



HAL
open science

Modélisation et caractérisation des structures hybrides bois/aluminium pour une utilisation future comme glissières de sécurité de ponts routiers

Gotre Bi Djeli Bienvenu Boli, Daniel Coutellier, Marc Oudjene, Hakim Naceur

► To cite this version:

Gotre Bi Djeli Bienvenu Boli, Daniel Coutellier, Marc Oudjene, Hakim Naceur. Modélisation et caractérisation des structures hybrides bois/aluminium pour une utilisation future comme glissières de sécurité de ponts routiers. S-MART 2023: 18ème Colloque national S.mart, Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence, Université de Toulon [UTLN], Apr 2023, Carry-le-Rouet, France. hal-04398178

HAL Id: hal-04398178

<https://hal.science/hal-04398178>

Submitted on 16 Jan 2024

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.

Modélisation et caractérisation des structures hybrides bois/aluminium pour une utilisation future comme glissières de sécurité de ponts routiers

Gotre Bi Djeli Bienvenu. Boli ^{a,b} *, Daniel. Coutellier ^a, Marc. Oudjene ^b, Hakim. Naceur ^a

^a LAMIH, UMR CNRS 8201, INSA Hauts-de-France, Université Polytechnique Hauts-de-France, 59313 Valenciennes Cedex 9, France

^b Département de génie civil et génie des eaux, Université Laval, 1065 avenue de la Médecine, Québec, Canada

* E-Mail : Gotre.Boli@uphf.fr

1. INTRODUCTION

Selon son rapport annuel publié en 2020, le Ministère des Transports du Québec (MTQ), déclare assumer la gestion de 5495 ouvrages d'art parmi lesquels 4264 ponts dont l'âge moyen est d'environ 40,3 ans. Selon le bilan de l'état des chaussées du réseau routier supérieur québécois, environ 20% de ces ouvrages d'art présentent des défaillances causées notamment par l'écoulement des eaux et l'utilisation de sel de déglacage sur les dalles de béton des ponts. Le sel s'infiltre dans le béton et cause la corrosion des armatures en acier. Le MTQ est donc confronté à des coûts importants et croissants d'entretien de première urgence de son parc de ponts. Compte tenu de cette dégradation des ponts, généralement constitués d'un tablier en béton, et des coûts élevés d'entretien qui en découlent, une solution est recherchée afin de réduire les coûts et l'impact environnemental. L'utilisation de matériaux locaux, durables et recyclables tels que le bois et l'aluminium conduit à une alternative prometteuse dans la conception. Le bois et l'aluminium font partie, d'un programme de valorisation à l'échelle du Canada et du Québec visant en particulier à renforcer les filières québécoises de l'aluminium [1] et du bois d'ingénierie [2]. Le bois possède un fort potentiel de disponibilité et de valorisation dans les pays tels que le Canada et la France et constitue, de nos jours, une solution d'écoconception.

La publication par le gouvernement du Québec en 2013 de la charte du bois [2] et en 2015 de la Stratégie québécoise de développement de l'aluminium [1] a pour objectif de promouvoir l'utilisation du bois et de l'aluminium dans la construction et la réhabilitation d'ouvrages d'art. Dans ce contexte, Djedid et al. [3] et Beudon et al. [4] se sont intéressés à la possibilité d'utiliser du bois et de l'aluminium comme matériau de

construction pour un tablier de pont. Le bois et l'aluminium peuvent être utilisés de plusieurs manières, à savoir comme platelage de ponts pour la rénovation ou encore pour la construction d'un nouveau pont [5].

Cependant, dans un contexte de changement climatique et de préservation de l'environnement, une analyse économique et environnementale du cycle de vie de ces types de ponts utilisant le bois et l'aluminium est nécessaire. Dans ce contexte, une étude d'un pont routier à platelage en aluminium sur poutres en bois lamellé-collé menée par Beudon et al. [4] et d'un pont à platelage en aluminium sur des poutres en acier menée par Pedneault et al. [6] ont montré que les coûts, comparés à ceux d'un pont conventionnel équivalent en béton sur poutres en acier, sont plus avantageux.

Dans nos travaux, le bois et l'aluminium sont envisagés pour la conception de glissières de sécurité sur ponts routiers.

