

Non restreint

WOODST : OUTIL DE MODÉLISATION AVANCÉ POUR L'ANALYSE DE LA SÉCURITÉ INCENDIE DES STRUCTURES EN BOIS

Zhiyong Chen, Ph.D., P.Eng., Christian Dagenais, Ph.D., P.Eng., Chun Ni, Ph.D., P.Eng.

Le manque de modèles appropriés pour tester le comportement d'éléments et d'assemblages en bois sous l'effet de forces et de l'exposition au feu fait obstacle à la conception et à la construction de bâtiments en bois de grande hauteur (Chen, Karacabeyli, & Lum, 2017). FPInnovations a créé un outil de modélisation avancé, WoodST, pour simuler de manière précise et complète le comportement structurel des structures en bois sous l'effet de forces ou de l'exposition au feu ou des deux (Chen, Ni, & Dagenais, 2018). WoodST est capable de calculer le transfert de chaleur, la vitesse de carbonisation, la courbe charge-déplacement ainsi que le moment et le mode de défaillance des structures en bois exposées au feu, offrant ainsi une solution à coût compétitif pour l'analyse de la sécurité incendie des ossatures en bois. La présente note d'information présente brièvement le développement et la vérification de WoodST. Deux applications de WoodST sont également présentées.

Développement de l'outil WoodST

Le bois est un matériau anisotrope. Ses propriétés de rigidité et de résistance varient en fonction de l'orientation du fil du bois dans les directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T). Les modes de rupture et les relations contrainte-déformation du bois dépendent de la direction de la charge par rapport au fil et du type de charge (tension, compression ou cisaillement). Comme l'illustre la figure 1, la relation contrainte-déformation est généralement linéaire et la rupture est fragile pour le bois en tension et en cisaillement, tandis que la relation contrainte-déformation est généralement non linéaire et la rupture est ductile pour le bois en compression. Lors de l'exposition au feu, une réaction physico-chimique

complexe comprenant la migration de l'humidité, le fluage thermique transitoire, la formation de charbon, le rétrécissement et la fissuration du charbon de bois, qui influencent grandement les performances mécaniques, se produisent dans les éléments et les assemblages en bois.

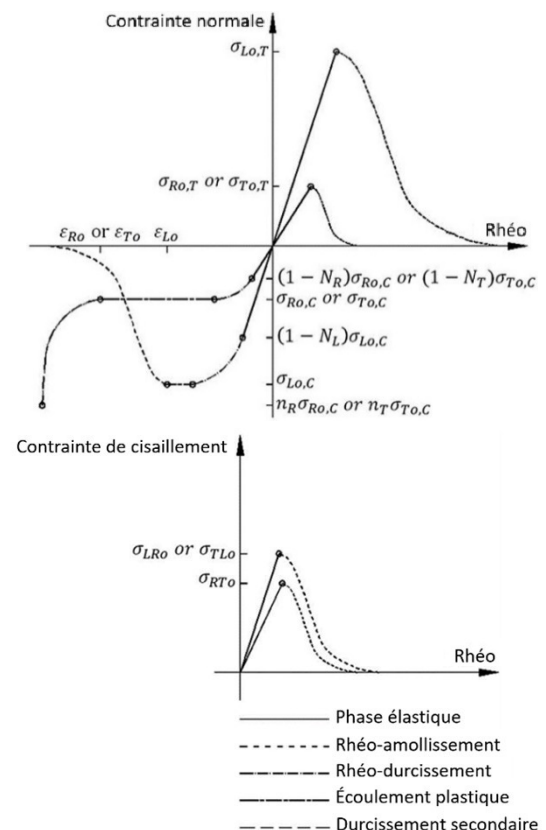


Figure 1. Comportement typique du bois en termes de contrainte et de déformation. Note : σ_{io} = résistance axiale dans la direction i ; $\sigma_{io, T}$ et $\sigma_{io, C}$ = résistance à la traction et à la compression dans la direction i ; σ_{ijo} = résistance au cisaillement dans le plan $i-j$; N_i et n_i = paramètres permettant de déterminer respectivement la surface d'allongement initial et final ; ϵ_{Lo} = déformation initiale due à une compression parallèle au fil ; ϵ_{Ro} et ϵ_{To} = déformation initiale durant le durcissement secondaire en raison d'une compression perpendiculaire au fil.

