity

An important non-acoustic parameter of granular media is the inter-particle porosity which is needed to model its acoustical properties.

The inter-particle porosity of shiv (ϕ) was deduced by minimising the discrepancy between the measured real part of the bulk modulus and that which was predicted with the Zwikker - Kosten model¹⁹. The details of this experiment are presented Sec. III. The porosity can also be predicted as a function of the density of shiv and apparent density of the shiv particles $\rho_{particle}$, which includes the effect of the intra-particle pores, i.e.

$$\phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_{particle}} \quad (1)$$

The apparent particle density was estimated from the inter-particle porosity data and it is presented in Table I. Fig. 5 presents the inter-particle porosity data which are compared with that predicted with Eq. (1) for a range of granular mix densities.

Inter-particle porosity ranges between 65% and 85% and it is 10% to 20% lower than the open porosity of the samples. The apparent particle density ranges between 460 and 605 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. These values of a relatively low density are attributed to the presence of the intra-pores in the particles of shiv.

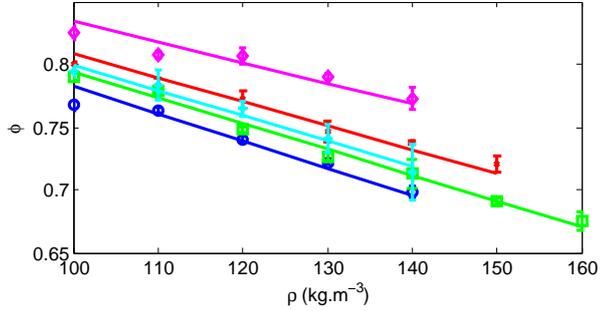


FIG. 5. Inter-particle porosity ϕ of the shiv SA (\times), SB (\circ), SC (\square), SD (\diamond), SE ($+$) as a function of density. Markers correspond to averaged measurements and lines correspond to Eq. (1)

4. Air flow resistance

The air flow resistivity σ can be estimated from the low frequency behavior of the imaginary part of the measured dynamic density ρ_{eq} as described in Ref.¹⁵ by Eq. (2).

$$\sigma = \lim_{\omega \rightarrow 0} -\omega \Im(\rho_{eq}) \quad (2)$$

The purpose of this experiment was to determine the flow resistivity for each particle mix which was measured in the impedance tube, because the arrangement of particles in the tube can be different that achieved in a separate flow resistivity experiment. This estimate was validated by performing the direct measurement, on shiv SA, following the standard procedure outlined in the ISO9053^{7,20}. The resistivities deduced from ρ_{eq} are presented Fig. 6. Globally, this parameter ranges between 1000 and 9000 $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$, and increases with the increased granular mix density and with the decreased particle size.

The dependence of the flow resistivity on the inter-particle porosity and characteristic particle size of the shiv can be derived from homogenization methods developed for monosized spherical particles, for instance using the model by Boutin and Geindreau⁹. In this model (see Sec. III), the expression of the resistivity given in Eq. (3) is deduced from the low frequency limit of the dynamic density.

$$\sigma = \frac{3\eta\beta^2}{(-1 + \frac{2+3\beta^5}{\beta(3+2\beta^5)})R_{particle}^2} \quad (3)$$

$\beta = (1 - \phi)^{1/3}$, η is the viscosity of air and $R_{particle}$ the equivalent radius of particles which in the model corresponds to the radius of the monosized spherical aggregates.

The results presented in Fig. 6 show that the normalized permeability $k_0/R_{particle}^2 = \eta/(\sigma R_{particle}^2)$ plotted for the five different shiv types depends on the inter-particle porosity and follows closely the behavior that is

Annexe D : Compléments de modélisation

expected for a packing of spheres having the same characteristic particle dimension.

Here the characteristic size $R_{particle}$ has been estimated for each of the five shiv types using the least square method to minimize the error between resistivity data and Eq. (3). The results of this analysis are given in Table I. These equivalent radii cannot be easily interpreted for shiv since hemp particles have a parallelepiped shape. However, it has been shown in Ref.⁷ that this characteristic size can be related to the thickness of the particles.

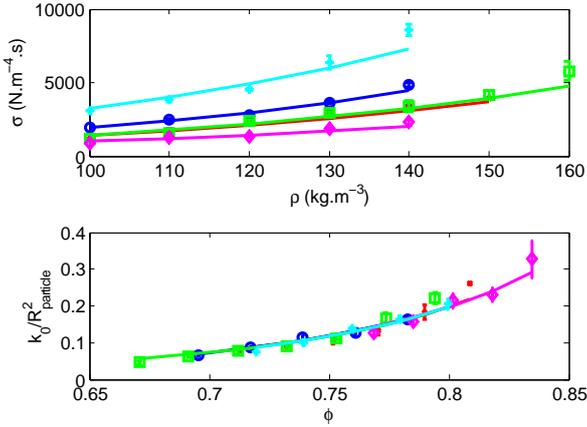


FIG. 6. Resistivity σ (top) of the shiv SA (\times), SB (\circ), SC (\square), SD (\diamond), SE ($+$) as a function of density and normalized permeability $k_0/R_{particle}^2$ (bottom) as a function of inter-particle porosity. Solid lines represent the predictions using Boutin and Geindreau model⁹.

5. Tortuosity

The tortuosity of the five types of shiv was evaluated using the time of flight method²¹ which consists in measuring the time delay between the incident and the transmitted waves using a short pulse with the spectrum centred at 48 kHz. This measurement was performed under the same conditions as those attained when the acoustical properties of shiv were measured. This experiment was repeated three times for each of the five types of shiv and the results were averaged. The shiv density was carefully controlled so that the dependence of the tortuosity on the shiv density and porosity could be determined. The specimen was placed in a circular cylindrical container with the diameter of 100 mm and its thickness was maintained at 50 mm in all the experiments. The results of these experiments are presented in Fig. 7 as a function of the material density and inter-particle porosity.

The results shown in Fig. 7 suggest that the tortuosity of shiv is considerably higher than that measured in the case of a loose spherical particle mix. A typical tortuosity value for a loose packing of spherical particles is between 1 and 1.5²². The tortuosity of hemp particles ranges between 1.5 and 3.5, and depends linearly on the material

density. The difference between the expected and measured values can be attributed to the parallelepiped shape of the particles and to the unique particle size distribution which is attained when elongated particles become loosely intermixed.

Modelling of the observed experimental dependence for the tortuosity is complicated, because there is no simple theoretical model which is able to take into account the parallelepiped particle shape and account analytically for all possible packing arrangements. Numerical modeling of this behaviour is possible, e.g. using similar work by Malinouskaya *et al.*¹², by describing the exact geometry of the particles and assuming a particular packing arrangement. An alternative is to assign a shape factor n as suggested by Attenborough¹¹ using expression $\alpha_\infty = \phi^{-n}$. Fig. 7 illustrate how well this model can account empirically for the complex particle shape. The agreement between the measured and modeled tortuosity values is close within 12%. The shape factors for this comparison were determined using a least square method so that this model could agree well with the tortuosity data.

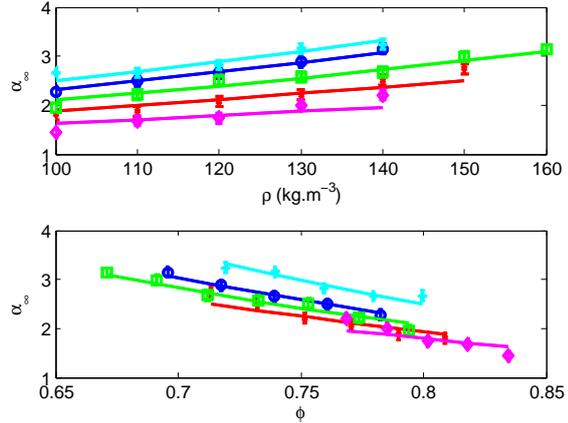


FIG. 7. Tortuosity α_∞ of the shiv SA (\times), SB (\circ), SC (\square), SD (\diamond), SE ($+$) as a function of density (top) and inter-particle porosity (bottom). Solid lines correspond to Attenborough model¹¹.

III. MODELING APPROACHES

A. Description of the models

The predictions of the acoustical properties of granular media which are reported in this work were made using three equivalent fluid models which assume the rigid frame behavior. Zwikker and Kosten²³ showed that above some characteristic frequency, the vibration of the frame and of the fluid in the porous material are decoupled so that the rigid frame approximation can be adopted. In the case of shiv⁷, this decoupling frequency

9 Propriétés acoustiques des chènevottes

ranges between 100 and 150 Hz. In this case, the acoustical properties of porous materials can be predicted from the knowledge of the behavior of ρ_{eq} and K_{eq} ²⁴.

A harmonic time dependence of type $\exp(j\omega t)$ is considered here. As a consequence, sound absorption α can be calculated as $\alpha = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2$, with Z being the surface impedance of the sample, and Z_0 the impedance of air. The surface impedance of a hard-backed sample can be calculated as $Z = -jZ_c \cot(kE)$, with Z_c being the characteristic impedance of the porous medium of which this layer is composed. Here $Z_c = \sqrt{\rho_{eq} K_{eq}}$ is the characteristic impedance, $k = \omega \sqrt{\frac{\rho_{eq}}{K_{eq}}}$ is the wavenumber in the porous medium, and E is the specimen thickness in meters.

As explained in Ref.⁷, shiv is a mix of loose microporous particles. Therefore, a double-porosity approach can be used to take into account the properties of the intra-particle (macro) pores and of the particle micropores. The analysis of the experimental data presented in Ref.⁷ shows that there is a considerable permeability contrast which exists between these two networks of pores. Therefore, in the frequency range considered in this work, the pressure diffusion effects between the macro and micro-pores are relatively small and can be neglected²⁵. In this case, a traditional, single-porosity approach can be adopted to describe accurately the intrinsic properties of the inter-particle network of pores. This is done in the following using three complementary models: a first approach based on the models by Johnson *et al.*²⁶ and Zwikker and Kosten¹⁹, a granular approach developed by Boutin and Geindreau⁹ and a log-normal pore size distribution approach from the model by Horoshenkov *et al.*²⁷.

1. Johnson-Zwikker-Kosten approach

Some general models have been developed to describe porous materials such as granular, fibrous or foam materials. For example, the model by Johnson *et al.*²⁶ can be used to predict the visco-inertial effects and the model by Zwikker and Kosten¹⁹ to predict the thermal effects in a porous medium. This approach was chosen in this work because it is based on a limited number of non-acoustic parameters and enables to capture well the acoustical absorption behavior of porous media. Besides, it has been presented and applied successfully in the past to predict the acoustical properties of hemp concrete (e.g.^{5,7}).

The dynamic density and bulk modulus are given by

$$\rho_{eq}(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[1 - \frac{j\sigma\phi}{\omega\rho_0\alpha_\infty} \sqrt{1 + j\frac{4\alpha_\infty^2 \eta\rho_0\omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right] \quad (4)$$

$$K_{eq}(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[1 + 2(\gamma - 1) \frac{T(\sqrt{N_{Pr}}\lambda\sqrt{-j})}{\sqrt{N_{Pr}}\lambda\sqrt{-j}} \right]^{-1}, \quad (5)$$

respectively. Here T is the ratio between the Bessel functions of first and zero order, and λ is

$$\lambda = \sqrt{\frac{8\alpha_\infty \rho_0 \omega}{\sigma\phi}}, \quad (6)$$

where ρ_0 is the density of the air (kg m^{-3}), N_{Pr} its Prandtl number. Four acoustical parameters describe the inter-particle porous medium: the porosity ϕ , the resistivity σ , the tortuosity α_∞ and the viscous characteristic length Λ (m).

The viscous characteristic length (Λ) is difficult to measure directly and it was deduced from the acoustical data. The method and results of this characterization procedure are presented in Sec. III.B.

2. Mono-sized spherical granular material approach

The second model investigated in this paper relates to the acoustical properties of granular media, which is more adapted to the porous nature of shiv. This kind of materials have been studied by Boutin and Geindreau. In Ref.⁹, a model has been developed to predict the acoustical properties of mono-sized spherical aggregates and the authors found a very good agreement between this model and numerical predictions. This model has been used by Venegas and Umnova to predict the acoustical properties of a packing of porous grains²⁸.

In this paper, we apply the model by Boutin and Geindreau to study the differences in the acoustic behavior of a parallelepiped particle mix and a mix composed of spherical particles which have similar porosity and similar equivalent particle size. This approach is particularly interesting since the model is based on only two non-acoustical parameters: the radius of the aggregate, $R_{particle}$, and the inter-particle porosity ϕ . Several boundary conditions have been considered in the work by Boutin and Geindreau, and when the pressure approach (P-estimate) is used, the analytical model agrees well with the results of the numerical simulation⁹.

According to this model the dynamic density and bulk modulus of the equivalent fluid in the material pores are given by

$$\rho_{eq}(\omega) = \frac{\eta}{j\omega\delta_v^2} \left[1 - \frac{3}{x_v^2} \frac{Ax_v + B \tanh(x_v(\beta - 1))}{ax_v + b \tanh(x_v(\beta - 1))} \right] \quad (7)$$

$$K_{eq}(\omega) = \frac{\gamma p_0}{\phi} \left[\gamma - j\omega\rho_0(\gamma - 1) \frac{C_p \delta_t^2 \Theta}{\kappa\phi} \right]^{-1} \quad (8)$$

In the above expressions the parameter Θ , A , B , a and b are frequency dependent and expressed as

$$\Theta = 1 - \beta^3 + 3\frac{\beta^2}{x_t} \left(\frac{1 + x_t \tanh(x_t(\beta - 1))}{x_t + \tanh(x_t(\beta - 1))} - 1 \right) \quad (9)$$

$$A = (3 + (\beta x_v)^2)(1 + x_v^2/6) - 3\beta(1 + x_v^2/2) \quad (10)$$

$$B = (3 + (\beta x_v)^2)(1 + x_v^2/2) - 3\beta x_v^2(1 + x_v^2/6) \quad (11)$$

$$a = \frac{3 + (\beta x_v)^2}{3} - 3\beta - (1 + x_v^2/6) \frac{2}{\beta} + \frac{4}{\cosh(x_v(\beta - 1))} \quad (12)$$

$$b = (3 + (\beta x_v)^2) - \beta x_v^2 - (1 + x_v^2/2) \frac{2}{\beta}. \quad (13)$$

Annexe D : Compléments de modélisation

In this model, β is defined as $\beta = (1 - \phi)^{1/3}$, and the viscous and thermal layer thickness are $\delta_v = \sqrt{\frac{\eta}{j\omega\rho_0}}$ and $\delta_t = \sqrt{\frac{\kappa}{j\omega\rho_0 C_p}}$, respectively. Finally, $x_v = \frac{R_{cell}}{\beta\delta_v}$ and $x_t = \frac{R_{cell}}{\beta\delta_t}$ with $R_{cell} = R_{particle}/\beta$.

3. Log-normal pore size distribution approach

The last model which was considered in this work is based on the work by Horoshenkov *et al.*²⁷. This model has been developed for granular materials mainly and it takes into account a particular type of distribution in the pore size. A more general model could also be adopted to describe the acoustical behavior of materials with any arbitrary pore size distribution²⁹. In our case, the pore size distribution in shiv is close to log-normal so that a more computationally efficient Padé approximation approach detailed in Ref.¹⁷ for log-normal distribution is adopted. According to this model the dynamic density and bulk modulus for the equivalent fluid in the material pores are given by (note that the original paper considers a $\exp(-j\omega t)$ convention for time dependence so that ω have been changed in $-\omega$)¹⁷:

$$\rho_{eq}(\omega) = \frac{\alpha_\infty}{\phi} \left[\rho_0 + \frac{\sigma\phi}{j\omega\alpha_\infty} \tilde{F}(\omega) \right] \quad (14)$$

$$K_{eq}(\omega) = \frac{\gamma p_0}{\phi} \left[\gamma - \frac{\rho_0(\gamma - 1)}{\rho_0 + \frac{\sigma\phi}{jN_{Pr}\omega\alpha_\infty} \tilde{F}(N_{Pr}\omega)} \right]^{-1} \quad (15)$$

$$, \quad (16)$$

where

$$\tilde{F}(\omega) = \frac{1 + \theta_3\epsilon(\omega) + \theta_1\epsilon(\omega)^2}{1 + \theta_3\epsilon(\omega)} \quad (17)$$

$$\epsilon(\omega) = \sqrt{\frac{j\omega\rho_0\alpha_\infty}{\sigma\phi}} \quad (18)$$

$$(19)$$

is the Padé approximant for the viscosity correction function. The parameters θ_1 and θ_3 in Eq. (17) are shape factors defined as a function of the pore geometry. In the original paper, three shapes are discussed for pores: circular, triangular and slit-type. Here, the shape of pores is assumed circular so that we have $\theta_1 = (4/3)e^{4d^2} - 1$, $\theta_2 = (1/\sqrt{2})e^{3d^2/2}$ and $\theta_3 = \frac{\theta_1}{\theta_2}$ with $d = \sigma_s \ln 2$, σ_s being the standard deviation of the log-normal distribution of shiv pore size.

The choice of pore shape in this model is somewhat arbitrary and does not affect significantly the behavior of Eq. (17). These factors includes information on the standard deviation in the pore size which is independent from the assumed pore geometry. The only difference here is in the way the characteristic pore dimension is defined for each of the three shapes when the probability density data for the pore size distribution are collected and analysed¹⁷.

B. Indirect characterization

1. Viscous characteristic length

Characteristic viscous lengths have been found using the least square method to minimize the difference between measured and modeled sound absorption coefficient using the Johnson-Zwikker-Kosten approach. They are presented in Fig. 8. As expected, the viscous length reduces with the increased density and with the reduced particle size. As for the tortuosity, this parameter is affected by the shape and size distribution of particles. In⁷, it is shown that shiv have smaller viscous length than mono-sized spherical aggregates of same inter-particle porosity and characteristic particle dimension, and that many existing models are not really suitable for this material. However, predictions using Umnova model made for Λ can give good approximations of the experimental viscous characteristic length as illustrated in Fig. 8¹⁰.

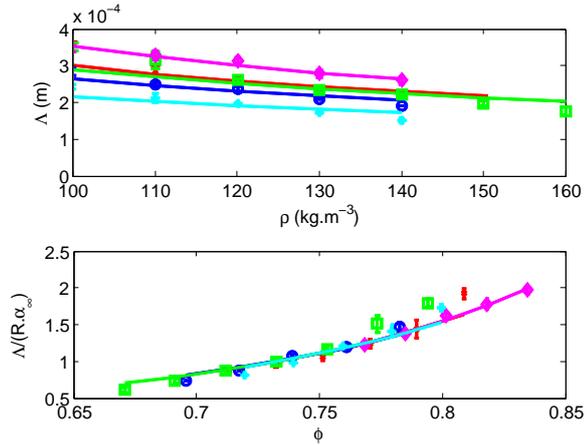


FIG. 8. The characteristic viscous length Λ of the shiv SA (\times), SB (\circ), SC (\square), SD (\diamond), SE ($+$) as a function of density (top); and the normalized characteristic viscous length $\Lambda/(R_{particle}\alpha_\infty)$ as a function of inter-particle porosity (bottom). Solid lines correspond to the Umnova cell model¹⁰.

2. Standard deviation of pore size distribution and pore size

Since the standard deviation of the pore size distribution could not be accurately determined from the image analysis data, it has been evaluated in a similar way that the viscous characteristic length, with the least square method minimizing the error between the measured sound absorption coefficient and the absorption coefficient predicted with the log-normal pore size distribution model. The results presented in Fig. 9 illustrate that the values of the standard deviation in the pore size range between 0.5 and 1. These values are generally lower than those estimated directly from the analysis of the images of the material surface. Besides, it is observed here that

9 Propriétés acoustiques des chènevottes

the standard deviation increases with density, which was not obvious from the results of the image analysis which are presented in Fig. 4.

Compared to other media, these standard deviations are relatively high. In¹⁷, glass beads, Coustone and foam can be modeled accurately using the log-normal approach provided that the standard deviation range is between 0.22 and 0.44. In our case the shape and size distribution of hemp particles appear to be responsible for a noticeable increase in the standard deviation of pore size as compared with that typical for glass beads. This is the expected behavior in the standard deviation in the pore size in the loose granular mixes in which particle shape deviates from spherical. The work by Asdrubali and Horoshenkov³⁰ suggests that the standard deviation in the pore size of expanded clay granulates with high proportion of micro-pores can vary between $0.44 \leq \sigma_s \leq 0.88$ which is in line with the behavior observed in the case of shiv.

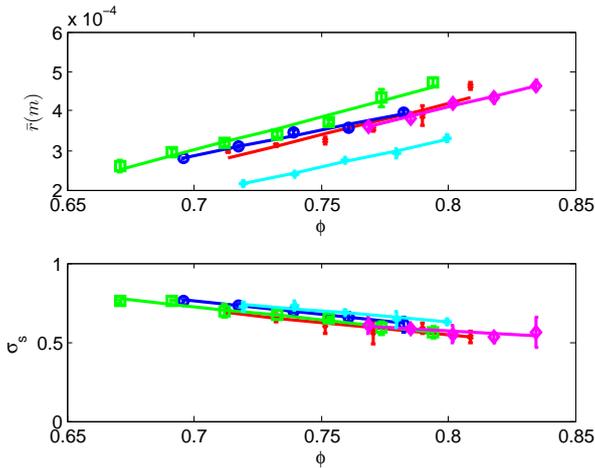


FIG. 9. The characteristic pore size \bar{r} deduced from Eqs. (20) and (21) (top) and standard deviation σ_s deduced from acoustical data (bottom) for the shiv SA (\times), SB (\circ), SC (\square), SD (\diamond), SE ($+$) as a function of inter-particle porosity. Solid lines represents linear fits.

For a porous medium with circular pores of radius r , the flow resistivity σ can be evaluated from the probability density function data for the pore radius $e(r)$ using the following equation^{29,31}:

$$\sigma = \frac{8\alpha_\infty\eta}{\phi r_{eff}^2} \quad (20)$$

$$r_{eff}^2 = \int_0^\infty r^2 e(r) dr = \bar{r}^2 e^{(2\sigma_s \ln 2)^2} \quad (21)$$

These equations were used to estimate the mean pore radius \bar{r} . The top part of Fig. 9 presents this parameter for the five shiv types and as a function of density.

As expected, the mean pore radius \bar{r} decreases with the decreased porosity. The behavior of \bar{r} is very close to that observed in Fig. 8 for the viscous characteristic

length Λ , which can be interpreted as an estimate of the size of interconnection between pores²⁶. A more close examination of Figs. 8 and 9, suggests that the value of the viscous characteristic length is generally smaller than that of the characteristic pore size. This result is consistent with the theoretical relation between these two characteristics which was derived by Horoshenkov *et al.*³², i.e.

$$\Lambda = \bar{r} e^{(-3/2(\sigma_s \ln 2)^2)} \quad (22)$$

Fig. 10 compares the experimental data for Λ to the predicted values using Eq. 22, and shows that the ratio $0.86 \leq \frac{\Lambda}{\bar{r}} e^{3/2(\sigma_s \ln 2)^2} \leq 1.06$ is relatively constant and close to unity, which suggests that the relation derived in³² stands for a range of granular mixes with variable particle size and porosity.

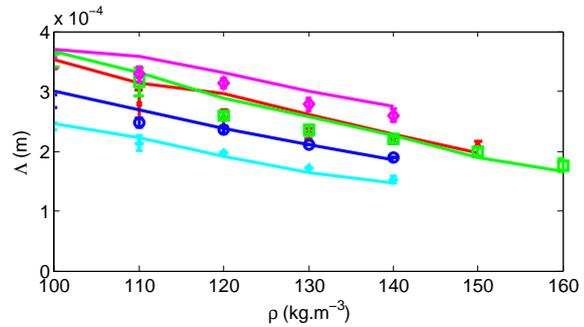


FIG. 10. Characteristic viscous length Λ of the shiv SA (\times), SB (\circ), SC (\square), SD (\diamond), SE ($+$) as a function of density. Markers correspond to averaged measurements and lines correspond to Eq. (1)

C. Ability of the models to describe shiv

The error Δ between the measured sound absorption spectra and those predicted using the three adopted modeling approaches is shown in Fig. 11 as a function of the material density. This error was computed as the normalized sum of the absolute value of the spectral differences. We observe that the most accurate model is the Johnson-Zwikker-Kosten approach for which the error in the predicted absorption coefficient spectra is less than 5%. The predictions using the log-normal pore size distribution approach accurate to 5-15%. The granular media approach is not sufficiently accurate as up to 30% errors are observed.

This is partly explained by the fact that the granular model is based on two parameters, ϕ and $R_{particle}$, which have not been fitted but indirectly characterized from the real part of the dynamic bulk modulus and the imaginary part of the dynamic density respectively, whereas in the two other cases, one parameter has been fitted on the sound absorption data: Λ in the Johnson-Zwikker-Kosten model and σ_s in the log normal pore size distribution approach.

