

Evaluation et optimisation du comportement en vibration des planchers composite CLT-béton

THAI Minh-Van ^{1,2,*}

¹Université de Bordeaux, I2M, département GCE, Bordeaux 33000, France

²Applied Sciences Department, University of Québec in Chicoutimi, Saguenay, QC G7H 2B1, Canada

*minh-van.thai@u-bordeaux.fr

RESUME Ce travail de thèse vise à évaluer et optimiser le comportement en vibration des planchers composite CLT-béton. Dans un premier temps, le comportement d'un connecteur composite individuel a été étudié. Le connecteur à entaille renforcée a été choisi et testé par des essais de cisaillement. Trois poutres en CLT-béton à longue portée (9 m) de différents niveaux composites ont été fabriquées. Elles sont soumises aux tests expérimentaux en vibration et en flexion statique. Une calibration des modules des panneaux CLT due à l'impact des entailles est réalisée et suivie d'une optimisation multiobjective des planchers CLT-béton. Les fonctions-objectifs considérées sont le poids, l'épaisseur du plancher et son coût total. Les fonctions-contraintes sont liées à l'état limite de service (flèche et vibration) et à l'état limite ultime (flexion et cisaillement). Un front Pareto des solutions optimales potentielles a été obtenu. Elles peuvent constituer de solutions de référence à la destination des ingénieurs en vue d'améliorer leur processus de conception.

Mots-clefs CLT-béton, vibration des planchers légers, connecteur composite, optimisation multiobjective

I. INTRODUCTION

Les composites bois-béton (*timber-concrete composite - TCC*) sont utilisés pour leurs multiples avantages : bilan carbone avantageux, énergie grise réduite, bonne résistance et rigidité, performances améliorées en termes de résistance à l'incendie, en sismique, en acoustique, en confort thermique ; de facilité et rapidité de mise en œuvre, de capacités de préfabrication et de déconstruction. Récemment, les panneaux de bois lamellé-collé croisé (*cross-laminated timber - CLT*) - un produit d'ingénierie du bois relativement nouveau - a été associé à du béton pour former un composite CLT-béton (*CLT-concrete composite - CCC*) destiné à la construction de planchers. Ce système hybride bénéficie, d'une part, des avantages mentionnés ci-haut des structures TCC traditionnelles, et d'autre part, d'une faible épaisseur par rapport aux TCC. Ainsi, pour une même hauteur totale d'un bâtiment TCC de 10 étages, le bâtiment à plancher CCC gagnera un étage de plus. Les structures CCC, qui emploient l'interaction composite entre le CLT et le béton, sont aussi des solutions pour des planchers à longue portée (plus de 8 m). Cependant, ils nécessitent une

meilleure compréhension des interactions entre les différents composites dans la contribution aux performances en vibration.

La structure TCC comprend trois composants principaux : le bois, la couche de béton et les systèmes de connecteurs. Les derniers faisant objet de nombreuses études, plusieurs solutions sont proposées (Dias et al., 2010; Lukaszewska et al., 2008; Yeoh et al., 2008). De même, ces types de connecteurs pourraient être appliqués aux structures CCC sous réserve de certaines modifications mineures dues à l'épaisseur limitée du CLT. Effectivement, parmi les solutions de connecteurs proposées (Higgins et al., 2017; Jiang and Crocetti, 2019; Quang Mai et al., 2018), le connecteur à entaille est considéré comme une solution équilibrée sur le plan de la fonction à assurer et du coût.

Les dalles bois-béton utilisant les panneaux en bois massif CLT avec le système de connecteur composite ont démontré leur intérêt lors de leur utilisation dans la construction du bâtiment Design de l'Université de Massachusetts Amherst (WoodWorks, 2018). Cependant, le CCC n'est pas encore populaire sur le marché. La pratique adoptée par exemple au Québec est de construire les dalles CLT avec une chape en béton et sans les connecteurs. En France, l'utilisation des planchers CCC dans la construction est encore en développement. Le coût de construction élevé ainsi que l'impact des choix de béton-bois-connecteur dans le design reste un problème ouvert.

