

Comportement en flexion et en torsion de poutres mixtes acier-bois constitués de profilés minces

Bruno JURKIEWIEZ ¹, Tarek JAAFAR ², Maxime AUDEBERT ², Chaimaa JAAFARI ³, Sébastien DURIF ³, Abdelhamid BOUCHAIR³

¹ Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire des matériaux composites pour la Construction (LMC2), 82 boulevard Niels Bohr, 69100 Villeurbanne, France

² Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), Université de Lyon, UMR 5513, 58 rue Jean Parot, 42023 Saint-Etienne, Cedex 2, France

³ Université Clermont Auvergne, INP Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

RESUME Des travaux récents ont montré que la combinaison de profilés en acier avec des poutres en bois massif pour former des structures mixtes présente un intérêt tant sur le plan du comportement mécanique que sur celui de la protection au feu ou du développement durable. Dans cette étude, les profiles en acier standards sont remplacés par des profilés minces obtenus à partir de tôles pliées à froid. Ce choix permet d'optimiser la conception de ces structures hybrides. Le comportement des constituants seuls est d'abord étudié expérimentalement en flexion et en torsion. Les poutres hybrides sont ensuite assemblées avec des connecteurs mécaniques et elles sont testées à leur tour selon ces 2 types de sollicitations. Les résultats d'essais permettent de quantifier le rôle de chaque constituant, en termes de rigidité ou de résistance. Ils montrent que la présence du bois permet de retarder considérablement le déversement et les instabilités locales qui se produisent dans les profilés en acier seuls.

Mots-clefs structure hybride acier-bois, profilé mince, flexion, torsion, essais

I. INTRODUCTION

L'impact de la construction sur l'environnement est très important. En effet, d'après le ministère de la transition écologique et solidaire, le secteur du bâtiment a généré 227.5 millions de tonnes de polluants en 2014, soit 74% du total des déchets produits en France. De plus, 45% de la consommation énergétique et 27% des émissions de CO₂ du pays peuvent être attribués au secteur du BTP.

Face aux préoccupations environnementales croissantes et aux enjeux majeurs liés au développement durable et aux économies d'énergie, le matériau bois est appelé à être de plus en plus utilisé dans le domaine de la construction. C'est en effet un matériau naturel, biodégradable, renouvelable et il constitue un puits de carbone intéressant s'il est stocké à grande échelle dans le bâtiment. Il est également léger, présente de très bonnes propriétés mécaniques, il est durable dans

le temps (s'il est correctement mis en œuvre) et s'avère être une solution de protection au feu efficace grâce à sa faible conductivité thermique et sa teneur en eau naturelle.

De nombreux travaux antérieurs ont montré qu'associer le bois avec d'autres matériaux de construction peut s'avérer pertinent et efficace, que ce soit au plan mécanique, écologique ou économique. Par exemple, des poutres en bois (massif ou lamellé-collé) peuvent être associées à une dalle en béton armé pour former des éléments de planchers rigides, résistants et rapides à construire [1-3]. Les structures bois peuvent également être utilisées avec d'autres matériaux pour être renforcées / réparées au moyen d'éléments en acier ou en matériaux composites, sous la forme de barres ou de plaques, liées au moyen de connecteurs mécaniques ou par collage [4-9].

Le bois peut également être utilisé pour augmenter les performances de poutres en acier ou de poutres en matériaux composites [10-11]. Ces travaux ont montré que la présence du bois permet de retarder le déversement des poutres et ainsi accroître la capacité portante de ces éléments. Toutefois, les dimensions standardisées des poutres renforcées (acier ou composite) ne permettent pas une exploitation optimale des éléments bois, du fait principalement des épaisseurs trop importantes de semelles ou d'âme d'une part et d'autre part, du fait des différences de modules d'élasticité entre l'acier / le composite et le bois. Des travaux menés en Autriche [12-13] ont montré que l'emploi de poutres en acier constituées de tôles minces pliées est un choix pertinent car il permet d'ajuster à volonté les dimensions du profilé métallique de manière à équilibrer sa contribution mécanique dans le comportement d'une poutre mixte. De plus, ce choix s'avère être économiquement intéressant car il permet d'économiser la quantité d'acier nécessaire et les techniques de pliage sont à ce jour parfaitement maîtrisées.

Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans cet esprit en utilisant pour le profilé métallique des tôles pliées à froid associées à des éléments en bois. On cherche à déterminer expérimentalement le comportement mécanique instantané en flexion et en particulier à évaluer le rôle respectif de chaque constituant selon les phases de chargement. Les différentes étapes de la campagne d'essais ainsi que la géométrie des corps d'épreuve testés sont d'abord présentées. Les réponses en torsion et en flexion des éléments homogènes et des poutres sont ensuite analysées et discutées.

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

A. Objectifs et méthode

La campagne d'essais a nécessité 8 poutres en acier S235 réalisées en tôle pliée de 4 mm d'épaisseur et présentant une section droite en forme de U ainsi que 20 poutres en bois massif Epicéa de section rabotée 80 x 120 mm². Chaque élément présente une longueur de 3100 mm.

Les poutres en bois sont d'abord identifiées, mesurées et pesées. Elles ont ensuite été entreposées à l'abri dans l'atelier avant utilisation pour stabiliser leur hygrométrie. Après chaque essai à

rupture, plusieurs échantillons ont été prélevés dans les parties saines afin de mesurer l'humidité [14].

Chaque poutre en bois a d'abord été testée dans le domaine élastique en torsion et en flexion selon la norme NF EN 408 [14] permettant de déterminer le module d'élasticité global $E_{m,g}$ et le module de cisaillement $G_{tor,s}$. Puis, 10 d'entre elles ont été testées en flexion jusqu'à la rupture selon cette même norme et 6 autres ont été assemblées en poutres jumelles (PJ1 à PJ3) et testées à leur tour dans le domaine élastique en torsion et en flexion jusqu'à la rupture. Finalement, les 4 dernières poutres ont été utilisées pour construire 2 poutres mixtes acier-bois identiques nommées SW17a et SW17b (Figure 1).

Les poutres en acier ont été assemblées dos-à-dos pour former 4 poutres jumelles en I (PFF1 à PFF4). Les poutres PFF1 et PFF2 ont d'abord été testées dans le domaine élastique en torsion puis en flexion jusqu'à la rupture selon le même dispositif que les poutres jumelles bois. Les poutres PFF3 et PFF4 ont servi au montage des poutres mixtes SW17a et SW17b.

Dans tous les cas, la connexion entre les éléments est assurée par des boulons de diamètre 8 mm avec rondelles et écrous. Aucun test n'a été effectué sur ces connecteurs.

Une fois assemblées, les poutres mixtes SW17a et SW17b ont également été testées dans le domaine élastique en torsion et en flexion jusqu'à la rupture, selon les mêmes schémas que ses constituants. Ce programme expérimental, illustré sur la Figure 1, permet d'évaluer expérimentalement la contribution de chaque constituant sur le comportement de l'élément hybride, aussi bien en torsion qu'en flexion.

B. Géométrie des poutres hybrides, dispositif expérimental et propriétés des matériaux

Les deux poutres hybrides testées (SW17a et SW17b) sont identiques et sont constituées chacune de 2 poutres en acier positionnées dos-à-dos et 2 poutres bois positionnées entre les ailes. L'ensemble est connecté par des paires de boulons (avec rondelles et écrous) espacées de 25 cm dans la direction longitudinale. Le même principe de fabrication a été retenu pour les poutres jumelles en bois ou en acier. La position des boulons a été choisie pour respecter les prescriptions normatives en matière d'assemblage, notamment les conditions de pinces et d'espacements minimums [15 – 16]. La Figure 2 montre la géométrie des poutres testées.

