

Etude de la résistance au cisaillement et du vieillissement de contreplaqués collés par résine thermoplastique et renforcés par des fibres naturelles

Shear strength and aging study of plywood bonded with thermoplastics and reinforced with natural fibers

Clément Prunier¹, Jérôme Rousseau¹, Pauline Butaud², Thomas Jeannin³ et Vincent Placet³

1 : Laboratoire DRIVE
Université de Bourgogne,
49, rue Mademoiselle Bourgeois, BP 31 58027 Nevers
clement.prunier@u-bourgogne.fr, jerome.rousseau@u-bourgogne.fr

2 : Institut FEMTO-ST
SUPMICROTECH, Université de Franche-Comté, CNRS, F-25000 Besançon, France
pauline.butaud@univ-fcomte.fr

3 : Institut FEMTO-ST
Université de Franche-Comté, CNRS, F-25000 Besançon, France
vincent.placet@univ-fcomte.fr

Résumé

Dans l'industrie du bois, le remplacement des colles traditionnelles utilisées pour les contreplaqués par des adhésifs thermoplastiques recyclés ou biosourcés est une alternative intéressante. Ce travail étudie l'hybridation de contreplaqués utilisant des résines thermoplastiques polypropylène recyclé greffé anhydride maléique (rPPAM) ou acide polylactique (PLA) comme adhésifs et des renforts en fibres de lin. Les performances de ces contreplaqués sont caractérisées à travers leur résistance au cisaillement interlaminaire. Les résultats obtenus montrent que ces adhésifs présentent des caractéristiques satisfaisantes en comparaison à celles des colles traditionnelles. L'effet de l'ajout de fibres de lin à l'interface entre placages varie en fonction du type d'adhésif, de l'essence de bois et de l'orientation des fibres, et n'est pas toujours positive quant à la résistance au cisaillement. Enfin, le vieillissement des assemblages selon deux méthodes différentes est étudié. Les contreplaqués utilisant du PP se distinguent par une bonne résistance au vieillissement, contrairement au PLA. Dans tous les cas de figures, le vieillissement entraîne une baisse des performances lorsque des fibres sont présentes à l'interface.

Abstract

In the wood industry, replacing traditional glues used for plywood with recycled or bio based thermoplastic adhesives represents an interesting alternative. This work studies plywood hybridization using recycled polypropylene grafted with maleic anhydride (rPPAM) or PLA thermoplastic resins as adhesives and flax fiber as reinforcements. The performance of these plywood is characterized by their interlaminar shear strength. The results showed that these adhesives have fair characteristics compared with those of traditional glues. The addition of flax fibers at the interface between veneers showed an influence dependent on adhesive type, wood species and fiber orientation, which was not always positive regarding shear strength. Finally, the aging of joints using two different methods is studied. Plywood made with PP stand out for their good resistance to aging, unlike PLA. In all cases, aging leads to a drop in performance when fibers are present at the interface.

Mots Clés : Contreplaqué, thermoplastiques, lin, adhésion, vieillissement.

Keywords: Plywood, thermoplastic, flax, adhesion, aging.

1. Introduction

La maîtrise de l'empreinte environnementale des matériaux utilisés dans l'industrie est devenue un enjeu extrêmement important. Le bois représente une solution intéressante dans ce contexte. Lorsqu'il est utilisé sous forme de contreplaqués, il nécessite l'emploi d'adhésifs tels que les colles à base d'urée formaldéhyde (UF), mélamine urée formaldéhyde (MUF) et phénol urée formaldéhyde (PUF). Il s'agit de composés pétrosourcés qui posent un problème d'impact environnemental tant lors de leur production que lors de la gestion de leur fin de vie, en plus de certains risques sanitaires [1]. Leur remplacement par des adhésifs à plus faible impact environnemental constitue donc un sujet d'étude

de premier ordre. Parmi les candidats à ce remplacement, on compte les résines biosourcées basées sur les tannins et la lignine [2], mais aussi différentes résines thermoplastiques comme le polyéthylène basse densité (PEBD), le polyamide (PA), le polyester (PE) [3], le polyéthylène haute densité (PEHD), le polyuréthane (PU) [4], le polypropylène recyclé (rPP) [5] parfois greffé d'anhydride maléique (AM) pour améliorer l'adhésion [6], ainsi que l'acide polylactique (PLA) [7, 8]. L'étude présentée ici se concentre sur l'utilisation de ces deux dernières résines, soient le rPPAM et le PLA.