Le Manuel d'inventaire des structures [7] du MTQ propose l'utilisation de différents matériaux pour la construction des glissières de sécurité sur les ponts, à savoir : le béton régulier, le béton BHP, l'acier, l'aluminium, le bois. Pour des glissières de sécurité multi-matériaux, les choix possibles sont : Béton/acier, Bois/acier, Acier/aluminium. Des glissières de sécurité combinant le bois et l'aluminium sont actuellement peu utilisées.

Le développement d'un nouveau dispositif de retenue (glissières de sécurité) pour les ponts routiers exige des essais de choc à grandeur réelle qui peuvent être très dispendieux en termes de temps et de coûts. Dans ce contexte, la simulation numérique se présente comme

une alternative afin de permettre la réduction voire la suppression des essais expérimentaux.

Une nouvelle génération de glissières de sécurité hybride en bois confiné dans une enveloppe en aluminium est envisagée. Le bois est connu pour ses grandes capacités d'absorption de choc et l'aluminium comme élément protecteur contre les intempéries, en plus d'être léger, résistant à basse température et à la corrosion. L'aluminium réduit et retarde également les modes de rupture fragile du bois.

La présente étude s'intéresse à la modélisation par éléments finis de différentes structures hybrides bois/aluminium incluant du bois confiné. La possibilité d'utiliser la loi matériau MAT-143-WOOD du logiciel LS-DYNA pour la modélisation du bois et du bois confiné est explorée. Les résultats numériques sont corrélés aux résultats expérimentaux.

2. MODELISATION ELEMENTS FINIS D'ASSEMBLAGES HYBRIDES BOIS/ALUMINIUM

Différentes structures hybrides bois/aluminium disponibles dans la littérature ont été sélectionnées afin d'évaluer la modélisation du bois et du bois confiné avec la loi matériau MAT-143-WOOD pour différentes géométries et différents cas de chargement. Des essais de flexion trois points ont été réalisés sur des goujons en bois densifié et des goujons hybrides en bois confiné proposés par Rollo [8]. Des essais de traction en double cisaillement sur des structures hybrides constituées de bois lamellé-collé (BLC) et d'une platine en aluminium assemblés avec des goujons en acier galvanisé et des goujons hybrides en bois confiné ont été analysés par Tétreault [9].

2.1. Lois matériaux

2.1.1. Modèle matériau pour le bois : MAT-143-WOOD

À l'échelle macroscopique, le bois est considéré comme un matériau orthotrope avec différentes propriétés suivant la direction considérée : longitudinale (L ou 1), radiale (R ou 2) et tangentielle (T ou 3). Le modèle matériau MAT-143-WOOD [10] de LS-DYNA est basé sur l'hypothèse de comportement isotrope transverse. Ce modèle utilise un critère de plasticité de Hashin en considérant deux critères de rupture (fragiles) parallèle $f_{||}$ et perpendiculaire f_{\perp} aux fils suivants les équations (1) et (2) respectivement :

$$f_{||} = \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} + \frac{(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2)}{S_{||}^2} - 1 \quad (1)$$

$$f_{\perp} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{\perp}^2} - 1 \quad (2)$$

avec σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} les composantes de contraintes, X et Y les contraintes limites à la rupture en traction et compression dans les directions longitudinale et transverse. $S_{||}$ et S_{\perp} représentent les contraintes limites à la rupture en cisaillement suivant les directions longitudinale et transverse. La rupture a lieu dans la direction parallèle lorsque $f_{||} > 0$ et dans la direction perpendiculaire lorsque $f_{\perp} > 0$.

