

Évaluation de la résistance aux trous du LVL de peuplier

PEIGNON Axel, SERRA Joël, CANTAREL Arthur, EYMA Florent, CASTANIE Bruno

Institut Clément (ICA), Université de Toulouse, CNRS UMR 5312, INSA, ISAE-Supaéro,
IMT Mines Albi, UPS, Toulouse, France

peignon@insa-toulouse.fr

Mots clefs : Bois ; Placages ; Éprouvettes trouées ; Essais de traction ; Point Stress

Introduction

Si l'on souhaite réaliser des structures durables en bois pour des véhicules (Castanié et al 2024), il peut être nécessaire de les réaliser en plusieurs parties et donc de les assembler en les découpant ou en les perçant, ce qui induit des concentrations de contraintes et diminue leur résistance à la rupture. Cependant, peu d'études s'intéressent précisément au comportement du lamibois (LVL) troué. Bien que plusieurs études traitent de poutres de LVL trouées, ou de structures en LVL trouées, aucune ne s'intéresse à l'effet du trou à l'échelle du coupon de LVL. Concernant le LVL et à notre connaissance, seuls Reiner et al (2023) ont réalisé des essais de traction sur des éprouvettes trouées et ils concluent que des similitudes peuvent être observées entre les endommagements de leurs éprouvettes en LVL et ceux observables sur des composites en fibre de carbone. Contrairement au LVL, ce type d'essais est déjà réalisé sur des composites issus de matériaux synthétiques afin de caractériser des assemblages (Achard et al 2014, Yan et al 1999). Ces essais permettront d'avoir une comparaison directe avec des essais de traction sur des éprouvettes lisses (sans trou) et de comprendre l'influence d'un trou sur le mode de ruine d'un matériau. Ils permettent en outre de déterminer des contraintes admissibles pour le dimensionnement de structures trouées. Généralement, les essais sur éprouvettes trouées servent également de référence pour la modélisation d'autres types de dommages tels que l'impact, la tenue après impact ou la propagation de fissures dans l'étude des matériaux composites (Hallett et al 2009). Par conséquent, l'étude d'éprouvettes trouées est dans le milieu des composites industriels, un cas d'étude largement utilisé qui permet par la suite d'évaluer les modèles de simulation des dommages dans les stratifiés composites.

De plus, la méthodologie du « Point Stress », très largement utilisée en aéronautique pour le dimensionnement de trous dans les matériaux composites en carbone (CFRP) ou en verre (GFRP) sera utilisée et son application au LVL sera évaluée. Cette étude vise donc à caractériser le LVL troué en se basant sur une approche déjà éprouvée sur les composites stratifiés classiques, afin d'étudier son applicabilité sur des stratifiés à base de bois.

Matériel et méthodes

Des placages de bois de peuplier Koster (*Populus x canadensis*), d'une épaisseur de 1 mm, ont été utilisés pour la fabrication des éprouvettes de traction. Les placages, fournis par le laboratoire LaBoMaP de Cluny, ont été produits à l'aide d'une dérouleuse. La densité moyenne des placages de peuplier était de 377 kg/m³ (écart-type : 20 kg/m³).

Deux stratifications ont été caractérisées :

- [90°/0°/90°/0°]_{1/2}s pour la configuration CP (Contreplaqué) ;
- [90°/45°/0°/-45°]_s pour la configuration QI (Quasi-Isotrope).

Deux configurations, pour chaque stratification, seront étudiées :

- Des éprouvettes lisses (sans trou) ;
- Des éprouvettes trouées en leur centre (Fig. 1b). Le diamètre du trou est de 4,2 mm. Le trou est réalisé par perçage. Ce choix est fait pour garder le rapport de 1/6 entre la largeur de l'éprouvette et le diamètre du trou comme recommandé dans la norme ASTM D5766.

