

Impact sur le transfert d'humidité d'une grille destinée à des mesures optiques de déformation du bois par spectre localisé (LSA)

NGUEDJIO Loic chrislin^{1,2}, BLAYSAT Benoit², JAILIN Thomas², GRIL Joseph^{2,3},
TALLA Pierre Kisito¹, MOUTOU PITTI Rostand^{2,4}

¹Unité de recherche et de Modélisation des Systèmes Physiques (UR-2MSP), Département de Physiques, Faculté des Sciences, Université de Dschang, BP 067, Dschang, Cameroun

²Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000, Clermont-Ferrand, France

³Université Clermont Auvergne, INRAE, PIAF, F-63000, Clermont-Ferrand, France

⁴CENAREST, IRT, BP14070, Libreville, Gabon

loic.nguedjio@doctorant.uca.fr

Mots clefs : Bois ; Gradients d'humidité ; LSA ; *Khaya invorensis* ; fissuration ; diffusion

Contexte et objectifs

Les conséquences des variations dimensionnelles des éléments de structure en bois dues aux phénomènes d'adsorption et de désorption d'eau représentent les principales causes de dégradation des éléments en bois. Les variations de teneur en eau induisent des déformations sous forme de gonflements ou de retraits, selon que le bois adsorbe ou désorbe de l'humidité. Si ces déformations hydriques sont gênées, des contraintes hydriques se développent et sont à l'origine de l'apparition des fissures ou de la propagation de fissures préexistantes (Manfoumbi et al 2012) par excès de traction transverse. En mécanique de la rupture expérimentale, les techniques d'analyse d'image et de contrôle non destructif sont de plus en plus utilisées pour la caractérisation des paramètres de fissuration du bois. Au regard de notre problématique, nous préconisons d'adapter ces techniques à des environnements à humidité et température variables. La méthode de la grille (Grédiac et al 2016), souvent utilisée en mécanique expérimentale, a connue quelques imperfections rendant ainsi difficile l'analyse et l'interprétation des résultats (Dang et al 2017). La méthode d'analyse d'images par spectre localisé (LSA) se présente comme une amélioration de la méthode de la grille (Blaysat et al 2024) avec, notamment, sa capacité à fournir directement les champs de déplacements et de déformations en surface de l'échantillon testé. Cependant, l'application de cette méthode requiert un traitement préalable de la surface de l'éprouvette consistant à imposer une couche de peinture et une gravure de motif périodique par traitement thermique au laser. Cependant, il est nécessaire de quantifier l'impact de ce traitement de surface vis-à-vis des échanges hydriques en surface qui représente les conditions limites alimentant le transfert hydrique. Ce travail a donc pour objectif principal de déterminer quel est cet impact, en vue d'appliquer cette méthode d'analyse d'images en environnement hygrothermique variable.

Matériels et Méthodes

Préparation des échantillons

Les éprouvettes cubiques de dimensions 40 mm (R) x 36 mm (T) x 2, 4 ou 8 mm (L) ont été confectionnées à partir d'un barreau de duramen de *Khaya invorensis* provenant de la forêt Béninoise de l'Ouémé, initialement conditionné dans un environnement de laboratoire ventilé et de température ambiante 20°C $\pm$ 2,5°C et d'humidité relative variant de 50 à 70% pendant une durée de 5 mois. Après découpage des éprouvettes, elles ont chacune été recouvertes par

des couches de ruban adhésif sur les quatre faces longitudinales afin d'orienter le processus de diffusion dans la direction L (Fig. 1). Un espace adéquat est également laissé sur la face supérieure permettant de fixer un fil de pêche dont l'utilité sera expliquée dans le paragraphe suivant. Au total 9 éprouvettes (K1-K2-K4-K5-K7-K8, sans modification et K3-K6-K9 modifiées) de 3 catégories d'épaisseurs 2 mm, 4 mm et 8 mm à raison de 3 chacune par catégorie ont été scindées en deux classes : 2 éprouvettes de chaque épaisseur sans aucune modification et une éprouvette de chaque épaisseur destinée au traitement de surface en vue de la méthode LSA.

