



**HAL**  
open science

# Détermination des paramètres de fabrication d'assemblage de substrats bois par adhésifs thermoplastiques renforcés par des fibres naturelles

Clément Prunier, Jérôme Rousseau, Mohammed El Moussaid, Pauline  
Butaud, Vincent Placet

## ► To cite this version:

Clément Prunier, Jérôme Rousseau, Mohammed El Moussaid, Pauline Butaud, Vincent Placet. Détermination des paramètres de fabrication d'assemblage de substrats bois par adhésifs thermoplastiques renforcés par des fibres naturelles. 25ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04278919

**HAL Id: hal-04278919**

**<https://hal.science/hal-04278919v1>**

Submitted on 10 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Détermination des paramètres de fabrication d'assemblage de substrats bois par adhésifs thermoplastiques renforcés par des fibres naturelles

C. PRUNIER<sup>a</sup>, J. ROUSSEAU<sup>a</sup>, M. EL MOUSSAID<sup>a</sup>, P. BUTAUD<sup>b</sup>,  
V. PLACET<sup>b</sup>

- a. DRIVE EA1859, Univ. Bourgogne Franche Comté, F58000, Nevers France.  
clement\_prunier@etu.u-bourgogne.fr – jerome.rousseau@u-bourgogne.fr –  
mohammed.el-moussaid@u-bourgogne.fr
- b. FEMTO-ST, UFC/ENSMM/UTMM, UMR 6174 CNRS, Département Mécanique  
Appliquée, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France.  
pauline.butaud@univ-fcomte.fr – vincent.placet@univ-fcomte.fr

## Résumé

*La situation écologique actuelle encourage l'utilisation de matériaux possédant une faible empreinte carbone, comme le bois, très présent dans l'industrie sous forme de contreplaqués. Un contreplaqué est un assemblage de couches de bois appelés placages, dans des orientations variables. Aujourd'hui, les placages sont collés entre eux majoritairement par des colles à base de formaldéhyde, un composant classé cancérigène. Ce travail étudie le remplacement de cet adhésif par du polypropylène (PP) recyclé qui est un thermoplastique non toxique. Dans une première partie, une étude a été menée sur l'impact des paramètres de fabrication (temps de chauffe, pression) sur la résistance en cisaillement d'assemblages collés de contreplaqués, pour deux essences de bois, le hêtre et le douglas. Pour le hêtre, des valeurs de résistance au cisaillement aux environs de 8 MPa ont été atteintes, pour un temps de chauffe de 15 minutes, et ce pour les différentes pressions de fabrication testées. Pour le douglas, la résistance moyenne est d'environ 4 MPa, sans impact notable du temps de chauffe ou de la pression. Des observations au microscope numérique ont permis de mettre en évidence un ancrage mécanique important du joint de PP dans les placages adjacents par diffusion du thermoplastique fondu dans les cellules. Dans une deuxième partie, l'ajout de fibres naturelles de lin dans le joint de PP a été étudié. La présence des fibres induit une augmentation des propriétés de résistance en cisaillement du joint pour les deux essences.*

## Abstract

*The actual ecological situation promotes the use of low carbon footprint materials as wood, very present in today's industry as plywood. It is a combination of wood layers called veneers, oriented in different ways. Today, veneers are mainly glued together by formaldehyde-based adhesives, a known carcinogenic component. This work studies the replacement of formaldehyde in plywood by*

polypropylene (rPP), a non-toxic thermoplastic. The first part is a study on the influence of manufacturing parameters (heating time, pressure) on the plywood adhesive joints shear strength, for two wood species, beech and douglas fir. Regarding the beech study, shear strength values around 8 MPa are reached for a 15 minutes heating time whereas pressure variation do not show significant impact. For douglas fir, results are around 4 MPa, without any impact of pressure nor heating time. Observations made with a digital microscope show an important mechanical anchoring between the PP joint and veneers, caused by the adhesive diffusion of the melted thermoplastic in near wood cells. In a second part, the effect of the addition of flax fibers in the PP joint is studied. The presence of fibres induces an increase in the joint shear strength properties of the plywood, for both wood species.

**Mots clefs : Bois, fibres naturelles, matériau hybride, collage, thermocompression**

## 1 Introduction

Dans le contexte écologique actuel, l'urgence d'une transition vers une consommation plus éco-responsable pousse les industriels à revoir leurs méthodes et moyens de production. Cette prise de conscience entraîne une augmentation de l'utilisation du bois. Le bois est en effet un matériau naturel aux propriétés mécaniques intéressantes et à l'avantage, lors de la croissance de l'arbre, d'absorber du CO<sub>2</sub> puis de le séquestrer pendant la durée de vie des produits manufacturés. La filière bois est également dotée de moyens de production à relativement faible émission carbone [1]. La production mondiale de panneaux dérivés du bois a ainsi augmenté de 9,2% entre 2014 et 2018. Les contreplaqués représentaient 40% de ces panneaux en 2018, et leur production a augmenté de 11% sur la même période [2]. Cette croissance s'explique par leur facilité de fabrication et leurs performances mécaniques remarquables. Les contreplaqués sont composés d'un empilement de plusieurs couches de bois appelés placages ou plis, d'un nombre généralement impair, et avec une alternance de la direction des fibres du bois [3]. Cette stratégie de stratification permet de compenser l'inhomogénéité du bois due à ses défauts tels que les nœuds, et son caractère anisotrope induit par sa structure fibreuse [4].

