

## Évaluation de la performance sismique des cadres contreventés en bois avec assemblages à goujons et plaques d'acier insérées : indicateurs de performance fondés sur la dérive et sur l'énergie

Kiavash Gholamizoj

Vous pouvez consulter l'article [ici](#) [1].

### Introduction

Les structures en bois ont connu une expansion significative ces dernières années, résultant des progrès des produits du bois d'ingénierie, de l'amélioration de la qualité de fabrication et de l'attention croissante portée à la construction durable et à une faible empreinte carbone.

La performance sismique des structures massives en bois conventionnelles dépend largement de leur comportement d'assemblage, où se concentrent les déformations non linéaires et la dissipation d'énergie. Ainsi, le choix et la modélisation des systèmes résistants aux forces sismiques (SFRS) sont essentiels pour assurer une performance fiable et prévisible. Parmi les SFRS disponibles, les cadres contreventés en bois (TBF) équipés d'assemblages à goujons et de plaques d'acier insérées constituent une solution prometteuse pour les bâtiments massifs en bois de faible à moyenne hauteur, à condition que la réponse dominée par les assemblages soit correctement représentée au niveau du système.

### Méthodologie

Cet article propose un cadre d'évaluation de performance dual pour les TBF, intégrant à la fois des métriques traditionnelles fondées sur la dérive et un indice de dommage avancé basé sur l'énergie. Cette approche vise à pallier les limites des métriques ISDR usuelles, qui ne permettent généralement pas de représenter adéquatement la dégradation physique cumulative ni la dissipation

d'énergie caractéristiques des assemblages en bois, notamment lorsque ceux-ci impliquent la plastification des fixations et l'écrasement du bois.

La composante fondée sur la dérive s'appuie sur les lignes directrices du Centre canadien des matériaux de construction (CCMC) [2], et évalue le SFRS au regard des objectifs du Code national du bâtiment du Canada (CNB) 2020 [3]. Cette démarche prescriptive consiste à soumettre des archétypes de bâtiment à un séisme de niveau de conception à 100 % (DLE, correspondant à une probabilité de dépassement de 2 % en 50 ans) ainsi qu'à un DLE amplifié à 200 % afin d'évaluer la robustesse en situation de charge extrême. Le critère de réussite est atteint lorsque le 90e centile des réponses demeure inférieur aux limites de dérive prescrites pour le DLE à 100 %, et que moins de 50 % des enregistrements conduisent à des réponses de type effondrement lors du DLE à 200 %.

Afin d'offrir une caractérisation plus détaillée de la réponse sismique, l'étude adopte un indice de dommage (ID) fondé sur l'énergie, qui cumule l'énergie hystérétique dissipée au cours du chargement sismique. Le dommage est quantifié sur une échelle normalisée de 0 à 1, où la valeur 1 correspond à la défaillance du système. Les valeurs intermédiaires de l'indice sont associées à cinq états de dommage discrets, allant de l'absence de dommage visible jusqu'au dommage total.

La méthodologie est appliquée à vingt archétypes de TBF conçus pour l'aléa sismique modéré de Montréal. Ces archétypes varient de deux à six étages et couvrent différentes classes de ductilité ainsi que plusieurs configurations d'assemblages. Un archétype typique est présenté à la Figure 1. La conception repose sur des principes de conception par capacité, selon lesquels la dissipation d'énergie est volontairement et strictement localisée dans les assemblages à type de goujons avec plaques d'acier insérées. Afin de préserver l'intégrité du système global, les poutres, colonnes et éléments de contreventement sont protégés par capacité par l'application d'un facteur de surcapacité de 2,0, garantissant que ces composants demeurent élastiques tandis que les assemblages entrent en régime plastique et assurent la dissipation d'énergie.

La modélisation numérique utilisée pour l'évaluation de la performance a été réalisée à l'aide d'OpenSeesPy [4]. Les assemblages ont été modélisés au moyen d'éléments de longueur nulle, dont les paramètres hystéritiques ont été calibrés à partir des données expérimentales afin de reproduire le comportement de pincement caractéristique du bois sous chargement cyclique. Cette phase de calibration a permis de représenter fidèlement la dégradation de la résistance ainsi que la perte de raideur observées lors des essais en laboratoire.

## Analyse dynamique et conclusions générales

L'évaluation a été réalisée au moyen d'analyses non linéaires d'historique de réponse, en utilisant 32 enregistrements de mouvements du sol mis à l'échelle selon le spectre sismique correspondant à l'aléa local. Les résultats globaux indiquent que ces cadres contreventés en bois atteignent de manière cohérente les objectifs de performance, suggérant que les facteurs de modification des forces du CNB sont adaptés à ce type de systèmes dans des régions à aléa modéré. Bien que les archétypes de plus grande hauteur aient montré des concentrations de dérive au niveau intermédiaire, dues à l'influence de modes supérieurs, les éléments protégés par capacité ont conservé une marge de sécurité significative, attestant de leur rôle efficace dans la dissipation d'énergie et la préservation de l'intégrité structurelle.

Les résultats concernant les éléments protégés par capacité ont souligné l'efficacité de cette philosophie de conception. À toutes les intensités de séisme simulées, les poutres et colonnes en lamellé-collé ont présenté des rapports demande/capacité nettement inférieurs à l'unité, confirmant que le facteur de surcapacité de 2,0 a efficacement confiné les dommages aux zones fusibles prévues au sein des contreventements (Figure 2). Dans les archétypes plus hauts (quatre et six étages), les concentrations de dérive observées au niveau intermédiaire ont été particulièrement instructives : elles indiquent que, bien que la stabilité globale des bâtiments soit préservée, la distribution des forces latérales demeure non uniforme. Cette situation engendre des demandes localisées de dissipation d'énergie qui pourraient être négligées dans des analyses statiques simplifiées se limitant au premier mode de vibration.