L'évaluation de la résistance à l'humidité et à l'immersion est cruciale lors de l'introduction de nouveaux adhésifs pour l'assemblage de contreplaqués, car elle permet d'avoir une idée rapide de leur réaction au vieillissement et de les qualifier pour différents domaines d'application. Les assemblages réalisés avec du PLA montrent de bons résultats pour des essais d'immersion en eau froide, mais ne sont cependant pas utilisables dans des milieux humides à partir de 60 °C du fait de la dégradation par hydrolyse des groupements esters de la résine [9]. En ce qui concerne le PP, l'étude de Kajaks et al. [5] montre une dégradation des contreplaqués assemblés avec cette résine lors de l'immersion en eau froide, avec une baisse de plus de 50% des propriétés de résistance au cisaillement interlaminaire après 24 h d'immersion. Cependant, dans une autre étude, le caractère hydrophobe du PP rend les assemblages résistants à des vieillissements accélérés par immersion en eau chaude et bouillante et leur permet d'atteindre certains standards d'adhésifs conventionnels [6].

Par ailleurs, plusieurs études ont montré un réel intérêt à renforcer des produits bois comme des contreplaqués par des matériaux composites fibrés, dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques et de diminuer leur variabilité [5, 10]. Il est important de maîtriser l'effet de cet ajout de renfort sur le comportement adhésif des interfaces, car cela va influencer sur le transfert de charge entre les différents éléments. Jorda et al. [5] ont étudié l'effet du renforcement par ajout de fibres de lin à l'interface de contreplaqués collés par différents adhésifs, et ont observé que l'effet de cet ajout sur la résistance au cisaillement interlaminaire dépendait de l'adhésif utilisé : une amélioration a été observée lors d'utilisation d'époxy ou de colle urée-formaldéhyde (UF), alors que la résistance diminuait pour des colles mélamines-urée-formaldéhyde (MUF) ou polyuréthane (PUR).

Le projet dans lequel s'inscrit cette étude s'intéresse aux effets de ce renforcement par fibres, en les combinant à des adhésifs constitués de résines recyclées ou biosourcées. L'objectif poursuivi est d'améliorer et d'homogénéiser les propriétés structurelles globales du matériau bois, mais aussi dans un premier temps d'obtenir localement une meilleure résistance interlaminaire des interfaces entre placages. On s'intéresse de plus aux effets du vieillissement sur ces renforcements, en les soumettant d'une part à un conditionnement de 40 jours dans des conditions sévères de température et d'humidité, et d'autre part à un vieillissement accéléré par immersion de courte durée dans l'eau bouillante. Ces méthodes de vieillissement correspondent aux normes relatives aux contreplaqués permettant de catégoriser leurs différentes classes d'application [11]. Une première partie présentera les matériaux utilisés, puis le processus de fabrication des contreplaqués et de préparation des éprouvettes, et la méthode d'essai utilisée. Dans un deuxième temps, les résultats obtenus seront présentés afin d'évaluer l'effet de la résine et de l'apport ou non de fibres, et l'effet du vieillissement selon les différentes configurations. Enfin, la dernière section conclut cet article et présente les perspectives associées à ces travaux.

2. Matériel et méthodes

2.1 Matériaux

Les contreplaqués utilisés dans cette étude sont constitués de deux essences de bois : le hêtre et le douglas. Le bois se présente sous forme de placages, de fines couches de bois obtenues par un procédé de déroulage, réalisé au LaBoMaP de Cluny. Les placages ont une épaisseur de 2 mm pour le hêtre et 3 mm pour le douglas, pour une masse volumique de 710 kg/m³ pour le hêtre et 500 kg/m³ pour le

douglas. Les placages sont stockés en intérieur à température ambiante, et sont découpés en plaques de 240 x 240 mm² au moment de la fabrication.

