

DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUE DU BOIS DE CHÈNEVOTTE À PARTIR D'IMAGERIES 3D OBTENUES PAR NANOTOMOGRAPHIE X.

Moudhaffar Nouri*¹ , Anh Dung Tran Le¹ , Willy Leclerc¹ , Geoffrey Promis¹ , Dang Mao Nguyen² ,Patrick Perré³

¹Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI, UR-UPJV 3899), Université de Picardie Jules Verne, Avenue des Facultés, Amiens 80025 Cedex 1, France

²Laboratoire Innovation Matériau Bois Habitat Apprentissage (LIMBHA), Ecole Supérieure du Bois, 7 Rue Christian Pauc, 44306, Nantes, France

³Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux, SFR Condorcet FR CNRS 3417, Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Center Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie, 3 rue des Rouges Terres, Pomacle 51110, France

***moudhaffar.nouri@u-picardie.fr**

RESUME. Ce travail est dédié à la prédiction des propriétés thermo-physiques du bois de chènevotte à partir de leur morphologie 3D réelle grâce à la nanotomographie. Le traitement des images est réalisé avec Fiji-ImageJ. Les propriétés morphologiques comme la porosité, l'orientation des fibres, la taille des pores et la tortuosité sont obtenues à l'aide d'un ensemble de Volume Elémentaires Représentatifs (VER) extraits des images réalisées.. La Conductivité Thermique Effective (CTE) est par ailleurs déterminée dans les trois directions orthogonales par le biais d'un code de simulation écrit en langage Fortran lequel est basé sur la méthode des volumes finis.. La formulation de l'équation d'énergie tient compte du rôle de l'eau dans le transfert thermique sous sa forme liée et sous forme de vapeur.

MOTS-CLÉS: Bois de chènevotte, nanotomographie à rayons X, propriétés morphologiques, conductivité effective.

ABSTRACT. This work is dedicated to predicting the macroscopic properties of hemp shiv from their real 3D morphology thanks to nanotomography. Image processing is made with Fiji-ImageJ. Morphology properties like porosity, Fibre orientation, Pore size, and tortuosity are predicted based on a VER study. Morphological properties like porosity, fiber orientation, pore size and tortuosity are evaluated using a set of Representative Elemental Volumes (REVs) extracted from the 3D images. The Effective Thermal Conductivity (ETC) is also determined in the three orthogonal directions through a simulation code written in Fortran language which is based on the finite volume method. The formulation of the energy equation considers the role of water in the heat transfer in its bound form and as vapor.

KEYWORDS: hemp shiv, X-ray nanotomography, morphological properties, effective conductivity.

1 INTRODUCTION

Lors de ces dernières décennies, les matériaux biosourcés hygroscopiques ont suscité un intérêt grandissant, notamment dans le domaine du génie civil. Cette classe de matériaux dispose en effet de plusieurs avantages. En premier lieu, les matériaux biosourcés sont recyclables (Scardeccia, 2020).

Le béton de chanvre, à titre d'exemple, est facile à mettre en œuvre, à déconstruire et à recycler et s'intègre aisément dans la composition de paroi de bâtiments. En deuxième lieu, le contexte agricole national français favorise l'utilisation du béton de chanvre grâce à une production d'environ 40 000 t de bois de chènevotte, suffisante pour répondre au besoin du marché (Nguyen, T. T. 2010). En outre, la transformation du bois de chènevotte est respectueuse de l'environnement, car celle-ci s'effectue de manière mécanique et sans aucun recours à un traitement chimique, tout en conservant une durabilité significative (Marceau et al. 2017). En plus de ses avantages environnementaux, la chènevotte, comme les matériaux biosourcés en général, disposent de propriétés hygrothermiques intéressantes, notamment au regard de leur capacité à stocker et à libérer l'humidité de manière intelligente en fonction de l'état hydrique du milieu (Shea et al. 2012, Collet-Foucault 2004). Plusieurs mécanismes sont mis en évidence pour assurer ces échanges tels que l'effet mémoire (Perré, 2019) ou le couplage chaleur-masse (Perré et al. 2019). Le bois de chènevotte, comme les autres matériaux biosourcés fibreux, se compose de deux phases : une matrice solide et une seconde phase gazeuse qui est souvent moins conductive et permet d'assurer le stockage de l'énergie. Ainsi, le bois de chènevotte est un bon isolant thermique au regard de sa conductivité thermique, largement affectée par sa saturation et sa densité avec des valeurs comprises entre 0.048 et 0.123 W/mK.

