

Structure composite de plancher bois-béton par liaison collée

Mohammed SHEHADA, Frédéric DUPRAT, Zakaria DJAMAÏ

1 Université de Toulouse, LMDC INSA-UPS

RESUME

Les structures bois-béton reçoivent une attention croissante dans le contexte du changement climatique. Outre le piégeage du carbone au sein du matériau bois, facilitant l'accès au label bio-sourcé des bâtiments, ce type de structure est léger et permet de combiner efficacement les propriétés naturellement intéressantes des matériaux, la résistance en compression pour le béton, et la résistance en flexion / traction pour le bois. La liaison collée entre le béton et le bois confère un transfert complet des déformations entre les deux matériaux, pour toutes les phases de chargement jusqu'à la ruine, et apporte ainsi une raideur constante de la structure, contrairement à la liaison mécanique classique par organes métalliques. La mise en œuvre de la liaison est également simple, ce qui constitue un autre avantage. L'étude proposée examine les caractéristiques de rupture, le glissement à l'interface, la distribution des déformations et le comportement charge-flèche des poutres composites bois-béton (TCC) collées, fabriquées selon un procédé humide ou sec. Des poutres TCC, chacune d'une portée de 3,2 m, ont été testées en flexion quatre points. Les résultats ont révélé des modes de rupture distincts entre les deux méthodes de fabrication, soulignant l'importance cruciale de l'intégrité de la liaison pour atteindre une action composite efficace et un partage des contraintes optimal. Les poutres fabriquées par voie humide ont démontré une liaison rigide, un alignement constant de l'axe neutre et une répartition efficace des contraintes, conduisant à des performances supérieures et une capacité de flexion ultime plus élevée. En revanche, les poutres fabriquées par voie sèche ont présenté une séparation à l'interface, entraînant un partage des contraintes inefficace et une capacité de flexion réduite. Malgré ces différences, les deux méthodes de fabrication ont montré des réponses charge-flèche comparables avant la rupture, reflétant un comportement uniforme et conforme aux caractéristiques pleinement composites sous les charges appliquées.

Mots-clefs

Plancher composite bois - béton, liaison collée bois – béton

I. INTRODUCTION

Le rapport résistance-densité élevé du bois le rend compétitif par rapport au béton et à l'acier, du point de vue structural et environnemental. Cependant, sa déformabilité et l'impact du changement climatique sur la ressource forestière constituent un frein à son utilisation exclusive. Associer le bois à un matériau plus raide dans une solution constructive hybride peut permettre de relever ce défi (Quintana Gallo et al., 2021). Les structures TCC combinent le bois et le béton, améliorant la rigidité, l'isolation acoustique et la masse thermique pour une meilleure efficacité

énergétique (Ceccotti, 2002a; David Yeoh et al., 2011). Remplacer la section en traction du béton par du bois permet une fabrication plus rapide, des charges réduites sur les fondations, des plafonds décoratifs et une diminution des émissions de CO₂ (Fu et al., 2020; Ghanbari Ghazijahani et al., 2017; D. Yeoh et al., 2011). Les chercheurs soulignent les performances élevées des structures TCC à court et long terme, ce qui les rend de plus en plus attractives dans le domaine de la construction (Ling et al., 2023; Tao et al., 2022).

Les connexions mécaniques dans les poutres TCC provoquent souvent des glissements relatifs, des flèches supplémentaires et des ruptures en flexion dues à la plastification ou à l'arrachement des connecteurs, à l'écrasement local du béton, sans que les résistances en flexion soient atteintes (Ceccotti, 2002b; Du et al., 2019; Ferrara et al., 2023; Miotto and Dias, 2012). Les connexions adhésives ont été développées pour surmonter ces limitations, améliorant les performances dans des conditions ultimes et de service (Brunner et al., 2007; Ferrara et al., 2023; Frohmüller et al., 2021; Fu et al., 2020; Sousseau et al., 2023; Tannert et al., 2017; Tesfaye Deresa et al., 2021).

Des études précédentes (Brunner et al., 2007; Frohmüller et al., 2021; Negrão et al., 2010a, 2010b; Tannert et al., 2017) ont identifié deux méthodes de collage pour les structures TCC : humide ou sèche. Le collage humide consiste à appliquer un adhésif sur le bois avant de couler du béton frais, créant une connexion rigide. Le collage à sec utilise des dalles de béton préfabriquées collées au bois, ce qui améliore la rapidité de construction, réduit les effets de l'humidité et optimise la logistique.

