

Comportement thermomécanique des panneaux de façades bois/béton

Roufaïda ASSAL¹, Andrea ARMONICO¹, Laurent MICHEL¹, Emmanuel FERRIER¹.

¹ Université de Lyon, Université Lyon 1, LMC2-EA7427, F-69622 Villeurbanne, France

RESUME : La réalisation d'un panneau bois-béton par collage est un concept innovant car il va permettre à la fois de développer un système à faible impact environnemental mais aussi d'allier les qualités respectives des deux matériaux, là où ils sont les plus efficaces. Dans le cas des planchers, les conditions d'exposition sont connues et stables au cours de la vie de l'ouvrage. La question soulevée est qu'en est-il si durant leur durée de vie, les panneaux de façades sont exposés à des gradients de température importants entre l'intrados et l'extrados.

L'objectif de ce travail est donc d'étudier le comportement thermomécanique des panneaux de façade bois -béton collé. Dans un premier temps une étude expérimentale est exposée présentant des méthodes de mesure et d'évaluation de la rigidité d'un assemblage en utilisant la technique de la corrélation d'images et à travers des essais push out. Ensuite des résultats d'essais à plus grande échelle sont expérimentés et comparés à une modélisation analytique et par éléments finis pour vérifier le comportement thermomécanique de la structure.

Mots-clefs, Façades bois-béton collées, comportement thermomécanique, corrélation d'images, essai push out, modélisation.

I. INTRODUCTION

Les techniques de collage par adhésif structural sont de plus en plus utilisées dans le domaine de la construction pour remplacer les méthodes d'assemblage traditionnelles telles que les boulons, les vis et les clous. Les adhésifs offrent de nombreux avantages par rapport aux connecteurs mécaniques, tels que la suppression de zones de contrainte concentrées, une meilleure résistance aux sollicitations et une répartition plus homogène des forces. L'utilisation d'adhésifs permet également de réduire les contraintes dans les joints en augmentant la surface de contact entre les pièces, cela améliore la résistance globale de la structure et permet de réduire les risques de déformation et de fissuration. Cependant, il est important de noter que les adhésifs utilisés dans le génie civil sont soumis aux conditions climatiques et peuvent subir des altérations au fil du temps. Les propriétés mécaniques et physiques des adhésifs peuvent être affectées par l'humidité, la chaleur ou le froid, et cela peut entraîner une perte d'adhérence ou une fragilisation de l'assemblage. Il y a des recherches qui se sont concentrées sur l'analyse de la résistance et de la durabilité des collages, notamment en étudiant les effets des cycles de charges thermiques et hygrométriques sur les adhésifs et sur les joints collés

Plusieurs études ont montré que le fluage des joints augmente avec la température et l'humidité, et que la résistance à la traction et le module diminuent avec leurs augmentations, entraînant des

ruptures principalement dans l'adhésif. L'étude (Nguyen, 2008) a montré que le vieillissement hygrothermique pendant 2 mois augmentait la force à la rupture des éprouvettes de 27,5%. D'autres études, comme celles de (Amidi & Wang, 2016) et (Lai, et al., 2010) ont montré l'influence marquée de la température sur les performances des assemblages collés. La fatigue de ce type de connexion a aussi été validée en utilisant des conditions hygrométriques et thermiques selon les études de (Pham, 2007) et (Le Roy, et al., 2009). Il y a des travaux qui ont également été menés sur la durabilité des assemblages bois-béton sous chargements environnementaux, comme les travaux de (Loulou, et al., 2011) qui ont suggéré que les changements de la teneur en eau peuvent causer des dommages aux différents matériaux qui composent la structure. Le but de cette étude est d'examiner le comportement thermomécanique des assemblages collés en utilisant des essais mécaniques de type push-out pour évaluer les propriétés d'adhérence. Pour cela, une technique de corrélation d'image est utilisée pour caractériser l'adhérence des joints collés, et les résultats ont été simulés à l'aide de modélisations par éléments finis à petite échelle. Ensuite, des modélisations analytiques et des simulations par éléments finis à grande échelle ont été effectuées pour étudier le comportement des façades bois-béton collées.