Les résidus de chanvre sont des particules ligneuses extraites au cœur des tiges de chanvre (*cannabis sativa*). Ils sont obtenus par un processus industriel de défibrage par broyage mécanique des particules qui sont ensuite dépoussiérées et calibrées (Bouloc 2006). La caractérisation numérique de la chènevotte et des matériaux similaires à l'échelle microscopique est complémentaire aux méthodes analytiques car cette méthode fournit de larges informations sur la morphologie. Les études microscopiques effectuées sur le bois de chènevotte, basées sur la MEP, révèlent que sa microstructure est composée de vaisseaux conducteurs dont les diamètres varient entre 10 μm et 20 μm . La détermination de la porosité de la chènevotte est facilitée par la nature de ses deux phases bien distinctes. Cependant, les diamètres des pores varient d'une façon considérable (Jiang et al. 2018) au sein du matériau. Les microspores ont un diamètre qui varie entre quelques nanomètres et jusqu'à 2 μm . Les mésopores ont un diamètre entre 2 μm et 20 μm tandis que les macropores ont un diamètre supérieure à 20 μm , pouvant atteindre l'ordre de quelques millimètres. Ces derniers sont souvent concentrés dans la couche de la moelle. Cette variation importante de l'ordre de grandeur est difficile à couvrir par une seule méthode de détermination de la porosité, notamment avec certaines méthodes analytiques (Anovitz 2015). Latomographie à double foyer offre l'avantage de combiner les deux échelles nano et microscopiques afin de couvrir la totalité du spectre de porosité. Dans la direction longitudinale, le bois de chènevotte est composé de vaisseaux (fibres ouvertes), contenant des perforations horizontales permettant la circulation de l'humidité entre les vaisseaux. Ces vaisseaux (macropores) sont généralement solitaires et entourés par des fibres trachéides et des fibres libriformes (mésopores), séparées par des rayons ligneux. La porosité du bois de chènevotte a été étudiée à plusieurs reprises dans la littérature, soit par des méthodes analytiques, soit par des méthodes à radiation (microscope optique, Microscope électronique à balayage). Les résultats varient en fonction de la densité des tiges observées. Une étude effectuée à l'aide des particules enrichies en magnétite (MEP) conduit à une porosité de 76,6 % \Rightarrow 0.2 (Jiang et al. 2018). Un résultat identique a été identifié avec la méthode MEP par Nguyen et al. (Nguyen et al. 2009).

2 ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE DU BOIS DE CHÈNEVOTTE

Ce travail consiste alors en une caractérisation de la microstructure du bois de chènevotte, effectuée à partir d'un ensemble d'images obtenues par tomographie, réalisées sur un dispositif EasyTom XL Ultra (160-230) à un foyer Nano 160 de tension de (60kv). L'imageur CCD utilisé permet d'obtenir une résolution de 0,3 μm . 1568 plans de projection sont obtenus avec des dimensions de 2016 x 1344 pixels (0.604 mm x 0.409 mm). Dans la partie suivante, deux études sont présentées : dans un premier temps, la morphologie du bois de chènevotte est analysée à partir des images obtenues par tomographie exploitées grâce au logiciel FIJI-IMAGEJ (Schindelin et al. 2012). Dans un second temps, la caractérisation des propriétés thermiques effectives du bois de chènevotte est effectuée à l'aide d'une reconstruction de la morphologie à partir des images obtenues par tomographie. La conductivité thermique effective (CTE) est déterminée par homogénéisation via la simulation du transfert thermique au sein d'un VER à l'échelle des pores, de façon analogue à des travaux effectués sur du bois (Perré et al. 2016, Louërat et al. 2018).