Nos recherches antérieures (Shehada et al., 2023) ont investi le comportement mécanique des joints TCC collés avec des adhésifs époxy dans des conditions humides ou sèches. Des essais de cisaillement double ont été réalisés, en prenant en compte des variables telles que la teneur en humidité du bois, le type et l'épaisseur de l'adhésif, l'ajout de sable dans l'adhésif et le sablage du béton. Les conditions sèches ont montré des résistances au cisaillement de 6 à 8 MPa, avec des modes de rupture principalement dus à des ruptures cohésives dans le béton et/ou le bois.

Malgré ces avancées, obtenir une liaison complète entre le bois et le béton reste un défi majeur dans les structures TCC en raison des différences de propriétés des matériaux et des conditions de surface. Les systèmes TCC collés dépendent de méthodes de fabrication appropriées pour garantir une action composite efficace. Dans le processus à sec, les irrégularités de surface ou la présence d'huile de démoulage sur la plaque de béton peuvent affaiblir l'adhésion (Frohmüller et al., 2021; Fu et al., 2021), tandis que dans le processus humide, les vibrations du béton peuvent déplacer l'adhésif. Le béton autoplaçant (BAP) est une solution adaptée grâce à sa fluidité et ses propriétés autonivelantes.

Pour réduire l'empreinte carbone de la construction, il est essentiel d'optimiser le ratio bois-béton dans les systèmes de plancher, en visant une proportion plus élevée de bois sans compromettre les performances structurelles. Bien que l'équilibre entre l'impact climatique et les performances structurelles soit complexe, cette étude aborde ce défi en utilisant une fine dalle de béton connectée à une poutre en bois.

L'objectif de cette étude est de faire progresser les connaissances et de fournir une compréhension approfondie du comportement mécanique et des performances des structures TCC collées, en évaluant la capacité portante, la rigidité, le glissement à l'interface et la

déformation, tout en promouvant des solutions de construction innovantes et à faible empreinte carbone.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Matériaux

Adhésif : Pour la fabrication des poutres TCC, Sikadur®-53 (processus humide) et Sikadur®-330 (processus sec), deux adhésifs époxy de SIKA AG, ont été sélectionnés pour leur faible viscosité, garantissant une excellente imprégnation et adhérence (Frohn Müller et al., 2021).

Bois : Le bois lamellé-collé GL24h, largement utilisé dans la construction TCC, a été utilisé dans cette étude. Les éléments en bois étaient composés de 6 lamelles avec une section transversale de $120 \times 40 \text{ mm}^2$ et une longueur de 3,2 mètres. Les propriétés mécaniques sont détaillées dans le tableau 1.

Béton : Dans le processus de fabrication à sec des TCC, la planéité de la plaque de béton est essentielle pour assurer une liaison efficace. Les irrégularités ou imperfections peuvent affaiblir la structure composite. Bien que le sablage soit recommandé pour éliminer les huiles et les faiblesses de surface (Frohn Müller et al., 2021), il a été remplacé par un nettoyage à l'air comprimé en raison de conditions de sécurité. Dans le processus humide, la vibration du béton peut affecter l'adhérence de l'adhésif, mais le béton autoplaçant (BAP) atténue ce problème, améliorant la qualité de surface et le comportement de la connexion. Le BAP, correspondant à la classe de résistance C45/55, a été utilisé dans les deux processus. Les dalles de béton ($0,4 \times 0,06 \times 3,2 \text{ m}^3$) comprenaient un treillis d'armature ST25C pour assurer durabilité et maniabilité. Le tableau 1 résume les propriétés de résistance mécanique et de rigidité du béton utilisé dans les poutres TCC.

