



**HAL**  
open science

# Approche conjointe acoustique et thermique pour l'optimisation des laines végétales du bâtiment

Clément Piégay

► **To cite this version:**

Clément Piégay. Approche conjointe acoustique et thermique pour l'optimisation des laines végétales du bâtiment. Construction durable. Université de Lyon, 2019. Français. NNT : 2019LYSET010 . tel-02724778

**HAL Id: tel-02724778**

**<https://theses.hal.science/tel-02724778>**

Submitted on 2 Jun 2020

**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.



N°d'ordre NNT : 2019LYSET010

## Mémoire de thèse

### THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

Opérée au sein de  
**Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat**

**Ecole Doctorale N° 162**  
**Mécanique, Energétique, Génie civil et Acoustique**

**Spécialité : Acoustique**

Soutenue publiquement le 14/11/2019, par :

**Clément PIEGAY**

---

# Approche Conjointe Acoustique et Thermique pour l'Optimisation des Laines Végétales du Bâtiment

---

Devant le jury composé de :

Celzard, Alain	Professeur	Université Lorraine	Président du jury
Collet, Florence	MCF HDR	Université Rennes 1/LGCM	Rapporteuse
Dazel, Olivier	Professeur	LAUM/Université du Mans	Rapporteur
Arnaud, Laurent	IPEF HDR	Cerema/DtecTV	Examinateur
Marceau, Sandrine	Docteur	Ifsttar	Examinatrice
Gourdon, Emmanuel	IDTPE HDR	Université Lyon/ENTPE	Directeur de thèse
Glé, Philippe	Docteur	Cerema/UMRAE	Co-directeur de thèse
Gourlay, Etienne	Docteur	Cerema/Eq. BPE	Encadrant de thèse
Jaouen, Luc	Docteur	Matelys	Invité



*A Céline*  
*A mes enfants Gautier, Marion et Grégoire*



Dans un contexte où il est indispensable d'apporter des réponses aux enjeux environnementaux majeurs auxquels notre planète est confrontée, un des principaux secteurs concernés est celui du bâtiment, pour lequel les logements sont encore en 2019 globalement mal isolés d'un point de vue thermique, mais également acoustique. Aussi, des solutions peuvent être apportées par des isolants biosourcés comme les laines végétales, capables de stocker le dioxyde de carbone atmosphérique, et possédant des propriétés multifonctionnelles à fort potentiel.

Néanmoins, un certain nombre de verrous scientifiques freinent encore la croissance de ces matériaux sur le marché des isolants fibreux. Ils sont liés notamment à la méconnaissance des spécificités des laines végétales et au manque d'investigations concernant des approches de valorisation conjointe de leurs performances acoustiques et thermiques.

Afin de répondre à ces problématiques, une démarche innovante est développée en s'appuyant sur une méthode d'Homogénéisation Auto-Cohérente conjointe acoustique et thermique, reposant sur une géométrie cylindrique (HAC cylindrique), en vue de l'optimisation des laines végétales du bâtiment. Ainsi, la conductivité thermique est déterminée en statique à partir du couplage d'un modèle « HAC cylindrique statique » pour le transfert par conduction et d'un modèle semi-empirique pour le transfert par rayonnement. L'absorption acoustique est quant à elle déterminée par un modèle « HAC cylindrique dynamique ». Cette méthode permet ainsi de lier les paramètres de leur microstructure, tels que la taille des fibres et la porosité, à leurs propriétés macroscopiques par l'établissement de relations analytiques.

La validation de la procédure de modélisation conjointe ainsi développée s'effectue par comparaison des prédictions avec des résultats expérimentaux. Ces résultats sont issus de banques de données constituées à partir de campagnes de caractérisations de grandes ampleurs conduites au cours de la thèse sur plus de vingt matériaux différents. Elles concernent à la fois des paramètres liés à la microstructure spécifique des laines végétales, ainsi que leurs propriétés en absorption acoustique et en isolation thermique.

**Mots clés :** Matériaux fibreux, Fibres végétales, Absorption acoustique, Conductivité thermique, Approche conjointe acoustique-thermique, Approche micro-macro, Homogénéisation Auto-Cohérente, Optimisation, Banques de données expérimentales.

---

## **Acoustic and thermal joint approach for the optimization of building's vegetal wools**

If we consider today's context, it is essential for our planet to provide answers to major environment challenges. One of the main domain to look at is the building trade. Indeed, in 2019, most flats are still badly insulated from a thermal but also an acoustic point of view.

Therefore, solutions can be provided using biobased insulation materials such as vegetal wools, which are able to store atmospheric carbon dioxide and have in the same time multifunctional properties of high potential.

Nevertheless, a number of scientific barriers are still to be removed to allow the development of these materials on the insulation market. They are linked to ignorance about vegetal wools in particular, and also to the lack of modelling methods that would highlight their acoustic and thermal efficiency.

In order to address this problem, a new approach has been developed. It is based on a joint acoustic and thermal Self-Consistent Method with a cylindrical geometry (cylindrical SCM) for optimizing the building's vegetal wools. Thus, the thermal conductivity is determined statically from the coupling of a cylindrical SCM model for conduction transfer with a semi-empirical model for radiation transfer. Sound absorption is determined by a dynamic cylindrical SCM model. Therefore, this method will allow us to link the parameters of fibrous material microstructure to their macroscopic properties by establishing analytical relationships.

The validation of the joint modelling method thereby developed, is carried out by comparing predictions and experimental results. These results are based from databases consisting of large scale experimental characterisations that were carried out throughout this thesis on a variety of twenty materials. They concern both the parameters specifically related to vegetal wool microstructure and the acoustic absorption and thermal insulation properties of these wools.

Keywords : Fibrous materials, Vegetal fibres, Acoustic absorption, Thermal conductivity, Acoustic and thermal joint approach, Micro-macro approach, Self-consistent method, Optimization, experimental database.



---

---

## Remerciements

---

Je tenais tout d'abord à remercier très chaleureusement mon équipe d'encadrants. Merci à Emmanuel, Philippe et Etienne de m'avoir guidé tout au long de ces trois années. Merci également pour la confiance que vous m'avez témoignée, pour votre grande disponibilité, vos conseils avisés, votre soutien et vos remarques toujours constructives. C'est avec un petit pincement au cœur que j'aborde la fin de cette collaboration. Je tenais à souligner le plaisir qui a été le mien de travailler avec vous au sein de « The Biobased Team ». J'ai particulièrement apprécié la complémentarité de chacun d'entre vous au sein de cette équipe, ainsi que la bonne humeur et l'esprit taquin qui y a régné constamment. Puissante est La Force au sein de l'équipe et sages ont été vos conseils pour me détourner du côté obscur. De grands mercis je vous dois !

Je voulais également remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner mon travail, les rapporteurs Florence Collet et Olivier Dazel, ainsi que les examinateurs Sandrine Marceau, Laurent Arnaud et Alain Celzard.

Un merci particulier à Sandrine Marceau de m'avoir accueilli plusieurs fois au cours de la thèse à l'Ifsttar de Champs-sur-Marne dans le cadre de la caractérisation expérimentale des échantillons de laines végétales. Merci également à Dina pour son aide très précieuse, notamment pour la réalisation des images MEB et les caractérisations au pycnomètre.

Merci à Luc Jaouen de la société Matelys d'avoir accepté de faire partie du jury en tant qu'invité. Merci, également pour l'aide apportée dans le cadre des modélisations HAC.

Merci à Laurent Arnaud et Valentin Colson, ainsi qu'à Sandrine et Luc (que je remercie à nouveau) pour la participation active à mon comité scientifique de début de thèse.

Je remercie les sociétés Laroche S.A. et CAVAC Biomatériaux pour les matériaux fournis dans le cadre de la thèse. Un remerciement particulier à Olivier Jadeau et Valentin Colson de la société CAVAC Biomatériaux pour leur accueil lors de la visite du site de production.

---

Je souhaite également remercier l'ensemble du personnel du Laboratoire de Strasbourg (Cerema) pour son accueil chaleureux. Pendant ces trois années de thèse, j'ai vraiment apprécié l'ambiance conviviale qui règne au laboratoire. J'aurai à présent, je l'espère, plus de temps pour participer aux nombreux évènements qui y sont organisés. Je remercie Philippe Thirion et David Ecotière pour leur soutien. Merci à tous les membres du Groupe acoustique qui contribuent à sa bonne ambiance. Un merci tout particulier à Thierry pour son aide inestimable au cours des campagnes de caractérisation expérimentales des laines végétales. Merci à Laurent d'avoir joué le rôle de metteur en scène pour la réalisation de la vidéo de présentation de ma thèse.

Je remercie toutes les personnes avec qui j'ai été amené à travailler ou à échanger lors de mes semaines de travail à l'ENTPE. Je tenais particulièrement à remercier Joachim pour sa très grande contribution dans le développement de la Boîte Chaude. Un grand merci également à Nadia pour son aide lors des caractérisations expérimentales. Je tenais à remercier également Francette Pignard, Sonia Cénille et Luc Delattre pour le suivi administratif de la thèse.

Un merci spécial à Emmanuelle pour son aide extrêmement précieuse concernant les traductions. Merci aux doctorants et stagiaires avec qui j'ai pu échanger au cours de la thèse. Merci à Joffrey, Pierre, et Guillaume de m'avoir accueilli lors de mes périples à Lyon et à Paris.

Un grand merci à tous mes amis d'Autun et d'ailleurs, Fafa, Nicole, Manu, Claire, Jérôme, Gaëlle, Denis, Natascha, Etienne, Céline, Philippe, Sophie, Philippe, Fabienne, Vincent, Sandrine pour leurs encouragements et leur soutien.

Merci à Manu pour avoir partagé avec moi quelques bonnes soirées Strasbourgeoises.

Un merci ludique spécial à Elodie, Guillaume et Pierre pour toutes les excellentes soirées jeux de sociétés auxquelles j'ai été convié. Je vais avoir à présent un peu plus de temps pour explorer toute la richesse du monde ludique !

Je voulais également remercier tout particulièrement mes parents Annick et Gérard pour leur soutien, ainsi que mon frère Victor-Arthur pour les moments d'échanges sur la thèse et l'aide lors de la relecture avisée du mémoire. Merci également à Sylvie et Christian.

Un immense Merci à mes trois enfants Gautier, Marion et Grégoire. Restez comme vous êtes, je suis tellement fier de vous !

Enfin, je ne dirai jamais suffisamment merci à Céline mon épouse, qui depuis 2012, par son courage et son abnégation au quotidien, m'a permis de reprendre mes études et d'achever enfin cette quête scientifique qui me tenait tant à cœur. Merci à vous quatre pour votre soutien sans faille et l'amour que vous me communiquez.

## Symboles latins

$a$	Rayon du cylindre unitaire (modèle Tarnow)	$(m)$
$b^2$	Surface moyenne d'une cellule unité (modèle Tarnow)	$(m^2)$
$c$	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	$(J.K^{-1}.kg^{-1})$
$e$	Epaisseur d'un échantillon	$(m)$
$e_{comp}$	Epaisseur d'un échantillon comprim�e	$(m)$
$E$	Module d'Young	$(Pa)$
$f$	Fréquence	$(Hz)$
$f_{dec}$	Fréquence de découplage	$(Hz)$
$f_r$	Fréquence de compression	$(Hz)$
$f_t$	Fréquence caractéristique des effets thermiques	$(Hz)$
$f_v$	Fréquence caractéristique des effets visco-inertiels	$(Hz)$
$HR$	Humidité relative	$(\%)$
$I$	Matrice unité	
$\vec{I}$	Tenseur unité	
$I_0, I_1$	Fonctions de Bessel modifiées de première espèce d'ordre 0 et 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	$(Pa)$
$K_h$	Module d'incompressibilité dynamique du couplage de deux milieux fibreux	$(Pa)$
$K_p$	Module d'incompressibilité dynamique du milieu lié aux fibres polymères	$(Pa)$
$K_v$	Module d'incompressibilité dynamique du milieu lié aux fibres végétales	$(Pa)$
$K_0, K_1$	Fonctions de Bessel modifiées de première espèce d'ordre 0 et 1	
$L_0$	Distance intercouche (modèle de Bankvall)	$(m)$
$m_a$	Masse apparente des matériaux	$(kg)$
$m_{ref}$	Masse de référence des matériaux à l'état sec	$(kg)$
$m_s$	Masse de la phase solide des matériaux	$(kg)$
$n$	Taux de compression (modèle de Castagnède)	
$N_{Pr}$	Nombre de Prandtl de l'air	
$Nu^*$	Nombre de Nusselt de filtration	
$p$	Pression acoustique	$(Pa)$
$P_0$	Pression à l'équilibre de l'air	$(Pa)$
$q$	Production de chaleur interne	$(W.m^{-3})$
$r$	Rayon en coordonnées cylindriques	$(m)$
$R$	Coefficient de réflexion acoustique	
$R_w$	Indici d'affaiblissement acoustique pondéré	
$R_f$	Rayon moyen des fibres	$(m)$
$R_{f_{pol}}$	Rayon moyen des fibres polymères	$(m)$
$R_{f_{veg}}$	Rayon moyen des fibres végétales	$(m)$
$\partial R$	Surface de la phase solide de rayon $R$	$(m^2)$
$R_{th}$	Résistance thermique	$(m^2.K.W^{-1})$
Re	Partie réelle d'un nombre complexe	
$Ra^*$	Nombre de Rayleigh de filtration	
$S$	Surface	$(m^2)$
$S_p$	Surface latérale des pores	$(m^2)$
$t$	Variable temporelle	$(s)$
$T$	Température	$(K)$ ou $(^\circ C)$
$Tr$	Coefficient de transmission	
$[T]$	Matrice de transfert	
$TL$	Indice d'affaiblissement acoustique (transmission loss)	$(dB)$
$\vec{u}$	Déplacement	$(m)$

---

$\vec{v}$	Vitesse acoustique dans la phase fluide	$(m.s^{-1})$
$V_f$	Volume de la phase fluide des matériaux	$(m^3)$
$V_s$	Volume de la phase solide des matériaux	$(m^3)$
$V_{tot}$	Volume total des matériaux	$(m^3)$
$w_m$	Teneur en eau massique	
$w_v$	Teneur en eau volumique	
$\vec{w}$	Vecteur complexe appartenant à l'espace vectoriel $W$	
$W$	Espace vectoriel de Hilbert	
$Z_0$	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

$\alpha$	Coefficient d'absorption acoustique	
$\alpha_\infty$	Tortuosité	
$\alpha_w$	Coefficient d'absorption acoustique pondéré	
$\beta$	Paramètre d'homogénéisation (HAC cylindrique)	
$\beta_{moy}$	Coefficient d'extinction moyen	$(m^2.kg^{-1})$
$\beta'$	Coefficient de rayonnement	
$\gamma$	Rapport des capacités calorifiques de l'air à pression et volume constants	
$\Gamma$	Interface solide-fluide de la cellule périodique (HSP)	
$\Gamma_f$	Interface de la phase fluide avec la frontière de la cellule (HSP)	
$\Gamma_s$	Interface de la phase solide avec la frontière de la cellule (HSP)	
$\delta_t$	Epaisseur de couche limite thermique	$(m)$
$\delta_v$	Epaisseur de couche limite visqueuse	$(m)$
$\epsilon$	Rapport d'échelle	
$\eta$	Coefficient d'amortissement structural	
$\kappa$	Viscosité de volume de l'air	$(Pa.s)$
$\theta$	Angle ou azimut (coordonnées cylindriques)	$(rad)$
$\lambda$	Conductivité thermique	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_0$	Conductivité thermique de l'air	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_{eq}$	Conductivité thermique équivalente	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_{cond}$	Conductivité thermique spécifique au mode de transfert par conduction	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_{conv}$	Conductivité thermique spécifique au mode de transfert par convection	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_r$	Conductivité thermique spécifique au mode de transfert par rayonnement	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_f$	Conductivité thermique de la phase fluide	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_s$	Conductivité thermique de la phase solide	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_{pol}$	Conductivité thermique des fibres polymères	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_{veg}$	Conductivité thermique des fibres végétales	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_{cel}$	Conductivité thermique de la cellulose	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda^\perp$	Conductivité thermique perpendiculaire à l'axe longitudinal des fibres	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda//$	Conductivité thermique parallèle à l'axe longitudinal des fibres	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\lambda_0$	Conductivité thermique de l'air	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
$\Lambda$	Longueur caractéristique visqueuse	$(m)$
$\Lambda'$	Longueur caractéristique thermique	$(m)$
$\mu$	Viscosité de cisaillement de l'air	$(Pa.s)$
$\nu$	Coefficient de Poisson	
$\nu^*$	Nombre de Nusselt de filtration	

---

$\Xi$	Perméabilité dynamique thermique	$(m^2)$
$\Xi_0$	Perméabilité thermique statique	$(m^2)$
$\pi$	Constante ( $\approx 3,14$ )	
$\Pi$	Perméabilité dynamique visco-inertielle	$(m^2)$
$\Pi_h$	Perméabilité dynamique visco-inertielle du couplage de deux milieux fibreux	$(m^2)$
$\Pi_p$	Perméabilité dynamique visco-inertielle du milieu lié aux fibres polymères	$(m^2)$
$\Pi_v$	Perméabilité dynamique visco-inertielle du milieu lié aux fibres végétales	$(m^2)$
$\Pi_0$	Perméabilité visqueuse statique	$(m^2)$
$\rho$	Densité dynamique	$(kg.m^{-3})$
$\rho_h$	Densité dynamique du couplage de deux milieux fibreux	$(kg.m^{-3})$
$\rho_{limp}$	Densité dynamique du comportement limp	$(kg.m^{-3})$
$\rho_0$	Masse volumique de l'air au repos	$(kg.m^{-3})$
$\rho_a$	Masse volumique apparente des matériaux	$(kg.m^{-3})$
$\rho_{a_{sec}}$	Masse volumique apparente des matériaux à l'état sec	$(kg.m^{-3})$
$\rho_{pol}$	Masse volumique des fibres polymères	$(kg.m^{-3})$
$\rho_s$	Masse volumique de la phase solide des matériaux	$(kg.m^{-3})$
$\rho_{veg}$	Masse volumique des fibres végétales	$(kg.m^{-3})$
$\sigma$	Résistance statique à l'écoulement de l'air	$(N.m^{-4}.s)$
$\sigma_{moy}$	Ecart-type de la distribution log-normale	$(m)$
$\sigma_{sb}$	Constante de Stefan-Boltzmann	$(W.m^{-2}.K^{-4})$
$\tau$	Fraction volumique de fibres polymères dans le milieu composite	
$v$	Facteur de transmission acoustique	
$\phi$	Porosité	
$\varphi$	Densité de flux thermique	$(W.m^{-2})$
$\varphi_c$	Densité de flux thermique par conduction	$(W.m^{-2})$
$\varphi_r$	Densité de flux thermique par rayonnement	$(W.m^{-2})$
$\omega$	Pulsation	$(rad.s^{-1})$
$\omega_{dec}$	Pulsation de découplage	$(rad.s^{-1})$
$\omega_t$	Pulsation caractéristique des effets thermiques	$(rad.s^{-1})$
$\omega_v$	Pulsation caractéristique des effets visco-inertiels	$(rad.s^{-1})$
$\Omega$	Volume du motif générique	$(m^3)$
$\Omega_f$	Volume de la phase fluide du motif générique	$(m^3)$
$\Omega_s$	Volume de la phase solide du motif générique	$(m^3)$



---

## Symboles mathématiques

$\vec{\nabla}$	Opérateur gradient
$\vec{\nabla} \cdot$	Opérateur divergence
$\Delta$	Opérateur laplacien
$\frac{\partial}{\partial x}$	Dérivée partielle par rapport à la variable $x$
$\oint_{\partial V} dS$	Intégrale de la surface $dS$ représentant la frontière ( $\partial V$ de $V$ )
$\iiint_V dV$	Intégrale de volume
$\bar{x}$	Conjugué de la variable complexe $x$
$\otimes$	Produit tensoriel
$\mathbf{D}(\vec{v})$	tenseur des taux de déformation appliqué à la vitesse locale

## Acronymes

<i>ACV</i>	Analyse du Cycle de Vie
<i>ADEME</i>	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
<i>AQC</i>	Agence de la Qualité de la Construction
<i>CESE</i>	Conseil Économique, Social et Environnemental
<i>CGDD</i>	Commissariat Général au Développement Durable
<i>CNB</i>	Conseil National du Bruit
<i>CNTE</i>	Conseil National de la Transition Écologique
<i>COFRAC</i>	COmité FRançais d'ACcréditation
<i>COP</i>	COnférence des Parties
<i>CO<sub>2</sub></i>	Dioxyde de carbone
<i>CREPIM</i>	Centre de Recherche et d'Etude sur les Procédés d'Ignifugation des Matériaux
<i>CSTB</i>	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
<i>DVS</i>	Dynamic Vapor Sorption (Sorptions Dynamique de Vapeur)
<i>ELAN</i>	Evolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique
<i>ENTPE</i>	Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
<i>ERP</i>	Etablissement Recevant du Public
<i>FCBA</i>	Institut technologique pour les filières Forêt, Bois, Construction et Ameublement
<i>GES</i>	Gaz à Effet de Serre
<i>GIEC</i>	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du climat
<i>HAC</i>	Homogénéisation Auto-Cohérente
<i>HQE</i>	Haute Qualité Environnementale
<i>HSP</i>	Homogénéisation des Structures Périodiques
<i>IFOP</i>	L'Institut Français d'Opinion Publique

---

<i>JCAL</i>	Modèle acoustique semi-phénoménologique dit de Johnson Champoux Allard et Lafarge
<i>LTECV</i>	Loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte
<i>MEB</i>	Microscope Électronique à Balayage
<i>MTES</i>	Ministère de la Transition Écologique et Solidaire
<i>NRA</i>	Nouvelle Réglementation Acoustique
<i>OMS</i>	Organisation Mondiale de la Santé
<i>PACTE</i>	Programme d'Action pour la qualité de la Construction et la Transition Énergétique
<i>RILEM</i>	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
<i>RT</i>	Réglementation Thermique
<i>SAU</i>	Surface Agricole Utile
<i>TMM</i>	Transfert Matrix Method (Méthode des Matrices de Transfert)
<i>UICPA</i>	Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée
<i>VER</i>	Volume Élémentaire Représentatif

---

---

## Table des matières

---

<b>Préambule et structure du mémoire</b>	<b>1</b>
<b>I Contexte et principaux enjeux liés aux laines végétales du bâtiment</b>	<b>3</b>
1 Le contexte . . . . .	4
1.1 De grands défis environnementaux et sanitaires . . . . .	4
1.2 Les mesures réglementaires engagées . . . . .	6
2 La filière des laines végétales du bâtiment . . . . .	8
2.1 La culture des plantes à croissance rapide pour le stockage de $CO_2$ atmosphérique . . . . .	8
2.2 Les méthodes d'obtention et de premiers traitements des fibres conduisant à la fabrication des panneaux de laines végétales . . . . .	12
2.3 Une part de marché qui reste faible malgré des performances rivalisant avec les isolants fibreux conventionnels . . . . .	20
3 Construction de la thèse . . . . .	25
3.1 Identification des verrous scientifiques relatifs aux performances des laines végétales . . . . .	26
3.2 Problématique de la thèse . . . . .	27
3.3 Les objectifs de la thèse et la démarche scientifique mise en œuvre . . . . .	28
<b>II État de l'art : Identification des méthodes de modélisation des propriétés acoustiques et thermiques liées aux spécificités des fibres et des laines végétales</b>	<b>31</b>

## Table des matières

---

1	Des caractéristiques et des spécificités propres aux fibres et aux laines végétales . . . . .	32
1.1	La classification des laines et des fibres végétales . . . . .	32
1.2	Les spécificités des fibres végétales lignocellulosiques . . . . .	34
1.3	L'influence de la nature et de l'organisation des fibres . . . . .	42
2	Les laines végétales : des matériaux aux propriétés multifonctionnelles . . . . .	54
2.1	Des propriétés acoustiques liées à une microstructure dissipative . . . . .	54
2.2	Des propriétés en isolation thermique conférées par une porosité élevée . . . . .	65
2.3	Les propriétés mécaniques des laines végétales . . . . .	73
3	L'identification de méthodes de modélisation en vue d'une approche micro-macro conjointe acoustique et thermique pour les matériaux fibreux . . . . .	74
3.1	Une approche conjointe acoustique et thermique relativement peu déve- loppée . . . . .	75
3.2	Les différentes approches pour la modélisation des propriétés acoustiques et thermiques . . . . .	76
3.3	Les modèles de références concernant le comportement élastique et la compression des matériaux poreux . . . . .	87
4	Conclusion . . . . .	90

### **III Caractérisation et modélisation des performances acoustiques des laines vé- gétales** . . . . . **93**

1	Présentation des fibres et des matériaux de la thèse . . . . .	94
1.1	Les panneaux de laines végétales . . . . .	94
1.2	Les fibres végétales . . . . .	98
2	Caractérisation expérimentale du squelette des matériaux . . . . .	98
2.1	Caractérisation des distributions de rayons de fibres . . . . .	99
2.2	Masse volumique et porosité des fibres du squelette des matériaux . . . . .	108
2.3	Résistance à l'écoulement de l'air . . . . .	112
2.4	Tortuosité, longueurs caractéristiques et perméabilité thermique . . . . .	115
3	Caractérisation expérimentale des propriétés acoustiques . . . . .	117
3.1	Protocoles expérimentaux mis en œuvre . . . . .	118
3.2	Evaluation de l'influence de l'humidité sur les propriétés acoustiques . . . . .	119
3.3	Résultats et analyses des caractérisations expérimentales . . . . .	121
4	Modèle d'homogénéisation acoustique s'appuyant sur deux types de fibres . . . . .	123
4.1	Elaboration du modèle . . . . .	124
4.2	Validation du modèle à deux tailles de fibres . . . . .	127

4.3	Optimisation de l'absorption acoustique . . . . .	131
5	Analyse et prise en compte des comportements limp et élastique de la phase solide	132
5.1	Comportement limp . . . . .	133
5.2	Comportement élastique . . . . .	134
6	Influence de la compression sur les performances acoustiques des laines végétales	138
6.1	Adaptation des dispositifs expérimentaux . . . . .	139
6.2	Résultats et analyses des caractérisations expérimentales . . . . .	139
6.3	Modélisation des phénomènes de compression 1D . . . . .	141
7	Conclusion . . . . .	143

**IV Caractérisation et modélisation des performances thermiques des laines végétales** **145**

1	Dispositifs utilisés et protocoles mis en œuvre pour la caractérisation expérimentale	146
1.1	Dispositifs en régime transitoire . . . . .	146
1.2	Développement d'un dispositif expérimental en régime stationnaire . . .	147
1.3	Présentation et analyse des résultats expérimentaux . . . . .	151
2	Influence de la masse volumique sur les performances thermiques des laines végétales . . . . .	155
2.1	Adaptation des dispositifs et protocoles expérimentaux . . . . .	155
2.2	Résultats et analyses des caractérisations expérimentales . . . . .	156
2.3	Influence de la compression sur les performances thermiques des laines végétales . . . . .	158
3	La caractérisation expérimentale de l'influence de l'eau sur les performances thermiques des laines végétales . . . . .	159
3.1	L'influence de l'humidité relative sur la teneur en eau des matériaux . . .	160
3.2	Caractérisation de la célérité de sorption et de désorption . . . . .	164
3.3	Evaluation de l'influence de la présence d'eau au sein des matériaux sur leurs performances thermiques . . . . .	165
4	Méthode HAC cylindrique en statique pour la détermination des propriétés thermiques des matériaux fibreux . . . . .	169
4.1	Modélisation de la conductivité thermique . . . . .	170
4.2	Comparaison de la modélisation HAC avec les résultats expérimentaux .	176
4.3	Eléments de discussion sur les limites du modèle HAC cylindrique . . . .	180
5	Prise en compte du transfert par rayonnement thermique dans l'approche de modélisation . . . . .	181

5.1	Modélisation du transfert thermique par rayonnement . . . . .	182
5.2	Couplage du rayonnement à la modélisation HAC cylindrique . . . . .	184
6	Conclusion . . . . .	190
<b>V Approche conjointe de modélisation acoustique et thermique par Homogénéisation Auto-Cohérente</b>		<b>193</b>
1	Etablissement des lois macroscopiques à partir de l’HSP . . . . .	194
1.1	Hypothèses de base . . . . .	194
1.2	Relations à l’échelle locale . . . . .	195
1.3	Prise en compte de la condition de séparation d’échelles . . . . .	196
1.4	Utilisation de développements asymptotiques . . . . .	197
1.5	Résolution des équations par formulation variationnelle . . . . .	199
2	Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux . . . . .	203
2.1	Elaboration du motif générique . . . . .	204
2.2	Développement de l’approche HAC cylindrique dynamique . . . . .	206
2.3	Validation de l’approche HAC cylindrique dynamique . . . . .	226
3	Lien entre la modélisation HAC cylindrique et les modélisations fluide-équivalent	231
3.1	Identification des paramètres liés aux effets visco-inertiels . . . . .	232
3.2	Identification des paramètres liés aux effets thermiques . . . . .	237
4	Synthèse et analyse de l’approche conjointe acoustique et thermique . . . . .	240
4.1	Identification d’une procédure conjointe acoustique et thermique . . . . .	241
4.2	Application de la procédure conjointe de modélisation des propriétés acoustiques et thermiques . . . . .	244
4.3	Possibilité d’optimisation conjointe des performances acoustiques et thermiques . . . . .	247
5	Conclusion . . . . .	250
<b>Conclusion générale et perspectives</b>		<b>253</b>
<b>Références bibliographiques</b>		<b>257</b>
<b>Annexe A : Dispositifs expérimentaux</b>		<b>1</b>
1	Microscope Electronique à Balayage (MEB) . . . . .	1
2	Porosimètres et pycnomètre à hélium . . . . .	2
2.1	Porosimètre par différentiel de pression . . . . .	2

2.2	Porosimètre par comparaison de volumes d'air . . . . .	3
2.3	Pycnomètre à hélium . . . . .	3
3	Résistivimètre . . . . .	4
4	Tube d'impédance . . . . .	5
4.1	Tube d'impédance en configuration « conventionnelle » . . . . .	5
4.2	Tube d'impédance adapté pour la compression des échantillons . . . . .	6
5	Conductivimètres . . . . .	7
5.1	Conductivimètres en régime transitoire . . . . .	7
5.2	Conductivimètre en régime permanent . . . . .	10
6	DVS . . . . .	11

**Annexe B : Modélisation HAC cylindrique dynamique pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux** **13**

1	Récapitulatif des fonctions du modèle . . . . .	13
---	---	----



## Table des matières

---

---

## Préambule et structure du mémoire

---

Ce mémoire expose les travaux de recherches menés dans le cadre de ma thèse concernant le développement d'une approche conjointe acoustique et thermique afin d'optimiser les performances des laines végétales utilisées comme isolant du bâtiment. Il s'articule autour de cinq chapitres.

L'objectif du premier chapitre consiste à présenter un état des lieux de la filière des laines végétales. Pour cela, je m'attache à mettre en lumière de manière objective, en m'appuyant sur des études et des références de la littérature, l'état des connaissances afin de lever un certain nombre de craintes, de méconnaissances et d'idées préconçues sur cette filière. Ainsi, ce premier chapitre du mémoire raconte, à travers un focus particulier sur les laines de chanvre et de lin, toutes les étapes qui les conduisent jusque dans l'enveloppe des bâtiments, depuis la culture des plantes, en passant par leur fabrication puis leur commercialisation sur le marché des isolants fibreux. L'analyse de tous ces éléments me mène ainsi à l'identification de **verrous scientifiques** qui freinent encore le développement des isolants fibreux biosourcés en 2019. Le premier acte de ce mémoire s'achève alors par **la formulation de la problématique de la thèse et de ses objectifs**.

Afin de répondre aux attentes formulées, je dresse, en guise de deuxième chapitre, un état de l'art qui nous plonge tout d'abord au cœur des spécificités de la microstructure des matériaux et de leurs fibres végétales. Une remontée guidée par les phénomènes physiques acoustiques et thermiques est alors effectuée jusqu'aux propriétés macroscopiques des laines végétales. La recherche de modélisations micro-macro est alors lancée afin d'identifier des références sur lesquelles m'appuyer dans l'optique de l'approche conjointe, dont les travaux dans la littérature sont bien peu nombreux. Cet état de l'art relativement complet, que j'ai souhaité le plus exhaustif possible, conduit à l'identification des éléments à investiguer en priorité pour apporter des **réponses innovantes aux objectifs de la thèse**.

Le troisième chapitre de ce mémoire, qui concerne la caractérisation et la modélisation des propriétés acoustiques des laines végétales, débute par la présentation des principaux protagonistes de ce travail de recherche, à savoir 22 panneaux de laines végétales. Ces derniers entrent rapidement en action à travers les premières campagnes de caractérisations expérimentales qui sont lancées afin de **constituer des banques de données**

**aussi complètes que possible de leur microstructure et de leurs propriétés acoustiques.** Ce chapitre fait également la part belle à une modélisation composite couplée au modèle d'homogénéisation micro-macro de Tarnow, *qui a fait l'objet d'une publication dans la revue de rang A, Applied Acoustics*<sup>1</sup>. **Ce modèle permet ainsi de prédire l'absorption acoustique de matériaux fibreux à partir de la taille caractéristique de deux types de fibres (végétales et polymères pour les laines végétales).** Ce troisième acte du mémoire se termine par la prise en compte du comportement élastique du squelette de quelques matériaux et par des investigations sur l'influence de la compression des laines végétales.

Le chapitre suivant est consacré à la caractérisation et la modélisation de la conductivité thermique des matériaux. Ainsi, des expérimentations sont menées sur les échantillons à partir de **deux dispositifs fonctionnant en régime transitoire**. Les résultats sont ensuite comparés à des mesures réalisées avec **un dispositif reposant sur un régime permanent, spécialement développé dans le cadre de la thèse**. Contrairement à l'absorption acoustique, la présence d'eau dans les matériaux a une influence sur leur conductivité thermique. Ainsi, les liens entre les conditions d'humidité relative, la teneur en eau des matériaux et la conductivité thermique sont caractérisés et analysés. Tous ces résultats engrangés viennent compléter et enrichir les banques de données expérimentales de la thèse. Je propose également dans ce chapitre de recourir à **l'Homogénéisation Auto-Cohérente (HAC)**. Cette méthode de modélisation est adaptée, dans le cas du transfert thermique par conduction, pour une géométrie cylindrique proche de la morphologie des fibres en première approximation. *Un article sur ces travaux est en cours de révision dans la revue de rang A Construction and Building Materials, Cons. Build. Mat. - review*<sup>2</sup>. Cette approche est finalement couplée avec un modèle relatif au transfert thermique par rayonnement afin de proposer une modélisation plus complète et plus proche des phénomènes observés.

Enfin, l'ultime chapitre de ce mémoire, sous forme de pentalogie, est constitué de deux parties principales. La première, qui a fait l'objet d'*une communication orale en congrès international*<sup>3</sup>, expose l'adaptation de la **méthode HAC cylindrique au phénomène d'absorption acoustique en dynamique**. Elle s'appuie notamment sur des lois de comportement à l'échelle macroscopique établies à partir de la méthode d'Homogénéisation des Structures Périodiques (HSP). Après un développement détaillé, cette approche HAC conduit à l'établissement de trois solutions possibles pour l'absorption acoustique des matériaux fibreux. Cette modélisation HAC cylindrique en dynamique est ensuite validée pour le cas des laines végétales.

La deuxième partie de ce chapitre s'appuie sur une synthèse générale de l'approche de modélisation conjointe acoustique et thermique. Cette synthèse a fait l'objet d'*une communication orale en congrès international*<sup>4</sup>. Elle conduit à l'élaboration d'**une procédure globale de modélisation conjointe des propriétés acoustiques et thermiques**. Ce cinquième chapitre me permet ainsi de regrouper dans cette procédure conjointe acoustique et thermique tous les travaux menés précédemment dans le cadre de la thèse. Elle offre ainsi tous les outils nécessaires à l'optimisation des performances acoustiques et thermiques des matériaux fibreux.

---

1. Piégay *et al.* 2018, *Acoustical model of vegetal wools including two types of fibers*, App. Acoust 129, p. 36-46

2. Piégay *et al.*, *A cylindrical self-consistent modelling of vegetal wools thermal conductivity*

3. Piégay *et al.*, *A self-consistent approach for the acoustical modeling of vegetal wools*, INTER-NOISE 2018, Chicago

4. Piégay *et al.*, *Acoustical and thermal self-consistent modelling for the optimisation of vegetal wools used in green buildings*, ICBBM 2019, Belfast

---

### Contexte et principaux enjeux liés aux laines végétales du bâtiment

---

Lorsque j'ai débuté mes travaux de recherche sur mon sujet de thèse, j'ai été frappé par le fossé qui sépare encore les laines biosourcées des matériaux plus conventionnels sur le marché des isolants fibreux. Néanmoins, tout au long de la construction de ma thèse, j'ai pris conscience, notamment à l'occasion d'échanges lors de mes communications orales, qu'au-delà des attentes en termes de performances et de propriétés physiques, de nombreuses interrogations et craintes subsistent concernant l'utilisation de ces matériaux. L'analyse de ces doutes conduit à des questionnements plus globaux pouvant s'étendre de manière plus large à la filière des isolants biosourcés dans son ensemble.

C'est pourquoi j'ai jugé pertinent, même si cela n'est pas très conventionnel, de rédiger un état des lieux original et détaillé mais non exhaustif concernant la filière des laines végétales.

Dans un contexte où il est indispensable d'apporter des réponses aux enjeux environnementaux majeurs auxquels notre planète est confrontée, comme le dérèglement climatique, la réduction de la biodiversité, la diminution des ressources et l'augmentation des risques sanitaires et environnementaux, la France a renforcé sa démarche de transition écologique depuis 2013 (création du Conseil National de la Transition Ecologique). Un des principaux secteurs concernés par cette transition est celui du bâtiment, pour lequel les logements sont encore globalement mal isolés d'un point de vue thermique, mais également acoustique en 2019. Ainsi,

les pouvoirs publics ont décidé de s'appuyer sur un certain nombre de dispositifs réglementaires et législatifs afin d'accélérer la rénovation du parc bâti, notamment par l'utilisation de matériaux biosourcés, comme les laines végétales, qui sont capables d'apporter des solutions aux problématiques à la fois environnementales et sanitaires.

Afin de mieux appréhender l'ensemble des enjeux liés à l'utilisation de ces matériaux dans le domaine de la construction durable en 2019, un état des lieux de cette filière est dressé dans ce chapitre. Sans être complètement exhaustif, il apporte des éléments de connaissance sur les fibres végétales depuis la culture des plantes jusqu'aux premières étapes d'extraction mécanique, en passant par leur capacité à stocker du dioxyde de carbone atmosphérique, puis sur la fabrication des isolants, leurs propriétés multi-fonctionnelles attendues et l'identification des éléments qui freinent encore leur développement dans le marché des isolants.

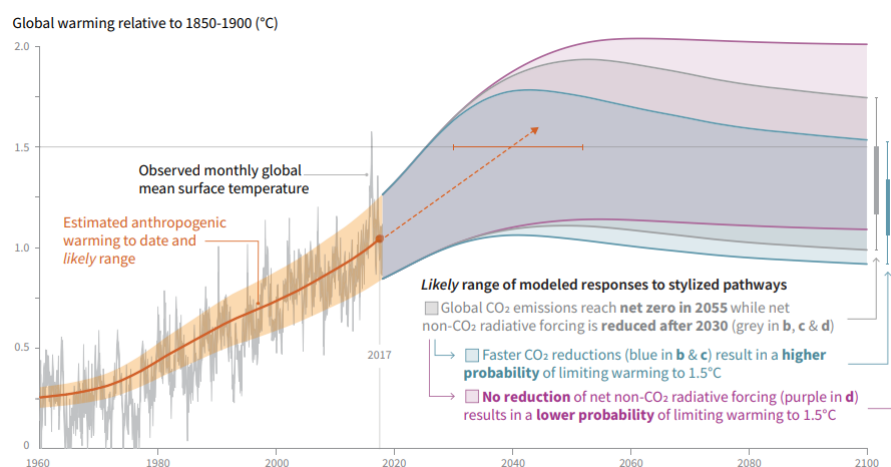
Ainsi, à partir de cet état des lieux, des verrous scientifiques majeurs sont identifiés et conduisent à la formulation de la problématique de ce travail de thèse. Afin d'y répondre et de contribuer à lever les doutes et les réticences liés à l'utilisation de ces matériaux, une démarche scientifique est mise en œuvre en s'appuyant sur quatre grands objectifs.

# 1 Le contexte

## 1.1 De grands défis environnementaux et sanitaires

Le dernier rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), rendu public en octobre 2018, confirme de manière quasiment incontestable que les activités humaines sont la principale cause du réchauffement climatique actuel [GIEC 2018]. Il confirme également que l'objectif de limiter la hausse moyenne des températures à l'échelle du globe à  $1,5^{\circ}\text{C}$  d'ici 2100, qui avait été fixé au cours de la COP 21 à Paris en 2015, sera difficile à respecter.

En effet, comme l'illustre la Figure I.1, en 2017-2018 ce réchauffement atteignait déjà  $1^{\circ}\text{C}$ . Aussi, les experts du GIEC exposent des pistes pour tenter de respecter l'objectif de  $1,5^{\circ}\text{C}$  afin de limiter au maximum les conséquences négatives qui affecteraient les espèces vivantes animales et végétales. Ainsi, le GIEC insiste sur la nécessité de réduire drastiquement la demande en énergie des bâtiments, de l'industrie et des transports. En parallèle, pour compléter cette première recommandation, des experts tels que Jean Jouzel, glaciologue, climatologue et ancien vice-président du Groupe scientifique du GIEC, préconisent l'utilisation de procédés ou de matériaux, comme les biosourcés, capables de capturer le dioxyde de carbone atmosphérique,



**Figure I.1** – Evolution globale de la température et modélisation du réchauffement attendu en fonction de trois scénarios de réduction des émissions de GES [GIEC 2018]

un des principaux GES<sup>1</sup>.

Le secteur du bâtiment qui est pointé du doigt dans ce rapport, représente pour la France 22% des émissions de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et 45% de l'énergie finale consommée en France [ADEME 2018a]. En effet, deux tiers des logements résidentiels du parc bâti ont été construits avant 1974 en l'absence de toute réglementation thermique [PACTE 2017]. Le secteur du bâtiment contribue donc de manière significative au phénomène de réchauffement climatique.

Par ailleurs, ces problématiques ne sont pas les seules à concerner le secteur du bâtiment. En effet, la qualité de l'ambiance intérieure, notamment le confort acoustique et le confort hygrothermique, sont également impactés par la mauvaise isolation du parc bâti ciblée par le rapport PACTE de 2017. Comme nous passons en moyenne 80% de notre temps dans des environnements intérieurs [ADEME 2018b], ces problématiques ont donc un impact direct sur la santé des occupants.

En ce qui concerne les nuisances sonores, 86% des Français déclaraient en 2014 être gênés à leur domicile. Les principales sources sont le bruit des transports et les bruits de voisinage [IFOP 2014]. Le coût sur la santé de chacune de ces nuisances sonores est estimé à 11,5 milliards d'euros par an en France selon une étude diligentée en 2016 par le Conseil National du Bruit (CNB) et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) [CNB & ADEME 2016]. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), quant à elle, évalue pour l'Europe à 903000 le nombre d'années de vie en bonne santé perdues en raison d'une exposition

1. [www.lemoniteur.fr](http://www.lemoniteur.fr)

à des bruits excessifs notamment pendant les périodes de sommeil.

Ainsi, face à ce constat relativement négatif pour le secteur du bâtiment, l'État français a décidé d'apporter des réponses en s'appuyant sur le développement d'un dispositif réglementaire.

### 1.2 Les mesures réglementaires engagées

En France, les pouvoirs publics ont mis en place des stratégies réglementaires afin d'apporter une réponse aux grands défis environnementaux, sanitaires et sociétaux exposés dans la section précédente. En s'appuyant sur les engagements du Grenelle de l'environnement (lois Grenelle 1<sup>2</sup> et Grenelle 2<sup>3</sup>) notamment en matière d'amélioration de la qualité de l'environnement sonore, mais également sur les réglementations thermiques et acoustiques en vigueur (RT 2012, RT bâtiment existant<sup>4</sup>, NRA<sup>5</sup>), les pouvoirs publics français ont pris de nouveaux engagements concernant la rénovation du parc bâti avec la promulgation en août 2015 de la Loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV)<sup>6</sup>.

En plus de fixer l'objectif d'atteindre un niveau de performance énergétique conforme aux normes « bâtiment basse consommation » (50 kWh par m<sup>2</sup> par an) pour l'ensemble du parc de logements en 2050, l'Article 14 du Titre II de la loi précise que « *l'utilisation des matériaux biosourcés concourt significativement au stockage de carbone atmosphérique et à la préservation des ressources naturelles. Elle est encouragée par les pouvoirs publics lors de la construction ou la rénovation de bâtiments.* »

En ce qui concerne les matériaux biosourcés, le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) en donne la définition suivante : « *Les matériaux biosourcés sont, par définition, des matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale.* »

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. Ainsi, comme l'illustre la Figure II.1 du Chapitre II, les autres isolants fibreux d'origine naturelle, tels que les laines minérales (verre, roche, etc.) en sont exclus.

---

2. LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en oeuvre du Grenelle de l'environnement

3. LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement

4. [www.rt-batiment.fr](http://www.rt-batiment.fr)

5. [www.bruit.fr](http://www.bruit.fr)

6. LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

Cette volonté de mise en œuvre des transitions énergétique et environnementale a été récemment renforcée par la promulgation en novembre 2018 de la loi Evolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique (ELAN)<sup>7</sup> qui prépare la future Réglementation Environnementale 2020 (RE 2020).

Elle précise notamment que « *Les performances énergétiques, environnementales et sanitaires des bâtiments s'inscrivent dans une exigence de lutte contre le changement climatique, de sobriété de la consommation des ressources et de préservation de la qualité d'air intérieur.* »

De plus, elle instaure la notion de performance environnementale des produits de construction durant le cycle de vie du bâtiment. Ainsi, pour évaluer cette performance, seront pris en compte : les émissions de GES tout au long du cycle de vie du bâtiment, leur contribution au stockage du carbone atmosphérique ainsi que la quantité de matériaux renouvelables ou recyclables incorporés. L'objectif étant d'évaluer l'impact environnemental des produits et équipements dans le calcul de l'analyse du cycle de vie (ACV) des bâtiments.

**L'ACV est un outil normalisé (ISO 14040 à 14043) développé depuis 1994. Il permet de réaliser une évaluation globale et multicritère des impacts environnementaux de produits ou de services. Ainsi, l'ACV recense et quantifie, tout au long de la vie des produits (fabrication, distribution, utilisation, collecte, élimination), les flux physiques de matière et d'énergie entrant et sortant associés aux activités humaines générant de la pollution [Boeglin & Veuillet 2005].**

En parallèle et afin de prendre en compte les évolutions de ces nouvelles lois et réglementations, des certifications et des labels spécifiques pour les bâtiments sont créés, notamment en matière énergétique et environnementale. Les certifications et les labels publics sont délivrés par des organismes tiers officiels et indépendants accrédités par le COFRAC (COmité FRançais d'ACcréditation) et bénéficiant d'une convention spéciale avec l'Etat. Ainsi, le label « bâtiment biosourcé », qui a été instauré par l'arrêté du 19 décembre 2012, offre la possibilité de valoriser les constructions neuves qui utilisent des matériaux biosourcés. Depuis 2016 et avec une nouvelle version sortie en 2018, la certification « HQE bâtiment durable » étend son champ d'action en caractérisant la qualité de vie offerte par le bâtiment, son respect de l'environnement et des performances énergétiques et économiques. On retrouve donc des objectifs performantiels concernant le confort hygrothermique et le confort acoustique, l'utilisation raisonnée des énergies et des ressources naturelles, ainsi que l'apport du bâtiment dans la lutte

---

7. LOI n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique



contre le changement climatique.

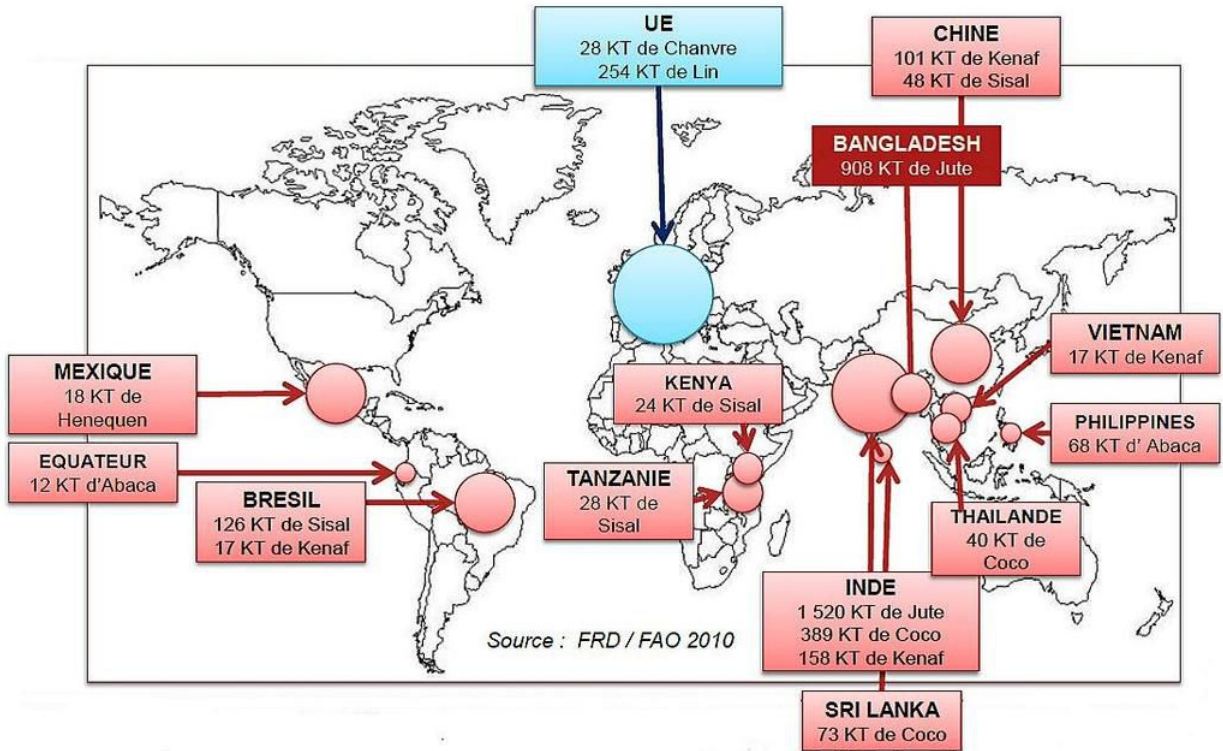
**Ainsi, compte tenu de tous ces éléments, l'isolant utilisé dans l'enveloppe du bâtiment devient un enjeu majeur non seulement du point de vue de la performance thermique mais également de celui du confort acoustique et du confort hygrothermique pour des bâtiments responsables et durables.**

## 2 La filière des laines végétales du bâtiment

Les laines végétales, qui sont des matériaux biosourcés issus de la biomasse végétale, peuvent être utilisées en tant qu'isolants du bâtiment. Cependant, même si ces matériaux semblent posséder toutes les caractéristiques et performances permettant d'impulser les transitions énergétiques et environnementales (et comme cela est présenté dans la suite de ce mémoire), la part de la filière des laines végétales sur le marché des isolants fibreux reste faible. Pourtant, en 2007, à l'issue du Grenelle de l'environnement, un plan d'action sur les matériaux biosourcés avait été lancé en parallèle de celui relatif à la filière bois. En 2019, soit douze ans après, il semble donc nécessaire de faire un état des lieux de cette filière, depuis la culture des plantes jusqu'à l'impact de l'utilisation des produits manufacturés dans l'enveloppe du bâtiment, afin de mieux comprendre et d'identifier les freins qui limitent encore son développement.

### 2.1 La culture des plantes à croissance rapide pour le stockage de $CO_2$ atmosphérique

De nombreuses plantes peuvent être utilisées à travers le monde pour obtenir des fibres végétales, comme l'illustre la Figure I.2 qui représente la production mondiale annuelle moyenne de fibres hors coton et bois entre 2001 et 2009 [Chabaud 2015]. Ainsi, en Europe, les principales fibres produites et utilisées pour la fabrication des isolants fibreux végétaux sont le lin, dont la France est le premier producteur mondial, et le chanvre, dont la France est le leader européen en termes de production. De plus, le lin et le chanvre ont été identifiés en 2015 par le Conseil Economique, Social et Environnemental (CESE) comme deux filières au cœur des enjeux des matériaux biosourcés émergents. C'est pourquoi, dans la suite de ce chapitre, un intérêt particulier est porté au chanvre et au lin avec une présentation des spécificités de leur culture, liées à leur impact sur l'exploitation des sols, ainsi que leur contribution au stockage de carbone atmosphérique.



**Figure I.2** – Production annuelle moyenne (en kT) de fibres végétales dans le monde sur la période de 2001 à 2009, hors coton et bois [Chabaud 2015]

### 2.1.1 Une influence limitée des cultures sur l'exploitation des sols

Le chanvre industriel ou *Cannabis Sativa L.*, présenté à la Figure I.3(a), appartient à la famille des *Cannabaceae*. Le lin ou *Linum ursitatissimum L.*, présenté à la Figure I.3(b) appartient pour sa part à la famille des *Linaceae*.

Le chanvre et le lin sont des plantes à culture annuelle qui présentent de nombreux atouts. En effet, leur introduction contribue à l'allongement et à la diversification de la rotation des cultures, en stoppant notamment le cycle des maladies. De plus, leur densité de peuplement élevée et leur vitesse de croissance rapide permettent une couverture totale du sol, réduisant les risques d'érosion et leur conférant un fort pouvoir étouffant contre les adventices. Ainsi, ces cultures laissent une parcelle propre et un sol meuble pour la culture suivante. Enfin, elles ne nécessitent pas de traitements phytosanitaires et sont résistantes aux ravageurs. Le chanvre se distingue plus particulièrement car il n'y a pas de restrictions concernant sa rotation sur une même parcelle, alors que pour le lin, il est nécessaire d'attendre cinq à six ans avant de le cultiver à nouveau sur une même parcelle.



**Figure I.3** – (a) Chanvre *Cannabis Sativa L.*, source :([www.jardinage.lemonde.fr](http://www.jardinage.lemonde.fr)), (b) lin *Linum ursitatissimum L.*, source :([www.mastersoffinen.com](http://www.mastersoffinen.com))

Les seules contraintes réelles de ces deux cultures concernent les sols et les conditions de semis. En effet, pour assurer un bon développement des plantes, il est préférable d'utiliser des terres bien drainées, riches en réserves humiques et minérales, ainsi qu'un sol réchauffé et ressuyé au moment du semis. La dose de semis, faible ou forte, favorisera soit le rendement des graines, soit le rendement des fibres et la facilité de défilage.

En 2018, les cultures de chanvre et de lin en France représentaient respectivement 16 400 *ha*<sup>8</sup> et 98 300 *ha*<sup>9</sup>. En ce qui concerne leur répartition, la culture du chanvre est présente principalement en Ile de France, dans le Nord-Est et l'Ouest de la France. Pour sa part, la culture du lin est essentiellement située en Normandie et dans le Nord de la France.

Il est à noter qu'il existe également une filière de lin oléagineux cultivé pour ses graines. Elle représentait, en 2017, une surface cultivée de 28 700 *ha* répartie sur l'ensemble du territoire mais avec deux pôles principaux situés dans le centre de la France et dans le Sud-Ouest. Cependant, contrairement à la filière du lin fibre, les tiges sont très rarement valorisées [Inovia 2017].

Ainsi, même si les surfaces de ces cultures tendent à progresser depuis quelques années, avec +10% en 2017 et +5% en 2018 pour le lin<sup>10</sup> et +50% pour le chanvre depuis 2013<sup>11</sup>, elles restent faibles par rapport à celles de l'agriculture nourricière. En effet, elles correspondent à 0,06% de la Surface Agricole Utile (SAU) pour le chanvre et 0,34% pour le lin.

Ces surfaces offrent néanmoins des opportunités en termes de captage du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) présent dans l'atmosphère.

---

8. [www.interchanvre.org](http://www.interchanvre.org)

9. [www.lelin-cotenature.fr](http://www.lelin-cotenature.fr)

10. [www.terre-net.fr](http://www.terre-net.fr)

11. [www.interchanvre.org](http://www.interchanvre.org)

### 2.1.2 Une forte contribution au stockage de carbone atmosphérique

Un des atouts majeurs des cultures de chanvre et de lin est leur capacité à stocker du dioxyde de carbone atmosphérique. En effet, comme pour tous les végétaux, le développement du chanvre et du lin est lié au processus de photosynthèse. Ainsi, les plantes produisent du glucose, nécessaire à leur croissance, grâce à l'énergie lumineuse, en absorbant le gaz carbonique de l'air et en rejetant de l'oxygène. Le carbone présent dans le  $CO_2$  est alors intégralement synthétisé par les plantes dans le glucose et devient donc un élément constitutif des végétaux, comme l'illustre la Figure I.4. Il est alors nommé carbone biogénique.

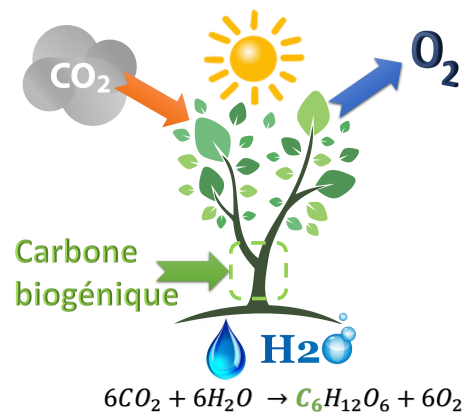


Figure I.4 – Schématisation du phénomène de photosynthèse

Les cultures de chanvre et de lin vont ainsi piéger du  $CO_2$  atmosphérique pendant leur phase de croissance et contribuer à la diminution des quantités de GES présentes dans l'atmosphère. Grâce à leur importante biomasse, un hectare de culture de chanvre ou de lin capte, avant sa maturité, autant de  $CO_2$  qu'un hectare de forêt, soit 15 t [InterChanvre 2017]. En ce qui concerne leurs produits dérivés biosourcés, dont font partie les laines végétales, il est considéré que le carbone représente environ 50% de leur masse [Pittau *et al.* 2018]. Ainsi, ces produits transformés peuvent être considérés comme des puits à carbone en conservant le  $CO_2$  atmosphérique capté pendant toute leur durée de vie, estimée entre 25 et 50 ans en moyenne [Karibati 2015]. D'autre part, comme le cycle de rotation des cultures de plantes à croissance rapide, comme le chanvre et le lin, est annuel, la capacité de régénération et donc de stockage de carbone biogénique d'une parcelle est très importante à travers ses éléments dérivés. En première approximation, on peut donc estimer que cette capacité va croître en fonction des années d'exploitation de la parcelle jusqu'à atteindre une valeur d'équilibre l'année où les premiers produits dérivés vont être détruits et vont relâcher le carbone stocké. Pour plus d'informations sur les différents scénarios de fin de vie des produits transformés il est possible de se référer à

[Pittau *et al.* 2018]. En comparaison, la période nécessaire de rotation d'une forêt pour régénérer son stock de  $CO_2$  est évaluée à 90 ans selon [Eriksson *et al.* 2007]. A surface équivalente, les cultures de plantes à croissance rapide vont donc permettre un stockage plus important de carbone biogénique.

Les ACV traditionnelles ne prennent pas en compte ces différences de temporalité entre la rotation des cultures et la durée de vie des produits transformés et considèrent donc une neutralité des matériaux biosourcés vis-à-vis de leur impact sur les GES. Ainsi, des outils scientifiques pour élaborer des ACV dynamiques prenant en compte cette notion de décalage de temporalité ont été développés [Levasseur *et al.* 2010, Levasseur *et al.* 2012].

**D'autres travaux scientifiques ont montré, en s'appuyant sur ces ACV dynamiques, que l'utilisation de matériaux biosourcés dans les bâtiments n'a pas un impact neutre sur la quantité de GES dans l'atmosphère mais contribue à sa diminution [Fouquet *et al.* 2015, Lumia 2017, Pittau *et al.* 2018].**

Une fois la phase de croissance achevée et le carbone fixé au sein des éléments constitutifs des plantes, la phase de récolte des tiges peut débuter avant les premiers traitements naturels et mécaniques conduisant à l'extraction des fibres.

## 2.2 Les méthodes d'obtention et de premiers traitements des fibres conduisant à la fabrication des panneaux de laines végétales

Après la récolte, l'étape de rouissage constitue un premier traitement naturel des tiges en vue de favoriser l'obtention des fibres. Ensuite, une fois que les pailles (dénomination des tiges) sont suffisamment sèches, elles sont mises en balles puis stockées à l'abri avant la première étape mécanique qui va conduire à l'extraction des fibres. Ces fibres vont ensuite être utilisées pour la confection de nombreux matériaux comme des tissus, des papiers, des cordes et des isolants. En fonction des usages, les modes de fabrication de ces isolants vont permettre de choisir le type et les plages de dimensions de fibres utilisées.

### 2.2.1 Une récolte et une phase de rouissage des tiges spécifiques à chaque type de plante

Les cultures de chanvre et de lin ont des techniques de récoltes différentes.

Pour le chanvre la récolte s'effectue suivant deux modes différents, un mode non battu permettant de récupérer uniquement la tige et un mode battu permettant dans un premier temps de récupérer la graine avant de faucher la tige [Chanvre 2017].

Pour sa part, le lin lui n'est pas fauché mais arraché<sup>12</sup>, comme l'illustre la Figure I.5(b).



**Figure I.5** – (a) Andains de chanvre, source([www.pinterest.fr](http://www.pinterest.fr)), (b) arrachage du lin et dépôt en andains, source([www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com))

Pour les deux types de plantes, les tiges sont ensuite déposées au sol en andains, comme présenté aux Figures I.5(a) et (b) pour être rouies. Le rouissage constitue la première étape naturelle de transformation de la plante en fibres avec pour objectif de faciliter l'extraction des fibres.

Il est à noter que le rouissage est une étape obligatoire pour le lin, sans quoi il n'est pas possible d'effectuer les opérations de séparation des fibres. Néanmoins, il ne faut pas le laisser trop rouir sinon il n'est plus utilisable et doit être brûlé pour éviter de contaminer le sol et compromettre la culture suivante. En ce qui concerne le chanvre, l'opération de rouissage n'est pas obligatoire mais elle favorise grandement l'opération d'extraction des fibres.

En effet, sous l'action de la pluie et du soleil, des micro-organismes et des bactéries présents dans le sol s'introduisent dans les tiges. Ils vont alors contribuer à la dégradation des ciments pectiques qui soudent les fibres à la partie ligneuse de la plante. Cette phase de rouissage est donc très importante car, outre le fait d'avoir un impact sur les opérations de défibrage, elle conditionne également la qualité des fibres végétales [Pallesen 1996],[Hobson *et al.* 2001], [Abot 2010], ainsi que [Martin 2014]. Concernant son influence sur la taille des fibres, elle semble relativement limitée [Mazian *et al.* 2018] et [Placet *et al.* 2017]. Néanmoins, cette

---

12. [www.usrtl-ifl.fr](http://www.usrtl-ifl.fr)

**étape de rouissage conduit à faciliter le défibrage des agglomérats de fibres, permettant ainsi de réduire le nombre d'éléments de taille supérieure à celle des fibres unitaires.**

Cette technique de rouissage reste la plus répandue et la plus communément utilisée, même si elle est difficilement maîtrisable. En effet, sa durée peut varier de 2 semaines à 3 mois en fonction des conditions météorologiques et des demandes des industriels qui vont exploiter les fibres.

C'est pourquoi, compte tenu de cette grande variabilité, des recherches sont menées afin de développer d'autres méthodes permettant une meilleure maîtrise et une optimisation du processus de rouissage [Bouloc 2006], [Abot 2010], [Martin 2014]. Néanmoins, même si certains procédés développés présentent un potentiel intéressant de production de fibres fines et résistantes, notamment les techniques dites « enzymatiques », aucune n'est à l'heure actuelle utilisée de manière industrielle. D'autres pistes sont également envisagées comme le développement d'outils permettant un suivi sur le terrain pour les cultivateurs afin de mieux évaluer le degré de rouissage, ou encore la mise en place d'une certification pour mieux répondre aux exigences industrielles quant aux dimensions et à la résistance des fibres [Chanvre 2017].

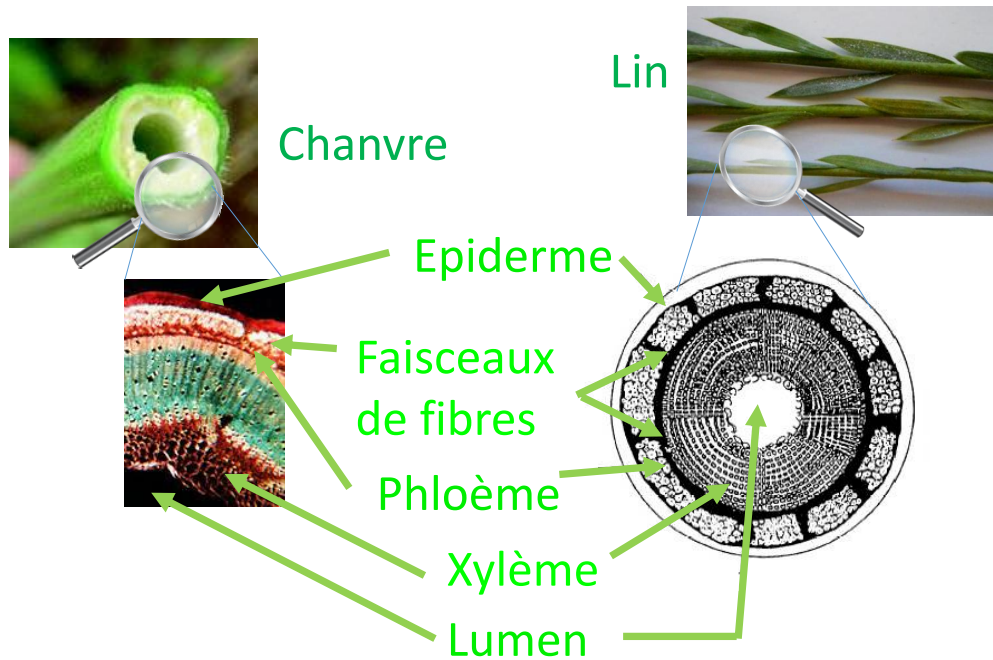
### 2.2.2 Les processus de traitement conduisant à la valorisation des pailles

La première étape de traitement mécanique des pailles va différer légèrement entre le lin et le chanvre. En effet, pour le lin, il correspond au teillage et pour le chanvre au défibrage. Cette phase consiste à séparer mécaniquement le bois ou xylème de la partie fibreuse ou faisceau de phloème. Les pailles de chanvre et de lin présentent une structure interne assez similaire, comme l'illustre la Figure 1.6. Ainsi, une excavation centrale, ou lumen, est entourée par un massif de xylème. En périphérie de la tige, se trouvent la partie contenant les fibres et la surface externe constituée d'un épiderme.

Les étapes de ce premier traitement mécanique des pailles correspondent successivement à l'égrenage, l'étirage, le broyage et le battage. Pour obtenir le détail de ces différentes étapes de traitement il est possible de consulter le site internet de l'Industrie Française du Lin<sup>13</sup> et pour le détail des chaînes de traitement il est possible de trouver des éléments dans la thèse [Martin 2014]. Que ce soit pour le chanvre ou pour le lin, on retrouve les établissements qui effectuent le défibrage (chanvrières) et le teillage (linières) dans les régions de production de ces plantes présentées à la Section 2.1.1, favorisant ainsi les circuits courts.

---

13. [www.usrtl-ifl.fr](http://www.usrtl-ifl.fr)



**Figure I.6** – Vues en coupe des tiges de chanvre (sources : [www.cerig.pagora.grenoble-inp.fr](http://www.cerig.pagora.grenoble-inp.fr), [www.terresinovia.fr](http://www.terresinovia.fr)) et de lin (sources : [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), [www.agri-culture.fr](http://www.agri-culture.fr))

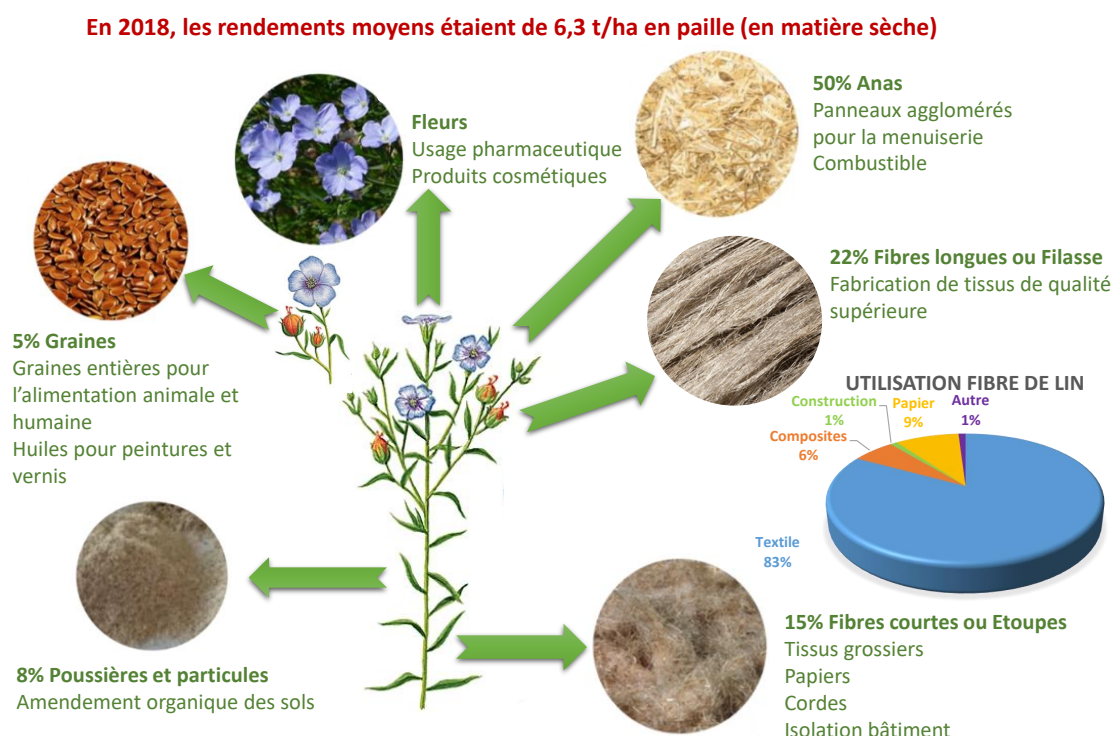
Même s'ils sont regroupés principalement dans les régions Normandie et Hauts de France, contrairement aux chanvrières qui sont mieux réparties sur le territoire, les linières possèdent plus d'établissements et des chaînes de traitement plus développées. Cela vient du fait que, comme le présente les Figures I.7 et I.8, le débouché principal des fibres de lin est le secteur textile (83%) avec une exigence de qualité supérieure, alors qu'il est beaucoup plus minoritaire pour le chanvre (1%).

A l'issue de ce premier traitement, l'ensemble des pailles et des graines sont valorisées pour les deux types de plantes.

Ainsi, pour le chanvre, l'élément principal obtenu est la chènevotte issue du bois des tiges, viennent ensuite les fibres qui vont principalement être utilisées pour la fabrication de papiers, comme l'illustre la Figure I.8.

En ce qui concerne le lin, l'élément principal obtenu est l'anas issu comme pour la chènevotte du bois de la tige. Deux types de fibres sont également extraites comme le présente la figure I.7 : les fibres longues (filasse) ou les fibres courtes (étoupes). Les fibres longues sont en général destinées à l'industrie textile. Pour cela, d'autres traitements tels que le peignage, la filature, le tissage, le tricotage et l'ennoblissement sont nécessaires. Les laines végétales vont pour leur part





**Figure I.7** – Valorisation de la paille et des graines de lin et débouchés des éléments produits (d'après : [Martin 2014, Chabaud 2015])

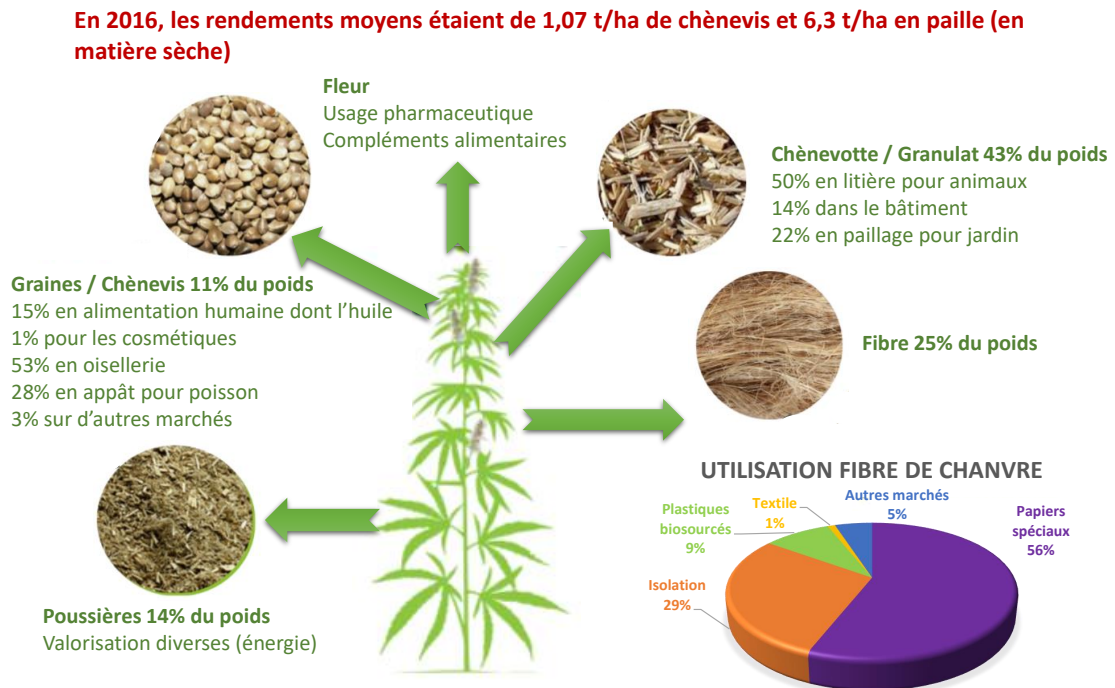
être fabriquées avec les fibres courtes. Pour le lin, les teilleurs proposent deux qualités de fibres courtes. En effet, les fibres courtes de meilleure qualité peuvent être retravaillées (cardage) pour obtenir des fibres cotonisées. Ainsi, la fibre de lin est en règle générale d'un diamètre plus faible avec une répartition plus homogène que celle du chanvre.

### 2.2.3 Des process de fabrication spécifiques aux laines végétales

Une fois la première étape de traitement mécanique réalisée, les fibres peuvent être utilisées en vrac sans subir de process de consolidation, comme l'illustre la Figure I.9. On parle alors de **matériaux non tissés et non consolidés** qui peuvent être utilisés en isolation du bâtiment pour remplir les vides de construction, comme les combles par exemple.

Les non-tissés consolidés sont, pour leur part, obtenus à partir de process de fabrication qui vont permettre de lier les fibres entre elles. Il est alors possible de mettre en œuvre des procédés de fabrication selon deux voies, la voie sèche et la voie humide. La voie humide concerne les techniques utilisant des liants chimiques comme des résines composites.

Pour sa part, la voie sèche comprend deux process différents. Le premier, appelé **aiguille-**

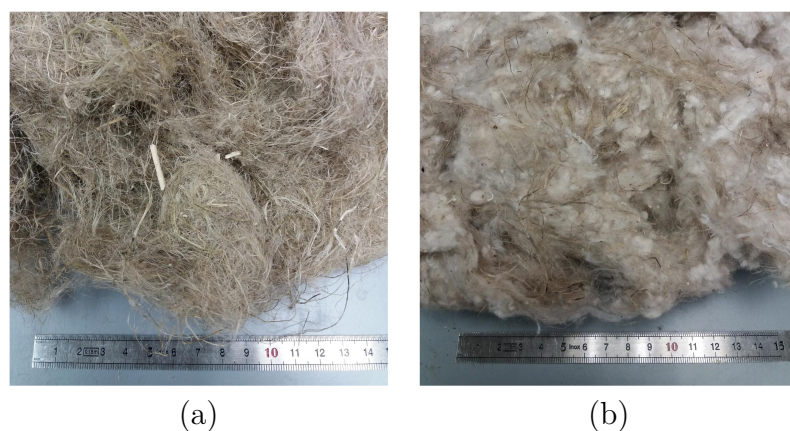


**Figure I.8** – Valorisation de la paille et des chènevis de chanvre et débouchés des éléments produits (d'après : [InterChanvre 2017])

**tage**, consiste à réaliser un enchevêtrement des fibres à l'aide d'un réseau d'aiguilles crantées. Il est utilisé pour la fabrication de feutres, de voiles et de tapis minces pouvant être utilisés comme sous-couche dans l'enveloppe du bâtiment afin notamment d'isoler des bruits d'impacts [Glé 2013], comme l'illustre la Figure I.10(a).

Le second est un procédé thermique appelé thermoliage qui va permettre de fabriquer des panneaux d'isolants semi-rigides avec des épaisseurs plus importantes, comme l'illustre la Figure I.10(b).

Des fibres polymères bicomposantes (en général de 10% à 20% en masse du matériau) présentées à la Figure I.11(a), en polyester ou polyéthylène, composées d'une enveloppe externe autour d'un noyau central sont alors mélangées aux fibres végétales. Cette première étape de préparation comprend également la coupe, le nettoyage et le mélange des différents types de fibres. Cette étape permet de sélectionner le ou les types de fibres végétales, en général de un à trois (exemple : chanvre-lin, bois-kénaf, chanvre-lin-coton, etc.), ainsi qu'une plage de diamètres des fibres en écartant les éléments les plus grossiers. Elles sont ensuite transportées entre les différents dispositifs de la ligne de production par un réseau de conduites à air, avant d'être



**Figure I.9** – Fibres vrac : (a) fibres de chanvre, (b) mélange composé de fibres de lin, chanvre et coton

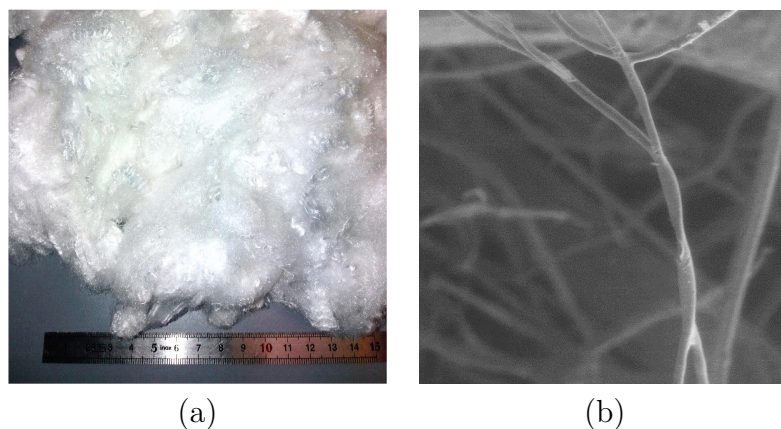


**Figure I.10** – (a) Echantillon de laine de chanvre aiguilleté, (b) Panneau semi-rigide de laine de chanvre

préparées pour constituer des nappes. C'est cette étape qui conditionne l'orientation des fibres [Kueny 2013]. Une fois superposées en nappes successives, elles sont chauffées à une centaine de degrés Celsius.

L'enveloppe des fibres bicomposantes polymères, ayant une température de fusion plus basse que son noyau, fond afin de créer des points de connexion entre elles et constituer ainsi une matrice assurant la cohésion des panneaux de fibres, comme l'illustre la Figure I.11(b). De plus, du fait de ce processus de fabrication qui superpose des couches de fibres, on peut s'attendre à ce que les panneaux de laines végétales présentent un caractère anisotrope.

Il est également possible de fabriquer des panneaux de laines multicouches notamment en vue d'une utilisation en dalles de faux-plafonds. Un panneau de laine monocouche peut alors être associé à des parements d'épaisseurs plus faibles mais ayant des densités plus élevées. L'ajout de parements va permettre d'augmenter la résistance à la flexion des panneaux de



**Figure I.11** – (a) Fibres polymères en vrac, (b) points de connexion entre fibres polymères observés au MEB sur une laine de chanvre

laines et d’optimiser ses performances acoustiques [Glé 2013].

### 2.2.4 Une réaction au feu pouvant nécessiter un traitement hydrofuge

La réaction au feu d’un matériau est liée à sa combustibilité et son inflammabilité. Une autre notion qui lui est liée est la résistance au feu, qui pour sa part se caractérise par la durée pendant laquelle le matériau va permettre de limiter la propagation des flammes. La réaction au feu est réglementée suivant des classifications qui varient selon la norme Française [NF P92-507 2004] et la norme Européenne [NF EN 13501-1-A1 2013], bien qu’une correspondance peut être établie entre les deux [Capon & Khelifi 2012].

Un des paramètres qui va permettre d’établir le classement des matériaux est la température d’inflammation. Pour les fibres végétales, cette dernière va dépendre de leur composition chimique [Freivalde *et al.* 2014]. Ainsi, plus leur composition est riche en cellulose et en hémicellulose et plus la température d’inflammabilité est basse. Comme le présente la section 1.2.1 du Chapitre 2 et plus particulièrement le Tableau 2.1, les fibres végétales sont constituées principalement de ces deux éléments ce qui en fait des éléments inflammables et propagateurs de flamme. De plus, la présence dans les laines végétales de fibres polymères ajoute également du pouvoir calorifique au matériau [Capon & Khelifi 2012]. Les laines végétales non traitées sont donc généralement mal classées d’un point de vue de la réaction au feu.

Dans le cadre de la réglementation des ERP qui impose des seuils de classement pour la réaction au feu, il est nécessaire d’effectuer un traitement d’ignifugation sur laines végétales.

Ce traitement, qui correspond à l’ajout d’un retardateur de flamme au matériau, a pour objectif l’augmentation du temps d’ignition ainsi que sa capacité d’auto-extinction et la dimi-

nution des quantités de chaleur dégagée et de fumées et gaz toxiques émis [Matar 2016].

Parmi les différentes familles de produits utilisées on trouve tout d'abord les hydroxydes, mais qui présentent le désavantage de nécessiter une utilisation en grande quantité (de l'ordre de 50% en masse du matériau), puis les dérivés halogénés mais dont l'utilisation est très réglementée, notamment par la directive REACH (enregistrement, évaluation, autorisation et vérification des produits chimiques), car ils ont des effets néfastes pour l'environnement. On trouve également des composés azotés et phosphorés dont l'utilisation se développe de plus en plus et des produits intumescents et exfoliants [Capon & Khelifi 2012],[Matar 2016]. Enfin, des travaux récents ont été menés afin d'identifier de nouveaux substituts aux produits ignifugeants conventionnels qui viennent d'être présentés, comme le sulfate de magnésium heptahydraté [Colson *et al.* 2019]. Chacune de ces familles de retardateurs agit selon des modes d'actions différents tant physiques, par refroidissement ou création d'une barrière de protection par exemple, que chimiques par des réactions qui vont limiter le développement et la propagation des flammes.

En fonction du type de retardateur utilisé, celui-ci peut avoir un impact sur les performances des isolants, notamment si le produit entraîne une diminution de la porosité des matériaux [Glé 2013]. Des possibilités sont alors offertes sur le mode d'incorporation des retardateurs, soit dans la masse, soit en surface. En effet, il est possible de limiter sa présence, notamment dans le cas de panneaux d'isolants multicouches en traitant uniquement une des couches de parement d'épaisseur souvent faible, comme cela avait pu être fait dans le cadre d'une expérimentation de dalles de faux plafond biosourcées d'une galerie marchande [Glé 2013].

### **2.3 Une part de marché qui reste faible malgré des performances rivalisant avec les isolants fibreux conventionnels**

Comme nous le verrons dans la suite de ce mémoire, les spécificités des laines végétales, liées aux fibres et aux process de fabrication utilisés, leurs permettent de présenter des performances acoustiques et thermiques rivalisant avec les autres isolants fibreux. De plus, grâce à leur caractère hygroscopique, elles se démarquent des autres isolants fibreux en affichant des propriétés hygro-régulatrices et thermo-régulatrices intéressantes dans la contribution au confort hygrothermique dans les bâtiments. Cette sensibilité à l'humidité contribue également à leur conférer un avantage pour la régulation hygrothermique des parois et notamment pour la réhabilitation du bâti ancien. Cependant, malgré tous leurs atouts, les laines végétales restent beaucoup moins utilisées que les isolants conventionnels. Ceci pouvant s'expliquer par un prix de vente plus élevé en règle générale et des appréhensions vis-à-vis de la mise en œuvre des

matériaux et de leur durabilité.

### 2.3.1 Des matériaux aux propriétés multifonctionnelles

Les laines végétales contiennent une grande proportion volumique d'air, ce sont des matériaux dits poreux.

**Un matériau poreux est un milieu qui présente une structure interne discontinue constituée d'une matrice solide et d'interstices multiples, ou pores, connectés ou non entre eux.**

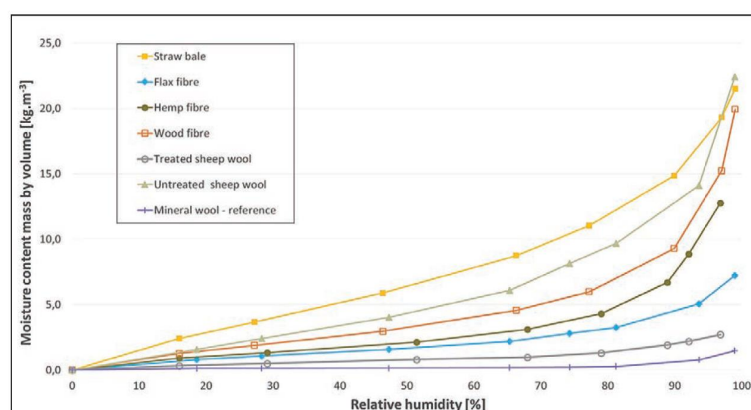
Parmi ces matériaux, les critères retenus pour la classification des isolants s'appuient généralement sur les propriétés de la structure de leur matrice solide et sur la nature de sa composition chimique [Langlais & Klarsfeld 2004]. A partir de cette hypothèse, les auteurs de cette référence bibliographique proposent de définir trois catégories de matériaux isolants poreux : cellulaire, granulaire ou fibreux.

La première catégorie regroupe les matériaux constitués d'une matrice solide continue et de cellules contenant un gaz (air ou autre) qui peuvent être fermées, ouvertes ou partiellement ouvertes (béton cellulaire, verre cellulaire, mousse, etc.).

Les granulaires et les fibreux se démarquent quant à eux de ce type de matériaux car leur phase solide est discontinue et se composent respectivement de granulats (béton de chanvre) et de fibres (laines végétales).

Ainsi, les laines végétales sont des matériaux fibreux possédant un réseau de pores ouverts sur l'extérieur permettant à l'air qu'elles contiennent de s'écouler et d'interagir avec les fibres (frottements visqueux et échanges de chaleur). L'intérieur de ces matériaux est alors le siège de multiples phénomènes physico-chimiques qui sont intéressants aussi bien d'un point de vue acoustique que thermique pour leur application en tant qu'isolants. Les performances acoustiques et thermiques de ces matériaux vont leur permettre de rivaliser avec les isolants conventionnels tels que les laines minérales [Asdrubali *et al.* 2012], [Arenas & Asdrubali 2018], [Kymäläinen & Sjöberg 2008].

De plus, contrairement aux laines conventionnelles (roche, verre), les laines végétales possèdent un caractère hygroscopique ([Heberlé 2016], [Pierre & Colinart 2011], [Collet *et al.* 2008]) comme l'illustre la Figure I.12. Ainsi, en fonction de l'humidité relative de l'air (HR %), elles vont capter une certaine quantité d'eau. Cette capacité leur confère des qualités hygro-régulatrices qui peuvent contribuer à maintenir une humidité stable dans une pièce. Cette caractéristique est un atout car ces matériaux participent au confort hygrothermique à l'intérieur des bâtiments en limitant les effets néfastes sur la santé d'un air trop sec ou trop humide.



**Figure I.12** – Isothermes de sorption de fibres et d'isolants fibreux (Relative humidity : humidité relative, Moisture content : teneur en eau) [Volf *et al.* 2015]

Les laines végétales possèdent également des propriétés thermo-régulatrices qui permettent de déphaser et d'amortir les transferts de chaleur de part et d'autre des parois des logements. Cette capacité à réguler la température va contribuer à sa stabilité à l'intérieur des bâtiments au cours de la journée. Les propriétés thermo-régulatrices viennent donc en complément des propriétés hygro-régulatrices dans leur contribution au confort hygrothermique [Heberlé 2016].

### 2.3.2 Des propriétés liées à la mise en œuvre et à la durabilité des laines végétales

Dans le cadre de la mise en œuvre des laines végétales il existe des avis techniques, des cahiers de prescriptions techniques et des documents de référence qui apportent toutes les préconisations nécessaires à une bonne réalisation en fonction du type d'isolation retenue [AQC 2016].

Comme pour les isolants fibreux conventionnels, si les prescriptions techniques ne sont pas respectées, une mauvaise mise en œuvre pourra engendrer des désordres. En effet, en 2016 une étude terrain réalisée par l'AQC a pu mettre en exergue que les désordres et sinistres recensés sur des parois isolées à partir de matériaux biosourcés, tels que des laines de chanvre notamment, étaient dus à des défauts soit de conception, soit de mauvaises prescriptions ou soit de mise en œuvre inadaptée liés à une méconnaissance des propriétés et spécificités des isolants biosourcés par les professionnels. Ces conclusions ont par ailleurs été confirmées par une étude menée également en 2016 relative à l'utilisation de matériaux biosourcés dans la rénovation thermique du bâti ancien [Heberlé 2016].

Comme pour les matériaux conventionnels, les désordres rencontrés, suite au non respect des prescriptions techniques d'utilisation et de mise en œuvre, sont souvent liés à la présence d'eau. Aussi, dans le cas d'un excès d'humidité, les propriétés présentées par les matériaux

biosourcés permettent le passage de l'humidité à travers la paroi, l'empêchant de se concentrer à certains endroits du matériau. Ainsi, l'utilisation d'isolants biosourcés tels que les laines végétales se montre plus adaptée à la rénovation du bâti ancien que les isolants conventionnels [Heberlé 2016].

En ce qui concerne le développement fongique lié à cette présence d'eau et au vieillissement des matériaux, il a longtemps constitué un frein à l'utilisation des matériaux biosourcés par une application peu adaptée de la norme NF EN ISO 846 [ISO 846 1997], [CSTB 2012]. En effet, son application aux isolants biosourcés et non aux isolants conventionnels, qui peuvent présenter également des développements fongiques [Heberlé 2016], était assujettie à l'utilisation de traitements anti-fongiques. Ce problème a cependant été identifié en 2012 dans une étude de l'Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement [FCBA 2012] qui a contribué à établir des classes d'emplois précisant dans quelles configurations les isolants biosourcés non traités peuvent être utilisés sans risque de développement de moisissures [FCBA\_CSTB 2015].

D'autre part, des travaux de thèse récents [Delannoy 2018] présentent des résultats encourageants concernant le vieillissement des matériaux biosourcés. En effet, des cycles de vieillissements extrêmes ont dû être mis en œuvre sur des bétons de chanvre pour observer des développements fongiques.

Pour ce qui est de la vulnérabilité aux rongeurs et insectes (mites et termites) pour ce type de matériaux, elle est relativement limitée.

**En effet, les laines végétales, notamment les laines de chanvre et de lin, ne contiennent pas de protéines qui sont particulièrement prisées par les rongeurs et les insectes.**

### 2.3.3 Représentation des laines végétales dans le marché des isolants fibreux

Compte tenu de tous les éléments exposés dans les sections précédentes, les laines végétales présentent de nombreux atouts. Ce potentiel avait d'ailleurs été identifié, en mars 2010, à travers la filière des matériaux biosourcés identifiée comme « l'une des 18 filières vertes ayant un potentiel de développement économique élevé pour l'avenir » par le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD).

Plus récemment en 2015, les filières lin et chanvre ont fait l'objet d'un avis du Conseil Economique, Social et Environnemental (CESE) qui les décrivait comme « des enjeux actuels pour les pôles de compétitivité et les investissements d'avenir ». Depuis, les pouvoirs publics incitent fortement à leur utilisation dans le domaine du bâtiment, comme il a été mentionné précédemment.



Cependant, la part de marché des laines végétales, malgré une progression de 5% en 2017, reste faible par rapport aux autres isolants conventionnels. En effet, en 2017 elle s'élevait à 7%, alors que la part des laines minérales (laine de verre, laine de roche) était de 50% et celle des plastiques et mousses alvéolaires (polystyrène extrudé et expansé) de 40%<sup>14</sup>. La part monte à 12% pour les maisons individuelles. Parmi la part des laines végétales, 50% sont des laines de bois. Des études réalisées en 2016, notamment par l'Ademe, estimaient une progression constante mais relativement contenue conduisant la part des isolants fibreux biosourcés à 13% en 2030.

Ces chiffres qui restent donc relativement éloignés de ceux affichés par les isolants fibreux conventionnels, peuvent s'expliquer par plusieurs raisons. Tout d'abord, un ordre de grandeur des prix globalement plus élevé pour des laines végétales comme l'illustre le Tableau 1.1.

Matériaux	Ordre de grandeur des prix moyens ( $HT/m^2$ )
Laine de verre	4 – 5 €
Laine de roche	8 – 9 €
Ouate de cellulose en vrac	10 – 11 €
Laine de bois	19 – 20 €
Autres laines végétales	20 – 22 €

**Tableau I.1** – Ordre de prix moyen en France hors-taxe du mètre carré d'isolants fibreux du bâtiment (résistance thermique de  $5 m^2.K.W^{-1}$ ) en 2016 [Cerema 2017]

D'après les données du Tableau I.1, seul le prix de la ouate de cellulose en vrac semble pouvoir rivaliser avec ceux des solutions minérales traditionnelles. Cela peut s'expliquer par un coût plus faible de la matière première (papier recyclé) et une moins grande variabilité de sa production en comparaison des fibres végétales. De plus, l'augmentation rapide des volumes de production depuis 2010, grâce au développement d'une nouvelle génération de chaînes de production, contribue également à la baisse du prix de vente<sup>15</sup>.

En ce qui concerne les laines végétales, le poids du transport pèse de manière très significative dans le prix de vente. En effet, il représente 25% du prix [Cerema 2017]. Cela s'explique par le fait que les filières de production restent des structures locales liées aux régions de production et qu'elles sont moins structurées que celles des isolants conventionnels avec des volumes de production beaucoup moins importants [Chabaud 2015].

Aussi, les acteurs de cette filière estiment qu'il est nécessaire de dépasser la simple logique de remplacement d'un produit par un autre en se basant sur son prix de vente sec. Des analyses

---

14. [www.actu-environnement.com](http://www.actu-environnement.com)

15. [www.build-green.fr](http://www.build-green.fr)

en coûts globaux sont à favoriser afin d'intégrer les contributions environnementales, la durée de vie des matériaux et les performances du bâti dans la durée.

A l'heure actuelle, le développement d'une telle approche se heurte encore à une méconnaissance des performances et des qualités des isolants biosourcés par les acteurs du bâtiment [AQC 2016].

**Pour faire reconnaître les qualités des isolants biosourcés, mettre fin aux doutes des industriels concernant leurs caractéristiques techniques et lever les réticences à les utiliser, le CESE, dans son avis de 2015, préconise de renforcer l'investigation sur les propriétés ainsi que sur les connaissances scientifiques et techniques de ces produits.**

### 3 Construction de la thèse

Tous les éléments scientifiques et techniques qui viennent d'être exposés convergent vers la même conclusion : les laines végétales sont des matériaux biosourcés possédant des propriétés multifonctionnelles à fort potentiel notamment dans le domaine de l'isolation acoustique et thermique du bâtiment. De plus, ces matériaux se démarquent des isolants fibreux conventionnels notamment par les spécificités de leurs fibres végétales (Sections 2.2.1 et 2.2.2). En effet, en plus d'être capables de stocker du dioxyde de carbone atmosphérique (Section 2.1.2), ils possèdent un caractère hygroscopique qui confère aux laines végétales des prédispositions afin de contribuer activement au confort hygrothermique des logements, comme cela a été présenté à la Section 2.3.1 de ce chapitre.

Néanmoins, comme il a été constaté à la Section 2.3.3 de ce chapitre et comme le préconise le CESE, pour promouvoir la filière des isolants fibreux biosourcés, des investigations scientifiques sont encore nécessaires.

Ainsi, afin de répondre à la fois à ce besoin, mais également à ceux liés au développement des labels et certifications de bâtiments durables (basse consommation énergétique et confort acoustique) dans la construction neuve, ainsi que la nécessité d'améliorer les performances en isolation acoustique et thermique dans le cadre des rénovations massives du parc bâti existant prévu par la Loi LTECV (Section 1.2), **il semble pertinent et novateur de mettre en œuvre une optimisation conjointe des performances acoustiques et thermiques des laines végétales.**

Cependant, pour développer une telle démarche, il est nécessaire de lever plusieurs verrous

scientifiques.

### 3.1 Identification des verrous scientifiques relatifs aux performances des laines végétales

La volonté de développer une approche conjointe des performances acoustiques et thermiques des laines végétales se heurte à **un premier verrou scientifique relatif à la corrélation entre ces deux phénomènes physiques**. En effet, les lois qui régissent les phénomènes physiques liés aux propriétés en isolations acoustiques et thermiques ne sont pas les mêmes. Ces phénomènes peuvent même parfois être antagonistes comme cela est souligné dans [Chéné 2013]. Pour un matériau homogène d'une épaisseur donnée, plus celui-ci possède une masse volumique élevée et plus ses propriétés en isolation acoustique ont tendances à augmenter. En revanche, ses performances en isolation thermique suivent généralement la tendance inverse.

Même s'il existe des travaux présentant des résultats de caractérisation à la fois pour des performances acoustiques et thermiques d'isolants fibreux, comme dans [Rwawiire *et al.* 2017] et [Asdrubali *et al.* 2015], les phénomènes de dissipation acoustique et de transferts de chaleur qui leur sont respectivement liés sont en règle générale étudiés séparément.

Néanmoins, les propriétés acoustiques et thermiques des isolants fibreux peuvent être liées à des paramètres de leur microstructure [Luu 2016], [Lux 2005]. Ainsi, plusieurs méthodes ont été développées afin d'établir des liens entre ces paramètres caractéristiques à l'échelle des fibres (échelles microscopiques et mésoscopiques) et les grandeurs caractéristiques des propriétés acoustiques et thermiques à l'échelle du matériau (échelle macroscopique). Cette approche offre donc l'opportunité d'identifier, à l'échelle de la microstructure, des paramètres communs aux deux phénomènes physiques liés aux propriétés acoustiques et thermiques des isolants fibreux.

A cette échelle, il est nécessaire de prendre en compte **un second verrou scientifique lié à la spécificité des fibres végétales**.

En effet, comme il a été présenté aux Sections 2.2.1 et 2.2.2 de ce chapitre, les fibres végétales présentent des variabilités en termes de morphologie et de dimensions liées au type de plantes dont elles sont issues et à toutes les étapes de transformation, de sélection et de préparation préalable à la fabrication des panneaux de laines végétales. Il faut également prendre en compte le fait que les matériaux sont composés de fibres polymères utilisées dans le process de thermo-liage. Même si leur proportion massique reste beaucoup plus faible que celle des fibres végétales, leur présence dans les matériaux contribue également à la spécificité de la microstructure des laines végétales.

De plus, du fait de leur process de fabrication, les panneaux de laines végétales présentent des orientations de fibres spécifiques qui leur confèrent un caractère anisotrope. Cette orientation particulière est à prendre en compte, notamment dans les démarches de modélisation.

**Le troisième verrou scientifique découle ainsi directement des deux précédents, et correspond au développement et à la mise en œuvre d’une méthode de modélisation analytique commune aux phénomènes de dissipation acoustique et de transferts de chaleur dans les matériaux fibreux, tout en prenant en compte les spécificités des fibres qui les composent.** La résolution de ce verrou peut notamment s’appuyer sur les modélisations HAC développées pour les matériaux granulaires dans le cas de l’acoustique [Boutin & Geindreau 2010] et dans le cas de la thermique [Cérézo 2005].

**Un quatrième verrou est lié à l’influence d’éléments extérieurs sur les performances acoustiques et thermiques des laines végétales, comme notamment la présence d’eau au sein des matériaux liée au caractère hygroscopique des fibres végétales, ou encore la variation de leur masse volumique comme dans le cas de la compression (éléments pouvant être liés au conditionnement, au transport ou à la mise en œuvre des matériaux comme décrit à la Section 2.3.2 de ce chapitre).**

Un dernier verrou concerne l’ignifugation des matériaux, évoquée à la Section 2.2.4 de ce chapitre. Néanmoins, ce verrou, qui constitue un travail de thèse en soi, n’a pas pu être abordé dans le cadre de cette thèse.