FPInnovations a développé un outil de modélisation avancé appelé WoodST en vue de l'évaluation des performances structurales (S) et thermiques (T) du bois et des assemblages sous l'effet de forces et de l'exposition au feu (Chen, Ni, Dagenais et Kuan, 2020). Ce modèle constitutif unique combine quelques sous-modèles spécifiques basés sur la mécanique :

- propriétés élastiques simplifiées sous la forme d'une élasticité linéaire orthotrope;
- extension des critères de résistance Yamada-Sun utilisés pour évaluer la rupture fragile et la déformation ductile dans différentes directions et conditions de contrainte;
- une évolution des dommages dus à la déformation a été développée pour décrire le rhéo-amollissement post-crête de la rupture fragile en tension et en cisaillement;
- établissement d'une loi sur l'écoulement plastique et le durcissement basée sur l'extension des critères de résistance Yamada-Sun afin de décrire la relation contrainte-déformation plastique de la déformation ductile en compression;
- développement d'une évolution du durcissement dû à la déformation pour mettre en œuvre le durcissement secondaire (densification) sous l'effet de la compression perpendiculaire au fil;
- adoption d'un modèle de réduction multilinéaire ($k-p-c$) pour refléter l'influence du feu sur le comportement mécanique des matériaux à base de bois.

Vérification I : Une poutre en LVL

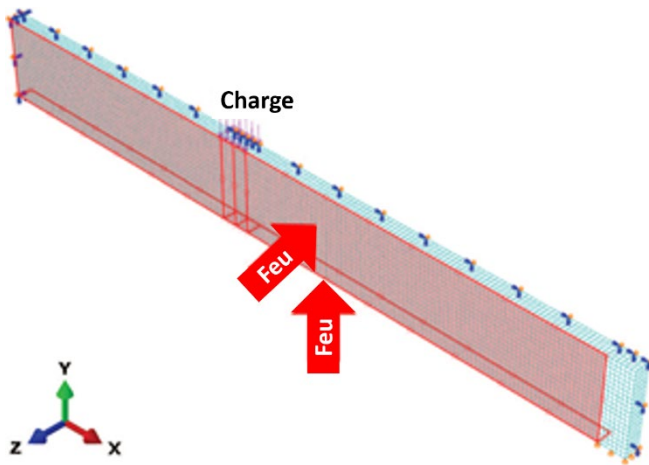
Une poutre en LVL à simple appui d'une section de 89 x 241 mm avec charge en deux points pour un total de 16,8 kN (50 % du rapport de contrainte admissible) testée selon la norme d'exposition au feu ASTM E119 a été choisie comme premier scénario de vérification (Chen et al., 2020). Un modèle par éléments finis (EF) de 1/4 de la poutre (figure 2a) a été développé à l'aide d'ABAQUS. Des limites symétriques ont été assignées à l'extrémité gauche et à l'arrière du modèle, tandis que la courbe normalisée temps-température de l'ASTM E119 a été appliquée sur le côté et en bas, reproduisant une exposition au feu sur trois côtés. Le modèle EF a simplement été soutenu à l'extrémité droite.

Une analyse combinée thermo-structurale a été effectuée à l'aide de WoodST. Le déplacement de la poutre en LVL a augmenté avec le temps et la température, comme en témoigne la figure 2b. Lors de l'analyse, les éléments extérieurs sur le côté et au fond ont été carbonisés en premier puis enlevés. Lorsque les contraintes ont augmenté en raison de la réduction progressive de la section transversale, les résistances du bois ont diminué en raison de la température élevée. Le modèle EF a échoué en mode fragile dans la direction longitudinale lorsque le critère de résistance a été atteint. L'analyse a prédit que la défaillance (figure 2c) indiquée par le changement brusque de déplacement (figure 2b) se produirait à 30,5 min. Comme le moment de la défaillance prévu se situe à 10 % du moment réel de la défaillance (33,7 min), on considère que le modèle informatique peut raisonnablement prévoir le comportement compte tenu de la nature de l'incendie.