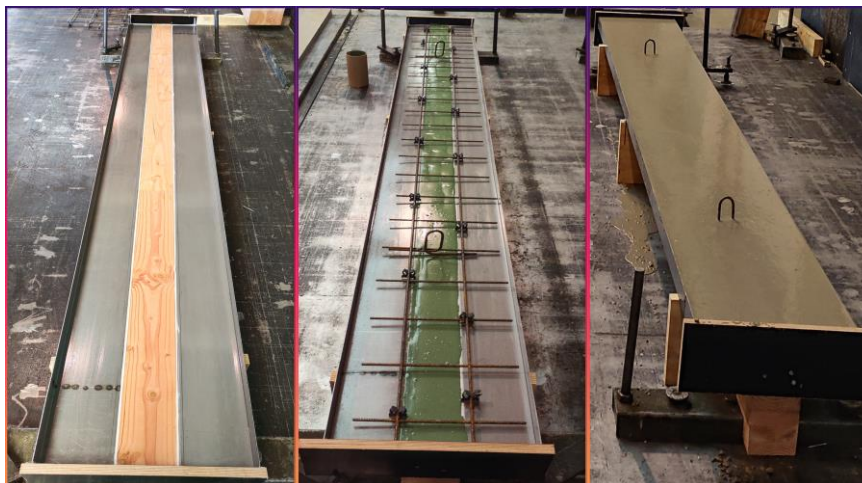


FIGURE 1. Processus humide de fabrication des poutres TCC

Fabrication

Les poutres TCC ont été fabriquées selon le processus de fabrication humide ou sec. Dans le processus humide, un béton autoplaçant a été coulé dans un coffrage soigneusement aligné sur les poutres en bois, équipé d'un treillis d'armatures ST25C, au contact d'une couche de 3 mm d'adhésif, après un temps de prise de 37 minutes. Les surfaces irrégulières du bois n'ont pas été rectifiées pour simuler des conditions réelles de fabrication en usine. Dans le processus sec, des panneaux de béton préfabriqués ont été collés sur des surfaces en bois préencollées avec une épaisseur d'adhésif contrôlée. La teneur en humidité du bois était estimée entre 12 % et 14 % au moment de l'encollage. Le béton avait au moins 14 jours de durcissement avant les essais.

TABLEAU 1. Résistance mécanique et rigidité du bois et du béton utilisés

Matériau	Propriété	Paramètres	Valeur
Bois (GL24h)	Valeur moyenne du module d'élasticité	E [MPa]	11000 ^a
	Valeur moyenne du module de cisaillement	G [MPa]	720 ^a
	Résistance moyenne en flexion	f_m [MPa]	31.50 ^b
	Résistance moyenne en traction	f_t [MPa]	21.32 ^b
	Résistance moyenne au cisaillement	f_v [MPa]	3.43 ^b
Béton (C45/55)	Valeur moyenne du module d'élasticité	E_c [MPa]	36283 ^c
	Valeur moyenne du module de cisaillement	G [MPa]	14513 ^c
	Résistance moyenne en compression	f_{cm} [MPa]	53 ^c
	Résistance moyenne en traction	f_{ctm} [MPa]	3.8 ^c
	Résistance moyenne en traction de surface	$f_{ctm,surf}$ [MPa]	2 ^d

^a Selon EN 1194

^b Calculé à partir des valeurs caractéristiques dans EN 1194, en supposant une distribution lognormale avec COV 15 (Köhler et al., 2007)

^c Selon EN 1992-1-1:2004

^d Selon Frohnmüller et al. (Frohnmüller et al., 2021)

Configuration des essais

Les poutres TCC ont été testés en flexion quatre points conformément à la norme EN 408, qui ne définit pas de procédure de chargement spécifique. Différentes méthodes ont été utilisées par les chercheurs : Negrão et al. (Negrão et al., 2010b) ont appliqué une courbe charge-temps avec un taux de charge de 98,1 N/s prescrit par la norme EN 26891, passant du contrôle en force au contrôle en déplacement. Frohnmüller et al. (Frohnmüller et al., 2021) ont utilisé des cycles de chargement quasi-statiques, tandis qu'Augeard et al. (Augeard et al., 2018) ont employé un contrôle de déplacement à 4 mm/min. Dans cette étude, l'objectif était de solliciter l'interface bois-béton jusqu'à la rupture à l'aide d'un vérin hydraulique de 200 kN appliquant une charge à un taux de 10 kN/min.

Les poutres (longueur de 3200 mm, portée de 2850 mm) ont été conçues pour positionner l'axe neutre près de l'interface de collage et respecter les états limites ultimes (ULS) et de service (SLS). Deux configurations ont été utilisées pour faire varier la distribution du moment de flexion: la première avec un espacement de 1200 mm entre les points de chargement et la seconde avec un espacement de 540 mm.

Des jauges de déformation ont été installées pour mesurer les distributions de déformation dans les composants en béton et en bois au milieu de la portée des poutres TCC. Pour quantifier le

glissement à l'interface de collage, un capteur LVDT (plage $\pm 1,5$ mm, fréquence 10 Hz) a été fixé à la surface de la poutre à l'aide d'une équerre collée à la sous face de la table en béton et positionnée à 40 cm de l'extrémité de la poutre. Un autre capteur LVDT a mesuré la flèche au milieu de la portée. Tous les capteurs étaient connectés à un dispositif Dewetron pour l'acquisition des données, comme illustré dans la Fig. 2. Cette configuration a permis un suivi précis des déformations, des glissements et des flèches pendant les essais.