## 3.2 Problématique de la thèse

Afin de prendre en compte les verrous scientifiques qui viennent d’être identifiés, ce mémoire de thèse va tâcher de répondre à la problématique suivante :

**En s’appuyant sur les spécificités des laines végétales, peut-on développer une approche de modélisation micro-macro commune afin d’optimiser leurs performances acoustiques et thermiques en vue d’apporter des solutions pour la construction et la rénovation de bâtiments durables ?**

### 3.3 Les objectifs de la thèse et la démarche scientifique mise en œuvre

Afin de répondre à cette problématique, une démarche scientifique reposant sur quatre grands objectifs est développée comme le présente la Figure I.13.

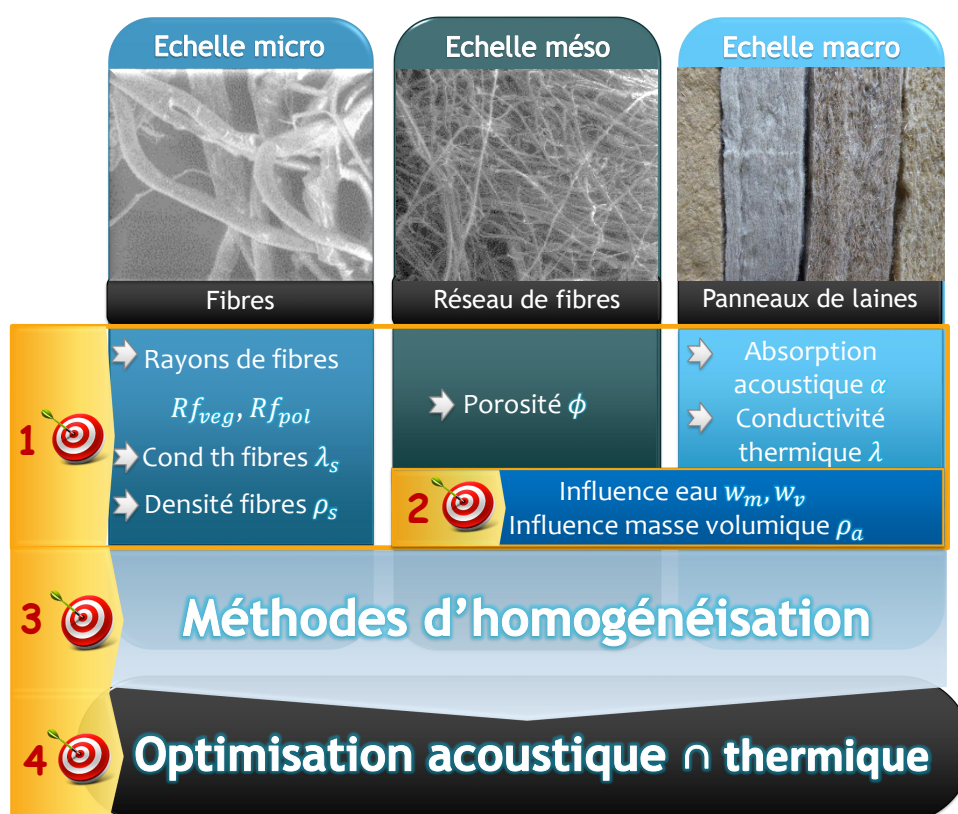


Figure I.13 – Démarche scientifique mise en œuvre dans le cadre du travail de thèse

Ainsi, le premier objectif de ce travail de thèse (1) concerne la caractérisation expérimentale des spécificités et des propriétés des panneaux de laines végétales étudiées suivant les trois échelles définies à la Figure I.13. Cette caractérisation a pour but la constitution de banques de données les plus larges et complètes possible des paramètres et des propriétés spécifiques aux laines végétales utilisés dans le cadre de la thèse. Toutes ces données viennent compléter les connaissances scientifiques de la littérature et mettre en exergue notamment le rôle des paramètres relatifs aux échelles microscopique et mésoscopique sur les propriétés macroscopiques acoustiques et thermiques des laines végétales.

Le second objectif (2🎯) est lié directement au premier et vise à caractériser et à évaluer les influences de l'eau et de la variation de masse volumique sur les propriétés acoustiques et thermiques des matériaux. En ce qui concerne l'influence de l'eau, les données obtenues doivent permettre de mieux comprendre le lien entre la quantité d'eau absorbée par les matériaux et les conditions d'humidité relative de leur environnement (plus particulièrement pour celles rencontrées généralement dans les logements), puis, de caractériser son influence sur les propriétés acoustiques et thermiques en fonction de la quantité d'eau contenue dans les matériaux. En ce qui concerne la variation de masse volumique, il est possible de réaliser des mesures en comprimant les matériaux (avec adaptation des dispositifs le cas échéant). Il est également nécessaire d'évaluer dans quelle mesure l'évolution de ce paramètre peut jouer un rôle dans l'optimisation des performances des matériaux et comment il peut être pris en compte à travers une approche de modélisation. Les résultats peuvent également constituer des données pour les professionnels notamment dans l'évaluation de l'impact de la compression dans le cas de défauts de mise en œuvre.

L'objectif suivant (3🎯) concerne l'identification et l'adaptation d'approches de modélisations communes aux phénomènes physiques liés aux propriétés acoustiques et thermiques des matériaux fibreux. Il est fondamental que ces modélisations permettent de prédire ces propriétés à partir des paramètres identifiés à l'échelle de la microstructure. Il est également indispensable que les approches utilisées prennent en considération la morphologie et la géométrie des fibres, ainsi que le caractère anisotrope des laines végétales. Enfin, une dernière exigence relative aux méthodes de modélisations concerne l'établissement de relations analytiques en vue de leur utilisation pour l'optimisation des performances des matériaux fibreux.

Enfin, le dernier objectif (4🎯) concerne l'élaboration d'une procédure conjointe acoustique et thermique. Il est important que cette procédure s'appuie sur une synthèse globale de l'ensemble des travaux menés pour répondre aux trois premiers objectifs et à la problématique de la thèse. Cette procédure conjointe doit en outre, à partir d'un nombre restreint de paramètres d'entrée, être constituée d'un ensemble d'outils modulables pouvant être utilisés pour l'optimisation des performances acoustiques et thermiques des matériaux fibreux.



---

### État de l'art : Identification des méthodes de modélisation des propriétés acoustiques et thermiques liées aux spécificités des fibres et des laines végétales

---

Comme cela vient d'être présenté dans le premier chapitre, les fibres et les laines végétales possèdent des caractéristiques originales qui leur permettent de se démarquer des isolants fibreux conventionnels. Ainsi, dans une première partie, ces spécificités sont présentées à l'échelle de la fibre puis à l'échelle de l'agencement des fibres (squelette), au travers des données disponibles dans la littérature. Ensuite, à l'échelle des matériaux, les connaissances sur les propriétés acoustiques, thermiques et mécaniques des laines végétales sont exposées en s'appuyant sur les phénomènes physiques et les paramètres qui leurs sont liés. Dans la troisième partie, un état des lieux des travaux réalisés sur des approches conjointes des caractérisations et des modélisations acoustiques et thermiques des matériaux fibreux est présenté. Les méthodes de modélisations, ainsi que les phénomènes pouvant les influencer sont ensuite recensés. Enfin, en s'appuyant sur la synthèse de tous ces éléments, la conclusion de ce chapitre conduit à identifier les domaines à investiguer plus particulièrement dans le cadre des travaux de thèse.



# 1 Des caractéristiques et des spécificités propres aux fibres et aux laines végétales

Dans cette section, la classification des laines végétales en tant qu'isolant du bâtiment, ainsi que l'origine des fibres végétales sont tout d'abord présentées. Les données disponibles dans la littérature permettent ensuite d'illustrer les spécificités des fibres retenues dans le cadre de ce travail de thèse, en termes d'organisation, de composition, de dimension et de morphologie. Enfin, d'autres éléments bibliographiques sont présentés afin de faire le lien entre les fibres et les particularités qu'elles confèrent aux laines végétales, notamment en ce qui concerne leur phase solide.

## 1.1 La classification des laines et des fibres végétales

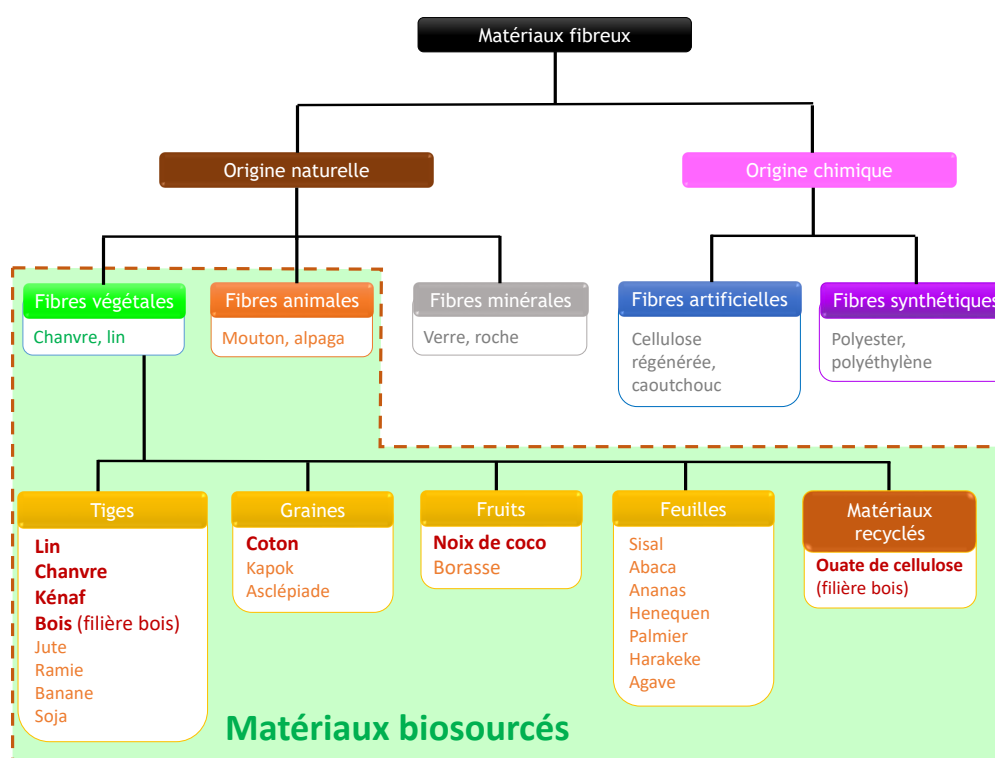


Figure II.1 – Schéma présentant la classification des matériaux fibreux

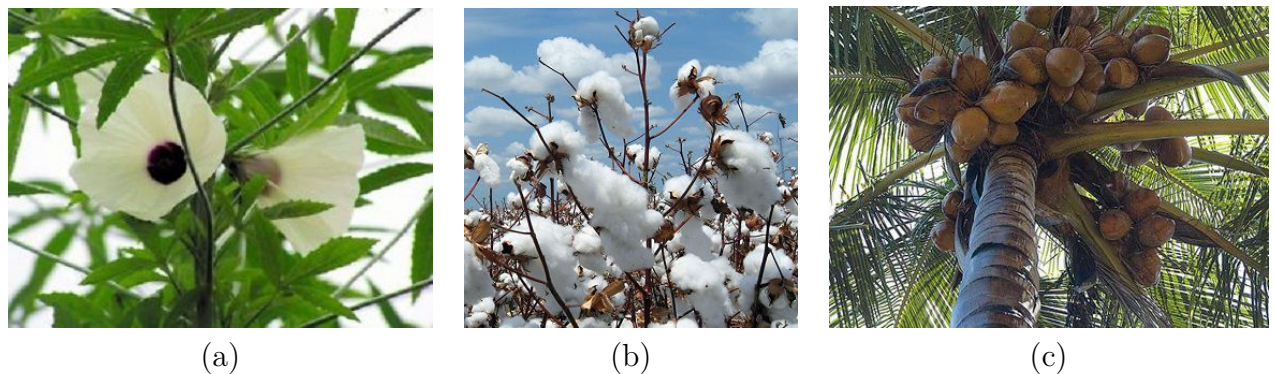
Les laines végétales sont des matériaux fibreux d'origine naturelle. En effet, leurs fibres sont obtenues par transformations physiques et mécaniques à partir d'éléments naturels sans modification de leur composition, contrairement à ceux d'origine chimique dont les fibres sont

## II.1 Des caractéristiques et des spécificités propres aux fibres et aux laines végétales

obtenues soit par transformation chimique d'éléments naturels, soit par fabrication de polymères organiques et inorganiques. Cette classification est illustrée par la Figure II.1.

Cette figure précise également la classification des fibres naturelles d'origine végétale en fonction de la partie de la plante dont elles sont issues, ainsi que des listes non exhaustives de fibres pouvant être utilisées pour la fabrication d'isolants biosourcés du bâtiment.

La majorité des laines végétales étudiées dans le cadre de ce travail de thèse sont fabriquées à partir de chanvre et de lin qui ont été présentés en détail à la Section 2 du Chapitre I. Les autres types de laines caractérisés dans le cadre de cette thèse (indiqués en caractères gras dans la Figure II.1) sont fabriqués à partir de fibres de kénaf, coton, coco et bois, ainsi que d'ouate de cellulose. Ces matériaux sont présentés succinctement dans la suite de cette section.



**Figure II.2** – (a) Culture de kénaf *Hibiscus cannabinus L.*, (b) Cotonnier *Gossypium arboreum*, (c) Cocotier ou *Cocos nucifera*

Le **kénaf** ou *Hibiscus cannabinus L.*, présenté à la Figure II.2(a), est une plante à cycle annuel (croissance rapide) apparentée au jute. Même si sa culture est peu exigeante, comme celle du chanvre, il est sensible au gel<sup>1</sup>. Ainsi, comme l'indique la Figure I.2, il est cultivé principalement en Asie du Sud-Est (Inde, Chine, Vietnam), mais également dans les régions tropicales d'Afrique et en Amérique Centrale.

Le **cotonnier** ou *Gossypium arboreum*, présenté à la Figure II.2(b), est également une plante à cycle annuel, qui est cultivée à travers le monde principalement dans les zones tropicales et subtropicales. Les principaux producteurs sont la Chine, l'Inde et les Etats-Unis. Sa culture représente environ 75% de la production mondiale de fibres végétales<sup>2</sup>.

Pour sa part, le **cocotier** ou *Cocos nucifera*, présenté à la Figure II.2(c) pousse en zone humide et extrêmement ensoleillée. On en trouve partout autour du globe, mais comme le

1. [https://www.doc-developpement-durable.org/file/Arbres-Fruitiers/FICHES\\_ARBRES/bissap-hibiscus%20sabdaria%20fa&cannabinus/kenaf-ADEME.pdf](https://www.doc-developpement-durable.org/file/Arbres-Fruitiers/FICHES_ARBRES/bissap-hibiscus%20sabdaria%20fa&cannabinus/kenaf-ADEME.pdf)

2. <https://www.planetoscope.com/cereales/1469-production-mondiale-de-chanvre.html>

mentionne la Figure I.2, les principaux producteurs de fibre de coco se trouvent en Asie du Sud-Est (Inde, Sri Lanka, Thaïlande). Les fibres sont issues de la bourre, l'enveloppe fibreuse externe des noix de coco<sup>3</sup>.

Enfin, il semble pertinent d'inclure **les laines de bois** et **la ouate de cellulose** aux travaux de thèse. En effet, ces matériaux représentent une part non négligeable des isolants fibreux biosourcés utilisés notamment en France, comme cela a été présenté à la Section 2.3.3 du Chapitre I. Cependant, ils appartiennent à la filière bois qui s'est développée en parallèle de celle des autres laines végétales qui viennent d'être présentées.

## 1.2 Les spécificités des fibres végétales lignocellulosiques

Le Chapitre I a montré que les fibres végétales présentent des spécificités, notamment en termes de variabilité de leurs dimensions, dues à la fois aux conditions de culture des plantes, mais également aux traitements naturels et mécaniques qui conduisent à leur extraction. De plus, les fibres présentent également des spécificités propres au type de plantes dont elles sont issues, comme leur organisation microstructurale et leurs propriétés mécaniques.

### 1.2.1 Une organisation microstructurale commune

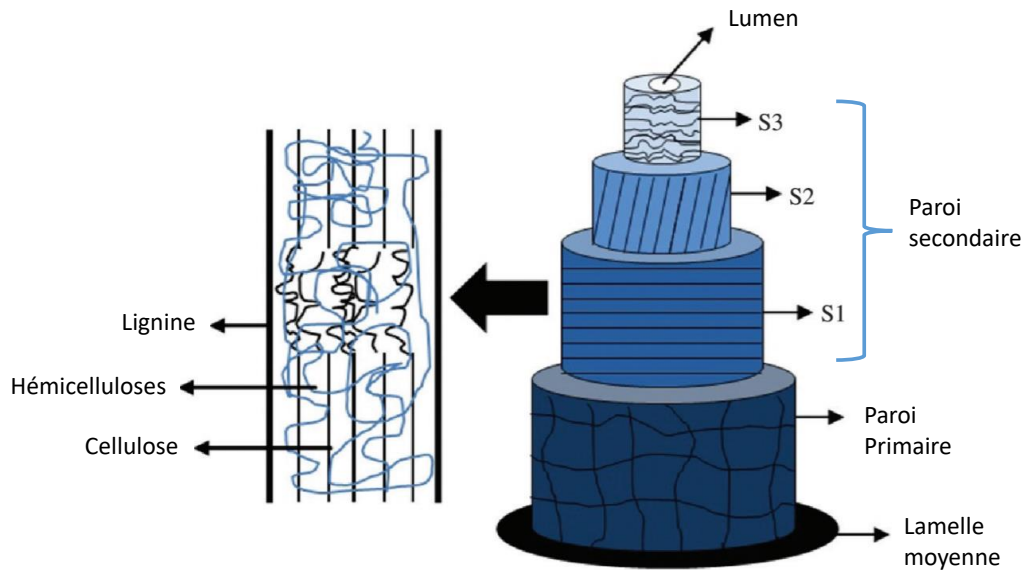
De nombreux travaux ont été réalisés sur la structure interne des fibres végétales, constituant ainsi de bonnes connaissances sur l'organisation interne des fibres lignocellulosiques telles que celles de lin [Martin 2014], de chanvre [Abot 2010], de kénaf [Ramesh 2016], de coton [Olesen & Plackett 1999, Pereira *et al.* 2015], de coco [Tran *et al.* 2015] et de bois [Persson 2000]. Ces travaux s'accordent sur le fait que toutes ces fibres présentent une structure interne similaire comme l'illustre la représentation schématique d'une fibre lignocellulosique présentée Figure II.3.

Les fibres sont ainsi composées d'une paroi cellulaire et d'un canal central appelé lumen qui a pour fonction d'alimenter la plante en eau et en nutriments pendant sa phase de croissance. La forme de sa section, circulaire, ellipsoïdale, voire quasiment rectangulaire pour les fibres de bois [Persson 2000], ainsi que ses dimensions, varient au sein d'une même variété de fibres mais également d'une variété à l'autre. Les travaux menés dans [Placet *et al.* 2012] conduisent à une estimation du diamètre pour le lumen comprise dans la plage  $[0, 5 - 10 \mu m]$ .

Pour sa part, la paroi cellulaire se décompose en plusieurs couches concentriques comme le montre la Figure II.3. Ainsi, la couche externe (ou lamelle moyenne) est constituée principalement de pectines, ou substances pectiques, qui sont des polysaccharides. Elles contribuent à la

---

3. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cocotier>



**Figure II.3** – Représentation schématique d'une fibre cellulosique [Pereira *et al.* 2015]

rigidité des parois des fibres et à la cohésion des cellules végétales en jouant le rôle de ciment intercellulaire [Dallel 2012].

La paroi primaire est pour sa part composée d'un arrangement désordonné de microfibrilles de cellulose placées dans une matrice de pectines, d'hémicellulose et de lignine.

La cellulose, qui appartient à la famille des polysaccharides, est un polymère naturel qui est le constituant principal des parois des fibres végétales. Il s'agit d'une macromolécule constituée de monomères de D-Glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ) liés entre eux.

Les hémicelluloses sont les seconds polysaccharides les plus présents dans les parois des fibres végétales, mais contrairement à la cellulose, elles sont présentes sous plusieurs formes différentes. Elles jouent un rôle de cohésion entre les différents composants des parois des fibres [Dallel 2012] et présentent une capacité de sorption de l'eau relativement importante [Martin 2014].

Enfin, la lignine possède une structure moléculaire tridimensionnelle complexe qui peut varier d'une espèce végétale à une autre. De plus, contrairement à la cellulose, elle ne comporte pas de motifs répétitifs. Outre une contribution à la rigidité des parois des fibres, elle présente des propriétés d'imperméabilité à l'eau et de grande résistance à la décomposition [Olesen & Plackett 1999] [Dallel 2012].

La cellulose, l'hémicellulose et la lignine présentent des masses volumiques différentes comme cela est montré dans [Roudier 2012]. Leurs valeurs sont indiquées dans le Tableau II.1.

Tous ces constituants vont également être présents dans la paroi secondaire des fibres cellulosiques qui se décompose elle-même en trois couches nommées S1, S2 et S3 comme l'illustre

<b>Eléments Chimiques</b>	<b>Masse volumique (<math>kg.m^{-3}</math>)</b>
Cellulose	1550
Hémicellulose	1490
Lignine	1400

**Tableau II.1** – Masse volumique des polymères constitutifs des fibres végétales [Roudier 2012]

la Figure II.3. C'est cette partie, dont l'épaisseur est la plus importante (90% du diamètre de la fibre selon [Placet *et al.* 2012]), qui va conférer ses propriétés mécaniques aux fibres, notamment la couche S2. En effet, contrairement à la paroi primaire, les couches S1 et S2 sont beaucoup plus structurées, avec des microfibrilles de cellulose cristalline enroulées en spirale [Pereira *et al.* 2015, Martin 2014].

Les différentes variétés de fibres vont ainsi présenter pour chaque paroi des compositions chimiques, des épaisseurs et des orientations de microfibrilles différentes.

### 1.2.2 Une composition chimique spécifique à chaque famille

Comme cela vient d'être présenté dans la section précédente, les fibres végétales sont toutes constituées de cellulose, d'hémicelluloses, de pectines, de lignine, mais également d'eau et d'autres éléments minoritaires [Olesen & Plackett 1999].

Une synthèse des données disponibles dans la littérature sur les teneurs massiques pour chaque polymère en fonction du type de fibres, est présentée dans le Tableau II.2.

En prenant en compte les valeurs de masse volumique du Tableau II.1, l'analyse du Tableau II.2 permet de faire un certain nombre d'observations sur la composition des fibres végétales.

Ainsi, les fibres de lin, chanvre et kénafe présentent des plages de teneurs massiques du même ordre de grandeur pour la cellulose, les hémicelluloses et les lignines. Il est donc fort probable que ces trois types de fibres présentent des propriétés relativement similaires.

Pour illustrer les différences entre les fibres et les granulats, qui sont plus étudiés dans la littérature, la composition de la chènevotte, issue de travaux de thèse récents, a été ajoutée au Tableau II.2. Ainsi, les fibres de chanvre se distinguent de la chènevotte par une teneur massique plus importante en cellulose et moins élevée en lignine. Les travaux menés dans [Hill *et al.* 2009] décrivent des comportements différents pour la lignine et la cellulose vis-à-vis de l'eau. De plus, [Eitelberger & Hofstetter 2011] donne des valeurs de conductivités thermiques 50% plus importantes pour la lignine par rapport à celles de la cellulose. Ainsi, il est très probable que les fibres présentent des conductivités thermiques spécifiques légèrement différentes de celles de

## II.1 Des caractéristiques et des spécificités propres aux fibres et aux laines végétales

Matériaux	Teneur en cellulose (%)	Teneur en hémicelluloses (%)	Teneur en lignine (%)	Teneur en pectines (%)	Références
Fibre de lin	62 – 72	16 – 20,6	2 – 4	1,8 – 2,3	[Martin 2014] [Ramesh 2016] [Pereira <i>et al.</i> 2015]
Fibre de chanvre	68 – 85	10 – 22,4	3 – 10	5 – 10	[Olesen & Plackett 1999] [Ramesh 2016] [Pereira <i>et al.</i> 2015]
Fibre de kénaf	72	20,3 – 21,5	9	/	[Faruk <i>et al.</i> 2012] [Ramesh 2016] [Pereira <i>et al.</i> 2015]
Fibre de coco	32 – 53	14,7 – 20	38 – 45	/	[Faruk <i>et al.</i> 2012] [Ramesh 2016] [Pereira <i>et al.</i> 2015]
Bois feuillus	38 – 45	18 – 39	22 – 28	4	[Vignon <i>et al.</i> 1995]
Bois conifères	39 – 45	30 – 33	26 – 34	/	[Olesen & Plackett 1999]
Fibre de bois haute densité	30 – 60	20 – 30	21 – 37	/	[Pereira <i>et al.</i> 2015]
Fibre de bois faible densité	31 – 64	25 – 40	14 – 34	/	
Fibre de coton	82,7 – 90	5,7	0,7 – 1,6	/	[Ramesh 2016] [Reddy & Yang 2009]
Chènevotte	53 – 54,9	11,5 – 12,1	15 – 16,8	/	[Delannoy 2018]

**Tableau II.2** – Compositions chimiques de fibres et de granulats végétaux (teneurs massiques des polymères)

la chènevotte contrairement à ce qui peut être trouvé dans certains travaux de la littérature qui ont tendance à faire l’amalgame entre les deux.

Pour sa part, la fibre de coco se caractérise par une teneur massique en cellulose beaucoup plus faible que celles des fibres de lin, chanvre et kénaf compensée par une teneur en lignine beaucoup plus importante. On peut donc s’attendre à ce que la fibre de coco présente un caractère ligneux plus marqué, ainsi qu’une masse volumique certainement plus faible.

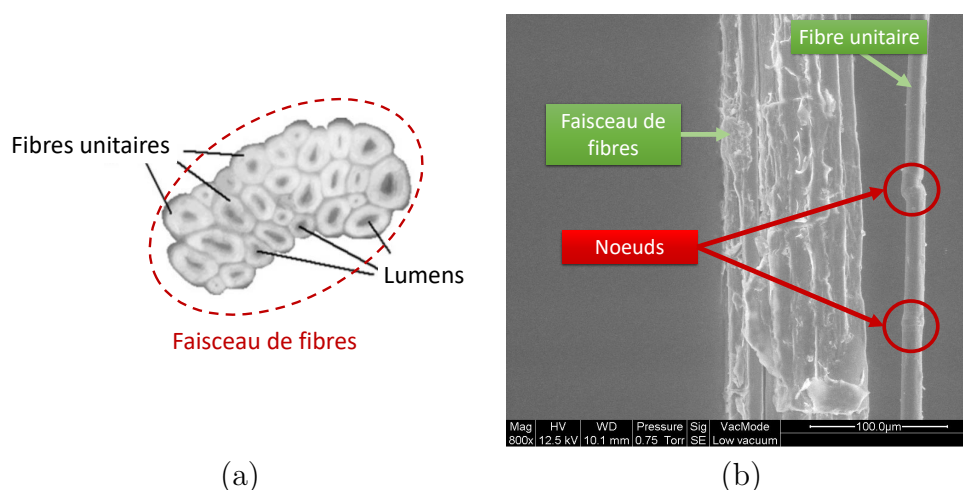
Contrairement à la fibre de coco, la fibre de coton se caractérise par une composition majoritaire en cellulose (plus de 80%) et on peut raisonnablement penser qu’elle possède une masse volumique supérieure aux autres fibres étudiées.

Enfin, plusieurs valeurs sont présentées pour le bois et les fibres de bois en fonction de différentes catégories comme la densité, ou la famille dont ils sont issues. Quel que soit le type, le bois se démarque des fibres issues de plantes à croissance rapide par une teneur massique en cellulose plus faible et une teneur en hémicelluloses plus importante.

Outre des différences de composition chimique, les différentes variétés de fibres lignocellulosiques vont également présenter des variabilités en termes de dimensions.

### 1.2.3 Des morphologies et des dimensions variées

Les fibres végétales peuvent être caractérisées suivant leur diamètre et leur longueur. Même si la représentation schématique de la Figure II.3 présente une fibre circulaire, les fibres unitaires ne le sont en général pas parfaitement, comme le montre la Figure II.4(a) représentant une vue en coupe de fibres de lin. En effet, des travaux réalisés sur des fibres de lin ont permis de déterminer un facteur de forme de circularité de 0,907 légèrement éloigné d'une circularité parfaite pour laquelle la valeur serait de 1 [Charlet *et al.* 2010b].



**Figure II.4** – (a) Vue en coupe transversale d'un faisceau de fibres de lin [Charlet *et al.* 2010a], (b) Image MEB de fibres de lin [Piégay *et al.* 2018]

D'autre part, on peut voir sur les Figure II.4(a) et (b) que les fibres ne sont pas toujours sous forme unitaire, mais qu'elles peuvent se retrouver agglomérées les unes aux autres sous forme de faisceaux de fibres recouverts d'hémicelluloses jouant le rôle de colle. Leur présence peut s'expliquer par l'étape de défibrage (chanvre) ou teillage (lin) (Section 2.2 du Chapitre I) qui reste toujours incomplète et qui ne permet pas d'obtenir uniquement des fibres unitaires.

Même si la littérature est un peu moins riche que pour la composition chimique des fibres végétales, il est possible de trouver des valeurs de diamètres et de longueurs pour les fibres unitaires et les faisceaux de fibres. Cependant, les données ne sont pas présentées de manière uniforme. Ainsi, on peut trouver soit des valeurs moyennes obtenues avec quelques dizaines de fibres soit des plages de valeurs. Les méthodes d'obtention sont rarement précisées même s'il

## II.1 Des caractéristiques et des spécificités propres aux fibres et aux laines végétales

s'agit fréquemment de relevés réalisés à partir d'images obtenues avec un Microscope Electronique à Balayage (MEB). Le nombre de fibres caractérisées n'est que très rarement indiqué, ne permettant pas d'évaluer la représentativité des relevés réalisés.

Une synthèse des plages de données récoltées dans la littérature pour les diamètres et les longueurs de fibres unitaires et de faisceaux de fibres est présentée dans le Tableau II.3.

Fibres	Longueurs ( <i>mm</i> )	Diamètres unitaires ( $\mu m$ )	Diamètres faisceaux ( $\mu m$ )	Références
Lin	8 – 80	5 – 38	10 – 600	[Abot 2010] [Charlet <i>et al.</i> 2010a] [Martin 2014] [Olesen & Plackett 1999] [Ramesh 2016]
Chanvre	5 – 55	10 – 51	20 – 500	[Abot 2010] [Charlet <i>et al.</i> 2010a] [Olesen & Plackett 1999] [Placet <i>et al.</i> 2012] [Ramesh 2016]
Kénaif	/	/	/	/
Coton	10 – 60	10 – 45	/	[Charlet <i>et al.</i> 2010a] [Olesen & Plackett 1999] [Ramesh 2016]
Coco	20 – 150	/	10 – 430	[Ramesh 2016]
Bois feuillus	0,3 – 2,5	10 – 45	/	[Olesen & Plackett 1999]
Bois conifères	1 – 9	15 – 60	/	[Olesen & Plackett 1999]

**Tableau II.3** – Plages de dimensions des fibres végétales

Les données disponibles sont plus nombreuses pour le lin et le chanvre comme l'indiquent les références bibliographiques mentionnées dans le Tableau II.3.

Même si les plages de diamètres de fibres unitaires sont relativement larges pour ces deux types de fibres, avec une amplitude de  $33\mu m$  pour le lin et de  $41\mu m$  pour le chanvre, les valeurs minimum et maximum tendent à confirmer des valeurs de diamètres plus faibles pour le lin que pour le chanvre.

D'autre part, il est à noter qu'aucune donnée n'a pu être obtenue concernant les dimensions des fibres de kénaif même dans les travaux menés par [Ramesh 2016] relatifs à une étude spécifique de cette fibre.

En outre, des travaux ont également montré que le diamètre des fibres végétales n'est pas toujours constant sur l'ensemble de leur longueur. Ainsi, un relevé de diamètres réalisé sur 20 fibres de lin a montré que l'écart relatif moyen pour une fibre est de l'ordre de 20%



[Charlet *et al.* 2010a].

Enfin, concernant la morphologie des fibres, la Figure 2.4(b) permet également de noter la présence de noeuds le long des fibres unitaires dont l'origine n'est pas encore établie. Ces noeuds sont néanmoins considérés comme des défauts qui peuvent avoir une influence sur certaines propriétés mécaniques des fibres [Martin 2014].

### 1.2.4 Des propriétés mécaniques de haut niveau

Dans la littérature, il existe de nombreux travaux de caractérisation des propriétés mécaniques des fibres végétales. Cependant, la majeure partie de ces travaux se focalisent sur leurs propriétés en traction.

En effet, les fibres végétales présentent globalement une excellente résistance à la traction [Glé 2013, Olesen & Plackett 1999].

Comme pour la composition chimique et les dimensions des fibres végétales, des plages de valeurs de résistance en traction et de module d'Young issues de plusieurs références bibliographiques sont présentées dans le Tableau II.4.

Fibres	Résistance en traction (MPa)	Module d'Young(GPa)	Références
Lin	400 – 2000	25 – 110	[Bos <i>et al.</i> 2002] [Charlet <i>et al.</i> 2010a] [Faruk <i>et al.</i> 2012] [Martin 2014] [Ramesh 2016]
Chanvre	270 – 1100	23,5 – 90	[Bos <i>et al.</i> 2002] [Charlet <i>et al.</i> 2010a] [Faruk <i>et al.</i> 2012] [Placet <i>et al.</i> 2012] [Ramesh 2016]
Kénaif	223-930	14,5-53	[Bos <i>et al.</i> 2002] [Faruk <i>et al.</i> 2012] [Ramesh 2016]
Coton	287 – 800	5,5 – 13	[Charlet <i>et al.</i> 2010a] [Ramesh 2016]
Coco	95 – 230	2,8 – 6	[Faruk <i>et al.</i> 2012] [Ramesh 2016]

**Tableau II.4** – Plages de valeurs de résistance en traction et module d'Young de fibres végétales

Une rapide analyse des données présentées dans le Tableau II.4 semble indiquer que ce sont les fibres de lin qui présentent les propriétés en traction les plus élevées. Viennent ensuite

les fibres de chanvre, de kénaï et de coton aux propriétés du même ordre de grandeur puis nettement en-dessous les fibres de coco.

De plus, il semble qu'un lien puisse être établi entre le diamètre des fibres et leurs propriétés en traction. En effet, les fibres de lin présentent les diamètres les plus faibles (Tableau II.3). Cette corrélation est confirmée par la littérature pour le lin et le chanvre [Martin 2014, Placet *et al.* 2012].

La teneur en eau des fibres a également été identifiée comme un facteur influençant. En effet, les propriétés en traction semblent optimales à température ambiante et à une humidité relative de 50% alors qu'un échauffement du matériau au-dessus de  $100^{\circ}C$  entraîne une perte irréversible de ces propriétés, notamment pour les fibres de lin [Martin 2014].

Pour ce qui est des noeuds, identifiés à la Figure II.4(b), leur influence sur la valeur de résistance à la traction n'a pas été établie. En revanche, ils correspondent aux zones les plus susceptibles de rompre lors des essais de traction [Martin 2014].

En revanche, leur influence semble plus significative sur la résistance en compression des fibres avec un impact sur la valeur de résistance à la compression, notamment pour le lin [Bos *et al.* 2002]. La littérature est beaucoup moins riche en ce qui concerne la caractérisation de la compression des fibres végétales. Cependant, [Bos *et al.* 2002] présente une valeur de résistance à la compression longitudinale pour des fibres de lin de l'ordre de  $1200MPa$ . Il semble donc que les fibres végétales, ou tout du moins les fibres de lin, présentent également une très bonne résistance à la compression.

Certaines spécificités des fibres végétales semblent avoir été traitées et caractérisées de manière plus large dans la littérature, comme l'organisation et la composition de la microstructure, ainsi que les propriétés de résistance à la traction. Un lien peut être fait entre ces spécificités et l'élaboration de fibres composites renforcées à partir de fibres végétales.

En revanche, même si des données sont présentes dans la littérature concernant la caractérisation de leurs dimensions et plus particulièrement leurs diamètres, elles restent peu nombreuses et manquent de précision pour une majorité d'entre elles. Il en est de même pour les propriétés mécaniques autres que la traction et notamment celles liées à la compression.

Ces éléments sont donc à prendre en compte dans la Section 2 du Chapitre III relative à la caractérisation des fibres constituant le squelette des matériaux. De plus, cette analyse est à compléter notamment dans la Section 1.3 suivante pour ce qui est de la variabilité et des distributions de diamètres de fibres, en se plaçant cette fois-ci à l'échelle des matériaux pouvant contenir plusieurs types de fibres différentes.

### 1.3 L'influence de la nature et de l'organisation des fibres

Les matériaux isolants utilisés dans le cadre de ces travaux de thèse sont des panneaux de laines végétales semi-rigides monocouches dont le processus de fabrication par thermoliage a été présenté à la Section 2.2.2 du Chapitre I. Ainsi, des fibres polymères sont associées aux fibres végétales pour former la phase solide des matériaux, également appelée squelette. Elle est composée d'un à trois types de fibres végétales et de fibres polymères. La répartition massique des différents types de fibres est indiquée à la Section 1 du Chapitre 3. Outre cette phase solide, les matériaux sont également constitués d'une phase fluide composée d'air et en fonction des conditions de température et d'humidité relative dans lesquelles se trouvent les matériaux d'une phase liquide composée d'eau.

Cette section se focalise sur la matrice solide des matériaux à travers, tout d'abord, la disponibilité dans la littérature de travaux et de données relatifs à des distributions de diamètres de fibres, ainsi que leur orientation dans les laines végétales.

La partie suivante s'attache à définir la notion de porosité, en prenant en compte les différentes échelles à laquelle on peut la caractériser, puis à établir le lien avec la masse volumique de la matrice solide.

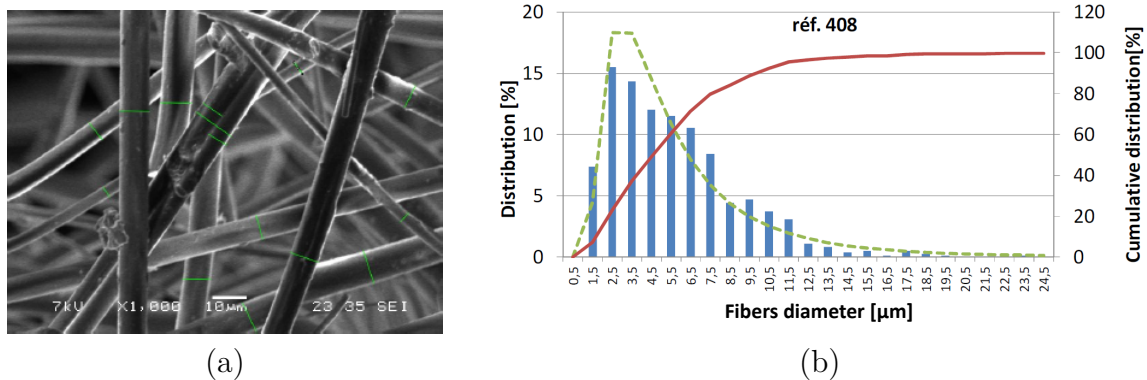
Une quatrième partie s'attarde sur l'état des connaissances concernant les propriétés thermiques de cette matrice solide pour les isolants fibreux biosourcés telles que les laines végétales.

Enfin, les ressources de la littérature sur la capacité de sorption des fibres et des laines végétales sont présentées avant d'apporter des éléments de conclusion à cette section.

#### 1.3.1 Une distribution hétérogène des diamètres de fibres

La méthode de relevés de diamètres de fibres dans un matériau fibreux non-tissé à partir d'images de la microstructure est la plus répandue dans la littérature. En effet, même si d'autres méthodes de relevés existent comme le montre la synthèse réalisée par [Singha *et al.* 2012], la méthode par analyse d'images semble être la plus facile et la plus simple à mettre en œuvre pour obtenir une distribution de diamètres de fibres [Charlet *et al.* 2010a, Kerdudou *et al.* 2015, Luu *et al.* 2017b, Martin 2014, Piégay *et al.* 2018, Singha *et al.* 2012]. Les images de la microstructure sont en général obtenues avec un Microscope Electronique à Balayage (MEB), avant d'être exploitées à l'aide de logiciels libres tels que ImageJ ou Mesurim. Ainsi, les relevés sont réalisés de manière manuelle en traçant un segment transversal à l'axe longitudinal de la fibre, comme l'illustre la Figure II.5(a). Des procédures de relevé sont explicitées dans [Kerdudou *et al.* 2015, Singha *et al.* 2012].

D'autre part, les travaux menés dans [Singha *et al.* 2012] considèrent que pour être re-



**Figure II.5** – (a) Relevé de diamètres de fibres à partir d’une image MEB [Kerdudou *et al.* 2015], (b) Histogramme de diamètres de fibres de verre (bleu), distribution cumulée associée (rouge) et distribution log-normale correspondante (vert) [Kerdudou *et al.* 2015]

productible le relevé doit comprendre au moins 250 mesures à partir d’au moins 20 images distinctes. Ces préconisations sont à prendre en compte mais ne peuvent pas être généralisées à tous les matériaux. Les résultats des relevés de diamètres de fibres sont ensuite généralement présentés sous forme d’histogrammes, comme présenté à la Figure II.5(b).

Il est alors possible de modéliser la répartition des diamètres de fibres par une loi de distribution, comme le montre la Figure II.5(b), pour laquelle une distribution log-normale est généralement utilisée. Ainsi, dans plusieurs références bibliographiques les distributions de fibres sont modélisées par des lois log-normales, comme dans [Kerdudou *et al.* 2015] pour des fibres d’une laine de verre. Ce type de modélisation a également été utilisée dans [Singha *et al.* 2012] et pour des distributions de tailles de chènevottes (granulats de chanvre) dans [Glé 2013]. Dans [Luu *et al.* 2017a] une loi gamma est utilisée pour modéliser une distribution de diamètres de fibres. Cette loi est définie, en plus des paramètres conventionnels d’espérance et de variance, par un paramètre lié à un facteur de forme qui permet de moduler la forme de la distribution entre celle d’une loi normale et celle d’une loi log-normale.

En ce qui concerne les distributions de diamètres de fibres d’isolants fibreux biosourcés, les données sont très peu présentes dans la littérature. On trouve dans [Luu 2016], des données relatives à des relevés de rayons de fibres pour une laine d’asclépiade contenant des fibres bicomposites. Les relevés ont été réalisés sur les deux types de fibres, 744 pour les fibres d’asclépiade et 184 pour les fibres polymères à partir de 28 images MEB. Ainsi, le rayon moyen obtenu pour les fibres végétales est de  $24,4 \pm 6,6 \mu\text{m}$  et pour les fibres polymères de  $14,7 \pm 1,7 \mu\text{m}$ . Des valeurs du même ordre de grandeur ont été obtenues dans [Piégay *et al.* 2018], à partir de relevés réalisés sur des laines de lin et de chanvre. Pour les fibres polymères, les valeurs des

rayons moyens sont de  $12,2 \mu m$  et  $13,7 \mu m$  et pour les fibres végétales, le rayon moyen pour le lin est de  $14,6 \mu m$  et pour le chanvre de  $27,9 \mu m$ . Ces données semblent confirmer le fait que le rayon moyen des fibres végétales est plus élevé que celui des fibres polymères et que leur distribution est plus hétérogène. **Ces résultats sont néanmoins à confirmer compte tenu du peu de données présentes dans la littérature.**

Enfin, dans [Luu *et al.* 2017b] et dans [Glé 2013] il est indiqué que le rayon des fibres va avoir une influence sur plusieurs paramètres liés directement aux propriétés des matériaux, comme notamment la porosité et la résistance statique à l'écoulement de l'air (souvent simplifié par le terme résistivité), qui sont définies respectivement aux Sections 1.3.3 et 2.1.5 de ce chapitre. On peut également s'attendre à un effet de l'agencement et de l'organisation des fibres dans les matériaux sur ces caractéristiques.

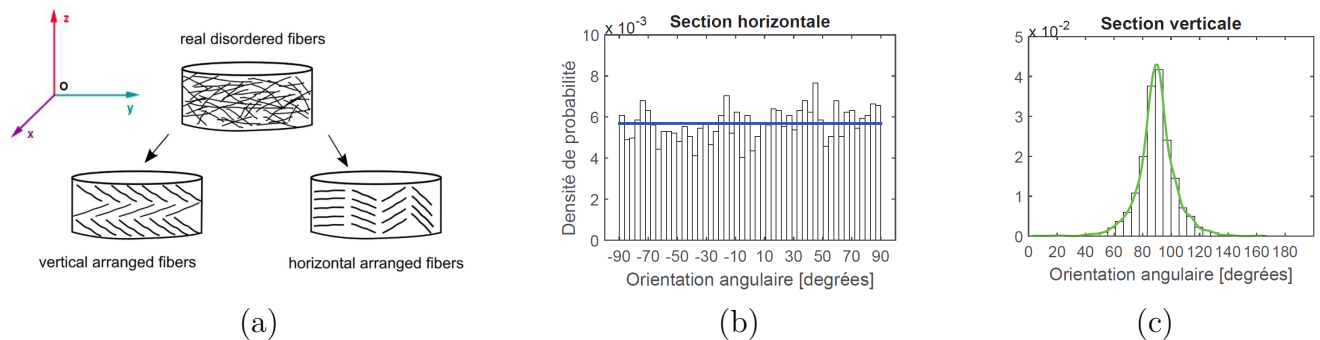
### 1.3.2 Une organisation anisotrope des fibres

Comme cela a été indiqué dans le Chapitre I, le process de fabrication par thermoliage des laines végétales va générer une orientation spécifique des fibres. Dans [Lei *et al.* 2018], plusieurs types d'organisation de fibres sont présentés, comme le montre la Figure II.6(a). Afin d'identifier l'organisation interne des matériaux la plus proche de ces différents types, il est possible de faire un relevé d'angle de fibres à partir d'images réalisées au MEB, comme pour le relevé de rayons de fibres. Ainsi, dans [Luu 2016], 3322 angles ont été relevés manuellement par analyse d'images MEB réalisées sur une laine d'asclépiade. Le relevé a été réalisé suivant deux plans spécifiques. Le premier correspond à une section horizontale située dans un plan (xy) d'une couche de matériau et le second à une section verticale située dans un plan de coupe (yz) du matériau comme indiqué sur la Figure II.6(a).

Les résultats de ces relevés sont présentés aux Figures II.6(b) et (c). La distribution des angles dans la section horizontale ne met pas en évidence d'orientation spécifique pour les fibres qui semblent donc être organisées de manière désordonnée. En revanche, la distribution des angles dans la section verticale peut être modélisée par une loi normale centrée sur une valeur proche de  $90^\circ$ . La valeur exacte précisée dans [Luu 2016] est de  $89,73^\circ$  avec un écart-type de  $13,63^\circ$ .

Ainsi, l'organisation interne du matériau se rapproche fortement du type d'organisation horizontale des fibres, présenté à la Figure II.6(a), en couches successives. Par ailleurs, l'écart-type va avoir tendance à se réduire lorsque le matériau est comprimé, renforçant encore un peu plus cette organisation horizontale [Lei *et al.* 2018]. **Compte tenu du manque de données dans la littérature, le caractère anisotrope des laines végétales suivant une section**

## II.1 Des caractéristiques et des spécificités propres aux fibres et aux laines végétales



**Figure II.6** – (a) Différents types d'organisation des fibres dans les matériaux fibreux [Lei *et al.* 2018], (b) Histogramme de distribution d'orientation de fibres d'une laine d'asclépiade dans une section horizontale (plan (xy)) (c) Histogramme de distribution d'orientation de fibres d'une laine d'asclépiade dans une section verticale (plan (yz)) [Luu 2016]

horizontale, est à confirmer pour les laines végétales.

En effet, comme le montrent les travaux réalisés dans [Lei *et al.* 2018] et [Luu *et al.* 2017b], l'organisation des fibres à l'intérieur des matériaux va avoir une influence sur des paramètres comme la résistance au passage à l'air, la tortuosité et les longueurs caractéristiques visqueuses et thermiques définies à la Section 3.2.1 de ce chapitre, et par conséquent sur les propriétés acoustiques des matériaux. L'influence sur les propriétés thermiques est abordée à la Section 2.2.

Mais qu'il s'agisse des propriétés acoustiques ou thermiques des laines végétales, elles sont liées à la masse volumique apparente des matériaux.

### 1.3.3 Les liens entre la masse volumique de la phase solide et la porosité des matériaux

#### Masse volumique de la phase solide

La masse volumique de la phase solide, notée  $\rho_s$ , correspond à la masse volumique de la phase solide d'un matériau poreux. Cette phase solide peut alors être continue ou discontinue. Dans le cas des matériaux fibreux et plus particulièrement des laines végétales fabriquées par thermoliage, elle est considérée comme discontinue et composée de fibres végétales et de fibres polymères. Les masses volumiques de ces deux types de fibres sont donc notées respectivement  $\rho_{veg}$  et  $\rho_{pol}$ .

Pour les fibres polymères, la valeur de la masse volumique donnée dans [Oldham *et al.* 2011] est  $\rho_{pol} = 1350 \text{ kg.m}^{-3}$ .

En ce qui concerne les fibres végétales, les plages de données disponibles dans la littérature

sont synthétisées dans le Tableau II.5.

Fibres	Masse volumique $\rho_{veg}$ ( $kg.m^{-3}$ )	Porosité $\phi$ (%)	Références
Lin	1360 – 1500	3 – 7	[Martin 2014] [Charlet <i>et al.</i> 2010a] [Pereira <i>et al.</i> 2015] [Ramesh 2016]
Chanvre	1400 – 1500	1 – 5	[Pereira <i>et al.</i> 2015] [Ramesh 2016] [Placet <i>et al.</i> 2012]
Kénaif	1400 – 1500	/	[Pereira <i>et al.</i> 2015] [Ramesh 2016]
Coton	1500 – 1600	/	[Pereira <i>et al.</i> 2015] [Ramesh 2016]
Coco	1150 – 1460	27-37	[Pereira <i>et al.</i> 2015] [Ramesh 2016] [Tran <i>et al.</i> 2015]
Bois	1520	/	[Wassilieff 1996]

**Tableau II.5** – Plages de valeurs de masse volumique de phase solide et de porosité des fibres végétales

Les valeurs de masse volumique des fibres végétales sont quasiment toutes du même ordre de grandeur sauf celle du coton, qui semble un peu plus élevée, et celle de la coco, qui est plus faible, comme attendu et annoncé à la Section 1.2.2 de ce chapitre. Ces valeurs sont également plus élevées que celle des fibres polymères.

Le Tableau II.6 présente des valeurs de masse volumique de la phase solide issues de la littérature pour quelques types de laines également caractérisés dans le cadre des travaux de thèse (Section 2.2 du Chapitre III). Le pourcentage massique de fibres polymères se trouvant dans la matrice solide est indiqué. De même que la masse volumique apparente du matériau, notée  $\rho_a$ , qui correspond au rapport entre la masse du matériau,  $m$ , et le volume total du matériau,  $V_{tot}$ . En première approximation, la masse du matériau peut être assimilée à la masse de sa phase solide,  $m = m_s$ . En effet, la phase fluide est considérée comme saturée d'air et sa masse est négligeable comparée à celle de la phase solide.

Hormis pour la laine de chanvre, les valeurs de masse volumique de la phase solide indiquées semblent en-dessous de celles auxquelles on pouvait s'attendre. En effet, avec des valeurs comprises entre 1250 et 1300  $kg.m^{-3}$ , elles sont inférieures aux masses volumiques des éléments constitutifs des fibres végétales présentées au Tableau II.1 de la Section 1.2.1 de ce chapitre, et même à celle des fibres polymères. **Compte tenu de la très faible quantité de données présentes dans la littérature, ce point est à investiguer dans le cadre de cette thèse,**

## II.1 Des caractéristiques et des spécificités propres aux fibres et aux laines végétales

Matériaux	Pourcentage massique fibres polymères (%)	Masse volumique ph. solide $\rho_s$ ( $kg.m^{-3}$ )	Masse volumique matériau $\rho_a$ ( $kg.m^{-3}$ )	Porosité $\phi$ (%)	Références
Laine lin	12	1290	33	96,4	[Glé 2013]
Laine chanvre	/	1498	40	97,5	[Collet 2004]
Laine brute	/	1300	20	98,5	[Oldham <i>et al.</i> 2011]

**Tableau II.6** – Données de la littérature relatives à la masse volumique apparente des matériaux, à la masse volumique de leur phase solide et à leur porosité

en s'appuyant sur des données issues de caractérisations expérimentales.

### Porosité

La connaissance de la masse volumique de la phase solide d'un matériau et de sa masse volumique apparente permet de déterminer la porosité d'un matériau fibreux. La porosité, notée  $\phi$ , représente le volume de la phase fluide, donc l'air, contenu dans le volume total du matériau, comme le montre l'Equation II.1.

$$\phi = \frac{V_f}{V_{tot}} = \frac{V_{tot} - V_s}{V_{tot}} = 1 - \frac{V_s}{V_{tot}} \quad (II.1)$$

Or, comme la masse du matériau est considérée comme équivalente à la masse de la phase solide, l'Equation II.1 peut s'écrire :

$$\phi = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (II.2)$$

La porosité se présente, en outre, sous plusieurs formes en fonction de la nature et de l'organisation de la phase solide. Ainsi, on parle de porosité occluse lorsque les pores du matériau ne communiquent pas avec l'extérieur et de porosité ouverte lorsqu'ils sont ouverts sur l'extérieur. Un matériau peut posséder ces deux types de porosité. Dans ce cas, sa porosité totale correspond à la combinaison de ces deux porosités. C'est le cas des laines végétales. En effet, la porosité dite inter-fibre, correspondant au réseau de pores résultant de l'agencement des fibres entre elles, est ouverte [Glé 2013]. En revanche, la porosité dite intra-fibre, correspondant à la porosité à l'intérieur des fibres est considérée comme fermée [Charlet *et al.* 2010b, Placet *et al.* 2012].

Des valeurs de cette porosité intra-fibre sont disponibles dans la littérature et présentées dans le Tableau II.5. Les valeurs sont relativement faibles, inférieures à 10%, sauf pour la coco dont la valeur est de l'ordre de 30%.



Pour la porosité inter-fibre, elle est en générale relativement élevée ( $> 90\%$ ), comme l'illustre les valeurs du Tableau II.6. Les masses volumiques apparentes des panneaux semi-rigides de laines végétales sont en général comprises entre 20 et  $100 \text{ kg.m}^{-3}$  [Glé 2013]. Ainsi, les panneaux les plus légers peuvent atteindre des porosités supérieures à  $98\%$ , alors que les plus lourds vont avoir des porosités légèrement supérieures à  $90\%$ .

**Même si ces valeurs sont à confirmer dans le cadre de ces travaux de thèse, il semble que la porosité intra-fibre puisse être négligée en comparaison de la porosité inter-fibre, comme cela est mis en évidence dans [Glé 2013]. En première approximation, seule la porosité ouverte est considérée, notamment dans la modélisation des phénomènes physiques liés aux propriétés acoustiques et thermiques des matériaux.**

Ces propriétés thermiques des matériaux sont par ailleurs liées aux caractéristiques thermiques de leur squelette.

### 1.3.4 Une conductivité thermique de squelette bien mal connue

Les propriétés thermiques des matériaux gouvernent les échanges thermiques qui se produisent dès lors que l'équilibre thermodynamique n'est plus assuré, c'est-à-dire lorsqu'il y a un écart de température au sein du matériau ou entre le matériau et son environnement. Il existe trois types d'échanges thermiques : la conduction, la convection et le rayonnement. Dans le cadre de la thèse, ce sont les propriétés liées à l'isolation thermique des matériaux qui sont à prendre en compte. C'est donc la conductivité thermique, permettant de quantifier la capacité des matériaux à conduire la chaleur, qui est retenue. Néanmoins, comme cela est explicité plus tard dans le mémoire à la Section 2.2.1 de ce chapitre, chaque mode de transfert thermique peut être décrit sous forme d'une conductivité thermique. La conductivité thermique équivalente d'un matériau, notée  $\lambda_{eq}$ , représente la conductivité globale déterminée à partir de la somme des conductivités thermiques issues de chaque mode de transfert de chaleur. Généralement la contribution principale provient de la conductivité thermique par conduction [Bankvall 1973, Langlais & Klarsfeld 1997, Borjes *et al.* 2008]. Elle dépend des conductivités thermiques de la phase fluide, notée  $\lambda_f$  et de la phase solide, notée  $\lambda_s$ . Aussi, on peut s'attendre à ce que la valeur de  $\lambda_s$  varie en fonction du type de fibres constituant la phase solide.

Néanmoins, très peu de valeurs sont disponibles dans la littérature. Ainsi, seules des valeurs pour des fibres de chanvre, de coton et de bois ont pu être identifiées. De plus, la majorité des valeurs présentées n'ont pas été obtenues par des caractérisations expérimentales mais par l'utilisation de modèles et donc de manière indirecte. C'est le cas notamment pour le chanvre

## II.1 Des caractéristiques et des spécificités propres aux fibres et aux laines végétales

---

dont la valeur a été calculée à partir de particules de chanvre [Nguyen *et al.* 2016].

Dans ces travaux, les hypothèses d'orthotropie des fibres et de géométrie cylindrique sont faites à l'échelle locale [Lux 2005]. Deux valeurs spécifiques de conductivité thermique sont donc déterminées. La première correspondant à une conductivité thermique longitudinale, parallèle à l'axe longitudinal des fibres, notée  $\lambda_s^{\parallel}$  et la seconde correspondant à une conductivité thermique transversale, perpendiculaire à l'axe longitudinal des fibres, notée  $\lambda_s^{\perp}$ . Les différentes valeurs pour les fibres végétales sont présentées dans le Tableau II.7. Il faut par ailleurs être prudent avec les valeurs identifiées dans la littérature qui peuvent être utilisées pour des types de fibres différents. En effet, les travaux menés par exemple dans [El Sawalhi *et al.* 2016] s'appuient sur des valeurs pour les fibres de chanvre qui proviennent de travaux initialement réalisés sur le bois [Siau 1984].

Fibres	$\lambda_{veg}^{\parallel}$ $W.m^{-1}.K^{-1}$	$\lambda_{veg}^{\perp}$ $W.m^{-1}.K^{-1}$	Références
Chanvre	/	0,58	[Nguyen <i>et al.</i> 2016]
Coton	1,88	0,36	[Kawabata & Rengasamy 2002]
Bois	0,73	0,52	[Thunman & Leckner 2002]
Bois	0,88	0,44	[Siau 1984]
Bois	/	0,6	[Saastaminen & Richard 1996]

**Tableau II.7** – Valeurs de conductivité thermique de fibres végétales

De manière générale, la conductivité thermique transversale présente une valeur plus faible que la conductivité thermique longitudinale, ce qui peut s'expliquer par la présence du lumen, et donc d'air, ainsi que d'une discontinuité due aux différentes couches dans la coupe transversale.

Pour les fibres de bois, compte tenu de l'écart entre les valeurs (écart relatif d'environ 30% pour la conductivité transversale), ces données permettent uniquement d'avoir un ordre de grandeur des conductivités thermiques.

D'autres travaux sur les fibres de bois, s'appuyant sur des valeurs de conductivités thermiques des constituants chimiques des fibres exposés aux Sections 1.2.2 et 1.2.2, ont été réalisés [Eitelberger & Hofstetter 2011]. Ainsi pour la cellulose, les valeurs de conductivité thermique longitudinale et transversale sont respectivement de  $\lambda_{cel}^{\parallel} = 1,06 W.m^{-1}.K^{-1}$  et de  $\lambda_{cel}^{\perp} = 0,26 W.m^{-1}.K^{-1}$ . On peut ainsi rapprocher ces valeurs de celles des fibres de coton qui sont composées à plus de 80% de cellulose. Cependant, pour la valeur longitudinale, l'écart est relativement important, de l'ordre de 80%.

Pour les fibres polymères, quelques valeurs sont présentes dans la littérature. Ainsi, dans [El Sawalhi 2015] on trouve une valeur de conductivité thermique transversale de  $\lambda_{pol}^{\perp} =$

0,33  $W.m^{-1}.K^{-1}$  et dans [Kawabata & Rengasamy 2002] les plages de valeurs de conductivité thermique longitudinale et transversale sont respectivement de  $\lambda_{pol}^{//} = 1,00 - 1,06 W.m^{-1}.K^{-1}$  et de  $\lambda_{pol}^{\perp} = 0,16 - 0,18 W.m^{-1}.K^{-1}$ . Là encore on note un écart entre les différentes valeurs de la littérature.

Les références, dont sont issues les valeurs présentées dans le Tableau II.7, ne précisent que rarement les conditions d'humidité relative lors des mesures. Ces conditions ont pourtant un effet significatif sur la quantité d'eau présente à l'intérieur des fibres et entre elles au sein de la phase solide comme le précisent les travaux menés dans [Finck 1930].

### 1.3.5 Une sensibilité à l'eau se manifestant à l'échelle des fibres comme à l'échelle du squelette

Le caractère hygroscopique des fibres et des laines végétales, évoqué précédemment, va entraîner la présence d'eau dans leur structure. Cette phase liquide est directement liée aux conditions de température ( $T$ ) et d'humidité relative ( $HR$ ) dans lesquelles elles vont se trouver [Martin 2014]. La teneur en eau, notée  $w$  est le paramètre utilisé pour quantifier la quantité d'eau présente dans les fibres et les laines. Néanmoins, il est possible de définir deux types de teneur en eau, massique ( $w_m$ ) et volumique ( $w_v$ ). Comme l'illustre l'Equation II.3, la teneur en eau massique est déterminée en faisant le rapport de la masse d'eau présente dans le matériau sur la masse de référence du matériau à l'état sec, notée  $m_{ref}$ .

$$w_m = \frac{m_a - m_{ref}}{m_{ref}} = \frac{m_{eau}}{m_{ref}} \quad (II.3)$$

La masse d'eau ( $m_{eau}$ ) est déterminée par différence entre la masse apparente ( $m_a$ ) du matériau mesurée aux conditions de température et d'humidité relative recherchées et la masse de référence.

En ce qui concerne la teneur en eau volumique, elle correspond au rapport entre le volume d'eau contenu dans le matériau et le volume total du matériau. Elle est déterminée à partir de  $w_m$  en utilisant la relation suivante :

$$w_v = w_m \frac{\rho_{a_{sec}}}{\rho_{eau}} \quad (II.4)$$

Avec  $\rho_{a_{sec}}$  la masse volumique du matériau à l'état sec.  $\rho_{eau} = 997,13 kg.m^{-3}$  à  $25^{\circ}C$ .

Dans les fibres, l'eau se trouve sous forme libre ou sous forme liée au sein des parois qui ont été détaillées à la Section 1.2.1 [Hill et al. 2009]. En effet, les parois peuvent contenir d'autant plus d'eau que les molécules qui les composent possèdent de groupes hydroxyles ( $OH$ ). Ces

## II.1 Des caractéristiques et des spécificités propres aux fibres et aux laines végétales

groupes sont accessibles notamment dans les hémicelluloses et dans une moindre mesure dans la cellulose et confèrent un comportement hygroscopique aux laines végétales.

Des valeurs de teneur en eau pour les différents types de fibres végétales sont disponibles dans la littérature, notamment dans [Faruk *et al.* 2012, Martin 2014, Ramesh 2016]. Cependant, les conditions de température et d'humidité relative correspondant aux valeurs présentées ne sont pas toujours précisées. Or, ces valeurs de teneur en eau varient en fonction de ces conditions. En effet, comme il est précisé dans [Collet 2004], lorsque l'humidité relative de l'air ambiant augmente, les fibres vont capter de l'eau suivant le phénomène de sorption, faisant augmenter leur masse apparente et donc la teneur en eau. Par un processus inverse dit de désorption, lorsque l'humidité relative diminue, la teneur en eau va diminuer.

Les travaux menés dans [Hill *et al.* 2009] présentent plusieurs courbes de sorption/désorption à 25°C pour des fibres de lin, de chanvre, de coton et de coco, comme l'illustre la Figure II.7.

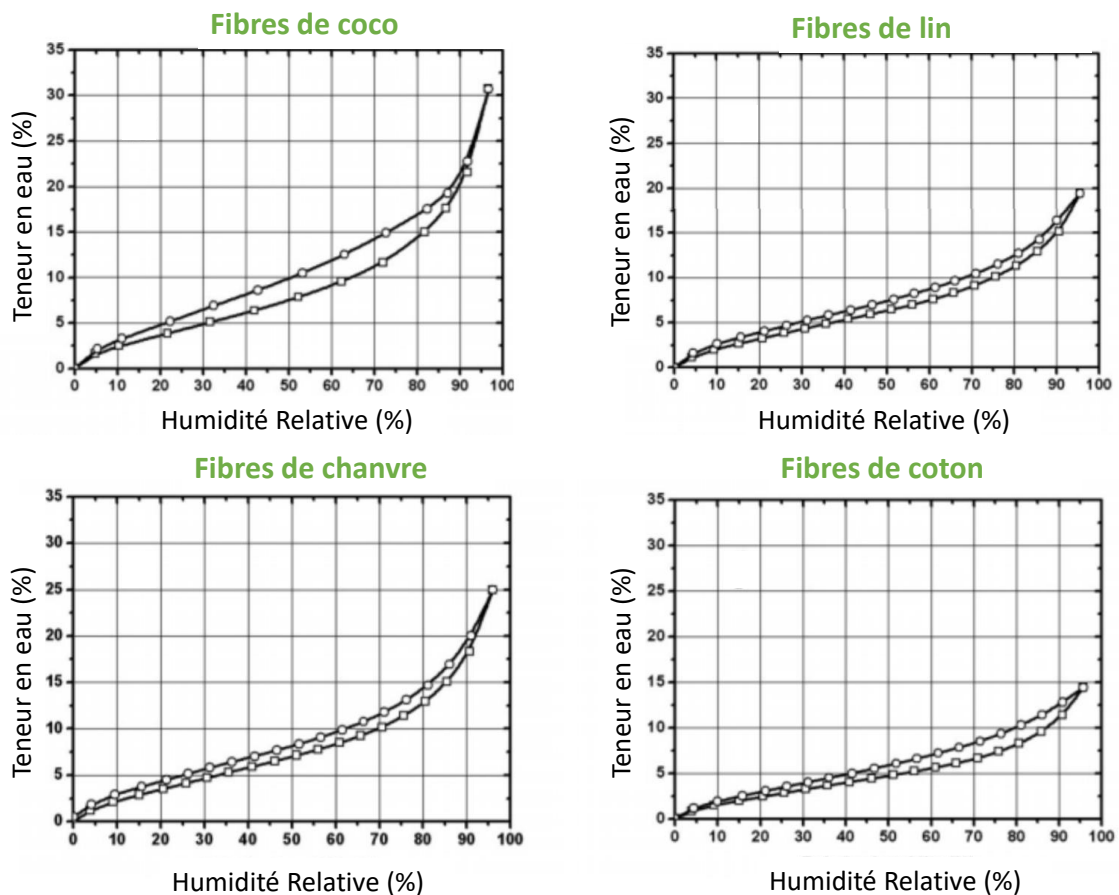


Figure II.7 – Cycle sorption-désorption de fibres végétales [Hill *et al.* 2009]

Les courbes de la Figure II.7 correspondent au type II de la classification de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC), comme il est indiqué dans [Collet *et al.* 2008]. De plus, elles présentent une hystérésis entre les cycles de sorption et désorption. La présence de cette hystérésis peut s'expliquer par la combinaison de plusieurs phénomènes (mécaniques, thermodynamiques, chimiques) qui sont détaillés dans [Collet 2004] et [Hill *et al.* 2009]. D'autre part, il est également montré dans ces travaux, ainsi que dans [Almeida *et al.* 2018] que la température n'a pas d'influence sur le cycle de sorption alors qu'elle en a sur le cycle de désorption.

La sorption se décompose en 3 étapes.

- La première pour une humidité relative comprise dans la plage [0 – 15%] où une adsorption monocouche sur la surface interne de la paroi cellulaire domine.
- La seconde, pour la plage [15 – 70%] d'humidité relative où la formation d'eau multicouche dans les microcapillaires de la paroi cellulaire transitoire se produit.
- La troisième, lorsque l'humidité relative dépasse 70%, la condensation capillaire devient de plus en plus dominante.

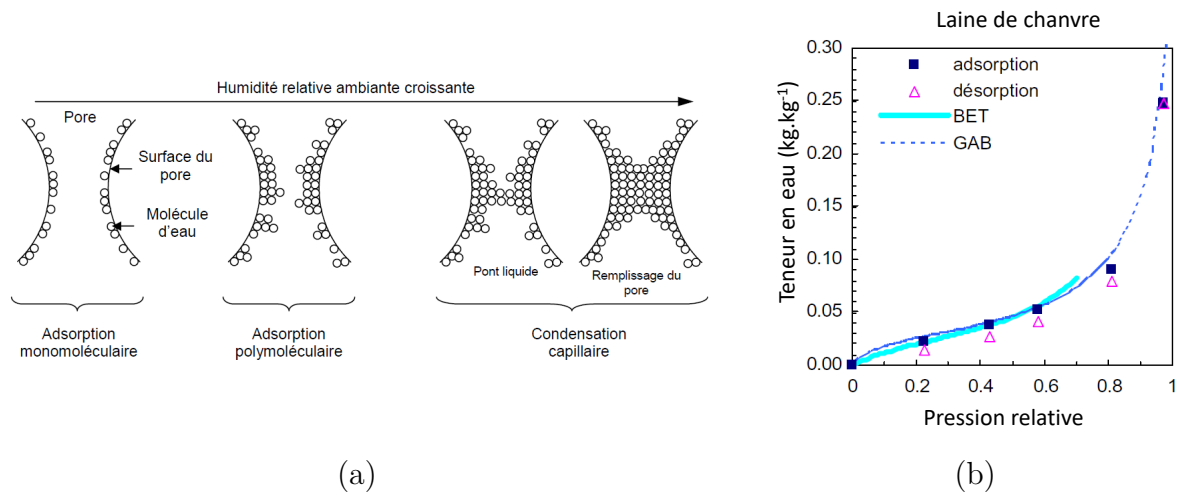
En ce qui concerne les résultats, les fibres de coco se démarquent des autres fibres par une hystérésis plus marquée et une teneur en eau plus élevée pour les hautes valeurs d'humidité relative. Ce résultat peut être mis en lien avec le fait que les fibres de coco contiennent un pourcentage de lignine plus élevé que les autres fibres, comme cela a été présenté à la Section 1.2.2. En effet, il semble que la capacité du réseau de la lignine à se déformer pour s'adapter à l'eau à l'intérieur de la paroi cellulaire soit plus importante que pour les autres éléments [Hill *et al.* 2009].

Le coton, pour sa part, du fait d'une composition quasi exclusive en cellulose, présente une sensibilité à l'eau moindre que le lin et le chanvre. Néanmoins, quel que soit le type de fibres, l'augmentation de la quantité d'eau en leur sein lors du processus de sorption entraîne leur gonflement et l'augmentation des surfaces d'adsorption [Hill *et al.* 2009].

Pour ce qui est des laines végétales, les travaux de la littérature considèrent que ces matériaux suivent le processus de fixation de l'humidité des milieux poreux, présenté à la Figure II.8(a) [Collet 2004]. On retrouve ainsi les trois phases du processus de sorption explicité précédemment pour les fibres dans [Hill *et al.* 2009].

On retrouve également des courbes de sorption-désorption du même type que pour les fibres végétales, comme illustré à la Figure II.8(b) pour le chanvre.

Cependant, même si on retrouve la même valeur de teneur en eau pour une humidité relative proche de 95%, la pente de la courbe de sorption semble moins marquée. En effet, pour le chanvre, en s'appuyant sur les graphes des Figures II.7 et II.8(b), pour une humidité relative de 50%, on trouve  $w_{m_{fibre}} = 8\%$ , alors que  $w_{m_{laine}} = 4,5\%$ . Néanmoins, d'autres travaux



**Figure II.8** – (a) Représentation schématique des phénomènes d’adsorption physique dans un pore [Collet 2004], (b) isotherme de sorption d’une laine de chanvre [Collet *et al.* 2008]

de la littérature présentent des valeurs différentes de la teneur en eau de laines de chanvre pour une humidité relative de 50%, plus proche de 2% dans [Volf *et al.* 2015] et de 7% dans [Korjenic *et al.* 2011].

**Des investigations sont donc à mener dans le cadre de la thèse pour les différents types de fibres afin de confirmer tout ou partie de ces valeurs.**

De manière générale, les données et les travaux à l’échelle des fibres végétales sont relativement bien représentés dans la littérature, à l’exception de leurs caractéristiques thermiques. Pour chaque type de fibres, un lien peut souvent être établi entre le comportement observé et la composition de leur microstructure.

A l’échelle de la phase solide, que ce soit pour ses dimensions, son organisation ou ses propriétés spécifiques, les travaux de référence sont rares. De plus, quand des données existent elles ne sont pas toujours concordantes, notamment concernant les spécificités thermiques ou de sensibilité à l’eau.

**Un travail d’investigation plus important à l’échelle du squelette est donc à mener dans le cadre de ces travaux de thèse afin de mieux comprendre l’influence de ces spécificités sur les propriétés multifonctionnelles des laines végétales et notamment les propriétés acoustiques et thermiques.**

# 2 Les laines végétales : des matériaux aux propriétés multifonctionnelles

Compte tenu de leur structure poreuse et fibreuse, décrite dans la section précédente, les laines végétales semblent posséder des prédispositions afin d'afficher des propriétés acoustiques, thermiques et mécaniques de haut niveau. En effet, une onde acoustique se propageant dans un panneau de laine végétale est soumise à des phénomènes dissipatifs qui confèrent au matériau des capacités en absorption et en affaiblissement acoustique. De même, le niveau de porosité très élevé de ces matériaux joue un rôle prépondérant en ce qui concerne les phénomènes de transferts thermiques en leur sein, leur conférant ainsi des capacités en isolation thermique. Enfin, les excellentes propriétés mécaniques observées pour les fibres présagent de performances mécaniques de bon niveau pour les laines végétales.

## 2.1 Des propriétés acoustiques liées à une microstructure dissipative

Les mécanismes physiques liés à la dissipation d'ondes sonores dans un milieu poreux font l'objet de travaux scientifiques depuis le XIX<sup>e</sup> siècle avec d'illustres pionniers tels que Kirchhoff, Rayleigh ou encore Biot.

Après avoir exposé des hypothèses de base sur les milieux poreux, les phénomènes de dissipation d'une onde sonore par frottements et échanges thermiques entre les phases fluides et solides sont détaillés.

Les paramètres intrinsèques de ces effets dissipatifs sont ensuite reliés aux grandeurs représentatives des propriétés acoustiques des milieux poreux.

Enfin, à partir de résultats issus de la littérature, le large panel de propriétés acoustiques des laines végétales est exposé.

### 2.1.1 La formulation des hypothèses de base pour un milieu poreux biphasique

Avant de faire une présentation synthétique des phénomènes physiques se produisant lorsqu'une onde sonore se propage dans un matériau poreux comme les laines végétales, il est indispensable de présenter les hypothèses de base formulées.

Les matériaux poreux sont considérés en première approximation comme homogènes et isotropes. On considère également qu'ils sont constitués d'une phase solide saturée par une phase fluide. Cette dernière est constituée uniquement d'air, qui est considéré dans le cadre de ce mémoire comme un fluide newtonien compressible et caractérisé par une viscosité de cisaillement  $\mu$  et une conductivité thermique  $\lambda_0$ .

Quant à la phase solide, elle est dans le cas général considérée comme élastique. En effet, dans [Biot 1956a, Biot 1956b] il est montré que deux ondes de compression et une onde de cisaillement peuvent se propager dans le matériau. Néanmoins, les travaux menés dans [Zwikker & Kosten 1949] définissent une fréquence de découplage, notée  $f_{dec}$  et présentée par l'Equation II.5, au-dessus de laquelle on peut considérer que seule une onde de compression dans la phase fluide peut être prise en compte. Ainsi, dans ce cas, la formulation de l'hypothèse d'une phase solide rigide est alors acceptable.

$$f_{dec} = \frac{\sigma \phi^2}{2\pi \rho_a} \quad (\text{II.5})$$

$\sigma$  représente la résistance statique à l'écoulement de l'air, qui est définie à la Section 2.1.3.

Dans un premier temps, l'hypothèse de phase solide rigide est donc retenue. La validité de cette hypothèse pour les matériaux caractérisés dans le cadre de la thèse est discutée à la Section 5 du Chapitre III.

La porosité des matériaux est considérée comme ouverte et les pores interconnectés. De plus, l'hypothèse est faite d'un milieu à simple porosité dans lequel les tailles de pores sont considérées suffisantes ( $> 10 \mu m$ ) pour être perméables aux ondes acoustiques du domaine audible. Aussi, la longueur d'onde est considérée suffisamment grande devant la taille des pores pour pouvoir négliger les effets de diffraction [Olny 1999].

Enfin, on se place dans le cadre de l'acoustique linéaire. Ainsi, les grandeurs acoustiques du second ordre sont négligées par rapport à celles du premier ordre. Cette hypothèse permet de simplifier grandement les équations, notamment celles du mouvement [Bruneau 1998].

Dans le cadre défini par ces hypothèses de base, il est maintenant possible de définir les deux phénomènes de dissipation d'une onde sonore se propageant dans un matériau poreux.

### 2.1.2 Une structure siège de dissipation acoustique par effets visco-inertiels

L'onde sonore se propageant dans le matériau génère un différentiel de pression qui entraîne un mouvement de la phase fluide. L'air va donc se déplacer dans les pores (effets inertiels) et subir des contraintes visqueuses au contact de la phase solide supposée rigide (effets visqueux).

L'équation du mouvement pour un fluide visqueux newtonien, en petites déformations, est l'équation de Navier-Stokes linéarisée [Bruneau 1998], qui s'écrit :

$$\mu \Delta \vec{v} + (\mu + \kappa) \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) - \rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{\nabla} p \quad (\text{II.6})$$



Avec  $p$  la pression acoustique,  $\vec{v}$  la vitesse acoustique dans la phase fluide,  $\kappa$  le coefficient de viscosité de volume de l'air et  $\rho_0$  la masse volumique de l'air à l'équilibre.

En considérant que la longueur d'onde acoustique correspond à une sollicitation macroscopique très grande devant la taille des pores, l'air peut être considéré au premier ordre comme localement incompressible [Olny 1999]. Ce qui se traduit par :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{II.7})$$

Dans le cas d'une onde acoustique harmonique, dont la dépendance temporelle sera de la forme  $e^{j\omega t}$ , avec  $\omega = 2\pi f$  la pulsation de l'onde et  $f$  sa fréquence, l'équation de Navier-Stokes linéarisée peut se simplifier en :

$$\mu \Delta \vec{v} - j\omega \rho_0 \vec{v} = \vec{\nabla} p \quad (\text{II.8})$$

En se plaçant dans le cas particulier de pores cylindriques, la résolution de cette équation s'appuie sur des fonctions de Bessel et sur  $\delta_v$  l'épaisseur de la couche limite visqueuse [Zwikker & Kosten 1949, Biot 1956a, Biot 1956b].  $\delta_v$  s'exprime par la relation suivante :

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0 \omega}} \quad (\text{II.9})$$

La comparaison de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la couche limite visqueuse avec le rayon du pore conduit à l'identification de deux types de régimes asymptotiques pour l'écoulement de l'air.

Lorsque le rayon des pores est très grand devant  $\delta_v$ , il s'agit d'un régime inertiel où le terme  $-j\omega \rho_0 \vec{v}$  est prépondérant devant le terme  $\mu \Delta \vec{v}$ .

Inversement, lorsque  $\delta_v$  est très grand devant le rayon du pore, le terme  $-j\omega \rho_0 \vec{v}$  peut être négligé par rapport au terme  $\mu \Delta \vec{v}$ . Il s'agit alors d'un régime d'écoulement visqueux.

La détermination de la vitesse macroscopique  $\langle \vec{v} \rangle$  d'écoulement dans le pore cylindrique est régie par la loi de Darcy généralisée :

$$\langle \vec{v} \rangle = -\frac{\Pi(\omega) \vec{\nabla} p}{\mu} \quad (\text{II.10})$$

$\Pi(\omega)$  représente la perméabilité dynamique. Cette fonction, qui dépend de  $\Delta \vec{v}$ , du rayon du pore cylindrique et de fonctions de Bessel, est considérée comme une grandeur intrinsèque car indépendante des propriétés de la phase fluide. L'autre grandeur traditionnellement définie

à partir de la perméabilité dynamique et caractéristique des effets de dissipation visco-inertiels est la densité dynamique  $\rho$  :

$$\rho(\omega) = \frac{\mu}{j\omega\Pi(\omega)} \quad (\text{II.11})$$

En suivant une approche similaire, il est possible d'identifier également une grandeur intrinsèque caractéristique des effets de dissipation thermique.

### 2.1.3 Une structure propice aux phénomènes de dissipation thermique des ondes sonores

Le différentiel de pression ( $\vec{\nabla}p$ ), généré par l'onde acoustique au sein de la phase fluide, entraîne également une modification de l'évolution thermodynamique et plus particulièrement de la température de la phase fluide. Ainsi, ce couplage entre différentiel de pression et variation de température à l'échelle des pores est régi par l'équation de la chaleur linéarisée :

$$\lambda_0\Delta T - \rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{II.12})$$

Avec  $T$  la variation de température de l'air par rapport à la température d'équilibre et  $C_p$  la capacité calorifique de l'air à pression constante.

Par analogie avec les phénomènes visco-inertiels, la résolution de l'équation de la chaleur conduit à l'utilisation de fonctions de Bessel et à la définition de l'épaisseur de couche thermique  $\delta_t$  qui s'exprime par la relation suivante :

$$\delta_t = \sqrt{\frac{\lambda_0}{\rho_0 C_p \omega}} \quad (\text{II.13})$$

Toujours par analogie avec les effets visco-inertiels, deux régimes asymptotiques de l'évolution thermodynamique de la phase fluide dans un pore sont définis. Un régime adiabatique lorsque le rayon du pore est très grand devant  $\delta_t$  et un régime isotherme lorsque  $\delta_t$  est très grand devant le rayon.

La température macroscopique  $\langle T \rangle$  dans un pore cylindrique peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$\langle T \rangle = \frac{j\omega p \Xi(\omega)}{\lambda_0} \quad (\text{II.14})$$

Avec  $\Xi(\omega)$  la perméabilité dynamique thermique. Comme  $\Pi(\omega)$ , il s'agit d'une grandeur intrinsèque. Le module d'incompressibilité thermique  $K$ , la grandeur intrinsèque généralement

utilisée pour caractériser les effets de dissipation thermique, est défini en fonction de  $\Xi(\omega)$  par l'équation suivante :

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

Avec,  $P_0$  la pression de l'air à l'équilibre et  $\gamma$  le coefficient de Laplace correspondant au rapport des capacités calorifiques de l'air à pression constante et à volume constant,  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ .

### 2.1.4 Une équation de propagation directement liée aux perméabilités dynamiques visco-inertielle et thermique

Pour la phase fluide, l'équation de conservation de la masse peut s'exprimer par la relation suivante :

$$j\omega \langle \rho \rangle + \rho_0 \vec{\nabla} \cdot \langle \vec{v} \rangle = 0 \quad (\text{II.16})$$

$\langle \rho \rangle$  est la densité macroscopique de l'air.

De plus, on peut exprimer l'équation d'état suivante :

$$\frac{p}{P_0} = \frac{\langle \rho \rangle}{\rho_0} + \frac{\langle T \rangle}{T_0} \quad (\text{II.17})$$

Ainsi, à partir des Equations II.10, II.11, II.14, II.15, II.16 et II.17, il est possible d'exprimer l'équation de propagation de l'onde acoustique dans un pore cylindrique en fonction de  $\rho$  et  $K$  par la relation suivante :

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

A l'échelle macroscopique et avec l'approximation de pores cylindriques, l'air peut être considéré comme un fluide dissipatif pour la propagation d'une onde acoustique, dont la célérité dépend de la fréquence et des effets visco-inertiels et thermiques. Elle peut ainsi s'exprimer en fonction de la pulsation ( $\omega$ ), de la densité dynamique ( $\rho$ ) et du module d'incompressibilité ( $K$ ) selon la relation suivante :

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

$\rho$  et  $K$  représentent ainsi le premier couple de grandeurs intrinsèques caractéris-

---

tiques dans le cadre des phénomènes de dissipation d'une onde sonore au sein des matériaux poreux. Il est donc possible à présent de les relier aux grandeurs représentatives des propriétés acoustiques des matériaux.

### 2.1.5 Des paramètres acoustiques représentatifs des propriétés en affaiblissement et en absorption acoustique liées aux phénomènes dissipatifs

Les performances acoustiques de l'enveloppe d'un bâtiment reposent sur deux approches distinctes :

- **La correction acoustique** d'un local qui caractérise la capacité à réguler le niveau des sons qui y sont émis lors de l'excitation acoustique de ses parois. L'objectif est de contrôler la réverbération afin de maîtriser le niveau sonore du local en fonction de ses usages.
- **L'isolation acoustique** qui caractérise la capacité d'une paroi à atténuer la transmission d'énergie acoustique entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment ou entre deux locaux intérieurs. L'objectif est de réduire au maximum les niveaux sonores transmis à travers les différentes parois d'un local.

Chacune de ces deux notions au niveau paroi ou local dépend des propriétés des matériaux utilisés.

Ainsi, les propriétés des matériaux du bâtiment sont généralement caractérisées par deux grandeurs :

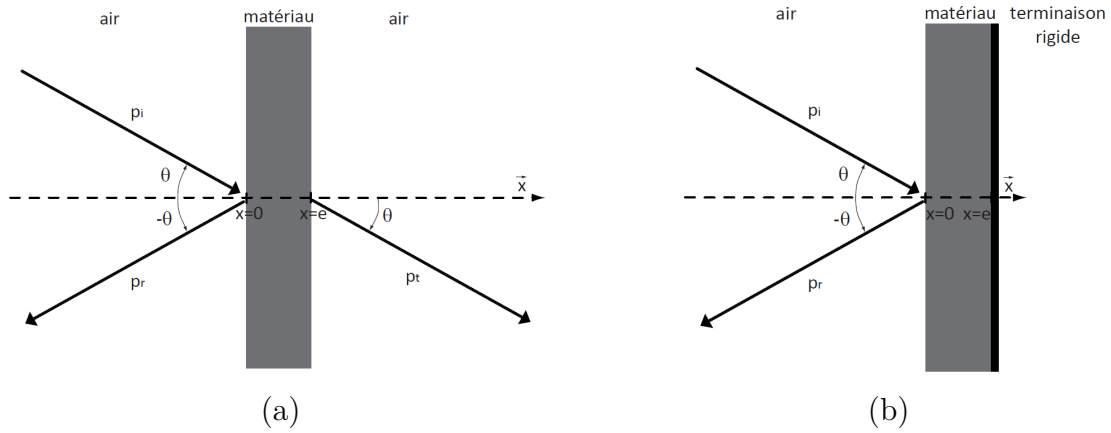
- **le coefficient d'absorption acoustique** noté  $\alpha$ ,
- **l'indice d'affaiblissement acoustique** noté **TL** pour « Transmission Loss ».

Ces deux grandeurs dépendent de l'onde sonore excitatrice. Dans le cadre de cette thèse, on se place dans une hypothèse d'ondes planes orientées selon un angle d'incidence par rapport à la normale issue des matériaux, comme illustré à la Figure II.9.

#### Coefficient d'absorption acoustique

On se place dans le cas présenté à la Figure II.9(b) où le matériau est adossé à une terminaison rigide qui a pour objectif d'imposer une valeur nulle pour la condition limite de vitesse normale. Le coefficient d'absorption acoustique  $\alpha$  s'exprime en fonction du facteur de réflexion du matériau  $R$ , lui même relié aux pressions de l'onde incidente  $p_i$  et de l'onde réfléchie  $p_r$  :

$$R(\theta) = \frac{p_r(\theta, x = 0)}{p_i(\theta, x = 0)} \quad (\text{II.20})$$



**Figure II.9** – Ondes incidentes, réfléchies et transmises pour un matériau soumis à une onde acoustique d'incidence  $\theta$  [Glé 2013]

$$\alpha(\theta) = 1 - |R(\theta)|^2 \quad (\text{II.21})$$

La valeur du coefficient d'absorption acoustique est donc par définition comprise entre 0 pour les matériaux totalement réfléchissants et 1 pour les matériaux complètement absorbants.

Afin de relier le couple de paramètres intrinsèques  $\rho$  et  $K$  caractéristiques des phénomènes de dissipation dans les matériaux poreux, identifiés aux Sections 2.1.2 et 2.1.3 de ce chapitre, au coefficient d'absorption acoustique  $\alpha$ , on se place dans le cas particulier d'une **onde acoustique plane, harmonique se propageant en incidence normale** ( $\theta = 0^\circ$ ).

Cette onde est définie à l'instant  $t$  et en un point  $M$  de la phase fluide du matériau par une vitesse acoustique  $\vec{v}(M, t)$  et une pression acoustique  $p(M, t)$  qui s'expriment selon les relations suivantes :

$$p(M, t) = Ae^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \overrightarrow{OM})} \quad (\text{II.22})$$

$$\vec{v}(M, t) = \frac{A}{Zc} e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \overrightarrow{OM})} \vec{e}_x \quad (\text{II.23})$$

Avec  $A$  correspondant à l'amplitude de la pression acoustique,  $\overrightarrow{OM}$  le vecteur position se trouvant sur l'axe  $\vec{x}$  et  $O$  le point situé en  $x = 0$ ,  $\vec{e}_x$  correspondent au vecteur unitaire de l'axe  $\vec{x}$ .

$\vec{k}$  pour sa part est le vecteur d'onde, dont la norme  $k$  correspond au nombre d'onde du

matériau qui peut être relié à la célérité de l'onde selon la relation suivante :

$$k = \frac{\omega}{c(\omega)} \quad (\text{II.24})$$

En reprenant l'expression de la célérité exprimée à l'Equation II.19, on obtient :

$$k = \omega \sqrt{\frac{K(\omega)}{\rho(\omega)}} \quad (\text{II.25})$$

Enfin,  $Zc$  est l'impédance caractéristique du matériau. Elle peut s'exprimer selon la relation suivante :

$$Zc = \rho(\omega)c(\omega) \quad (\text{II.26})$$

Ou encore :

$$Zc = \sqrt{\rho(\omega)K(\omega)} \quad (\text{II.27})$$

Les Equations II.25 et II.27 constituent ainsi des relations de passage entre les couples de grandeurs intrinsèques  $(\rho, K)$  et  $(k, Zc)$ .

De plus, en incidence normale, le coefficient d'absorption acoustique peut également s'exprimer selon la relation suivante [Allard & Atalla 2009] :

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \right|^2 \quad (\text{II.28})$$

Avec  $Z_0$  l'impédance caractéristique de l'air et  $Z_s$  l'impédance de surface du matériau dans le cas où il est adossé à une terminaison rigide (II.9(b)) qui s'exprime suivant la relation :

$$Z_s = \left. \frac{p}{\vec{v} \cdot \vec{x}} \right|_{x=0} = -jZc \cot(ke) \quad (\text{II.29})$$

### Indice d'affaiblissement acoustique

Afin de déterminer l'indice d'affaiblissement du matériau on se place dans le cas présenté à la Figure II.9(a). Ainsi, on peut définir le facteur de transmission  $v$  en fonction des pressions de l'onde incidente  $p_i$  et de l'onde transmise  $p_t$  :

$$v(\theta) = \left| \frac{p_t(\theta, x = e)}{p_i(\theta, x = 0)} \right|^2 \quad (\text{II.30})$$

L'indice d'affaiblissement pour une onde plane s'exprime alors suivant la relation suivante :

$$TL(\theta) = -10\log(v(\theta)) \quad (\text{II.31})$$

L'indice d'affaiblissement acoustique s'exprime en décibels ( $dB$ ).

A présent que deux grandeurs caractéristiques des propriétés acoustiques des matériaux poreux ont été définies, un recensement des données disponibles dans la littérature les concernant peut être fait.

### 2.1.6 Le large panel de performances acoustiques présenté par les laines végétales

Depuis 2010 environ, plusieurs références bibliographiques font état des performances acoustiques de matériaux biosourcés dans lesquels on peut retrouver des laines de lin, de chanvre, de kénaf, de coco et de bois, comme dans [Arenas & Asdrubali 2018], [Asdrubali *et al.* 2012], mais aussi dans [Berardi & Iannace 2015], [Hosseini Fouladi *et al.* 2011]. Toutes soulignent les très bonnes prédispositions de ces matériaux notamment en termes d'absorption acoustique, plus particulièrement à moyennes et hautes fréquences. Il est également précisé que pour augmenter l'absorption à plus basse fréquence, une solution est d'augmenter l'épaisseur des matériaux.

Néanmoins, d'autres travaux identifient différents paramètres de la structure des matériaux influençant leur niveau d'absorption acoustique. Ainsi, l'étude menée notamment sur des laines de bois dans [Wassilieff 1996] montre le lien entre absorption et résistance statique à l'écoulement de l'air,  $\sigma$ , du matériau.

**La résistance statique à l'écoulement de l'air (résistivité) d'un matériau,  $\sigma$ , caractérise la capacité d'un matériau à s'opposer à l'écoulement d'un fluide à travers sa structure. Ainsi, ce paramètre est lié à l'équation de Darcy en régime permanent et est inversement proportionnel à la perméabilité statique  $\Pi_0$  de la phase fluide. Elle s'exprime en  $N.m^{-4}.s$  et est donnée par la relation suivante :**

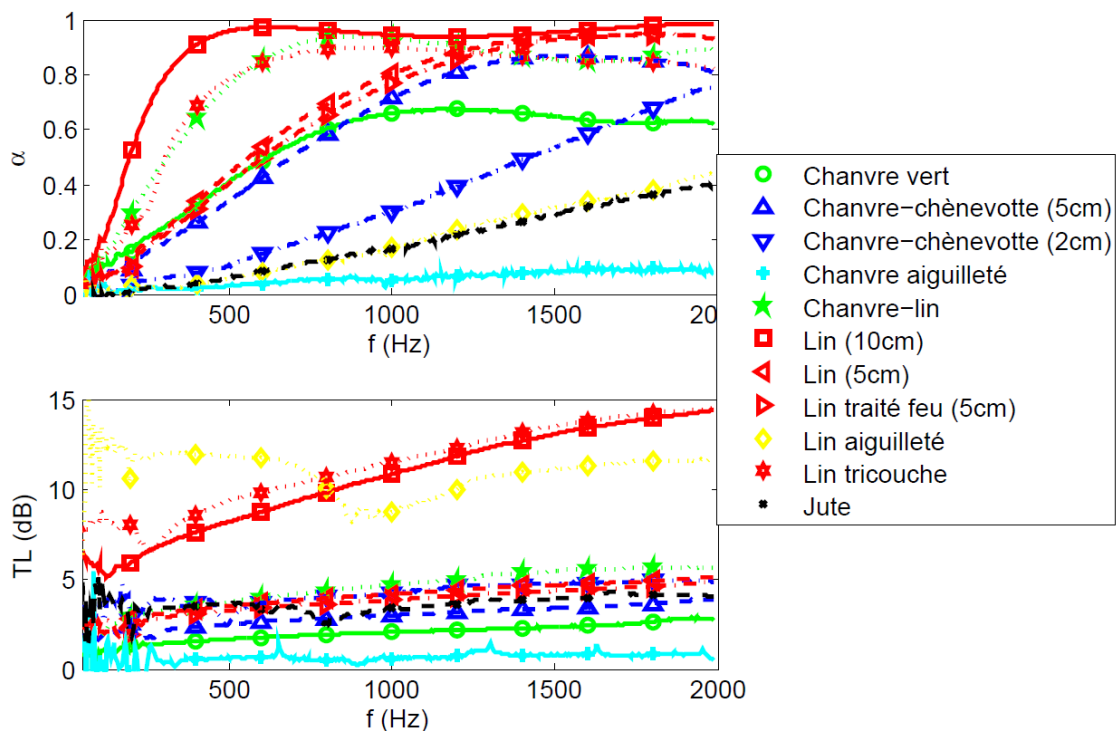
$$\sigma = -\frac{\vec{\nabla} p}{\phi \vec{v}} \quad (\text{II.32})$$

Comme la résistivité dépend également de la porosité du matériau, elle est donc liée à sa masse volumique apparente, ainsi qu'à la masse volumique de la phase solide, comme cela a été explicité à la Section 1.3.3 de ce chapitre.

## II.2 Les laines végétales : des matériaux aux propriétés multifonctionnelles

Ceci est confirmé par les travaux de [Oldham *et al.* 2011], qui de plus soulignent le lien avec les rayons de fibres. En effet, parmi les matériaux caractérisés dans ces travaux, les meilleurs résultats d'absorption acoustique sont obtenus pour ceux ayant les rayons de fibres les plus faibles.

Dans [Glé 2013], des travaux présentent des caractérisations acoustiques sur un plus grand nombre de laines végétales, monocouches ou tricouches, fabriquées à la fois par des processus de thermoliage et d'aiguilletage (voir Section 2.2.3 du Chapitre I) et présentant des masses volumiques apparentes comprises dans la plage  $[20 - 250 \text{ kg.m}^{-3}]$  et des épaisseurs comprises dans la plage  $[8 - 100 \text{ mm}]$ . Les résultats montrent l'étendue de la gamme d'absorption et d'isolation qu'il est possible d'obtenir avec ce type de matériaux, comme l'illustre la Figure II.10.



**Figure II.10** – Gamme d'absorptions acoustiques et d'indices d'affaiblissement moyens de laines végétales [Glé 2013]

Ces travaux confirment également les liens énoncés précédemment entre les propriétés acoustiques des matériaux et les paramètres tels que la masse volumique apparente, la porosité, la résistivité et les rayons des fibres.

Ces éléments seront donc bien à prendre en compte lors de l'investigation de mé-



thodes de modélisation des phénomènes acoustiques des matériaux fibreux comme les laines végétales. De plus, comme il est conseillé dans [Berardi & Iannace 2017], les modèles devront dans la mesure du possible reposer sur un nombre restreint de paramètres d'entrée.

Enfin, un rapport datant de 2018 et relatif aux propriétés acoustiques des matériaux biosourcés [Blinet *et al.* 2018] présente des résultats de caractérisation pour plusieurs laines végétales, notamment des laines de chanvre, de ouate de cellulose, de mélange chanvre, lin coton et de bois. Ces résultats confortent le large panel de ces matériaux en termes d'absorption et d'indice d'affaiblissement.

De plus, cette étude présente des caractérisations effectuées sur une large gamme de systèmes de parois contenant des laines végétales tels que des cloisons, des plafonds suspendus, des combles perdus, des toitures, etc. Quel que soit le type de paroi, l'étude montre à travers les valeurs des indicateurs acoustiques normalisés (indice d'affaiblissement acoustique pondéré  $R_w(C; C_{tr})$  et coefficient d'absorption acoustique pondéré  $\alpha_w$ ) que les dispositifs intégrant des laines végétales rivalisent largement avec ceux contenant des isolants fibreux conventionnels (laines de roche et verre).

En s'appuyant sur des hypothèses de base s'appliquant à la fois aux phases solide et fluide, les développements exposés dans la littérature permettent d'établir des relations simples entre les propriétés des matériaux poreux et les phénomènes de dissipation d'une onde acoustique en leur sein. **Une évaluation de la validité de ces hypothèses et des relations exposées, pour le cas des matériaux fibreux tels que les laines végétales, est donc à mener dans le cadre de ces travaux de thèse.**

D'autre part, les résultats des caractérisations expérimentales identifiées dans la littérature permettent d'avoir une première vision de la gamme des performances acoustiques pouvant être attendues pour le cas des laines végétales qui sont étudiées dans ce travail de thèse.

Ces travaux confirment également un certain nombre de paramètres sur lesquels les modélisations peuvent s'appuyer afin d'ouvrir des perspectives d'optimisation des performances acoustiques pour des matériaux fibreux. Parmi ces paramètres, il est possible d'envisager que la porosité ou les rayons des fibres puissent également jouer un rôle au niveau des propriétés thermiques des laines végétales.

## 2.2 Des propriétés en isolation thermique conférées par une porosité élevée

La conductivité thermique équivalente du matériau est identifiée comme la grandeur représentative des propriétés en isolation thermique des laines végétales. Après avoir exposé sa définition, les contributions des phénomènes de transferts thermiques par conduction, convection puis rayonnement sont évaluées afin d'identifier à quels paramètres de la microstructure des matériaux fibreux ils sont liés. Enfin, les valeurs de conductivités thermiques présentes dans la littérature sont recensées puis évaluées.

### 2.2.1 La conductivité thermique équivalente du matériau comme grandeur représentative des propriétés thermiques des laines végétales

Comme il a été présenté à la Section 1.3.4 de ce chapitre, la grandeur retenue pour caractériser les performances en isolation thermique des laines végétales est la conductivité thermique.

**Dans la suite de ce mémoire, elle est nommée conductivité thermique équivalente et notée  $\lambda_{eq}$ .**

En considérant, en première approximation, un milieu poreux saturé par une phase fluide immobile soumis à un gradient de température, on peut écrire une relation analogue à la loi de Fourier, liant  $\lambda_{eq}$ , le gradient de température  $\vec{\nabla}T$  et la densité de flux thermique  $\vec{\phi}$  :

$$\vec{\phi} = -\lambda_{eq} \vec{\nabla}T \quad (\text{II.33})$$

Il est montré dans [Bories *et al.* 2008] que cette loi peut être généralisée au cas des milieux anisotropes, comme c'est le cas pour les panneaux de laines végétales. La conductivité thermique peut alors être considérée comme un tenseur. Les conductivités particulières issues de l'anisotropie des matériaux sont détaillées au Chapitre IV.

