

CONSTRUIRE EN BOIS

Le journal de la construction commerciale en bois

du labo
AU CHANTIER

Les tiges collées; performances au feu et aux effets sismiques

Les tiges collées sont un type d'assemblage dans lequel des tiges métalliques sont collées à l'intérieur d'une pièce de bois à l'aide d'un adhésif structural. Puisque les pièces métalliques du connecteur sont invisibles, ce système est une solution structurale esthétique ayant une résistance au feu intrinsèque dû au matériau bois qui protège la tige et l'adhésif.

La problématique actuelle en ce qui concerne les tiges collées est qu'il n'existe aucun cadre normatif en Amérique du Nord, que ce soit dans la conception, les essais, le contrôle de la qualité et la construction. Si on regarde ce qui se passe en Europe, on se rend compte de l'existence d'un manque de consensus entre les experts sur les facteurs à considérer dans les normes à adopter sans, compter que les différents adhésifs présents sur le marché n'ont pas encore été testés. Dans le but de développer des connaissances qui faciliteront leur intégration dans les normes, des travaux de recherche sur les tiges collées ont été réalisés à la Chaire industrielle de recherche sur la construction écoresponsable en bois (CIRCERB), à l'Université Laval.



FIGURE 1 : Représentation d'une tige collée

Le CIRCERB

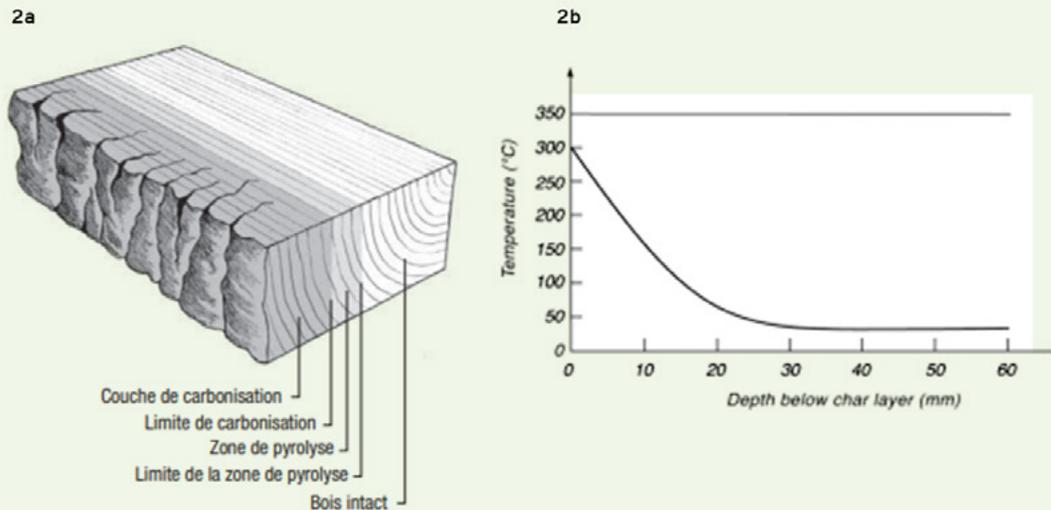
La chaire industrielle de recherche sur la construction écoresponsable en bois (CIRCERB) de l'Université Laval est une plateforme académique multidisciplinaire et intégrée jumelée à un consortium industriel. Évoluant au sein de la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique de l'Université Laval, la chaire oeuvre sur tout le réseau de création de valeur du secteur de la construction, dans le but de développer des solutions écoresponsables, qui utilisent le bois pour réduire l'empreinte écologique des bâtiments. Trois axes de recherche orientent son programme de recherche du CIRCERB: Concevoir, Construire et Exploiter.

La publication

Du Labo au chantier est une nouvelle publication de Cecobois qui a pour objectif la diffusion des travaux de recherche du CIRCERB. Elle vise la vulgarisation de projets réalisés par des étudiants à la maîtrise, au doctorat.

FIGURE 2a : Carbonisation du bois. (Crédit: Cecobois, 2020)

FIGURE 2b : Température à l'intérieur d'une pièce de bois. (Crédit: Buchanan et Abu, 2017)



Dans le cadre de ses travaux de Maîtrise, Diego Flores a étudié la performance au feu des tiges collées sous la supervision des professeurs Christian Dagenais et Pierre Blanchet. Actuellement, la performance au feu de ce type d'assemblage n'est pas totalement comprise, puisqu'il s'agit d'une combinaison de trois matériaux ayant des propriétés thermomécaniques différentes. Peu de recherches ont été effectuées à température élevée, et la plupart de ces études ont été effectuées sur un faible éventail d'adhésifs et sur des échantillons à petite échelle. Ainsi, il y a un manque de données sur le comportement à température élevée des tiges collées, limitant son inclusion dans les normes nord-américaines. Il était donc impératif d'étudier davantage ce sujet pour accroître l'utilisation des tiges collées dans l'industrie de la construction.