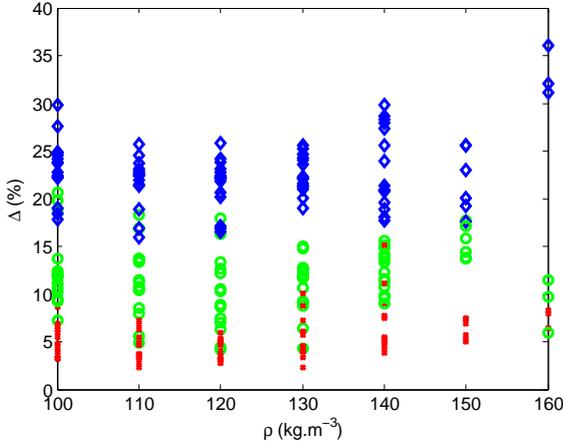


FIG. 11. The error in modeling of the sound absorption spectra α of shiv, with Johnson-Zwikker-Kosten approach (\times), granular approach (\diamond), and log-normal pore size distribution approach (\circ).

The measured acoustical properties for a 50 mm layer of shiv *SA* with the density $\rho = 120 \text{ kg m}^{-3}$ are shown in Fig. 12. These properties include the acoustic absorption coefficient, transmission loss, and real and imaginary parts of the dynamic density and bulk modulus of the equivalent fluid in the material pores. It appears that the Johnson-Zwikker-Kosten model and the log-normal pore size distribution model capture accurately the frequency dependance in the acoustical properties. The mono-sized granular media model predicts the acoustic behavior which is markedly different to that determined from the experiment. This difference is particularly pronounced in the case of the real part of the dynamic density, acoustic absorption coefficient and transmission loss spectra.

This can be attributed to the fact that the shape of the aggregates is not taken into account with the two-parameter model described in Ref.⁹. It has been shown experimentally that the tortuosity of shiv is very high in comparison with that typically found in loose granular mixes composed of particles of spherical shape. The real part of dynamic density of shiv is largely controlled by the value of tortuosity which the two-parameter model clearly underpredicts.

We note in Fig. 12 that the sound absorption of shiv is higher than that of mono-sized spherical granular media in the lower frequency range and lower or equal in the higher frequency range. The transmission loss of shiv is greater than the transmission loss of the equivalent mono-sized spherical granular media. As a result, shiv provides a better transmission loss in the whole frequency range and better sound absorption at the low frequencies. This is of interest in the case where shiv is used in the form of loose granular fillers in building elements, for instance as a filling material in attic floors.

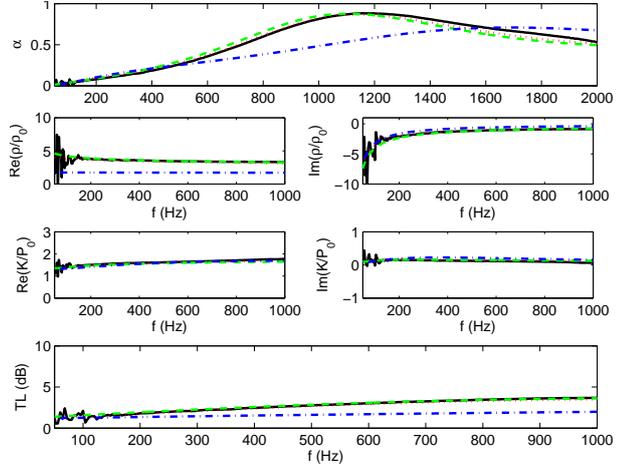


FIG. 12. The measured and predicted acoustical characteristics for a 50 mm layer of *SA* shiv with the material density of 120 kg m^{-3} . The Johnson-Zwikker-Kosten approach (\dots), the mono-sized spherical particle approach ($-\cdot-$), and the log-normal pore size distribution approach ($-\cdot-$), compared to data ($-$).

IV. THE EFFECTS OF THE PARTICLE SHAPE AND SIZE DISTRIBUTION ON THE ACOUSTICAL PROPERTIES

In the previous section, the predicted acoustic absorption coefficient spectra of shiv was compared against the experimental data. However, for this type of materials it is difficult to discriminate between the effects of the particle shape and particle size distribution. This is partially due to the fact that both are likely to influence the pore size distribution in a rather complex manner which is somewhat random and hard to predict. This section deals with these effects separately using the log-normal pore size distribution model. The input parameters in this model allows a better understanding of the role of particle size distribution since it can be linked more easily to the standard deviation of pore size rather than to the characteristic viscous length used in the model detailed in²⁴.

The reference data considered here is the acoustical properties of a mix of shiv *SA* with density 120 kg m^{-3} and thickness of 50 mm modeled with the assumed log-normal pore size distribution. These data will be compared against other results obtained with the same model but for different sets of non-acoustical parameters which take into account the change in the porous medium due to the variation in the particle shape and standard deviation in the particle size distribution.

A. The effect of the particle shape on the acoustical properties

Let us first consider a media having the same porosity ϕ , characteristic particle size $R_{particle}$, and standard

9 Propriétés acoustiques des chènevottes

deviation of particle size σ_p as in the case of the reference shiv (*SA* with density 120 kg m^{-3}). However, we assumed that the particle shape is somewhat different ranging from spherical particles to parallelepipedical ones as expected in the case of shiv. It is necessary to know the influence of the particle shape on the non-acoustical parameters σ , α_∞ and σ_s in order to be able to compute the acoustical properties of such media and to compare it with the properties of real shiv.

It has been shown that the permeability of a packing of spheres, ellipsoids and parallelepipeds can be modeled as a function of porosity and characteristic particle size¹² which are relatively independent of the particle shape. The results presented in Fig. 6 suggest that this assumption can be also true in the case of shiv. Consequently, we assume in this case (for some fixed values of ϕ and $R_{particle}$) that the resistivity is a constant as a function of the particle shape.

A number of models exist in the literature to determine the tortuosity of a parking of spherical particles from the porosity data. As an example, in Ref.⁹, this parameter is given as $\alpha_\infty = \frac{3-\phi}{2}$, while Ref.¹⁰ suggests the $\alpha_\infty = 1 + \frac{1-\phi}{2\phi}$ dependence. These findings and published relations enable to assume that tortuosity can range between the predicted minimum for the spherical particle case and the experimentally measured value of the tortuosity in the case of real shiv.

Finally, the last key question is to understand how the particle shape affects the standard deviation in the pore size. It is yet to be understood how the particle shape affects the porosity and pore size distribution⁸. One can expect that the particle shape has a bigger effect on the pore shape than on the standard deviation in the pore size distribution. Besides, it is now well known whether or not the pore shape has an influence on the acoustical properties for given porosity, resistivity and tortuosity values^{18,27}. For this reason, in the following analysis, we will consider that the standard deviation in the pore size is constant and equal to that derived for shiv.

The acoustical properties, sound absorption coefficient (α) and transmission loss (TL), were modeled using the log-normal pore size distribution approach for the different configurations discussed earlier in this paper. The results were obtained for a realistic shiv mix and for a granular mix of spherical aggregates having an equivalent particle size distribution. The values of the non-acoustical parameters were gradually incremented to represent the acoustical properties of real shiv $\{\phi(shiv); \sigma(shiv); \alpha_\infty(shiv); \sigma_s(shiv)\}$ to those which represent the acoustical properties of a spherical granular mix $\{\phi(shiv); \sigma(shiv); \frac{3-\phi(shiv)}{2}; \sigma_s(shiv)\}$. The absorption coefficient and transmission loss spectra obtained from this simulation are presented in Fig. 13. These graphs illustrate that the maximum in the sound absorption coefficient and transmission loss spectrum is shifted towards the lower frequencies as the transition occurs from the case of non-spherical particles to the case of a real shiv mix. This phenomenon is largely related to the increase in the tortuosity of the resultant granular mix.

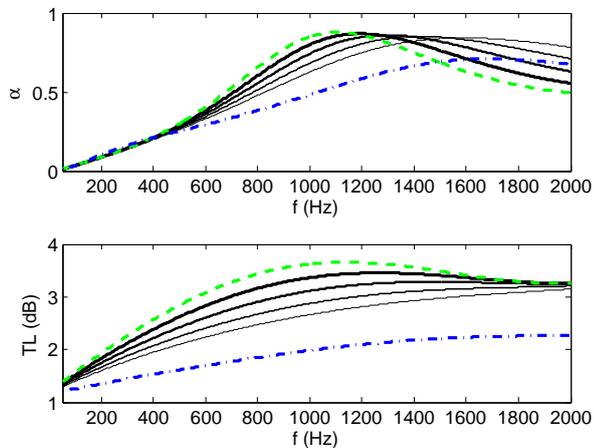


FIG. 13. The effect of the particle shape on the acoustical properties of shiv. A comparison of the mono-sized spherical model (· · ·), the log-normal pore size distribution model for reference shiv *SA* with density 120 kg m^{-3} (—) and the log-normal model with adapted parameters (— The thickness of the line increases with tortuosity).

B. The effect of the standard deviation in particle size distribution on the acoustical properties

Let us now consider media which are characterized with the same porosities ϕ , characteristic particle sizes $R_{particle}$, and particle shapes. Here we would like to investigate the effect of the particle size distribution and assume that it is log-normal with the standard deviation varying from 0 (particles having same size) to the value characterized in the case of real shiv. We also assume that the resistivity is the same for the different configurations, since the characteristic pore size is kept constant, and that the standard deviation of particle size has little or no effect on the tortuosity. This is true for spherical particles, since the work reported in Ref.²² shows that the tortuosity is constant for any arrangement of spheres because the porosity remains relatively unchanged.

The question which is interesting to address here is the relationships between particle size distribution and pore size distribution. This has been a focus of many studies related to geotechnics and hydrology. It has been shown in Ref.³³ that granular mixes having a log-normal particle size distribution have log-normal pore size distribution. Also, the log-normal particle size distribution has then been widely used to predict the pore size distribution of a soil and its water retention curve. The relationship between the particle size and the pore size is considered most frequently nonlinear³⁴ so that $r = \left(\frac{R}{u}\right)^{1/v}$, $\sigma_p = v\sigma_s$, $\bar{r} = \left(\frac{\bar{R}}{u}\right)^{1/v}$, where u and v depend on the packing conditions, and on the shape of pores and particles.

The link between the log-normal particle size distribution parameters of shiv and its log-normal pore size distribution parameters has been more closely investigated.

Annexe D : Compléments de modélisation

Fig. 14 compares these parameters for a given porosity $\phi = 0.78$ with a linear regression going through the origin. Here it appears that data and linear fit are close within 12%. The relations derived from linear regression between \bar{r} and respectively \bar{R} , \bar{L} and \bar{W} are given in Eqs. (23) to (25), with coefficient of determination R^2 above 0.85.

$$\bar{r} = 0.21\bar{R} + 0.13 \quad (R^2 = 0.85) \quad (23)$$

$$\bar{r} = 0.06\bar{L} + 0.13 \quad (R^2 = 0.86) \quad (24)$$

$$\bar{r} = 0.23\bar{W} + 0.11 \quad (R^2 = 0.86) \quad (25)$$

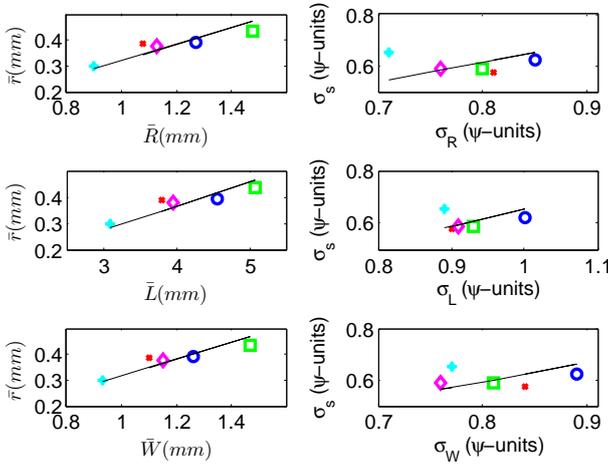


FIG. 14. Relationships between log-normal particle size distribution parameters (\bar{R} , \bar{L} , \bar{W} , σ_R , σ_L , and σ_W) and log-normal pore size distribution parameters (\bar{r} and σ_s) for $\phi=0.78$. Markers correspond to data for shiv *SA* (\times), *SB* (\circ), *SC* (\square), *SD* (\diamond), *SE* ($+$) and lines correspond to linear regression.

In this paper, the acoustical properties were predicted for five different cases in which the value of the standard deviation in the shiv particle size was gradually decreased from $\sigma_s(\text{shiv})$ to $\sigma_s = 0$. Fig. 15 presents the results of this simulation, which show that the acoustic absorption coefficient and transmission loss increase in a broad frequency range with the increased value in the standard deviation in the particle size.

V. CONCLUSION

In this study, the acoustical properties of hemp particles have been studied systematically. The results of these experiments suggest that: (i) the statistical distribution of a particle and pore dimensions in shiv follows closely a log-normal law: (ii) the standard deviation in a particle or pore dimension does not depend significantly on the particle size so that it is relatively independent

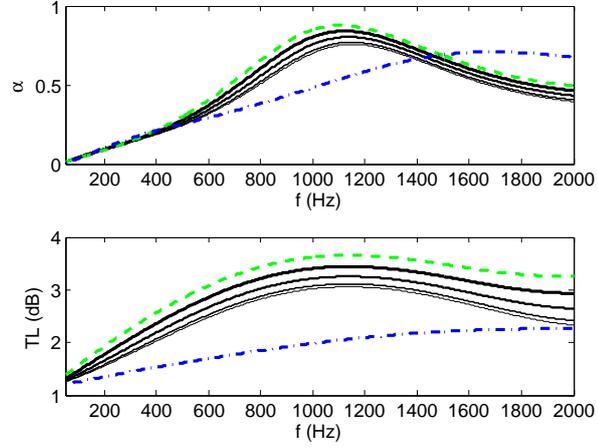


FIG. 15. Effect of the standard deviation of particle size distribution on the acoustical properties of shiv. Comparison of the mono-sized spherical model ($-\cdot-$), the log-normal model for reference shiv *SA* with density 120 kg m^{-3} ($---$) and the log-normal model with adapted parameters ($-$). The thickness of the line increases with standard deviation of pore size.

of the shiv mix. It has been shown that: (i) dependence of the flow resistivity on the interparticle porosity and characteristic particle size of shiv can be derived from homogenization methods proposed by Boutin and Geindreau⁹; (ii) the tortuosity of shiv is higher than that measured in the case of a loose spherical particle mix and it can be predicted accurately by introducing an empirical shape factor as proposed in Ref.¹¹.

The models proposed in Refs.^{9,19,26,27} have been used to study the influence of shape and size distribution of shiv particles on the acoustical properties of shiv. It has been observed that the most accurate predictions are achieved with the Johnson-Zwikker-Kosten approach^{19,26} with errors in the predicted absorption coefficient spectra being less than 5%. The predictions using the log-normal pore size distribution approach²⁷ are accurate to 5-15%. The granular media approach⁹ is least accurate.

The characteristic pore dimensions for a range of shivs have been determined acoustically using the models detailed in Refs.^{26,27}. It has been found that the value of the viscous characteristic length (Λ) is generally smaller than that of the characteristic pore size (\bar{r}). In the case of a porous medium with a finite value of the standard deviation in the pore size this result is expected because of the relation $\Lambda = \bar{r}e^{(-3/2(\sigma_s \ln 2)^2)}$ ³². The obtained experimental data suggest that the ratio $0.86 \leq \frac{\Lambda}{\bar{r}}e^{3/2(\sigma_s \ln 2)^2} \leq 1.06$ is relatively constant and close to unity for the range of shiv mixes studied in this work.

Finally, using the log-normal model, it has been found that in comparison to monosized spherical aggregates, sound absorption of shiv is shifted towards the lower frequencies while transmission loss increases across the whole frequency range. It has been found that the gain

in sound absorption is mainly due to the particle size distribution of shiv, and that the gain in sound transmission loss is attributed to a shape and size distribution of particles, and to an increased tortuosity.

- ¹ M.-P. Boutin, C. Flamin, S. Quinton, and G. Gosse, *Analyse du cycle de vie : Compounds thermoplastiques chargés fibres de chanvre et Mur en béton de chanvre banché sur ossature bois. Rapport d'étude INRA Lille, réf MAP 04 B1 0501* (2005).
- ² L. Arnaud and E. Gourlay, "Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes.", *Construction and Building Materials* **28**, 50–56 (2011).
- ³ V. Cerezo, "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique", Ph.D. thesis, Ecole doctorale MEGA, Lyon (2005).
- ⁴ D. Samri, "Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique", Ph.D. thesis, Ecole doctorale MEGA, Lyon (2008).
- ⁵ P. Glé, E. Gourdon, and L. Arnaud, "Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity", *Applied Acoustics* **72**, 249–259 (2011).
- ⁶ C. Garcia-Jaldon, D. Dupeyre, and M. Vignon, "Fibres from semi-retted hemp bundles by steam explosion treatment", *Biomass and Bioenergy* **14** (3), 251–260 (1998).
- ⁷ P. Glé, E. Gourdon, and L. Arnaud, "Modelling of the acoustical properties of hemp particles", *Construction and Building Materials* **37**, 801–811 (2012).
- ⁸ A.-B. Yu and R.-P. Zou, "Prediction of the porosity of particle mixtures", *KONA Powder and particle* **16**, 67–81 (1998).
- ⁹ C. Boutin and C. Geindreau, "Periodic homogenization and consistent estimates of transport parameters through sphere and polyhedron packings in the whole porosity range", *Physical Review E* **82-036313**, 18 (2010).
- ¹⁰ O. Umnova, K. Attenborough, and K.-M. Li, "Cell model calculations of dynamic drag parameters in packings of spheres", *The Journal of the Acoustical Society of America* **107**, 3113–3119 (2000).
- ¹¹ K. Attenborough, "On the acoustic slow wave in air-filled granular media", *Journal of the Acoustical Society of America* **81**, 93–102 (1987).
- ¹² I. Malinouskaya, V.-V. Mourzenko, J.-F. Thovert, and P.-M. Adler, "Random packings of spiky particles: Geometry and transport properties", *Physical Review E* **80**, 011304, 16 (2009).
- ¹³ T. Iwase, Y. Izumi, and R. Kawabata, "A new measuring method for sound propagation constant by using sound tube without any air spaces back of a test material", in *Internoise 98, Christchurch, New Zealand*, 4 (1998).
- ¹⁴ X. Olny and R. Panneton, "Acoustical determination of the parameters governing thermal dissipation in porous media", *Journal of the Acoustical Society of America* **123**, 814–824 (2008).
- ¹⁵ R. Panneton and X. Olny, "Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media", *Journal of the Acoustical Society of America* **119**, 2027–2040 (2006).
- ¹⁶ I. Ceyte, "Béton de chanvre, définition des caractéristiques mécaniques de la chènevotte, Travail de Fin d'Études", ENTPE 155 (2008).
- ¹⁷ K.-V. Horoshenkov and M.-J. Swift, "The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal", *Journal of the Acoustical Society of America* **110** (5), 2371–2378 (2001).
- ¹⁸ K. Attenborough, "Models for the acoustical properties of air-saturated granular media", *Acta Acustica* **1**, 213–226 (1993).
- ¹⁹ C. Zwikker, J.-V.-D. Eijk, and C.-W. Kosten, "Absorption of sound by porous materials. part III", *Physica* **VIII**, 1094–1101 (1941).
- ²⁰ *ISO 9053: Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance* (1991).
- ²¹ J.-F. Allard, B. Castagnede, M. Henry, and W. Lauriks, "Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air", *Review of Scientific Instruments* **65**, 754–755 (1994).
- ²² C. Boutin and C. Geindreau, "Estimates and bounds of dynamic permeability of granular media", *Journal of the Acoustical Society of America* **124**, 3576–3593 (2008).
- ²³ C. Zwikker and C.-W. Kosten, *Sound Absorbing Materials* (Elsevier, New-York) (1949).
- ²⁴ J.-F. Allard and N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, Second Edition* (Wiley) (2009).
- ²⁵ X. Olny and C. Boutin, "Acoustic wave propagation in double porosity media", *Journal of the Acoustical Society of America* **114**, 73–89 (2003).
- ²⁶ D.-L. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media", *Fluid Mechanics* **176**, 379–402 (1987).
- ²⁷ K.-V. Horoshenkov, K. Attenborough, and S.-N. Chandler-Wilde, "Padé approximants for the acoustical properties of rigid frame porous media with pore size distributions", *Journal of the Acoustical Society of America* **104**, 1198–1209 (1998).
- ²⁸ R. Venegas and O. Umnova, "Acoustical properties of double porosity granular materials", *Journal of the Acoustical Society of America* **130** (5), 2765–2776 (2011).
- ²⁹ G. Pispola, K.-V. Horoshenkov, and A. Khan, "Comparison of two modeling approaches for highly heterogeneous porous media", *Journal of the Acoustical Society of America* **121**, 961–966 (2007).
- ³⁰ F. Asdrubali and K.-V. Horoshenkov, "On the acoustic properties of expanded clay granulates", *Building Acoustics* **9** (2), 85–98 (2002).
- ³¹ K.-V. Horoshenkov, "Control of traffic noise in city streets", Ph.D. thesis, University of Bradford (1996).
- ³² K.-V. Horoshenkov, O. Dazel, and J.-P. Groby, "The asymptotic behavior of some models for the acoustical properties of rigid frame porous media", in *CD-ROM Proc. Internoise 2012, New York* (2012).
- ³³ Y. Rouault and S. Assouline, "A probabilistic approach towards modelling the relationships between particle and pore size distributions: the multicomponent packed sphere case", *Powder Technology* **96**, 33–41 (1998).
- ³⁴ S.-I. Hwang and S.-I. Choi, "Use of a lognormal distribution model for estimating soil water retention curves from particle size distribution data", *Journal of Hydrology* **323**, 325–334 (2006).

10 Propriétés acoustiques des bétons de chanvre

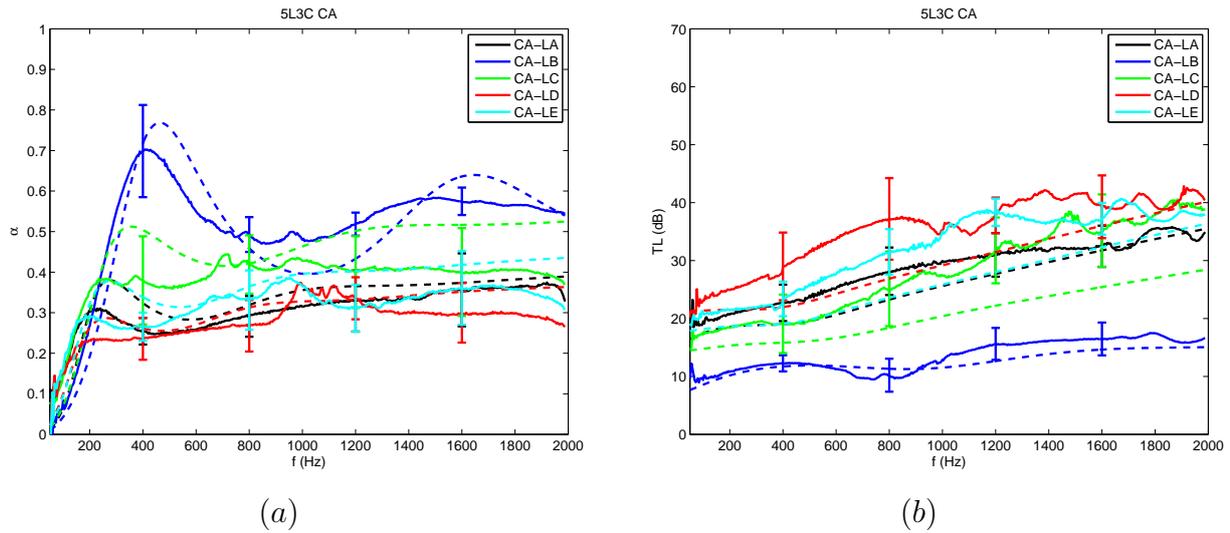


Figure D.12 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec de la chènevotte CA. Résultats expérimentaux (-) et modélisation (-)

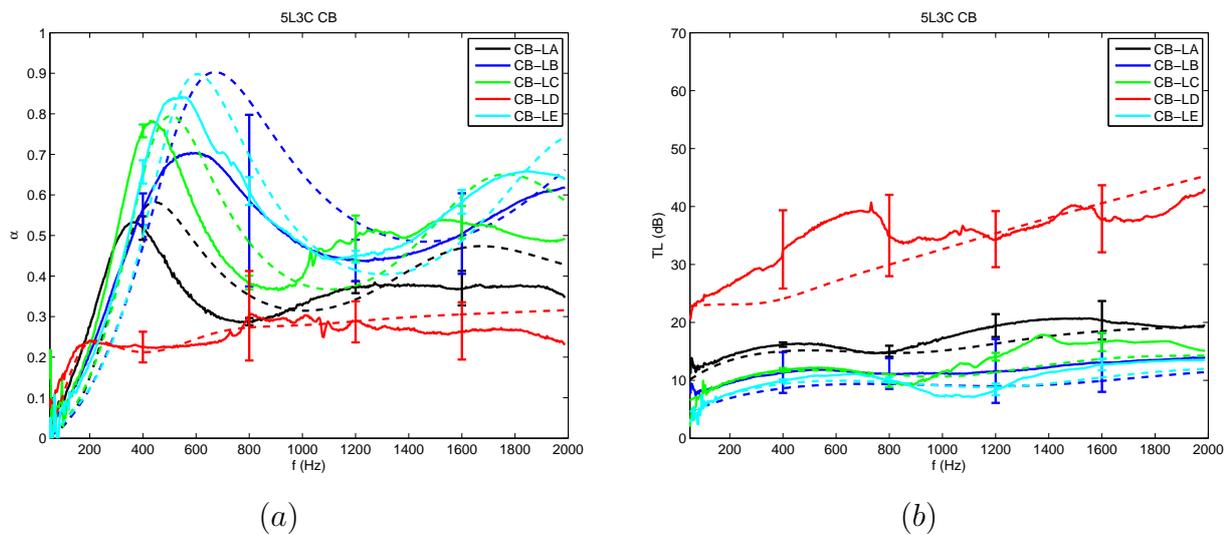


Figure D.13 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec de la chènevotte CB. Résultats expérimentaux (-) et modélisation (-)