De plus, comme cela a été exposé à la Section 1.3.4 de ce chapitre,  $\lambda_{eq}$  va dépendre, dans le cas d'un milieu poreux biphasique, des conductivités thermiques des phases solide ( $\lambda_s$ ) et fluide ( $\lambda_f$ ) et des différents types de transferts thermiques qui se produisent en leur sein : conduction, convection, rayonnement.

Aussi, comme cela est réalisé dans de très nombreuses références bibliographiques comme notamment dans [Bankvall 1973], [Bomberg & Klarsfeld 1983], [Bories *et al.* 2008], [Finck 1930], mais également dans [Karamanos *et al.* 2004], [Langlais & Klarsfeld 1997], [Ye *et al.* 2006], la contribution de chaque mode de transfert de chaleur peut être représentée sous forme d'une conductivité thermique spécifique :  $\lambda_{cond}$  pour la conduction,  $\lambda_{conv}$  pour la convection et  $\lambda_r$

pour le rayonnement.

$$\lambda_{eq} = \lambda_{cond} + \lambda_{conv} + \lambda_r \quad (\text{II.34})$$

Dans un premier temps, le phénomène de transfert thermique par conduction est détaillé en prenant en compte à la fois les phases solides et fluides des matériaux.

### 2.2.2 Un phénomène de transfert thermique par conduction s'appliquant aux deux phases solide et fluide

Dans un milieu soumis à un gradient de température, un flux de chaleur se crée de la région chaude vers la région froide, correspondant au phénomène de conduction thermique. Il se produit par contact de proche en proche sans déplacement de matière jusqu'à l'uniformisation de la température dans le milieu. L'équation caractéristique de la conduction thermique est la loi de Fourier présentée à l'Equation II.33.

L'association de cette relation au premier principe de la thermodynamique relatif à la conservation de l'énergie en tout point, conduit à l'équation de la chaleur linéarisée sous sa forme générale :

$$\lambda \Delta T + \vec{\nabla} T \cdot \vec{\nabla} \lambda + q = \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (\text{II.35})$$

Avec  $q$  la production de chaleur interne qui sera considérée comme nulle dans le cas des milieux étudiés dans le cadre de cette thèse. De même, que ce soit pour la phase solide où la phase fluide, il est considéré qu'à l'échelle locale, sous une faible variation de température, la variation des conductivités spécifiques est négligeable. Ainsi,  $\vec{\nabla} \lambda = \vec{0}$ . L'équation de la chaleur peut alors s'écrire :

$$\lambda \Delta T = \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (\text{II.36})$$

La conductivité thermique liée à la conduction dépend des conductivités thermiques spécifiques des phases considérées. Le cas de la phase solide a déjà été abordé à la Section 1.3.4 de ce chapitre.

Pour la phase fluide, il est possible de déterminer la valeur de la conductivité thermique de l'air en fonction des conditions de température et d'humidité relative considérées en s'appuyant sur [Tsilingiris 2007]. Cependant, les travaux menés par [Bankvall 1973] montrent qu'à l'intérieur d'un matériau fibreux, la conductivité thermique de la phase fluide n'est pas tout à fait la

même que celle de l'air. Ainsi, il définit une conductivité thermique équivalente pour la phase fluide qui dépend des conditions de température et de pression au niveau de la microstructure des pores. Il évalue cette conductivité pour l'air à  $25^{\circ}C$  à  $\lambda_f = 0,0275 \text{ Wm}^{-1}K^{-1}$ .

La conductivité thermique associée au phénomène de conduction dépend également de la porosité du milieu biphasique et donc de la masse volumique apparente des matériaux, comme l'indiquent les travaux menés dans [Ye *et al.* 2006] et [Stapulioniene *et al.* 2016]. Elle dépend également de la morphologie, de la taille et de la composition des fibres végétales, ainsi que de l'organisation de la phase solide comme le précisent les travaux de [Finck 1930], [Bankvall 1973] et [Stapulioniene *et al.* 2016]. **Il est donc important dans la suite de ce mémoire d'identifier ou de développer des modélisations qui s'approchent au mieux de la structure interne des matériaux.**

Un autre paramètre peut avoir une influence sur le phénomène de transfert thermique par conduction. Il s'agit de la présence d'eau dans les matériaux due au caractère hygroscopique des laines végétales. En effet, les travaux conduits dans [Korjenic *et al.* 2011] soulignent qu'une augmentation de la teneur en eau massique dans le matériau de 0% à 10% peut entraîner une élévation de la conductivité thermique d'environ 10% pour une laine de lin et de 15% pour une laine de chanvre.

Enfin, la présence de la phase fluide peut contribuer également aux autres phénomènes de transferts de chaleur identifiés, notamment convectifs sous l'impulsion de déplacements d'air créés soit par des différences thermiques, soit par des différences de pression.

### 2.2.3 Un phénomène de transfert de chaleur par convection supposé négligeable dans les isolants fibreux

La convection est liée à des mouvements d'un fluide soumis à un gradient de température. Le fluide chauffé emmagasine de l'énergie sous forme de chaleur puis migre vers d'autres zones où il va la céder. On peut distinguer plusieurs types de mouvements convectifs [Bories 1987]. Ceux liés à des mouvements naturels et correspondant à la convection naturelle et ceux correspondant à la convection forcée, majoritairement liés à des mouvements générés par un système mécanisé. Dans le cadre de cette thèse, il est considéré que seule la convection naturelle peut intervenir au sein des matériaux d'étude.

La convection naturelle se produit dans le fluide interstitiel et au voisinage des parois solides dès lors qu'ils ne sont pas à la même température. Le flux de chaleur alors transmis dépend de la nature du fluide et des dimensions de l'enceinte contenant le fluide. Ce dernier est caractérisé par un nombre de Rayleigh de filtration, noté  $Ra^*$  qui caractérise la prédominance des effets

convectifs ou conductifs. Pour évaluer cette prédominance, [Langlais & Klarsfeld 1997] définit le nombre de Nusselt de filtration, noté  $Nu^*$ , qui dépend de  $Ra^*$  et s'exprime également selon le rapport suivant :

$$Nu^* = \frac{\lambda_{conv}^*}{\lambda_{cond}} \quad (\text{II.37})$$

Avec  $\lambda_{conv}^*$  la conductivité thermique en présence de phénomènes de convection naturelle. Ainsi, si  $Nu^* \approx 1$ , alors les effets convectifs peuvent être négligés par rapport aux effets conductifs.

En s'appuyant sur des données présentées par [Langlais & Klarsfeld 1997] et [Bories 1987], pour des isolants fibreux présentant des caractéristiques pouvant s'apparenter à celles des laines végétales, il semble que l'effet des transferts convectifs puisse être négligé. Ce résultat est par ailleurs confirmé par d'autres travaux de la littérature.

Les effets convectifs ne sont ainsi pas pris en compte dans la modélisation de la conductivité thermique équivalente de matériaux isolants fibreux végétaux dans [Bankvall 1973] (fibres de lin, coton, bois et coco), dans [Lux 2005, Lux *et al.* 2006] (fibres de bois) et dans [Tilioua *et al.* 2012] (fibres de chanvre).

Cette hypothèse est généralisée aux matériaux fibreux de type laine isolante [Bankvall 1973], [Bomberg & Klarsfeld 1983], [Bories 1987], [Karamanos *et al.* 2004] et [Ji *et al.* 2014].

**Pour ces raisons, la convection ne sera pas prise en compte dans le cadre de la thèse mais il est néanmoins nécessaire de rester vigilant sur ce phénomène, notamment lors de l'analyse des résultats des caractérisations expérimentales.**

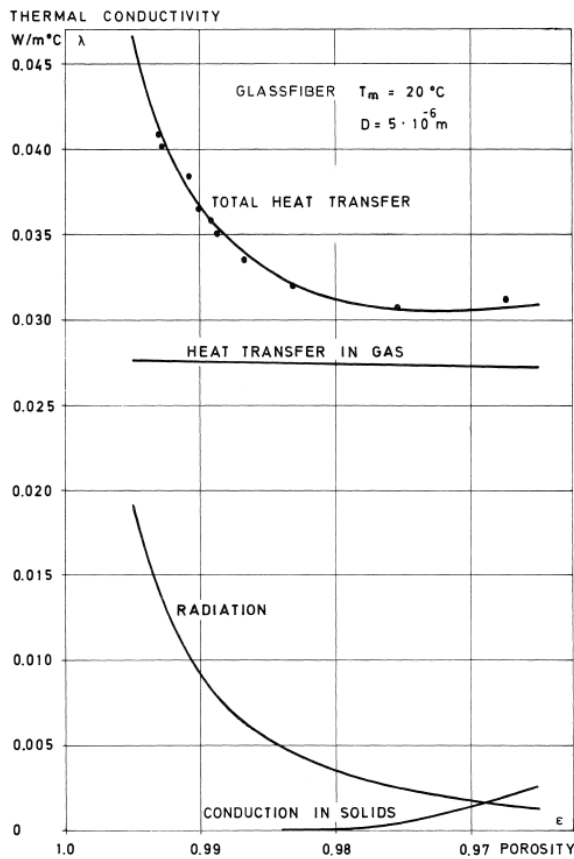
Un autre phénomène peut en revanche être à l'origine de l'augmentation de la conductivité thermique équivalente des isolants fibreux. Il s'agit du rayonnement entre les fibres dû à la présence de la phase fluide.

### 2.2.4 Un phénomène de transfert thermique par rayonnement influant pour de faibles masses volumiques

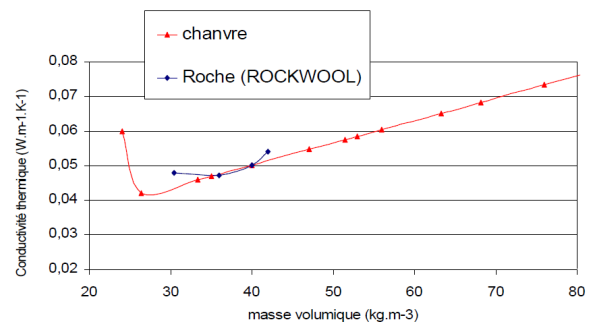
Dans le cas des matériaux fibreux comme les laines végétales, les fibres soumises à un gradient de température peuvent être considérées comme un corps capable d'émettre un rayonnement électromagnétique (phénomène d'émission). Ce rayonnement émis peut alors être transféré dans la phase fluide, considérée comme transparente au rayonnement. Lorsqu'il entre en contact avec d'autres fibres, le rayonnement est diffusé dans plusieurs directions différentes. Il est ensuite absorbé par les fibres atteintes, qui à la réception de cette énergie électromagnétique vont alors s'échauffer.

## II.2 Les laines végétales : des matériaux aux propriétés multifonctionnelles

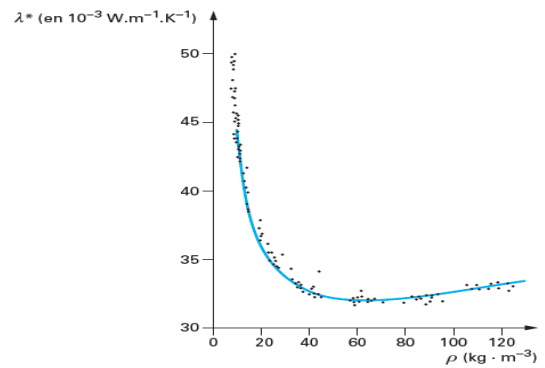
Ainsi le phénomène de rayonnement joue un rôle important dans le cas des matériaux présentant une porosité très élevée, et donc une masse volumique apparente faible. Dans les graphiques présentant l'évolution de la conductivité thermique équivalente en fonction de la masse volumique apparente ou de la porosité des matériaux, l'influence du rayonnement se traduit par la présence caractéristique d'un « optimum » de masse volumique (optimum de transferts couplés conduction-rayonnement) pour lequel la conductivité thermique équivalente est minimale, comme il est précisé dans [Bankvall 1973] et illustré à travers les courbes présentées à la Figure II.11.



(a)



(b)



(c)

**Figure II.11** – (a) Evolution des phénomènes de transferts de chaleur dans une laine de verre en fonction de la porosité [Bankvall 1973], (b) Evolution de la conductivité équivalente d'une laine de chanvre en fonction de la masse volumique [Arnaud & Cérezo 2001], (c) Evolution de la conductivité équivalente d'une laine minérale en fonction de la masse volumique [Langlais & Klarsfeld 1997].

A partir du graphe de la Figure II.11(a), on peut voir pour le cas d'une laine de verre que le phénomène de transfert thermique qui est prépondérant pour les porosités supérieures à 96%

est celui de la conduction par la phase fluide (nommé heat transfer in gas). Le phénomène de rayonnement qui rivalise au départ avec la conduction de la phase fluide décroît rapidement et ne représente plus que 10% environ de la contribution à la conductivité équivalente pour une porosité de 98%. Quant à la conduction liée à la phase solide, son effet n'entre en jeu que pour une porosité inférieure à 98% et va croître ensuite avec la diminution de la porosité et donc l'augmentation de la masse volumique. Les travaux de [Finck 1930] précisent que le phénomène de rayonnement est également lié à la taille des fibres et à leur orientation. En effet, Finck montre que d'un matériau fibreux à un autre l'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement est plus ou moins marqué et se décale par rapport à l'axe des masses volumiques.

Dans le cas des laines végétales, quelques données de la littérature permettent d'évaluer une plage de masse volumique de cet optimum pour des laines de chanvre. Ainsi, à partir de la courbe de la Figure II.11(b) relative à la caractérisation d'une laine de chanvre, on peut estimer cette plage à  $[25 - 30 \text{ kg.m}^{-3}]$ . Dans [Ye *et al.* 2006], ce sont des laines de mouton et de chanvre qui sont caractérisées et qui permettent d'identifier un intervalle identique.

**Compte tenu de ces résultats, une attention particulière à la manifestation du phénomène de rayonnement semble nécessaire lors de la caractérisation de la conductivité thermique des laines végétales qui vont présenter des masses volumiques de l'ordre de  $30 \text{ kg.m}^{-3}$  ou moins.**

Afin de prendre en compte la contribution de ce phénomène dans la modélisation de la conductivité thermique équivalente, il est possible de s'appuyer sur des approches empiriques exprimant la conductivité de rayonnement  $\lambda_r$  en fonction d'un terme en  $\rho^{-1}$  [Ye *et al.* 2006], [Langlais & Klarsfeld 1997]. Il est également possible d'utiliser des relations analytiques découlant de l'expression de la densité de flux radiatif [Bankvall 1973],[Bories *et al.* 2008].

En englobant les contributions des transferts thermiques par conduction et par rayonnement, la Figure II.11(c) fait état de valeurs de conductivité thermique équivalente proches de  $0,04 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$  pour une laine de chanvre. Il semble donc pertinent de recenser les autres références de la littérature contenant des données sur les valeurs de conductivité thermique des laines végétales, ainsi que les conditions et les dispositifs ayant permis de les obtenir.

### 2.2.5 Des propriétés en isolation thermique performantes pour les laines végétales

Les différentes données de conductivité thermique relatives aux laines végétales présentées dans la littérature sont recensées dans le Tableau II.8.

Ces résultats sont plus riches pour les laines de chanvre et de lin, mais sont relativement hétérogènes. Il est difficile d'en faire une analyse comparative compte tenu des informations

## II.2 Les laines végétales : des matériaux aux propriétés multifonctionnelles

Mat.	Conditions T(°C) - HR(%)	$\lambda_{eq}$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	Masse volumique $\rho_a$ ( $kg.m^{-3}$ )	Dispositif expérimental	Références
Laine lin	/	0,04	/	/	[Asdrubali <i>et al.</i> 2012]
	23°C - 0%	0,0429	32	Plaque Chaude	[Korjenic <i>et al.</i> 2011]
	23°C - 50%	0,065	25	Plaque Chaude	[Korjenic <i>et al.</i> 2016]
	/	0,052	27	Régime Transitoire	[Volf <i>et al.</i> 2015]
Laine chanvre	23°C - [0 - 2%]	0,042	39,4	Régime Transitoire	[Collet 2004]
	23°C - 50%	0,046	40,7		
	23°C - 80%	0,051	41,9		
	/	0,04	/	/	[Asdrubali <i>et al.</i> 2012]
	23°C - 50%	0,062	25	Plaque Chaude	[Korjenic <i>et al.</i> 2016]
	/	0,038	40	Plaque Chaude	[Kremensas <i>et al.</i> 2017]
	/	0,037	100		
	/	0,04	/	/	[Tilioua <i>et al.</i> 2012]
/	0,052	36,2	Régime Transitoire	[Volf <i>et al.</i> 2015]	
	T(°C) - 0% Ambiante	0,047	/	Régime Transitoire	[El Sawalhi <i>et al.</i> 2016]
Laine kénaf	/	0,044	/	/	[Asdrubali <i>et al.</i> 2012]
	25°C - 0%	0,04	100	Plaque Chaude	[Pennacchio <i>et al.</i> 2017]
Laine bois	/	0,065	/	/	[Asdrubali <i>et al.</i> 2012]
	/	0,048	51,5	Régime Transitoire	[Volf <i>et al.</i> 2015]
Laine coco	/	0,065	/	/	[Asdrubali <i>et al.</i> 2012]

**Tableau II.8** – Valeurs de conductivité thermique de laines végétales

différentes ou absentes concernant les conditions de température et d'humidité relative, les masses volumiques et les dispositifs expérimentaux utilisés.

En ce qui concerne les conditions de température et d'humidité relative dans lesquelles les mesures expérimentales sont réalisées, il a été montré à la Section 1.3.5 qu'elles ont une influence sur la quantité d'eau contenue dans les laines végétales. Dans [Finck 1930] il est souligné que l'eau présente dans la structure du matériau va contribuer à augmenter le nombre de contacts entre les fibres, entraînant ainsi une augmentation de la contribution des transferts conductifs de la phase solide pour la conductivité thermique équivalente. On est donc en droit de s'attendre



à ce que la conductivité thermique augmente de manière corrélée à celle de la quantité d'eau dans les laines végétales, ce qui est confirmé pour une laine de lin dans [Korjenic *et al.* 2011], pour des laines de lin, chanvre et bois dans [Volf *et al.* 2015] et pour une laine de chanvre dans [Collet *et al.* 2008]. Cependant, il est à noter que même si ces travaux s'accordent sur l'augmentation de la conductivité thermique en fonction de la quantité d'eau dans le matériau, les valeurs indiquées et leurs évolutions ne sont pas concordantes. **Ce point est donc à investiguer dans le cadre de cette thèse afin de compléter les données de la littérature.**

Pour la masse volumique des matériaux, il semble qu'elle joue un rôle important dans la valeur de la conductivité thermique. En effet, les courbes présentées à la Figure II.11 montrent que, pour des valeurs de masse volumique supérieures à l'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement, l'augmentation de la conductivité thermique est corrélée à celle de la masse volumique. D'autre part, dans [Arnaud & Cérezo 2001] des essais de compression réalisés sur des échantillons de laine de chanvre allant de 25 à 75  $kg.m^{-3}$  ont quantifié l'augmentation de conductivité thermique engendrée. Ainsi, pour un taux de compression de 50%, les augmentations de  $\lambda_{eq}$  se situent dans la plage [1,7 – 2,6%]. Il est par ailleurs noté une augmentation maximum pour la masse volumique la plus faible. Cependant, tous les travaux de la littérature ne corroborent pas ces conclusions, comme les résultats présentés dans [Kremensas *et al.* 2017] et relatifs à des laines de chanvre. En effet, pour des échantillons identiques de matériaux dont la masse volumique apparente passe de  $\rho_a = 40 kg.m^3$  à  $\rho_a = 100 kg.m^3$ , les valeurs de conductivité thermique équivalente diminuent d'environ 4%. **Ce point est donc à investiguer dans le cadre de la thèse afin de mieux appréhender le lien entre masse volumique et conductivité thermique.**

Enfin, la littérature fait état de deux familles principales de dispositifs de caractérisation de la conductivité thermique. La première, reposant sur le régime stationnaire, s'appuie sur la loi de Fourier en quantifiant une densité de flux dans le matériau soumis à un gradient de température. La seconde reposant sur le régime transitoire est équipée de sondes permettant à la fois de chauffer les échantillons et de relever l'augmentation de température en leur sein. Ces dispositifs présentent l'avantage de pouvoir caractériser la conductivité thermique beaucoup plus rapidement et permettent ainsi de répéter un plus grand nombre d'essais. **Dans le cadre de la thèse, il semble pertinent de mener des campagnes de mesures expérimentales avec les deux types de dispositifs afin d'évaluer s'ils conduisent à des résultats équivalents pour le cas des laines végétales.**

En conclusion, même si les données disponibles montrent que les propriétés thermiques des laines végétales peuvent rivaliser avec celles des isolants conventionnels, elles restent globalement peu nombreuses concernant la conductivité thermique. **Le travail de caractérisation expérimental envisagé dans le cadre de la thèse doit permettre de constituer des banques de données pour un maximum de types de laines végétales différentes.**

Concernant les phénomènes de transferts thermiques, notamment la conduction et dans une moindre mesure le rayonnement, leur rôle joué dans l'établissement de la conductivité thermique équivalente est lié directement aux caractéristiques de la microstructure des laines. **Ainsi, la taille des fibres et la porosité sont plus particulièrement à prendre en compte dans l'identification et l'adaptation des modélisations des propriétés thermiques des laines végétales.**

Ces fibres végétales qui présentent en outre d'excellentes propriétés mécaniques, comme cela a été exposé à la Section 1.2.4 de ce chapitre, laissent entrevoir pour ces matériaux des performances mécaniques de haut niveau.

### 2.3 Les propriétés mécaniques des laines végétales

La littérature est relativement pauvre concernant la caractérisation des propriétés mécaniques des panneaux de laines végétales. Une étude menée sur des laines de chanvre dans [Arnaud & Cérezo 2001] apporte de bonnes garanties concernant la mise en œuvre des matériaux en ce qui concerne la compression et la traction. En effet, pour les effets de la compression, qui sont corrélés à la masse volumique des matériaux, une diminution de l'épaisseur de 8% environ est constatée pour un taux de compression relativement élevé de 67% dans le cas d'une laine de masse volumique  $\rho_a = 25 \text{ kg.m}^{-3}$ . De même, cette étude souligne que les laines de chanvre caractérisées sont assez performantes en ce qui concerne la résistance à la traction. Les échantillons présentent des valeurs de résistances aux contraintes pouvant atteindre 235 kPa pour les échantillons dont la masse volumique est la plus forte ( $\rho_a = 75 \text{ kg.m}^{-3}$ ).

Une étude plus récente, datant de 2018, présente des valeurs de module d'Young ( $E$ ) pour plusieurs types de laines végétales, comme des laines de chanvre, de ouate de cellulose, de bois et de mélange chanvre-lin-coton [Blinet *et al.* 2018]. Les valeurs sont relativement homogènes, avec une plage [30 – 60] kPa sous 2 kg et [50 – 80] kPa sous 4 kg. Les valeurs semblent donc du même ordre de grandeur que pour d'autres matériaux isolants fibreux plus conventionnels.

Il est difficile de conclure de manière générale sur les performances mécaniques des laines végétales compte tenu du faible nombre de références bibliographiques trouvées. Cependant, les résultats présentés sont cohérents et semblent indiquer que leurs propriétés mécaniques sont de

bon niveau pour la gamme des isolants fibreux de ce type.

**En conclusion de cette section relative aux propriétés multifonctionnelles des laines végétales, il semble nécessaire de mener des campagnes de caractérisations expérimentales concernant leurs performances acoustiques et thermiques dans le cadre de la thèse. En effet, même si les données présentes dans la littérature permettent d'identifier de bons niveaux de performances multifonctionnelles pour ces matériaux, elles ont besoin d'être enrichies.**

**De plus, une analyse approfondie des résultats expérimentaux doit conduire à une meilleure compréhension de l'influence et du rôle joué par la masse volumique, la porosité, les tailles de fibres et la présence d'eau sur les phénomènes de dissipations acoustiques et de transferts thermiques se produisant au sein des matériaux fibreux biosourcés.**

Ces phénomènes sont par ailleurs directement liés à la spécificité de leur microstructure. C'est pourquoi, il semble nécessaire de pouvoir disposer d'approches de modélisation capables de prédire les performances acoustiques et thermiques des matériaux fibreux tels que les laines végétales à partir de paramètres spécifiques à leur microstructure.

### **3 L'identification de méthodes de modélisation en vue d'une approche micro-macro conjointe acoustique et thermique pour les matériaux fibreux**

Dans cette section, un tour d'horizon des quelques travaux issus de la littérature concernant les approches conjointes des propriétés acoustiques et thermiques des matériaux poreux est tout d'abord réalisé.

Dans un second temps, plusieurs types d'approches de modélisation des phénomènes de dissipation acoustique et de transferts thermiques issus de la littérature sont présentés. Les modèles identifiés constituent des éléments de référence pouvant être utilisés ou adaptés pour atteindre les objectifs de la thèse dans le cadre de l'approche conjointe et concernant la détermination de relations analytiques micro-macro.

Enfin, d'autres modèles de référence présents dans la littérature sont recensés afin de prendre en compte les phénomènes pouvant influencer les performances des laines végétales.

### 3.1 Une approche conjointe acoustique et thermique relativement peu développée

#### 3.1.1 Les approches conjointes se limitant aux caractérisations expérimentales

Il existe dans la littérature quelques travaux faisant état de caractérisations expérimentales des performances multifonctionnelles de matériaux biosourcés (ou pouvant s'y apparenter).

Ainsi, dans [Buratti *et al.* 2018] on retrouve ce type de caractérisation pour des matériaux fabriqués à base de cosses de riz. Dans [Mati-Baouche *et al.* 2014] des caractérisations expérimentales multifonctionnelles concernent des tiges de tournesol broyées et collées avec des liants naturels à base de chitosans.

Plus proche des laines végétales, ce sont les hauts niveaux de performances acoustiques et thermiques de panneaux de matériaux isolants fabriqués à partir de papier et de textiles recyclés qui sont exposés dans [Ricciardi *et al.* 2014] et [Buratti *et al.* 2016].

Concernant les matériaux fibreux, des caractérisations acoustiques et thermiques ont été menées sur des panneaux de laines minérales dans [Moretti *et al.* 2016].

Pour la plupart de ces travaux, il s'agit de mettre en exergue les performances multifonctionnelles de nouveaux matériaux très récents et dont on cherche à promouvoir l'utilisation. Même si la démarche semble relativement novatrice, elle se limite à faire état des résultats des caractérisations puis à comparer les performances avec celles de matériaux équivalents. Il n'y a pas de recherche de compréhension des phénomènes physiques en jeu pouvant expliquer les comportements observés. Ainsi, il n'y a pas de modélisation mise en œuvre afin d'identifier des paramètres liés aux propriétés acoustiques et thermiques.

#### 3.1.2 Les approches conjointes s'appuyant sur des modélisations des phénomènes physiques

Les travaux de la littérature relatifs à des approches multifonctionnelles, et notamment concernant les performances acoustiques et thermiques, utilisant des méthodes de modélisation afin de prédire leurs performances, ne sont pas très nombreux.

Pour les matériaux granulaires biosourcés, une étude est menée dans [Delannoy 2018] afin de caractériser l'impact du vieillissement sur les performances multifonctionnelles de bétons de chanvre. Les grandeurs acoustiques et thermiques utilisées sont caractérisées expérimentalement puis modélisées.

Dans [Rwawiire *et al.* 2017], des isolants fibreux biosourcés sont caractérisés d'un point de vue acoustique et thermique avec pour objectif de recenser et d'évaluer des modèles utilisés

dans la littérature. Les plus pertinents sont déterminés par comparaison avec les résultats des caractérisations expérimentales.

Dans un autre domaine d'étude de matériaux poreux comme la pétrographie, les travaux menés dans [Kazatchenko *et al.* 2004] proposent une technique de modélisation conjointe de la conductivité électrique et des vitesses acoustiques dans les roches poreuses. Une technique de simulation conjointe des vitesses acoustiques et de la conductivité électrique est utilisée à partir du même modèle de microstructure des roches poreuses. Le modèle appliqué présente un milieu isotrope homogène composé de deux constituants : des grains, qui constituent un squelette solide de haute résistivité et des pores saturés par un fluide conducteur. Après validation de cette approche, une inversion du modèle pour reconstruire la microstructure des roches poreuses est possible.

Même si le domaine est différent de celui des isolants fibreux, un parallèle peut être fait au niveau de l'approche de modélisation développée. **En effet, il semble pertinent d'identifier un motif microstructural biphasique à partir duquel des approches conjointes acoustiques et thermiques de modélisation peuvent être mises en œuvre. Cette démarche offre l'opportunité d'identifier des paramètres communs aux deux phénomènes physiques.**

En conclusion, les travaux relatifs à une approche conjointe en vue de modéliser les performances acoustiques et thermiques de matériaux fibreux sont quasiment inexistantes dans la littérature. Ils se cantonnent bien souvent uniquement à une caractérisation expérimentale séparée de chacune des deux propriétés. Quand des modèles sont utilisés, ils le sont également de manière séparée sans objectif d'identifier des paramètres pouvant être communs aux deux phénomènes. **Ainsi, afin de pallier cette absence dans la littérature de travaux sur la corrélation entre les phénomènes acoustiques et thermiques pour les isolants fibreux, il semble pertinent dans le cadre de cette thèse d'identifier des paramètres communs, notamment à l'échelle de la microstructure.**

### 3.2 Les différentes approches pour la modélisation des propriétés acoustiques et thermiques

L'objectif de cette section est double. Tout d'abord, il s'agit de faire état des modèles pour les matériaux poreux, très éprouvés et usités dans la littérature et dont les résultats ont été validés pour les laines végétales. En effet, ils peuvent servir, dans la suite de ces travaux de thèse, d'éléments fiables de comparaison pour d'autres méthodes de modélisation retenues ou

## II.3 L'identification de méthodes de modélisation en vue d'une approche micro-macro conjointe acoustique et thermique pour les matériaux fibreux

---

adaptées.

Le deuxième objectif est d'identifier parmi les approches de modélisation micro-macro, celles offrant à la fois la possibilité de développement d'une approche conjointe acoustique et thermique, mais permettant également d'établir des relations analytiques directes entre les paramètres de la microstructure et les propriétés à l'échelle macroscopique.

### 3.2.1 Une approche acoustique semi-phénoménologique éprouvée s'appuyant sur la géométrie des pores

Cette approche établit des relations analytiques à partir de l'observation directe des propriétés du milieu poreux, à l'échelle du phénomène.

En s'inspirant des travaux menés dans [Kirchhoff 1868], Zwikker et Kosten développent une modélisation du comportement acoustique des milieux poreux en faisant l'hypothèse d'un matériau plein percé de pores cylindriques non connectés, parallèles entre eux et ouverts sur l'extérieur [Zwikker & Kosten 1949].

Cette modélisation conduit à l'expression de la densité dynamique ( $\rho$ ) et du module d'incompressibilité dynamique ( $K$ ), présentés respectivement aux Sections 2.1.2 et 2.1.3 de ce chapitre, en fonction de la porosité ( $\phi$ ), de la résistivité ( $\sigma$ ) et de la tortuosité ( $\alpha_\infty$ ). On parle de modèle à 3 paramètres.

La tortuosité d'un matériau poreux ( $\alpha_\infty$ ) représente la sinuosité de son réseau de pores. Elle est définie pour un matériau par la relation suivante :

$$\alpha_\infty = \frac{\frac{1}{V} \int_V v^2 dV}{\left(\frac{1}{V} \int_V \vec{v} dV\right)^2} \quad (\text{II.38})$$

Elle peut être représentée en première approximation par le rapport au carré entre la longueur du chemin emprunté par une onde pour le traverser et son épaisseur. Il s'agit donc d'un paramètre sans dimension dont la valeur est supérieure ou égale à 1. Pour les matériaux fibreux, elle reste en générale proche de 1 [Glé 2013],[Luu *et al.* 2017b].

D'autres travaux se sont ensuite succédés afin d'intégrer des formes de pores de plus en plus élaborées. Ainsi, les travaux conduits dans [Johnson *et al.* 1987], intègrent un quatrième paramètre, la longueur caractéristique visqueuse ( $\Lambda$ ) afin d'améliorer la description des effets visco-inertiels. Elle est définie par la relation suivante :

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int_{S_p} \vec{v}^2 dS_p}{\int_{V_p} \vec{v}^2 dV_p} \quad (\text{II.39})$$

Avec  $S_p$  la surface latérale des pores. En général,  $\Lambda$  est utilisé comme estimation du rayon d'étranglement des pores. Dans [Glé 2013] les valeurs de  $\Lambda$  sont de l'ordre de quelques dizaines ou centaines de micromètres pour les laines végétales.

Un cinquième paramètre, la longueur caractéristique thermique ( $\Lambda'$ ), est ensuite introduit dans [Champoux & Allard 1991] pour améliorer la description des effets thermiques. Ce paramètre est défini par la relation suivante :

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{\int_{S_p} dS_p}{\int_V dV} \quad (\text{II.40})$$

Par analogie avec  $\Lambda$ ,  $\Lambda'$  est utilisé pour estimer la dimension des élargissements des pores. En général, pour les matériaux tels que les laines végétales sa valeur est de l'ordre du double de  $\Lambda$ .

Enfin, les travaux menés dans [Lafarge *et al.* 1997] permettent de découpler totalement les effets visco-inertiels des effets thermiques par l'introduction de la perméabilité thermique statique ( $\Xi_0$ ) dans l'expression du module d'incompressibilité dynamique.  $\Xi_0$  est un paramètre défini par analogie avec la perméabilité visqueuse statique  $\Pi_0$ . Elle peut être assimilée à la facilité d'un matériau à être traversé par un flux thermique. Plus de détails concernant ce paramètre sont données à la Section 3 du Chapitre V.

Ce modèle à 6 paramètres est communément appelé dans la littérature, modèle de Johnson-Champoux-Allard-Lafarge ou modèle JCAL. Les paramètres qui viennent d'être détaillés sont nommés de manière générique, dans la suite du mémoire, les paramètres acoustiques. Les expressions de la densité dynamique et du module d'incompressibilité sont données par les relations suivantes :

$$\rho(\omega) = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[ 1 - \frac{j\sigma\phi}{\omega\alpha_\infty\rho_0} \sqrt{1 + j\frac{4\alpha_\infty^2\mu\rho_0\omega}{\sigma^2\Lambda^2\phi^2}} \right] \quad (\text{II.41})$$

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[ \gamma - (\gamma - 1) \left( 1 - j\frac{8\lambda_0}{\Lambda^2 C_p \rho_0 \omega} \sqrt{1 + j\frac{\Lambda^2 C_p \rho_0 \omega}{16\lambda_0}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (\text{II.42})$$

Les travaux menés dans [Glé 2013] et dans [Piégay 2016] montrent que ce modèle, même s'il n'est pas spécifiquement dédié aux matériaux fibreux, permet d'obtenir des prédictions précises et fiables du coefficient d'absorption acoustique pour les laines végétales.

## II.3 L'identification de méthodes de modélisation en vue d'une approche micro-macro conjointe acoustique et thermique pour les matériaux fibreux

### 3.2.2 Des modèles thermiques s'appuyant sur le couplage des phases solide et fluide

Dans la littérature on trouve de nombreux modèles de la conductivité thermique qui s'appuient sur une approche biphasique (phases fluide et solide) des matériaux. Un certain nombre d'entre eux a été évalué pour deux matériaux fibreux biosourcés, une laine de chanvre dans [El Sawalhi *et al.* 2016] et des laines de type feutre fabriquées à partir de fibres d'écorce (nommées « barkcloth ») dans [Rwawiire *et al.* 2017]. Les déviations relatives entre les caractérisations expérimentales et les prédictions des modèles évalués sont visibles dans le Tableau II.9.

Modèle	Laine chanvre [El Sawalhi <i>et al.</i> 2016]	Barkcloth [Rwawiire <i>et al.</i> 2017]	Références
Serie	-38%	-66%	[Cérézo 2005]
Parallèle	+72%	-35%	[Cérézo 2005]
Géométrique	-26%	-51%	[Lichtenecker 1924]
Willye & Southwick	(-17%) - (+60%)	/	[Wyllie & Southwick 1954]
Krischer & Kröll	(-32%) - (+15%)	/	[Krischer & Kroll 1956]
Halpin-Tsai	-34%	/	[Goyal <i>et al.</i> 2008]
Lewis-Nielsen	-24%	/	[Pal 2008]
Maxwell sphères solides	/	-79%	[Maxwell 1873]
Maxwell sphères fluides	+40%	/	[Maxwell 1873]
Cheng & Vachon	/	-5%	[Cheng & Vachon 1969]
SCM (2 phases)	+45%	/	[Boutin 1996]

**Tableau II.9** – Ecart relatif entre la conductivité thermique modélisée et les caractérisations expérimentales d'une laine de chanvre [El Sawalhi *et al.* 2016] et du matériau « barkcloth » [Rwawiire *et al.* 2017]

Les deux approches biphasiques de base les plus couramment utilisés sont le modèle série et le modèle parallèle. Dans le premier cas, le flux de chaleur passe successivement à travers la phase fluide puis à travers la phase solide. Cette modélisation confère une part prépondérante à la phase fluide et a en général tendance à sous-estimer la conductivité thermique équivalente. Dans le deuxième cas, le flux de chaleur passe simultanément dans les deux phases.

Dans la littérature, on retrouve de nombreuses adaptations s'appuyant sur des combinaisons de ces deux modèles, tels que les modèles géométrique [Lichtenecker 1924], de Willye et Southwick [Wyllie & Southwick 1954] ou encore celui de Krischer et Kröll [Krischer & Kroll 1956]. Néanmoins, comme cela est montré par le Tableau II.9, toutes ces approches semblent présenter des écarts relativement importants avec les mesures expérimentales. Cela peut s'expliquer par le fait que ces approches ne prennent pas en compte la morphologie caractéristique de la phase solide des matériaux, même si pour le cas des modèles de Willye et Southwick, ainsi que celui



de Krischer et Kröll [Krischer & Kroll 1956] l'anisotropie est retranscrite.

D'autres modèles s'appuyant sur des géométries sphériques ont été évalués par les deux références [El Sawalhi *et al.* 2016] et [Rwawiire *et al.* 2017]. Ainsi, les modèles de Halpin-Tsai [Goyal *et al.* 2008] et Lewis-Nielsen [Pal 2008] sont dédiés à des particules isotropes. Ils semblent sous-estimer la conductivité thermique de la laine de chanvre comme le montre le Tableau II.9. Les deux modèles de Maxwell [Maxwell 1873], correspondant respectivement à des sphères solides dans une phase fluide et à des sphères fluides dans une phase solide, semblent sous-estimer la valeur de conductivité thermique dans le premier cas, et la surestimer dans le deuxième. Cela peut s'expliquer par le fait que la modélisation d'un milieu isotrope reposant sur des géométries sphériques n'est pas adaptée au cas de matériaux fibreux anisotropes.

Les travaux de [Rwawiire *et al.* 2017] conduisent finalement à identifier le modèle de Cheng et Vachon [Cheng & Vachon 1969] comme le plus approprié. Néanmoins, comme les modèles précédents, il ne s'appuie pas sur des paramètres de la microstructure des matériaux.

Les travaux menés dans [El Sawalhi *et al.* 2016] évaluent également un modèle HAC pour une géométrie sphérique. Son analyse est développée à la Section 3.2.5 de ce chapitre. Enfin, l'auteur de cet article considère que le modèle, qu'il a adapté d'une approche numérique s'appuyant sur des modélisations 3D à partir d'images tomographiques, est le plus pertinent pour déterminer la conductivité thermique de la laine de chanvre étudiée. Cette approche est discutée à la Section 3.2.4 de ce chapitre.

### 3.2.3 Des modèles acoustiques empiriques spécifiques aux matériaux fibreux

Un des premiers modèles empiriques élaboré pour les matériaux fibreux est celui de Delany-Bazley [Delany & Bazley 1970]. Ce modèle a été développé en s'appuyant sur des caractérisations du comportement acoustique de laines minérales, présentant des diamètres de fibres généralement inférieurs à  $10 \mu\text{m}$ . Il est valable pour des matériaux possédant une porosité proche de 100% et dont la résistivité vérifie  $0,01 < \frac{\rho_0 f}{\sigma} < 1$ . Néanmoins, il peut parfois conduire, pour des basses fréquences, à des valeurs négatives de la partie réelle de l'impédance de surface ( $Z_s$ ). Ce modèle très utilisé dans la littérature a été adapté pour une plus grande plage de fréquences dans [Mechel 1976]. D'autres travaux exposés dans [Miki 1990] ont apporté des corrections aux constantes initialement déterminées par Delany et Bazley, permettant ainsi de pouvoir utiliser le modèle pour des matériaux multicouches. Ce sont ces expressions corrigées de la densité

## II.3 L'identification de méthodes de modélisation en vue d'une approche micro-macro conjointe acoustique et thermique pour les matériaux fibreux

---

dynamique et du module d'incompressibilité dynamique qu'il convient d'utiliser :

$$Zc = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 0,07 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,632} - j0,107 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,632} \right] \quad (\text{II.43})$$

$$k = \frac{\omega}{c_0} \left[ 1 + 0,108 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,618} - j0,160 \left( \frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0,618} \right] \quad (\text{II.44})$$

Ce modèle peut ainsi servir de référence afin de comparer les prédictions des modèles acoustiques développés dans le cadre de cette thèse.

### 3.2.4 Des modélisations s'appuyant sur des approches d'homogénéisation micro-macro

[Perrot 2006] introduit les méthodes d'homogénéisation comme des techniques mathématiques permettant de relier les propriétés des constituants d'un milieu hétérogène à l'échelle de la microstructure aux propriétés du milieu macroscopique. La technique consiste à définir un milieu homogène qui est équivalent au milieu hétérogène à l'échelle macroscopique. [Cérézo 2005] précise que pour déterminer les caractéristiques du matériau homogène, ce dernier doit présenter le même comportement mécanique global, ainsi que répondre aux mêmes conditions aux limites que le milieu hétérogène. Le principe de consistance énergétique doit également être respecté entre le milieu hétérogène et le milieu homogénéisé.

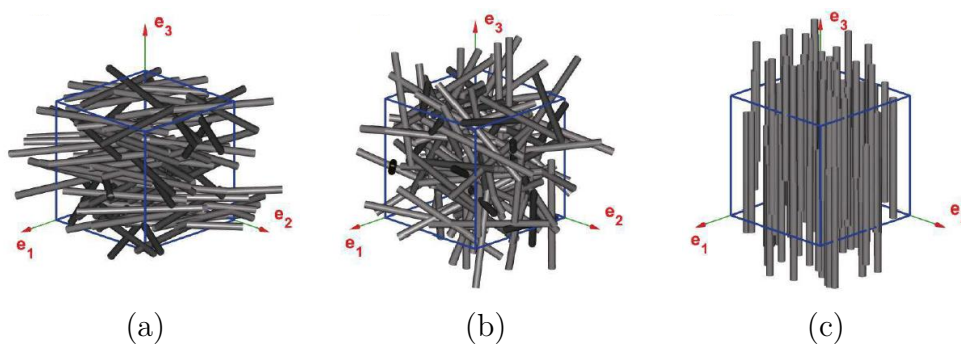
[Auriault 1991] précise également que la mise en œuvre des techniques d'homogénéisation nécessite un volume élémentaire représentatif (VER) à partir duquel le matériau est reconstruit. Une seconde condition est relative au respect de la condition de séparation entre les échelles microscopiques et macroscopiques.

Une des méthodes les plus utilisées dans la littérature pour la modélisation des propriétés des isolants poreux est la méthode d'homogénéisation des structures périodiques (HSP), initialement introduite par [Bensoussan *et al.* 1978] et [Sanchez-Palencia 1980]. Dans [Boutin 2000] puis dans [Perrot 2006], il est précisé que cette méthode présente l'avantage de décrire rigoureusement les lois gouvernant les phénomènes de dissipation acoustique à l'échelle macroscopique à partir des équations gouvernant les écoulements visqueux et les échanges thermiques du fluide à l'échelle du pore (respectivement les équations de Navier-Stokes et de la chaleur). De plus, la méthode HSP peut être appliquée quelle que soit la microstructure périodique retenue. Cependant, seule la mise en œuvre de simulations numériques permet la détermination des propriétés acoustiques recherchées en raison de la forte complexité de la propagation du flux à travers les pores. Cette approche est détaillée à la Section 1 du Chapitre V.

Dans le cas des matériaux fibreux, ce type de méthodes a été appliqué dans la littérature à la fois pour la modélisation des phénomènes de propagation et de dissipation acoustique, mais également pour celle des phénomènes de transferts thermiques.

### Modèles acoustiques

Dans le cas de l'acoustique, les travaux menés dans [Perrot 2006] développent une méthode hybride couplant homogénéisation numérique et modèle semi-phénoménologique (JCAL). Cette méthode repose sur une reconstruction 3D d'une cellule élémentaire représentative du milieu poreux. Développée initialement à partir de milieux réticulaires, cette approche a ensuite été adaptée aux milieux fibreux [Perrot *et al.* 2008] afin d'évaluer l'influence de la section des fibres et des tailles de pores sur l'absorption acoustique. Plus récemment, cette méthode hybride a été adaptée pour l'étude de laines de verre dans [He *et al.* 2018], mais également au cas de matériaux fibreux végétaux (fibres d'asclépiades) dans [Luu 2016] avec une reconstruction 3D d'un milieu fibreux aléatoire reposant sur une valeur de rayon de fibres (hypothèse de fibres rectilignes et de section circulaire), la porosité et l'orientation des fibres. La possibilité de faire varier ce dernier paramètre permet de simuler de nombreuses structures fibreuses différentes comme l'illustre la Figure II.12.



**Figure II.12** – (a) Structure avec répartition et orientation aléatoire en 2D (plan  $(e_1, e_2)$ ) des fibres selon des couches parallèles successives, (b) Structure avec répartition aléatoire et orientation en 3D des fibres, (c) Structure aléatoire 1D avec répartition aléatoire et orientation unique des fibres [Luu *et al.* 2017b]

Après reconstruction de la cellule élémentaire, les limites asymptotiques du champ de vitesse en son sein sont déterminées par des calculs numériques s'appuyant sur la méthode des éléments finis. L'absorption acoustique est alors modélisée en utilisant le modèle JCAL, après détermination des paramètres acoustiques présentés à la Section 3.2.1 de ce chapitre, à partir du champ des vitesses. Il est à noter que les travaux de Luu ont conduit à la formulation de relations entre les paramètres du modèle JCAL et les paramètres utilisés pour caractériser le

## II.3 L'identification de méthodes de modélisation en vue d'une approche micro-macro conjointe acoustique et thermique pour les matériaux fibreux

---

squelette (rayon et orientation des fibres, porosité) [Luu *et al.* 2017b].

On peut également évoquer une autre approche, reposant sur la méthode HSP, mise en œuvre dans [Peyrega 2010] pour des matériaux fibreux végétaux. Le volume élémentaire représentatif  $y$  est défini à partir d'images de matériaux fibreux réalisées par tomographie. Cependant, contrairement à la démarche précédente, l'absorption acoustique est déterminée par application de la méthode HSP, sans recours au modèle JCAL, mais moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices concernant le VER, afin d'alléger les simulations numériques. Ces travaux ont permis ensuite d'évaluer l'influence de la taille des fibres et leur répartition dans l'espace [Peyrega & Jeulin 2013].

### Modèles thermiques

En ce qui concerne la modélisation micro-macro des phénomènes de transferts thermiques dans les matériaux fibreux végétaux, les travaux menés dans [Lux 2005] mettent en œuvre la méthode de modélisation HSP pour des isolants fabriqués à partir de fibres de bois. Comme pour les travaux de Peyrega, le VER est obtenu à partir d'images 3D réalisées par tomographie à rayons X [Lux *et al.* 2006]. Malgré l'utilisation d'un grand nombre de paramètres et de simulations numériques complexes, les résultats obtenus, même s'ils sont jugés satisfaisants, laissent apparaître des écarts avec les caractérisations expérimentales réalisées. Néanmoins, ces travaux ont permis de mettre en évidence l'influence de l'orientation et de la distribution du diamètre des fibres sur les propriétés thermiques des matériaux fibreux.

Ces travaux ont par ailleurs été adaptés à des laines de chanvre, comme cela a été évoqué à la Section 3.2.2 de ce chapitre, dans [El Sawalhi 2015]. Le degré de raffinement de la modélisation est accentué par la prise en compte de l'humidité et de transferts couplés de chaleur et de masse. Ces éléments conduisent à une modélisation extrêmement complexe qui nécessite de nombreux traitements numériques.

Un des principaux avantages de ces méthodes réside dans la modélisation relativement fine de la morphologie du squelette. En effet, que ce soit pour les phénomènes acoustiques, comme pour les phénomènes thermiques, cette méthode de modélisation permet de mettre en évidence l'influence de la variation des paramètres de la microstructure sur les propriétés macroscopiques des matériaux.

Cependant, ces techniques présentent également quelques inconvénients. En effet, plus le niveau de détail du VER est important et plus le nombre de paramètres à caractériser à l'échelle de la microstructure augmente, entraînant une complexification de son utilisation. De plus, la mise en œuvre de telles approches est encore alourdie par la nécessité de réaliser de nombreux

calculs numériques. Enfin, même si les propriétés macroscopiques des matériaux sont déterminées à partir des paramètres de la microstructure, il n'y a pas de formalisation de ce lien reposant sur des relations analytiques directes.

Ainsi, afin de pallier ces manques, il est possible d'utiliser la méthode d'homogénéisation auto-cohérente (HAC).

### 3.2.5 Une approche d'homogénéisation auto-cohérente permettant d'obtenir des relations analytiques micro-macro

La méthode d'homogénéisation auto-cohérente [Hashin 1968] est sensiblement différente de la méthode HSP présentée dans la section précédente. Même si les principes des méthodes d'homogénéisation restent les mêmes, la microstructure n'est pas identifiée avec précision comme pour la méthode HSP, mais elle est reproduite par des hétérogénéités génériques. Aussi, il est précisé dans [Boutin 1996] et dans [Cérézo 2005] que l'hypothèse fondamentale sur laquelle repose cette méthode est de considérer que le matériau à l'échelle macroscopique et les paramètres microstructuraux suivent la même loi de comportement. Ainsi, il est possible d'établir des relations analytiques entre les caractéristiques de chaque constituant, mais également leur concentration volumique et les grandeurs macroscopiques. Dans la littérature on trouve à la fois des travaux s'inspirant de cette méthode, des travaux la couplant avec la méthode HSP ou encore l'utilisant de manière directe. Ces différentes approches sont présentées rapidement dans les paragraphes qui suivent. Elles seront détaillées plus amplement dans la suite de ce mémoire, notamment aux Chapitres IV et V.

#### Modèle acoustique d'homogénéisation couplée HSP-HAC

La démarche présentée dans ce paragraphe, qui s'appuie sur [Hashin 1968], a été développée principalement par les travaux de Boutin. Dans [Boutin 2000], il est précisé que cette approche utilise la méthode HSP pour obtenir rigoureusement les lois de comportement des propriétés macroscopiques des matériaux poreux. Cette étape s'affranchit du type de matériaux considéré, que ce soit granulaire, fibreux ou autre.

C'est à la seconde étape, lors de l'application de la méthode HAC que le motif générique élémentaire est défini. Dans le cas des matériaux granulaires, il est modélisé par une inclusion bicomposite sphérique (phase solide incluse dans la phase fluide) et dans le cas des matériaux fibreux, par une inclusion bicomposite cylindrique [Boutin 2000].

Par la suite, les travaux menés sur le développement de cette approche de modélisation se focalisent sur les matériaux granulaires à travers un milieu poreux constitué de sphères poly-

## II.3 L'identification de méthodes de modélisation en vue d'une approche micro-macro conjointe acoustique et thermique pour les matériaux fibreux

---

dispersées. Ainsi, les travaux exposés dans [Boutin & Geindreau 2008] conduisent à la modélisation de la densité dynamique ( $\rho$ ). La résolution mathématique par la méthode HAC permet de conjecturer deux valeurs plausibles qui reposent sur une approche en vitesse ( $\rho - v$ ) et une approche en pression ( $\rho - p$ ). Ces deux solutions constituent des bornes de validité de la densité dynamique. Elles sont complétées par l'approche de vorticité nulle utilis  e par Tarnow et Umnova (modèles décrits au paragraphe suivant)    la place de l'hypothèse de consistance énergétique.

Dans [Boutin & Geindreau 2010], toujours dans le cas des matériaux granulaires, l'approche est globalis  e avec le développement de relations permettant de déterminer le module d'incompressibilité dynamique ( $K$ ), pour lequel une seule valeur plausible est conjectur  e par l'application de la méthode HAC. L'approche est valid  e par comparaison avec des méthodes numériques (  l  ments finis).

**Dans le cadre des objectifs de la thèse, cette approche semble constituer un outil fondamental concernant l'établissement de relations micro-macro. De plus, des développements sont à envisagés pour le cas des matériaux fibreux et notamment en dynamique.**

### Modèle acoustique d'homog  nisation reposant sur une hypothèse de vorticité nulle

En utilisant la philosophie de la méthode HAC, mais en remplaçant le principe de consistance énergétique par une condition de vorticité nulle, des approches ont été d  velopp  es pour les cas des matériaux granulaires dans [Umnova *et al.* 2000] et pour celui des fibreux par Tarnow. Ce modèle, même s'il ne respecte pas le principe de consistance énergétique, reste une référence dans la littérature en ce qui concerne la modélisation des propriétés d'absorption acoustique des matériaux fibreux.

Le modèle global est décrit à travers trois publications scientifiques. Ainsi, dans [Tarnow 1996] des relations sont établies entre résistivité du matériau, rayon de fibres et porositt  . Dans [Tarnow 1997a] il développe la relation liant la résistivité à la densité dynamique. Enfin, les travaux menés dans [Tarnow 1997b] proposent des relations permettant de calculer le module d'incompressibilité dynamique.

L'approche repose sur un VER constitué de fibres cylindriques rectilignes, possédant une section constante et étant parallèles entre elles. Deux types de distributions sont ensuite d  velopp  es, une régulière avec la même distance entre chaque fibre et une seconde avec des distances variant entre chaque fibre. Deux types de flux d'air sont également modélisés, le premier parallèle aux fibres et le second perpendiculaire aux fibres. En prenant en compte les deux

distributions et ces deux types de flux, le modèle propose donc quatre configurations possibles.

Le cas présentant une distribution aléatoire avec un flux perpendiculaire est celui qui présente les meilleurs résultats pour les laines végétales, comme cela a été montré dans [Glé 2013], puis confirmé dans [Piégay 2016]. Il est explicité plus en détail à la Section 4.1.1 du Chapitre III.

### Méthode HAC utilisée pour la modélisation de la conductivité thermique équivalente des matériaux granulaires

La méthode HAC a été mise en œuvre dans [Boutin 1996] pour la modélisation de la conductivité thermique équivalente d'un béton cellulaire. Elle a ensuite été utilisée dans [Cérézo 2005] pour déterminer les propriétés thermiques de bétons de chanvre. Les relations déterminées dans ces travaux l'ont été pour des inclusions bicomposantes et tricomposantes avec introduction d'une phase liquide. Dans le cas de la modélisation tricomposante, il s'avère que l'influence de l'eau est sous-estimée dans les prédictions du modèle par comparaison avec des valeurs obtenues par caractérisation expérimentale, notamment pour le cas du béton cellulaire.

Comme cela a été évoqué à la Section 3.2.2 de ce chapitre, [El Sawalhi *et al.* 2016] a évalué cette approche dans le cas d'une laine de chanvre. L'écart relatif entre la conductivité thermique modélisée et celle caractérisée expérimentalement est relativement éloigné, comme le montre le Tableau II.9. Cependant, il convient de prendre du recul par rapport à ce résultat, notamment en ce qui concerne la valeur de conductivité thermique de la phase solide utilisée correspondant à des fibres de bois (1.3.4). **Malgré tout, afin de mieux prendre en compte la morphologie des fibres et le caractère anisotrope des laines végétales, il semble pertinent de s'appuyer sur cette approche pour l'adapter au cas d'une géométrie cylindrique.**

Pour conclure, le recensement des approches de modélisation conduisant à la détermination des performances acoustiques et thermiques des matériaux poreux a permis d'identifier deux types d'approches micro-macro possibles.

Le premier repose sur une définition fine du VER mais nécessite la mise en œuvre de moyens conséquents pour la caractérisation des paramètres de la microstructure et la résolution de simulations numériques. En outre, les résultats ne sont pas toujours aussi satisfaisants que ce qui était escompté compte tenu de la lourdeur de telles démarches.

Le second fait le choix de configurations de VER simplifiées, ce qui permet l'obtention de relations analytiques entre les paramètres de la microstructure et les propriétés macroscopiques des matériaux.

Compte tenu des objectifs fixés dans le cadre de cette thèse, les démarches s'appuyant sur

## II.3 L'identification de méthodes de modélisation en vue d'une approche micro-macro conjointe acoustique et thermique pour les matériaux fibreux

---

l'homogénéisation auto-cohérente semblent constituer un bon compromis en offrant la possibilité d'une approche de modélisation conjointe acoustique et thermique. Elle offre également la possibilité de conjecturer des prédictions à partir de l'établissement de relations analytiques. Néanmoins, excepté pour le modèle de Tarnow, les démarches sont à adapter au cas des matériaux fibreux.

D'autres modèles liés au comportement des matériaux ou à la prise en compte de phénomènes influençant leurs propriétés peuvent également être recensés afin de compléter les démarches de modélisation déjà identifiées.

### 3.3 Les modèles de références concernant le comportement élastique et la compression des matériaux poreux

Cette partie recense des modèles considérés comme des références dans la littérature dans le cadre de la prise en compte de phénomènes pouvant influencer sur le comportement et les performances des laines végétales.

#### 3.3.1 Modélisation des comportements limp et poro-élastiques de la matrice solide

A la Section 2.1.1 de ce chapitre, l'hypothèse d'un squelette rigide a été formulée. Cependant, cette hypothèse n'est pas toujours valable et il existe deux autres types de comportement pour la phase solide d'un matériau poreux. Ainsi, outre l'hypothèse d'un squelette rigide, ce dernier peut être considéré comme élastique ou présenter un comportement dit « limp », qui pourrait se traduire par « flexible » et qui correspond à une simplification du cas élastique pour de faibles masses volumiques.

#### Prise en compte du comportement limp

Ce comportement peut s'observer pour des matériaux très légers (faible masse volumique) ou de très faible épaisseur ( $< 10 \text{ mm}$ ). Ce qui peut être le cas pour les laines végétales.

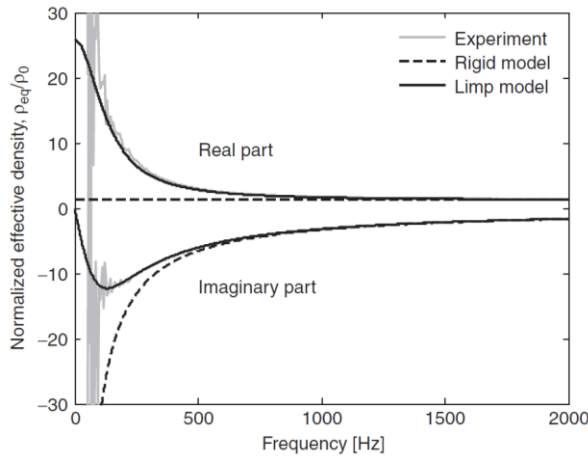
Dans [Panneton 2007] il est précisé que comme pour le cas rigide, seule l'onde de compression dans la phase fluide est prise en compte. Ainsi, l'Equation II.18 de propagation d'une onde sonore reste identique. Cependant, alors que le module d'incompressibilité dynamique reste le même, la densité dynamique du comportement limp ( $\rho_{limp}$ ) est exprimée par la relation



suivante :

$$\rho_{limp} = \frac{\rho(\rho_a + \phi\rho_0) - \rho_0^2}{(\rho_a + \phi\rho_0) + \rho - 2\rho_0} \quad (\text{II.45})$$

L'effet du comportement limp va ainsi avoir une influence sur la partie imaginaire de la densité dynamique pour les basses fréquences, comme l'illustre la Figure II.13.



**Figure II.13** – Comparaison de la densité normalisée pour un matériau fibreux léger ( $\rho = 30 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $e = 50 \text{ mm}$ ) entre un comportement rigide, limp et des mesures expérimentales ([Panneton 2007])

Il est à noter que dans [Doutres *et al.* 2007], un paramètre (FSI pour Frame Stiffness Influence) est défini pour évaluer le caractère de rigidité d'un matériau et le classer le cas échéant dans la catégorie limp. Toutefois, la détermination de ce paramètre nécessite la mise en œuvre de la théorie de Biot sur laquelle repose le cas d'un squelette élastique.

### Prise en compte du comportement poro-élastique

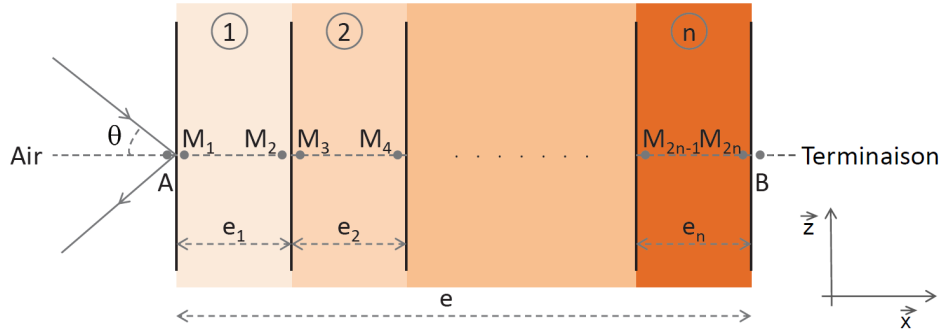
Dans ce cas, la propagation de l'onde dans le matériau est plus complexe à modéliser, du fait que deux ondes de compression et une onde de cisaillement sont maintenant à prendre en compte [Biot 1956a, Biot 1956b], comme cela a été présenté à la Section 2.1.1.

Ainsi, l'équation de propagation établie dans le cas d'un squelette rigide devient un système à trois équations. La théorie de Biot définit alors trois densités dynamiques et trois modules d'incompressibilité qui sont déterminés à partir de la masse volumique apparente du matériau, sa porosité, sa résistivité, sa tortuosité, ainsi que le module d'Young ( $E$ ) et le coefficient de Poisson ( $\nu$ ).

Il est alors possible d'utiliser la méthode des matrices de transfert (TMM pour Transfer Matrix Method), décrite dans [Allard & Atalla 2009] pour déterminer le coefficient d'absorption

## II.3 L'identification de méthodes de modélisation en vue d'une approche micro-macro conjointe acoustique et thermique pour les matériaux fibreux

acoustique d'un matériau poreux. Il est à noter que cette méthode a été développée pour des structures multicouches supposées homogènes et isotropes. La Figure II.14 représente ainsi le cas d'un matériau à  $n$  couches.



**Figure II.14** – Représentation d'une structure à  $n$  couches ([Glé 2013]).

La propagation d'une onde plane d'incidence  $\theta$  est décrite en un point  $M$  par le champ acoustique représenté par un vecteur  $\vec{V}(M)$ . De plus, pour chaque couche  $i$  une matrice de transfert  $[T_i]$  est définie et se trouve liée au champ acoustique par la relation :

$$\vec{V}(M_{2i-1}) = [T_i] \vec{V}(M_{2i}) \quad (\text{II.46})$$

Dans le cadre de cette thèse, seules des couches de matériaux caractérisées par un comportement fluide-équivalent ou poroélastique sont utilisées. Les résultats de l'utilisation de cette méthode de modélisation sont présentés à la Section 5.2 du Chapitre III de ce mémoire.

Dans le cas où les matériaux subissent une contrainte de compression, il est également possible de s'appuyer sur des modèles éprouvés de la littérature.

### 3.3.2 Modélisation de la compression

Dans le cadre de la modélisation des effets de compression sur les propriétés acoustiques des matériaux poreux, de nombreuses références de la littérature s'appuient sur les travaux menés dans [Castagnède *et al.* 2000]. Des relations permettent ainsi de déterminer les valeurs des cinq premiers paramètres du modèle JCAL ( $\phi, \sigma, \alpha_\infty, \Lambda$  et  $\Lambda'$ ) à partir d'un taux de compression  $n = e/e_{comp}$  ( $e_{comp}$  correspondant à l'épaisseur du matériau comprimé). La connaissance des cinq paramètres à l'état initial est néanmoins nécessaire. En outre, des relations sont proposées pour des compressions 1D et 2D.

Ces relations ont par la suite fait l'objet de comparaisons avec des mesures expérimentales réalisées sur des matériaux poreux de type feutre [Castagnède *et al.* 2001]. Ces caractérisations ont permis de conclure que les résultats présentaient une bonne précision pour la porosité et les longueurs caractéristiques visqueuse et thermique. Ils étaient en revanche moins satisfaisants pour la tortuosité et la résistivité.

Dans [Wang *et al.* 2008], les relations ont été couplées avec la méthode TMM présentée à la section précédente afin de caractériser l'effet de la compression 1D sur l'absorption acoustique de matériaux poroélastiques. Il s'avère que cette adaptation du modèle originel donne de bons résultats pour des matériaux possédant une résistivité relativement élevée.

Le cas de l'influence de la compression sur l'affaiblissement acoustique de matériaux poroélastique a été traité dans [Campolina *et al.* 2012], qui conclut que les relations sont valides uniquement pour des taux de compression faibles.

Pour le cas des matériaux fibreux, des travaux ont été menés dans [Keshavarz & Ohadi 2013] toujours à partir des relations du modèle originel. La méthode TMM a été utilisée pour évaluer l'effet de l'angle d'incidence sur les propriétés acoustiques de laines de verre. Les paramètres physiques comprimés ont été donnés dans les directions parallèle et perpendiculaire en considérant des fibres assimilées à des cylindres parallèles.

Enfin, plus récemment les travaux menés dans [Lei *et al.* 2018] ont abouti à l'établissement de nouvelles relations pour les paramètres du modèle JCAL, en couplant les relations issues de [Castagnède *et al.* 2000], avec un paramètre d'orientation de fibres et la prise en compte de leur arrangement au sein du matériau.

**Pour conclure, que ce soit pour l'influence du comportement de la phase solide ou celle de la compression sur le comportement des matériaux poreux, des modèles très usités dans la littérature existent. Il est néanmoins nécessaire de confirmer leur validité pour le cas des laines végétales par comparaison avec des résultats de caractérisations expérimentales.**

## 4 Conclusion

Le premier enseignement que l'on peut tirer de cet état de l'art concerne la confirmation du fort potentiel des laines végétales en tant qu'isolant acoustique et thermique du bâtiment. Elles tirent ces propriétés prometteuses, que l'on peut élargir à la mécanique, des caractéristiques propres à leur microstructure. En effet, la particularité des fibres végétales, leurs dimensions,

leur orientation et leur agencement confèrent à ces matériaux un caractère anisotrope, une grande porosité qui va contribuer largement à la dissipation des ondes sonores, ainsi qu'à limiter les transferts de chaleur en leur sein. Le caractère hygroscopique de ces matériaux va également jouer un rôle non négligeable sur leur capacité à capter et à relâcher de l'eau en fonction des interactions entre les laines et les conditions de température et d'humidité relative de leur environnement. Ce caractère, qui est conféré par les fibres végétales, dépend de leur composition chimique et est propre à chaque nature de fibres.

Ces connaissances ont pu être obtenues par des travaux de caractérisation des fibres et des matériaux. Cela conduit au deuxième point important à souligner et qui concerne la nécessité de compléter et d'enrichir les données expérimentales sur les matériaux, leur microstructure et les propriétés qui leur sont liées. En effet, même si des données existent dans la littérature, le constat général fait état de leur répartition inégale d'un domaine à l'autre, de résultats parfois contradictoires, manquant d'informations concernant les conditions d'obtention. De plus, les données sont souvent obtenues de manière indirecte en faisant d'importantes hypothèses. Ce constat semble plus marqué pour les matériaux fibreux dont font partie les laines végétales en comparaison des matériaux granulaires, plus étudiés dans la littérature.

Malgré cet état de fait constaté également dans le cadre des approches de modélisation micro-macro, des démarches, pouvant être mises en œuvre directement pour les laines végétales, ont pu être recensées dans la littérature. Des perspectives s'ouvrent également concernant l'adaptation, au cas des milieux fibreux, de démarches utilisant l'homogénéisation auto-cohérente ou la couplant avec l'homogénéisation des structures périodiques. L'objectif étant d'obtenir des relations analytiques entre les paramètres de la microstructure et les propriétés macroscopiques des matériaux fibreux. Cela offre de surcroît l'opportunité de mener une démarche de modélisation conjointe acoustique et thermique inédite pour les isolants fibreux tels que les laines végétales.

En effet, les rares travaux de caractérisation des performances acoustiques et thermiques des matériaux fibreux qui existent dans la littérature les présentent toujours de manière décorrélée sans chercher de liens entre eux. Aussi, dans la suite de ce mémoire, même si le troisième chapitre est davantage centré sur la caractérisation et la modélisation des phénomènes acoustiques et le quatrième sur le volet thermique, il est nécessaire de souligner, dans la mesure du possible, les corrélations entre l'acoustique et la thermique. Ce fil directeur conduit le mémoire jusqu'au cinquième et dernier chapitre, qui se charge de faire la synthèse de l'approche conjointe développée dans le cadre de cette thèse.



---

# Caractérisation et modélisation des performances acoustiques des laines végétales

---

Comme cela vient d'être présenté dans le Chapitre II, les laines végétales tirent leurs spécificités des caractéristiques propres aux fibres végétales qui les composent. Ainsi, les matériaux utilisés dans le cadre de ce travail de thèse sont tout d'abord présentés par famille de fibres végétales.

Ces matériaux sont ensuite caractérisés d'un point de vue expérimental à plusieurs échelles afin de constituer des bases de données sur les paramètres caractéristiques de leur squelette (phase solide), ainsi que sur leurs performances acoustiques. Dans le cadre de ces caractérisations, l'influence de la présence d'eau sur les propriétés acoustiques des matériaux est également évaluée. Toutes ces données sont ensuite analysées et comparées avec les résultats de la littérature identifiés au Chapitre II.

Fort de toutes ces données expérimentales, une démarche de modélisation est alors mise en œuvre à partir du couplage du modèle d'approche micro-macro de Tarnow avec un modèle composite. Cette nouvelle modélisation permet alors de prédire les propriétés acoustiques de matériaux fibreux à partir de deux types de fibres différentes (végétales et polymères).

Après validation de cette modélisation par comparaison avec les résultats expérimentaux, des investigations sont menées concernant les comportements limp et élastiques du squelette des matériaux. Enfin, l'impact de la variation de masse volumique par compression des matériaux est caractérisé expérimentalement et analysé.

# 1 Présentation des fibres et des matériaux de la thèse

Les laines végétales caractérisées dans le cadre de cette thèse correspondent toutes à des panneaux semi-rigides fournis par les sociétés Laroche S.A. (fabricant de lignes industrielles de traitement mécanique des fibres) et Cavac Biomatériaux (filiale du groupe coopératif agricole vendéen Cavac).

Tous ces matériaux sont représentés au sein de neuf familles en fonction des fibres végétales qui les composent. Six d'entre elles correspondent à un seul type de fibres (chanvre, lin, kénaf, bois, coco et ouate de cellulose). Les trois dernières familles de laines sont constituées de plusieurs types de fibres végétales (chanvre-lin, chanvre-lin-coton et bois-kénaf). Pour distinguer tous ces matériaux, un référencement par lettre a été utilisé.

Tous les échantillons de laine étudiés présentent un point commun car ils ont tous été fabriqués par thermoliage, dont le process est présenté à la Section 2.2.3 du Chapitre I. Ainsi, les laines végétales contiennent toutes un pourcentage massique de fibres polymères bicomposantes ajoutées lors de la fabrication des panneaux d'isolants. Elles sont désignées dans la suite du mémoire par fibres polymères ou tout simplement polymères.

Cinq types de fibres végétales et un type de fibres polymères (polyester) utilisés pour la fabrication des panneaux de laines de la thèse ont également pu être caractérisés expérimentalement.

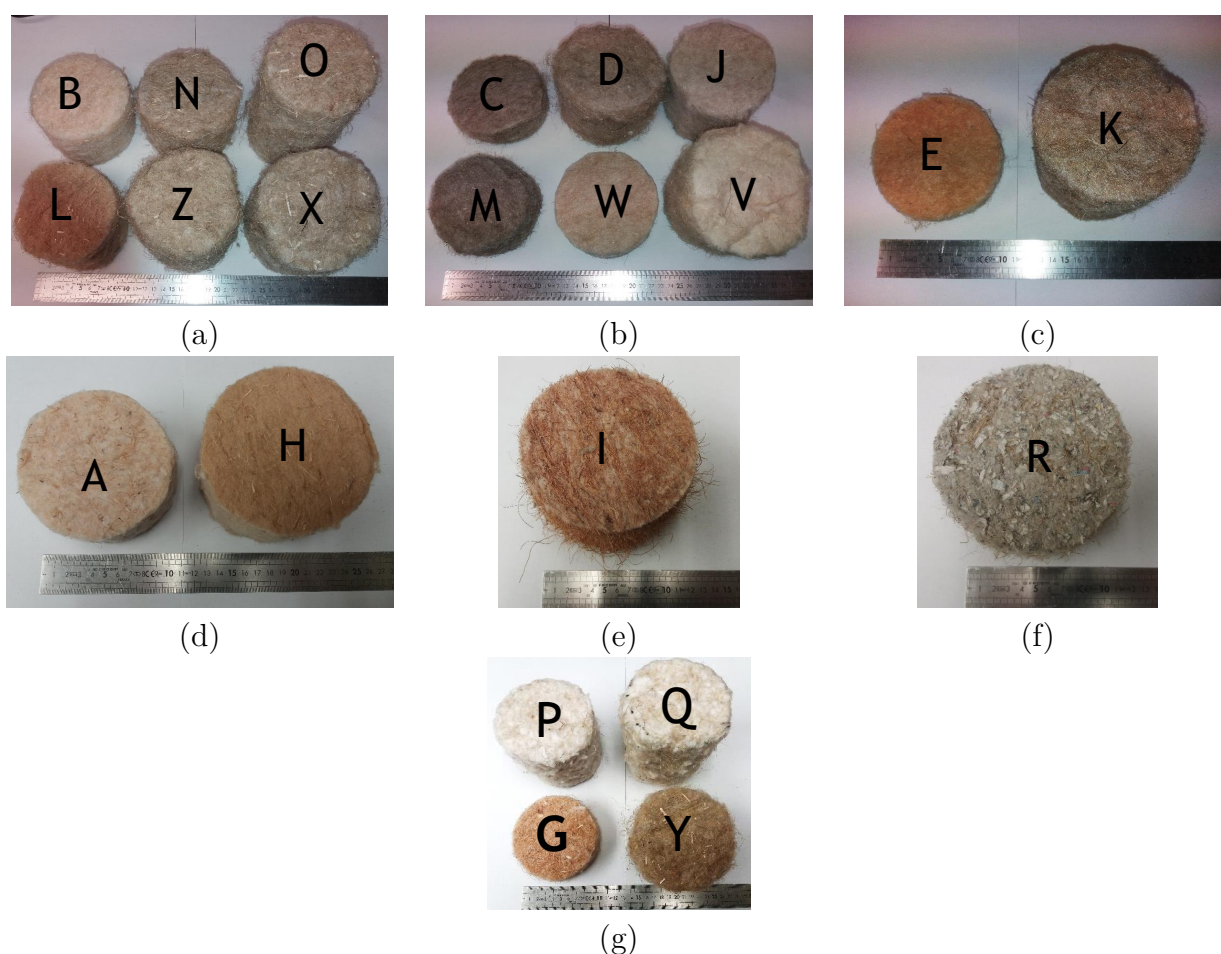
Ainsi, cette section se concentre sur la présentation des principaux protagonistes de ce mémoire à travers la répartition massique de leurs fibres végétales et polymères, leur épaisseur, ainsi que leur masse volumique.

## 1.1 Les panneaux de laines végétales

Des échantillons de matériaux sont présentés par famille de fibres à la Figure III.1. Les matériaux constitués d'un mélange de plusieurs fibres végétales ont été regroupés.

Pour la caractérisation expérimentale des masses volumiques de chaque matériau, quatre échantillons cylindriques de diamètre  $100 \pm 2 \text{ mm}$  sont utilisés. Ces échantillons sont obtenus par découpe de panneaux semi-rigides à l'aide d'une scie à ruban.

Une première campagne d'essais a été réalisée après séchage des échantillons en étuve à  $50^\circ\text{C}$  pendant 120 heures. En effet, au bout de ce laps de temps, en s'appuyant sur la norme NF EN ISO 12571 [NF EN ISO 12571 2000], un suivi de la variation massique journalière des échantillons permet de garantir une évolution inférieure à 0,1% pour tous les matériaux. De plus, une température de séchage relativement basse a été choisie afin de ne pas dégrader les



**Figure III.1** – Echantillons de laines de (a) chanvre, (b) lin, (c) kénafe, (d) bois, (e) coco, (f) ouate de cellulose, (g) G : laine de bois-kénafe, P et Q : laines de chanvre-lin-coton, Y : laine de chanvre-lin

matériaux (Section 1.2.4).

A la sortie de l'étuve ils sont pesés à l'aide d'une balance Mettler Toledo MG203S d'une précision de 0,01 g. **Dans la suite de ce mémoire, cette valeur relevée est considérée comme la masse de référence des échantillons de matériaux.**

Une seconde campagne de caractérisation des masses des matériaux a ensuite été réalisée dans les conditions de température et d'humidité relative du laboratoire d'essais. Ces conditions sont maintenues à une température ( $T$ ) de  $25 \pm 0,8^\circ\text{C}$  et une humidité relative ( $HR$ ) de  $40 \pm 2\%$ . Ces deux conditions ont été retenues car elles sont relativement représentatives de celles que l'on peut trouver dans le domaine du bâtiment. Les échantillons ont été pesés après une stabilisation de 48 h dans ces conditions de température et d'humidité relative. Le relevé de leur masse a été effectué à l'aide d'une balance Mettler Toledo ME 1002E d'une précision de 0,1 g.



Les résultats de ces caractérisations, ainsi que l'épaisseur et la composition massique des fibres végétales et polymères fournies par les fabricants pour les différents matériaux de la thèse, sont présentés dans le Tableau III.1.

Type de laine	Réf.	Compo. massique Veg / Pol	Epaisseur (mm)	$\rho_a$ ( $kg.m^{-3}$ )	$\rho_a$ ( $kg.m^{-3}$ )
				HR = 0%	HR = 40%
Chanvre	B	85 / 15	90	$25,3 \pm 1,0$	$26,3 \pm 0,8$
	L	80 / 20	90	$28,9 \pm 0,5$	$30,6 \pm 0,5$
	N	90 / 10	100	$38,9 \pm 2,9$	$40,8 \pm 2,7$
	O	90 / 10	140	$37,1 \pm 0,7$	$39,3 \pm 0,9$
	X	85 / 15	100	$44,5 \pm 0,6$	$46,0 \pm 2,6$
	Z	85 / 15	80	$35,7 \pm 0,8$	$37,2 \pm 1,8$
Lin	C	85 / 15	50	$33,6 \pm 1,0$	$34,9 \pm 1,3$
	D	85 / 15	90	$30,6 \pm 1,6$	$31,7 \pm 1,6$
	J	80 / 20	90	$31,7 \pm 0,4$	$33,0 \pm 0,5$
	M	85 / 15	55	$25,4 \pm 1,1$	$26,6 \pm 1,1$
	V	88 / 12	100	$47,1 \pm 1,4$	$49,8 \pm 1,0$
	W	88 / 12	40	$43,8 \pm 2,4$	$45,4 \pm 2,6$
Kénaif	E	80 / 20	25	$37,6 \pm 1,8$	$39,0 \pm 2,0$
	K	80 / 20	100	$27,4 \pm 1,2$	$28,8 \pm 1,3$
Bois	A	85 / 15	50	$57,4 \pm 0,5$	$58,8 \pm 0,9$
	H	88 / 12	100	$40,2 \pm 1,0$	$42,0 \pm 1,0$
Coco	I	70 / 30	105	$93,8 \pm 5,2$	$96,8 \pm 5,4$
Ouate	R	85 / 15	100	$43,0 \pm 1,9$	$45,2 \pm 1,9$
Bois-kénaif	G	40 / 40 / 20	40	$50,7 \pm 4,4$	$53,2 \pm 4,7$
Chanvre-lin-coton	P	92 / 8	100	$29,6 \pm 0,3$	$30,8 \pm 0,4$
	Q	92 / 8	160	$26,2 \pm 1,0$	$27,3 \pm 1,0$
Chanvre-lin	Y	45 / 45 / 10	100	$32,1 \pm 0,7$	$34,1 \pm 0,8$

**Tableau III.1** – Nomenclature et caractéristiques des laines végétales

Ce sont donc vingt-deux matériaux répartis en neuf types de laines végétales (basés sur le type de fibres végétales) qui sont utilisés dans le cadre de ce travail de thèse. Comme l'illustre les données du Tableau III.1, ce grand nombre de matériaux offre des plages importantes en termes de proportion massique de fibres végétales [70 – 92%], d'épaisseurs [25 – 160 mm] et de masse volumique [ $25,3 - 93,8 kg.m^{-3}$ ] pour  $HR = 0\%$  et [ $26,3 - 96,8 kg.m^{-3}$ ] pour  $HR = 40\%$ . On observe, d'ores et déjà l'influence de l'eau sur ces matériaux par l'augmentation de la masse volumique de l'ordre de 2 à 6% lorsqu'ils sont pesés dans un environnement à  $HR = 40\%$ .

Les laines de chanvre et de lin avec six représentants pour chacune d'elles sont les types de matériaux les plus représentés. Ce grand nombre de matériaux offre l'opportunité d'évaluer l'influence de leurs caractéristiques sur leurs propriétés acoustiques et thermiques. Leurs échan-

tillons sont visibles respectivement aux Figures III.1(a) et (b). Il est à noter que les laines C et J correspondent à des fibres de lin cotonisées qui sont obtenues par un traitement supplémentaire lors des opérations de teillage qui consiste à raccourcir la fibre et l'affiner pour lui conférer des caractéristiques proches de celles des fibres de coton. De plus, les matériaux qui présentent des paramètres communs, comme la composition massique des fibres, l'épaisseur ou la masse volumique, peuvent être comparés plus aisément. En effet, il est intéressant de comparer les propriétés des laines de chanvre et de lin car leurs fibres végétales présentent de nombreuses similitudes, comme cela a été énoncé à la Section 1.2 du Chapitre II.

Pour les laines de kénaif et de bois, dont les échantillons sont présents respectivement aux Figures III.1(c) et (d), elles possèdent deux représentants aux caractéristiques différentes. Pour le kénaif, la laine (E) présente l'épaisseur la plus faible de tous les échantillons caractérisés dans cette thèse (25 mm), mais possède une masse volumique supérieure à celle du matériau (K), comme l'illustre le Tableau III.1. Pour le bois également, le matériau (A) est moins épais mais plus dense que le matériau (H).

La laine de coco, dont un échantillon est visible à la Figure III.1(e), apporte une petite touche d'exotisme. Ce matériau présente la particularité d'avoir la masse volumique la plus élevée de tous les échantillons de la thèse ( $96,8 \text{ kg.m}^{-3}$  pour  $HR = 40\%$ ). Elle présente également la proportion massique la plus élevée en fibres polymères avec 30%.

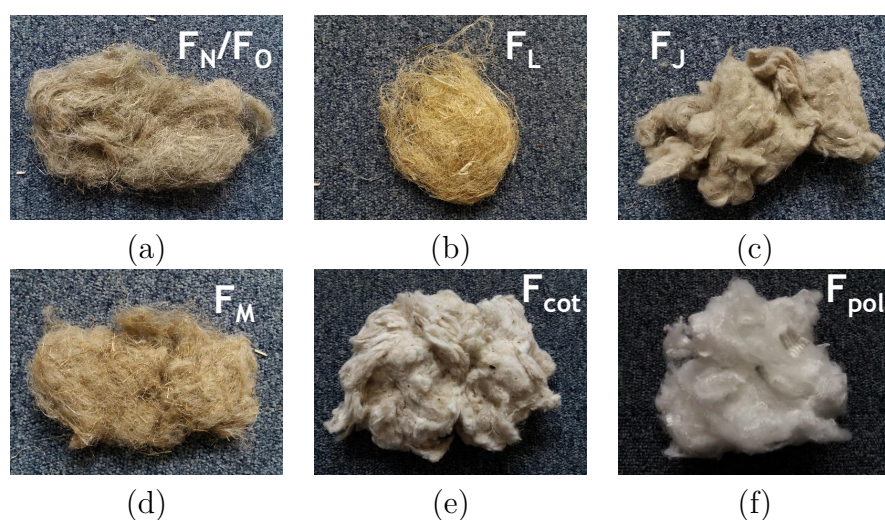
Pour les laines de bois et de coco, leurs caractérisations expérimentales va permettre de constater si les spécificités de leurs fibres (Section 1.2 du Chapitre II), notamment en termes de composition chimique et de masse volumique, se répercutent sur leurs propriétés acoustiques et thermiques.

Un échantillon d'ouate de cellulose, qui est le seul matériau fabriqué à partir de papier et de carton recyclés est présenté à la Figure III.1(f).

Enfin, il est également possible de caractériser les performances de matériaux constitués de mélanges de fibres végétales avec les laines (G), (P), (Q) et (Y), dont les échantillons sont visibles à la Figure III.1(g). Il est à noter que pour le mélange Chanvre-lin-coton, les laines (P) et (Q) diffèrent uniquement par leur épaisseur. Pour ce type de laine, il est particulièrement intéressant de caractériser l'influence de l'ajout de fibres de coton sur les performances acoustiques et thermiques. En effet, comme cela a été présenté à la Section 1 du Chapitre II, il semble qu'elles présentent une masse volumique supérieure à celles du chanvre et du lin et un caractère hygroscopique moins marqué.

### 1.2 Les fibres végétales

Pour certains matériaux présentés dans la Section 1.1 précédente, des fibres végétales et polymères, en vrac, utilisées pour leur fabrication sont disponibles. Elles sont référencées en plaçant un F devant la lettre du matériau correspondant. Les différents types de fibres sont présentés à la Figure III.2.



**Figure III.2** – Fibres de (a) chanvre (N)/(O), (b) chanvre (L), (c) lin cotonisé (J), (d) lin (M), (e) coton (P)/(Q), (f) polyester

La caractérisation de ces fibres présente notamment un intérêt dans la détermination de leur masse volumique afin de les comparer par la suite aux masses volumiques des phases solides des matériaux qui contiennent des pourcentages massiques différents de fibres végétales et polymères. Ces données sont présentées dans le Tableau III.3.

A présent que les acteurs principaux de ce mémoire sont présentés, leurs paramètres, et plus particulièrement ceux de leur phase solide, peuvent être détaillés.

## 2 Caractérisation expérimentale du squelette des matériaux

Dans cette section, c'est tout d'abord à l'échelle des fibres que le squelette est caractérisé. En effet, des images de la microstructure des laines sont réalisées à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB). Ces images sont ensuite analysées puis exploitées pour caractériser

la distribution des rayons de fibres des matériaux.

C'est ensuite les masses volumiques des fibres et du squelette des matériaux qui sont caractérisés expérimentalement à l'aide de trois dispositifs différents. Après une analyse comparative de ces résultats, ils conduisent à la détermination de la porosité ouverte (inter-fibres) des matériaux.

Le paramètre suivant qui est caractérisé expérimentalement est la résistance statique à l'écoulement de l'air.

Enfin, quatre autres paramètres sont déterminés de manière indirecte à l'aide de mesures réalisées avec un tube d'impédance. Il s'agit de la tortuosité, des longueurs caractéristiques visqueuse et thermique, ainsi que de la perméabilité thermique.

### 2.1 Caractérisation des distributions de rayons de fibres

Compte tenu des éléments de la littérature exposés à la Section 1.2.3 du Chapitre II sur les spécificités des fibres végétales, en ce qui concerne notamment leurs morphologies, des images ont été réalisées avec un MEB sur des échantillons de matériaux.

L'analyse de ces images conduit ensuite à choisir une méthode de relevé des dimensions des fibres permettant de retranscrire au mieux les spécificités observées. Un protocole est alors défini en s'appuyant sur la formulation d'un certain nombre d'hypothèses concernant les fibres avant de constituer des banques de données expérimentales.

Les résultats des relevés sont ensuite présentés sous forme d'histogrammes afin d'évaluer la possibilité de les identifier par une loi de distribution. Des valeurs moyennes de rayons de fibres sont également déterminées. Tous ces résultats sont comparés aux quelques données de la littérature, puis analysés en comparant les types de laines entre eux.

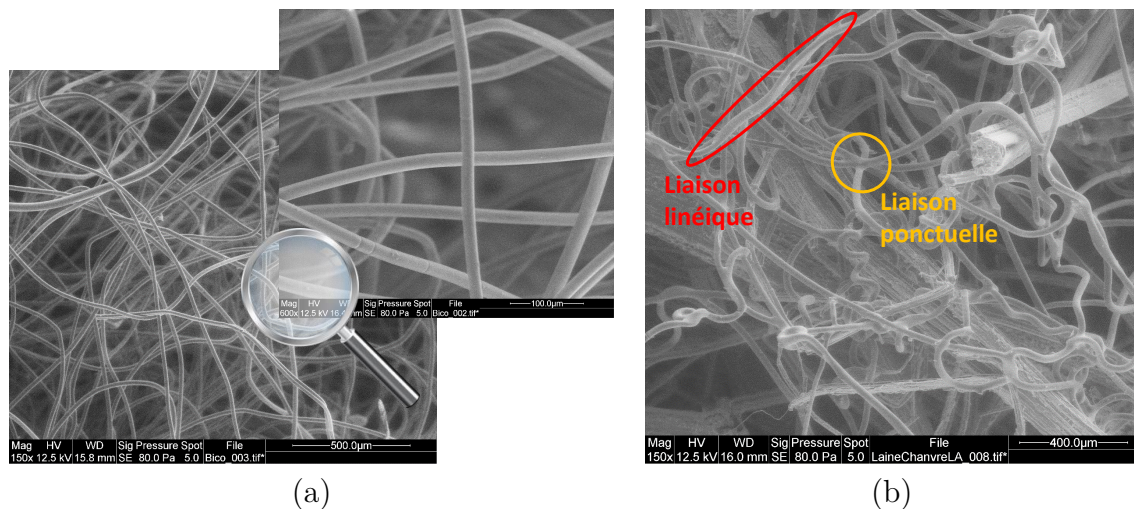
#### 2.1.1 Méthode de caractérisation utilisée

En s'appuyant sur les travaux menés dans [Piégay *et al.* 2018] et les éléments de la littérature exposés à la Section 1.3.1 du Chapitre II, l'utilisation d'un MEB semble être le moyen le plus simple et le plus approprié pour observer les spécificités des fibres composant les laines végétales. Ce type de dispositif a pu être utilisé au cours de la thèse au sein de l'unité MAST/CPDM de l'Ifsttar à Champs-sur-Marne. Son principe de fonctionnement est décrit à l'Annexe A1.

#### Morphologie et spécificités des fibres végétales

La réalisation d'images sur les différents matériaux utilisés dans le cadre de la thèse laissent apparaître un certain nombre de spécificités propres aux fibres constituant les laines végétales.

Il s'agit tout d'abord de distinguer les deux types de fibres. Comme l'illustre la Figure III.3(a), les fibres polymères avant fabrication des matériaux présentent un aspect lisse et uniforme. Elles semblent également relativement souples. Après fabrication, elles forment des réseaux de fibres soudées entre elles, comme le montre la Figure III.3(b). La zone de jonction peut être ponctuelle ou linéique, entraînant dans ce cas une taille supérieure pour l'élément résultant.



**Figure III.3** – Images MEB de fibres polymères (a) avant fabrication des matériaux, (b) après fabrication, dans la laine de chanvre (B)

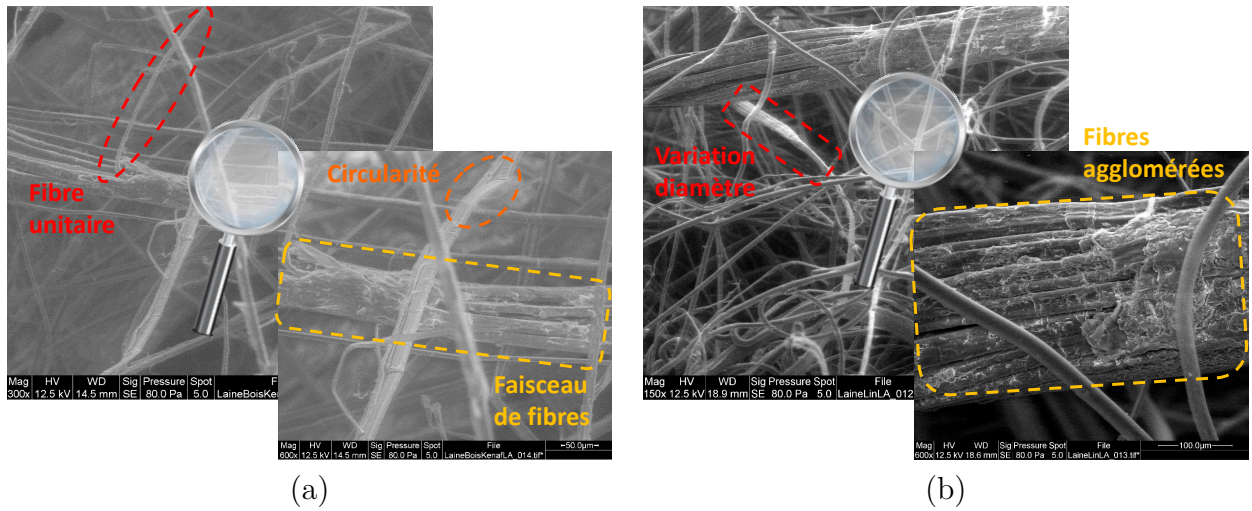
Pour les fibres végétales, la morphologie n'est pas aussi homogène et uniforme. L'analyse des images réalisées au MEB permet d'identifier les spécificités citées précédemment à la Section 1.2.3 du Chapitre II. En effet, les fibres végétales peuvent se présenter sous forme unitaire ou sous forme de faisceaux de fibres pour lesquels les fibres sont agglomérées les une aux autres par les pectines et les hémicelluloses, comme l'illustrent les Figures III.4(a) et (b).

Elles peuvent également présenter des discontinuités au niveau de leur diamètre comme l'illustre la Figure III.4(b).

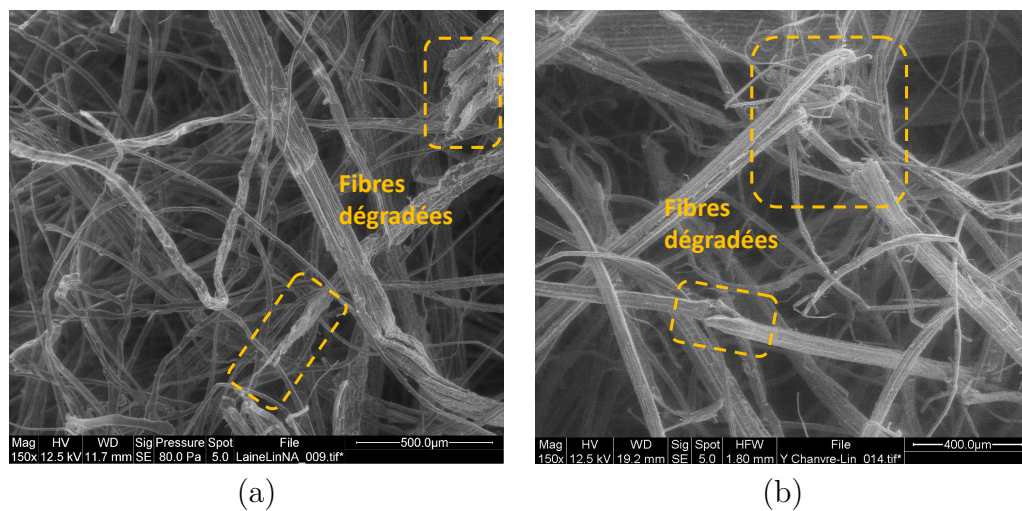
Les faisceaux, quant à eux, peuvent présenter des morphologies diverses avec un degré de circularité moindre que ceux des fibres unitaires comme le montre la Figure III.4(a).

De plus, les fibres végétales peuvent également présenter des zones endommagées. Elles peuvent se trouver aux extrémités qui se décomposent alors en de nombreuses micro-fibres, comme on peut l'observer sur la Figure III.5(a). Elles peuvent également être situées en pleine section de fibre, comme l'illustre la Figure III.5(b).

Enfin, la répartition des fibres n'est pas toujours uniforme et il est possible d'observer,



**Figure III.4** – Images MEB (a) de la laine de lin (D) et (b) de la laine de bois-kénaf (G)

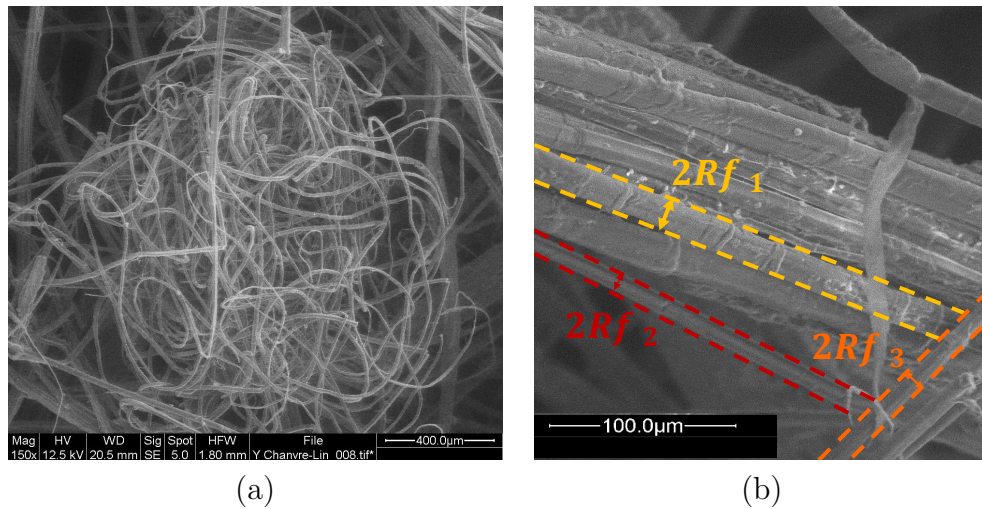


**Figure III.5** – Images MEB (a) de la laine de lin cotonisé (J) et (b) de la laine de chanvre-lin (Y)

comme sur la Figure III.6(a) des zones beaucoup plus denses en fibres.

Cependant, malgré ces nombreuses particularités, de nombreuses fibres unitaires peuvent être assimilées à des fibres cylindriques de rayon quasiment constant comme le montre la Figure III.6(b).

Compte tenu de tous ces éléments et de toutes ces spécificités propres aux laines végétales, il est indispensable de mettre en place un protocole de relevé du diamètre des fibres afin de les mesurer avec fiabilité.



**Figure III.6** – Images MEB (a) de la laine de chanvre-lin (Y) et (b) de la laine de lin (M)

### 2.1.2 Protocole de relevé des rayons de fibres

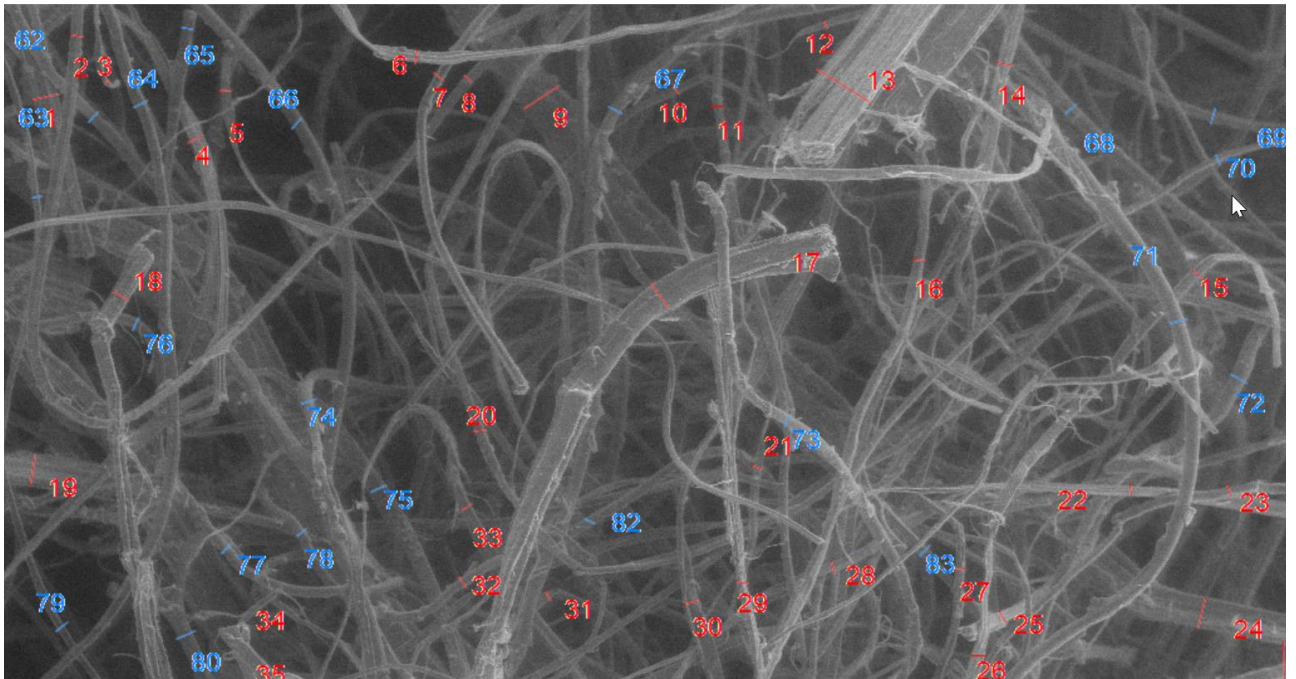
La variabilité extrêmement importante de la taille des fibres végétales, observée à partir des images MEB présentées aux Figures III.3 à III.6, rend le traitement automatisé des tailles de fibres, notamment par logiciel de traitement et d'analyse d'images, comme DiameterJ (plugin ImageJ) très complexe à mettre en œuvre. L'opération de segmentation consistant à traiter les pixels de l'image afin d'identifier les fibres se heurte à cette grande variabilité ainsi qu'à la densité des fibres enchevêtrées. Les relevés automatiques des dimensions de fibres identifiées ne conduisent pas à des résultats aussi représentatifs que ceux réalisés manuellement.