Deux adhésifs thermoplastiques sont étudiés. Le premier est un polypropylène recyclé (rPP) provenant de déchets agricoles, fourni par la société Adivalor®. Il est mélangé à 5 % en masse de polypropylène greffé d'anhydride maléique (PPAM) Polybond® 3200, qui contient 1% d'anhydride maléique (AM). Cet ajout a pour effet de favoriser l'adhésion du polypropylène, de nature hydrophobe, avec le bois et les fibres naturelles en permettant une estérification entre l'AM et les groupements alcools du bois et des fibres. Le matériau a été transformé en film de 70 µm d'épaisseur par extrusion calandrage. Son "Melting Flow Index" (MFI) est de 6 g/10 min (230 °C – 2,16 kg). Le deuxième adhésif retenu est une résine PLA fournie sous forme de pellets par la société NaturePlast sous la référence « PLE 005 ». Il a également été transformé en film de 100 µm d'épaisseur. Il possède un MFI de 10 g/10min (190°C, 2,16 kg).

Les renforts sont composés de fibres unidirectionnelles de lin (FlaxTape®), se présentant sous forme de nappes d'une densité surfacique de 110 g/m², et fournies par la société Lineo®. Elles sont stockées à 23 °C et 50% d'humidité relative pendant au moins 48 h avant fabrication.

2.2 Fabrication des contreplaqués

Les placages sont assemblés suivant la séquence d'empilement [0/90/0]_s (s pour symétrique), 0° est le sens du fil du bois. Les contreplaqués sont fabriqués par thermocompression en utilisant une presse Fontijne® LabPro 600 à 180 °C, une température permettant une bonne fluidité du rPPAM et du PLA, tout en restant en dessous des températures de dégradation des fibres de lin [12] et du bois [13]. Le processus complet de fabrication comprend plusieurs étapes. La presse se ferme et la température des plateaux monte à 180 °C à une vitesse de 15 °C/min. La pression est ensuite appliquée pendant une durée correspondante au temps nécessaire pour atteindre 180 °C au cœur du contreplaqué, cette température étant ensuite maintenue pendant une durée variant de 5 à 15 minutes. Les plateaux sont ensuite refroidis à une vitesse de 20 °C/min. Après retour à la température ambiante, la presse est ouverte et le contreplaqué est stocké à 50 % HR et 23 °C pendant au moins 72 h avant essai.

Les contreplaqués hybridés sont obtenus par ajout d'un pli de lin unidirectionnel FlaxTape® entre les deux plis centraux, à 0° ou 90° par rapport au sens du fil du bois. Le processus de fabrication reste strictement identique.

2.3 Réalisation des éprouvettes

Les plaques sont découpées d'après la norme EN302 en 7 éprouvettes de 220 x 25 mm². Elles sont ensuite entaillées sur chaque face de façon à obtenir des rainures de 3 mm de largeur espacées de 25 mm. Une représentation schématique de l'éprouvette est donnée en Fig 1a. La surface comprise entre les deux rainures est appelée surface de recouvrement, et mesure donc 25 x 25 mm². La sollicitation de traction imposée aux éprouvettes entraîne une contrainte de cisaillement dans cette surface de recouvrement, ce qui permet de qualifier sa résistance et ainsi d'évaluer les performances d'adhésion des différentes configurations d'interface.

7 éprouvettes de chaque groupe de constituants présentés en Tab.1 ont subi un vieillissement accéléré, réalisé selon deux méthodes différentes, plus ou moins sévères. La première méthode, notée « Ag1 » (pour Aging 1), s'inspire des travaux de Scida et al. [14], qui étudient le vieillissement hygrothermique de composites lin/epoxy. Dans cette méthode, les éprouvettes sont vieilles dans une enceinte climatique Q-SUN XE-3® avec un taux d'humidité de 90%HR et une température de 40 °C pendant 40 jours. Ce vieillissement est appliqué aux éprouvettes de hêtre et de douglas, utilisant des adhésif rPPAM ou PLA, avec ou sans présence de renfort en lin. La deuxième méthode, notée « Ag2 »

est basée sur la norme EN 314 concernant les essais d'adhésion pour contreplaqués. Elle consiste en une immersion de 6 h de l'échantillon dans l'eau bouillante, avant un séchage en enceinte conditionnée. Son caractère très exigeant permet de tester les limites d'adhésifs connus pour leur caractère hydrophobe, comme le PP. Cette méthode a été utilisée pour tester des éprouvettes de hêtre et de douglas collés avec du rPPAM ou du PLA, et en présence ou non de renforts de lin.

