

Caractérisation et prédiction des propriétés thermiques de laines de chanvre à l'aide d'images tomographiques

Rayane EI-SAWALHI¹, Jérôme LUX^{1*}, Patrick SALAGNAC¹

¹Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'environnement (LaSIE)

Av. M. Crépeau - 17042 La Rochelle Cedex 1

*(auteur correspondant : jerome.lux@univ-lr.fr)

Résumé – Cet article présente des résultats expérimentaux et numériques concernant les caractéristiques structurales et thermiques de laines de chanvre utilisées comme isolant thermique pour les bâtiments. La microstructure (porosité, diamètre des fibres et des pores, orientation des fibres, etc.) a été étudiée par analyse d'images 3D. La conductivité thermique effective de la laine a été estimée par différentes méthodes : mesures expérimentales, méthode de changement d'échelles à partir d'images tomographiques et modèles analytiques et semi-empiriques présents dans la littérature scientifique. Ce travail montre l'intérêt de l'apport de l'analyse d'images pour relier les propriétés effectives à la structure des matériaux.

Nomenclature

A surface de contact, m^2
 \mathbf{b} vecteur de fermeture
 l dimension du VER
 \mathbf{n} normale sortante
 \mathbf{r} vecteur position m
 V volume, m^3
 x,y,z coordonnées, m

Symboles grecs
 ε fraction volumique
 λ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
Indices et exposants
 a air
 eq équivalent
 f fibre
 m moyen

1. Introduction

Ces dernières années, on voit le développement de nouveaux matériaux écologiques pour l'isolation des bâtiments à partir de fibres organiques naturelles (lin, chanvre, bois...). Contrairement aux laines minérales qui sont produites industriellement et dont les caractéristiques sont bien connues, les fibres végétales sont très hétérogènes et peu d'études ont été réalisées pour caractériser leurs propriétés thermiques. L'optimisation des propriétés thermiques de ces matériaux constitue un enjeu industriel et économique important qui passe par la compréhension de la relation entre le procédé de fabrication et leur microstructure.

Dans ce papier, nous nous proposons d'évaluer la conductivité thermique de ce type d'isolant. Si la littérature scientifique abonde de modèles analytiques ou semi-empiriques permettant de relier certains aspects de la microstructure d'un milieu poreux avec sa conductivité thermique équivalente [1],[2], un grand nombre de ceux-ci sont peu adaptés à une utilisation dédiée aux milieux fibreux, notamment parce qu'ils ne tiennent pas compte de l'orientation des fibres.

Les milieux fibreux présentent en effet souvent une anisotropie géométrique liée d'une part à l'anisotropie des fibres elles-mêmes, mais également à leur orientation au sein du matériau. On note également que dans le cas des fibres végétales, il apparaît une anisotropie des propriétés thermiques locales, puisque le tenseur de conductivité des fibres est généralement orthotrope [3].

Nous proposons ici une alternative qui consiste à travailler sur une représentation 3D discrète de la microstructure réelle des matériaux. Cela nous permet d'une part de caractériser quantitativement l'architecture du réseau de fibres et d'autre part de réaliser les calculs des propriétés thermiques macroscopiques directement sur la microstructure réelle. Pour ce faire, nous utilisons la micro-

tomographie aux rayons X afin de générer des images tridimensionnelles de nos matériaux. Des outils d'analyse d'images issus de la morphologie mathématique [4] sont ensuite utilisés afin de mesurer les paramètres géométriques pertinents (taille des pores, diamètres de fibres, orientations, porosité, etc.). Ces données sont notamment indispensables pour estimer la taille d'un volume élémentaire représentatif (VER) du matériau étudié.

Dans cet article, ce procédé d'imagerie est appliqué à une laine de chanvre en panneau, constituée de fibres de chanvre et de fibres polyester. Dans une première partie, nous présentons le matériau étudié ainsi que les principales données expérimentales le concernant. Dans une seconde partie, la méthode d'évaluation de la conductivité thermique effective à partir d'images tomographiques est décrite et les résultats obtenus sont comparés aux résultats expérimentaux et aux résultats fournis à partir des modèles rencontrés dans la littérature scientifique.

