

Caractérisation de la diffusion de l'eau dans le bois utilisé pour la manufacture d'instrument à vent

ALKADRI Ahmad^{1,2}, JULLIEN Delphine², ARNOULD Olivier², DYAKONOVA Nina³,
COQUILLAT Dominique³, GRIL Joseph⁴

¹Henri Selmer Paris, 25 rue Maurice Berteaux, 78711 Mantes-la-Ville, France

²Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), Université de Montpellier, CNRS (UMR 5508), Montpellier, France

³Laboratoire Charles Coulomb (L2C), Université de Montpellier, CNRS (UMR 5521), Montpellier, France

⁴Institut Pascal, Université de Clermont Auvergne, CNRS (UMR 6602), Aubière, France
ahmad.alkadri@umontpellier.fr

Mots clefs : bois, diffusion, teneur en eau, TéraHertz

Contexte et objectif

Une étude sur la caractérisation de bois tropicaux (*Dalbergia melanoxylon* ou ébène du Mozambique) pour la facture d'instruments à vent est en cours dans le cadre d'une collaboration entre Henri SELMER Paris et le LMGC. Les objectifs de ces travaux sont de mieux caractériser la ressource utilisée par l'entreprise Henri Selmer Paris. Les recherches portent actuellement sur la diffusion de l'eau dans des échantillons de bois de différentes espèces et présentant des formes variées (cylindriques, parallélépipédiques, autres...), la modélisation de la teneur en eau à l'équilibre (EMC) sous diverses conditions atmosphériques, la mesure des coefficients de retrait et gonflement du bois au cours de changement de teneur en eau, et la validation d'un modèle de diffusion anisotrope en utilisant l'imagerie TéraHertz (THz).

Méthodes

Les expérimentations sur la diffusion reposent sur deux formes géométriques d'échantillons : parallélépipédique (Alkadri *et al.* 2017) et cylindrique creux (Fig. 1). Les échantillons sont stabilisés sous plusieurs conditions atmosphériques (température T en °C et humidité relative HR en %) pour mesurer les coefficients de diffusion et les teneurs en eau à l'équilibre avec la méthode gravimétrique classique.

La diffusion sur les échantillons parallélépipédiques et cylindriques a été modélisée. Dans Alkadri *et al.* (2017), nous avons décrit la modélisation de la diffusion dans des échantillons parallélépipédiques. Pour la diffusion dans des échantillons cylindriques, nous avons supposé que : (a) le matériau, bois de *Dalbergia melanoxylon*, est quasi-isotrope transverse (coefficient de diffusion radiale $D_R \sim$ tangentielle D_T). Ainsi, selon la loi de Fick, la quantité d'eau diffusée (C) dans le bois dans un plan du cylindre peut être écrite comme (Carslaw & Jaeger 1959, Crank 1975) :

$$D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) = \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (\text{eq. 1})$$

où r est la position radiale dans le cylindre, D est le coefficient de diffusion, et t le temps. Si le cylindre est creux, avec a son rayon intérieur et b son rayon extérieur, et si on isole les faces transverses, la diffusion va se passer principalement dans la direction radiale ou quasi-unidimensionnelle comme le cas de cylindre infini (Crank 1975).