2.1 PROPRIETES MORPHOLOGIQUES

Afin d'étudier la morphologie du bois de chènevotte, la notion de VER est indispensable. En effet, le VER d'un milieu hétérogène caractérise le plus petit volume qui permet de représenter fidèlement sa structure à l'échelle d'étude visée (Hornung 1996). Ses dimensions doivent être suffisamment fines pour éviter les variations observées à l'échelle macroscopique, mais également suffisamment grandes pour représenter la complexité de sa morphologie. Sous ces hypothèses, la mesure d'une propriété donnée du milieu étudié sera la plus précise possible.

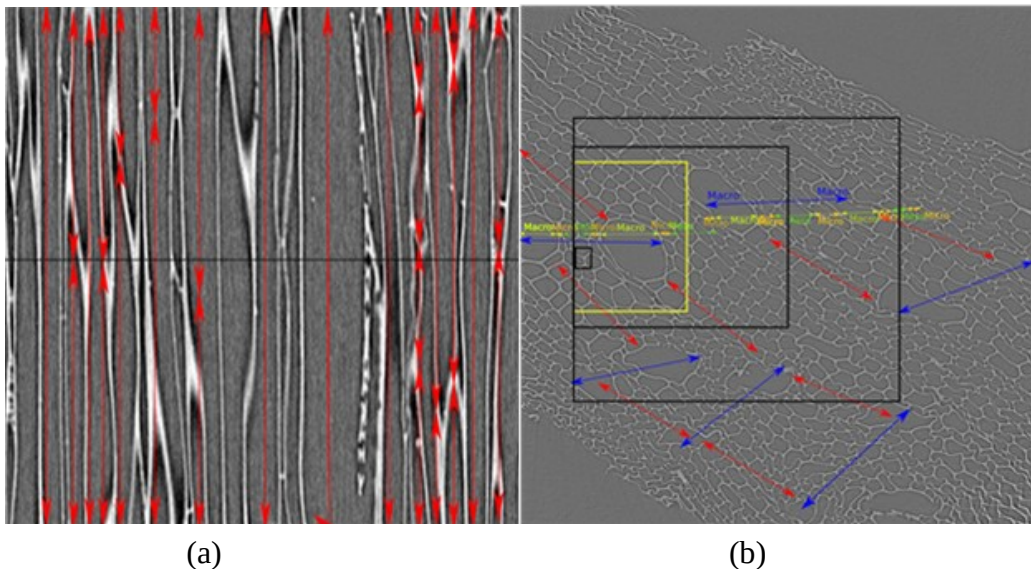


Figure 1: Imagerie obtenue par tomographie du bois de chènevotte : a- a) Plan de coupe horizontale, b- b) Reconstitution du plan longitudinal à l'aide du logiciel FIJI-IMAGEJ
Le VER peut présenter une certaine périodicité typique de la structure du matériau étudié. Dans les images du plan du bois de la chènevotte présentées en Figure 1, nous remarquons que sa structure est caractérisée par des macropores situés à distance régulière (flèches bleues) et entourés par des mésopores, qui sont eux-mêmes séparés par des micropores. Cette périodicité se translate dans la direction radiale (flèches rouges). Le volume élémentaire, défini en jaune, est le plus petit volume

élémentaire qui recouvre cette périodicité. Les autres volumes (en noir) sont obtenus en multipliant les dimensions ce volume. Dans la direction longitudinale, on constate une symétrie par rapport à la longueur moyenne des fibres fermées. Par la suite, cette longueur est identifiée comme étant la profondeur du VER défini dans la section transversale.

Le Tableau 1 présente la porosité et le diamètre moyen des pores pour chaque volume étudié. Ces résultats sont obtenus par un traitement des images avec Fiji-ImageJ.

On constate sur la Figure 2-a que la porosité du milieu converge en fonction la taille du volume étudié vers $83,6\% \pm 0,62$. La valeur ainsi obtenue est proche de celle évoquée en introduction ($76,6\%$) et publiée par (Jiang et al. 2018). Néanmoins, il faut tenir compte du fait que la porosité dépend de plusieurs facteurs dont la densité du milieu, ou encore l'année de récolte.