L'objectif général du projet était de caractériser la performance au feu des adhésifs structuraux utilisés dans les tiges collées. De façon plus spécifique il s'agissait de :

1. Documenter le comportement des assemblages de tiges collées exposés à de hautes températures ;
2. Définir la température de transition vitreuse (T_g) des adhésifs mis à l'essai ;
3. Déterminer la capacité des tiges collées exposées à différentes températures ;
4. Évaluer les modes de rupture obtenus pour chaque échantillon ;

Si on décortique chacun des trois éléments constituant les tiges collées, le bois se dégrade à une température d'environ 280°C, il se forme alors une couche de carbonisation à une vitesse connue, soit à un taux de 0,65 mm/min dans le cas du bois lamellé-collé (Figure 1) et présente un très fort gradient thermique au-delà de la couche carbonisée (Figure 2).

En ce qui concerne l'acier, il y a peu de réduction de la capacité sous 200°C, mais il y a une perte d'environ 50 % de sa capacité à 600°C. C'est pourquoi l'acier est typiquement critique à la performance au feu des assemblages bois-acier.

Puisque le diamètre des tiges métalliques utilisées dans les tiges collées est trop gros pour conférer un bon système de vissage dans le bois, l'adhésif est la composante qui permet le transfert des efforts d'un élément à l'autre. Les époxy et les polyuréthanes sont favorisés puisqu'ils peuvent adhérer à des matériaux non-poreux (acier) et poreux (bois), peuvent être appliqués sans pression et peuvent réticuler à température ambiante. Cependant, plusieurs études suggèrent que cette composante est critique à la performance au feu des tiges collées, puisqu'il y a une perte considérable de leur résistance au-delà de la température de transition vitreuse (T_g). Ainsi, trois types d'époxy et deux types de polyuréthanes ont été utilisés dans le cadre de cette recherche.

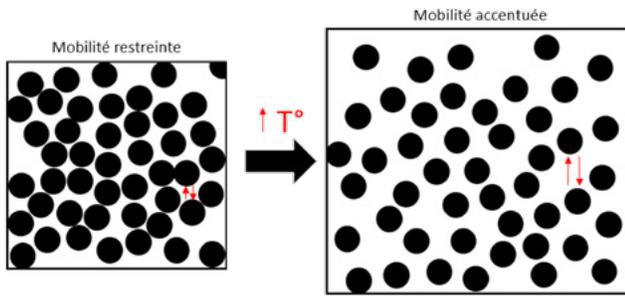


Figure 3 : Mobilité des molécules suivant la température de transition vitreuse (Crédit : CIRCERB).

La température de la T_g est utilisée pour déterminer la mobilité des molécules, qui se situait entre 40°C et 80°C selon l'adhésif étudié dans ce projet. Au-delà de la T_g , des modifications permanentes se produisent dans le polymère puisqu'il y a un accroissement de la mobilité des molécules, entraînant une transition entre un état solide vers un état caoutchouteux de l'adhésif. Parmi les facteurs qui influencent la T_g , notons le type et la formulation de l'adhésif, l'historique thermique, la densité de réticulation et le catalyseur.

Le concept de fabrication est le suivant : percer un trou au centre des pièces de bois et y insérer la tige métallique, connecter les deux pièces de bois et injecter l'adhésif par le trou d'injection jusqu'à ce qu'il sorte par le trou d'échappement, assurant ainsi une répartition uniforme.

« Les résultats suggèrent que la température influence la résistance, la rigidité et le mode de rupture des tiges collées. »

La méthodologie prévoyait une analyse mécanique dynamique (DMA) qui est une méthode d'analyse sensible permettant de déterminer le comportement viscoélastique, la T_g et finalement la densité de réticulation des adhésifs étudiés. Cette méthode est privilégiée puisqu'elle évalue les propriétés thermomécaniques des adhésifs à différentes températures, soit selon le *storage modulus* qui indique que la résistance mécanique de l'adhésif commence à diminuer, le *loss modulus* qui indique que l'adhésif commence à devenir caoutchouteux et le *tan delta* qui indique que l'adhésif a un comportement très caoutchouteux avec peu de résistance.