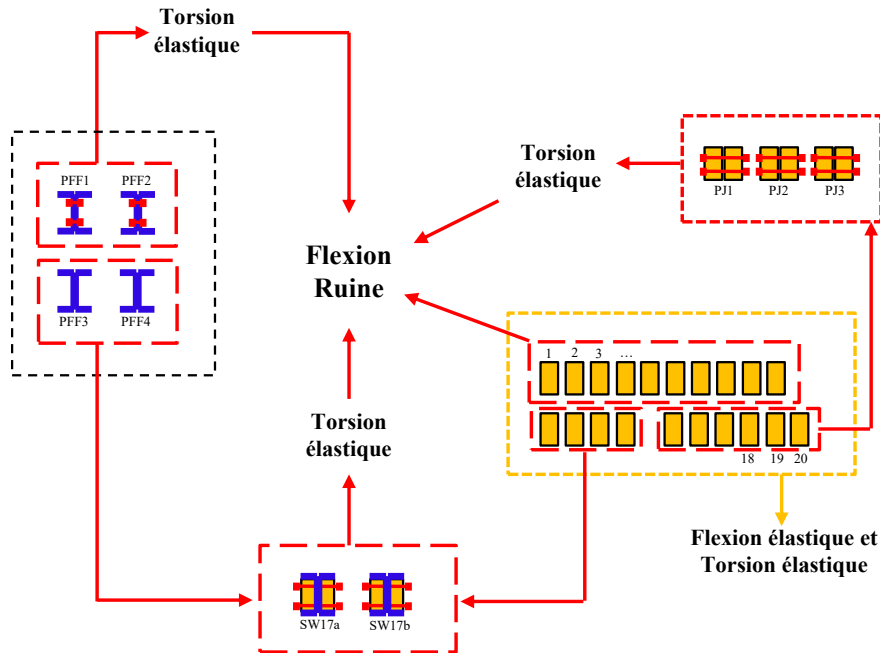


FIGURE 1. Principales étapes de la campagne d'essais

Pour les essais de flexion, les poutres sont posées sur des rouleaux laissant libre la rotation autour de son axe principal de flexion et le chargement est appliqué sur la poutre par l'intermédiaire de plaques en acier selon un schéma de flexion 4 points centrée (portée de 3 m et distance entre points de chargement de 40 cm). Pour les essais de torsion, les poutres sont encastrées à une extrémité et appuyées sur un rouleau à l'autre extrémité, laissant libre la rotation autour de leur axe longitudinal. Le couple de torsion est appliqué à l'extrémité libre par l'intermédiaire d'une force excentrée générant dans la poutre un couple de torsion uniforme. La Figure 3 illustre ces deux dispositifs expérimentaux.

Durant les essais de flexion, il a été mesuré la force appliquée par un capteur de force résistif, la flèche en différents points par des capteurs inductifs, la rotation aux extrémités par des inclinomètres et la déformation longitudinale en plusieurs points de la section centrale. Durant les essais de torsion, la force excentrée appliquée et les rotations aux 2 extrémités de la poutre ont été mesurées. Toutes les mesures ont été enregistrées sur une centrale d'acquisition Vishay avec une fréquence de 2 Hz.