II. MATERIAUX ET ESSAIS

Les spécimens sont fabriqués par l'entreprise CRUARD dans son intégralité et ensuite livrée au laboratoire pour les essais expérimentaux. Au total, seize éprouvettes testées en statique. Les spécimens sont composés d'une partie bois GL24h d'une section de 300 mm x 80 mm, collés à un élément de béton de classe C40 ayant une section transversale de 300 mm x 80 mm. La résine utilisée est Eponal 371 (EP371) fournie par la société BOSTIK. Elle est connue pour sa forte adhérence et sa résistance à la rupture. Elle est souvent employée dans les applications de collage qui nécessitent une résistance élevée à la traction et à la flexion. Deux séries de spécimens ont été testées avec différents types de protocole de fabrication. La série 1 présente un plan de collage incliné entre le bois et le béton. La série 2 présente un plan de collage non incliné. Pour ces deux séries, une mise en œuvre consiste à vibrer et tremper la partie bois dans le béton, la seconde consiste à ajouter un pré-trempage et une vibration supplémentaire. La technique de collage est celle proposée dans les travaux de (Augeard, et al., 2018)(tableau1).

TABLEAU 1. Protocoles de fabrication des éprouvettes testés

Séries testés	Protocole de fabrication	Nombre
Série 1	Vibration1, trempage, pente	4
	Vibration1, Pré trempage, trempage, vibration 2, pente	4
Série 2	Vibration1, trempage, sans pente	4
	Vibration1, trempage, Pré trempage, vibration 2, sans pente	4

Les essais ont été réalisés à l'aide d'une presse de compression d'une capacité de 1000 kN. La caractérisation de l'adhérence entre le bois et le béton est faite par un essai push-out identifié par la

norme NF EN 408. Cet essai est un moyen de tester la qualité et la fiabilité de la jonction collée entre le bois et le béton. Il consiste à appliquer une charge sur l'extrémité de l'éprouvette jusqu'à ce que la jonction collée cède, en mesurant les forces appliquées et les déformations subies par l'éprouvette pendant l'essai. Les résultats de cet essai sont utilisés pour évaluer la qualité de la jonction collée et pour déterminer si elle est appropriée pour son utilisation prévue dans une structure donnée. L'essai permet de définir la charge à rupture et le glissement entre les deux matériaux pour des raisons de représentativité au niveau de la largeur de poutre notamment, les dimensions des spécimens imposent un angle de 25° entre la génératrice de l'éprouvette et l'axe de l'effort. La rigidité d'un système d'assemblage est déterminée par son module de glissement, qui quantifie la résistance offerte contre le déplacement de la surface de contact entre le béton et le bois lorsqu'une charge est appliquée à la structure.

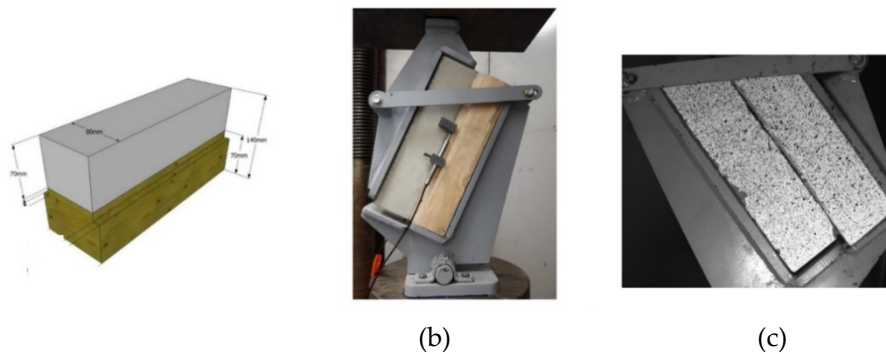


FIGURE 1. a : dimensions du spécimens push-out, b : Principe de l'essai d'adhérence Push-out, c : Mesure du déplacement et de la déformation par l'outil de la corrélation d'image

Parmi les méthodes de mesure optique, la corrélation d'images numériques (DIC) déjà utilisé dans les travaux de (Armonico, 2022) permet de mesurer les champs de déformation à la surface d'un échantillon. La rigidité d'une éprouvette collée en bois béton est analysée en utilisant cette technique tout en mesurant la déformation de l'éprouvette sous charge. Le dispositif de mesure est présenté à la Figure. 1.c. Les échantillons ont été marqués avec une peinture speckle noire. La surface est observée avec une caméra haute résolution (2048 x 2048 pixels), et les images sont enregistrées tout au long de l'essai. L'analyse des champs de déplacement et de déformation par le logiciel interne GOM correlate a fourni des informations, en particulier à l'interface bois/béton. Les valeurs de déformation locales sont caractérisées par une couleur spécifique et sont moyennées sur un domaine entourant le point considéré. Ces derniers vont permettre le calcul du coefficient de glissement de l'assemblage suivant deux méthodes de mesure pour un champs de déplacement et de déformation au niveau du joint de colle.