Les résultats suggèrent que la température influence la résistance, la rigidité et le mode de rupture des tiges collées. On observe une faible perte de résistance et de rigidité à des températures sous le *storage modulus* (mode de rupture ductile), une faible perte de résistance et une perte significative de la rigidité

FIGURE 4 : Représentation d'une tige collée avec trous d'insertion pour l'adhésif (Crédit CIRCERB).

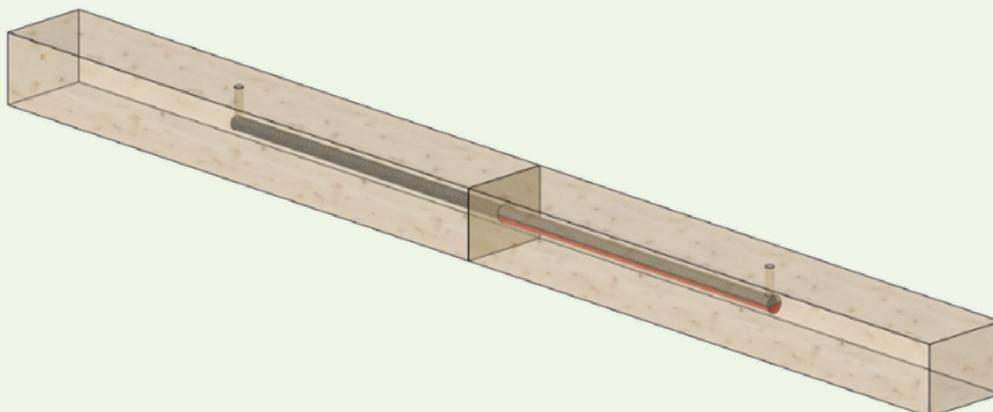
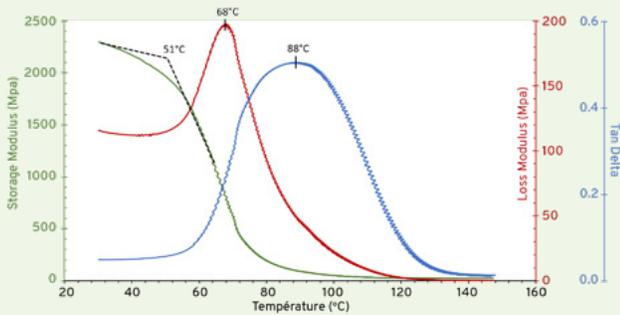


Figure 5: Courbe d'une analyse mécanique dynamique (Crédit CIRCERB).



Storage Modulus : Résistance mécanique commence à diminuer

Loss Modulus: Déformation devient plus facile (caoutchouteux)

Tan delta: Déformation devient très facile (très caoutchouteux)

à des températures juste au-delà du storage modulus (mode de rupture ductile ou fragile) et une perte considérable de la résistance et de la rigidité à des températures autour et au-delà du loss modulus (mode de rupture fragile). Il est à noter que le paramètre d'adhésif a été isolé dans nos essais puisque les propriétés du bois et de l'acier sont peu affectées à nos températures d'essai (200°C).

Les figures 5 et 6 illustrent bien une réduction significative de la résistance et rigidité, respectivement, au fur et à mesure que la température de l'essai augmente pour tous les adhésifs.

Les résultats suggèrent que l'adhésif est critique à la performance thermomécanique de la tige collée et que la Tg est un bon indicateur de la température maximale à laquelle l'adhésif peut être exposé avant de subir une diminution dans sa résistance et sa rigidité. En effet, sous le *storage modulus*, on obtient presque une résistance de l'ordre de 100 % (rupture ductile - tige) et au-delà du *loss modulus*, on obtient une forte diminution de la résistance (rupture fragile - adhésif). Les recommandations sont les suivantes:

- Évaluer adéquatement la Tg de l'adhésif utilisé pour les tiges collées (DMA) ;
- Limiter une hausse de température au-delà du *storage modulus* au niveau de la ligne de colle ;
- Utiliser des matériaux protecteurs (gypse, panneaux de bois, etc.) ;
- Dimensionner l'élément en bois en conséquence (gradient thermique).