Cependant, il subsiste toujours une certaine inhomogénéité et donc une dispersion importante dans les caractéristiques mécaniques des produits bois, ce qui oblige les industriels à appliquer des coefficients de sécurité importants. Dans les secteurs où un surplus de masse est à proscrire, comme pour les transports, ce surdimensionnement est très problématique. Les caractéristiques mécaniques spécifiques des produits bois restent par ailleurs modérées. L'étude présentée ici s'inscrit dans un projet proposant de renforcer les contreplaqués par des matériaux composites à fibres naturelles et à matrice thermoplastique, dans le but d'homogénéiser et d'améliorer leurs propriétés. Dans les travaux de Kajaks et al. [5], l'efficacité de différentes résines thermoplastiques a été étudiée pour plusieurs types de fibres afin de renforcer des contreplaqués. Des valeurs de résistance au cisaillement allant jusqu'à 10 MPa ont été mesurées. Borri et al. [6] ont également observé une amélioration de la résistance en flexion de 27,8% lors du renforcement externe de poutres en pin par des composites à fibres de lin et matrice époxy. Aujourd'hui, la fabrication des contreplaqués utilise en majorité des adhésifs à base de formaldéhyde, comme les colle PF (Phénol-Formaldéhyde), UF (Urée-Formaldéhyde), ou MUF (Mélamine-Urée-Formaldéhyde) [7], [8]. Ce choix est motivé par l'excellente adhésion que permettent ces colles, leur facilité d'application, ainsi que leur excellente résistance à l'eau [9]. Il a cependant été prouvé que les contreplaqués utilisant ce type d'adhésif émettent pendant des années des formaldéhydes [10], une substance irritante pour les muqueuses des voies respiratoires et des yeux, classée cancérigène chez

l'Homme [11]. Le remplacement de ces adhésifs dans les contreplaqués est donc un sujet de premier ordre pour la communauté scientifique qui cherche des solutions non-toxiques et écologiques.

L'adhésif étudié dans les travaux présentés ici est un polypropylène recyclé (rPP) issu de déchets agricoles, et utilisé sous forme de films. La mise en œuvre de ce type d'adhésif diffère sensiblement de celle des colles traditionnelles. L'influence des paramètres de mise en œuvre des films thermoplastiques comme adhésif dans les contreplaqués a été étudiée par plusieurs travaux de la littérature récente. Song et al. [12] ont étudié l'impact du temps de chauffe, de la pression, de la température et du grammage pour la fabrication de composites bois/PP en utilisant des placages d'eucalyptus, et ont réussi à obtenir des valeurs de résistance en flexion et en cisaillement supérieures à celle obtenue avec une colle urée formaldéhyde classique. Grigsby et al. [13] présentent une étude sur l'utilisation de PLA (PolyLactic Acid) comme adhésif sur des placages de bouleau, épicéa et pin radiata montrant l'impact de la température et du temps de chauffe. Ils étudient aussi, au même titre que Bakken & Taleyarkhan [14], l'impact de la forme semi-cristalline ou amorphe du PLA utilisé comme adhésif. De nombreux autres bio-adhésifs sont aujourd'hui à l'étude, comme ceux présentés par Pizzi [15] ou encore Antov et al. [16]. Les résultats de ces études sont très prometteurs, et demandent à être complétés en étudiant notamment d'autres essences de bois ainsi que l'impact d'ajout de fibres naturelles dans les adhésifs.

L'étude présentée ici a pour objectif d'évaluer l'influence des paramètres de fabrication sur les propriétés en cisaillement d'assemblages de contreplaqués collés par polypropylène recyclé. Les résultats obtenus sur deux essences de bois (hêtre et douglas) sont tout d'abord évalués, puis l'effet d'apport de fibres de lin dans le joint collé est étudié.

## 2 Matériel et méthodes

### 2.1 Matériaux

Trois matériaux sont utilisés dans cette étude pour la fabrication des contreplaqués : des placages de bois, des films de polypropylène et des nappes de renforts en fibres de lin.

Les placages sont obtenus à partir de deux essences exploitées dans les forêts du Morvan, le hêtre et le douglas. Ils ont été obtenus par procédé de déroulage et fournis par le LaBoMaP de Cluny. Leur épaisseur est de 2 mm pour le hêtre et de 3 mm pour le douglas et leur masse volumique moyenne est de 710 kg/m<sup>3</sup> et 500 kg/m<sup>3</sup>, respectivement. Après déroulage, les placages ont été stockés dans une halle à température ambiante. Ils sont ensuite découpés en plaques de 240 x 240 mm<sup>2</sup>.

