CRMR
Centre de recherche sur
les matériaux renouvelables

Performance structurale des assemblages à goujons avec plaques d'acier insérées pour contreventements en bois massif

Kiavash Gholamizoj

Vous pouvez consulter l'article ici [1].

Introduction

La construction en bois a suscité un intérêt croissant au cours des dernières décennies en raison de ses atouts environnementaux et structuraux. La durabilité du bois, sa légèreté et son rapport résistance/poids élevé en font un matériau particulièrement attrayant pour la construction moderne. Sa faible masse contribue notamment à réduire les forces d'inertie sismiques, permettant ainsi aux bâtiments en bois de bien résister aux sollicitations sismiques.

Historiquement, les structures légères en ossature bois étaient limitées aux bâtiments de faible et moyenne hauteur en raison d'une résistance latérale insuffisante. Toutefois, l'émergence des produits de bois massif, tels que le bois lamellé-croisé (CLT) et le bois lamellé-collé (glulam), a révolutionné le secteur, rendant possible la construction de bâtiments en bois plus hauts et plus résilients, même dans les zones sismiques.

Dans ce contexte, les contreventements en bois constituent une solution pratique pour résister aux forces latérales induites par le vent et les séismes. Ces systèmes sont à la fois efficaces sur le plan structural et économiques, et leur utilisation est encadrée par les normes nationales. Par exemple, le Code national du bâtiment du Canada (CNB 2020) [2] autorise l'utilisation de contreventements en bois à ductilité limitée jusqu'à 15 mètres de hauteur en catégorie sismique (SC) 3, et de contreventements modérément ductiles jusqu'à 20 mètres en SC4.

UNIVERSITÉ LAVAL | Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

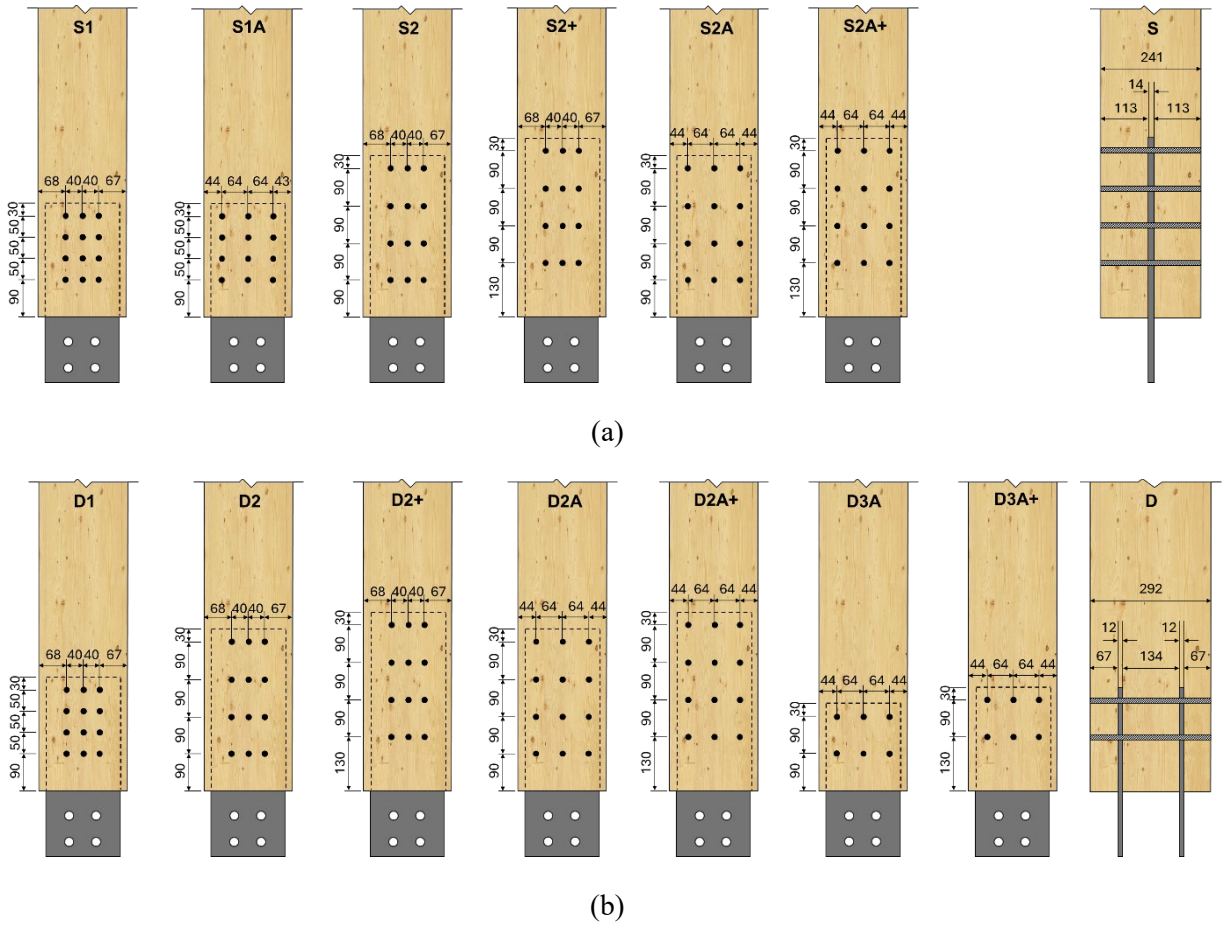
Cependant, la norme CSA O86-24 [3], qui fournit des directives détaillées pour la conception en bois au Canada, ne propose pas de méthodologies spécifiques pour la conception des assemblages, alors même que ceux-ci sont déterminants pour assurer la ductilité globale du système contreventé. Cette lacune constitue un défi majeur pour les ingénieurs souhaitant développer des systèmes parasismiques en bois robustes et conformes aux normes.