III. MODELISATION ANALYTIQUE

Il existe différents modèles analytiques qui permettent de calculer le glissement et la contrainte de cisaillement dans un panneau de façade en bois-béton collé sous chargement thermique. Ces modèles sont généralement basés sur des hypothèses simplificatrices et des équations analytiques qui permettent de déterminer les déformations dues à la flexion thermique des panneaux et les contraintes dans les différentes parties de la structure. Cette déformation est causée par l'expansion

et contraction du bois et du béton du panneau lorsqu'il est soumis à des variations de température. Ces modèles prennent en considération les propriétés matérielles du panneau et des variations de température auxquelles il est soumis. La méthode analytique développée dans cette section est basée sur le modèle et les hypothèses initialement mis en œuvre dans les travaux de (Granhölm, 1949). La méthode combine un tel modèle avec l'approche employée dans les travaux de (Holmberg & Plem, 1965) et étend l'application du modèle à des panneaux de différentes tailles de couche soumises à une flexion thermique avec des propriétés de béton et du bois. Les hypothèses associées aux analyses sont les suivantes :

- Les déplacements et les rotations sont limités
- La température sur les parois est constante de sorte que gradient thermique est supposé agir sur une seule couche.
- La méthode ne prend pas en compte le retrait du béton
- Pour information, le milieu est à $x = 0$ et les supports sont à $x = l/2$ et $x = -l/2$.
- On considère qu'il y a une adhérence parfaite entre les matériaux

Le panneau subira des déformations et des contraintes hors du plan, dont l'ampleur dépendra de la rigidité du milieu de connexion et des dimensions de l'élément, L'intérêt de cet article est de trouver la contrainte du cisaillement τ due à ce chargement thermique. Il est exprimé comme une combinaison du glissement de flexion, de la courbure du panneau, et du glissement axial qui se rapporte à la déformation causée par la force axiale interne du au chargement thermique. La variable b est utilisé pour représenter la largeur du panneau ($\sigma_{Flexion}$), et la contrainte normale (σ_{axial}). Notez que les indices c et b représentent la couche béton et bois, respectivement. Cette méthode de calcul est déjà largement utilisée par de nombreux auteurs pour les structures de génie civil (Pozo-Lora & Maguire, 2020).