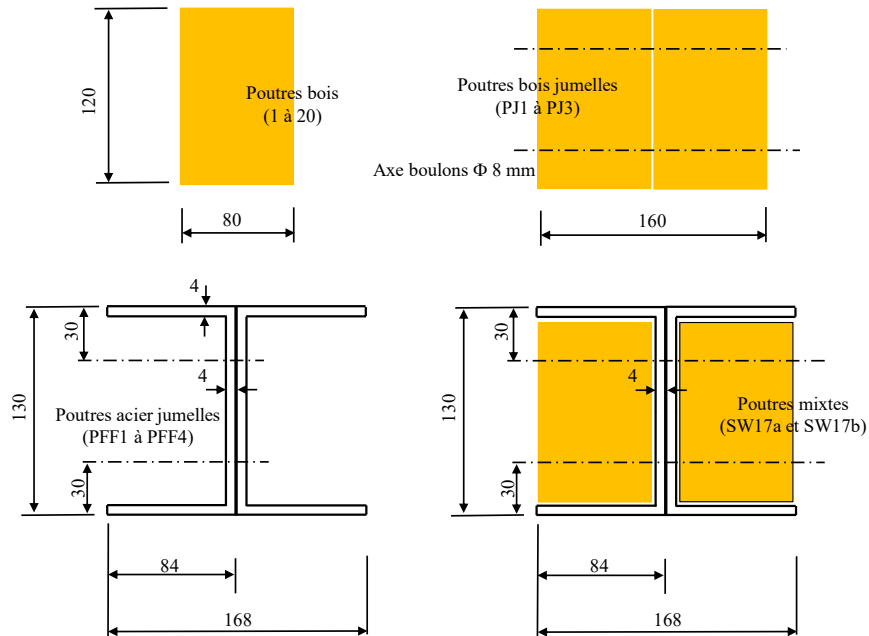


FIGURE 2. Description des poutres testées

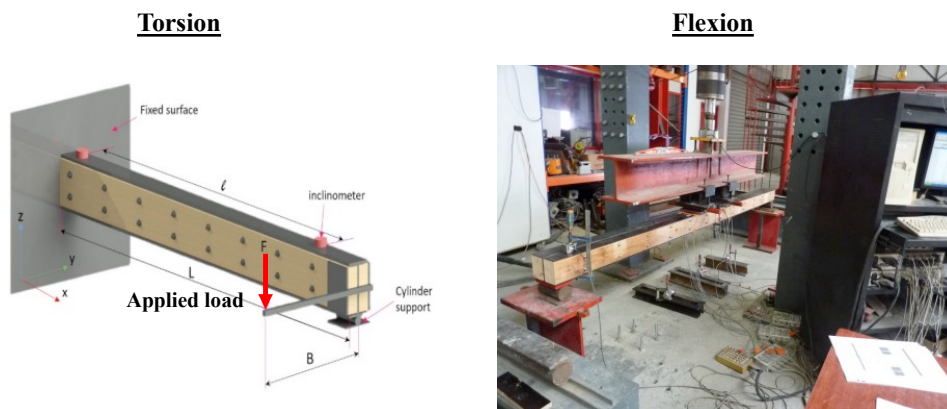


FIGURE 3. Illustration des dispositifs expérimentaux de torsion et de flexion

Des essais de traction ont été effectués sur des éprouvettes prélevées dans les poutres en acier. Les valeurs moyennes de la limite d'élasticité et de la contrainte à rupture valent respectivement 302.9 ± 13.4 MPa et 445.2 ± 21.2 MPa. En supposant un module d'élasticité de 210 GPa, la déformation élastique limite peut être estimée à 1,4 ‰.

Pour le bois, l'humidité moyenne relevée vaut 11.1 ± 1.1 % et la masse volumique moyenne est de 464.3 ± 30.4 kg/m³. Par ailleurs, les essais de torsion et les essais de flexion effectués dans le domaine élastique sur l'ensemble des poutres bois du lot ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques principales : le module d'élasticité global $E_{m,g}$ et le module de

cisaillement $G_{tor,s}$ valent respectivement 11887 ± 1370 MPa et 680 ± 86 MPa. La variabilité non négligeable de ces différentes propriétés physiques est principalement due à l'hétérogénéité naturelle du bois utilisé (présence de nœuds, défauts, fissures...).

III. RESULTATS D'ESSAIS SUR LES ELEMENTS DE STRUCTURE ET DISCUSSIONS

A. Comportement en Torsion

Le comportement des poutres en torsion est illustré sur la Figure 4. On constate que l'angle mesuré à l'extrémité libre varie à peu près proportionnellement au couple appliqué (et qu'il s'annule totalement quand le moment est ramené à 0). Ce résultat confirme que l'essai a été effectué dans le domaine élastique des matériaux et qu'aucune instabilité géométrique n'est survenue pendant les essais. La contrainte de torsion maximale calculée dans le cas de la poutre bois seule est d'environ 1 MPa.

Le graphe montre aussi que les poutres jumelles en bois apportent la majeure partie de la rigidité torsionnelle de la poutre mixte comparativement à celle de la poutre jumelle en acier. Ceci est tout à fait logique car on sait que la rigidité en torsion de section ouverte est faible, d'autant plus quand les tôles constitutives sont de faible épaisseur.

Ainsi, la présence du bois entre les semelles des profils métalliques augmente considérablement leur rigidité de torsion et ainsi leur résistance au déversement.