2. Caractérisation de la structure fibreuse

2.1. Caractérisation expérimentale

Le matériau étudié dans ce travail est un composite non-tissé chanvre / PES destiné à l'isolation du bâtiment (masse volumique $32,8 \pm 1,6 \text{ kg.m}^{-3}$). Les fibres PES bicomposantes sont présentes à environ 10% en masse et permettent d'assurer la cohésion et la tenue mécanique de l'isolant. Ce sont les fibres les plus fines (diamètre autour de $20 \mu\text{m}$) et les plus longues (environ 1 mm). Le chanvre est quant à lui présent sous forme de fibres (partie externe de la tige) mais aussi de chènevottes (partie interne de la tige assurant la conduction de la sève). Les fibres de chanvre ont généralement une section ellipsoïdale, et un diamètre qui varie assez largement entre environ $50 \mu\text{m}$ et $200 \mu\text{m}$. Les granulats de chènevotte identifiés sont quant à eux de dimensions bien supérieures, puisque leur diamètre est de l'ordre du millimètre.

Bien que la consolidation du matériau induise généralement une orientation privilégiée des fibres dans les plans transverses (plans notés xOy), une observation macroscopique (figure 1) révèle que les fibres présentent en réalité une déviation non négligeable autour de ces plans. Il est néanmoins clair que très peu de fibres sont orientées selon l'épaisseur du matériau (axe z).



Figure 1 : Laine de chanvre en panneau.

2.2. Caractérisation morphologique par imagerie 3D

L'étude quantitative de la structure fibreuses à partir d'images tomographiques 3D nous permet d'une part de caractériser le matériau et l'influence du procédé de fabrication sur le produit final, mais également de déterminer la taille d'un volume élémentaire représentatif (VER) au sein duquel pourront être calculés numériquement les propriétés thermiques effectives de l'isolant.

2.2.1. Acquisition et identification des phases

Afin de bien résoudre les fibres les plus fines, ainsi que la porosité interne de la chènevotte, la résolution choisie pour l'acquisition des images tomographiques est de $8 \mu\text{m}/\text{voxel}$. Compte tenu de cette résolution, les échantillons d'isolant doivent se présenter sous forme d'un cylindre de dimensions 1 cm de hauteur pour 1 cm de diamètre environ. Les tomographies obtenues sont de taille $2121 \times 2206 \times 1500$ voxels. Afin de limiter les effets liés à la découpe, nous travaillons sur des sous-volumes de plus petites tailles localisés au centre de l'image. Il convient de noter que pour un certain nombre de mesures, une résolution plus grossière mais suffisante de $16\mu\text{m}/\text{voxel}$ a été utilisée afin de limiter les tailles d'images étudiés.

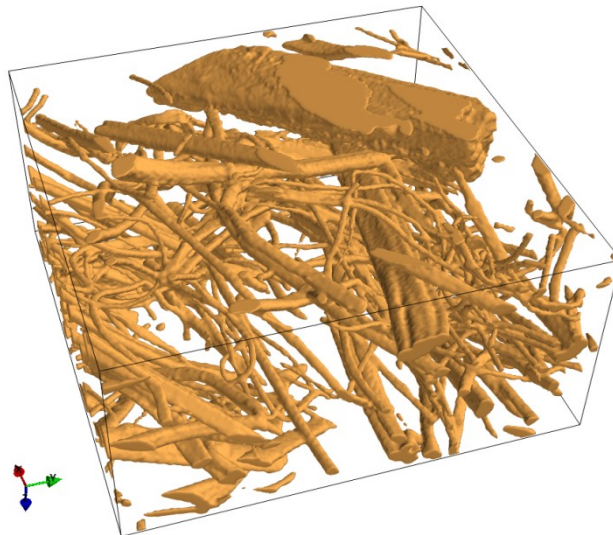


Figure 2 : Visualisation d'une laine de chanvre ($3 \times 3 \times 1,5 \text{ mm}^3$).