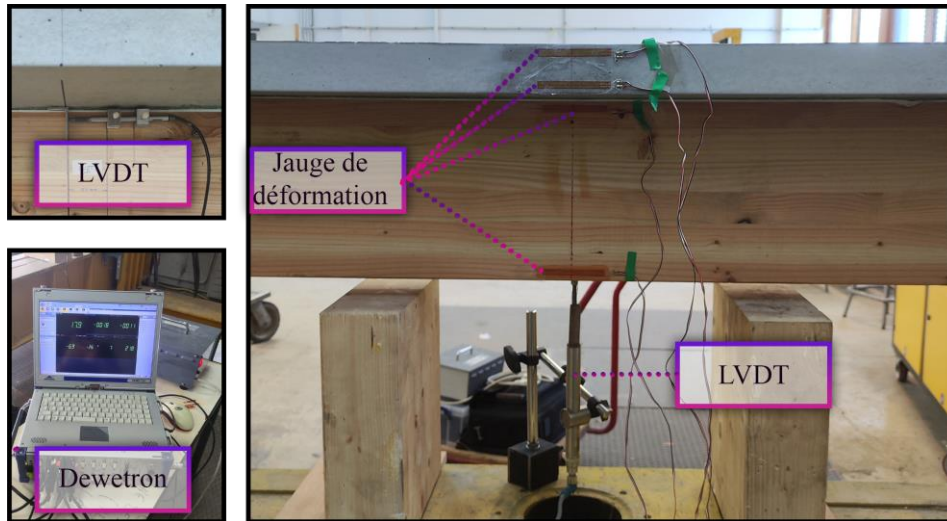


FIGURE 2. Disposition des jauges de déformation et des capteurs LVDT

La corrélation d'images numériques (DIC) a été utilisée pour mesurer les déformations de surface des spécimens TCC. Un motif de points noirs sur fond blanc (diamètre de 5,08 mm) a été appliqué à l'aide d'un kit spécialisé pour garantir la précision. Deux caméras de 5 mégapixels avec une configuration optique 2D (taille de pixel : 3,45 μm) ont enregistré les images. Les caméras étaient positionnées à 3,6 mètres des spécimens, avec une séparation de 1,3 mètre pour assurer une vue complète. Un éclairage supplémentaire a été utilisé pour améliorer la visibilité du motif de points. Le logiciel Vic-3D a analysé les déplacements et les champs de déformation, avec des tailles de sous-ensemble et de pas fixées respectivement à 19 et 6, pour correspondre au motif de points.

Résultats expérimentaux et discussion

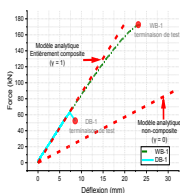
Réponse charge-flèche au milieu de la portée

Les Fig. 3 illustrent la réponse charge-flèche et le comportement en flexion des poutres TCC. Les poutres fabriquées par voie humide ou sèche ont initialement présenté des réponses charge-flèche au milieu de la portée similaires, correspondant à un comportement pleinement composite ($\gamma = 1$). Cependant, après la défaillance de l'adhérence dans les poutres fabriquées par voie sèche (par exemple, DB-1 et DB-2), leur comportement a divergé, correspondant à un comportement non composite ($\gamma = 0$). Les poutres fabriquées par voie humide ont conservé un comportement composite, certaines (par exemple, WB-2) montrant un comportement non linéaire.

La réponse charge-flèche a été divisée en deux phases : déformation élastique (première phase) et comportement non linéaire avec des dommages localisés (deuxième phase). Les poutres fabriquées par voie sèche ont subi une chute soudaine de charge et une augmentation de la flèche en raison de la défaillance de l'adhérence à l'interface bois-béton. Les poutres fabriquées par voie humide ont montré une variation linéaire de la flèche jusqu'à la capacité de charge ultime, après quoi les taux de flèche ont augmenté rapidement.

L'analyse par corrélation d'images numériques (DIC) a révélé un comportement non élastique aux extrémités des poutres sous contrainte de compression transversale, avec des différences de tassement attribuées aux conditions d'appui. Le confinement du bois par des vis aurait pu atténuer le tassement et l'écrasement du bois.

(a)



(b)

FIGURE 3. Courbes de réponse charge-flèche au milieu de la portée des poutres testées.