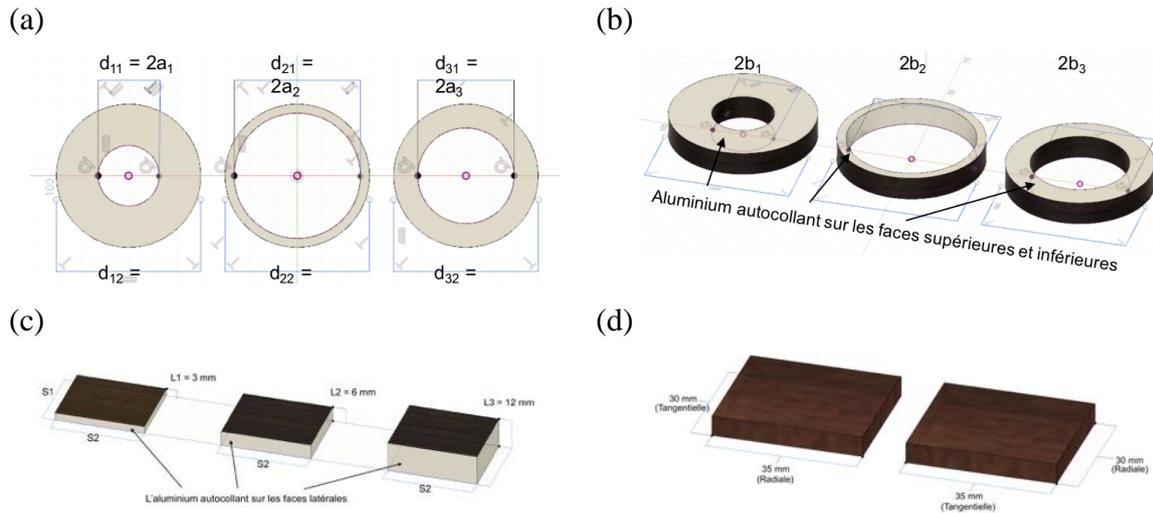


Fig. 1 : (a & b) Plan d'échantillonnage cylindrique creux avec différents ratios rayon extérieur/intérieur (b/a) ; (c) plan d'échantillonnage parallélépipédique, fait sur les trois orientations du bois (tangentielle, radiale, et longitudinale) ; (d) échantillons pour mesurer les teneurs en eau à l'équilibre du bois.

Avec cette géométrie, si la teneur en eau C_0 sur les bords extérieur et intérieur est constante, soit les conditions aux limites $C(r = a, t) = C(r = b, t) = C_0$, on obtient alors la solution suivant Carslaw et Jaeger (1959) :

$$C = C_0 \left[1 - \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(a\alpha_n)U_c(r\alpha_n)}{J_0(a\alpha_n) + J_0(b\alpha_n)} e^{-\alpha_n^2 Dt} \right], \quad (\text{eq. 2})$$

$$U_c(r\alpha_n) = J_0(r\alpha_n)Y_0(b\alpha_n) - J_0(b\alpha_n)Y_0(r\alpha_n) \quad (\text{eq. 3})$$

avec J_0 la fonction de Bessel de première espèce, α_n les racines de l'expression (3) pour $r = a$ et Y_0 la fonction de Bessel de deuxième espèce. Cette solution est aussi connue comme celle de la diffusion radiale dans le plan transverse d'un cylindre creux.

Par la suite, nous allons comparer les données expérimentales obtenues avec le modèle analytique ci-dessus et un modèle numérique en utilisant MATLAB[®] (MathWorks 2015).

Pour valider le modèle de diffusion, et pour observer directement la diffusion de l'eau, nous avons utilisé l'imagerie THz (Bensalem *et al.* 2018). Elle a été réalisée en mode transmission à une fréquence de 0,29 THz et polarisation du champ électrique vertical, i.e., perpendiculaire aux fibres de l'échantillon, et est en cours de mise au point et de calibration sur des échantillons de différente densité (e.g., balsa ou hêtre).

La teneur en eau en conditions atmosphériques variées a été mesurée et modélisée. Les mesures ont été faites à plusieurs températures ($T = 20^\circ\text{C}$, 25°C , 40°C et 60°C) et sous différentes HR pour chaque niveau de température ($HR = 25\%$, 45% , 65% et 85%). Nous avons également mesuré les variations dimensionnelles correspondantes des échantillons de bois pendant l'adsorption. Les valeurs sont modélisées comme suit :

$$\Delta Y = Y - Y_0 = \beta \times MC \quad (\text{eq. 4})$$

Avec Y la dimension du bois dans une direction pour une teneur en eau MC et β le coefficient de retrait/gonflement. Un modèle similaire doit être développé pour le cas de la désorption, mais cela nécessitera que les échantillons de bois soient dans un état complètement saturé afin de pouvoir de mesurer le PSF (point de saturation des fibres) précisément.