10 Propriétés acoustiques des bétons de chanvre

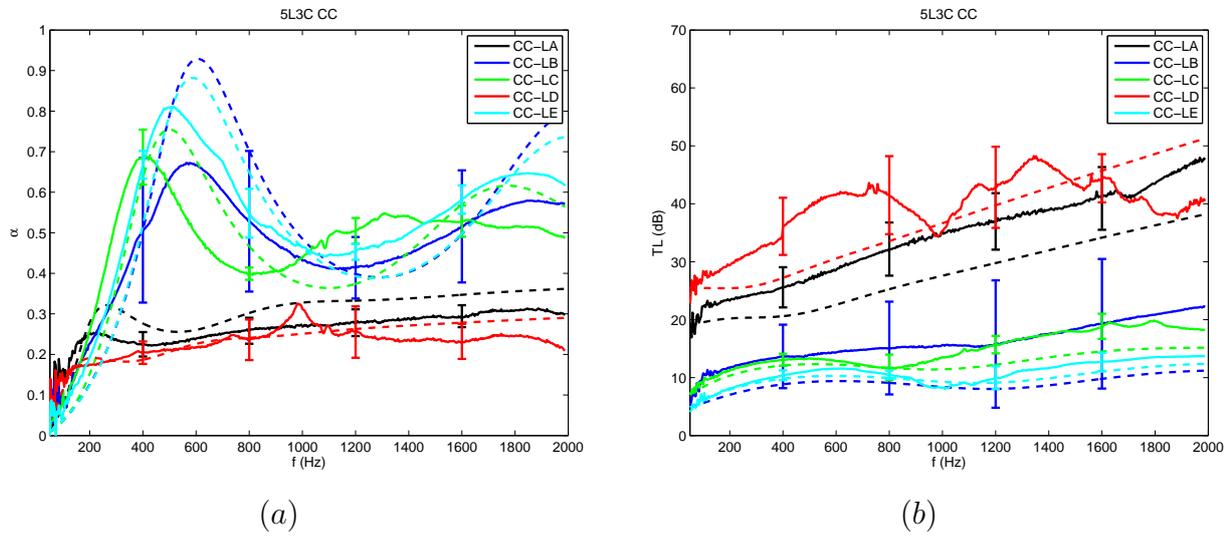


Figure D.14 – Absorptions acoustiques (a) et indices d'affaiblissement acoustique (b) des bétons de chanvre réalisés avec de la chènevotte CC. Résultats expérimentaux (-) et modélisation (-)

Annexe E : Applications

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

11.1 Sensibilité des propriétés des chènevottes aux paramètres de culture

11.1.1 Résultats obtenus sur les chènevottes cultivées en 2009

Annexe E : Applications

Chanvre	Masses volumiques de squelette ($kg.m^{-3}$)	
	Moyenne	Ecart-type
F17-25	806	1
F17-50	799	1
F17-75	799	2
F32-25	831	1
F32-50	818	8
F32-75	847	2
Uso31-25	815	3
Uso31-50	796	2
Uso31-75	819	4
F17-25	806	1
F32-25	831	1
Uso31-25	815	3
F17-50	799	1
F32-50	818	8
Uso31-50	796	2
F17-75	799	2
F32-75	847	2
Uso31-75	819	4
Standart-bas	824	3
F17-50	799	1
Standart-haut	871	4
F17-50	799	1
Rouissage-moyen	1292	16
Rouissage-long	1171	4
Stade-fleuraison	894	6
Fin-fleuraison	907	5
F17-50	799	1
Zero-azote	900	5
F17-50	799	1
Azote-eleve	817	3

Tableau E.1 – Masses volumiques de squelette des chènevottes de l'année 2009

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

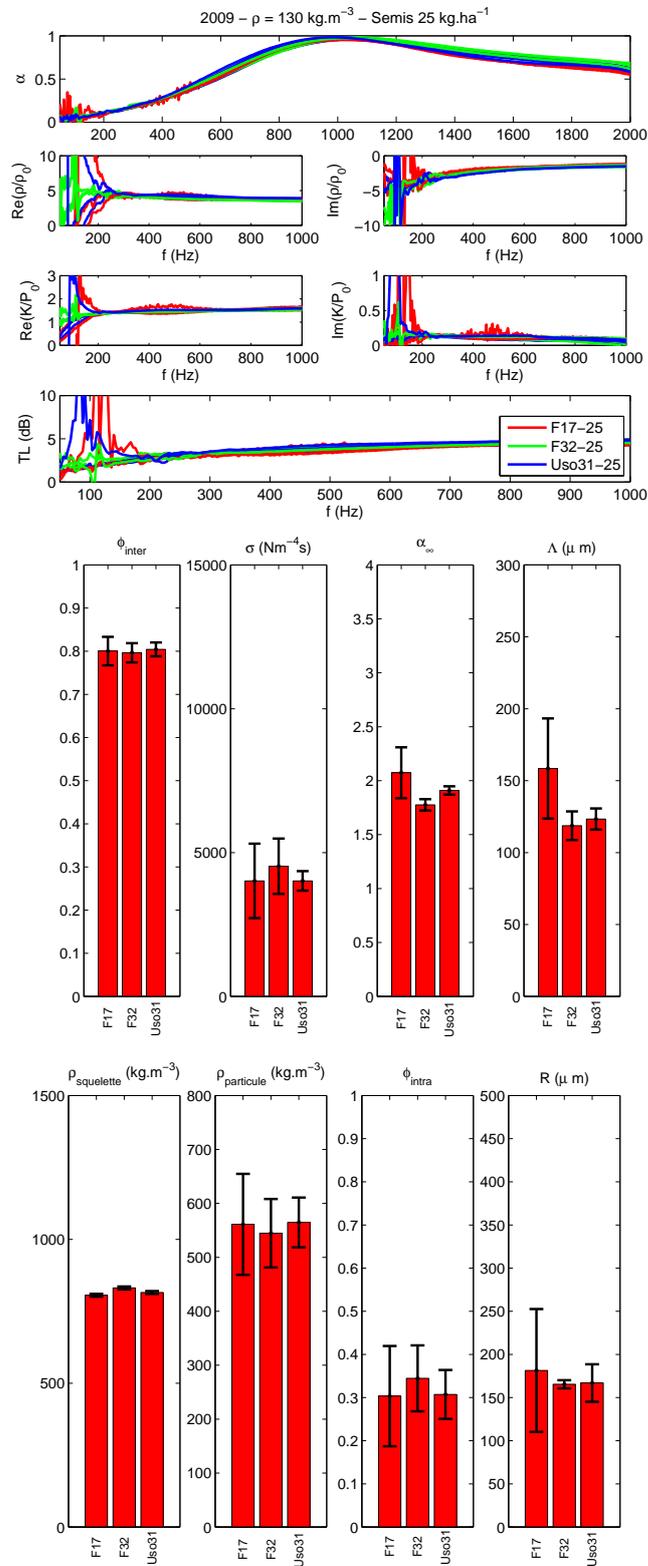


Figure E.1 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de la variété - 25 kg.ha^{-1}

Annexe E : Applications

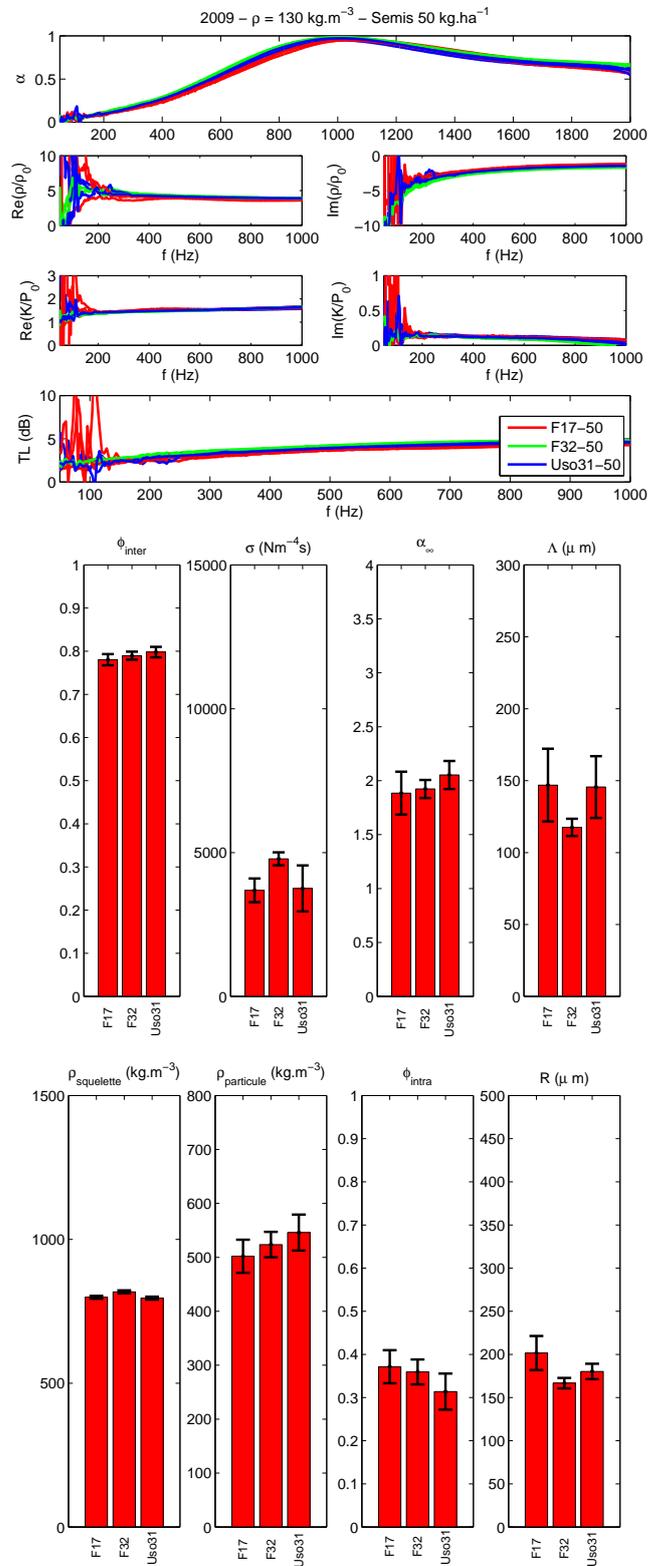


Figure E.2 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de la variété - 50 kg.ha^{-1}

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

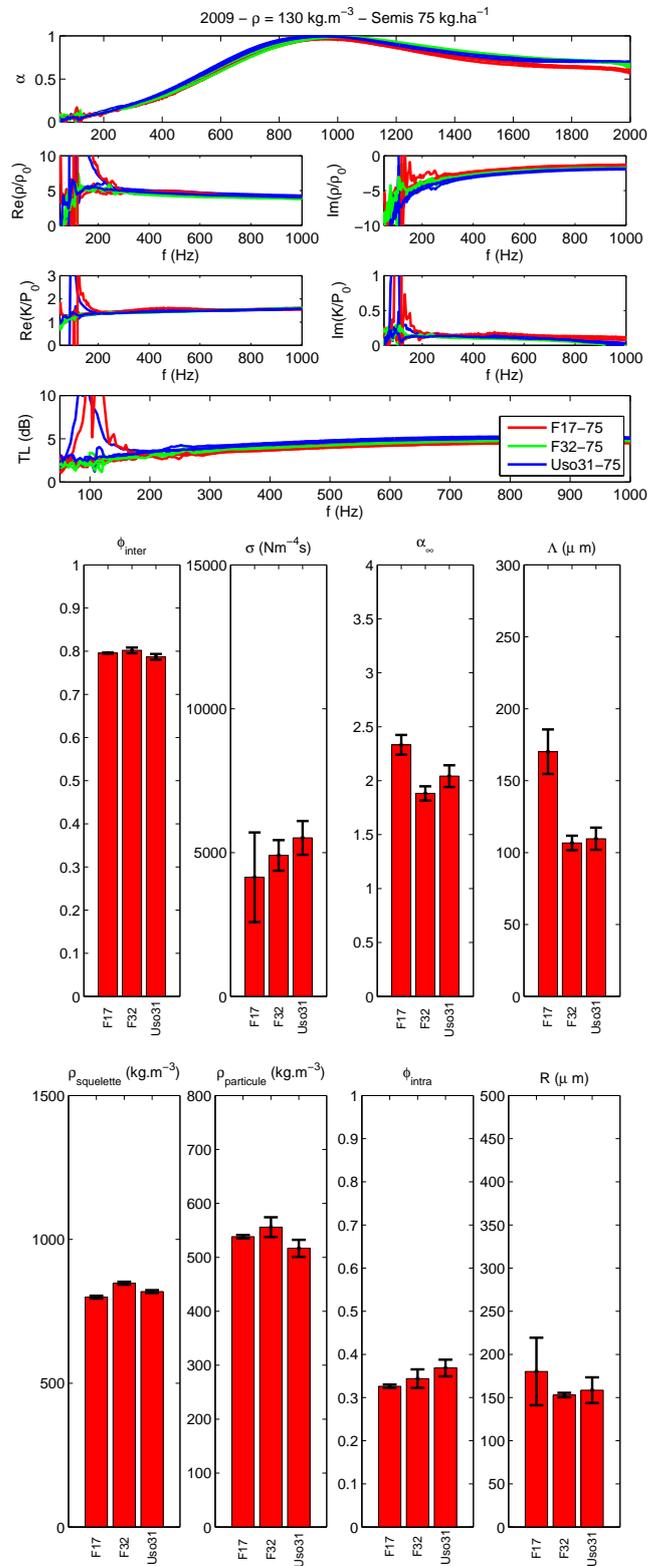


Figure E.3 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de la variété - 75 kg.ha^{-1}

Annexe E : Applications

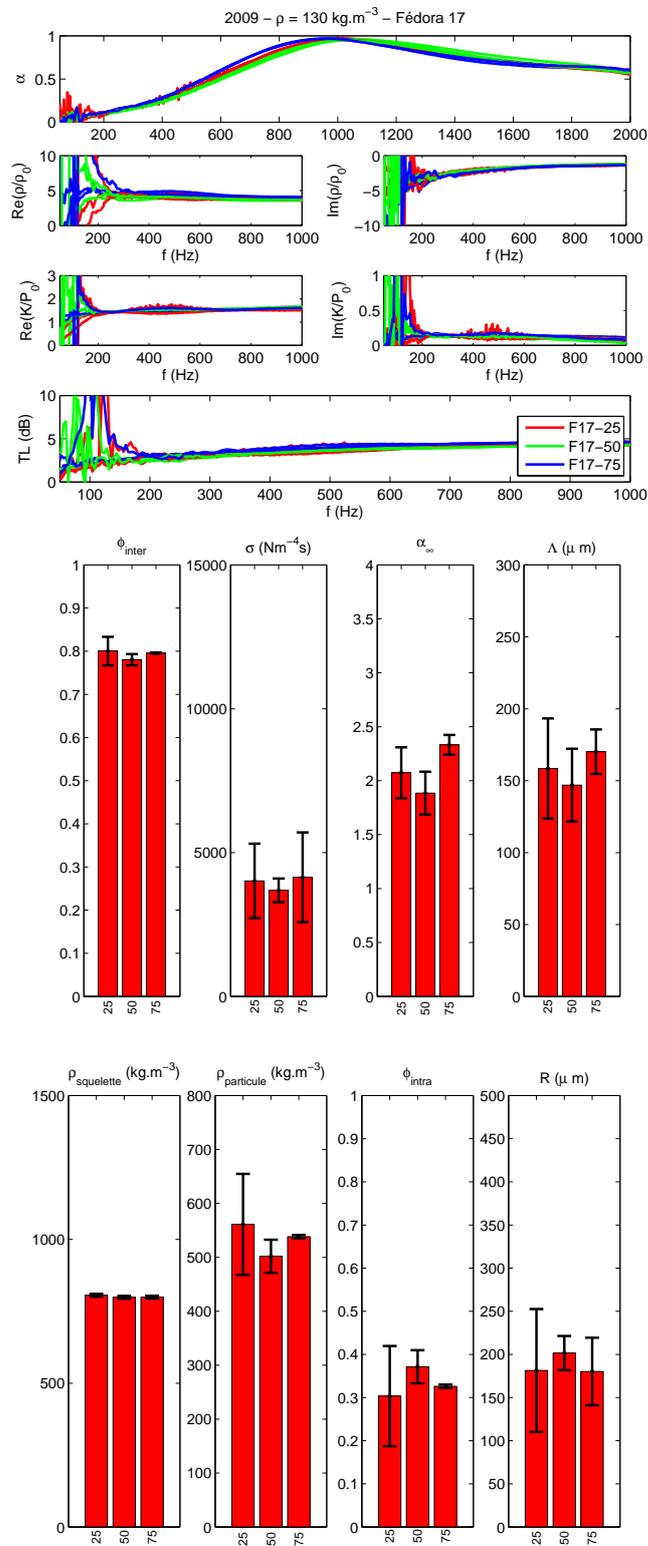


Figure E.4 – Propriétés acoustiques des chènèvoites en fonction de la densité de semis - F17

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

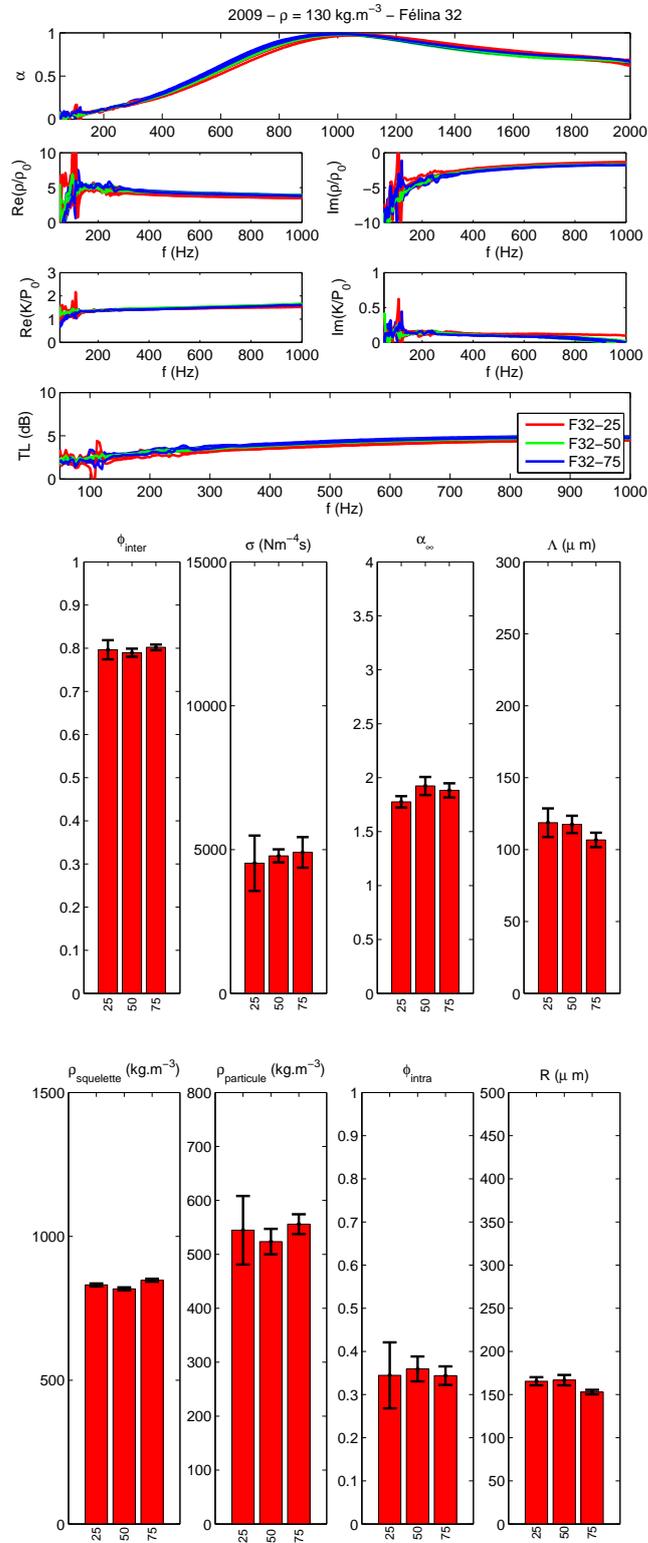


Figure E.5 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de la densité de semis - F32

Annexe E : Applications

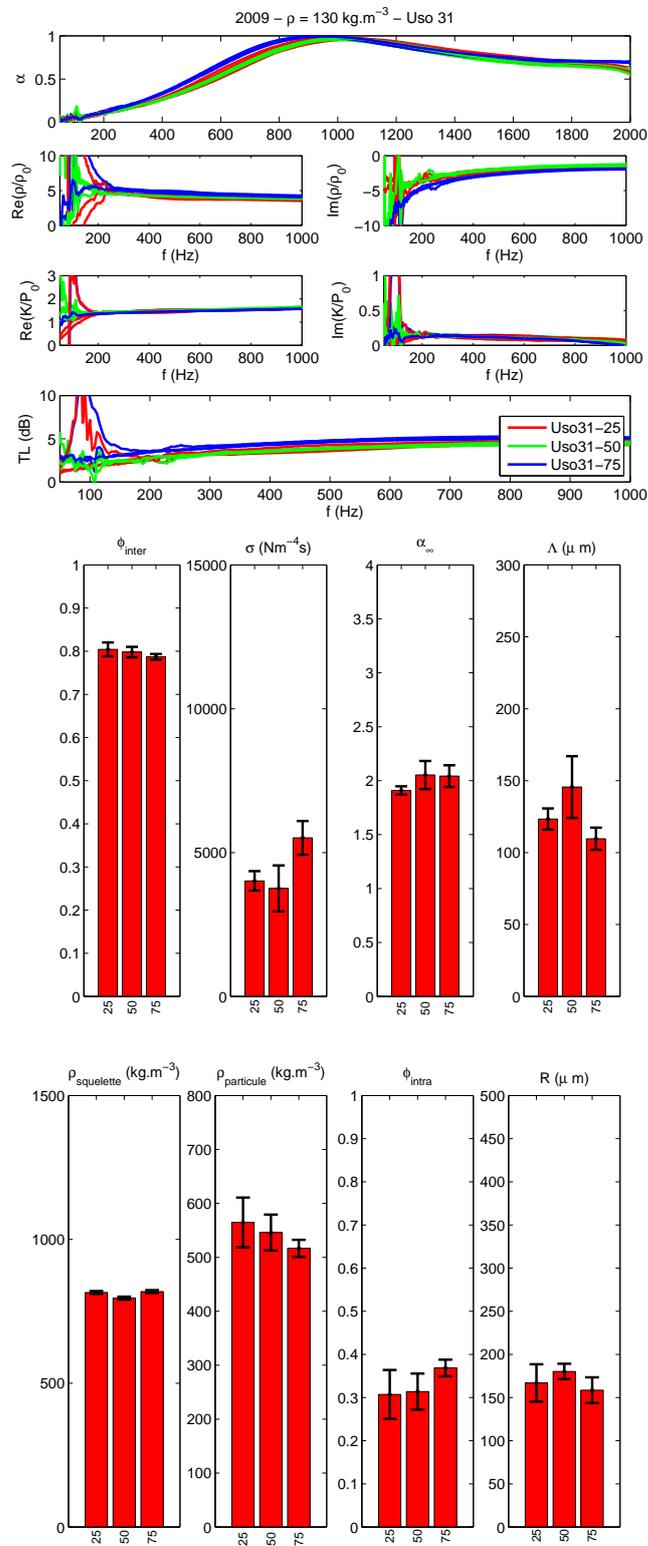


Figure E.6 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de la densité de semis - Uso31