Dans le cadre de ses travaux de maîtrise à l'Université de Sherbrooke, sous la supervision du professeur Jean Proulx, Simon Veilleux a de son côté étudié le comportement sismique et dynamique des assemblages en tiges collées dans les charpentes en bois massif. Avec ces assemblages, on cherche à développer un comportement rigide similaire au béton armé conventionnel. Cependant, tel que souligné précédemment,

FIGURE 6: Résultats des tests de résistance pour les 5 type d'adhésifs, soit PUR 1, PUR 2, EPX 1, EPX 2 et EPX 3 (Crédit CIRCERB).

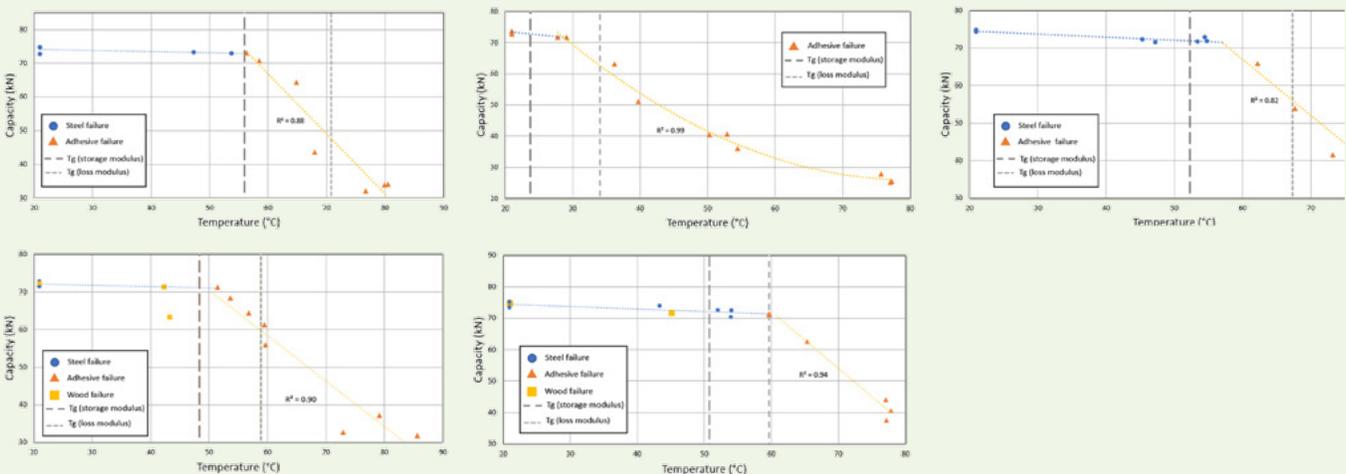
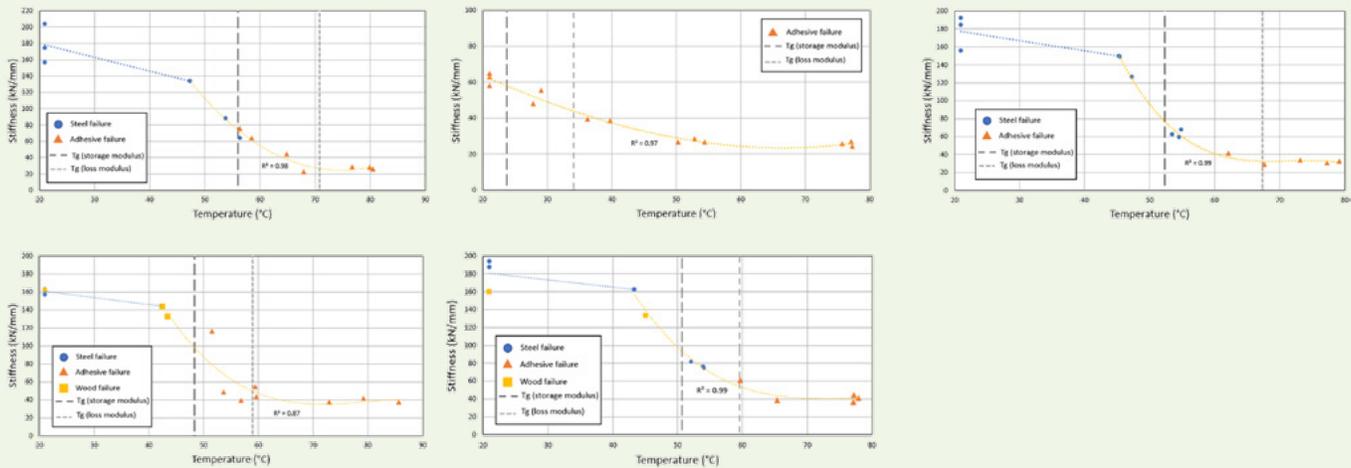