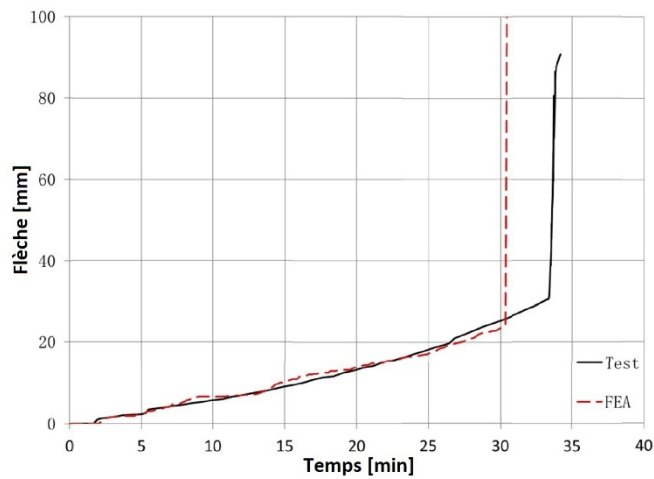
Vérification II : Un assemblage en bois lamellé-collé boulonné

Un assemblage bois-acier-bois, composé d'éléments en bois lamellé-collé de 130 x 190 mm, de quatre boulons et d'une plaque en acier de 9,5 mm d'épaisseur, soumis à une charge de traction axiale constante de 11,5 kN (10 % de la capacité de charge ultime dans les conditions ambiantes), testé conformément à la norme CAN/ULC S101 pour l'exposition au feu, a été choisi comme deuxième scénario de vérification (Chen et al., 2020). Un modèle par éléments finis de 1/8 de l'assemblage (figure 3a) a été élaboré à l'aide d'ABAQUS. Des limites symétriques ont été assignées à l'avant du lamellé-collé, à l'extrémité gauche, à l'avant et au bas de la plaque en acier et au bas des boulons, tandis que la courbe normalisée temps-température de la norme CAN/ULC S101 pour l'exposition au feu a été appliquée en haut et à l'arrière du modèle, reproduisant une exposition au feu sur quatre côtés.

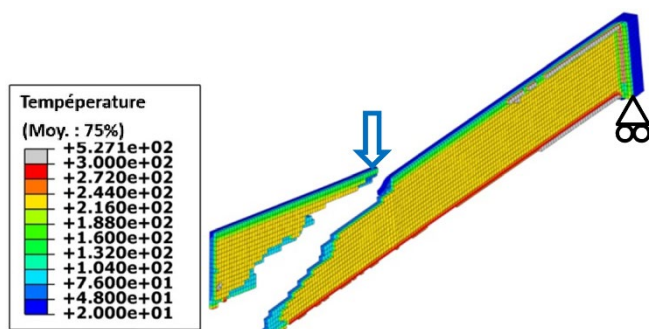
Les figures 3b et 3c montrent les vues en coupe transversale du lamellé-collé résiduel avec et sans trous de boulons à partir de l'analyse par éléments finis et des coupes de l'échantillon d'essai résiduel à 25,5 min. La partie grise du contour représente le bois carbonisé lorsque la température est supérieure à 300° C. Le modèle de transfert de chaleur a donné une bonne prédiction des dimensions résiduelles du bois par rapport aux résultats des tests.



(a)

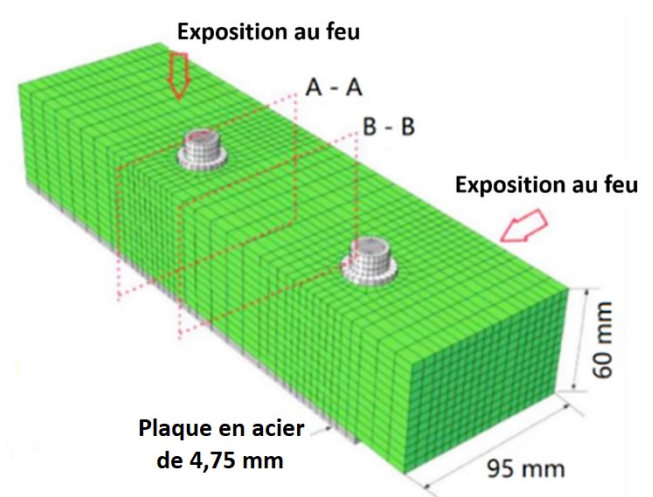


(b)