La performance sismique des structures en bois dépend fortement du comportement de leurs assemblages. Contrairement au bois, dont le comportement est principalement élastique et fragile, les assemblages métalliques constituent les principaux éléments dissipateurs d'énergie. Parmi les différents types de connexions, les assemblages à goujons avec plaques d'acier insérées sont largement utilisés en raison de leur fiabilité dans le transfert de charges et de leur compatibilité architecturale. Leur comportement sous sollicitations cycliques est donc déterminant pour assurer la résilience sismique des structures.

Méthodologie

La présente étude s'inscrit dans un programme de recherche plus vaste consacré à l'optimisation de la conception parasismique des contreventements en bois massif. Elle porte sur l'évaluation des assemblages à goujons avec plaques d'acier insérées, soumis à la fois à des chargements monotones et cycliques. Les objectifs étaient : (1) analyser l'influence de paramètres géométriques et mécaniques clés sur la performance des assemblages, (2) évaluer la pertinence des dispositions de la norme CSA O86 pour ce type d'assemblages, et (3) proposer un cadre de classification des dommages fondé sur l'énergie, en appui à une approche de conception basée sur la performance.

La campagne expérimentale a compris 67 essais en vraie grandeur couvrant 13 configurations d'assemblages, ce qui constitue un apport significatif par rapport aux études antérieures. Chaque configuration comportait trois rangées de goujons en acier (nuance 300W, diamètre 12,7 mm), avec des variations du nombre de goujons, de leur espacement, du nombre de plaques insérées et de la distance aux abouts. La Figure 1 illustre l'ensemble des configurations testées.. Les indicateurs de performance examinés incluaient la résistance, la rigidité, la ductilité, les modes de rupture et la capacité de dissipation d'énergie.