En se basant sur la norme ASTM D3039, les éprouvettes de traction lisses ont une longueur de 250 mm et une largeur de 25 mm. La géométrie des éprouvettes trouées est identique à celle des éprouvettes lisses afin de comparer ces deux configurations. Pour chaque configuration et stratification, 18 éprouvettes de traction sont fabriquées. Sur chaque éprouvette, des talons en aluminium de 1 mm d'épaisseur et de 50 mm de long sont ajoutés à chaque extrémité de sorte à limiter les concentrations de contraintes, et donc la rupture, dans les mors de la machine d'essai (Fig. 1a).

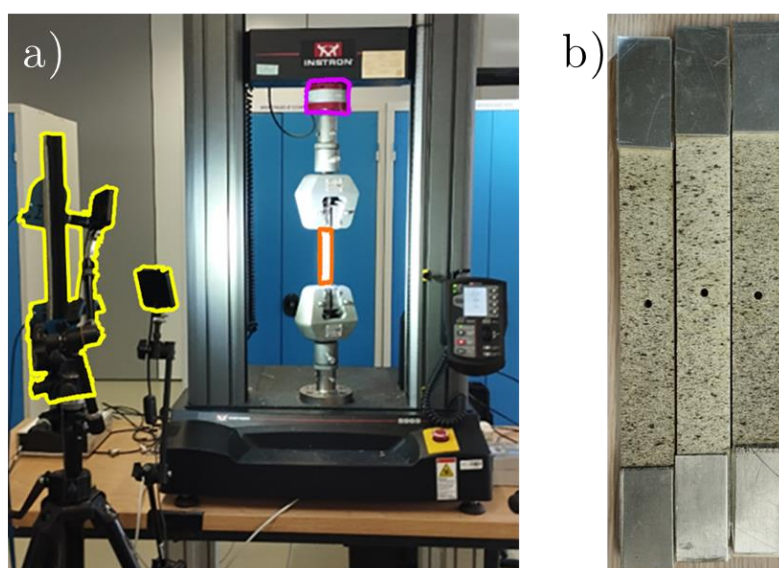


Fig. 1 : Montage expérimental : (a) DIC et éclairage (jaune), cellule d'effort (violet), et éprouvette (orange) ; (b) Eprouvettes de traction QI trouées

Les essais de traction ont été réalisés à température et humidité ambiantes (25,0 °C et 59,5 %HR). Les échantillons de bois ont été caractérisés à un taux d'humidité de 10,6 %. Une machine Instron 5900 a été utilisée pour ces essais. Une cellule de force de 10 kN a été installée, avec une précision de mesure de 0,5 N. La vitesse de déplacement des mors appliquée était de 2 mm/min.

La corrélation d'images numériques stéréo (DIC) a été utilisée pour suivre la déformation de l'échantillon. Deux caméras 8 MP (4096x2160 pixels) ont été utilisées pour acquérir des images des échantillons. Les mouchetis ont été appliqués directement sur les faces des échantillons, les côtés clairs du peuplier contrastant directement avec la peinture noir mat. Les taches ont été réalisées par pulvérisation de la peinture et la taille des motifs a été déterminée en fonction du dispositif expérimental afin d'obtenir une taille minimale de 3 pixels pour chaque tache (Reu, 2014) (Fig. 1b). Les données de corrélation d'images ont été analysées avec VIC Correlated System. Une calibration a été effectuée à l'aide d'une mire.

Point Stress

En plus de l'étude purement expérimentale, une analyse des concentrations de contrainte en bord de trou sera faite. En effet, lorsque l'on vient solliciter en traction une éprouvette trouée, on observe une concentration de contraintes en bord de trou (Fig. 2) (Lekhnitskii 1969).

