

L'orientation angulaire désigne un état des fibres pouvant être intentionnellement changé pour modifier les propriétés du matériau correspondant. Dans cette communication, nous identifions le tenseur d'orientation angulaire d'un matériau fibreux, constitué par l'agencement de fibres végétales et de fibres bi-composants utilisées comme liant, par images MEB. On reconstruit alors un volume élémentaire représentatif (VER) de la micro-géométrie aléatoire à partir des distributions d'orientations angulaires précédemment mesurées. Pour plusieurs tirages de VER reconstruits, les équations locales (équations de Stokes, écoulement potentiel, conduction thermique) sont ensuite résolues par la méthode des éléments finis pour identifier les coefficients du modèle macroscopique. Des mesures de perméabilité et au tube d'impédance réalisées sur les échantillons réels montrent que le modèle correspondant est un bon candidat pour simuler l'ensemble des propriétés de transport de matériaux fibreux désordonnés à partir de la connaissance des principales caractéristiques de la géométrie (diamètres et proportions de fibres, distributions angulaires, porosité). Il est aussi montré par simulations que les propriétés de transport, en particulier la perméabilité, sont très affectées et donc modulables par l'orientation angulaire des fibres, ce qui en fait un levier privilégié pour l'amélioration ultérieure de leurs propriétés acoustiques.

## 1 Introduction

L'objectif général dans cette communication consiste à déterminer les propriétés géométriques, la perméabilité, et les propriétés acoustiques d'un matériau fibreux dont les paramètres de la microstructure sont identifiés par images obtenues au Microscope Electronique à Balayage (MEB). Ensuite, à partir du modèle reconstruit, l'orientation angulaire des fibres est soumise à modifications, les propriétés de transport et acoustiques peuvent alors être étudiées pour différents degrés d'alignement des fibres.

Les études précédentes sont soit restreintes à des modèles bidimensionnels [1, 2], soit limitées à l'influence de l'orientation angulaire sur la perméabilité du milieu [3]. On peut noter une étude intéressante qui regroupe à la fois une modélisation fine du milieu tridimensionnel et une prédiction de la perméabilité associée, mais dans laquelle il est dommage de constater une perte d'information physique causée par l'emploi subséquent d'un modèle empirique [4,5].

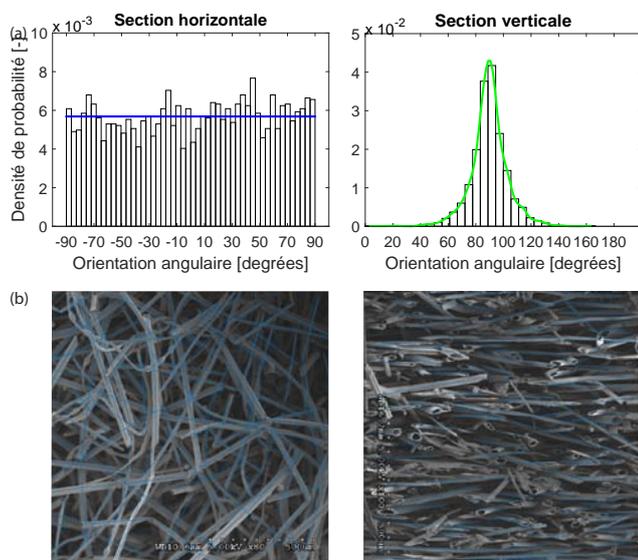


Figure 1: (a) Distributions de l'orientation des fibres déterminées expérimentalement par Microscopie Electronique à Balayage (MEB). Les histogrammes sont convertis en densités de probabilités. (b) Images MEB correspondant à des sections horizontale (plan xy) et verticale (plan orthogonal à xy).