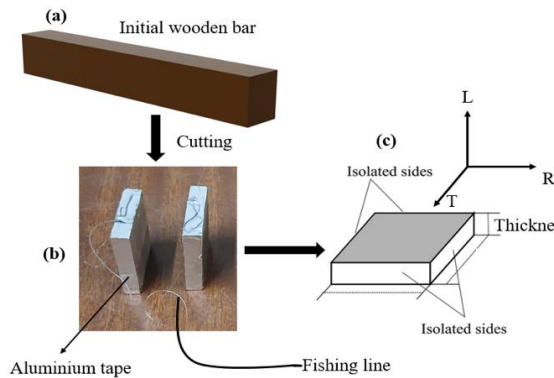


Fig. 1 : Découpage des éprouvettes et préparation initiale

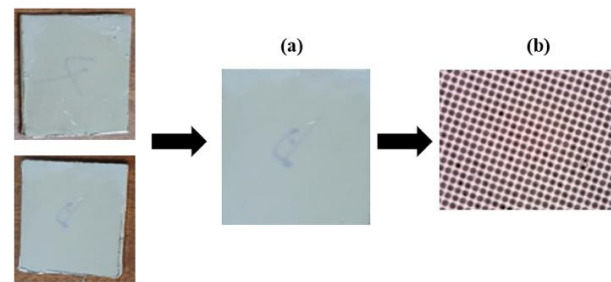


Fig. 2 : Etat de surface des éprouvettes après traitement

Dans le cas des éprouvettes modifiées, les deux faces non colmatées ont d'abord été recouvertes d'une fine couche de peinture à caractéristique perméable et de couleur blanche (Dulux Valentine, AkzoNobel Decorative Paints, France). Un motif périodique en damier a été, dans un second temps, gravé grâce à une gravure laser (40kHz) à une vitesse de 3200 mm/s afin d'obtenir des motifs de 30 micromètres de diamètre afin d'obtenir de petits damiers au regard des dimensions des éprouvettes testées. Finalement, nous obtenons des éprouvettes avec des surfaces modifiées selon les exigences liées à l'application de la méthode LSA, telles que présentées dans la Fig. 2.

Méthode expérimentale

La méthode expérimentale utilisée pour les essais de diffusion de nos échantillons repose sur le dispositif de la Fig. 3. Il s'agit d'une boîte de plexiglass de dimensions 45 cm x 20 cm x 20 cm utilisée et validée pour la première fois par Asseko et al (2024), et dont la cellule de force servant à la mesure de la masse a été remplacée par une balance de type Proviteq à lecture électronique pour plus de précision (0.0001 g). A l'intérieur de la boîte, l'hygrométrie est imposée par l'emploi d'une solution saline saturée (carbonate de potassium ici pour une ambiance humide à 43% à 20°C). La boîte dispose d'un ventilateur permettant d'homogénéiser l'ambiance climatique. Un capteur thermo-hydrique permet de vérifier l'humidité relative et la température à l'intérieur de la boîte à tout instant. Une grille métallique empêche les éprouvettes d'être en contact direct avec la solution saline. Celles-ci sont chacune maintenue à l'aide d'un fil de pêche qui ressort par un trou de diamètre 10 mm sur la face supérieure du couvercle de la boîte. Un bouchon en silicone permet alors de boucher le trou maintenant les éprouvettes dans la boîte. Le bouchon n'est enlevé que le temps de la mesure, ce qui permet de limiter les échanges d'air entre l'intérieur de la boîte et l'environnement externe.

