

Impact des fissures de déroulage sur la délignification, l'imprégnabilité et les performances mécaniques d'un assemblage de placages imprégné d'une résine acrylique et thermo-compressé

MAILLEFERT Paul^{1,2}, MARCON Bertrand¹, DENAUD Louis¹, GROSSE Charlotte²

¹Arts et Métiers Sciences et Technologies, LaBoMaP

²WOODOO

paul.maillefert@ensam.eu

Mots clefs : placage ; fissures de déroulages ; résine acrylique ; imprégnation ; délignification ; cinétique.

Contexte

En France, le volume de bois sur pied a augmenté de 50% depuis 1985, atteignant 2,8 milliards de m³, avec une forte progression des feuillus (+65%) (IGN 2023). Pourtant, ces essences restent peu valorisées dans l'industrie bois, du fait d'une chaîne de transformation moins développée et d'une méconnaissance de leurs propriétés (FCBA 2017). Les résineux, à l'inverse, sont largement utilisés. Cependant ils subissent de plein fouet les effets du changement climatique. Depuis 2018, la mortalité des arbres, notamment l'épicéa, a fortement augmenté à cause des sécheresses, pathogènes et gelées printanières (Piedallu et al 2020). Dans ce contexte, il est nécessaire de diversifier les essences sous-exploitées, notamment les feuillus secondaires et les bois dépérissants.

Dans ce contexte, WOODOO développe un matériau composite innovant, le "Stack", à base de placages de feuillus délignifiés et imprégnés de polymères, capable de remplacer le béton ou l'aluminium dans des applications en construction. Ces matériaux, sont très émetteurs en gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment et de la construction représente environ 39% des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie, dont 11% proviennent des matériaux de construction tels que le ciment ou l'acier (WorldGBC 2019). Le produit d'entrée du procédé de fabrication de WOODOO est le placage de bois issu du procédé de déroulage. Pour fiabiliser sa production, l'entreprise collabore avec le LaBoMaP, afin de mieux décrire l'état initial de ces placages (défauts, fissures, structure) et comprendre son impact sur le procédé d'élaboration du STACK. L'entreprise souhaite définir un cahier des charges complet de l'état initial du placage adapté au procédé WOODOO afin d'optimiser les performances mécaniques finales pour faire concurrence aux matériaux classiques de construction fortement carbonés.

Objectifs de l'étude

Afin de développer un matériau capable de concurrencer les structures en béton, WOODOO a mis en place un procédé de fabrication multi-étapes combinant déroulage, délignification partielle, imprégnation polymérique, et thermocompression. Le déroulage joue un rôle fondamental dans la qualité mécanique et structurelle des placages. Ce procédé consiste à couper un billon en rotation en mode 0-90, générant ainsi des fines feuilles de bois, les placages (Frayssinhes 2020).

Ce processus, bien qu'efficace, induit des défauts intrinsèques au matériau, notamment des fissures dites «de déroulage ». Celles-ci apparaissent préférentiellement dans la lamelle moyenne de la paroi cellulaire, c'est-à-dire la couche intercellulaire riche en lignine, comme l'a

démonstré Thibaut (1988). L'utilisation d'une barre de pression lors du procédé permet de réduire visuellement les profondeurs des fissures du placages (Rohumaa et al 2018).

Lors de cette étude, les placages sont imprégnés avec une résine acrylique, qui est polymérisée in situ dans les porosités du bois. Un multiplis de placages imprégnés est ensuite thermo-comprimé pour fixer la résine et finaliser la fabrication du lamibois (LVL) à très haute performance mécanique, car imprégné de résine polymérisée et densifié, appelé « Stack » chez Woodoo. La résine joue un double rôle comparativement à un bois non traité : elle bloque les accès aux sites de sorption de la paroi, limitant ainsi les variations dimensionnelles du bois selon les conditions environnementales et les attaques de pathogènes (Hill 2006), et elle oppose une résistance mécanique à la recouvrance hygrothermique du bois, permettant de conserver des propriétés mécaniques recherchées à travers sa densification.

Une délignification partielle est appliquée en amont de l'imprégnation, ce qui améliore la compressibilité et l'imprégnabilité du matériau (Frey 2018). Certains auteurs ont démontré que cette étape permettait l'infiltration de monomères hydrophobes comme le MMA dans la paroi cellulaire (Zhang et al 2023).