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

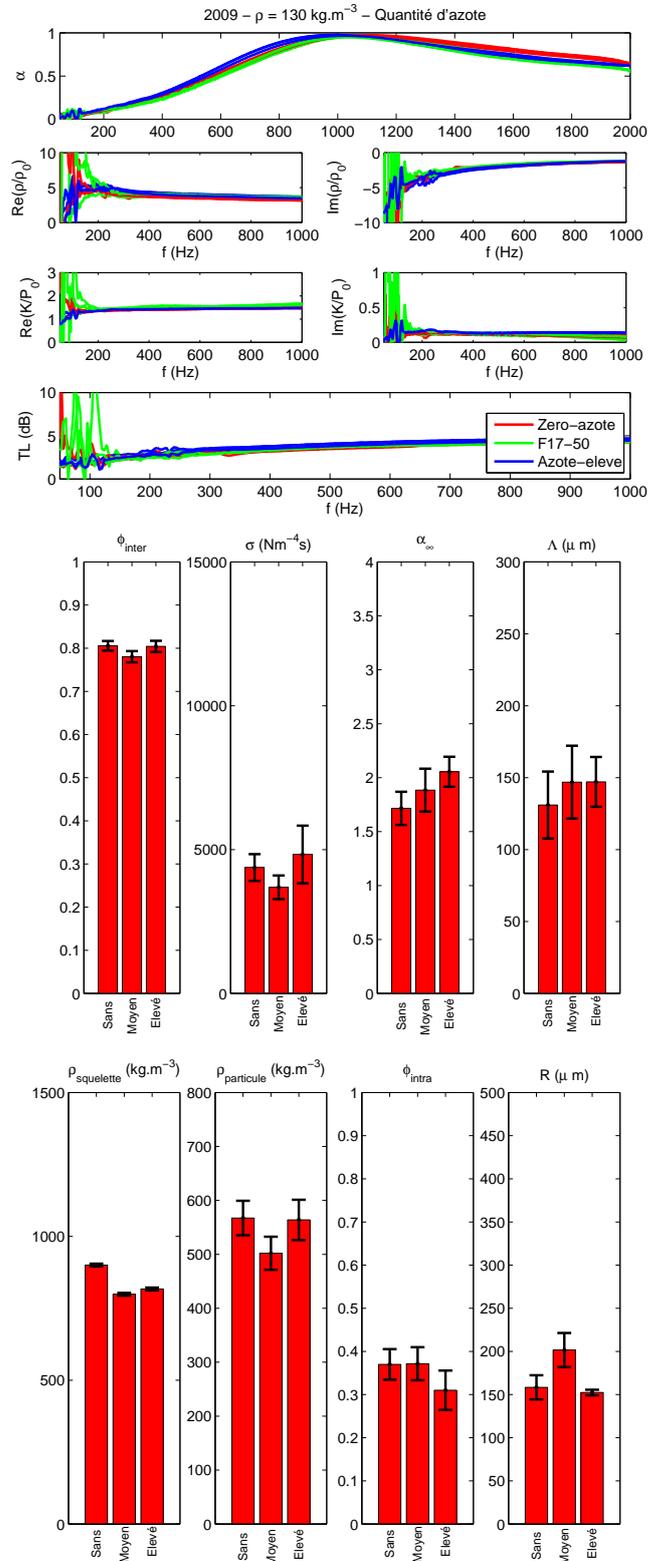


Figure E.7 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de la quantité d'azote

Annexe E : Applications

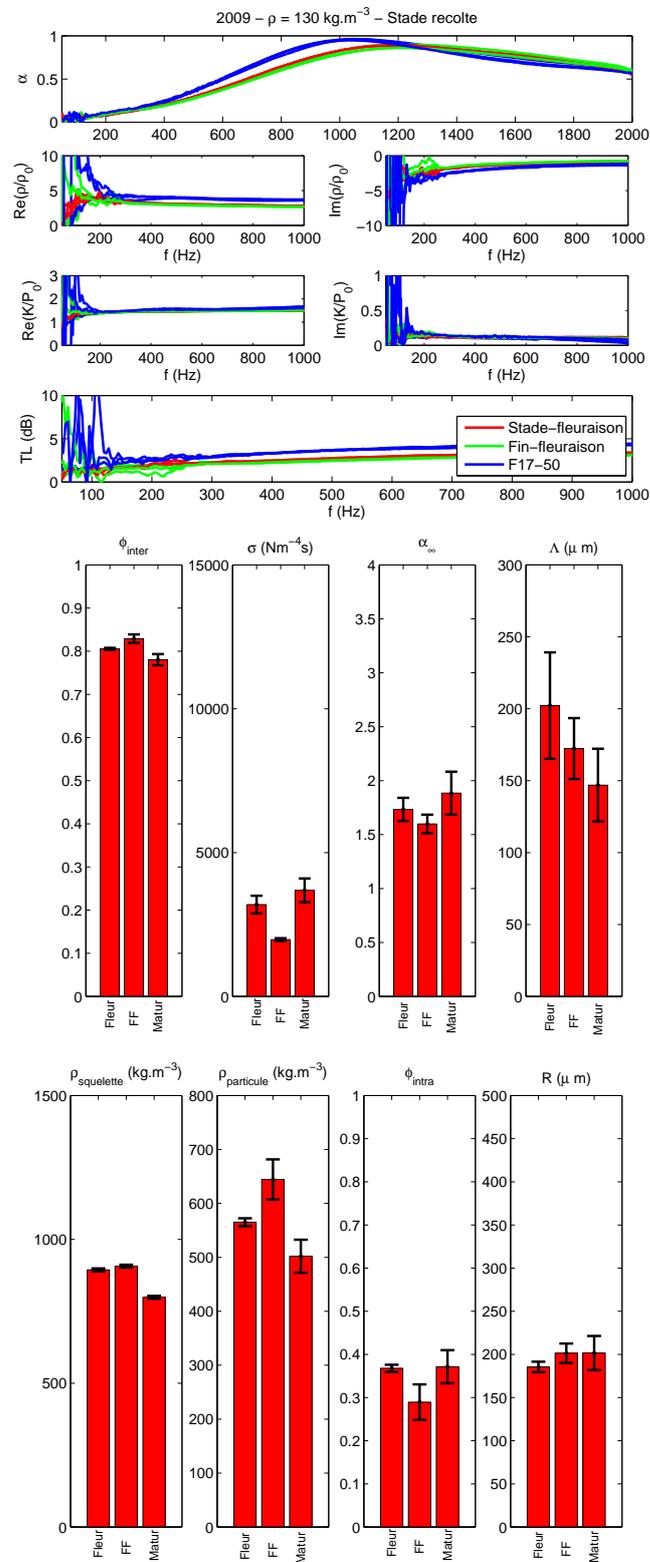


Figure E.8 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction du stade de récolte

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

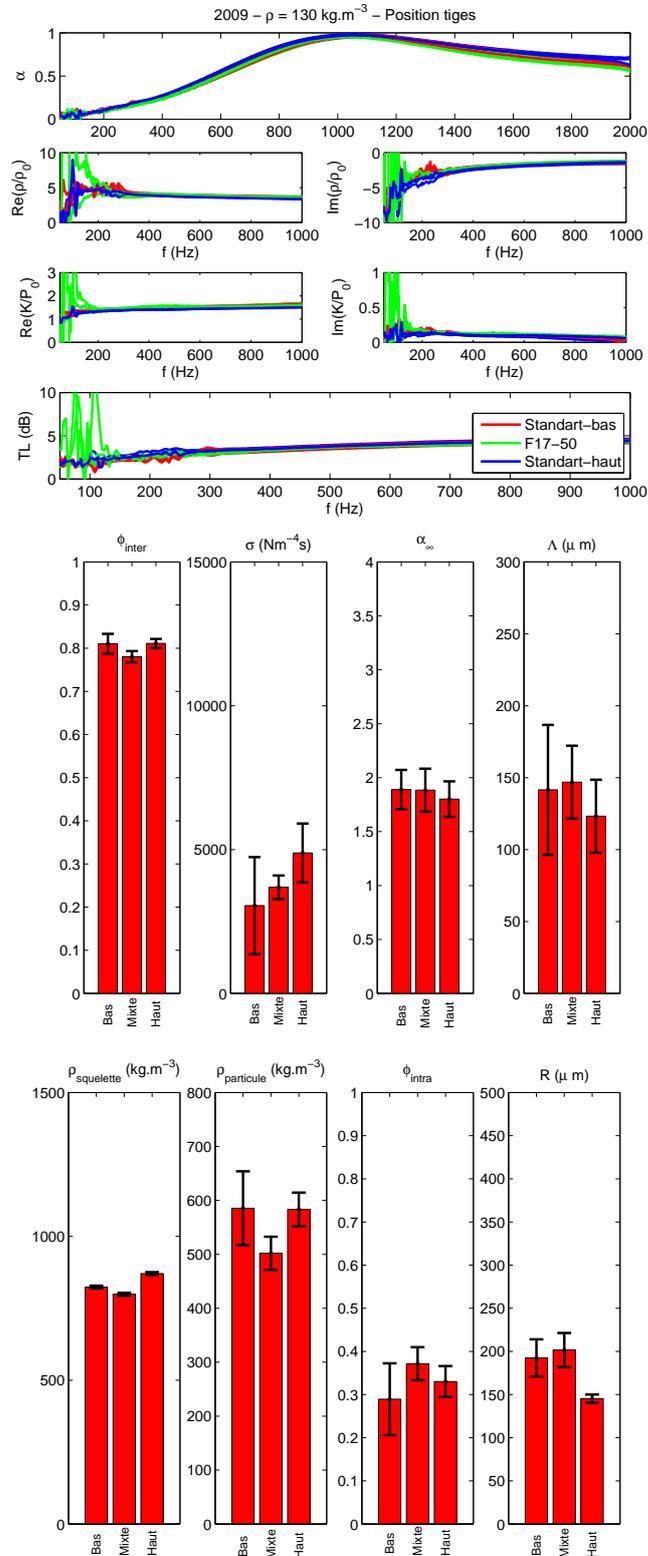


Figure E.9 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de leur origine dans la tige

Annexe E : Applications

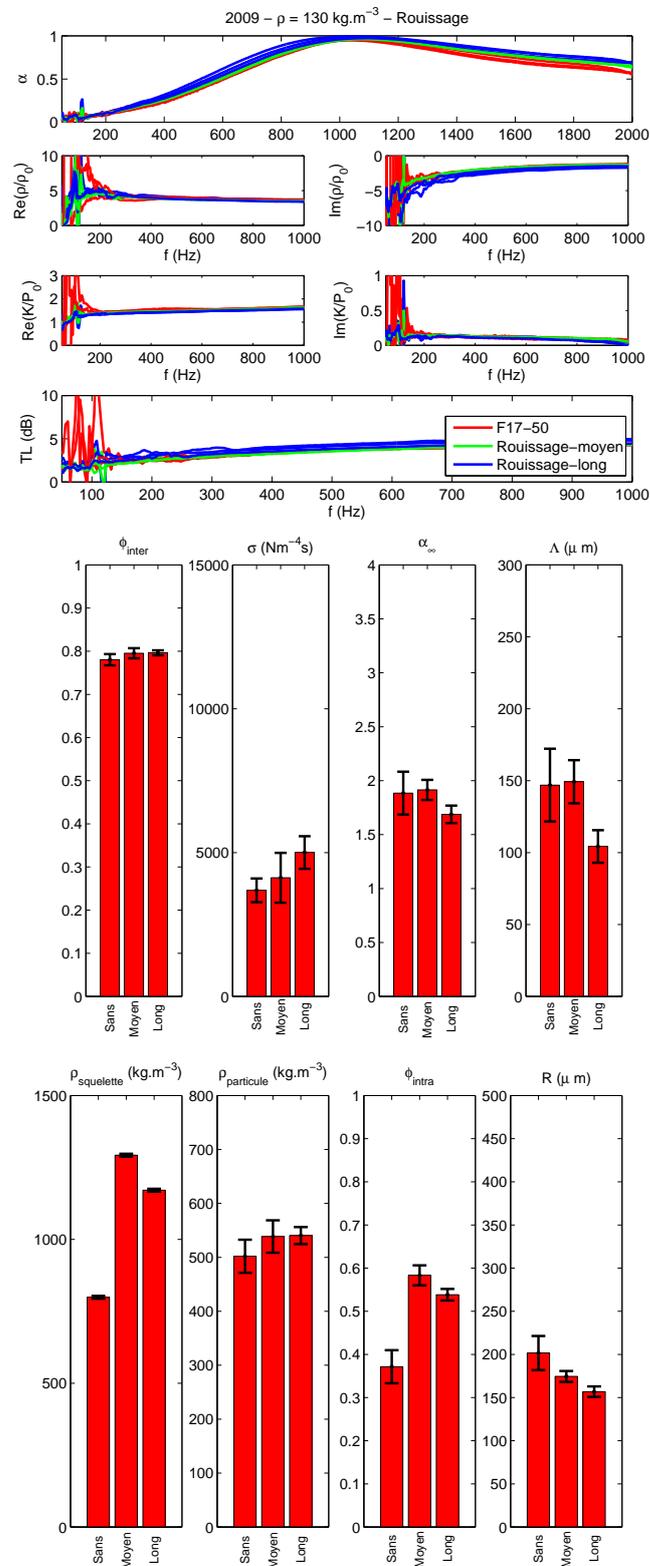


Figure E.10 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction du rouissage

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

11.1.2 Résultats obtenus sur les chènevottes cultivées en 2010

Chanvre	Masses volumiques de squelette ($kg.m^{-3}$)	
	Moyenne	Ecart-type
E68	740	12
F12	672	14
F17	782	5
F32	733	4
F75	753	4
S27	699	3
Uso31	671	3
F17-25	803	4
F17-50	839	2
F17-75	904	4
F32-25	829	4
F32-50	826	5
F32-75	828	3
Uso31-25	803	1
Uso31-50	871	2
Uso31-75	842	1
F17-25	803	4
F32-25	829	4
Uso31-25	803	1
F17-50	839	2
F32-50	826	5
Uso31-50	871	2
F17-75	904	4
F32-75	828	3
Uso31-75	842	1
Standart-bas	884	1
F17-50	839	2
Standart-haut	813	1
F17-50	839	2
Rouissage-moyen	1299	1
Stade-fleuraison	836	3
Fin-fleuraison	835	4
F17-50	839	2
Zero-azote	820	3
F17-50	839	2
Azote-eleve	792	3

Tableau E.2 – Masses volumiques de squelette des chènevottes de l'année 2010

Annexe E : Applications

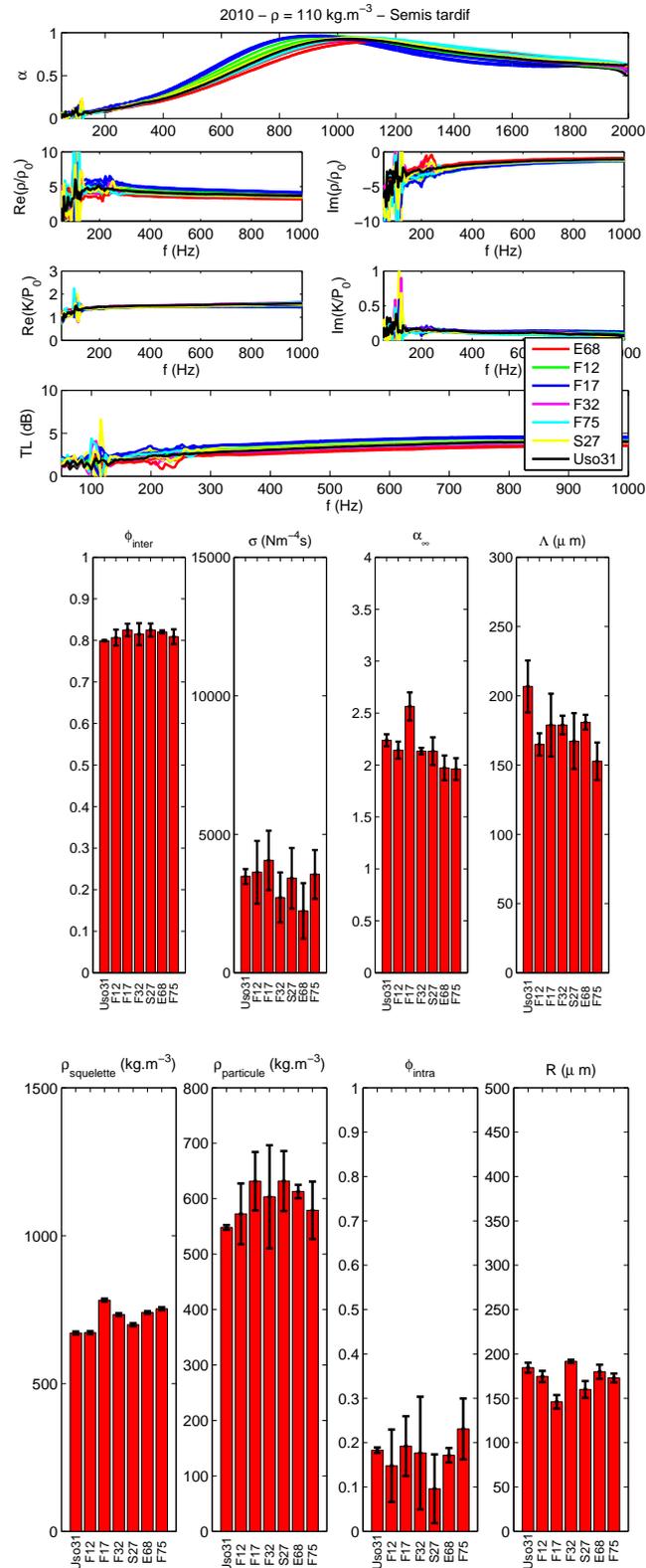


Figure E.11 – Propriétés acoustiques des chènèvotes en fonction de la variété - semis tardif

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

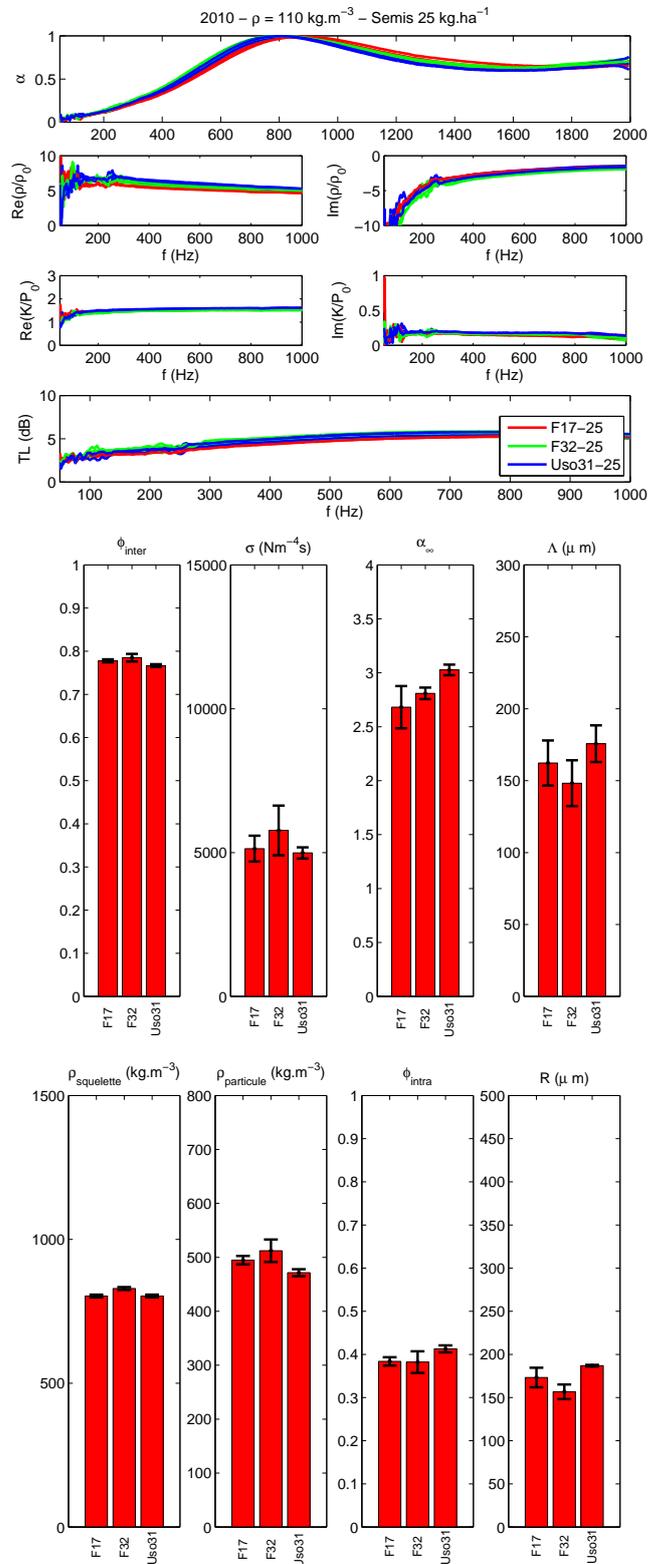


Figure E.12 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de la variété - 25 kg.ha^{-1}

Annexe E : Applications

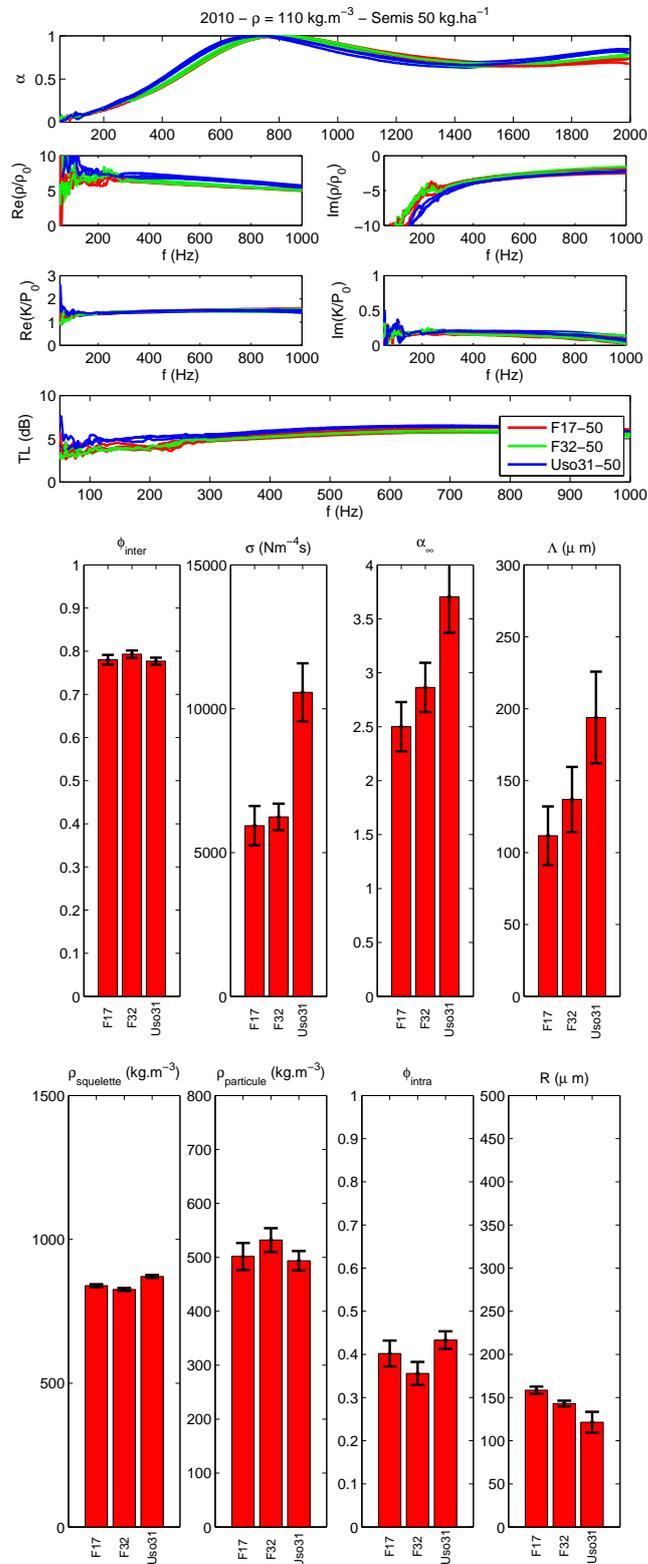


Figure E.13 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de la variété - 50 kg.ha^{-1}

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

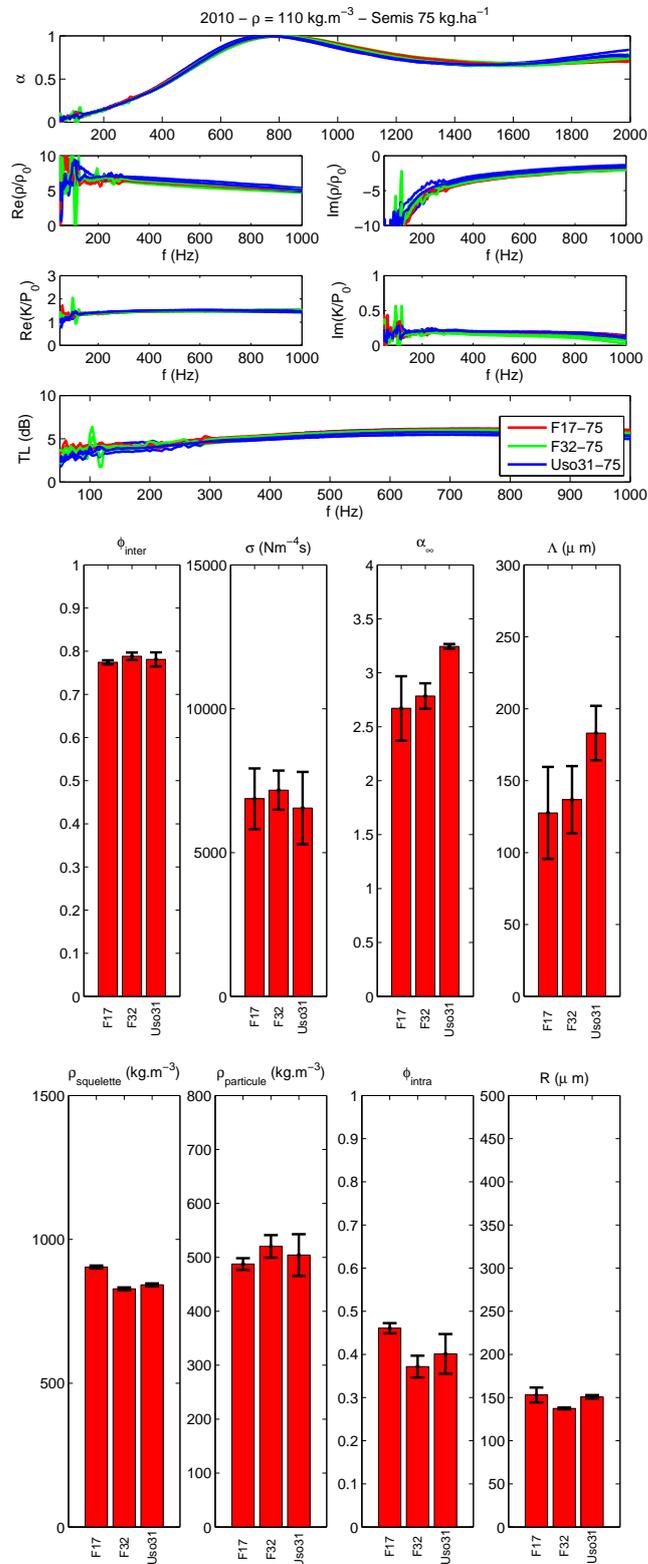


Figure E.14 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de la variété - 75 kg.ha^{-1}