Le polypropylène (PP) utilisé comme adhésif, fourni par la société Adivalor®, est un matériau recyclé à base de déchets issus de l'agriculture. Il contient 5 % en masse de PP-g-MA (polypropylène greffé anhydride maléique) Polybond® 3200, contenant environ 1% d'anhydride maléique. Le Melting Flow Index (MFI) du polymère est de 115 g/10 min (190 °C - 2.16 kg). Les granulés ont été transformés en film par un procédé d'extrusion calandrage. L'épaisseur des films obtenus est d'environ 70 µm. Ils sont stockés à température ambiante avant utilisation.

Le renfort en fibres de lin est fourni par la société Lineo®. Il se présente sous la forme de fibres unidirectionnelles (Flaxtape®), d'une masse surfacique de 110 g/m<sup>2</sup>. Les fibres sont stockées à 23°C et 50% RH pendant au moins 48h avant utilisation.

### 2.2 Elaboration des contreplaqués

Les placages sont assemblés selon la séquence [0/90/0]<sub>s</sub>, l'orientation 0° correspondant à la direction du fil du bois. Deux films de PP sont disposés entre chaque pli. Lorsque l'ajout des fibres de lin est étudié, celles-ci sont ajoutées entre les deux films PP situés au centre du contreplaqué.

Deux procédés ont été employés pour réaliser les contreplaqués, la thermocompression et la cuisson sous vide. Dans le premier cas, une presse de thermocompression Fontijne® LabPro 600 a été utilisée. Le cycle de fabrication comprend une montée à 15 °C/min. Lorsque les plateaux chauffants atteignent la température de 180 °C, une pression est appliquée. Les valeurs de 10 et 20 bars ont été retenues pour l'étude. La température de 180 °C a été choisie car elle constitue un compromis permettant d'obtenir une fusion correcte du polypropylène tout en évitant une dégradation des fibres de lin [17] et du bois [18]. Le temps nécessaire pour obtenir une température de 180 °C au cœur du contreplaqué a été défini en mesurant celle-ci à l'aide d'un thermocouple. Un temps de maintien à cette température, de 5 ou 15 min (paramètre de l'étude) est destiné à permettre la bonne imprégnation des placages. Les plateaux sont ensuite refroidis à 20 °C/minute, puis la pression est relâchée et la presse ouverte. Le contreplaqué obtenu est ensuite stocké à 23 °C et 50% RH pendant au moins 48 h.

La cuisson sous vide, quant à elle, est réalisée dans une enceinte thermique Memmert® UF 450 Plus, en disposant les placages et l'adhésif sous une bâche à vide. Les paramètres sont les mêmes que ceux retenus pour la thermocompression, à l'exception de la vitesse de chauffe qui est de 4,5 °C/min et du refroidissement qui se fait par ouverture des portes de l'enceinte.

## 2.3 Fabrication des éprouvettes

Les plaques sont découpées à l'aide d'une scie sur table Titan® TTB343TAS en 7 éprouvettes de 220 x 25 mm<sup>2</sup>. Celles-ci sont ensuite rainurées (**figure 1**) conformément à la norme NF EN 302-1 [19]. Les éprouvettes ont une largeur  $b = 25$  mm, une longueur  $l_1 = 220$  mm, une longueur de recouvrement  $l_2 = 25$  mm et une largeur des rainures  $l_3 = 3$  mm. Lors d'un essai de traction, la présence des deux rainures (**figure 2**) permet de faire passer le flux d'effort par la surface du joint qui est ainsi sollicitée en cisaillement. On obtient finalement un joint collé entre deux substrats contreplaqués de 3 plis [0/90/0], cette configuration ayant pour but de limiter les ruptures en traction des structures collées, au profit des ruptures adhésives ou cohésives au niveau du joint.

