

Caractérisation temporelle des déformations microscopiques dans les panneaux de fibres en conditions humides.

KIBLÉUR Pierre^{1,4}, MANIGRASSO Zaira², GOETHALS Wannes^{3,4}, AELTERMAN Jan^{2,3,4},
BOONE Matthieu^{3,4}, VAN ACKER Joris^{1,4}, VAN DEN BULCKE Jan^{1,4}

¹UGent-Woodlab, Department of Environment, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Coupure Links 653, 9000 Ghent, Belgium

²Department of Telecommunications and information processing - imec, Faculty of Engineering and Architecture, Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 41, 9000 Ghent, Belgium

³Department of Physics and astronomy, Faculty of Sciences, Ghent University, Proeftuinstraat 86, 9000 Ghent, Belgium

⁴Ghent University Center for X-ray Tomography (UGCT), Proeftuinstraat 86, 9000 Ghent, Belgium

pierre.kibleur@ugent.be

Mots clés : fibres de bois ; MDF; microtomographie à rayons X dynamique; hygroscopie; digital volume correlation; deep learning; segmentation d'images

Contexte et objectifs

Les panneaux de fibres de bois sont des composants essentiels de la construction durable. Le réarrangement du bois après déstructuration en des panneaux homogènes et fonctionnels, fait en sorte d'élargir la part de biomasse utilisable. Malheureusement, cette étape d'ingénierie a ses inconvénients. Par exemple, nous savons que les panneaux de type MDF ne résistent pas bien à l'humidité, et ont tendance à gonfler en sa présence. Ceci pourrait être résolu par une élaboration plus éclairée de ces panneaux. Mais la connaissance et la compréhension des mécanismes à l'origine du gonflement du MDF sont pré-requises. Cependant, le MDF est un matériau très complexe. Et les outils, dont nous disposons pour l'étudier, sont poussés vers leurs limites. A l'extrême de ce qui nous est possible, nous combinons des méthodes de pointe pour permettre une analyse inédite du gonflement du MDF en situation humide, à l'échelle microscopique.

Matériel et méthodes

Le scanner à rayons X Nanowood (UGCT - UGent-Woodlab; Dierick *et al.*, 2014), permet d'acquérir des scans à haute résolution (2.5µm; 50kV, 5W, 1s exposition, 2001 projections/scan). Un générateur d'humidité GenRH (Surface Measurements Systems, UK) crée un flux d'air humide (95% RH), qui pénètre une chambre climatique construite sur mesure pour la tomographie (Patera, 2014). Dans cette chambre, un échantillon de MDF (2x2x9mm³) présente un gonflement sous l'effet de l'humidité, tandis que des radiographies sont acquises en continu pendant plus de 5h (14007 projections au total, suffisamment pour reconstruire indépendamment 7 scans, Fig. 1).

Du fait du gonflement de l'échantillon pendant l'acquisition, les reconstructions sont floues. Elles sont rendues nettes par l'application d'un algorithme de reconstruction de pointe, capable d'interpoler les artefacts de mouvement (De Schryver *et al.*, 2018). Dès lors, il devient possible d'utiliser la corrélation d'images (DVC) pour déduire les champs de déformation dans le MDF. Néanmoins, pour atteindre la haute résolution que requiert l'étude de fibres de bois dans cet

arrangement aléatoire qu'est le MDF, la création d'un algorithme de DVC innovant et sur-mesure était nécessaire (Manigrasso *et al.*, *en révision*).

Les images 3D du matériau doivent être segmentées pour analyser les champs de déformation. Dans le MDF, deux structures de fibres sont visibles à l'œil nu: les fibres isolées d'une part, et les faisceaux de fibres ($\sim 10^1$ - 10^2 fibres) d'autre part. Cette segmentation n'a été possible que par l'application d'un réseau de neurones profond (Kibleur *et al.*, *en révision*), basé sur l'architecture U-Net3D, et entraîné sur un jeu de données relativement restreint.