FIGURE 7: Résultats des tests de rigidité pour les 5 type d'adhésifs, soit PUR 1, PUR 2, EPX 1, EPX 2 et EPX 3 (Crédit CIRCERB).



encore aujourd'hui, il n'existe aucun processus de conception standardisé des assemblages en tiges collées, que ce soit en Amérique ou en Europe. Ainsi, le projet de recherche de Simon Veilleux cherche à déterminer leur capacité à dissiper de l'énergie sous sollicitation dynamique. Son mémoire de maîtrise présente également les renseignements suivants :

- Résistance en flexion des assemblages en tiges collées;
- Rigidité en rotation des assemblages;
- Variation du centroïde et de la courbure des assemblages.

Les essais en laboratoires réalisées par Simon Veilleux ont consisté à réaliser des essais cycliques sur différents montages en bois lamellé-collé (*Glulam*) en épinette. Ces derniers étaient configurés en « T » inversé, et leur assise était retenue par des attaches en acier et des appuis latéraux (Figure 8). Chacun des éléments des montages représentaient un élément structural défini :

- Élément horizontal : colonne en bois;
- Élément vertical : poutre en bois.

Les charges cycliques ont été appliquées sur l'élément vertical de tous les montages par un vérin cyclique avec un bras de levier d'environ deux mètres (Figure 8). La méthode d'essai cyclique ayant été utilisée était le *Sequential Phased Displacement Loading Protocol* du protocole E2126 de la norme ASTM.

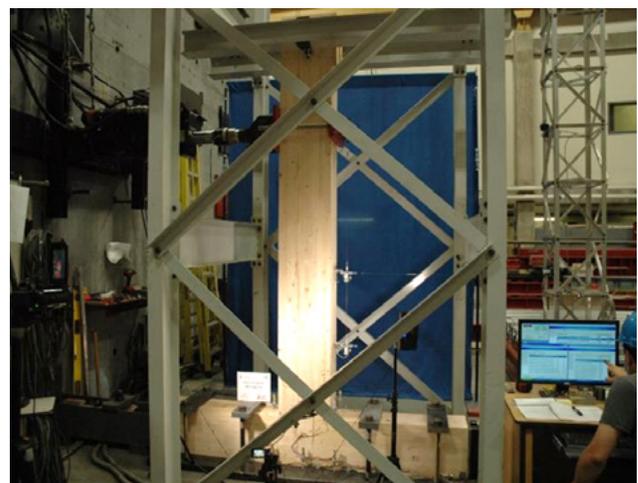
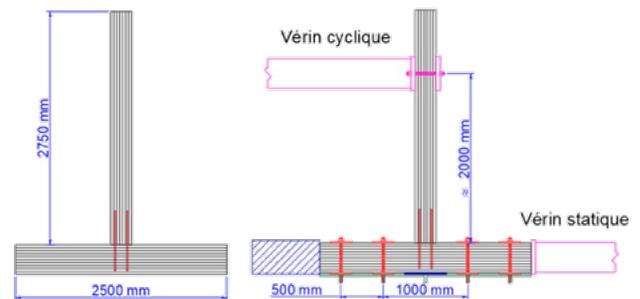
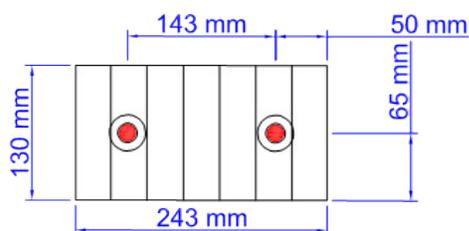


Figure 8 Configuration structurale des montages Crédit : CIRCERB – Simon veilleux

« Durant les essais cycliques, les valeurs des amplitudes de déplacement de chacun des montages ont pu être déterminées par les résultats des essais monotones. »