L'analyse comparative entre les deux indicateurs a révélé que, si l'évaluation fondée sur la dérive suggérait une marge de sécurité élevée, l'indice basé sur l'énergie apportait une vision plus nuancée de l'état physique des assemblages. Cela souligne que ce dernier constitue un outil essentiel pour évaluer la résilience à long terme et la réparabilité des structures massives en bois, en fournissant un niveau de détail sur la fatigue cumulative que les métriques ponctuelles de dérive maximale ne permettent pas, à elles seules, de capturer.

En définitive, la méthodologie confirme que les TBF à assemblages à goujons constituent une solution viable et résiliente pour les bâtiments massifs en bois de hauteur intermédiaire dans des régions à aléa modéré, à condition que les dommages soient soigneusement gérés grâce à une évaluation combinant l'indice énergétique et les limites de dérive traditionnelles.

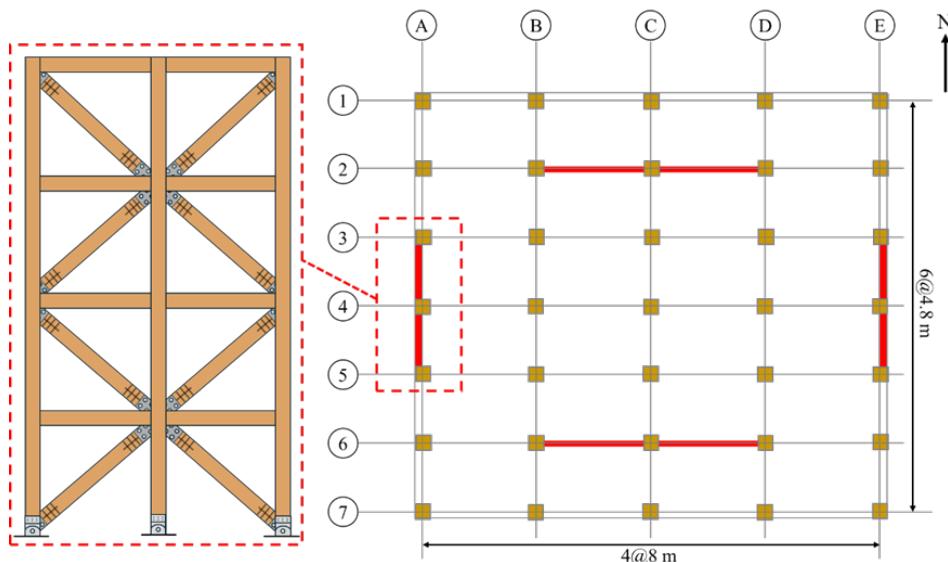


Figure 1. Élévations et vues en plan des configurations typiques des archéotypes étudiés [1]

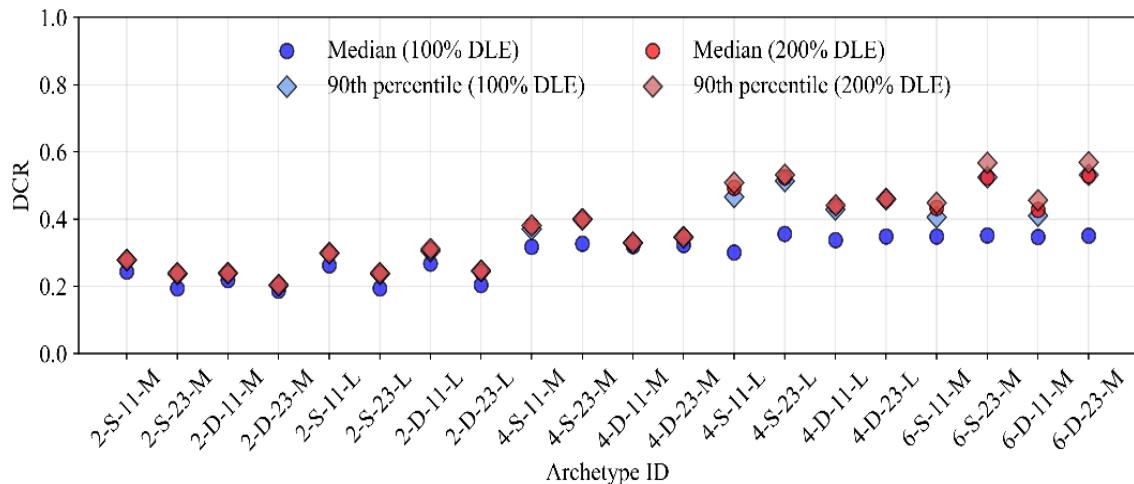


Figure 2 Rapports pic demande/capacité pour la résistance axiale des contreventements sous 100 % et 200 % DLE [1]

## Références

- [1] K. Gholamizoj, H. Zhu, A. Salenikovich, M. Bezabeh, & Y. H. Chui (2026). Seismic performance assessment of timber braced frames with dowel connections and slotted-in steel plates: Drift- and energy-based performance indicators. *Structures*, 85, 111155. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.111155>.
- [2] R. DeVall, M. Popovski, and J. B. W. McFadden (2021). «Technical Guide for Evaluation of Seismic Force Resisting Systems and Their Force Modification Factors for Use in the National Building Code of Canada with Concepts Illustrated Using a Cantilevered Wood CLT Shear Wall Example », NRC Publications Archive.
- [3] National Research Council of Canada (NRC) (2020). « National Building Code of Canada 2020 ». Ottawa, ON: NRC.
- [4] M. Zhu, F. McKenna and M. H. Scott (2018). « OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework », *SoftwareX*, vol. 7, pp. 6-11.