

# Comportement en flexion d'éléments modulaires de plancher hybride CLT – acier

Bruno JURKIEWIEZ<sup>1</sup>, Tarek JAAFAR<sup>2</sup>, Maxime AUDEBERT<sup>2</sup>, Saleh ZAAFOURI<sup>3</sup>, Chaimaa JAAFARI<sup>3</sup>, Sébastien DURIF<sup>3</sup>, Abdelhamid BOUCHAIR<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> INP Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

**RESUME** Le CLT (Cross-Laminated Timber) est une solution technique en bois massif qui se développe dans la construction de façon importante ces dernières années car elle permet de concevoir des planchers autoportants performants, rapides à mettre en œuvre et présentant une empreinte environnementale modérée. Son comportement mécanique peut être encore amélioré si le panneau CLT est associé à des éléments métalliques. Dans cette étude, nous proposons un système constructif innovant, modulaire et démontable, associant des panneaux CLT et des profilés en acier au moyen de connecteurs mécaniques. Le comportement en flexion est étudié expérimentalement jusqu'à la ruine permettant de quantifier la rigidité flexionnelle dans le domaine élastique et la capacité portante maximale, éléments clés pour le dimensionnement de telles structures. Le rôle de chaque élément constitutif est établi et l'influence de la forme du profilé sur le comportement de la structure hybride est déterminée. Les mesures réalisées pendant les essais sont comparées aux résultats de calculs obtenus au moyen d'un modèle numérique par éléments finis. Les écarts mesures / calculs sont discutés à la lumière des hypothèses retenues pour la modélisation.

**Mots-clés** structure hybride CLT - acier, flexion, essais, modélisation éléments finis

## I. INTRODUCTION

L'emploi du bois lamellé-croisé (CLT : cross laminated timber) est en pleine expansion dans le domaine du bâtiment du fait de ses bonnes propriétés mécaniques, d'une conductivité thermique modérée et de son faible impact environnemental (comparativement à des solutions tout béton armé ou tout charpente métallique). Le CLT est utilisé sous la forme de panneaux pour constituer des planchers ou des murs, associés à une ossature porteuse en acier indépendante. De nombreuses études ont été réalisées sur ce type d'élément et des règles de dimensionnement éprouvées par l'expérience sont désormais disponibles [1-4].

Les panneaux CLT peuvent également être associés à d'autres matériaux pour former des systèmes constructifs plus performants. Par exemple, à l'instar des structures mixtes acier-béton, les

panneaux CLT peuvent être connectés à une dalle en béton armé profitant ainsi du bon comportement en compression du béton et des très bonnes propriétés du bois en traction. On peut trouver dans la littérature nombre de publications traitant des systèmes de connexion ou du comportement en flexion de ces éléments sous différents types de chargement [5-7]. Bien que performante, cette solution technique n'est pas optimale au regard de la déconstruction ou du réemploi des éléments.

Une solution plus vertueuse consiste à associer les panneaux CLT à des poutres en acier pour former des structures mixtes en utilisant exclusivement des connecteurs mécaniques (vis et/ou boulons). S'inspirant là encore des planchers mixtes acier-béton, Hassanieh *et al.* [8] ont été parmi les premiers à développer ce type de structure où les panneaux CLT sont fixés au-dessus des poutres en acier. Sur cette idée, d'autres chercheurs se sont concentrés sur les systèmes de connexion [9-10] ou sur le comportement à l'échelle de l'élément de structure ou du plancher [11-13]. L'inconvénient majeur de cette solution technique est l'épaisseur totale de plancher qu'elle induit, ce qui peut être une difficulté pour certains projets de construction.

Dans sa thèse, Okutu [14] a montré que les panneaux CLT pouvaient être avantageusement positionnés entre les semelles des profilés métalliques (slim-floor systems) permettant ainsi une réduction considérable de l'épaisseur de plancher tout en conservant des performances de flexion élevées. Cette conception permet également d'apporter une protection au feu partielle des poutres en acier [15]. Dans cette veine, l'entreprise PEIKKO a récemment développé et mis sur le marché le système DeltaBeam® présentant des capacités portantes élevées [16].