Les travaux de ce projet de recherche sont divisés en deux étapes : effectuer des tests expérimentaux sur les connecteurs individuels de type entaille puis sur des poutres composites utilisant ce même type de connecteur. La performance du connecteur et son impact sur la vibration des poutres sont étudiés. Ensuite, une optimisation multiobjective portant sur une conception optimisée d'un plancher CCC est réalisée en utilisant l'algorithme génétique NSGA-II.

II. EVALUATION DU COMPORTEMENT EN VIBRATION DES PLANCHERS CCC

A. Essais de cisaillement sur les connecteurs à entaille pour les planchers CCC

En mobilisant quatre variables : la longueur du bord chargé du bois (longueur du talon), la profondeur de l'entaille, la longueur de la vis et l'épaisseur de la couche de béton, la présente étude analyse leurs effets sur les performances mécaniques du connecteur à entaille CCC. Issu de cette expérimentation, l'aspect déconstructible du connecteur est clairement identifié. Le CLT utilisé pour les tests est un 5 plis de grade E1. Son taux d'humidité moyen après l'essai est de 15,7%. Le fournisseur indique que le module d'élasticité des lamelles longitudinales et de transversales sont respectivement de 9 et 11.7 GPa. Le module en compression du béton C35 employé est de 22.3 GPa selon les tests de compression sur cinq échantillons cylindriques. Pour renforcer le connecteur, deux vis entièrement filetées sont placées au milieu de l'entaille avec une gaine en plastique. La gaine sépare la vis du béton durci. Cela rend le détachement aisé une fois le test terminé et valide la déconstructibilité du plancher. L'éprouvette est de dimensions 750 x 300 mm². L'épaisseur du CLT est de 175mm et celle du béton varie de 80 à 100 mm. Une entaille a été usinée sur la surface supérieure pour chaque panneau CLT. Les configurations de test sont présentées à la FIGURE 1.

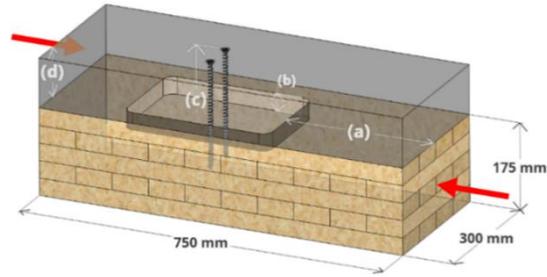


FIGURE 1. Configurations de test (en mm) et schéma d'un échantillon, avec longueur du talon (a), profondeur de l'entaille(b), longueur de vis (c) et l'épaisseur du béton (d)

B. Performance des connecteurs à entaille pour planchers composites CLT-béton

La FIGURE 2a montre l'influence de la longueur du talon sur la rigidité de cisaillement K_1 . Plus celle-ci est longue, plus la rigidité augmente. L'effet de l'excentricité pourrait être la cause de ce phénomène : la compression produite par le moment d'excentricité serait plus importante dans les échantillons dont la longueur de talon est plus longue et augmenterait la rigidité.

Une entaille plus profonde ne mène pas à un connecteur plus rigide (FIGURE 2b). Pour une entaille de 35 mm de profondeur, les lamelles de la première couche sont complètement éliminées. Ce phénomène de pic pourrait s'expliquer par son faible module d'élasticité perpendiculaire de la deuxième couche. En plus, cette couche posée dans le sens perpendiculaire à la première serait moins résistante au cisaillement.

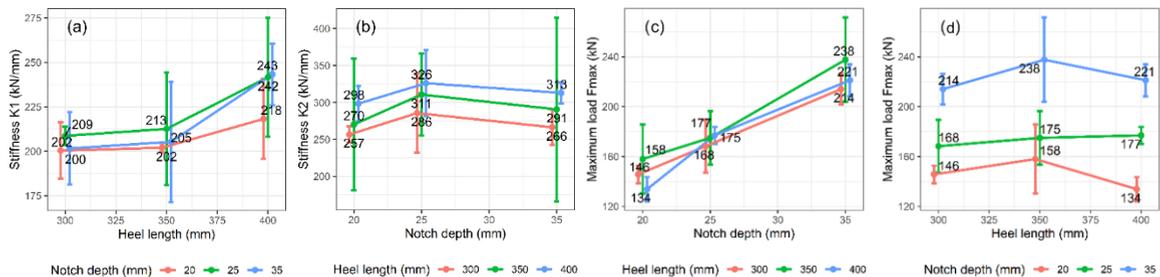


FIGURE 2. Influence de longueur du talon et de profondeur de l'entaille sur la rigidité K_1 , K_2 et la charge maximale F_{max}