Résultats

Nous avons utilisé les modèles numériques de diffusion dans le plan transverse d'un cylindre infini creux. Pour la même valeur de $D \times t$, la distribution de concentration C/C_0 est affectée fortement par les ratios b/a (Fig. 2). Cela correspond bien au modèle analytique.

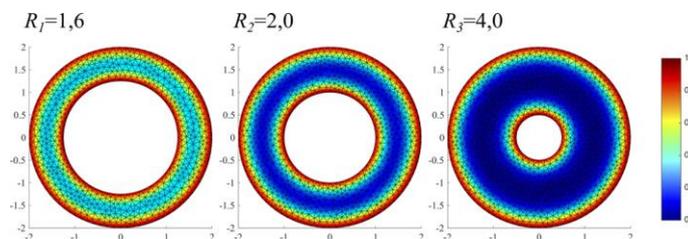


Fig. 2 : Modèle de distribution de concentration (C/C_0) pour la diffusion dans trois cylindres creux pour la même valeur $Dt = 0,4$. R_1 , R_2 , et R_3 correspondent aux valeurs de b/a .

Ensuite, avec les données expérimentales obtenues, nous avons comparé les valeurs de quantité totale d'eau diffusée (correspondant à la méthode usuelle gravimétrique de mesure du coefficient de diffusion moyen) avec celles de modèle analytique et numérique (Fig. 3). On peut voir que les valeurs expérimentales et celles des modèles correspondent bien.

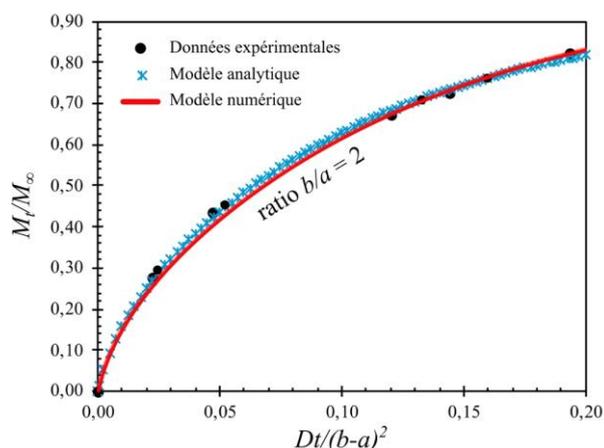


Fig. 3 : Ratio de quantité total d'eau diffusé (M_t/M_∞) dans le plan du cylindre creux : comparaison entre les données expérimentales et les modèles (analytique et numérique)

Concernant le gonflement du bois, suite aux mesures faites dans les directions R et T, et les mesures surfaciques, nous avons déterminé les paramètres de gonflement et les pourcentages de changements de dimension pour les deux directions R et T (Fig. 4). On peut voir que la valeur de β dans la direction R est inférieure à celle dans la direction T. Malheureusement, étant donné que nous n'avons pas encore pu saturer les bois complètement ni avoir les données de masse du bois à l'état vert, nous n'avons pas encore les données réelles de PSF et donc les valeurs de retrait ne sont pas encore déterminées. Les travaux à venir concerneront l'imbibition des échantillons avec de l'eau sans dissoudre les extractibles dans le bois.

Enfin, concernant les mesures THz, la détection de l'eau aux fréquences THz est liée à sa forte absorption dans ce domaine de fréquence. Ainsi l'imagerie d'absorption en THz (2D voire 3D) permet d'obtenir la distribution de l'eau au cours de la diffusion (Fig. 5). Les travaux futurs sur cette partie concerneront : (a) la calibration pour obtenir les valeurs précises d'atténuation pour chaque valeur de teneur en eau, (b) les essais préliminaires sur d'autres essences de bois ayant des structures homogènes et des densités plus faibles, et (c) les essais sur le bois pour la facture d'instruments à vent (*Dalbergia melanoxylon*).