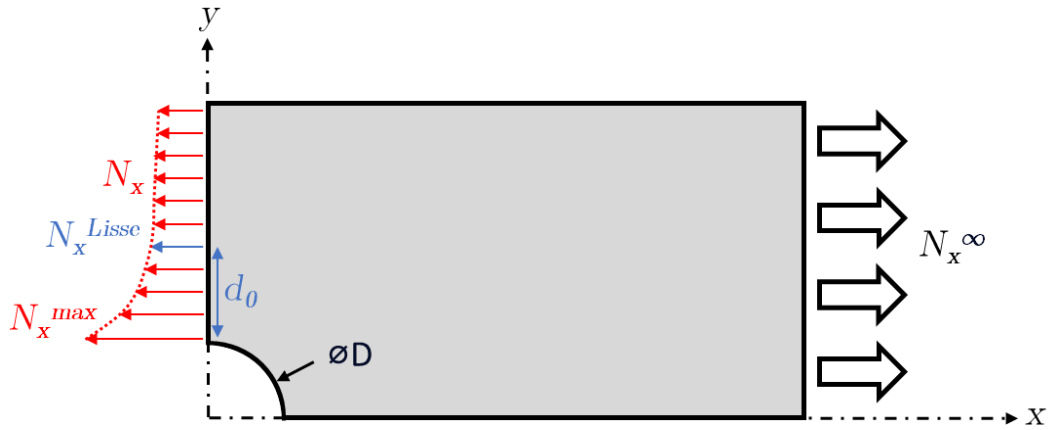


Fig. 2 : Illustration des concentrations de contraintes en bord de trou et des divers paramètres mécaniques

L'un des premiers modèles, largement utilisé dans l'industrie pour rendre compte de ce phénomène, est le critère du « Point Stress » développé par Whitney et Nuismer (1974). Ce critère suppose que la rupture se produit lorsque la contrainte en traction atteint la contrainte à la rupture d'une éprouvette non trouée à une distance caractéristique du trou (d_0).

Résultats

Les courbes contraintes-déformation obtenues lors des essais pour les deux configurations trouées sont illustrées sur les Fig. 3 et 4. Les faciès de ruptures des éprouvettes sont représentés sur les Fig. 5 et 6. On constate une rupture fragile pour les deux stratifications étudiées.

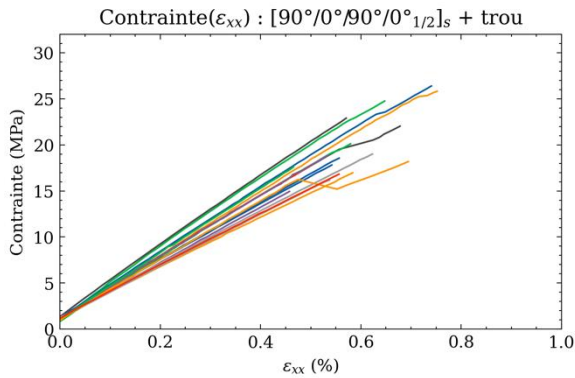


Fig. 3 : Courbes contrainte déformation pour la configuration CP

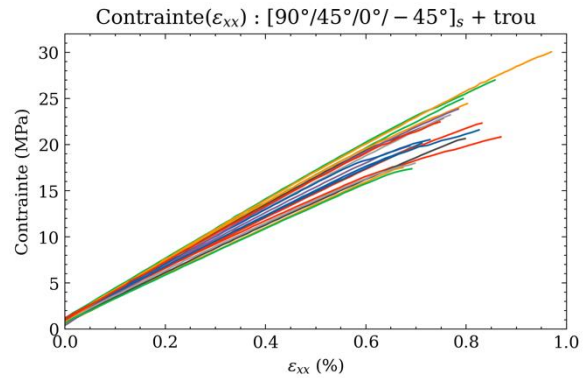


Fig. 4 : Courbes contrainte déformation pour la configuration QI



Fig. 5 : Éprouvettes post mortem d'éprouvettes CP



Fig. 6 : Éprouvettes post mortem d'éprouvettes QI

Afin de caractériser l'effet du trou, il est nécessaire de comparer les contraintes à ruptures des éprouvettes lisses et des éprouvettes trouées. Le Tableau 1 récapitule les valeurs moyennes pour les séries CP et QI.