Essence	Vieillessement	Adhésif	Renfort de lin
Douglas Hêtre	40 °C 90% HR 40j (Ag1) Immersion eau bouillante – 6h (Ag 2)	rPPAM PLA	Avec/Sans

Tab. 1. Récapitulatif des paramètres de l'étude de vieillissement

2.4 Essais de résistance au cisaillement interlaminaire

Les essais de cisaillement interlaminaire ont été réalisés avec une machine de traction MTS C45, utilisant une cellule de force de 100 kN. L'essai est piloté en déplacement à une vitesse de 2 mm/min. La Fig. 1 (a) indique les sollicitations appliquées (flèches rouges) et met en évidence la zone du joint testée (en rouge) en cisaillement. La direction de traction est celle du fil du bois (0 °) à l'interface. La Fig. 1 (b) montre la déformation de cisaillement pendant l'essai, obtenue par corrélation d'image sur face latérale d'une éprouvette. On constate que ces déformations sont maximales au niveau des angles des encoches autour du joint. La Fig. 1 (c) montre un exemple de montage d'une éprouvette prête à être testée. On peut y apercevoir un mouchetis destiné à la corrélation d'images ainsi que l'installation de micros pour de l'émission acoustique, dont les résultats ne seront pas présentés ici.

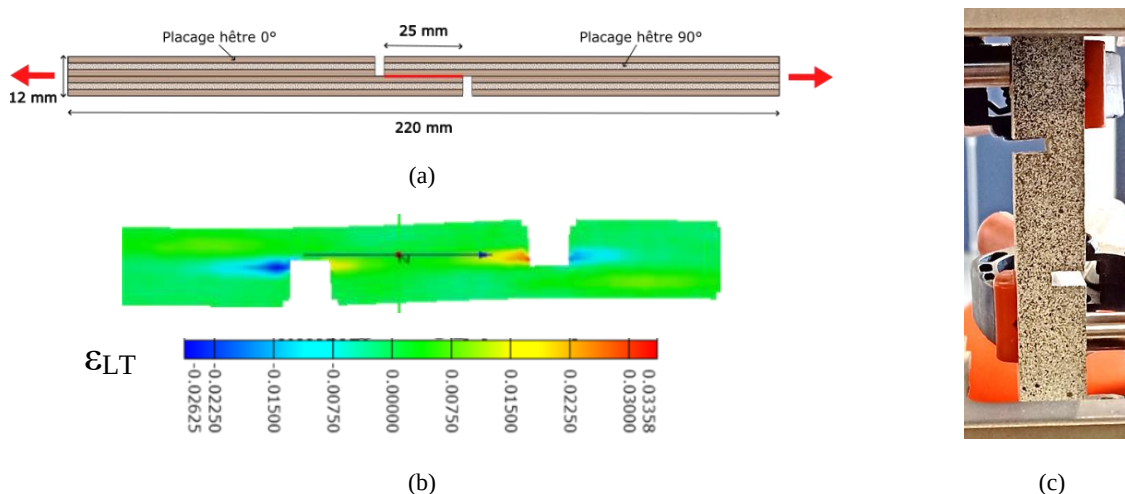


Fig. 1 - (a) Géométrie et composition des éprouvettes des essais de résistance en cisaillement ; (b) : Visualisation par corrélation d'images du champ de déformation en cisaillement dans les éprouvettes testées en cisaillement interlaminaire. (c) Montage d'essai de cisaillement interlaminaire

Lors de l'essai, la force et le déplacement de la traverse sont enregistrés. La force à rupture est ensuite divisée par la surface de la zone de recouvrement pour obtenir la valeur de contrainte en cisaillement interlaminaire, notée ILSS (pour InterLaminar Shear Strength). Une étude statistique utilisant le test de Student est réalisée afin de déterminer si les variations entre les résultats sont statistiquement significatives. La valeur significative de p (valeur de probabilité du test de Student) est fixée à 0,05.

