



RÉSISTANCE AU FEU

FORMATION CECOBOIS – LES PROS DU BOIS

Christian Dagenais, ing., Ph.D.
Scientifique leader – Systèmes de construction
Professeur invité – Université Laval

19 juin 2020



FPInnovations est un centre de recherche sans but lucratif qui se spécialise dans la création de solutions afin de soutenir la compétitivité du secteur forestier canadien à l'échelle mondiale

- +430 employés
- Opérations forestières
- Pâtes et papiers
- Produits du bois
- Produits biosourcés



Plan du webinaire

Concept de résistance au feu

Méthode d'essai CAN/ULC S101

Résistance au feu – Bois

- Généralités
- Ossature de bois
- Construction massive en bois
- Assemblages (attaches)

Conclusion

Concept de résistance au feu

La résistance au feu des éléments et assemblages permet de subdiviser un bâtiment en compartiments résistants au feu et assurer l'intégrité structurale

- L'un des plus importants concept de protection passive contre l'incendie
- Objectif « *contrôle du déplacement du feu* » de l'arbre NFPA 550 [1]
 - Éléments séparatifs (murs, planchers, toits, cloisons)
 - Éléments structuraux (poutres, colonnes, murs, planchers, toits)

Concept de résistance au feu

Un matériau ne possède pas de “résistance au feu”

- Pas une propriété intrinsèque d'un matériau...
- ...mais plutôt une propriété d'une structure ou d'un élément de structure
 - Poutre ou colonne simple en bois, acier ou béton
 - Assemblage de plancher (poutrelles, gypse, etc)

CNBC [2] exige que le DRF soit déterminé par :

- Essais réels conformément à CAN/ULC S101 [3] (très coûteux !)
- Annexe D du CNBC (D-2.3, D-2.4 et D-2.11 sont reliés au bois)
- Tableaux A-9.10.3.1.A (murs) et B (planchers et toits) du CNBC

Concept de résistance au feu

Objectifs du Code

- OS1 : Sécurité incendie
- OP1 : Protection du bâtiment contre l'incendie

- Attribution 1 : [F03-OS1.2] [F04-OS1.3]
 - Limiter la probabilité que les matériaux, les assemblages de matériaux ou les éléments structuraux aient une résistance insuffisante à la propagation du feu, ce qui pourrait causer des blessures à des personnes.
 - Limiter la probabilité que les matériaux, les assemblages de matériaux ou les éléments structuraux aient une résistance insuffisante à la propagation du feu, ce qui pourrait provoquer leur défaillance ou leur effondrement, puis causer des blessures à des personnes.

Concept de résistance au feu

Objectifs du Code

- OS1 : Sécurité incendie
- OP1 : Protection du bâtiment contre l'incendie
- Attribution 2 : [F03-OP1.2] [F04-OP1.3]
 - Limiter la probabilité que les matériaux, les assemblages de matériaux ou les éléments structuraux aient une résistance insuffisante à la propagation du feu, ce qui pourrait causer des dommages au bâtiment.
 - Limiter la probabilité que les matériaux, les assemblages de matériaux ou les éléments structuraux aient une résistance insuffisante à la propagation du feu, ce qui pourrait provoquer leur défaillance ou leur effondrement, puis causer des dommages au bâtiment.

Concept de résistance au feu

Aptitude d'une structure à résister à un feu peut être vérifiée selon 3 niveaux

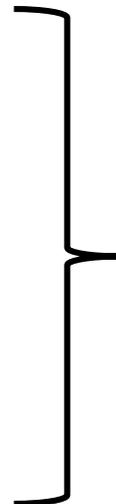
1. Temps (min ou hre)
2. Température (°C)
3. Résistance (kN ou kN·m)

Permettant de rencontrer les critères de performance :

R : résistance mécanique

E : intégrité

I : isolation



Concept de résistance au feu

Situation normale vs incendie

- États limites ultimes sont plus critiques afin de prévenir un effondrement
 - Déformations ne sont pas importantes sauf si elles influencent les résistances
- Efforts internes peuvent être induits par dilatation thermique du matériau (négligeable pour le bois)
- Résistances peuvent être réduites par la chaleur (acier et béton armé)
- Sections transversales peuvent être réduites dues à la carbonisation (bois) ou par éclatement (béton)
- Facteurs de sécurité moindres (événement rare, probabilité plus petite)
- Différents modes de rupture sont à considérer

