

Étude de la migration d'humidité en condition non-isotherme dans le bois massif par tomographie à rayons X

MARTIN Benoît^{1,2}, COLIN Julien^{2,3}, LU Pin², CASALINHO Joel³, PERRÉ Patrick^{2,3} et RÉMOND Romain¹

¹LERMaB, ENSTIB, Université de Lorraine, Épinal, France

²Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux, SFR Condorcet FR CNRS 3417, Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), Pomacle, France

³Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire de Génie des Procédés et Matériaux, Gif-sur-Yvette, France
b.martin@univ-lorraine.fr

Mots clés : épicéa ; transferts couplés ; sollicitation thermique ; migration hydrique ; tomographie

Introduction

Pour garantir la pérennité des bâtiments en bois, ainsi qu'une qualité d'air intérieur saine, il est nécessaire d'assurer un bon comportement hygrothermique des parois extérieures (Johansson, Bok, et Ekstrand-Tobin 2013; Tietze et al. 2017). En effet, les échanges hydriques peuvent avoir un impact non négligeable sur les déperditions thermiques globales et doivent, en conséquence, être intégrés dans les modèles numériques (Duforestel 2014; Moon, Ryu, et Kim 2014; Perré 2019). Cependant, des études ont montré que des écarts demeurent entre mesures expérimentales et simulations hygrothermiques (Woloszyn et al. 2014; McClung et al. 2014). Or, la caractérisation des propriétés hydriques des matériaux est généralement réalisée en conditions isothermes, qui se trouvent relativement éloignées des conditions d'usages des matériaux.

Pour mieux comprendre les transferts au sein des parois, il est nécessaire de descendre à l'échelle matériau. En s'appuyant sur l'imagerie à rayons X, ce travail s'intéresse à la migration d'humidité dans le bois massif soumis à des conditions non isothermes.

Matériels et méthodes

Préparation de l'échantillon

Un échantillon cylindrique (\varnothing 20 mm) d'épicéa commun (*Picea abies*) a été usiné avec une machine CNC 5 axes suivant la direction radiale. Une phase de conditionnement préalable a été effectuée pour amener l'échantillon à une teneur en eau homogène de 17.5 %. L'étude de la migration d'humidité au sein de l'échantillon soumis à des conditions limites thermiques non uniformes nécessite de maintenir une teneur en eau moyenne constante. Pour ce faire, la surface latérale de l'échantillon a été recouverte d'une double couche de revêtement imperméable (Rubson, Liquid Rubber Plus). Ensuite, une gaine thermo- retractable souple a été ajoutée pour parfaire l'étanchéité en périphérie. Un multicouche a été appliqué sur les deux sections parallèles comprenant une couche de revêtement Rubson, une feuille aluminium et de nouveau une couche de revêtement Rubson.

Contrôle des conditions limites

La sollicitation thermique consiste en une différence de température de 20 °C (15 et 35 °C de part et d'autre de l'échantillon), maintenue constante pour reproduire une configuration hivernale de manière simplifiée. Un dispositif expérimental innovant a été conçu pour contrôler les conditions aux limites de l'échantillon tout en étant compatible avec la tomographie à rayons X (permettre une rotation complète de l'échantillon sans vibration, limiter l'absorption des rayons X par le dispositif et manuable pour libérer l'utilisation du tomographe à rayons X).

Acquisition et traitement d'images

L'acquisition des projections 2D a été réalisée avec un tomographe de dernière génération de la société RX Solutions (EasyTom XL Ultra 150-160). La reconstruction tomographique, de chacune des acquisitions, a ensuite été effectuée à partir des projections acquises, via le logiciel *X-Act* (RX Solutions). Le résultat obtenu est une série de coupes transversales générées perpendiculairement à l'axe du cylindre avec une taille de pixel de 40,017 µm. Ces dernières ont été analysées avec le logiciel *FIJIimageJ*.