L'évolution de l'endommagement suit différentes lois pour les modes parallèle et perpendiculaire et est gouvernée respectivement par les équations (3) et (4) :

$$d(\tau_{||}) = \frac{d_{max||}}{B} \left[\frac{1+B}{1+Be^{-A(\tau_{||}-\tau_{0||})}} - 1 \right] \quad (3)$$

$$d(\tau_{\perp}) = \frac{d_{max\perp}}{D} \left[\frac{1+D}{1+De^{-C(\tau_{\perp}-\tau_{0\perp})}} - 1 \right] \quad (4)$$

B et D sont des paramètres d'adoucissement qui déterminent l'allure de la courbe après la rupture et sont obtenus par calibration à l'aide d'essais expérimentaux. A et C sont calculés par la loi matériau à l'aide des valeurs d'énergie de rupture G_f selon les équations (5) et (6) :

$$A = \tau_{0||} L \left(\frac{1+B}{BG_{f||}} \right) \log(1+B) \quad (5)$$

$$C = \tau_{0\perp} L \left(\frac{1+D}{BG_{f\perp}} \right) \log(1+D) \quad (6)$$

Les paramètres de la loi de comportement utilisé dans cette étude, sont résumés dans le Tableau 1. Ils ont été déterminés expérimentalement pour certains et par identification inverse pour d'autres.

2.1.2. Modèle matériau pour l'aluminium : MAT-024-Linear Piecewise Plasticity

Le comportement de l'aluminium est modélisé en utilisant le modèle matériau MAT-024 de LS-DYNA qui décrit le comportement d'un matériau élasto-plastique avec prise en compte de la vitesse de déformation en utilisant le modèle de Cowper et Symonds. L'évolution de la déformation en fonction de la contrainte est décrite en utilisant l'équation (7) donnée par Ramberg-Osgood :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (7)$$

avec E le module d'élasticité de l'aluminium et K et n les paramètres d'écrouissage.

Tableau 1 : Paramètres matériau pour le bois densifié et le bois lamellé-collé (paramètre LS-DYNA entre parenthèses)

Paramètre [unité]	Bois densifié (épicéa densifié)	Bois lamellé-collé (BLC)
$\rho = \rho_{wood}$ [kg/m ³]	1174	560
E_L (EL) [MPa]	30000	1200
E_T (ET) [MPa]	2000	480
G_{LT} (GLT) [MPa]	1750	720
G_{TR} (GTR) [MPa]	1000	130
ν_{LT} (PR) [-]	0,41	0,26
$f_{t,L}$ (XT) [MPa]	125	60
$f_{c,L}$ (XC) [MPa]	120	50
$f_{t,T}$ (YT) [MPa]	12,5	3,5
$f_{c,T}$ (YC) [MPa]	104	13,5
$f_{v,L}$ (SXY) [MPa]	85	6,5
$f_{v,T}$ (SYZ) [MPa]	120	6,5
$G_{f,L,I}$ (GF1) [MPa.mm]	40,5	25
$G_{f,L,II}$ (GF2) [MPa.mm]	291,5	90
$G_{f,T,I}$ (GF1P) [MPa.mm]	1,35	0,24
$G_{f,T,II}$ (GF2P) [MPa.mm]	2,75	0,7
B (BFIT)	300	30
D (DFIT)	300	30
d_L (DMAX)	0,9999	0,9999
d_T (DMAXP)	0,9900	0,9900

Les paramètres matériaux utilisés pour l'aluminium sont les suivants :

- Densité : 2700 kg/m³
- Module d'Young : 70000 MPa
- Coefficient de Poisson : 0,33
- Limite d'élasticité : 210 MPa
- Ecrouissage de l'aluminium 6061-T6 : $n = 45$ pour une déformation à l'ultime de 8% prescrite par l'Eurocode 9.

2.1.3. Modèle matériau pour l'acier : MAT-003-Plastic Kinematic

Pour l'acier un modèle de comportement élastoplastique avec écrouissage cinématique a été adopté (MAT-003 de LS-DYNA), prenant en compte l'effet de vitesse de déformation par la loi de Cowper et Symonds. Les paramètres utilisés pour l'acier sont :

- Densité : 7877 kg/m³
- Module d'Young : 210000 MPa
- Coefficient de Poisson : 0,33
- Limite d'élasticité : 450 MPa

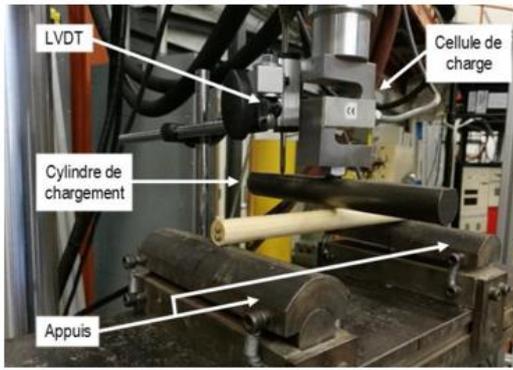
2.2. Essai de flexion trois points sur goujon hybride en bois confiné