Ainsi, dans le cadre de cette thèse, il a été jugé plus pertinent de mettre en œuvre un relevé manuel concernant le rayon des fibres. Ce choix, qui entraîne une durée beaucoup plus longue de caractérisation, restreint le nombre de matériaux traités mais permet un gain dans la précision des relevés de rayons de fibres. Par ailleurs, c'est ce choix qui a également été fait dans les références bibliographiques identifiées à la Section 1.3.1 du Chapitre II.

Afin de respecter les préconisations énoncées à la Section 1.3.1 du Chapitre II, pour chaque matériau, au moins 300 diamètres de fibres sont relevés à partir d'un minimum de 20 images. De plus, lors du relevé la distinction est faite entre les fibres végétales et polymères.

Le relevé est réalisé à l'aide du logiciel Mesurim ©. Chaque fibre qui peut être clairement identifiée est caractérisée par un diamètre correspondant à une mesure suivant son axe transversal, comme l'illustre la Figure III.7.

Lorsque les fibres présentent un diamètre variable, le diamètre le plus représentatif de la fibre ou du faisceau de fibres est relevé.



**Figure III.7** – Relevé de rayons de fibres avec le logiciel Mesurim © à partir d’images MEB de la laine de chanvre (N). Rouge : fibres végétales - Bleu : fibres polymères.

Même si toutes les fibres ne présentent pas une circularité parfaite, l’hypothèse est faite que les fibres et les faisceaux de fibres sont des cylindres de rayon constant égal à la moitié du diamètre relevé à partir des images MEB, comme l’illustre la Figure III.6(b). Les observations ainsi réalisées sur la circularité des fibres corroborent les résultats des travaux de [Charlet *et al.* 2010a] pour lesquels la circularité de fibres de lin avait été estimée à 0,907. L’hypothèse peut donc être considérée comme acceptable.

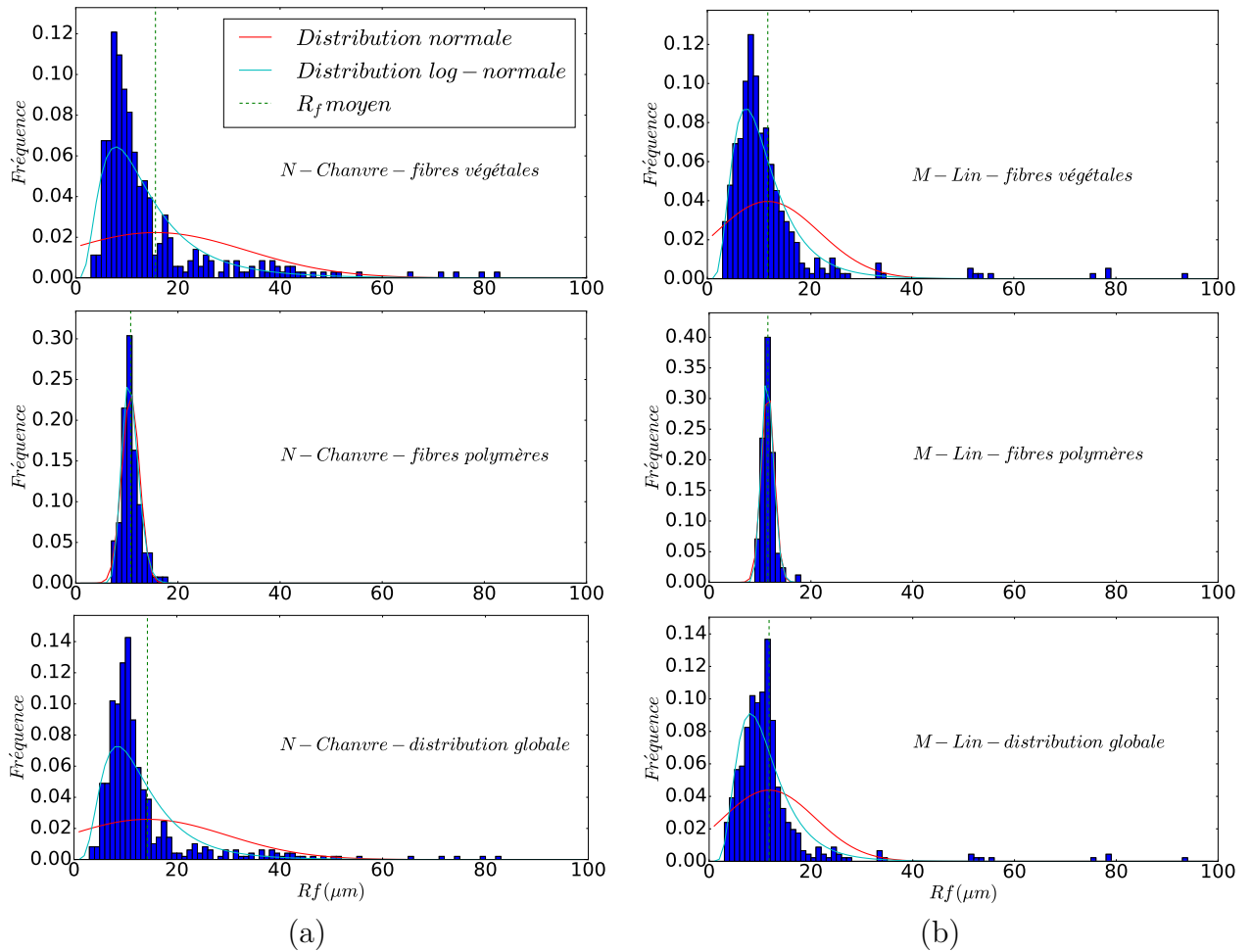
**Dans la suite du mémoire, on parle de rayon de fibres à la fois pour les fibres unitaires mais également pour les faisceaux de fibres.**

### 2.1.3 Résultats et analyses des relevés réalisés

Pour chaque matériau caractérisé, les rayons de fibres relevés sont présentés sous forme de trois histogrammes, comme l’illustre la Figure III.8 pour l’exemple des laines (N) et (M). Le premier représente la distribution des rayons de fibres végétales. Le second représente la distribution des rayons de fibres polymères. Enfin, le dernier représente la distribution globale comprenant les fibres végétales et polymères.

Les histogrammes sont présentés avec un pas pour les rayons de fibres de  $1\ \mu m$ . De plus, la





**Figure III.8** – Histogrammes de distribution de rayons de fibres pour les laines (a) de chanvre (N) et (b) de lin (M)

moyenne arithmétique des rayons pour chaque type de fibres est indiquée sur les histogrammes. Enfin, comme cela a été évoqué à la Section 1.3.1 du Chapitre II, on retrouve l’utilisation dans la littérature de la loi log-normale pour modéliser les distributions de la taille d’éléments constitutifs de la microstructure des matériaux. En effet, ce type de distribution a été utilisé pour des matériaux granulaires dans [Horoshenkov *et al.* 2007] et pour des particules de chanvre dans [Glé 2013]. Cette distribution a également été utilisée pour des matériaux fibreux, comme des laines de verre dans [Kerdudou *et al.* 2015] et pour une laine d’asclépiade dans [Luu *et al.* 2017a]. C’est pourquoi, afin de modéliser les distributions relatives aux tailles de fibres des matériaux caractérisés dans le cadre de la thèse, des lois normales et log-normales sont représentées sur les histogrammes.

### III.2 Caractérisation expérimentale du squelette des matériaux

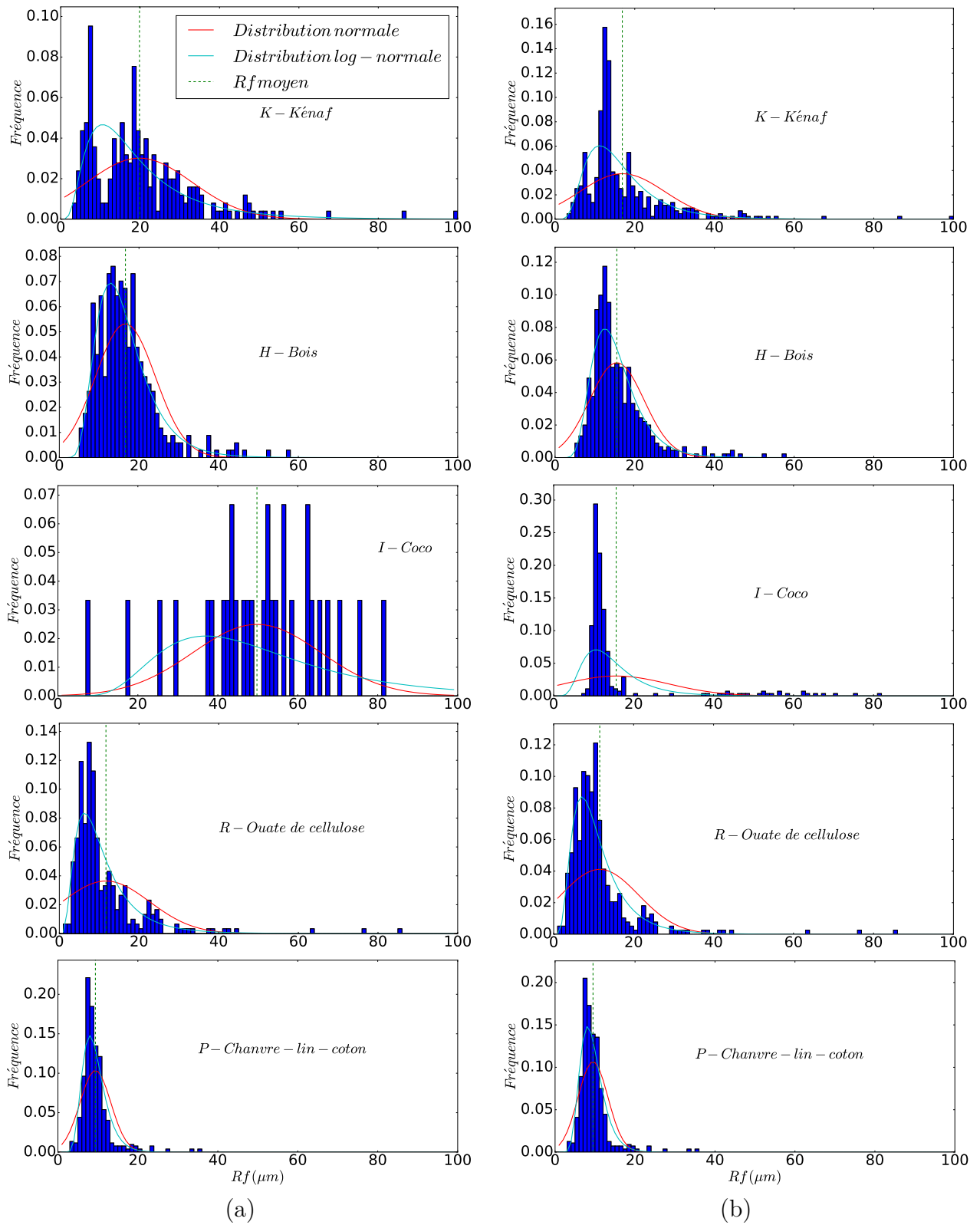


Figure III.9 – Histogrammes de distribution de rayons de fibres (a) végétales, (b) globaux

On observe que sur les figures les distributions de rayons de fibres polymères sont beaucoup plus homogènes que celles des fibres végétales. Ainsi, leur distribution peut être modélisée par une loi normale. Pour les laines de chanvre (N) et de lin (M), dont les distributions sont présentées à la Figure III.8, les rayons moyens sont respectivement de  $10,8 \mu m$  et de  $11,5 \mu m$  avec des écarts-types de  $1,7 \mu m$  et de  $1,3 \mu m$ .

A titre de comparaison les écarts-types pour les fibres végétales (N) et (M) sont respectivement de  $17,9 \mu m$  et de  $10,1 \mu m$ . Les distributions des rayons de fibres végétales des laines de lin et de chanvre sont beaucoup plus dispersées que pour les fibres polymères. Ainsi, comme l'illustre la Figure III.8 et comme cela était attendu pour les fibres végétales, une modélisation de leur distribution par une loi log-normale est plus adaptée.

La présence des fibres polymères permet en outre de réduire légèrement la variabilité des distributions globales de fibres des matériaux. En effet, les écarts-types pour les laines (N) et (M) sont légèrement inférieurs à ceux de leurs fibres végétales avec des valeurs respectives allant de  $15,4 \mu m$  (écart relatif de 16%) à  $9,1 \mu m$  (écart relatif de 19%).

Compte tenu de l'homogénéité et de la répétabilité des distributions de fibres polymères, dans la suite des résultats, seules les distributions de fibres végétales et les distributions globales sont représentées. Pour les laines de kénaf (K), de bois (H), de coco (I), d'ouate de cellulose (R) et de chanvre-lin coton (P) ces distributions sont présentées à la Figure III.9.

Compte tenu de l'homogénéité des résultats pour les laines de lin, les distributions des deux laines (C) et (D) ne sont pas représentées.

La caractérisation des cinq autres matériaux conduit à des distributions de rayons de fibres très différentes et plus particulièrement pour les fibres végétales, comme l'illustre la Figure III.9.

Pour les distributions de fibres végétales, la modélisation par une loi log-normale reste la plus adaptée sauf pour la laine de coco qui présente des éléments de rayons élevés mais relativement homogènes. On note également pour les fibres de kénaf la présence de deux tailles représentatives différentes.

La prise en compte dans les distributions globales des fibres polymères atténue les spécificités des distributions des fibres végétales, comme l'illustre la Figure III.9(b). Ainsi, la modélisation par une loi log-normale est celle qui correspond le mieux aux distributions globales de rayons de fibres des laines végétales.

**Deux paramètres semblent caractériser les distributions de rayons de fibres de ces matériaux : le rayon moyen de la distribution et son degré d'homogénéité relatif à l'écart-type de la distribution. On peut supposer que ces deux éléments vont jouer un rôle dans les performances acoustiques et thermiques des laines végétales.**

## III.2 Caractérisation expérimentale du squelette des matériaux

Dans le cadre des modélisations micro-macro identifiées à la Section 3.2 du Chapitre II et qui sont utilisés dans la suite du mémoire, les modèles s'appuient généralement sur une valeur de taille de fibre. Ce qui semble être une hypothèse acceptable en première approximation comme le confirme les travaux de [Luu *et al.* 2017a]. Les histogrammes représentés aux Figures III.8 et III.9 nous montrent que pour tous les matériaux, dans le cas des fibres végétales, comme dans le cas global, les rayons arithmétiques de fibres sont plus élevés que le rayon moyen des distributions log-normales. Le rayon arithmétique permet ainsi de mieux retranscrire l'influence et la présence des éléments de dimension élevée, notamment dans le cas des matériaux fortement hétérogènes comme le kénaf, la coco, la ouate de cellulose ou encore le bois. C'est pourquoi, dans la suite de ce mémoire, c'est le rayon arithmétique des fibres végétales, polymères et globales (végétales et polymères) qui est pris en compte dans le cadre des modélisations mises en œuvre qui nécessitent l'utilisation d'une valeur de rayon de fibres.

Un récapitulatif de tous les rayons relevés est présenté dans le Tableau III.2. Les valeurs sont par ailleurs du même ordre de grandeur et comprises dans les plages de données issues de la littérature qui ont été présentées précédemment aux Sections 1.2.3 et 1.3.1 du Chapitre II.

Type de laine	Réf.	Rf <sub>pol</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Rf <sub>veg</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Rf <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_{\text{moy}}$ ( $\mu\text{m}$ )
Chanvre	N	10,75	15,60	14,28	1,74
Lin	C	12,06	12,29	12,26	1,66
	D	12,13	12,78	12,65	1,67
	M	11,54	11,83	11,78	1,62
Kénaf	K	12,86	19,84	16,88	1,68
Bois	H	12,09	16,59	15,50	1,51
Coco	I	11,52	49,79	15,63	1,61
Ouate de cellulose	R	10,88	11,70	11,52	1,75
Chanvre-lin-coton	P	10,89	9,38	9,49	1,37

**Tableau III.2** – Rayons moyens (arithmétiques) des fibres et écart-type de la distribution log-normale associée

Le degré d'homogénéité des distributions globales est évalué avec la valeur de l'écart-type donné par la loi log-normale, qui est indiquée également dans le Tableau III.2.

Ainsi, le matériau qui présente à la fois le rayon de fibres moyen le plus faible et le meilleur degré d'homogénéité est la laine de chanvre-lin-coton. **Son rayon de fibres moyen est même inférieur à celui des fibres polymères. Ceci constitue un résultat original car dans la littérature les matériaux caractérisés présentent toujours des rayons moyens de**

fibres végétales supérieurs à ceux des fibres polymères, comme cela a été présenté à la Section 1.3.1 du Chapitre II.

Avec des caractéristiques très homogènes, les laines de lin présentent également un bon compromis entre rayon de fibres moyen et écart-type.

La ouate de cellulose (R), ainsi que les laines de chanvre (N) et de kéraf (K) présentent pour leur part un degré d'hétérogénéité plus important.

Enfin, la laine de coco, qui malgré une distribution de fibres végétales relativement atypique par rapport aux autres matériaux, présente une valeur de rayon de fibres moyen équivalente à celle du bois. En effet, avec une composition massique de fibres polymères égale à 30%, ce matériau contient environ dix fois plus de fibres polymères que de fibres végétales. Ces dernières structurent donc la distribution globale et permettent d'homogénéiser le matériau.

## 2.2 Masse volumique et porosité des fibres du squelette des matériaux

Les définitions de la masse volumique et de la porosité des fibres de la phase solide des matériaux ont été explicitées à la Section 1.3.3 du Chapitre II.

### 2.2.1 Dispositifs expérimentaux et protocoles utilisés

Trois dispositifs différents ont été utilisés au cours de la thèse pour caractériser la masse volumique de la phase solide des matériaux, ainsi que celle des fibres en vrac. Il s'agit de deux porosimètres (Laboratoire de Strasbourg noté « poro Cerema » et ENTPE noté « poro ENTPE ») et d'un pycnomètre à hélium (unité MAST/CPDM de l'Ifsttar de Marne-la-Vallée). Leur description se trouve à l'Annexe A2.

Les trois dispositifs utilisés permettent de déterminer expérimentalement le volume de la phase solide des échantillons. A partir de cette valeur il est alors possible de déterminer la masse volumique de la phase solide ( $\rho_s$ ) et la porosité ( $\phi$ ) de l'échantillon caractérisé.  $\rho_s$  et  $\phi$  sont calculées à partir des Equations II.1 et II.2, explicitées à la Section 1.3.3 du Chapitre II.

Pour les deux porosimètres, les conditions de température et d'humidité relative des mesures sont celles du laboratoire, à savoir une température (T) de  $25 \pm 0,8^\circ C$  et une humidité relative (HR) de  $40 \pm 2\%$ . En effet, dans le cadre de la thèse, après une phase d'expérimentation, il a été jugé que ces conditions standards de température et d'humidité relative étaient les plus aisées à maintenir dans le laboratoire pendant les caractérisations expérimentales.

Les résultats expérimentaux sont déterminés pour chaque matériau à partir de la caractérisation de cinq échantillons. De plus, la masse de chaque échantillon est déterminée à l'aide d'une balance Mettler Toledo ME 1002E d'une précision de 0,1 g.

En ce qui concerne le pycnomètre, il est nécessaire d'effectuer un paramétrage du dispositif avant les essais. Ainsi, lors de la première campagne de mesure, des essais de test ont été menés afin de déterminer les valeurs des paramètres les plus appropriées aux laines végétales. Ainsi, tous les matériaux ont été caractérisés avec le paramétrage suivant :

- Le nombre de purges réalisées avant l'essai a été fixé à 10 avec une pression de 19,5 *psi* ;
- Le nombre de cycles de mesures est fixé à 5 ;
- La pression des mesures est fixée à 15 *psi* ;
- Le critère de fin de mesure a été fixée à 0,005 *psi/min*.

De plus, les échantillons sont pesés à l'aide d'une balance de précision (0,0001 g) avant et après chaque mesure. En effet, les échantillons perdent de la masse (environ 0,4% en moyenne) suite aux opérations de purges qui chassent une partie de l'eau contenue en leur sein. C'est la valeur mesurée après l'essai qui est prise comme référence pour la détermination de la masse volumique de leur phase solide.

Enfin, des fibres de chanvre ont été broyées afin d'évaluer la porosité intrafibre. Il était initialement prévu de broyer d'autres types de fibres, néanmoins il s'est avéré que cette opération est relativement complexe à réaliser. En effet, après découpe puis passage au blender, seul un résultat concluant a été observé pour les fibres de chanvre, pour lesquelles une matrice de fibres composée d'éléments plus fins visuellement a été obtenue. Pour les autres fibres, compte tenu de leurs propriétés mécaniques, il n'a pas été possible de les broyer avec un blender.

### 2.2.2 Résultats des caractérisations expérimentales

Des caractérisations expérimentales ont été conduites sur les laines végétales de la thèse, ainsi que sur les fibres en vrac et les fibres de chanvre broyées. Les résultats de ces caractérisations sont synthétisés par types de matériaux dans le Tableau III.3.

Les résultats de masse volumique de la phase solide ont été déterminés en faisant la moyenne de cinq valeurs expérimentales pour les deux porosimètres. Pour le pycnomètre, il s'agit de la moyenne de valeurs déterminées au cours de deux campagnes de mesures. Pour chaque valeur, l'écart-type des mesures est précisé.

Les masses volumiques des fibres en vrac et des fibres de chanvre broyées ont été caractérisées uniquement avec le pycnomètre.

D'autre part, seuls six matériaux ont pu être caractérisés avec le porosimètre par différentiel

de pression de l'ENTPE. Cela permet néanmoins de comparer les résultats obtenus avec les deux autres dispositifs.

Type laine	Réf.	$\rho_s$ ( $kg.m^{-3}$ )			$\phi^*$ (%)		
		poro ENTPE	poro Cerema	pycno Ifsttar	poro ENTPE	poro Cerema	pycno Ifsttar
Chanvre	B	1455 ± 133	1345 ± 82	1508 ± 22	98,2	98,0	98,3
	L	/	1545 ± 53	1518 ± 18	/	98,0	98,0
	$F_L$	/	/	1537 ± 13	/	/	/
	N	/	1634 ± 40	1506 ± 17	/	97,5	97,3
	$F_N$	/	/	1534 ± 11	/	/	/
	$F_N$ broyées	/	/	1570 ± 5	/	/	/
	X	/	1452 ± 14	1516 ± 6	/	96,8	97,0
Z	/	1531 ± 18	1518 ± 5	/	97,6	97,5	
Lin	C	1615 ± 50	1658 ± 42	1521 ± 5	97,8	97,9	97,7
	D	1561 ± 83	1658 ± 50	1546 ± 2	98,0	98,1	97,9
	J	/	1515 ± 99	1534 ± 2	/	97,8	97,8
	$F_J$	/	/	1562 ± 6	/	/	/
	M	/	1541 ± 26	1551 ± 15	/	98,3	98,3
	$F_M$	/	/	1554 ± 3	/	/	/
	V	/	1522 ± 25	1524 ± 15	/	96,7	96,7
W	/	1530 ± 22	1517 ± 13	/	97,0	97,0	
Kénaif	E	1626 ± 24	/	1532 ± 5	97,6	/	97,5
	K	/	1592 ± 18	1513 ± 19	/	98,2	98,1
Bois	A	1549 ± 28	1537 ± 79	/	96,2	96,2	/
	H	/	1565 ± 67	1467 ± 12	/	97,3	97,1
Coco	I	1634 ± 65	/	1430 ± 9	94,1	/	93,2
Ouate de cel.	R	/	1579 ± 23	1562 ± 15	/	97,1	97,1
Chanvre- lin-coton	P	/	1636 ± 53	1547 ± 10	/	98,1	98,0
	$F_{cot}$	/	/	1573 ± 25	/	/	/
Chanvre-lin	Y	/	1605 ± 23	1523 ± 22	/	97,9	97,8
Polyester	$F_{pol}$	/	/	1353 ± 2	/	/	/

**Tableau III.3** – Masse volumique des fibres de la phase solide des laines végétales (valeur/écart-type) et porosité des laines végétales, \* : incertitude  $\leq 0,1\%$

### 2.2.3 Analyse comparative des dispositifs expérimentaux

Pour les masses volumiques de squelette, les résultats sont globalement cohérents, même si, avec de nombreuses masses volumiques supérieures à  $1550 kg.m^{-3}$ , les porosimètres semblent présenter des valeurs un peu élevées par rapport à celles données par le pycnomètre, ainsi que les valeurs de la littérature présentées dans le Tableau II.5 de la Section 1.3.3 du Chapitre II.

Ces écarts entre les valeurs de masse volumique de squelette présentés entre les différents dispositifs expérimentaux n'ont qu'une incidence très modérée sur les valeurs de porosité des matériaux. En effet, dans 95% des résultats, les écarts relatifs entre les différents dispositifs sont inférieurs à 0,1%. Pour la laine de chanvre (B), l'écart maximum est de 0,3% et pour la laine de coco (I), il est de l'ordre de 1%. Le fait que les valeurs de masses volumiques de squelette du pycnomètre soient globalement plus faibles que celles des porosimètres entraîne des valeurs de porosité égales ou légèrement plus faibles.

**Ainsi, pour ne pas surestimer la porosité des matériaux, notamment dans le cas de l'acoustique, où les ondes sonores ne pénètrent pas forcément dans les pores de dimensions les plus faibles, ce sont les valeurs caractérisées au pycnomètre qui sont utilisées dans la suite de ce mémoire.**

### 2.2.4 Analyse comparative pour les matériaux et les fibres

#### Les fibres

Tout d'abord, la valeur expérimentale de la masse volumique des fibres polymères (polyester) présentée dans le Tableau III.3 correspond à la valeur identifiée dans la littérature ( $\rho_s = 1350 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Cela confirme bien que ces fibres ont une masse volumique inférieure à celles des fibres végétales étudiées dans le cadre de cette thèse.

Pour les fibres de lin ( $(F_J$  et  $F_M)$ ), on note un léger écart entre les deux valeurs obtenues, visibles dans le Tableau III.3. Les fibres de lin cotonisées ( $F_J$ ) semblent présenter une masse volumique supérieure aux fibres de lin ( $F_M$ ). Cet écart peut être lié au traitement supplémentaire que subissent les fibres cotonisées. Néanmoins, les valeurs obtenues sont supérieures de 3 à 4% par rapport aux valeurs de la littérature présentées au Tableau II.5 de la Section 1.3.3 du Chapitre II. Cela peut être lié aux conditions hygrométriques de caractérisation des fibres qui ne sont pas dans un état sec.

Comme attendu en raison de sa composition chimique majoritaire en cellulose (Section 1.2.2 du Chapitre II), les fibres de coton présentent une valeur supérieure aux autres fibres, avec une valeur de  $1573 \text{ kg.m}^{-3}$  qui se trouve dans la plage de valeurs donnée par les références bibliographiques mentionnées dans le Tableau II.5.

Les deux valeurs concernant les fibres de chanvre sont quasiment identiques. Elles sont légèrement plus faibles (de l'ordre de 1%) que celles des fibres de lin. Là encore, ces valeurs sont légèrement supérieures (environ 2%) aux valeurs de la littérature présentées dans le Tableau II.5.

**Enfin, il est important de souligner que la valeur de la masse volumique des fibres**



de chanvre broyées est supérieure d'environ 3% par rapport aux fibres non broyées. Ce résultat permet de confirmer la présence d'une porosité intrafibre fermée au sein des fibres de chanvre de l'ordre de 2,3% dans le cas présent. Il semble bien confirmé une porosité intrafibre fermée relativement faible en comparaison de la porosité interfibre ou globale [Glé 2013].

### Les laines

A partir des données expérimentales sur les masses volumiques de fibres végétales et polymères et en prenant en compte le ratio massique entre ces deux types de fibres, il est possible d'évaluer la masse volumique de la phase solide des laines. Ainsi, pour la laine de chanvre (N) on trouve une masse volumique de squelette de  $1513 \text{ kg.m}^{-3}$ , très proche de la valeur mesurée expérimentalement,  $1506 \text{ kg.m}^{-3}$ . Pour les trois autres laines dont les données sont disponibles, (L), (J) et (M), on trouve des écarts relatifs entre la valeur mesurée et la valeur calculée inférieurs à 2%. Pour ces quatre matériaux, les résultats entre les masses volumiques des fibres et la masse volumique de la phase solide sont donc très homogènes et cohérents.

Globalement, à part pour les laines de bois (H) et de coco (I), toutes les masses volumiques de squelette caractérisées avec le pycnomètre à hélium sont relativement proches et sont comprises entre  $1500 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $1550 \text{ kg.m}^{-3}$ .

En ce qui concerne les valeurs de porosité, à part pour la laine de coco qui présente une porosité de 93,2%, tous les autres matériaux se trouvent dans une plage resserrée comprise entre 96,2% et 98,3%.

## 2.3 Résistance à l'écoulement de l'air

La résistance à l'écoulement de l'air des matériaux ou résistivité a été présentée et définie à la Section 2.1.6 du Chapitre II.

### 2.3.1 Dispositif et protocole expérimental mis en œuvre

La caractérisation expérimentale de la résistivité des matériaux est réalisée au laboratoire de Strasbourg à partir d'un résistivimètre SIGMA SIG2014 de la marque Mecanum. Sa description est détaillée à l'Annexe A3.

Les mesures sont réalisées dans les conditions de température  $T = 25 \pm 0,8^\circ\text{C}$  et d'humidité relative  $HR = 40 \pm 2\%$  du laboratoire. Avant et après chaque mesure, les échantillons sont pesés afin de vérifier que la teneur en eau ne varie pas au cours des caractérisations. Pour chaque

matériau, quatre échantillons sont caractérisés sur leurs deux faces. La moyenne des valeurs de résistivité ainsi que l'écart-type sont ensuite calculés pour chaque matériau.

### 2.3.2 Résultats des caractérisations expérimentales

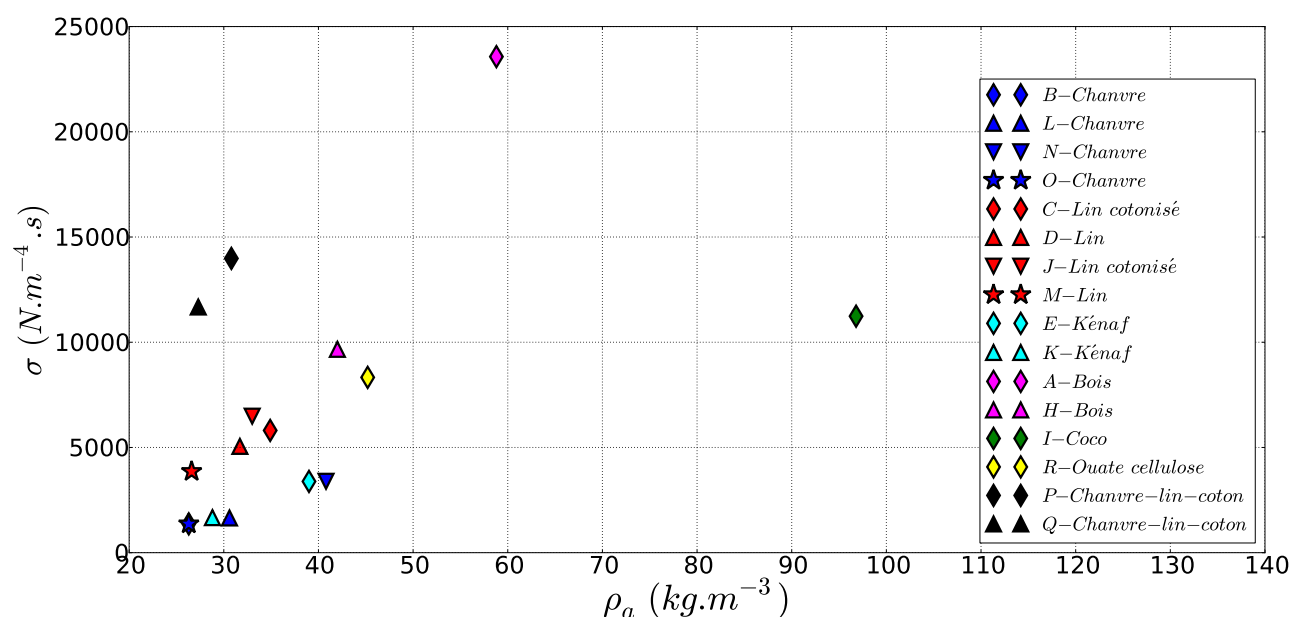
Les résultats des caractérisations expérimentales menées dans le cadre de la thèse sont présentées dans le Tableau III.4.

Type de laine	Réf.	$\sigma$ ( $N.m^{-4}.S$ )
Chanvre	B	$1370 \pm 264$
	L	$1650 \pm 285$
	N	$3393 \pm 332$
	O	$3152 \pm 285$
Lin	C	$5809 \pm 247$
	D	$5052 \pm 510$
	J	$6487 \pm 254$
	M	$3861 \pm 412$
Kénaf	E	$3386 \pm 152$
	K	$1665 \pm 200$
Bois	A	$23570 \pm 514$
	H	$9663 \pm 603$
Coco	I	$11238 \pm 547$
Ouate de cel.	R	$8330 \pm 611$
Chanvre-lin-coton	P	$13983 \pm 804$
	Q	$11674 \pm 753$

**Tableau III.4** – Valeurs expérimentales de la résistivité des laines végétales

### 2.3.3 Analyse des résultats

Les valeurs de résistivité obtenues peuvent être comparées à des valeurs de la littérature, notamment pour le lin et le chanvre. Ainsi, dans [Glé 2013], une valeur de  $\sigma = 1030 N.m^{-4}.s$  est donnée pour une laine de chanvre de masse volumique  $\rho_a = 20,8 kg.m^{-3}$ . Cela semble cohérent avec les valeurs du Tableau III.4 obtenues notamment pour les laines de chanvre (B) et (L) qui présentent respectivement des masses volumiques de  $26,3 kg.m^{-3}$  et  $30,6 kg.m^{-3}$ . Pour une laine de lin de masse volumique  $\rho_a = 32,6 kg.m^{-3}$ , les travaux de [Glé 2013] donnent une résistivité de  $4270 N.m^{-4}.s$ . Avec les laines (C), (D) et (J) qui présentent des masses volumiques respectivement de  $34,9 kg.m^{-3}$ ,  $31,7 kg.m^{-3}$  et  $33,0 kg.m^{-3}$ , des résistivités légèrement supérieures ont été obtenues, comme le montrent les valeurs du Tableau III.4. Néanmoins, ces valeurs restent du même ordre de grandeur.



**Figure III.10** – Valeurs de résistivité des matériaux en fonction de leur masse volumique

Aussi, les valeurs de résistivité des matériaux ne semblent pas uniquement liées à leur valeur de masse volumique mais également à la taille de leurs fibres. Ainsi, pour le vérifier, la Figure III.10 représente les valeurs de résistivités des matériaux regroupés en familles de laines végétales en fonction de leur masse volumique.

En croisant les données représentées par la Figure III.10 avec les valeurs de rayons de fibres moyens présentés dans le Tableau III.2, on voit que les résistivités sont effectivement liées directement à la taille des fibres. Les laines végétales peuvent ainsi être regroupés par famille de fibres. A partir de la Figure III.10, on observe que pour chaque famille, possédant en première approximation un même rayon moyen de fibres, la résistivité croît avec la masse volumique.

Les relevés de distribution de rayons de fibres, réalisés à la Section 2.1.3 de ce chapitre, ont montré que la laine (P) présente la valeur moyenne de rayons de fibres la plus faible et la distribution la plus homogène. Ainsi, cette laine atteint une valeur de résistivité supérieure à toutes les autres familles, hormis pour le matériau (A), alors qu'elle possède une masse volumique relativement basse de  $30,8 \text{ kg.m}^{-3}$ .

En comparaison, la laine de coco (I), qui est caractérisée par un rayon moyen de fibres supérieur à celui de (P), a besoin d'une masse volumique beaucoup plus élevée de  $96,8 \text{ kg.m}^{-3}$  pour atteindre une résistivité du même ordre de grandeur.

Les autres paramètres acoustiques, définis à la Section 3.2.1 du Chapitre II peuvent égale-

ment être déterminés à partir des caractérisations expérimentales des laines végétales.

### 2.4 Tortuosité, longueurs caractéristiques et perméabilité thermique

Ces paramètres n'ont pas pu être déterminés par une caractérisation expérimentale directe. Néanmoins, il est possible d'estimer des valeurs par des approches indirectes à partir de mesures réalisées sur les matériaux avec un tube d'impédance.

En s'appuyant sur les travaux de [Panneton & Oly 2006] et [Oly & Panneton 2008], les paramètres acoustiques peuvent être estimés à partir des valeurs expérimentales de porosité et de résistivité des matériaux ainsi que les limites basses et hautes fréquences de la densité dynamique ( $\rho$ ) et du module d'incompressibilité ( $K$ ). Ces deux grandeurs intrinsèques aux matériaux sont déterminés expérimentalement avec un tube d'impédance, comme cela est détaillée dans la suite du mémoire, à la Section 3 de ce chapitre. Le détail des relations permettant d'estimer  $\alpha_\infty$ ,  $\Lambda$ ,  $\Lambda'$  et  $\Xi_0$  est donné dans [Panneton & Oly 2006] et [Oly & Panneton 2008].

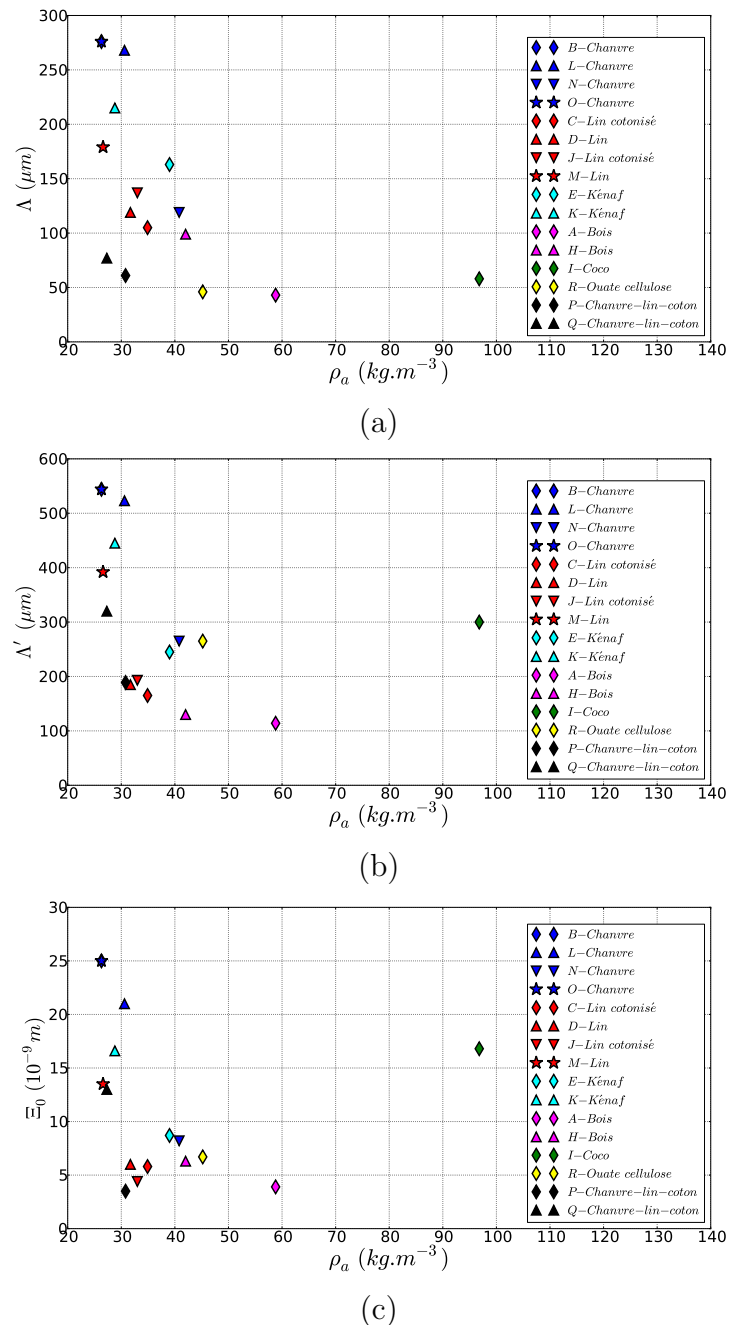
#### 2.4.1 Résultats

Type de laine	Réf.	$\alpha_\infty$	$\Lambda(10^{-6}m)$	$\Lambda'(10^{-6}m)$	$\Xi_0(10^{-9}m)$
Chanvre	B	$1,08 \pm 0,04$	$276 \pm 48$	$544 \pm 67$	$25,0 \pm 3,2$
	L	$1,05 \pm 0,04$	$268 \pm 51$	$523 \pm 64$	$21,0 \pm 3,0$
	N	$1,01 \pm 0,02$	$119 \pm 13$	$265 \pm 31$	$8,2 \pm 1,5$
	O	$1,01 \pm 0,01$	$128 \pm 14$	$284 \pm 45$	$9,4 \pm 2,4$
Lin	C	$1,00 \pm 0,00$	$105 \pm 12$	$165 \pm 28$	$5,8 \pm 0,9$
	D	$1,02 \pm 0,01$	$119 \pm 14$	$185 \pm 31$	$6,0 \pm 1,1$
	J	$1,04 \pm 0,03$	$137 \pm 27$	$193 \pm 46$	$4,4 \pm 0,8$
	M	$1,00 \pm 0,00$	$179 \pm 60$	$392 \pm 101$	$13,5 \pm 3,3$
Kénaif	E	$1,00 \pm 0,00$	$163 \pm 53$	$245 \pm 68$	$8,7 \pm 2,1$
	K	$1,00 \pm 0,00$	$215 \pm 31$	$445 \pm 48$	$16,6 \pm 2,0$
Bois	A	$1,07 \pm 0,07$	$43 \pm 6$	$114 \pm 54$	$3,9 \pm 0,6$
	H	$1,00 \pm 0,00$	$99 \pm 6$	$130 \pm 10$	$6,3 \pm 0,9$
Coco	I	$1,00 \pm 0,00$	$58 \pm 7$	$300 \pm 83$	$16,8 \pm 3,5$
Ouate de cel.	R	$1,09 \pm 0,06$	$46 \pm 2$	$265 \pm 56$	$6,7 \pm 1,3$
Chanvre-lin-coton	P	$1,01 \pm 0,05$	$61 \pm 5$	$189 \pm 77$	$3,5 \pm 0,6$
	Q	$1,00 \pm 0,00$	$77 \pm 2$	$320 \pm 61$	$13,0 \pm 0,5$

**Tableau III.5** – Valeurs des paramètres acoustiques : tortuosité ( $\alpha_\infty$ ), longueurs caractéristiques visqueuse ( $\Lambda$ ) et thermique ( $\Lambda'$ ), perméabilité thermique ( $\Xi_0$ ) (valeur moyenne / écart-type)

Les résultats présentées dans le Tableau III.5 pour chacun des quatre paramètres sont déterminés à partir de la moyenne de huit valeurs obtenues par méthode indirecte. Ces huit valeurs

sont issues de la caractérisation expérimentale au tube d'impédance, comme cela est présenté à la Section 3 de ce chapitre.



**Figure III.11** – (a) Valeurs de la longueur caractéristique visqueuse des matériaux en fonction de leur masse volumique, (b) valeurs de la longueur caractéristique thermique des matériaux en fonction de leur masse volumique, (c) valeurs de la perméabilité thermique des matériaux en fonction de leur masse volumique

#### 2.4.2 Analyse des résultats

Pour la tortuosité, comme attendu et annoncé à la Section 3.2.1 du Chapitre II, les valeurs sont très proches de 1 pour tous les matériaux.

Pour les trois autres paramètres, les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celles présentées dans [Piégay *et al.* 2018].

Comme pour les résultats de la résistivité des matériaux, présentés à la Section 2.3 de ce chapitre, des graphes de l'évolution de  $\Lambda$ ,  $\Lambda'$  et  $\Xi_0$  en fonction de la masse volumique sont réalisés. Ils sont présentés à la Figure III.11.

Pour ces trois paramètres, on voit qu'ils dépendent de la masse volumique des matériaux et donc de leur porosité, mais également des rayons de fibres des matériaux comme c'est le cas pour pour la résistivité.

Cette dépendance s'observe très bien pour la longueur caractéristique visqueuse où les familles de matériaux se regroupent en fonction de l'ordre de grandeur de leur rayon moyen de fibres (Tableau III.2). Cela est moins marqué pour la longueur caractéristique thermique et la perméabilité thermique. Encore une fois, on observe que les laines de chanvre-lin-coton, (P) et (Q), présentent des valeurs de  $\Lambda$ ,  $\Lambda'$  et  $\Xi_0$  les plus faibles par rapport aux matériaux de masse volumique équivalente.

Les campagnes de caractérisations expérimentales conduites dans cette section ont permis de constituer des banques de données exhaustives concernant les paramètres caractéristiques d'un grand nombre de laines végétales.

De plus, même si de nombreux paramètres ont été caractérisés, l'analyse des résultats a permis d'identifier que les spécificités de chaque type de laine sont liées notamment aux dimensions de leurs fibres végétales ainsi qu'à leur masse volumique.

Tous ces matériaux peuvent à présent être caractérisés à l'échelle macroscopique afin d'en déterminer leurs performances acoustiques.

## 3 Caractérisation expérimentale des propriétés acoustiques

Les propriétés acoustiques caractérisées expérimentalement dans le cadre de cette thèse sont représentées par le coefficient d'absorption acoustique  $\alpha$  et l'indice d'affaiblissement acoustique  $TL$ , qui ont été définis précédemment à la Section 2.1.4 du Chapitre II.

Dans un premier temps, les protocoles expérimentaux mis en œuvre sont détaillés afin de réaliser des mesures pour différentes conditions d'humidité relative, avant de présenter les résultats expérimentaux.

Une première analyse est conduite afin d'évaluer l'influence de la présence d'eau dans les matériaux sur leurs propriétés acoustiques. Puis, une analyse comparative des résultats obtenus est menée par rapport aux données de la littérature puis en s'appuyant sur les caractéristiques des matériaux.

### 3.1 Protocoles expérimentaux mis en œuvre

Les caractérisations acoustiques réalisées dans le cadre de cette thèse reposent sur l'utilisation d'un tube d'impédance en incidence normale. En effet, cette méthode de caractérisation présente l'avantage de caractériser à la fois l'absorption acoustique ( $\alpha$ ), l'indice d'affaiblissement acoustique ( $TL$ ) et les grandeurs intrinsèques des matériaux ( $[k, Z_c]$ ,  $[\rho, K]$ ). Le dispositif du Laboratoire de Strasbourg qui a été utilisé est présenté à l'Annexe A4.

Afin d'être adapté aux dimensions du tube d'impédance, les échantillons de matériaux testés dans le cadre de la thèse sont tous de forme cylindrique. Le choix a été fait d'opter pour un diamètre de  $100\text{ mm}$ . Compte tenu de ce diamètre, le domaine de validité fréquentiel est  $[143 - 1993\text{ Hz}]$ . Il aurait pu être plus important avec un diamètre de  $46\text{ mm}$ . Cependant, la découpe circulaire des échantillons n'est pas aisée et pose un réel problème pour des diamètres de faible dimension, pouvant engendrer des problèmes de fuites au niveau de leur pourtour lors de la mise en place des échantillons dans le tube d'impédance.

Pour chaque matériau, les deux faces de quatre échantillons sont caractérisées expérimentalement à l'aide du tube d'impédance. Les mesures sont réalisées dans les conditions de température et d'humidité relative du laboratoire, à savoir une température ( $T$ ) de  $25 \pm 0,8^\circ\text{C}$  et une humidité relative ( $HR$ ) de  $40 \pm 2\%$ . Néanmoins, afin d'évaluer l'influence de l'humidité sur les propriétés acoustiques des laines végétales, trois campagnes d'essais ont été menées dans le cadre de la thèse avec des conditions d'humidité relative proches de  $0\%$ , puis de  $40\%$  et enfin de  $75\%$ .

#### Matériaux maintenus dans des conditions à faible hygrométrie

Les échantillons ont été séchés en étuve à  $50^\circ\text{C}$  pendant 72 heures. Les échantillons sont ensuite stockés dans une boîte hermétique utilisée comme dessiccateur contenant du gel de silice. Ce stockage permet de maintenir un environnement dans lequel l'humidité relative est de

l'ordre de 3% et donc proche d'un état sec. Le contrôle et le suivi de l'hygrométrie à l'intérieur des boîtes de stockage sont réalisés à l'aide d'un capteur Rotronic HygroPalm HP23.

Lors de la caractérisation des matériaux en tube d'impédance, un suivi de la masse des échantillons est réalisé avant et après la mesure afin de s'assurer que sa teneur en eau massique ne varie pas.

#### **Matériaux dans les conditions de température et d'humidité relative du laboratoire**

Les échantillons sont laissés à l'air libre pendant au moins 48 heures dans l'environnement du laboratoire pour lequel l'hygrométrie est contrôlée à  $40 \pm 2\%$ . Un suivi de la masse est réalisée, à l'aide de la balance Mettler Toledo ME 1002E présente dans le laboratoire d'essais, afin de s'assurer que la teneur en eau massique présente dans les échantillons reste stable.

#### **Matériaux maintenus dans des conditions à forte hygrométrie**

Afin d'établir une humidité relative plus élevée, une solution saturée en chlorure de sodium (*NaCl*) est placée dans une boîte hermétique utilisée comme dessiccateur. Les échantillons à caractériser y sont alors placés afin d'être maintenus dans les mêmes conditions de température et d'humidité relative pendant une semaine. L'hygrométrie à l'intérieur de la boîte a pu être suivie à l'aide du capteur Rotronic HygroPalm HP23.

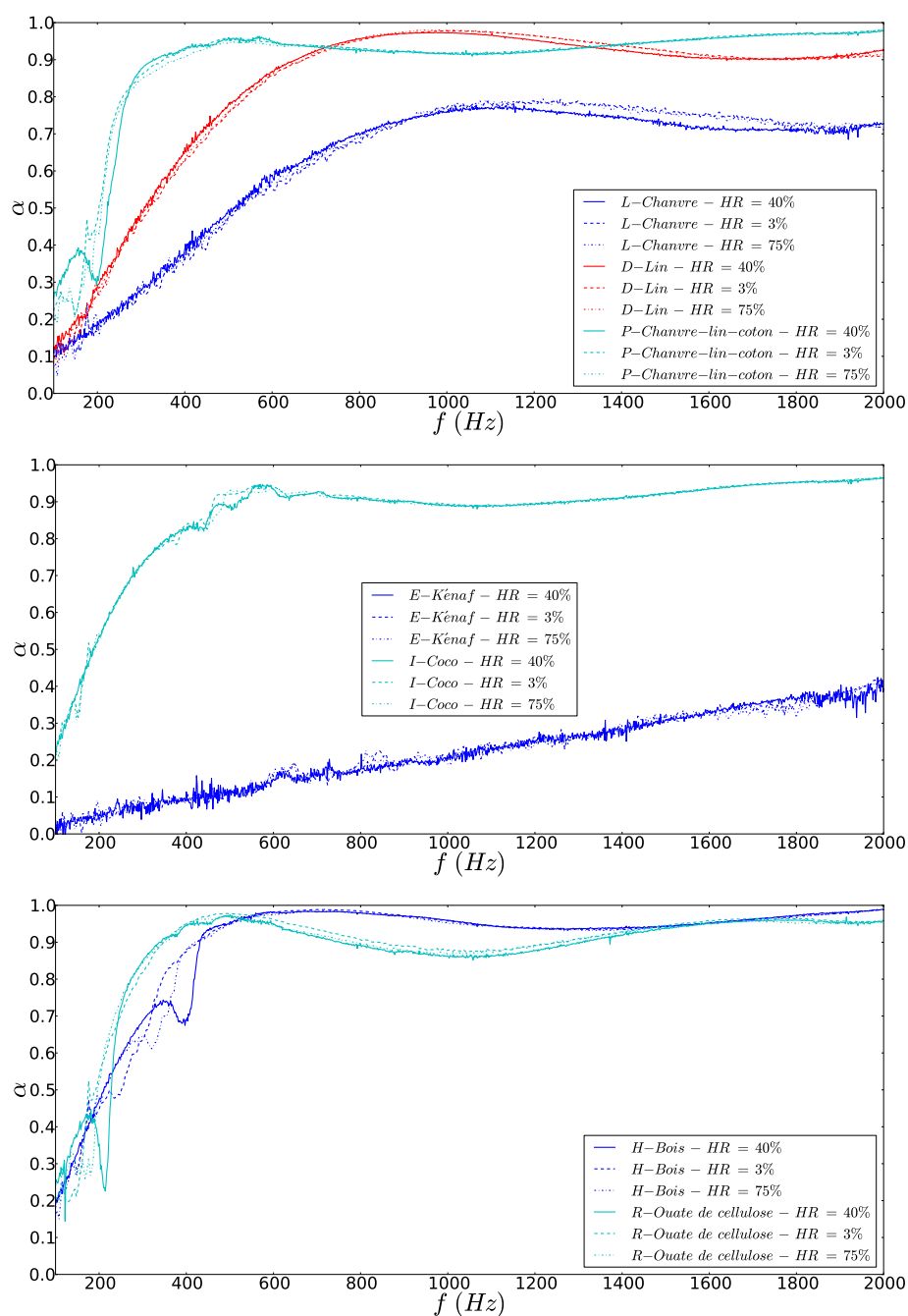
Comme pour les conditions de conditionnement des échantillons précédentes, un suivi de la masse des échantillons est réalisé avant et après chaque mesure afin de s'assurer que leur teneur en eau massique ne varie pas.

Une évaluation de l'influence de l'humidité est alors réalisée pour sept familles de laines.

### **3.2 Evaluation de l'influence de l'humidité sur les propriétés acoustiques**

Pour les sept types de laines végétales différents caractérisés, les résultats présentés à la Figure III.12 ne montrent pas d'influence significative de l'humidité sur l'absorption acoustique pour une humidité relative comprise entre 3% et 75%. Pour certains matériaux, comme (P), (H) et (R), on observe des résonances mécaniques. Le décalage de fréquence de ces résonances pour différentes mesures peut s'expliquer par la légère variabilité de la mise en place des échantillons dans le tube d'impédance. Comme cela est expliqué ultérieurement à la Section 5.2 de ce chapitre, cela est dû en partie à la grande souplesse des laines végétales.





**Figure III.12** – Courbes de l’influence de l’humidité sur les coefficients d’absorption acoustique en fonction de la fréquence

De plus, comme cela est également détaillé dans la suite du mémoire et plus particulièrement à la Section 3.1 du Chapitre IV, les teneurs en eau massique et volumique restent faibles jusqu’à des humidités relatives élevées proches de 75% (Tableau IV.5).

Cette faible teneur en eau va être en partie fixée par les fibres végétales en raison de leur caractère hygroscopique comme cela a été explicité à la Section 1.3.5 du Chapitre II. On peut ainsi supposer que cette eau va se loger préférentiellement dans les pores de plus petites dimensions, tels que les pores intrafibres, sans perturber les phénomènes de dissipation acoustique.

Ainsi, l'incidence sur les effets dissipatifs des laines végétales et donc sur les propriétés en absorption acoustique des matériaux sont extrêmement faibles, contrairement aux propriétés thermiques des laines végétales, comme cela est évoqué brièvement à la Section 2.2.2 du Chapitre II et est explicité plus en détail plus loin dans le mémoire à la Section 3.1 du Chapitre IV. **Par conséquent, l'effet de la présence d'eau dans les matériaux est négligé dans la suite du mémoire concernant leurs propriétés acoustiques.**

### 3.3 Résultats et analyses des caractérisations expérimentales

Pour chaque matériau, les résultats présentés à la Figure III.13 correspondent à une valeur moyenne d'absorption et d'affaiblissement acoustique déterminées à partir de huit mesures.

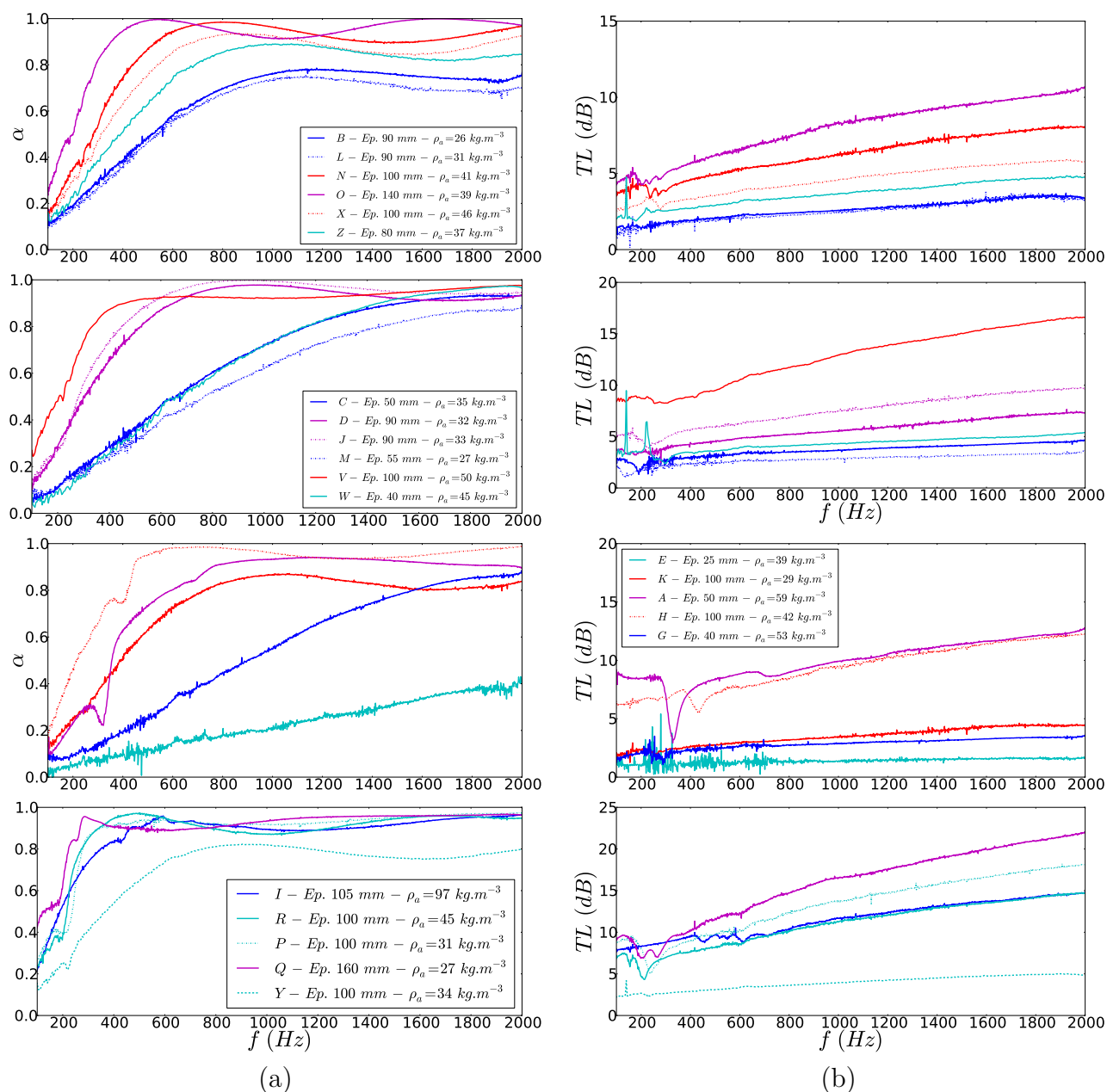
Comme l'épaisseur des matériaux est un paramètre qui joue un rôle important sur les propriétés d'absorption et d'affaiblissement acoustique, elles sont indiquées sur les représentations graphiques de la Figure III.13. De plus, pour chaque graphe, les matériaux de mêmes épaisseurs ont été représentés avec la même couleur.

**Ces résultats confirment bien les éléments énoncés à la Section 2.1.5 du Chapitre II concernant les propriétés acoustiques des laines végétales et plus particulièrement en absorption acoustique.** En effet, à partir de la Figure III.13(a), on constate que les matériaux affichent des performances en absorption de bon niveau pour les moyennes et hautes fréquences. L'augmentation de l'épaisseur des matériaux permet d'améliorer l'absorption à plus basse fréquence. Néanmoins, le fait d'augmenter l'épaisseur et la masse volumique des matériaux peut entraîner l'apparition de résonances élastiques comme par exemple pour les laines (A), (H), (P), (Q), (R) et (I). Ce point est discuté à la Section 5.2 de ce chapitre.

**Ces résultats montrent également toute l'étendue de la gamme d'absorption et d'affaiblissement que peuvent présenter les laines végétales en tant qu'isolant du bâtiment pour des plages d'épaisseurs comprises entre 25 et 160 mm et de masses volumiques apparentes comprises entre 26 et 97 kg.m<sup>-3</sup>.**

Comme cela avait été énoncé à la Section 2.1.5 du Chapitre II, on peut noter l'influence de paramètres tels que la résistivité ou la porosité sur l'absorption acoustique des laines végétales. En effet, pour des épaisseurs identiques de 90 mm et des porosités extrêmement proches (Tableau III.3), la laine de lin (J) présente une meilleure absorption que la laine (D), qui elle-même

présente une meilleure absorption que la laine de chanvre (L), avec des résistivités respectives de  $6487 N.m^{-4}.s$ ,  $5052 N.m^{-4}.s$  et  $1650 N.m^{-4}.s$ .



**Figure III.13** – Résultats des caractérisations (a) du coefficient d'absorption acoustique et (b) de l'indice d'affaiblissement des matériaux de la thèse

L'influence de la porosité peut être illustrée par la meilleure absorption présentée par la laine de chanvre (B) vis-à-vis de (L). Pour des épaisseurs identiques et des résistivités équivalentes

(Tableau III.4), (B) présente une porosité de 98,3% supérieure à celle de (L) qui est de 98,0%.

Même si l'influence de la taille des fibres sur l'absorption acoustique existe indirectement via la résistivité, il est plus difficile de l'illustrer directement dans le cas présent (absence de données pour des laines d'épaisseurs, de masses volumiques, de porosités et de résistivités identiques). Le rôle joué par les rayons de fibres est plus largement investigué dans la Section 4 de ce chapitre. D'autre part, dans la suite de ce chapitre, la modélisation des propriétés acoustiques des matériaux fibreux se focalise uniquement sur l'absorption acoustique.

En conclusion, cette section a montré que pour une gamme d'humidité relative comprise entre 3% et 75%, la présence d'eau dans les laines végétales n'avait pas d'incidence sur leurs performances acoustiques et notamment celles en absorption.

De plus, les résultats des caractérisations expérimentales des propriétés acoustiques des matériaux de la thèse ont illustré la large gamme de leurs performances et le lien entre l'absorption acoustique et les caractéristiques de leur microstructure.

## 4 Modèle d'homogénéisation acoustique s'appuyant sur deux types de fibres

**Le contenu de cette section est largement inspiré d'un article publié dans la revue de rang A avec comité de lecture *Applied Acoustics* [Piégay et al. 2018].**

Afin de modéliser les propriétés acoustiques des laines végétales à partir de paramètres caractéristiques de leur microstructure, il a été exposé à la Section 3.2.4 du Chapitre II que des approches d'homogénéisation micro-macro existent dans la littérature pour les matériaux fibreux.

De plus, comme un des objectifs de la thèse est de mettre en œuvre des modélisations analytiques, il est possible de s'appuyer sur des méthodes dites d'homogénéisation auto-cohérente (HAC), comme cela a été présenté à la Section 3.2.5 du Chapitre II. Pour le cas des matériaux fibreux, un modèle a été développé à la fin des années 90, par Tarnow [Tarnow 1996, Tarnow 1997a, Tarnow 1997b].

Cependant, ce modèle remplace la condition de consistence énergétique, propre aux méthodes d'homogénéisation, entre l'inclusion à l'échelle microscopique et le milieu homogène équivalent à l'échelle macroscopique, par une condition de vorticité nulle au sein de la phase fluide. Malgré ce changement d'hypothèse de base, sa validité, dans une configuration de flux

perpendiculaire à des fibres distribuées aléatoirement, a été vérifiée pour des laines végétales par les travaux menés dans [Glé 2013].

D'autre part, comme il a été montré à la Section 2.1 de ce chapitre, les laines végétales sont constituées de deux types de fibres, végétales et polymères, qui présentent des rayons moyens différents. Or, le modèle de Tarnow ne repose que sur un rayon de fibres.

Néanmoins, des approches de modélisations composites reposant sur l'inclusion d'un matériau poreux dans un autre ont été développées notamment dans [Gourdon & Seppi 2010, Bécot *et al.* 2011]. Ces travaux s'appuient en partie sur ceux menés dans [Boutin *et al.* 1998] relatifs à la double porosité d'un matériau. Dans le cas des modèles composites, la phase fluide est alors remplacée par un second matériau.

Ainsi, il est possible de coupler le modèle de Tarnow au modèle composite afin de prendre en compte les deux types de fibres constituant les laines végétales.

Dans un premier temps, l'élaboration du couplage des deux modèles est détaillée. Puis, sa validation est évaluée par comparaison avec les résultats des caractérisations expérimentales menées à la Section 3.3 de ce chapitre. Les prédictions du modèle développé sont également comparées à celles de modèles éprouvés de la littérature comme celui de Miki [Miki 1990] ou encore le modèle JCAL détaillé à la Section 3.2.1 du Chapitre II.

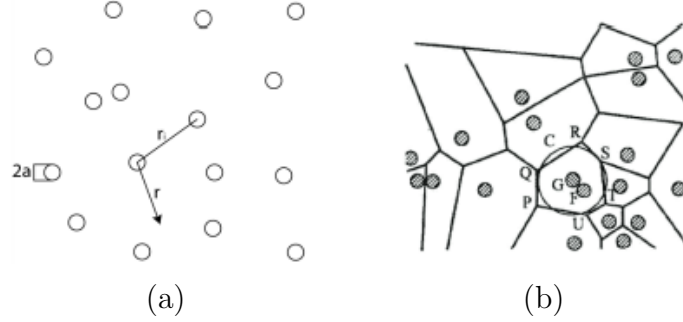
Ensuite, l'intérêt du modèle est analysé. Enfin, une investigation de la variation des rayons de fibres végétales permet d'explorer leur incidence sur la gamme des performances acoustiques des matériaux.

## 4.1 Elaboration du modèle

### 4.1.1 Modèle de Tarnow

Le motif générique à l'échelle locale est constitué d'une phase solide représentée par un cylindre de longueur infinie et de rayon ( $a$ ) comme l'illustre la Figure III.14(a).

Chaque cylindre est séparé de ses voisins par une distance  $r_i$ . Comme la répartition n'est pas régulière, les polygones de Voronoï sont utilisés pour délimiter une cellule autour de chaque cylindre. Les contours sont en fait les médiatrices des segments reliant chaque cylindre avec ces voisins. Chaque cellule de Voronoï est ensuite assimilée à un disque d'une surface équivalente. Comme l'illustre la Figure III.14(b) le cercle C a la même surface que le polygone PQRSTU. L'hypothèse est alors faite que les cylindres se répartissent selon une loi de Poisson et que la surface des cellules suit une distribution gamma de paramètre environ égal à 3,61. L'espérance choisie est notée  $b^2$  et correspond à la surface moyenne d'une cellule unité.



**Figure III.14** – Schématisation du motif générique à l'échelle locale du modèle de Tarnow avec (a) une répartition aléatoire des fibres à partir (b) des polygones de Voronoï [Tarnow 1996]

A partir de cette configuration et des volumes respectifs des phases fluide et solide, il est possible d'exprimer la relation suivante :

$$(b^2 - \pi a^2)\rho_f + \pi a^2\rho_s = b^2\rho_a \quad (\text{III.1})$$

Avec  $\rho_f$  et  $\rho_s$  correspondant respectivement aux masses volumiques du fluide et de la phase solide.

La densité dynamique s'exprime alors par la relation suivante :

$$\rho = \frac{-1}{\phi} \left( \frac{\text{Im}(\Sigma)}{\omega} + j \frac{\text{Re}(\Sigma)}{\omega} \right) \quad (\text{III.2})$$

La fonction  $\Sigma$  est obtenue par une méthode auto-cohérente itérative nommée l'approche de Brinkman. Cette méthode est détaillée dans [Tarnow 1997a].

En ce qui concerne le module d'incompressibilité dynamique, il est déterminé après hypothèses et calculs (détaillés dans [Tarnow 1997b]) par la relation suivante :

$$K = \left( \frac{\gamma P_0}{\phi} \right) \left[ \frac{1}{\gamma - \frac{\gamma-1}{1 + \frac{4j}{b^2} \left[ \frac{2j}{\pi} \ln(0.89054ka) + 1 \right]}} \right] \quad (\text{III.3})$$

La méthode donne également une relation de la résistivité en fonction d'une valeur de rayon de fibres ( $R_f$ ), la porosité du matériau ( $\phi$ ) et la viscosité dynamique ( $\mu$ ) :

$$\sigma = 4\mu \frac{(1 - \phi)}{R_f^2 \left[ 0.640 \ln \left( \frac{1}{(1-\phi)} \right) - 0.737 + (1 - \phi) \right]} \quad (\text{III.4})$$

### 4.1.2 Modèle composite à deux tailles de fibres

Afin de prendre en compte les deux types de fibres, végétales et polymères dans la modélisation, le modèle de Tarnow est adapté à partir de l'approche composite développée dans [Gourdon & Seppi 2010].

Ainsi, la phase solide est considérée comme un mélange de deux milieux fibreux, avec le premier contenant les fibres végétales et le second les fibres polymères. Il est donc nécessaire pour utiliser une telle approche de connaître les fractions volumiques de chacun des milieux. Ces données sont obtenues à partir des fractions massiques données dans le Tableau III.1.

Afin de pouvoir déterminer le coefficient d'absorption acoustique ainsi modélisé, il est nécessaire de déterminer les expressions de la densité dynamique  $\rho_h$  et du module d'incompressibilité dynamique  $K_h$  qui sont les grandeurs intrinsèques aux matériaux et représentatifs des effets visco-inertiels et thermiques au sein du milieu composite. Ces deux grandeurs ont été définis précédemment à la Section 2.1 du Chapitre II.

#### Effets visco-inertiels

Pour le cas du milieu composite, on peut appliquer la relation qui lie la densité dynamique  $\rho_h$  à la perméabilité dynamique  $\Pi_h$  décrite à l'Equation II.11.

Par ailleurs,  $\Pi_h$  s'exprime en fonction de la perméabilité dynamique du milieu constitué des fibres végétales,  $\Pi_v$ , de la perméabilité dynamique du milieu constitué des fibres polymères,  $\Pi_p$ , ainsi que de la fraction volumique de fibres polymères dans le milieu composite  $\tau$ , par la relation suivante :

$$\Pi_h = (1 - \tau)\Pi_v + \tau\Pi_p \quad (\text{III.5})$$

$\Pi_v$  et  $\Pi_p$  sont alors déterminés à l'aide du modèle de Tarnow. Ainsi, elles dépendent uniquement du rayon de fibres moyen de chaque type de fibres et de la porosité du matériau dont l'hypothèse est faite qu'elle est la même pour les deux milieux compte tenu de l'homogénéité du matériau.

#### Effets thermiques

En s'appuyant sur les travaux menés dans [Gourdon & Seppi 2010],  $K_h$  peut s'exprimer à partir de  $\tau$ , des modules d'incompressibilité dynamique des milieux constitués des fibres végétales ( $K_v$ ) et des fibres polymères ( $K_p$ ), ainsi que d'un paramètre  $F_d$  représentant le niveau de couplage entre les deux milieux fibreux constituant la phase solide. Ainsi,  $K_h$  s'exprime par

la relation suivante :

$$K_h = \left[ \frac{\tau}{K_p(\omega)} + (1 - \tau) \frac{F_d(\omega)}{K_h(\omega)} \right]^{-1} \quad (\text{III.6})$$

Dans le cadre de cette thèse, l'hypothèse est faite d'un couplage complet entre les deux milieux, entraînant  $F_d = 1$ . En effet, compte tenu de la répartition supposée homogène des fibres polymères parmi les fibres végétales, on fait l'hypothèse d'une pression uniforme dans le matériau. Ainsi, on peut considérer qu'il n'existe pas de fort contraste de perméabilité entre les deux milieux nécessitant de prendre en compte une fonction de diffusion de pression.

$K_v$  et  $K_p$  sont déterminés à partir de l'Equation III.3 du modèle de Tarnow.

### 4.2 Validation du modèle à deux tailles de fibres

Le modèle ainsi adapté pour prendre en compte deux types de fibres est dans un premier temps validé par comparaison avec les caractérisations expérimentales dont les résultats ont été présentés à la Section 3.3 de ce chapitre.

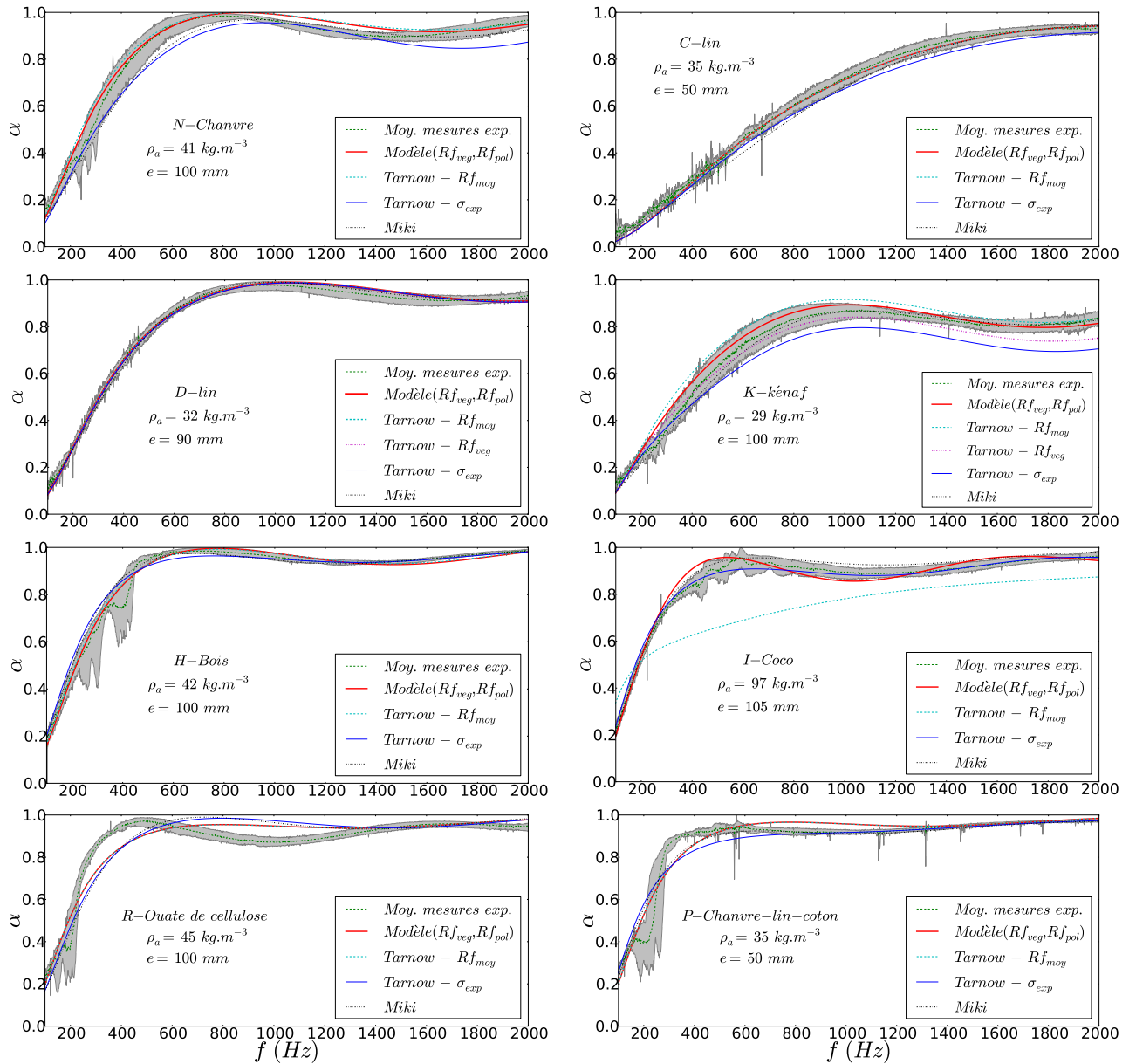
Dans un second temps, il peut être comparé aux modèles de Tarnow et à celui de Miki qui sont fréquemment utilisés dans la littérature afin d'en évaluer l'intérêt. Dans la suite de ce mémoire, le modèle à deux tailles de fibres est désigné comme « Modèle ( $R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}}$ ) ». Le modèle « Tarnow- $\sigma$  » est utilisé avec une valeur de résistivité expérimentale (Tableau III.4) en entrée, alors que les modèles « Tarnow- $R_f$  » et « Tarnow- $R_{f_{veg}}$  » utilisent respectivement une valeur moyenne de rayon de fibres expérimentale (végétales et polymères) et une valeur moyenne de rayon de fibres végétales (Tableau III.2) afin de déterminer la valeur de résistivité.

#### 4.2.1 Validation du modèle par rapport aux résultats expérimentaux

Les prédictions du modèle à deux tailles de fibres donnent des résultats fiables par comparaison avec les mesures expérimentales avec un degré moindre pour la laine de coco (I) et la ouate de cellulose (R), comme l'illustre la Figure III.15.

Afin de matérialiser l'amplitude des valeurs expérimentales d'absorption acoustique, un fuseau (grisé) est représenté graphiquement pour tous les matériaux caractérisés à la Figure III.15. Il est construit à partir des valeurs minimales et maximales de l'absorption acoustique. La valeur moyenne de ces mesures expérimentales est également représentée comme cela avait été fait pour la Figure III.13. Afin de quantifier l'amplitude moyenne du fuseau, un écart relatif entre les valeurs minimales et maximales est calculé et reporté dans le Tableau III.6.





**Figure III.15** – Comparaison du modèle à deux tailles de fibres ( $R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}}$ ) avec les résultats des caractérisations expérimentales et avec les modèles de Tarnow et de Miki

Un écart relatif moyen est également indiqué dans le Tableau III.6 entre les résultats des modélisations et la valeur moyenne des résultats expérimentaux.

Pour le modèle ( $R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}}$ ) la plupart des écarts relatifs moyens sont inférieurs à 5% ou très proche pour la laine de kénaf avec 5, 2%. Ils sont un peu plus élevés pour les laines de coco (I) et la ouate de cellulose (R).

### III.4 Modèle d'homogénéisation acoustique s'appuyant sur deux types de fibres

Pour la laine de coco (I), cela peut s'expliquer par des valeurs de rayon moyen de fibres végétales et de porosité légèrement surévalués. Néanmoins, l'écart relatif présenté reste acceptable.

Pour la ouate de cellulose (R), l'écart avec les caractérisations expérimentales peut s'expliquer par le comportement élastique du matériau, qui à basse fréquence est mis en vibration par les ondes acoustiques. Comme les modélisations mises en œuvre reposent sur l'hypothèse d'un squelette rigide, les phénomènes de résonances de la phase solide ne sont pas pris en compte, ce qui constitue dans le cas présent une des limites des modélisations utilisées. Néanmoins, la modélisation reste acceptable en première approximation. Il est à noter que ce phénomène apparaît également pour le cas de la laine de chanvre-lin-coton. En s'appuyant sur les résultats expérimentaux d'absorption acoustique des matériaux étudiés dans la thèse et présentés à la Figure III.13(a), ce phénomène de résonance concerne les laines végétales d'une épaisseur  $e \geq 100 \text{ mm}$  ou d'une masse volumique  $\rho_a \geq 40 \text{ kg.m}^{-3}$ . Des investigations complémentaires sur la modélisation de ce comportement élastique de la phase solide sont présentées à la Section 5.2 de ce chapitre.

Laine	Réf.	Ec relatif moy (%) Exp.	Ec relatif moy (%) Mod ( $R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}}$ )	Ec relatif moy (%) Tarnow- $\sigma$	Ec relatif moy (%) Tarnow- $R_f$	Ec relatif moy (%) Miki
Chanvre	N	11,7	3,3	6,5	4,2	5,3
Lin	C	11,0	4,0	7,6	4,1	6,3
	D	4,9	1,7	1,8	1,7	1,5
Kénaf	K	12,0	5,2	10,5	8,3	3,6
Bois	H	7,1	2,3	3,2	2,2	2,6
Coco	I	7,2	6,2	2,0	6,8	3,4
Ouate cel.	R	7,5	7,5	8,2	7,5	8,1
Chanvre-lin-coton	P	10,8	4,4	4,4	4,4	3,6

**Tableau III.6** – Ecart relatif moyen entre la valeur min et max pour les mesures expérimentales et entre les prédictions des modèles et la valeur moyenne des résultats expérimentaux

En conclusion, le modèle ( $R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}}$ ) est considéré comme validé pour la détermination de l'absorption acoustique des laines végétales.

#### 4.2.2 Évaluation de l'intérêt du modèle ( $R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}}$ )

Dans un premier temps, en s'appuyant sur la Figure III.15 et le Tableau III.6, la comparaison du modèle ( $R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}}$ ) avec celui de Miki conduit à des résultats relativement proches sauf

pour la laine de coco. Des explications ont été avancées à la section précédente (4.2.1).

Afin d'évaluer l'intérêt du modèle  $(R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}})$  s'appuyant sur deux tailles de fibres, ce dernier est comparé au modèle de Tarnow et à celui de Miki qui est un modèle empirique largement utilisé dans la littérature pour modéliser les propriétés en absorption acoustique des matériaux fibreux.

A partir des résultats de la Figure III.15 et du Tableau III.6, on constate que la modélisation Tarnow– $R_f$  présente de meilleurs résultats que le modèle Tarnow– $\sigma$  sauf dans le cas de la laine de coco où la modélisation est relativement éloignée des données expérimentales. Cet écart peut s'expliquer par une distribution de rayons de fibres très hétérogène, comme cela a été caractérisé à la section 2.1.3 de ce chapitre.

Ainsi, dans ce cas, le modèle  $(R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}})$  permet de traduire une partie de cette hétérogénéité avec deux tailles moyennes de fibres végétales et polymères ayant une différence significative ( $R_{f_{veg}} = 49,70 \mu m$  et  $R_{f_{pol}} = 11,52 \mu m$ ).

Ainsi, on constate en s'appuyant sur la Figure III.15 et le Tableau III.6, que le modèle  $(R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}})$  conduit pour tous les matériaux à de meilleurs résultats que pour le modèle Tarnow– $R_f$ .

L'influence des fibres polymères même en faible quantité est relevée à partir du moment où leur valeur moyenne de rayons de fibres présente une différence avec celle des fibres végétales. Cette différence n'est cependant pas significative dans tous les cas. En effet, lorsque les valeurs moyennes de rayons de fibres végétales et polymères sont proches, le gain apporté par le modèle  $(R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}})$  reste modéré. Ainsi, pour la laine de lin (D), dont les rayons moyens sont  $R_{f_{veg}} = 12,78 \mu m$  et  $R_{f_{pol}} = 12,13 \mu m$ , les résultats des modèles  $(R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}})$  et Tarnow– $R_{f_{veg}}$  sont quasiment identiques.

En revanche, pour le cas de la laine de kéraf (K), pour laquelle les rayons moyens sont  $R_{f_{veg}} = 19,84 \mu m$  et  $R_{f_{pol}} = 12,86 \mu m$ , l'influence des fibres polymères est beaucoup plus significative. Cela se traduit par un gain de l'ordre de 3% entre l'écart relatif du modèle  $(R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}})$  et celui du modèle Tarnow– $R_{f_{veg}}$  par rapport aux résultats expérimentaux.

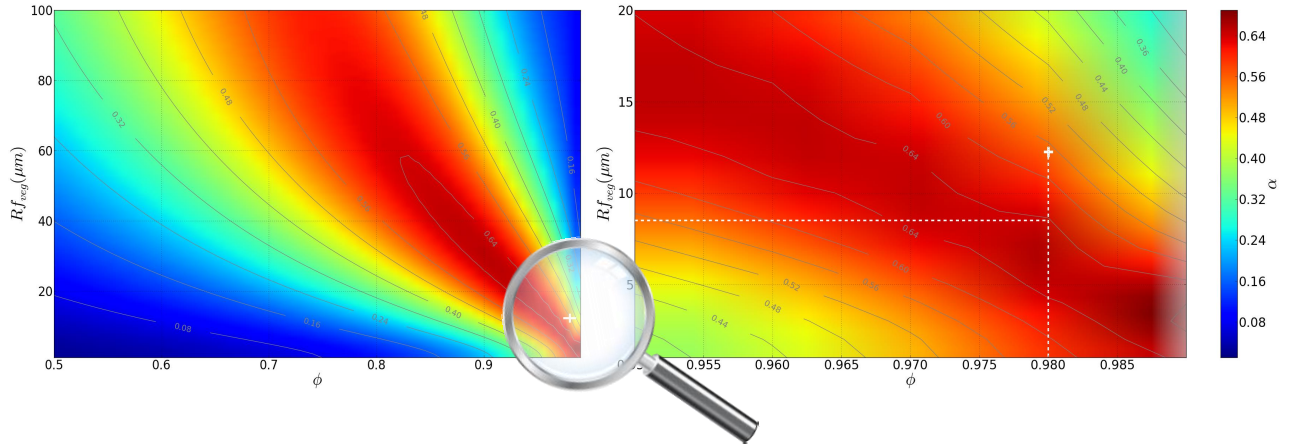
Ce modèle fait donc preuve d'un grand intérêt à partir du moment où les fibres végétales vont présenter des tailles moyennes d'un ordre supérieur à celui des fibres polymères. Il va également présenter un grand intérêt pour les matériaux ayant un degré de défibrage relativement faible avec une présence de nombreux agglomérats de fibres végétales.

D'autre part, il est possible d'utiliser cette modélisation en vue d'optimiser l'absorption acoustique des matériaux.

### 4.3 Optimisation de l'absorption acoustique

Afin d'analyser l'influence de la porosité et du rayon moyen de fibres végétales sur l'absorption acoustique des matériaux fibreux, tels que les laines végétales, le modèle  $(R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}})$  est utilisé pour la laine de lin (D). Son épaisseur ( $e = 90\text{ mm}$ ) et la valeur de rayons de fibres polymères ( $R_{f_{pol}} = 12,29\ \mu\text{m}$ ) restent inchangés. En revanche, sa porosité et son rayon moyen de fibres végétales varient selon les plages suivantes :

- Pour  $\phi : [0,5 - 1]$  avec un pas de 0.01.
- Pour  $R_{f_{veg}} : [1 - 100\ \mu\text{m}]$  avec un pas de  $1\ \mu\text{m}$ .



**Figure III.16** – Modélisation du coefficient d'absorption acoustique moyen de la laine de lin (D) à partir du modèle  $(R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}})$

La Figure III.16 présente la valeur moyenne du coefficient d'absorption acoustique calculé dans la plage  $[0 - 2000\text{ Hz}]$  avec un pas de  $4\text{ Hz}$  pour chaque couple  $(R_{f_{veg}}, \phi)$ .

La valeur moyenne du coefficient d'absorption acoustique pour la laine de lin (D) telle qu'elle a été caractérisée dans la thèse est représentée par une croix blanche ( $R_{f_{veg}} = 12,29$  et  $\phi = 0,98$ ).

On voit ainsi sur la Figure III.16, qu'il est possible d'améliorer l'absorption acoustique de la laine (D). En diminuant la porosité, il est possible d'améliorer cette propriété d'absorption avec des fibres de rayons moyens plus élevés. Cependant, dans l'optique d'une optimisation conjointe avec les propriétés thermiques des laines végétales, qui est l'objectif final de la thèse, il ne semble pas pertinent de diminuer la porosité des matériaux. Le fait d'augmenter encore un peu plus la porosité de (D) est possible mais va nécessiter une diminution du rayon moyen de

fibres végétales (valeurs de l'ordre de  $5\ \mu m$ ) pour améliorer son absorption. Cette valeur semble difficile à obtenir avec les process de défibrages utilisés dans la fabrication des laines végétales.

Il est cependant possible de conserver la même porosité et de diminuer le rayon moyen des fibres végétales vers une valeur de l'ordre de  $9\ \mu m$  afin de passer d'une valeur moyenne de coefficient d'absorption acoustique d'environ 0,56 à 0,64, comme l'illustre la Figure III.16.

Un modèle composite a pu être adapté dans le cadre de cette thèse au cas des laines végétales afin de prendre en compte les deux types de fibres qui composent leur phase solide.

Ce modèle a été validé par comparaison avec les mesures expérimentales d'absorption acoustique menées sur les laines végétales étudiées dans le cadre de cette thèse.

De plus, la comparaison avec le modèle de Tarnow a établi que le modèle  $(R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}})$  présente des prédictions plus précises notamment dans le cas où les rayons moyens des fibres végétales et polymères sont différents.

En outre, ce modèle peut également être utilisé afin d'optimiser les performances en absorption acoustique des laines végétales en faisant varier la porosité des matériaux, ainsi que leur valeur moyenne de rayons de fibres végétales.

Néanmoins, une limite des modélisations mises en œuvre dans cette section a été observée lorsque le squelette des matériaux ne respecte plus l'hypothèse de rigidité. Il semble donc pertinent d'investiguer les comportements limp et élastique du squelette.

## 5 Analyse et prise en compte des comportements limp et élastique de la phase solide

Les caractérisations expérimentales, représentées à la Figure III.15, ont permis d'observer des résonances mécaniques pour plusieurs matériaux. Leur présence souligne les limites de l'hypothèse de squelette rigide énoncée à la Section 2.1.1 du Chapitre II pour les laines végétales concernées.

Comme cela a été évoqué à la Section 3.3.1 du Chapitre II, deux autres types de comportements, limp et élastique sont possibles pour la phase solide des matériaux poreux.

Ainsi, dans un premier temps, des caractérisations expérimentales sont réalisées à basses fréquences puis comparées aux prédictions des modélisations afin d'évaluer si le comportement limp est observé pour les laines végétales concernées.

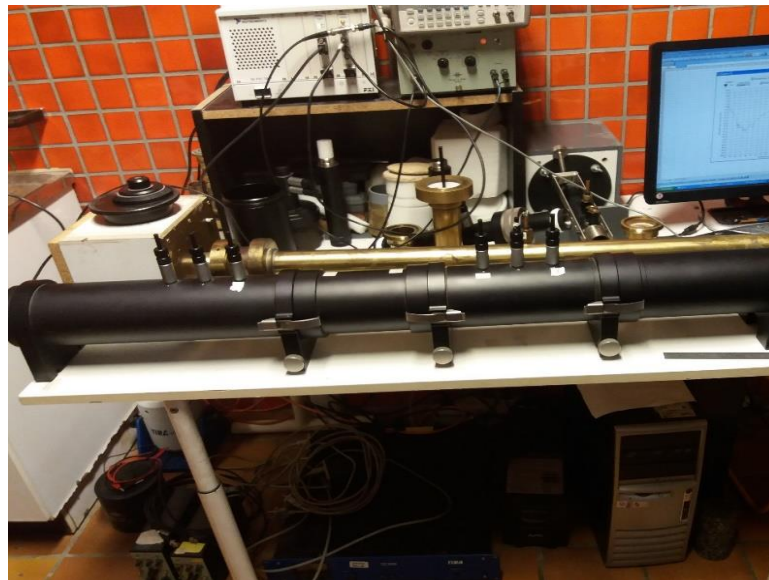
Dans un second temps, le modèle de Biot [Biot 1956a, Biot 1956b] peut être utilisé afin de prendre en compte le comportement élastique du squelette des matériaux. A travers la mise en

œuvre de la méthode TMM, présentée à la Section 3.3.1 du Chapitre II, son efficacité est alors évaluée pour le cas des laines végétales étudiées dans le cadre de cette thèse.

### 5.1 Comportement limp

#### 5.1.1 Dispositif et protocole expérimentaux utilisés

Comme cela a été montré à la Figure II.13 issue de [Panneton 2007], le comportement limp s'observe à partir des parties réelles et imaginaires de la densité dynamique ( $\rho$ ) à basse fréquence.



**Figure III.17** – Tube d'impédance Bruel & Kjaer Type 4106 de l'ENTPE adapté pour les caractérisations expérimentales de l'effet limp sur les laines végétales

Avec le dispositif de tube d'impédance utilisé pour la caractérisation acoustique des matériaux, la limite basse de la fréquence est de  $143\text{ Hz}$ . Or, il est nécessaire d'abaisser cette limite pour observer un éventuel effet limp.

Pour cela, il est nécessaire d'augmenter la longueur du tube d'impédance et la distance entre les deux microphones mesurant la pression acoustique à l'intérieur. Les mesures ont été réalisées à l'ENTPE avec un tube d'impédance Bruel & Kjaer Type 4106, comme illustré à la Figure III.17.

Après de nombreuses phases d'expérimentations relatives aux réglages de l'allongement du tube et à l'écartement des microphones, le meilleur compromis a été trouvé pour une distance

de séparation des microphones de  $40,5\text{ cm}$ . Les mesures ont ainsi été réalisées pour une plage de fréquences de  $[45 - 500\text{ Hz}]$  avec un pas de  $0,5\text{ Hz}$ .

Quatre matériaux ont pu être caractérisés expérimentalement :

- la laine de lin cotonisé (C),  $e = 50\text{ mm}$ ,  $\rho_a = 34,9\text{ kg.m}^{-3}$  ;
- la laine de lin (D),  $e = 90\text{ mm}$ ,  $\rho_a = 31,7\text{ kg.m}^{-3}$  ;
- la laine de kénaif (E),  $e = 25\text{ mm}$ ,  $\rho_a = 39,0\text{ kg.m}^{-3}$  ;
- la laine de coco (I),  $e = 105\text{ mm}$ ,  $\rho_a = 96,8\text{ kg.m}^{-3}$  ;

Les caractéristiques de ces matériaux permettent de balayer des plages importantes d'épaisseurs et de masses volumiques apparentes. Compte tenu de ces caractéristiques, on peut envisager une éventuelle observation du comportement limp pour les laines (C), (D) et (E).

### 5.1.2 Analyse des résultats expérimentaux

Dans le but de vérifier si le comportement limp concerne les matériaux caractérisés, seule la densité dynamique est représentée, comme l'illustre la Figure III.18.

Le modèle de Johnson *et al.* [Johnson *et al.* 1987] est utilisé pour modéliser la densité dynamique (Equation II.41) avec l'hypothèse de squelette rigide puis avec une densité dynamique adaptée au comportement limp déterminée par l'Equation II.45.

La comparaison des courbes expérimentales de densité dynamique avec les modélisations ne conduit finalement pas à une observation évidente de l'effet limp. En effet, pour les laines (C) et (D), les courbes expérimentales sont beaucoup plus proches de l'hypothèse de squelette rigide que ce soit pour la partie réelle comme pour la partie imaginaire. Pour la laine (E), il est difficile d'apporter une conclusion compte tenu de la courbe extrêmement bruitée pour la partie imaginaire de la densité dynamique expérimentale et du faible écart entre les deux modélisations. Enfin, pour la laine de coco, comme attendu, la masse volumique du matériau est trop élevée pour que l'effet limp puisse être observé.

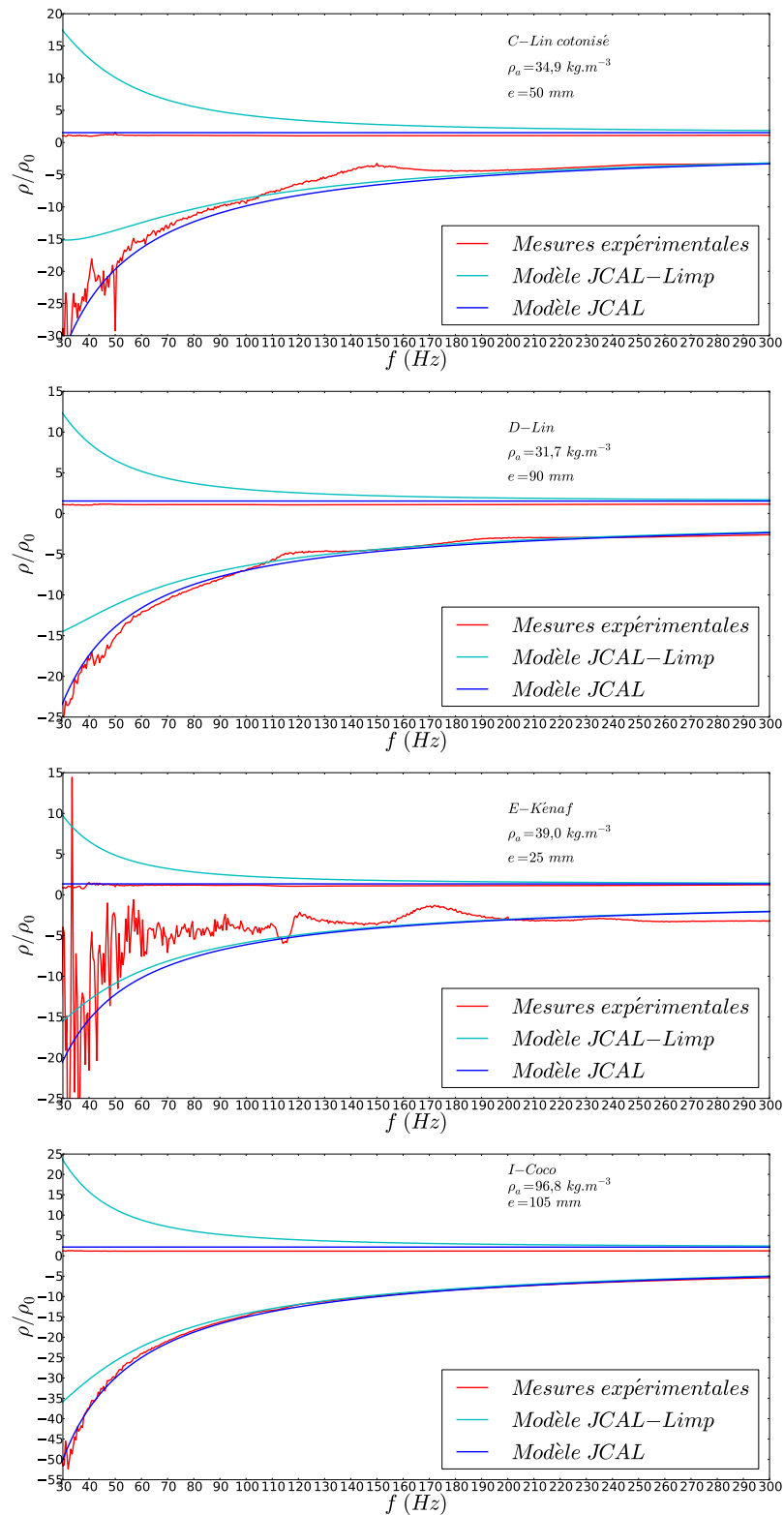
En conclusion, l'effet limp n'a pas été observé à partir des mesures expérimentales réalisées dans le cadre de cette thèse, malgré l'adaptation du tube d'impédance permettant de caractériser la densité dynamique des matériaux à partir d'une valeur en fréquence de  $45\text{ Hz}$ .

## 5.2 Comportement élastique

### 5.2.1 Principe de la TMM

La méthode TMM, décrite dans [Allard & Atalla 2009], a été explicitée à la Section 3.3.1 du Chapitre III.

### III.5 Analyse et prise en compte des comportements limp et élastique de la phase solide



**Figure III.18** – Comparaison des caractérisations expérimentales de la densité dynamique normalisée avec les modélisations de Johnson *et al.* [Johnson *et al.* 1987] pour le cas limp et le cas d'un squelette rigide



Cette méthode peut être utilisée afin de prendre en compte le comportement élastique de la phase solide d'un matériau poreux selon le modèle de Biot [Biot 1956a, Biot 1956b].

Dans le cas des panneaux de laines végétales, deux hypothèses sont formulées concernant une couche de fluide-équivalent ou une couche poroélastique, couplant la dissipation visco-thermique de la phase fluide et la dissipation élastique de la phase solide.