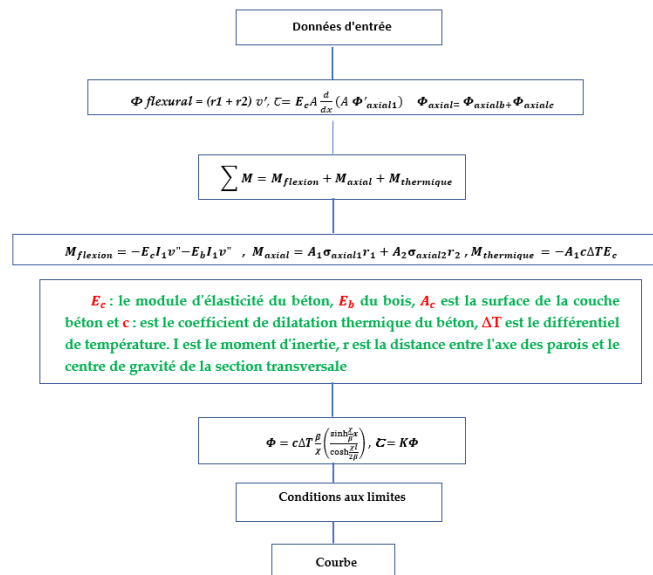


FIGURE 2. Organigramme pour la modélisation analytique

TABLEAU 2. Paramètres mécaniques du béton et du bois

Propriétés mécaniques	Béton	Bois
E[MPa]	32116	11700
μ	0.2	0.3

IV. MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS

A. Modélisation de l'essai push-out

Dans cette partie une modélisation par élément fini de l'essai push out a été faite dans le but de reproduire le plus fidèlement possible les observations expérimentales. Comme évoqué précédemment l'objectif de ce travail est la caractérisation de l'adhérence c'est pour cela que dans cette section une rupture adhésive était modélisée sur le logiciel Abaqus. Le modèle utilisé et le modèle de zone cohésive qui permet de présenter les ruptures adhésives ou les décollements qui se produisent au niveau de l'interface entre deux matériaux. Ce modèle introduit des éléments cohésifs de très faible épaisseur avec une loi d'interaction entre les nœuds des deux matériaux initialement confondus. Pour ce faire, il est important de sélectionner les paramètres de simulation qui sont les plus adaptés aux observations. Le comportement mécanique de la colle était déterminé par des essais de traction réalisés à une vitesse de 1 mm/min. Les valeurs choisies sont la caractéristique mécanique à la traction de la fiche technique de l'adhésif Eponal 371 (EP371) (Tableau3). Le maillage est type C3D8R mieux adapté pour modéliser des géométries courbes ou des déformations importantes.

$$, K_n = \frac{E}{e} \quad K_s = K_t = \frac{E}{2e(1+\nu)}$$

TABLEAU 3. Paramètre des éléments interface

E [MPa]	K_n [MPa]	K_t [MPa]	K_s [MPa]	B_{max} [MPa]	E [mm]	Allongement
3500 ± 500	3500	1346	1346	32 ± 3	1	1.2 + 0,2 %

TABLEAU 4. Paramètres élastiques du GL24h (Guitard & El Amri, 1987)

E11	E22	E33	G12	G13	G23	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}	ρ [kg/m ³]
11700	915	571	772	713	76	0.382	0.430	0.487	415

B. Modélisation thermomécanique du panneau

La modélisation thermomécanique consiste à prendre en compte les effets de la température sur le comportement mécanique d'une structure. Des analyses thermomécaniques de couplage thermique-mécanique ont été modélisées sur Abaqus. Les propriétés thermiques et mécaniques du bois et du béton, les conditions aux limites thermiques et mécaniques ont été implantées (tableau 5). Le maillage du modèle est du type C3D8T (élément de volume hexaédrique à 8 nœuds et à 3 degrés de liberté) a été utilisé pour modéliser des structures en 3 dimensions pour le couplage

thermique-mécanique. La conductance thermique de la colle a aussi été pris en considération et le maillage a été raffiné au niveau du contact entre le bois et béton

TABLEAU 5. Propriétés thermiques et mécaniques du bois et du béton

Propriétés	GL24h	Béton
α	$55 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$
c [j/ Kg C°]	2400	945.3
ρ [Kg/m ³]	415	2350
λ [W, m ⁻¹ K ⁻¹]	0.14	1.94

V. OBSERVATIONS ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

C. Résultats des essais push out

Le comportement statique des éprouvettes testées est linéaire jusqu'à rupture, la résistance au cisaillement des assemblages collés est relativement importante à cause de la rigidité élevée de la connexion, aucune différence de résistance n'a été observé entre les deux séries, la rupture est du type fragile dans les plans du collage cela peut être dû à la limitation du domaine plastique de l'adhésif, le tableau ci-dessous résume les valeurs moyennes des contraintes de cisaillement obtenues par l'essai push out

TABLEAU 6. Valeurs moyennes des contraintes de cisaillement ζ

Séries	F Moyenne [kN]	ζ Moyenne [MPa]
1	149.05	8.2
2	149.45	8.3

Il a été possible de déterminer la pente de la courbe charge glissement qui représente la raideur K_t [kN/mm] de l'assemblage bois-béton, le tableau suivant présente les raideurs initiales pour l'ensemble des cinq spécimens