Le modèle EF du test de flexion trois points est réalisé d'abord pour un goujon en bois densifié puis pour un goujon hybride en bois confiné. La Figure 1.b représente le modèle EF utilisé et la Figure 1.a représente l'expérimentation réalisée par Rollo et al. [8]. Le modèle EF du goujon en bois densifié est réalisé avec des éléments solides hexaédriques à 8 nœuds. Les éléments à contrainte constante (EFLORM 1) avec un seul point d'intégration sont utilisés pour le maillage du bois densifié. La vitesse de la traverse utilisée lors des essais est de **5 mm/min** ce qui s'apparente à un test de type quasi-statique.

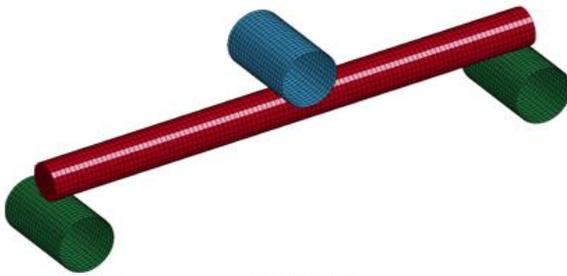
Le cylindre de chargement et les appuis ont été maillés avec des éléments de coque de type ELFORM16 et sont considérés comme des matériaux rigides dans le modèle.

Le goujon hybride en bois confiné (Figure 2) est réalisé par l'ajout d'une enveloppe d'aluminium au goujon en bois densifié. Le tube d'aluminium est maillé à l'aide d'éléments solides hexaédriques à 8 nœuds de type ELFORM1.

Les conditions aux limites utilisées dans le modèle EF pour le goujon hybride sont les mêmes que celles utilisées pour le goujon en bois densifié.



(a) Test expérimental



(b) Modèle EF

Figure 1 : Test de flexion trois points pour le goujon en bois densifié

2.3. Essai de traction en cisaillement double sur des assemblages hybrides bois/aluminium

Deux séries d'essais (Figure 3) de traction sous charge monotone sont réalisées sur des assemblages hybrides. La première série d'essais concerne les assemblages hybrides bois/aluminium avec des goujons en acier

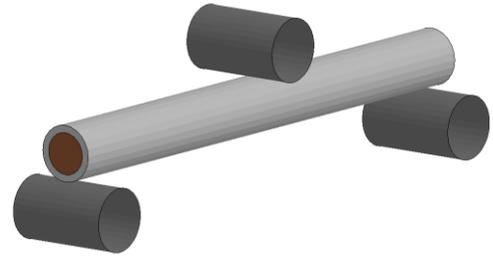
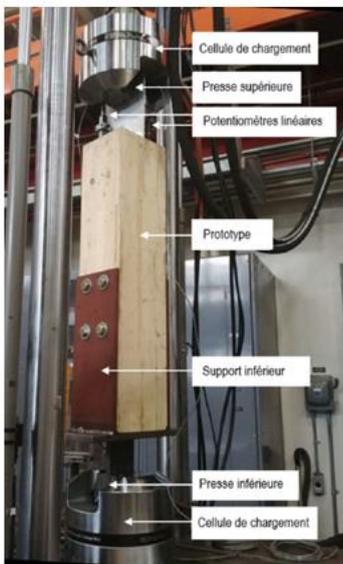


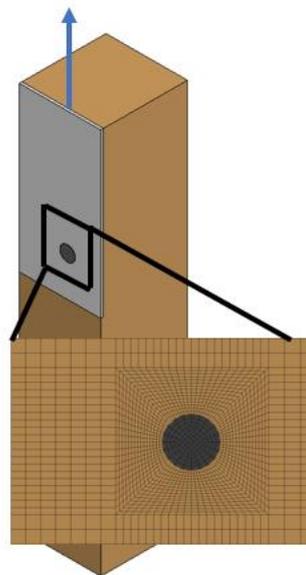
Figure 2 : Modèle EF du test de flexion trois points du goujon hybride en bois confiné

galvanisé et la deuxième série d'essais concerne des assemblages hybrides bois/aluminium avec des goujons hybrides bois/aluminium en bois confiné. Les assemblages sont réalisés avec des membrures en bois lamellé-collé (BLC) et une platine d'aluminium est insérée entre les deux membrures en BLC et retenue par les goujons.