La Figure 2-b, montre que le diamètre moyen des pores converge en fonction de la taille du volume étudié. Ce diamètre tend vers une valeur de $17,39 \pm 0,57\ \mu\text{m}$, valeur proche de la valeur de $20,8\ \mu\text{m}$ identifiée par (Jiang et al. 2018).

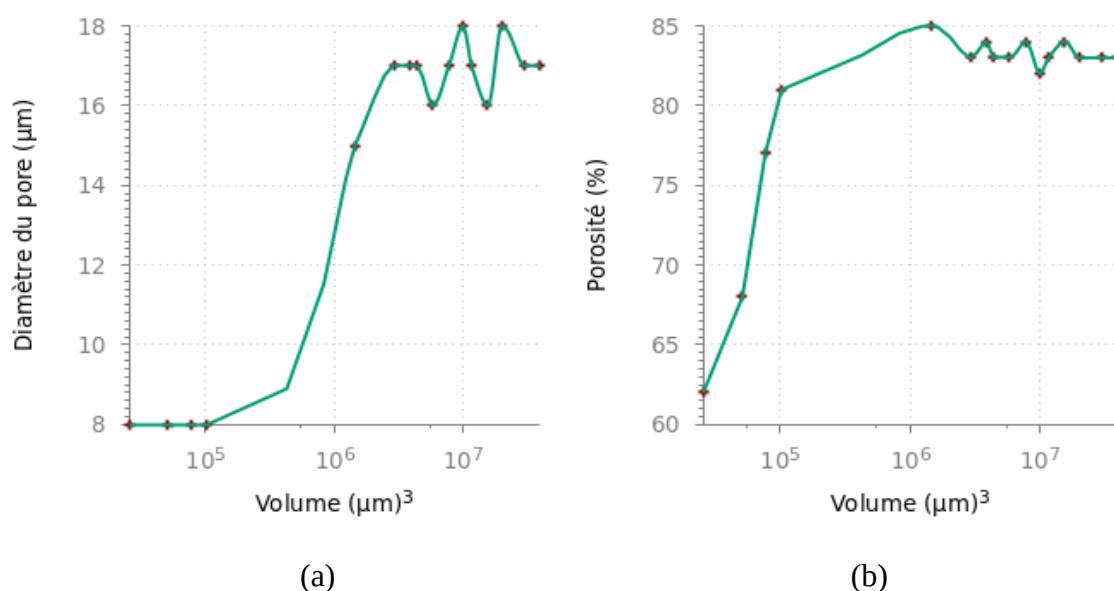


Figure 2: Propriétés morphologiques en fonction du volume étudié : a) Diamètre moyen des pores, b) Porosité

La Figure 3 montre la distribution du diamètre moyen des pores. Les deux types de pores les plus fréquents sont les mésopores et les micropores, avec un diamètre moyen respectif proche de $17,6\ \mu\text{m}$ et $2,9\ \mu\text{m}$. Les macropores (vaisseaux) sont moins nombreux avec une variabilité plus importante entre $20\ \mu\text{m}$ et $100\ \mu\text{m}$ et une distribution similaire à celle obtenue dans des travaux antérieurs (Glé et al. 2021, Magniont et al. 2012).

L'orientation des fibres est obtenue par le truchement de la reconstruction du plan longitudinal contenant les fibres dans leur longueur. L'orientation moyenne des fibres par rapport au plan horizontal est de l'ordre de $84,76 \pm 19$ degrés. Cette valeur s'explique par le fait que les fibres de bois de chènevotte (Figure -1a) sont longitudinales et unidirectionnelles, à l'exception de quelques perforations horizontales. La tortuosité, définie comme le rapport de la longueur, des voies fluides tortueuses préférentielles et de la dimension macropique du l'échantillon, a une valeur moyenne de $1,0144$. Cette valeur proche de 1, symbolise le caractère rectiligne des fibres.