A la connaissance des auteurs, c'est la première fois qu'un modèle tridimensionnel de fibres permettant la prédiction des propriétés de transport et d'absorption sonore d'un matériau réel est présenté en se basant uniquement sur l'étude de la géométrie locale du milieu par imagerie ; validations expérimentales à l'appui. La détermination du coefficient de pertes par transmission de l'échantillon inséré dans un tube d'impédance nécessite en revanche un ajustement des paramètres élastiques en utilisant un code éléments finis axisymétrique et une formulation de Biot [6], l'échantillon étant soumis à des contraintes latérales à son pourtour.

## 2 Méthodes numériques

On considère une structure désordonnée constituée de fibres rectilignes de sections circulaires distribuées aléatoirement dans un espace tridimensionnel avec recouvrement possible aux intersections. Les caractéristiques géométriques des cylindres constituant les fibres sont identifiées par imagerie. Le milieu fibreux d'intérêt est un matériau utilisé à des fins d'écoconception constitué de deux types de fibres, des fibres naturelles creuses d'asclépiade d'origine végétale (type a) et des fibres synthétiques bi-composants (type b) utilisées comme liant après chauffage. Toutes les structures fibreuses sont générées à porosité donnée,  $\phi = 0.962 \pm 0.04$ , qui correspond à la porosité mesurée. Les diamètres interne et externe des fibres creuses sont estimés par microscopie électronique à balayage. On collecte des images MEB de sections d'échantillons dans le plan horizontal (plan xy) et dans le plan vertical (plan orthogonal à xy) pour différentes localisations du matériau poreux, à partir desquelles les orientations angulaires des fibres pour chacun des deux plans sont mesurées manuellement. Ensuite, ces données expérimentales sont converties en densités de probabilités, en utilisant des distributions normale ou uniforme. Les histogrammes expérimentaux et les densités de probabilité correspondantes sont illustrés à la Figure 1. La densité de probabilité correspondant aux images prises dans le plan horizontal est uniforme, alors que l'orientation angulaire des fibres correspondant aux images MEB prises dans le plan vertical est caractérisée par une moyenne  $\mu_\theta = 89.73^\circ$  et un écart type  $\sigma_\theta = 13.63^\circ$ . On s'intéresse aussi au rapport entre longueur cumulée de fibres bi-composants et longueur cumulée de fibres d'Asclépiade,  $L_b/L_a$ .

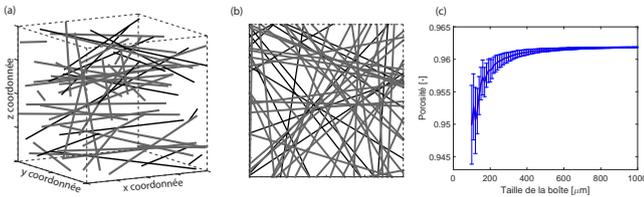


Figure 2: (a) Vue tridimensionnelle, (b) et vue bidimensionnelle correspondante d'un réseau de fibres généré numériquement, (c) avec la convergence de la porosité en fonction de la taille du VER.

Ensuite, on cherche à dimensionner la taille du Volume Élémentaire Représentatif (VER) cubique de dimension  $L^i$ , via une variante de l'algorithme de Wang et Pan (Wang et Pan, 2008). Ici, une approximation analytique 2D du volume total de fibres  $V_a$  et  $V_b$  à l'itération  $i$  permet d'estimer le nombre de fibres  $N_a$  et  $N_b$  contenues dans le volume cubique et d'en déduire la porosité correspondante ; connaissant la porosité cible, les rayons  $r_a = 25 \pm 6.6 \mu\text{m}$  et  $r_b = 14.7 \pm 1.7 \mu\text{m}$ , l'épaisseur de paroi de fibres creuses  $t = 1.6 \pm 0.4 \mu\text{m}$ , et le rapport  $L_b/L_a = 37.15\%$ . L'erreur commise est inversement proportionnelle à l'élancement des fibres. Chaque itération consiste en trois étapes distinctes : (i) un positionnement aléatoire  $(x_j, y_j)$  du centre de fibre  $c_j$  selon une distribution uniforme ; (ii) une assignation aléatoire d'angle d'orientation  $\theta_j$  pour le centre de fibre  $c_j$  qui appartient à la distribution angulaire identifiée expérimentalement ; (iii) un calcul analytique de la longueur de fibre  $l_j$  dans le carré de côté  $L^i$ , à partir duquel les volumes solides élémentaires sont déduits pour chaque type de fibre. La somme de ces volumes solides élémentaires tend asymptotiquement vers les estimations analytiques  $V_a$  et  $V_b$  initialement obtenues, et la porosité vers la porosité cible. Pour 1000 cas simulés, l'évolution de ce processus est illustrée par la Figure 2. Avec un critère de convergence basé sur une erreur relative entre porosité calculée et porosité expérimentale fixé à  $\varepsilon = 0.1 \%$ , on obtient  $L = 400 \mu\text{m}$ .