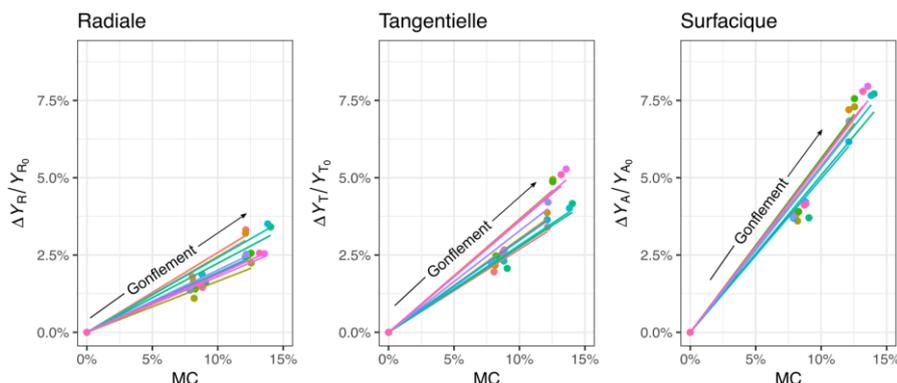


Fig. 4 : Gonflements des échantillons en fonction de MC pendant l'adsorption. Les points représentent les données expérimentales et les lignes les modèles ; chaque couleur représente différents échantillons qui proviennent d'un même barreau de bois.

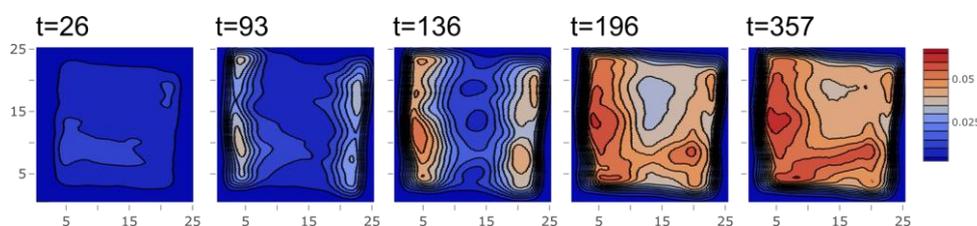


Fig. 5 : Images montrant l'évolution de la transmission du faisceau THz (V) dans un échantillon de balsa (22 mm × 22 mm × 4 mm, fibres perpendiculaires au champ électrique de la radiation THz) avec tous les cotés isolés sauf les faces latérales par où l'eau peut diffuser au cours du temps t (en minutes).

Conclusions et perspectives

La caractérisation de la diffusion de l'eau dans le bois est en cours d'étude à l'aide d'échantillons parallélépipédiques et cylindriques creux et diverses techniques (suivi global par pesée, imagerie THz). Les travaux à venir vont se focaliser sur la caractérisation de la diffusion dans des géométries plus complexes. Des expérimentations permettant de déterminer précisément le PSF doivent être faites afin de déterminer la valeur des coefficients de retrait du bois. Nos recherches portent actuellement sur la modélisation de la relation entre HR et MC en comparant les résultats obtenus avec le modèle usuel de Hailwood-Horrobin (1946).

Références

- Alkadri A., Jullien D., Arnould O., Langbour P., Gril J. (2017) Caractérisation et procédés de séchage de bois tropicaux pour la facture d'instruments à vent. In: 6^{èmes} journées du GDR 3544 "Sciences du bois", Nov 21-23, Nantes, France.
- Bensalem M., Sommier A., Mindeguia J.C., Batsale J.C., Pradere C. (2018) Terahertz measurement of the water content distribution in wood materials. *J Infrared Milli Terahz Waves* 39 (2):195–209.
- Carslaw & Jaeger. (1959) *Conduction of Heat in Solids*. London: Oxford University Press.
- Crank J. (1975) *The Mathematics of Diffusion*, 2nd ed. New York: Oxford University Press.
- Hailwood A.J., Horrobin S. (1946) Absorption of water by polymers: Analysis in terms of simple model. *Trans. Faraday Soc.* 42B: 82–102.
- MathWorks. (2015) *MATLAB and PDE Toolbox Release 2015b*. Natick: The MathWorks, Inc., Massachusetts, United States.