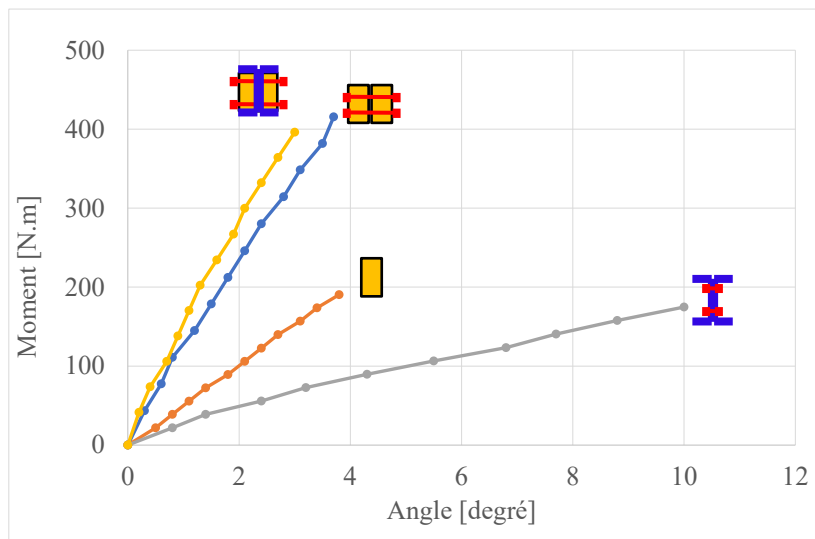


FIGURE 4. Contribution de chaque élément dans le comportement en torsion de SW17b

B. Comportement en flexion

Le comportement des poutres hybrides est illustré sur les Figures 5 à 7. Le comportement est linéaire jusqu'à une charge d'environ 35 kN avec des déformations dans le bois et l'acier qui restent modérées (déformation maximale en valeur absolue : 1,2 ‰ et 0,4 ‰ dans l'acier et dans le bois respectivement). A partir de 35 kN, on observe le début du flambement des semelles supérieures du profilé métallique en zone centrale. Le début de l'instabilité géométrique est très rapidement suivi du début de la plastification dans les semelles inférieures et supérieures du profilé métallique. A ce stade, aucun signe d'endommagement (visuel ou sonore) n'est observé dans les poutres en bois. Les diagrammes force – flèche et force – déformations dans l'acier deviennent très fortement non linéaires, traduisant une augmentation importante de la déformée de la poutre pour une augmentation modérée de la charge appliquée. En fibre supérieure, l'augmentation des déformations dans l'acier est accentuée par l'instabilité locale des semelles, leur soulèvement et la flexion locale qu'elles induisent.

La charge maximale est atteinte pour environ 58 kN et correspond à une première rupture par traction / cisaillement dans une des 2 poutres en zone centrale. Elle s'accompagne d'une chute brutale de la capacité portante. Le chargement reprend avec une rigidité fortement diminuée jusqu'à ce qu'une seconde rupture se produise dans le bois induisant à son tour une chute de capacité portante et ainsi de suite. L'essai est arrêté après l'apparition de nombreuses autres fissures dans les poutres en bois induisant une flèche maximale de plus de 175 mm et de très grandes déformations dans les matériaux.

La Figure 8 montre la contribution relative des matériaux dans le comportement de la poutre mixte. On constate que la rigidité de flexion élastique est principalement apportée par le profilé métallique en début de chargement, du fait notamment de la valeur plus élevée, de son module élastique. Dans une deuxième phase, les poutres en bois « prennent le relais » et permettent non seulement d'augmenter la capacité portante des profilés seuls (dans le cas étudié : d'environ 52%) mais de permettre également l'apparition de grandes déformations / flèches tout en conservant un niveau de chargement élevé traduisant ainsi une importante ductilité structurale.