La présence de fissures peut influencer fortement les étapes du procédé de fabrication du Stack. Par exemple, leur présence favoriserait localement l'efficacité et la cinétique d'imprégnation, en particulier après une délignification partielle. En effet, les fissures de déroulages se propagent préférentiellement dans la lamelle moyenne, riche en lignine (Thibaut 1988).

Ainsi, dans le contexte du procédé WOODOO, la compréhension et le contrôle de ces fissures deviennent essentiels. Elles peuvent d'un côté servir de voies d'entrée aux monomères, facilitant l'imprégnation dans la paroi cellulaire du bois tout en ayant une influence positive sur les cinétiques d'imprégnation, mais elles peuvent aussi fragiliser le matériau. Nous allons principalement nous intéresser à la fissuration comme facteur influençant la cinétique d'imprégnation des placages de peuplier, ayant subi ou non un traitement de délignification. Une étude préliminaire n'a pas permis d'identifier d'influence de la fissuration sur les propriétés mécaniques du Stack (Maillefert 2025).

Matériels et méthodes proposés

Les placages sont obtenus à partir de cultivars de peuplier Koster (*Populus x canadensis*). Nous choisissons une épaisseur de déroulage de 2 mm. Deux billons de 500 mm et 460 mm de diamètre sont déroulés du même arbre, avec la dérouleuse instrumentée du LaBoMaP. Un des billons est déroulé sans barre de pression et l'autre avec un enfoncement (noté BP%) de la barre de pression à 20% (voir Eq. 1). Les placages sélectionnés sont prélevés dans l'aubier.

$$BP\% = \left(1 - \frac{\text{passage}}{p}\right) \times 100 \quad \text{avec} \quad \text{passage} = \sqrt{C_v^2 + C_h^2} \quad \text{Eq. 1}$$

Où BP% est l'enfoncement de la barre de pression exprimé en % (par rapport à la passe), le passage est la distance réelle entre le couteau et la barre de pression, p est la passe ou l'avance par tour (correspondant généralement à l'épaisseur du placage cible), C_v est la cote verticale entre le fil du couteau et la barre et enfin C_h est la cote horizontale entre le fil du couteau et le point de contact de la barre.

Les fissures de déroulage de ces placages sont étudiées à l'aide du SMOF (Système de Mesure d'Ouverture des Fissures) (Denaud et al 2012, Marc et al 2024), afin de vérifier visuellement que les deux lots de placages ont un état de fissuration différent.

Ces deux lots subissent ensuite un traitement de délignification, procédé interne à Woodoo. Les taux de lignine et de perte de masse des placages seront vérifiés avec la méthode Klason (ISO

21436). 6 mesures par lot sont réalisées. L'étude comprend donc 2 facteurs de 2 niveaux chacun, selon leur traitement de délignification et leur niveau de fissuration. Les placages sont ensuite un à un imprégnés selon la méthode d'imprégnation en bûche sous vide (infusion) utilisée par (Acosta et al 2023) avec la résine acrylique de Woodoo à taux d'humidité contrôlé dans une enceinte climatique Memmert HPP 750 eco.

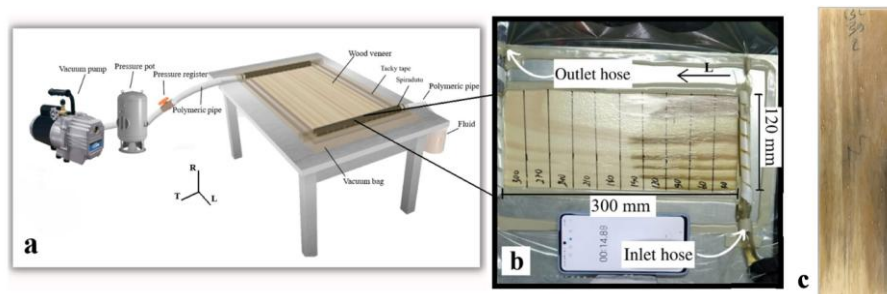


Fig. 1 : Mesure de perméabilité par étude du front de résine (a), (b) (Acosta et al 2023) et stack final (c)

La cinétique d'imprégnation est par la suite étudiée par le suivi du front de résine dans le placage (observation macroscopique avec une caméra) et la mesure de variation de la masse du pot de résine imprégnant avec une balance connectée (Ohaus NV1202). Ces placages sont ensuite thermo-compressés par 6 avec une cible de densification avec un taux fixe de 50%. La presse hydraulique utilisée est la OMC Machinery SRL P-LAB 110 12/10. Les Stacks obtenus sont alors découpés en éprouvettes pour être testés en flexion 3 points selon la norme NF EN 310 (1993) avec une machine d'essais mécaniques Testometric X350-20.