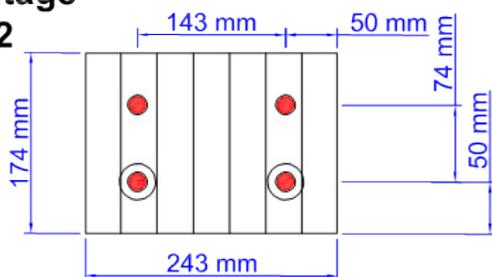
Montage

1



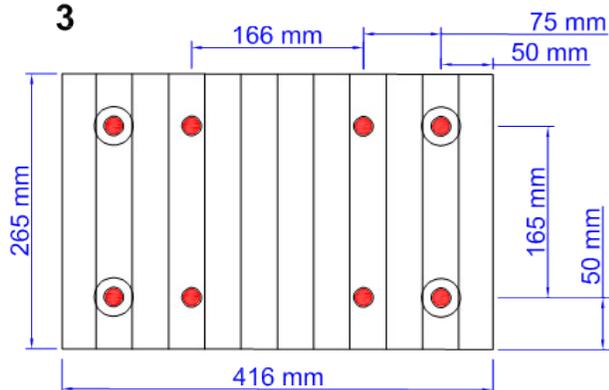
Montage

2



Montage

3



 Tige jaugée

Figure 9 Configuration des tiges filetées dans les montages. Crédit : CIRCERB – Simon veilleux

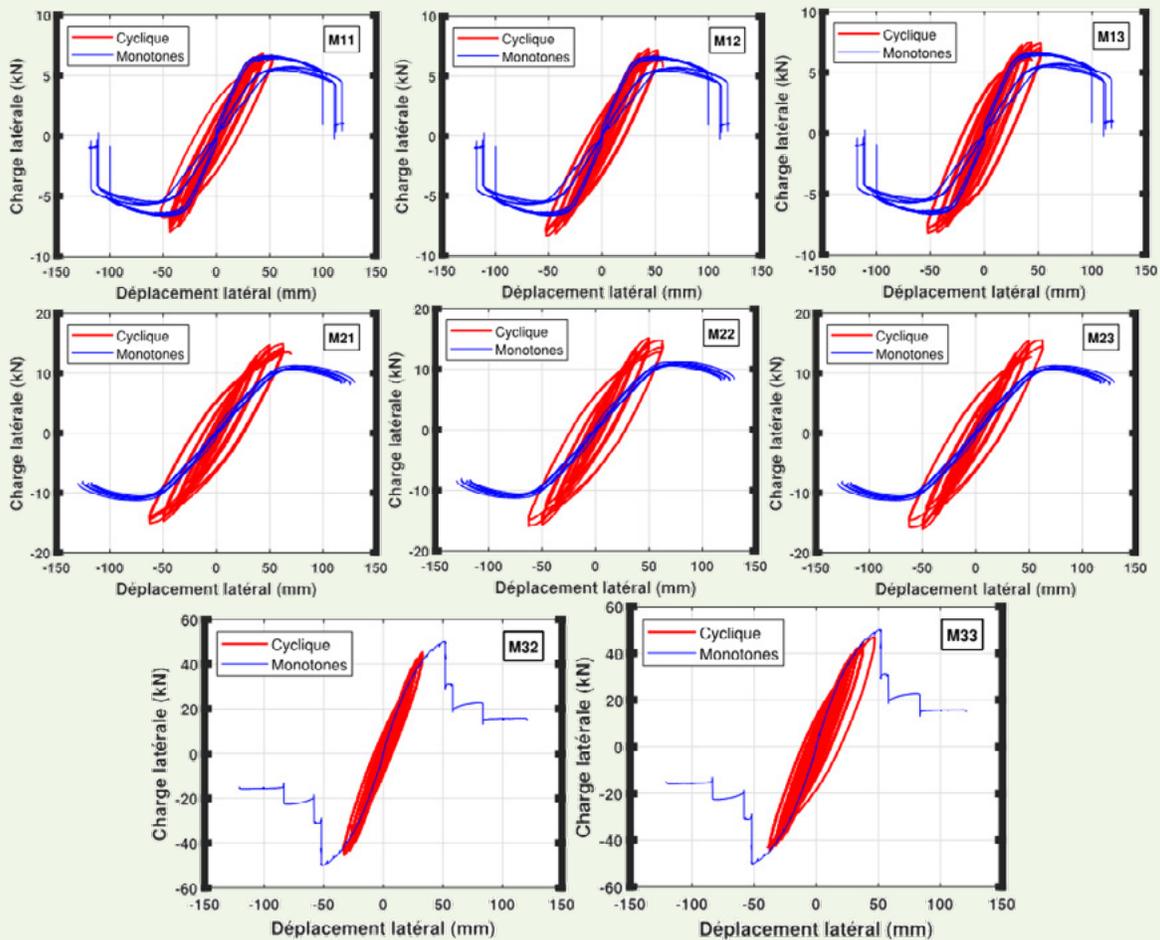
Afin d'évaluer le comportement sismique et dynamique des assemblages en tiges collées, trois différents montages ont été considérés. Chacun de ces montages possédait respectivement deux, quatre et huit tiges filetées de 1,59 cm (5/8 pouces) de diamètre brute (Figure 9). Ces différents montages ont été respectivement nommés:

- M1 : montage à deux tiges;
- M2 : montage à quatre tiges;
- M3 : montage à huit tiges.