TABLEAU 7. Valeurs de coefficient de rigidités transversales

	Raideur moyenne K_t [kN/mm]
Séries testées	3619

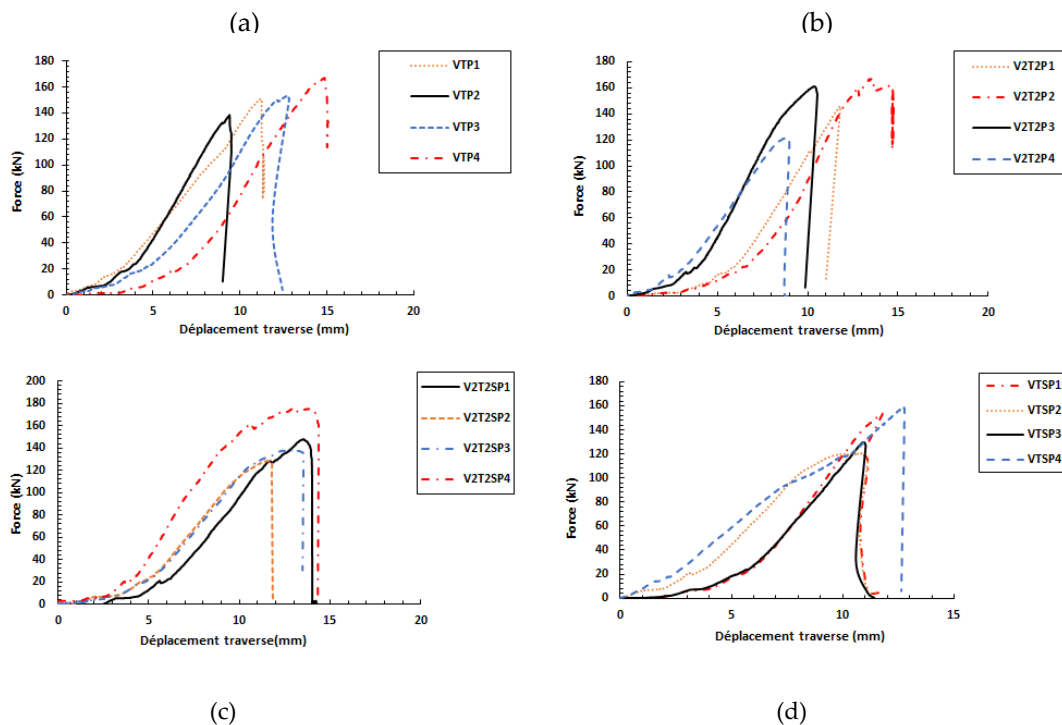


FIGURE 3. Résultats des essais push out, a : Vibration1, trempage, pente, b : Vibration1, Pré trempage, trempage, vibration 2 pente, c : Vibration1, trempage, Pré trempage, vibration 2, sans pente d : Vibration1, trempage, sans pente

D. Résultats de la corrélation d'image

Dans cette étude, le coefficient de glissement transversal K_t a été estimé en utilisant la technique de corrélation d'image et deux méthodes différentes. La première méthode consiste à calculer le glissement relatif entre le bois et le béton en utilisant la relation $K_t = \Delta F / \Delta \delta$ (Figure 4.a). La deuxième méthode consiste à suivre l'évolution de la déformation au niveau du joint collé en utilisant la pente de la courbe force-déformation (Figure4.b).

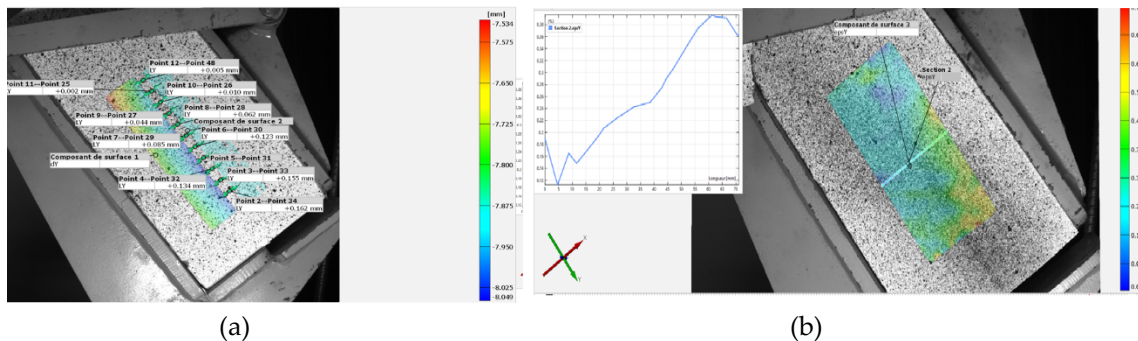


FIGURE 4. Calcul de la rigidité suivant a : méthode1, b : méthode2

TABLEAU 8. Coefficient de rigidité transversal calculé par l'outil de la corrélation d'image

Méthodes	Rigidité K_t [kN/mm]	Ecart entre les deux méthodes [%]
1	3611	47
2	2453	

Les résultats obtenus dans cette étude ont mis en évidence une rigidité accrue pour la première méthode de calcul du coefficient de glissement transversal K_t par rapport à la deuxième méthode. Cette caractéristique est particulièrement importante pour les applications nécessitant une résistance élevée à la déformation, comme les structures porteuses. En outre ces résultats ont bien montrés que la première méthode est efficace pour une évaluation rigoureuse de l'assemblage et des propriétés d'adhérence pour des applications soumises à des sollicitations importantes.

