

## Evaluation du taux de restitution d'énergie en mode I d'un LVL de peuplier

PEIGNON Axel<sup>1</sup>, SERRA Joël<sup>1</sup>, GELARD Léo<sup>1</sup>, CANTAREL Arthur<sup>1</sup>, EYMA Florent<sup>1</sup>,  
CASTANIE Bruno<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Clément (ICA), Université de Toulouse, CNRS UMR 5312, INSA, ISAE-Supaéro,  
INSA, IMT Mines Albi, UPS, Toulouse, France  
[peignon@insa-toulouse.fr](mailto:peignon@insa-toulouse.fr)

**Mots clés :** Bois ; Placages ; Taux de restitution d'énergie ; Essai DCB (Double Cantilever Beam) ; Délaminage ; Pontage de Fibres ; Mode I

### Introduction

Le lamibois (LVL) et le contreplaqué sont des produits composites structurels fabriqués à partir de fines feuilles de bois déroulées, appelées placages et assemblées avec un adhésif. Le contreplaqué a une stratification croisée, ce qui signifie que les placages longitudinaux et transversaux sont alternés dans tout le stratifié. Dans le LVL, contrairement au contreplaqué, les fibres du placage sont principalement orientées dans la même direction. Pour un usage structurel, certains LVL peuvent avoir quelques placages à fils croisés. Le LVL et le contreplaqué, du fait de leur fabrication, offrent la possibilité de sélectionner les placages ne présentant pas de défauts, présentent des caractéristiques mécaniques statiques comparables, voire supérieures, à celles du bois massif (Leicester et Bunker, 1969). Par ailleurs des études récentes des auteurs ont montré que le LVL présente aussi un potentiel mécanique intéressant pour des applications de crash ou d'impact (Guélou et al., 2021; Susainathan, 2017). Aussi, en se basant sur l'utilisation de ces résultats, l'utilisation de la stratégie de modélisation dite Discrete Ply Model (Bouvet et al., 2009; Serra et al., 2016) a été envisagée pour modéliser les scénarios de rupture des structures à base de contreplaqué, aussi bien en statique qu'en dynamique. Cette stratégie repose sur uniquement 13 paramètres dont les taux de restitution d'énergie aux interfaces qu'il convient d'identifier spécifiquement pour les applications de composite bois.

Pour caractériser le taux de restitution d'énergie en mode I, mode nécessitant le moins d'énergie pour ce matériau et qui est donc le plus dangereux pour la structure, l'essai DCB (Double Cantilever Beam) est privilégié. Peu d'auteurs se sont intéressés aux essais DCB sur des interfaces de bois collés, que ce soit pour du LVL ou du contreplaqué. El Moustaphaoui et al. (2021) ont caractérisé la ténacité d'une interface de contreplaqué de ceiba de 9 plis. Baba et al. (2010) se sont intéressés au contreplaqué de hêtre, et Xiao et al. (2023) se sont intéressés au LVL de peuplier. Cependant, les études précédentes ne s'intéressaient qu'aux interfaces 0°/0°. Or, dans le cas de stratifiés tels que le contreplaqué, le délaminage se produit majoritairement aux interfaces 0°/90° en raison du cisaillement interlaminaire maximal pour des interfaces orientées perpendiculairement. Ce phénomène est bien connu dans le domaine des composites (Gay, 2014) mais très peu étudié pour le bois.

Cette étude vise donc à caractériser les taux de restitution d'énergie en mode I pour deux interfaces différentes : une interface 0°/0° et une interface 0°/90°.

## Matériel et méthodes

L'essai Double Cantilever Beam (DCB) consiste à appliquer une charge aux extrémités d'une éprouvette qui entraîne la propagation de la fissure en mode pur I (Fig. 2). Des placages de bois de peuplier (*Populus*) Koster de 1mm ont été utilisés pour la fabrication des éprouvettes DCB. Les placages, fournis par le laboratoire LaBoMaP de Cluny, ont été produits à l'aide d'une dérouleuse. Deux configurations ont été réalisées et sont illustrées sur la Fig. 1 :

- Un contreplaqué 8 plis avec une configuration  $[0^\circ]_8$  pour l'interface  $0^\circ/0^\circ$ .
- Un contreplaqué 9 plis avec une configuration de stratification  $[0^\circ_4, 90^\circ, 0^\circ_4]$  pour l'interface  $0^\circ/90^\circ$ .