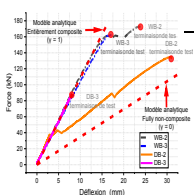
Caractéristiques de rupture

La méthode de fabrication influence de manière significative le comportement à la rupture des poutres TCC, avec des modes de rupture distincts observés entre les poutres fabriquées par voie humide ou sèche.

Toutes les poutres fabriquées par voie sèche ont présenté des modes de rupture identiques, caractérisés par une défaillance d'adhérence à l'interface entre la dalle de béton et la couche de colle. Cela a entraîné une séparation complète de la dalle de béton, conduisant à une réduction significative de la capacité portante ultime par rapport aux poutres fabriquées par voie humide et aux prédictions analytiques utilisant la méthode γ (Eurocode 5).

Les investigations ont révélé une délamination le long de l'interface collée, attribuée à des facteurs tels qu'une adhérence inadéquate, une préparation de surface insuffisante, des effets de retrait et des résidus d'huile sur la surface du béton. Des défauts précoces, en particulier aux extrémités des poutres, ont également été observés, probablement causés par une répartition inégale de la pression de collage et le retrait différentiel entre les matériaux. Ces problèmes soulignent l'importance d'un durcissement et d'une préparation de surface appropriés pour garantir l'intégrité de la liaison.

Les poutres fabriquées par voie humide ont montré des modes de rupture différents, sans défaillance d'adhérence observée. La rupture était plutôt gouvernée par des contraintes de traction et de flexion localisées dans le bois, comme l'indiquent des fissures en bas près des nœuds au milieu de la portée et des fissures de cisaillement horizontales entre les appuis et les points de chargement (Fig. 4). Ces fissures suggèrent une rupture en cisaillement et en flexion du bois, accompagnée de bruits de fracture, à 90 % de la charge maximale. Un comportement d'inclinaison



près de la charge maximale a été attribué à des imperfections géométriques initiales, indiquant que le bois avait atteint sa limite. Notamment, aucune fissure ni rupture en compression n'ont été observées dans le béton, contrastant avec les résultats d'autres études.

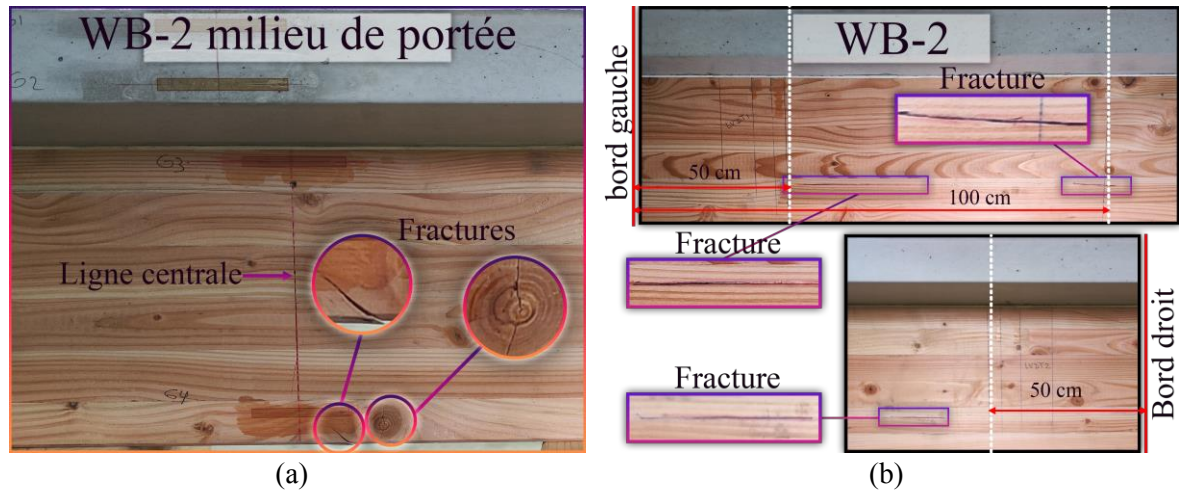


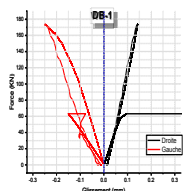
FIGURE 4. Mécanisme de rupture dans les poutres TCC fabriquées par voie humide, par exemple, WB-2 au niveau de (a) la portée médiane et (b) les extrémités de la poutre.

Glissement à l'interface

Le glissement à l'interface entre la dalle de béton et le bois influence de manière significative le comportement structural des poutres TCC. Les mesures de glissement, effectuées à 40 cm des deux extrémités à l'aide de capteurs LVDT, ont révélé des schémas de glissement semi-symétriques cohérents jusqu'à la rupture.