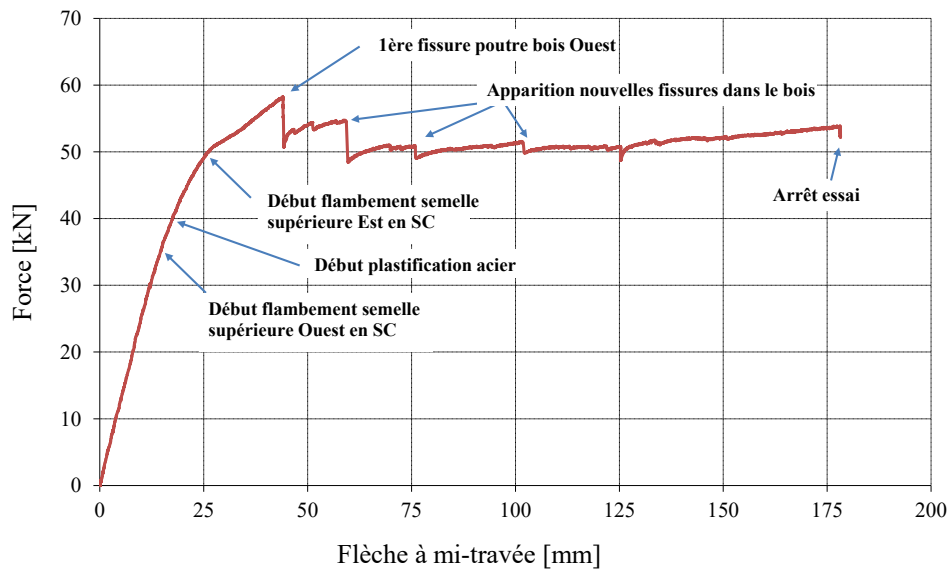


FIGURE 5. Comportement en flexion de la poutre hybride SW17a – Flèche

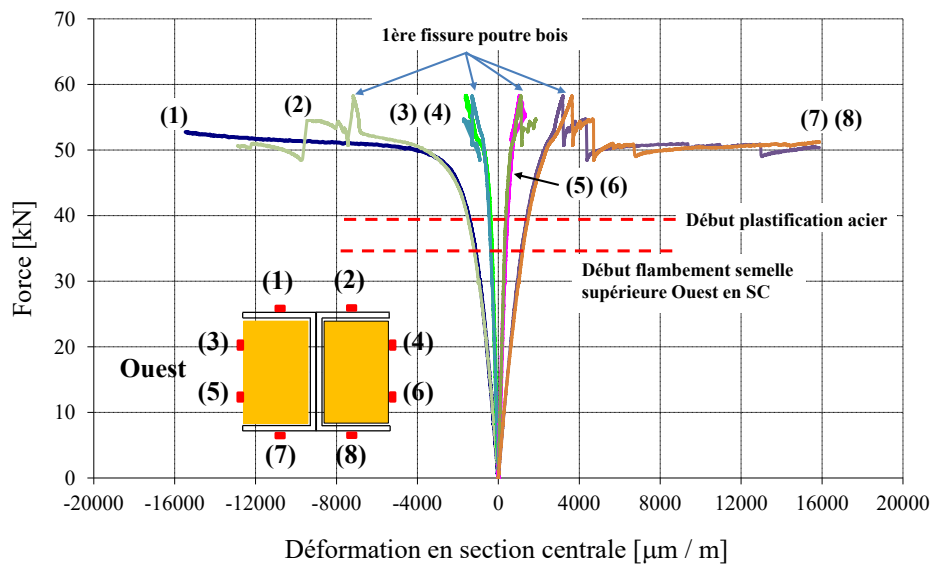


FIGURE 6. Comportement en flexion de la poutre hybride SW17a – Déformation



FIGURE 7. Comportement en flexion de la poutre hybride SW17a – Phases du comportement

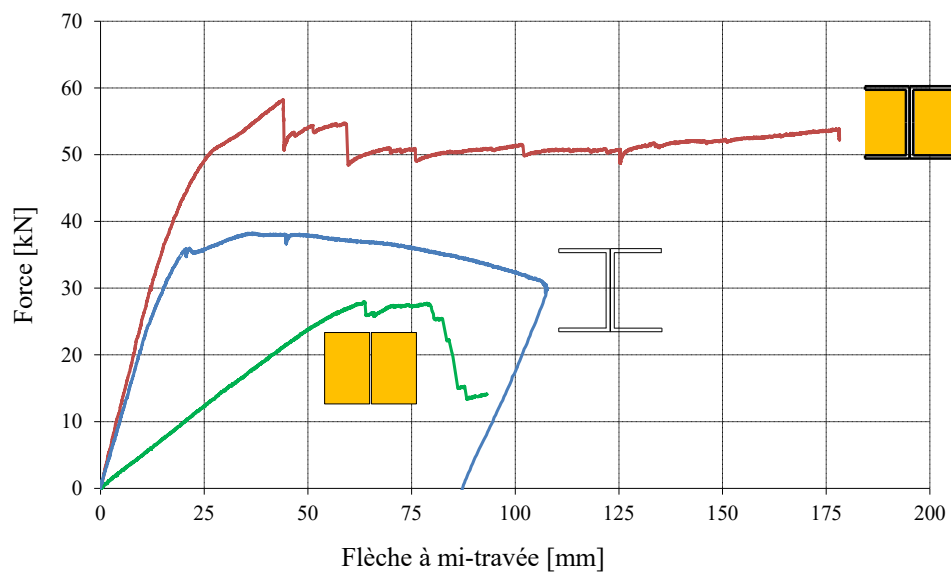


FIGURE 8. Contribution de chaque élément dans le comportement en flexion de la poutre hybride

IV. CONCLUSIONS

Cette étude expérimentale, qui se veut prospective, a permis de confirmer l'intérêt d'associer des éléments en bois avec des poutres en acier pour former des poutres mixtes acier-bois performantes en flexion. Pour la configuration géométrique testée, les résultats d'essais permettent de quantifier le gain de cette association en terme de capacité portante et de ductilité structurale.