La résistance du connecteur augmente d'environ 50% dans le cas de l'entaille la plus profonde (35 mm) par rapport à l'entaille peu profonde (20 mm) (FIGURE 2c). L'impact de la longueur du talon sur la charge maximale F_{max} de l'entaille n'est pas significatif (FIGURE 2d).

La longueur de vis et l'épaisseur de béton n'ont pas d'influence sur les rigidités de cisaillement K_1 , K_2 et la charge maximale F_{max} . Ce fait valide l'application de notre solution pour les planchers déconstructibles. Comme les vis ne sont pas en contact direct avec le béton, elles peuvent être facilement dévissées. La désinstallation des vis des planchers à grande échelle devrait être entérinée dans les prochaines campagnes de test.

Ces deux variables géométriques ont un impact sur les raideurs K_1 et K_2 tandis que la charge maximale F_{max} dépend seulement de la profondeur de l'entaille. La longueur de la vis et l'épaisseur

de la couche de béton n'ont pas d'effet significatif sur les performances mécaniques du connecteur. La relation entre la rigidité et la profondeur de l'entaille n'est pas linéaire. L'entaille la plus profonde (35 mm) ne permet pas d'obtenir les rigidités K_1 et K_2 les plus élevées. La rupture fragile du connecteur à entaille, quelle que soit la cause (rupture du bois ou rupture du béton), pourrait être évitée par le fait d'utiliser une entaille moins profonde et/ou une longueur de talon plus importante. La désinstallation de la vis après les tests a été effectuée avec succès. Il s'agit là d'une solution de connecteur écoresponsable pour les planchers composites par rapport à d'autres connecteurs permanents.

C. Essais de vibration sur des planchers composite CLT-béton utilisant des connecteurs à entaille

Trois poutres CCC de dimension 9×1 m (longueur \times largeur) ont été fabriquées. Le niveau composite est lié à la disposition des connecteurs à entaille sur la surface supérieure des poutres. La première poutre (poutre 1 ) ne possède pas de connecteur (non-composite). La deuxième et la troisième (poutre 2 ) et poutre 3 ) possèdent un et trois rangs de connecteurs. La portée effective des poutres est de 8,7 m. Les entailles de dimension $200 \times 200 \times 25$ mm³ (longueur \times largeur \times profondeur) ont été usinées dès la fabrication des panneaux. Les connecteurs individuels ont été testés dans la première étape pour déterminer leur rigidité et leur résistance.



FIGURE 3. Les panneaux CLT et le connecteur à entaille avant le coulage du béton.

D. Modèle analytique pour la fréquence naturelle des poutres CCC et la comparaison avec les résultats expérimentaux

Les fréquences naturelles sont déterminées par l'expression analytique proposée par Wu et al. (2007). Sur la base de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli, la solution « exacte » de la fréquence pour la section composite avec deux couches de matériaux différents peut être obtenue:

$$f_n = \frac{n^2 \pi}{2} \sqrt{\frac{EI_{eff}}{mL^4}}, \quad EI_{eff} = \overline{EI} \left[1 - \frac{\beta^2 - 1}{\frac{\tilde{\alpha}^2}{(n\pi)^2} + \beta^2} \right] \quad (1,2)$$

où \overline{EI} est la rigidité en flexion d'une poutre composite parfaitement rigide, β est un paramètre lié à la géométrie et au module d'élasticité des matériaux utilisés, $\tilde{\alpha}$ est un paramètre lié à la rigidité du

connecteur de cisaillement, m et L sont la masse et la longueur de la poutre, k désigne la rigidité au cisaillement du connecteur, s est l'espacement du connecteur.