La présente étude s'inscrit dans ces derniers développements et propose un système de plancher innovant acier-CLT type « slim-floor » conçu à partir de modules préfabriqués en usine et mis en place sur chantier dans un délai court. La connexion utilisée est uniquement mécanique (vis et boulons) permettant ainsi un démontage et un réemploi plus aisés. Les profilés utilisés sont des HEA ou des UPE. Les profilés en acier et les panneaux CLT ont d'abord été étudiés seuls en flexion. Deux modules acier-CLT ont ensuite été construits et testés à leur tour en flexion jusqu'à la ruine. Les principaux résultats d'essais sont présentés et discutés. Ils permettent de comprendre le comportement en flexion de ces structures hybrides et d'évaluer le rôle de chaque composant. Les mesures obtenues sont comparées aux résultats numériques obtenus par un modèle éléments finis 3D non linéaire spécialement développé pour cette étude.

## II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

### A. Objectifs et méthode

La campagne d'essais a nécessité 4 HEA 160 S275 (appelées HEA1 à HEA4), 6 UPE 160 S275 (UPE1 à UPE6) et 4 panneaux CLT identiques (CLT1 à CLT4). La première phase a consisté à tester ces 4 panneaux dans le domaine élastique afin de déterminer leurs rigidités flexionnelles. Puis les panneaux CLT1 et CLT2 ont été testés en flexion jusqu'à la ruine. Les poutres HEA1 et HEA2 ont été à leur tour testées en flexion jusqu'à la ruine tandis que les poutres HEA3 et HEA4 ont été associées au panneau CLT3 pour produire le module hybride n°1. De même, 4 des 6 UPE ont été assemblés 2 à 2, dos-à-dos, connectées avec des boulons de diamètre 8 mm pour former 2 poutres en I reconstituées (appelées UPEs1 et UPEs2) qui ont à leur tour été testées en flexion jusqu'à la

ruine. Puis, les 2 derniers UPE (UPE5 et UPE6) ont été assemblés au panneau CLT4 pour construire le module hybride n°2. Finalement, les 2 modules hybrides ont été testés en flexion jusqu'à la ruine. La Figure 1 illustre les différentes étapes de la campagne d'essais. Ainsi, les propriétés des éléments constitutifs seuls ayant été déterminées, leur contribution respective dans le comportement global des modules hybrides a pu être analysée.

### FIGURE 1. Principales étapes de la campagne d'essais

#### B. Propriétés des matériaux

Des essais de traction ont été effectués sur des éprouvettes découpées dans différentes parties saines des poutres en acier utilisées. Dans le cas des HEA, les valeurs moyennes de la limite d'élasticité  $f_y$  et de la contrainte à rupture  $f_u$  valent respectivement  $331 \pm 11$  MPa et  $461 \pm 14$  MPa. En supposant un module d'élasticité de 210 GPa, la déformation élastique limite vaut 1,6%. Dans le cas des UPE, ces 3 grandeurs valent respectivement  $295 \pm 10$  MPa,  $425 \pm 8$  MPa et 1,4%.

Les panneaux CLT, fournis par l'entreprise Piveteau Bois, présentent une épaisseur de 140 mm, une largeur de 1230 mm et une longueur de 4000 mm. Ils sont constitués de 5 couches de pin collées : les lamelles des 2 couches extérieures et de la couche médiane, de classe C24, sont orientées selon l'axe longitudinal des panneaux. Les 2 autres couches intermédiaires sont disposées transversalement et sont de classe C16. Il est à noter que des engravures ont été réalisées dans les 2 coins inférieurs de chaque panneau pour accueillir les semelles inférieures des profilés métalliques. La Figure 2 montre la disposition et l'épaisseur des différentes lamelles.



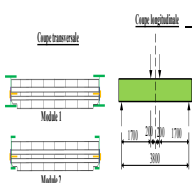
**FIGURE 2. Géométrie et constitution des panneaux CLT HEXAPLI 5L***C. Géométrie et construction des modules hybrides*

La Figure 3 montre la géométrie des 2 modules hybrides étudiés. Chaque poutre en acier (HEA et UPE) est connectée au panneau CLT sur ses joues au moyen de 5 tirefonds de diamètre 10 mm et de longueur 120 mm (espacement longitudinal de 920 mm). Il est à noter que les orifices réalisés dans les âmes des profilés pour le passage des tirefonds font un diamètre de 20 mm et que des petites plaques carrées de MDF de 6 mm d'épaisseur et de 40 mm de côté jouent le rôle de rondelles. Cette disposition a pour objectifs de laisser libres les potentiels glissements longitudinaux relatifs qui pourraient se produire entre les profilés et le CLT mais d'empêcher les éventuelles instabilités locales pouvant survenir pendant les essais.