Toutes les tiges des différents montages ont été ancrées sur une profondeur de 300 mm et de 400 mm dans l'élément horizontal et vertical respectivement, et de l'adhésif en polyuréthane a été utilisé pour permettre l'adhérence entre les tiges et le bois de charpente.

Durant les essais cycliques, les valeurs des amplitudes de déplacement de chacun des montages ont pu être déterminées par les résultats des essais monotones. Ces essais ont été réalisés par Étienne Gauthier-Turcotte, étudiant gradué à la maîtrise en génie civil à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Ils consistaient à engendrer un déplacement constant sur l'élément vertical des différents montages avec un bras de levier d'environ deux mètres. L'objectif était de déterminer la valeur du déplacement latéral engendrant la transition de la phase élastique à la phase plastique de tous les montages. Plus précisément, il s'agit du déplacement qui engendre une diminution relativement importante de la rigidité latérale des différents montages. Cette transition porte le nom de premier événement majeur (PEM). Sa valeur a été considéré à titre d'amplitude de référence pour chacun des montages.

Figure 10 Courbe d'hystérésis de chacun des spécimens des différents montages étudiés.
Crédit : CIRCERB – Simon veilleux



Également, un vérin statique a été installé sur l'une des extrémités de l'élément horizontal de tous les montages pour simuler les charges de compressions appliquées dans les colonnes de bois. Pour ce faire, trois charges ont été considérées :

- Une charge de 5 kN;
- Une charge correspondant à environ 25 % de la résistance nominale en compression (P_n) de l'élément;
- Une charge correspondant à environ 50 % de P_n de l'élément.

Pour cette raison, trois spécimens ont été assemblés pour chacun des montages dans le cadre de ce projet de recherche. Chacun de ces spécimens ont subi l'une des charges axiales précédentes sur leur élément horizontal, et leur nomenclature a été traduite dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Nomenclature des noms des spécimens pour les différents montages étudiés.

Montages	Nomenclature des spécimens		
M1	M11	M12	M13
M2	M21	M22	M23
M3	M32	M33	-

De plus, dans le cadre du projet de recherche de Simon Veilleux, le spécimen M31 a été utilisé pour réaliser un essai monotone supplémentaire.

Les résultats obtenus à la suite des essais cycliques ont montré, d'une part, que la quantité de tiges dans les différents assemblages impacte grandement la quantité d'énergie dissipée totale. En effet, plus le nombre de tiges dans les assemblages

« En comparaison avec les connexions boulonnées dans les charpentes d'acier, la dissipation d'énergie engendrée par les assemblages en tiges collées du projet de recherche de Simon Veilleux est significativement moins marquante. »

augmente, plus ces derniers dissipent de l'énergie. À titre comparatif, il a été mesuré que les spécimens du montage M3 dissipent entre 1,25 fois et 3,0 fois plus d'énergie globalement que ceux du montage M2, sachant que ce dernier possède deux fois moins de tiges. Pour sa part, les spécimens du montage M2 dissipent entre 1,30 fois et 2,50 fois plus d'énergie que ceux du montage M1. Ainsi, plus les assemblages en tiges collées possèdent de surface d'acier, plus ils dissipent de l'énergie.

D'autre part, il a été observé que la configuration des tiges dans les assemblages en tiges collées jouait un rôle sur la quantité d'énergie dissipée par cycle de chargement. En comparant le montage M2 avec le montage M3, le montage M3 dissipait légèrement plus d'énergie par cycle de chargement que le montage M2, et ce, bien que le montage M3 ait deux fois plus d'acier. Tel qu'il est présenté dans la Figure 9, les tiges du montage M3 ont été réparties sur deux rangées, alors que celles du montage M2 ont été réparties sur une seule rangée. Ainsi, dans les circonstances où les tiges du montage M3 auraient été installées sur une seule rangée, la quantité d'énergie par cycle de chargement du montage M3 aurait été beaucoup plus importante. Dans le cas des montages M1 et M2, les spécimens des montages M2 dissipent entre 2,0 à 3,0 fois plus d'énergie par cycle