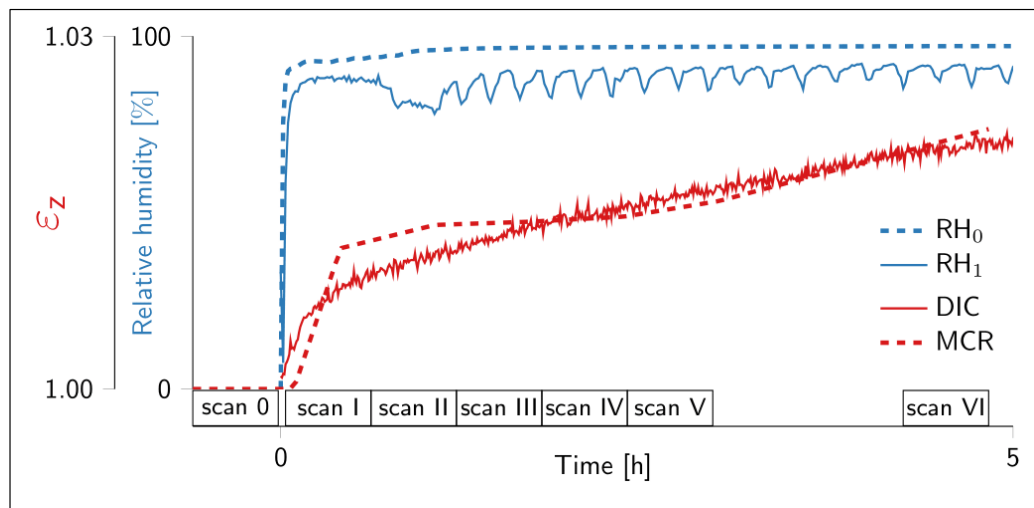


Fig. 1 : La planification des scans, avec taux d'humidité correspondants (RH₀: mesure à la sortie du GenRH; RH₁: mesure à la sortie de la chambre climatique), et mesures du gonflement macroscopique (DIC : résultat de l'expérience préliminaire de calibration utilisant la photographie et des échantillons identiques (Kibleur *et al.*, 2019) ; MCR : gonflement interpolé durant la phase de reconstruction spéciale)

Résultats et discussion

L'analyse visuelle des résultats montre que les faisceaux de fibres participent d'avantage au gonflement que les fibres de bois isolées (Fig. 2). Cette observation correspond à l'intuition que les faisceaux de fibres, dont la structure est plus difficile à imprégner avec des additifs que les fibres seules, pourraient donc rester plus sensibles à l'humidité. Pour évaluer cette hypothèse, la caractérisation quantitative des deux régimes de gonflement était nécessaire. Les faisceaux de fibres furent segmentés automatiquement dans un volume suffisamment large. C'est une étape très difficile du fait de la nature du matériau. Cependant, la stratégie basée sur l'architecture UNet3D a surpassé tous les autres algorithmes (Tab. 1 ; Kibleur *et al.*, *en révision*).

Tab. 1 : Validation de la segmentation basée sur UNet3D, sur deux volumes de tests, et comparaison avec la littérature en utilisant le Matthew's correlation coefficient (MCC)

Segmentation	MCC on first volume	MCC on second volume
State of the art (Sliseris <i>et al.</i> , 2016)	0.435	0.506
Kibleur <i>et al.</i> , 2021	0.748	0.705

Bien qu'encore imparfaite, cette segmentation demeure précise et permet de noter une différence significative entre la déformation dans les faisceaux de fibres et en dehors (Fig. 3). De plus, la même analyse (appliquée à chaque scan au cours de l'expérience) montre que les faisceaux de fibres initient le gonflement. Leur gonflement précède toujours celui des fibres seules (Fig. 4).

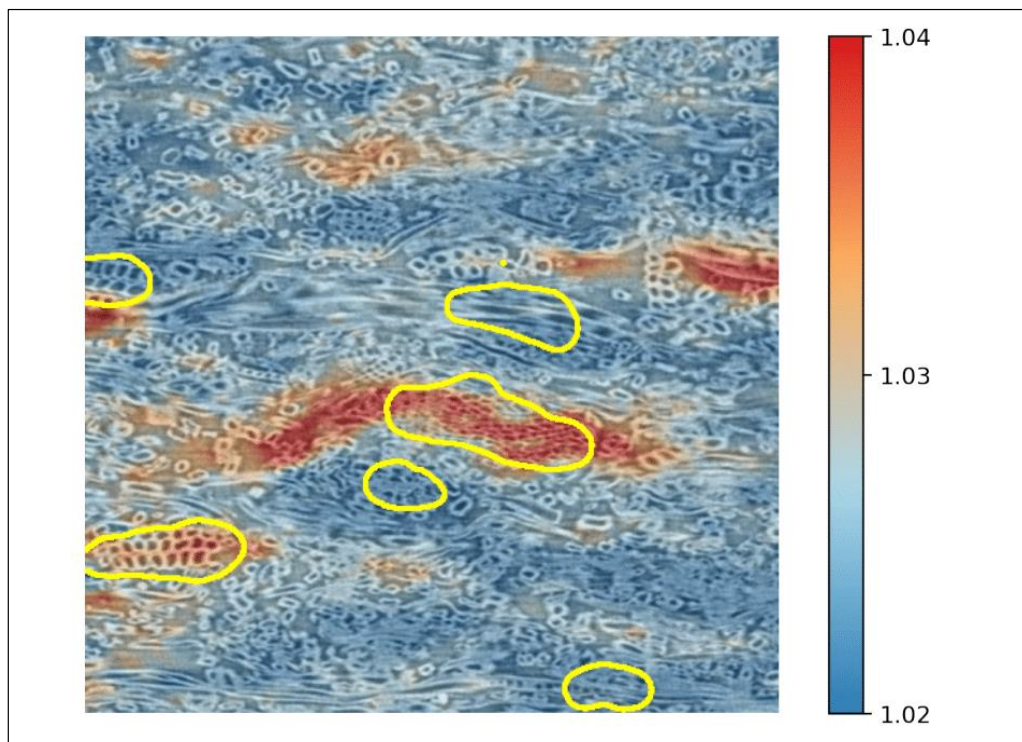


Fig. 2: La superposition du champ de déformation maximal (entre les scans 0 et VI) sur la structure du MDF révèle des zones de gonflement préférentiel, qui correspondent à des faisceaux de fibres. Les contours de la segmentation automatique de ces faisceaux de fibres (avec le deep learning) sont montrés en jaune.