Annexe E : Applications

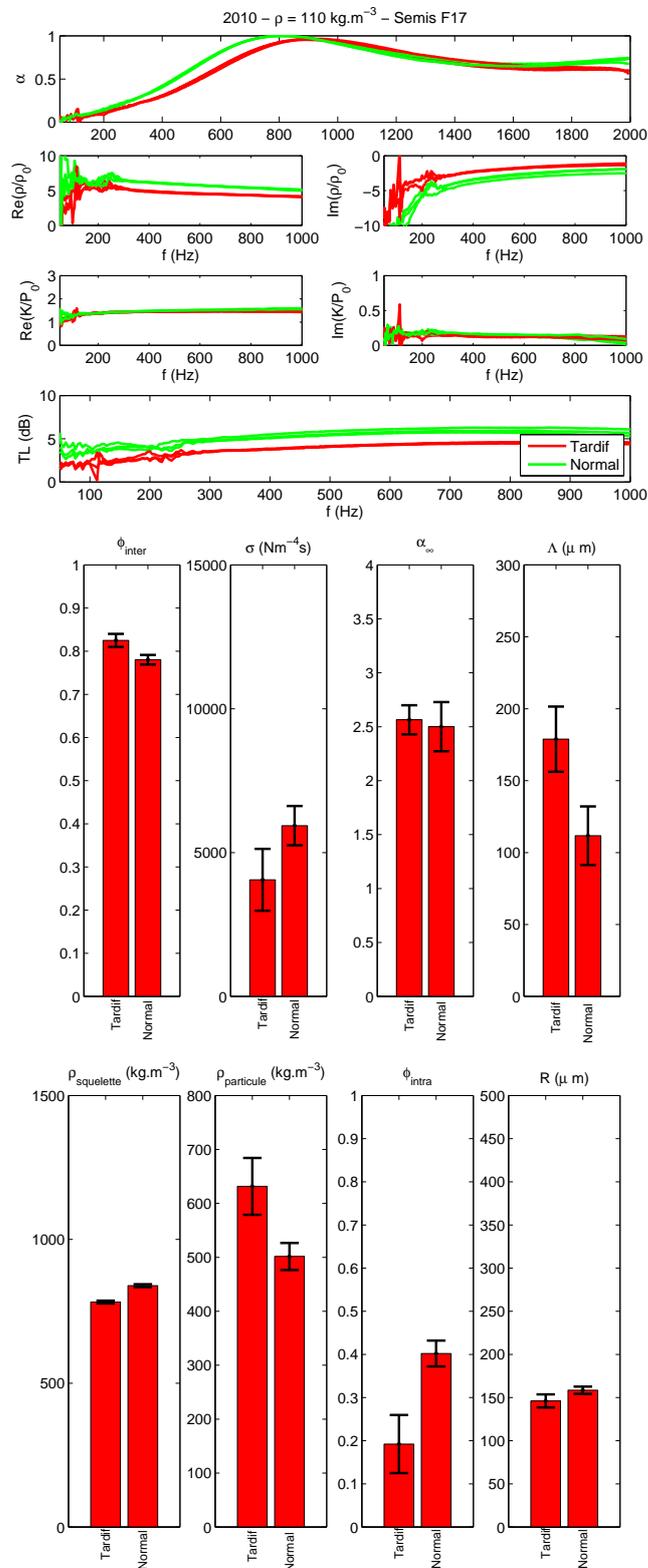


Figure E.15 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de la date de semis - F17

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

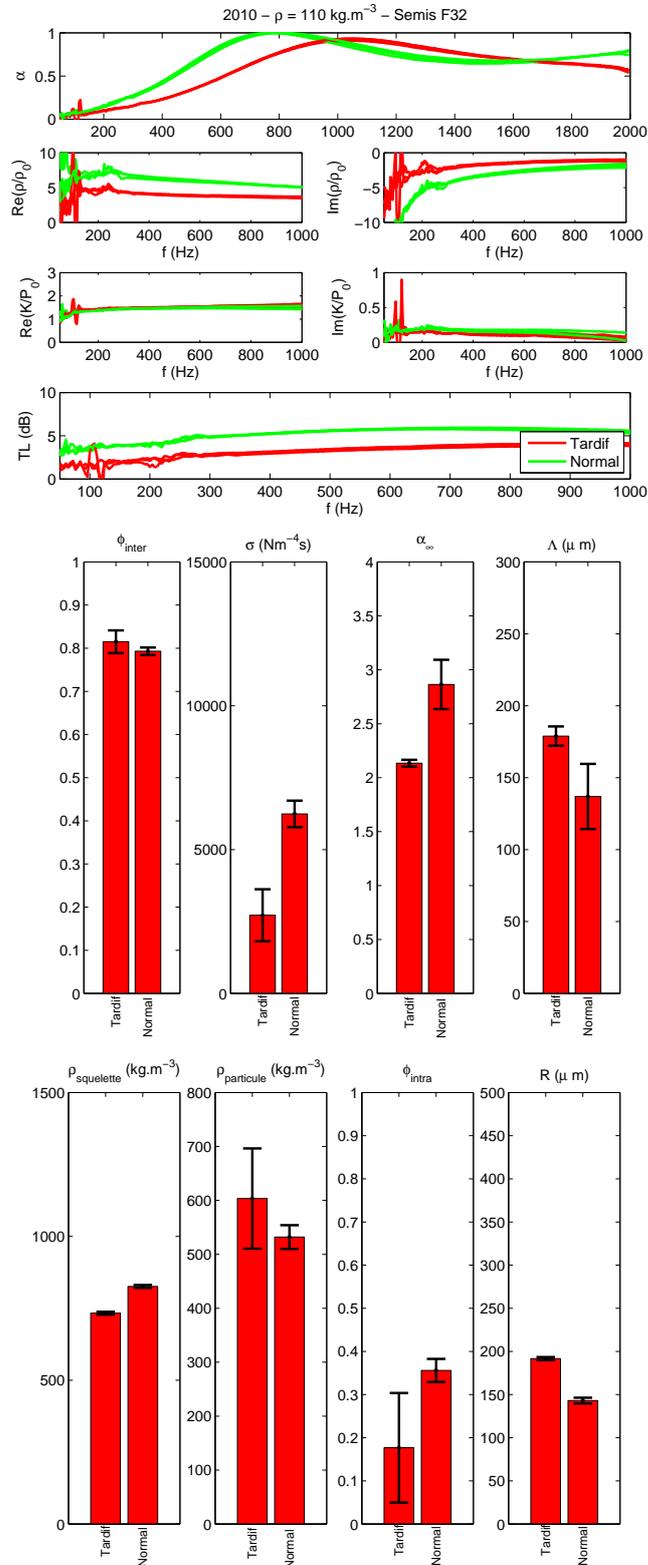


Figure E.16 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de la date de semis - F32

Annexe E : Applications

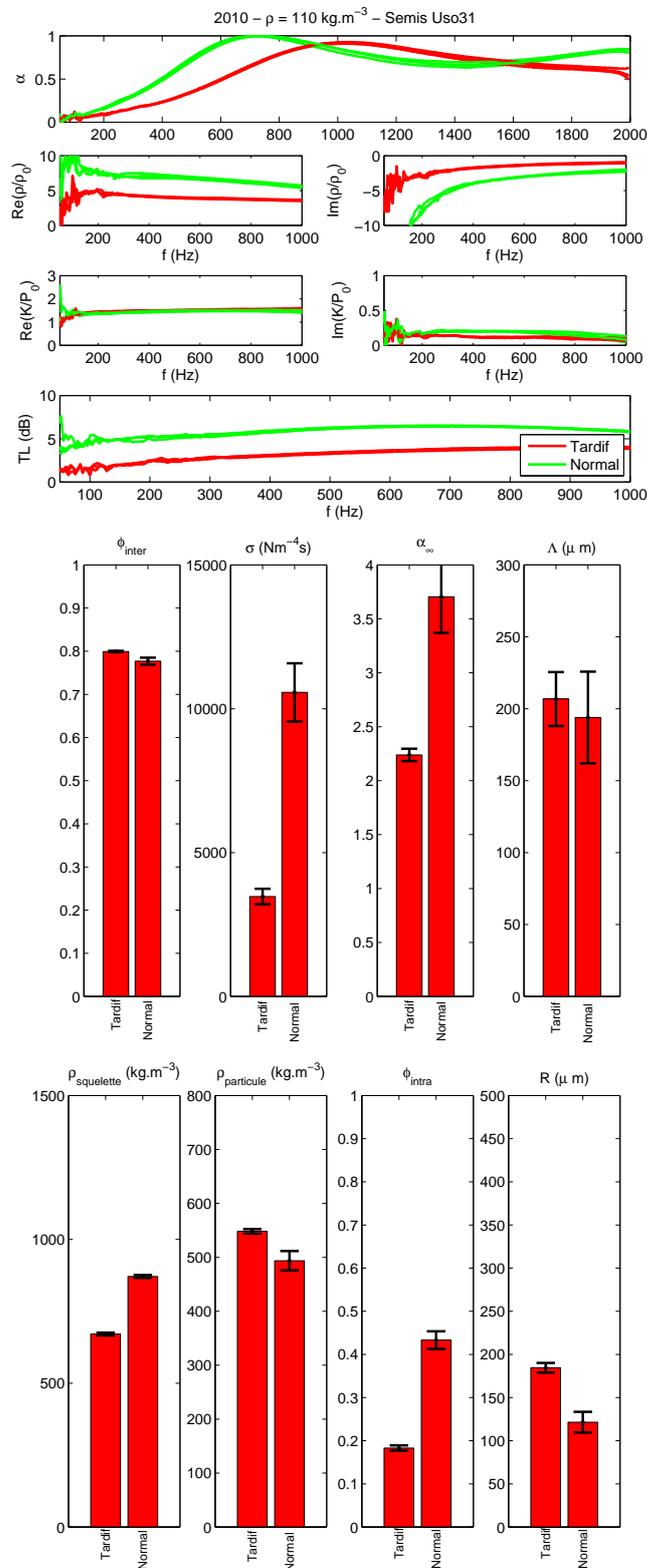


Figure E.17 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de la date de semis - Uso31

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

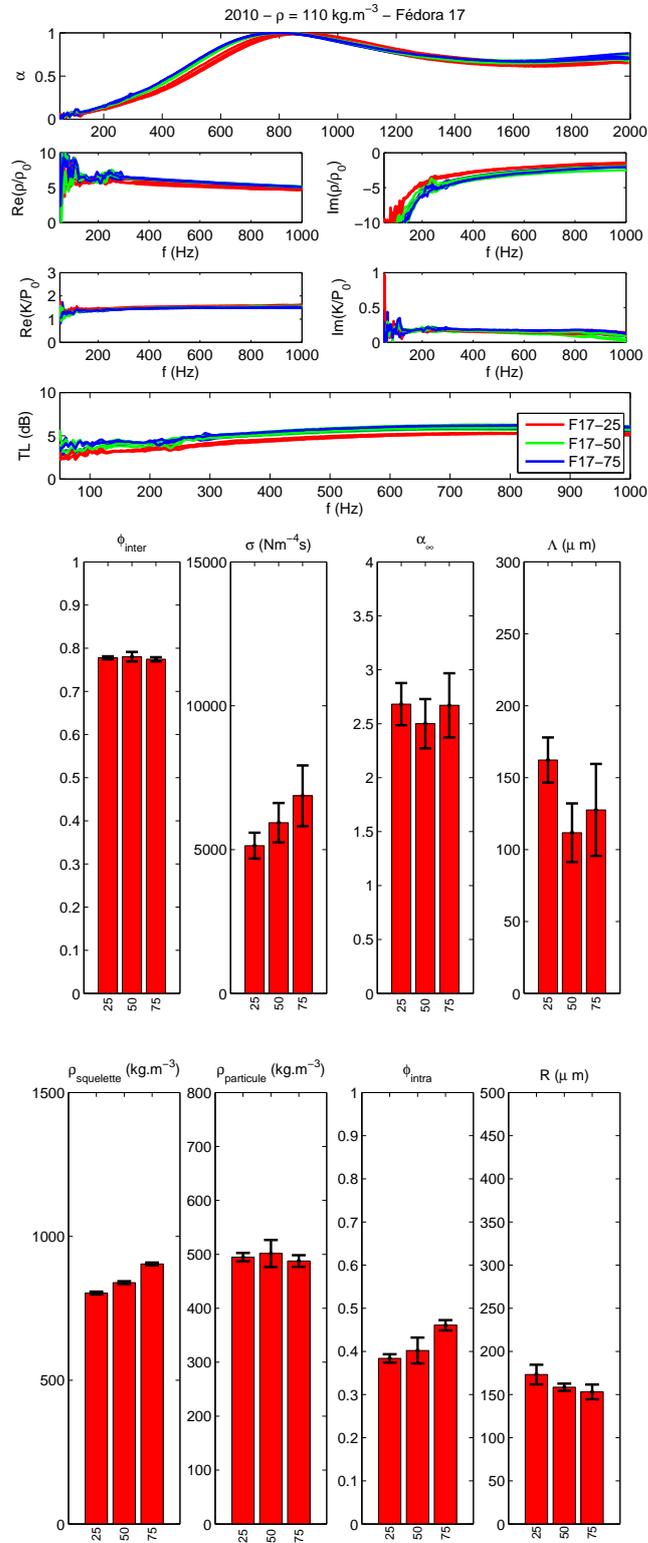


Figure E.18 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de la densité de semis - F17

Annexe E : Applications

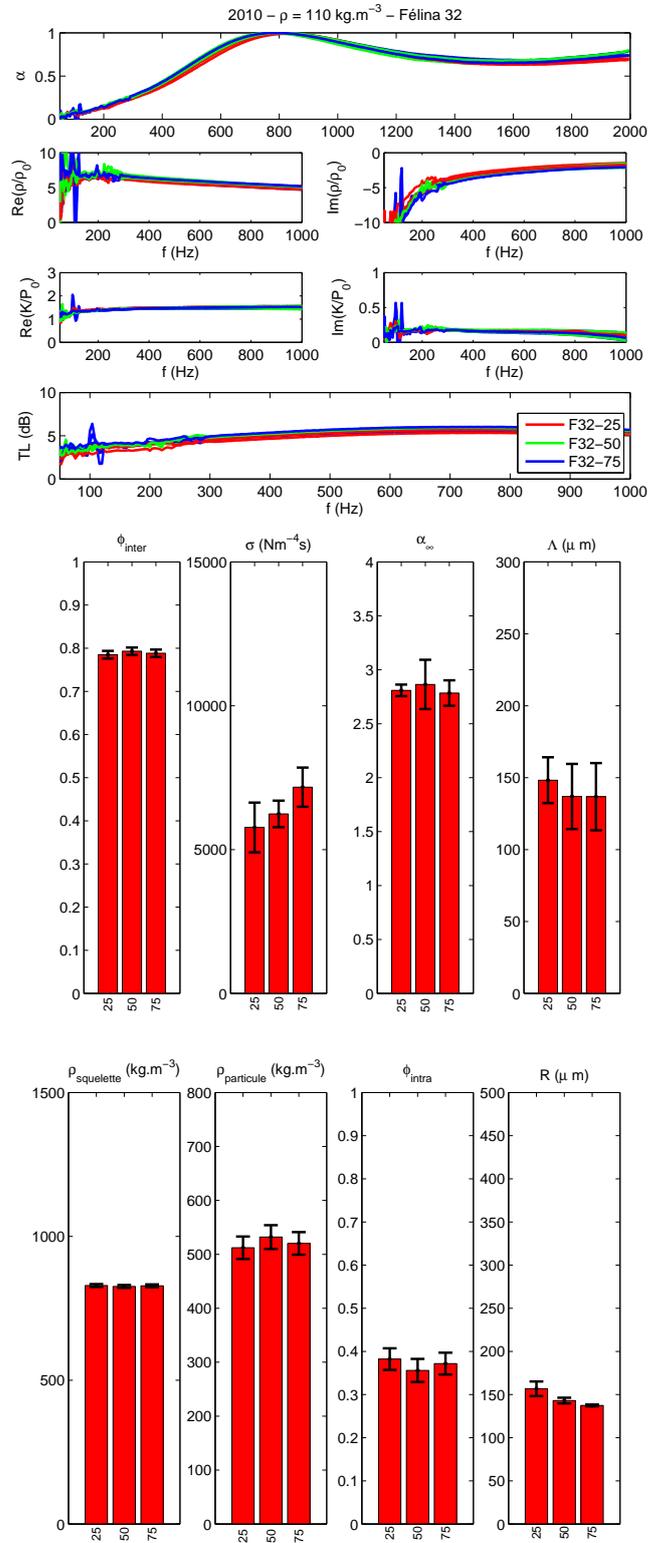


Figure E.19 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de la densité de semis - F32

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

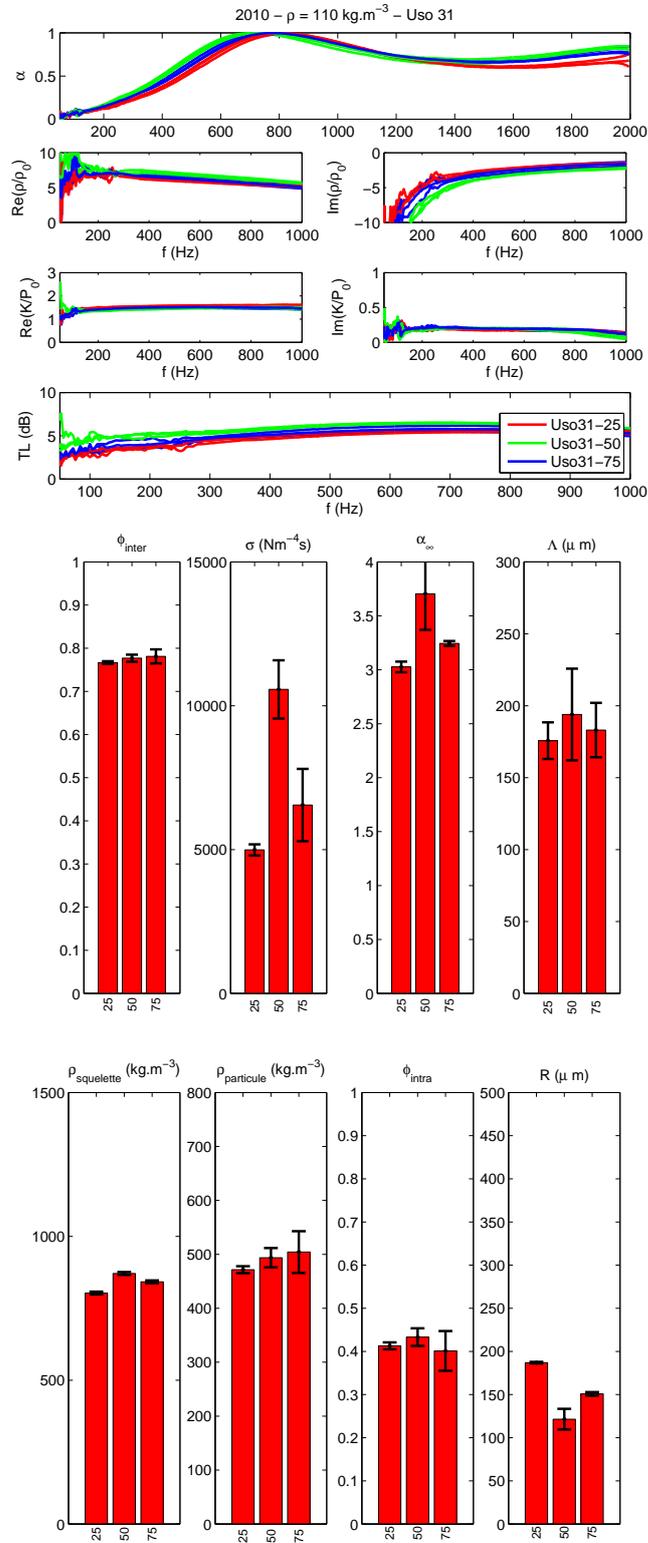


Figure E.20 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de la densité de semis - Uso31

Annexe E : Applications

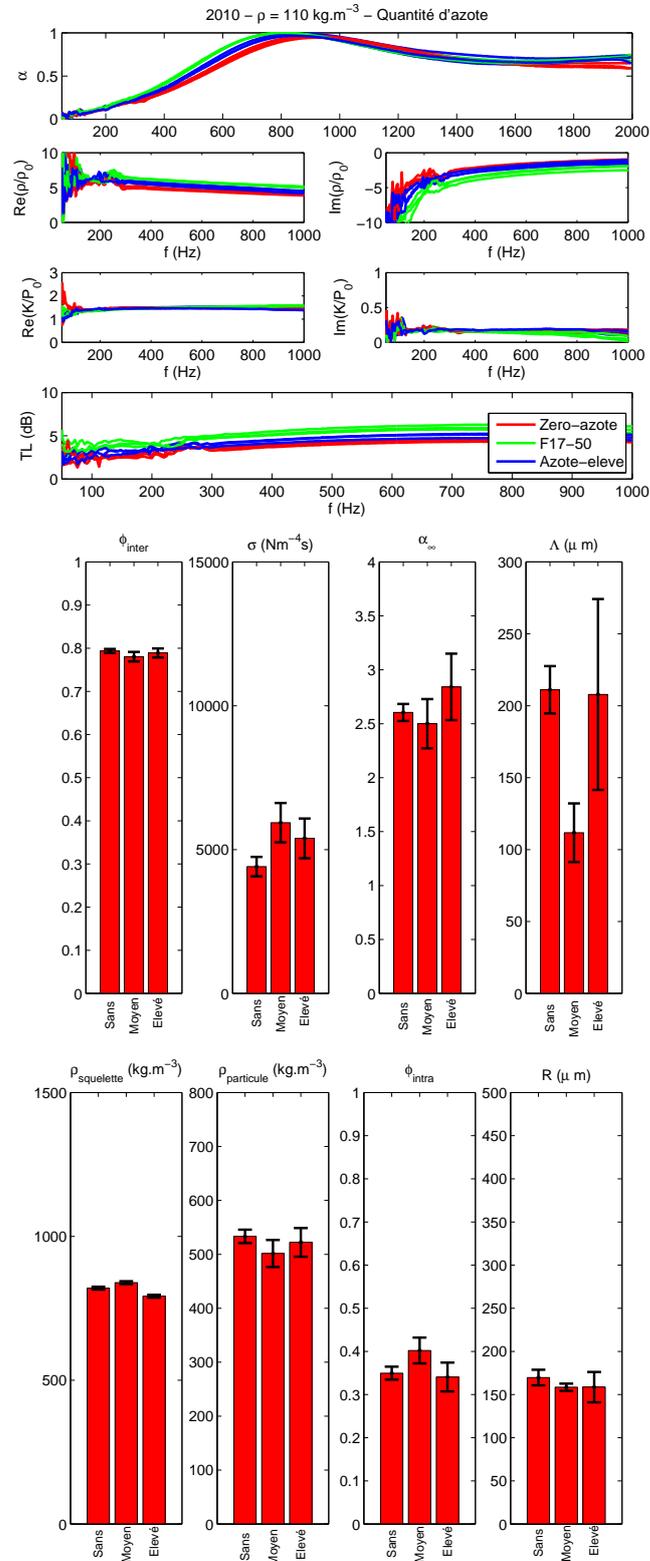


Figure E.21 – Propriétés acoustiques des chenevottes en fonction de la quantité d'azote