Tab. 1 : Contraintes à la rupture des éprouvettes CP et QI lisses et trouées
(l'écart-type est indiqué entre parenthèses)

Série	Contrainte à la rupture – Lisse (MPa)	Contrainte à la rupture – Troué (MPa)	Rapport des contraintes Lisse/Troué (sans unité)
CP	30,3 (4,3)	19,9 (3,3)	1,52
QI	33,1 (4,9)	22,3 (3,2)	1,48

On constate que la réduction de la contrainte à la rupture liée à la présence d'un trou affecte de manière similaire les stratifiés QI que CP car le rapport des contraintes à la rupture entre les éprouvettes lisses et les éprouvettes trouées est quasi-identique (respectivement 1,48 et 1,52). Dans la littérature, les valeurs obtenues sur CFRP, pour une géométrie d'éprouvette équivalente, se trouvent entre 1,3 et 2,2 (Carlsson et al 1989, Russo et Zuccarello 2007).

Point stress

Dans ces travaux, la méthode du « Point Stress » sera utilisée en se basant sur un calcul des concentrations de contraintes théoriques pour obtenir une valeur de d_0 pour les deux stratifications étudiées. Il est ainsi possible de tracer, sur la Fig. 7, les concentrations de contraintes (N_x/N_x^∞) en fonction de la distance au trou dans la direction y ($y-R$) ; et d'obtenir une valeur de d_0 pour chaque stratification. Pour la stratification QI, on obtient une valeur de d_0 de 1,43mm. Tandis que, pour la stratification CP, on obtient une valeur de d_0 de 1,14mm. Notons que les valeurs obtenues se trouvent entre 1 et 2 mm, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux classiques obtenus sur des composites pétrosourcés (Bouvet 2018; Russo et Zuccarello 2007).

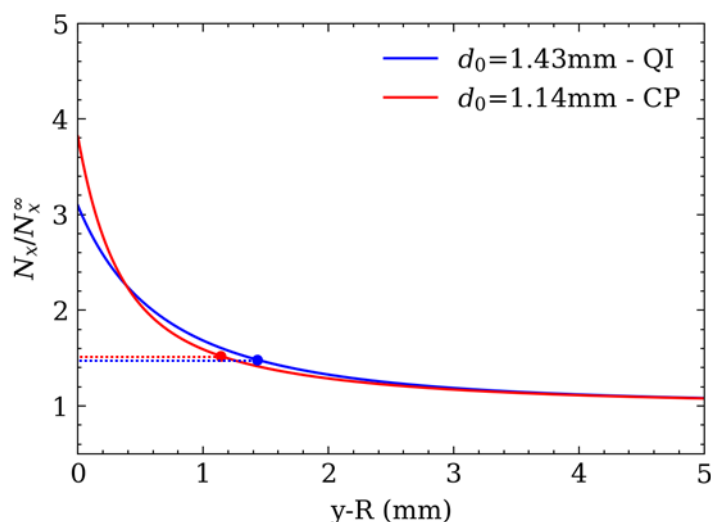


Fig. 7 : Comparaison des concentrations de contraintes en bord de trou pour les stratifications CP et QI trouées

Bien que l'on obtienne des valeurs différentes de d_0 pour nos deux séries, il avait été constaté que les rapports de contraintes à la rupture, entre les éprouvettes lisses et trouées, étaient proches entre les deux séries. Cela s'explique simplement par des concentrations de contraintes en bords de trou qui sont différentes entre les deux séries (Fig. 7). Les concentrations de

contraintes plus importantes en bord de trou pour la série CP s'expliquent par un ratio plus important de plis à 0° dans cette configuration.

Conclusion

Dans ces travaux, des essais de traction sur des stratifications quasi-isotropiques et contreplaqué sont présentés. Des éprouvettes lisses et trouées ont été caractérisées via des essais de traction unidirectionnels. Concernant la tenue au trou, il semblerait que les deux stratifications étudiées soient impactées de façon similaire, les rapports de contrainte à la rupture entre les éprouvettes lisses et les éprouvettes trouées sont comparables pour les deux stratifications. Dans ce cas, et pour une application structurelle, le choix de l'une ou de l'autre des stratifications ne sera pas fonction de sa tenue au trou. On pourrait donc privilégier la stratification QI qui a la propriété d'être quasi-isotrope, et donc rassurant si la direction de chargement est variable. De plus, la présence de plis à $\pm 45^\circ$ ajoute de la stabilité dans une stratifié de placage de bois et ce type de pli ajoute une plus-value pour limiter le flambage d'une structure. Toutefois, la stratification CP reste plus facile à fabriquer, et possède l'avantage de limiter les chutes de matières pour sa fabrication.