Détermination de la teneur en eau locale

L'échantillon est discrétisé en régions d'intérêt (ROI), en isolant le bois initial, de transition et final de chaque cerne. D'après (Freyburger et al. 2009), pour chacune de ces ROI, la valeur de niveau de gris (*CT number*) peut être reliée à la teneur en eau du bois (X) via une droite (Éq. 1) dont les paramètres sont obtenus par calibration :

$$CT\ number_{ROI} = 0,55 \cdot \rho_0 \cdot (X + 1) + 2,8372 \cdot 10^4 \quad (1)$$

avec ρ_0 la masse volumique anhydre du bois

Résultats et discussion

L'écart de température de 20 °C imposé de part et d'autre l'échantillon entraîne une migration humidité de la zone chaude vers la zone froide sous l'effet du gradient de pression partielle de vapeur d'eau (Bouali et al. 2012) (Fig. 1). Le champ de teneur en eau observé présente de fortes variations locales le long de l'échantillon. Ces variations sont liées à la densité hétérogène de l'épicéa au sein des cernes. Du côté de la zone froide ($T_1 = 15^\circ\text{C}$), la teneur en eau augmente au-delà du point de saturation des fibres ($X \approx 30\%$ b.s., (Siau 1984)), ce qui suggère la présence d'eau libre. L'analyse des coupes tomographiques confirme la présence d'eau libre au cours de l'expérimentation avec l'apparition de taches noires à proximité de la plaque froide (Fig. 2). L'accès au volume 3D permet également d'accéder aux variations dimensionnelles avec un diamètre de l'échantillon – suivant la direction tangentielle – qui augmente à proximité de la plaque froide et diminue à l'opposé de l'échantillon. Deux lignes verticales en pointillées ont été ajoutées sur les côtés des coupes pour faciliter l'évaluation du gonflement de l'échantillon au cours du temps. Ces changements dimensionnels sont liés aux modifications de l'état hydrique local du bois avec une variation de la quantité d'eau liée entre ces deux zones. Ces deux observations sont en cohérences avec l'évolution temporelle de la distribution de teneur en eau représentée en figure 1.

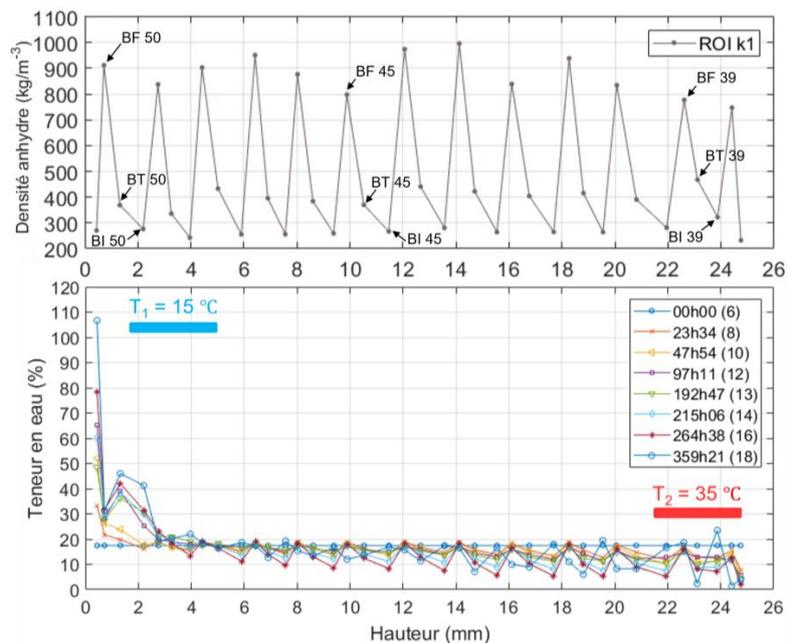


Fig. 1 : Évolution temporelle de la teneur en eau en fonction de la hauteur dans l'échantillon avec le profil de densité anhydre correspondant placé au dessus

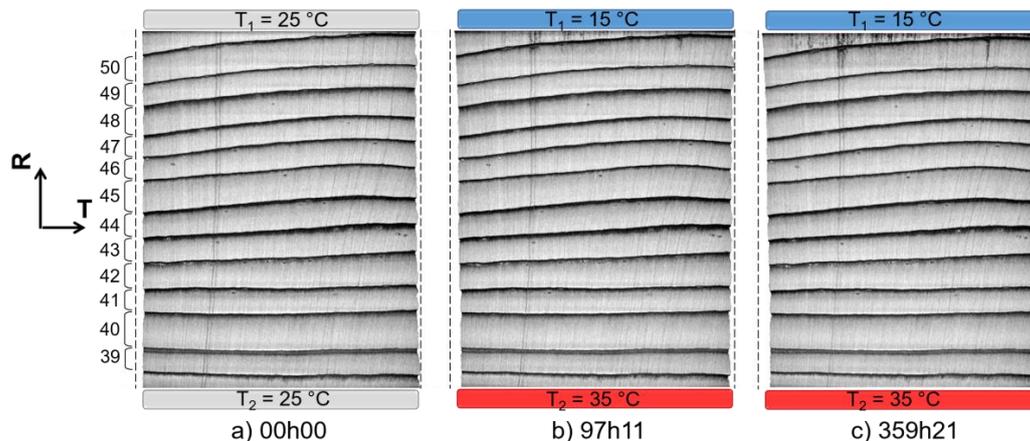


Fig. 2 : Coupes tomographiques localisées au centre de l'échantillon suivant le plan R- T. Le niveau de gris foncé équivaut à la présence de matière plus dense que le niveau de gris clair.