3. Résultats

3.1 Résistance au cisaillement des contreplaqués

L'effet de l'ajout de fibres naturelles de lin à l'interface entre deux placages sur la résistance au cisaillement interlaminaire est discuté dans cette section. La Fig. 2 présente une comparaison des résistances au cisaillement interlaminaire pour des contreplaqués avec et sans renforts en fibres de lin.

Les éprouvettes de hêtre collées au rPPAM et au PLA ont des valeurs de résistance au cisaillement interlaminaire de respectivement 7 MPa et 7,7 MPa, ce qui est en deçà des valeurs pour des colles traditionnelles qui se trouvent aux alentours des 9 MPa [15]. Les éprouvettes de douglas collées au rPPAM et au PLA ont des valeurs de résistance au cisaillement interlaminaire de 4,2 MPa et 2,5 MPa, ce qui est similaire pour le rPPAM et inférieur pour le PLA aux résultats obtenus avec des colles traditionnelles, qui se trouvent autour des 4,5 MPa.

Dans le cas des éprouvettes hêtre collées au rPPAM, l'ajout de fibres naturelles à 0° vient améliorer les performances de l'interface, la valeur de résistance au cisaillement interlaminaire passe de 6,96 MPa à 8,83 MPa. Cette amélioration est confirmée par l'étude statistique, avec $p < 0,007$. L'ajout de fibres permet d'augmenter l'épaisseur du joint et de localiser la rupture dans l'interface, alors qu'elle apparaît dans le substrat pour les éprouvettes sans fibres. Lorsque les fibres sont disposées à 90° dans l'interface, la variation de valeur de résistance au cisaillement de l'interface n'est pas statistiquement significative ($p > 0,3$), mais la rupture reste localisée dans le joint.

Les collages réalisés avec du PLA ont une rupture toujours localisée dans le joint de colle, même en l'absence de fibres. L'ajout de fibres à 0° a un effet négatif statistiquement significatif ($p < 0,0005$) sur la valeur de résistance au cisaillement interlaminaire, avec une diminution de 7,66 MPa à 6,76 MPa. Cette diminution est également observée lorsque l'orientation des fibres est à 90° ($p < 0,00004$), la résistance au cisaillement interlaminaire passant de 7,66 MPa à 6,57 MPa.

Les éprouvettes de douglas ont une rupture qui est toujours localisée dans le substrat. Les éprouvettes de douglas collées au rPPAM ont bénéficié d'une amélioration statistiquement significative ($p < 0,04$) de leur résistance au cisaillement interlaminaire lors de l'ajout de fibres à 0°. On passe alors de 4,17 MPa à 5,69 MPa. Aucune variation statistiquement significative n'est observée lorsque les fibres sont ajoutées à 90°. Pour les éprouvettes collées au PLA, une amélioration statistiquement significative ($p < 0,007$) de la valeur de résistance au cisaillement interlaminaire est observée lorsque les fibres sont ajoutées à 0°, avec des valeurs passant de 2,52 MPa à 3,77 MPa. Aucune variation statistiquement significative n'est observée lorsque les fibres sont ajoutées à 90° ($p > 0,06$).

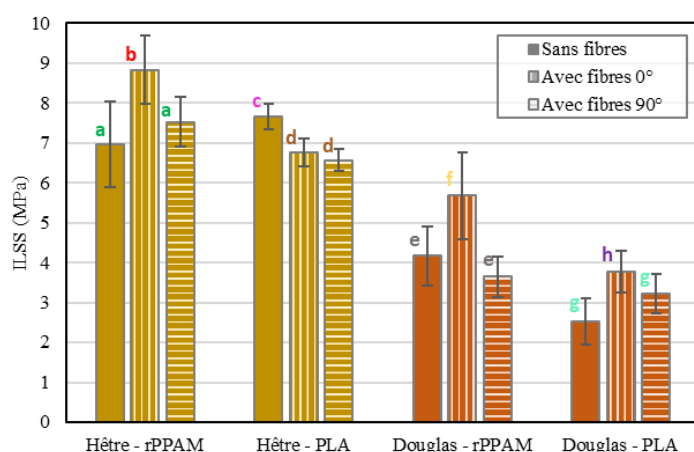


Fig. 2 - Valeurs de résistance au cisaillement interlaminaire pour des contreplaqués avec/sans renforts, écarts types et analyse statistique de Student ($a \rightarrow h$)

3.1 Effet du vieillissement accéléré

Les résultats après vieillissement accéléré (à 90% HR et 40 °C pendant 40 jours, noté Ag1) sont présentés en Fig. 3.