Après découpage des éprouvettes, elles sont placées dans une étuve thermique à 105°C jusqu'à obtention d'une première masse anhydre notée m_{01} . Ensuite les éprouvettes sont sorties de

l'étuve, les quatre faces sont colmatées et le fil de pêche attaché, le traitement de surface est effectué pour les éprouvettes concernées. Elles sont remises dans l'étude pour mesurer la deuxième masse anhydre notée m_{02} (avec ruban adhésif, fil de pêche et gravure de damier pour certaines). Enfin, elles sont introduites dans la boîte de diffusion pour le suivi de la masse m et estimation de la teneur en eau ω donnée par la formule suivante :

$$\omega = \frac{m - m_{02}}{m_{01}} \quad (1)$$

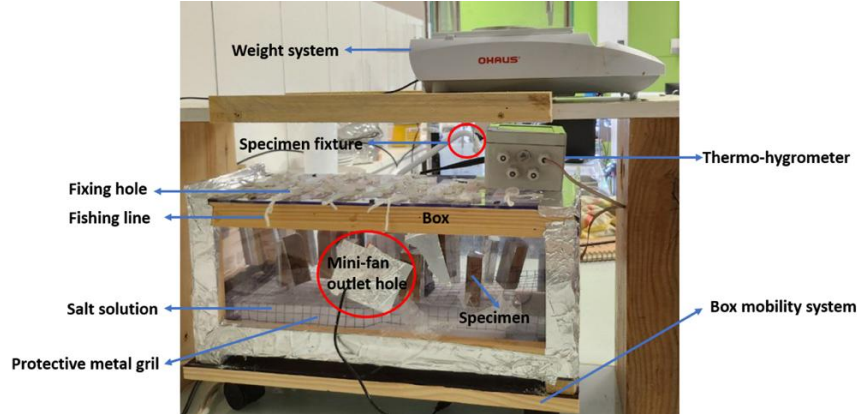


Fig. 3 : Dispositif expérimental pour les essais de diffusion

Détermination des paramètres de diffusion

Les paramètres de diffusion à savoir le coefficient de diffusion longitudinal D et le coefficient d'échange surfacique S ont été déterminés par identification inverse. Elle est basée sur l'optimisation du problème de diffusion formulé par la deuxième loi de Fick (voir Eq. 2) via l'algorithme simplex Nelder-Mead (Nelder et al 1965) implémenté en Python.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \omega}{\partial x} \right), \quad D \frac{\partial \omega}{\partial x} = S(\omega_e - \omega_{surf}) \quad (2)$$

Dans cette équation, ω_e et ω_{surf} sont respectivement la teneur en eau à l'équilibre et la teneur en eau à la surface des éprouvettes.

Résultats et discussion

L'un des avantages d'avoir utilisé des échantillons de faible épaisseur est que le processus de diffusion est plus rapide et les teneurs en eau d'équilibre sont atteintes pour quasiment toutes les éprouvettes. Comme le montre la Fig. 4 l'éprouvette K9 est la seule éprouvette n'ayant pas atteint l'humidité d'équilibre en raison sans doute de la couche de peinture rajoutée à sa surface en plus d'avoir l'épaisseur la plus importante de l'échantillonnage.