Conclusions et perspectives

Nous avons combiné différentes techniques de pointe pour permettre l'analyse d'un matériau complexe composé de fibres de bois et qui est sujet au gonflement en milieu humide. Nos résultats montrent que les faisceaux de fibres constituent ici une faiblesse particulière du MDF. Les études futures devront considérer les différences profondes entre fibres et faisceaux de fibres. Par exemple, nous examinerons à présent à quel point les différences observées peuvent être dues aux disparités de revêtement (résine urea-formaldehyde, paraffine) entre fibres et faisceaux de fibres. Pour l'instant, ces additifs sont trop similaires aux fibres de bois pour être bien observés via la tomographie à rayons X. Mais d'autres techniques de pointe pourraient nous aider à trouver des indices de leur distribution.

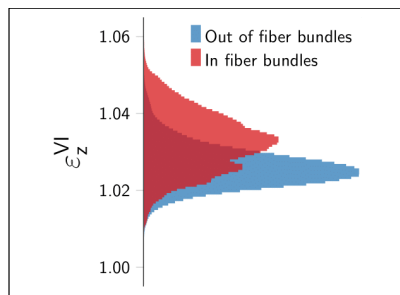


Fig. 3 : Déformations maximales (calculées entre le premier et le dernier scan), en et en dehors des faisceaux de fibres.

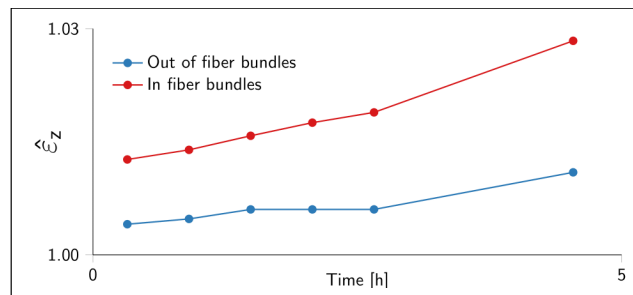


Fig. 4 : Evolution de la déformation moyenne au cours de l'expérience, en et en dehors des faisceaux de fibres. Un point correspond au milieu d'un scan, comme vu sur la Fig. 1.

Remerciements

Cette étude fait partie du projet Model-Coupled 4D- μ CT for Advanced Material Characterization (MoCCha-CT: <https://www.ugent.be/we/ugct/en/research/moccha-ct>), financé par le FWO. Le Special Research Fund of Ghent University est remercié pour son support au UGCT Centre of Expertise (BOF.EXP.2017.0007). Les auteurs voudraient remercier Stijn Willen pour la préparation des échantillons.

Références

- De Schryver, T., Dierick, M., Heyndrickx, M., Van Stappen, J., Boone, M., Van Hoorebeke, L., and Boone, M. (2018) Motion compensated micro-CT reconstruction for in-situ analysis of dynamic processes, *Scientific Reports*, 7655 (8) 1, 2045-2322.
- Dierick, M., Van Loo, D., Masschaele, B., Van den Bulcke, J., Van Acker, J., Cnudde, V., Van Hoorebeke, L. (2014) Recent micro-CT scanner developments at UGCT, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 324 35-40.
- Kibleur, P., Lehnebach, R., Van den Bulcke, J., Van Acker, J. (2019) Determining the local deformation fields of wood-based panels set in moist conditions, 8^{èmes} journées du GDR 3544 « Sciences du bois » - Epinal, 18-21 novembre 2019.
- Kibleur, P., Aelterman, J., Boone, M., Van den Bulcke, J., Van Acker, J. (under review) Deep learning segmentation of wood fiber bundles in fiberboards.
- Kibleur, P., Manigrasso, Z., Goethals, W., Aelterman, J., Boone, M., Van Acker, J., Van den Bulcke, J. (under review) 4D-CT characterization of local deformations in swelling MDF.
- Manigrasso, Z., Aelterman, J., Goethals, W., Kibleur, P., Philips, W. (under review) Total Variation regularization of strain in Digital Volume Correlation.
- Patera, A. (2014) 3D experimental investigation of the hygro-mechanical behaviour of wood at cellular and sub-cellular scales. PhD thesis, ETH-Zürich.
- Sliseris, J., Andrea, H., Kabel, M., Wirjadi, O., Dix, B., Plinke, B. (2016) Estimation of fiber orientation and fiber bundles of MDF, *Materials and Structures* 49 (10) 4003-4012.