Les contreplaqués collés au rPPAM sans fibres montrent une augmentation statistiquement significative ($p < 0,0009$) de la résistance en cisaillement interlaminaire suite au vieillissement, par rapport aux éprouvettes non vieilles, en passant de 6,96 MPa à 9,43 MPa (+35%). Lorsque les éprouvettes contiennent des fibres, une diminution significative de la résistance ($p < 0,0004$) est observée, avec une baisse de 8,83 MPa à 6,63 MPa (-25%). Comme dans le cas des éprouvettes non vieilles, l'ajout de fibres dans l'interface permet de localiser la rupture dans le joint, alors qu'elle a lieu dans le substrat lorsque les fibres sont absentes.

Les éprouvettes collées au PLA montrent une baisse significative ($p < 0,00004$) de leur résistance au cisaillement interlaminaire après vieillissement avec une diminution de 7,66 MPa à 6,48 MPa (-15%). Une baisse significative ($p < 0,0004$) est également observée pour les éprouvettes avec des fibres, avec une diminution de 6,76 MPa à 4,82 MPa (-38%). Les éprouvettes avec ou sans fibres présentent une rupture localisée dans l'adhésif.

Concernant le douglas, tous les essais se caractérisent par une rupture localisée dans le substrat. Les éprouvettes collées au rPPAM ne montrent pas de variation statistiquement significative de résistance au cisaillement interlaminaire lors du vieillissement, qu'il y ait présence ou non de fibres à l'interface, (respectivement $p > 0,9$ et $p > 0,3$).

Les éprouvettes collées au PLA ne montrent pas de variation statistiquement significative ($p > 0,05$) lors du vieillissement. Lorsque les éprouvettes contiennent des fibres, une diminution statistiquement significative ($p < 0,004$) est observée, avec une diminution de 3,77 MPa à 2,82 MPa (-25%).

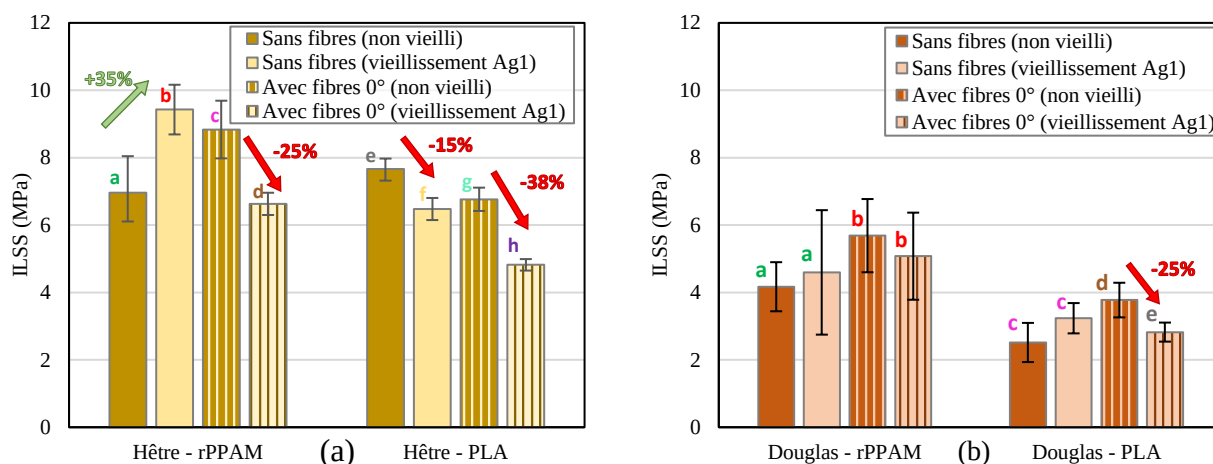


Fig. 3 - Valeurs de résistance au cisaillement après Ag1 pour des éprouvettes de hêtre (a) et de douglas

Les résultats de résistance au cisaillement interlaminaire des éprouvettes qui ont subi un vieillissement accéléré par immersion en eau bouillante (Ag2) sont présentés en Fig. 4. Les éprouvettes collées au PLA s'étant délaménées lors du processus de vieillissement accéléré, leurs résultats ne seront pas présentés.