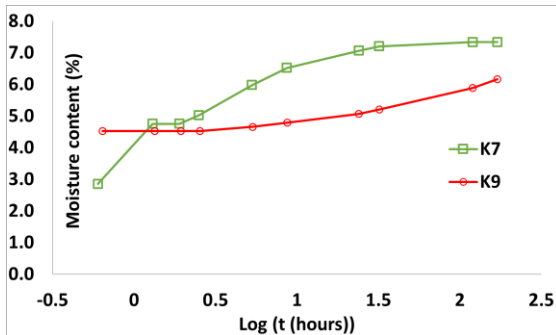


Fig. 4 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps

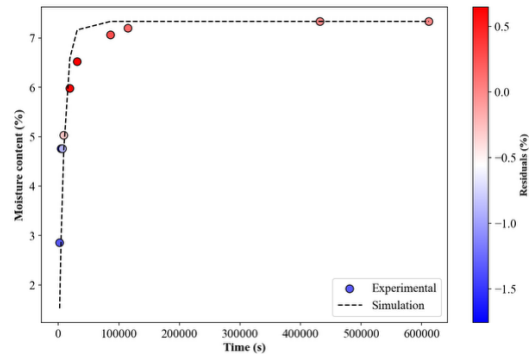


Fig. 5 : Simulation numérique de la diffusion

Les paramètres de diffusion ainsi que les courbes d'ajustements numérique/expérimentale sont directement obtenus après exécution du schéma numérique Nelder-Mead. La Fig. 5 donne un exemple d'ajustement pour l'éprouvette K6 : on peut constater une corrélation assez bonne entre les mesures et le modèle numérique, avec une erreur quadratique moyenne inférieure à 0,5%. En choisissant une optimisation groupée avec la détermination d'un seul coefficient de diffusion D pour l'ensemble des échantillons et de deux coefficients d'échange surfacique S_1 pour les éprouvettes non modifiées et S_2 pour les éprouvettes modifiées, on obtient à la fin du processus d'optimisation : $D = 5,54 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$, $S_1 = 9,32 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ et $S_2 = 4,05 \times 10^{-7} \text{ m/s}$.

Lorsqu'on compare directement S_1 à S_2 , on constate que les éprouvettes dont la surface a été modifiée par la couche de peinture blanche et la gravure de damier ont un coefficient d'échange surfacique plus petit, témoignant d'une diminution du flux hydrique entrant en surface. L'explication se trouve dans l'apport de la couche supplémentaire de peinture et les mécanismes opérationnels de gravure qui comme l'indique la valeur de S_2 bouche les pores de la surface libre du matériau limitant ainsi la pénétration de la vapeur d'eau. Le flux hydrique est ralenti d'un facteur de 2.3 suite à la modification de surface, un résultat étroitement lié à l'épaisseur de la couche de peinture dosée sur la surface des éprouvettes ainsi qu'à l'intensité des paramètres de gravure (fréquence, nombre de répétition et puissance).

Conclusion et perspectives

Ce travail a permis de déterminer le coefficient de diffusion longitudinale et le coefficient d'échange surfacique du bois tropical *Khaya ivorensis*. Deux classes d'échantillons ont été testées à savoir des échantillons sans traitement de surface et des échantillons dont les surfaces ont été recouvertes par une fine couche de peinture avant de se voir gravée d'un damier à motif périodique. Ce traitement de surface intervient en tant que préalable à la méthode d'analyse d'images par spectre localisé qui est employée pour caractériser les champs mécaniques d'une éprouvette de bois. Les résultats ont montré que les échantillons, dont la surface a été modifiée, possèdent des coefficients d'échange surfacique 2.3 plus faible. La suite des travaux permettra, en réalisant les essais de fissuration du bois en milieu humide via la LSA, de mieux comprendre l'impact du traitement de surface sur les paramètres de fissuration.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via le projet DIAM-WOOD N°23-CE22-0006-03 pour le soutien financier apporté à ce travail.

Références

- Asseko M, Bontemps A, Godi G, Moutou Pitti R, Goli G, Ikogou S, Fournely É, Gril J (2024) Diffusion properties of gabonese tropical hardwoods and European softwoods measured with low-tech equipment and by an inverse method. *Bois et Forêts des Tropiques*, 360, 1–12.
- Blaysat B, Sur F, Jailin T, Vinel A, Grédiac M (2024) Opensa: An open-source toolbox for computing full-field displacements from images of periodic patterns, *SoftwareX*, 27, 101826.
- Dang D, Moutou Pitti R, Toussaint E, Grédiac M (2017) Inverse identification of early-and latewood hydric properties using full-field measurements, *wood mater. Sci. Eng.*, 1–14.
- Grédiac M, Sur F, Blaysat B (2016) The grid method for in-plane displacement and strain measurement: A review and analysis, *Strain*, 52(3), 205–243.

Manfoumbi Boussougou N, Nguyen T, Angellier N, Dubois F, Ulmet L, Sauvat N (2014) Experimental and numerical aspects in diffusion process characterization in tropical species, European journal of environmental and civil engineering, 18(9), 963–982.

Nelder JA, Mead R (1965) A simplex method for function minimization, The computer journal, 7(4), 308–313.