E. Résultats de la Modélisation de l'essai push-out

Les résultats de la modélisation de l'essai pushout (Figure 5) donnent des résultats proches à ceux observés expérimentalement, cela signifie que le modèle de zone cohésive utilisé pour simuler l'interface est valide et peut reproduire les phénomènes observés lors de l'essai expérimental. L'estimation de l'évolution de la contrainte de cisaillement a été faite en comparant les résultats obtenus par simulation et DIC (corrélation d'image). À partir de la modélisation (figure 5.a) la contrainte de cisaillement a été estimée à une valeur moyenne de 10.6 MPa par rapport à celle par rapport à celle issue de la DIC ou elle a atténué 8.4 MPa. Il est important de noter que notre modèle n'a pas pris en compte tous les effets de bords qui pourraient se produire lors de l'essai et qui pourraient influencer les résultats obtenus par la modélisation.

TABLEAU 9. Comparaison entre résultat expérimental et modélisation par éléments finis

Résultats	Contrainte de cisaillement τ [MPa]
Modélisation par éléments finis	10.6
Essai de cisaillement Push out	8.4

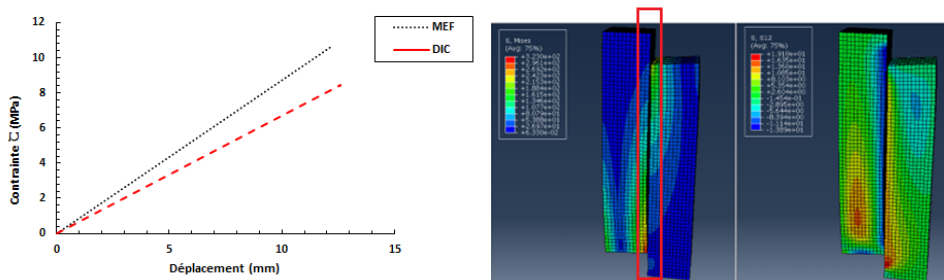


FIGURE 5. Modélisation de l'essai push out sur Abaqus

F. Résultats de la Modélisation thermomécanique des panneaux

La figure 6 présente l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la longueur du panneau. Pour un gradient de température $\Delta T=50$, le panneau subit une flexion thermique pour une contrainte de cisaillement estimé de 0.52 MPa. Il est possible de voir que lorsque la longueur du panneau augmente, la contrainte de cisaillement augmente également et la résistance du matériau à la flexion thermique diminue. Cela peut être expliqué par le fait que lorsque les températures à la surface d'un matériau sont différentes une expansion ou un retrait des différentes parties du matériau ce produit, et ce qui peut entraîner des forces de traction et de compression pouvant endommager le matériau ou altérer les performances de la structure.

La modélisation FEM d'un panneau a donné des valeurs de contraintes de cisaillement plus importantes que celles trouvées analytiquement. Cela peut être expliqué par le fait que les modèles analytiques simplifiés ne sont pas capables de reproduire avec précision les résultats expérimentaux, et qu'il est nécessaire de prendre en compte des effets tels que la viscoélasticité et la relaxation pour une meilleure description du comportement thermomécanique des assemblages collés. La figure 6.b montre que le panneau subit une flexion thermique.