Conclusion et perspectives

Dans ce travail, la tomographie à rayons X a permis des analyses qualitative et quantitative de la migration d'humidité dans le bois sous l'effet d'une différence de température aux bornes de l'échantillon.

L'analyse de la distribution de l'eau libre pourra être approfondie en considérant la structure anatomique du bois d'épicéa. Par ailleurs, il conviendra d'étendre la gamme de conditions aux limites, notamment en appliquant des consignes variables dans le temps, pour approcher le comportement dynamique observé en inter- saison ou en été. L'ensemble de ces résultats expérimentaux pourront être confrontés avec ceux obtenus par simulation numérique.

Remerciements

L'ADEME est partenaire du projet et co-finance une bourse de thèse dans le cadre de la thématique « villes et territoires durables », contribution au développement de bâtiments performants intégrant des matériaux biosourcés.

Cette étude a été réalisée au sein du Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), soutenu par la Région Grand Est, le Département de la Marne, le Grand Reims, et l'Union européenne. Les auteurs remercient en particulier le Département de la Marne, le Grand Reims, la Région Grand Est et l'Union européenne, ainsi que le Fonds européen de développement régional (FEDER Champagne-Ardenne 2014-2020), pour leur soutien financier à la Chaire de Biotechnologie de CentraleSupélec.

Pour quatre ans (du 01/05/2016 au 31/07/2020) et avec un budget total de 965 000 €, 3D-BioMat a été cofinancé par le Grand Reims (31%) et l'Union européenne (48,7%-soit 50% des dépenses éligibles). L'Europe s'engage auprès du Grand Est avec le Fonds Européen de Développement Régional.

Références

- Bouali, Anis, Romain Rémond, Giana Almeida, et Patrick Perré. 2012. « Thermo-diffusion in wood: X-ray MC profiles analysed using a 2-D computational model ». In . Xiamen: In Proceedings of the 18 th International Drying Symposium.
- Duforestel, Thierry. 2014. « Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique: recherches sur l'efficacité énergétique des bâtiments. » Mémoire HDR.
- Freyburger, Charline, Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Thiéry Constant, et Jean-Michel Leban. 2009. « Measuring Wood Density by Means of X-Ray Computer Tomography ». *Annals of Forest Science* 66 (8): 804- 804. <https://doi.org/10.1051/forest/2009071>.
- Johansson, Pernilla, Gunilla Bok, et Annika Ekstrand-Tobin. 2013. « The Effect of Cyclic Moisture and Temperature on Mould Growth on Wood Compared to Steady State Conditions ». *Building and Environment* 65 (juillet): 178- 84. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.004>.
- McClung, Ruth, Hua Ge, John Straube, et Jieying Wang. 2014. « Hygrothermal performance of cross-laminated timber wall assemblies with built-in moisture: field measurements and simulations ». *Building and Environment* 71 (janvier): 95- 110. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.008>.
- Moon, Hyeun Jun, Seung Ho Ryu, et Jeong Tai Kim. 2014. « The Effect of Moisture Transportation on Energy Efficiency and IAQ in Residential Buildings ». *Energy and Buildings* 75 (juin): 439- 46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.039>.
- Perré, Patrick. 2019. « Coupled Heat and Mass Transfer in Biosourced Porous Media without Local Equilibrium: A Macroscopic Formulation Tailored to Computational Simulation ». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 140 (septembre): 717- 30. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.043>.
- Siau, John Finn. 1984. *Transport Process in Wood*. Berlin: Springer-Verlag.
- Tietze, Andrea, Stepan Ott, Sylvain Boulet, Klodian Gradeci, Nathalie Labonnote, Steinar Grynning, Joakim Noreen, et Pousette Anna. 2017. « Tall timber facades - Identification of cost-effective and resilient envelopes for wood constructions ».
- Woloszyn, Monika, Joseph Virgone, Abdelkrim Trabelsi, Zakaria Slimani, Eric Mougel, Romain Reymond, Helisoa Rafidiarison, et al. 2014. « Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants : démarche du projet HYGRO-BAT », 9.

10^{es} journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Montpellier, 17-19 novembre 2021