Ces images en niveaux de gris sont tout d'abord filtrées afin d'en diminuer le bruit, puis seuillées à l'aide d'un algorithme de croissance de région afin de distinguer la phase air de la phase fibreuse. Notons que les niveaux de gris très similaires des fibres PES et des fibres de chanvre ne permettent pas pour l'instant de distinguer ces deux types de fibres sur ce seul critère. La figure 2 présente une vue 3D d'un sous-volume étudié. On constate que l'architecture du réseau de fibres est très complexe, avec un enchevêtrement de fibres polymères de petits diamètres autour de fibres de chanvre et de chènevotte de tailles plus importantes, mais de tortuosité plus faible.

2.3. Détermination d'un VER géométrique

L'estimation d'un VER géométrique se base tout d'abord sur la stabilisation de la porosité, du diamètres des fibres et de la tailles de pores mesurés dans des volumes de tailles croissantes [5]. Les distributions de tailles des fibres/pores sont mesurées par une méthode classique de granulométrie par ouverture morphologique [6], où chaque ouverture supprime les parties de la phase étudiée qui sont de taille inférieure à la taille de l'élément. A titre d'illustration, la figures 3 montre que la porosité se stabilise autour de 92% pour un volume de 150 mm^3 ($6,14 \times 6,14 \times 3,84 \text{ mm}^3$). Les volumes représentatifs estimés par les mesures granulométriques sont du même ordre de grandeur. Ces mesures permettent par ailleurs de caractériser la microstructure de l'isolant et de valider les données macroscopiques.

On mesure par exemple une proportion de fibres de diamètre inférieur à $32 \mu\text{m}$ autour de 10%, ce qui correspond a priori à la proportion des fibres PES que l'on peut attendre. Les fibres de chanvre qui constituent l'essentiel du panneau ont un diamètre mesuré compris entre environ 50 et $200 \mu\text{m}$, avec un pic autour de $74 \mu\text{m}$, ce qui encore une fois correspond bien aux données expérimentales.

Concernant les pores, les distributions obtenus tendent vers une gaussienne de moyenne $375 \mu\text{m}$ et d'écart type $168 \mu\text{m}$. Ce type de distribution a déjà été observée sur d'autres isolants non-tissés, à la différence de matériaux issus de procédés papetiers où l'on reporte en général des distributions de type loi gamma [7].

Afin de valider la taille du VER, on vérifie que celui-ci est de dimensions supérieures aux longueurs de corrélations estimées à partir de la fonction d'autocorrélation. Ces longueurs de corrélations ne sont pas les mêmes dans toutes les directions, ce qui traduit l'anisotropie du matelas fibreux, observée à l'échelle macroscopique (cf figure 1). On évalue en effet les longueurs de corrélations entre environ $800 \mu\text{m}$ selon l'axe z et 2 mm pour les axes x et y.

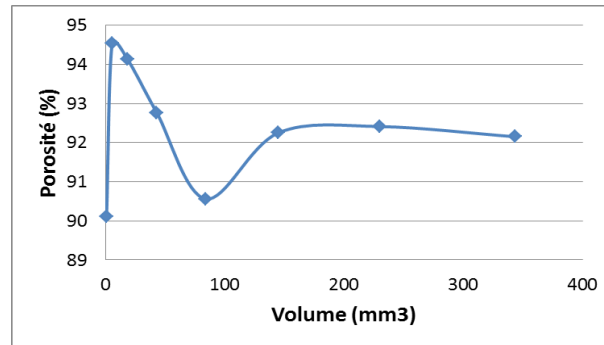


Figure 3 : Évolution de la porosité avec la taille du volume de mesure.

2.4. Orientations des fibres

L'orientation des fibres dans le matelas fibreux joue un rôle déterminant dans les propriétés thermiques de l'isolant. Afin de quantifier cette anisotropie, nous avons calculé les orientations locales en chaque voxel des fibres par une méthode basée sur des ouvertures morphologique dérivée de [8]. La figure 4 propose une visualisation 3D de la rose des directions obtenue. La proportion des voxels orientés dans une direction de l'espace est représenté par sa distance à l'origine. Ces résultats viennent confirmer les observations macroscopiques effectués, i.e. on observe bien qu'une proportion importante de fibres présentent un écart angulaire non négligeable avec le plan xOy (qui reste cependant inférieur à 45°), ce qui n'est pas idéal d'un point de vue des performances thermiques. On remarque également une anisotropie dans les plans transverses où on distingue clairement une direction privilégiée (pour approximativement $\theta = -\pi/4, \phi = 0$), ce qui n'était pas attendu ici. Il n'est pour l'instant pas possible de dire si cet effet est lié au procédé de fabrication ou à une modification de la structure lors de la découpe des échantillon.