Résultats attendus

L'enjeu scientifique de l'étude réside dans l'évaluation des différents impacts des fissures de déroulage sur la délignification, l'imprégnabilité, les performances mécaniques et la stabilité dimensionnelle du produit final. Nous souhaitons dans un premier temps vérifier l'hypothèse selon laquelle les placages présentant un niveau élevé de fissuration permettent une meilleure pénétration des molécules délignifiantes, en raison d'une meilleure accessibilité à la lamelle moyenne riche en lignine. Cela pourrait se traduire par une perte de masse plus importante ou un taux résiduel de lignine plus faible, mesurable via la méthode Klason. Un deuxième résultat attendu serait que les placages fissurés présentent une cinétique d'imprégnation plus rapide (suivie via le front de résine et de la variation de masse), et plus profonde, par rapport aux placages peu fissurés. Cette meilleure imprégnation pourrait se traduire par l'obtention de Stacks aux propriétés mécaniques équivalentes voire améliorées si la résine parvient à combler efficacement les porosités du bois. Enfin, la pénétration de la résine dans la paroi cellulaire par les zones délignifiées permettrait d'atteindre une meilleure stabilité dimensionnelle à l'humidité. Ces résultats permettront de mieux définir le rôle des fissures de déroulage, usuellement considérées comme des défauts dans les performances du Stack, et d'adapter les conditions de déroulage et de traitement chimique pour optimiser la qualité du produit fini.

Remerciements

Merci à la société Arbor pour l'approvisionnement des billons utilisés pour cette étude.

Références

Acosta AP, Barbosa KT, Da Silva AAX, Gatto DA, De Avila Delucis R, Campos Amico S (2023) Vacuum infusion as a novel method to determine wood permeability. *European Journal of Wood and Wood Products*, 81(1): 33–44,. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01887-3>.

- Denaud L, Bléron L, Eyma F, Marchal R. Wood peeling process monitoring: a comparison of signal processing methods to estimate veneer average lathe check frequency. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1-3) :253–261, <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0549-8>.
- Marc C, Marcon B, Denaud L, Girardon S (2025) U-NET-based deep learning for automated detection of lathe checks in homogeneous wood veneers. *European Journal of Wood Products*. 83, 54. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02208-0>
- FCBA (2017) Valorisation des feuillus secondaires : vers une relance industrielle. URL <https://www.fcba.fr>. Rapport technique.
- Frayssinhes R (2020) Optimisation des paramètres de déroulage du douglas et modélisation des propriétés mécaniques de panneaux de LVL intégrant les données sylvicoles. Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, 2020. URL <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03132767/document>.
- Frey M (2018) Effet de la délignification sur la densification du bois. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Hill CAS (2006) *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. Wiley, 1 edition, January 2006. <https://doi.org/10.1002/0470021748>.
- Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) (2023) Inventaire forestier national – résultats 2023. URL <https://inventaire-forestier.ign.fr>.
- ISO 21436 (2020) Pâtes - Détermination de la teneur en lignine - Méthode d'hydrolyse acide, AFNOR.
- Maillefert P (2025) Rapport de première année de thèse de doctorat, ENSAM
- Movassaghi E (1985) Influence des paramètres microdensitométriques du bois sur les efforts de coupe et la qualité des placages de Douglas et de Châtaignier obtenus par déroulage. Thèse de doctorat Ingénieur USTL, Montpellier.
- NF EN 310 (1993) Panneaux à base de bois - Détermination du module d'élasticité en flexion et de la résistance à la flexion, AFNOR
- Piedallu C, Balandier P, Courbaud B (2020) Suivi du dépérissement forestier en France – synthèse Département de la Santé des Forêts (DSF) 2018–2020.
- Rohumaa A, Viguier J, Girardon S, Krebs M, Denaud L (2018) Lathe check development and properties: effect of log soaking temperature, compression rate, cutting radius and cutting speed during peeling process of European beech (*Fagus sylvatica* L.) veneer. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(6): 1653–1661. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1341-9>.
- Thibaut B (1988) Le processus de coupe du bois par déroulage. Thèse d'état, Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, France.
- World Green Building Council (WorldGBC) (2019) Bringing embodied carbon upfront.
- Zhang H, Xu F, Xu L, Zheng C (2023) The effect of delignification ratio on the PMMA occupation in poplar wood cell wall by the macro and micro comparative study. *Journal of Wood Science*, 69(1). <https://doi.org/10.1186/s10086-023-02082-5>.