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

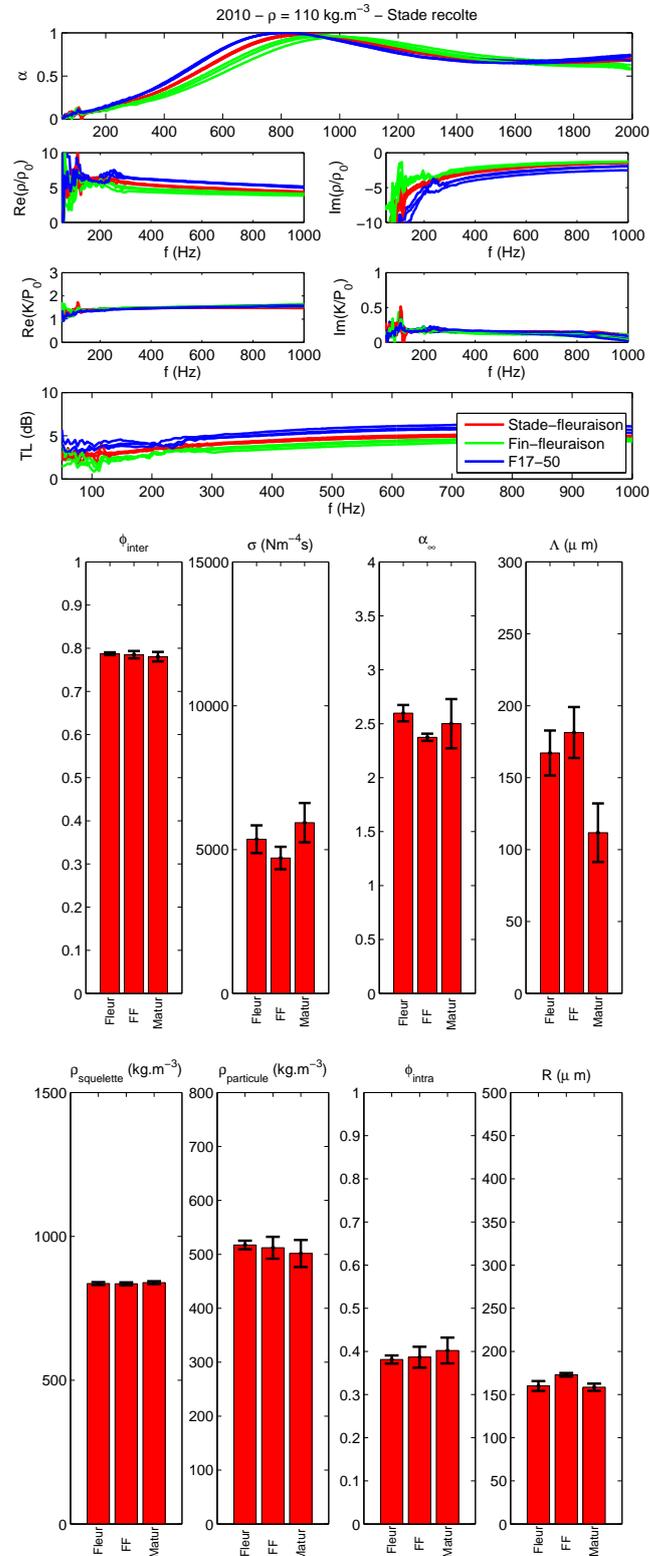


Figure E.22 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction du stade de récolte

Annexe E : Applications

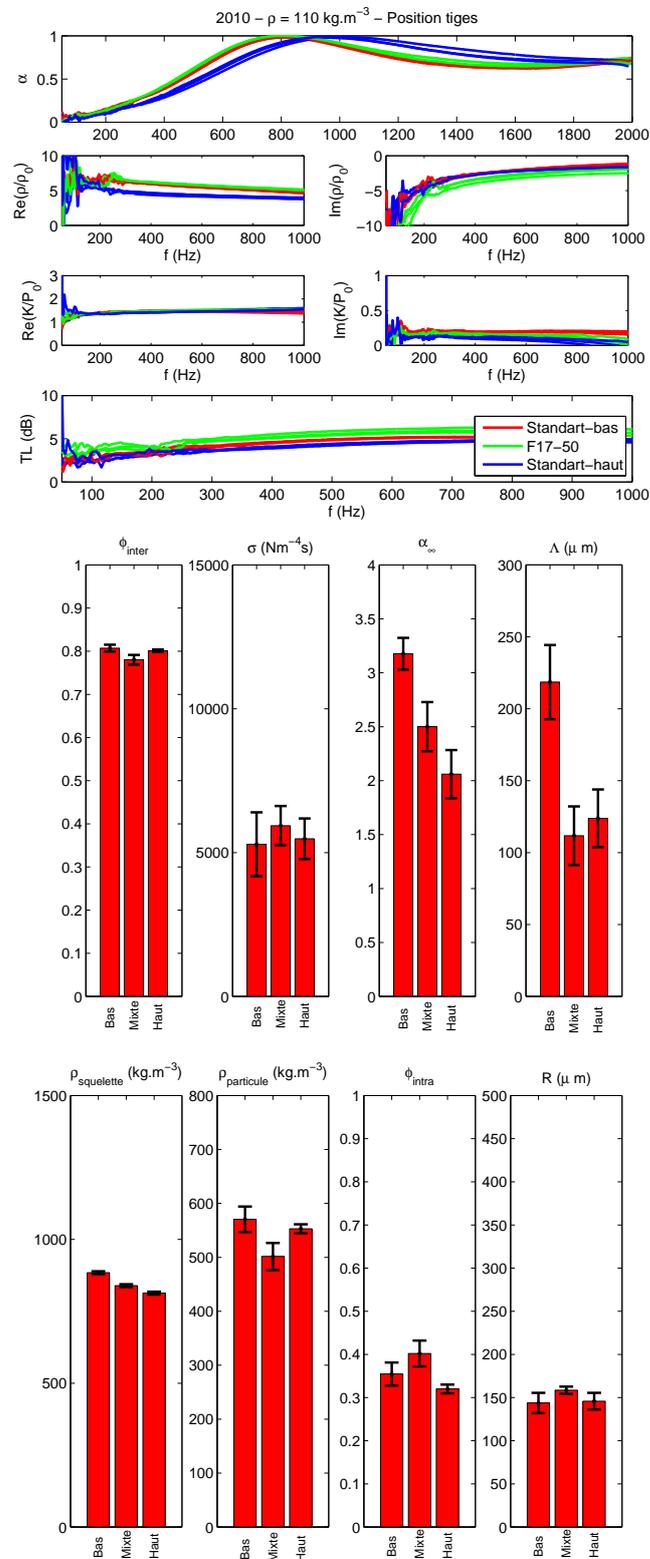


Figure E.23 – Propriétés acoustiques des chènervottes en fonction de leur origine dans la tige

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

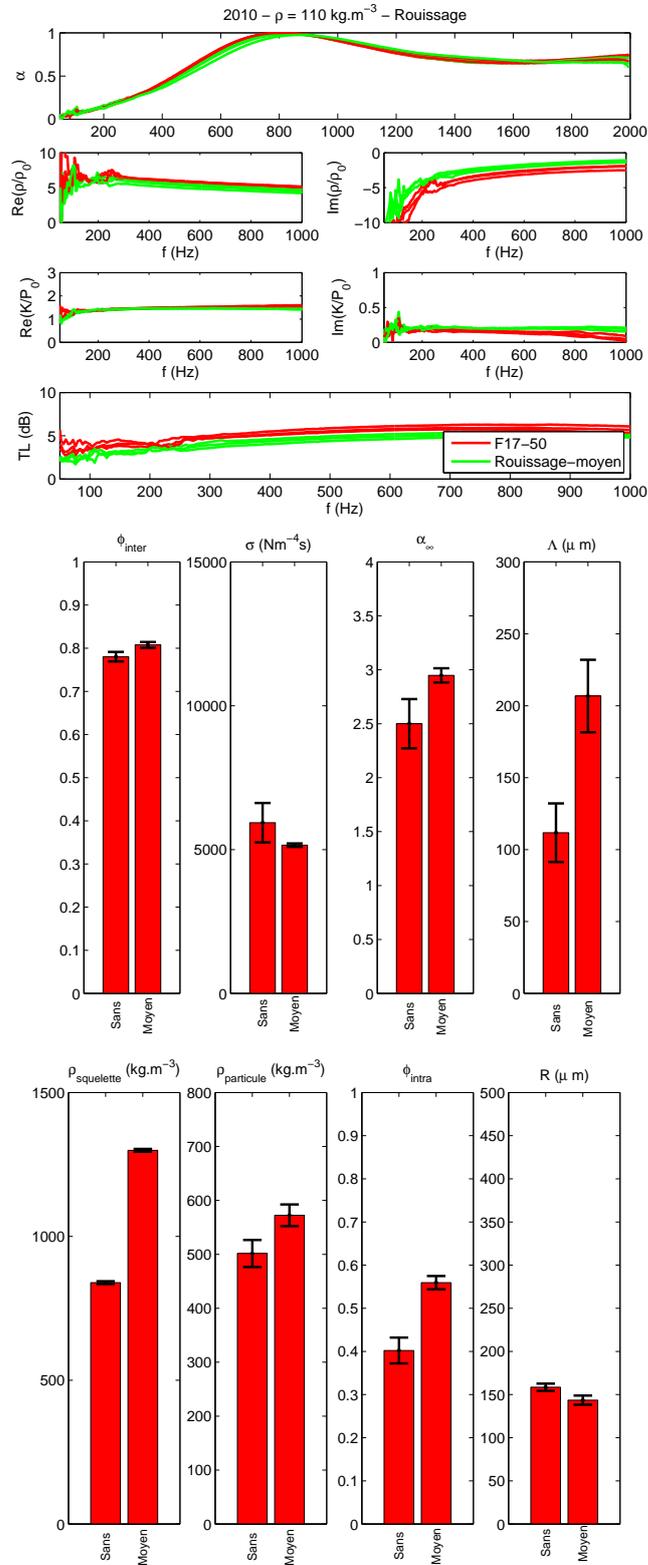


Figure E.24 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction du rouissage

11.1.3 Résultats obtenus sur les chènevottes cultivées en 2011

Chanvre	Masses volumiques de squelette ($kg.m^{-3}$)	
	Moyenne	Ecart-type
F17-25	864	2
F17-50	850	2
F17-75	902	2
F17-100	907	2
F17-125	945	3
Rouissage-0j	850	2
Rouissage-10j	1297	1
Rouissage-20j	1351	3
Rouissage-30j	1318	4
Rouissage-40j	1365	7

Tableau E.3 – Masses volumiques de squelette des chènevottes de l'année 2011

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

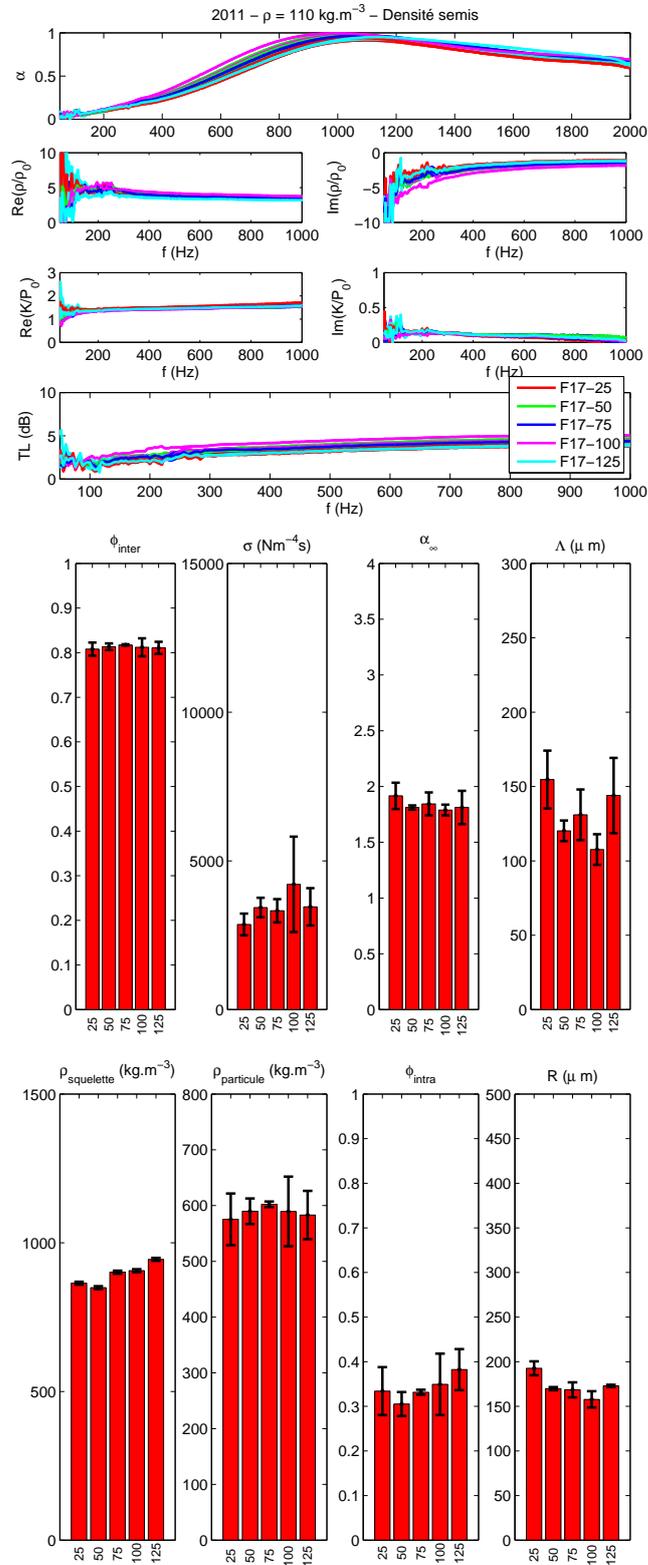


Figure E.25 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de la densité de semis - F17

Annexe E : Applications

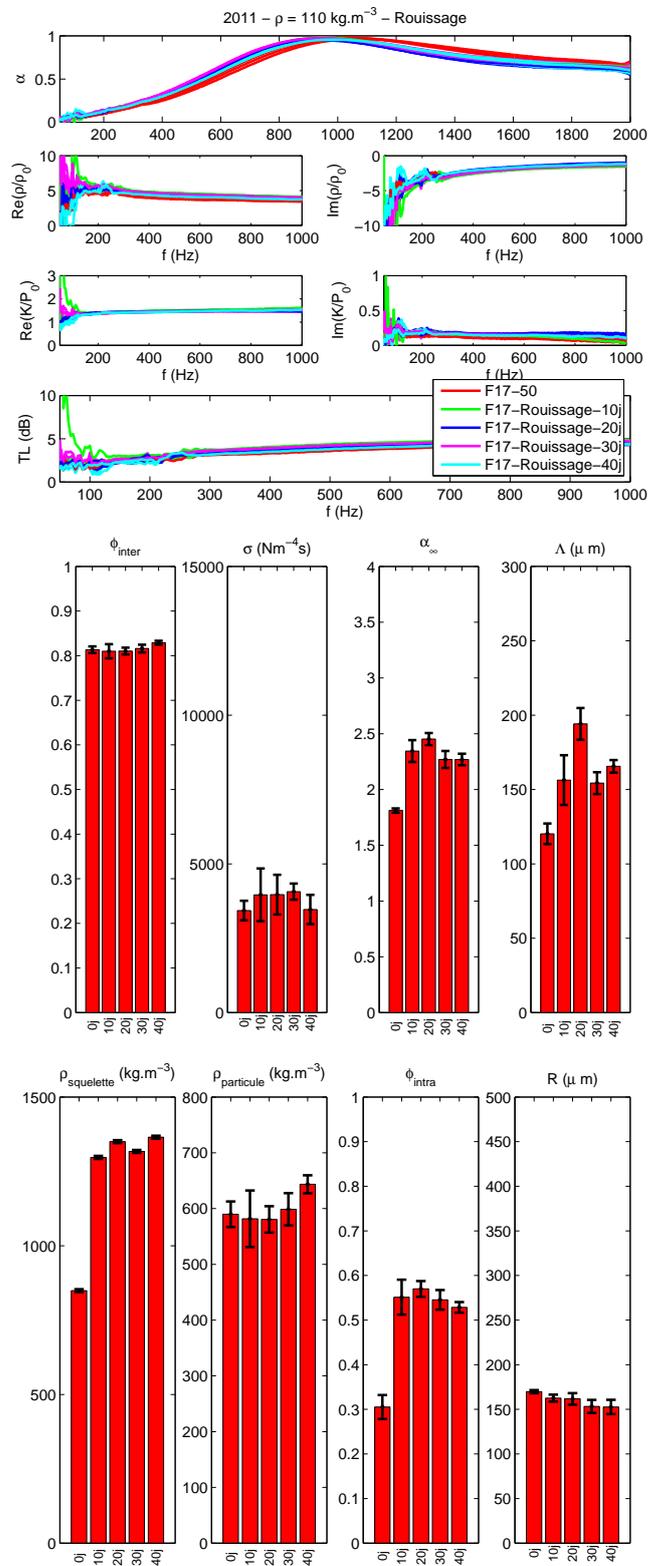


Figure E.26 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction du rouissage

11.2 Sensibilité des propriétés des chènevottes aux paramètres d'environnement

11.2.1 Evolution sur trois ans (2009 à 2011)

Annexe E : Applications

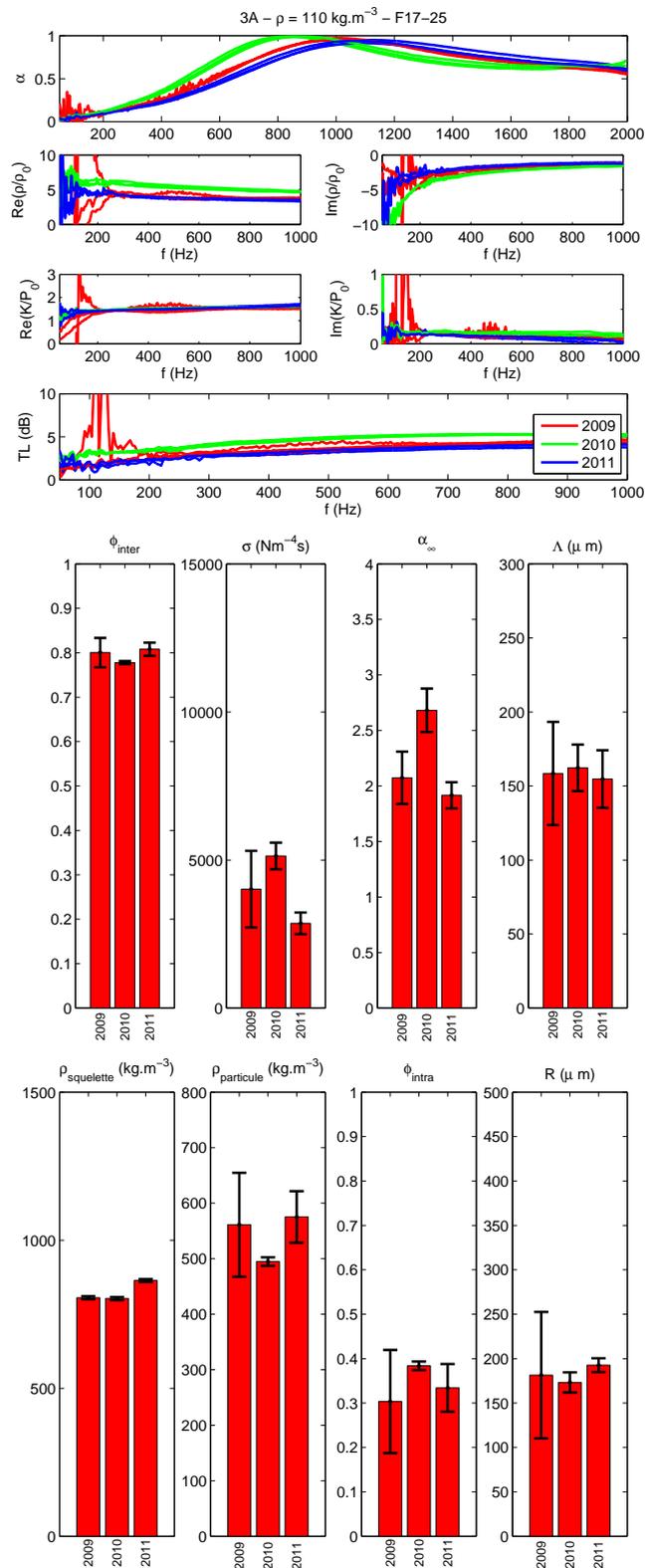


Figure E.27 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de l'année - F17-25

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

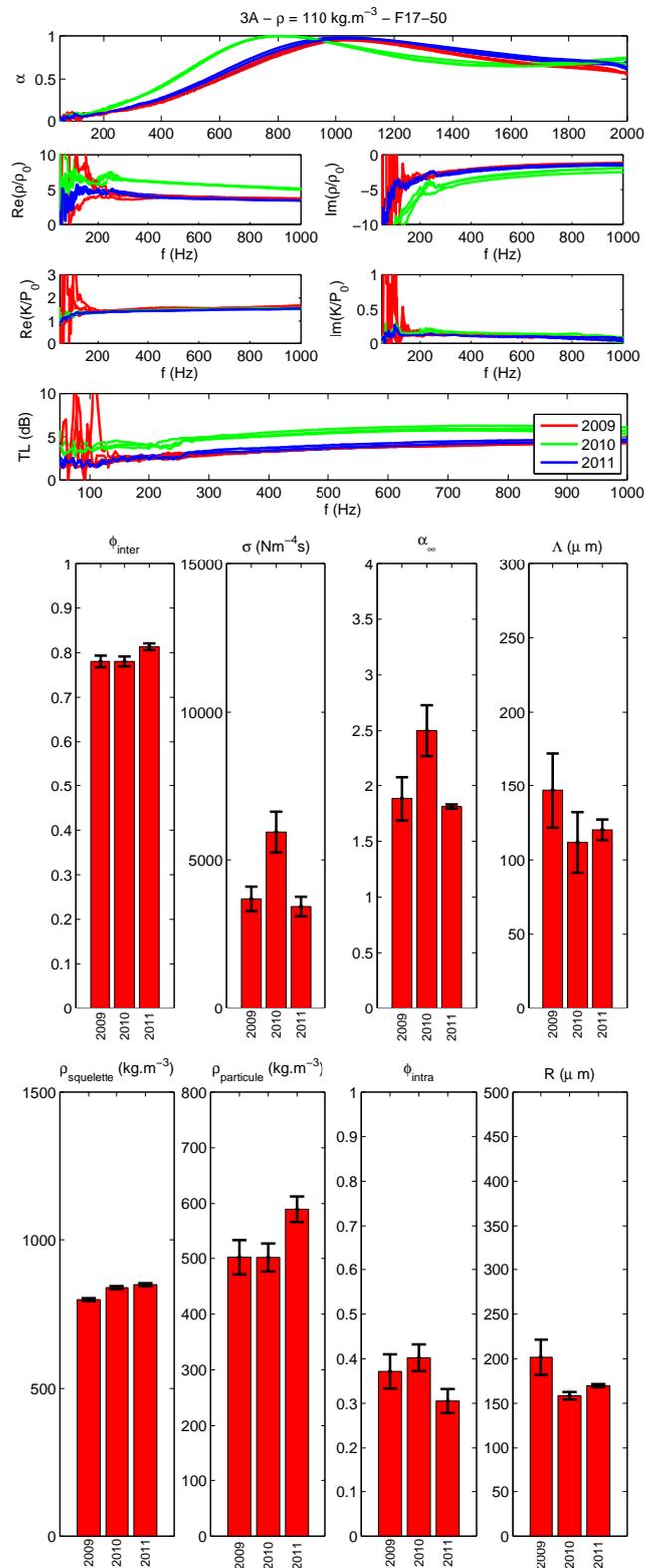


Figure E.28 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de l'année - F17-50

Annexe E : Applications

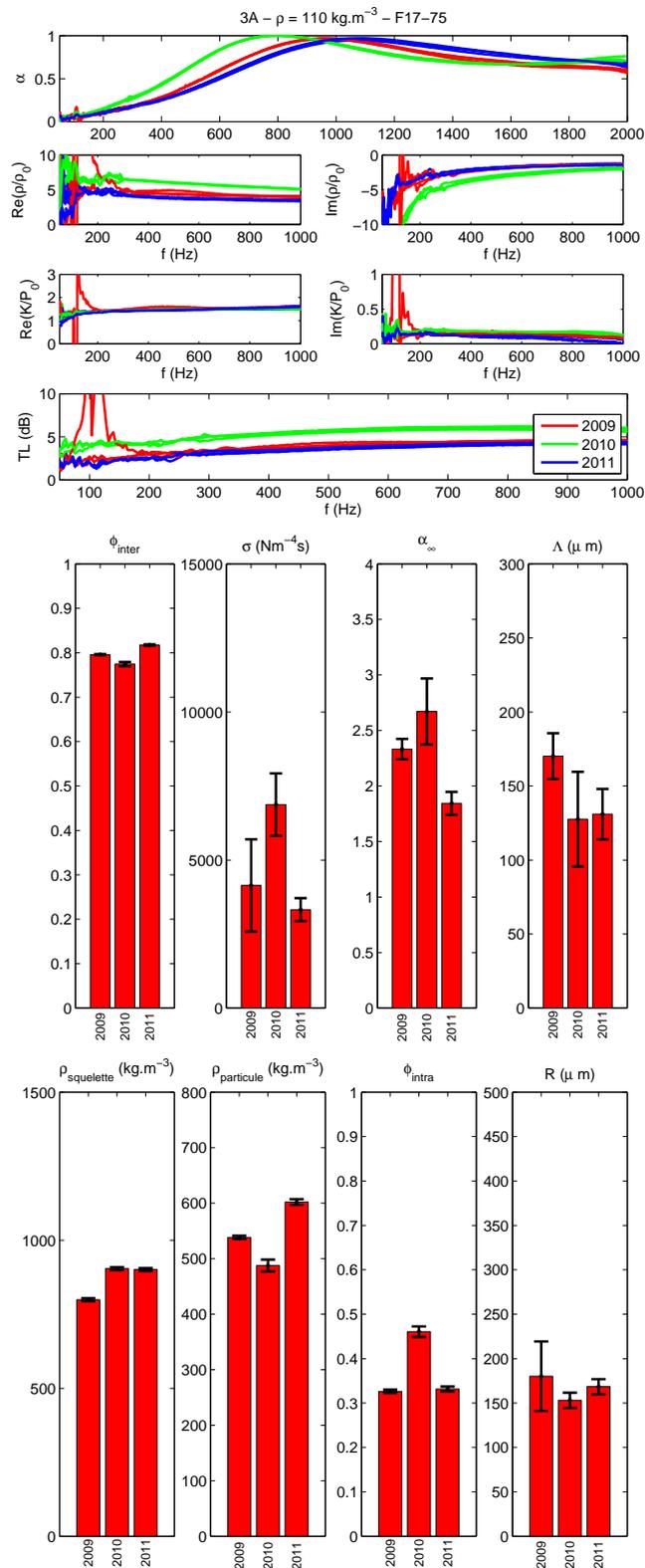


Figure E.29 – Propriétés acoustiques des chènevottes en fonction de l'année - F17-75