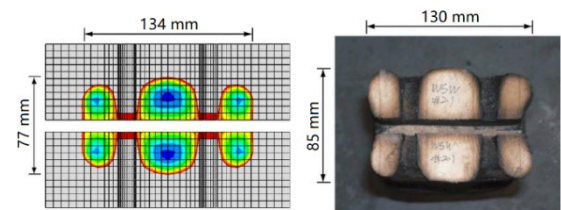


(c)

Figure 2. Modélisation d'une poutre en LVL : a) Modèle par éléments finis de 1/4; b) Courbe flèche-temps; c) Mode de défaillance.

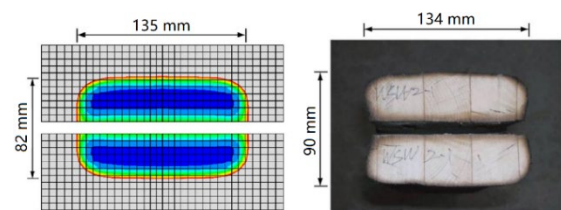


(a)



A - A

(b)



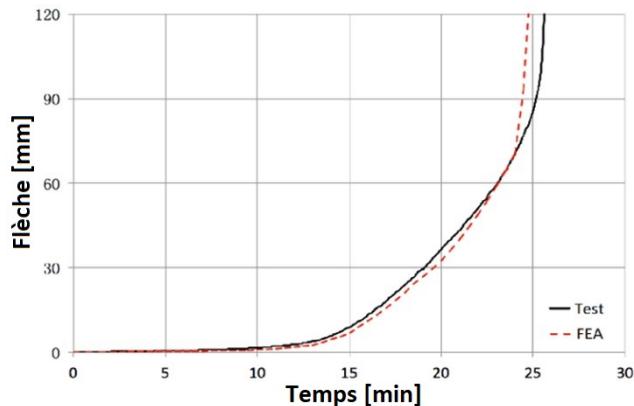
B - B

(c)

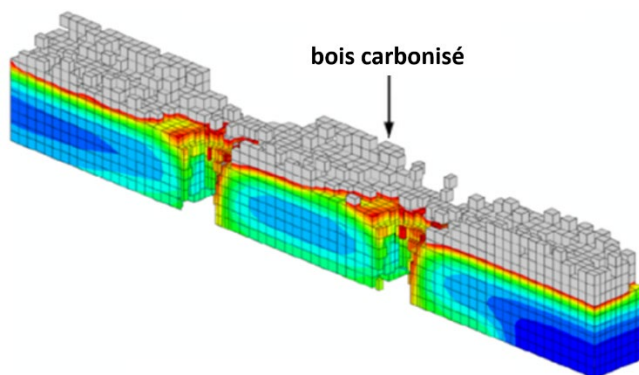
Figure 3. Modélisation d'un assemblage en bois lamellé-collé et boulons : a) Modèle par éléments finis de 1/8; b) Coupe transversale à la section A-A (analyse par EF par opposition au test); c) Coupe transversale à la section B-B (analyse par EF par opposition au test).

Le déplacement axial de l'assemblage a augmenté avec le temps et la température, comme en témoigne la figure 4a. Le déplacement a commencé à augmenter de manière significative après 10 min lors de l'essai. Cela s'explique par le fait que le module d'élasticité du bois autour des boulons a considérablement diminué en raison de la chaleur transférée par les boulons. Avec l'augmentation de la température, la section transversale du lamellé-collé a progressivement diminué et les contraintes autour des trous ont augmenté en conséquence, tandis que la résistance du bois a diminué en raison de la température élevée. Le modèle de l'assemblage a échoué en mode

d'écrasement du bois dans les trous de boulons dans le sens longitudinal (figure 4b). Le modèle de joint prévoyait que l'échec indiqué par le changement brusque du déplacement (figure 4a) se produirait à 25,5 min, soit à moins de 10 % du résultat réel du test (28,0 min).