Les propriétés de transport sont ensuite classiquement obtenues par résolution, dans la phase fluide des VER reconstruits, des équations associées à trois problèmes aux limites types : (a) un écoulement de Stokes ; (b) un écoulement potentiel (formellement identique à un problème de conduction électrique avec phase solide non-conductrice) ; (c) une diffusion de la chaleur où la phase solide est à température constante. Des conditions aux limites périodiques sont imposées aux parois fluides du volume cubique. Les moyennes appropriées des champs solutions donnent accès aux grandeurs macroscopiques recherchées [8, 9].

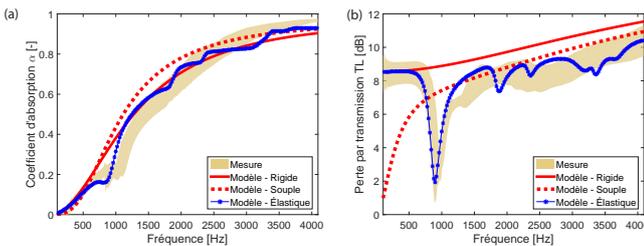


Figure 3: Comparaisons entre prédictions et mesures ; (a) coefficient d'absorption sonore en incidence normale, (b) coefficient de pertes par transmission. L'épaisseur de l'échantillon est égale à  $14.30 \pm 0.89 \text{ mm}$ .

Ces derniers estimateurs sont utilisés comme paramètres d'entrées de modèles semi-phénoménologiques approchés mais robustes dont on s'assure qu'ils vérifient des relations fondamentales entre parties réelle et imaginaire d'une fonction dynamique complexe. Les propriétés acoustiques d'un milieu fluide équivalent en squelette rigide sont ainsi déterminées, et comparées à des mesures d'absorption sonore en incidence normale réalisées en tube d'impédance (voir Figure 3). Le modèle souple, en plus des paramètres de transports précédemment calculés, nécessite la connaissance de la densité effective *in vacuo* du matériau fibreux obtenue expérimentalement,  $\rho_f = 32.3 \pm 0.07 \text{ kg/m}^3$  [10]. Pour ces deux modèles, on remarque une bonne adéquation entre absorption mesurée et simulée, sans paramètre ajusté. Tel que mentionné en introduction, simuler les pertes par transmission de l'échantillon nécessite une estimation des propriétés élastiques du matériau en conditions de montage dans le tube. Ces derniers paramètres sont quant à eux ajustés. Le module d'Young  $E$ , le coefficient de Poisson  $\nu$ , et le facteur d'amortissement  $\eta$  ainsi déterminés sont les suivants :  $E = 280\,000 \text{ Pa}$ ,  $\nu = 0$ ,  $\eta = 0.01$ . Les deux dernières valeurs sont classiques pour des matériaux fibreux, la première est relativement élevée, mais physiquement réaliste car le matériau subit des contraintes circonférentielles dans le tube qui ont pour effet d'augmenter sa raideur apparente. Telle qu'en atteste la Figure 3, sans ce dernier triplet de valeurs, une estimation fiable des pertes par transmission de l'échantillon n'est pas possible. Une tentative de détermination directe des paramètres élastiques d'un milieu fibreux aléatoire reste à faire et sera probablement l'objet de travaux ultérieurs.