En plus de caractériser l'effet du trou dans cette étude, une méthode de « Point Stress » est mise en place pour estimer la rupture des stratifiés troués. Cette approche nous permet d'obtenir une valeur de d_0 pour chaque stratification. Il est important de noter que l'approche du « Point Stress » mise en place est identique à celle utilisée pour caractériser des matériaux composites issus de matériaux pétrosourcés. On peut constater que cette méthode semble donc applicable aux stratifiés en bois comme le LVL. Les résultats obtenus sont, de plus, dans le même ordre de grandeur que ceux obtenus sur des composites industriels, à savoir entre 1 et 2 mm (Bouvet 2018, Russo et Zuccarello 2007).

Cette étude permet de mieux comprendre le comportement mécanique des LVL utilisant des stratifications industrielles. Toutefois, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour valider ou affiner le comportement d'un LVL sous des sollicitations plus complexes. En effet, seulement deux stratifications, une seule essence et une seule configuration de trou ont été caractérisées dans cette étude. Caractériser l'effet de la géométrie des éprouvettes ou celle du trou sur les valeurs de d_0 obtenues tout en caractérisant proprement les déformations locales en bord de trou pourraient permettre de mieux comprendre l'effet d'un trou sur le comportement du LVL. De plus, il peut également être intéressant de caractériser l'effet des procédés d'usinage du trou et l'influence d'éventuelles fissurations sur les valeurs de d_0 obtenues.

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

Achard V, Bouvet C, Castanié B, Chirol C (2014) Discrete ply modelling of open hole tensile tests. *Composite Structures*, 113:369-381. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.03.031>

Bouvet C (2018) Dimensionnement des structures composites : applications à l'aéronautique. Editions Technip, Paris, 416 p. <https://www.librairielesquare.com/livre/9781784053482-dimensionnement-des-structures-composites-applications-a-l-aeronautique-christophe-bouvet/>

- Castanié B, Peignon A, Marc C, Eyma F, Cantarel A, Serra J, Curti R, Hadiji H, Denaud L, Girardon S, Marcon B (2024) Wood and plywood as eco-materials for sustainable mobility: A review. *Composite Structures*, 329, 117790. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117790>
- Carlsson L, Aronsson C, Bäcklund J (1989) Notch sensitivity of thermoset and thermoplastic laminates loaded in tension. *Journal of Materials Science*, 24(5), 1670-1682. <https://doi.org/10.1007/BF01105690>
- Hallett SR, Green BG, Jiang W-G, Cheung KH, Wisnom MR (2009) The open hole tensile test: A challenge for virtual testing of composites. *International Journal of Fracture*, 158(2):169-181. <https://doi.org/10.1007/s10704-009-9333-8>
- Reiner J, Pizarro SO, Hadi K, Narain D, Zhang P, Jennings M, Subhani M (2023) Damage resistance and open-hole strength of thin veneer laminates: Adopting design and testing principles from fibre-reinforced polymers. *Engineering Failure Analysis*, 143:106880. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106880>
- Reu P (2014) All about Speckles: Aliasing. *Experimental Techniques*, 38(5):1-3. <https://doi.org/10.1111/ext.12111>
- Russo A, Zuccarello B (2007) An accurate method to predict the stress concentration in composite laminates with a circular hole under tensile loading. *Mechanics of Composite Materials*, 43(4):359-376. <https://doi.org/10.1007/s11029-007-0033-z>
- Whitney JM, Nuismer RJ (1974) Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations. *Journal of Composite Materials*, 8(3):253-265. <https://doi.org/10.1177/002199837400800303>
- Yan Y, Wen W-D, Chang F-K, Shyprykevich P (1999) Experimental study on clamping effects on the tensile strength of composite plates with a bolt-filled hole. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(10):1215-1229. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(99\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00002-0)