Les poutres fabriquées par voie humide ont montré une liaison adhésive résiliente, avec des courbes de glissement revenant à des points proches de leur position initiale après le relâchement de la charge, indiquant une défaillance minimale de l'interface. En revanche, les poutres fabriquées par voie sèche ont présenté une augmentation marquée des valeurs de glissement vers la fin des essais, indiquant fortement une défaillance de l'interface à différents niveaux de charge, comme illustré dans la Fig. 5. Cela met en évidence les performances supérieures de la liaison des poutres fabriquées par voie humide par rapport à celles fabriquées par voie sèche.

FIGURE 5. Glissement à l'interface dans la zone de cisaillement.



Répartition des déformations

Le segment de flexion pure des poutres TCC a été analysé pour étudier leur comportement sous contraintes de flexion uniquement. Des jauges de déformation ont été placées le long de la hauteur de la section au milieu de la portée pour mesurer les déformations, tandis que des modèles analytiques ont prédit la répartition des déformations. La corrélation d'images numériques (DIC) a été utilisée pour mesurer les déformations de flexion et de cisaillement à ± 1000 mm de l'axe central (Fig. 6).

Les résultats ont montré que la déformation de flexion atteignait son maximum en bas de la section transversale au milieu de la portée, tandis que la déformation de cisaillement culminait à l'axe neutre de flexion dans la zone de cisaillement entre le point de chargement et l'appui. L'augmentation de la déformation de cisaillement près des appuis a été attribuée aux charges concentrées provoquant des contraintes de cisaillement plus élevées.

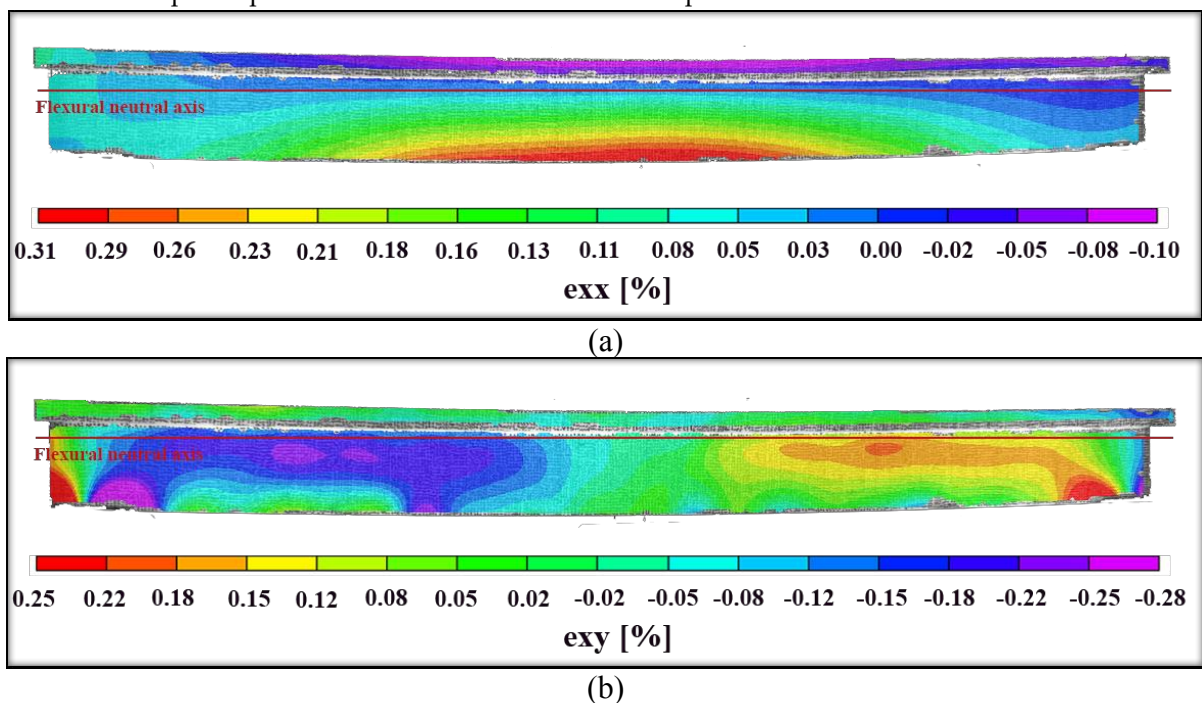


FIGURE 6. Répartition des déformations à la surface de WB-1 extraite du post-traitement DIC à un niveau de charge de 173 kN, (a) déformation de flexion, et (b) déformation de cisaillement.