Chaque module hybride est testé, dans le domaine élastique et jusqu'à la rupture, en flexion 4 points centrée avec une portée libre de 3800 mm.

**FIGURE 3. Description des modules hybrides testés***D. Dispositif expérimental*

Tous les corps d'épreuve ont été testés en flexion 4 points centrée, dans le domaine élastique et/ou jusqu'à rupture. Pour chaque essai, le corps d'épreuve est positionné sur des appuis qui laissent libre la rotation autour de l'axe transversal avec une portée libre de 3800 mm. Le chargement est appliqué via un vérin de 500 kN par l'intermédiaire d'une poutre de répartition et de plaques d'acier de 20 mm d'épaisseur destinées à limiter les concentrations de contraintes au droit des points de chargement. L'essai est piloté en déplacement contrôlé avec une vitesse de 2 mm/mn. Pendant les essais, il a été mesuré la force totale appliquée par un capteur de force, les déplacements verticaux en différents points au moyen de capteurs inductifs, les rotations aux extrémités au moyen d'inclinomètres et les déformations longitudinales en différents points (sur l'acier et/ou sur le CLT) à l'aide de jauges d'extensométrie. Toutes les mesures effectuées sont enregistrées avec une fréquence d'acquisition de 2 Hz. Le dispositif d'essai est illustré pour différentes configurations sur la Figure 4.



**FIGURE 4. Dispositifs expérimentaux**

### III. RESULTATS D'ESSAIS ET DISCUSSIONS

#### *A. Comportement des profilés métalliques*

Les graphes force – déplacement des profilés métalliques sont présentés sur les Figures 5 et 6. On observe une très bonne répétabilité des essais. Les comportements des poutres en acier sont très similaires. La fin du domaine élastique correspond à une charge comprise entre 70 et 80 kN et correspond au début de la plastification des semelles dans la zone centrale. Le chargement se poursuit, les déformations plastiques progressent rapidement et se propagent vers le centre de gravité des profilés métalliques dans la zone centrale. La charge maximale est atteinte lorsque le flambement des semelles supérieures se produit. La charge décroît tandis que les déformations et les flèches augmentent très rapidement. L'essai est arrêté. La charge maximale moyenne atteinte vaut 91,1 kN dans le cas des HEA et 80,8 kN dans le cas des doubles UPE.



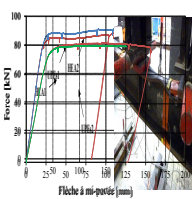
**FIGURE 5.** Comportement en flexion jusqu'à la ruine des HEA 160

**FIGURE 6.** Comportement en flexion jusqu'à la ruine des doubles UPE 160

### B. Comportement des panneaux CLT

Les panneaux CLT ont d'abord été testés en flexion dans le domaine élastique afin d'évaluer leur rigidité flexionnelle. Le dispositif d'essai et les mesures de flèche sont présentés sur la Figure 7. Une flèche moyenne de  $12,5 \pm 0,3$  mm a été relevée pour 40 kN montrant ainsi une faible variabilité entre les panneaux. Comparativement aux éléments en bois massif ou, dans une moindre mesure, en lamellés-collés, cette faible variabilité est obtenue grâce à la disposition croisée de lamelles de bois sélectionnées et expurgées de tout défaut. Ce processus de fabrication réduit fortement l'anisotropie du matériau et homogénéise ses propriétés.

Les panneaux CLT1 et CLT2 ont ensuite été testés en flexion jusqu'à la ruine pour déterminer leur capacité portante et leur mode de ruine. La Figure 8 illustre la relation force-déflexion des éléments qui est assez similaire entre les 2 panneaux. A l'instar des autres produits bois, cette relation est quasiment linéaire jusqu'à ce qu'une première fissure / rupture se produise dans une des lamelles inférieures induisant une petite chute de force. Le chargement se poursuit avec une petite baisse de rigidité flexionnelle jusqu'à l'apparition d'une nouvelle rupture dans une autre lamelle et ainsi de suite. La charge maximale moyenne est de 182,2 kN et correspond à une chute de force importante et irréversible qui se produit quand toutes les lamelles inférieures sont rompues.