Méthode d'essai CAN/ULC S101

Temps pendant lequel un matériau ou une construction continue de fournir, dans des conditions déterminées d'essai et de comportement :

- sa fonction séparative (c.-à-d. empêcher le passage des flammes et la transmission de la chaleur)
- sa fonction structurale (c.-à-d. supporter les charges)
- Ou les deux fonctions

Performance nullement reliée à la notion de combustibilité des matériaux

- Évaluée selon CAN/ULC S114 [10]
- *Résistance au feu \neq incombustibilité*



Méthode d'essai CAN/ULC S101

Essais normalisés (courbes temps-température) les plus courants sont :

- ULC S101 [3] (Canada)
- ASTM E119 [11] (USA)
- ISO 834-1 [12] (International)



Méthode d'essai CAN/ULC S101

CAN/ULC S101 et ASTM E119

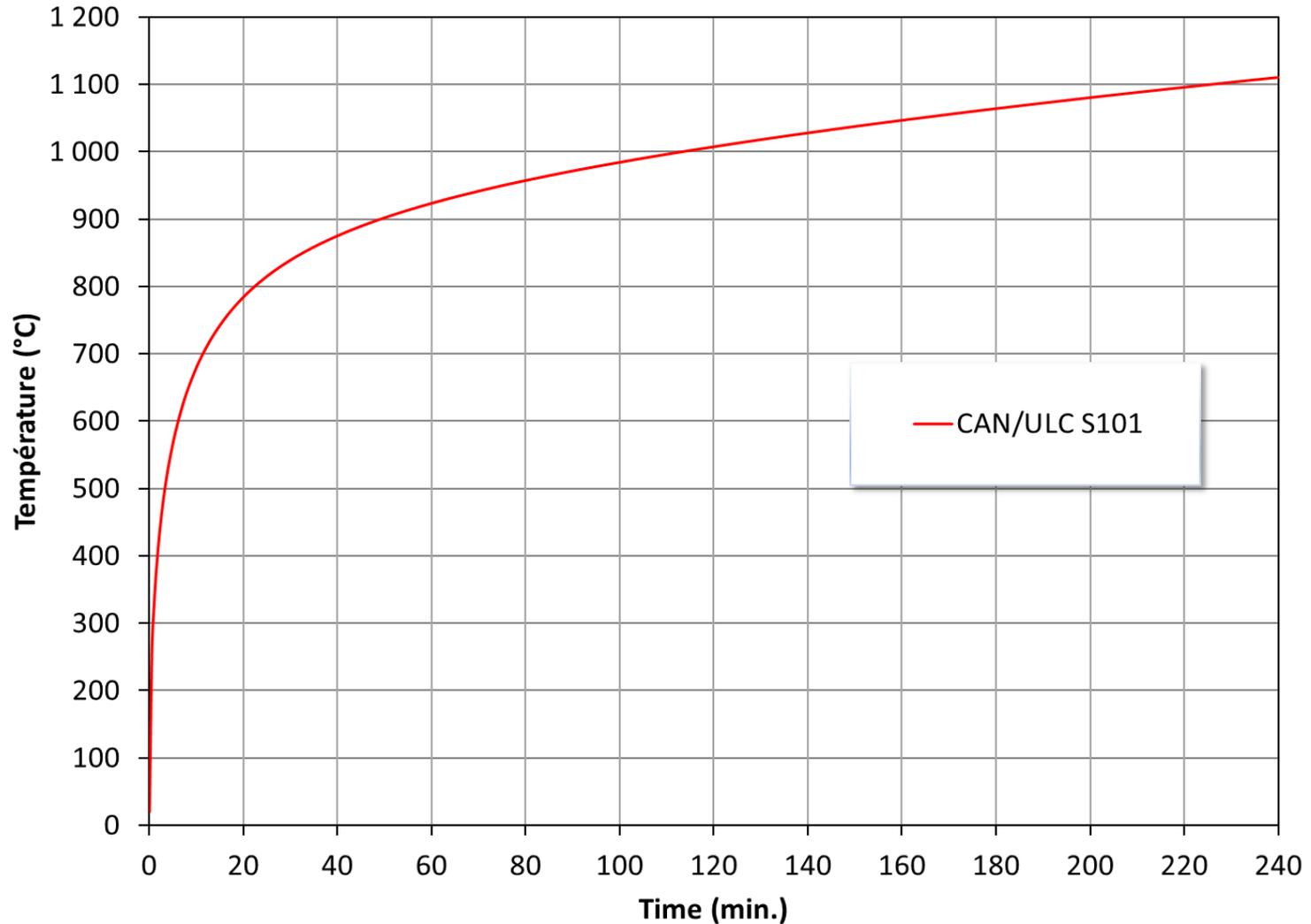
$$T(^{\circ}\text{C}) = 750 \left(1 - e^{-0,49\sqrt{t}} \right) + 22\sqrt{t} + 20$$