La première étape de l'approche TMM consiste à déterminer la matrice de transfert pour chaque hypothèse. Le détail des matrices des couches fluide-équivalent et poroélastique n'est pas explicité dans ce mémoire mais peut être consulté dans [Allard & Atalla 2009]. Dans le cas de la couche fluide-équivalent, c'est le modèle JCAL, explicité à la Section 3.2.1 du Chapitre II, qui est utilisé.

Il convient ensuite de fixer une condition limite à l'extrémité du matériau et un angle d'incidence pour l'onde sonore excitatrice. Afin de se placer dans les mêmes conditions que celles utilisées pour la caractérisation expérimentale, on se place dans le cas d'un matériau adossé à une terminaison rigide et une onde sonore en incidence normale.

Les propriétés acoustiques du matériau poreux, telles que l'absorption ou l'affaiblissement acoustique peuvent alors être modélisées.

### 5.2.2 Analyse des résultats de la modélisation TMM

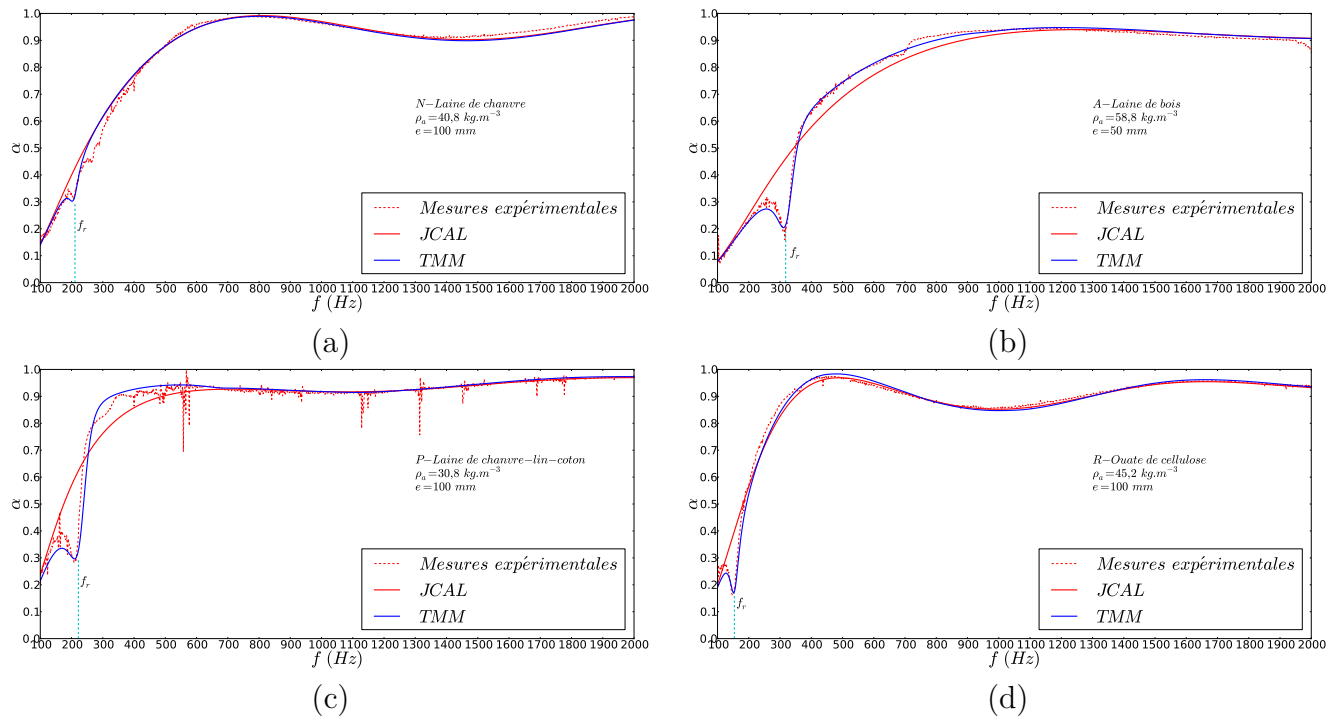
La méthode a été appliquée à quatre matériaux présentant une résonance mécanique lors de la caractérisation expérimentale, les laines de chanvre (N), de bois (A), de chanvre-lin-coton (P) et la ouate de cellulose (R).

En ce qui concerne les paramètres élastiques, l'hypothèse est faite que le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) est considéré comme nul pour tous les matériaux étudiés dans le cadre de la thèse. En effet, le coefficient de Poisson correspond, lors d'une compression 1D d'un échantillon, au rapport entre l'allongement transversal relatif et le rétrécissement longitudinal relatif. Or, il est constaté que l'allongement transversal relatif est quasiment nul pour les laines végétales. Ainsi, l'hypothèse est faite de considérer une valeur nulle pour le coefficient de Poisson dans le cadre de ces travaux de thèse, comme cela est fait dans [Blinet *et al.* 2018] pour des laines végétales ou dans [Dauchez *et al.* 2002] et [Tarnow 2005] pour des laines minérales.

Les modules d'Young ( $E$ ) sont ensuite déterminés par méthode des moindres carrés entre les modélisations et les résultats expérimentaux relatifs aux coefficients d'absorption acoustique de chaque échantillon. Les paramètres acoustiques utilisés pour la mise en œuvre de la modélisation sont ceux synthétisés dans le Tableau III.5.

Les résultats des modélisations sont représentés à la Figure III.19.

### III.5 Analyse et prise en compte des comportements limp et élastique de la phase solide



**Figure III.19** – Comparaison des modélisations TMM (Biot) et JCAL avec les caractérisations expérimentales des coefficients d'absorption acoustique d'un échantillon des laines (a) de chanvre (N), (b) de bois (A), (c) de chanvre-lin-coton et (d) pour la ouate de cellulose

L'utilisation du modèle de Biot via la méthode TMM permet bien de retranscrire le comportement élastique observé à partir des résultats expérimentaux. Les valeurs de modules d'Young ( $E$ ) utilisés pour la modélisation sont reportés dans le Tableau III.7.

Laine	Réf.	$E$ (kPa)	$f_r$ (Hz)
Chanvre	N	280	211
Bois	A	270	318
Ouate cel.	R	170	154
Chanvre-lin-coton	P	240	222

**Tableau III.7** – Module d'Young et fréquence de compression des matériaux (N), (A), (R) et (P)

Les valeurs du module d'Young, comprises dans la plage  $[1,7 - 2,8 \text{ kPa}]$ , sont relativement proches les unes des autres. Ces valeurs sont supérieures à celles caractérisées dans [Blinet *et al.* 2018] qui ont été présentées précédemment à la Section 2.3 du Chapitre II.

Les valeurs synthétisées dans le Tableau III.7 correspondent effectivement à des modules apparents, conditionnés par la géométrie de l'échantillon et par ses conditions limites dans

le tube. Leur estimation indirecte à partir des mesures acoustiques reste ainsi approximative compte tenu de la variabilité constatée lors des mesures expérimentales et liée à la souplesse des matériaux.

Dans [Allard & Atalla 2009], une relation de détermination de cette fréquence a été établie en fonction de l'épaisseur des matériaux, ainsi que leur masse volumique apparente et les valeurs de module d'Young et de coefficient de Poisson. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$f_r = \frac{1}{4e} \sqrt{\frac{\text{Re}(K_c)}{\rho_a}} \quad (\text{III.7})$$

Avec

$$K_c = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (\text{III.8})$$

Cette fréquence correspond à une résonance quart d'onde liée à la propagation d'une onde de compression dans la phase solide des matériaux dans la même direction que l'excitation. Les valeurs des fréquences de compression pour les matériaux (N), (A), (P) et (R) sont indiquées dans le Tableau III.7. Elles ont été reportées sur les graphes de la Figure III.19. On s'aperçoit que ces fréquences correspondent bien à celles modélisées à l'aide de la TMM.

Pour conclure, le modèle de Biot couplé à un modèle fluide-équivalent du type JCAL mis en œuvre à l'aide de la TMM prédit de manière satisfaisante le comportement élastique des laines végétales dans le cadre de leurs performances en absorption acoustique.

## 6 Influence de la compression sur les performances acoustiques des laines végétales

Afin de caractériser et de mieux comprendre le lien entre la compression des matériaux ( $\rho_a$ ) et leurs propriétés en absorption acoustique ( $\alpha$ ), ainsi que leur résistivité ( $\sigma$ ), des caractérisations expérimentales ont été menées dans le cadre de la thèse.

Pour cela, il a été nécessaire d'adapter les dispositifs expérimentaux afin de réaliser des mesures en compression.

Même si la compression des matériaux fibreux a déjà été investiguée dans la littérature, tous les travaux s'appuient sur la modélisation de base établie dans [Castagnède *et al.* 2000]. Ainsi, cette approche est utilisée dans le cas d'une laine de lin afin d'estimer ses paramètres acoustiques, comme la résistivité, la tortuosité et les longueurs caractéristiques visqueuse et

thermique.

Il est alors possible de comparer l'absorption modélisée avec les résultats expérimentaux afin d'évaluer sa pertinence dans le cas des laines végétales.

### 6.1 Adaptation des dispositifs expérimentaux

Afin de caractériser expérimentalement l'absorption acoustique et la résistivité des matériaux en compression, il a été nécessaire d'adapter le tube d'impédance et le résistivimètre du laboratoire de Strasbourg. Le même principe a été utilisé pour ces deux dispositifs. Ainsi, seule l'adaptation du tube d'impédance est présentée à l'Annexe A4.2.

Les phases de conception, de mise en œuvre et d'expérimentation qui ont conduit à ces évolutions ont été réalisées à l'occasion de mon co-encadrement d'un stage de Master 2 « Sciences, Technologie, Santé, Mention Physique fondamentale et Applications » de l'Université de Bordeaux, dont l'intitulé est « Effet de la compression sur les performances acoustiques et thermiques des laines végétales » [Farah 2018].

Avant la réalisation des mesures sur les laines végétales, des phases de tests ont été réalisées afin d'évaluer la transparence acoustique du système de compression placé à l'intérieur du tube d'impédance. Ils ont permis d'identifier que la réduction de la section du tube d'impédance avait une influence sur les mesures d'absorption acoustique. Ainsi, les fonctions de transferts sont réajustées avant l'exploitation des données expérimentales.

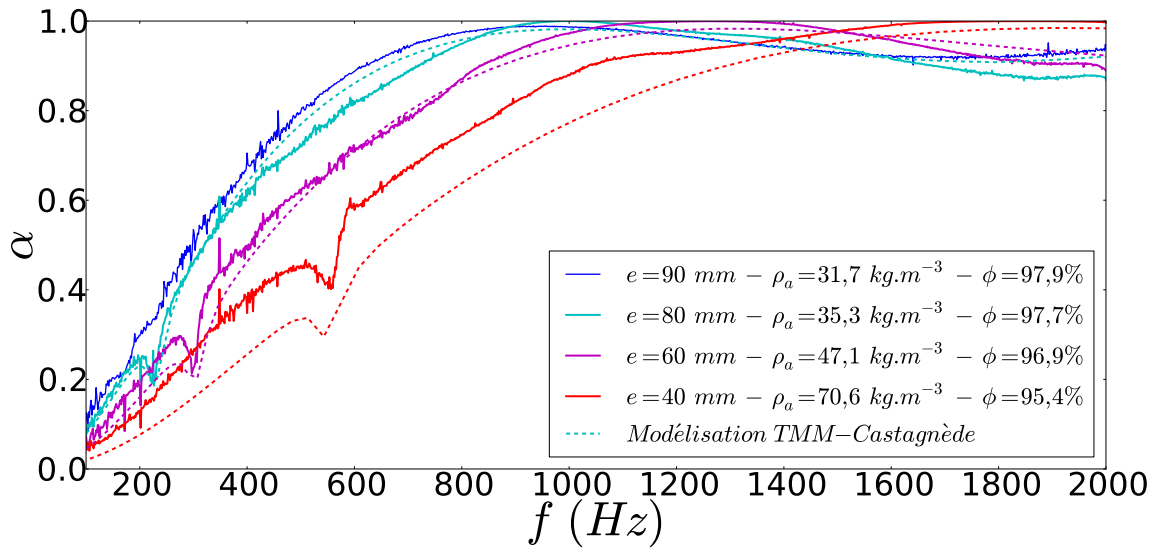
### 6.2 Résultats et analyses des caractérisations expérimentales

#### 6.2.1 Coefficient d'absorption acoustique

Dans le cadre de ce mémoire, on se focalise sur un matériau représentatif du comportement des laines végétales en compression. C'est la laine de lin (D) qui est retenue. En effet, comme l'illustre la Figure III.20, elle est caractérisée par une absorption acoustique moyenne représentative pour ce type de matériau et montre très bien un comportement élastique caractéristique lorsque sa masse volumique augmente.

Un échantillon de laine (D) est caractérisé pour trois taux de compression différents. Les valeurs d'épaisseur, de masse volumique et de porosité pour chacune de ces compressions sont indiquées sur la Figure III.20.

Sur la plage de fréquences caractérisées expérimentalement, la diminution de l'épaisseur ne semble pas avoir une incidence significative sur l'absorption maximale de l'échantillon. En revanche, on observe un décalage fréquentiel de cette absorption. Avec l'augmentation de la



**Figure III.20** – Caractérisations expérimentales de l’absorption acoustique de la laine de lin (D) sans compression (référence) et pour 3 taux de compression, ainsi que les modélisations TMM-JCA à partir des paramètres acoustiques déterminés avec le modèle de Castagnède

masse volumique de l’échantillon due à la compression, on pourrait s’attendre à un décalage vers les basses fréquences comme cela a été observé à partir des résultats présentés à la Figure III.13. Or on observe le phénomène contraire avec un décalage du premier pic d’absorption (résonance quart d’onde de la phase fluide) vers les hautes fréquences. La diminution de l’épaisseur est ainsi prépondérante sur l’augmentation de la masse volumique.

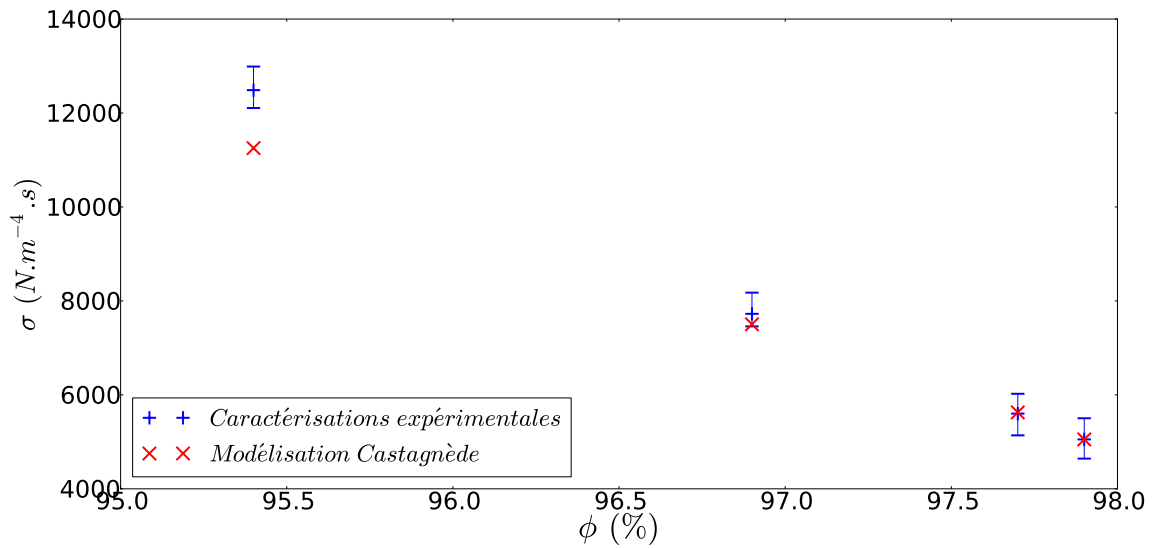
De plus, l’augmentation de la masse volumique met en évidence des résonances mécaniques dues à un comportement élastique du squelette des matériaux. On constate également son décalage vers les hautes fréquences lors de la compression des échantillons. Ce phénomène est analysé un peu plus loin à la Section 6.3.

### 6.2.2 Résistivité

La résistivité est également caractérisée expérimentalement à partir de la laine de lin (D) et pour les mêmes taux de compression que pour les mesures au tube d’impédance.

Les résultats sont présentés à la Figure III.21.

Les résultats sont cohérents avec ce qui pouvait être attendu. En effet, avec la diminution de la porosité et de la taille des pores, les fibres se trouvent plus resserrées et la résistivité augmente.



**Figure III.21** – Caractérisations expérimentales de la résistivité de la laine de lin (D) sans compression (référence) et pour 3 taux de compression, ainsi que les prédictions du modèle de Castagnède pour ces taux de compression

### 6.3 Modélisation des phénomènes de compression 1D

Comme cela a été évoqué à la Section 3.3.2 du Chapitre II, l'influence de la compression 1D sur les performances acoustiques des matériaux fibreux a déjà été investiguée à travers de nombreux travaux de la littérature [Castagnède *et al.* 2001], [Kino & Ueno 2008], mais également [Wang *et al.* 2008], [Campolina *et al.* 2012], [Lei *et al.* 2018]. Néanmoins, tous ces travaux s'appuient sur les travaux originels menés dans [Castagnède *et al.* 2000] où des relations permettent de déterminer les cinq paramètres du modèle JCA à partir d'un taux de compression correspondant au rapport de l'épaisseur initiale du matériau sur son épaisseur comprimée. Castagnède définit ainsi deux jeux de relations pour les compressions 1D et 2D. Dans notre cas, ce sont les relations de la compression 1D qui sont utilisées

L'objectif de cette section est de vérifier sur la laine de lin (D), qui vient d'être caractérisée en compression, si l'application de ces relations permet en première approximation de les valider.

Dans un premier temps, c'est la résistivité qui est modélisée. Elle est déterminée avec la relation de Castagnède et à partir de la valeur de référence (sans compression) mentionnée dans le Tableau III.4. Les résultats sont présentés sur la Figure III.21. On constate que pour les deux premiers taux de compression les valeurs modélisées et expérimentales sont très proches. En revanche, pour le taux de compression le plus élevé on note un écart relatif de l'ordre de

9,5%. L'écart entre le modèle et les données expérimentales semblent s'accroître avec l'augmentation de la compression. Ainsi, le modèle de Castagnède semble plus adapté, dans le cas de la laine de lin (D), pour des taux de compression modérés. A noter, que notre taux de compression le plus élevé s'élève déjà à 55%, ce qui est déjà relativement élevé pour ce type de matériau.

Les trois autres paramètres acoustiques ( $\alpha_\infty$ ,  $\Lambda$  et  $\Lambda'$ ) sont alors déterminés avec la modélisation de Castagnède pour chacun des taux de compression et à partir des valeurs de référence qui ont été synthétisées dans le Tableau III.5.

A l'aide de ces paramètres, un coefficient d'absorption acoustique est déterminé pour chaque taux de compression à l'aide de la modélisation TMM, présentée à la Section 5.2 de ce chapitre, afin de prendre en compte le comportement élastique de la phase solide.

Les résultats de ces modélisations sont représentés à la Figure III.20. De manière cohérente avec la modélisation de la résistivité, le modèle TMM-JCA utilisé avec les paramètres acoustiques déterminés à partir du modèle 1D de Castagnède donne de bons résultats pour les deux premiers taux de compression.

Pour le taux de compression le plus élevée, la modélisation donne une estimation moins précise.

En conclusion, la compression à une dimension de manière perpendiculaire aux couches de fibres, qui a été caractérisée sur une laine de lin, entraîne un décalage fréquentiel de l'absorption acoustique des laines végétales vers les hautes fréquences. Ce décalage est observable pour des diminutions de l'épaisseur de l'ordre de 10 mm. En effet, la réduction de l'épaisseur des matériaux prend le pas sur l'augmentation de la masse volumique. De plus, des résonances mécaniques apparaissent à partir d'un taux de compression de 10% dans le cas de la laine de lin caractérisée. Des précautions sont donc à prendre dans le cas de la mise en œuvre des matériaux impliquant une compression éventuelle des panneaux d'isolants afin de ne pas engendrer de décalage fréquentiel de leurs performances en absorption.

De plus, pour des taux de compressions inférieurs à 50%, l'approche de modélisation proposée par Castagnède pour déterminer les paramètres acoustiques des matériaux comprimés semble présenter des prédictions fiables.

## 7 Conclusion

Ce chapitre a été l'occasion de présenter les matériaux étudiés dans le cadre de la thèse. Les premières campagnes d'expérimentation sur les matériaux ont permis de recueillir de nombreuses données sur leur microstructure, mais également sur les paramètres acoustiques qui leur sont liés et leurs propriétés acoustiques telles que l'absorption et l'affaiblissement acoustique.

En ce qui concerne la microstructure, les analyses d'images réalisées au MEB ont conduit à l'identification des spécificités et des variabilités des fibres végétales, notamment en termes de morphologies et de dimensions, par rapport aux fibres polymères. La réalisation puis l'analyse d'histogrammes de distribution de rayons de fibres permettent de mettre en évidence les différences qui peuvent être marquées entre les différents types de fibres végétales. La répartition des rayons de fibres végétales peut en outre être représentée par des distribution log-normales. Ce qui permet à travers la valeur de l'écart type d'évaluer le degré d'hétérogénéité caractéristique de chaque type de fibres.

Ces résultats constituent des éléments importants sur lesquels il est possible de s'appuyer pour l'analyse des données expérimentales relatives aux paramètres acoustiques tels que la résistivité, la tortuosité, les longueurs caractéristiques visqueuses et thermiques, ainsi que la perméabilité thermique statique. En effet, cela permet de souligner le lien entre la taille des fibres, ainsi que la porosité des matériaux et ses paramètres acoustiques.

La caractérisation des propriétés acoustiques des laines végétales confirme le panel important qu'il est possible d'obtenir pour l'absorption acoustique, en fonction des épaisseurs et des masses volumiques. Cette absorption n'est, par ailleurs, pas impactée par la présence d'eau dans les matériaux. Ce résultat peut s'interpréter par le fait que l'eau se loge préférentiellement dans les pores de plus petites dimensions, qui ont peu d'influence sur les phénomènes de dissipation acoustique. Les indices d'affaiblissement des matériaux restent quant à eux relativement faibles.

Afin de prendre en compte les différences de dimensions entre les fibres végétales et polymères dans la modélisation de l'absorption acoustique, un modèle composite s'appuyant sur l'approche d'homogénéisation micro-macro de Tarnow a été développé. Il permet ainsi de prédire l'absorption acoustique des matériaux fibreux à partir de deux valeurs équivalentes de rayons de fibres. La validation de ce modèle a été réalisée pour les laines végétales par comparaison avec les caractérisations expérimentales. De plus, l'analyse de ces résultats a montré que la modélisation développée conduisait toujours à des prédictions plus précises que pour le modèle à une taille de fibre.

L'utilisation de modèles classiques de la littérature relatifs au comportement poroélastique des matériaux a permis de vérifier leur efficacité pour les laines végétales concernant la prise



en compte du comportement élastique et dans le cas de la compression des matériaux.

Il semble opportun à présent d'étudier les phénomènes physiques liés aux propriétés thermiques des laines végétales afin d'évaluer si des méthodes d'homogénéisation micro-macro peuvent être établies en s'appuyant sur les paramètres influents identifiés dans le cas acoustique, tels que la taille des fibres ou encore la porosité. De même, il semble pertinent d'analyser, comme pour l'acoustique, l'influence de l'eau et de la variation de masse volumique sur les performances des laines végétales.

---

# Caractérisation et modélisation des performances thermiques des laines végétales

---

Les propriétés thermiques des laines végétales sont tout d'abord caractérisées expérimentalement. Des campagnes de mesures de la conductivité thermique sont ainsi réalisées avec plusieurs types de dispositifs expérimentaux, soit en régime transitoire, soit en régime stationnaire.

Les dispositifs utilisés sont ensuite adaptés afin de réaliser des mesures de conductivité thermique pour différents taux de compression (1D) des matériaux. Leur réaction face aux changements de température et d'humidité relative de leur environnement est également caractérisée expérimentalement, ainsi que, l'effet de la présence d'eau sur leurs performances thermiques. Toutes ces données collectées permettent à la fois d'étudier l'impact de la masse volumique et de la teneur en eau sur les propriétés thermiques des laines végétales, mais également de constituer des bases de données utilisées ensuite pour la validation des modèles mis en œuvre.

Dans le cadre de la modélisation de la conductivité thermique équivalente des laines végétales, une méthode d'homogénéisation micro-macro dite auto-cohérente (HAC cylindrique) est adaptée au cas des matériaux fibreux afin de prendre en compte leur caractère anisotrope et la géométrie de leur microstructure.

Enfin, pour compléter cette approche, l'effet du rayonnement entre les fibres, dont l'influence sur la conductivité thermique est mise en exergue, est également modélisé. Les résultats de la modélisation couplée des phénomènes de transferts par conduction et rayonnement sont ainsi présentés et analysés.

# 1 Dispositifs utilisés et protocoles mis en œuvre pour la caractérisation expérimentale

La caractérisation expérimentale des propriétés thermiques des laines végétales est réalisée à partir de trois dispositifs. Comme cela a été souligné dans le Chapitre II d'état de l'art, la caractérisation de la conductivité thermique équivalente, pour des matériaux hygroscopiques comme les laines végétales, est relativement délicate à réaliser.

En effet, les résultats dépendent fortement des conditions de température et d'humidité relative dans lesquelles les essais sont réalisés. De plus, on trouve dans la littérature deux types de dispositifs de caractérisation différents. Le premier réalise les essais en régime transitoire et le second en régime permanent. C'est pourquoi, plusieurs dispositifs et protocoles expérimentaux sont utilisés, afin d'évaluer leur pertinence et de caractériser de manière la plus complète possible la conductivité thermique des laines végétales.

## 1.1 Dispositifs en régime transitoire

Dans le cadre de ces travaux de thèse, deux dispositifs sont utilisés :

- Le premier est du type disque chaud nommé « **Hot Disk** » s'appuyant sur la norme ISO 22007-2 [ISO 22007-2 2012] ;
- Le second est du type « **Fil Chaud** » reposant sur la norme ASTM D 5930-2017 [ASTM D-5930 2017] relative à la méthode d'essai normalisée pour la conductivité thermique des matières plastiques à l'aide d'un dispositif de source transitoire linéaire pour le Fil Chaud et sur les recommandations AAC 11-3 de la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages).

La description de ces deux dispositifs se trouve à la Section 5 de l'Annexe A5.

Les mesures expérimentales sont réalisées sur les mêmes échantillons que ceux utilisés pour la caractérisation des propriétés acoustiques (Section 1.1 du Chapitre III).

Pour chaque matériau, cinq mesures sont réalisées à partir de quatre échantillons en alternant les faces de mesures et les échantillons d'une caractérisation à l'autre.

Avant chaque campagne d'essais, les matériaux sont laissés au moins 48h dans les conditions de température et d'humidité relative du laboratoire d'essais, maintenues respectivement à  $T = 25 \pm 0,8^\circ\text{C}$  et  $HR = 40 \pm 2\%$ . Un contrôle de leur masse est effectué avant et après chaque mesure à l'aide d'une balance Mettler Toledo ME 1002E.

Ce suivi de la masse permet de quantifier la teneur en eau massique ( $w_m$ ) présente dans les échantillons au moment des caractérisations expérimentales, mais également de s'assurer que

## IV.1 Dispositifs utilisés et protocoles mis en œuvre pour la caractérisation expérimentale

---

ce paramètre ne varie pas au cours de la mesure.

D'autre part, lors des essais, une cloche est disposée sur l'ensemble constitué des échantillons et de la sonde (fil chaud et Hot Disk) afin de limiter les effets de convection au niveau des échantillons.

Pour les deux dispositifs expérimentaux, après plusieurs essais, les paramètres qui ont été jugés les plus adaptés au cas des laines végétales sont présentés dans le Tableau IV.1.

Dispositif	Puissance de chauffe ( $mW$ )	Durée de mesure ( $s$ )
Hot Disk	40	160
Fil Chaud	100	120

**Tableau IV.1** – Paramètres de mesure des dispositifs expérimentaux en régime stationnaire pour la caractérisation de la conductivité thermique des matériaux

Pour tenter d'être le plus complet possible en ce qui concerne la caractérisation expérimentale de la conductivité thermique des laines végétales, un dispositif en régime stationnaire a également été utilisé.

### 1.2 Développement d'un dispositif expérimental en régime stationnaire

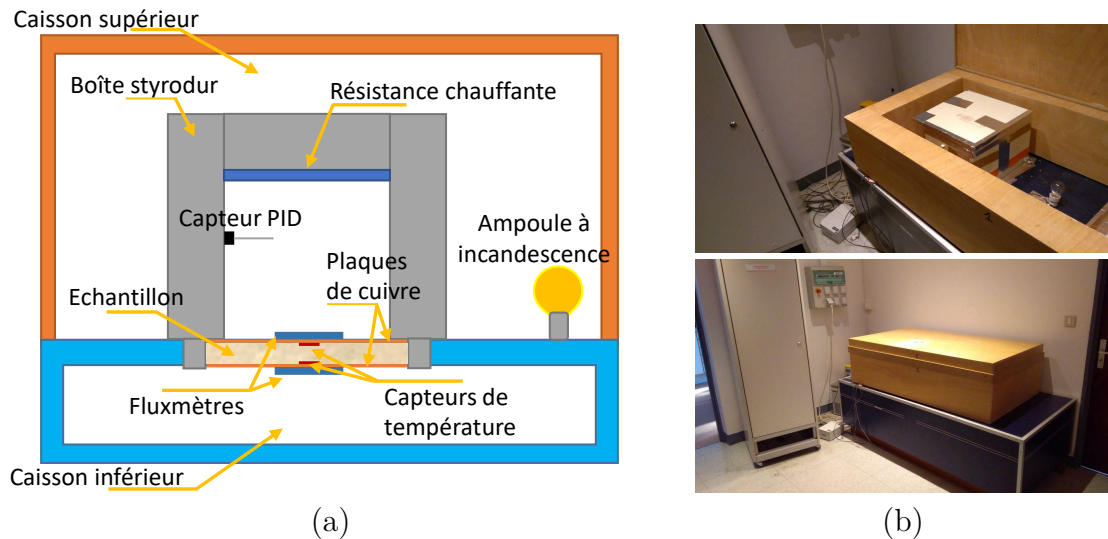
Dans le cadre de la thèse, un dispositif dit « **boîte chaude** » a été utilisé afin de pouvoir déterminer la conductivité thermique des matériaux en régime permanent. Cette « boîte chaude » a été développée à l'ENTPE avec l'aide d'un ingénieur d'étude, Joachim Blanc-Gonnet, à partir d'un ancien dispositif nommé « machine thermique » [Cérézo 2005].

Le principe du dispositif s'appuie sur la norme ISO 8302 [ISO 8302 1991] relative à la détermination de la conductivité thermique en régime stationnaire. La « boîte chaude » impose des températures différentes de part et d'autre d'un échantillon à caractériser afin de générer un flux de chaleur le traversant. En connaissant la valeur du flux, du gradient de température entre la face chaude et la face froide, ainsi que l'épaisseur de l'échantillon, il est alors possible de déterminer la conductivité thermique du matériau.

#### 1.2.1 Principe de fonctionnement de la « boîte chaude »

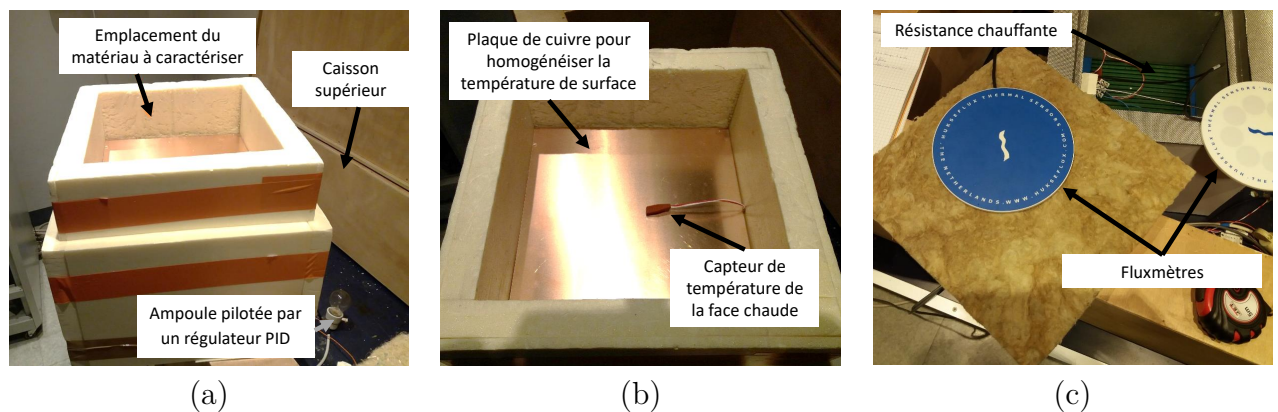
Le système « boîte chaude », dont le pilotage et l'acquisition sont réalisés via un programme Labview ©, impose la température des faces d'un échantillon en chauffant l'air en partie haute

et en le refroidissant en partie basse selon un principe de caissons constituant des enceintes isothermes. Une représentation en coupe du dispositif est exposée à la Figure IV.1.



**Figure IV.1** – (a) Représentation en coupe et (b) Photographies du dispositif « boîte chaude »

Ainsi, l'échantillon à caractériser est placé dans une boîte en styrodur © permettant de limiter les pertes de chaleur par les surfaces de la boîte en contact avec les caissons. La température de consigne dans la boîte (en partie haute de l'échantillon) est pilotée par un régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé), couplé à une résistance chauffante assurant la production de chaleur (puissance 20 W), comme l'illustre la Figure IV.2(a).



**Figure IV.2** – (a) Boîte en styrodur contenant l'échantillon à caractériser et caisson en bois dans lequel est placé la boîte, (b) capteur de température et plaque de cuivre placés de part et d'autre de l'échantillon à caractériser, (c) fluxmètres utilisés sur chaque face de l'échantillon

## IV.1 Dispositifs utilisés et protocoles mis en œuvre pour la caractérisation expérimentale

Pour la face froide, un cryostat, de type Eco RE620 (Lauda) à eau glycolée, est réglé à une température constante de  $0^{\circ}\text{C}$ . Ce réglage permet d'établir une température stationnaire dans le caisson bas au-dessous de  $5^{\circ}\text{C}$ .

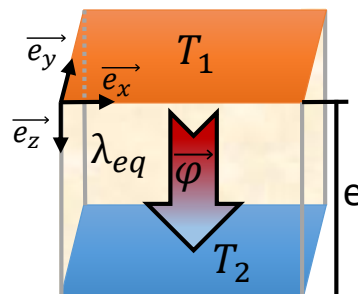
Les températures de surfaces de l'échantillon sont déterminées à l'aide de capteurs de température (Pt 100), comme l'illustre la Figure IV.2(b). Des plaques de cuivre sont placées de part et d'autre de l'échantillon afin de garantir une température homogène en surface, comme le montre la Figure IV.2(b). Deux fluxmètres de type Hukseflux, modèle HFP03-05 avec une sensibilité de  $537,1\mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ , visibles à la Figure IV.2(c), sont ensuite placés sur chacune de ces plaques afin de mesurer le flux thermique traversant l'échantillon.

Cette boîte, contenant l'échantillon et comportant à chaque extrémité les fluxmètres, est placée dans le caisson supérieur qui est maintenu à une température constante par une ampoule à incandescence pilotée elle aussi par un capteur PID, comme le montre la Figure IV.1. Cette ampoule sert à maintenir une température dans le caisson supérieur très proche de celle à l'intérieur de la boîte en styrodur afin de limiter les fuites et les transferts de chaleur entre les deux.

Afin de connaître et contrôler la température et l'humidité dans le caisson supérieur et la boîte en styrodur, des capteurs de température et d'humidité relative y sont placés permettant une lecture et un enregistrement de l'évolution de ces paramètres.

Une fois que les températures de surfaces sont suffisamment stabilisées, alors la valeur du flux traversant l'échantillon tend vers une valeur constante.

### 1.2.2 Principe de la mesure de conductivité thermique



**Figure IV.3** – Représentation schématique de l'orientation et de la direction du flux généré par le dispositif « boîte chaude » au sein de l'échantillon

En s'appuyant sur la loi de Fourier exprimée à l'Equation II.33 de la Section 2.2.1 du

Chapitre II, on peut écrire :

$$\varphi \vec{e}_z = -\lambda_{eq} \vec{\nabla} T \quad (\text{IV.1})$$

Comme le montre la Figure IV.3, le gradient de température ne dépend que de  $z$  et est orienté selon l'axe ( $z$ ). Aussi, il peut s'exprimer selon la relation :

$$\vec{\nabla} T = \frac{dT}{dz} \vec{e}_z \quad (\text{IV.2})$$

En intégrant l'Equation IV.1, on obtient finalement :

$$\lambda_{eq} = \frac{\varphi e}{\Delta T} \quad (\text{IV.3})$$

Avec  $\Delta T = T_2 - T_1$ .

### 1.2.3 Protocole de mesures mis en œuvre

Contrairement aux mesures en régime transitoire réalisées dans un laboratoire d'essais, l'humidité relative du local accueillant le dispositif « boîte chaude » ne peut pas être contrôlée. Néanmoins, des relevés de l'humidité relative du local ont permis de constater que sa valeur restait relativement stable et proche de 35%.

En revanche, la température de consigne à l'intérieur de la boîte en styrodur et dans le caisson est bien de  $25^\circ C$  comme pour les essais au laboratoire. La température du cryostat est fixée à  $0^\circ C$ .

Comme pour le protocole des essais en laboratoire, les échantillons sont pesés avant et après la mesure afin d'évaluer une éventuelle variation de la teneur en eau massique au sein des matériaux pendant l'essai.

Après plusieurs essais d'expérimentation, il a été choisi de relever les valeurs de températures des faces chaude et froide de l'échantillon, ainsi que la valeur du flux le traversant 24 heures après le début des mesures. Cela permet de garantir un relevé de ces données en régime stationnaire.

Enfin, la dernière différence avec les essais en régime transitoire concerne la dimension des échantillons. En effet, ce sont cette fois-ci des parallélépipèdes rectangles de section carrée  $27 \times 27 \text{ cm}$  qui sont caractérisés.

### 1.3 Présentation et analyse des résultats expérimentaux

Type laine	Réf.	Dispositif	$HR$ (%)	T (°C)	$\rho_a$ ( $kg.m^{-3}$ )	$\lambda$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
Chanvre	B	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	26,2	$0,054 \pm 0,002$
	L	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	30,1	$0,058 \pm 0,001$
	N	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	45,3	$0,060 \pm 0,003$
		Boîte Chaude	$34,1 \pm 3,2$	$25,5 \pm 1,2$	41,6	$0,048 \pm 0,001$
	X	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	46,0	$0,057 \pm 0,002$
Boîte Chaude		$44,8 \pm 3,5$	$24,3 \pm 1,1$	46,3	$0,058 \pm 0,001$	
Z	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	38,1	$0,054 \pm 0,002$	
	Boîte Chaude	$28,4 \pm 4,2$	$27,1 \pm 2,5$	41,3	$0,054 \pm 0,001$	
Lin	C	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	35,2	$0,052 \pm 0,002$
		Fil chaud	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	35,2	$0,052 \pm 0,002$
	D	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	31,9	$0,054 \pm 0,001$
	J	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	33,3	$0,053 \pm 0,002$
	M	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	27,5	$0,052 \pm 0,003$
		Fil chaud	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	27,5	$0,052 \pm 0,002$
V	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	49,8	$0,055 \pm 0,001$	
	Boîte Chaude	$46,7 \pm 3,1$	$25,2 \pm 0,9$	48,6	$0,052 \pm 0,001$	
W	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	45,4	$0,052 \pm 0,001$	
	Boîte Chaude	$22,5 \pm 3,8$	$23,9 \pm 2,1$	46,2	$0,055 \pm 0,001$	
Kénaf	E	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	39,0	$0,054 \pm 0,002$
		Fil chaud	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	39,0	$0,052 \pm 0,002$
	K	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	28,2	$0,053 \pm 0,001$
Bois	A	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	59,2	$0,056 \pm 0,002$
		Fil chaud	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	59,2	$0,054 \pm 0,001$
	H	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	42,7	$0,053 \pm 0,003$
Coco	I	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	96,3	$0,061 \pm 0,002$
Ouate de cellulose	R	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	45,2	$0,052 \pm 0,002$
		Boîte Chaude	$30,1 \pm 2,7$	$25,5 \pm 1,3$	45,7	$0,047 \pm 0,001$
Bois-kénaf	G	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	54,1	$0,056 \pm 0,003$
Chanvre-lin-coton	P	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	31,6	$0,051 \pm 0,002$
		Boîte Chaude	$44,9 \pm 2,9$	$25,1 \pm 1,1$	33,6	$0,051 \pm 0,001$
Q	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	30,1	$0,052 \pm 0,002$	
Chanvre-lin	Y	Hot Disk	$40 \pm 2$	$25 \pm 0,8$	34,1	$0,056 \pm 0,003$
		Boîte Chaude	$42,3 \pm 2,4$	$25,2 \pm 1,0$	34,7	$0,055 \pm 0,001$

Tableau IV.2 – Résultats de la caractérisation thermique des laines végétales

Les résultats des caractérisations expérimentales sont tout d'abord présentés puis ils sont discutés et analysés. Dans un premier temps, les résultats sont exploités pour comparer les dispositifs expérimentaux utilisés entre eux. Dans un second temps, ils servent à faire une



analyse comparative des performances thermiques des matériaux entre eux.

### 1.3.1 Présentation des résultats

Les résultats des caractérisations expérimentales de la conductivité thermique des matériaux sont présentés dans le Tableau IV.2. Ils sont regroupés par type de laines. De plus, pour chaque valeur de conductivité thermique, la masse volumique apparente des matériaux ainsi que les conditions de température et d'humidité relative des essais sont précisées.

Pour les matériaux caractérisés par plusieurs dispositifs, il est possible dans un premier temps d'évaluer la cohérence des résultats.

### 1.3.2 Analyse comparative des dispositifs expérimentaux

Dans un premier temps les résultats des deux dispositifs fonctionnant en régime transitoire sont comparés entre eux, puis les résultats du Hot Disk sont comparés à ceux de la Boîte Chaude qui fonctionne en régime permanent.

#### Hot Disk et Fil Chaud

Quatre matériaux ont pu être caractérisés à la fois par le Fil Chaud et par le Hot Disk dans les mêmes conditions de température et d'humidité relative.

Ainsi, pour les deux laines de lin (C) et (D) les résultats obtenus sont les mêmes comme l'illustre le Tableau IV.2. Pour les laines de kénafe (E) et de bois (A), on note un écart de seulement  $0,002 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ , correspondant à un écart relatif de l'ordre de 4%.

Il y a donc une très bonne concordance entre les résultats fournis par ces deux dispositifs.

De plus, ces résultats sont de l'ordre de grandeur de ceux que l'on peut trouver dans la littérature, notamment dans [Volf *et al.* 2015] où la conductivité thermique de laines de lin et de chanvre ont été caractérisées par un dispositif en régime transitoire. En effet, des valeurs égales à  $\lambda_{eq} = 0,052 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$  ont été déterminées pour ces deux types de laines présentant des masses volumiques de  $36,2 \text{ kg.m}^{-3}$  pour le lin et de  $27 \text{ kg.m}^{-3}$  pour le chanvre.

#### Hot Disk et Boîte Chaude

Huit matériaux ont pu être caractérisés avec ces deux dispositifs, comme l'illustre le Tableau IV.2. Pour six caractérisations l'écart relatif moyen est de 2,5%. Pour la ouate de cellulose (R), on note un écart relatif légèrement plus important de 10%. Cet écart qui reste acceptable peut s'expliquer par plusieurs facteurs, comme la différence d'humidité relative, l'évaluation de l'épaisseur de l'échantillon et des incertitudes liées à la mise en place de l'échantillon dans

## IV.1 Dispositifs utilisés et protocoles mis en œuvre pour la caractérisation expérimentale

---

le cadre. En revanche, concernant l'écart relatif de 25% pour la laine de chanvre (N), qui est lié à une valeur de conductivité thermique anormalement basse pour la boîte chaude, aucun problème, ni aucune explication n'ont pu être clairement identifiés.

Malgré ce cas particulier, les résultats obtenus avec ces deux dispositifs sont très cohérents, ce qui constitue un résultat original compte tenu du peu d'études qui comparent ces deux régimes différents.

Dans la littérature, les travaux de [Korjenic *et al.* 2016] présentent des conductivités thermiques pour des laines de lin et de chanvre caractérisées par un dispositif en régime permanent. Ainsi, pour des laines de lin et de chanvre de masse volumique  $\rho_a = 25 \text{ kg.m}^{-3}$  les conductivités thermiques sont respectivement de  $\lambda_{eq} = 0,065 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$  et  $\lambda_{eq} = 0,062 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$ . Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues avec la Boîte Chaude. Néanmoins, compte tenu des conditions hygrométriques ( $HR = 50\%$ ) supérieures à celles des mesures de la thèse, l'ordre de grandeur des résultats obtenus est respecté.

La conclusion de cette campagne de caractérisations expérimentales de la conductivité thermique de laines végétales à grande échelle est la concordance entre les résultats obtenus par trois types de dispositifs différents. Il est souligné également l'originalité des résultats concernant la caractérisation et l'analyse de résultats s'appuyant sur les deux régimes transitoire et permanent. Ces résultats permettent ainsi d'assurer la fiabilité et la robustesse des valeurs caractérisées expérimentalement pour des conditions de températures et d'humidités relatives proches de  $T = 25^\circ C$  et de  $HR = 40\%$ , qui correspondent à des conditions réelles dans le domaine du bâtiment.

Fort de ce résultat, un seul dispositif (Hot Disk) peut être retenu pour caractériser et étudier plus spécifiquement la conductivité thermique des matériaux de la thèse.

### 1.3.3 Analyse comparative de la conductivité thermique des matériaux

Cette analyse repose sur la comparaison des conductivités thermiques déterminées à l'aide du dispositif Hot Disk.

Les résultats présentés dans le Tableau IV.2 restent relativement homogènes. En effet, la plage de valeurs est comprise entre  $0,051 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$  pour la laine de chanvre-lin-coton (P) et  $0,061 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$  pour la laine de coco (I).

En première approche, compte tenu de conditions de température et d'humidité relative très proches pour chaque mesure, l'analyse des résultats du Tableau IV.2 conduit à identifier deux facteurs principaux qui semblent jouer un rôle pour la conductivité thermique des laines

végétales : le type de fibres et la masse volumique apparente.

Pour des masses volumiques équivalentes les résultats des laines de lin sont légèrement inférieurs à ceux des laines de chanvre, de l'ordre de 5% en moyenne, ce qui peut notamment s'expliquer par des rayons de fibres moyens plus faibles, comme cela est présenté dans le Tableau III.2.

De même, le mélange chanvre-lin-coton (P) qui présente les valeurs les plus faibles de rayons de fibres moyens, affiche les valeurs de conductivité thermique les plus faibles.

La ouate de cellulose (R) dont la valeur moyenne de rayons de fibres est proche des laines de lin, affiche une conductivité thermique équivalente à celle de la laine de lin (W) pour une masse volumique équivalente.

Pour leur part, les laines de bois, (A) et (H) présentent une conductivité thermique similaire à celles des laines de kéna (E) et (K) pour des masses volumiques supérieures d'environ 50%. Cela peut s'expliquer par des valeurs moyennes de rayons de fibres plus faibles pour le bois, comme le montre le Tableau III.2 de la Section 2.1.3 du Chapitre III.

Enfin, la laine de coco (I) présente une conductivité thermique supérieure de 9% par rapport aux valeurs moyennes affichées par les laines de chanvre et de bois et supérieure de 15% par rapport à celles des laines de lin et kéna. Malgré un pourcentage massique de fibres polymères important (30%), cela peut s'expliquer par la valeur relativement élevée de sa masse volumique qui est proche de  $100 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Néanmoins, le lien entre conductivité thermique et masse volumique n'est pas forcément vérifiée pour les matériaux appartenant aux familles de laines de lin et de chanvre. En effet, les laines de chanvre (B) et (Z) présentant la même conductivité thermique pour des masses volumiques respectives de  $26,2 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $38,1 \text{ kg.m}^{-3}$ . On observe la même chose pour les laines de lin (M) et (W) avec des masses volumiques respectives de  $27,5 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $45,4 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Même si des tendances sont observées entre les différents types de laines, il est nécessaire de prendre un peu de recul par rapport au lien entre conductivité thermique, masse volumique et tailles de fibres établi à partir d'une seule caractérisation expérimentale pour chaque matériau.

Ainsi, afin d'investiguer de manière plus approfondie l'influence de la valeur de la masse volumique des laines végétales sur leur conductivité thermique, les dispositifs expérimentaux peuvent être adaptés pour comprimer les matériaux. Avec des taux de compression différents, il est alors possible de caractériser la conductivité thermique des laines végétales en faisant varier leur masse volumique sans modifier l'épaisseur des fibres, permettant ainsi d'enrichir les données sur les propriétés thermiques des laines végétales.

## 2 Influence de la masse volumique sur les performances thermiques des laines végétales

La masse volumique constitue un levier d'optimisation des performances des laines végétales. Ainsi, afin de mieux comprendre le lien entre ce paramètre et la conductivité thermique des matériaux, une des solutions est de caractériser expérimentalement cette dernière à différents taux de compression pour un matériau donné. Ces mesures offrent également l'opportunité de caractériser le phénomène de transfert thermique par rayonnement au sein des laines végétales.

Pour cela, il est nécessaire d'adapter les dispositifs expérimentaux afin de caractériser les matériaux en compression à la fois en régime transitoire et stationnaire.

Les résultats expérimentaux ainsi obtenus sont analysés et le rôle du rayonnement est évalué.

Enfin, une synthèse des résultats obtenus est réalisée afin de quantifier l'impact de la compression sur les performances thermiques des matériaux lors de leur mise en œuvre.

### 2.1 Adaptation des dispositifs et protocoles expérimentaux

Dans le cadre de ces travaux de thèse, les dispositifs Hot Disk, pour le régime transitoire, et la Boîte Chaude, pour le régime stationnaire, ont été adaptés afin de réaliser des essais permettant de faire évoluer la masse volumique des matériaux à partir de leur compression (sans modification de l'épaisseur des fibres).

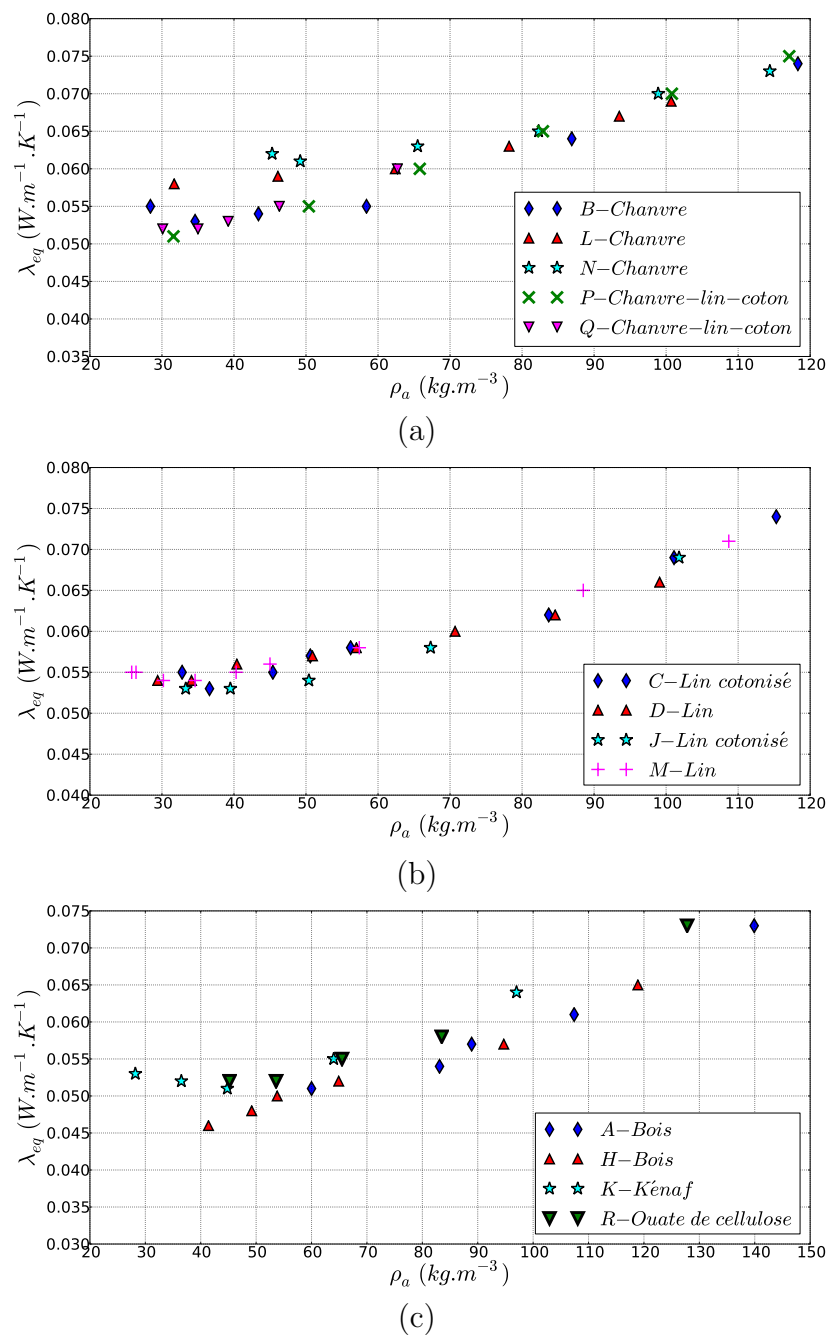
Dans ce cadre, ces dispositifs ont été adaptés pour réaliser des compressions à une dimension des échantillons, suivant un axe perpendiculaire aux couches de fibres.

Le descriptif des adaptations du Hot Disk est détaillé à l'Annexe A5.1.2. Le même protocole de mesure a été utilisé que pour les caractérisations expérimentales présentées à la Section 1.3.1 de ce chapitre, en y ajoutant pour chaque essai la mesure de l'épaisseur des échantillons afin de déterminer le taux de compression appliqué. De plus, une cloche spécifique a été fabriquée et placée sur l'ensemble afin de limiter les effets de convection aux bords des échantillons.

Pour la Boîte Chaude, les adaptations réalisées pour comprimer les échantillons sont décrites à l'Annexe A5.2.1. Le protocole de mesures présenté précédemment dans ce chapitre à la Section 1.3.2 reste inchangé.

## 2.2 Résultats et analyses des caractérisations expérimentales

### 2.2.1 Hot Disk



**Figure IV.4** – Caractérisation expérimentale de la conductivité thermique équivalente en fonction de la masse volumique pour les laines de (a) chanvre et chanvre-lin-coton, (b) lin, (c) bois, kénaf et ouate de cellulose

Quel que soit le type de laines caractérisé, on observe une plus grande dispersion entre les valeurs de conductivité thermique des différents matériaux pour les valeurs de masse volumique basses, comme l'illustre les trois graphes de la Figure IV.4.

Cela semble lié au phénomène de transfert thermique par rayonnement qui joue un rôle plus important pour les masses volumiques basses. En effet, au-delà de  $\rho_a = 60 \text{ kg.m}^{-3}$  les valeurs de conductivité thermique semblent croître de manière linéaire, avec un phénomène de conduction thermique qui semble prépondérant. En deçà de cette valeur, on observe à l'inverse une influence plus marquée du rayonnement. Ainsi, on note pour quasiment toutes les laines, la présence d'un « optimum de transferts couplés conduction-rayonnement » comme cela est montré par les Figures II.11(b) et (c) de la Section 2.2.4 du chapitre II.

En revanche, les laines de bois ne semblent pas présenter cet optimum de transferts couplés conduction-rayonnement. Une des raisons probables vient du fait que ces matériaux présentent des masses volumiques sans compression relativement élevées et supérieures à  $40 \text{ kg.m}^{-3}$ . La taille des fibres doit également jouer un rôle dans ce phénomène car avec une masse volumique de l'ordre de grandeur de celles des laines de bois, mais avec une taille moyenne de fibres inférieure, la ouate de cellulose (R) se comporte différemment avec un optimum proche de  $\rho_a = 50 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Néanmoins, il semble prématuré, dans un premier temps, de lier cet optimum uniquement à la taille des fibres et à la masse volumique des matériaux. En effet, les laines (B) et (K) qui présentent des masses volumiques beaucoup plus faibles que celle de (R), affichent également un optimum de transferts couplés conduction-rayonnement proche de ce dernier.

### 2.2.2 Boîte Chaude

Compte tenu de la durée importante du processus d'installation et de mesure pour chaque échantillon (24h pour un essai), seul un taux de compression a pu être réalisé sur les matériaux caractérisés, dont les résultats sont présentés dans le Tableau IV.3.

Malgré un taux de compression qui reste faible avec des masses volumiques comprises entre  $45,7 \text{ kg.m}^{-3}$  pour le matériau (P) et  $72,5 \text{ kg.m}^{-3}$  pour la laine (V), les valeurs de conductivité thermique obtenues semblent globalement élevées. En effet, pour les laines N, P et R, les valeurs de conductivités caractérisées sont équivalentes à celles obtenues avec le Hot Disk pour des masses volumiques supérieures à  $100 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Ces écarts peuvent s'expliquer par des conditions d'humidité relative très hétérogènes d'un essai à l'autre et également par des difficultés de mise en place du matériau en compression dans le cadre en styrodur. Les dimensions plus importantes des échantillons rectangulaires par

rapport à ceux de forme cylindrique, tendent à engendrer des problèmes au niveau des bords, où le matériau a tendance à se relever. Ainsi, la compression n'est pas totalement homogène sur l'ensemble de l'échantillon et des problèmes de fuites peuvent survenir.

Laine	$HR(\%)$	T ( $^{\circ}C$ )	$\rho_a$ ( $kg.m^{-3}$ )	$\lambda$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
N	$30,4 \pm 1,6$	$24,9 \pm 0,8$	57,4	$0,073 \pm 0,001$
P	$30,4 \pm 1,8$	$24,6 \pm 0,9$	45,7	$0,069 \pm 0,001$
R	$31,5 \pm 1,5$	$25,2 \pm 1,1$	61,9	$0,069 \pm 0,001$
V	$35,8 \pm 2,0$	$24,3 \pm 0,8$	72,5	$0,067 \pm 0,001$
W	$30,9 \pm 1,9$	$23,3 \pm 0,7$	56,2	$0,063 \pm 0,001$
X	$43,7 \pm 2,3$	$23,9 \pm 1,1$	52,5	$0,076 \pm 0,001$
Y	$25,3 \pm 2,1$	$24,4 \pm 0,9$	49,4	$0,072 \pm 0,001$
Z	$39,9 \pm 2,4$	$24,1 \pm 0,8$	59,3	$0,074 \pm 0,001$

**Tableau IV.3** – Résultats de la caractérisation thermique en régime stationnaire pour des laines végétales comprimées

Compte tenu de ces éléments, ce sont donc les valeurs obtenues avec le Hot Disk qui sont prises en compte pour la suite de l'analyse des données expérimentales et pour la validation des modélisations mises en œuvre.

### 2.3 Influence de la compression sur les performances thermiques des laines végétales

L'augmentation de la conductivité thermique des matériaux est mise en corrélation avec les taux de compression appliqués lors des caractérisations expérimentales. Cette analyse s'appuie sur les données collectées lors des essais réalisés avec le dispositif Hot Disk.

Les résultats présentés par le Tableau IV.4 sont globalement homogènes. La première colonne précise le taux de compression nécessaire pour dégrader de quelques  $mW.m^{-1}.K^{-1}$  la conductivité thermique des matériaux. On s'aperçoit qu'il est nécessaire pour cela de réaliser une compression d'au moins 20%. Les taux de compression minimums concernent les laines de bois qui possèdent déjà des masses volumiques élevées par rapport aux autres matériaux et qui semblent moins sujettes au phénomène de rayonnement. Il semble que ce phénomène de rayonnement qui intervient pour les masses volumiques les plus faibles limite les effets de la compression. En revanche, lorsque le transfert thermique par conduction est prépondérant l'effet de la compression est plus significatif. Ainsi, les valeurs indiquées dans les deuxième et troisième colonnes du Tableau IV.4 montrent que des taux de compression de l'ordre de 50% entraînent

### IV.3 La caractérisation expérimentale de l'influence de l'eau sur les performances thermiques des laines végétales

Laine	Mat.	Comp. (%)	Augmentation Relative (%)	Comp. (%)	Augmentation Relative (%)	Comp. (%)	Augmentation Relative (%)
Chanvre	B	51,5	0	67,3	16,0	77,9	34,5
	L	26,3	1	46,2	8,6	68,0	15,5
	N	30,4	1	53,9	12,9	60,2	17,4
Lin	C	31,4	2	48,7	9,1	71,2	34,5
	D	31,0	2	48,9	11,1	65,6	22,2
	J	33,3	1	49,4	9,4	66,7	30,2
	M	42,0	1	54,4	5,5	75,9	29,0
Kénaf	K	55,2	2	—	—	70,4	20,7
Bois	A	27,6	3	43,4	19,6	57,0	23,2
	H	21,4	2	55,7	23,9	64,3	41,3
Ouate Cel.	R	32,0	3	46,6	11,5	65,1	40,4
Chanvre-Lin-coton	P	34,6	4	49,9	17,6	71,9	31,4
	Q	27,6	1	38,9	5,8	54,6	15,4

**Tableau IV.4** – Influence de la compression sur la conductivité thermique des laines végétales

en moyenne des dégradations des performances thermiques de l'ordre de 10 à 15%. Pour des taux de compression encore plus importants, il est possible d'atteindre des dégradations de la conductivité thermique de l'ordre de 30 à 40%. Ainsi, lors de la mise en œuvre des laines végétales, à moins d'avoir des défauts de pose importants entraînant des taux de compression supérieurs à 20%, il semble peu probable de dégrader leurs performances thermiques.

Un autre paramètre peut néanmoins avoir une incidence sur les performances thermiques des laines végétales. Il s'agit de la présence d'eau dans le matériau.

### 3 La caractérisation expérimentale de l'influence de l'eau sur les performances thermiques des laines végétales

L'influence de l'eau sur les laines végétales est tout d'abord caractérisée en suivant l'évolution de la masse des matériaux. Ce suivi permet d'évaluer le lien entre le niveau d'humidité relative de leur environnement et leur teneur en eau. Ces essais sont complétés par quelques résultats d'analyse gravimétrique d'adsorption à l'aide d'un dispositif DVS (Dynamic Vapor Sorption) pour des laines de lin.

Dans un second temps, la cinétique d'adsorption de la vapeur d'eau est également caractérisée expérimentalement afin d'analyser la capacité des matériaux à s'adapter à un changement d'hygrométrie de leur environnement.



Enfin, l'influence sur les performances thermiques de l'hygrométrie et de la quantité d'eau présente dans les matériaux est quantifiée à travers des mesures expérimentales de conductivités thermiques.

### 3.1 L'influence de l'humidité relative sur la teneur en eau des matériaux

Un suivi de la masse des échantillons a été réalisé au Laboratoire de Strasbourg (Cerema) pour quatre valeurs distinctes d'humidité relative à une température contrôlée de  $T = 25 \pm 0,8^\circ\text{C}$ . Des protocoles différents ont été mis en œuvre afin d'atteindre les valeurs d'humidité relative souhaitées.

#### 3.1.1 Les protocoles de mesures utilisés

##### Humidité relative de 3%

Comme pour la caractérisation de l'influence de l'eau sur les propriétés acoustiques des matériaux (3.1 du Chapitre III), la première étape consiste à sécher les matériaux en étuve à  $50^\circ\text{C}$  pendant 72 heures. Ils sont ensuite stockés dans une boîte hermétique utilisée comme dessiccateur et contenant du gel de silice, permettant de maintenir un environnement dans lequel l'humidité relative est de 3% proche d'un état sec.

##### Humidité relative de 40% et 55%

Les échantillons sont laissés à l'air libre pendant au moins 48 heures dans l'environnement du laboratoire pour lequel l'hygrométrie est contrôlée à  $40 \pm 2\%$ . Le même protocole est utilisé ensuite pour l'établissement d'un environnement à  $55 \pm 2\%$ .

##### Humidité relative de 75%

Comme pour ce qui a été fait à la Section 3.1 du Chapitre III, les échantillons sont placés dans une boîte hermétique utilisée comme dessiccateur avec une solution saturée en chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) pendant une semaine.

#### 3.1.2 Résultats du suivi de masse des matériaux

La caractérisation de la masse des échantillons est réalisée à l'aide de la balance Mettler Toledo ME 1002E du laboratoire.

### IV.3 La caractérisation expérimentale de l'influence de l'eau sur les performances thermiques des laines végétales

Les teneurs en eau massique et volumique sont déterminées à partir des Equations II.3 et II.4.

Les résultats qui sont présentés dans le Tableau IV.5 sont regroupés par type de laines afin d'observer les tendances générales de l'évolution des teneurs en eau massique et volumique dans les matériaux en fonction de l'humidité relative.

Des plages d'humidité relative sont données pour les conditions en hygrométrie basse (3%) et haute (75%). En effet, une légère variation d'humidité relative a été observée dans la boîte hermétique contenant les matériaux lorsque ces derniers sont sortis pour être pesés.

Pour chaque valeur ou plage de valeurs d'hygrométrie ( $HR$ ), les plages de résultats de teneurs en eau sont encadrées par les valeurs minimales et maximales déterminées.

Laines	$HR = [3 - 10\%]$		$HR = 40\%$		$HR = 55\%$		$HR = [70 - 75\%]$	
	$w_m(\%)$	$w_v(10^{-3}\%)$	$w_m(\%)$	$w_v(10^{-3}\%)$	$w_m(\%)$	$w_v(10^{-3}\%)$	$w_m(\%)$	$w_v(10^{-3}\%)$
Chanvre	0,2 – 1,2	5 – 54	3,7 – 4,4	94 – 196	5,3 – 6,1	134 – 272	6,2 – 7,9	157 – 353
Lin	0,1 – 1,3	3 – 61	3,5 – 4,1	89 – 194	5,1 – 5,7	130 – 269	5,9 – 7,0	150 – 331
Kénafe	0,3 – 1,2	8 – 45	3,6 – 3,9	99 – 147	5,4 – 5,7	148 – 215	6,9 – 7,3	190 – 275
Bois	0,3 – 1,1	12 – 63	3,0 – 3,2	121 – 184	4,5 – 4,7	181 – 271	5,6 – 6,5	226 – 374
Coco	0,1 – 1,5	9 – 141	3,9 – 4,2	367 – 395	5,1 – 5,3	480 – 499	6,4 – 6,5	602 – 611
Ouate cel.	0,3 – 1,4	13 – 60	3,2 – 3,7	138 – 160	5,4 – 5,7	233 – 246	6,7 – 7,5	289 – 323
Bois-kénafe	0,3 – 1,2	15 – 61	3,7 – 3,9	188 – 198	5,5 – 5,8	280 – 295	/	/
Ch-lin-cot	0,2 – 1,2	5 – 36	3,1 – 3,4	81 – 101	4,9 – 5,3	129 – 157	5,7 – 6,4	150 – 190
Chanvre-lin	0,4 – 1,5	13 – 48	3,8 – 4,1	122 – 132	5,6 – 5,8	180 – 187	/	/

**Tableau IV.5** – Valeurs de teneur en eau massique ( $w_m$ ) et volumique ( $w_v$ ) caractérisées par types de laines végétales pour quatre valeurs distinctes d'hygrométrie

On observe une augmentation faible mais continue des teneurs en eau massique et volumique corrélée à l'augmentation d'humidité relative dans la plage  $[3 - 75\%]$ , comme cela est souligné dans [Volf *et al.* 2015], avec des résultats du même ordre de grandeur.

De plus, les valeurs de teneurs en eau semblent dépendre du type de fibres végétales et les écarts tendent à augmenter entre les différents matériaux avec l'élévation de l'humidité relative. Pour illustrer cela, il faut analyser la teneur en eau volumique qui s'appuie sur la masse volumique des matériaux. Ainsi, les laines de bois (A et H), qui possèdent des masses volumiques parmi les plus élevées, présentent des valeurs de teneur en eau massique plus faibles que pour les autres matériaux. Cependant, elles affichent des teneurs en eau volumique légèrement supérieures aux laines de lin ou chanvre par exemple, comme le montre les résultats présentés dans le Tableau IV.5.

Les laines qui semblent présenter la sensibilité la plus faible à l'humidité sont celles de chanvre-lin-coton (P et Q). En effet, quelle que soit l'humidité relative, elles affichent des plages de teneur en eau volumique inférieures aux autres laines. Cela peut s'expliquer notamment par la présence de fibres de coton qui sont moins sensibles à l'eau que les autres fibres caractérisées dans le cadre de cette thèse, comme cela a été évoqué à la Section 1.3.5 du Chapitre II.

Il semble que la sensibilité à l'eau est légèrement inférieure pour les laines de lin par rapport aux laines de chanvre avec un écart relatif de l'ordre de 5 à 6%, comme le montre les résultats du Tableau IV.5. On peut rapprocher ce résultat de ceux présentés par les travaux de [Hill *et al.* 2009] sur les fibres, qui ont été présentés à la Section 1.3.5 du Chapitre II.

Ce rapprochement entre fibres et laines est également valable pour la coco (I) qui est le matériau le plus sensible à l'eau, comme l'illustre le Tableau IV.5, et dont les fibres affichent les résultats les élevés au niveau de leurs courbes de sorption et désorption [Hill *et al.* 2009].

En conclusion, même si elles augmentent de manière continue avec l'humidité relative, les teneurs en eau restent relativement modérées pour les laines végétales, jusqu'à des valeurs de  $HR = 75\%$ . De plus, les teneurs en eau volumiques des laines semblent corrélées à la nature de leurs fibres végétales.

Ainsi, afin d'avoir une caractérisation plus complète des phases de sorption et désorption des laines végétales, des essais à l'aide d'un dispositif DVS (Dynamic Vapor Sorption) ont été réalisés.

### 3.1.3 Résultats de caractérisation des cycles de sorption/désorption

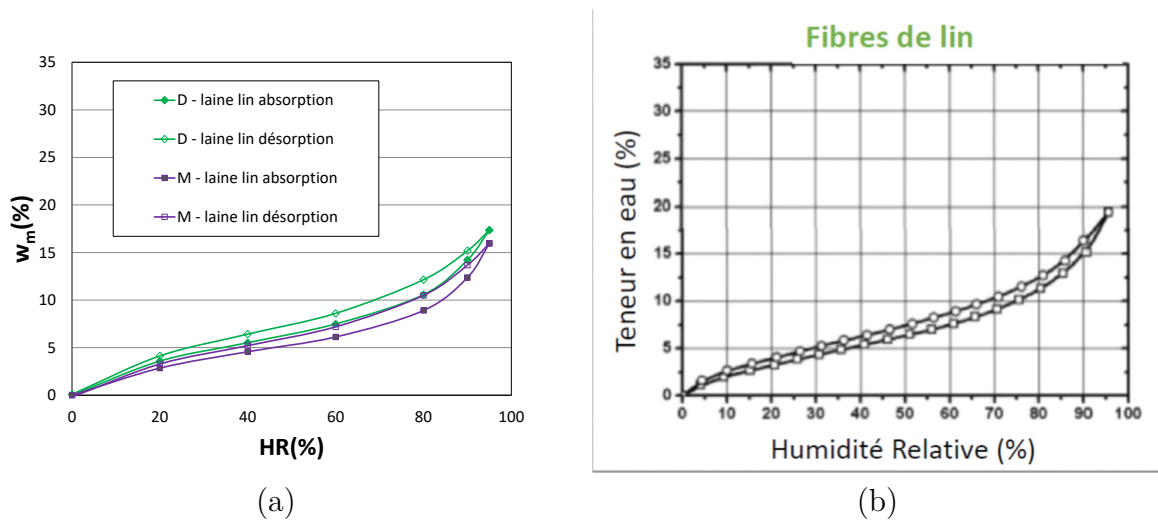
Dans le cadre de cette thèse, des essais gravimétriques d'adsorption de vapeur d'eau ont pu être réalisés à l'aide d'un dispositif DVS, modèle DVS-Avantage, SMS) de l'unité MAST/CPDM de l'Ifsttar. La description de ce dispositif se trouve en Annexe A6.

Compte tenu de la durée importante d'un essai (1 semaine), seules deux laines de lin (D et M) ont pu être caractérisées.

Pour chacune des deux laines de lin D et M, un cycle de sorption et de désorption a pu être caractérisé, comme l'illustre la Figure IV.5. De plus, la courbe de sorption/désorption de fibres de lin issue des travaux menés dans [Hill *et al.* 2009] a été ajoutée sur cette figure.

La première remarque concerne la forme des courbes. En effet, elles correspondent bien au type II de la classification IUPAC avec la présence d'hystérésis entre les courbes de sorption

### IV.3 La caractérisation expérimentale de l'influence de l'eau sur les performances thermiques des laines végétales



**Figure IV.5** – Courbe de sorption/désorption en fonction de l'humidité relative de (a) deux laines de lin et (b) de fibres de lin ([Hill *et al.* 2009])

et désorption, comme cela est indiqué à la Section 1.3.5 du Chapitre II. On retrouve bien des résultats cohérents avec les travaux de [Collet *et al.* 2008] menés sur la laine de chanvre.

De plus, les courbes obtenues pour les laines de lin sont très proches de celle présentée par [Hill *et al.* 2009] pour la fibre de lin. Comme attendu, les valeurs de teneur en eau sont plus faibles dans le cas des laines compte tenu de la présence de fibres polymères ne présentant pas le caractère hygroscopique des fibres végétales. Cet écart relatif est compris dans la plage [0,5 – 2%].

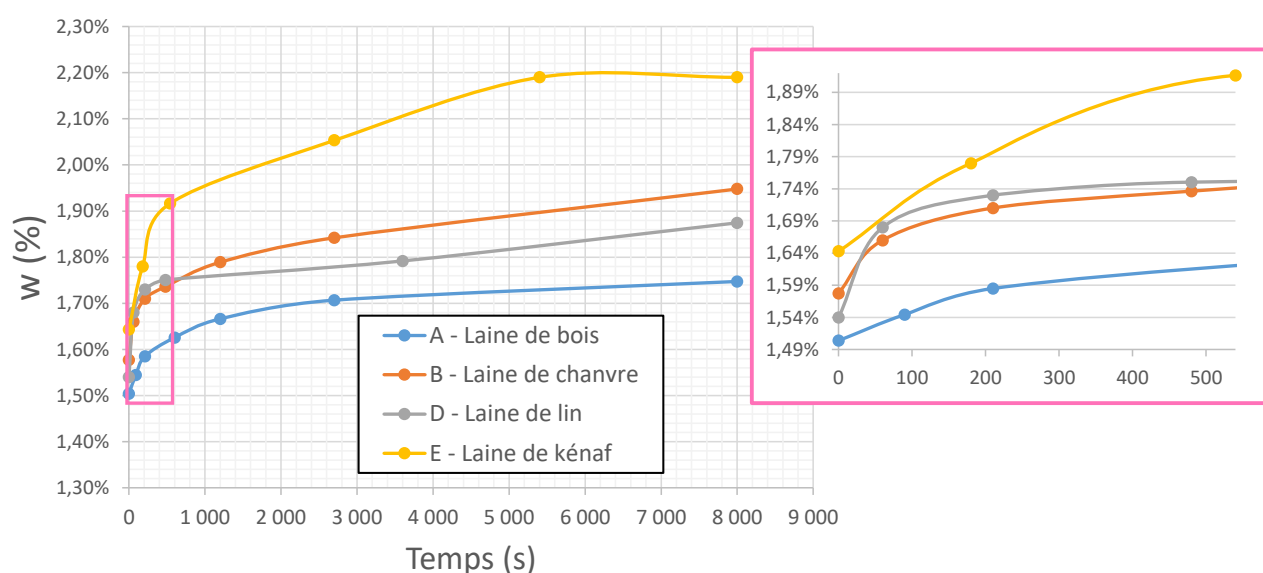
Néanmoins, la présence de fibres polymères n'est pas la seule explication car les laines D et M qui présentent la même teneur massique en fibres polymères (15%), n'ont pas les mêmes courbes de sorption/désorption. En effet, la laine M, qui possède un rayon de fibres moyen inférieur de 8% et une masse volumique inférieure de 20% par rapport à la laine D, présente une adsorption d'eau inférieure d'environ 1,5%. Il est cependant difficile de conclure avec seulement deux mesures que ces deux paramètres jouent un rôle important dans la sensibilité à l'eau des laines végétales.

En ce qui concerne les valeurs de teneur en eau massique, pour  $HR = 70\%$ , on obtient des valeurs pour la sorption de l'ordre de  $w_m = 7\%$  pour la laine M et de l'ordre de  $w_m = 8,5\%$  pour la laine D qui sont légèrement supérieures à celles obtenues avec les caractérisations précédemment réalisées au sein du laboratoire ([5,9 – 7,0%]). Cela peut s'expliquer par le fait que lors de la mesure des masses les matériaux sont sortis de la boîte hermétique où les conditions hygrométriques sont imposées et se retrouvent alors soumis à une humidité relative

différente. Même si le laps de temps est relativement court, de l'ordre de la minute, les matériaux semblent réagir très rapidement à ce changement d'humidité relative. Ainsi, il semble pertinent de caractériser la vitesse de reprise ou de décharge des laines en eau.

### 3.2 Caractérisation de la célérité de sorption et de désorption

Afin d'évaluer la célérité de la réaction des laines végétales lors d'un changement d'humidité relative, un suivi de l'évolution de la masse de quatre matériaux a été réalisé pour leur transfert d'un environnement possédant une humidité relative de 10% (boîte hermétique utilisée comme dessiccateur contenant du gel de silice) à un environnement stabilisé à  $HR = 30\%$  (laboratoire).



**Figure IV.6** – Evolution de la teneur en eau en fonction du temps pour quatre laines végétales passant d'un environnement avec  $HR = 10\%$  à  $HR = 30\%$

Les résultats sont présentés à la Figure IV.6. On s'aperçoit que, comme cela était pressenti dans la section précédente, les laines végétales réagissent très rapidement à un changement d'humidité relative. Ainsi, après seulement 10 minutes, les laines de lin, chanvre et kénafe se sont chargées à 50% de leur valeur en teneur en eau à l'état stable. Ce dernier étant atteint pour une plage comprise entre 5 et 8 heures. Pour la laine de bois, le chargement à 50% est atteint au bout de 20 minutes. Même si les caractérisations expérimentales sur des durées aussi longues n'ont pas été réalisées lors de la désorption, le suivi de l'évolution de la masse des matériaux, lors de leur passage d'un conditionnement à  $HR = 75\%$  aux conditions du

## IV.3 La caractérisation expérimentale de l'influence de l'eau sur les performances thermiques des laines végétales

---

laboratoire contrôlées à  $HR = 40\%$ , a montré un comportement similaire en terme de célérité de perte de masse.

Il reste maintenant à quantifier l'influence de ces variations de teneur en eau au sein des matériaux sur la valeur de leur conductivité thermique.

### 3.3 Evaluation de l'influence de la présence d'eau au sein des matériaux sur leurs performances thermiques

Afin d'évaluer l'influence de la présence d'eau au sein des matériaux sur leurs performances thermiques, les caractérisations expérimentales menées à la Section 1.3 de ce chapitre sont complétées par des essais à l'aide du dispositif Hot Disk pour deux conditions d'humidité relative différentes, proches de 3% et 75%. Dans un premier temps, les résultats sont analysés à partir de l'évolution de la teneur en eau massique au sein des matériaux puis dans un deuxième temps, une corrélation est faite avec les valeurs d'humidité relative de l'environnement dans lequel se trouvent les matériaux.

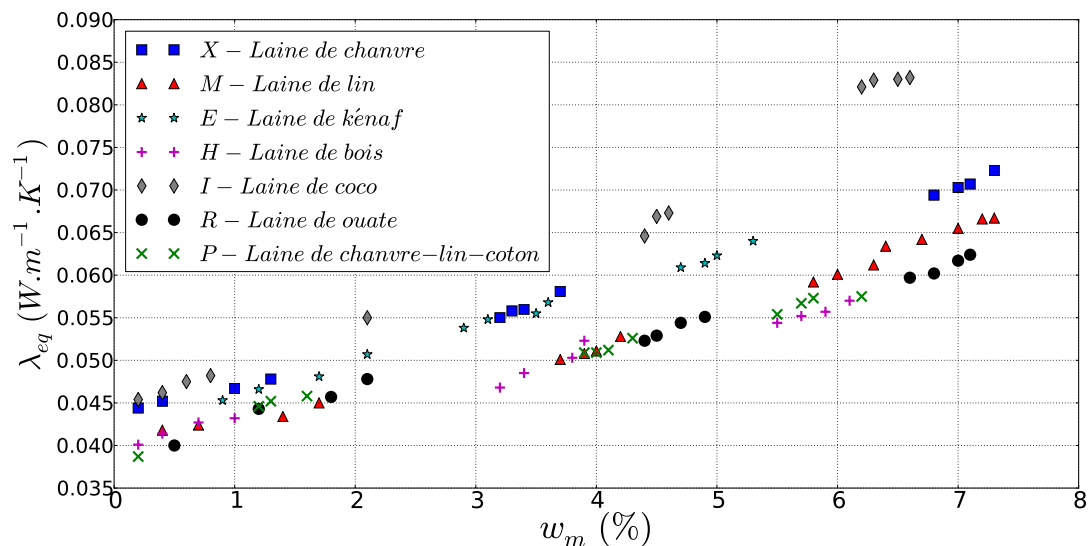
#### 3.3.1 Analyse des résultats en fonction de l'évolution de la teneur en eau au sein des matériaux

Les valeurs de conductivité thermique sont déterminées à l'aide du dispositif Hot Disk selon le même protocole que celui exposé précédemment à la Section 1.1 de ce chapitre. Les résultats sont présentés par type de laines, comme l'illustre la Figure IV.7.

Une première remarque d'ordre général concerne l'augmentation continue de la conductivité thermique, qui semble même linéaire, en fonction des valeurs de teneur en eau, quel que soit le type de laines végétales.

Comme pour la caractérisation des teneurs en eau massique et volumique en fonction de l'humidité relative, on observe que les différences de comportements entre les différents types de matériaux sont de plus en plus marquées avec l'augmentation de la teneur en eau.

Ainsi, trois groupes de tendances face à l'influence de l'eau présente dans les matériaux semblent pouvoir être distingués. Le premier correspond à la laine de coco qui affiche, quelle que soit la teneur en eau massique, les valeurs de conductivité thermique les plus importantes. Cela ne constitue pas une surprise, compte tenu des résultats précédents obtenus aux Sections 1.3.1 et 3.1.2 de ce chapitre, soulignant une conductivité thermique et une sensibilité à l'eau plus élevées que les autres matériaux.



**Figure IV.7** – Caractérisation expérimentale de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau massique ( $w_m$ ) des matériaux

Le deuxième groupe comprend les laines de chanvre et de kénaf. En s'appuyant sur les données de la littérature présentées au chapitre II et comme cela a été illustré à la Section 3.1.2 de ce chapitre concernant la sensibilité à l'eau, les fibres de chanvre et de kénaf présentent de nombreuses caractéristiques communes. Ceci peut expliquer le comportement de leurs propriétés thermiques qui semblent similaires.

Le dernier groupe est composé des laines de lin, de chanvre-lin-coton, de bois et de ouate de cellulose. Le comportement de ces quatre matériaux face à l'augmentation de la teneur en eau est similaire jusqu'à  $w = 5\%$ . Au-delà, le lin semble montrer une sensibilité légèrement supérieure aux trois autres. Les résultats pour le lin semblent cohérents vis-à-vis du mélange chanvre-lin-coton car ce dernier présente une sensibilité à l'eau moindre (Tableau IV.5) et des rayons de fibres moyens plus faibles (Tableau III.2).

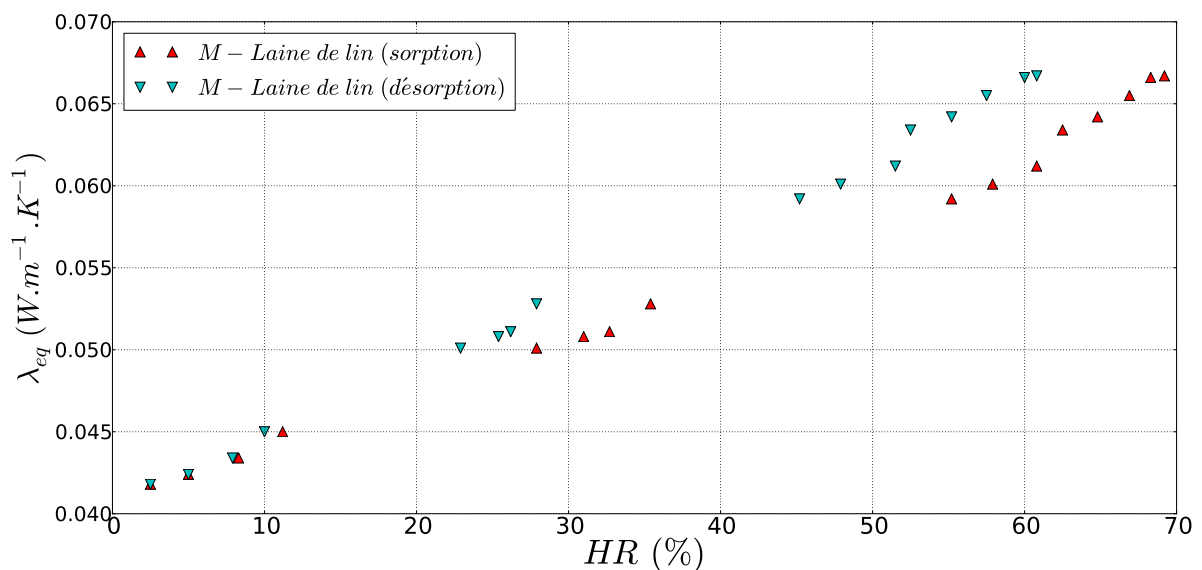
Les résultats sont plus surprenants pour la laine de bois (H) qui avait été identifiée comme plus sensible à l'eau que les trois autres matériaux de ce groupe. Néanmoins, ces résultats sont cohérents avec ceux présentés dans [Volf *et al.* 2015]. En effet, avec une masse volumique de  $51,5 \text{ kg.m}^{-3}$  supérieure à celles de laines de chanvre et de lin (respectivement  $36,2 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $27,0 \text{ kg.m}^{-3}$ ) et une teneur en eau volumique supérieure aux deux autres matériaux, une laine de bois présente une conductivité thermique inférieure d'environ 8% par rapport aux laines de chanvre et lin.

### IV.3 La caractérisation expérimentale de l'influence de l'eau sur les performances thermiques des laines végétales

En conclusion, la conductivité thermique des laines végétale augmente de façon continue avec l'élévation de leur teneur en eau massique. L'amplitude de cette augmentation ne semble pas uniquement liée à leur sensibilité à l'eau (quantité d'eau adsorbée) mais également à la nature des fibres végétales.

#### 3.3.2 Analyse de la corrélation des résultats avec l'humidité relative de l'environnement des matériaux

En combinant les résultats de la courbe de sorption/désorption de la laine de lin (M), présentée à la Figure IV.5 et les mesures de la Figure IV.7, il est possible d'obtenir une courbe de l'évolution de la conductivité thermique de la laine de lin en fonction de l'humidité relative à laquelle ce matériau est soumis. Ces résultats sont montrés par la Figure IV.8.



**Figure IV.8** – Caractérisation expérimentale de la conductivité thermique de la laine de lin (M) en fonction de l'humidité relative (HR)

Comme dans le cas de l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau massique présente dans les matériaux, on obtient une évolution quasiment linéaire en fonction de l'humidité relative. En considérant une plage d'humidité relative comprise entre 30 et 70% pour un logement, on peut analyser la variation de conductivité thermique qui lui correspond. Ainsi, dans le cas de la sorption, pour une humidité relative proche de 30%, la laine de lin (M) présente une conductivité thermique proche de  $\lambda_{eq} = 0,05 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , soit une valeur supérieure d'environ 22% par rapport à celle présentée pour un état sec. Pour une



humidité relative proche de 70%, la conductivité thermique atteint des valeurs de l'ordre de  $\lambda_{eq} = 0,067 W.m^{-1}.K^{-1}$ , correspondant à une augmentation de 34% par rapport à la valeur pour  $HR = 30\%$  et de 63% par rapport à l'état sec. **L'influence de l'humidité relative est donc loin d'être négligeable sur les performances thermiques des laines végétales. De plus, ces propriétés vont évoluer, une fois le matériau mis en œuvre, en fonction des conditions hygrométriques des locaux.**

L'évaluation de l'augmentation de la conductivité thermique pour les autres laines a été réalisée à partir des mesures en laboratoire. Les résultats sont présentés dans le Tableau IV.6.

Laines	Augmentation $\lambda$ (%) entre $HR = [3 - 10]\%$ et $HR = 40\%$			Augmentation $\lambda$ (%) entre $HR = 40\%$ et $HR = [65 - 70]\%$		
	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy
Chanvre	22,7	30,4	<b>27,2</b>	11,7	33,3	<b>20,4</b>
Lin	20,9	31,7	<b>25,6</b>	17,3	20,3	<b>18,5</b>
Kénafe	14,9	15,2	<b>15,1</b>	16,7	16,7	<b>16,7</b>
Bois	29,3	33,3	<b>31,3</b>	7,5	16,1	<b>11,8</b>
Coco	33,3	33,3	<b>33,3</b>	36,1	36,1	<b>36,1</b>
Ouate de cellulose	23,8	23,8	<b>23,8</b>	17,3	17,3	<b>17,3</b>
Chanvre-lin-coton	22,0	22,0	<b>22,0</b>	11,8	11,8	<b>11,8</b>

**Tableau IV.6** – Augmentations moyennes (minimum et maximum) de conductivité thermique équivalente des différents types de laines lors de l'évolution de l'humidité relative

Même si les résultats ne sont pas aussi détaillés que pour la laine de lin (M), on note également des élévations significatives ( $[15,1 - 33,3]\%$ ) entre un état quasi-sec et une humidité relative de 40%. Les augmentations moyennes sont comprises dans la plage  $[11,8 - 36,1]\%$  pour une évolution de l'humidité relative de 40 à  $[65 - 70]\%$ , avec des résultats relativement homogènes entre les différents types de laines sauf pour la laine de coco qui comme précédemment montre une sensibilité à l'eau plus importante. En outre, il est à noter que pour la laine de chanvre-lin-coton, la présence des fibres de coton permet de limiter légèrement l'influence de l'eau sur ses performances thermiques.

Les laines végétales sont des matériaux hygroscopiques qui réagissent très rapidement aux changements des conditions hygrométriques de leur environnement. Ainsi, elles vont se charger et se décharger en eau suivant des cycles de sorption/désorption qui vont présenter comme dans le cas des fibres végétales une hystérésis. Les différentes laines caractérisées montrent donc des comportements différents en fonction de la nature de leurs fibres. Ainsi, la teneur en eau, qu'elle soit massique ou volumique, dans les matériaux est corrélée au comportement de leurs fibres

végétales décrit par leurs courbes de sorption/désorption.

En ce qui concerne l'influence de cette présence d'eau dans les matériaux sur les performances thermiques, elle est loin d'être négligeable. Même si la conductivité thermique de toutes les laines végétales augmente en fonction de la teneur en eau et de l'humidité relative, l'influence est plus ou moins marquée en fonction du type des matériaux et plus particulièrement de la nature de leurs fibres végétales. Ainsi, les laines de lin, de bois, d'ouate de cellulose et celles qui contiennent des fibres de coton vont présenter une sensibilité légèrement moins marquée que pour les autres laines.

A présent, afin de prédire le niveau des performances thermiques des laines végétales qui ont été caractérisées, et plus particulièrement la conductivité thermique, il est possible de mettre en œuvre une approche micro-macro s'appuyant sur la méthode d'homogénéisation autocohérente.

## 4 Méthode HAC cylindrique en statique pour la détermination des propriétés thermiques des matériaux fibreux

Cette section s'appuie largement sur le contenu d'un article accepté pour publication dans la revue de rang A avec comité de lecture *Construction and Building Materials* et intitulé « A cylindrical self-consistent modelling of vegetal wools thermal conductivity ».

En s'appuyant sur les travaux de [Hashin 1968], la méthode d'homogénéisation auto-cohérente a été appliquée au cas des matériaux granulaires par [Boutin 1996] ou encore [Cérézo 2005] afin de modéliser leur conductivité thermique. Néanmoins, comme cela a été présenté à la Section 3.2.5 du Chapitre II, l'application de cette approche, reposant sur une géométrie sphérique, au cas de matériaux fibreux conduit à des prédictions relativement éloignées, comme il est montré dans [El Sawalhi *et al.* 2016]. Ainsi, l'objectif de cette section est d'adapter cette démarche de modélisation au cas des matériaux fibreux anisotropes.

Pour cela, les hypothèses de base relatives à cette démarche sont tout d'abord énoncées en s'appuyant sur les grands principes des méthodes d'homogénéisation. Ensuite, afin de rendre compte du caractère anisotrope des matériaux fibreux, les relations permettant de déterminer leur conductivité thermique équivalente sont développées dans deux cas particuliers correspon-

dant à des orientations parallèle et perpendiculaire du flux de chaleur par rapport aux fibres.

Les résultats de la modélisation sont ensuite comparés aux caractérisations expérimentales réalisées sur les échantillons de matériaux de cette thèse (Section 2.2.1) afin d'évaluer la précision de prédiction de la méthode HAC pour les laines végétales.

Enfin, les limites de cette approche HAC cylindrique sont analysées et discutées.

### 4.1 Modélisation de la conductivité thermique

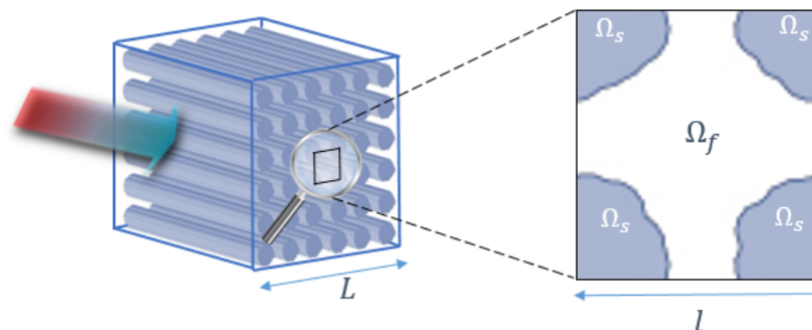
En s'appuyant sur les travaux menés concernant le transfert thermique par convection au sein des matériaux fibreux, exposés à la Section 2.2.3 du Chapitre II, l'hypothèse est faite de ne pas prendre en compte ce phénomène. De même, dans un premier temps, le transfert thermique par rayonnement n'est pas utilisé dans la modélisation.

#### 4.1.1 Les hypothèses et les principes de base de l'homogénéisation auto-cohérente

On considère un milieu hétérogène à simple porosité constitué de deux phases. Une phase solide ( $\Omega_s$ ) et une phase fluide ( $\Omega_f$ ) qui sature le milieu.

Comme cela a été énoncé à la Section 3.2.4 du Chapitre II, pour mettre en œuvre une méthode d'homogénéisation micro-macro, deux principes de base sont à respecter :

- l'existence d'un volume élémentaire représentatif (VER) du milieu hétérogène auquel est associé une longueur microscopique caractéristique ( $l$ ), comme illustré à la Figure IV.9 ;
- la séparation d'échelle entre les hétérogénéités à l'échelle microscopique et la sollicitation à l'échelle macroscopique caractérisée par une longueur ( $L$ ), comme le montre la Figure IV.9.



**Figure IV.9** – Le milieu fibreux macroscopique (à gauche) soumis à une sollicitation (flux thermique représenté par la flèche) et la cellule élémentaire représentative constituée des phases solide  $\Omega_s$  et fluide  $\Omega_f$  (à droite)

## IV.4 Méthode HAC cylindrique en statique pour la détermination des propriétés thermiques des matériaux fibreux

---

Cette hypothèse de séparation d'échelle se traduit par l'expression d' $\epsilon$ , le rapport d'échelle :

$$\epsilon = \frac{l}{L} \ll 1 \quad (\text{IV.4})$$

La Figure IV.9 est une représentation simplifiée d'un matériau fibreux avec des fibres parallèles entre elles et réparties de manière régulière.

L'hypothèse est faite qu'aux échelles du matériau et de la cellule élémentaire, la variation de température est gouvernée par l'équation de la chaleur linéarisée, exprimée précédemment par l'Equation II.36.

De plus, en se plaçant dans un régime permanent, on a :  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ .

Finalement, l'équation de la chaleur linéarisée peut s'écrire suivant la relation :

$$\lambda \Delta T = 0 \quad (\text{IV.5})$$

La dernière hypothèse qui est à prendre en compte est celle de la consistance énergétique entre le milieu hétérogène et le milieu homogénéisé. Cette condition est détaillée aux Sections 4.1.3 et 4.1.4.

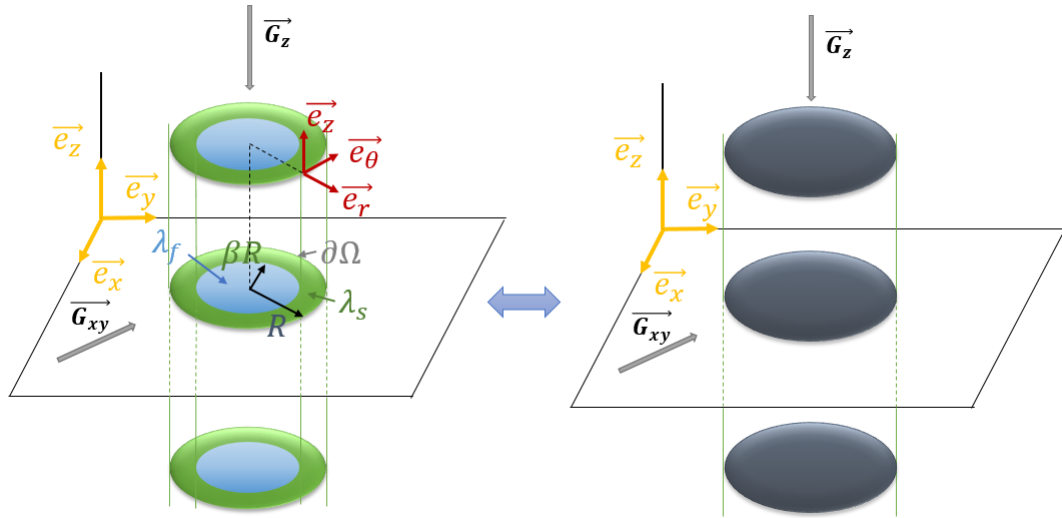
De plus, dans le cadre de l'application de la démarche HAC et pour établir des relations analytiques, il convient d'utiliser un motif générique à l'échelle locale reposant sur une morphologie simplifiée.

### 4.1.2 La configuration du motif générique suivant une géométrie cylindrique

Pour prendre en compte le caractère fibreux et anisotrope des laines végétales, une morphologie simple suivant une géométrie cylindrique est utilisée.

Ainsi, le motif générique ( $\Omega$ ) représentant le comportement du VER, décrit par un cylindre de rayon ( $R$ ) et de surface ( $\partial R$ ), est composé d'une inclusion bicomposite. La phase fluide, de volume ( $\Omega_f$ ) et de rayon ( $\beta R$ ), est incluse dans une phase solide, de volume ( $\Omega_s$ ) et de rayon ( $R$ ), comme le montre la Figure IV.10. Compte tenu de la porosité très élevée des laines végétales, le cas d'une configuration où la phase fluide est incluse dans la phase solide est retenu. En effet, avec une configuration inverse, la conductivité thermique équivalente deviendrait quasiment égale à la conductivité de la phase fluide.

De plus, l'hypothèse est faite, en première approche, de ne pas considérer de contact partiels entre les fibres, comme cela est introduit par les travaux menés dans [Lee *et al.* 2006]. La constante relative à la prise en compte de ces contacts tend alors vers zéro. Ce qui correspond au cas d'un contact parfait entre les fibres. Compte tenu de la configuration du motif générique,



**Figure IV.10** – L’inclusion élémentaire solide-fluide (à gauche) et le milieu homogène équivalent (à droite)

cette hypothèse semble raisonnable.

La porosité de cette inclusion est  $\phi = \frac{\Omega_f}{\Omega} = \beta^2$ .

En outre, en prenant un rayon équivalent de fibres pour l’ensemble des fibres végétales et polymères,  $R_{eq}$ , la relation suivante peut être établie :

$$R = \frac{R_{eq}}{\sqrt{(1 - \phi)}} \quad (\text{IV.6})$$

De même que pour l’hypothèse relative à l’équation de la chaleur linéarisée, il est considéré que la force uniforme représentée par le gradient de température ( $\vec{G}$ ), avec  $\vec{G} = \nabla T$ , comme indiqué sur la Figure IV.10, s’applique à la fois à l’inclusion et au milieu homogène équivalent.  $\vec{G}$  est caractérisé par une amplitude ( $G$ ) et une direction.

Comme il a été présenté précédemment à la Section 1.3.2 du Chapitre II, on peut considérer que les panneaux de laines végétales sont constitués de couches parallèles de fibres successives. En s’appuyant sur ce caractère anisotrope, il est possible de définir deux directions privilégiées pour le gradient de température. La première est perpendiculaire à l’axe longitudinal des fibres, dans le plan  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta)$ . La seconde est parallèle à l’axe longitudinal des fibres et donc suivant l’axe  $\vec{e}_z$ , comme le montre la Figure IV.10.