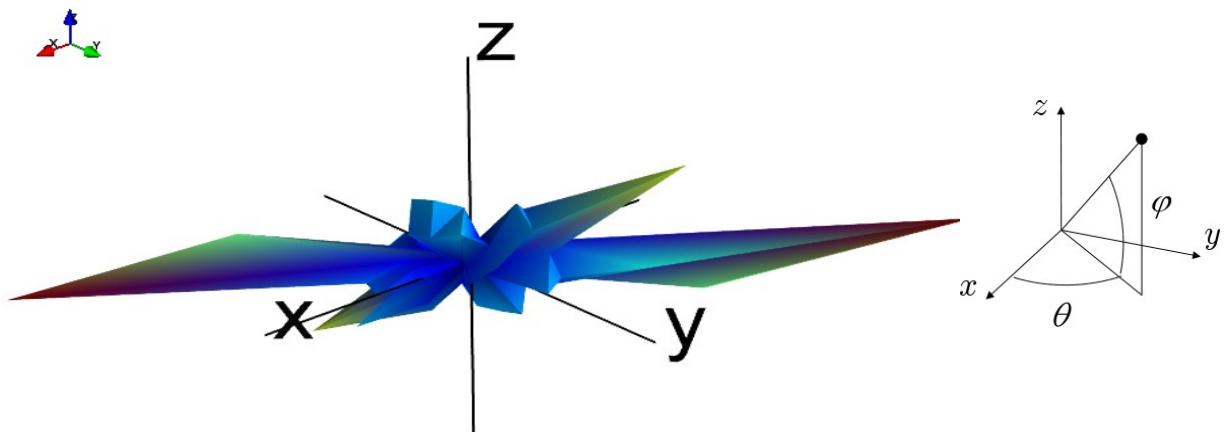


Figure 4 : Rose des directions calculée pour 20 classes selon l'angle θ et 6 classes selon l'angle ϕ .

3. Évaluation de la conductivité thermique effective

De nombreuses méthodes existent pour évaluer la conductivité thermique effective de matériau à forte porosité. On peut ainsi trouver des méthodes expérimentales et des méthodes basées sur la simulation numérique (éléments finis, éléments de frontière, Monte-Carlo, Lattice-Boltzmann...) [9] avec comme représentation du milieu une structure géométrique construite numériquement ou à partir de la structure réelle obtenue par imagerie. Par ailleurs, des modèles basés sur l'équation de Fourier, sur des analogies électriques ou empiriques ont été développés afin de prédire l'évolution de la conductivité thermique effective en fonction de différents paramètres (porosité, tortuosité, orientation, etc.).

Nous nous proposons, dans cette partie, de comparer des résultats obtenus à partir de calcul réalisés sur une image tomographique couplée à une méthode de changement d'échelle, à des modèles décrits dans la littérature scientifique.

3.1. Conductivité thermique obtenue expérimentalement

La conductivité thermique de la laine de chanvre a été déterminée expérimentalement par une méthode instationnaire (Tci, C-Therm Technologies), basée sur la technique du plan chaud. Une valeur moyenne de $0,047 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a été déterminée dans le cas de la laine de chanvre préalablement séchée et à température ambiante. Des mesures de conductivités thermiques suivant 3 orientations ont été réalisées mais n'ont pas permis de conclure à un transfert prépondérant dans une direction particulière.