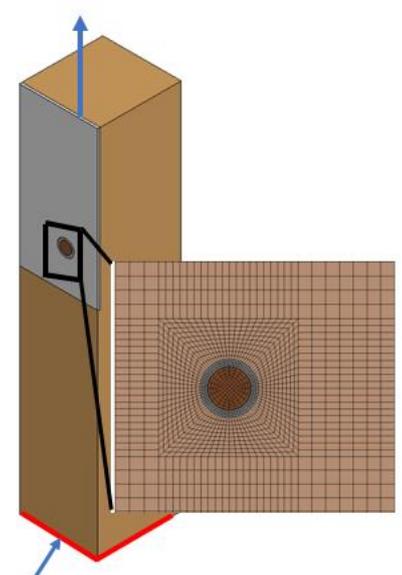
Le modèle EF pour ces deux types d'assemblages est réalisé sous LS-DYNA avec des éléments solides hexaédrique à 8 nœuds de type 1 (ELFORM 1) pour le bois, l'aluminium et l'acier. La présence de deux plans de symétrie permet l'étude d'un quart de l'assemblage en introduisant des conditions de symétrie. Un contact surfacique (*AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE*) est défini entre le bois et l'aluminium avec un coefficient de frottement de 0,3. Lors des tests expérimentaux, une vitesse $V = 2 \text{ mm/min}$ est imposée à la platine d'aluminium.



(a) Test expérimental



(b) Modèle EF avec goujon en acier galvanisé



(c) Modèle EF avec goujon hybride bois/aluminium

$$U_x = U_y = U_z = 0$$

Figure 3 : Essai de traction en cisaillement double sur des assemblages hybrides en bois aluminium

3. RESULTATS

3.1. Essai de flexion trois points sur goujon hybride en bois confiné

Les résultats des essais de flexion trois points réalisés sur le goujon hybride bois/aluminium sont analysés à partir de la réponse globale des courbes force-déplacement et de la déformée de la structure. La Figure 4 présente une comparaison entre les courbes expérimentales (en couleur traits pleins) et la prédiction du modèle EF (en noir traits pointillés). L'analyse des courbes expérimentales permet de constater une première chute de force qui correspond à la rupture du bois confiné dans l'enveloppe d'aluminium. La charge est ensuite reprise par l'enveloppe d'aluminium jusqu'à la rupture finale de la structure hybride avec la rupture du tube en aluminium. Ces résultats mettent en évidence l'apport du tube d'aluminium contenant la rupture fragile du bois. Une dispersion est aussi observée au niveau des résultats expérimentaux, elle met en évidence le caractère naturel et complexe du bois. Cependant avec les paramètres matériaux identifiés, le modèle a permis de reproduire la moyenne des courbes expérimentales.

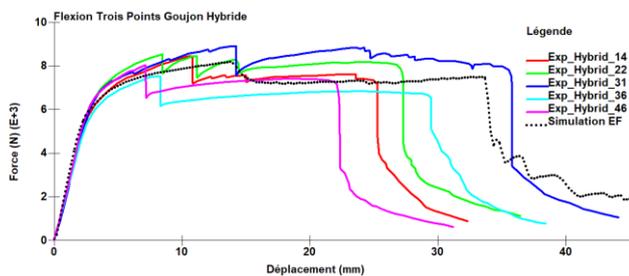


Figure 4 : Courbes Force-Déplacement des essais de flexion trois points sur le goujon hybride

3.2. Essai de traction en cisaillement double sur des assemblages hybrides bois/aluminium

Lors des essais expérimentaux des assemblages bois/aluminium avec le goujon en acier galvanisé, il est possible d'observer, au niveau des éléments en bois, des fissures après rupture de l'assemblage. Il s'agit de fissures verticales dans le sens des fibres (Figure 5.a), à l'emplacement du goujon, qui correspondent à des fissures de fendage et qui sont créées par des contraintes perpendiculaires au sens des fibres causées par le déplacement des goujons. La Figure 5 montre une comparaison entre les mesures expérimentales et la prédiction du modèle numérique. On remarque une cohérence entre les résultats numériques et les observations expérimentales tant au niveau des modes de rupture observés (Figures 5a et 5b) que de la capacité de charge maximale de l'assemblage (Figure 6).