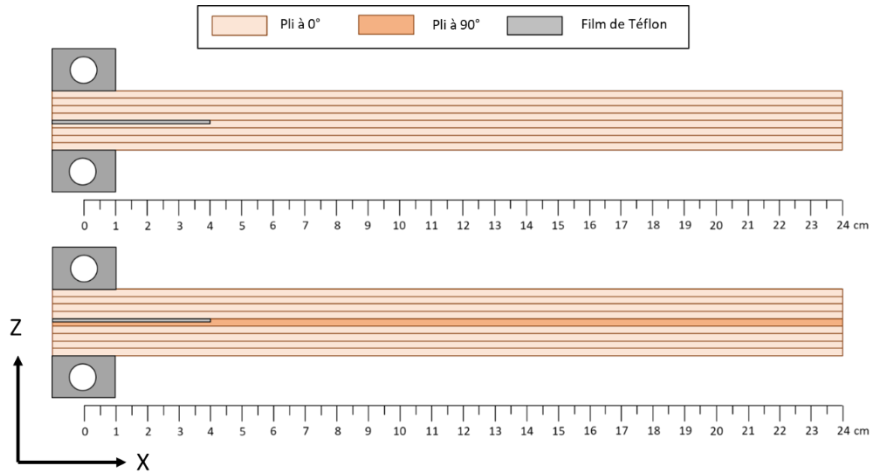


Fig. 1 : Configuration des éprouvettes DCB de la série  $0^\circ/0^\circ$  (haut) et  $0^\circ/90^\circ$  (bas)

Un total de 12 éprouvettes par configuration a été découpé au laser. Les éprouvettes DCB ont des dimensions nominales de  $250(L) \times 25(B) \times 8\text{mm}(H)$  pour la série  $0^\circ/0^\circ$  et de  $250(L) \times 25(B) \times 9\text{mm}(H)$  pour la série  $0^\circ/90^\circ$  (Fig. 2). L'éprouvette est mise en place avec une longueur de fissure initiale ( $a_0$  sur la Fig. 2).

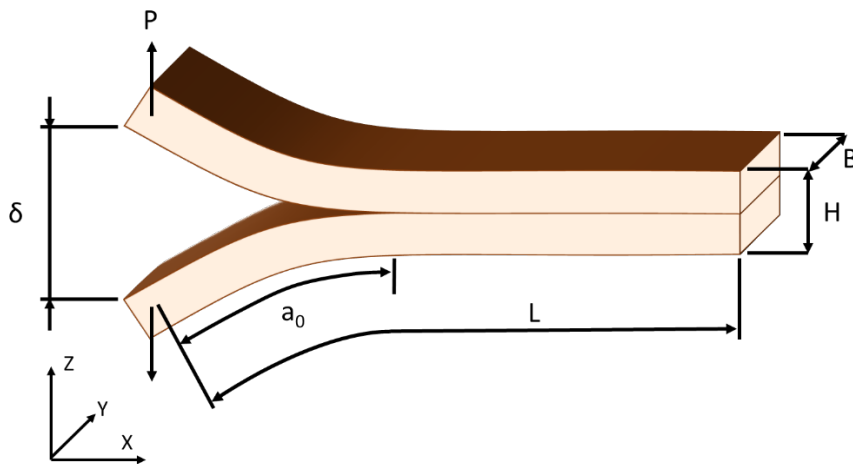


Fig. 2 : Schématisation de l'essai DCB

Un script python a été utilisé pour suivre la pointe de la fissure en utilisant la corrélation d'image (DIC) pour chaque éprouvette. Pour obtenir le taux de restitution d'énergie, il est nécessaire d'établir un lien entre la longueur de fissure, la courbe force ( $P$  sur la Fig. 2) – déplacement ( $\delta$  sur la Fig. 2) et l'équation d'Irwin-Kies (1954). Dans cette étude, une seule méthode sera utilisée pour établir cette relation : la méthode de complaisance modifiée (MCC) (ASTM

D5528 : ASTM 2010). Cette méthode a été comparée à la méthode issue de la théorie de la poutre corrigée (ISO 15024 : ISO 2001) ainsi que la méthode de calibration de complaisance (CC) (ASTM D5528 : ASTM 2010). Les écarts constatés sur la valeur moyenne de  $G_{Ic}$  calculée avec la méthode MCC sont en moyenne de l'ordre de 2% avec la méthode CC et 12% avec la théorie des poutres corrigée. Nous faisons le choix par la suite de ne présenter que la méthode MCC. Cette méthode est privilégiée car c'est celle qui nécessite les hypothèses les plus faibles sur la relation entre la complaisance et la longueur de la fissure.