Dans ces conditions, même si d’autres orientations sont possibles, seuls deux cas spécifiques de modélisation de la conductivité thermique équivalente sont étudiés :

- Le cas d’un gradient de température perpendiculaire à l’axe longitudinal des fibres, pour

lequel les grandeurs caractéristiques seront indexées par le symbole ( $\perp$ ).

- Le cas d'un gradient de température parallèle à l'axe longitudinal aux fibres, pour lequel les grandeurs caractéristiques seront indexées par le symbole ( $//$ ).

### 4.1.3 Approche HAC dans le cas d'un flux de chaleur perpendiculaire

Dans la suite de cette section l'indice  $i$  peut être remplacé par les index des phases solides ( $s$ ), fluide ( $f$ ), ou par celui du milieu homogénéisé ( $eq$ ).

#### L'expression de la température

L'équation de la chaleur, Equation IV.5, s'écrit en coordonnées cylindriques avec la relation suivante :

$$\frac{\partial^2 T_i(r, \theta)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i(r, \theta)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i(r, \theta)}{\partial \theta^2} = 0 \quad (\text{IV.7})$$

Afin de trouver une solution générale à cette équation, la température peut s'exprimer à partir de deux fonctions indépendantes :  $T_i(r, \theta) = f_i(r) \cdot h(\theta)$ .

Pour la fonction  $h(\theta)$ , l'hypothèse est faite de retenir uniquement le terme variable en  $\theta$  à l'ordre 1. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$h(\theta) = G \sin(\theta) \quad (\text{IV.8})$$

$T_i(r, \theta)$  devient :

$$T_i(r, \theta) = G f_i(r) \sin(\theta) \quad (\text{IV.9})$$

En insérant l'Equation IV.9 dans l'Equation IV.7, une équation différentielle classique du second ordre est obtenue :

$$\frac{\partial^2 f_\alpha(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f_\alpha(r)}{\partial r} - \frac{1}{r^2} f_\alpha(r) = 0 \quad (\text{IV.10})$$

La solution peut s'écrire sous la forme :

$$f_i(r) = A_i r + \frac{1}{r} B_i \quad (\text{IV.11})$$

Avec  $A_i$  et  $B_i$  deux constantes à déterminer à partir des conditions aux limites.

L'Equation IV.9 peut alors s'écrire :

$$T_i(r, \theta) = G \left( A_i r + \frac{1}{r} B_i \right) \sin(\theta) \quad (\text{IV.12})$$

**Les conditions aux limites**

A présent que l'expression de la température est établie, il faut déterminer les constantes pour les phases fluide, solide et pour le milieu homogénéisé.

*Dans la phase fluide,  $0 < r \leq \beta R$  :*

$$T_f(r, \theta) = G(A_f r + \frac{1}{r} B_f) \sin(\theta) \quad (\text{IV.13})$$

Dans le cas spécifique où  $r \rightarrow 0$ , comme la température possède une valeur finie, alors  $B_f = 0$ . L'Equation IV.13 devient :

$$T_f(r, \theta) = G A_f r \sin(\theta) \quad (\text{IV.14})$$

*Dans la phase solide,  $\beta R \leq r \leq R$  :*

$$T_s(r, \theta) = G(A_s r + \frac{1}{s} B_s) \sin(\theta) \quad (\text{IV.15})$$

A l'interface fluide/solide,  $r = \beta R$ , on considère la continuité de la température et du flux de chaleur :

$$A_f \beta R = A_s \beta R + \frac{B_s}{\beta R} \quad (\text{IV.16})$$

$$\lambda_f A_f = \lambda_s^\perp \left( A_s - \frac{B_s}{(\beta R)^2} \right) \quad (\text{IV.17})$$

Cette continuité est également considérée en  $r = R$  :

$$A_s R + \frac{B_s}{R} = A_{eq} R + \frac{B_{eq}}{R} \quad (\text{IV.18})$$

$$\lambda_s^\perp \left( A_s - \frac{B_s}{R^2} \right) = \lambda_{eq}^\perp \left( A_{eq} - \frac{B_{eq}}{R^2} \right) \quad (\text{IV.19})$$

Quand  $r$  tend vers l'infini :  $\vec{G} = \vec{\nabla} T$ . Ainsi, suivant l'axe  $\vec{e}_r$ , cette égalité se traduit par :

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} G \left( A_{eq} - \frac{B_{eq}}{r^2} \right) = G \quad (\text{IV.20})$$

On peut donc conclure que :  $A_{eq} = 1$

La dernière condition correspond à la consistance énergétique. Elle se traduit par l'égalité

---

## IV.4 Méthode HAC cylindrique en statique pour la détermination des propriétés thermiques des matériaux fibreux

---

de l'intégration du gradient de température au sein du milieu homogénéisé et celui comportant l'inclusion cylindrique. Cette égalité s'exprime par la relation suivante :

$$\iiint_{\Omega} \vec{\nabla} T(r, \theta) d\Omega = \iiint_{\Omega} \vec{\nabla} T_{eq}(r, \theta) d\Omega \quad (\text{IV.21})$$

C'est-à-dire :

$$G\Omega = G\Omega \left(1 - \frac{B_{eq}}{R^2}\right) \quad (\text{IV.22})$$

Ainsi,  $B_{eq} = 0$

Les équations IV.18 et IV.19 peuvent alors s'écrire :

$$A_s R + \frac{B_s}{R} = R \quad (\text{IV.23})$$

$$\lambda_s^{\perp} \left(A_s - \frac{B_s}{R^2}\right) = \lambda_{eq} \quad (\text{IV.24})$$

Nous avons à présent un système de quatre équations, Equations IV.16, IV.17, IV.23, IV.24, et quatre constantes à déterminer  $A_s$ ,  $A_f$ ,  $B_s$  et  $\lambda_{eq}$ .

La résolution de ce système conduit à l'expression de la conductivité thermique équivalente comme une fonction des conductivités spécifiques de chacune des deux phases et de la porosité du milieu :

$$\lambda_{eq}^{\perp} = \lambda_s^{\perp} \left( 1 + \frac{\phi}{\frac{(1-\phi)}{2} + \frac{1}{\frac{\lambda_f}{\lambda_s^{\perp}} - 1}} \right) \quad (\text{IV.25})$$

Cette équation est de la même forme mais avec des coefficients différents par rapport à celle présentée dans [Cérézo 2005] pour le cas d'une géométrie sphérique utilisée pour les matériaux granulaires. Il est possible de vérifier si cette nouvelle formulation est adaptée au cas des laines végétales en comparant les prédictions de la modélisation HAC cylindrique avec des données expérimentales obtenues dans le cadre de la thèse.

Il est possible également d'écrire la relation IV.25 sous la forme suivante :

$$\lambda_{eq}^{\perp} = \lambda_s^{\perp} \frac{(\lambda_s^{\perp} + \lambda_f) - \phi (\lambda_s^{\perp} + \lambda_f)}{(\lambda_s^{\perp} + \lambda_f) + \phi (\lambda_s^{\perp} + \lambda_f)} \quad (\text{IV.26})$$



En s'appuyant sur la relation IV.26, on montre qu'avec une valeur fixe de la conductivité spécifique de la phase fluide  $\lambda_f$  et de la porosité  $\phi$ , l'augmentation de la conductivité spécifique de la phase solide  $\lambda_s$  entraîne bien une augmentation de la conductivité thermique équivalente  $\lambda_{eq}^\perp$ .

De la même manière, on montre qu'avec une valeur fixe de la conductivité spécifique de la phase fluide  $\lambda_f$  et de la conductivité spécifique de la phase solide  $\lambda_s$ , l'augmentation de la porosité  $\phi$ , entraîne bien, avec un volume d'air plus important dans le matériau, une diminution de la conductivité thermique équivalente  $\lambda_{eq}^\perp$ .

### 4.1.4 Approche HAC dans le cas d'un flux de chaleur parallèle

Contrairement au cas du flux de chaleur perpendiculaire, le flux de chaleur parallèle passe en même temps dans les phases fluide et solide. Ce cas de figure correspond à l'approche parallèle évoquée à la Section 3.2.2 du Chapitre II. Ainsi, la conductivité équivalente pour un flux de chaleur parallèle s'exprime par la relation suivante :

$$\lambda_{eq}^// = \phi\lambda_f + (1 - \phi)\lambda_s^// \quad (\text{IV.27})$$

Le cas du flux parallèle ne correspond pas à l'utilisation conventionnelle des panneaux de laines végétales utilisés en tant qu'isolants du bâtiment. C'est pourquoi dans la suite de ce chapitre, seul le cas d'un flux perpendiculaire aux fibres est comparé aux caractérisations expérimentales des matériaux étudiés en vue de valider la méthode de modélisation HAC cylindrique développée.

## 4.2 Comparaison de la modélisation HAC avec les résultats expérimentaux

Afin d'évaluer la validité de la modélisation HAC mise en œuvre dans le cas des matériaux fibreux, les prédictions de la conductivité thermique équivalente en fonction de la masse volumique des matériaux sont comparées avec les résultats expérimentaux obtenus à la Section 2.2.1 de ce chapitre.

Cependant, pour déterminer la conductivité thermique équivalente à partir de la modélisation HAC cylindrique développée, il est nécessaire au préalable d'identifier les valeurs des conductivités spécifiques des phases fluides et solides des matériaux.

### 4.2.1 Conductivité thermique de la phase fluide

Il est considéré que la phase fluide est composée d'air. En s'appuyant sur les travaux réalisés par [Bankvall 1973] présentés à la Section 2.2.4 du Chapitre II, la valeur de conductivité de la phase fluide au sein des matériaux fibreux est fixée pour  $25^{\circ}\text{C}$  à  $\lambda_{air} = 0,0275 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . C'est cette valeur qui est utilisée dans la suite de ce mémoire.

### 4.2.2 Conductivité thermique de la phase solide

Comme cela a été exposé à la Section 1.3.4 du Chapitre II, les données relatives aux valeurs de conductivité thermique de la phase solide sont très peu nombreuses et ne concernent que quelques types de fibres (chanvre, coton et bois). De plus, ces données ne sont pas issues de caractérisations expérimentales. Ainsi, dans ce cas de figure, de nombreux travaux de la littérature déterminent  $\lambda_s$  par une inversion de modèle [Hashin 1968], [Boutin 1996], [Cérézo 2005], [Collet & Pretot 2014], [Gourlay 2014], [Nguyen *et al.* 2016].

Ainsi, la conductivité thermique de la phase solide, dans le cas d'un flux perpendiculaire aux fibres, est déterminée à partir des caractérisations expérimentales et par inversion du modèle HAC cylindrique développé à la Section 4.1.3 et représenté par l'Equation IV.25. En effet, cette approche de modélisation a l'avantage de présenter une géométrie proche de celle des fibres.

De plus, compte tenu de la présence probable de transferts thermiques par rayonnement pour les masses volumiques les plus basses, comme cela a été illustré à la Section 2.2.1, les valeurs de conductivités thermiques équivalentes utilisées correspondent aux taux de compression expérimentaux les plus importants pour chaque matériau. Ces valeurs de conductivités thermiques équivalentes sont obtenues à partir de cinq caractérisations expérimentales (Section 1.3.1 de ce chapitre). Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau IV.7. Elles sont comprises dans une plage restreinte  $[0,94 - 1,06] \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , sauf pour le bois, qui présente une valeur plus basse de  $0,78 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

Ces valeurs sont globalement plus élevées que celles présentées dans le Tableau II.7 du Chapitre II, mais semblent relativement cohérentes (compte tenu de leur composition) par rapport à celles connues pour d'autres types de fibres. De plus, les valeurs sont homogènes et restent dans un ordre de grandeur proche des valeurs de la littérature qui ont été déterminées par modélisation et dont on ignore si la présence d'eau au sein des fibres végétales est prise en compte. Aussi, ce sont les valeurs présentes dans le Tableau IV.7 qui sont utilisées dans la suite du mémoire.

	Materiaux	$\lambda_s^\perp$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
Laine		
Chanvre	B / L / N	1,03 / 1,01 / 0,95
Chanvre-lin-coton	P / Q	0,98 / 0,96
Lin cotonisé	C	1,06
Lin	D	1,03
Kénaif	K	0,94
Bois	A / H	0,78 / 0,78
Ouate cellulose	K	0,96

**Tableau IV.7** – Valeurs de conductivité thermique de la phase solide, dans le cas d’un flux perpendiculaire aux fibres, déterminées par inversion du modèle HAC cylindrique

### 4.2.3 Evaluation du modèle HAC cylindrique

La comparaison des prédictions du modèle HAC cylindrique avec les caractérisations expérimentales présentées à la Section 2.2.1 est réalisée à partir des graphes de la Figure IV.11.

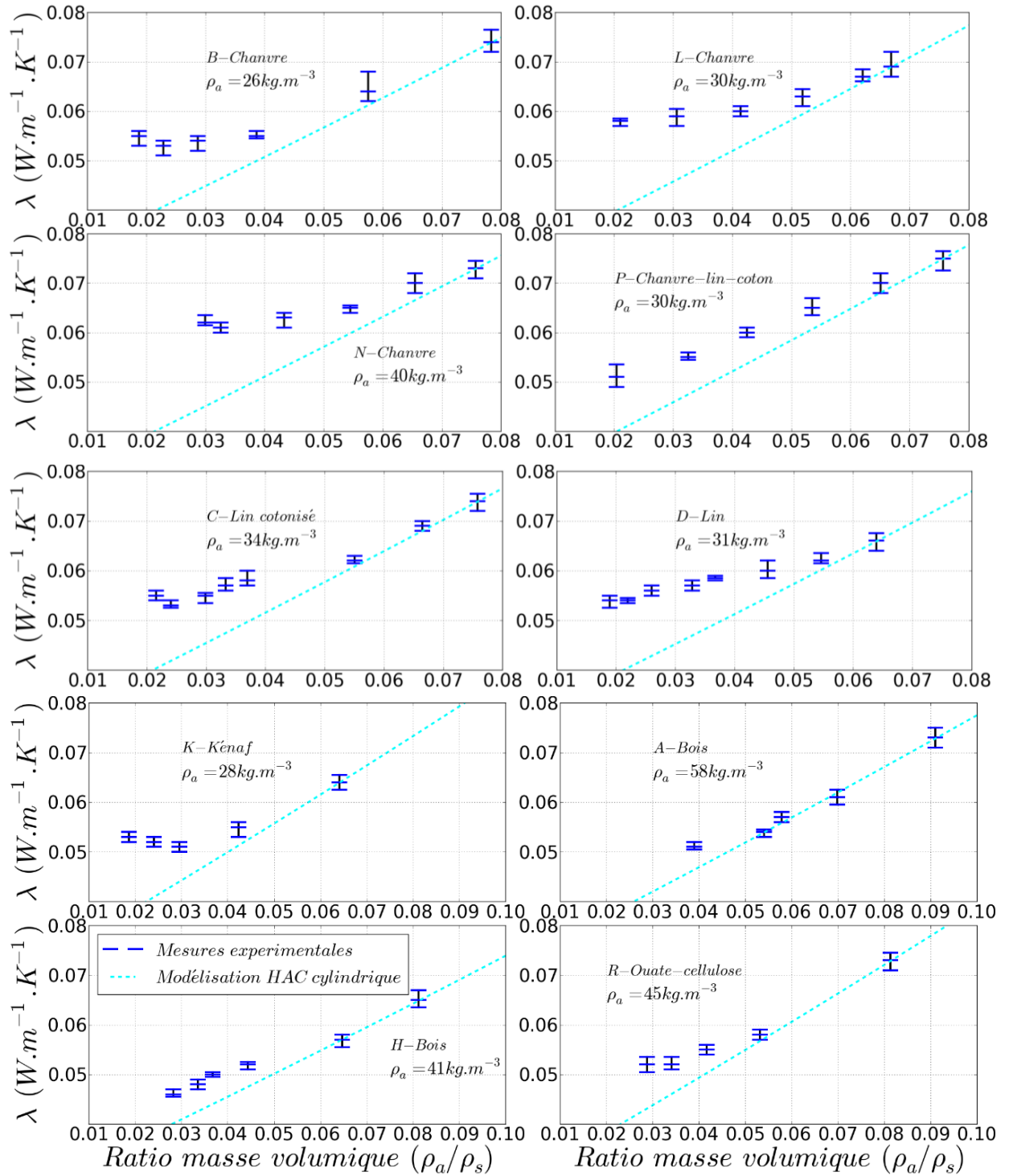
Au vu des graphes de la Figure IV.11, on constate que pour un grand nombre de matériaux, la modélisation HAC mise en œuvre est relativement éloignée des mesures expérimentales et plus particulièrement pour les faibles ratio de masse volumique. En effet, pour les laines de chanvre, de lin et de kénaif, l’écart relatif moyen entre les valeurs expérimentales et les prédictions de la modélisation se trouve dans une plage relativement homogène comprise entre 12,0% pour la laine (L) et 15,2% pour la laine (D).

L’écart relatif pour le mélange chanvre-lin-coton (P) est un peu plus bas avec une valeur de 9,2%.

Seules les modélisations des laines de bois, (A) et (H), et de la ouate de cellulose (R) semblent présenter une corrélation plus importante avec les mesures expérimentales. Cela est confirmé par les valeurs des écarts relatifs moyens entre mesures expérimentales et modélisation qui sont respectivement de 2,6% et 7,5% pour les laines (A) et (H), et de 7,9% pour (R).

Une des explications est liée à l’impact du transfert thermique par rayonnement sur la valeur de la conductivité thermique équivalente. En effet, les graphes de la Figure IV.11 montrent que cet effet semble relativement important. Il est néanmoins plus marqué pour les densités les plus basses, mais il semble avoir une influence non négligeable jusqu’à des valeurs de ratio de masse volumique proche de 0,065 comme pour le chanvre (N). Ces valeurs de ratio correspondent à des masses volumiques de l’ordre de  $80 \text{ kg}.m^{-3}$ .

#### IV.4 Méthode HAC cylindrique en statique pour la détermination des propriétés thermiques des matériaux fibreux



**Figure IV.11** – Comparaison des modélisations HAC cylindrique avec les résultats des caractérisations expérimentales de la conductivité thermique

Il semble également que le phénomène de transfert thermique par rayonnement soit lié à la taille des fibres. En effet, pour la laine de chanvre (N) qui possède une masse volumique hors compression de  $40 \text{ kg.m}^{-3}$  et un rayon moyen de fibres de  $14,3 \mu\text{m}$ , l'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement semble se situer dans la plage de ratio  $[0,03 - 0,04]$ , alors que pour la laine de chanvre-lin-coton (P), qui possède une masse volumique hors compression de  $30 \text{ kg.m}^{-3}$  et un rayon moyen de fibres de  $9,5 \mu\text{m}$ , l'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement semble se situer en deçà du ratio  $0,02$ . Cela est confirmé par les laines de lin (C) et (D) qui possèdent des masses volumiques et des rayons de fibres moyens inférieurs et qui présente un optimum de transferts couplés conduction-rayonnement situé dans une plage de ratio  $[0,02 - 0,03]$  inférieure à celle de (N).

Les laines de bois, (A) et (H), ainsi que la ouate de cellulose (R) possèdent des masses volumiques hors compression plus importantes. Comme l'illustre les graphes de la Figure IV.11, avec des valeurs de masses volumiques qui augmentent, le rayonnement n'a quasiment plus d'influence sur la conductivité thermique équivalente qui se trouve alors très proche de la conductivité thermique due au phénomène de conduction.

**Ainsi, ces courbes et notamment celle relative à la laine de bois (A) permettent de valider le modèle HAC cylindrique développé dans le cas de la conduction et en l'absence des autres modes de transferts thermiques, ce qui intervient pour des densités supérieures à environ  $80 \text{ kg.m}^{-3}$ .**

### 4.3 Eléments de discussion sur les limites du modèle HAC cylindrique

La comparaison des prédictions du modèle HAC cylindrique développé à la Section 4.1.3 avec les résultats de la caractérisation expérimentale de dix laines végétales différentes a conduit à la validation de cette modélisation mais pour une plage limitée de masses volumiques.

En effet, pour la borne inférieure de cette plage, la validation a pu être établie pour des masses volumiques  $\rho_a > 80 \text{ kg.m}^{-3}$ . En deçà de cette valeur, la contribution du transfert par rayonnement thermique à la conductivité équivalente ne peut pas être négligée. Ceci constitue une première limite à cette modélisation dans le cas des isolants fibreux végétaux.

La borne supérieure, qui varie en fonction du type de laine, reste néanmoins toujours inférieure à un ratio de masse volumique de  $0,1$ . Même si on peut supposer que le modèle HAC cylindrique permet de prédire des valeurs précises de la conductivité thermique équivalente au-delà de ce ratio, il n'est pas possible de le vérifier dans le cadre de cette thèse. Cependant, même

si la valeur du ratio reste faible, cela correspond à des taux de compression déjà relativement importants qui sont proches de 80% pour certains matériaux étudiés. Des taux de cet ordre de grandeur, voire plus importants ne semblent pas présenter un intérêt pour des conditions réelles d'utilisation dans un bâtiment.

Enfin, les quelques valeurs de conductivités spécifiques de la phase solide des laines végétales présentes dans la littérature ne sont pas issues de caractérisations expérimentales mais de modélisations. Pour cette raison et par manque de données fiables, ces conductivités de la phase solide ont été déterminées par inversion du modèle HAC cylindrique, constituant ainsi une limite supplémentaire à prendre en compte dans le cadre de la mise en œuvre de cette démarche de modélisation.

Le développement d'une approche de modélisation s'appuyant sur une inclusion générique bicomposite de géométrie cylindrique a conduit à l'établissement de relations permettant de prédire la conductivité thermique équivalente pour le phénomène de transfert thermique par conduction. Cette géométrie simplifiée permet de se rapprocher de celle des fibres et de prendre en compte le caractère anisotrope des panneaux de laines végétales.

Cependant, la comparaison entre les prédictions de cette modélisation et les caractérisations expérimentales ont permis d'identifier quelques limites notamment pour les masses volumiques inférieures à  $80 \text{ kg.m}^{-3}$ . En effet, dans ce cas de figure, la contribution du transfert thermique par rayonnement à la conductivité thermique équivalente ne peut pas être négligée par rapport au phénomène de conduction.

**Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte ce phénomène dans l'établissement des relations de la conductivité thermique équivalente.**

## 5 Prise en compte du transfert par rayonnement thermique dans l'approche de modélisation

Le transfert thermique par rayonnement est un phénomène physique qui s'appuie sur des paramètres spécifiques liés à l'architecture microstructurale des matériaux. Néanmoins, des approches de modélisation existent dans la littérature pour le cas des matériaux fibreux.

Ainsi, après avoir présenté ces approches, elles sont couplées avec la modélisation HAC cylindrique développée à la section précédente. La validité de cette démarche est ensuite évaluée et discutée pour le cas des laines végétales en s'appuyant sur les caractérisations expérimentales menées dans le cadre de cette thèse. Elle est également analysée au travers des différents leviers

possibles afin d'optimiser les performances thermiques des laines végétales.

### 5.1 Modélisation du transfert thermique par rayonnement

Après une description du transfert thermique par rayonnement dans le cas des matériaux fibreux, deux approches de modélisation sont présentées.

#### 5.1.1 La description du transfert thermique par rayonnement

Dans les matériaux fibreux tels que les laines végétales, le transfert thermique par rayonnement, qui a été présenté à la Section 2.2.4 du Chapitre II, est un phénomène physique relativement complexe. Il peut se décomposer en trois phénomènes principaux :

- l'émission d'ondes électromagnétiques par les fibres qui vont se propager dans la phase fluide et interagir avec les autres fibres,
- l'absorption d'une partie de l'énergie électromagnétique des ondes reçues qui contribue à l'échauffement des fibres,
- la diffusion dans de multiples directions d'ondes électromagnétiques dont une partie de l'énergie est transmise, absorbée et réfléchiée par les fibres atteintes.

Dans [Langlais & Klarsfeld 1997], il est précisé que lors de l'établissement de l'équation de la chaleur, deux densités de flux sont à prendre en compte.

La première densité de flux correspond au transfert thermique par conduction,  $\vec{\varphi}_c$ , et s'exprime selon la loi de Fourier donnée à l'Equation II.33.

La seconde correspond à la densité de flux relative au transfert thermique par rayonnement,  $\vec{\varphi}_r$ . Elle s'exprime notamment en fonction du champ de luminance directionnelle relié à l'équation de transfert radiatif. Différents coefficients de diffusion, d'absorption et d'extinction propres à la microstructure du matériau sont alors utilisés.

Dans le cas général, les équations de la chaleur et de transfert radiatif sont couplées.

Cependant, en faisant quelques hypothèses sur les matériaux, il est possible de les découpler et de pouvoir ainsi traiter les deux types de transferts séparément.

Ces hypothèses sont les suivantes :

- les fibres qui composent la phase solide sont considérées comme un milieu semi-transparent homogène qui absorbe, diffuse et réémet le rayonnement thermique,
- la phase fluide est considérée comme un milieu transparent au rayonnement thermique dans lequel la convection naturelle est négligée,
- l'indice de réfraction du milieu à l'échelle locale ne varie pas avec la température,

- les matériaux sont assimilés à des matériaux optiquement épais (ce qui est généralement le cas des isolants légers)

Dans ces conditions, la densité de flux radiatif peut s'exprimer sous une forme analogue à la loi de Fourier, comme cela est présenté à l'Equation [IV.28](#).

$$\vec{\varphi}_r = -\lambda_r \vec{\nabla} T \quad (\text{IV.28})$$

$\lambda_r$  représente alors la conductivité thermique de rayonnement.

La conductivité thermique équivalente  $\lambda_{eq}$  peut alors s'exprimer comme la somme des conductivités thermiques de conduction et de rayonnement comme le montre l'Equation [IV.29](#).

$$\lambda_{eq} = \lambda_c + \lambda_r \quad (\text{IV.29})$$

Comme il a été décidé de considérer uniquement le cas d'un flux perpendiculaire aux fibres, la conductivité thermique de conduction s'exprime par la relation établie à l'Equation [IV.25](#).

En ce qui concerne la conductivité thermique de rayonnement, elle peut s'exprimer selon l'approximation de Rosseland-Deissler [[Deissler 1964](#)].

### 5.1.2 Modélisation de la conductivité thermique de rayonnement à partir de l'approximation de Rosseland-Deissler

Dans le cas des isolants fibreux l'approximation de Rosseland-Deissler [[Deissler 1964](#)] conduit à la relation suivante :

$$\lambda_r = \frac{4\sigma_{sb}\langle T_{moy} \rangle^3 e}{\left(\frac{2}{\phi} - 1\right) + \beta_{moy}\rho_a e} \quad (\text{IV.30})$$

Avec  $\sigma_{sb}$  la constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma_{sb} = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}K^{-4}$ .  $\langle T_{moy} \rangle$  correspond à la température moyenne de part et d'autre du matériau,  $e$  est l'épaisseur du matériau. Enfin,  $\beta_{moy}$  est le coefficient d'extinction moyen. Il s'exprime en  $m^2.kg^{-1}$ .

Ce coefficient dépend de la nature du matériau et de sa masse volumique apparente. Il peut être déterminé à partir de la connaissance des coefficients de diffusion et d'absorption du matériau et de l'intégration de la luminance du corps noir. Compte tenu de la complexité et de l'absence de données expérimentales, sa détermination est généralement obtenue par inversion de modèle comme dans le cas des conductivités thermiques de conduction de la phase solide des laines végétales [[Langlais & Klarsfeld 1997](#)], [[Karamanos et al. 2004](#)], [[Bories et al. 2008](#)], [[Tilioua et al. 2012](#)].



Il semble que seules des valeurs de coefficient d'extinction de laines minérales conventionnelles de type laines de verre ou de roche soient disponibles dans la littérature. Ainsi, dans [Langlais & Klarsfeld 1997], le coefficient d'extinction moyen passe de  $60,509 \text{ m}^2.kg^{-1}$  pour une masse volumique de  $5 \text{ kg.m}^{-3}$  à  $20,800 \text{ m}^2.kg^{-1}$  pour une masse volumique de  $15 \text{ kg.m}^{-3}$ . Compte tenu des masses volumiques des matériaux étudiés dans le cadre de cette thèse, on peut donc s'attendre à obtenir des valeurs plus faibles.

Dans la littérature, il existe d'autres travaux menés dans [Bankvall 1973] qui proposent une approche s'appuyant sur l'agencement de fibres par couches.

### 5.1.3 Modélisation de la conductivité thermique par rayonnement de Bankvall

Dans ses travaux, Bankvall [Bankvall 1973] considère l'agencement d'un matériau fibreux en  $n$  couches successives parallèles entre elles et séparées par une distance  $L_0$ .

Il obtient une expression de la conductivité thermique de rayonnement donnée par la relation suivante :

$$\lambda_r = 4\sigma_{sb}\langle T_{moy} \rangle^3 \beta' L_0 \quad (\text{IV.31})$$

Avec  $L_0$  la distance intercouche qui est déterminée à partir de la porosité et d'un rayon de fibre moyen  $R_{f_{moy}}$ , selon l'Equation IV.32.

$$L_0 = \frac{\pi}{4} \frac{R_{f_{moy}}}{(1 - \phi)} \quad (\text{IV.32})$$

Le coefficient de rayonnement  $\beta'$  dépend de la température, du rayon de fibre moyen et de la porosité [Bankvall 1973]. Pour une température de  $20^\circ\text{C}$ , une porosité de 0,98 et un rayon de fibres moyen de  $5 \mu\text{m}$ , il obtient des valeurs de  $\beta'$  de l'ordre de 3,5 (sans unité).

Il est à présent possible de modéliser la conductivité thermique équivalente à partir du couplage des conductivités thermiques de conduction et de rayonnement.

## 5.2 Couplage du rayonnement à la modélisation HAC cylindrique

Les deux couplages possibles de la modélisation de la conductivité thermique de conduction avec les approches de Rosseland-Deissler et Bankvall pour la conductivité thermique de rayonnement sont développées dans le cas d'un flux perpendiculaire aux fibres. Les prédictions sont ensuite comparées aux valeurs des caractérisations expérimentales comme cela a été réalisé à la Section 4 de ce chapitre.

## IV.5 Prise en compte du transfert par rayonnement thermique dans l'approche de modélisation

---

La validité des coefficients  $\beta_{moy}$  et  $\beta'$  peut alors être discutée, ainsi que le pourcentage de contribution de chaque phénomène de transfert en fonction de la masse volumique.

Enfin, des analyses sont réalisées afin de mieux définir la zone d'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement et mettre en évidence l'influence des rayons de fibres sur la conductivité thermique équivalente.

### 5.2.1 Relations couplées conduction-rayonnement

En couplant l'Equation IV.25 issue de la modélisation du transfert thermique par conduction avec l'Equation IV.30 relative à l'approche de Rosseland-Deissler pour le transfert par rayonnement, on obtient la relation suivante :

$$\lambda_{eq}^{\perp} = \lambda_{eq}^{\perp} = \lambda_s^{\perp} \frac{(\lambda_s^{\perp} + \lambda_f) - \phi (\lambda_s^{\perp} + \lambda_f)}{(\lambda_s^{\perp} + \lambda_f) + \phi (\lambda_s^{\perp} + \lambda_f)} + \frac{4\sigma_{sb} \langle T_{moy} \rangle^3 e}{\left(\frac{2}{\phi} - 1\right) + \beta_{moy} \rho_a e} \quad (IV.33)$$

Dans le cas du couplage de la modélisation HAC (conduction) avec l'approche de Bankvall, on obtient la relation suivante :

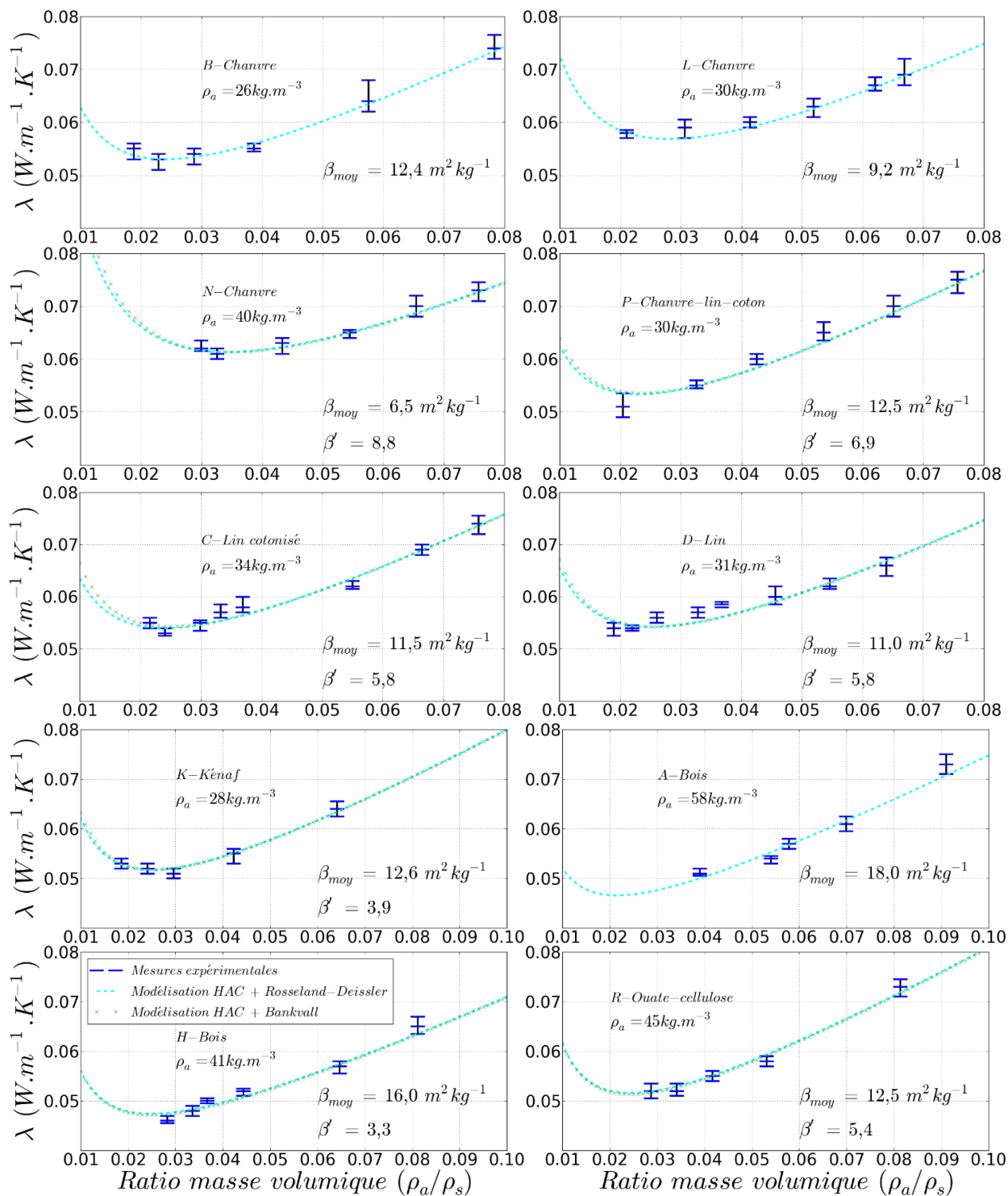
$$\lambda_{eq}^{\perp} = \lambda_{eq}^{\perp} = \lambda_s^{\perp} \frac{(\lambda_s^{\perp} + \lambda_f) - \phi (\lambda_s^{\perp} + \lambda_f)}{(\lambda_s^{\perp} + \lambda_f) + \phi (\lambda_s^{\perp} + \lambda_f)} + 4\sigma_{sb} \langle T_{moy} \rangle^3 \beta' L_0 \quad (IV.34)$$

Afin d'évaluer l'évolution de ces modèles couplés par rapport à la modélisation HAC s'appuyant uniquement sur le transfert thermique par conduction, les nouveaux résultats sont représentés pour les mêmes matériaux qu'à la Section 4. Cependant, pour le modèle de Bankvall qui s'appuie sur un rayon de fibre moyen, les données ne sont pas disponibles pour les matériaux (B), (L) et (A).

### 5.2.2 Evaluation des modèles couplés conduction-rayonnement

En prenant en compte le transfert thermique par rayonnement, on obtient des modélisations relativement proches des résultats expérimentaux, comme l'illustre les graphes de la Figure IV.12.

Les écarts relatifs moyens entre les modélisations et les résultats expérimentaux sont tous en dessous de 3% comme l'illustre le Tableau IV.8.



**Figure IV.12** – Comparaison des modélisations couplées HAC cylindrique/Rosseland-Deissler et HAC cylindrique/Bankvall avec les résultats des caractérisations expérimentales de la conductivité thermique équivalente

## IV.5 Prise en compte du transfert par rayonnement thermique dans l'approche de modélisation

Laine	Réf.	Ecart relatif Moy (%)		Ecart relatif Max (%)	
		Rosseland-Deissler	Bankvall	Rosseland-Deissler	Bankvall
Chanvre	B	1,1	/	2,2	/
	L	1,1	/	3,5	/
	N	0,8	0,8	1,8	1,9
Lin	C	1,5	1,6	2,6	2,9
	D	2,2	2,1	3,2	3,2
Kénaif	K	0,8	0,7	2,1	2,2
Bois	A	1,8	/	3,1	/
	H	1,9	1,9	3,5	3,0
Ouate de cellulose	R	1,2	1,2	2,3	2,0
Chanvre-lin-coton	P	2,2	2,2	5,0	5,6

**Tableau IV.8** – Ecart relatif moyen et maximum entre les prédictions des modélisations HAC/Rosseland-Deissler et HAC/Bankvall et les caractérisations expérimentales

Ces valeurs permettent également de constater que les approches Rosseland-Deissler et Bankvall donnent des résultats extrêmement proches.

### 5.2.3 Éléments de discussion sur les approches de modélisations couplées

#### Analyse des coefficients $\beta_{moy}$ et $\beta'$

Le premier élément de discussion concerne les coefficients  $\beta_{moy}$  et  $\beta'$  qui ont été déterminés par une méthode des moindres carrés en minimisant l'écart entre la modélisation et les valeurs expérimentales.

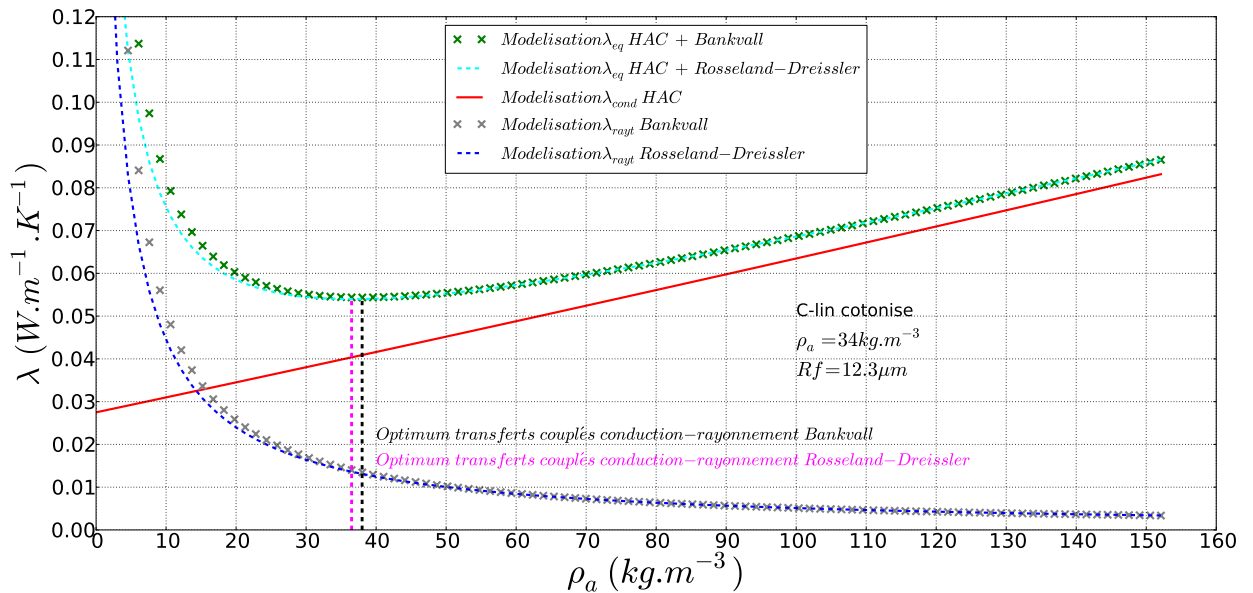
Pour  $\beta_{moy}$  les valeurs sont toutes inférieures à  $20,8 m^2.kg^{-1}$  ce qui correspond à un matériau fibreux conventionnel de masse volumique égale à  $15 kg.m^{-3}$  [Langlais & Klarsfeld 2004]. De plus, les valeurs sont très homogènes et comprises dans la plage  $[11,0 - 12,6 m^2.kg^{-1}]$  sauf pour quatre matériaux. La laine de chanvre (L) présente ainsi une valeur de  $9,2 m^2.kg^{-1}$  très légèrement en dehors de cette plage. La laine de chanvre (N) présente une valeur plus basse de  $6,5 m^2.kg^{-1}$ . Même si sa masse volumique est supérieure à celles des laines de chanvre (B) et (L), cela ne suffit pas à expliquer cette valeur. Les valeurs des laines de bois sont également inattendues car elles sont de  $16 m^2.kg^{-1}$  pour (H) et  $18 m^2.kg^{-1}$  pour (A). Avec des masses volumiques supérieures aux laines de chanvre, lin, kénaif et chanvre-lin-coton, on aurait pu s'attendre à des valeurs inférieures à  $10 m^2.kg^{-1}$ . D'autres paramètres non identifiés dans le cas présent doivent intervenir afin d'expliquer l'ordre de grandeur de ces valeurs.

En ce qui concerne  $\beta'$ , la seule valeur identifiée dans la littérature,  $\beta' = 3,5$ , correspond à

un matériau de porosité 0,98 et de rayon de fibres moyen de  $5 \mu m$  [Bankvall 1973]. Dans notre cas on obtient des valeurs comprises dans la plage  $[3,3 - 8,8]$  qui est bien du même ordre de grandeur. En revanche, quelques valeurs paraissent un peu moins cohérentes. En effet, la laine de bois (H) qui possède une porosité de 0,971 et un rayon de fibres moyen de  $15,8 \mu m$ , présente une valeur de  $\beta' = 3,3$ , alors que la laine (P), qui possède une porosité de 0,98 et un rayon de fibres moyen de  $9,5 \mu m$ , donc plus proches de la valeur de la littérature, présente une valeur de  $\beta' = 6,9$ . En l'absence de plus de données de la littérature, il est difficile d'analyser ces écarts.

### Contribution de chaque type de transfert à la conductivité thermique équivalente

Le second élément exposé concerne la contribution de chaque type de transfert thermique.



**Figure IV.13** – Détail de la contribution des transferts thermiques par conduction et rayonnement en fonction de la masse volumique pour la laine de lin (C) et identification des optimums de transferts couplés conduction–rayonnement relatifs aux approches de Rosseland–Deissler et Bankvall

Cette contribution est analysée à travers la modélisation de la conductivité thermique équivalente pour le cas de la laine de lin cotonisé (C), comme l'illustre la Figure IV.13. Ainsi, on note que l'équilibre entre la contribution des transferts par conduction et par rayonnement est respecté pour  $\rho_a \approx 15 kg.m^{-3}$  quelle que soit la modélisation. La contribution de la conduction passe à 80% pour  $\rho_a = 45 kg.m^{-3}$ .

Ainsi, même s'il est plus difficile de discerner l'influence du rayonnement pour les matériaux ayant une masse volumique supérieure ou égale à  $\rho_a = 45 kg.m^{-3}$ , car l'optimum de transferts couplés conduction–rayonnement n'est pas observable

## IV.5 Prise en compte du transfert par rayonnement thermique dans l'approche de modélisation

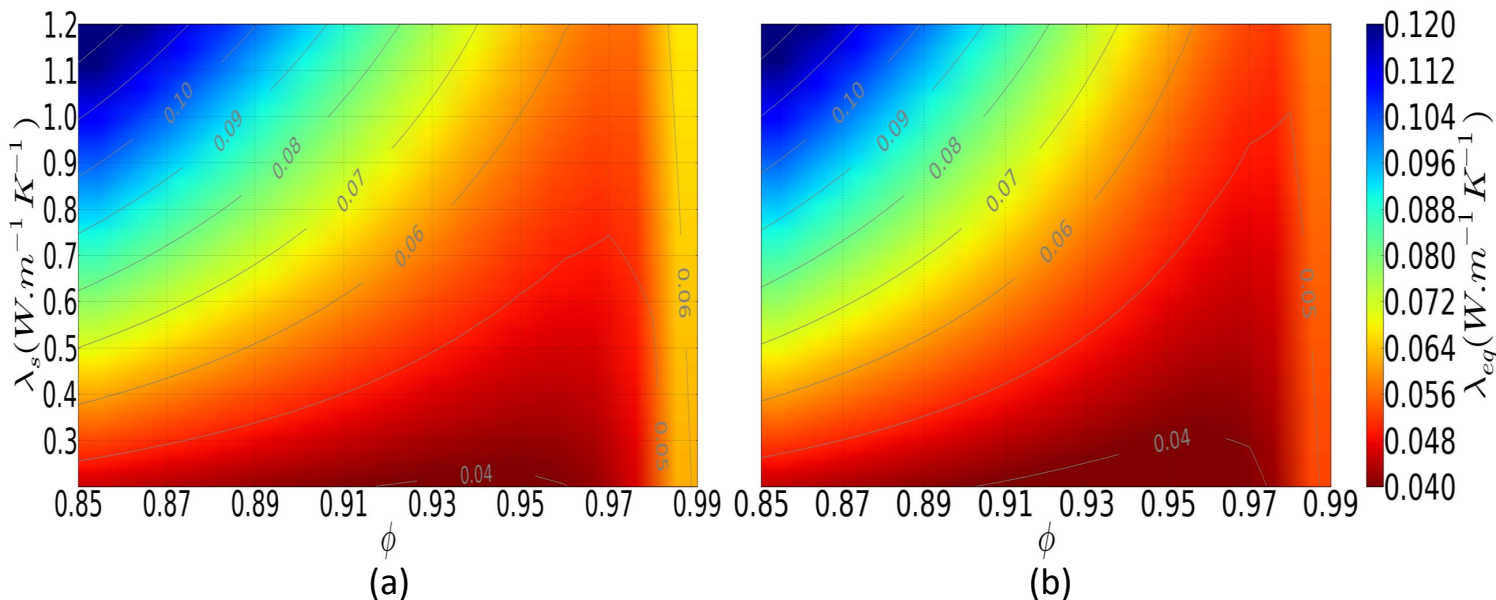
expérimentalement, ce phénomène est quand même présent et semble difficile à négliger.

La contribution de la conduction passe ensuite à 90% pour  $\rho_a = 80 \text{ kg.m}^{-3}$ . Comme tous les matériaux étudiés dans le cadre de cette thèse, sauf la laine de coco, ont des masses volumiques largement inférieures à cette valeur, leur conductivité thermique équivalente reste dépendante du phénomène de rayonnement.

La contribution du rayonnement passe finalement en deçà de 5% pour  $\rho_a > 130 \text{ kg.m}^{-3}$ .

### L'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement

A partir du graphe de la Figure IV.13, il est possible de déterminer les valeurs des optimums de transferts couplés conduction-rayonnement suivant les deux modélisations. Ainsi, on obtient des valeurs relativement proches de  $\rho_{opt-rayt} = 36,5 \text{ kg.m}^{-3}$  pour HAC/Rosseland-Deissler et de  $\rho_{opt-rayt} = 38 \text{ kg.m}^{-3}$  pour HAC/Bankvall. En déterminant l'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement pour les autres matériaux caractérisés, il est possible d'identifier une plage relativement restreinte comprise entre 34 et  $42 \text{ kg.m}^{-3}$  sauf pour la laine de chanvre (N). Elle présente en effet une valeur d'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement supérieure égale à  $51 \text{ kg.m}^{-3}$ , dont la valeur est difficile à interpréter.



**Figure IV.14** – Influence de la variation de conductivité thermique de la phase solide et de la porosité sur la conductivité thermique équivalente pour la laine de lin C (a) dans le cas d'un rayon de fibre moyen de  $12,3 \mu\text{m}$ , (b) dans le cas d'un rayon de fibre moyen de  $9 \mu\text{m}$

### L'influence du rayon de fibres

Toujours à partir de la modélisation de la laine de lin (C), le graphe de la Figure IV.14(a) présente la variation de la conductivité thermique équivalente en fonction de la porosité et de la conductivité thermique de la phase solide pour un rayon de fibres moyen caractérisé expérimentalement  $R_f = 12,3 \mu m$ . Le fait de diminuer cette valeur à  $R_f = 9 \mu m$  entraîne une amélioration de la conductivité thermique équivalente comme l'illustre la Figure IV.14(b). Dans ce cas, on voit qu'il est possible d'obtenir des valeurs de conductivité thermique équivalente inférieures à  $0,05 W.m^{-1}.K^{-1}$  pour des porosités supérieures à 97% correspondant à une masse volumique proche de l'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement.

Il est donc possible, en faisant varier la masse volumique et le rayon de fibres moyen d'optimiser les performances thermiques des laines végétales comme dans le cas de leurs performances en absorption acoustique.

## 6 Conclusion

Une approche originale s'appuyant sur la caractérisation expérimentale de la conductivité thermique des laines végétales, à partir de deux dispositifs fonctionnant en régime transitoire et d'un dispositif fonctionnant en régime stationnaire, a pu être menée dans le cadre de la thèse. L'exploitation et l'analyse des résultats ont montré leur cohérence et ainsi la fiabilité de ces dispositifs pour la caractérisation des conductivités thermiques des laines végétales.

Ces dispositifs ont ensuite été adaptés pour caractériser l'influence de la variation de la masse volumique à partir de la compression des matériaux. L'analyse des résultats obtenus a mis en exergue l'influence du phénomène de transfert thermique par rayonnement pour les masses volumiques les plus basses.

L'influence de l'eau captée par ces matériaux hygroscopiques a également été caractérisée expérimentalement. Les essais menés ont ainsi montré l'influence non négligeable de la teneur en eau contenue au sein des laines végétales sur leurs performances thermiques. De plus, ces matériaux qui réagissent très rapidement aux changements hygrométriques de leur environnement, présentent un comportement en cycles de sorption/désorption corrélé aux propriétés hygroscopiques de leurs fibres végétales.

Afin de modéliser la conductivité thermique liée aux transferts par conduction, une approche reposant sur une méthode d'homogénéisation auto-cohérente a été adaptée au cas d'une géométrie cylindrique. Elle s'appuie ainsi sur un motif générique à l'échelle locale proche de la morphologie d'une fibre. Une relation analytique est ainsi déterminée, permettant d'exprimer

la conductivité thermique en fonction de la porosité et des conductivités spécifiques des phases solides et fluides des matériaux.

Le phénomène de transfert thermique par rayonnement a également été pris en compte à partir de modèles de la littérature éprouvés pour des isolants fibreux conventionnels.

Le couplage de ces deux modèles permet ainsi d'obtenir des prédictions très fiables pour la conductivité thermique équivalente des matériaux fibreux. Cette approche a ensuite été validée pour les laines végétales par comparaison avec les résultats expérimentaux.

L'analyse de cette démarche de modélisation a permis de quantifier la part de chaque type de transfert thermique en fonction de la masse volumique des matériaux. Ainsi, pour les laines végétales il semble difficile de négliger le phénomène de rayonnement qui a une influence beaucoup plus importante que ce qui était envisagé. Enfin, une analyse paramétrique à partir de la méthode de modélisation développée permet de confirmer le rôle de levier joué par la porosité et les rayons de fibres dans une optique d'optimisation des performances thermiques des laines végétales.

Afin de mettre en œuvre une approche de modélisation conjointe acoustique et thermique, il semble pertinent d'appliquer à présent la démarche d'homogénéisation auto-cohérente au cas de l'acoustique en faisant évoluer la démarche vers une approche en dynamique.





---

# Approche conjointe de modélisation acoustique et thermique par Homogénéisation Auto-Cohérente

---

Dans la stratégie d'approche conjointe acoustique et thermique et pour faire suite à l'adaptation de l'approche HAC cylindrique développée dans le cadre de la modélisation de la conductivité thermique des matériaux fibreux, cette méthode est à présent appliquée en dynamique afin de déterminer les propriétés acoustiques de ces matériaux. En s'appuyant sur la démarche utilisée par C. Boutin pour les matériaux granulaires reposant sur une géométrie sphérique [Boutin 2000], [Boutin & Geindreau 2008], [Boutin & Geindreau 2010], une modélisation utilisant les principes de l'Homogénéisation des Structures Périodiques (HSP) et de l'Homogénéisation Auto-Cohérente (HAC) est adaptée au cas des matériaux fibreux. Pour cela, une géométrie cylindrique est utilisée afin de prendre en compte le caractère anisotrope des laines végétales, ainsi que les paramètres caractéristiques des matériaux fibreux à l'échelle de la microstructure. L'objectif de cette méthode d'homogénéisation étant, comme dans le cas de la modélisation des propriétés thermiques, d'établir des relations entre les paramètres à l'échelle locale (microstructure) et les propriétés macroscopiques des matériaux.

La première étape de cette modélisation consiste à établir les relations gouvernant les lois de comportement à l'échelle macroscopique en s'appuyant sur la méthode HSP. Dans un second temps, des hypothèses simplificatrices sont faites sur le volume élémentaire représentatif avant de mettre en œuvre la méthode HAC. L'objectif de cette démarche est d'essayer de déterminer des solutions analytiques possibles à partir des lois macroscopiques préalablement établies par

l'HSP. La validité des solutions ainsi obtenues par cette approche mêlant HSP et HAC est ensuite évaluée par comparaison avec les résultats des caractérisations expérimentales menées et présentées au Chapitre III.

Dans une troisième section, la modélisation HAC cylindrique en dynamique est évaluée en déterminant les limites basses et hautes fréquences des parties réelles et imaginaires de la densité dynamique et du module d'incompressibilité. Un lien est alors fait avec les paramètres acoustiques utilisés par les modélisations fluide-équivalent s'appuyant sur les effets visco-inertiels et thermiques.

Enfin, afin de répondre à la problématique générale de la thèse, la dernière section présente une procédure globale d'approche conjointe acoustique et thermique. Cette procédure s'appuie sur la synthèse globale des modélisations développées dans le cadre de la thèse. Ainsi, à partir de deux paramètres d'entrée, un rayon moyen de fibres et une valeur de porosité, la procédure conduit à la prédiction des propriétés acoustiques et thermiques des matériaux fibreux.

# 1 Etablissement des lois macroscopiques à partir de l'HSP

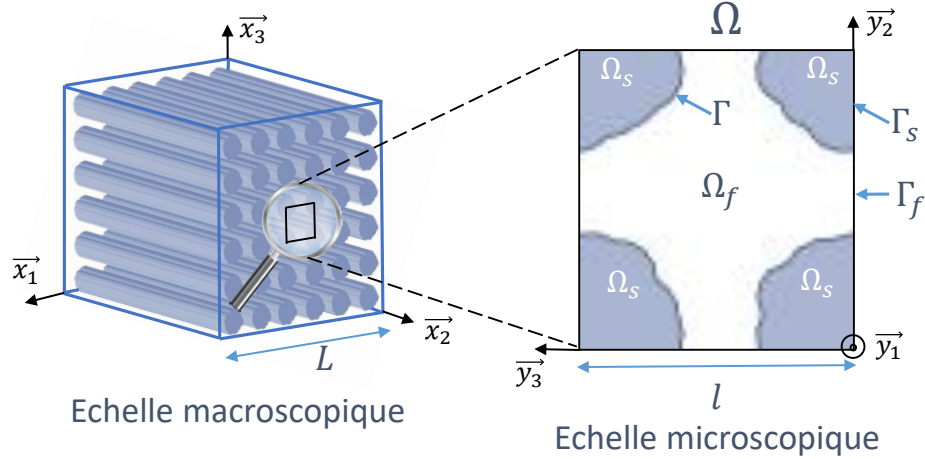
Afin de déterminer les lois du comportement du milieu homogénéisé à l'échelle macroscopique de manière rigoureuse à partir de la description des phénomènes à l'échelle locale, l'HSP est appliquée suivant quatre étapes.

Tout d'abord, il s'agit de formuler des hypothèses de base concernant la description du milieu à modéliser à l'échelle locale. Les équations relatives aux phénomènes physiques considérés à cette échelle sont ensuite exprimées. La prise en compte du principe de séparation d'échelle propre aux méthodes d'homogénéisation permet alors d'établir des équations normalisées. Enfin, la dernière étape consiste à résoudre ces équations en utilisant la méthode de formulation variationnelle, avant d'établir des solutions à l'échelle macroscopique.

## 1.1 Hypothèses de base

On considère un milieu fibreux constitué d'une phase solide et d'une phase fluide de viscosité  $\mu$  saturant le milieu. Le milieu est supposé à simple porosité  $\phi$  comme cela a déjà été explicité à la Section 2.1.1 du Chapitre II. L'hypothèse d'un squelette (phase solide) rigide, imperméable et d'évolution thermodynamique isotherme est choisie. La phase fluide est quant à elle considérée comme un fluide visqueux newtonien et compressible.

La Figure V.1 montre une représentation schématique de ce milieu fibreux aux échelles macroscopique et microscopique.



**Figure V.1** – Représentation schématique d'un milieu fibreux aux échelles macroscopique et microscopique avec la cellule périodique  $\Omega$ .  $\Omega_s$  et  $\Omega_f$  correspondent respectivement aux volumes des phases solide et fluide.  $\Gamma$  est l'interface solide-fluide.  $\Gamma_s$  et  $\Gamma_f$  sont les interfaces solide et fluide avec la frontière de la cellule  $\Omega$

## 1.2 Relations à l'échelle locale

On considère la propagation d'une onde plane harmonique de célérité  $c$  et d'amplitude unitaire dans le milieu fibreux. Cette onde est alors soumise aux phénomènes de dissipation liés aux effets visco-inertiels et thermiques, comme à la Section 4.1.2 du Chapitre III.

### 1.2.1 Les effets visco-inertiels

La propagation de l'onde sonore génère des mouvements au sein de la phase fluide. A l'échelle locale, on suppose que la longueur d'onde de la sollicitation acoustique a une dimension très supérieure à celle des pores, comme cela a été explicité à la Section 2.1.1 du Chapitre II. Ainsi, en première approximation, le fluide peut être considéré comme incompressible. Ce qui peut se traduire par la relation suivante :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{V.1})$$

Avec  $\vec{v}$  la vitesse du fluide à l'échelle locale (microscopique).

De plus, l'onde est considérée comme harmonique ( $e^{j\omega t}$ ), donc l'équation de Navier-Stokes linéarisée gouvernant la phase fluide s'écrit :

$$\mu \Delta \vec{v} - \vec{\nabla} p = j\omega \rho_0 \vec{v} \quad (\text{V.2})$$

Avec  $p$  la pression et  $\rho_0$  la densité apparente de la phase fluide.

La forme locale de l'équation de conservation de la masse linéarisée se traduit par la relation suivante :

$$j\omega\rho + \rho_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{V.3})$$

Enfin, avec l'hypothèse d'un squelette rigide, la condition d'adhérence à l'interface solide/fluide  $\Gamma$ , comme illustré à la Figure V.1, s'exprime par la relation :

$$\vec{v}_{/\Gamma} = \vec{0} \quad (\text{V.4})$$

### 1.2.2 Les effets thermiques

A l'échelle locale, la variation de température est régie par l'équation de la chaleur linéarisée qui s'exprime par la relation :

$$\lambda_f \Delta T - j\omega\rho_0 C_p T = -j\omega p \quad (\text{V.5})$$

Elle est également liée à l'Equation d'état II.12

Par analogie avec les effets de dissipation visco-inertiels, on exprime la condition de variation de température à l'interface ( $\Gamma$ ) :

$$T_{/\Gamma} = 0 \quad (\text{V.6})$$

## 1.3 Prise en compte de la condition de séparation d'échelles

La condition de séparation d'échelle, déjà présentée à la Section 4.1.1 du Chapitre IV et représentée par la Figure V.1 se traduit par un adimensionnement de chacun des termes présents dans les équations linéarisées.

Pour cela, on définit  $\vec{X}$  la variable du système. A l'échelle macroscopique, on peut lui associer la variable  $\vec{x} = \frac{\vec{X}}{L}$  et à l'échelle locale, la variable  $\vec{y} = \frac{\vec{X}}{l}$ . Elles sont liées à  $\epsilon$  par la relation suivante :

$$\vec{x} = \epsilon \vec{y} \quad (\text{V.7})$$

Afin de rendre compte des variations des grandeurs aux échelles macroscopiques et microscopiques, on les exprime en fonction de  $(\vec{x}, \vec{y})$ .

Afin d'obtenir des systèmes d'équations normalisées pour chacun des phénomènes de dissipation, il est nécessaire d'estimer l'importance de chacun des termes les uns par rapport aux autres en utilisant des nombres sans dimension.

L'Equation V.2 de Navier-Stokes devient alors :

$$\epsilon^2 \mu \Delta \vec{v} - \vec{\nabla} p = j\omega \rho_0 \vec{v} \quad (\text{V.8})$$

Les Equations V.1, V.3 et V.4 restent identiques.

L'Equation V.5 de la chaleur devient ainsi :

$$\epsilon^2 \lambda_f \Delta T - j\omega \rho_0 C_p T = -j\omega p \quad (\text{V.9})$$

Le système est complété par les Equations II.12 et V.6.

### 1.4 Utilisation de développements asymptotiques

Chaque grandeur,  $\vec{v}$ ,  $p$ ,  $\rho$  et  $T$  est exprimée comme un développement asymptotique en puissances de  $\epsilon$ .

Chaque développement est de la forme :

$$f(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{i=0}^{\infty} \epsilon^i f^i(\vec{x}, \vec{y}) \quad (\text{V.10})$$

Les opérateurs gradient ( $\vec{\nabla}$ ), divergence ( $\vec{\nabla} \cdot$ ) et Laplacien ( $\Delta$ ) sont approximés par les relations suivantes :

$$\vec{\nabla} \simeq \vec{\nabla}_x + \epsilon^{-1} \vec{\nabla}_y \quad (\text{V.11})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \simeq \vec{\nabla}_x \cdot + \epsilon^{-1} \vec{\nabla}_y \cdot \quad (\text{V.12})$$

$$\Delta \simeq \Delta_x + 2\epsilon^{-1} \vec{\nabla}_x \cdot \vec{\nabla}_y + \epsilon^{-2} \Delta_y \quad (\text{V.13})$$

Les développements asymptotiques sont injectés dans les systèmes des équations normalisées. Les termes de même ordre peuvent alors être identifiés pour chacun des systèmes d'équations relatifs aux phénomènes de dissipation visco-inertiels et thermiques.

### 1.4.1 Les effets visco-inertiels

L'Equation normalisée de Navier-Stokes V.8 conduit à l'établissement de deux relations. La première à l'ordre  $o(\epsilon^{-1})$  qui traduit que la pression est uniforme dans les pores au premier ordre :

$$\vec{\nabla}_y p^0 = 0 \quad (\text{V.14})$$

La seconde à l'ordre  $o(1)$  qui s'exprime par la relation suivante :

$$\mu \Delta_y \vec{v}^0 - \vec{\nabla}_y p^1 - \vec{\nabla}_x p^0 = j\omega \rho_0 \vec{v}^0 \quad (\text{V.15})$$

En ce qui concerne l'équation V.3 de conservation de la masse, on obtient également deux relations à des ordres différents. La première à l'ordre  $o(\epsilon^{-1})$  où l'on retrouve l'hypothèse d'incompressibilité du fluide, au premier ordre, à l'échelle des pores :

$$\vec{\nabla}_y \cdot \vec{v}^0 = 0 \quad (\text{V.16})$$

La seconde à l'ordre  $o(1)$  qui se traduit par la relation suivante :

$$j\omega \rho^0 + \vec{\nabla}_y \cdot \vec{v}^1 + \vec{\nabla}_x \cdot \vec{v}^0 = 0 \quad (\text{V.17})$$

Enfin, la condition d'adhérence exprimée par l'Equation V.4 devient :

$$\vec{v}^0_{/\Gamma} = \vec{0} \quad (\text{V.18})$$

### 1.4.2 Les effets thermiques

Par analogie avec les effets visco-inertiels, on obtient trois relations mais qui sont uniquement à l'ordre  $o(1)$  :

$$\lambda_f \Delta_y T^0 - j\omega \rho_0 C_p T^0 = -j\omega p^0 \quad (\text{V.19})$$

$$\frac{p^0}{p_0} = \frac{\rho^0}{\rho_0} + \frac{T^0}{T_0} \quad (\text{V.20})$$

$$T^0_{/\Gamma} = 0 \quad (\text{V.21})$$

## 1.5 Résolution des équations par formulation variationnelle

La résolution des systèmes d'équations ainsi obtenus est réalisée traditionnellement dans la littérature à partir de l'utilisation d'une formulation variationnelle [Auriault 1980], [Olby 1999], [Boutin & Geindreau 2008].

Pour les Equations V.15 et V.19, avant de les intégrer sur  $\Omega_f$ , on effectue le produit scalaire de chacun des termes du champ vectoriel  $\vec{v}$  et des champs scalaires  $p$  et  $T$  par un champ  $\vec{w}$  appartenant à l'espace vectoriel  $W$ , défini par :

$$W = \{ \vec{w}, \Omega - \text{periodique} / \vec{\nabla}_y \cdot \vec{w} = 0, \vec{w}|_{\Gamma} = \vec{0} \}.$$

### 1.5.1 Les effets visco-inertiels

Dans le cas des effets visco-inertiels on peut ainsi écrire à partir de l'Equation V.15 la relation suivante :

$$- \iiint_{\Omega_f} \vec{\nabla}_y p^1 \cdot \vec{w} \, d\Omega + \mu \iiint_{\Omega_f} \Delta_y \vec{v}^0 \cdot \vec{w} \, d\Omega - \iiint_{\Omega_f} \vec{\nabla}_x p^0 \cdot \vec{w} \, d\Omega = \iiint_{\Omega_f} j\omega\rho_0 \vec{v}^0 \cdot \vec{w} \, d\Omega \quad (\text{V.22})$$

Il est possible de modifier l'écriture de certains termes afin de la simplifier en utilisant une forme particulière du Théorème de flux-divergence. Ce théorème, dont on peut trouver d'autres appellations dans la littérature comme Théorème de Green-Ostrogradski ou encore Théorème de la divergence, traduit l'égalité entre l'intégrale de la divergence d'un champ vectoriel ( $\vec{F}$ ) sur un volume donné ( $V$ ) et le flux de ce champ à travers la surface ( $dS$ ) représentant la frontière du volume ( $\partial V$ ). Il est également possible de l'exprimer sous la forme suivante :

$$\iiint_V (\vec{F} \cdot \vec{\nabla} g + g (\vec{\nabla} \cdot \vec{F})) \, dV = \iint_{\partial V} g \vec{F} \cdot \vec{dS} \quad (\text{V.23})$$

Ainsi, dans notre cas, on peut écrire la relation suivante concernant le premier terme de l'Equation V.22 :

$$\iiint_{\Omega_f} (\vec{\nabla}_y p^1 \cdot \vec{w} + p^1 (\vec{\nabla}_y \cdot \vec{w})) \, d\Omega = \iint_{\Omega_f} p^1 \vec{w} \cdot \vec{dS} \quad (\text{V.24})$$

Par définition de l'espace vectoriel  $W$ , le terme  $p^1 (\vec{\nabla}_y \cdot \vec{w})$  s'annule.

De plus, compte tenu des conditions de périodicité des vecteurs de  $W$  et compte tenu des conditions d'adhérence, le terme  $\iint_{\Omega_f} p^1 \vec{w} \cdot \vec{dS}$  s'annule également.



Ainsi, on peut écrire que :

$$\iiint_{\Omega_f} \overline{\nabla}_y p^1 \cdot \overline{w} \, d\Omega = 0 \quad (\text{V.25})$$

En utilisant l'Equation V.23 du théorème de flux-divergence, il est également possible de modifier l'écriture du deuxième terme de l'Equation V.22 :

$$\mu \iiint_{\Omega_f} (\overline{\nabla}_y (\overline{\nabla}_y \cdot \overline{v}^0) \cdot \overline{w} + \overline{\nabla}_y \cdot \overline{v}^0 (\overline{\nabla}_y \cdot \overline{w})) \, d\Omega = \mu \iint_{\Omega_f} \overline{\nabla}_y \cdot \overline{v}^0 \overline{w} \, dS \quad (\text{V.26})$$

Comme pour le cas précédent, compte tenu des conditions de périodicité des vecteurs de  $W$  et des conditions d'adhérence, le terme  $\mu \iint_{\Omega_f} \overline{\nabla}_y \cdot \overline{v}^0 \overline{w} \, dS$  s'annule.

Ainsi, on obtient la relation suivante :

$$\mu \iiint_{\Omega_f} \Delta_y \overline{v}^0 \cdot \overline{w} \, d\Omega = -\mu \iiint_{\Omega_f} \overline{\nabla}_y \cdot \overline{v}^0 \cdot \overline{\nabla}_y \cdot \overline{w} \, d\Omega \quad (\text{V.27})$$

Dans certaines références bibliographiques, il est possible de trouver cette relation exprimée avec le tenseur des taux de déformation  $\mathbf{D}(\overline{v})$ . Elle s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\iiint_{\Omega_f} \overline{\nabla}_y \cdot \overline{v}^0 \cdot \overline{\nabla}_y \cdot \overline{w} \, d\Omega = 2 \iiint_{\Omega_f} \mathbf{D}_y(\overline{v}^0) \cdot \mathbf{D}_y(\overline{w}^0) \, d\Omega \quad (\text{V.28})$$

D'autre part, comme l'Equation V.14 a montré que la pression varie à l'échelle macroscopique dans les pores, on peut écrire :

$$p^0 = p^0(\overline{x}) = P \quad (\text{V.29})$$

Ainsi, on peut écrire que :

$$-\iiint_{\Omega_f} \overline{\nabla}_x P \overline{w} \, d\Omega = -\overline{\nabla}_x P \iiint_{\Omega_f} \overline{w} \, d\Omega \quad (\text{V.30})$$

A présent, en utilisant les Equations V.25, V.27, V.29 et V.30, on peut donner une expression simplifiée de l'Equation V.22 à partir de la relation suivante :

$$\iiint_{\Omega_f} \overline{\nabla}_y \overline{v}^0 \cdot \overline{\nabla}_y \overline{w} \, d\Omega + j \frac{\omega \rho_0}{\mu} \iiint_{\Omega_f} \overline{v}^0 \cdot \overline{w} \, d\Omega = -\frac{1}{\mu} \overline{\nabla}_x P \iiint_{\Omega_f} \overline{w} \, d\Omega \quad (\text{V.31})$$

La relation obtenue en utilisant la formulation variationnelle s'exprime sous la forme :

$$f(\overline{v}, \overline{w}) = -\frac{1}{\mu} \overline{\nabla}_x P \iiint_{\Omega_f} \overline{w} \, d\Omega \quad (\text{V.32})$$

Il s'agit d'une forme bilinéaire positive, définie coercive. L'application du théorème de Lax-Milgram garantit l'existence et l'unicité de la solution. De plus, à partir du conjugué de la vitesse  $\overline{v^0}$  et en posant  $\vec{w} = \overline{v^0}$ , on obtient la relation suivante :

$$\iiint_{\Omega_f} \overline{\nabla_y} \vec{v}^0 \cdot \overline{\nabla_y} \overline{v^0} d\Omega + j \frac{\omega \rho_0}{\mu} \iiint_{\Omega_f} \vec{v}^0 \cdot \overline{v^0} d\Omega = -\frac{1}{\mu} \overline{\nabla_x} P \iiint_{\Omega_f} \overline{v^0} d\Omega \quad (\text{V.33})$$

La solution s'écrit alors :

$$\vec{v}^0(\vec{x}, \vec{y}, \omega) = -\frac{[\pi(\vec{y}, \omega)]}{\mu} \overline{\nabla_x} P(\vec{x}, \omega) \quad (\text{V.34})$$

$\pi(\vec{y}, \omega)$  représente le tenseur de perméabilité à l'échelle locale.

En intégrant  $\vec{v}^0(\vec{x}, \vec{y}, \omega)$  sur  $\Omega$  on obtient la vitesse macroscopique du milieu homogène équivalent :

$$\langle \vec{v}^0 \rangle_{\Omega} = -\frac{[\Pi(\omega)]}{\mu} \overline{\nabla_x} P(\vec{x}, \omega) \quad (\text{V.35})$$

On retrouve l'équation correspondant à la **loi de Darcy généralisée** exprimée précédemment à l'Equation II.10 de la Section 2.1.2 du Chapitre II, où  $[\Pi(\omega)]$  est le tenseur de perméabilité dynamique. Il est alors possible, avec l'hypothèse d'un milieu isotrope, d'obtenir la densité dynamique  $\rho$  à partir de l'Equation II.11 établie au Chapitre II.

D'autre part, les travaux menés dans [Boutin & Geindreau 2008] précisent que l'Equation V.33 démontre la consistance énergétique entre les descriptions microscopiques et macroscopiques.

Enfin, en prenant en compte la condition d'adhérence exprimée à l'Equation V.18 et en intégrant sur  $\Omega$  l'Equation V.17, on obtient la relation suivante :

$$j\omega \langle \rho^0 \rangle_{\Omega} + \overline{\nabla_x} \cdot \langle \vec{v}^0 \rangle_{\Omega} = 0 \quad (\text{V.36})$$

L'Equation V.36 combinée à l'Equation V.35 conduit à l'établissement de l'équation de propagation dans le milieu homogène équivalent, exprimée précédemment à la Section 2.1.3 du Chapitre II par l'Equation II.18.

### 1.5.2 Les effets thermiques

La même démarche que pour les effets visco-inertiels est mise en œuvre. Cependant, il s'agit ici d'un problème scalaire et non vectoriel. Ainsi, pour appliquer la formulation variationnelle on effectue le produit de  $T^0$  avec  $\psi$  un scalaire tel que  $\overline{\nabla} \psi = 0$  et  $\psi|_{\Gamma} = 0$ .

La première étape consiste donc à faire le produit de chacun des termes de l'Equation V.19 par  $\psi$  avant de les intégrer sur  $\Omega_f$ . On obtient la relation suivante :

$$\lambda_f \iiint_{\Omega_f} \Delta_y T^0 \psi d\Omega - j\omega \rho_0 C_p \iiint_{\Omega_f} T^0 \psi d\Omega = -j\omega P \iiint_{\Omega_f} \psi d\Omega \quad (\text{V.37})$$

Comme pour les effets visco-inertiels, on utilise le Théorème de flux-divergence pour transformer l'écriture du premier terme de l'Equation V.37. De plus, en utilisant les conditions de périodicité de  $\psi$  et les conditions isothermes à l'interface solide-fluide, on obtient la relation suivante :

$$\lambda_f \iiint_{\Omega_f} \vec{\nabla}_y T^0 \cdot \vec{\nabla}_y \psi d\Omega + j\omega \rho_0 C_p \iiint_{\Omega_f} T^0 \psi d\Omega = j\omega P \iiint_{\Omega_f} \psi d\Omega \quad (\text{V.38})$$

Cette relation peut se mettre sous la forme d'une fonction  $f$  pouvant s'écrire de la manière suivante :

$$f(T^0, \psi) = j\omega P \iiint_{\Omega_f} \psi d\Omega \quad (\text{V.39})$$

Il s'agit bien comme dans le cas visco-inertiel d'une forme bilinéaire positive, définie coercive. Il est alors possible d'appliquer le Théorème de Lax-Milgram qui garantit l'existence et l'unicité de la solution. Avant de déterminer la solution, on remplace  $\psi$  par  $\overline{T^0}$ . L'Equation V.38 peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$\lambda_f \iiint_{\Omega_f} \vec{\nabla}_y T^0 \cdot \vec{\nabla}_y \overline{T^0} d\Omega + j\omega \rho_0 C_p \iiint_{\Omega_f} T^0 \overline{T^0} d\Omega = j\omega P \iiint_{\Omega_f} \overline{T^0} d\Omega \quad (\text{V.40})$$

Cette relation représente la consistance énergétique pour les effets de dissipation thermique entre l'échelle locale représentée par les termes de gauche et le milieu homogène équivalent, échelle macroscopique, représenté par le terme de droite.

La solution du processus de formulation variationnelle s'exprime selon la relation suivante :

$$T^0(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{\xi(\vec{y}, \omega)}{\lambda_f} j\omega P(\vec{x}, \omega) \quad (\text{V.41})$$

$\xi(\vec{y}, \omega)$  représente la perméabilité thermique à l'échelle locale.

La relation gouvernant la variation de température macroscopique du milieu homogène équivalent est obtenue en intégrant sur  $\Omega$ . Cette relation est la suivante :

$$\langle T^0 \rangle_{\Omega} = \frac{\Xi(\omega)}{\lambda_f} j\omega P(\vec{x}) \quad (\text{V.42})$$

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

L'Equation V.42 est équivalente à la loi de Darcy pour les effets visco-inertiels.  $\Xi(\omega)$  est la perméabilité thermique dynamique du milieu homogène équivalent. Elle est liée au module d'incompressibilité dynamique  $K$ , qui s'exprime selon la relation suivante :

$$K = \rho_0 \frac{P}{\langle \rho^0 \rangle_\Omega} \quad (\text{V.43})$$

En combinant les Equations V.43 et V.20 on obtient la relation de  $K(\omega)$  en fonction de  $\Xi(\omega)$  :

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0 / \phi}{\gamma - j(\gamma - 1) \frac{\Xi(\omega)}{\delta_t^2 \phi}} \quad (\text{V.44})$$

L'application de la méthode d'homogénéisation des structures périodiques a permis d'établir des relations entre les champs de vitesse, de pression et de température à l'échelle locale et leur forme macroscopique liée au milieu homogène équivalent.

De plus, que ce soit dans le cas des effets visco-inertiels ou des effets thermiques, ces relations expriment la consistance énergétique entre la description des phénomènes à l'échelle microscopique et les grandeurs à l'échelle macroscopique.

Cependant, l'HSP est utilisée indépendamment de la morphologie de la cellule élémentaire et la mise en œuvre de résolutions numériques est nécessaire pour déterminer des solutions.

Ainsi, afin de déterminer des solutions analytiques possibles, la suite de cette approche de modélisation repose sur le couplage de l'HSP et de la méthode d'homogénéisation auto-cohérente. L'HAC est utilisée en s'appuyant sur les équations gouvernant les lois de comportement à l'échelle macroscopique qui ont été établies dans cette section et sur le principe de consistance énergétique.

## 2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

Les développements et la validation de la modélisation présentée dans cette section a fait l'objet d'une communication orale en congrès international<sup>1</sup>. De plus,

---

1. Piégay *et al.*, *A self-consistent approach for the acoustical modeling of vegetal wools*, INTER-NOISE 2018, Chicago

un article est en cours de rédaction afin de soumettre ces résultats à un journal de rang A avec comité de lecture.

Cette méthode a été utilisée en statique pour la détermination de la densité dynamique,  $\rho$ , pour les matériaux fibreux par [Berdichevsky & Cai 1993] et dans le cas de matériaux granulaires (HAC sphérique) par [Boutin 2000]. Par la suite, les travaux qui ont été menés dans [Boutin & Geindreau 2008] et [Boutin & Geindreau 2010] ont conduit à la détermination de  $\rho$  et du module d'incompressibilité  $K$  en dynamique mais uniquement pour le cas des matériaux granulaires.

Dans l'application de cette méthode, il faut tout d'abord élaborer un motif générique de géométrie simplifiée et établir les équations gouvernant le comportement des champs de vitesse, pression et température à l'échelle locale. Sous la contrainte d'une force macroscopique homogène, des équations différentielles sont alors obtenues et résolues afin de déterminer des solutions pour les trois grandeurs caractéristiques au sein de la phase fluide. L'établissement de conditions aux limites permet ensuite de proposer trois familles de solutions pour  $\rho$  et  $K$  permettant ensuite de modéliser les propriétés acoustiques des matériaux fibreux.

Enfin, l'évaluation de la validité de ces solutions est réalisée par comparaison avec les résultats expérimentaux précédemment obtenus.

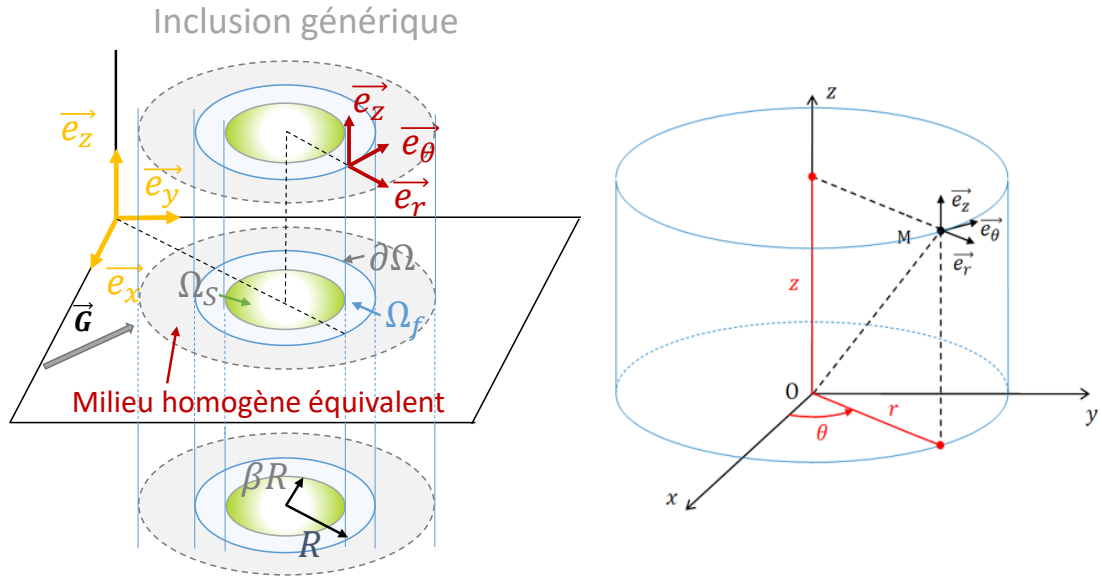
### 2.1 Elaboration du motif générique

Comme dans le cas de la modélisation HAC thermique (Section 4.1.2 du Chapitre IV), un motif générique représentatif du VER constitué d'une inclusion cylindrique bicomposante est choisi. Néanmoins, dans le cas présent, c'est un cylindre solide assimilé à une fibre de rayon constant sur toute sa longueur (supposée infinie) qui est inclus dans un cylindre d'air, comme le représente la Figure V.2.

On peut ainsi exprimer la porosité  $\phi$  à partir des rayons de la phase solide  $\beta R$  et de l'inclusion  $R$ .  $\phi = 1 - \left(\frac{\beta R}{R}\right)^2 = 1 - \beta^2$ . A partir d'une valeur moyenne de rayon de fibre,  $R_f$ , et de la valeur de la porosité  $\phi$ , il est alors possible de déterminer  $R$  avec l'expression suivante :

$$R = \frac{R_f}{\sqrt{1 - \phi}} \quad (\text{V.45})$$

En ce qui concerne la sollicitation macroscopique matérialisée par un gradient de pression  $\overrightarrow{\nabla P}$ , elle a été représentée à la Figure V.2 dans un plan défini par  $(\overrightarrow{e}_r, \overrightarrow{e}_\theta)$ , perpendiculaire à l'axe longitudinal  $(\overrightarrow{e}_z)$  de la fibre. Ce cas de figure correspond à un cas limite particulier, comme cela a déjà été défini pour l'approche thermique à la Section 4.1.2 du Chapitre IV. De même, on



**Figure V.2** – Représentation de l'inclusion cylindrique constituée d'une phase solide incluse dans une phase fluide

définit le second cas limite particulier correspondant à une force parallèle à l'axe longitudinal de la fibre. Toutes les orientations de  $\overline{\nabla P}$  sont possibles entre ces deux limites [Luu 2016] et [Lei *et al.* 2018]. Néanmoins, comme il a déjà été explicité à la Section 4.1.4 du Chapitre IV, le cas du flux parallèle ne correspond pas à l'utilisation conventionnelle des panneaux de laines végétales utilisés en tant qu'isolants du bâtiment. Ainsi, en première approche, seul le cas d'un flux perpendiculaire aux fibres est développé dans la suite de ce chapitre.

Pour simplifier l'écriture de la force de pression acoustique,  $\overline{\nabla P}$  est remplacée par une force notée  $\vec{G}$ .

Dans le cas d'une force perpendiculaire aux fibres, elle s'exprime par la relation suivante :

$$\vec{G} = G_r \vec{e}_r + G_\theta \vec{e}_\theta \quad (\text{V.46})$$

### 2.1.1 Les effets visco-inertiels

A l'échelle macroscopique, la loi de Darcy généralisée peut s'exprimer avec la relation suivante :

$$\langle \vec{v} \rangle = \vec{V} = -\frac{\Pi}{\mu} \overline{\nabla P} = -\frac{\Pi}{\mu} \vec{G} \quad (\text{V.47})$$

Dans la phase fluide, pour  $\beta R < r < R$ , c'est l'équation de Navier-Stokes linéarisée qui régit les mouvements du fluide à l'échelle locale. Elle peut s'exprimer par la relation suivante :

$$-\vec{\nabla} p - \frac{1}{\delta_v^2} \mu \vec{v} + \Delta(\mu \vec{v}) = \vec{0} \quad (\text{V.48})$$

Avec  $\delta_v = \sqrt{\frac{\mu}{j\rho_0\omega}}$  l'épaisseur de la couche limite visqueuse définie à la Section 2.1.2 du Chapitre II.

De plus, on a vu qu'à l'échelle locale le fluide pouvait être considéré comme incompressible au premier ordre, comme le traduit l'Equation V.1. Enfin, il a été montré également que la condition d'adhérence entre la phase solide et la phase fluide est nulle, Equation V.4.

### 2.1.2 Les effets thermiques

A l'échelle macroscopique, l'équivalent de la loi de Darcy généralisée s'exprime par la relation suivante :

$$\langle T \rangle = \frac{\Xi}{\lambda_f} j\omega P \quad (\text{V.49})$$

Dans la phase fluide, pour  $\beta R < r < R$ , c'est l'équation de la chaleur linéarisée qui régit le champ de la température du fluide à l'échelle locale. Elle peut s'exprimer par la relation suivante :

$$\Delta T - \frac{1}{\delta_t^2} T + \frac{j\omega P}{\lambda_f} = 0 \quad (\text{V.50})$$

Enfin, par analogie avec les effets visco-inertiels, la condition de température à l'interface solide/fluide est nulle, Equation V.6.

A présent que toutes les relations de base aux échelles macroscopiques et microscopiques ont été rappelées, les champs de pression, vitesse et température peuvent être exprimés.

## 2.2 Développement de l'approche HAC cylindrique dynamique

### 2.2.1 Le champ de pression

D'après les travaux de [Howells 1974] et [Boutin & Geindreau 2008], il est possible d'exprimer le champ de pression à l'échelle locale  $p$  en fonction de la sollicitation  $\vec{G}$  et d'une fonction

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

dépendant de la variable  $r$  à partir de la relation suivante :

$$p = \vec{G} \cdot \vec{\nabla} h(r) \quad (\text{V.51})$$

En appliquant l'opérateur divergence ( $\vec{\nabla} \cdot$ ) à l'équation de Navier-Stokes linéarisée (Equation V.48), on obtient :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} p - \frac{1}{\delta_v^2} \mu \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + \omega (\mu \vec{\nabla} \cdot \vec{v}) = 0 \quad (\text{V.52})$$

Or, comme le fluide est considéré comme incompressible à l'échelle locale (Equation V.1), l'expression précédente se simplifie et on peut écrire que :

$$\Delta p = 0 \quad (\text{V.53})$$

En injectant l'expression de  $p$ , correspondant à l'Equation V.51 dans l'Equation V.53, on obtient :

$$\Delta (\vec{G} \cdot \vec{\nabla} h(r)) = \vec{G} \cdot \vec{\nabla} (\Delta h(r)) = G_r \frac{\partial(\Delta h(r))}{\partial r} = 0 \quad (\text{V.54})$$

Ce qui conduit finalement à l'équation différentielle suivante :

$$\Delta h(r) = c_0 \quad (\text{V.55})$$

La résolution de l'équation sans second membre  $\Delta h(r) = 0$  conduit à une première solution  $h_0 = c_0 \ln(r) + c_2$ .

La résolution de l'équation avec second membre conduit à une seconde solution  $h_1 = \frac{c_1}{4} r^2 + c_2'$ .

Finalement, on peut exprimer la fonction  $h$  par la relation suivante :

$$h(r) = c_0 \ln(r) + \frac{c_1 \cdot r^2}{4} \quad (\text{V.56})$$

La constante correspondant à la somme de  $c_2$  et  $c_2'$  a été prise égale à zéro car elle n'a pas de sens physique et n'intervient jamais dans les conditions aux limites.

Le champ de pression peut donc s'exprimer suivant la relation :

$$p = G_r \left( \frac{c_0}{r} + \frac{c_1 \cdot r}{2} \right) \quad (\text{V.57})$$


---



### 2.2.2 Le champ de vitesse

De même que pour le cas du champ scalaire  $p$ , il est possible de s'appuyer sur les travaux de [Howells 1974] et [Boutin & Geindreau 2008] pour exprimer le champ vectoriel de la vitesse à l'échelle locale sous la forme suivante :

$$\mu \vec{v} = \vec{G} \left[ \vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} f(r) + g(r)I \right] \quad (\text{V.58})$$

Avec  $\otimes$  représentant l'opérateur du produit tensoriel et  $I$  la matrice identité. En appliquant l'opérateur divergence à l'Equation V.58, on obtient la relation suivante :

$$\vec{G} \cdot \vec{\nabla} \cdot \left[ \vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} f(r) + g(r)I \right] = \mu \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{V.59})$$

L'Equation V.59 peut encore s'écrire sous la forme :

$$\vec{G} \cdot \vec{\nabla} \left[ \Delta f(r) + g(r) \right] = G_r \left( \frac{\partial(\Delta f(r) + g(r))}{\partial r} \right) = 0 \quad (\text{V.60})$$

On peut ainsi écrire que  $\Delta f(r) + g(r) = a_0$ , ou encore  $g(r) = -\Delta f(r) + a_0$  avec  $a_0$  une constante.

En injectant l'expression de  $g(r)$  dans l'Equation V.58, on obtient la relation suivante :

$$\mu \vec{v} = \vec{G} \left[ \vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} f(r) - \Delta f(r)I + a_0I \right] \quad (\text{V.61})$$

D'autre part, en incluant dans la fonction  $f(r)$  le terme  $-\frac{a_0}{2}r^2$  cela permet de supprimer le terme  $a_0I$ .

En effet,  $\vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} (r^2) = 2$ . De plus,  $\Delta (r^2) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial r^2}{\partial r} \right) = 4$ .

Ainsi,  $\vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} (r^2) - \Delta (r^2)I = -2I$ .

L'Equation V.58 s'écrit donc finalement :

$$\mu \vec{v} = \vec{G} \cdot \left[ \vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} f(r) - \Delta f(r)I \right] \quad (\text{V.62})$$

En injectant l'expression des termes  $\mu \vec{v}$  et  $p$  dans l'Equation de Navier-Stokes linéarisée V.48, on obtient la relation suivante :

$$-\vec{\nabla} \cdot (\vec{G} \cdot \vec{\nabla} h(r)) - \frac{1}{\delta_v^2} \vec{G} \cdot \left[ \vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} f(r) - \Delta f(r)I \right] + \Delta \left( \vec{G} \cdot \left[ \vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} f(r) - \Delta f(r)I \right] \right) = \vec{0} \quad (\text{V.63})$$

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

Cette expression peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$\vec{G} \cdot \left[ -\Delta h(r)I + [\vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} - I\Delta] \left[ -h(r) + \Delta f(r) - \frac{1}{\delta_v^2} f(r) \right] \right] = \vec{0} \quad (\text{V.64})$$

Pour alléger l'Equation V.64, on pose  $m(r) = \left[ -h(r) + \Delta f(r) - \frac{1}{\delta_v^2} f(r) \right]$ .

La fonction  $h(r)$  peut également être remplacée par son expression établie à l'Equation V.56.

Ainsi,  $\Delta h(r) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial h}{\partial r} \right) = c_1$

Finalement, l'Equation V.64 peut s'exprimer par la relation suivante :

$$\vec{G} \cdot \left[ -c_1 I + \vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} m(r) - I\Delta m(r) \right] = \vec{0} \quad (\text{V.65})$$

Chaque terme de cette relation peut s'exprimer sous forme d'une matrice. Ainsi, comme la fonction  $m$  ne dépend que de  $r$  et n'a de composante que suivant la direction  $\vec{e}_r$ , le produit tensoriel  $\vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} m(r)$  peut s'écrire sous la forme simplifiée suivante :

$$\vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} m(r) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial m(r)}{\partial r} \right) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r} \frac{\partial m(r)}{\partial r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{V.66})$$

Le terme  $\Delta m(r)$  est égal à  $\frac{1}{r} \frac{\partial m(r)}{\partial r} + \frac{\partial^2 m(r)}{\partial r^2}$ .

L'Equation V.65 peut donc s'écrire sous forme matricielle de la manière suivante :

$$\vec{G} \cdot \begin{bmatrix} -c_1 - \frac{1}{r} \frac{\partial m(r)}{\partial r} & 0 & 0 \\ 0 & -c_1 - \frac{\partial^2 m(r)}{\partial r^2} & 0 \\ 0 & 0 & -c_1 - \frac{\partial^2 m(r)}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial m(r)}{\partial r} \end{bmatrix} = \vec{0} \quad (\text{V.67})$$

Ainsi,  $-c_1 - \frac{1}{r} \frac{\partial m(r)}{\partial r} = 0 \iff \frac{\partial m(r)}{\partial r} = -c_1 r$ . En intégrant, on obtient donc une expression pour la fonction  $m(r)$  :

$$m(r) = -h(r) + \Delta f(r) - \frac{1}{\delta_v^2} f(r) = -c_0 \ln(r) - \frac{c_1}{4} r^2 + \Delta f(r) - \frac{1}{\delta_v^2} f(r) = -\frac{c_1}{2} r^2 \quad (\text{V.68})$$

Finalement, on obtient pour la fonction  $f(r)$  une équation différentielle avec second membre du second degré à coefficients non constants, qui s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} - \frac{1}{\delta_v^2} f(r) = c_0 \ln(r) - \frac{c_1}{4} r^2 \quad (\text{V.69})$$


---

L'équation sans second membre (ESSM) relative à cette équation différentielle est :

$$\frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} - \frac{1}{\delta_v^2} f(r) = 0 \quad (\text{V.70})$$

La solution générale  $f_0(r)$  de cette équation s'exprime avec des fonctions de Bessel modifiées de première espèce  $I_0$  et  $K_0$ , comme le montre la relation suivante :

$$f_0(r) = c_2 I_0(r/\delta_v) + c_3 K_0(r/\delta_v) \quad (\text{V.71})$$

Une solution particulière  $f_1(r)$  de l'Equation V.69 peut s'exprimer avec la relation suivante :

$$f_1(r) = \delta_v^2 \left( -c_0 \ln r + \frac{c_1}{4} r^2 - c_1 \delta_v^2 \right) \quad (\text{V.72})$$

Finalement la solution générale  $f(r) = f_0(r) + f_1(r)$  s'exprime par la relation suivante :

$$f(r) = \delta_v^2 \left( -c_0 \ln r + \frac{c_1}{4} r^2 - c_1 \delta_v^2 \right) + c_2 I_0(r/\delta_v) + c_3 K_0(r/\delta_v) \quad (\text{V.73})$$

### 2.2.3 Le champ de température

Le champ de température  $T$  dans la phase fluide, pour  $\beta R < r < R$ , est gouvernée par l'Equation de la chaleur V.50.

Par analogie avec les effets visco-inertiels et en s'appuyant sur les équations précédemment établies pour la dissipation thermique à la Section 1.5.2, on peut exprimer la température  $T$  en fonction de la perméabilité thermique à l'échelle locale par la relation suivante :

$$T(r) = \xi(r) \frac{j\omega P}{\lambda_f} \quad (\text{V.74})$$

En injectant cette expression de  $T$  dans l'Equation V.50, on obtient la relation suivante :

$$\Delta \xi(r) - \frac{1}{\delta_t^2} \xi(r) + 1 = 0 \quad (\text{V.75})$$

En exprimant  $\Delta \xi(r)$  en coordonnées cylindriques, on obtient :

$$\Delta \xi(r) = \frac{\partial^2 \xi(r)}{\partial r^2} + \frac{\partial \xi(r)}{\partial r} \quad (\text{V.76})$$

On obtient finalement l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial^2 \xi(r)}{\partial r^2} + \frac{\partial \xi(r)}{\partial r} - \frac{1}{\delta^2} \xi = -1 \quad (\text{V.77})$$

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

Comme pour le champ de vitesse, il s'agit d'une équation différentielle du second degré à coefficients non constants avec second membre.

Ainsi, par analogie, la solution de l'ESSM s'exprime par la relation suivante :

$$\xi_0(r) = c_4 I_0(r/\delta_t) + c_5 K_0(r/\delta_t) \quad (\text{V.78})$$

La solution particulière s'exprime simplement par :  $\xi_1(r) = \delta_t^2$

Finalement, la solution  $\xi(r)$  de cette équation s'exprime par la relation :

$$\xi(r) = \delta_t^2 + c_4 I_0(r/\delta_t) + c_5 K_0(r/\delta_t) \quad (\text{V.79})$$

A présent que les expressions des fonctions relatives aux champs de pression, vitesse et température ont été exprimées à l'échelle locale, il reste à déterminer les cinq constantes utilisées. Pour cela, il est nécessaire d'exprimer les conditions aux limites du problème.

### 2.2.4 Les conditions aux limites relatives aux effets visco-inertiels

Pour les effets visco-inertiels, des conditions aux limites peuvent être exprimées concernant la vitesse, à la frontière solide-fluide, ainsi qu'à la frontière de l'inclusion. Il faut également exprimer les contraintes qui s'exercent sur l'inclusion générique à cette frontière. De plus, il est nécessaire de prendre en compte la condition de consistence énergétique entre l'inclusion à l'échelle locale et le milieu homogène équivalent. Il est également possible d'évaluer le cas où la condition de consistence énergétique est remplacée par une condition de vorticité nulle comme cela est fait pour le modèle de Tarnow [Tarnow 1997b], [Tarnow 1997a]. Ainsi, plusieurs systèmes d'équations relatifs aux conditions aux limites choisies sont établis.

#### Les conditions relatives à la vitesse

En premier lieu, comme il est beaucoup utilisé dans la suite du mémoire, l'expression du Laplacien de la fonction  $f(r)$  en coordonnées cylindriques est donnée :

$$\Delta f(r) = \frac{1}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} + \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} \quad (\text{V.80})$$

A l'interface solide/fluide, pour  $r = \beta R$ , la condition d'adhérence conduit à une vitesse nulle,  $\vec{v}(\beta R) = \vec{0}$ .

La vitesse locale s'exprime à partir de l'Equation V.62. Cette équation peut également s'écrire sous forme matricielle à partir de chacun de ses termes.

Pour la vitesse, compte tenu de la géométrie cylindrique et du fait que l'on se soit placé par hypothèse dans le plan  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta)$  (cas d'un flux perpendiculaire), elle peut s'écrire  $\vec{v} = v_r \vec{e}_r + v_\theta \vec{e}_\theta$ .

Pour la force  $G^\perp$ , elle peut s'exprimer par la relation  $G^\perp = G \cos \theta \vec{e}_r + G \sin \theta \vec{e}_\theta$ .

Enfin, pour le terme  $[\vec{\nabla} \otimes \vec{\nabla} f(r) - \Delta f(r)I]$ , en s'appuyant sur l'Equation V.67 et sur l'expression du Laplacien de  $f$  (Equation V.80), il peut s'écrire sous forme matricielle par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} - \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} \end{bmatrix} \quad (\text{V.81})$$

Donc finalement, l'équation de la vitesse peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \mu v_r \\ \mu v_\theta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G \cos \theta \\ G \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} - \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} \end{bmatrix} \quad (\text{V.82})$$

On obtient donc deux relations pour les composantes du vecteur vitesse à l'échelle locale.

Suivant l'axe  $\vec{e}_r$ , on obtient la relation suivante :

$$\mu v_r(r) = -G \cos \theta \frac{1}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} \quad (\text{V.83})$$

Suivant l'axe  $\vec{e}_\theta$ , on obtient la relation suivante :

$$\mu v_\theta(r) = -G \sin \theta \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} \quad (\text{V.84})$$

En reprenant la condition d'adhérence citée plus haut et en la couplant avec les Equations V.83, V.84 et V.80, on obtient deux premières conditions aux limites :

$$-\frac{1}{\beta R} \frac{\partial f(\beta R)}{\partial r} = 0 \quad (\text{V.85})$$

$$-\Delta f(\beta R) = 0 \quad (\text{V.86})$$

Même si les Equations V.83 et V.84 des vitesses radiales et orthoradiales sont différentes par rapport à une géométrie sphérique, les conditions limites obtenues à l'interface solide-fluide sont identiques.