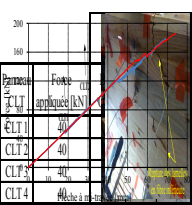
**FIGURE 7.** Comportement en flexion des panneaux CLT dans le domaine élastique

**FIGURE 8.** Comportement en flexion jusqu'à la ruine des panneaux CLT

### C. Comportement des modules hybrides acier – CLT

Les modules hybrides n°1 et n° 2 ont été testés en flexion jusqu'à la ruine et leur comportement est illustré sur la Figure 9. Bien que n'étant pas constitués des mêmes profilés métalliques, leur comportement présente beaucoup de similitudes.

La réponse en flexion de ces modules hybrides présente 2 phases principales. Les flèches et les déformations augmentent d'abord linéairement avec la charge appliquée (jusqu'à 245 kN pour le module n°1 et 135 kN pour le module 2). Pour cette charge, les premières déformations plastiques apparaissent dans les profilés métalliques en fibre inférieure, dans la zone centrale de la poutre. Au-delà de cette charge qui définit la fin du domaine élastique des modules hybrides, le comportement reste à peu près linéaire mais avec une rigidité flexionnelle fortement réduite. Les déformations plastiques progressent et s'étendent dans les profilés métalliques. Les premières fissures / ruptures importantes sont entendues et observées vers 350 kN et 150 kN pour les modules 1 et 2 respectivement, ce qui correspond à des petites chutes de force sur les diagrammes. La charge maximale est atteinte lorsque la majorité des lamelles bois inférieures est rompue dans la zone centrale : elle vaut 368,5 kN pour le module 1 et 289,1 kN pour le module 2.



Après essai, les modules ont été démontés et examinés. Aucun glissement ni aucun endommagement n'ont pu être relevés à proximité des tirefonds soulignant le bon fonctionnement de la connexion. De même, aucun écrasement en compression transversale au niveau des « rondelles » en MDF, sous les écrous des tirefonds, n'est observé traduisant une absence d'instabilité locale de l'âme des profilés métalliques. Comme les centres de gravité des profilés métalliques et des panneaux CLT sont peu éloignés, les connecteurs ne sont soumis qu'à des charges modérées avant la ruine.

La Figure 10 illustre pour chaque module hybride la contribution relative du panneau CLT et des profilés métalliques lors du comportement en flexion. Pour les 2 configurations testées, on constate que, à peu de choses près, la réponse du module hybride est la somme des réponses de ses constituants. En effet, dans le domaine élastique, la rigidité flexionnelle du double UPE, d'un HEA et d'un panneau CLT étant à peu près les mêmes, la rigidité flexionnelle du module hybride 1 est égale à trois fois celle du CLT tandis que celle du module hybride 2 est égale à 2 fois celle du CLT. De même, à la ruine, on observe approximativement les mêmes rapports entre la capacité portante du module hybride et celles de ses constituants. La ductilité structurale des modules hybrides (capacité de déformation après la charge maximale sans chute importante) est légèrement augmentée par rapport à celle d'un panneau CLT seul.

#### IV. SIMULATIONS NUMERIQUES PAR ELEMENTS FINIS

##### A. Hypothèses et modèle

Les simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel ABAQUS. La géométrie des éléments modélisés est celle décrite dans le paragraphe II. Le maillage 3D des profilés métalliques et des panneaux CLT a été réalisé avec des éléments volumiques (élément hexaédrique linéaire C3D8R). D'après les observations expérimentales, les organes de connexion (tirefonds) sont peu sollicités durant ces essais. Par souci de simplification du modèle, ils ne sont donc pas modélisés. Tenant compte de la double symétrie, seul un quart de la structure est modélisé. Le CLT n'est pas modélisé comme un matériau bois homogénéisé mais chaque lamelle constitutive est discrétisée. La taille définitive des éléments finis a été choisie après une étude de sensibilité afin d'obtenir le meilleur compromis entre précision et temps de calculs. La Figure 11 illustre les maillages réalisés.