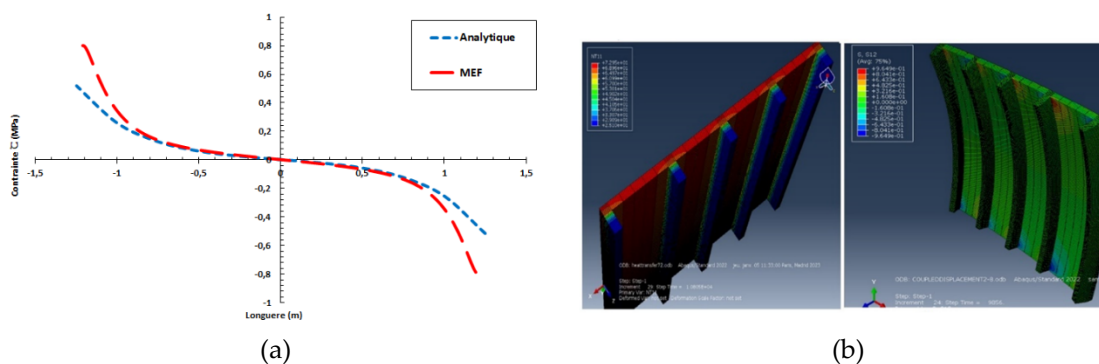


FIGURE 6. a : Evolution de la Contrainte de cisaillement analytique et par MEF pour un gradient de température de 50 °C, b : Evolutions de la température à l'intérieur du panneau et contrainte de cisaillement τ ,

TABLEAU 10. Comparaison entre résultat expérimental et modélisation par éléments finis du panneau

Résultats	Contrainte de cisaillement τ [MPa]
Modélisation par éléments finis	0.72
Modélisation analytique	0.52

VI. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- Les assemblages collés en bois-béton ont une rigidité élevée et une résistance au cisaillement relativement importante. Cela signifie que ces assemblages sont capables de résister à des forces de cisaillement sans se déformer de manière significative. La rigidité élevée est donnée comme une raison pour cette résistance élevée au cisaillement, cela implique que les assemblages ont une forte capacité à maintenir leur forme et leur alignement sous des charges appliqués.
- La simulation de l'essai push out à produire les mêmes résultats que ceux observés lors de l'essai expérimental, ce qui indique que le modèle de zone cohésive utilisé pour reproduire l'interface est valide. On a comparé les résultats obtenus par simulation et corrélation d'image pour évaluer l'évolution de la contrainte de cisaillement, l'écart entre les deux est estimé de 26%.
- La résistance des structures soumises à des variations de température dépend fortement du paramètre de contrainte de cisaillement, en outre l'effet de flexion thermique est un aspect crucial à considérer lors de la conception de structures exposées à des températures changeantes.
- Les calculs FEM du panneau ont indiqué des contraintes de cisaillement supérieures à celles déterminées par une analyse mathématique, en comparant les deux modèles, les résultats montrent une bonne corrélation avec un écart de 38% ce qui permet par la suite de valider le modèle

REFERENCES

S. Amidi, & J. Wang. (2016). Subcritical debonding of FRP-to-concrete bonded interface under synergistic effect of load, moisture, and temperature. *Mechanics of Materials*, 92, 80–93.

Andrea. (2022). Comportement d'adhérence de poutres renforcées avec polymère renforcé de fibres (PRF) avec mesure par fibre optique distribuée. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40.

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.

H. Granholm. (1949). Om sammansatta balkar och pelare med särskild hänsyn till spikade träkonstruktioner: On composite beams and columns with particular regard to nailed timber structures. s.l.: *Gumpert*.

D. Guitard, & F. El Amri. (1987). Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. s.l., s.n., 335–358.

A. Holmberg & E. Plem. (1965). Behaviour of load-bearing sandwich-type structures. s.l.: *Byggeforskningen*.

W. L. Lai et al. (2010.) Characterization of the deterioration of externally bonded CFRP-concrete composites using quantitative infrared thermography. *Cement and Concrete Composites*, 32, 740–746.

R.Le Roy, H. S .Pham, & G. Foret. (2009). New wood composite bridges. *European journal of environmental and civil engineering*, Volume 13, p. 1125–1139.

L. Loulou., S.Caré, R.Le Roy, & M.Bornert. (2010). Damage of Wood-Concrete Composite subjected to variable hygrometric conditions. s.l., s.n., p. 28002.

L .Loulou, et al. (2011). Etude de la durabilité des assemblages collés bois-béton soumis à des chargements hydriques. s.l., s.n.

T.-H.-T.Nguyen. (2008). Modèle d'endommagement des assemblages collés : Identification et application à la description d'un essai de vieillissement accéléré, s.l.: s.n.

H. S.Pham. (2007). Optimisation et comportement en fatigue de la connexion bois-BFUP pour de nouveaux ponts mixtes, s.l.: s.n.

F.Pozo-Lora, & M.Maguire . (2020). Thermal bowing of concrete sandwich panels with flexible shear connectors. *Journal of Building Engineering*, 29, 101124.