Fig. 7 illustre la répartition des déformations de flexion dans les sections transversales au milieu de la portée des poutres TCC. Les résultats expérimentaux (lignes continues) s'alignent étroitement avec les prédictions analytiques (lignes pointillées), l'axe neutre étant systématiquement situé dans le bois près de l'interface bois-béton. Cet alignement indique une répartition efficace des contraintes, le bois supportant les contraintes de traction et le béton gérant les contraintes de compression, optimisant ainsi les performances de la poutre composite.

FIGURE 7. Répartition des déformations de flexion des poutres composites dans la section transversale au milieu de la portée.

Les poutres fabriquées par voie humide ont présenté des positions cohérentes de l'axe neutre tout au long de leur portée, indiquant une connexion rigide et entièrement liée. Cependant, sous des charges élevées (par exemple, >140 kN), certaines poutres (par exemple, WB-1, WB-3) ont montré des perturbations dans la position de l'axe neutre d'un côté, probablement en raison de contraintes de cisaillement élevées endommageant partiellement la connexion. Les contraintes de flexion étaient plus élevées dans les poutres avec des points de charge rapprochés (par exemple, WB-1), concentrant les contraintes sur des portées plus courtes, comparativement aux poutres avec des espacements plus larges entre les points de charge (par exemple, WB-2, WB-3).

En revanche, les poutres fabriquées par voie sèche ont montré moins de cohérence dans la position de l'axe neutre le long de leur portée, avec une variabilité significative près de leur capacité ultime. Les défauts de liaison à l'interface ont contribué à cette incohérence. Par exemple, dans DB-1, l'axe neutre s'est déplacé vers le béton à -1000 mm de l'axe central, tandis que la section droite (+1000 mm) montrait un meilleur alignement avec le milieu de la portée, suggérant des différences localisées dans le mécanisme de contribution partagée, comme illustré dans la Fig. 8.

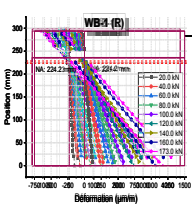
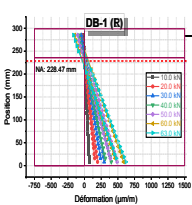


FIGURE 8. Bending strain distribution of the composite beams e.g., WB-1, and DB-1 at distances -1000 mm (L) and +1000 mm (R) from the center line.

Conclusion

Cette étude a présenté une investigation expérimentale sur des poutres TCC de 3,2 m de portée, collées par adhésif, apportant des informations précieuses sur leur comportement et leurs performances. Les conclusions suivantes ont été tirées :

1. Techniques de liaison et choix des matériaux : Les techniques de liaison et le choix des matériaux sont essentiels pour les structures TCC. Les poutres fabriquées par voie humide ont présenté une connexion adhésive fiable, assurant un comportement composite stable grâce à une liaison rigide.
2. Caractéristiques de rupture : Les méthodes de fabrication ont significativement influencé les modes de rupture. Les poutres fabriquées par voie humide ont montré un alignement cohérent de l'axe neutre et une répartition efficace des contraintes, tandis que les poutres fabriquées par voie sèche ont subi des défaillances d'adhésion dues à des connexions imparfaites, aux forces de retrait et aux résidus d'huile.
3. Préparation de surface : Le sablage est recommandé pour éliminer les résidus d'huile et rendre les surfaces rugueuses, améliorant ainsi la résistance de la liaison adhésive.
4. Analyse des déformations et du glissement : Les poutres fabriquées par voie humide ont montré un comportement composite efficace et une liaison adhésive robuste, avec des courbes de glissement revenant à leur position initiale après le relâchement de la charge. En revanche, les poutres fabriquées par voie sèche ont présenté des valeurs de glissement accrues et des écarts dans la répartition des déformations près de leur capacité ultime, indiquant une perte du comportement composite.