La comparaison expériences - modèle est réalisée sur la base des résultats des tests de poutres CCC. Le TABLE 1 présente les caractéristiques du panneau et du connecteur CLT ainsi que les fréquences naturelles issues des essais expérimentaux et du modèle analytique. La différence relative normalisée de fréquence NRFD (en %) a été définie comme :

$$NRFD = \frac{|f_{\text{experiment}} - f_{\text{modele}}|}{f_{\text{experiment}}} \quad (3)$$

Comme on peut le voir à la TABLE 1, les poutres 2 et 3 ont une fréquence fondamentale d'environ 5,3 à 5,4 Hz et l'amortissement d'environ 1%. Ils sont de 5,0 Hz et de 2% pour la poutre non composite. L'ajout de la couche de béton a considérablement augmenté les performances des panneaux CLT. La fréquence calculée par la méthode de Wu et al. (2007) et les résultats expérimentaux étaient en bon accord dans le cas des poutres 2 et 3. Le modèle analytique ne peut pas capturer la fréquence fondamentale de la poutre 1. Cela s'explique par le fait que d'autres phénomènes peuvent se produire, tels que le frottement à l'interface et les propriétés visqueuses élastiques du bois pendant la vibration.

TABLE 1. Comparaison des fréquences naturelles entre les expériences et le modèle de Wu et al.

Beams	CLT E_b (GPa)	Connector k (kN/mm)	f_1 (Hz)		f_2 (Hz)		NRFD f_1 (%)		NRFD f_2 (%)	
			Exp.	Wu	Exp.	Wu	Exp-Wu	Exp-Wu	Exp-Wu	Exp-Wu
1 	9.2	0	5,0	2,9	16	12	42		28	
2 	9.0	334	5,3	5,0	18	17	4		7	
3 	8.5	1001	5,4	5,3	19	19	1		-4	

Le modèle analytique peut être utilisé dans le cadre d'une mise en œuvre rapide pour évaluer les fréquences naturelles. Le seul inconvénient d'un modèle simplifié est qu'il ne peut pas décrire localement l'influence du connecteur à entaille (profondeur, longueur du talon, distance entre les connecteurs).

III. OPTIMISATION MULTI-OBJECTIVE DES PLANCHERS COMPOSITE CLT-BETON UTILISANT L'ALGORITHME GENETIQUE NSGA-II

A. Formulation de l'optimisation

Les objectifs de cette optimisation consistent à minimiser le poids total, l'épaisseur totale et le coût du plancher. La fonction de coût comprend le coût des matériaux et le coût de la mise en place. La fonction d'épaisseur du plancher est la somme de l'épaisseur du CLT, du béton, de la couche isolante et du panneau de gypse coupe-feu. La fonction du poids total est calculée comme le poids par unité de surface. Ces objectifs sont parfois opposés entre eux. L'utilisation de matériaux de qualité supérieure réduirait le poids et l'épaisseur mais ils entraînent un coût plus élevé.

La conception a été réalisée pour une bande CCC de 1 m en ce qui concerne les variables d'optimisation. Sur la base des résultats expérimentaux, nous pourrions disposer d'un maximum

de 3 rangs du connecteur à entaille dans la largeur de 1 m. Un béton normal a été choisi pour la conception, six classes de C20 à C45 sont fournies. L'épaisseur de la couche de béton peut aller de 60 mm à 180 mm, avec un saut de 5 mm. Le CLT du fabricant local a été choisi pour la conception. Trois classes de CLT E1 à E3 avec des caractéristiques définies (module d'élasticité, résistance des tôles, densité, coût) sont retenues. L'épaisseur du CLT est quant à elle comprise entre 89 mm et 244 mm, avec huit configurations prédéfinies. La rigidité en flexion dépend de la configuration du CLT et de la disposition des connecteurs. La surface inférieure du plancher est protégée par un panneau de gypse (retardateur de flamme). La couche d'isolation entre le CLT et le béton pourrait être adoptée pour améliorer la rigidité en flexion effective.