## Résultats

Les courbes P- $\delta$  obtenues lors des essais, sont illustrées par série sur les Figures 3 et 4. On observe déjà une variabilité plus importante pour la série  $0^\circ/0^\circ$  (Fig. 3) comparé à la série  $0^\circ/90^\circ$  (Fig. 4). En moyennant les valeurs pour l'ensemble des éprouvettes, on observe que la valeur de  $G_{Ic}$  pour la série  $0^\circ/0^\circ$  donne une valeur plus élevée que pour la série  $0^\circ/90^\circ$ . Cela peut s'expliquer par le fait que du pontage de fibre se produit dans la série  $0^\circ/0^\circ$  (zone A sur la Fig. 5). Le pontage de fibre est plus important dans le bois que dans les composites classiques car l'angle de plongée des fibres est bien supérieur à celui rencontré dans ces derniers (Pramreiter et al., 2020). Les valeurs moyennes du taux de restitution d'énergie obtenues sont les suivantes :  $G_{Ic-0^\circ/0^\circ} = 422 \text{ J/m}^2 \pm 30\%$  et  $G_{Ic-0^\circ/90^\circ} = 247 \text{ J/m}^2 \pm 21\%$ .

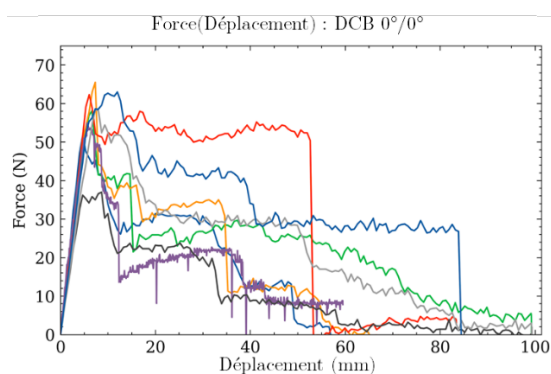


Fig. 3 : Courbes P- $\delta$  pour la série  $0^\circ/0^\circ$

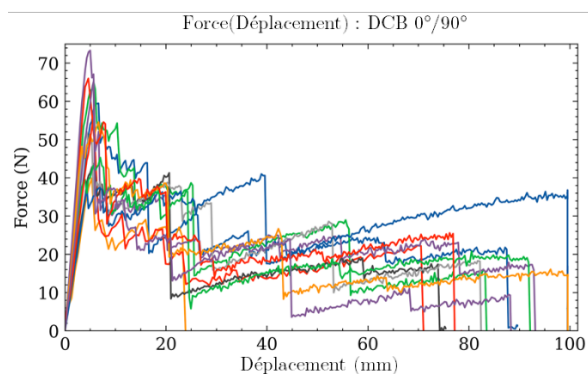


Fig. 4 : Courbes P- $\delta$  pour la série  $0^\circ/90^\circ$

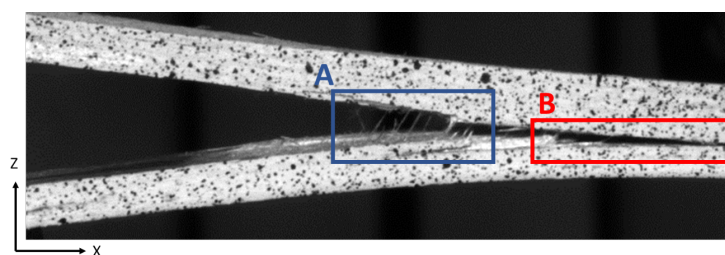


Fig. 5 : Éprouvette post mortem n°4 de la série  $0^\circ/0^\circ$  présentant du pontage de fibres (A) et une fissure migrant hors de l'interface initiale (B)