3.2. Conductivité thermique obtenue par analyse d'image

3.2.1. Modèle à une température

Une seconde approche consiste à calculer le tenseur de conductivité thermique macroscopique directement sur la microstructure réelle par une méthode de changement d'échelle [3] Dans cette approche, le lien entre la température locale et la température macroscopique s'exprime au travers du problème différentiel suivant, si l'on suppose l'équilibre thermique local :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\lambda_f \cdot \nabla b_f) &= 0 \\ \nabla \cdot (\lambda_a \cdot \nabla b_a) &= 0 \\ b_f &= b_a \text{ sur } A_{fa} \\ n_{fa} \cdot \lambda_f \cdot \nabla b_f &= n_{fa} \cdot \lambda_a \cdot \nabla b_a + n_{fa} (\lambda_a - \lambda_f) \\ b_a(\mathbf{r} + l_i) &= b_a(\mathbf{r}), b_f(\mathbf{r} + l_i) = b_f(\mathbf{r}), i = x, y, z \quad \text{Périodicité} \\ \langle b_f \rangle &= \langle b_a \rangle = 0 \quad \text{Moyenne nulle} \end{aligned} \quad (1)$$

L'opérateur $\langle \rangle$ désigne la moyenne spatiale prise dans le volume de calcul. Le tenseur de conductivité effective s'exprime alors à partir du champ de fermeture \mathbf{b} :

$$\lambda_{eq} = \epsilon_f \langle \lambda_f \rangle + \epsilon_a \langle \lambda_a \rangle + \frac{\lambda_f - \lambda_a}{V} \cdot \int_{A_{fa}} n_{fa} \cdot \mathbf{b}_f \, dA \quad (2)$$

La résolution de ce problème de fermeture sur la structure réelle permet de calculer le tenseur de conductivité thermique équivalent à la condition de connaître le champ de tenseurs de conductivité thermique locale λ_f et λ_a . Si la conductivité de l'air immobile est isotrope, le tenseur de conductivité thermique des fibres est orthotrope. Sa valeur pour les composantes radiales et tangentielles est d'environ $0,44 \text{ W/mK}$, tandis qu'elle est de $0,88 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour la composante longitudinale [3]. La détermination du champ de conductivité locale des fibres nécessite donc de connaître l'orientation locale en chaque point des fibres. Pour ce faire, nous utilisons les champs d'orientation locales calculées précédemment. Le problème de fermeture est résolu par un schéma aux volumes finis [10] où le maillage correspond à celui de l'image (maille cubique).

3.2.2. Résultats

La conductivité thermique est calculée sur des volumes de tailles croissantes, ceci afin de vérifier d'une part la stabilisation des résultats et d'autre part de montrer que le VER géométrique est également représentatif pour le processus physique étudié. La figure 5 présente l'évolution des trois composantes du tenseur de conductivité macroscopique ainsi que de l'écart type en fonction du volume de calcul. On constate une stabilisation satisfaisante à partir d'un volume de 150 mm³ environ, ce qui correspond au VER géométrique déterminé par les mesures morphologiques. L'anisotropie de la conductivité équivalente est également mise en évidence et correspond ici encore aux résultats obtenus par l'analyse des fonctions d'autocorrélation. Les valeurs calculées ($\lambda_x = 0,048$ W.m⁻¹.K⁻¹, $\lambda_y = 0,043$ W.m⁻¹.K⁻¹, $\lambda_z = 0,033$ W.m⁻¹.K⁻¹) sont du même ordre de grandeur que les résultats expérimentaux (0,047 W.m⁻¹.K⁻¹), même si on n'a pas pu mettre en évidence une orientation spécifique de la conductivité thermique expérimentalement (sûrement dû à la technique de mesure expérimentale).