La résistance de la structure, le confort vibratoire et les contraintes liées au feu sanctionnent chaque conception trouvée par l'algorithme génétique. Les contraintes ELU et ELS adoptées ont été calculées selon la norme canadienne de conception du bois CSA-O86 : 2014 (Canadian Standards Association, 2017) et la norme de conception du béton CSA-A23 : 2014 (Canadian Standards Association, 2014). La rigidité en flexion effective est calculée selon la méthode Gamma (EN 1995-1-1, 2002). Pour les contraintes SLS, la flèche d'une poutre simple sous la charge distribuée à court et à long terme a été calculée. Les contraintes ULS sont la résistance au moment de flexion, la résistance au cisaillement de la section composite et la résistance au cisaillement horizontal des connecteurs critiques.

L'algorithme génétique NSGA-II (Deb et al., 2002) a été utilisé pour l'optimisation. Il est disponible sous les formes de packages open sources implémentées en langage Python.

B. Résultat et discussion

La FIGURE 4 présente les solutions du front Pareto pour le cas de portée de 8 m et de 10 m. Les solutions de même couleur sont "équivalents au sens du front de Pareto".

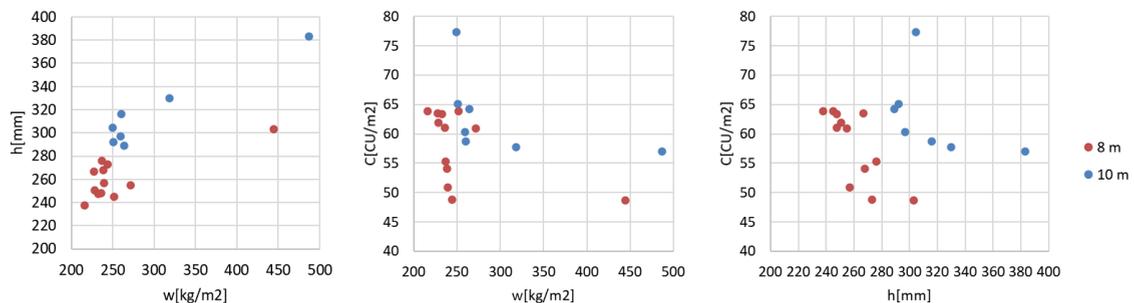


FIGURE 4. Front Pareto of the solutions for 8 m span floor 10 m span floor

Les contraintes de la flèche à long terme, de vibration et de résistance à la flexion au cas d'incendie sont les plus exigeantes avec leurs hauts ratios de chargement par résistance. Les solutions obtenues ont tendance à augmenter la classe du béton au lieu de son épaisseur.

Deux groupes de solutions se sont formés sur la base de l'épaisseur de CLT (FIGURE 5). Les solutions utilisant des panneaux CLT moins épais ont une performance limitée en service et à un coût élevé. Les solutions ayant les panneaux CLT 7 couches sont les plus compétitifs en termes de coût. Pour la condition de portée de 10 m (FIGURE 5b), sept solutions possibles ont été trouvées.

Lorsque la portée devient plus longue, l'optimisation a opté pour les panneaux CLT les plus résistants possible (213 mm et 245 mm).

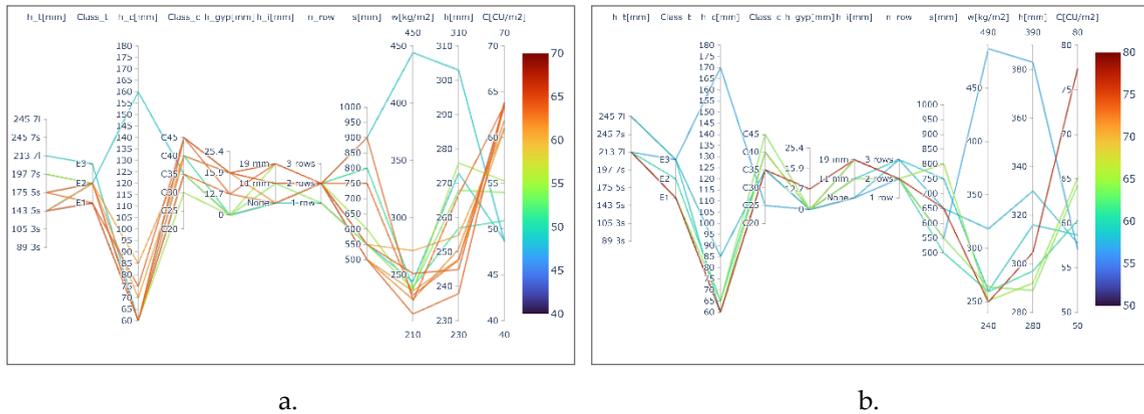


FIGURE 5. Détails de variable des solutions pour le plancher de 8m et de 10 m de portée.