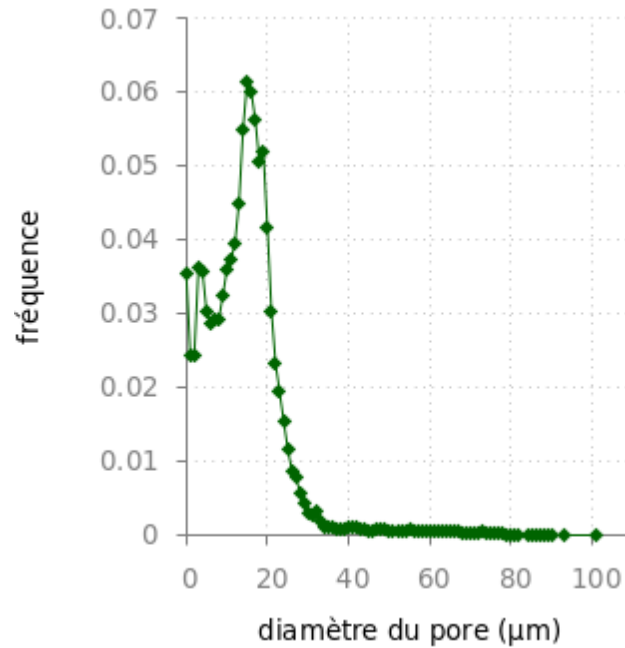


Figure 3: Distribution du diamètre moyen des pores

Tableau 1: Porosité et diamètre moyen de pores en fonction du volume étudié.

	Dimension(longueur, largeur, hauteur)	Porosité(%)	Diamètre moyen des pores (μm)
Volume 0	60X60X250	62,2	8,35
	60X60X500	68,6	8,37
	60X60X750	77,40	8,33
	60X60X1000	81,20	8,69
Volume 1 (Volume de référence)	396X514X250	85,14	15,64
	396X514X500	83,9	17,63
	396X514X750	83,7	17,19
	396X514X1000	83,9	16,55
Volume 2	782X696X250	84,2	17,10
	782X696X500	84,05	17,85
	782X696X750	83,70	17,54
	782X696X1000	84,6	16,95
Volume 3	1320X1060X250	82,8	18,55
	1320X1060X500	83,5	18,22
	1320X1060X750	83,2	17,71
	1320X1060X1000	83,02	17,72

2.2 PROPRIETES THERMIQUES

Afin de modéliser l'équation de conservation de l'énergie et de prédire les propriétés thermiques du bois de chènevotte, nous considérons un milieu biphasique constitué d'une phase gazeuse et d'une phase solide (Figure 4).

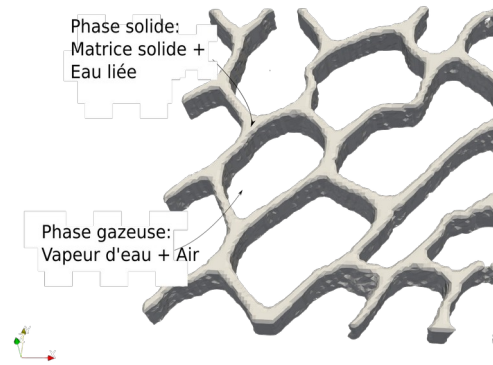


Figure 4: Modèle biphasique utilisé pour la simulation des propriétés thermiques du bois de chènevotte

La phase gazeuse est constituée de l'air humide, résultant du mélange de l'air avec le vapeur d'eau. Cette phase correspond aux pores du bois de chènevotte. La phase solide représente la matrice, constituée de la paroi cellulaire et l'eau liée. Ce modèle prend en considération les différents éléments principaux jouant sur la conductivité du bois de chènevotte. L'équation de transfert thermique sous sa forme enthalpique est présentée comme suit :

$$\frac{\partial (\psi_g (\rho_v(x,t) h_v(x,t) + \rho_a(x,t) h_a(x,t)) + \psi_s (\rho_b(x,t) h_b(x,t) + \rho_s(x,t) h_s(x,t)))}{\partial t} (1) = H(k(x)) \nabla(T(x,t))$$

Avec : $h_v(x,t) = C_p T(x,t) + L_{v273.5}$

$$h_a(x,t) = C_{pa} T(x,t) \quad x \in \Omega_g$$

$$h_s(x,t) = C_{ps} T(x,t) \quad x \in \Omega_s$$

$$h_b(x,t) = C_{pb} T(x,t) \quad x \in \Omega_s$$

$$H(k(x)) = \frac{2k_{x,i} k_{x+\delta x,i}}{k_{x,i} + k_{x+\delta x,i}} \quad i = g, s$$

a : air, s : matrice solide, b : eau liée, g : phase gazeuse, s : phase solide,

Le modèle proposé permet de prendre en compte deux composants importants du transfert thermique dans les milieux hygroscopiques : la vapeur d'eau et l'eau liée présentes dans la phase solide. Bien que la diffusivité thermique de la vapeur d'eau et de l'air sec soit similaires, l'eau liée est deux fois plus diffusive, ce qui affecte la diffusivité et la distribution de la température dans le matériau.