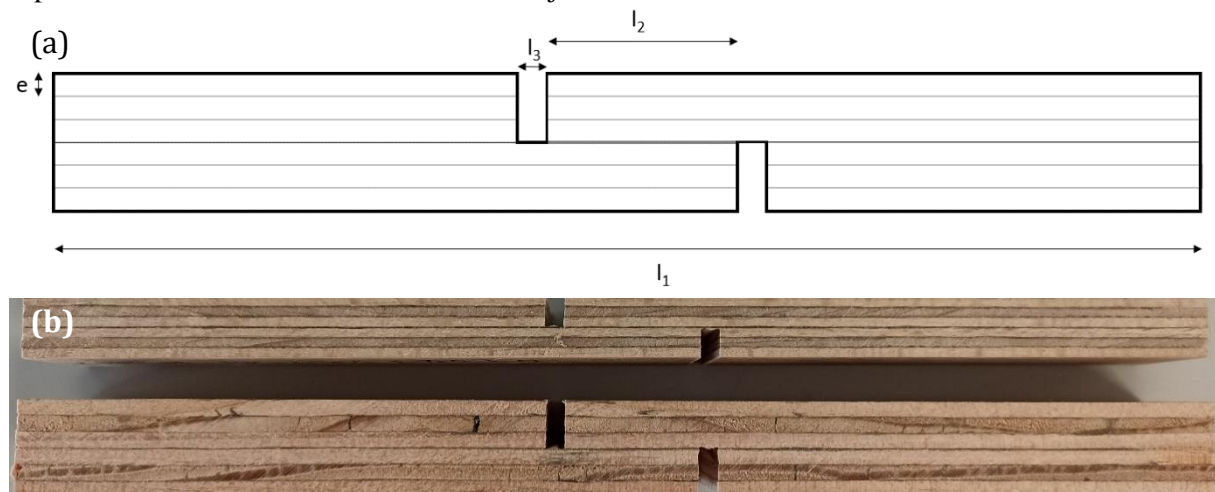


Figure 1 – (a) : Géométrie des éprouvettes pour la mesure de la résistance en cisaillement. ( $l_1 = 220$  mm,  $l_2 = 25$  mm,  $l_3 = 3$  mm,  $e = 2$  mm pour le hêtre, 3 mm pour le douglas). Largeur  $b = 25$  mm

(b) : Photo de deux éprouvettes, une en hêtre (en haut), et une en douglas (en bas).

## 2.4 Essais de traction sur joint

Les essais de traction sont réalisés sur une machine MTS C45, équipée d'une cellule de force de 100 kN. L'essai est piloté en déplacement à une vitesse de traverse de 2 mm/min. L'évolution de la force en fonction du déplacement de la traverse est enregistrée.

## 3 Résultats et discussions

### 3.1 Effet des paramètres de fabrication sur l'adhésion

Les paramètres étudiés sont le temps de chauffe et de la pression appliquée lors de la fabrication de contreplaqués bois/PP. La **figure 2** regroupe les résultats en résistance au cisaillement obtenus pour les différents couples de paramètres et pour les différentes essences étudiées. En ce qui concerne les essences, les essais réalisés avec des substrats en hêtre montrent une résistance au cisaillement au niveau du joint nettement supérieure à ceux utilisant du douglas. La nature du substrat a donc un effet important sur les performances de l'assemblage. Les valeurs de résistance sont regroupées dans le **tableau 1**. Afin de déterminer si les variations entre les résultats pour les différents paramètres sont significatives, une étude statistique par la méthode ANOVA à deux variables a été réalisée.

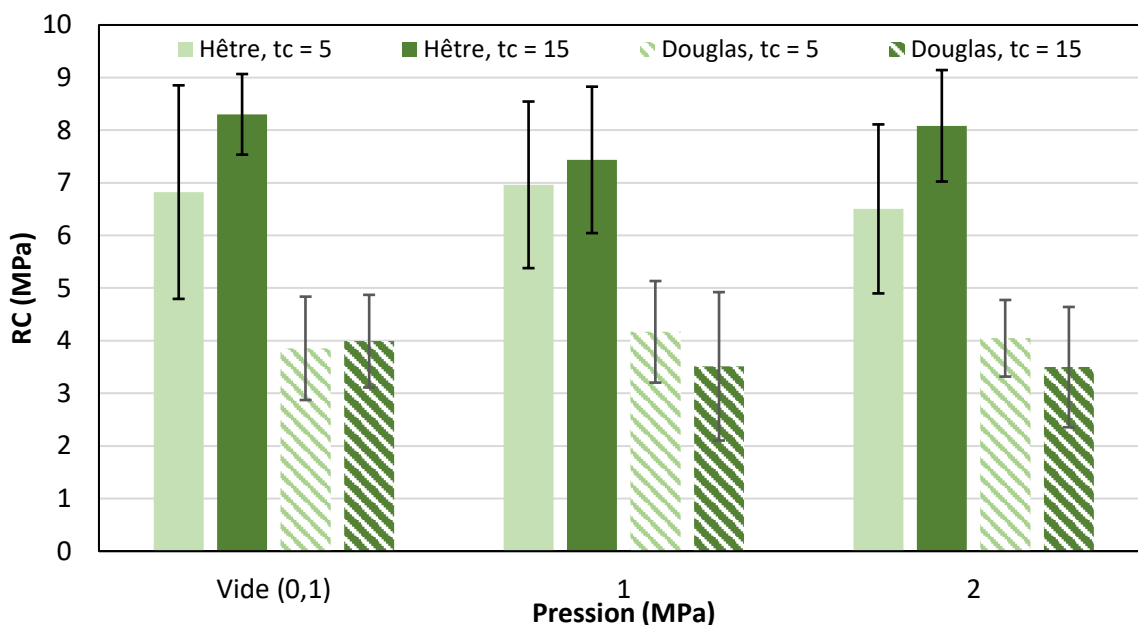


Figure 2 – Représentation de la résistance au cisaillement (RC) des contreplaqués en fonction de l'essence ainsi que de la pression et du temps de chauffe (tc) utilisés lors de la fabrication. Essais réalisés selon la norme NF EN 302