D'autre part, il est également possible d'exprimer une condition de vitesse à la frontière

---

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

( $r = R$ ) entre l'inclusion générique et le milieu homogène équivalent. En effet, la vitesse moyenne à l'intérieur de l'inclusion est égale à la vitesse macroscopique donnée par la relation de Darcy exprimée par l'Equation V.47. Cette égalité se traduit par la relation suivante :

$$\vec{V}(r) = \frac{1}{\Omega} \iiint_{\Omega_f} \vec{v}(r) d\Omega \quad (\text{V.87})$$

Il est possible de simplifier cette expression en utilisant la relation du Théorème de flux-divergence exposée précédemment dans ce chapitre à la Section 1.5.1 par l'Equation V.23.

Ainsi, on peut écrire l'égalité suivante :

$$\iiint_{\Omega_f} \vec{v}(r) d\Omega = \iiint_{\Omega_f} \left( \vec{v} \cdot \vec{\nabla} r \vec{e}_r + r \vec{e}_r \left( \vec{\nabla} \cdot \vec{v}(r) \right) \right) d\Omega \quad (\text{V.88})$$

En effet,  $\vec{\nabla} r \cdot \vec{e}_r = 1$  et compte tenu des hypothèses formulées,  $\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$  comme énoncé précédemment dans ce chapitre à la Section 2.1.2.

On peut donc écrire la relation suivante :

$$\iiint_{\Omega_f} \vec{v}(r) d\Omega = \oint_{\partial\Omega} r \vec{e}_r \cdot \vec{v}(r) \cdot \vec{dS} \quad (\text{V.89})$$

avec pour  $r = R$ ,  $\vec{dS} = R d\theta dz \vec{e}_r$ . De plus, on a vu que  $\vec{v}(r) = v_r(r) \vec{e}_r + v_\theta(r) \vec{e}_\theta$ .

Donc,  $\vec{v}(R) \cdot \vec{dS} = \vec{v}(R) \cdot (R d\theta dz \vec{e}_r) = v_r(R) R d\theta dz$ .

De plus,  $\vec{e}_r$  s'exprime dans le repère cartésien ( $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ ) par la relation  $\vec{e}_r = \cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \vec{e}_y$ .

Ainsi, on peut résoudre l'intégrale de surface exprimée à l'Equation V.89 dans le cas où  $r = R$  :

$$\oint_{\partial\Omega} R \vec{e}_r \cdot \vec{v}(R) \cdot \vec{dS} = \oint_{\partial\Omega} R v_r(R) dS \vec{e}_r = R^2 \int_0^Z dz \int_0^{2\pi} v_r(R) (\cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \vec{e}_y) d\theta \quad (\text{V.90})$$

Avec  $Z$  la hauteur de l'inclusion cylindrique,  $\int_0^Z dz = Z$ .

En remplaçant  $v_r(R)$  par son expression donnée à l'Equation V.83, on peut écrire que  $\int_0^{2\pi} v_r(R) (\cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \vec{e}_y) d\theta = -\frac{G}{\mu R} \frac{\partial f(R)}{\partial r} \left( \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \vec{e}_x + \int_0^{2\pi} \sin \theta \cos \theta d\theta \vec{e}_y \right)$ .

Les deux intégrales peuvent à présent être calculées. Ainsi,  $\int_0^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \vec{e}_x = \pi \vec{e}_x$  et  $\int_0^{2\pi} \sin \theta \cos \theta d\theta \vec{e}_y = \vec{0}$ .

Avant de donner l'expression de  $\vec{V}(R)$  à partir de l'Equation V.87, il reste à exprimer  $\Omega$ , le volume de l'inclusion. Ainsi,  $\Omega = \pi R^2 Z$ .

La vitesse moyenne dans l'inclusion peut donc maintenant être déterminée :

$$\vec{V}(r) = \frac{1}{\Omega} \iiint_{\Omega_f} \vec{v}(r) d\Omega = -\frac{1}{\pi R^2 Z} R^2 Z \frac{G}{\mu R} \frac{\partial f(R)}{\partial r} \pi \vec{e}_x \quad (\text{V.91})$$

En simplifiant termes à termes et en écrivant que  $\vec{G} = G \vec{e}_x$ , on obtient finalement pour la vitesse moyenne, l'expression suivante :

$$\vec{V}(r) = \frac{1}{\mu R} \frac{\partial f(R)}{\partial r} \vec{G} \quad (\text{V.92})$$

En identifiant cette valeur de  $\vec{V}(r)$  avec celle donnée par l'Equation V.47 de Darcy généralisée, on peut exprimer une troisième condition limite en  $r = R$  en fonction de la perméabilité  $\Pi$ , par la relation suivante :

$$-\frac{1}{R} \frac{\partial f(R)}{\partial r} + \Pi = 0 \quad (\text{V.93})$$

Comme la vitesse normale du fluide ( $v_r(r)$ ) s'exprime en fonction de  $\frac{\partial f(r)}{\partial r}$ , cette dernière condition limite signifie que la vitesse radiale à la frontière entre l'inclusion et le milieu homogène équivalent sont égales en tout point de cette surface. Ainsi, on peut écrire la relation suivante :

$$v_r(R) = V_r(R) \quad (\text{V.94})$$

### Les conditions relatives aux contraintes à la frontière de l'inclusion

En s'appuyant sur les travaux menés tout d'abord dans [Boutin & Geindreau 2008], puis ensuite dans [Boutin & Geindreau 2010] concernant les contraintes à la frontière de l'inclusion, il est physiquement possible d'établir une égalité entre la pression  $P$  dans le milieu homogène équivalent et la contrainte de l'inclusion, pouvant s'exprimer par  $-p \vec{I} + 2 \mu \mathbf{D}(\vec{v}(r))$  avec  $\mathbf{D}(\vec{v}(r))$  le tenseur des taux de déformation qui dépend de la vitesse locale.

La relation qui traduit cette condition peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\oint_{\partial\Omega} [-(p - P) \vec{I} + 2 \mu \mathbf{D}(\vec{v}(r))] \cdot d\vec{S} = 0 \quad (\text{V.95})$$

A la frontière de l'inclusion,  $r = R$ ,  $d\vec{S} = R d\theta dz \vec{e}_r$ . On peut calculer séparément l'intégrale de chacun des trois termes constituant l'Equation V.95.

Le premier terme à déterminer est  $\oint_{\partial\Omega} -p \vec{I} \cdot d\vec{S}$ . Or, en reprenant l'expression de  $p$  donnée par l'Equation V.51, on peut écrire que  $\oint_{\partial\Omega} -p \vec{I} \cdot d\vec{S} = \oint_{\partial\Omega} -\vec{G} \cdot \vec{\nabla} h(r) \cdot \vec{I} \cdot d\vec{S}$ , avec  $\vec{\nabla} h(r) = \frac{\partial h(r)}{\partial r} \vec{e}_r$ .

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

Ainsi, en s'appuyant sur le développement des calculs effectués dans le paragraphe précédent relatif aux conditions aux limites de la vitesse en  $r = R$ , on peut écrire que :

$$\oiint_{\partial\Omega} -p \vec{T} \vec{dS} = -GR \frac{\partial h(R)}{\partial r} \int_0^Z dz \int_0^{2\pi} (\cos^2 \theta + \cos \theta \sin \theta) d\theta = -\pi RZ \frac{\partial h(R)}{\partial r} G \quad (\text{V.96})$$

Pour déterminer  $\oiint_{\partial\Omega} P \vec{T} \vec{dS}$  on peut appliquer la version du théorème de flux divergence utilisée au paragraphe précédent. Ainsi,  $\oiint_{\partial\Omega} P \vec{T} \vec{dS} = \iiint_{\Omega_f} (\vec{T} \cdot \vec{\nabla} P + P \vec{\nabla} \cdot \vec{T}) d\Omega$ . Avec  $\vec{\nabla} \cdot \vec{T} = 0$ ,  $\vec{\nabla} P = \vec{G}$  et  $d\Omega = r dr d\theta dz$ . On obtient donc pour ce second terme la relation suivante :

$$\oiint_{\partial\Omega} P \vec{T} \vec{dS} = \pi R^2 Z G \quad (\text{V.97})$$

Enfin pour le troisième terme de l'Equation V.95, il faut déterminer le tenseur  $\mathbf{D}(\vec{v}(r))$  en coordonnées cylindriques. Avec un vecteur vitesse à l'échelle locale dépendant uniquement de la variable  $r$  et ayant des composantes suivant les axes  $\vec{e}_r$  et  $\vec{e}_\theta$ , ce tenseur se calcule à partir de la relation suivante :

$$\mathbf{D}(\vec{v}(r)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_r(r)}{\partial r} & \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r(r)}{\partial \theta} - \frac{v_\theta(r)}{r} + \frac{\partial v_\theta(r)}{\partial r} \right) & 0 \\ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r(r)}{\partial \theta} - \frac{v_\theta(r)}{r} + \frac{\partial v_\theta(r)}{\partial r} \right) & \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta(r)}{\partial \theta} + \frac{v_r(r)}{r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{V.98})$$

En injectant les expressions de  $v_r(r)$  et  $v_\theta(r)$  données par les Equations V.83 et V.84, on peut écrire l'expression de  $2\mu \mathbf{D}(\vec{v}(r))$

$$2\mu \mathbf{D}(\vec{v}(r)) = \begin{bmatrix} -2(\vec{G} \cdot \vec{e}_r) \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} \right) & (\vec{G} \cdot \vec{e}_\theta) \left( \frac{1}{r} \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} - \frac{\partial^3 f(r)}{\partial r^3} \right) & 0 \\ (\vec{G} \cdot \vec{e}_\theta) \left( \frac{1}{r} \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} - \frac{\partial^3 f(r)}{\partial r^3} \right) & -2(\vec{G} \cdot \vec{e}_r) \frac{1}{r^2} \frac{\partial f(r)}{\partial r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{V.99})$$

Comme lorsque  $r = R$ ,  $\vec{dS} = R d\theta dz \vec{e}_r$ , il est nécessaire de déterminer le produit scalaire  $2\mu \mathbf{D}(\vec{v}(r)) \cdot \vec{e}_r$ , qui conduit à 2 termes,  $D_{rr}$  suivant l'axe  $\vec{e}_r$  et  $D_{r\theta}$  suivant l'axe  $\vec{e}_\theta$ . On obtient ainsi les relations suivantes :

$$2\mu D_{rr} = -2G \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial f(r)}{\partial r} \right) \quad (\text{V.100})$$



$$2\mu D_{r\theta} = G \sin \theta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} - \frac{\partial^3 f(r)}{\partial r^3} \right) \quad (\text{V.101})$$

La détermination du troisième terme de l'Equation V.95 peut ainsi se décomposer comme l'illustre la relation suivante :

$$\begin{aligned} \iint_{\partial\Omega} 2\mu \mathbf{D}(\vec{v}(r)) \cdot \vec{e}_r dS &= -2G \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{R} \frac{\partial f(R)}{\partial r} \right) \int_0^Z dz \int_0^{2\pi} (\cos^2 \theta + \cos \theta \sin \theta) d\theta \\ &+ G \left( \frac{1}{R} \frac{\partial^2 f(R)}{\partial r^2} - \frac{\partial^3 f(R)}{\partial r^3} \right) \int_0^Z dz \int_0^{2\pi} (-\sin^2 \theta + \cos \theta \sin \theta) d\theta \quad (\text{V.102}) \\ &= \pi R Z G \left( -\frac{\partial^3 f(R)}{\partial r^3} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 f(R)}{\partial r^2} - 2 \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{R} \frac{\partial f(R)}{\partial r} \right) \right) \end{aligned}$$

Or  $\left( -\frac{\partial^3 f(R)}{\partial r^3} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 f(R)}{\partial r^2} - 2 \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{R} \frac{\partial f(R)}{\partial r} \right) \right)$  peut se simplifier en développant de la manière suivante  $-2 \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{R} \frac{\partial f(R)}{\partial r} \right) = \frac{1}{R} \frac{\partial^2 f(R)}{\partial r^2} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial f(R)}{\partial r}$ .

De plus, on peut montrer que  $\frac{\partial}{\partial r}(\Delta f(r)) = -\frac{\partial^3 f(r)}{\partial r^3} - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 f(R)}{\partial r^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial f(R)}{\partial r}$ .

Finalement, on obtient la solution suivante :

$$\iint_{\partial\Omega} 2\mu \mathbf{D}(\vec{v}(r)) \cdot \vec{e}_r dS = \pi R Z G \left( -\frac{\partial}{\partial r}(\Delta f(r)) \right) \quad (\text{V.103})$$

Ainsi, en combinant les Equations V.96, V.97 et V.103 avec l'Equation V.95, on obtient la relation suivante :

$$\pi R Z G \left( R - \frac{\partial h(R)}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r}(\Delta f(r)) \right) = 0 \quad (\text{V.104})$$

On obtient ainsi une quatrième condition aux limites qui se traduit par la relation suivante :

$$R - \frac{\partial h(R)}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r}(\Delta f(R)) = 0 \quad (\text{V.105})$$

### Les conditions relatives à la consistance énergétique

Une opération préalable est réalisée à partir de l'Equation de Navier-Stokes V.48 qui régit les mouvements du fluide à l'échelle locale. Pour des raisons pratiques, elle est écrite sous la forme suivante :

$$\mu \Delta(\vec{v}(r)) - j\omega \rho_0 \vec{v}(r) = \vec{\nabla} p \quad (\text{V.106})$$


---

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

On applique ensuite la méthode de la formulation variationnelle utilisée précédemment à la Section 1.5.1 dans le cas de l'approche HSP. Cependant, au lieu d'effectuer le produit scalaire des termes de l'Equation V.106 par un champ  $\vec{w}$ , on utilise le conjugué de la vitesse à l'échelle locale  $\vec{v}$ .

On obtient donc la relation suivante :

$$\mu \iiint_{\Omega_f} \Delta (\vec{v}(r)) \cdot \vec{v}(r) d\Omega - j\omega\rho_0 \iiint_{\Omega_f} \vec{v}(r) \cdot \vec{v}(r) d\Omega = \iiint_{\Omega_f} \vec{\nabla} p \cdot \vec{v}(r) d\Omega \quad (\text{V.107})$$

A présent, il est possible de simplifier certains termes en utilisant le Théorème de flux-divergence. De plus, comme on a déjà déterminé le tenseur des taux de déformation  $\mathbf{D}(\vec{v}(r))$ ,  $(\vec{\nabla} \cdot \vec{v}(r))$  est remplacé par  $2\mathbf{D}(\vec{v}(r))$ .

Le premier terme peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$2\mu \iiint_{\Omega_f} (\vec{\nabla} (\mathbf{D}(\vec{v}(r))) \cdot \vec{v}(r) + \mathbf{D}(\vec{v}(r)) \cdot \mathbf{D}(\vec{v}(r))) d\Omega = 2\mu \oint_{\partial\Omega} \mathbf{D}(\vec{v}(r)) \vec{v}(r) \cdot \vec{dS} \quad (\text{V.108})$$

Le terme de droite de l'Equation V.107 peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\iiint_{\Omega_f} \vec{\nabla} p \cdot \vec{v}(r) d\Omega = \oint_{\partial\Omega} p \vec{v}(r) \cdot \vec{dS} \quad (\text{V.109})$$

En injectant les nouvelles expressions données par les Equations V.108 et V.109 dans l'Equation V.107, on obtient la relation suivante :

$$\begin{aligned} & 2\mu \iiint_{\Omega_f} \mathbf{D}(\vec{v}(r)) \cdot \mathbf{D}(\vec{v}(r)) d\Omega + j\omega\rho_0 \iiint_{\Omega_f} \vec{v}(r) \cdot \vec{v}(r) d\Omega \\ & = - \oint_{\partial\Omega} p \vec{v}(r) \cdot \vec{dS} + 2\mu \oint_{\partial\Omega} \mathbf{D}(\vec{v}(r)) \vec{v}(r) \cdot \vec{dS} \end{aligned} \quad (\text{V.110})$$

Cette relation peut être comparée à celle de l'Equation V.33 établie à la Section 1.5.1 dans le cadre de l'application de la méthode HSP. Afin de l'adapter à notre cas, elle peut être reformulée

---

par la relation suivante :

$$2\mu \iiint_{\Omega_f} \mathbf{D}_y(\vec{v}(r)) \cdot \mathbf{D}_y(\overline{\vec{v}}(r)) d\Omega + j\omega\rho_0 \iiint_{\Omega_f} \vec{v}(r) \cdot \overline{\vec{v}}(r) d\Omega = -\frac{1}{\mu} \overline{\nabla}_x P \iiint_{\Omega_f} \overline{\vec{v}}(r) d\Omega \quad (\text{V.111})$$

Cette relation exprime la consistance énergétique entre l'inclusion à l'échelle locale (termes de gauche) et le milieu homogène équivalent à l'échelle macroscopique (terme de droite). Par analogie entre les Equations V.110 et V.111, la relation suivante peut être établie :

$$-\iint_{\partial\Omega} p \overline{\vec{v}}(r) \cdot \overline{dS} + 2\mu \iint_{\partial\Omega} \mathbf{D}(\vec{v}(r)) \overline{\vec{v}}(r) \cdot \overline{dS} = -\overline{\nabla} P \iiint_{\Omega_f} \overline{\vec{v}}(r) d\Omega \quad (\text{V.112})$$

En appliquant le Théorème de flux-divergence au terme de droite de l'Equation V.112, on obtient finalement la relation suivante :

$$-\iint_{\partial\Omega} p \overline{\vec{v}}(r) \cdot \overline{dS} + 2\mu \iint_{\partial\Omega} \mathbf{D}(\vec{v}(r)) \overline{\vec{v}}(r) \cdot \overline{dS} = -\iint_{\partial\Omega} P \overline{\vec{v}}(r) \cdot \overline{dS} \quad (\text{V.113})$$

Afin d'exprimer l'équivalence énergétique entre l'inclusion et le même volume du milieu homogène équivalent, la démarche utilisée précédemment pour les conditions de contraintes à la frontière est mise en œuvre.

Ainsi,  $\overline{\vec{V}}(R)$  est défini comme le conjugué de la vitesse moyenne à la frontière entre l'inclusion et le milieu homogène équivalent. L'équivalence énergétique en  $r = R$  peut alors se traduire par la relation suivante :

$$-\iint_{\partial\Omega} [(P - p) + 2\mu \mathbf{D}(\vec{v}(R))] \cdot [\overline{\vec{v}}(R) - \overline{\vec{V}}(R)] dS \vec{e}_r = \vec{0} \quad (\text{V.114})$$

En effectuant le produit scalaire par  $\vec{e}_r$ , on obtient deux relations :

$$-\iint_{\partial\Omega} [(P - p) + 2\mu D_{rr}] [\overline{v}_r(R) - \overline{V}_r(R)] dS = 0 \quad (\text{V.115})$$

$$-\iint_{\partial\Omega} 2\mu D_{r\theta} [\overline{v}_\theta(R) - \overline{V}_\theta(R)] dS = 0 \quad (\text{V.116})$$

Or, on a vu précédemment que  $\overline{v}_r(R) = \overline{V}_r(R)$ , donc l'Equation V.115 ne conduit pas à l'énoncé de conditions relatives à la consistance énergétique. En revanche, l'Equation V.116 permet de formuler deux conditions en parallèle. En effet, soit  $[\overline{v}_\theta(R) - \overline{V}_\theta(R)]$ , soit  $2\mu D_{r\theta} = 0$ .

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

Dans le premier cas, en exprimant  $v_\theta(R)$  à partir de l'Equation V.84 et  $V_\theta(R)$  à partir de l'Equation de Darcy généralisée V.47, on obtient la relation suivante :

$$v_\theta(R) - V_\theta(R) = -\frac{\partial^2 f(R)}{\partial r^2} \frac{\vec{G} \cdot \vec{e}_\theta}{\mu} + \Pi \frac{\vec{G} \cdot \vec{e}_\theta}{\mu} \quad (\text{V.117})$$

On obtient donc :

$$\frac{\partial^2 f(R)}{\partial r^2} = \Pi \quad (\text{V.118})$$

En combinant ce résultat avec la condition limite sur la vitesse à la frontière de l'inclusion donnée par l'Equation V.105, on obtient finalement :

$$-\frac{1}{2}\Delta(f(R)) + \Pi = 0 \quad (\text{V.119})$$

Dans ce cas de figure, à la frontière entre l'inclusion et le milieu homogène équivalent, la vitesse de la phase fluide (composantes radiale et orthoradiale) est égale à celle du milieu équivalent. En revanche, il n'y a pas égalité entre la pression s'exerçant à l'intérieur de l'inclusion et la pression du milieu homogène équivalent. Cette configuration a été nommée approche en flux [Boutin & Geindreau 2008], elle est notée dans la suite avec l'indice  $v$ .

Dans le deuxième cas, en reprenant l'expression de  $D_{r\theta}$  donnée par l'Equation V.101, on obtient une condition limite alternative pour la consistance énergétique qui s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{\partial^3 f(R)}{\partial r^3} = \frac{1}{R} \frac{\partial^2 f(R)}{\partial r^2} = 0 \quad (\text{V.120})$$

Dans ce cas de figure, la contrainte de cisaillement s'annule. Ainsi, la contrainte s'exerçant sur l'inclusion ( $-p\mathbf{I} + 2\mu\mathbf{D}(\vec{v}(R))$ ) est égale à la pression  $P$  s'exerçant dans le milieu homogène équivalent à la frontière entre les deux. Cependant, les vitesses orthoradiales de la phase fluide et du milieu homogène ne sont pas égales à leur frontière. Cette configuration est nommée approche en pression.

D'autre part, dans le cas de la modélisation de V. Tarnow utilisée précédemment au Chapitre III, bien qu'elle ait été développée à partir d'une approche HAC, elle ne repose pas sur une hypothèse de consistance énergétique mais sur une hypothèse de vorticité nulle. Malgré le fait que le modèle ne prenne pas en compte la condition de consistance énergétique, il donne de bons résultats pour les matériaux fibreux. Une explication est apport  e par les travaux de [Boutin & Geindreau 2008]. En effet, il semble que le niveau de vorticité disparaît lorsque la vitesse atteint son maximum au milieu de l'espace entre les cylindres, c'est-à-dire à la limite de

la cellule.

Pour obtenir une condition relative à cette hypothèse, il faut déterminer le rotationnel de la vitesse locale  $\vec{rot}(\vec{v}(r))$  pour  $r = R$ .

Comme  $\vec{v}(r)$  ne dépend que de  $r$  et possède des composantes suivant  $\vec{e}_r$  et  $\vec{e}_\theta$ , la relation du rotationnel correspondant est la suivante :

$$\vec{rot}(\vec{v}(r)) = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial(rv_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) \vec{e}_z \quad (\text{V.121})$$

Pour  $r = R$ , on obtient la relation suivante :

$$\vec{rot}(\vec{v}(R)) = -\frac{\vec{G} \cdot \vec{e}_\theta}{\mu} \left( \frac{\partial^3 f(R)}{\partial r^3} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 f(R)}{\partial r^2} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial f(R)}{\partial r} \right) \vec{e}_z = -\frac{\vec{G} \cdot \vec{e}_\theta}{\mu} \frac{\partial(\Delta(f(R)))}{\partial r} \vec{e}_z \quad (\text{V.122})$$

La condition relative à la vorticité nulle peut donc s'écrire avec la relation suivante :

$$\frac{\partial(\Delta(f(R)))}{\partial r} = \vec{0} \quad (\text{V.123})$$

Cette condition supplémentaire conduit à une troisième approche nommée vorticité nulle.

**En conclusion, pour les effets visco-inertiels trois systèmes de cinq conditions aux limites sont possibles :**

- Le système 1 correspondant à l'approche en flux et reposant sur les Equations **V.85, V.86, V.93, V.105 et V.119** ;
- Le système 2 correspondant à l'approche en pression et reposant sur les Equations **V.85, V.86, V.93, V.105 et V.120** ;
- Le système 3 correspondant à l'hypothèse de vorticité nulle et reposant sur les Equations **V.85, V.86, V.93, V.105 et V.123**.

A présent, d'autres conditions aux limites sont à déterminer pour les effets relatifs à la dissipation thermique.

### 2.2.5 Les conditions aux limites relatives aux effets thermiques

Pour les effets de dissipation thermique, deux conditions aux limites sont nécessaires. Ainsi, une première condition correspond à une variation nulle de température au niveau de la surface séparant les phases fluide et solide. Puis, une deuxième condition est relative à la consistance énergétique.

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

### Les conditions relatives à la variation de température

L'hypothèse d'une variation nulle de température à la frontière  $\Gamma$  entre les phases fluide et solide a été formulée à la Section 2.1.2 par l'Equation V.6. Ainsi, pour  $r = \beta R$ , la première condition s'exprime par la relation suivante :

$$\xi(\beta R) = 0 \quad (\text{V.124})$$

### Les conditions relatives à la consistance énergétique

Comme dans le cas des effets visco-inertiels, la première étape consiste à appliquer la méthode de la formulation variationnelle à l'Equation V.50 régissant la variation de température à l'échelle locale. De plus, on utilise directement la fonction  $\bar{T}$  dans cette méthode. On obtient ainsi la relation suivante :

$$-\lambda_f \iiint_{\Omega_f} \Delta T(r) \bar{T}(r) d\Omega + j\omega \rho_0 C_p \iiint_{\Omega_f} T(r) \bar{T}(r) d\Omega = j\omega P \iiint_{\Omega_f} \bar{T}(r) d\Omega \quad (\text{V.125})$$

En appliquant le Théorème de flux divergence au premier terme de l'Equation V.125, on obtient la relation suivante :

$$\lambda_f \iiint_{\Omega_f} \vec{\nabla} T(r) \cdot \vec{\nabla} \bar{T}(r) d\Omega + j\omega \rho_0 C_p \iiint_{\Omega_f} T(r) \bar{T}(r) d\Omega - \lambda_f \oint_{\partial\Omega} \vec{\nabla} T(r) \bar{T}(r) \vec{dS} = j\omega P \iiint_{\Omega_f} \bar{T}(r) d\Omega \quad (\text{V.126})$$

Par identification avec l'Equation V.40 établie précédemment à la Section 1.5.2 dans l'utilisation de la formulation variationnelle pour la méthode HSP et en se plaçant à la frontière de l'inclusion ( $r = R$ ), on obtient la relation suivante :

$$\lambda_f \oint_{\partial\Omega} \vec{\nabla} T(R) \bar{T}(R) \vec{dS} = 0 \quad (\text{V.127})$$

Cette relation peut également s'écrire :

$$\lambda_f \frac{\partial T(R)}{\partial r} \bar{T}(R) \int_0^Z dz \int_0^{2\pi} d\theta = 0 \quad (\text{V.128})$$

La première possibilité est  $\bar{T}(R) = 0$ , mais comme il s'agit d'un terme artificiel utilisé pour appliquer la formulation variationnelle cela n'a pas de sens physique.

La deuxième solution est  $\frac{\partial T(R)}{\partial r} = 0$ .

En reprenant l'expression de  $T$  donnée à l'Equation V.74, on peut finalement écrire la condition limite pour la consistance énergétique des effets de dissipation thermique par la relation :

$$\frac{\partial \xi(R)}{\partial r} = 0 \quad (\text{V.129})$$

Finalement pour les effets thermiques, on a déterminé deux conditions limites représentées par les Equations V.124 et V.129.

Il est à présent possible de déterminer les constantes des solutions pour le module d'incompressibilité ( $K$ ) et de coupler avec les trois approches possibles pour la densité dynamique ( $\rho$ ) afin d'obtenir une approche de modélisation HAC cylindrique complète pour déterminer les propriétés acoustiques des matériaux fibreux.

### 2.2.6 Solutions du modèle HAC cylindrique

La première étape consiste à déterminer les constantes  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  de l'Equation V.73, ainsi que  $\Pi$  la perméabilité dynamique pour les trois approches des effets visco-inertiels en flux, pression et avec l'hypothèse de vorticité nulle. On a trois systèmes de cinq équations (conditions limites) avec cinq inconnues. Ensuite, avec l'Equation II.11 pr  sent  e à la Section 2.1.2 du Chapitre II il est possible de déterminer trois valeurs de densité dynamique différentes correspondant aux trois approches  $\rho_v$  (flux),  $\rho_p$  (pression) et  $\rho_z$  (condition de zéro vorticité).

Pour les effets thermiques, un seul système de deux équations à deux inconnues est à résoudre, afin de déterminer les deux constantes  $c_4$  et  $c_5$  de l'Equation V.79. Il est alors possible d'exprimer la perméabilité thermique puis de déterminer le module d'incompressibilité dynamique  $K$ .

Enfin, chacune des trois valeurs de densité dynamique ( $\rho_v$ ,  $\rho_p$  et  $\rho_z$ ) peut être associ  e au module d'incompressibilité ( $K$ ) pour déterminer trois valeurs de coefficient d'absorption acoustique  $\alpha_v$ ,  $\alpha_p$  et  $\alpha_z$ .

La résolution des systèmes et des différentes solutions s'appuient sur les fonctions  $f$ ,  $h$  et  $\xi$  reli  es respectivement aux champs  $\vec{v}$ ,  $p$  et  $T$ , ainsi que sur leurs d  riv  es successives. C'est pourquoi, tous ces éléments sont regroupés en Annexe B1.

Pour simplifier l'écriture des équations deux paramètres sont définis  $p = \frac{r}{\delta_v}$  et  $q = p\beta$ .

On reporte les fonctions  $f$  et  $h$  dans les quatre premières équations relatives aux conditions

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

limites. Pour l'Equation V.85, on obtient la relation suivante :

$$\delta_v^2 \left( -\frac{c_0}{(\beta R)^2} + \frac{c_1}{2} \right) + \frac{1}{\delta_v \beta R} (c_2 I_1(q) - c_3 K_1(q)) = 0 \quad (\text{V.130})$$

Pour l'Equation V.86, on obtient la relation suivante :

$$c_1 \delta_v^2 + \frac{c_2}{\delta_v^2} I_0(q) + \frac{c_3}{\delta_v^2} K_0(q) = 0 \quad (\text{V.131})$$

Pour l'Equation V.93, on obtient la relation suivante :

$$\delta_v^2 \left( \frac{c_0}{R^2} - \frac{c_1}{2} \right) - \frac{1}{R \delta_v} (c_2 I_1(p) - c_3 K_1(p)) + \Pi = 0 \quad (\text{V.132})$$

Pour l'Equation V.105, on obtient la relation suivante :

$$1 - \frac{c_0}{R^2} - \frac{c_1}{2} - \frac{c_2}{\delta_v^3 R} I_1(p) + \frac{c_3}{\delta_v^3 R} K_1(p) = 0 \quad (\text{V.133})$$

La cinquième équation dépend d'une des trois approches identifiées précédemment.

### La densité dynamique pour l'approche en flux

Pour l'Equation V.119, on obtient la relation suivante :

$$-\frac{2\delta_v^2 c_0}{R^3} + \frac{c_2}{\delta_v^3} I_1(p) - \frac{c_2}{\delta_v^2 R} I_2(p) - \frac{c_3}{\delta_v^3} K_1(p) - \frac{c_3}{\delta_v^2 R} K_2(p) = 0 \quad (\text{V.134})$$

La solution analytique pour  $\Pi_v$  est de la forme :

$$\Pi_v = \delta_v^2 \left( \frac{R^2 \phi A + 2\delta_v R(\beta B + C)}{R^2(1 - \phi)A + 2\delta_v(-2R\beta^2 E + R\beta F + RC + 8\beta\delta_v G)} \right) \quad (\text{V.135})$$

Les fonctions  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $E$ ,  $F$  et  $G$  s'expriment par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} A &= I_0(p)K_0(q) - I_0(q)K_0(p), \\ B &= I_0(p)K_1(q) - I_0(q)K_1(q) + I_1(q)K_0(p) - I_1(q)K_0(q), \\ C &= I_0(p)K_1(p) - I_0(q)K_1(p) + I_1(p)K_0(p) - I_1(p)K_0(q), \\ E &= I_0(q)K_1(p) + I_1(p)K_0(q), \\ F &= I_0(p)K_1(q) + I_0(q)K_1(q) + I_1(q)K_0(p) + I_1(q)K_0(q), \\ G &= -I_1(p)K_1(q) + I_1(q)K_1(p) \end{aligned} \quad (\text{V.136})$$



### La densité dynamique pour l'approche en pression

Dans ce cas, c'est l'Equation V.120 qui est utilisée. En injectant les expressions des fonctions  $h$  et  $f$ , on obtient la relation suivante :

$$\frac{1}{2} \left( c_1 \delta_v^2 + \frac{c_2}{\delta_v^2} I_0(p) + \frac{c_3}{\delta_v^2} K_0(p) \right) + \Pi = 0 \quad (\text{V.137})$$

La solution analytique pour  $\Pi_p$  est de la forme :

$$\Pi_p = \delta_v^2 \left( \frac{R^3 \phi E + R^2 \delta_v (2\beta G - \phi A) + 2\delta_v^2 R(\beta B - C)}{\phi R^3 E (R^2 + 4\beta^2 \delta_v) - R^2 \delta_v (2 - \phi) A - 2R\delta_v^2 (C + \beta F) - 2\beta \delta_v (R^2 + 4\delta_v^2) G} \right) \quad (\text{V.138})$$

Les fonctions  $A, B, C, E, F$  et  $G$  sont les mêmes que pour l'approche en flux exprimées par l'Equation V.136.

Dans ce cas de figure, le champ de vitesse déterminé représente la vitesse du flux à travers l'enveloppe de la phase fluide sous les conditions de pression imposées à la frontière externe ( $r = R$ ).

### La densité dynamique pour l'hypothèse de vorticité nulle

Sous cette hypothèse, c'est l'Equation V.123 qui est utilis  e. En injectant les expressions des fonctions  $h$  et  $f$ , on obtient la relation suivante :

$$\frac{c_2}{\delta_v^3} I_1(p) - \frac{c_3}{\delta_v^3} K_1(p) = 0 \quad (\text{V.139})$$

La solution analytique pour  $\Pi_z$  est de la forme :

$$\Pi_z = \delta_v^2 \left( \frac{R\phi E + 2\beta \delta_v G}{R(2 - \phi)E - 2\beta \delta_v G} \right) \quad (\text{V.140})$$

Les fonctions  $E$  et  $G$  sont les mêmes que celles utilis  es dans l'approche en flux et décrites par l'Equation V.136

### Le module d'incompressibilité dynamique

Pour simplifier l'écriture des équations deux paramètres sont définis  $p' = \frac{r}{\delta_t}$  et  $q' = p' \beta$ . On reporte la fonction  $\xi$  dans les deux Equations V.124 et V.129 relatives aux conditions limites pour les effets thermiques. Pour la fonction  $\xi$ , seule la d  riv  e par rapport à  $r$  est nécessaire.

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

Ces deux équations s'expriment par les relations suivantes :

$$\delta_t^2 + c_4 I_0(q') + c_5 K_0(q') = 0 \quad (\text{V.141})$$

$$\frac{c_4}{\delta_t} I_1(p') - \frac{c_5}{\delta_t} K_1(p') = 0 \quad (\text{V.142})$$

La résolution de ce système de deux équations à deux inconnues conduit aux solutions suivantes :

$$c_4 = -\frac{\delta_t^2 K_1(p')}{I_0(q')K_1(p') + K_0(q')I_1(p')} \quad (\text{V.143})$$

$$c_5 = -\frac{\delta_t^2 I_1(p')}{I_0(q')K_1(p') + K_0(q')I_1(p')} \quad (\text{V.144})$$

L'étape suivante est de déterminer la perméabilité thermique  $\Xi(\omega)$  à partir de la relation suivante :

$$\Xi(\omega) = \frac{1}{\Omega_f} \iiint_{\Omega_f} \xi d\Omega \quad (\text{V.145})$$

Avec  $\Omega_f = \pi Z R^2 (1 - \beta^2)$  et  $d\Omega = r d\theta dz dr$

En injectant l'expression de  $\xi$  dans l'Equation V.145, on obtient la relation suivante :

$$\Xi(\omega) = \frac{1}{\pi Z R^2 (1 - \beta^2)} \pi Z \left( R^2 (1 - \beta^2) \delta_t^2 + 2c_4 \int_{\beta R}^R r I_0\left(\frac{r}{\delta_t}\right) dr + 2c_5 \int_{\beta R}^R r K_0\left(\frac{r}{\delta_t}\right) dr \right) \quad (\text{V.146})$$

La résolution des deux intégrales s'exprime par les relations :

$$\int_{\beta R}^R r I_0\left(\frac{r}{\delta_t}\right) dr = \delta_t R (I_1(p') - \beta I_1(q')) \quad (\text{V.147})$$

$$\int_{\beta R}^R r K_0\left(\frac{r}{\delta_t}\right) dr = -\delta_t R (K_1(p') - \beta K_1(q')) \quad (\text{V.148})$$

Finalement la perméabilité thermique  $\Xi(\omega)$  s'exprime par la relation suivante :

$$\Xi(\omega) = \delta_t^2 \left( 1 - \frac{2\delta_t}{R\phi} [c_4 (I_1(p') - \beta I_1(q')) - c_5 (K_1(p') - \beta K_1(q'))] \right) \quad (\text{V.149})$$

Le module d'incompressibilité dynamique ( $K(\omega)$ ) est alors déterminé par l'Equation V.44

---

La comparaison de la relation obtenue pour la perméabilité thermique avec celle déterminée dans le modèle de Tarnow, dans le cas de fibres régulières, présente de grandes similitudes. Certains coefficients diffèrent légèrement et les fonctions utilisées sont des fonctions de Hankel et de Bessel traditionnelles.

### 2.3 Validation de l'approche HAC cylindrique dynamique

Pour évaluer les trois approches de modélisation HAC cylindrique développées à la Section 2, le modèle est appliqué aux matériaux dont le relevé de distribution de rayons de fibres a été caractérisé dans le cadre de cette thèse. Ces matériaux sont cités à la Section 2.1.3 du Chapitre III. Les prédictions du modèle HAC cylindrique s'appuient donc sur une valeur de porosité caractérisée expérimentalement, dont les résultats ont été présentés précédemment dans le Tableau III.3, mais également sur une valeur moyenne de rayon de fibres obtenue à partir de l'exploitation d'image MEB, dont les valeurs ont été recensées dans le tableau III.2.

Les résultats relatifs aux trois densités dynamiques, au module d'incompressibilité puis aux coefficients d'absorption acoustique sont alors comparés aux valeurs expérimentales caractérisées à la Section 3, puis analysés en fonction des trois approches possibles.

Dans un second temps, une valeur de rayon de fibre peut être déterminée à partir du modèle afin d'obtenir une correspondance maximale avec les valeurs expérimentales. Cette valeur est alors comparée à la valeur caractérisée expérimentalement, avant de mener une analyse sur les résultats obtenus.

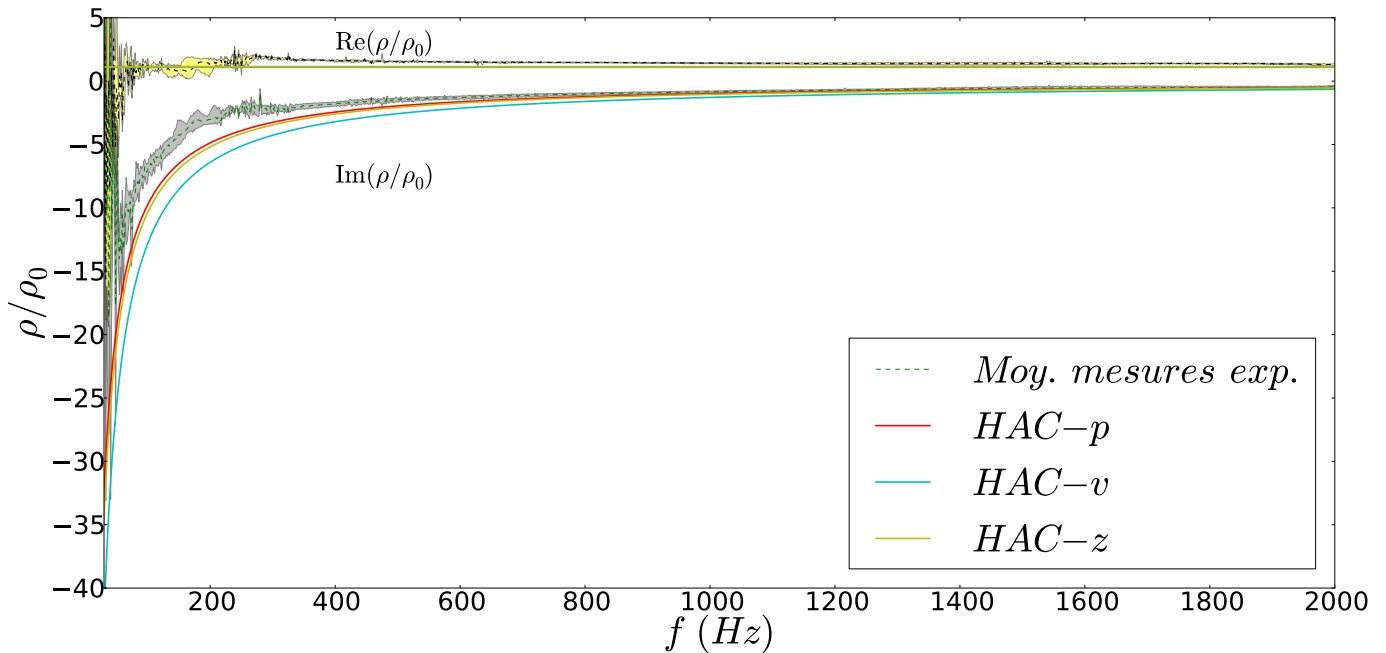
#### 2.3.1 Comparaison des densités dynamiques modélisées et expérimentales

Dans un premier temps, la modélisation HAC cylindrique développée est appliquée au cas de la laine de lin (D) pour les trois approches en pression, en flux et avec la condition de vorticité nulle. Les parties imaginaire et réelle de la densité dynamique normalis  e repr  sent  e par le rapport  $\rho/\rho_0$  sont repr  sent  es en fonction de la fréquence, comme l'illustre la Figure V.3.

Comme attendu, les trois approches donnent des valeurs de la partie réelle de la densité dynamique proches de 1. Compte tenu de la plage de fréquences relativement basses pour lesquelles les mesures ont été r  alis  es, il n'est pas possible de voir l'inflexion des courbes à partir de la fréquence de transition qui sépare le régime visqueux du régime inertiel. Les investigations complémentaires men  es à la Section 3 apportent d'autres éléments de compréhension de son évolution à plus hautes fréquences.

Pour la partie imaginaire, comme attendu les valeurs tendent vers l'infini lorsque la fréquence tend vers zéro. Puis, elles s'approchent asymptotiquement de 0 pour les hautes fréquences.

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux



**Figure V.3** – Caractérisation expérimentale et modélisation HAC cylindrique de la densité dynamique normalisée de la laine de lin (D) en fonction de la fréquence

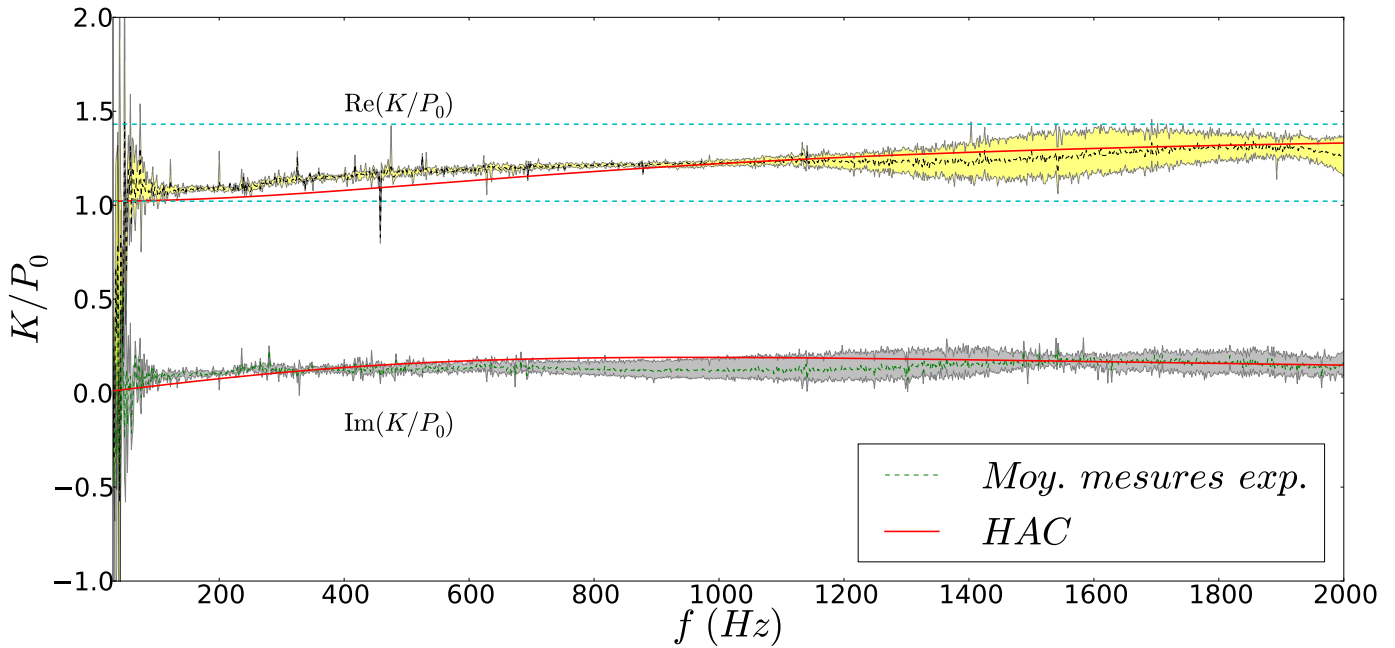
L'écart observé entre les courbes des trois approches est du même ordre de grandeur que les incertitudes de mesures. L'écart est un peu plus marqué entre l'approche en flux et les deux autres approches (en pression et pour la condition de vorticité nulle). Cette tendance suit celle qui a été observée pour la modélisation sphérique.

### 2.3.2 Comparaison du module d'incompressibilité modélisé et expérimental

Pour les effets thermiques, les parties réelles et imaginaires du module d'incompressibilité normalisé ( $K/P_0$ ) sont modélisées pour la laine de lin (D). La Figure V.4 permet de visualiser le comportement de ces deux termes par rapport aux mesures expérimentales.

Pour la partie réelle, la modélisation reste bien comprise entre les deux valeurs physiques limites correspondant à  $\text{Re}(K/P_0) \simeq 1/\phi$  en basse fréquence (régime isotherme) et  $\text{Re}(K/P_0) \simeq \gamma/\phi$  en haute fréquence (régime adiabatique). Ainsi, on vérifie bien que lorsque  $f \rightarrow 0$ , la modélisation HAC cylindrique correspond à  $\text{Re}(K/P_0) \rightarrow 1/\phi$ . Pour la limite lorsque  $f \rightarrow +\infty$ , des investigations complémentaires sont menées à la Section 3.

En ce qui concerne la partie imaginaire, on a bien  $\lim_{f \rightarrow 0} \text{Im}(K/P_0) = 0$ . Puis, elle croît jusqu'à la fréquence de transition thermique avant de décroître pour tendre à nouveau vers zéro. Pour la limite haute fréquence, dans ce cas également des éléments complémentaires sont donnés à la Section 3 de ce chapitre. Pour la laine (D), la modélisation HAC cylindrique conduit à une



**Figure V.4** – Caractérisation expérimentale et modélisation HAC cylindrique du module d’incompressibilité dynamique normalisé de la laine de lin (D) en fonction de la fréquence

fréquence de transition thermique  $f_t$  de l’ordre de  $980 \text{ Hz}$ . Même s’il est difficile de valider cette valeur par comparaison avec les données expérimentales, compte tenu de la forte variabilité de ces dernières, elle semble cohérente.

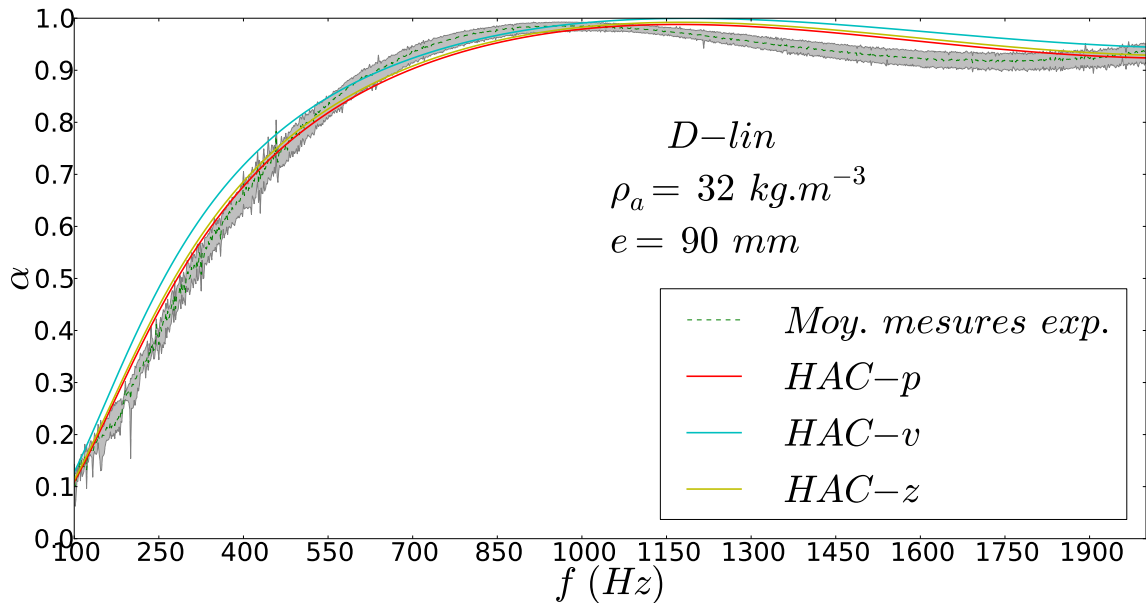
### 2.3.3 Comparaison des coefficients d’absorption acoustique modélisés et expérimentaux

Pour chaque approche, un coefficient d’absorption acoustique ( $\alpha_p$ ,  $\alpha_v$  et  $\alpha_z$ ) est déterminé en fonction de la fréquence à partir de la méthode HAC cylindrique. Ses différents coefficients s’appuient sur les valeurs de  $\rho$  ( $\rho_p$ ,  $\rho_v$  et  $\rho_z$ ), de  $K$ , ainsi que sur l’épaisseur du matériau (Section 2.1.4 du Chapitre II).

Pour le cas de la laine de lin (D), dont les valeurs de  $\rho_p$ ,  $\rho_v$ ,  $\rho_z$  et  $K$  ont été présentées respectivement aux Figures V.3 et V.4, les coefficients  $\alpha_p$ ,  $\alpha_v$  et  $\alpha_z$  sont présentés à la Figure V.5.

Les résultats sont relativement proches des mesures expérimentales. En effet, L’approche en pression est celle qui présente un écart relatif moyen par rapport à la valeur moyenne caractérisée expérimentalement le plus bas (3,4%), comme le montre les valeurs du Tableau V.1. La condition de vorticité nulle présente un écart relatif très proche de l’approche en pression (3,9%). Enfin, pour l’approche en flux, l’écart passe à (5,8%), mais reste largement acceptable.

## V.2 Méthode « HAC cylindrique dynamique » pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux



**Figure V.5** – Coefficients d’absorption acoustique des approches en pression (p), en flux (v) et suivant la condition de vorticité nulle (z) de la laine de lin (D) en fonction de la fréquence

Comme pour la densité dynamique l’écart observé entre les trois approches est du même ordre de grandeur que l’incertitude des mesures expérimentales (4,9%). L’écart entre l’approche en flux ( $\alpha_v$ ) et les deux autres approches, qui a déjà été observé pour le cas sphérique, est difficilement explicable physiquement.

Pour les autres matériaux, les écarts relatifs sont précisés dans le Tableau V.1.

Pour tous les matériaux identifiés dans le Tableau V.1, on retrouve la tendance observée pour la laine de lin (D) avec des approches en pression et avec la condition de vorticité nulle très proches et une approche en flux légèrement plus éloignée avec des écarts relatifs compris entre 4,5% et 11,1% mais qui restent tout à fait acceptables.

Il est également possible de comparer les valeurs du Tableau avec les écarts relatifs du Tableau III.6 déterminés pour le modèle ( $R_{f_{veg}}, R_{f_{pol}}$ ) à deux types de fibres développé au Chapitre III. Les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur, notamment pour les approches en pression et pour la condition de vorticité nulle.

En conclusion, l’approche HAC cylindrique en dynamique peut être validée pour le cas des laines végétales.

Laine	Réf.	$\alpha$			
		Ecart exp. relatif moyen (%)	Ecart relatif moyen (%)		
			$p$	$v$	$z$
Chanvre	N	11,7	6,3	8,0	6,8
Lin	C	11,0	4,8	8,6	5,1
	D	4,9	3,4	5,8	3,9
Kénaif	K	12,0	5,6	11,1	6,5
Bois	H	7,1	3,2	4,5	3,2
Coco	I	7,2	3,7	4,8	3,8
Ouate cellulose	R	7,5	6,0	7,0	6,0
Chanvre-lin-coton	P	10,8	3,9	6,3	4,1

**Tableau V.1** – Ecarts relatifs pour le fuseau de mesures expérimentales et entre les modélisations HAC et les valeurs expérimentales

### 2.3.4 Evaluation et analyse des rayons de fibres modélisés et expérimentaux

Il est possible à partir d'une méthode des moindres carrés en minimisant l'écart entre la modélisation et la valeur expérimentale moyenne de déterminer une valeur de rayon moyen de fibres optimale pour chaque matériau. Les valeurs ainsi déterminées sont légèrement différentes mais restent très proches des valeurs caractérisées à partir des images réalisées au MEB (Tableau III.2), comme le montre le Tableau V.2.

Laine	Réf.	$Rf_{HAC}$ ( $\mu m$ )	$Rf_{exp}$ ( $\mu m$ )	Ecart relatif (%)
Chanvre	N	16,7	14,3	16,2
Lin	C	12,8	12,3	4,4
	D	12,9	12,6	2,2
	M	12,5	11,8	6,1
Kénaif	K	17,8	16,9	5,4
Bois	H	15,3	15,8	3,3
Coco	I	15,9	15,7	1,3
Ouate cellulose	R	11,6	11,5	0,9
Chanvre-lin-coton	P	9,6	9,5	1,1

**Tableau V.2** – Evaluation des rayons de fibres moyens optimum pour la modélisation HAC cylindrique et comparaison avec les valeurs expérimentales

La seule exception concerne la laine de chanvre (N) qui présente un écart relatif entre les deux valeurs de rayons de fibres de 16,2%. Compte tenu des analyses menées à la Section 2.4.2 du Chapitre III sur le lien entre les paramètres acoustiques ( $\Lambda$ ,  $\Lambda'$  et  $\Xi_0$ ) et les rayons de fibres,

il peut être envisagé que le rayon déterminé expérimentalement puisse effectivement être légèrement sous-estimé. Néanmoins, il est nécessaire de prendre un peu de recul sur ce résultat car le degré d'hétérogénéité dans le cas de la laine de chanvre (N) est relativement important (Tableau III.2).

La méthode HAC cylindrique en dynamique développée dans cette section a permis d'établir deux solutions possibles pour la modélisation des propriétés acoustiques dans le cas de matériaux fibreux soumis à une sollicitation acoustique perpendiculaire au plan des fibres. Ces dernières ont été complétées par une approche s'appuyant sur une condition de vorticité nulle, remplaçant l'hypothèse de consistance énergétique. Cette approche a pu être valid  e pour les trois approches dans le cas des laines végétales.

L'analyse des modélisations HAC cylindrique a conduit à identifier l'approche en pression comme étant la plus proche des valeurs expérimentales caract  ris  es dans le cadre de cette thèse quel que soit le matériau. Néanmoins, l'approche s'appuyant sur une condition de vorticité nulle présente des résultats extrêmement proches de l'approche en pression. Cette condition qui ne respecte pas la consistance énergétique semble néanmoins s'appuyer sur une hypothèse physiquement valable, et plus proche de celle de l'approche en pression, pour laquelle la vorticité s'annule lorsque la vitesse dans le fluide atteint une valeur maximum à la limite du motif élémentaire.

Enfin, la détermination des rayons moyens de fibres par la méthode HAC cylindrique a conduit, hormis pour un cas, à des valeurs très proches de celles obtenues par caractérisation expérimentale.

## 3 Lien entre la modélisation HAC cylindrique et les modélisations fluide-équivalent

Même si la méthode HAC cylindrique, d  velopp  e à la section précédente, a pu être valid  e pour le cas de matériau fibreux tels que des panneaux isolants de laines végétales, il est possible de l'évaluer en reliant la modélisation HAC aux paramètres caractéristiques des matériau poreux utilisés dans les modèles fluide-équivalent. Ces paramètres, qui ont été définis à la Section 3.2.1 du Chapitre II peuvent être déterminés à partir de limites basses et hautes fréquences des perméabilités visco-inertielle  $\Pi$  et thermique  $\Xi$ .

Des relations permettant d'estimer ces paramètres acoustiques sont établies dans un premier temps pour les effets visco-inertiels selon les trois approches li  es à la modélisation HAC cylin-



drique, puis dans un second temps pour les effets thermiques. Des exemples relatifs aux laines végétales sont exposés pour illustrer le lien entre ces paramètres et les coefficients d'absorption acoustique, ainsi que les densités dynamiques et le module d'incompressibilité dynamique, notamment lorsque les fréquences tendent vers 0 ou vers  $+\infty$ .

De plus, l'évolution des paramètres caractéristiques des milieux poreux est évaluée en faisant varier la porosité car il s'agit d'un paramètre facilement contrôlable et représentatif du matériau.

### 3.1 Identification des paramètres liés aux effets visco-inertiels

Pour estimer les paramètres liés aux effets visco-inertiels, il faut s'intéresser aux limites basses et hautes fréquences des parties réelles et imaginaires de la densité dynamique.

#### 3.1.1 Basses fréquences

A basses fréquences on peut considérer que l'on se trouve dans un régime quasi-statique où les phénomènes visqueux sont prépondérants sur les phénomènes inertiels. Ainsi,  $\omega \rightarrow 0$  et donc  $\lim_{\omega \rightarrow 0} (1/\delta_v) = 0$ .

On définit, sur la base des travaux réalisés par Auriault [Auriault *et al.* 1985] et Boutin [Boutin & Geindreau 2010], la fonction  $H$  comme l'inverse de la perméabilité  $\Pi$ ,  $H = \Pi^{-1}$ . Pour un milieu poreux, on peut alors exprimer l'approximation de l'inverse de la perméabilité visco-inertielle à partir de la relation suivante :

$$H(\omega) \simeq \frac{1}{\Pi_0} + \frac{\delta_v^2}{\phi} \alpha_0 \quad (\text{V.150})$$

Avec  $\Pi_0$  la perméabilité intrinsèque statique et  $\alpha_0$  la tortuosité à basse fréquence.

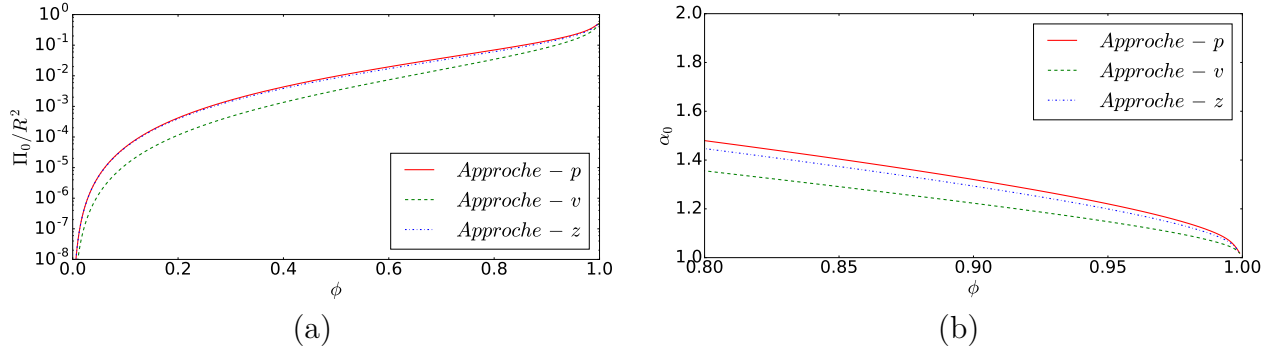
Ces deux paramètres peuvent être estimés à partir des relations suivantes :

$$\Pi_0 \simeq \lim_{\omega \rightarrow 0} \text{Re} \left( \frac{1}{H(\omega)} \right) \quad (\text{V.151})$$

$$\alpha_0 \simeq \lim_{\omega \rightarrow 0} \left( \frac{\phi}{\delta_v^2} H(\omega) \right) \quad (\text{V.152})$$

Sur la base du modèle HAC cylindrique développé à la Section 2 de ce chapitre et plus précisément en s'appuyant sur les Equations V.135, V.138 et V.140, il est possible d'observer la dépendance de ces paramètres vis-à-vis de la porosité à travers les graphes présentés à la Figure V.6

### V.3 Lien entre la modélisation HAC cylindrique et les modélisations fluide-équivalent



**Figure V.6** – (a) évolution des valeurs adimensionnées de  $\Pi_0 - p$ ,  $\Pi_0 - v$  et  $\Pi_0 - z$  en fonction de la porosité, (b) évolution des valeurs de tortuosité basse fréquence  $\alpha_0 - p$ ,  $\alpha_0 - v$  et  $\alpha_0 - z$  en fonction de la porosité

Les résultats ainsi obtenus sont cohérents. En effet, pour la valeur adimensionnée de la perméabilité basse fréquence représentée à la Figure V.6(a), les trois approches tendent bien vers 0 lorsque la porosité tend vers 0 et vers 1 lorsque la porosité tend vers 1.

Pour la tortuosité basse fréquence présentée à la Figure V.6(b), les trois approches possèdent bien des valeurs supérieures à 1 dans la gamme de porosité des fibres végétales avec  $\alpha_0 - p > \alpha_0 - z > \alpha_0 - v$ . Ces trois valeurs convergent néanmoins vers 1 lorsque la porosité tend vers 1.

D'autre part, avec la perméabilité statique ( $\Pi_0$ ), il est possible d'estimer la résistivité  $\sigma$  par la relation suivante, qui découle directement de la loi de Darcy (Equation V.47) :

$$\sigma = \frac{\mu}{\Pi_0} \quad (\text{V.153})$$

Compte tenu des résultats présentés à la Figure V.6(a), on peut affirmer que  $\sigma - p < \sigma - z < \sigma - v$ . Cette relation peut être appliquée au cas de la laine de lin (D) dont la partie imaginaire de la densité dynamique normalisée est représentée à la Figure V.3.

Laine	Réf.	$\sigma - p (N.m^{-4}.s)$	$\sigma - v (N.m^{-4}.s)$	$\sigma - z (N.m^{-4}.s)$	$\sigma_{exp} (N.m^{-4}.s)$
Lin	D	5898	7650	6256	5052

**Tableau V.3** – Valeurs de résistivité estimées à partir des 3 approches  $p$ ,  $v$  et  $z$  issues de la modélisation HAC cylindrique et valeur de résistivité caractérisée expérimentalement pour la laine de lin (D)

Les valeurs ainsi obtenues sont proches de la valeur caractérisée expérimentalement, comme l'illustre le Tableau V.3.

Cette méthode peut ainsi constituer une alternative afin d'estimer une valeur de résistivité pour les matériaux fibreux lorsqu'une caractérisation expérimentale n'est pas possible.

### 3.1.2 Hautes fréquences

Pour les hautes fréquences, ce sont les effets inertiels qui sont prépondérants sur les effets visqueux. Dans ce cas de figure,  $\lim_{\omega \rightarrow +\infty} (1/\delta_v) = +\infty$ .

Afin d'identifier les paramètres caractéristiques des milieux poreux à hautes fréquences, il est possible de s'appuyer sur la relation suivante [Auriault *et al.* 1985, Boutin & Geindreau 2010] :

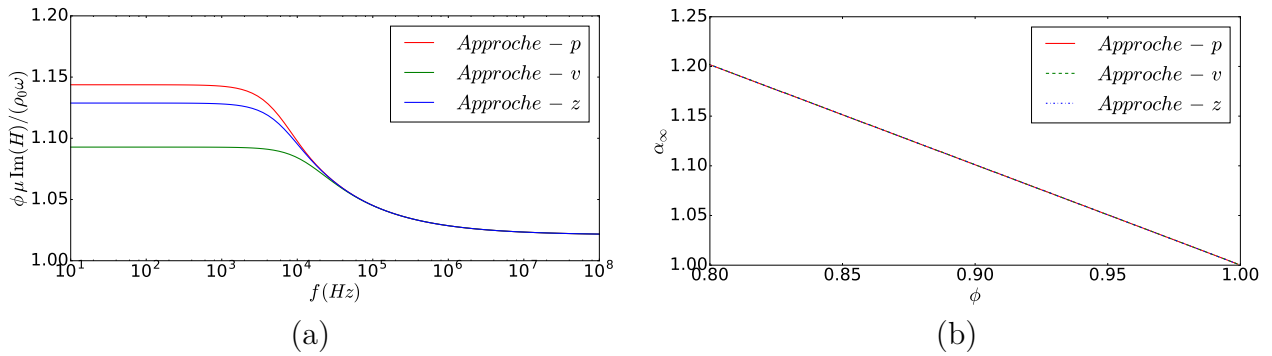
$$\frac{\mu \phi}{j\omega \rho_0} H(\omega) \simeq \alpha_\infty \left( 1 + \sqrt{\frac{M_v \omega_v}{2 j\omega}} \right) \quad (\text{V.154})$$

Avec  $\alpha_\infty$  la tortuosité précédemment définie à la Section 3.2.1 du Chapitre II,  $M_v$  correspondant à un facteur de forme pour les effets visco-inertiels et  $\omega_v$  la pulsation de transition qui sépare les domaines basses fréquences (régime visqueux) des domaines hautes fréquences (régime inertiel).

Une expression de  $\alpha_\infty$  peut donc être identifiée à partir de l'Equation V.154. En effet, la tortuosité peut s'exprimer à partir de la relation suivante :

$$\alpha_\infty \simeq \lim_{\omega \rightarrow +\infty} \frac{\mu \phi}{\omega \rho_0} \text{Im}(H(\omega)) \quad (\text{V.155})$$

En s'appuyant sur ce résultat et pour compléter l'analyse de la laine de lin (D), présentée précédemment à la Section 2.3 de ce chapitre, la Figure V.7(a) représente l'évolution de la fonction à laquelle est liée la tortuosité en fonction de la fréquence.



**Figure V.7** – (a) Evolution de la fonction de tortuosité dynamique suivant les approches  $p$ ,  $v$  et  $z$  en fonction de la fréquence pour la laine de lin (D), (b) évolution des valeurs de  $\alpha_\infty - p$ ,  $\alpha_\infty - v$  et  $\alpha_\infty - z$  en fonction de la porosité

La représentation graphique de la Figure V.7(a) permet de vérifier que dans le cas d'un régime visqueux  $\alpha_0 - p > \alpha_0 - z > \alpha_0 - v$ . Lorsque  $f$  tend vers  $+\infty$ , avec une porosité de 97,9%, les valeurs de tortuosité des trois approches convergent vers une valeur proche de 1.

### V.3 Lien entre la modélisation HAC cylindrique et les modélisations fluide-équivalent

Les courbes de la Figure V.7(b) permettent de vérifier que dans un régime inertiel et pour la gamme de porosité des laines végétales étudiées dans cette thèse, la tortuosité des trois approches correspond à une même valeur qui tend vers 1 lorsque la porosité tend vers 1.

De plus, à partir de la Figure V.7(b), il est possible d'identifier une relation entre la tortuosité et la porosité. En effet, la relation suivante peut être établie pour une valeur de porosité supérieure à 80% :

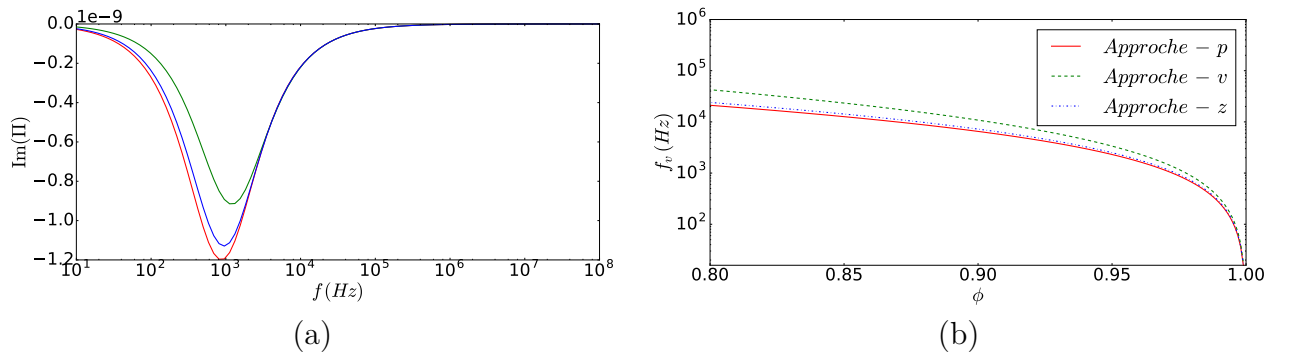
$$\alpha_\infty = (2 - \phi) \quad (\text{V.156})$$

Ce type de relation a surtout été déterminé pour les milieux granulaires. Néanmoins, elle a déjà fait l'objet d'investigations pour le cas d'une modélisation de matériaux micro-fibreux dans [Umnova *et al.* 2009]. La relation établie dans ce cas mais qui reste valable pour des dimensions classiques de matériaux poreux est la même qui vient d'être identifiée à l'Equation V.156.

A partir de la Figure V.7(a) on peut observer le passage du régime visqueux au régime inertiel. Dans [Zwikker & Kosten 1949] ou encore dans [Johnson *et al.* 1987], la fréquence de transition  $f_v$  s'exprime par la relation suivante :

$$f_v = \frac{\phi \mu}{2\pi \Pi_0 \rho_0 \alpha_\infty} \quad (\text{V.157})$$

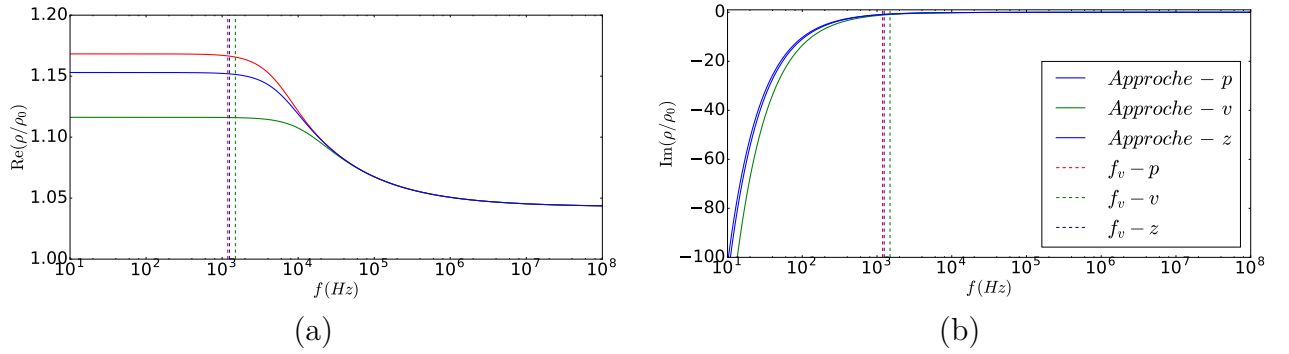
Les fréquences de transitions de la laine de lin (D) peuvent ainsi être estimées pour les trois approches  $p$ ,  $v$  et  $z$ . La représentation de la partie imaginaire de la perméabilité visco-inertielle en fonction de la fréquence permet de visualiser graphiquement ces valeurs, comme l'illustre la Figure V.8. La pulsation de transition est, quant à elle, déterminée par  $\omega_v = 2\pi f_v$ .



**Figure V.8** – (a) Représentation de la partie imaginaire de la perméabilité visco-inertielle suivant les approches  $p$ ,  $v$  et  $z$  en fonction de la fréquence pour la laine de lin (D), (b) évolution des valeurs de fréquences de transition visco-inertielles  $f_v - p$ ,  $\omega_v - v$  et  $\omega_v - z$  en fonction de la porosité

A partir de la Figure V.8 on retrouve bien  $f_v - p < f_v - z < f_v - v$ .

La Figure V.8(a), permet d'identifier l'ordre de grandeur des fréquences de transition dans la plage de porosité des laines végétales. Pour les trois approches, ces fréquences diminuent avec l'augmentation de la porosité.



**Figure V.9** – Représentation (a) de la partie réelle de la densité dynamique normalisée et (b) de la partie imaginaire de la densité dynamique normalisée suivant les approches  $p$ ,  $v$  et  $z$  en fonction de la fréquence pour la laine de lin (D)

Les valeurs des fréquences de transition pour la laine de lin (D) peuvent être reportées sur les représentations graphiques de  $\text{Re}(\rho/\rho_0)$  et de  $\text{Im}(\rho/\rho_0)$ , comme l'illustrent les Figures V.9(a) et (b). Que ce soit pour la partie réelle ou pour la partie imaginaire, les approches  $p$ ,  $v$  et  $z$  se dissocient lorsque le régime est visqueux. Néanmoins, les écarts entre les trois approches restent faibles et donc acceptables. En régime inertiel, il n'y a plus de dissipations et on retrouve bien une convergence logique des trois approches.

Avec la détermination de  $\alpha_\infty$ , puis de  $\omega_v$ , il est alors possible de déterminer  $M$  à partir de l'Equation V.154.

Dans [Johnson *et al.* 1987] on trouve la relation suivante :

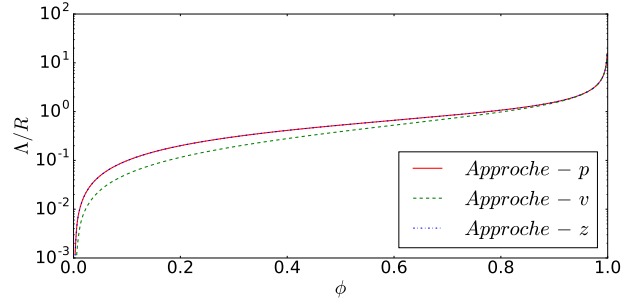
$$\sqrt{\frac{M_v \omega_v}{2 j \omega}} \simeq \frac{2 \delta_v}{\Lambda} \quad (\text{V.158})$$

Avec  $\Lambda$  la longueur caractéristique visqueuse définie à la Section 3.2.1 du Chapitre II.

Finalement, on peut évaluer  $\Lambda$  à partir de la relation suivante :

$$\Lambda \simeq \lim_{\omega \rightarrow +\infty} 2 \delta_v \sqrt{\frac{2 j \omega}{M_v \omega_v}} \quad (\text{V.159})$$

Comme pour les autres paramètres, la valeur de la longueur caractéristique visqueuse adimensionnée  $\Lambda/R$  est évaluée en fonction de la porosité.



**Figure V.10** – Evolution des valeurs adimensionnées des longueurs caractéristiques visqueuses  $\Lambda - p$ ,  $\Lambda - v$  et  $\Lambda - z$  en fonction de la porosité

On retrouve bien que lorsque  $\phi \rightarrow 0$ ,  $\Lambda/R \rightarrow 0$  et lorsque  $\phi \rightarrow 1$ ,  $\Lambda/R \rightarrow +\infty$ . De plus, pour la plage de porosité des laines végétales, les trois approches sont quasiment superposées, comme l'illustre la Figure V.10.

## 3.2 Identification des paramètres liés aux effets thermiques

De manière analogue à ce qui a été fait pour les effets visco-inertiels, il est possible de déterminer les paramètres thermiques des milieux poreux en étudiant les limites basses et hautes fréquences.

### 3.2.1 Basses fréquences

Lorsque  $\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{1}{\delta_t} = 0$ , la phase fluide se trouve dans un régime quasi-isotherme qui est alors prépondérant par rapport au régime adiabatique. Dans ce cas de figure, la perméabilité thermique peut s'exprimer pour un milieu poreux par la relation suivante [Boutin & Geindreau 2010] :

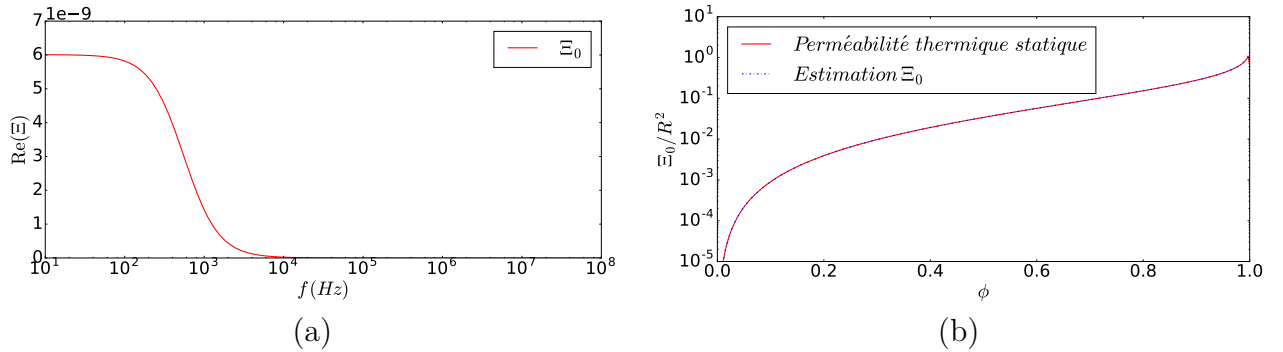
$$\Xi(\omega) \simeq \Xi_0 \left( 1 - \frac{j\omega \rho_0 C_p \Xi_0 \zeta_0}{\Lambda_f} \right) \quad (\text{V.160})$$

Avec,  $\Xi_0$  la perméabilité thermique statique définie précédemment à la Section 3.2.1 du Chapitre II et  $\zeta_0$  un coefficient correcteur pour la capacité thermique à basse fréquence.

Ainsi, à partir de l'Equation V.160, il est possible d'exprimer  $\Xi_0$  par la relation suivante :

$$\Xi_0 = \lim_{\omega \rightarrow 0} \text{Re}(\Xi(\omega)) \quad (\text{V.161})$$

Pour le cas de la laine de lin (D), la partie réelle de la perméabilité thermique en fonction de la fréquence est représentée à la Figure V.11(a).



**Figure V.11** – (a) Représentation de la partie réelle de la perméabilité thermique en fonction de la fréquence pour la laine de lin (D), (b) évolution de la valeur de perméabilité thermique adimensionnée  $\Xi_0/R^2$  en fonction de la porosité

Ainsi, on observe à partir de la Figure V.11(a) que pour le cas de la laine de lin (D), cette valeur va être très proche de  $6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  lorsque la fréquence tend vers 0. Cette valeur est parfaitement cohérente avec la valeur déterminée précédemment à la Section 2.4.1 du Chapitre III. Lorsque l'on passe dans un régime inertiel et donc adiabatique la partie réelle de la perméabilité thermique tend bien vers 0.

D'autre part, la valeur de perméabilité thermique statique peut être adimensionnée par le rapport  $\Xi_0/R^2$ . L'évolution de ce paramètre en fonction de la porosité est présentée à la Figure V.11(b). Ainsi, on retrouve bien un résultat similaire à celui de la perméabilité visco-inertielle. Quand la porosité tend vers 0,  $\Xi_0/R^2$  tend vers 0 et quand elle tend vers 1,  $\Xi_0/R^2$  tend vers 1.

### 3.2.2 Hautes fréquences

Pour les hautes fréquences, les effets inertiels prédominent et la phase fluide se trouve dans un régime quasi-adiabatique. Dans ce cas de figure,  $\lim_{\omega \rightarrow +\infty} (1/\delta_t) = +\infty$ .

Pour un milieu poreux, il est possible à haute fréquence de s'appuyer sur la relation suivante [Boutin & Geindreau 2010] :

$$\frac{\lambda_f}{j\omega\rho_0 C_p \Xi(\omega)} \simeq 1 + \sqrt{\frac{M_t \omega_t}{2 j\omega}} \quad (\text{V.162})$$

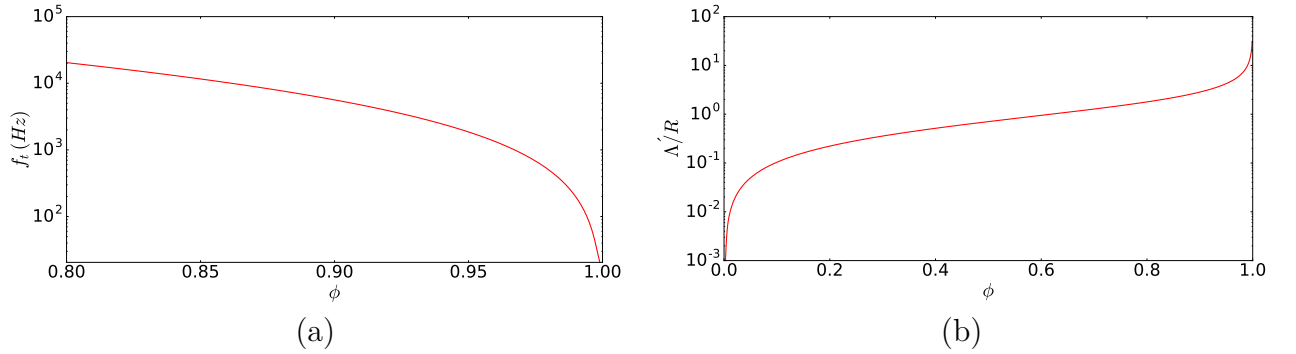
Avec  $\omega_t$  la pulsation de transition séparant pour les effets thermiques le domaine des basses fréquences (régime isotherme) de celui des hautes fréquences (régime adiabatique). Les travaux menés dans [Lafarge *et al.* 1997] expriment la fréquence de transition ( $\omega_t = 2\pi f_t$ ) par la relation

### V.3 Lien entre la modélisation HAC cylindrique et les modélisations fluide-équivalent

suivante :

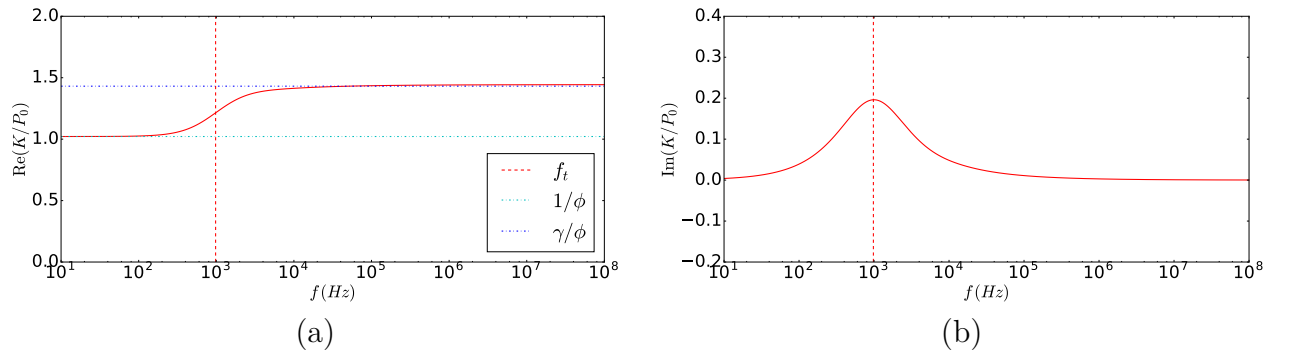
$$f_t = \frac{\lambda_f}{2\pi \rho_0 C_p \Xi_0} \quad (\text{V.163})$$

Cette fréquence de transition va diminuer avec l'augmentation de la porosité, comme l'illustre la Figure V.12(a).



**Figure V.12** – (a) Evolution de la fréquence de transition thermique en fonction de la porosité, (b) Evolution de la longueur caractéristique thermique adimensionnée ( $\Lambda'/R$ ) en fonction de la porosité

Comme pour le cas visco-inertiel, la fréquence de transition thermique peut être reportée sur les représentations graphiques de  $\text{Re}(K/P_0)$  et de  $\text{Im}(K/P_0)$ , comme l'illustrent les Figures V.13(a) et (b). Cette fréquence de transition correspond bien à l'inflexion de la courbe pour la partie réelle et au maximum de la fonction pour la partie imaginaire. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus dans [Olny & Boutin 2003].



**Figure V.13** – Représentation (a) de la partie réelle du module d'incompressibilité dynamique normalisé et (b) de la partie imaginaire du module d'incompressibilité dynamique normalisé en fonction de la fréquence pour la laine de lin (D)

Par analogie avec les effets visco-inertiels, [Champoux & Allard 1991] énonce la relation



suivante, permettant d'exprimer la longueur caractéristique thermique  $\Lambda'$  :

$$\sqrt{\frac{M_t \omega_t}{2 j \omega}} \simeq \frac{2 \delta_t}{\Lambda'} \quad (\text{V.164})$$

On peut alors déterminer  $\Lambda'$  par la relation suivante :

$$\Lambda' \simeq \lim_{\omega \rightarrow +\infty} 2 \delta_t \sqrt{\frac{2 j \omega}{M_t \omega_t}} \quad (\text{V.165})$$

La représentation graphique du paramètre adimensionné  $\Lambda'/R$  en fonction de la porosité est présentée à la Figure V.12(b). Comme pour les effets visco-inertiels on retrouve bien que le paramètre  $\Lambda'/R$  tend vers 0 lorsque la porosité tend vers 0 et qu'il tend vers l'infini lorsque la porosité tend vers 1.

La démarche mise en œuvre dans cette section permet de rattacher l'approche HAC cylindrique s'appuyant sur la microstructure des matériaux fibreux à une approche liée aux modèles dits fluide-équivalent reposant sur la géométrie des pores des matériaux.

De plus, les résultats obtenus lors de l'établissement des paramètres caractéristiques des milieux poreux à partir du modèle HAC cylindrique permet de confirmer sa validité.

En outre, il a pu être observé, notamment au travers de l'exemple de la laine de lin (D) que les trois approches liées aux effets visco-inertiels conduisent à des résultats relativement proches. De plus, les analyses des paramètres intrinsèques  $\rho$  et  $K$  ont montré la différence de leur comportement en fonction de la fréquence et donc des régimes visqueux-isothermes et inertiels-adiabatiques.

Fort de ce modèle HAC cylindrique acoustique validé, il est à présent possible de faire la synthèse avec le modèle HAC cylindrique thermique afin de proposer une démarche de modélisation conjointe.

## 4 Synthèse et analyse de l'approche conjointe acoustique et thermique

Cette synthèse de l'approche conjointe acoustique et thermique a fait l'objet d'une communication orale en congrès international<sup>2</sup>.

---

2. Piégay *et al.*, *Acoustical and thermal self-consistent modelling for the optimisation of vegetal wools used in green buildings*, ICBBM 2019, Belfast

Dans cette ultime section, afin de répondre à la problématique initiale de la thèse, il est proposé de synthétiser les développements menés dans le cadre de l'approche conjointe aux Chapitres III, IV et V. Ainsi, une procédure globale permettant de déterminer les propriétés acoustiques et thermiques des matériaux à partir de paramètres tels que la porosité et une valeur de rayon de fibres est proposée.

Dans un second temps, cette procédure est appliquée à une laine végétale afin de détailler son utilisation et souligner son efficacité. Enfin, à partir des résultats obtenus pour ce matériau, un exemple d'optimisation est exposé afin d'illustrer qu'à partir de la procédure conjointe, développée dans le cadre de la thèse, l'optimisation conjointe des performances acoustiques et thermiques des matériaux fibreux est possible.

### 4.1 Identification d'une procédure conjointe acoustique et thermique

En s'appuyant sur les résultats des travaux menés dans les chapitres et sections précédentes, une procédure novatrice de modélisation conjointe acoustique et thermique est proposée pour le cas des matériaux fibreux. Cette procédure est synthétisée par le Tableau V.4.

Elle repose uniquement sur deux paramètres d'entrée communs à l'échelle locale, une valeur de rayon de fibres moyen ( $R_{f_{moy}}$ ) et une valeur de porosité ( $\phi$ ) du matériau.

Cette procédure s'appuie notamment sur la mise en œuvre des deux modèles développés dans le cadre de ces travaux de thèse et qui reposent sur une approche commune d'homogénéisation auto-cohérente.

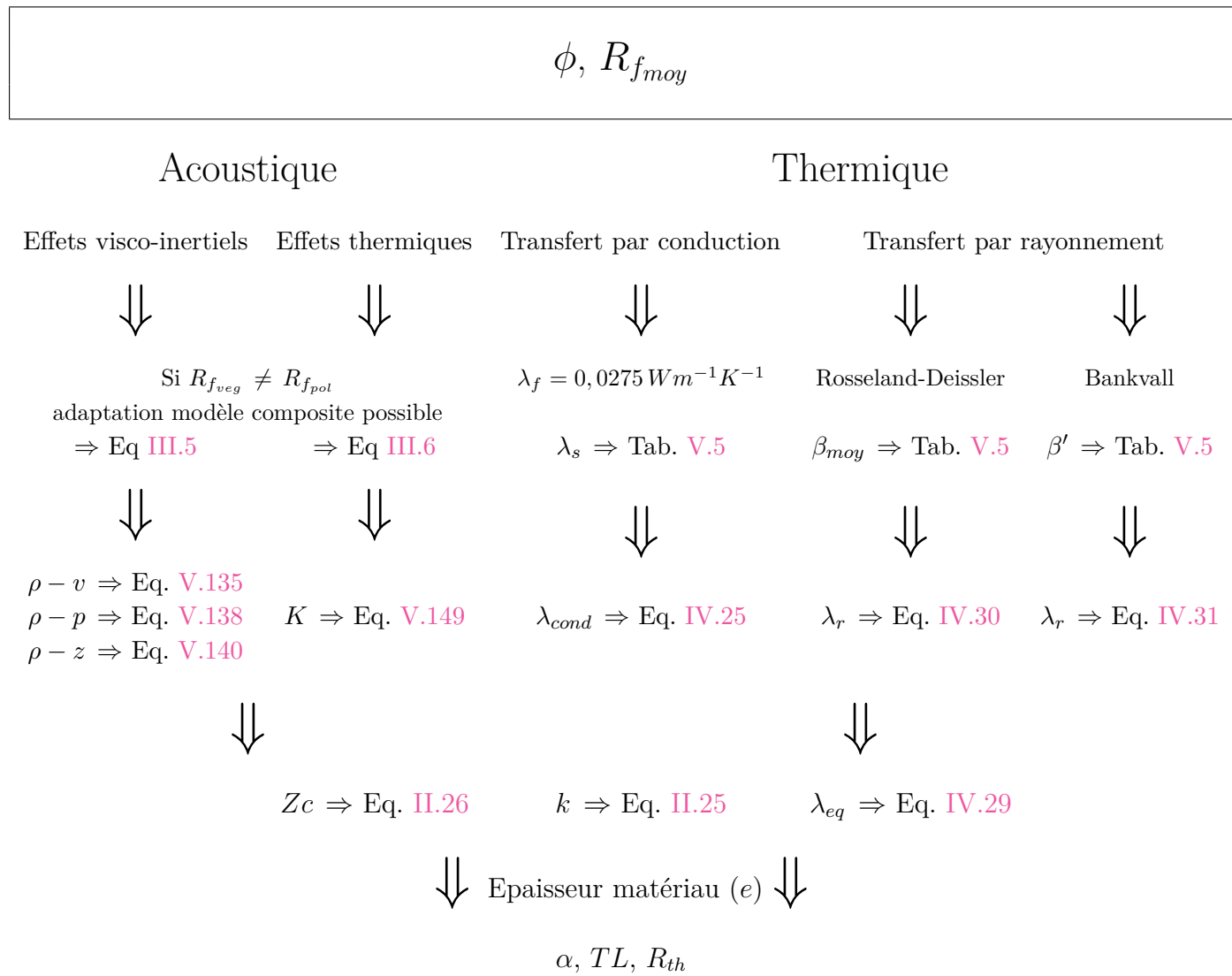
Cette procédure est détaillée selon les deux modes de dissipation (visco-inertiels et thermiques) conduisant aux propriétés acoustiques et deux transferts de chaleur au sein des matériaux par conduction et rayonnement conduisant aux propriétés thermiques.

#### 4.1.1 Dissipation acoustique par effets visco-inertiels et thermiques

Le paramètre intrinsèque qui matérialise la prise en compte des effets visco-inertiels au sein de la phase fluide des matériaux fibreux est la densité dynamique  $\rho$ . La procédure conjointe propose sa détermination suivant trois approches. Les deux premières en flux ( $v$ ) et en pression ( $p$ ) reposent sur l'hypothèse fondamentale de consistence énergétique des modèles d'homogénéisation micro-macro. La troisième, ( $z$ ), repose sur une condition de vorticité nulle, dont il a été montré à la Section 2.3 qu'elle était physiquement adapt  e.

Les analyses et validations de ces différentes approches pour le cas des laines végétales ont montré que l'approche en pression ( $p$ ) conduisait aux prédictions les plus proches des caract  -

Matériau fibreux



**Tableau V.4** – Synthèse de la procédure de modélisation conjointe acoustique et thermique

risations expérimentales. Néanmoins, les deux autres approches restent valables et notamment celle reposant sur la condition de vorticité nulle qui donne des résultats extrêmement proches de ceux liés à l’approche en pression.

Le Tableau V.4 indique les équations de détermination des perméabilités dynamiques visco-inertielles pour les trois approches ( $\Pi - v, \Pi - p, \Pi - z$ ).  $\rho - v, \rho - p, \rho - z$  sont ensuite obtenus avec l’Equation II.11 qui relie  $\Pi$  à  $\rho$ .

Pour les effets dissipatifs thermiques, le paramètre représentatif est le module d'incompressibilité dynamique  $K$ . Le Tableau V.4 précise l'équation de détermination de la perméabilité dynamique thermique  $\Xi$ .  $K$  peut alors être calculé à partir de l'Equation II.15.

Dans le cas où la fraction volumique de fibres polymères est connue et où les rayons moyens des fibres végétales et polymères sont différents, il est possible d'adapter le modèle HAC cylindrique avec un modèle composite comme cela a été réalisé à la Section 4 du Chapitre III. En effet, les perméabilités visco-inertielles pour les fibres végétales et polymères ( $\Pi_{veg}$  et  $\Pi_{pol}$ ) sont déterminées à partir du modèle HAC cylindrique puis recomposées avec le modèle composite ( $\Pi_h$ ). La démarche est identique pour le module d'incompressibilité dynamique ( $K_h$ ) déterminé à partir de ( $K_{veg}$  et  $K_{pol}$ ).

La procédure décrite par le Tableau V.4 indique ensuite les équations qui conduisent à la détermination de l'impédance caractéristique ( $Zc$ ) et du nombre d'onde ( $k$ ) qui sont des paramètres intrinsèques au matériau. Enfin, avec l'épaisseur ( $e$ ) du matériau, il est possible de déterminer le coefficient d'absorption acoustique ( $\alpha$ ) et l'indice d'affaiblissement acoustique ( $TL$ ). Cependant, la détermination des deux paramètres intrinsèques  $\rho$  et  $K$  ouvre bien d'autres perspectives comme notamment la détermination de la célérité de l'onde sonore, des champs de pression et de vitesse au sein des matériaux, mais également les puissances visqueuses et thermiques dissipées.

### 4.1.2 Transferts par conduction et rayonnement

Pour appliquer la modélisation HAC cylindrique afin de déterminer la conductivité équivalente de conduction, il est nécessaire de connaître les conductivités spécifiques des phases fluide et solide. Pour la phase fluide, la valeur proposée pour tenir compte de la présence d'eau dans les matériaux, indiquée dans le Tableau V.4, s'appuie sur les travaux de [Bankvall 1973].

Pour la conductivité de la phase solide,  $\lambda_s$ , il est proposé d'utiliser les valeurs recensées dans le Tableau V.5. Il faut garder à l'esprit que ces valeurs s'appuient sur des estimations moyennes déterminées dans le cadre de cette thèse (Section 4.2.2 du Chapitre IV). Ces valeurs, qui restent indicatives, ne sont en aucun cas des valeurs caractérisées expérimentalement. Cependant, en l'absence de données expérimentales dans la littérature, elles permettent de donner des ordres de grandeur acceptables pour ces valeurs.

Il est à noter que pour  $\lambda_s$  les valeurs sont très proches de  $1 W.m^{-1}.K^{-1}$ , hormis pour le bois dont la valeur est légèrement plus basse.

Laine	$\lambda_s^\perp$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	$\beta_{moy}$ ( $m^2.kg^{-1}$ )	$\beta'$
Chanvre	1,00	9,4	9
Lin	1,03	11	6
Kénafe	0,94	12,6	4
Bois	0,78	17	3
Ouate cellulosique	0,96	12,5	5
Chanvre-lin-coton	0,97	12,5	7

**Tableau V.5** – Valeurs proposées pour l’application de la procédure conjointe acoustique et thermique, de conductivité de la phase solide et de coefficients  $\beta_{moy}$  et  $\beta'$  utilisés dans les modèles Rosseland-Deissler et Bankvall

Afin de prendre en compte le transfert de chaleur par rayonnement, il est proposé d’utiliser l’approche de Rosseland-Deissler ou celle de Bankvall pour déterminer la conductivité équivalente de rayonnement.

L’approche de Rosseland-Deissler repose sur un coefficient d’extinction  $\beta_{moy}$  et celle de Bankvall sur un coefficient de rayonnement  $\beta'$ . Comme pour la conductivité thermique de la phase solide, des valeurs indicatives de ces coefficients en fonction des matériaux sont proposées dans le Tableau V.5. Ces valeurs ne constituent pas une référence pour les laines végétales. Elles donnent un ordre de grandeur et des plages de valeurs pour ces coefficients. Pour  $\beta_{moy}$  cette plage correspond à  $9,4 - 12,6 m^2.kg^{-1}$ , hormis pour le bois dont la valeur est supérieure. Pour  $\beta'$  cette plage correspond à  $3 - 9$  avec la borne inférieure correspondant au bois.

La conductivité thermique équivalente est ensuite déterminée en faisant la somme des conductivités équivalentes de conduction et de rayonnement. Enfin, en prenant en compte l’épaisseur du matériau ( $e$ ), il est possible de déterminer la résistance thermique du matériau ( $R_{th} = e/\lambda_{eq}$ ).

Cette procédure conjointe peut à présent être appliquée au cas d’une laine végétale afin d’en évaluer sa pertinence.

## 4.2 Application de la procédure conjointe de modélisation des propriétés acoustiques et thermiques

Pour illustrer l’application de la procédure conjointe qui vient d’être exposée, celle-ci est appliquée au cas de la laine de lin (M) pour laquelle des valeurs expérimentales de porosité et de rayon moyen de fibres sont disponibles.

Dans le cadre de cet exemple et afin de valider les résultats par rapport aux données expé-

rimentales de la thèse, la procédure est appliquée afin de déterminer le coefficient d'absorption acoustique pour une gamme de fréquence caractéristique du domaine du bâtiment  $[0 - 5000 \text{ Hz}]$  et la conductivité thermique équivalente pour des masses volumiques comprises dans la plage  $[0 - 120 \text{ kg.m}^{-3}]$ .

Les données d'entrée pour la laine de lin (M) sont :

- $\phi = 98,3\%$
- $R_{f_{moy}} = 11,78 \mu\text{m}$

Pour la modélisation thermique, les paramètres complémentaires sont retenus en s'appuyant sur les valeurs indiquées dans le Tableau V.5. A savoir,  $\lambda_s = 1,03 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,  $\beta_{moy} = 11 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1} / \beta' = 6$ .

Les résultats sont présentés aux Figures V.14(a) et (b).

Ces modélisations peuvent être comparées aux modélisations expérimentales sur la plage de fréquences  $[143 - 1993 \text{ Hz}]$  pour l'absorption acoustique et pour neuf valeurs de conductivité thermique caractérisées sur la plage de masses volumiques  $[25,8 - 108,7 \text{ kg.m}^{-3}]$ .