ISO 834

$$T(^{\circ}\text{C}) = 345 \log(8t + 1) + 20$$

Temps (min)	CAN/ULC S101 (ASTM E119)	ISO 834
0	20°C	20°C
30	839°C	842°C
45	890°C	902°C
60	924°C	945°C
120	1007°C	1049°C
240	1110°C	1153°C

Méthode d'essai CAN/ULC S101



Méthode d'essai CAN/ULC S101

Dispositifs d'essais

Colonne

$H \leq 3,81 \text{ m}$
(12'-6")

CAN/ULC S101

$H \geq 2750 \text{ mm}$



Image : NRC-IRC (www.nrc-cnrc.gc.ca)

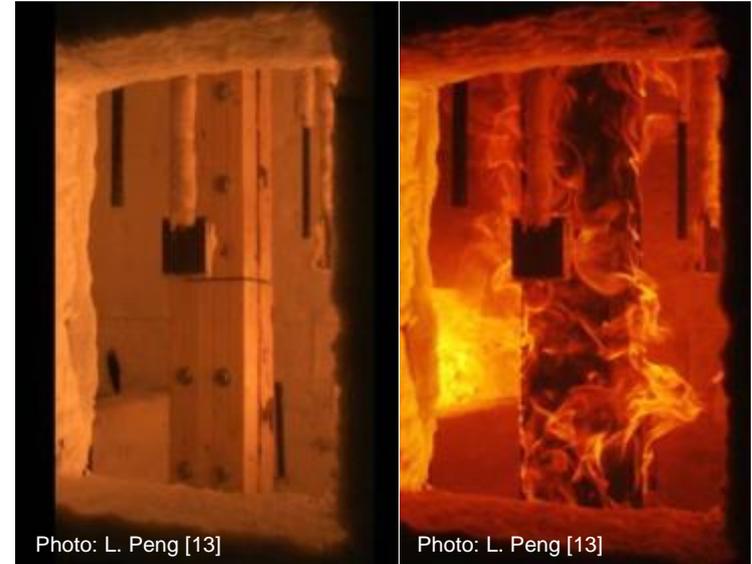


Photo: L. Peng [13]

Photo: L. Peng [13]

Méthode d'essai CAN/ULC S101

Dispositifs d'essais



Image : NRC-IRC (www.nrc-cnrc.gc.ca)

Plancher/Plafond

4,87 x 3,96 m
(16'x13')

CAN/ULC S101

Min. 16.8 m²
(H ou $L \geq 3660$ mm)

Méthode d'essai CAN/ULC S101

Dispositifs d'essais



Méthode d'essai CAN/ULC S101



Photo: FPInnovations

Méthode d'essai CAN/ULC S101

Dispositifs d'essais

Mur/Cloison

3,66 x 3,05 m
(12' x 10')

CAN/ULC S101

Min. 9.3 m²
(H ou $L \geq 2750$ mm)



Image : NRC-IRC (www.nrc-cnrc.gc.ca)