Les assemblages collés de hêtre montrent une résistance au cisaillement de l'ordre de 7 MPa. Une légère amélioration des performances est observée lorsque le temps de maintien est fixé à  $t_c = 15$  min, avec des résistances de l'ordre de 7,5 à 8 MPa. L'impact de ce paramètre est confirmé comme statistiquement significatif par l'étude ANOVA, avec un  $p > 0,8$ ,  $p$  étant la valeur de probabilité de l'étude ANOVA. Cette valeur s'approche de la valeur obtenue par Kajak et al. [5] de l'ordre de 8-9 MPa pour du rPP de classe Mosten MA et des substrats en bouleau. Un écart plus important est à noter lorsqu'ils utilisent du rPP de classe Mosten MB, avec des résistances au cisaillement autour des 9-10 MPa. L'écart entre les valeurs obtenues dans ce travail et celles de Kajak et al. [5] peut s'expliquer par la différence d'essence du bois et par la différence de PP, qui visiblement a un fort impact. Concernant les différentes pressions,

notre étude montre qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les résultats obtenus avec les différentes pressions de fabrication ( $p > 0,8$ ). L'étude statistique permet aussi d'infirmier l'existence d'interactions entre les paramètres ( $p > 0,56$ ).

Pour le douglas, l'étude ANOVA a montré que les différences de pression et de temps de chauffe n'avaient pas d'effet sur la résistance au cisaillement (respectivement  $p > 0,62$  et  $p > 0,29$ ). Elle a aussi montré qu'il n'y avait pas d'interaction entre ces paramètres ( $p > 0,63$ ).

Tableau 1 - Résultats des essais de résistance au cisaillement

Essence	tc (min)	P (MPa)	RC moyenne (MPa)	Ecart type
Hêtre	5	Vide (0,1)	6,82	2,03
		1	6,96	1,08
		2	6,50	1,61
	15	Vide (0,1)	8,30	0,77
		1	7,44	1,39
		2	8,08	1,06
Douglas	5	Vide (0,1)	3,85	0,98
		1	3,93	0,66
		2	4,05	0,73
	15	Vide (0,1)	3,99	0,88
		1	3,51	1,41
		2	3,50	1,14

Les observations réalisées au microscope numérique (**figure 3**) montrent la diffusion du PP dans les cellules du bois, en particulier dans les vaisseaux pour le hêtre. La **figure 3(a)** montre une vue en coupe transversale d'une éprouvette à base de hêtre. On y voit l'interface entre les deux placages du milieu du contreplaqué (les placages 3 et 4), pour une éprouvette fabriquée avec une pression de 2 MPa et 5 minutes de temps de chauffe. On voit que le PP (paraissant gris sur la photo) a bien pénétré dans les cellules du bois. Le PP est présent dans les vaisseaux, dans lesquels il s'est probablement propagé *via* les rayons ligneux. La diffusion est telle qu'on n'observe presque plus de PP à l'interface entre les placages, et elle est observable jusqu'à une distance de 0,3 mm du joint lui-même. Il s'agit donc là d'un véritable ancrage mécanique de l'adhésif dans les substrats. Cette diffusion est bien plus faible pour des placages collés avec des adhésifs traditionnels **figure 3(b)**, ce qui engendre une épaisseur de joint de colle plus important. Du fait de cet ancrage mécanique, les fibres du bois se retrouvent sollicitées au moment de l'essai de résistance au cisaillement, ce qui explique l'arrachement des fibres visibles dans les faciès de rupture (**figure 6(a)**). Le fait que les fibres du bois soient sollicitées mécaniquement fait donc entrer en jeu les caractéristiques mécaniques du bois dans la résistance au cisaillement de l'interface. L'essence utilisée a donc une grande importance sur la qualité de l'adhésion.