L'équation 1 est résolue à l'aide de la méthode volume finis, et au regard des hypothèses suivantes : les termes temporels sont discrétisés suivant un schéma d'Euler implicite. la résolution du système algébrique est effectuée à l'aide d'un solveur Newton-Krylov sans jacobien, permettant de choisir un pas de temps élevé avec un nombre d'itération réduit en comparaison avec les méthodes de résolutions classiques, notamment basées sur la méthode du point fixe.

La CTE macroscopique du VER, déterminée en sous-section 2.1, est identifiée à l'aide d'une approche d'homogénéisation : l'équation 1 est résolue en considérant des conditions aux limites de type Dirichlet orthogonales à la direction selon laquelle la CTE est évaluée ; et les surfaces longitudinales à cette direction sont soumises à une condition aux limites de type adiabatique. Une fois que le régime stationnaire est atteint, la conductivité thermique du milieu est déterminée à partir du flux moyen prédit sur chaque volume de contrôle (CV). Le calcul de la CTE prend ainsi la forme suivante :

$$\Gamma_{eff} = \frac{\langle \varphi \rangle L_x}{\Delta \psi} \quad (2)$$

La validation du code numérique a été effectuée par comparaison avec une diffusivité thermique analytique équivalente pour des morphologies de type série et parallèle.

La Figure 5 présente la distribution de la température en régime stationnaire avec les conditions aux limites imposées dans la direction x. Le même calcul a été effectué en respectant des conditions aux limites imposées dans les directions y et z. La CTE déterminée dans la direction x est respectivement 0.038 W/mK.

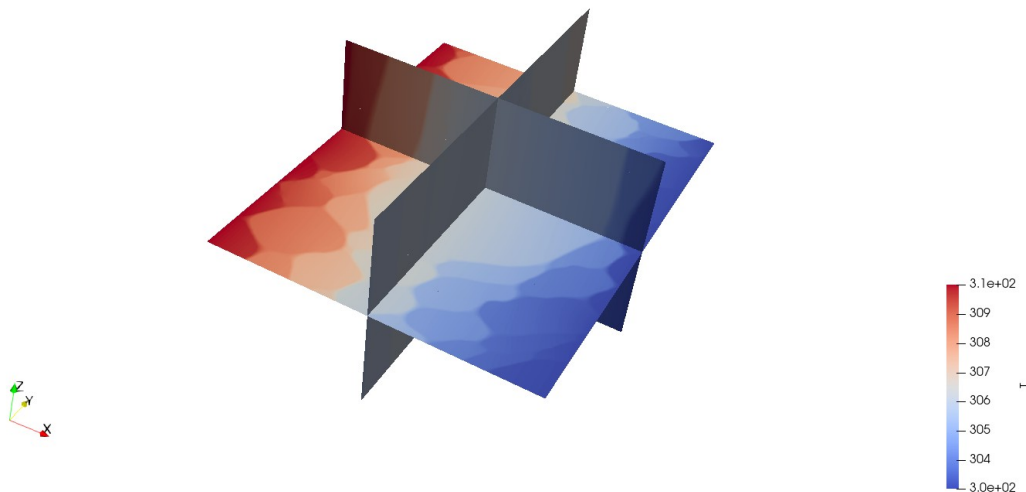


Figure 5: distribution de température sur plan 3D en régime transitoire sur le VER

3 CONCLUSION

Dans cet article, les caractéristiques morphologiques et thermiques d'un échantillon de bois de chènevotte ont été étudiées. La nanotomographie a permis d'obtenir des imageries de bois de chènevotte, matériau poreux, à partir desquelles plusieurs paramètres ont été caractérisés, tels que la porosité, l'orientation des fibres ou le diamètre moyen des pores. D'autre part, la simulation numérique a permis d'estimer la CTE du bois de chènevotte. Globalement, les valeurs prédites sont dans la plage de valeurs des résultats déjà publiés dans la littérature, confirmant ainsi la robustesse de l'approche proposée.