Méthode d'essai CAN/ULC S101

Dispositifs d'essais



Méthode d'essai CAN/ULC S101



Photo: FPIinnovations

Méthode d'essai CAN/ULC S101

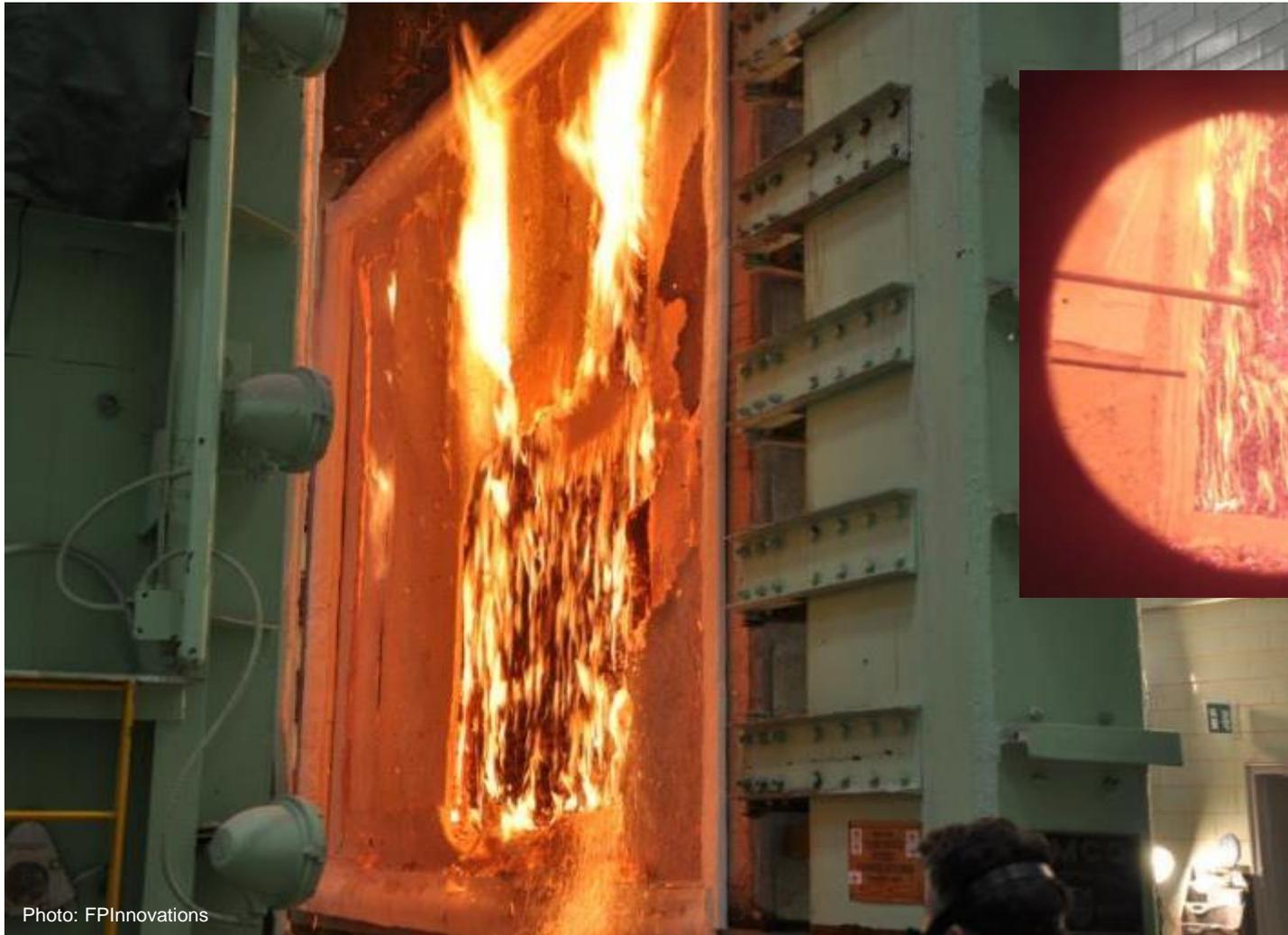
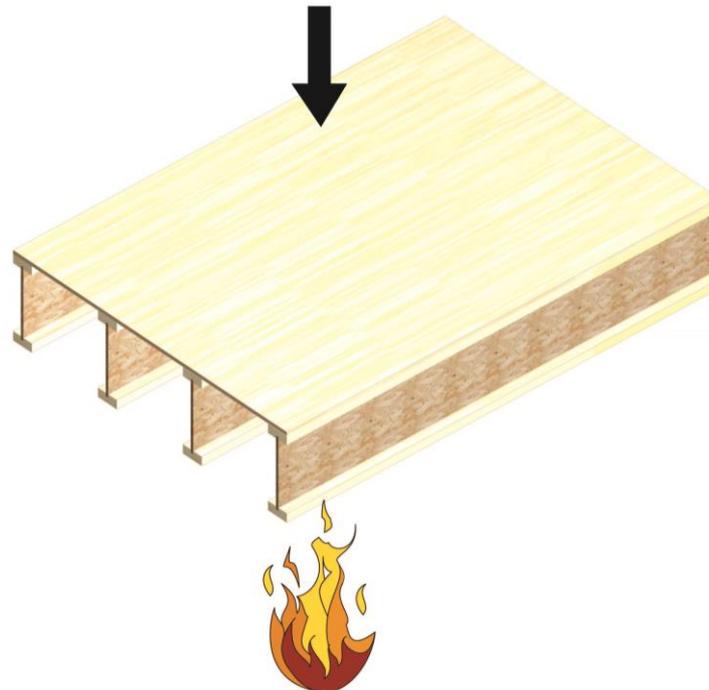