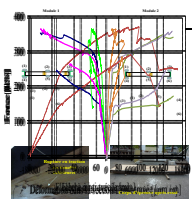
Les conditions aux limites imposées dans les modélisations correspondent aux conditions expérimentales aux appuis et aux points de chargement (pilotage en déplacement). Les interactions entre lamelles ont été modélisées avec des éléments de contact dont les paramètres ont été identifiés antérieurement [17]. Les interactions entre les profilés métalliques et les panneaux CLT sont gérées via l'utilisation d'un contact cohésif et d'une valeur de coefficient de frottement  $\mu = 0,3$ .

Dans les simulations numériques, l'acier est modélisé comme élasto-plastique écrouissable et les paramètres de la loi de comportement ont été choisis à partir des essais de traction réalisés sur les échantillons testés (voir paragraphe II.B). Le bois constitutif des lamelles est considéré comme isotrope transverse. Des essais de caractérisation en flexion 4 points sur des lamelles ont été réalisés afin de déterminer le module d'élasticité longitudinal  $E_L$  de ces lamelles. Le module transversal et les modules de cisaillement sont déduits analytiquement de cette valeur expérimentale. L'évolution de la plasticité dans le bois est considérée en utilisant le critère de Hill défini comme suit :

$$\sigma_H = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad (1)$$

Ce critère est utilisé pour représenter la plasticité anisotrope. Il correspond au critère de Von Misès généralisé pour les matériaux anisotropes. Le détail des paramètres de cette loi peut être trouvé dans [18-20]. Les caractéristiques mécaniques du bois (limites élastiques) sont déterminées d'après les classes de résistance des lamelles de bois (NF-EN-338 [20]).

**FIGURE 9.** Comportement en flexion jusqu'à la ruine des modules hybrides



**FIGURE 10.** Contribution de chaque élément dans le comportement en flexion des modules hybrides

**FIGURE 11.** Exemple de maillage utilisé pour les modules hybrides

B. *Comparaison mesures / calculs*

La Figure 12 compare l'évolution avec la charge des flèches mesurées et des flèches calculées pour les 2 modules hybrides. Les écarts mesures / calculs sont très faibles pour la majeure partie du comportement et, en particulier, le modèle décrit parfaitement les 2 phases du comportement (élastique et post-élastique) et le point de bifurcation observé lors des essais à l'apparition des déformations plastiques dans l'acier. L'introduction d'un critère d'endommagement du bois dans le modèle permettrait de déterminer une valeur de rupture numérique. Ces développements sont en cours.



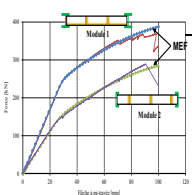
**FIGURE 12.** Comparaison des flèches mesurées et calculées pour les modules hybrides

## V. CONCLUSIONS

Cette étude a présenté le comportement en flexion de deux modules hybrides CLT – acier et celui de ses constituants. La connexion entre bois et acier est réalisée par des tirefonds positionnés sur les joues des panneaux. Des essais ont été réalisés jusqu’à la ruine et un modèle éléments finis 3D a été développé pour simuler le comportement élasto-plastique de ces éléments.

Les résultats d’essais, répétables, ont montré, pour les deux configurations testées, que la réponse en flexion du module hybride est approximativement la somme de celle de ses constituants. La ductilité structurale du module hybride est légèrement augmentée par rapport à celle d’un panneau CLT seul, essentiellement grâce aux déformations plastiques des profilés métalliques, mais le mode de ruine demeure inchangé : ruine par rupture des lamelles inférieures en traction. Par ailleurs, aucun signe de faiblesse ou d’endommagement dans la connexion n’a été relevé malgré une densité relativement faible de connecteurs. Ces observations sont en grande partie la conséquence du faible éloignement des centres de gravité des panneaux CLT et des profilés métalliques dans les modules hybrides.