4 REMERCIEMENT

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet HygroPo-BBM (ANR-21-CE22-0026). Les essais tomographiques pour l'échantillon de chènevotte ont été réalisés sur une EasyTom XL Ultra (160-230) par RX Solutions (Chavanod, France). Les auteurs tiennent à les en remercier.

5 BIBLIOGRAPHIE

- Anovitz, L. M., & Cole, D. R. (2015). Characterization and analysis of porosity and pore structures. *Reviews in Mineralogy and geochemistry*, 80(1), 61-164.
- Boulloc, P. (Ed.). (2006). *Le chanvre industriel: production et utilisations*. France Agricole Editions.
- Collet-Foucault, F. (2004). *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux* (Doctoral dissertation, Rennes, INSA).
- Collet, F., & Pretot, S. (2014). Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall. *Building and environment*, 82, 459-466.
- Glé, P., Lecompte, T., de Ménibus, A. H., Lenormand, H., Arufe, S., Chateau, C., ... & Celzard, A. (2021). Densities of hemp shiv for building: From multiscale characterisation to application. *Industrial Crops and Products*, 164, 113390.
- Hussain, A., Calabria-Holley, J., Lawrence, M., & Jiang, Y. (2019). Hygrothermal and mechanical characterisation of novel hemp shiv based thermal insulation composites. *Construction and Building Materials*, 212, 561-568.
- Hornung, U. (1996). *Homogenization and porous media* (Vol. 6). Springer Science & Business Media.
- Louërat M., Ayouz M., Perré P. (2018). Heat and moisture diffusion in spruce and wood panels computed from 3-D morphologies using the Lattice Boltzmann method, *J. Thermal Sci.*, 130: 471-483.
- Magniont, C., Escadeillas, G., Coutand, M., & Oms-Multon, C. (2012). Use of plant aggregates in building ecomaterials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(sup1), s17-s33.
- Marceau, S., & Delannoy, G. (2017). Durability of Bio-based concretes. In *Bio-aggregates Based Building Materials* (pp. 167-187). Springer, Dordrecht.
- Nguyen, S. T., Tran-Le, A. D., Vu, M. N., To, Q. D., Douzane, O., & Langlet, T. (2016). Modeling thermal conductivity of hemp insulation material: A multi-scale homogenization approach. *Building and Environment*, 107, 127-134.
- Nguyen, T. T. (2010). *Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre* (Doctoral dissertation, Université de Bretagne Sud).
- Nguyen, T. T., Picandet, V., Amziane, S., & Baley, C. (2009). Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(9), 1039-1050.
- Perré P., Almeida G., Ayouz M., Frank X. (2016). New modelling approaches to predict wood properties from its cellular structure: image-based representation and meshless methods, *Annals Forest Sci.*, 73: 147-162.
- Perré, P., Challansonnex, A., & Colin, J. (2019). On the importance of heat and mass transfer coupling for the characterization of hygroscopic insulation materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133, 968-975.
- Perré P. (2019). Coupled heat and mass transfer in biosourced porous media without local equilibrium: a macroscopic formulation tailored to computational simulation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 140: 717-730.
- Jiang, Y., Lawrence, R., Ansell, M., & Hussain, A. (2018). Cell wall microstructure, pore size distribution and absolute density of hemp shiv: Microstructure, porosity and absolute density. *Royal Society Open Science*, 5(4), 1-15.
- Scardecchia, S., Vita, A., Santulli, C., & Forcelllese, A. (2020). A material proposed for re-use of hemp shives as a waste from fiber production. *Materials Today: Proceedings*, 31, p213-p216.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., ... & Cardona, A. (2012). Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, 9(7), 676-682.
- Shea, A., Lawrence, M., & Walker, P. (2012). Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building. *Construction and building materials*, 36, 270-275.