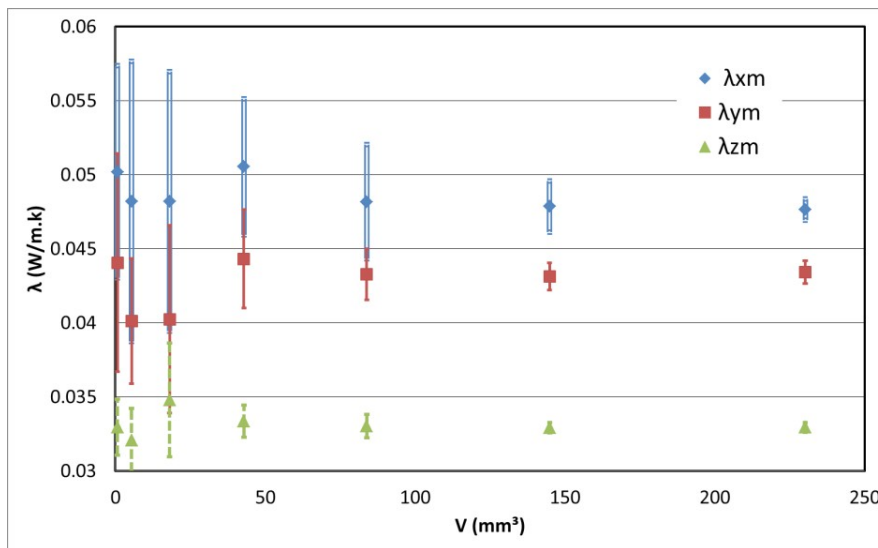


Figure 5 : Tenseur des conductivités thermiques en fonction du volume étudié.

3.3. Conductivité thermique obtenue par des modèles

3.3.1. Description des modèles

A partir de quelques modèles de base, de nombreux modèles ont été développés en introduisant des paramètres empiriques pour tenir compte de certaines caractéristiques structurales du matériau ou en combinant plusieurs modèles de base pour obtenir des modèles plus complexes. Le tableau suivant présente les modèles que nous avons retenus en fonction de leurs caractéristiques.

Modèles	Méthodes	Formes de la charge	Remarques
Série, parallèle [11]	Analogie		
Maxwell [12]	Fourier	Particules sphériques homogènes sans contact	
Halpin-Tsai [13]	Fourier	Fibres, disques	Anisotropie du matériau
Lewis et Nielsen [13]	Empirique	Cubes, cylindres, sphères, fibres	Fraction volumique maximum de charges
Willye et Southwick, et de Krischer [14]	Analogie		Conductivité anisotrope de la fibre, prise en compte de l'orientation des fibres
HAC [11][15]	Auto-cohérente		Modèle à deux composantes

Tableau 1 : Modèles de conductivité thermiques équivalentes.

3.3.2. Résultats

Dans cette étude, les modèles précédents ont été testés et les résultats ont été comparés à ceux obtenues par simulation numérique sur des images tomographiques (tableau 2).

Modèles	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Mesure expérimentale	0,047
Série	0,028
Parallèle	0,077
Maxwell	0,032
Halpin-Tsai	0,031
Lewis et Nielsen	0,036
HAC	0,061
Willye et Southwick	Suivant x : 0,058
	Suivant y : 0,064
	Suivant z : 0,046
Krischer	Suivant x : 0,042
	Suivant y : 0,046
	Suivant z : 0,035
Par analyse d'image	Suivant x : 0,048
	Suivant y : 0,042
	Suivant z : 0,033

Tableau 2 : Valeurs des conductivités thermiques équivalentes.

On peut noter d'une part que les modèles « série » et « parallèle » fournissent respectivement les valeurs minimum et maximum de la conductivité thermique apparente. Par ailleurs, les modèles classiques (Maxwell, Halpin-Tsai, Lewis et Nielsen et HAC) présentent des valeurs assez éloignées de la valeur expérimentale. Ceci est probablement lié au fait qu'ils ne tiennent pas compte de la forme des charges (ici des fibres) ou l'orientation de celles-ci.

L'intérêt des modèles de Willye et Southwick et de Krischer, qui sont des modèles basés sur l'analogie électrique (en deux dimensions), est qu'ils prennent en compte : l'orientation des fibres, la fraction des fibres suivant leur orientation (parallèle ou perpendiculaire au flux de chaleur), et l'anisotropie de la conductivité thermique intrinsèque de la fibre.

Afin de renseigner ces modèles, nous avons utilisé l'image tomographique afin de déterminer les orientations locales principales. Dans le plan [xy], respectivement 45% et 55% des fibres sont orientées plutôt selon x et plutôt selon y (nous avons divisés le champ d'orientation en deux classes selon θ ici); dans le plan [xz] et [yz], 27% des fibres ont une orientation privilégiée plutôt suivant z (de la même manière le champ d'orientation locale est pour ce faire divisé en deux classes selon ϕ). Ces pourcentages des fibres suivant les différentes directions ont ainsi été introduites dans les modèles de Willye et Southwick et de Krischer. On obtient ainsi un tenseur de conductivité thermique (suivant x, y et z) pour chaque modèle. Il est intéressant de remarquer que le modèle de Krischer donne un tenseur de conductivité très proche de celui obtenu par le calcul sur la structure réelle lorsqu'il est renseigné par des mesures structurales issues de l'analyse d'image.