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

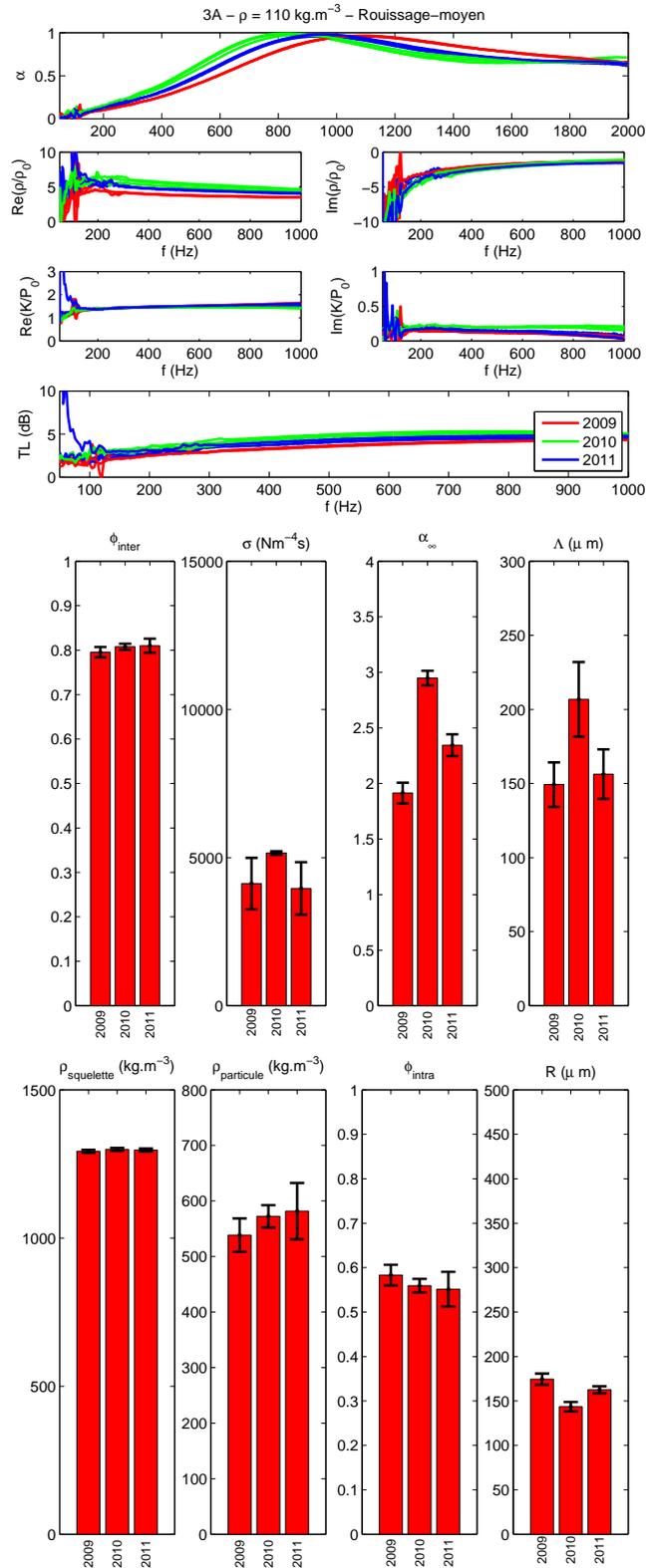


Figure E.30 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de l'année - Rouissage moyen

Annexe E : Applications

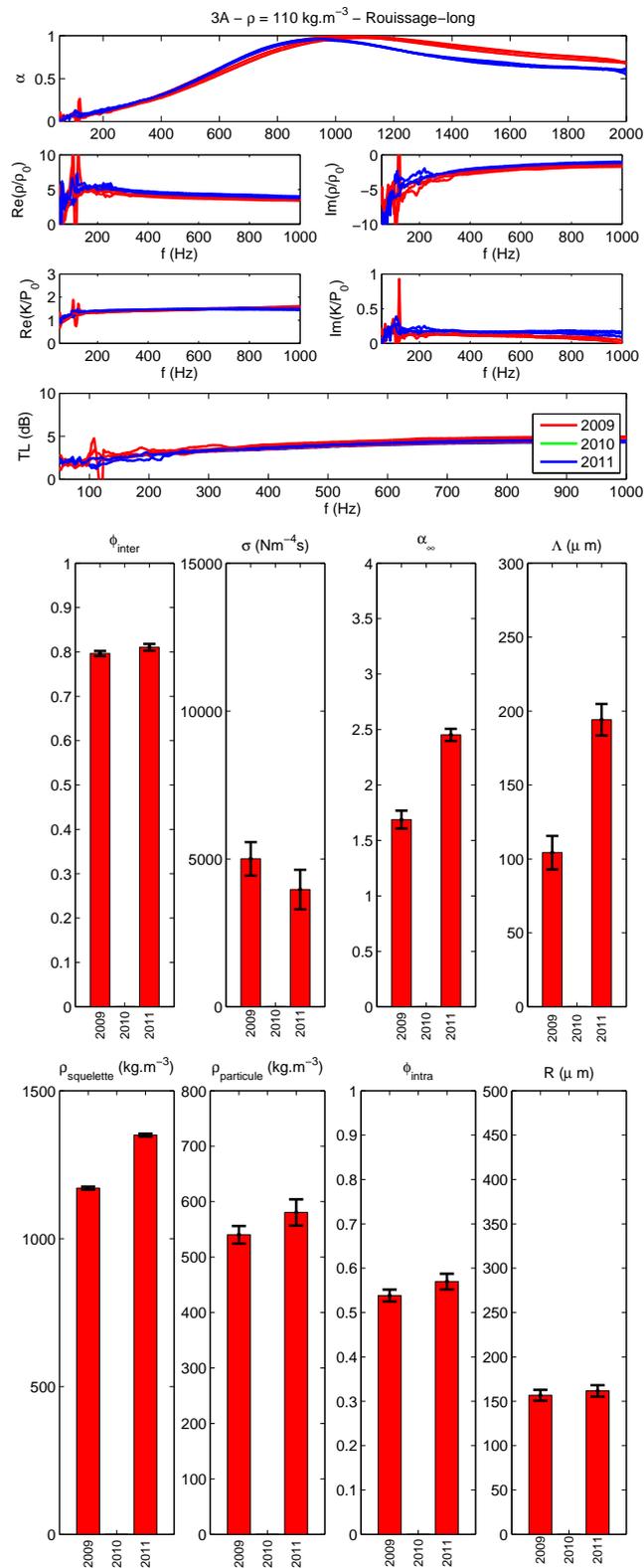


Figure E.31 – Propriétés acoustiques des chènervottes en fonction de l'année - Rouissage long

11 Caractérisation des chènevottes tracées par la FNPC

11.2.2 Evolution sur deux ans (2009 à 2010)

Annexe E : Applications

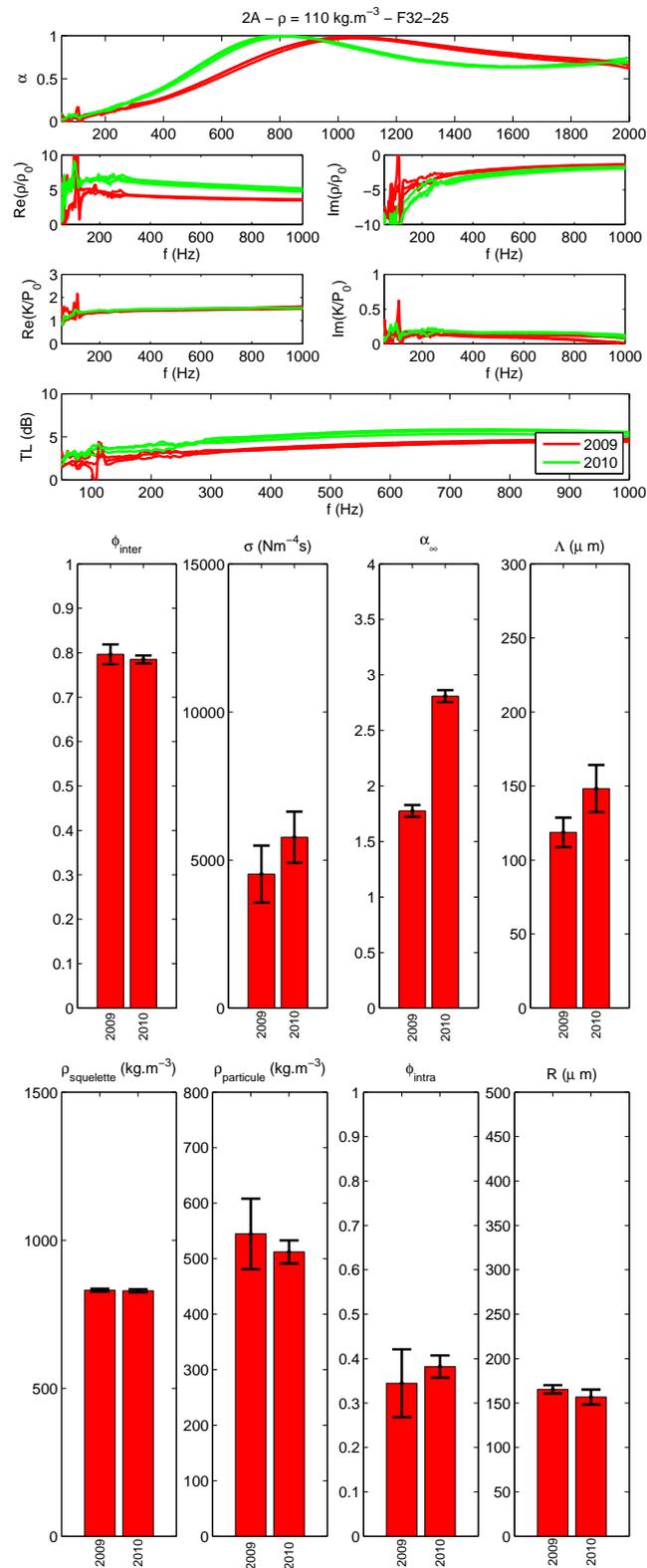


Figure E.32 – Propriétés acoustiques des chenevottes en fonction de l'année - F32-25

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

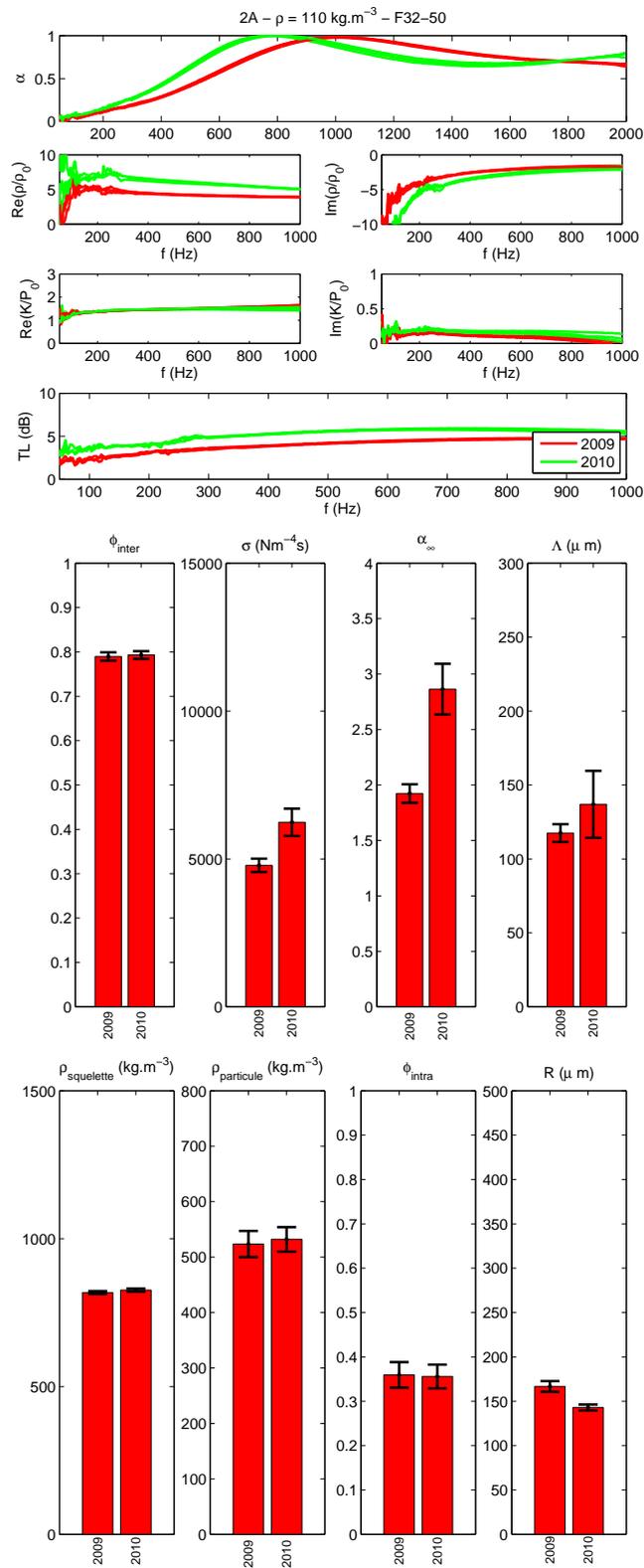


Figure E.33 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de l'année - F32-50

Annexe E : Applications

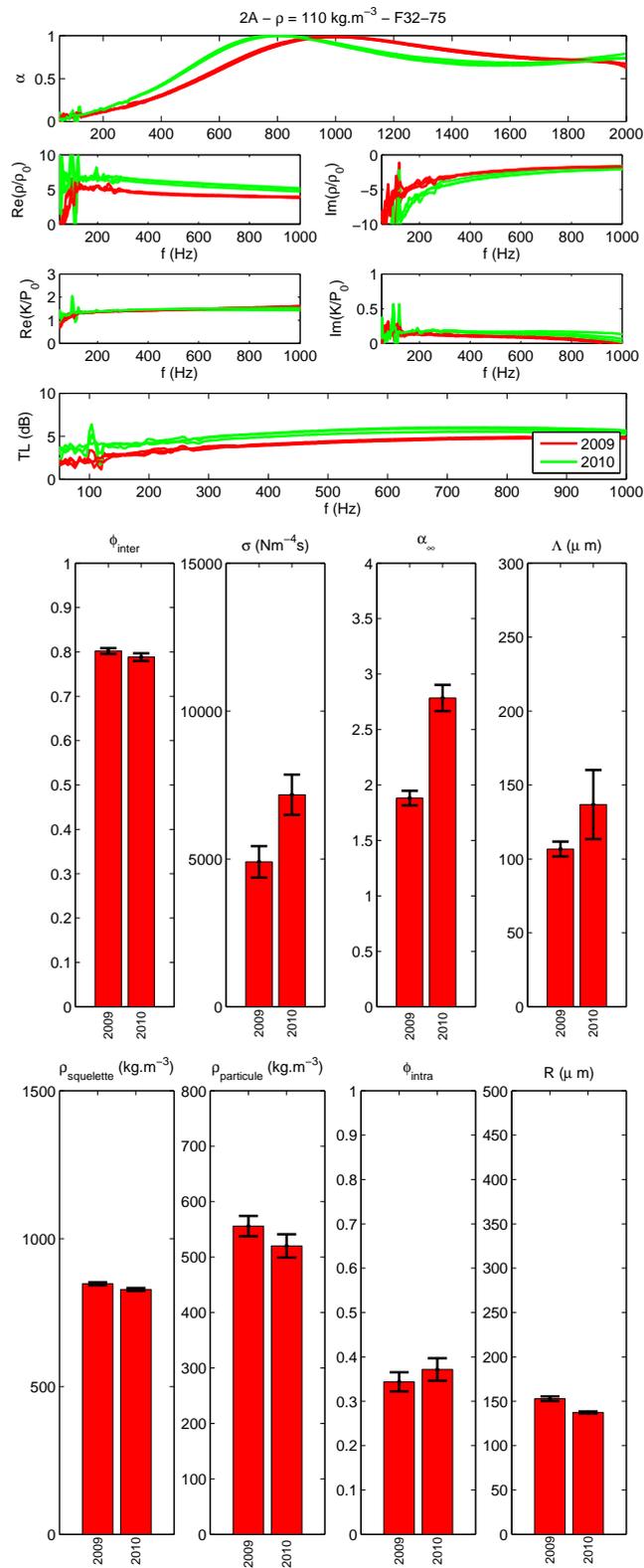


Figure E.34 – Propriétés acoustiques des chenevottes en fonction de l'année - F32-75

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

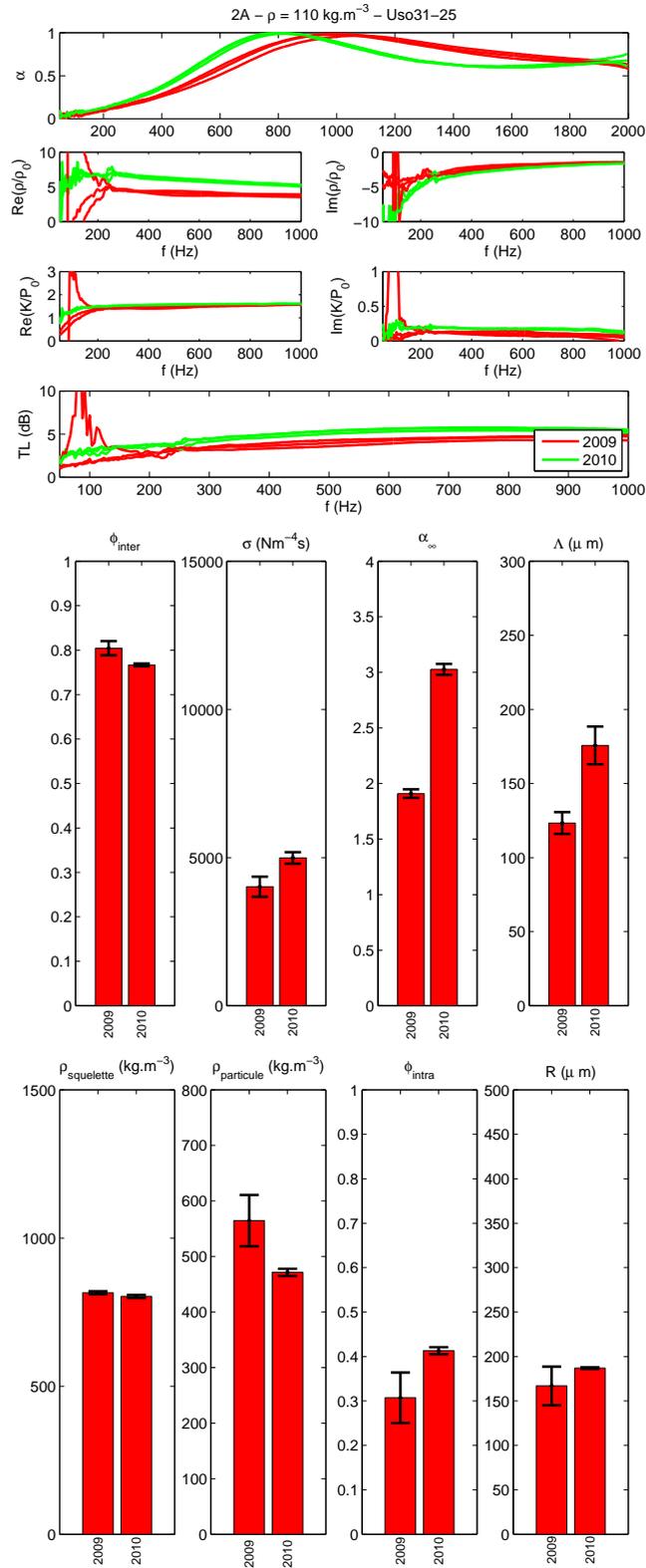


Figure E.35 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de l'année - Uso31-25

Annexe E : Applications

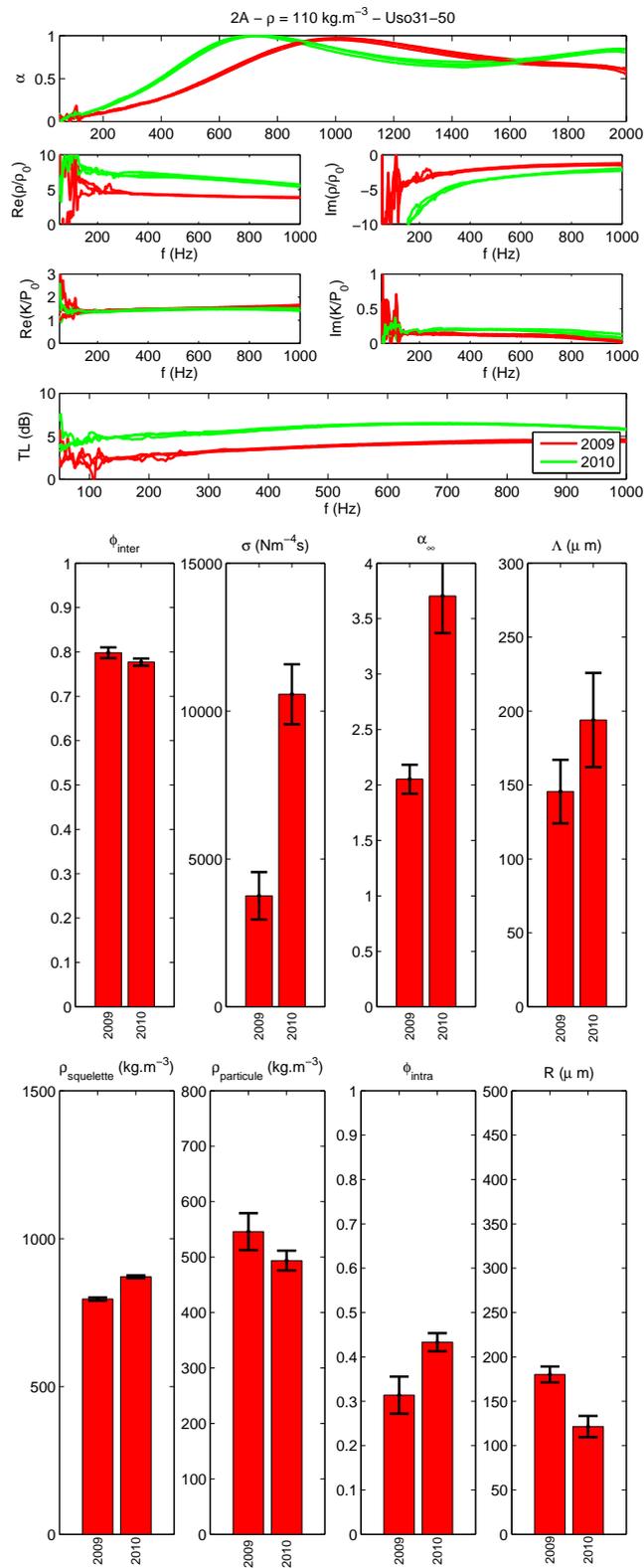


Figure E.36 – Propriétés acoustiques des chènervottes en fonction de l'année - Uso31-50