Photo: FPIinnovations

Méthode d'essai CAN/ULC S101

Critères d'évaluation des éléments

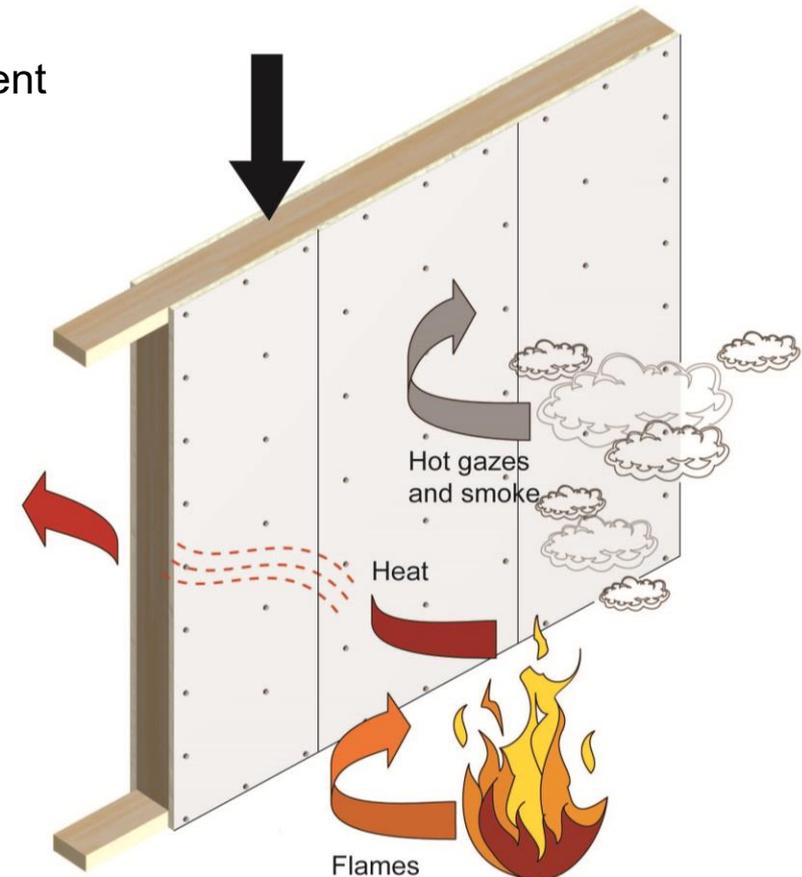
- Résistance mécanique (R)
 - Aptitude d'un ensemble ou d'un élément structural à résister aux actions spécifiées pendant l'exposition au feu donné