Ces résultats sont très prometteurs et ouvrent des perspectives nombreuses. Les possibilités d'optimisation sont larges (nuance d'acier, épaisseur et dimensions des tôles, géométrie et classe de résistance des éléments bois, nombre et position des connecteurs) offrant ainsi des cas d'applications variés en terme de portée, chargement ou schémas statiques.

Des questions sur le comportement mécanique et l'importance relative des paramètres du dimensionnement restent néanmoins ouvertes et nécessitent des travaux supplémentaires comme par exemple le comportement sous chargement cyclique, le comportement au cours du temps ou le comportement en cas d'incendie. De plus, la modélisation numérique du comportement mécanique permettrait de développer des outils de calcul analytique facilitant le dimensionnement de ces éléments de structures hybrides.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'équipe technique du LMC2 (E. Janin et N. Cottet) pour son aide précieuse lors des campagnes d'essais. Les auteurs remercient également l'ANR pour son soutien financier.

REFERENCES

- [1] R. Gutkowski, K. Brown, A. Shigidi, J. Natterer (2008). Laboratory tests of composite wood-concrete beams, *Construction and building materials*, 22, 1059-1066.
- [2] E. Augéard, L. Michel, E. Ferrier (2018). Experimental and analytical study of the mechanical behavior of heterogeneous glulam-concrete beams and panels assembled by a specific treatment of wood. *Construction and building materials*, 191, 812-825.
- [3] G.Y. Jeong, V.S. Pham, D.K. Tran (2023). Development of predicting equations for slip modulus and shear capacity of CLT-concrete composite with screw connections, *Journal of Building Engineering*, 71, 106468.
- [4] W.M. Bulleit (1984). Reinforcement of Wood materials: a review. *Wood and Fiber Science*, 391-397.
- [5] W.M. Bulleit, B.L. Sandberg (1989). Steel-reinforced glued laminated timber, *Journal of Structural Engineering*, 115, 433-444.

- [6] A. Borri, M. Corradi (2011). Strengthening of Timber Beams with high strength steel cords, *Composites Part B: Engineering*, 42, 1480-1491.
- [7] P. Alam, M.P. Ansell, D. Smedley (2009). Mechanical repair of timber beams fractured in flexure using bonded in reinforcements, *Composites: Part B*, 40, 95–106.
- [8] K. Schober, A.M. Harte, R. Kliger, R. Jockwer, Q. Xu, J. Chen (2015). FRP reinforcement of timber structures, *Construction and building materials*, 97,106-118.
- [9] J. Jasienko, T.P. Nowak (2014). Solid timber beams strengthened with steel plates – Experimental studies, *Construction and building materials*, 63, 81-88.
- [10] B. Jurkiewicz, S. Durif, A. Bouchair, C. Grazide (2022). Experimental and analytical study of hybrid steel-timber beams in bending, *Structures*, 39, 1231-1248.
- [11] B. Jurkiewicz, H. Darwich, C. Grazide (2024). Behaviour of GFRP-timber hybrid beams in torsion and bending, *Engineering Structures*, 321, 118892.
- [12] W. Winter, K. Tavoussi, F. Riola Parada, A. Bradley (2016). Timber-steel hybrid beams for multi-storey buildings: final report, *WCTE2016, Vienne*.
- [13] W. Winter, K. Tavoussi, F. Riola Parada, A. Fadai, I. Prasnjak (2016). Development of prefabricated timber-steel-concrete ribbed decks, *WCTE2016, Vienne*.
- [14] NF EN 408+A1 (2012). Structures en bois – Bois de structure et bois lamellé-collé – Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques. *AFNOR*.
- [15] Eurocode 3 (2005). S Design of steel structures – Part 1.1: General rules for buildings *European Committee for Standardization (CEN), Brussels*.
- [16] Eurocode 5 (2008). Design of timber structures – Part1-1: General – Common rules and rules for buildings. *European Committee for Standardization (CEN), Brussels*.