Dans un second temps, les faciès de rupture des éprouvettes de la série  $0^\circ/90^\circ$  ont été analysés pour mettre en évidence le chemin de la fissure et l'apparition de différents phénomènes physiques. Pour la série  $0^\circ/0^\circ$  la fissure se propage soit à l'interface, soit elle migre hors du plan initial (zone B sur la Fig. 5). Notons que la fissure ne semble jamais propager dans la colle. La rupture est soit adhésive entre le bois et la colle, soit cohésive dans le bois, mais il ne semble pas y avoir de rupture cohésive dans la colle lorsque l'on étudie les faciès de rupture au microscope. Ce phénomène a déjà été observé dans les assemblages bois où le joint de colle est

connu pour être plus résistant que le bois (Forest Products Laboratory USDA Forest Service, 2010). Afin de calculer des valeurs de  $G_{Ic}$  en distinguant les différents phénomènes de propagation sur chaque éprouvette, différents scénarios ont été identifiés pour classer la propagation de fissure pour les éprouvettes  $0^\circ/90^\circ$  :

- Fissure à l'interface  $0^\circ/90^\circ$  (zone 4 sur la Fig. 6)
- Propagation dans le pli de  $90^\circ$  (zone 5 sur la Fig. 6)
- Migration de la fissure hors du plan ou événements particuliers (zone B sur la Fig. 5, zone 3 sur la Fig. 6)

Cette distinction par zone est illustrée sur la Fig. 6.

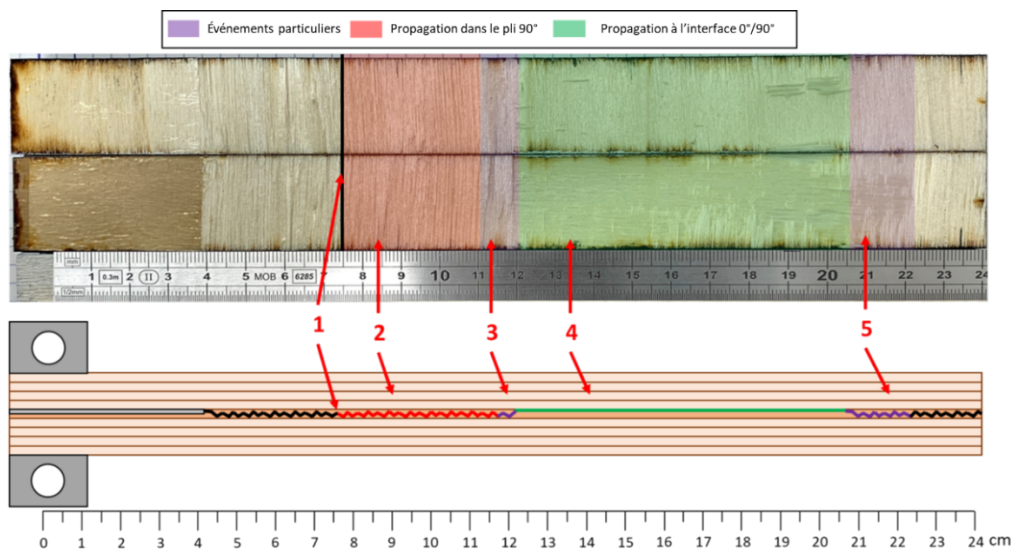


Fig. 6 : Interfaces supérieures et inférieures post mortem de l'éprouvette  $0^\circ/90^\circ$  n°4 avec identification des zones de propagation (en haut) et illustration du chemin de la fissure et des zones de propagation à travers la même éprouvette (en bas).

La valeur du taux de restitution d'énergie critique dans le pli de  $90^\circ$  obtenue est la suivante :  $G_{Ic-90^\circ\text{-pli}} = 247 \text{ J/m}^2 \pm 24\%$ . La valeur du taux de restitution d'énergie critique à l'interface  $0^\circ/90^\circ$  obtenue est la suivante :  $G_{Ic-0^\circ/90^\circ\text{-interface}} = 62 \text{ J/m}^2 \pm 28\%$ .