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

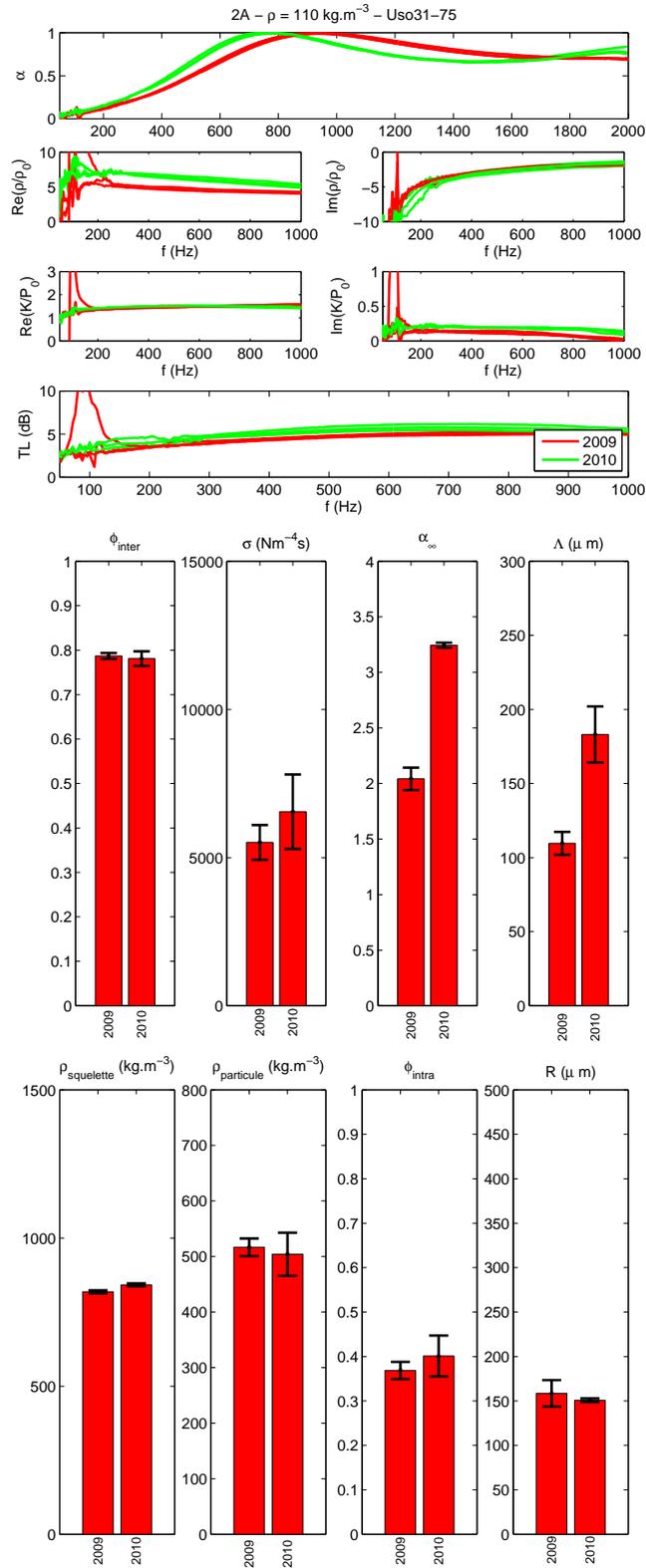


Figure E.37 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de l'année - Uso31-75

Annexe E : Applications

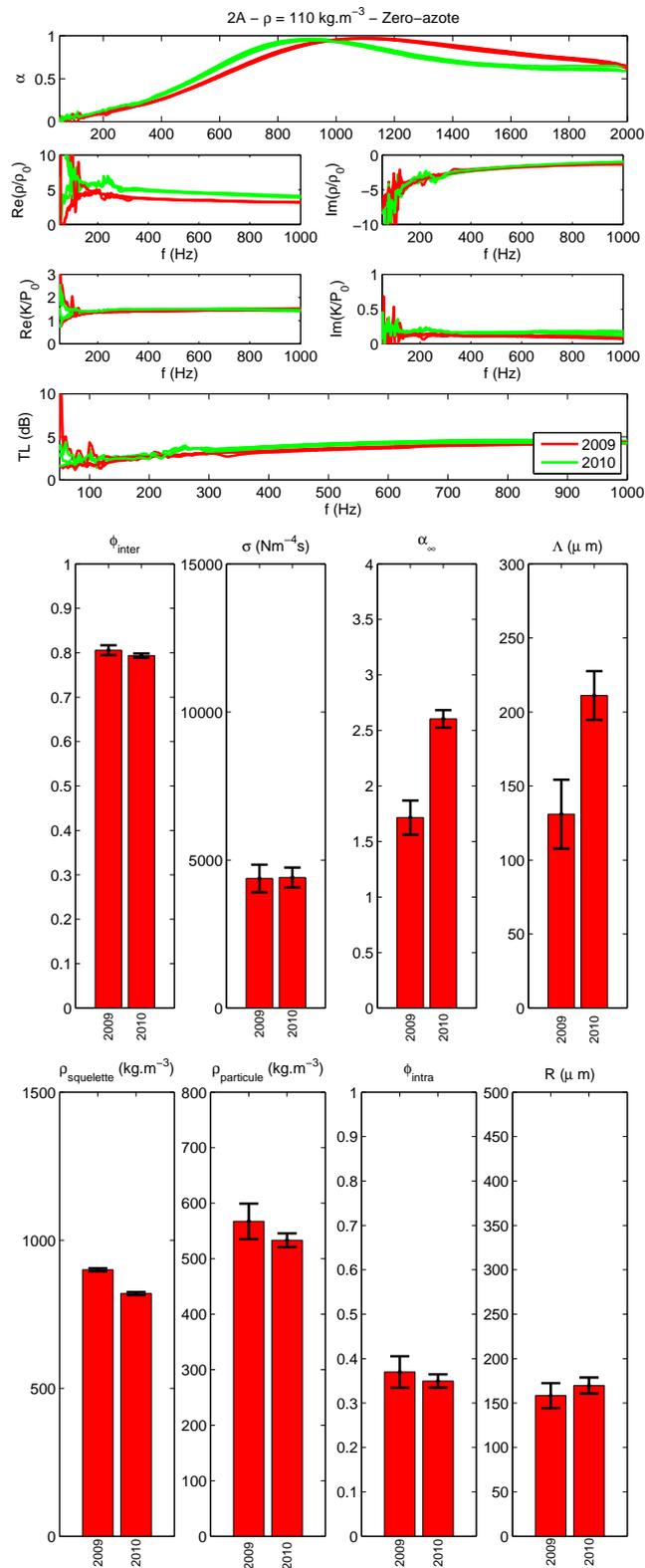


Figure E.38 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de l'année - Sans azote

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

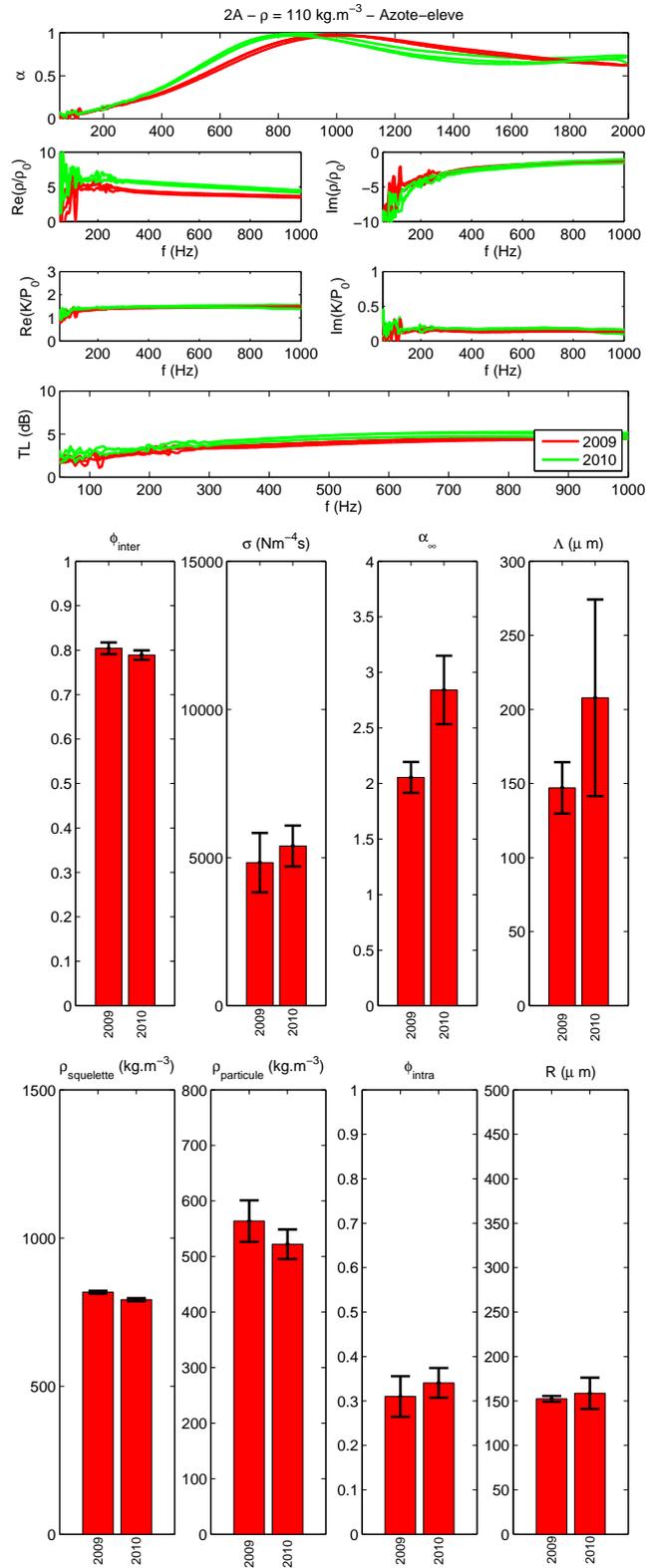


Figure E.39 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de l'année - Azote élevé

Annexe E : Applications

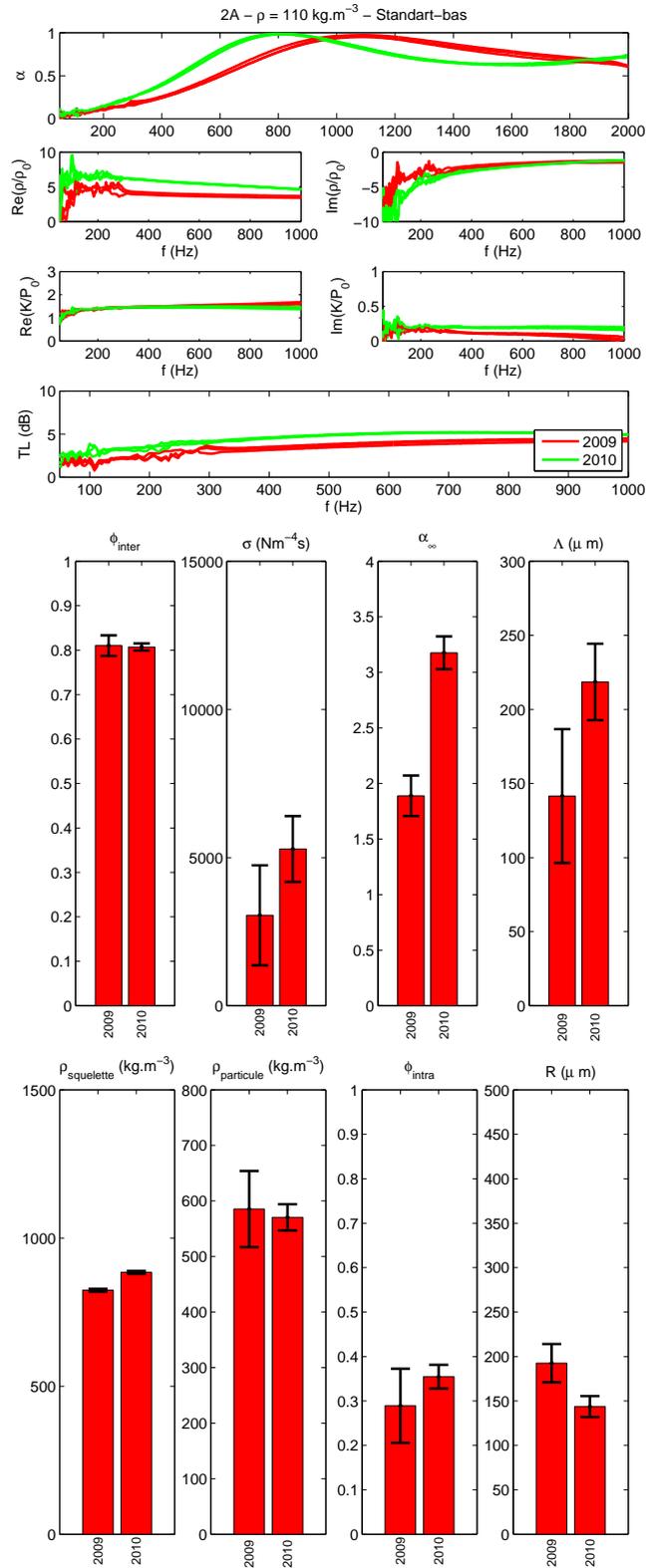


Figure E.40 – Propriétés acoustiques des chènervottes en fonction de l'année - Bas tiges

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

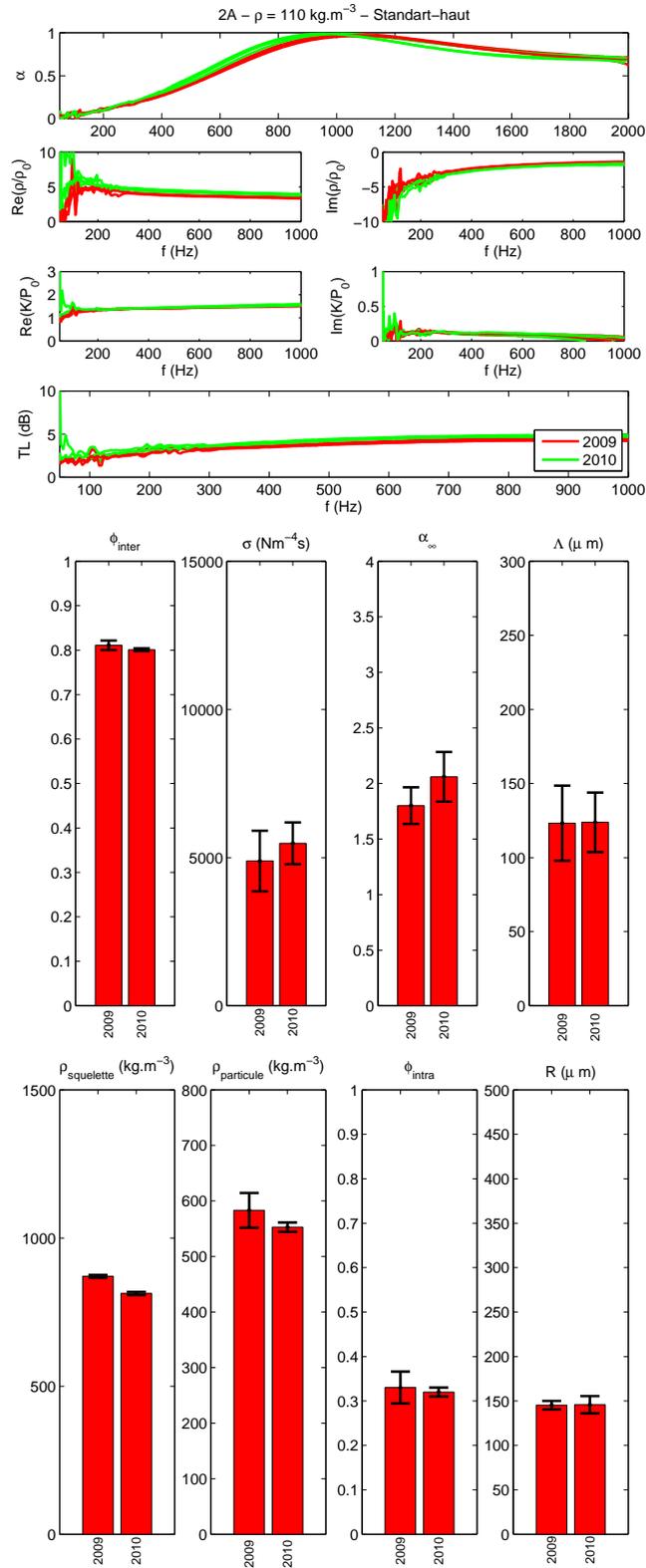


Figure E.41 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de l'année - Haut tiges

Annexe E : Applications

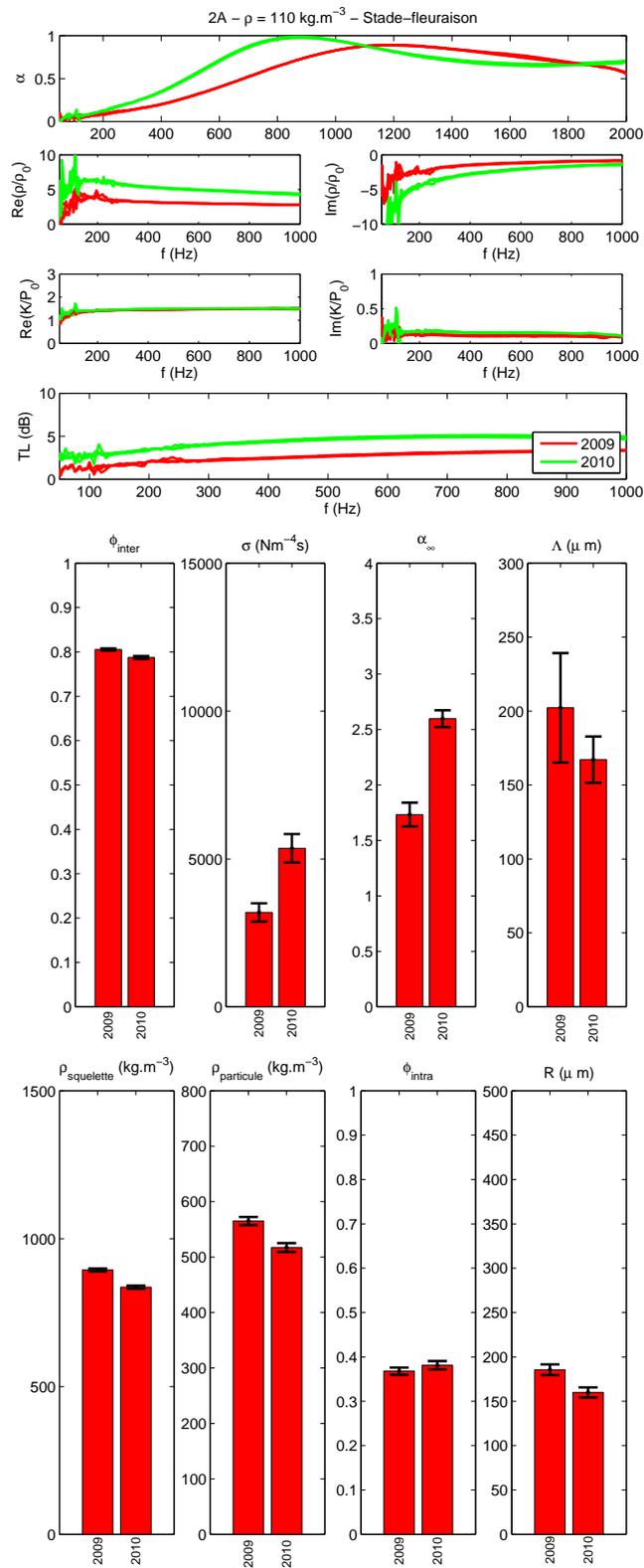


Figure E.42 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de l'année - Stade fleuraison

11 Caractérisation des chênévottes tracées par la FNPC

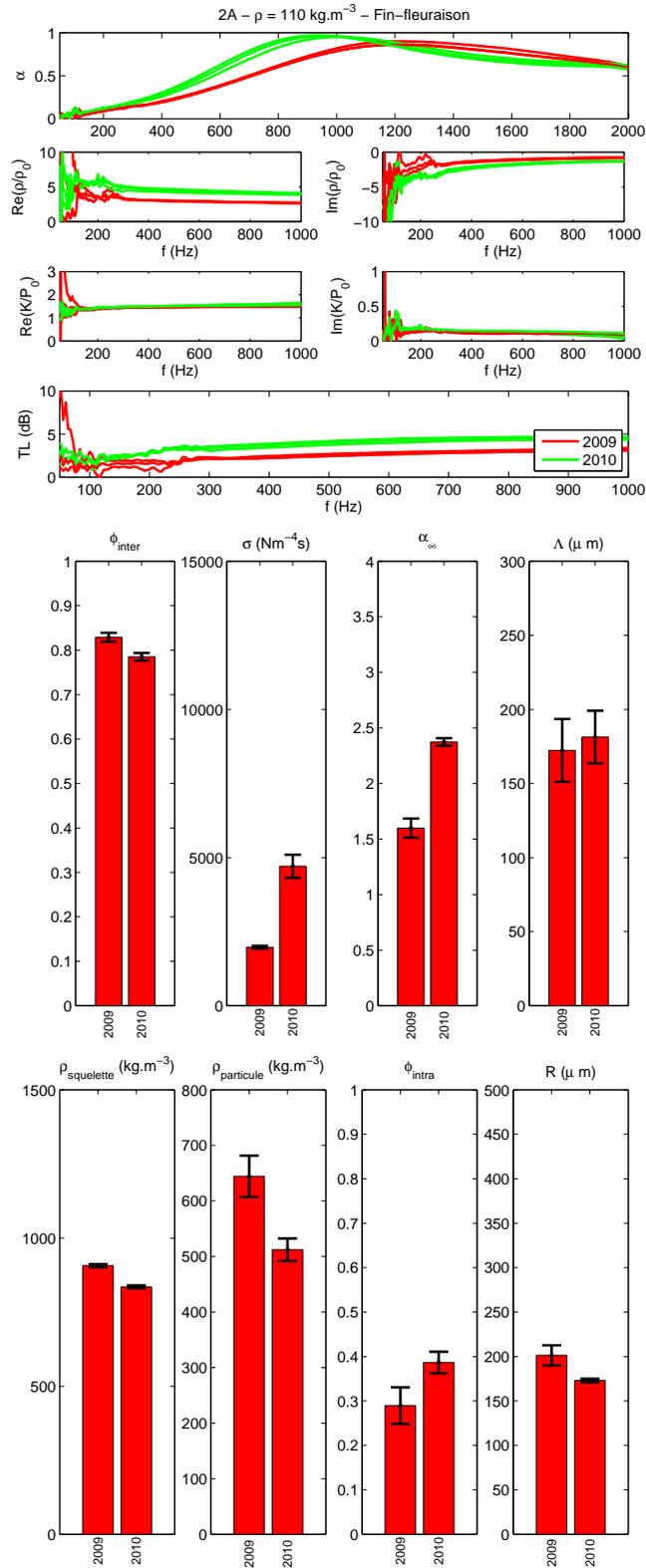


Figure E.43 – Propriétés acoustiques des chênévottes en fonction de l'année - Fin fleuraison

12 Caractérisation des panneaux acoustiques bio-sourcés

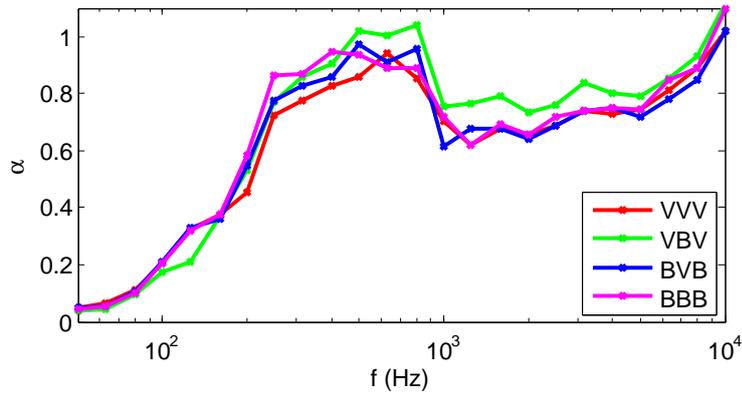


Figure E.44 – Absorption acoustique des échantillons multicouches en champ diffus

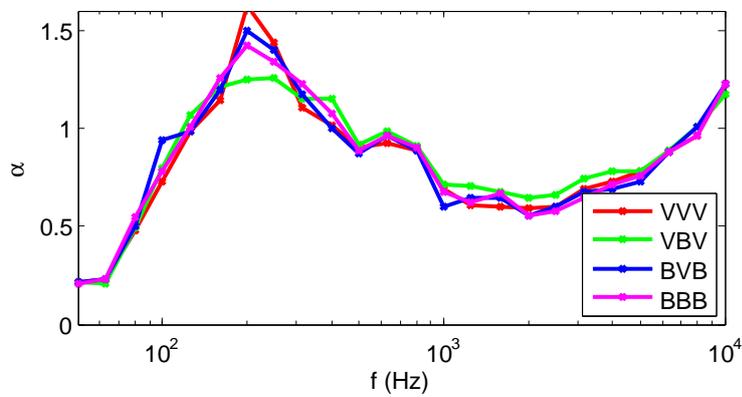


Figure E.45 – Absorption acoustique des échantillons multicouches en champ diffus avec un plenum de 10 cm

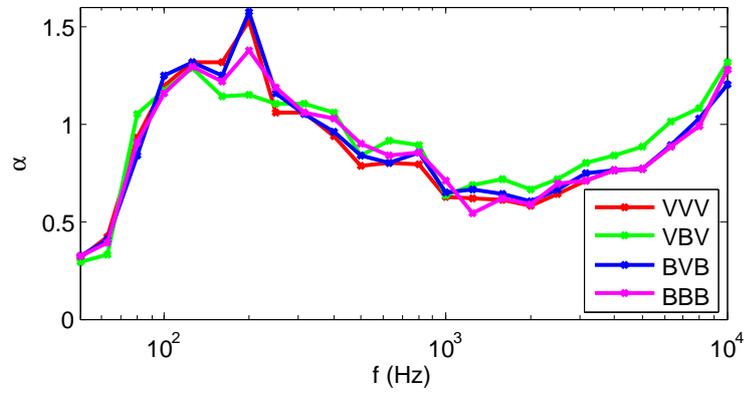


Figure E.46 – Absorption acoustique des échantillons multicouches en champ diffus avec un plenum de 20 cm