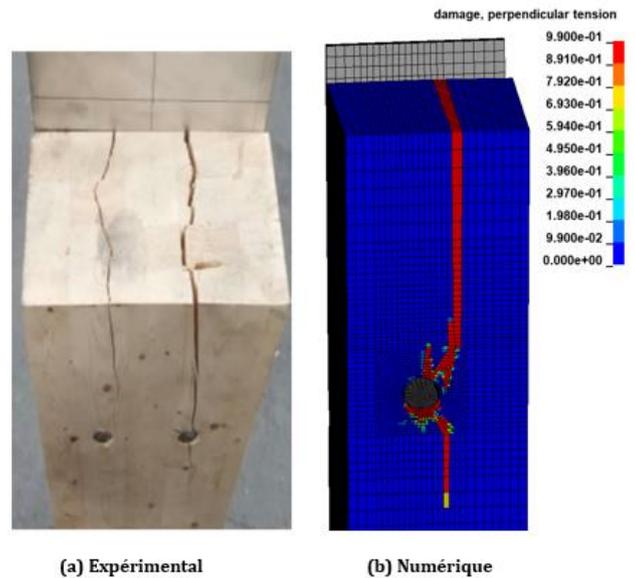


Figure 5 : Rupture par traction transverse de l'assemblage bois/aluminium avec des goujons en acier galvanisé

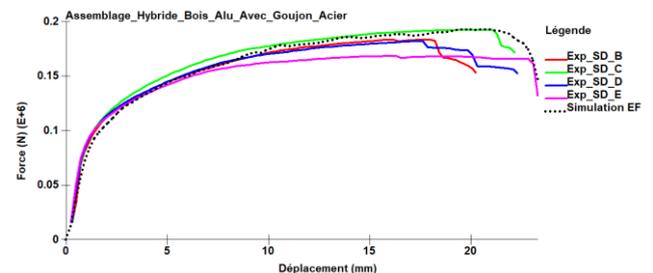


Figure 6 : Courbes Force-Déplacement des essais de traction en cisaillement double sur les assemblages bois/aluminium avec goujons en acier galvanisé

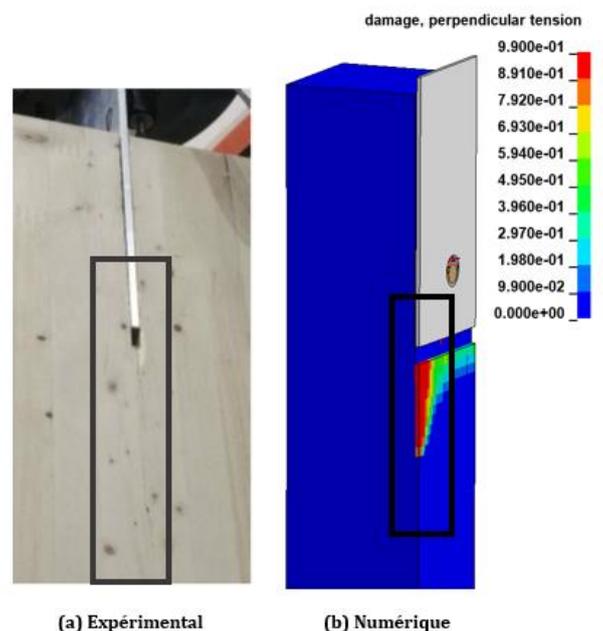


Figure 7 : Rupture par traction transverse de l'assemblage bois/aluminium avec des goujons hybride bois/aluminium