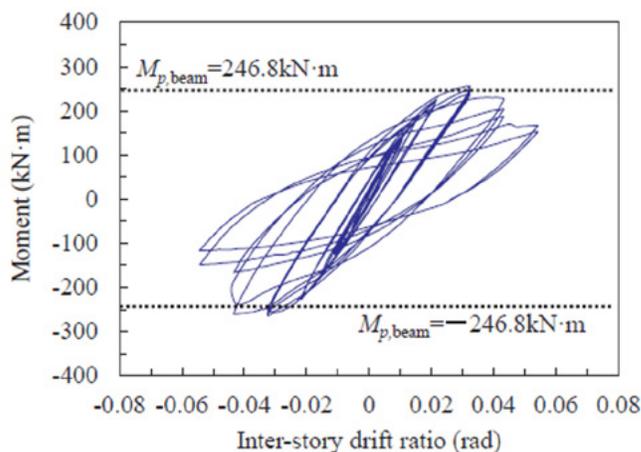


Figure 11 : Courbe d'hystérésis représentative d'une connexion boulonnée dans les charpentes d'acier. Crédit Deng et al., 2018)

de chargement que le montage M1. Ainsi, la quantité d'acier et la configuration des tiges dans les assemblages jouent un rôle important sur la quantité d'énergie dissipée par cycle de chargement.

Cependant, une grande dissipation d'énergie ne signifie pas nécessairement une plus grande ductilité de l'assemblage. Cette affirmation peut être expliquée en se référant à la Figure 3, qui présente les courbes d'hystérésis de tous les spécimens (lignes rouges). Ces courbes prennent la forme d'une ellipse, et elles représentent la charge cyclique requise pour engendrer un déplacement défini. Puisque les ellipses de tous les spécimens sont élancées, ces derniers sont alors peu ductiles.

En comparaison avec les connexions boulonnées dans les charpentes d'acier, la dissipation d'énergie engendrée par les assemblages en tiges collées du projet de recherche de Simon Veilleux est significativement moins marquante. Cette affirmation a été tirée d'un comparatif avec les connexions boulonnées du projet de recherche de En-Feng Deng et de ces collègues (Deng et al., 2018). De plus, les connexions boulonnées dans les charpentes d'acier ont aussi un comportement beaucoup plus ductile (Figure 4). De plus, les valeurs du ratio de l'énergie dissipée des assemblages en tiges collées du projet de Simon Veilleux ont été légèrement inférieures

à celles des connexions de En-Feng Deng. Cette affirmation montre que la quantité d'énergie dissipée par l'énergie de déformation des assemblages en tiges collées peut être augmentée pour atteindre celle des connexions boulonnées. Pour ce faire, plus d'acier dans les assemblages en tiges collées devra alors être requis.

Quant à la charge de compression ayant été appliquée sur l'élément horizontal de tous les spécimens, cette dernière impacte en effet la capacité des tiges à dissiper de l'énergie. Cette hausse de dissipation d'énergie peut s'expliquer par la hausse du confinement des tiges dans l'élément horizontal, puisque la charge de compression a engendré une agglomération de matières dans le périmètre des tiges.

Dans l'industrie de la construction, les assemblages en tiges collées ont le potentiel de promouvoir les structures de bois massif. Ces assemblages offrent une résistance au moment fléchissant adéquate, ont le potentiel d'offrir un comportement ductile dans les charpentes de bois, améliorent l'esthétisme des structures en mettant en valeur le bois et sont simples à assembler en usine. Cependant, il reste d'autres recherches à réaliser pour établir des critères simples de conception. L'absence de processus de conception standardisé nuit également à leur utilisation à grande échelle. Le projet de Simon Veilleux apporte ainsi des informations pertinentes pouvant aider à l'implantation de ce genre d'assemblages.

« Dans l'industrie de la construction, les assemblages en tiges collées ont le potentiel de promouvoir les structures de bois massif. »

Références

Deng, En-Feng, Liang Zong, Yang Ding, Xiao-Meng Dai, Ni Lou and Yang Chen. 2018. Monotonic and cyclic response of bolted connections with welded cover plate for modular steel construction. *Engineering Structures*, Volume 167, 15 July 2018, Pages 407-419. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.028>.

Buchanan A. H. et A. K. Abu. 2017. *Structural Design for Fire Safety - 2nd Edition*, West Sussex (UK): John Wiley & Sons, 2017.

Partenaires du CIRCERB



Partenaires majeurs Cecobois



Partenaires du CIRCERB



Partenaires majeurs Cecobois