L'optimisation multiobjectif basée sur des exigences structurelles et économiques réalisée pour des systèmes de plancher CCC propose des solutions optimisées et peut servir comme point de départ aux ingénieurs pour développer des conceptions délicates. Les coûts élémentaires (du bois, de la mise en place, ...) non montrés dans cette communication ont une influence évidente sur les solutions optimales.

IV. CONCLUSION

Cette étude comprend deux volets en lien avec les structures de type plancher CCC. Le connecteur composite à entaille renforcé par deux vis a été étudié et employé pour les poutres composites à longue portée. Les résultats expérimentaux constituent une base pour l'optimisation multiobjectif sur les planchers CCC.

- La performance du connecteur à entaille dépend fortement de la profondeur de l'entaille. Tandis que la résistance maximale au cisaillement est proportionnelle à cette profondeur, la rigidité de l'entaille la plus profonde n'est pas la plus élevée.
- Les autres variables géométriques telles que l'épaisseur du béton, longueur de vis et longueur du talon n'influencent pas la performance, c.-à-d., la rigidité et la résistance au cisaillement
- Les poutres CCC utilisant un connecteur à entaille atteignent un niveau de composite important. Pourtant, l'usinage un nombre important de l'entaille sur la surface des poutres CLT mènerait à une réduction de la rigidité et résistance de la poutre composite CCC.
- Les expressions analytiques permettent donner une prédiction assez exacte de la fréquence fondamentale des poutres CCC.
- L'optimisation multi objective des planchers CCC est une approche très utile lors des phases préliminaires de conception.

REFERENCES

- Canadian Standards Association, 2017. CSA-O86 2014: Engineering design in wood.
- Canadian Standards Association, 2014. CSA-A23.3-14: Design of concrete structures.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. Evol. Computat.* 6, 182–197.
<https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Dias, A.M.P.G., Cruz, H.M.P., Lopes, S.M.R., van de Kuilen, J.W., 2010. Stiffness of dowel-type fasteners in timber–concrete joints. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* 163, 257–266. <https://doi.org/10.1680/stbu.2010.163.4.257>
- EN 1995-1-1, 2002. EN 1995-1-1. Eurocode - Design of timber structures - Part 1-1. General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN).
- Higgins, C., Barbosa, A.R., Blank, C., 2017. Structural Tests of Concrete Composite-Cross-Laminated Timber Floors (Final Report No. Report No. 17-01). School of Civil and Construction Engineering, Corvallis, OR 97331.
- Jiang, Y., Crocetti, R., 2019. CLT-concrete composite floors with notched shear connectors. *Construction and Building Materials* 195, 127–139.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.066>
- Lukaszewska, E., Johnsson, H., Fragiaco, M., 2008. Performance of connections for prefabricated timber–concrete composite floors. *Mater Struct* 41, 1533–1550.
<https://doi.org/10.1617/s11527-007-9346-6>
- Quang Mai, K., Park, A., Lee, K., 2018. Experimental and numerical performance of shear connections in CLT–concrete composite floor. *Materials and Structures* 51.
<https://doi.org/10.1617/s11527-018-1202-3>
- WoodWorks, 2018. Case study: Inspiration through Innovation At UMass Amherst, an Exposed Mass Timber Structure is a Teaching Tool. woodworks, <http://www.woodworks.org>.
- Wu, Y.-F., Xu, R., Chen, W., 2007. Free vibrations of the partial-interaction composite members with axial force. *Journal of Sound and Vibration* 299, 1074–1093.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.08.008>
- Yeoh, D., Fragiaco, M., Aldi, P., Mazzilli, M., Kuhlmann, U., 2008. Performance of notched coach screw connection for timber-concrete composite floor system. WCTE 2008.