REFERENCES

- Augeard, E., Michel, L., Ferrier, E., 2018. Experimental and analytical study of the mechanical behavior of heterogeneous glulam–concrete beams and panels assembled by a specific treatment of wood. *Constr. Build. Mater.* 191, 812–825.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.038>
- Brunner, M., Romer, M., Schnüriger, M., 2007. Timber-concrete-composite with an adhesive connector (wet on wet process). *Mater. Struct. Constr.* 40, 119–126.
<https://doi.org/10.1617/s11527-006-9154-4>
- Ceccotti, A., 2002a. Composite concrete-timber structures. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 4, 264–275.
<https://doi.org/10.1002/pse.126>
- Ceccotti, A., 2002b. Composite concrete-timber structures. *Prog. Struct. Eng. Mater.* 4, 264–275.
<https://doi.org/10.1002/pse.126>
- Du, H., Hu, X., Xie, Z., Wang, H., 2019. Study on shear behavior of inclined cross lag screws for glulam-concrete composite beams. *Constr. Build. Mater.* 224, 132–143.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.035>
- Ferrara, G., Michel, L., Ferrier, E., 2023. Flexural behaviour of timber-concrete composite floor systems linearly supported at two edges. *Eng. Struct.* 281, 115782.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115782>
- Frohmüller, J., Fischer, J., Seim, W., 2021. Full-scale testing of adhesively bonded timber-concrete composite beams. *Mater. Struct. Constr.* 54. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01766-y>
- Fu, Q., Yan, L., Ning, T., Wang, B., Kasal, B., 2020. Interfacial bond behavior between wood chip concrete and engineered timber glued by various adhesives. *Constr. Build. Mater.* 238, 117743. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117743>
- Fu, Q., Yan, L., Thielker, N.A., Kasal, B., 2021. Effects of concrete type, concrete surface conditions and wood species on interfacial properties of adhesively-bonded timber – Concrete composite joints. *Int. J. Adhes. Adhes.* 107. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102859>
- Ghanbari Ghazijahani, T., Jiao, H., Holloway, D., 2017. Composite Timber Beams Strengthened by Steel and CFRP. *J. Compos. Constr.* 21, 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000714](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000714)
- Köhler, J., Sørensen, J.D., Faber, M.H., 2007. Probabilistic modeling of timber structures. *Struct. Saf.* 29, 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2006.07.007>
- Ling, Z., Li, Z., Lu, F., Yang, H., Zheng, W., Zhang, L., 2023. Flexural strengthening of timber-concrete composite beams using mechanically fastened and externally bonded combining mechanically fastened strengthening techniques. *J. Build. Eng.* 78, 107645.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107645>
- Miotto, J.L., Dias, A.A., 2012. Evaluation of perforated steel plates as connection in glulam-concrete composite structures. *Constr. Build. Mater.* 28, 216–223.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.045>
- Negrão, J.H.J. de O., Leitão de Oliveira, C.A., Maia de Oliveira, F.M., Cachim, P.B., 2010a. Glued

- Composite Timber-Concrete Beams. I: Interlayer Connection Specimen Tests. *J. Struct. Eng.* 136, 1236–1245. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000228](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000228)
- Negrão, J.H.J. de O., Maia de Oliveira, F.M., Leitão de Oliveira, C.A., Cachim, P.B., 2010b. Glued Composite Timber-Concrete Beams.II: Analysis and Tests of Beam Specimens. *J. Struct. Eng.* 136, 1246–1254. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000251](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000251)
- Quintana Gallo, P., Carradine, D.M., Bazaez, R., 2021. State of the art and practice of seismic-resistant hybrid timber structures. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 79, 5–28. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01556-3>
- Shehada, M., Djamaï, Z.I., Duprat, F., 2023. Investigation of the behaviour of adhesively bonded joints between timber and self-compacting concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 0, 1–22. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2276132>
- Sousseau, Y., Chaplain, M., Elachachi, S.M., Catterou, T., Faye, C., Garcia, P., 2023. Timber connection behaviour characterisation based on similitude laws. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 1–21. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2206886>
- Tannert, T., Endacott, B., Brunner, M., Vallée, T., 2017. Long-term performance of adhesively bonded timber-concrete composites. *Int. J. Adhes. Adhes.* 72, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.10.005>
- Tao, H., Yang, H., Zhang, J., Ju, G., Xu, J., Shi, B., 2022. Nonlinear finite element analysis on timber-concrete composite beams. *J. Build. Eng.* 51, 104259. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104259>
- Tesfaye Deresa, S., Xu, J., Shan, B., Ren, H., Xiao, Y., 2021. Experimental investigation on flexural behavior of full-scale glued laminated bamboo (glubam)-concrete composite beams: A case study of using recycled concrete aggregates. *Eng. Struct.* 233, 111896. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111896>
- Yeoh, David, Fragiaco, M., De Franceschi, M., Heng Boon, K., 2011. State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review. *J. Struct. Eng.* 137, 1085–1095. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000353](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000353)
- Yeoh, D., Fragiaco, M., Deam, B., 2011. Experimental behaviour of LVL-concrete composite floor beams at strength limit state. *Eng. Struct.* 33, 2697–2707. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.05.021>