(a)

(b)

Figure 1. Assemblages testés avec : (a) plaques simples; (b) plaques doubles (dimensions en mm)

Résultats et discussions

1. Principaux résultats expérimentaux

L'étude a montré que l'espacement des goujons dans une même rangée exerce une influence déterminante sur la performance des assemblages. L'augmentation de l'entraxe de 4d (quatre fois le diamètre du goujon) à 7d a amélioré à la fois la capacité portante et la dissipation d'énergie, mais s'est accompagnée de déplacements résiduels plus importants. Ces résultats soulignent l'existence d'un compromis entre résistance et capacité de recentrage, un aspect central de la conception parasismique.

Les ajustements de l'entraxe entre rangées et des distances aux abouts ont, quant à eux, produit des effets contrastés. Par exemple, l'augmentation de l'espacement entre rangées de 3d à 5d, ou de la distance aux abouts de 7d à 10d, a modifié la rigidité de manière variable, tout en ayant une incidence limitée sur d'autres indicateurs tels que la ductilité ou le mode de rupture. Ces résultats suggèrent qu'au-delà d'un certain seuil, l'optimisation géométrique n'apporte que des gains marginaux en termes de performance globale.

L'utilisation de doubles plaques d'acier insérées a permis d'accroître significativement la résistance et la rigidité, mais a favorisé des modes de rupture plus fragiles et une réduction de la ductilité. De même, l'ajout de goujons dans les configurations à double plaques a renforcé la résistance globale, tout en diminuant la dissipation d'énergie par goujon, traduisant une concentration accrue des contraintes et une déformation moins homogène. La Figure 2 présente les courbes enveloppes moyennes dérivées des boucles d'hystérésis de l'ensemble des éprouvettes testées.

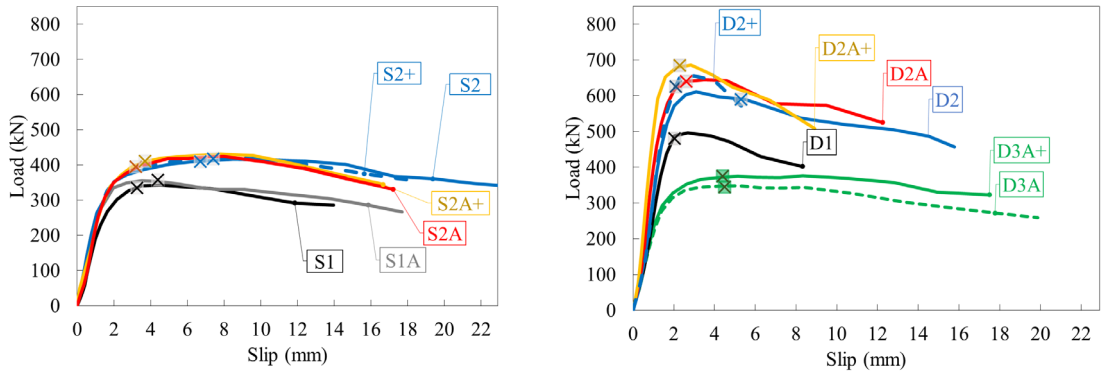


Figure 2. Courbes enveloppes moyennes des assemblages avec : (a) plaques insérées simples, (b) plaques insérées doubles

La comparaison entre les résultats expérimentaux et les prédictions de la norme CSA O86 a montré une bonne concordance pour les assemblages avec un entraxe de 7d. En revanche, pour les espacements plus serrés de 4d, les prévisions se sont révélées non conservatives en raison de ruptures prématurées par fissuration. Ces observations

indiquent que la CSA O86 pourrait nécessiter des ajustements, notamment l'introduction d'un facteur de réduction de résistance ou de recommandations de renforcement spécifiques pour les configurations à forte densité de goujons.

2. Évaluation des dommages et implications parasismiques

Un aspect novateur de cette étude réside dans l'application du modèle d'accumulation de dommages basé sur l'énergie de Kraetzig [4], lequel intègre simultanément la dissipation d'énergie et l'historique de déformation afin d'évaluer la dégradation des assemblages. À partir des observations expérimentales, une échelle qualitative de classification des dommages en cinq niveaux a été élaborée : Aucun, Mineur, Modéré, Sévère et Ruine. Cette démarche fournit un outil pertinent tant pour la conception parasismique basée sur la performance que pour l'évaluation post-sismique des dommages.