4. Conclusion

A travers cette étude, nous avons montré tout l'intérêt de l'utilisation d'images tomographiques pour la caractérisation morphologique d'une laine de chanvre, mais aussi pour le calcul de ses propriétés thermiques macroscopiques. Les résultats présentés complètent les mesures obtenues par les méthodes expérimentales traditionnelles et permettent en outre d'étoffer les données encore très limitées qui sont disponibles dans la littérature sur ce type de matériaux. On remarquera également que le calcul numérique a permis de mettre en évidence une anisotropie des propriétés macroscopiques liée à l'orientation des fibres, qui n'a pas été détectée expérimentalement. Par

ailleurs, on a pu montrer que certains modèles de la littérature peuvent être utilisés afin d'estimer un tenseur de conductivité thermique de laines, à partir du moment où ils sont bien renseignés sur la microstructure du matériau. Un travail plus approfondi, notamment sur des paramètres tels que les résistances de contacts entre les fibres, permettraient d'affiner ces modèles de conductivité thermique.

Références

- [1] I.H. Tavman, Effective thermal conductivity of isotropic polymer composites, *Int Commun Heat Mass Transfer*, 25 (5) (1998), pp. 723–732
- [2] M.R. Kulkarni, R.P. Brady, A model of global thermal conductivity in laminated carbon/carbon composites, *Compos Sci Technol*, 57 (3) (1997), pp. 277–285.
- [3] J. Lux , A. Ahmadi ,C. Gobbé ,C. Delisée , Macroscopic thermal properties of real fibrous materials : volume averaging method and 3D image analysis, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Volume 49, Issues 11-12, (June 2006), pp. 1958-1973.
- [4] J. Serra, Image Analysis and Mathematical Morphology, *New-York, Academic Press*, (1982).
- [5] J. Lux, C. Delisée, X. Thibault, 3D characterization of wood based fibrous materials: an application, *Image Analysis and Stereology*, 25:25-35, (2006).
- [6] G. Matheron. Eléments pour une théorie des milieux poreux. Paris: Masson; (1967).
- [7] J. Lux, Automatic segmentation and structural characterization of low density fiberboards, *Accepted for publication in Image Analysis and stereology*.
- [8] H. Altendorf, and D. Jeulin, 3D Directional Mathematical Morphology for Analysis of Fiber Orientations. *Image Analysis & Stereology*, [S.I.], v. 28, n. 3, p. 143-153, (may. 2011). ISSN 1854-5165.
- [9] S. Veisheh, N. Khodabandeh, A. Hakkaki-Fard. Mathematical models for thermal conductivity density relationship in fibrous thermal insulations for practical application. *Asian Journal of civil engineering (building and housing)* Vol. 10, No. 2 (2009) pages 201-214.
- [10] M. Edwards, et C. Rogers, A flux continuous scheme for the full tensor pressure equation. In Christie et al., *Eds. Proc of 4th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*,(June 1994) Norway.
- [11] V. Cerezo, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique , *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon* (2005)
- [12] J. Wang , J. K. Carson , M. F. North , D. J. Cleland , A new structural model of effective thermal conductivity for heterogeneous materials with co-continuous phases, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (2008) 2389-2397.
- [13] G. Droval, Elaboration et caractérisation de composites polymères conducteurs électrique et thermique
- [14] F. Collet, Caractéristiques hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux, *Institut National des Sciences Appliquées de Rennes* (2004)
- [15] L. Arnaud, H. Monnet, C. Cordier, F. Sallet , Modélisation par homogénéisation autocohérente de la conductivité thermique de béton et laines de chanvre. *Congrès français de thermique*, 15–17 (mai 2000), Elsevier; 2000. pp. 543–548.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la région Poitou-Charentes et les fonds FEDER pour le financement de ces travaux et Mme Delisée et M. Malvestio (respectivement professeure des universités et ingénieur d'études à l'I2M, Bordeaux) pour leur aide dans l'acquisition des images tomographiques.