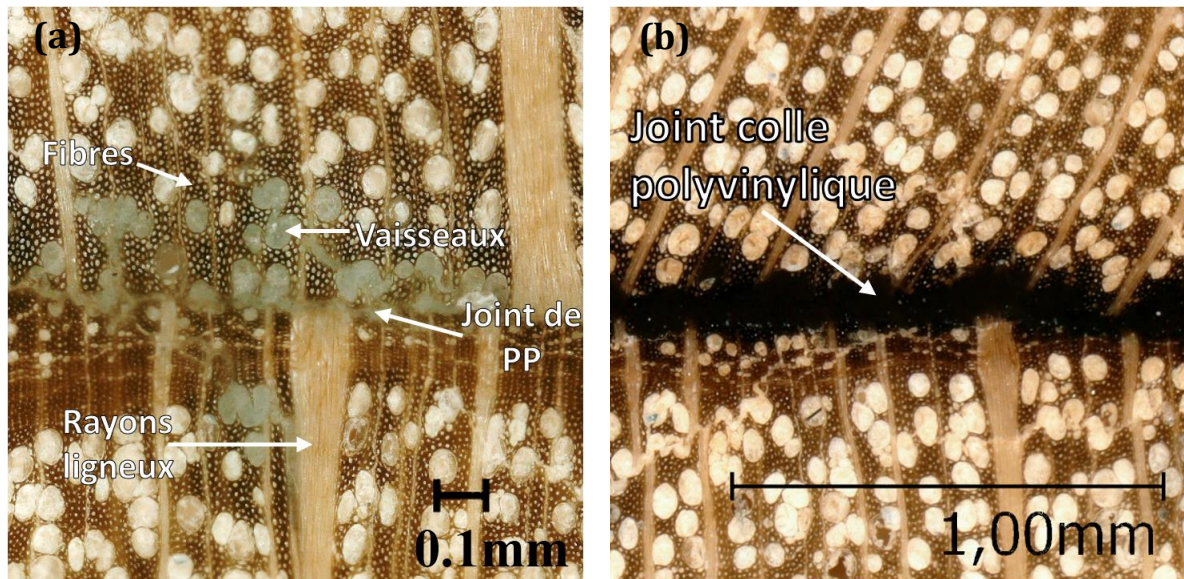


Figure 3 – Vue en coupe transversale de l’interface entre deux placages de hêtre au microscope numérique. (a) interface en PP, et (b) interface constituée d’une colle industrielle polyvinylique. Les paramètres de fabrications des images sont  $P = 2 \text{ MPa}$  et  $t_c = 5 \text{ min}$

### 3.2 Ajout de fibres à l’interface

La deuxième partie de l’étude est consacrée à l’effet de l’ajout de fibres de lin à l’interface entre les deux substrats, entre les deux films de PP. Les paramètres utilisés sont  $P = 1 \text{ MPa}$  et  $t_c = 5 \text{ min}$ . Le **figure 4** montre une vue en coupe transversale d’une éprouvette de hêtre dans laquelle l’interface entre les deux placages du milieu a été renforcée par des fibres de lin. Malgré la pression appliquée, le joint ici est beaucoup plus épais que pour les éprouvettes sans fibres de lin. Une diffusion du PP dans les vaisseaux du bois est toujours observée autour du joint initial. Les résultats obtenus sur ces éprouvettes sont présentés sur la **figure 5**.

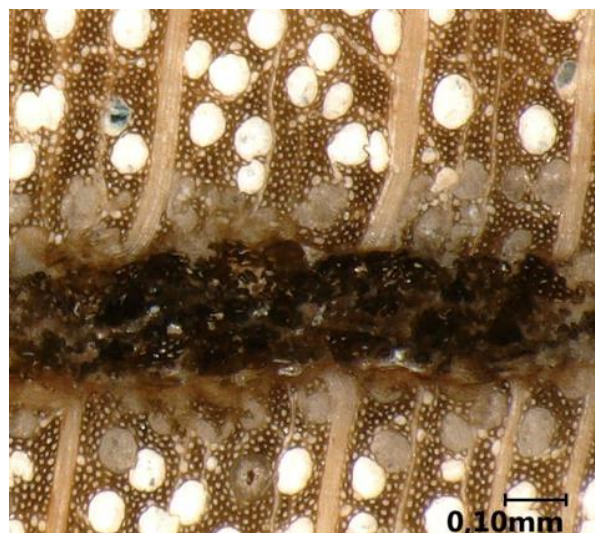


Figure 4 – Vue en coupe transversale de l’interface entre deux placages de hêtre, renforcé par des fibres de lin. Les paramètres de fabrication sont  $P = 1 \text{ MPa}$  et  $t_c = 5 \text{ min}$ .



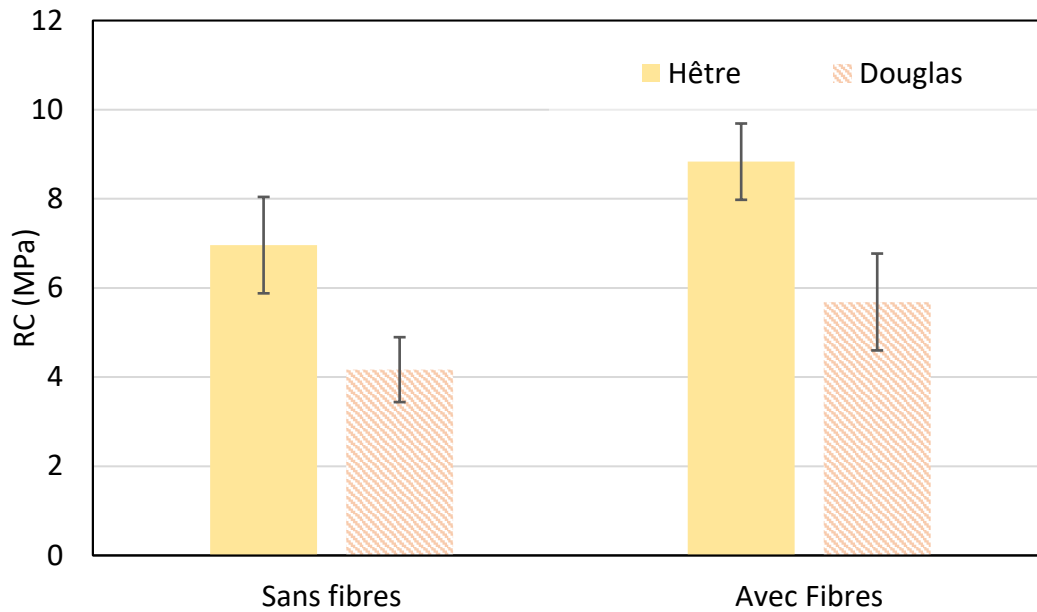


Figure 5 - Résultats des essais de résistance au cisaillement sur des contreplaqués avec ou sans renforts en fibre de lin. Les paramètres de fabrication sont  $P = 1 \text{ MPa}$ ,  $t_c = 5 \text{ min}$