(a)



(b)

Figure 4. Résultats de la modélisation : a) Flèche par rapport au temps du joint; b) Carbonisation et défaillance du lamellé-collé.

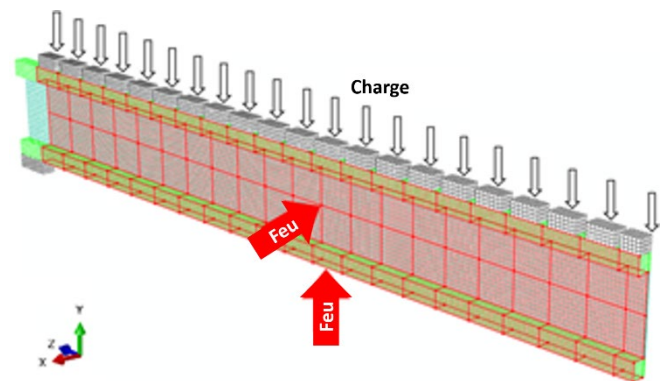
Application I : Solives en I à âme en OSB

En raison de son épaisseur limitée, l'âme en OSB est considérée comme le maillon faible des solives en I préfabriquées exposées au feu. WoodST a été utilisé pour évaluer et améliorer la performance au feu des âmes en OSB de solives en I préfabriquées en bois afin de répondre aux exigences américaines de résistance au feu des planchers résidentiels non protégés (Dagenais & Chen 2019). Avec cet outil de modélisation, seuls des échantillons d'OSB à petite échelle avec diverses options de protection (figure 5a) ont dû être testés pour caractériser la résistance résiduelle en fonction de diverses périodes d'exposition au feu, qui a ensuite été utilisée comme données d'entrée du modèle. La résistance au feu de l'ensemble des solives en I avec différentes protections de l'âme a ensuite été prédite avec une grande précision en effectuant une analyse

combinée thermo-structurale (figure 5b), sans procéder à de coûteux essais au feu grandeur nature.



(a)



(b)

Figure 5. a) Exposition au feu d'OSB de 9,5 mm; b) Modèle EF de 1/4 pour une solive en I avec âme en OSB.

Application II : Planchers à ossature légère de bois

En raison des limitations énoncées dans la norme CSA O86 et le code national du bâtiment du Canada (CNBC), la résistance structurale au feu des planchers à ossature légère de bois peut être déterminée soit en effectuant de coûteux essais au feu grandeur réelle, soit en utilisant la méthode fondée sur la somme des contributeurs du CNBC. La méthode WoodST a été utilisée pour évaluer la performance au feu des planchers à ossature bois afin de déterminer l'applicabilité de la norme CSA O86 sur la méthode de dimensionnement de la résistance au feu des éléments de structure en bois de plus de 70 mm d'épaisseur avec 3 côtés exposés au feu (Dagenais & Chen 2020). La figure 6a montre un modèle EF de 1/2 pour une solive de 2 x 8 avec un sous-plancher assigné d'un rapport de contrainte admissible de 50 % et exposé au feu conformément à la norme CAN/ULC S101. L'étape initiale de carbonisation et l'étape finale de défaillance du modèle sont illustrées respectivement dans les figures 6b et 6c. Les résultats de l'analyse par éléments finis montrent que les

dispositions actuelles de la norme CSA O86 sont applicables aux solives à ossature de bois dans les planchers non protégés.