Les assemblages à double plaque insérée ont révélé une progression rapide des dommages et un comportement fragile, généralement classés dans les catégories Sévère ou Ruine. À l'inverse, les assemblages à plaque unique avec entraxe élargi ont présenté une accumulation progressive des dommages, une ductilité plus élevée et une dissipation d'énergie supérieure, répondant ainsi plus efficacement aux exigences de résilience sismique.

La corrélation observée entre l'accumulation de dommages et les déplacements résiduels souligne l'importance d'une prise en compte conjointe de la configuration géométrique et des propriétés des matériaux dans la conception parasismique des assemblages. Ces résultats appuient la transition vers des cadres de conception basés sur la performance en ingénierie du bois, où le détail des assemblages influence directement la fonctionnalité post-sismique ainsi que les stratégies de réparation.

Retombées et perspectives

Les résultats de cette étude présentent plusieurs implications importantes :

1. **Amélioration des directives de conception**: Les données expérimentales fournissent une base solide pour l'évolution des dispositions de la norme CSA

O86, notamment en ce qui concerne la définition de configurations ductiles des assemblages à goujons.

2. **Conception parasismique fondée sur la performance** : L'échelle d'indice de dommage proposée permet d'élaborer des méthodologies de conception sismique plus précises et mieux adaptées aux différentes applications.
3. **Stratégies de renforcement** : Les résultats mettent en évidence la nécessité d'approfondir les recherches sur les techniques de renforcement des assemblages à forte densité de goujons ou intégrant plusieurs plaques d'acier.
4. **Calage des modèles** : Les données détaillées relatives aux courbes charge–déformation et à la dissipation d'énergie offrent une ressource précieuse pour le calage de modèles analytiques ou numériques appliqués aux contreventements en bois massif.

En conclusion, cette étude comble une lacune majeure dans la recherche sur la conception parasismique des structures en bois. Elle propose un ensemble expérimental riche et une analyse approfondie des assemblages à goujons, offrant aux praticiens des références concrètes, tout en soutenant l'évolution normative. Les résultats établissent des bases solides pour le développement de structures en bois plus résilientes face aux séismes. L'équilibre entre résistance, rigidité et ductilité demeure central dans cette démarche, et les outils de conception et d'évaluation proposés ouvrent la voie à des avancées déterminantes en matière de sécurité et de performance des constructions en bois massif.

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leur profonde gratitude pour le soutien financier apporté par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), dans le cadre du programme de subventions Alliance (numéro ALLPR 571090-21), ainsi que par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec (MRNF), à travers un appel de projets de R&D en construction bois (numéro APRCB-03).

Ils remercient également Nordic Structures et Rothoblaas pour la fourniture des matériaux et le partage de leur expertise technique. Enfin, une reconnaissance particulière est adressée aux techniciens du Centre de recherche sur les matériaux

renouvelables (CRMR) — Jean Ouellet, Félix Pedneault, Daniel Bourgault et Jean Brouillette — pour leur contribution inestimable tout au long du projet.

Références

[1] Gholamizoj, K., Salenikovich, A., Chui, Y. H., Zhu, H., & Bezabeh, M. (2025). Structural Performance of Dowel Connections with Slotted-in Steel Plates for Mass-Timber Braced Frames. Journal of Building Engineering, 113959. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113959.

[2] National Research Council Canada 2020. National Building Code of Canada. NRC Canada, Ottawa, ON, Canada.

[3] CSA O86-24: Engineering Design in Wood 2024. Canadian Standards Association, Toronto, ON, Canada.

[4] Kratzig W., Meyer I., Meskouris K. 1989. « Damage Evolution in Reinforced Concrete Members Under Cyclic Loading. » In: Structural Safety and Reliability.