Pour les éprouvettes de hêtre collées au rPPAM, une amélioration statistiquement significative ($p < 0,05$) de la valeur de résistance au cisaillement interlaminaire est observée entre les éprouvettes non vieilles et vieilles, augmentant de 6,96 MPa à 9,16 MPa (+32%). Pour les éprouvettes avec des fibres à l'interface, une diminution significative ($p < 0,00001$) est observée, avec une diminution de 8,83 MPa à 4,47 MPa (-49%). On constate à nouveau que la rupture est toujours localisée dans le joint quand les fibres sont présentes.

Les éprouvettes douglas – rPPAM vieilles ne montrent pas de différence significative ($p > 0,7$) par rapport aux éprouvettes vieilles. Lorsque des fibres sont présentes à l'interface, une diminution statistiquement significative ($p < 0,002$) est observée, avec une diminution de 5,69 MPa à 2,94 MPa (-48%). Les éprouvettes avec ou sans fibres présentent une rupture localisée dans l'adhésif.

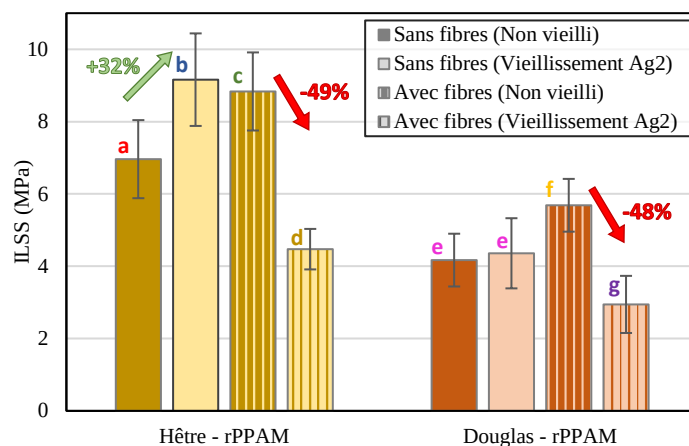


Fig. 4 - Valeurs de résistance au cisaillement après Ag2 pour des éprouvettes de hêtre (a) et de douglas (b)

La suite de l'étude sera consacrée à l'interprétation de ces résultats. Il est nécessaire d'analyser les phénomènes physico chimiques et mécaniques à l'échelle microscopique intervenant dans les différents constituants et leurs interfaces pour pouvoir proposer des mécanismes de dégradation et de rupture expliquant les différences de comportement observées.

4. Conclusion

Ce travail s'est intéressé à la résistance au cisaillement interlaminaire de contreplaqués de hêtre ou de douglas, collés avec des thermoplastiques rPPAM ou PLA, et renforcés ou non par des fibres naturelles. L'ajout de fibres de lin à 0° à l'interface a permis d'améliorer les valeurs de résistance au cisaillement interlaminaire pour les éprouvettes hêtre et douglas collées au rPPAM. Les éprouvettes collées au PLA ont montré une amélioration des performances de l'interface uniquement pour le douglas.

La deuxième partie de l'étude, étudiant le vieillissement de ces matériaux hybrides selon deux types de vieillissement, montre une excellente résistance à l'humidité du rPPAM, mais une dégradation dans le cas du PLA. L'ajout de fibres s'est montré défavorable à la résistance au cisaillement interlaminaire des contreplaqués. L'étude montre que le remplacement des adhésifs pétrosourcés des contreplaqués par des résines thermoplastiques recyclées ou biosourcées est une solution cohérente du point de vue des performances d'adhésion entre les placages. Le renforcement par fibres naturelles en condition d'humidité faible et stable possède un aspect bénéfique, mais semble être à éviter pour des utilisations dans des conditions à fort taux d'humidité.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le programme « Investissements d'Avenir », projet ISITE-BFC (contrat ANR-15-IDEX-0003) dans le cadre du projet WooFHi.

Bibliographie

- [1] « Formaldéhyde ». <https://www.cancer.org/cancer/cancer-causes/formaldehyde.html> (consulté le 18 février 2022).