Pour les essais réalisés sur des assemblages hybrides bois/aluminium avec le goujon hybride, il est possible d'observer au niveau des éléments en bois, une fissuration à l'emplacement de la platine en aluminium (Figure 7a). Cette fissuration est causée par la déformation du goujon hybride qui vient se loger dans la rainure du bois lamellé-collé (à la place de la platine en aluminium). Le modèle EF pour ce type d'assemblage est aussi en accord avec les observations expérimentales tant au niveau des modes de rupture observés (Figures 7a et 7b) que de la capacité de charge maximale de l'assemblage (Figure 8). La chute de force observée sur les courbes expérimentales et numérique (Figure 8) est due à la rupture du goujon hybride. Il convient aussi de noter que la traction transverse observée dans le sens du fil avec le goujon en acier galvanisé s'initie aussi dans les membrures de bois avec le goujon hybride. Cependant elle n'arrive pas à se propager du fait de la rupture prématurée du goujon hybride. Ainsi une optimisation du goujon hybride est nécessaire afin d'atteindre les performances du goujon en acier galvanisé.

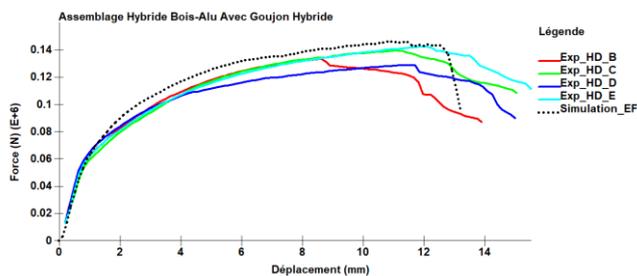


Figure 8 : Courbes Force-Déplacement des essais de traction en cisaillement double sur les assemblages bois/aluminium avec goujons hybride bois/aluminium

4. CONCLUSION

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la modélisation par EF de différentes structures hybrides bois/aluminium incluant du bois confiné avec le logiciel LS-DYNA. La possibilité de modéliser le comportement du bois et du bois confiné en statique à l'aide de la loi matériau MAT-143-WOOD a été explorée. Cette loi peut décrire fidèlement le comportement du bois confiné pour des sollicitations quasi-statiques, et l'initiation et la propagation de la rupture dans le bois. Bien que les résultats numériques soient en bon accord avec les essais expérimentaux, plusieurs travaux sont encore nécessaires afin de pouvoir appliquer un tel modèle dans la phase de développement des glissières de sécurité dont le domaine d'application est la dynamique rapide. Une campagne expérimentale en dynamique est en préparation afin d'évaluer le comportement du bois confiné et sa dépendance à la vitesse de déformation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants envers le **conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG)** et la **Région Hauts-de-France** pour leur soutien financier.

REFERENCES

- [1] Gouvernement du Québec, Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation. *Stratégie québécoise de développement de l'aluminium 2015-2025*. MESI, Montréal, QC, Canada 2015.
- [2] MRN. *Charte du bois*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Montréal, QC, Canada, 2013.
- [3] Djedid A., Guillot M., Desjardins V., Annan C. D., Fafard M. *Design and fabrication of bridge decks made from extruded aluminium*. Journal of Light Metal Welding, 58(Supplement):138s-144s, 2020.
- [4] Beudon C., Oudjene M., Djedid A., Annan C. D., Fafard M. *Life Cycle Assessment of an Innovative Hybrid Highway Bridge Made of an Aluminum Deck and Glulam Timber Beams*. Buildings, 12(10), 1616, 2022.
- [5] Desjardins V. *Construction et observation du pont à platelage en aluminium de Saint-Ambroise*, 2019.
- [6] Pedneault J., Desjardins V., Margni M., Conciatori D., Fafard M., Sorelli L. *Economic and environmental life cycle assessment of a short-span aluminium composite bridge deck in Canada*. Journal of Cleaner Production, 310, 127405, 2021.
- [7] Ministère des Transports de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transports. *Manuel d'inventaire des structures*. Québec, QC, Canada, 2017.
- [8] Rollo G. *Étude expérimentale et numérique d'un nouveau goujon hybride bois-aluminium pour les assemblages bois*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 2021.
- [9] Tétreault M. G. *Étude et modélisation de nouveaux assemblages hybrides en bois aluminium*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 2022
- [10] Murray Y. D. *Manual for LS-DYNA wood material model 143*. No. FHWA-HRT-04-097. United States. Federal Highway Administration, 2007.