Le modèle numérique proposé tient compte de la non linéarité des matériaux : une loi élasto-plastique isotrope écrouissable a été retenue pour l’acier et une loi élasto-plastique isotrope transverse avec critère de Hill a été choisie pour le bois. Les paramètres des lois de comportement ont été sélectionnés à partir d’essais de caractérisation effectués sur des morceaux prélevés sur les éléments testés ou provenant du même lot. Les conditions aux limites (appui, chargement, connecteurs, lois de contact...) ont été choisies pour représenter le plus fidèlement les conditions d’essais et le mode de fabrication industrielle des panneaux. Avec ces hypothèses, les simulations numériques ont été effectuées pour les 2 modules hybrides et les premières comparaisons effectuées entre flèches mesurées et flèches calculées montrent des écarts faibles. L’exploitation des modèles de calculs doit se poursuivre pour valider tous les aspects du comportement. Une fois validés, ces



modèles seront utilisés pour réaliser des études de sensibilité et seront appliqués pour différentes configurations permettant le développement de modèles analytiques de calcul simplifiés

## REMERCIEMENTS

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

## REFERENCES

- [1] R. Brandner (2014). Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report, internal report, Graz University of Technology.
- [2] A. Polastri, I. Giongo, A. Angeli, R. Brandner (2018). Mechanical characterization of a pre-fabricated connection system for cross laminated timber structures in seismic regions, *Engineering Structures*, 167, 705-715.
- [3] A. Ringhofer, R. Brandner, H.J. Blaß (2018). Cross laminated timber (CLT): Design approaches for dowel-type fasteners and connections, *Engineering Structures*, 171, 849-861.
- [4] I. Becker, F. Anderson, A.R. Phillips (2023). Structural design of hybrid steel-timber buildings for lower production stage embodied carbon emissions, *Journal of Building Engineering*, 76, 107053.
- [5] R. Gutkowski, K. Brown, A. Shigidi, J. Natterer (2008). Laboratory tests of composite wood-concrete beams, *Construction and Building Materials*, 2, 1059-1066.
- [6] E. Augeard, 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.
- [7] 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.
- [8] A. Hassanieh, H.R. Valipour, M.A. Bradford (2016). Experimental and analytical behaviour of steel-timber composite connections, *Construction and Building Materials*, 118, 63-75.
- [9] C. Loss, M. Piazza, R. Zandonini (2016). Connections for steel-timber hybrid prefabricated buildings. Part I: Experimental tests, *Construction and Building Materials*, 122, 781-795.
- [10] Y. Zhao, Y. Yuan, C.L. Wang, S. Meng (2023). Experimental and finite element analysis of flexural performance of steel-timber composite beams connected by hybrid-anchored screws, *Engineering Structures*, 292, 116503.

- [11] C. Loss, M. Piazza, R. Zandonini (2016). Connections for steel–timber hybrid prefabricated buildings. Part II: Innovative modular structures, *Construction and Building Materials*, 122, 796-808.
- [12] C. Loss, B. Davison (2017). Innovative composite steel-timber floors with prefabricated modular components, *Engineering Structures*, 132, 695-713.
- [13] D. Owolabi, C. Loss (2022). Experimental and numerical study on the bending response of a prefabricated composite CLT-steel floor module, *Engineering Structures*, 260, 114278.
- [14] K.A. Okutu (2019). CLT-Steel Composite Floors for Sustainable Multi-Storey Construction, Doctoral thesis, The University of Sheffield, Faculty of Engineering, Department of Civil & Structural Engineering.
- [15] A. Berezyiat, D. Dhima, S. Durif, M. Audebert, A. Bouchair, A. Si Larbi (2024). Fire Tests on Steel-Timber Composite Beams, *Fire Technology*, 60, 2601-2620.
- [16] S.M. West, E. Camnasio, S. Peltonen (2023). Deltabeam® with timber floor joints – Load bearing capacity at ambient temperature and in fire situation, *Proceedings of WCTE 2023, Oslo*, June 19-22, 3167-3176.
- [17] V.D. Tran, M. Oudjene, P.J. Méausoone (2014). FE analysis and geometrical optimization of timber beech finger-joint under bending test, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 52, 40-47.
- [18] T. P. Nowak, J. Jasieńko, et D. Czepiżak (2013). Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips, *Construction and Building Materials*, 40, 197-206.
- [19] M. He, Q. Zhang, X. Sun, W. Alhaddad (2024). An experimental and numerical study on the shear performance of friction-type high-strength bolted connections used for CLT-steel hybrid shear walls, *Eng. Struct.*, 306, 117868.
- [20] AFNOR. NF-EN-338. Juillet 2016.