## Conclusion

Dans la littérature les valeurs de  $G_{Ic}$  sur une interface  $0^\circ/0^\circ$  de LVL ou de lamellé-collé se trouvent en moyenne entre 20 et  $1200 \text{ J/m}^2$ . On peut noter que les écarts importants constatés entre les auteurs s'expliquent principalement par le type de bois et le type de colle utilisés. En effet, la ténacité d'un assemblage collé est fortement corrélée à la nature du couple bois-colle, la rugosité du bois, l'épaisseur du joint de colle ou le module d'Young du matériau caractérisé. De plus, une forte dispersion est attendue sur des essais DCB (Pluvinage, 1992). On ne trouve cependant pas dans la littérature de valeur de  $G_{Ic}$  pour une interface  $0^\circ/90^\circ$  dans le cas du contreplaqué. Or, compte tenu des résultats obtenus lors de cette étude, on constate que la valeur de  $G_{Ic}$  pour une interface  $0^\circ/90^\circ$  ( $G_{Ic-0^\circ/90^\circ\text{-interface}} = 62 \text{ J/m}^2 \pm 28\%$ ) est plus faible que pour une interface  $0^\circ/0^\circ$  ( $G_{Ic-0^\circ/0^\circ} = 422 \text{ J/m}^2 \pm 30\%$ ) de par le fait que le pontage de fibre est moins présent que pour une interface  $0^\circ/0^\circ$ .

Pour les éprouvettes avec une interface 0°/90°, la méthodologie mise en place dans cette étude permet d'extraire 2 taux de restitutions d'énergie, cette distinction offre la possibilité de simuler le délaminage intra pli et inter pli avec deux valeurs de ténacité distinctes (Peignon et al., 2023).

### Remerciements

La recherche qui a conduit aux résultats présentés ci-dessus a reçu des fonds de l'Agence Nationale de la Recherche française dans le cadre du projet BOOST (ANR-21-CE43-0008-01). Les auteurs remercient le Laboratoire LaBoMaP, Cluny, France pour la mise à disposition des placages de peuplier utilisés dans cette étude.

### Références

- Baba MN, Dogaru F, Curtu I, Dinu G, Bayer M, (2010) Experimental Determination of Interlaminar Fracture Toughness of Wood Laminated Composite Specimens under DCB Test. *Materiale Plastice*, 5.
- El Moustaphaoui A, Chouaf A, Kimakh K (2021) Experimental and numerical study of the delamination of Ceiba plywood under mode I, mode II and mixed-mode (I + II) loading using the DCB, ELS and MMF tests. *International Journal of Fracture*, 213(1):1-20.
- Forest Products Laboratory USDA Forest Service (2010) Wood handbook: Wood as an engineering material (FPL-GTR-190; Numéro FPL-GTR-190, p. 509). Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-190>
- Gay D (2014) *Composite Materials : Design and Applications* (3rd edition). CRC Press.
- Guélou R, Eyma F, Cantarel A, Rivallant S, Castanié B (2021) Crashworthiness of poplar wood veneer tubes. *International Journal of Impact Engineering*, 147, 103738
- Irwin GR, Kies JA (1954) Critical energy rate analysis of fracture strength. *Weld Journal*, 33 *Welding Research Supplement*, 193-198.
- Leicester RH, Bunker RC (1969) Fracture at butt joints in laminated pine. *Forest Prod. J.* 19(2):59-60.
- Pluvillage G (1992) *La rupture du bois et de ses composites*. Cépaduès-Éditions.
- Pramreiter M, Bodner SC, Keckes J, Stadlmann A, Kumpenza C, Müller U (2020) Influence of Fiber Deviation on Strength of Thin Birch (*Betula pendula* Roth.) Veneers. *Materials*, 13(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ma13071484>
- Peignon A, Serra J, Gélard L, Cantarel A, Eyma F, Castanié B (2023) Mode I delamination R-Curve in poplar laminated veneer lumber. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103982. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.103982>
- Serra J, Bouvet C, Castanié B, Petiot C (2016) Scaling effect in notched composites : The Discrete Ply Model approach. *Composite Structures*, 148, 127-143. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.062>
- Susainathan JP (2017) *Development and characterization of Wood Based Eco-structure*, thèse de l'Université de Toulouse.
- Xiao Z, Li C, Shu B, Tang S, Yang X, Liu Y (2023) Experimental Study of Mode-I and Mode-II Interlaminar Fracture Characteristics of Poplar LVL. *Journal of Renewable Materials*, 11(1):245-255. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.020751>