Les résultats montrent que l'ajout de fibres de lin dans les contreplaqués de hêtre augmentent la résistance de l'assemblage. De plus, la dispersion des résultats est réduite, avec un coefficient de variation passant de 0,16 à 0,1. Une nette différence est visible sur le profil de rupture (**figure 6**). La **figure 6 (a)** représente le faciès de rupture d'une éprouvette hêtre – PP, fabriquée, sans fibres de lin, avec un pression  $P = 1 \text{ MPa}$  et un temps de chauffe  $t_c = 5 \text{ min}$ . On y observe clairement des fibres de bois, qui ont été arrachées du placage opposé, ainsi que certaines zones de PP (plus sombres). La **figure 6 (b)** représente le faciès de rupture d'une éprouvette hêtre – PP dont l'interface a été renforcée par des fibres de lin, fabriquée avec les mêmes paramètres. La rupture a lieu au sein de l'adhésif composite lin/PP. Les fibres de lin sont observables sur les deux substrats, et le PP présente des zones blanches et arrachées typiques d'une rupture en cisaillement. Cette différence de faciès de rupture peut s'expliquer par la rigidité plus importante du joint de colle renforcé par les fibres. Les contraintes dans les substrats sont ainsi diminuées, et les contraintes dans le joint composite lui-même sont augmentées. Le joint étant également plus épais (comme montré sur la **figure 4**), il offre une zone de propagation de rupture préférentielle.



Figure 6 – Faciès de rupture des joints d'adhésif dans des éprouvettes (a) hêtre PP ; (b) hêtre PP renforcé par des fibres de lin.

La **figure 7(a)** montre une vue en coupe transversale du faciès de rupture présenté en **figure 6(b)**. On constate que la rupture a bien eu lieu dans le joint PP renforcé par fibres de lin, avec arrachement des fibres dans la partie supérieure de l'image. Le substrat hêtre, quant à lui, est resté intact. Dans le cas du douglas, le substrat, moins résistant que le hêtre, a rompu, comme on peut le voir sur la **figure 7(b)**. La zone d'interface renforcée par les fibres n'a pas été touchée, et la fissure s'est propagée dans le placage supérieur. On observe aussi une différence au niveau de l'ancrage mécanique. La zone de diffusion du PP est moins étendue dans les cellules, plus petites que celles du hêtre. En revanche le PP vient combler les macro fissures présentes dans le placage de douglas. Cette différence dans le mode de rupture peut expliquer pourquoi, malgré l'amélioration des performances apportée par les fibres, les performances n'ont pas atteint celles obtenues avec le hêtre.

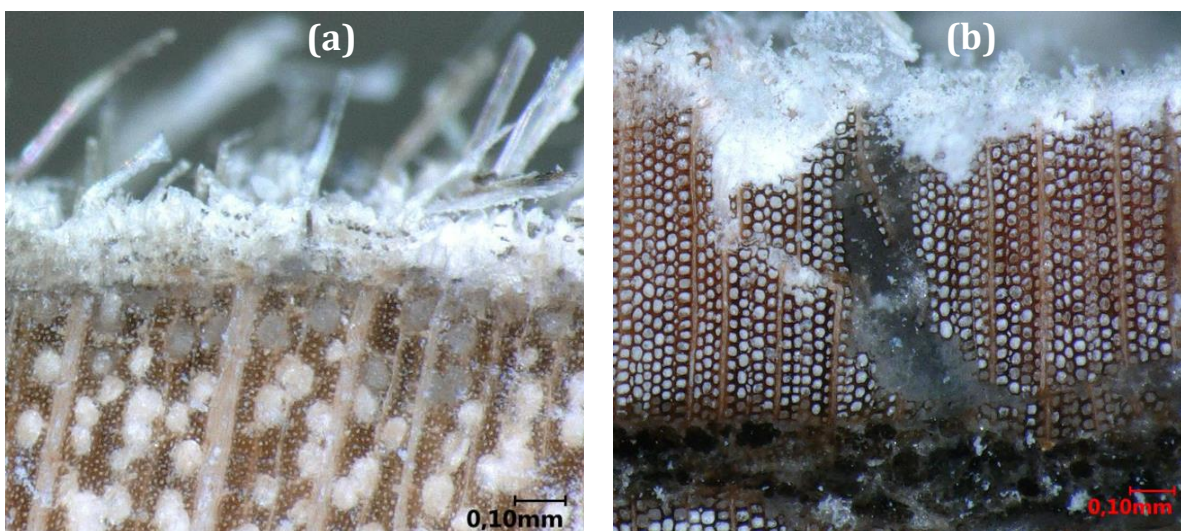


Figure 7 – Vue en coupe transversale d'un faciès de rupture d'éprouvettes renforcées par des fibres de lin. (a) Hêtre, (b) Douglas.