### 3 Conclusion

La principale conclusion pouvant être élaborée compte tenu du raisonnement présenté au cours de cette communication est la suivante : les matériaux aléatoires générés à partir des données expérimentales que sont (i) les caractéristiques géométriques des fibres seules, (ii) les densités de probabilité des orientations angulaires, (iii) la porosité ; permettent d'estimer précisément les propriétés de transport et les propriétés acoustiques de matériaux fibreux aléatoires. On en déduit donc que l'approche proposée permet d'obtenir une bonne estimation des propriétés acoustiques de milieux fibreux aléatoires, en utilisant seulement l'information relative à la géométrie du réseau fibreux. La méthode numérique développée peut être ensuite utilisée pour simuler l'effet de l'orientation des fibres sur les propriétés de transport et les propriétés acoustiques d'un matériau fibreux aléatoire en utilisant le concept de tenseur d'orientation angulaire d'ordre deux [11]. On montre alors, en accord avec les études précédentes de la littérature, qu'un réseau fortement aligné avec l'axe de propagation de l'onde acoustique permet d'augmenter significativement la perméabilité du réseau étudié (d'un facteur qui atteint 3 ici). Cet effet peut être amplifié si la porosité diminue. Un autre effet marquant peut être souligné, la tortuosité augmente de manière proportionnelle au désalignement des axes d'orientation des fibres et de propagation de l'onde acoustique. On présente ainsi, de manière plus générale, une technique d'analyse des relations entre structure, propriétés, et élaboration de matériaux fibreux. La méthodologie reportée et les résultats obtenus ici ont tous été détaillés au travers d'un manuscrit

récemment soumis à publication dans un article international à comité de lecture [12].

## Remerciements

Ces travaux ont été soutenus financièrement par le Conseil National de Recherches du Canada (CNRC). H. T. Luu a bénéficié de bourses de mobilité financées par l'Université Paris-Est (UPE).

## Références

- [1] R. Venegas and O. Umnova, Acoustical properties of double porosity granular materials, *J. Acoust. Soc. Am.* **130**, 2765–2776 (2011).
- [2] C. Peyrega and D. Jeulin, Estimation of acoustic properties and of the representative volume element of random fibrous media, *J. Appl. Phys.* **113**, 104901 (2013).
- [3] P. Soltani, M. S. Johari, M. Zarrebini, Effect of 3D fiber orientation on permeability of realistic fibrous porous networks, *Pow. Tech.* **254**, 44–56 (2014).
- [4] K. Schladitz, S. Peters, D. Reinel-Bitzer, A. Wiegmann and J. Ohser, Design of acoustic trim based on geometric modeling and flow simulation for non-woven, *Comp. Mat. Sci.* **38**, 56-66 (2006).
- [5] M. E. Delany and E. N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Appl. Acoust.* **3**, 105-116 (1970).
- [6] N. Atalla, R. Panneton, and P. Debergue, A mixed displacement-pressure formulation for poroelastic materials, *J. Acoust. Soc. Am.* **104**, 1444-1452 (1998).
- [7] M. Wang and N. Pan, Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials, *Mat. Sci. Eng. R* **63**, 1-30 (2008).
- [8] D. L. Johnson, J. Koplik and R. Dashen, Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, *J. Fluid Mech.* **176**, 379-402 (1987).
- [9] D. Lafarge, P. Lemarinier, J. F. Allard, and V. Tarnow, Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies, *J. Acoust. Soc. Am.* **102**, 1995–2006 (1997).
- [10] S. G. Advani and C. L. Tucker, The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites, *J. Rheol.* **31**, 751-784 (1987).
- [11] R. Panneton, Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media, *J. Acoust. Soc. Am.* **122**, EL217-EL222 (2007).
- [12] H. T. Luu, C. Perrot, V. Monchiet, R. Panneton, Sound waves and angular orientation in fibrous materials, Ms # JASA-00503 submitted to *J. Acoust. Soc. Am.* (March 2016).