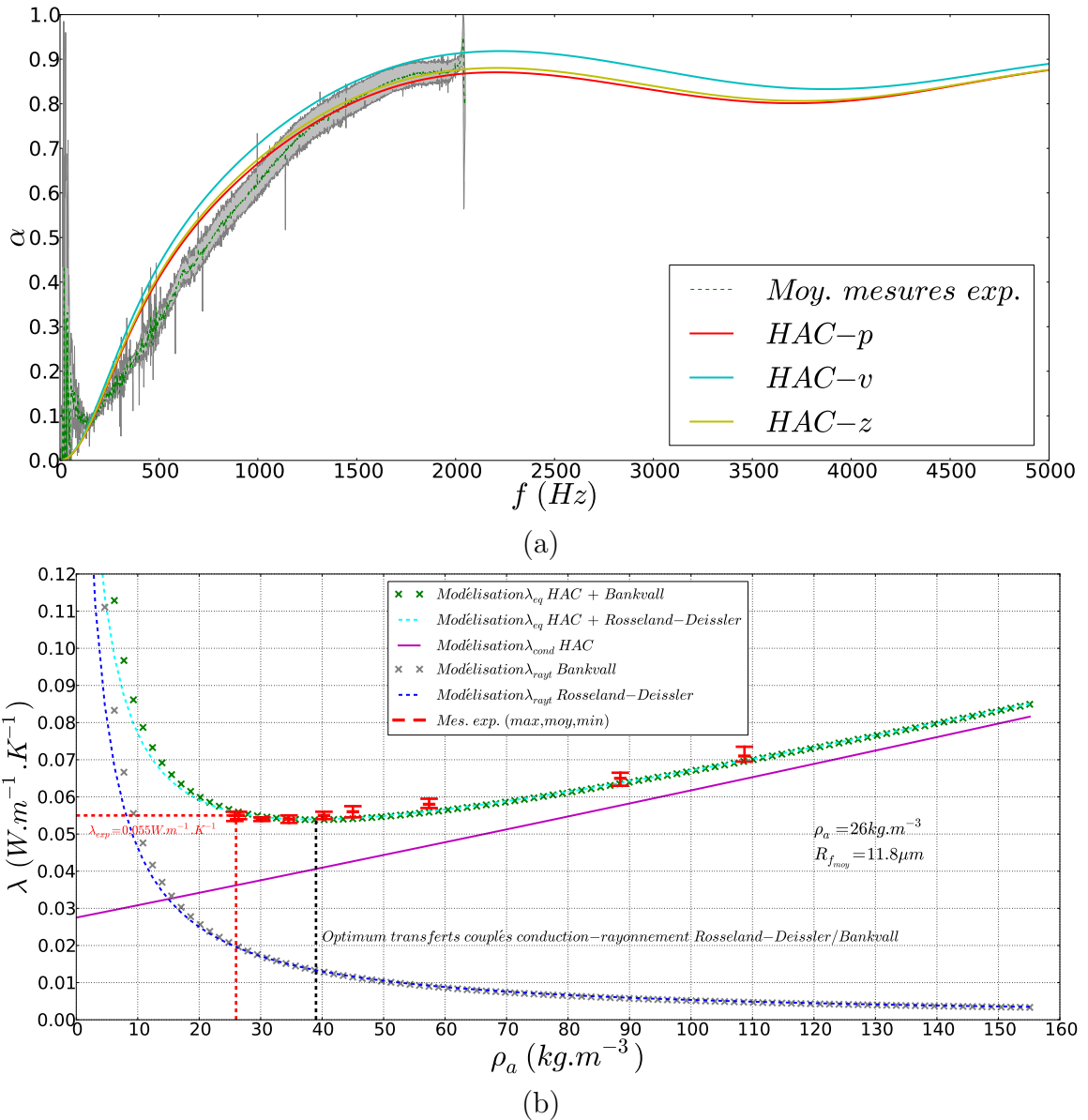
Laine	Réf.	Paramètre	Ecart relatif mes. exp. (%)	
			Moy	Max
Lin	M	$\alpha - p$	4,08	7,46
		$\alpha - v$	8,96	14,25
		$\alpha - z$	4,46	8,87
		$\lambda_{eq} - \text{Rosseland} - \text{Deissler}$	1,89	3,05
		$\lambda_{eq} - \text{Bankvall}$	1,84	3,17

**Tableau V.6** – Ecart relatif entre les modélisations de l'absorption acoustique et de la conductivité thermique équivalente et les valeurs caractérisées expérimentalement pour la laine de lin (M)

Les résultats de la procédure de modélisation HAC cylindrique conjointe acoustique et thermique sont très proches des caractérisations expérimentales comme l'attestent les écarts relatifs synthétisés dans le Tableau V.6. Le tableau présente les écarts relatifs moyens mais également les valeurs maximales des écarts relatifs entre modélisation et mesures expérimentales. On retrouve des résultats cohérents avec ceux présentés dans les Sections 5.2 du Chapitre IV et 2.3 de ce chapitre.

Pour l'absorption acoustique, c'est encore une fois l'approche en pression qui conduit aux résultats les plus proches des mesures expérimentales. Ainsi, c'est cette approche qui est retenue pour les investigations menées dans la suite de ce mémoire.

Pour la conductivité thermique, les deux approches de rayonnement sont équivalentes. Cependant, afin d'évaluer l'influence du rayon moyen des fibres, c'est l'approche de Bankvall qui



**Figure V.14** – Modélisation (a) du coefficient d'absorption acoustique et (b) de la conductivité équivalente de la laine de lin (M)

est sélectionnée pour illustrer une optimisation possible des performances de la laine (M).

Néanmoins, avant de déterminer dans quelle mesure une telle optimisation est possible, la résistivité de ce matériau est estimée à partir de l'Equation V.153.

Les valeurs obtenues sont légèrement supérieures à la valeur expérimentale mais restent dans le même ordre de grandeur notamment pour les approches  $p$  et  $z$ . Pour des valeurs faibles de résistivités, comme c'est le cas ici, une variation d' $1 \mu m$  de la valeur moyenne de rayon de

Laine	Réf.	$\sigma - p (N.m^{-4}.s)$	$\sigma - v (N.m^{-4}.s)$	$\sigma - z (N.m^{-4}.s)$	$\sigma_{exp} (N.m^{-4}.s)$
Lin	M	5532	7068	5849	3861

**Tableau V.7** – Valeurs de résistivité estimées à partir des 3 approches  $p$ ,  $v$  et  $z$  issues de la modélisation HAC cylindrique et valeur de résistivité caractérisée expérimentalement pour la laine de lin (M)

fibres peut entraîner des écarts de résistivité de l'ordre de  $1000 N.m^{-4}.s$ .

A présent que la procédure de modélisation HAC cylindrique conjointe acoustique et thermique a été appliquée avec succès, un exemple d'optimisation paramétrique est investigué pour la laine (M).

### 4.3 Possibilité d'optimisation conjointe des performances acoustiques et thermiques

L'objectif de cette section est d'illustrer cette possibilité d'optimisation des performances acoustiques et thermiques à travers un exemple appliqué à la laine de lin (M). Ainsi, à partir d'une analyse paramétrique de la porosité, ainsi qu'une valeur moyenne de rayon de fibres et en prenant en compte les contraintes techniques liées à ces paramètres (dans le cas des laines végétales), l'objectif est d'aboutir à une amélioration de l'absorption acoustique et de la conductivité thermique de la laine (M).

A partir de la Figure V.14(b), on observe une valeur minimale de conductivité thermique (optimum de transferts couplés conduction-rayonnement) pour  $\rho_a = 39 kg.m^{-3}$ . Cette valeur est légèrement plus élevée que la masse volumique d'origine du matériau ( $\rho_a = 25,8 kg.m^{-3}$ ).

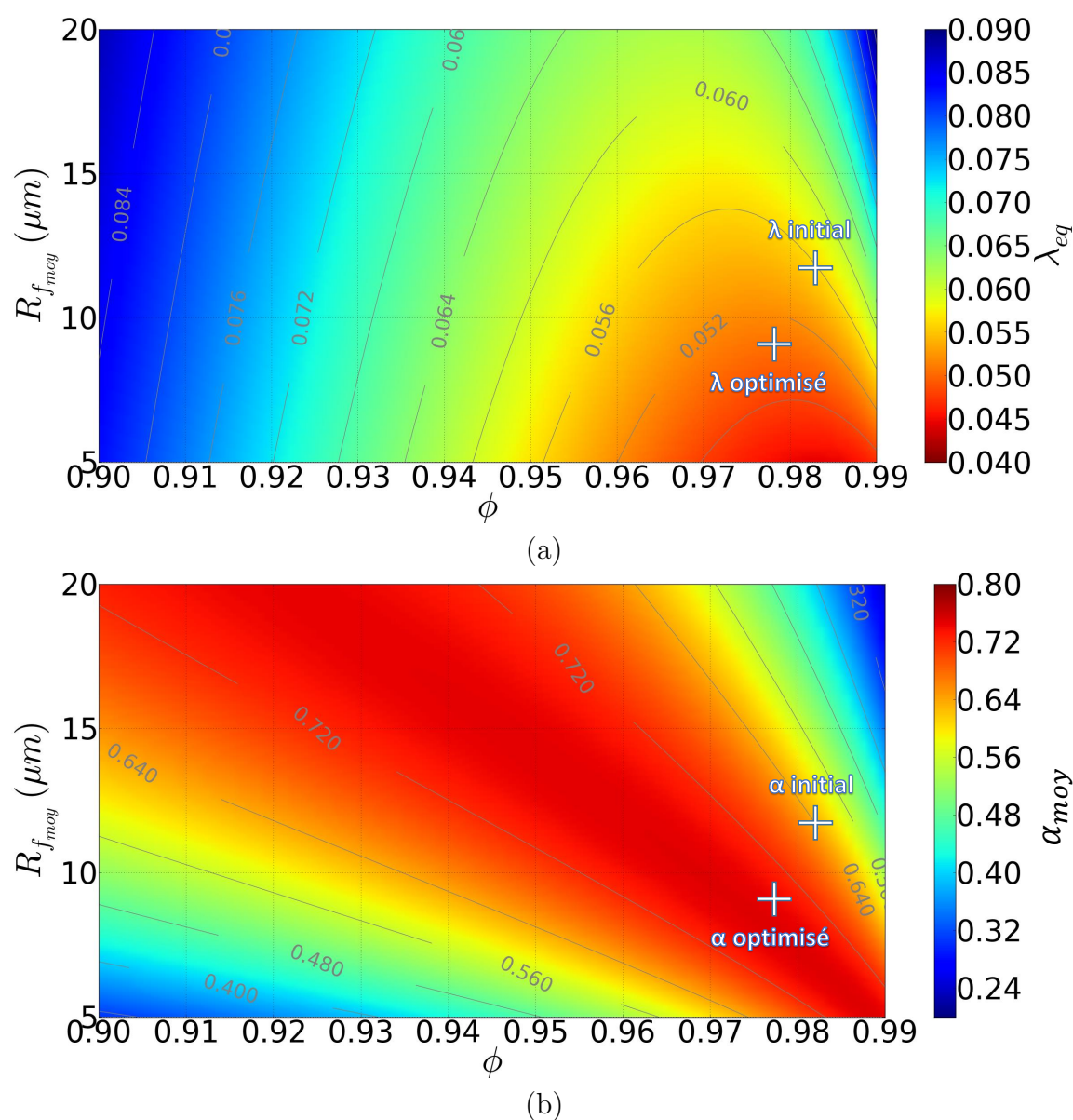
Pour cette valeur, l'influence du transfert thermique par rayonnement est plus importante, de l'ordre de 35%, ce qui conduit à une valeur de conductivité thermique qui peut être légèrement supérieure à celle de l'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement. De plus, cette valeur d'optimum de transferts couplés conduction-rayonnement est également liée à la valeur moyenne de rayon de fibres.

Ainsi, pour illustrer l'influence de la porosité et du rayon moyen de fibres, le graphe présenté à la Figure V.15(a) est tracé. Il détermine les valeurs de conductivités thermiques équivalentes pour les plages de variations suivantes :

- $[0, 90 - 0, 99]$  pour  $\phi$  ;
- $[5 - 20 \mu m]$  pour  $R_{f_{moy}}$ .

Pour obtenir une diminution de la conductivité thermique de la laine (M), il est nécessaire de diminuer la valeur moyenne des rayons de fibres, comme l'illustre la Figure V.15. Néan-



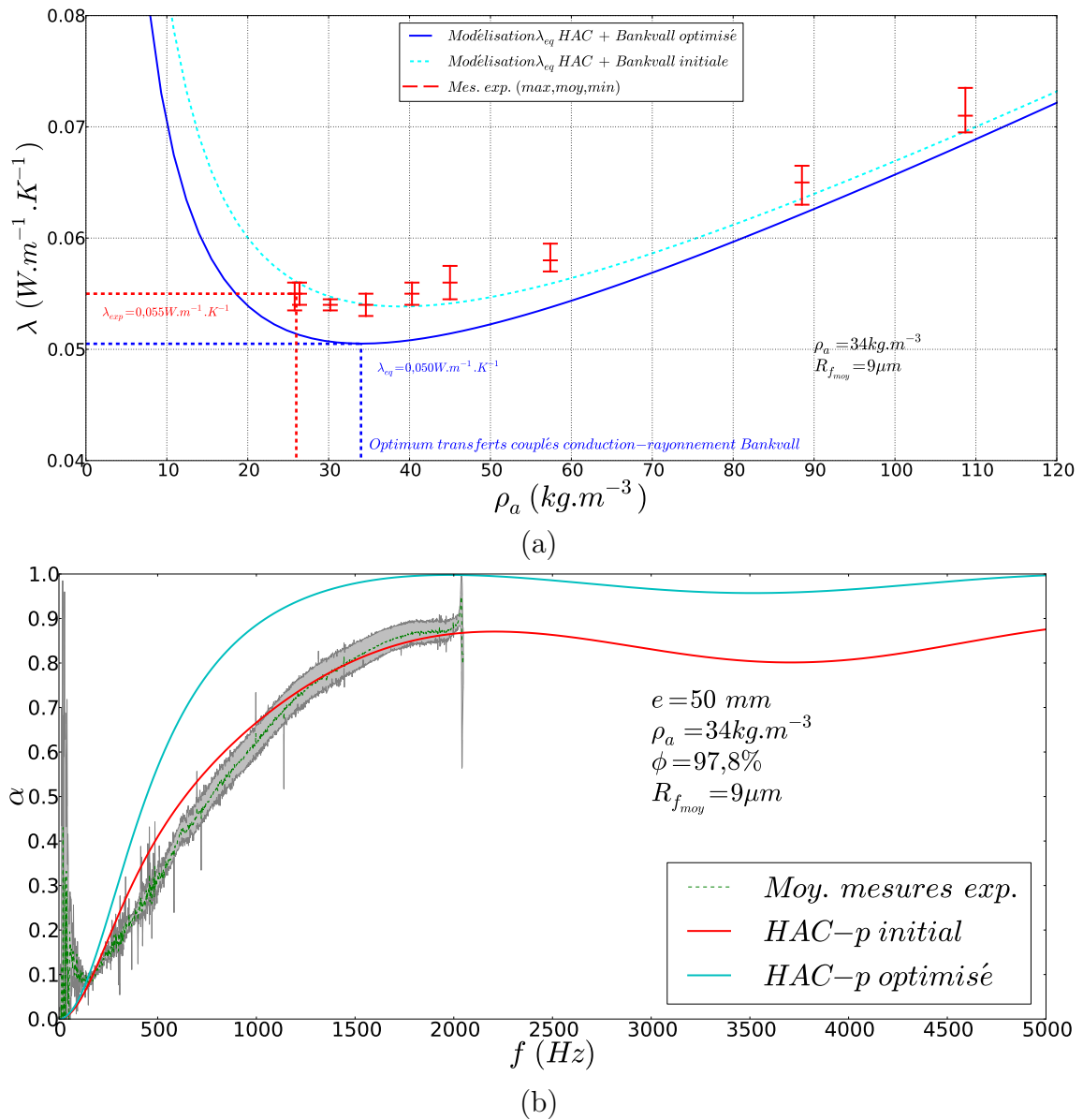


**Figure V.15** – (a) Valeurs de conductivités thermiques équivalentes pour la laine de lin (M) en fonction de la porosité et du rayon moyen de fibres déterminées à partir de la modélisation couplée HAC cylindrique-Bankvall, (b) Valeurs moyennes d’absorption acoustique (plage de fréquence  $[0 - 5000 Hz]$ ) pour la laine de lin (M) en fonction de la porosité et du rayon moyen de fibres déterminées à partir de la modélisation HAC cylindrique en dynamique

moins, des contraintes techniques s’appliquent à la valeur de ce paramètre. Les résultats de la caractérisation des tailles de fibres menée à la Section 2.1 du Chapitre III ont montré que pour la laine de chanvre-lin-coton (P), des valeurs de l’ordre de  $9 \mu m$  étaient réalisables. Ainsi, c’est cette valeur qui est retenue pour cet exemple.

## V.4 Synthèse et analyse de l'approche conjointe acoustique et thermique

On peut ainsi identifier à partir de la Figure V.15(a), la valeur de porosité correspondant à la conductivité thermique la plus faible. Cette dernière est obtenue pour  $\phi = 97,8\%$ , soit une masse volumique apparente pour la laine (M)  $\rho_a \simeq 34 \text{ kg.m}^{-3}$ .



**Figure V.16** – (a) Conductivité thermique de la laine de lin (M) optimisée par la procédure conjointe en fonction de la masse volumique, (b) Coefficient d'absorption de la laine de lin (M) optimisé par la procédure conjointe en fonction de la masse volumique

Pour l'absorption acoustique, la même démarche est mise en œuvre. Ainsi, la Figure V.15(b) représente des valeurs moyennes d'absorption acoustique déterminées pour des fréquences com-

prises dans la plage  $[0 - 5000 \text{ Hz}]$ . Elle montre l'influence de la porosité et du rayon moyen de fibres sur l'absorption acoustique.

En fixant  $R_{f_{\text{moy}}} = 9 \mu\text{m}$ , les valeurs optimales de porosité sont comprises dans la plage  $[97,1 - 97,9\%]$ . La valeur  $\phi = 97,8\%$  identifiée pour la conductivité thermique se trouve dans cette plage. Ainsi, c'est également cette valeur qui est retenue pour l'optimisation de l'absorption acoustique.

La procédure d'approche conjointe (Tableau V.4) est à présent mise en œuvre pour ces nouvelles données d'entrée. Les résultats sont présentés aux Figures V.16(a) et (b), ce qui permet d'apprécier visuellement le gain obtenu pour les performances en isolation thermique et en absorption acoustique. Pour l'isolation thermique, il est possible d'obtenir un gain de 10% en abaissant la conductivité thermique de  $0,055 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  à  $0,050 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Pour l'absorption acoustique, l'optimisation conduit à une augmentation moyenne sur la plage de fréquences  $[0 - 5000 \text{ Hz}]$  de l'ordre de 19%.

Même si un seul exemple a été exposé dans le cadre de ce mémoire, il permet de montrer que l'application de la procédure conjointe acoustique et thermique développée conduit à des résultats fiables. De plus, il illustre la possibilité d'optimiser conjointement les performances acoustiques et thermiques des laines végétales.

## 5 Conclusion

En s'appuyant sur l'objectif d'approche conjointe acoustique et thermique, une méthode de modélisation des propriétés acoustiques des matériaux fibreux reposant sur les mêmes principes que celle établie pour leurs propriétés thermiques a été développée en dynamique.

Cette méthode HAC cylindrique pour l'acoustique consiste à déterminer des solutions analytiques possibles à partir des lois de comportements macroscopiques établies rigoureusement par l'HSP en respectant le principe de consistence énergétique.

Pour cela, il est nécessaire de simplifier le motif élémentaire à l'échelle microscopique en conservant les spécificités du caractère fibreux des matériaux modélisés. Ainsi, une inclusion générique biphasique de géométrie cylindrique est définie comme élément de base de la méthode HAC développée.

Après établissement des fonctions relatives aux champs de vitesse, pression et température, l'application des conditions aux limites conduit à deux solutions possibles. Ces approches dites en flux et en pression sont complétées par une approche reposant sur une condition physiquement acceptable de vorticité nulle remplaçant la condition de consistence énergétique.

La modélisation HAC cylindrique ainsi développée a ensuite été validée pour ces trois approches par comparaison des paramètres intrinsèques liés aux effets de visco-inertiels (densité dynamique) et aux effets thermiques (module d'incompressibilité dynamique) avec les données expérimentales recueillies au cours de la thèse. Néanmoins, ce sont les approches en pression et s'appuyant sur une condition de vortacité nulle qui conduisent aux prédictions les plus fiables.

Afin de compléter l'évaluation de l'approche HAC cylindrique, des relations de passage entre cette approche reposant sur la modélisation de la microstructure des matériaux et les modélisations fluide-équivalents reposant sur la modélisation des pores ont été investiguées. L'analyse de ces relations conduit à valider les comportements de la densité dynamique et du module d'incompressibilité à basses et hautes fréquences.

Cette approche est ensuite regroupée avec les autres éléments développés dans tous les chapitres précédents pour constituer une procédure globale et inédite d'approche conjointe acoustique et thermique destinée aux matériaux fibreux. Cette procédure qui apporte une réponse concrète à la problématique de la thèse, a été appliquée et validée pour le cas d'une laine de lin. Enfin, un exemple a permis de montrer que l'optimisation des performances acoustiques et thermiques est possible et notamment pour les laines végétales utilisées en tant qu'isolants du bâtiment.



### Contribution de la thèse

Dans le cadre de ce travail de thèse, j'ai mené des investigations scientifiques sur des isolants, pour le bâtiment, fabriqués à partir de fibres végétales (provenant de plantes, graines ou fruits). Afin d'assurer la cohésion des laines végétales, des fibres polymères (généralement 10 à 20% en masse) sont incorporées au squelette des matériaux. Ainsi, ces matériaux se distinguent des isolants conventionnels sur de nombreux points. En effet, les fibres végétales se caractérisent par une grande variabilité de leur morphologie et de leurs dimensions, ainsi que par un caractère hygroscopique, qu'elles confèrent aux matériaux. De plus, les laines végétales sont des matériaux biosourcés, capables de stocker du dioxyde de carbone atmosphérique, leur permettant ainsi d'apporter des réponses dans la prise en compte des problématiques environnementales. Enfin, ce sont des matériaux également caractérisés par une forte porosité, un caractère anisotrope et des performances acoustiques et thermiques à fort potentiel.

Néanmoins, ces matériaux dont les spécificités sont bien souvent méconnues, ont nécessité des investigations pour enrichir les connaissances scientifiques et techniques les concernant et promouvoir la filière des isolants fibreux biosourcés.

C'est pourquoi, mon travail de thèse s'est focalisé sur une approche conjointe novatrice des propriétés acoustiques et thermiques des laines végétales. Afin de répondre aux objectifs liés à la problématique de ma thèse, mes travaux se sont appuyés sur trois étapes principales : la caractérisation expérimentale des panneaux de laines végétales, la modélisation de leurs propriétés acoustiques et thermiques et une synthèse globale des résultats et développements permettant de bâtir une procédure conjointe utilisable pour l'optimisation des performances acoustiques et thermiques des isolants fibreux.

Les nombreux résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de ma thèse, relatifs à la fois à la caractérisation des paramètres de la microstructure des matériaux et de leurs propriétés acoustiques et thermiques, constituent des éléments permettant de compléter et d'enrichir les données de la littérature. De plus, un certain nombre de résultats originaux ont été obtenus, notamment concernant les relevés de distributions de fibres qui illustrent le degré d'hétérogénéité variable des fibres végétales et les différences entre les familles dont elles sont issues. Les résultats ont également mis en exergue le rôle joué par les fibres dans les grandeurs caractéristiques et les propriétés étudiées. La caractérisation de l'absorption acoustique et de la conductivité thermique des laines végétales a montré leur niveau de performances élevé, ainsi que les larges gammes de valeurs possibles. Pour la conductivité thermique, le développement d'un dispositif de mesure en régime permanent a permis d'obtenir des résultats cohérents avec ceux obtenus en régime transitoire et ainsi de confirmer la robustesse de ces derniers. Il a également pu être souligné que la présence d'eau dans les matériaux n'a pas d'influence sur les performances acoustiques, contrairement aux performances thermiques. L'adaptation des dispositifs expérimentaux afin de réaliser des mesures en compression 1D a permis également de confirmer le rôle qui pouvait être joué par la masse volumique dans l'optimisation des matériaux.

Dans le cadre de la modélisation des propriétés des laines végétales, trois contributions majeures, s'appuyant sur des méthodes d'homogénéisation micro-macro, ont été adaptées et développées dans le cadre de mes travaux de thèse. La première approche de modélisation, relative à l'absorption acoustique, repose sur le couplage entre le modèle de Tarnow et un modèle composite. Elle conduit à la prise en compte des deux types de fibres (végétales et polymères) présentes dans les laines végétales et apporte une plus-value, dès lors que les rayons de ces deux types de fibres sont différents. Le second modèle relatif à la conductivité thermique et le troisième lié à l'absorption acoustique en dynamique reposent sur la même approche HAC. Ils s'appuient sur une géométrie cylindrique permettant de prendre en compte le caractère anisotrope des laines végétales et sur un motif générique à l'échelle de la microstructure simplifié mais permettant de prendre en compte une valeur moyenne de rayon de fibres. Dans le cas thermique, l'approche est couplée à un modèle permettant la prise en compte des effets de transfert thermique par rayonnement qui ont une influence sur la conductivité thermique équivalente jusqu'à des valeurs de masses volumiques relativement élevées (de l'ordre de  $100 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Pour la modélisation HAC acoustique, la condition de consistence énergétique conduit à la détermination de deux solutions possibles pour l'absorption acoustique des matériaux fibreux. Elles sont complétées par une troisième solution s'appuyant sur une condition physiquement acceptable

---

de vorticité nulle. Ces approches ont ensuite été validées par comparaisons avec les données expérimentales recueillies au cours de ma thèse. D'autres approches de modélisation ont été mises en œuvre dans le cadre de mes travaux de thèse. Ainsi, l'utilisation de modèles classiques pour les matériaux poroélastiques a montré qu'ils étaient adaptés au cas des laines végétales notamment dans la prise en compte du comportement élastique, de l'approche en fluide équivalent, ou pour la compression.

Enfin, la synthèse de tous ces travaux conduit à l'identification de deux paramètres communs aux propriétés d'absorption acoustique et de conductivité thermique équivalente : la porosité et une valeur moyenne de rayon de fibres. À partir de ces deux données d'entrées caractéristiques de la microstructure des laines végétales, une procédure de modélisation conjointe acoustique et thermique est construite en s'appuyant sur les trois modèles développés dans le cadre de ma thèse. Cette procédure conjointe permet d'apporter une réponse à la problématique de ma thèse en offrant un outil utilisable pour la mise en œuvre de méthodes d'optimisation des performances acoustiques et thermiques des matériaux fibreux. Un exemple de modélisation illustre à la fin du mémoire cette possibilité d'optimisation pour le cas d'une laine végétale.

## Perspectives

Les travaux que j'ai menés dans le cadre de ce travail de thèse ont contribué à apporter des réponses concernant le développement d'une approche conjointe acoustique et thermique afin d'optimiser les laines végétales du bâtiment. Néanmoins, ces travaux ont aussi mis en évidence certaines limites concernant les hypothèses formulées et les modélisations associées et ont conduit également à soulever de nouvelles questions. Tous ces points constituent ainsi de nouvelles perspectives de recherche.

Même si de nombreux matériaux fabriqués à partir de plusieurs types de fibres différentes ont été étudiés dans le cadre de ma thèse, les investigations sont encore à poursuivre afin de continuer à capitaliser des données concernant les propriétés des isolants fibreux biosourcés, mais également concernant les paramètres spécifiques de leur microstructure.

En ce qui concerne le relevé manuel des distributions de rayons de fibres à partir des images MEB, le travail s'est avéré être un exercice long et fastidieux. Les tentatives d'automatisation du traitement des images avec des logiciels de traitement d'images n'ont pas abouti à des résultats satisfaisants. Il pourrait donc être pertinent dans le cas des fibres végétales d'utiliser des techniques de deep learning afin de conduire à la reconnaissance des différents types de fibres, ainsi



que de leurs hétérogénéités et défauts. Cela pourrait également offrir l'opportunité de relever d'autres paramètres comme la longueur des fibres ou leur orientation.

Ce paramètre d'orientation des fibres n'a pas été pris en compte dans le cadre de ma thèse mais pourrait constituer un élément important afin de ne pas se limiter à l'hypothèse de flux (thermique ou acoustique) perpendiculaire ou parallèle aux fibres. Cet aspect d'orientations des fibres peut constituer un levier supplémentaire dans l'optimisation des performances acoustiques et thermiques des matériaux fibreux.

En première approximation, seules des valeurs moyennes arithmétiques de rayon de fibres ont été considérées dans le cadre de mes travaux de thèse. Aussi, afin de mieux retranscrire le caractère hétérogène des fibres végétales, des investigations complémentaires sont à mener pour remplacer ces valeurs par des modèles de distributions de rayons de fibres, notamment par des lois log-normales comme cela a été montré dans ma thèse.

En ce qui concerne la conductivité spécifique de la phase solide, le manque de données expérimentales fiables constitue une limite à la validation des données indirectes obtenues par inversion des modèles. Compte tenu de la difficulté expérimentale à caractériser directement ce paramètre, d'autres techniques alternatives méritent d'être investiguées pour sa détermination.

Le phénomène de transfert thermique par rayonnement est lié notamment à la taille et à l'orientation des fibres dans le matériau. Ainsi, le développement d'une modélisation de ce dernier à partir d'une approche HAC cylindrique peut être envisagé. Le modèle HAC thermique pourrait alors être plus complet avec la prise en compte des contributions dues à la conduction et au rayonnement dans la détermination de la conductivité thermique équivalente des matériaux fibreux.

D'autre part, dans le développement du modèle HAC thermique, il n'a pas été considéré de contacts partiels entre les fibres. Ainsi, la prise en compte de l'influence de ces contacts dans la modélisation de la conductivité thermique peut constituer un axe d'amélioration de l'approche HAC cylindrique.

Pour la modélisation HAC acoustique, une détermination analytique des limites basses et hautes fréquences des trois solutions obtenues dans le cadre de ma thèse pourrait également permettre de faire des liens avec les paramètres acoustiques issus des modèles fluide équivalent. Cela serait fait en vue d'établir des relations de ces paramètres à partir de la taille des fibres et de la porosité des matériaux.

Tous ces éléments relatifs à des améliorations ou à de nouvelles investigations scientifiques confèrent à la procédure d'approche conjointe développée dans le cadre de cette thèse de belles perspectives d'évolution.

---

## Références bibliographiques

---

- [Abot 2010] A. Abot. *caractérisation des fibres longues de chanvre (Cannabis sativa) en vue de leurs utilisations dans des matériaux composites*. Thèse de doctorat, Poitiers, 2010.
- [ADEME 2018a] ADEME. *Climat, Air et Energie : chiffres clés - édition 2018*. Rapport technique, ADEME, 2018.
- [ADEME 2018b] ADEME. *Un air sain chez soi. Des conseils pour préserver votre santé - Edition septembre 2018*, 2018.
- [Allard & Atalla 2009] J-F. Allard et N. Atalla. *Propagation of sound in porous media : modelling sound absorbing materials*. Wiley, Chichester, 2. ed édition, 2009. OCLC : 699014950.
- [Almeida *et al.* 2018] G. Almeida, R. Rémond et P. Perré. *Hygroscopic behaviour of lignocellulosic materials : Dataset at oscillating relative humidity variations*. *Journal of Building Engineering*, vol. 19, p. 320–333, Septembre 2018.
- [AQC 2016] AQC. *Isolants biosourcés : points de vigilance*. Rapport technique, Agence Qualité Construction, 2016.
- [Arenas & Asdrubali 2018] J.P. Arenas et F. Asdrubali. *Eco-Materials with Noise Reduction Properties*. In Leticia Myriam Torres Martínez, Oxana Vasilievna Kharissova et Boris Ildusovich Kharisov, éditeurs, *Handbook of Ecomaterials*, p. 1–26. Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [Arnaud & Cérezo 2001] L. Arnaud et V. Cérezo. *Qualification physique des matériaux de construction à base de chanvre*. Rapport technique CNRS 0711462, ENTPE, 2001.
- [Asdrubali *et al.* 2012] F. Asdrubali, S. Schiavoni et K. Horoshenkov. *A review of sustainable materials for acoustic applications*. *Building Acoustics*, vol. 19, no. 4, p. 283–312, 2012.

## Références bibliographiques

---

- [Asdrubali *et al.* 2015] F. Asdrubali, F. D’Alessandro et S. Schiavoni. *A review of unconventional sustainable building insulation materials*. Sustainable Materials and Technologies, vol. 4, p. 1–17, Juillet 2015.
- [ASTM D-5930 2017] ASTM D-5930. *ASTM D-5930 : Standard Test Method for Thermal Conductivity of Plastics by Means of a Transient Line-Source Technique*, 2017.
- [Auriault *et al.* 1985] J-L. Auriault, L. Borne et R. Chambon. *Dynamics of porous saturated media, checking of the generalized law of Darcy*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 77, no. 5, p. 1641–1650, 1985.
- [Auriault 1980] J-L. Auriault. *Dynamic behaviour of a porous medium saturated by a newtonien fluid*. International Journal of Engineering Science, vol. 18, no. 6, p. 775–785, 1980.
- [Auriault 1991] J-L. Auriault. *Heterogeneous medium. Is an equivalent macroscopic description possible ?* International Journal of Engineering Science, vol. 29, no. 7, p. 785–795, 1991.
- [Bankvall 1973] C. Bankvall. *Heat Transfer in Fibrous Materials*. Journal of Testing and Evaluation, vol. 1, no. 3, p. 235–243, 1973.
- [Bécot *et al.* 2011] F-X. Bécot, L. Jaouen et F. Chevillotte. *Analytical modeling of deformable porous composites*. In Proceedings of Forum Acusticum, 2011.
- [Bensoussan *et al.* 1978] A. Bensoussan, J.L. Lions et G. Papanicolaou. *Asymptotic Analysis for Periodic Structures*, volume 5. North Holland, 1978.
- [Beranek 1942] L. Beranek. *Acoustic impedance of porous materials*. Journal of the acoustical Society of America, vol. 13, p. 248–260, 1942.
- [Berardi & Iannace 2015] U. Berardi et G. Iannace. *Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications*. Building and Environment, vol. 94, p. 840–852, Décembre 2015.
- [Berardi & Iannace 2017] U. Berardi et G. Iannace. *Predicting the sound absorption of natural materials : Best-fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant*. Applied Acoustics, vol. 115, p. 131–138, Janvier 2017.
- [Berdichevsky & Cai 1993] A.L. Berdichevsky et Z. Cai. *Perform permeability predictions by self consistent method and finite element simulation*. Polym. Compos., vol. 14, no. 2, p. 132–143, 1993.
- [Biot 1956a] M-A. Biot. *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range*. The Journal of the acoustical Society of america, vol. 28, no. 1, p. 168–178, 1956.
- [Biot 1956b] M-A. Biot. *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range*. The Journal of the acoustical Society of america, vol. 28, no. 2, p. 179–191, 1956.

- 
- [Blinet *et al.* 2018] T. Blinet, T. Falwisanner, P. Glé, C. Guigou-Carter et E. Kadri. *Propriétés acoustiques des matériaux biosourcés*. Rapport technique DSC/2018-123/CG/ME, DGALN - DHUP, 2018.
- [Boeglin & Veuillet 2005] N. Boeglin et D. Veuillet. *Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)*. Rapport technique, ADEME, 2005.
- [Bomberg & Klarsfeld 1983] M. Bomberg et S. Klarsfeld. *Semi-empirical model of heat transfer in dry mineral fiber insulations*. Journal of Thermal Insulation, vol. 6, no. 3, p. 156–173, 1983.
- [Bories *et al.* 2008] S. Bories, A. Mojtabi, M. Prat et M. Quintard. *Transferts de chaleur dans les milieux poreux Conduction, convection, rayonnement*. Techniques de l'ingénieur Transferts thermiques, vol. base documentaire : TIB214DUO., no. ref. article : be8250, 2008. fre.
- [Bories 1987] S. Bories. *Natural Convection in Porous Media*. In Bear and Corapcioglu, editeur, Advances in Transport Phenomena in Porous Media. NATO ASI Series (Series E - Applied Sciences), volume 128. Springer, Dordrecht, 1987.
- [Bos *et al.* 2002] H.L. Bos, M.J.A. Van Den Oever et O.C.J.J. Peters. *Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites*. Journal of Materials Science, vol. 37, no. 8, p. 1683–1692, 2002.
- [Bouloc 2006] P. Bouloc. *Le chanvre industriel : production et utilisations*. France agricole édition, 2006.
- [Boutin & Geindreau 2008] C. Boutin et C. Geindreau. *Estimates and bounds of dynamic permeability of granular media*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 124, no. 6, p. 3576–3593, Décembre 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, no. 3, 036313 p., 2010.
- [Boutin *et al.* 1998] C. Boutin, P. Royer et J-L. Auriault. *Acoustic absorption of porous surfacing with dual porosity*. International Journal of Solids and Structures, vol. 35, no. 34-35, p. 4709–4737, Décembre 1998.
- [Boutin 1996] C. Boutin. *Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé : modélisation par méthode auto-cohérente*. Materials and Structures, no. 29, p. 609–615, 1996.
- [Boutin 2000] C. Boutin. *Study of permeability by periodic and self-consistent homogenisation*. European Journal of Mechanics - A/Solids, vol. 19, no. 4, p. 603–632, 2000.
- [Bruneau 1998] M. Bruneau. *Manuel d'acoustique fondamentale*. Hermes, 1998.
- [Buratti *et al.* 2016] C Buratti, E. Belloni, E. Lascaro, G.A. Lopez et P. Ricciardi. *Sustainable panels with recycled materials for building applications : environmental and acoustic characterization*. Energy Procedia, vol. 101, p. 972–979, 2016.
-

## Références bibliographiques

---

- [Buratti *et al.* 2018] C. Buratti, E. Belloni, E. Lascaro, F. Merli et P. Ricciardi. *Rice husk panels for building applications : Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials*. *Construction and Building Materials*, vol. 171, p. 338–349, 2018.
- [C522 2016] ASTM C522. *ASTM C522 - 03(2016) - Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials*, 2016.
- [Campolina *et al.* 2012] B. Campolina, N. Dauchez, N. Atalla et O. Doutres. *Vibroacoustic modelling of aircraft double-walls with structural links using Statistical Energy Analysis (SEA)*. *Applied Acoustics*, vol. 73, p. 791–797, 2012.
- [Capon & Khelifi 2012] G. Capon et S. Khelifi. *Traitement au feu de panneaux isolants acoustiques en fibres de chanvre*, 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.
- [Castagnède *et al.* 2001] B. Castagnède, J. Tizianel, A. Moussatov, A. Aknine et B. Brouard. *Parametric study of the influence of compression on the acoustical absorption coefficient of automotive felts*. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIB-Mechanics*, vol. 329, no. 2, p. 125–130, 2001.
- [Cerema 2017] Cerema. *Le coût des matériaux biosourcés dans la construction. Etat de la connaissance 2016*. Rapport technique, DREAL Bretagne, 2017.
- [Chabaud 2015] C. Chabaud. *Les filières lin et chanvre au coeur des enjeux des matériaux biosourcés émergents*. Rapport technique 2015-34, CESE, 2015.
- [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 *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, no. 2, p. 910–916, 1991.
- [Chanvre 2017] Terres Inovia Chanvre. *Guide de culture : Chanvre 2017*, 2017.
- [Charlet *et al.* 2010a] K. Charlet, J-P. Jernot, J. Breard et M. Gomina. *Scattering of morphological and mechanical properties of flax fibres*. *Industrial Crops and Products*, vol. 32, no. 3, p. 220–224, 2010.
- [Charlet *et al.* 2010b] K. Charlet, J.P. Jernot, S. Eve, M. Gomina et J. Bréard. *Multi-scale morphological characterisation of flax : From the stem to the fibrils*. *Carbohydrate Polymers*, vol. 82, no. 1, p. 54–61, 2010.

- [Cheng & Vachon 1969] S.C. Cheng et R.I. Vachon. *The prediction of the thermal conductivity of two and three phase solid heterogeneous mixtures*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 12, p. 249–264, 1969.
- [Chéné 2013] J-B. Chéné. *La problématique acoustique/thermique dans le bâtiment*. Paris, 2013.
- [CNB & ADEME 2016] CNB et ADEME. *Analyse bibliographique des travaux français et européens - Le coût social des pollutions sonores*. Rapport technique, 2016.
- [Collet & Pretot 2014] F. Collet et S. Pretot. *Thermal conductivity of hemp concretes : Variation with formulation, density and water content*. Construction and Building Materials, vol. 65, p. 612–619, Août 2014.
- [Collet et al. 2008] F. Collet, M. Bart, L. Serres et J. Miriel. *Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials*. Construction and Building Materials, vol. 22, no. 6, p. 1271–1280, Juin 2008.
- [Collet 2004] F. Collet. *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*. PhD Thesis, INSA-Rennes, 2004.
- [Colson et al. 2019] V. Colson, M. Bourebrab, M. Dalmais, O. Jadeau et C. Lanos. *Formulation of novel fire retardant additives for biobased insulation material*. p. 134–141, Belfast, UK, 2019. RILEM Publications.
- [Cérézo 2005] V. Cérézo. *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*. PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2005.
- [CSTB 2012] CSTB. *Guide technique spécialisé pour la constitution d'un dossier de demande d'Avis Technique : Isolants à base de fibres végétales ou animales*. Rapport technique, CSTB, 2012.
- [Dallel 2012] M. Dallel. *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : caractérisation physico-chimique de la fibre au fil*. PhD Thesis, Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2012.
- [Dauchez et al. 2002] N. Dauchez, M. Etchessahar et S. Sahraoui. *On measurement of mechanical properties of sound absorbing materials*. 5 p., 2002.
- [Deissler 1964] R.G. Deissler. *Diffusion approximation for thermal radiation in gases with jump boundary conditions*. Journal of Heat Transfert, vol. 86, p. 240–246, 1964.
- [Delannoy 2018] G. Delannoy. *Durabilité d'isolants à base de granulats végétaux*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2018.
- [Delany & Bazley 1970] M.E. Delany et E.N. Bazley. *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*. Applied acoustics, vol. 3, no. 2, p. 105–116, 1970.

## Références bibliographiques

---

- [Doutres *et al.* 2007] O. Doutres, N. Dauchez, J-M. Génevaux et O. Dazel. *Validity of the limp model for porous materials : A criterion based on the Biot theory*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 122, no. 4, p. 2038–2048, Octobre 2007.
- [Eitelberger & Hofstetter 2011] J. Eitelberger et K. Hofstetter. *Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point : A multiscale homogenization approach and its experimental validation*. Composites Science and Technology, vol. 71, no. 2, p. 134–144, Janvier 2011.
- [El Sawalhi *et al.* 2016] R. El Sawalhi, J. Lux et P. Salagnac. *Estimation of the thermal conductivity of hemp based insulation material from 3D tomographic images*. Heat and Mass Transfer, vol. 52, no. 8, p. 1559–1569, Août 2016.
- [El Sawalhi 2015] R. El Sawalhi. *Caractérisation expérimentale et modélisation multi-échelles des transferts de chaleur et de masse au sein d'isolants à structure fibreuse*. PhD Thesis, Université de La Rochelle, 2015.
- [Eriksson *et al.* 2007] E. Eriksson, A.R. Gillespie, L. Gustavsson, O. Langvall, M. Olsson, R. Sathre et J. Stendahl. *Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution*. Can. J. For. Res., no. 37, p. 671–681, 2007.
- [Farah 2018] B. Farah. *Effet de la compression sur les performances acoustiques et thermiques des laines végétales*. Mémoire de Master 2, Université de Bordeaux, 2018.
- [Faruk *et al.* 2012] O. Faruk, A.K. Bledzki, H-P. Fink et M. Sain. *Biocomposites reinforced with natural fibers*. Progress in Polymer Science, vol. 37, no. 11, p. 1552–1596, Novembre 2012.
- [FCBA 2012] FCBA. *Action 6a : Identification des freins normatifs et réglementaires à la prescription des matériaux biosourcés dans la construction*. Rapport technique, DHUP, 2012.
- [FCBA\_CSTB 2015] FCBA\_CSTB. *Durabilité des isolants biosourcés. Vers la création de classes d'emploi*. Rapport technique, DHUP, 2015.
- [Finck 1930] J.L. Finck. *Mechanism of heat flow in fibrous materials*. Bureau of Standards Journal of Research, vol. 6, p. 973–984, 1930.
- [Fouquet *et al.* 2015] M. Fouquet, A. Levasseur, M. Margni, A. Lebert, S. Lasvaux, B. Souyri, C. Buhé et M. Woloszyn. *Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings : Application to biogenic carbon and global warming assessment*. Building and Environment, vol. 90, p. 51–59, 2015.
- [Freivalde *et al.* 2014] L. Freivalde, S. Kukle, M. Andzs, E. Buksans et J. Gravitis. *Flammability of raw insulation materials made of hemp*. Composites Part B : Engineering, vol. 67, p. 510–514, Décembre 2014.
- [GIEC 2018] GIEC. *Global warming of 1.5°C*. 2018. OCLC : 1056192590.

- 
- [Glé 2013] P. Glé. *Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales-Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2013.
- [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, no. 4, p. 283–298, Avril 2010.
- [Gourlay 2014] E. Gourlay. *Caractérisation expérimentale des propriétés mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre*. PhD Thesis, ENTPE, 2014.
- [Goyal et al. 2008] R.K. Goyal, A.N. Tiwari et Y.S. Negi. *Microhardness of PEEK-ceramic micro-and nanocomposites : correlation with Halpin-Tsai model*. Materials Science and Engineering : A, vol. 491, no. 1-2, p. 230–236, 2008.
- [Gustafsson 1991] S.E. Gustafsson. *Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials*. Review of Scientific Instruments, vol. 62, no. 3, p. 797–804, 1991.
- [Gustavsson et al. 1994] M. Gustavsson, E. Karawacki et S.E. Gustafsson. *Thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensors. Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials*. Review of Scientific Instruments, vol. 65, no. 12, p. 3856–3859, 1994.
- [Hashin 1968] Z. Hashin. *Assessment of the self consistent scheme approximation : conductivity of particulate composites*. J Compos Mater, vol. 2, no. 3, p. 284–300, 1968.
- [He et al. 2018] M. He, C. Perrot, J. Guillemot, P. Leroy et G. Jacques. *Multiscale prediction of acoustic properties for glass wools : Computational study and experimental validation*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 143, no. 6, p. 3283–3299, Juin 2018.
- [Heberlé 2016] E. Heberlé. *Synthèse bibliographique des études sur la rénovation thermique du bâti ancien à l'aide de matériaux isolants biosourcés*. Rapport technique, Cerema, 2016.
- [Hill et al. 2009] Callum A. S. Hill, Andrew Norton et Gary Newman. *The water vapor sorption behavior of natural fibers*. Journal of Applied Polymer Science, vol. 112, no. 3, p. 1524–1537, Mai 2009.
- [Hobson et al. 2001] R.N. Hobson, D.G. Hepworth et D.M. Bruce. *Quality of Fibre Separated from Unretted Hemp Stems by Decortication*. Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 78, no. 2, 153\_158 p., 2001.
- [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*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 104, no. 3, p. 1198–1209, Septembre 2007.
-



## Références bibliographiques

---

- [Hosseini Fouladi *et al.* 2011] M. Hosseini Fouladi, M. Ayub et M. Jailani Mohd Nor. *Analysis of coir fiber acoustical characteristics*. Applied Acoustics, vol. 72, no. 1, p. 35–42, Janvier 2011.
- [Howells 1974] I.D. Howells. *Drag due to the motion of a Newtonian fluid through a sparse random array of small fixed objects*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 64, p. 449–485, 1974.
- [IFOP 2014] IFOP. *Les Français et les nuisances sonores. Ifop pour Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie*. Rapport technique RB/MCP 112427, IFOP, 2014.
- [Inovia 2017] Terres Inovia. *Guide de culture : lin oléagineux 2017*, 2017.
- [InterChanvre 2017] InterChanvre. *Plan filière de l'interprofession du chanvre*, 2017.
- [ISO 10534-2 2003] ISO 10534-2. *NF EN ISO 10534-2 Janvier 2003 - Détermination du facteur d'absorption acoustique et de l'impédance des tubes d'impédance - Partie 2 : méthode de la fonction de transfert*, 2003.
- [ISO 22007-2 2012] ISO 22007-2. *NF EN ISO 22007\_2. Plastiques - Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique - Partie 2 : méthode de la sourceplane transitoire (disque chaud)*, Mars 2012.
- [ISO 8302 1991] ISO 8302. *ISO 8302 : 1991. Isolation thermique - Détermination de la résistance thermique et des propriétés connexes en régime stationnaire - Méthode de la plaque chaude gardée*, 1991.
- [ISO 846 1997] ISO 846. *NF EN ISO 846 : 1997. Plastiques - Evaluation de l'action des micro-organismes*, 1997.
- [ISO9053-1 2018] ISO9053-1. *ISO 9053-1 :2018. Acoustique – Détermination de la résistance à l'écoulement de l'air – Partie 1 : Méthode statique*, 2018.
- [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.
- [Ji *et al.* 2014] R. Ji, Z. Zhang, L. Liu et X. Wang. *Development of the random simulation model for estimating the effective thermal conductivity of insulation materials*. Building and Environment, vol. 80, p. 221–227, Octobre 2014.
- [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.
- [Karamanos *et al.* 2004] A. Karamanos, A. Papadopoulos et D. Anastasellos. *Heat transfer phenomena in fibrous insulating materials*. In Proceedings of, 2004.
- [Karibati 2015] Karibati. *Avis d'expert : Matériaux biosourcés, gardiens du carbone*, 2015.
- [Kawabata & Rengasamy 2002] S. Kawabata et R.S. Rengasamy. *thermal conductivity of unidirectional fibre composites made from yarns and computation of thermal conductivity of yarns*. Indian Journal of Fibre & Textile Research, vol. 27, p. 217–223, 2002.

- [Kazatchenko *et al.* 2004] E. Kazatchenko, M. Markov et A. Mousatov. *Joint modeling of acoustic velocities and electrical conductivity from unified microstructure of rocks*. Journal of Geophysical Research, vol. 109, 2004.
- [Kerdudou *et al.* 2015] P. Kerdudou, J-B. Chéné, G. Jacqus, C. Perrot, S. Berger et P. Leroy. *A semi-empirical approach to link macroscopic parameters to microstructure of fibrous materials*. In The 44th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-Noise2015), 2015.
- [Keshavarz & Ohadi 2013] R. Keshavarz et A. Ohadi. *Effects of compression on sound absorption of transversely isotropic fibrous materials at oblique incidence*. Applied Acoustics, vol. 74, no. 3, p. 383–395, 2013.
- [Kino & Ueno 2008] N. Kino et T. Ueno. *Comparisons between characteristic lengths and fibre equivalent diameters in glass fibre and melamine foam materials of similar flow resistivity*. Applied Acoustics, no. 69, p. 325–331, 2008.
- [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.
- [Korjenic *et al.* 2011] A. Korjenic, V. Petránek, J. Zach et J. Hroudová. *Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources*. Energy and Buildings, vol. 43, no. 9, p. 2518–2523, Septembre 2011.
- [Korjenic *et al.* 2016] A. Korjenic, J. Zach et J. Hroudová. *The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions*. Energy and Buildings, vol. 116, p. 45–58, Mars 2016.
- [Kremensas *et al.* 2017] A. Kremensas, R. Stapulioniene, S. Vaitkus et A. Kairyte. *Investigations on Physical-mechanical Properties of Effective Thermal Insulation Materials from Fibrous Hemp*. Procedia Engineering, vol. 172, p. 586–594, 2017.
- [Krischer & Kroll 1956] O. Krischer et K. Kroll. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Springer verlag berlin édition, 1956.
- [Kueny 2013] R. Kueny. *Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2013.
- [Kymäläinen & Sjöberg 2008] H-R. Kymäläinen et A-M. Sjöberg. *Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations*. Building and Environment, vol. 43, no. 7, p. 1261–1269, Juillet 2008.
- [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.

## Références bibliographiques

---

- [Langlais & Klarsfeld 1997] C. Langlais et S. Klarsfeld. Isolation thermique à température ambiante. Bases physiques. Ed. Techniques Ingénieur, 1997.
- [Langlais & Klarsfeld 2004] C. Langlais et S. Klarsfeld. *Isolation thermique à température ambiante. Propriétés*. 28 p., 2004.
- [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, no. 3, p. 1366–1370, Mars 2003.
- [Lee *et al.* 2006] Y-M. Lee, R-B. Yang et S-S. Gau. *A generalized self-consistent method for calculation of effective thermal conductivity of composites with interfacial contact conductance*. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 33, no. 2, p. 142–150, Février 2006.
- [Lei *et al.* 2018] L. Lei, N. Dauchez et J.D. Chazot. *Prediction of the six parameters of an equivalent fluid model for thermocompressed glass wools and melamine foam*. Applied Acoustics, vol. 139, p. 44–56, Octobre 2018.
- [Levasseur *et al.* 2010] A. Levasseur, P. Lesage, M. Margni, L. Deschênes et R. Samson. *Considering Time in LCA : Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments*. Environmental Science & Technology, vol. 44, no. 8, p. 3169–3174, 2010.
- [Levasseur *et al.* 2012] A. Levasseur, P. Lesage, M. Margni, L. Deschenes et R. Samson. *Assesing temporary carbon sequestration and storage projects through land use, land-use change and forestry : comparison of dynamic life cycle assessment with ton-year approaches*. Clim. Change, no. 115, p. 759–776, 2012.
- [Lichtenecker 1924] K. Lichtenecker. *Der elektrische Leitungswiderstand künstlicher und natürlicher Aggregate*. Physikalische Zeitschrift, vol. 25, p. 169–181,193–204,226–233, 1924.
- [Lumia 2017] G. Lumia. *Bio-based insulation materials : an opportunity for the renovation of European residential building stock. Evaluation of carbon uptake benefits through a dynamic life cycle assessment (DLCA)*. PhD Thesis, 2017.
- [Luu *et al.* 2017a] H-T. Luu, R. Panneton et C. Perrot. *Effective fiber diameter for modeling the acoustic properties of polydisperse fiber networks*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 141, no. 2, p. EL96–EL101, Février 2017.
- [Luu *et al.* 2017b] H-T. Luu, C. Perrot et R. Panneton. *Influence of Porosity, Fiber Radius and Fiber Orientation on the Transport and Acoustic Properties of Random Fiber Structures*. Acta Acustica united with Acustica, vol. 103, no. 6, p. 1050–1063, Novembre 2017.
- [Luu 2016] H-T. Luu. *Multi-scale modeling of the sound dissipation in fabrics made of natural fibers*. PhD Thesis, Université de Sherbrooke, Quebec, Canada, 2016.

- [Lux *et al.* 2006] J. Lux, A. Ahmadi-Sénichault, C. Gobbé et C. Delisée. *Macroscopic thermal properties of real fibrous materials : Volume averaging method and 3D image analysis*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, no. 11, p. 1958–1973, 2006.
- [Lux 2005] J. Lux. *Comportement thermique macroscopique de milieux fibreux réels anisotropes : étude basée sur l'analyse d'images tridimensionnelles*. PhD Thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2005.
- [Martin 2014] N.A.M. Martin. *Contribution à l'étude de paramètres influençant les propriétés mécaniques de fibres élémentaires de lin : corrélation avec les propriétés de matériaux composites*. PhD Thesis, Université de Bretagne Sud, 2014.
- [Matar 2016] M. Matar. *Exploration de nouvelles voies pour l'ignifugation des polymères*. PhD Thesis, Université de Lorraine, 2016.
- [Mati-Baouche *et al.* 2014] N. Mati-Baouche, H. De Baynast, A. Lebert, S. Sun, C.J.S. Lopez-Mingo, P. Leclerc et P. Michaud. *Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan*. Industrial Crops and Products, 2014.
- [Maxwell 1873] J.C. Maxwell. *A treatise on electricity and magnetism*. Clarendon Press, vol. I, 598 p., 1873.
- [Mazian *et al.* 2018] B. Mazian, A. Bergeret, J-C. Benezet et L. Malhautier. *Influence of field retting duration on the biochemical, microstructural, thermal and mechanical properties of hemp fibres harvested at the beginning of flowering*. Industrial crops and products, vol. 116, p. 170–181, 2018.
- [Mechel 1976] F-P. Mechel. *Ausweitung der Absorberformel von Delany und Bazley zu tiefen Frequenzen*. Acustica, vol. 25, 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, vol. 11, no. 1, p. 19–24, 1990.
- [Moretti *et al.* 2016] E. Moretti, E. Belloni et F. Agosti. *Innovative mineral fiber insulation panes for buildings : Thermal and acoustic characterization*. Applied Energy, vol. 169, p. 421–432, 2016.
- [NF EN 13501-1-A1 2013] NF EN 13501-1-A1. *NF EN 13501\_1\_A1. Classement au feu des produits et éléments de construction - Partie 1 : classement à partir des données d'essais de réaction au feu*, 2013.
- [NF EN ISO 12571 2000] NF EN ISO 12571. *NF EN ISO 12571 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique*, 2000.
- [NF P92-507 2004] NF P92-507. *NF P92-507. sécurité contre l'incendie - Bâtiment - Matériaux d'aménagement - Classement selon leur réaction au feu*, 2004.

## Références bibliographiques

---

- [Nguyen *et al.* 2016] S.T. Nguyen, A.D. Tran-Le, M.N. Vu, Q.D. To, O. Douzane et T. Langlet. *Modeling thermal conductivity of hemp insulation material : A multi-scale homogenization approach*. Building and Environment, vol. 107, p. 127–134, Octobre 2016.
- [Oldham *et al.* 2011] D.J. Oldham, C.A. Egan et R.D. Cookson. *Sustainable acoustic absorbers from the biomass*. Applied Acoustics, vol. 72, no. 6, p. 350–363, Mai 2011.
- [Olesen & Plackett 1999] P.O. Olesen et D.V. Plackett. *Perspectives on the performance of natural plant fibres*. In Natural Fibres Performance Forum, May 27, volume 28, 1999.
- [Olny & Boutin 2003] X. Olny et C. Boutin. *Acoustic wave propagation in double porosity media*. The 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*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 123, no. 2, 814 p., 2008.
- [Olny 1999] X. Olny. *Absorption acoustique des milieux poreux à simple et double porosité : Modélisation et validation expérimentale*. PhD Thesis, Lyon, INSA, 1999.
- [PACTE 2017] PACTE. *Analyse détaillée du parc résidentiel existant*. Rapport technique, 2017.
- [Pal 2008] R. Pal. *On the Lewis-Nielsen model for thermal-electrical conductivity of composites*. Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, vol. 39, no. 5, p. 718–726, 2008.
- [Pallesen 1996] B.E. Pallesen. *The quality of combine-harvested fibre flax for industrial purposes depends on the degree of retting*. Industrial Crops and Products, vol. 5, no. 1, p. 65–78, 1996.
- [Panneton & Olny 2006] R. Panneton et X. Olny. *Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 119, no. 4, 2027 p., 2006.
- [Panneton 2007] R. Panneton. *Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 122, no. 6, p. EL217–EL222, Décembre 2007.
- [Pennacchio *et al.* 2017] R. Pennacchio, L. Savio, D. Bosia, F. Thiebat, G. Piccablotto, A. Patrucco et S. Fantucci. *Fitness : Sheep-wool and Hemp Sustainable Insulation Panels*. Energy Procedia, vol. 111, p. 287–297, Mars 2017.
- [Pereira *et al.* 2015] P.H.F. Pereira, M.F. Rosa, M.O.H. Cioffi, K.C.C.C. Benini, A.C. Milanese, H.J.C. Voorwald et D.R. Mulinari. *Vegetal fibers in polymeric composites : a review*. Polímeros, vol. 25, no. 1, p. 9–22, Février 2015.
- [Perrot *et al.* 2008] C. Perrot, F. Chevillotte et R. Panneton. *Bottom-up approach for microstructure optimization of sound absorbing materials*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 124, no. 2, p. 940–948, Août 2008.

- 
- [Perrot 2006] C. Perrot. *Microstructure et macro-comportement acoustique : approche par reconstruction d'une cellule élémentaire représentative*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2006.
- [Persson 2000] K. Persson. *Micromechanical modelling of wood and fibre properties*. Thèse de doctorat, [Univ.-bibl.], Lund, 2000. OCLC : 186553723.
- [Peyrega & Jeulin 2013] C. Peyrega et D. Jeulin. *Estimation of Acoustic Properties, of the representative Volume Element of Random Fibrous Media*. Journal of Applied Physics, American Institute of Physics, vol. 113, no. 10, p. 104901–104901–13, 2013.
- [Peyrega 2010] C. Peyrega. *Prédiction des propriétés acoustiques de matériaux fibreux hétérogènes à partir de leur microstructure 3D*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des mines de Paris, 2010.
- [Pierre & Colinart 2011] T. Pierre et T. Colinart. *Caractérisation thermo-hydrrique d'agro-matériaux à base de chanvre*. In Actes du colloque SFT, Perpignan, p. 24–27, 2011.
- [Piégay *et al.* 2018] C. Piégay, P. Glé, E. Gourdon, E. Gourlay et S. Marceau. *Acoustical model of vegetal wools including two types of fibers*. Applied Acoustics, vol. 129, p. 36–46, Janvier 2018.
- [Piégay 2016] C. Piégay. *Approche conjointe acoustique et thermique des laines végétales : Identification des modèles les plus adaptés par une étude expérimentale et théorique*. Mémoire de Master Recherche, Ecole Doctorale MEGA, 2016.
- [Pittau *et al.* 2018] F. Pittau, F. Krause, G. Lumia et G. Habert. *Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls*. Building and Environment, vol. 129, p. 117–129, Février 2018.
- [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 : Applied Science and Manufacturing, vol. 43, no. 2, p. 275–287, Février 2012.
- [Placet *et al.* 2017] V. Placet, A. Day et J. Beaugrand. *The influence of unintended field retting on the physicochemical and mechanical properties of industrial hemp bast fibres*. Journal of Materials Science, vol. 52, no. 10, p. 1–19, 2017.
- [Ramesh 2016] M. Ramesh. *Kenaf (Hibiscus cannabinus L.) fibre based bio-materials : A review on processing and properties*. Progress in Materials Science, vol. 78-79, p. 1–92, Juin 2016.
- [Reddy & Yang 2009] N. Reddy et Y. Yang. *Properties of natural cellulose fibers from hop stems*. Carbohydrate Polymers, vol. 77, no. 4, p. 898–902, Juillet 2009.
- [Ricciardi *et al.* 2014] P. Ricciardi, E. Belloni et F. Cotana. *Innovative panels with recycled materials : Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment*. Applied Energy, vol. 134, p. 150–162, Août 2014.
- [Roudier 2012] A. Roudier. *Analyse multi-échelle du comportement hygro-mécanique des fibres de lin*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont II, 2012.
-

## Références bibliographiques

---

- [Rwawiire *et al.* 2017] S. Rwawiire, B. Tomkova, J. Militky, L. Hes et B.M. Kale. *Acoustic and thermal properties of a cellulose nonwoven natural fabric (barkcloth)*. Applied Acoustics, vol. 116, p. 177–183, Janvier 2017.
- [Saastaminen & Richard 1996] J. Saastaminen et J-R. Richard. *Simultaneous Drying and Pyrolysis of solid Fuel Particles*. Combustion and Flame, vol. 106, p. 288–300, 1996.
- [Salissou & Panneton 2010] Y. Salissou et R. Panneton. *Wideband characterisation of the complex wave number and characteristic impedance of sound absorbers*. Journal of the acoustical Society of America, vol. 128, no. 5, p. 2868–2876, 2010.
- [Sanchez-Palencia 1980] E. Sanchez-Palencia. Non-homogeneous media and vibration theory, volume 127 of *Lecture Notes in Physics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1980.
- [Siau 1984] J-F. Siau. Transport Processes in Wood. Springer Series in Wood Science. T.E. Timell, springer - verlag édition, 1984.
- [Singha *et al.* 2012] K. Singha, S. Maity, M. Singha, P. Paul et D.P. Gon. *Effects of fiber diameter distribution of nonwoven fabrics on its properties*. International Journal of Textile Science, vol. 1, no. 1, p. 7–14, 2012.
- [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, no. 3, p. 1131–1152, 2000.
- [Stapulioniene *et al.* 2016] R. Stapulioniene, S. Vaitkus, S. Vejelis et A. Sankauskaite. *Investigation of thermal conductivity of natural fibres processed by different mechanical methods*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 17, no. 10, p. 1371–1381, Octobre 2016.
- [Tarnow 1996] V. Tarnow. *Airflow resistivity of models of fibrous acoustic materials*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 100, no. 6, p. 3706–3713, 1996.
- [Tarnow 1997a] V. Tarnow. *Calculation of the dynamic air flow resistivity of fiber materials*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 102, no. 3, p. 1680–1688, 1997.
- [Tarnow 1997b] V. Tarnow. *Compressibility of air in fibrous materials*. Journal of the acoustical Society of America, vol. 102, no. 3, p. 1680–1688, 1997.
- [Tarnow 2005] V. Tarnow. *Dynamic measurements of the elastic constants of glass wool*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 118, no. 6, p. 3672–3678, Décembre 2005.
- [Thunman & Leckner 2002] H. Thunman et B. Leckner. *Thermal conductivity of wood - models for different stages of combustion*. Biomass & Bioenergy, no. 23, p. 47–54, 2002. OCLC : 925715613.
- [Tilioua *et al.* 2012] A. Tilioua, L. Libessart, A. Joulin, S. Lassue, B. Monod et G. Jeandel. *Determination of physical properties of fibrous thermal insulation*. EPJ Web of Conferences, vol. 33, 02009 p., 2012.

- [Tran *et al.* 2015] L.Q.N. Tran, T. N. Minh, C.A. Fuentes, T.T Chi, A.W. Van Vuure et I. Verpoest. *Investigation of microstructure and tensile properties of porous natural coir fibre for use in composite materials*. Industrial Crops and Products, vol. 65, p. 437–445, Mars 2015.
- [Tsilingiris 2007] P.T. Tsilingiris. *Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100° C*. Energy Conversion & Management, vol. 49, p. 1098–1110, 2007.
- [Umnova *et al.* 2000] O. Umnova, K. Attenborough et K. Ming Li. *Cell model calculations of dynamic drag parameters in packings of spheres*. Journal of Acoustical Society of America, vol. 107, p. 3113–3118, 2000.
- [Umnova *et al.* 2009] O. Umnova, D. Tsiklauri et R. Venegas. *Effect of boundary slip on the acoustical properties of microfibrinous materials*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 126, no. 4, p. 1850–1861, 2009.
- [Vignon *et al.* 1995] M. R. Vignon, C. Garcia-Jaldon et D. Dupeyre. *Steam explosion of woody hemp chenevotte*. International journal of biological macromolecules, vol. 17, no. 6, p. 395–404, 1995.
- [Volf *et al.* 2015] M. Volf, J. Divis et F. Havlík. *Thermal, Moisture and Biological Behaviour of Natural Insulating Materials*. Energy Procedia, vol. 78, p. 1599–1604, Novembre 2015.
- [Wang *et al.* 2008] C.N. Wang, Y.M. Kuo et S.K. Chen. *Effects of compression on the sound absorption of porous materials with an elastic frame*. Applied Acoustics, vol. 69, p. 31–39, 2008.
- [Wassilieff 1996] C. Wassilieff. *Sound absorption of wood-based materials*. Applied Acoustics, vol. 48, no. 4, p. 339–356, 1996.
- [Wyllie & Southwick 1954] M.R.J. Wyllie et P.F. Southwick. *An Experimental Investigation of the S.P. and Resistivity Phenomena in Dirty Sands*. Journal of Petroleum Technology, vol. 6, no. 02, p. 44–57, 1954.
- [Ye *et al.* 2006] Z. Ye, C.M. Wells, C.G. Carrington et N.J. Hewitt. *Thermal conductivity of wool and wool-hemp insulation*. International Journal of Energy Research, vol. 30, no. 1, p. 37–49, Janvier 2006.
- [Zwikker & Kosten 1949] C. Zwikker et C-W. Kosten. *Sound Absorbing Materials*. Elsevier Publishing Company, New-York, 1949.







N°d'ordre NNT : 2019LYSET010

## **Annexes de thèse**

### **THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**

Opérée au sein de  
**Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat**

**Ecole Doctorale N° 162**  
**Mécanique, Energétique, Génie civil et Acoustique**

**Spécialité : Acoustique**

Soutenue publiquement le 14/11/2019, par :

**Clément PIEGAY**

---

# **Approche Conjointe Acoustique et Thermique pour l'Optimisation des Laines Végétales du Bâtiment**

---

Devant le jury composé de :

Celzard, Alain	Professeur	Université Lorraine	Président du jury
Collet, Florence	MCF HDR	Université Rennes 1/LGCM	Rapporteuse
Dazel, Olivier	Professeur	LAUM/Université du Mans	Rapporteur
Arnaud, Laurent	IPEF HDR	Cerema/DtecTV	Examinateur
Marceau, Sandrine	Docteur	Ifsttar	Examinatrice
Gourdon, Emmanuel	IDTPE HDR	Université Lyon/ENTPE	Directeur de thèse
Glé, Philippe	Docteur	Cerema/UMRAE	Co-directeur de thèse
Gourlay, Etienne	Docteur	Cerema/Eq. BPE	Encadrant de thèse
Jaouen, Luc	Docteur	Matelys	Invité



---

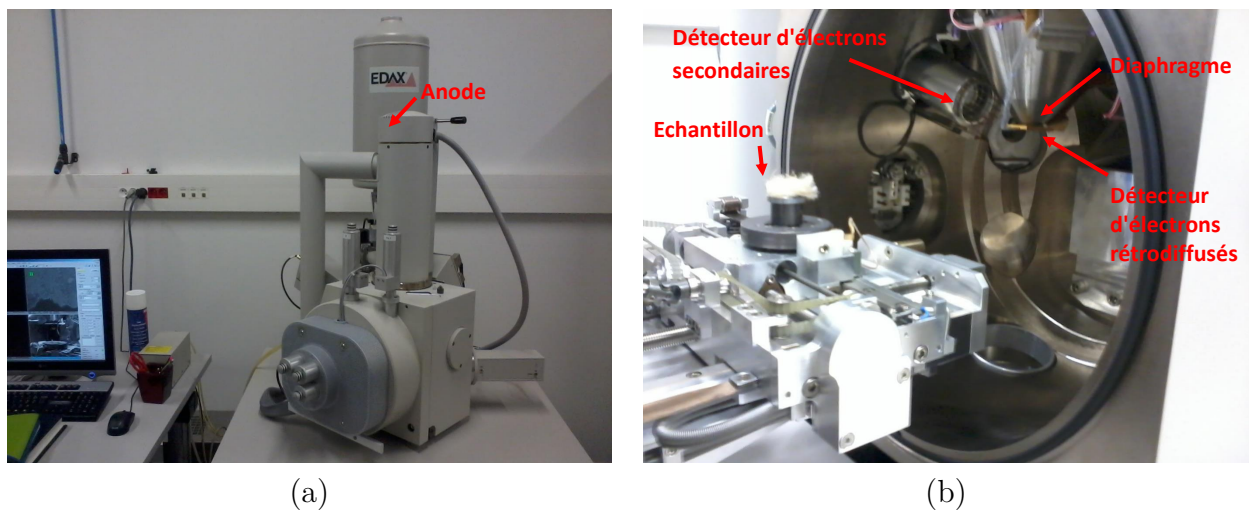
## Annexe A : Dispositifs expérimentaux

---

Tous les dispositifs expérimentaux utilisés dans le cadre de la thèse sont décrits dans cette annexe

### 1 Microscope Electronique à Balayage (MEB)

Comme l'illustre la Figure A.1(a), une anode émet un faisceau d'électrons primaires.

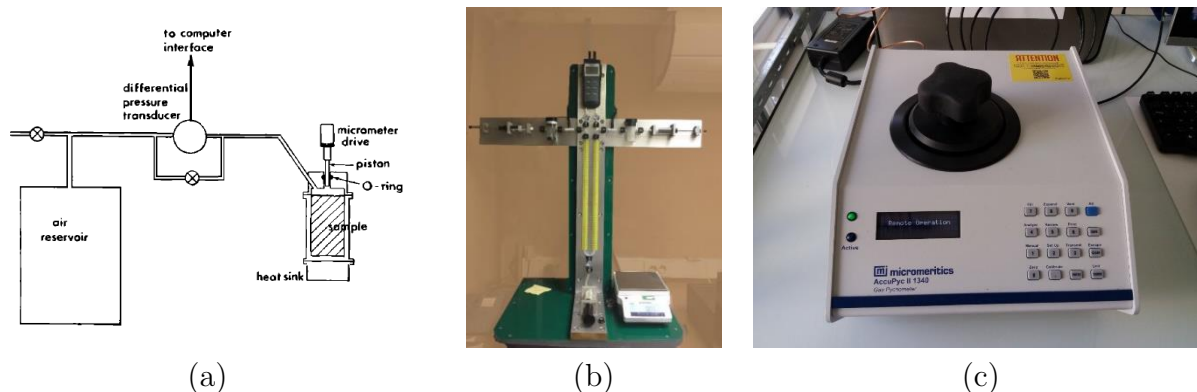


**Figure A.1** – Microscope électronique à balayage de l'unité MAST/CPDM de l'Ifsttar

Ce faisceau passe ensuite par une série de diaphragmes électromagnétiques avant de bombarder l'échantillon à analyser. La platine mobile qui permet de déplacer l'échantillon sous le faisceau d'électrons est visible sur la Figure A.1(b). A la suite du bombardement, il y a émission de deux types d'électrons. Dans notre cas, seuls les électrons secondaires sont utilisés. Une fois

réfléchis par la surface, ils permettent d'en obtenir une image. L'autre type d'électrons, dits rétrodiffusés, pénètrent au cœur de la matière de l'échantillon et interagissent avec les atomes le constituant, permettant ainsi d'avoir des informations sur la composition chimique du matériau. Malheureusement, la précision n'est pas assez fine pour distinguer les fibres végétales des fibres polymères.

## 2 Porosimètres et pycnomètre à hélium



**Figure A.2** – (a) Porosimètre par différentiel de pression (ENTPE), (b) porosimètre par comparaison de volume d'air (Laboratoire de Strasbourg, Cerema), (c) pycnomètre à hélium (Ifstar)

Même s'ils caractérisent le même paramètre, en l'occurrence le volume de squelette des échantillons, les trois dispositifs reposent sur des méthodes différentes.

### 2.1 Porosimètre par différentiel de pression

La méthode de mesure de ce porosimètre, dont le schéma de principe est illustré à la Figure A.2(a), repose sur les travaux menés dans [Beranek 1942] et optimisés par les travaux de [Champoux *et al.* 1991].

Le principe de ce dispositif repose sur la Loi de Boyle-Mariotte pour laquelle le produit du volume  $V$  par la pression  $P$  d'un gaz réel est constant s'il n'y a pas de changement de température. Ainsi, on place un échantillon à caractériser de volume  $V_{tot}$  connu dans une enceinte hermétique et calorifugée afin de garantir des conditions isothermes. Une première mesure est alors réalisée sans échantillon afin de déterminer le volume  $V_0$  de l'enceinte calorifugée. Un piston fixé au-dessus de l'enceinte permet de réduire son volume d'une valeur  $\Delta V_1$  connue. Cette

variation de volume entraîne une variation de pression  $\Delta P_1$  qui est caractérisée par un capteur différentiel de pression. En appliquant la Loi de Boyle-Mariotte, on peut écrire la relation suivante :

$$P_0 V_0 = (P_0 + \Delta P_1)(V_0 - \Delta V_1) \quad (1)$$

L'échantillon est ensuite placé dans l'enceinte hermétique et une deuxième mesure est réalisée afin de déterminer le volume de sa phase solide  $V_s$ . Elle est obtenue à partir de la relation suivante :

$$V_s = V_0 - \Delta V_2 \left( \frac{P_0 + \Delta P_2}{\Delta P_2} \right) \quad (2)$$

### 2.2 Porosimètre par comparaison de volumes d'air

Ce second dispositif, qui est représenté à la Figure A.2(b), repose sur la comparaison de volumes d'air. Le dispositif est une version améliorée de celui décrit dans les travaux de [Leclaire *et al.* 2003]. Deux porte-échantillons se trouvent de part et d'autre du dispositif et sont reliés par un tube en « U ». Pendant la mesure, un liquide est introduit dans ce tube et sépare ainsi les deux porte-échantillons. Le principe du dispositif est de comparer les volumes de ces deux porte-échantillons. Comme pour le dispositif précédent, la caractérisation expérimentale est menée en deux étapes.

La première consiste à équilibrer les volumes des deux porte-échantillons. Ensuite, l'échantillon à caractériser, dont le volume n'est pas nécessairement connu, est introduit dans le porte-échantillon de droite. En appliquant une dépression via un piston dans le tube en « U », l'équilibre entre les deux volumes est recherché. La lecture du volume ajouté pour atteindre l'équilibre permet alors de déduire le volume correspondant à la phase solide de l'échantillon.

L'avantage de ce dispositif par rapport au premier est que l'évaluation du volume de l'échantillon n'est pas nécessaire. De plus, une fois le dispositif calibré, chaque mesure peut être réalisée rapidement. En revanche, sa précision est plus faible (de l'ordre de 1% pour la porosité) en raison de la lecture du volume qui se fait sur la graduation.

### 2.3 Pycnomètre à hélium

Il a été possible au cours de ces travaux de thèse de mener une campagne de mesures à l'aide du pycnomètre à hélium (Pycnomètre AccuPyc II 1340 Micrometrics) de l'unité MAST/CPDM de l'Ifsttar à Champs-sur-Marne.

L'échantillon à caractériser est placé dans un porte-échantillon de volume connu. Le porte-échantillon est placé dans une chambre à l'intérieur du dispositif qui est ensuite fermée hermétiquement. De l'hélium, qui est un gaz inerte, est injecté dans la chambre contenant le porte-échantillon. Une fois que l'équilibre est atteint, l'hélium est admis puis détendu dans une autre volume interne de précision. La détermination du volume de la phase solide de l'échantillon repose sur la mesure des pressions relevées lors du remplissage de la chambre contenant l'échantillon puis lors de la décharge. Le processus de mesure est automatisé. En effet, le dispositif est composé d'un module d'analyse et d'un module de commande intégrés. Néanmoins, des paramètres de mesures sont à renseigner avant de lancer les essais.

- Le premier concerne le nombre de purges à faire avant la mesure. Il s'agit du nombre de remplissages et vidages par l'hélium dans la cellule avant la réalisation des mesures. Cette opération a pour effet de chasser une partie de l'eau contenue dans l'échantillon à caractériser. Il est donc nécessaire de repeser le matériau après l'essai.
- Le second concerne le nombre de cycles de mesures. Il s'agit du nombre de mesures successives qui seront réalisées pour déterminer une valeur moyenne du volume de matière solide dans la cellule. A partir de la masse de l'échantillon, la densité de la phase solide pourra être déterminée pour chaque volume mesuré.
- Le suivant est la pression des mesures et le dernier concerne le critère de fin de mesures. Ce dernier correspond à un taux d'équilibrage de la pression. Ainsi, la variation de pression par minute ne doit pas dépasser la valeur indiquée.

### 3 Résistivimètre



**Figure A.3** – Résistivimètre SIG2014

La caractérisation expérimentale de la résistivité des matériaux est réalisée avec un résistivi-

mètre SIGMA SIG2014 de la marque Mecanum, montré à la Figure A.3. Le principe de la mesure repose sur les normes ISO 9053-1 :2018 [ISO9053-1 2018] et ASTM C522-03 [C522 2016]. Pour un échantillon d'épaisseur  $L$  et de surface  $A$ , la résistivité du flux d'air ( $\sigma$ ) peut être évaluée à partir de la relation suivante :

$$\sigma = \frac{\Delta P A}{Q L} = \frac{\Delta P}{v L} \quad (3)$$

Avec  $Q$  la mesure du débit volumétrique et  $\Delta P$  le différentiel de pression de part-et-d'autre de l'échantillon d'essai.  $\Delta P$  est mesuré pour différentes vitesses du flux d'air ( $v$ ). Une régression linéaire est alors réalisée à partir de l'évolution de  $\Delta P$  en fonction de la vitesse du flux pour déterminer la résistivité de l'échantillon.

## 4 Tube d'impédance

Dans le cadre de cette thèse, les caractérisations expérimentales des propriétés acoustiques des matériaux ont été réalisées avec un tube d'impédance en incidence normale. Ce dispositif est présenté dans un premier temps en configuration conventionnelle d'utilisation.

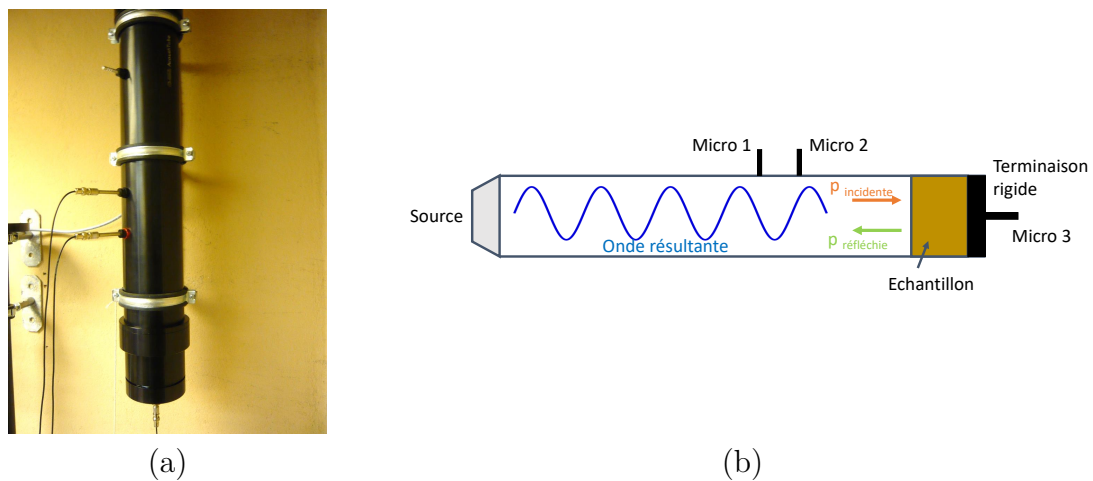
Dans un second temps, c'est l'adaptation du tube d'impédance pour réaliser des mesures en compression qui est présentée. En effet, dans le cadre de l'évaluation de l'influence de la masse volumique sur les performances des laines végétales, il a été nécessaire de faire évoluer le dispositif.

### 4.1 Tube d'impédance en configuration « conventionnelle »

C'est le dispositif du Laboratoire de Strasbourg (Cerema), présenté à la Figure A.4(a) qui a été utilisé pour les caractérisations expérimentales menées au cours de la thèse. Il s'agit d'un modèle AcustiTube AFD 1200.

La méthode de mesure utilisée est celle des trois positions sans cavité. Comme l'illustre la Figure A.4(b), l'échantillon de matériau est placé à l'extrémité opposée de la source, qui est considérée comme une terminaison rigide (impédance infinie). La source génère dans le tube une onde plane sinusoïdale. Le coefficient d'absorption acoustique ( $\alpha$ ) de l'échantillon est alors déterminé à partir des mesures de pression en deux positions par des microphones. Cette mesure est réalisée selon la norme ISO 10534-2 [ISO 10534-2 2003]. Le troisième microphone situé à l'arrière de l'échantillon, comme l'illustre la Figure A.4(b), permet de déterminer les grandeurs intrinsèques aux matériaux, c'est à dire la densité dynamique  $\rho$  et le module d'in-





**Figure A.4** – (a) Tube d'impédance du Laboratoire de Strasbourg, (b) représentation schématique du tube d'impédance pour la méthode de caractérisation à trois positions sans cavité

compressibilité  $K$ , à partir de l'impédance caractéristique  $Z_c$  et du nombre d'onde  $k$  comme cela a été défini précédemment à la Section 2.1.4 du Chapitre II. Cette méthode initialement développée par [Iwase *et al.* 1998], pour des sondes placées à l'intérieur du tube, a été adaptée par [Salissou & Panneton 2010] pour des microphones placés à l'extérieur.

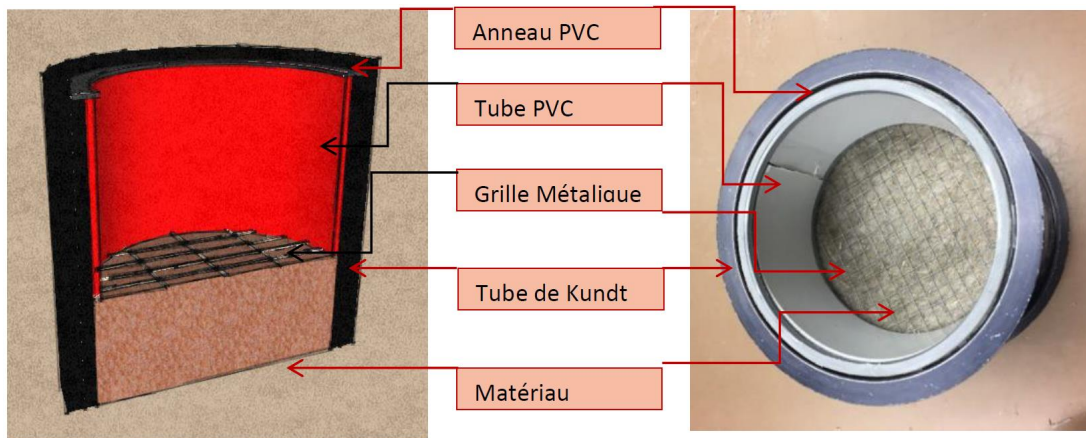
Avec la détermination de  $Z_c$  et  $k$ , il est alors possible de déterminer l'indice d'affaiblissement acoustique ( $TL$ ) en s'appuyant sur les travaux de [Song & Bolton 2000].

La description détaillée de ces méthodes n'est pas exposée dans ce mémoire mais est consultable dans les travaux menés par [Glé 2013].

## 4.2 Tube d'impédance adapté pour la compression des échantillons

Afin de caractériser l'influence de la masse volumique des matériaux sur leur performance en absorption acoustique, le tube d'impédance du laboratoire de Strasbourg a été adapté pour réaliser des mesures en compression à une dimension (1D) suivant un axe perpendiculaire aux couches de fibres des échantillons.

Comme l'illustre la Figure A.5, le système retenu permet de comprimer les échantillons de manière homogène en utilisant une grille, supposée « transparente acoustiquement ». Un tube PVC de diamètre 100 mm, d'épaisseur 2 mm et de hauteur  $h$  est placé au-dessus de la grille afin de contrôler le taux de compression choisi. Enfin, une bague en PVC d'une épaisseur légèrement supérieure à 2 mm est placée en partie supérieure du tube PVC afin de maintenir la pression lors du vissage de cette partie amovible du tube d'impédance sur sa base fixe.



**Figure A.5** – Adaptation du tube d'impédance afin de réaliser des mesures en compression 1D suivant un axe perpendiculaire aux couches de fibres des échantillons [Farah 2018]

La réalisation des mesures est ensuite la même que pour la configuration classique du tube d'impédance.

## 5 Conductivimètres

Dans le cadre de cette thèse, trois conductivimètres ont été utilisés pour caractériser la conductivité thermique des laines végétales. Deux conductivimètres, le Hot Disk et le Fil Chaud, fonctionnent en régime transitoire. Le troisième dispositif, nommé Boîte Chaude, repose sur un régime permanent.

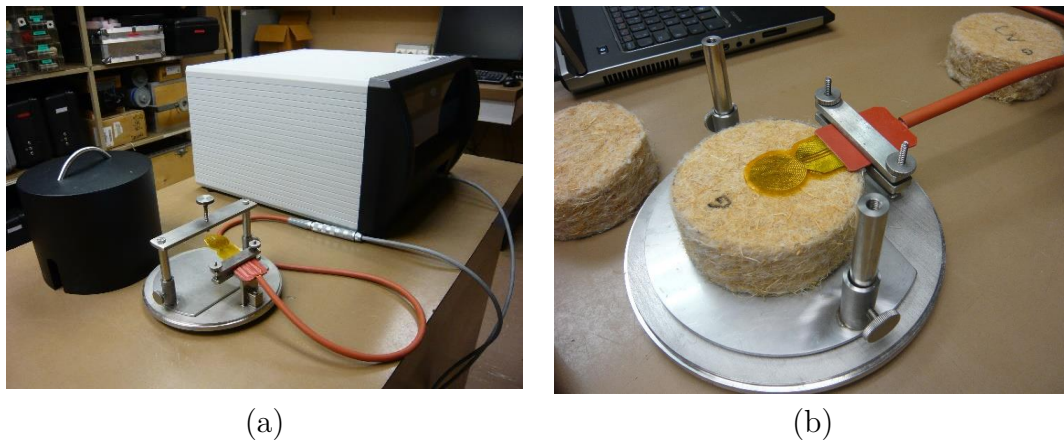
Dans un premier temps, les dispositifs Hot Disk et Fil Chaud sont présentés dans le cas d'une utilisation conventionnelle.

Dans un second temps, les dispositifs Hot Disk et Boîte Chaude sont adaptés afin de réaliser des mesures en compression 1D. Ces adaptations sont alors présentées pour ces deux dispositifs.

### 5.1 Conductivimètres en régime transitoire

#### 5.1.1 Hot Disk en configuration conventionnelle

Le dispositif expérimental utilisé est le modèle Hot Disk TPS 3500 présenté à la Figure A.6(a), repose sur la méthode de la source plane transitoire liée à la norme ISO 22007-2 [ISO 22007-2 2012]. Elle est adaptée aux matériaux ayant des valeurs de conductivités thermiques comprises dans la plage approximative  $[0,01 - 500] \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , comme dans le cas des laines végétales.



**Figure A.6** – (a) Dispositif Hot Disk TPS 3500, (b) Sonde à spirale bifilaire

Comme illustré à la Figure A.6(b), une sonde à élément chauffant constituée d'une spirale bifilaire en nickel de  $10\ \mu\text{m}$  d'épaisseur, prise en sandwich entre deux feuilles d'isolant de chaleur massique négligeable, est placée entre deux échantillons du matériau à tester.

La sonde parcourue par un courant électrique de puissance constante pendant un laps de temps préalablement défini génère un champ de température dynamique au sein des deux échantillons. L'augmentation de température est détectée et mesurée par la sonde elle-même comme une fonction du temps.

La détermination de la conductivité thermique de ce dispositif repose sur les travaux développés par [Gustafsson 1991] et [Gustavsson *et al.* 1994].

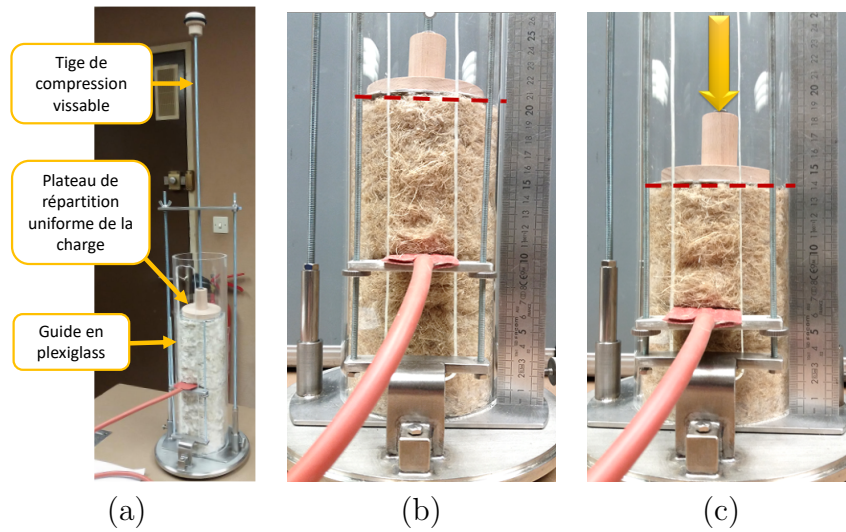
### 5.1.2 Hot Disk adapté pour la compression des échantillons

Pour le Hot Disk, la compression est assurée par une tige guidée à l'intérieur d'un tube en Plexiglas®, comme l'illustre la Figure A.7(a). L'extrémité basse de cette tige est constituée d'un plateau en bois et d'une plaque métallique ayant le même diamètre que le tube Plexiglas®. Ce système permet ainsi une répartition uniforme de la charge sur les échantillons.

Le dispositif permet de mesurer l'épaisseur des échantillons avant et après compression comme le montre les Figures A.7(b) et A.7(c).

### 5.1.3 Fil Chaud en configuration conventionnelle

Le dispositif fil chaud utilisé est un modèle Neotim FP2C, présenté à la Figure A.8(a). Il s'appuie sur le principe de mesure de la norme ASTM D 5930-2017 [ASTM D-5930 2017] relative à la méthode d'essai normalisée pour la conductivité thermique des matières plastiques



**Figure A.7** – (a) Adaptation du dispositif Hot Disk pour réaliser des mesures en compression, (b) laine de chanvre sans compression (205 mm), (c) laine de chanvre comprimée (140 mm)



**Figure A.8** – (a) Dispositif Fil Chaud, (b) Sonde plane composée d'un fil résistif (Source : <http://www.neotim.fr/FP2CConductivimetre.html>)

à l'aide d'un dispositif de source transitoire linéaire et sur les recommandations AAC 11-3 du RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures). Sa plage de caractérisation est comprise entre  $0,02$  et  $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Comme pour le dispositif Hot Disk, elle est adaptée au cas des laines végétales.

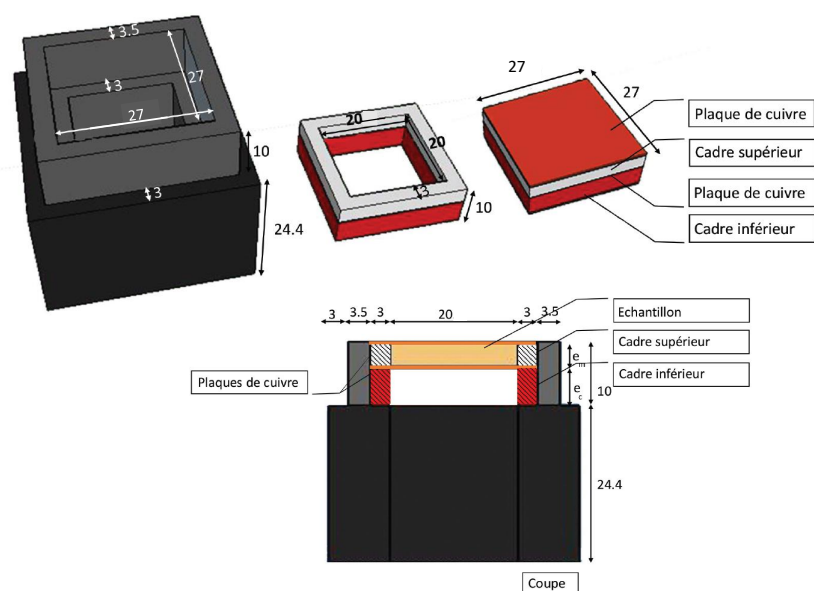
La chaîne d'acquisition du conductivimètre Fil Chaud est constituée d'un ordinateur pilote équipé du logiciel d'acquisition. Il est relié à un générateur délivrant un signal créneau qui crée un flux sous forme d'effet Joule par l'intermédiaire d'une sonde plane composée d'un fil résistif, présentée à la Figure A.8(b).

Cette sonde, qui est placée, comme dans le cas du Hot Disk, au contact de deux échantillons

d'un même matériau, est également équipée d'un capteur de température qui permet de déterminer l'évolution de la température en un point donné M de l'ensemble formé par les deux échantillons.

### 5.2 Conductivimètre en régime permanent

#### 5.2.1 Boîte Chaude adaptée pour la compression des échantillons



**Figure A.9** – Schéma et vue en coupe du dispositif « boîte chaude » adapté à la caractérisation des matériaux en compression

Le dispositif expérimental Boîte Chaude a été conçu afin de pouvoir réaliser des compressions pour des valeurs déterminées d'épaisseurs d'échantillons. Ainsi, la compression à une dimension des échantillons, selon le même axe que pour le dispositif Hot Disk, est réalisée en les insérant dans un cadre d'épaisseur inférieure.

Pour cela, un système de double cadres, dont l'un contenant l'échantillon, est utilisé, comme l'illustre la Figure A.9. Des cadres d'épaisseurs différentes peuvent ainsi être choisis pour réaliser la compression.



**Figure A.10** – (a) Cadre en Styrodur® d’une épaisseur de 10 cm fermé par les plaques de cuivre contenant l’échantillon comprimé, (b) système précédent avec fluxmètres et capteurs de température inséré dans la boîte en Styrodur® avant la caractérisation expérimentale

Les plaques de cuivre dont les dimensions sont égales à celles du cadre permettent d’assurer une charge répartie de manière uniforme sur l’échantillon comprimé, comme le montre la Figure A.10(a).

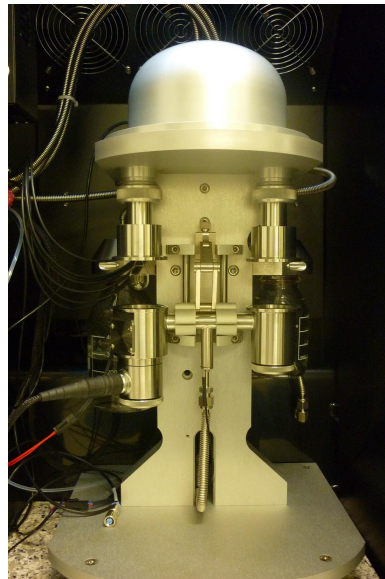
La Figure A.10(b) présente le système, contenant l’échantillon comprimé, inséré dans le cadre de la boîte en Styrodur®.

## 6 DVS

Les propriétés hygriques des laines végétales ont été caractérisées dans le cadre de la thèse par la mesure d’isothermes de sorption de vapeur d’eau avec un dispositif DVS (modèle DVS-Advantage, SMS), visible à la Figure A.11.

Ainsi, ce dispositif permet de quantifier la quantité de vapeur adsorbée dans un échantillon de matériau, pour une humidité et une température données, à partir des isothermes de sorption. Pour les laines végétales, le comportement des isothermes est de type II de la classification UICPA, comme cela est explicité à la Section 1.3.5 du Chapitre II.

Un échantillon d’une centaine de milligrammes placé dans une nacelle en quartz est introduit dans le dispositif. Après avoir défini des paliers successifs de températures et d’humidités relatives, le dispositif réalise le suivi d’évolution de la masse de l’échantillon pour chaque palier. A la fin du premier palier pour  $HR = 0\%$ , la masse  $m_0$  relevée est considérée comme la masse de l’échantillon à l’état sec. Dans le cadre des mesures réalisées, des paliers ont été fixés tous les 20% jusqu’à  $HR = 80\%$  complétés par deux paliers à  $HR = 90\%$  et à  $HR = 95\%$ . Pour chaque



**Figure A.11** – Modèle DVS-Advantage, SMS, de l'unité MAST/CPDM de l'Ifsttar

palier ( $HR$  fixée), la quantité de vapeur d'eau maximale que peut adsorber l'échantillon est mesurée,  $m(RH)$ . Chaque palier a une durée minimale de deux heures et le dispositif passe au palier suivant lorsque la variation de la masse de l'échantillon est inférieure à 0,0005% pendant une minute. Dans le cas où cette condition n'est pas atteinte au bout de 12 heures,  $m(RH)$  est enregistrée et le programme passe directement au palier suivant. Les isothermes de sorption sont tracées à partir de l'Equation II.3 relative à la détermination de la teneur en eau massique, dans laquelle  $m_{ref}$  est remplacé par  $m_0$ , et  $m_a$  par  $m(RH)$ .

---

## Annexe B : Modélisation HAC cylindrique dynamique pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

### 1 Récapitulatif des fonctions du modèle

La fonction  $h$  et sa dérivée par rapport à  $r$  s'expriment par les relations suivantes :

$$h(r) = c_0 \ln(r) + \frac{c_1 \cdot r^2}{4} \quad (1)$$

$$\frac{\partial h(r)}{\partial r} = \frac{c_0}{r} + \frac{c_1 \cdot r}{2} \quad (2)$$

La fonction  $f$  est la plus utilisée, ainsi que ses dérivées première, seconde et troisième par rapport à  $r$ . Les conditions limites utilisent également son Laplacien en coordonnées cylindriques, ainsi que sa dérivée. Toutes ces équations s'expriment par les relations suivantes :

$$f(r) = \delta_v^2 \left( -c_0 \ln r + \frac{c_1}{4} r^2 - c_1 \delta_v^2 \right) + c_2 I_0(r/\delta_v) + c_3 K_0(r/\delta_v) \quad (3)$$

$$\frac{\partial f(r)}{\partial r} = \delta_v^2 \left( -\frac{c_0}{r} + \frac{c_1 r}{2} \right) + \frac{c_2}{\delta_v} I_1(r/\delta_v) - \frac{c_3}{\delta_v} K_1(r/\delta_v) \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 f(r)}{\partial r^2} = \delta_v^2 \left( \frac{c_0}{r^2} + \frac{c_1}{2} \right) + \frac{c_2}{\delta_v^2} I_0(r/\delta_v) - \frac{c_2}{\delta_v r} I_1(r/\delta_v) + \frac{c_3}{\delta_v^2} K_0(r/\delta_v) - \frac{c_3}{\delta_v r} K_1(r/\delta_v) \quad (5)$$

$$\frac{\partial^3 f(r)}{\partial r^3} = -\frac{2\delta_v^2 c_0}{r^3} + \frac{c_2}{\delta_v^3} I_1(r/\delta_v) - \frac{c_2}{\delta_v^2 r} I_2(r/\delta_v) - \frac{c_3}{\delta_v^3} K_1(r/\delta_v) - \frac{c_3}{\delta_v^2 r} K_2(r/\delta_v) \quad (6)$$



## Annexe B : Modélisation HAC cylindrique dynamique pour la détermination des propriétés acoustiques des matériaux fibreux

---

$$\Delta f(r) = c_1 \delta_v^2 + \frac{c_2}{\delta_v^2} I_0(r/\delta_v) + \frac{c_3}{\delta_v^2} K_0(r/\delta_v) \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\Delta f(r))}{\partial r} = \frac{c_2}{\delta_v^3} I_1(r/\delta_v) - \frac{c_3}{\delta_v^3} K_1(r/\delta_v) \quad (8)$$

Pour la fonction  $\xi$ , seule la dérivée par rapport à  $r$  est nécessaire. Ces deux équations s'expriment par les relations suivantes :

$$\xi(r) = \delta_t^2 + c_4 I_0\left(\frac{r}{\delta_t}\right) + c_5 K_0\left(\frac{r}{\delta_t}\right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \xi(r)}{\partial r} = \frac{c_4}{\delta_t} I_1\left(\frac{r}{\delta_t}\right) - \frac{c_5}{\delta_t} K_1\left(\frac{r}{\delta_t}\right) \quad (10)$$