## 4 Conclusion

Dans ce travail, les effets des variations des paramètres de fabrication de contreplaqués utilisant du Polypropylène (PP) comme adhésif ont été étudiés pour deux essences de bois, le hêtre et le douglas. La première étude consistait à faire varier les valeurs de temps de chauffe et de pression, et de quantifier les résultats en mesurant la résistance au cisaillement du joint d'adhésif au milieu du contreplaqué. Concernant le hêtre, cette étude a montré que la pression de fabrication n'avait pas d'effet significatif pour la gamme considérée, et que le temps de chauffe optimal était de 15 minutes (après être arrivé à température à cœur). Aucun des paramètres n'a eu d'effet statistiquement significatif sur les résultats obtenus avec le douglas. La deuxième partie de cette étude consistait à renforcer l'interface centrale des contreplaqués par l'introduction de fibres de lin unidirectionnelles, orientées dans le sens des fibres du bois et de l'essai. Pour les deux essences, une amélioration de la résistance au cisaillement a été observée après cet ajout. Des différences sont cependant toujours visibles dans les faciès de rupture. Cette amélioration des performances est très prometteuse et encourageante pour de futures études sur leur impact sur d'autres propriétés du contreplaqué.

## 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.

## Références

- [1] F. Negro et R. Bergman, « Carbon stored by furnishing wood-based products: An Italian case study », *Maderas, Cienc. tecnol.*, n° ahead, p. 0-0, 2019, doi: 10.4067/S0718-221X2019005000106.
- [2] R. Brandner, « Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report », in *Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber (CLT)*, Graz, Austria, 2013, p. 33.
- [3] T. Sellers, *Plywood and Adhesive Technology*. CRC Press, 1985.
- [4] C. Tenorio, R. Moya, et F. Muñoz, « Comparative study on physical and mechanical properties of laminated veneer lumber and plywood panels made of wood from fast-growing Gmelina arborea trees », *J Wood Sci*, vol. 57, n° 2, p. 134-139, avr. 2011, doi: 10.1007/s10086-010-1149-7.
- [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] A. Borri, M. Corradi, et E. Speranzini, « Reinforcement of wood with natural fibers », *Composites Part B: Engineering*, vol. 53, p. 1-8, oct. 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.04.039.
- [7] H. R. Mansouri, « Amélioration des résines Urée-Formaldéhyde et Phénol-Formaldéhyde pour le collage des panneaux à base de bois », p. 261, 2007.
- [8] D. Gonçalves, J. M. Bordado, A. C. Marques, et R. Galhano dos Santos, « Non-Formaldehyde, Bio-Based Adhesives for Use in Wood-Based Panel Manufacturing Industry—A Review », *Polymers*, vol. 13, n° 23, p. 4086, nov. 2021, doi: 10.3390/polym13234086.
- [9] L. Pilato, Éd., *Phenolic Resins: A Century of Progress*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-04714-5.
- [10] B. Meyer, B. A. K. Andrews, et R. M. Reinhardt, Éd., *Formaldehyde Release from Wood Products*, vol. 316. Washington, DC: American Chemical Society, 1986. doi: 10.1021/bk-1986-0316.

- [11] « Formaldehyde ». <https://www.cancer.org/cancer/cancer-causes/formaldehyde.html> (consulté le 18 février 2022).
- [12] 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.
- [13] W. J. Grigsby, A. Puri, M. Gaugler, J. Lüedtke, 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.
- [14] A. C. Bakken et R. P. Taleyarkhan, « Plywood wood based composites using crystalline/amorphous PLA polymer adhesives », *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 99, p. 102581, juin 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102581.
- [15] A. Pizzi, « Recent developments in eco-efficient bio-based adhesives for wood bonding: opportunities and issues », *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 20, n° 8, p. 829-846, janv. 2006, doi: 10.1163/156856106777638635.
- [16] P. Antov, V. Savov, et N. Neykov, « SUSTAINABLE BIO-BASED ADHESIVES FOR ECO-FRIENDLY WOOD COMPOSITES. A REVIEW », *WOOD RESEARCH*, p. 15, 2020.
- [17] 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.
- [18] F. Avat, « Contribution à l'étude des traitements thermiques du bois jusqu'à 300°C: Transformations chimiques et caractérisations physico-chimiques », p. 363, 1993.
- [19] Normes nationales et documents normatifs nationaux. (2013). « Adhésifs pour structures portantes en bois - Méthodes d'essais - Partie 1 : détermination de la résistance du joint au cisaillement en traction longitudinale ». (NF EN 302-1)