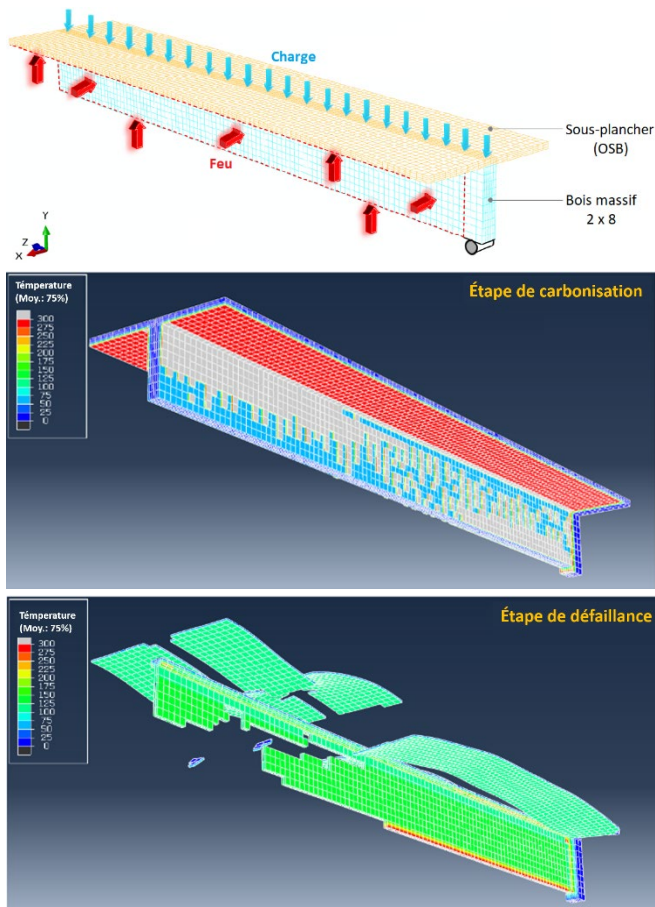


Figure 6. Modélisation d'un plancher à ossature de bois : a) Modèle EF de 1/2; b) Étape de carbonisation; c) Étape de défaillance.

Conclusions

Un outil de modélisation avancé, WoodST, a été développé pour l'analyse de la sécurité incendie des structures en bois. Il est démontré que cet outil de modélisation avancé peut prédire la réponse structurelle des poutres en LVL, des assemblages en lamellé-collé boulonnés, des solives en I à âme en OSB et des planchers à ossature de bois sous l'effet de forces et de l'exposition au feu avec une précision acceptable pour les concepteurs (c'est-à-dire dans les limites de 10 % des données d'essai). L'outil de modélisation développé peut :

- combler un manque en termes de modèles appropriés pour les assemblages en bois, ce qui constitue un obstacle à la conception et à la construction de bâtiments en bois de grande hauteur;

- fournir une solution de simulation économique par rapport aux solutions expérimentales coûteuses;
- réduire considérablement le coût et raccourcir le temps de développement et/ou d'optimisation de nouveaux produits et joints à base de bois.

Principales références

Chen, Z., Karacabeyli, E., & Lum, C. (2017). *A Survey on Modelling of Mass Timber (Project No. 301011232)*. FPInnovations, Vancouver, Canada.

Chen, Z., Ni, C., and Dagenais, C. (2018). *Advanced Wood-Based Solutions for Mid-Rise and High-Rise Construction: Modelling of Timber Connections under Force and Fire (Project No. 301012203)*. FPInnovations, Vancouver, Canada.

Chen, Z., Ni, C., Dagenais, C., & Kuan, S. (2020). *WoodST: A Temperature-Dependent Plastic-Damage Constitutive Model Used for Numerical Simulation of Wood-Based Materials and Connections*. *Journal of Structural Engineering*, 146(3), 04019225.

Dagenais, C. and Chen, Z. (2019). *Évaluation de la résistance au feu des poutrelles de bois en I (Projet no. 301013016)*. FPInnovations, Québec, Canada.

Dagenais, C., and Chen, Z. (2020). *Expanding Wood Use Towards 2025: Part 1 – Calculating Fire Resistance of Wood-Frame Floor Elements (Project No. 301013618)*. FPInnovations, Québec, Canada.

Pour plus d'information

Zhiyong Chen | (604) 222-5625
zhiyong.chen@fpinnovations.ca

Christian Dagenais | (418) 781-6753
christian.dagenais@fpinnovations.ca

Chun Ni | (604) 222-5647
chun.ni@fpinnovations.ca

Suivez-nous



fpinnovations.ca