- [2] N.-E. E. Mansouri, A. Pizzi, et J. Salvado, « Lignin-based polycondensation resins for wood adhesives », *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 103, n° 3, p. 1690-1699, févr. 2007, doi: 10.1002/app.25098.
- [3] P. Bekhta, M. Müller, et I. Hunko, « Properties of Thermoplastic-Bonded Plywood: Effects of the Wood Species and Types of the Thermoplastic Films », *Polymers*, vol. 12, n° 11, p. 2582, nov. 2020, doi: 10.3390/polym12112582.
- [4] M. Gaugler, J. Luedtke, W. J. Grigsby, et A. Krause, « A new methodology for rapidly assessing interfacial bonding within fibre-reinforced thermoplastic composites », *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 89, p. 66-71, mars 2019, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2018.11.010.
- [5] J. Kajaks, K. Kalnins, S. Reihmane, et A. Bernava, « Recycled Thermoplastic Polymer Hot Melts Utilization for Birch Wood Veneer Bonding », *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, vol. 30, n° 2, p. 87-102, mai 2014, doi: 10.1177/147776061403000202.
- [6] W. Song, W. Wei, X. Li, et S. Zhang, « Utilization of Polypropylene Film as an Adhesive to Prepare Formaldehyde-free, Weather-resistant Plywood-like Composites: Process Optimization, Performance Evaluation, and Interface Modification », *BioResources*, vol. 12, n° 1, p. 228-254, nov. 2016, doi: 10.15376/biores.12.1.228-254.
- [7] J. Luedtke, M. Gaugler, W. J. Grigsby, et A. Krause, « Understanding the development of interfacial bonding within PLA/wood-based thermoplastic sandwich composites », *Industrial Crops and Products*, vol. 127, p. 129-134, janv. 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.10.069.
- [8] W. J. Grigsby, A. Puri, M. Gaugler, J. Luedtke, et A. Krause, « Bonding Wood Veneer with Biobased Poly(Lactic Acid) Thermoplastic Polyesters: Potential Applications for Consolidated Wood Veneer and Overlay Products », *Fibers*, vol. 8, n° 8, p. 50, juill. 2020, doi: 10.3390/fib8080050.
- [9] A. D. Banjo, V. Agrawal, M. L. Auad, et A.-D. N. Celestine, « Moisture-induced changes in the mechanical behavior of 3D printed polymers », *Composites Part C: Open Access*, vol. 7, p. 100243, mars 2022, doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100243.
- [10] M. Valdes, G. F. Giaccu, D. Meloni, et Giovanna Concu, « Reinforcement of maritime pine cross-laminated timber panels by means of natural flax fibers », *Construction and Building Materials*, vol. 233, p. 117741, févr. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117741.
- [11] « EN302-1 - Adhésifs pour structures portantes en bois - Méthodes d'essais - Partie 1 : détermination de la résistance du joint au cisaillement en traction longitudinale », <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-3021/adhesifs-pour-structures-portantes-en-bois-methodes-dessais-partie-1-determ/fa164794/41412>.
- [12] K. Van de Velde et E. Baetens, « Thermal and Mechanical Properties of Flax Fibres as Potential Composite Reinforcement », *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 286, n° 6, p. 342-349, juin 2001, doi: 10.1002/1439-2054(20010601)286:6<342::AID-MAME342>3.0.CO;2-P.
- [13] F. Avat, « Contribution à l'étude des traitements thermiques du bois jusqu'à 300°C: Transformations chimiques et caractérisations physico-chimiques », p. 363, 1993.
- [14] D. Scida, M. Assarar, C. Poilâne, et R. Ayad, « Influence of hygrothermal ageing on the damage mechanisms of flax-fibre reinforced epoxy composite », *Composites Part B: Engineering*, vol. 48, p. 51-58, mai 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.12.010.
- [15] I. Gavrilović-Grmuša, M. Dunky, J. Miljković, et M. Djiporović-Momčilović, « Influence of the degree of condensation of urea-formaldehyde adhesives on the tangential penetration into beech and fir and on the shear strength of the adhesive joints », *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 70, n° 5, p. 655-665, sept. 2012, doi: 10.1007/s00107-012-0599-6.