Méthode d'essai CAN/ULC S101

Critères d'évaluation des éléments

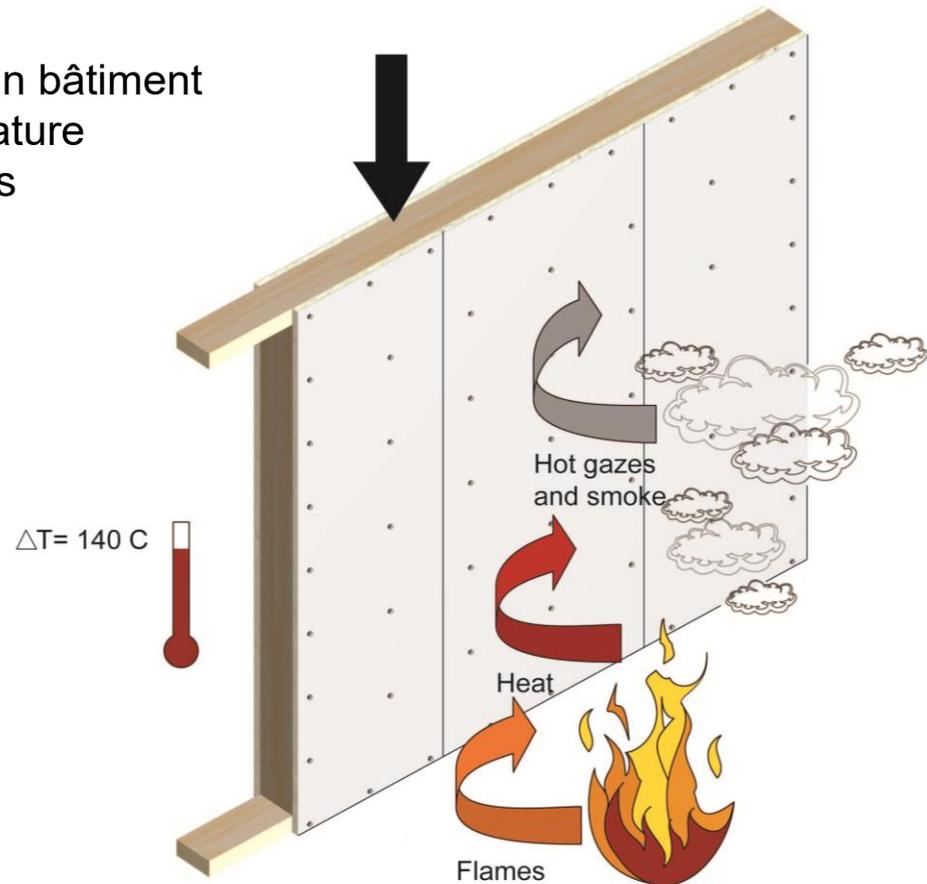
- Intégrité (E)
 - Aptitude d'un élément séparatif d'un bâtiment à empêcher le passage des flammes et des gaz chauds et à éviter l'apparition de flammes du côté non exposé



Méthode d'essai CAN/ULC S101

Critères d'évaluation des éléments

- Isolation (I)
 - Aptitude d'un élément séparatif d'un bâtiment à limiter l'augmentation de température de la face non exposée en dessous des niveaux spécifiés
 - $\Delta T \leq 140^{\circ}\text{C}$ (moyenne) ou
 - $\Delta T \leq 180^{\circ}\text{C}$ (max. en tout point)



Méthode d'essai CAN/ULC S101

Critères d'évaluation des éléments

	Résistance mécanique (R)	Intégrité (E)	Isolation (I)
Cloison / porte		✓	✓
Mur porteur	✓	✓	✓
Plancher / plafond	✓	✓	✓
Poutre	✓		
Colonne	✓		
Vitrerie		✓	

- Résistance mécanique : assure une stabilité structurale suffisante
- Intégrité et isolation : contrôle de propagation du feu au-delà de son point d'origine

Méthode d'essai CAN/ULC S101

Temps où l'un des critères n'est plus respecté dicte la résistance au feu de l'élément ou assemblage

- Degré de résistance au feu (DRF) = résistance au feu arrondie à la minute
 - DRF est exprimé en termes de 45 min, 1 h, 1.5 h, 2h, etc.

Degré de résistance au feu (DRF) obtenus par :

- Listes génériques ou essais propriétaires
- Méthodes de calcul
- Opinion d'experts (moins fréquent)

Méthode d'essai CAN/ULC S101

Éléments structuraux

- Charge complète
 - Charge appliquée résulte en un effet de charge pondérée égal à la résistance pondérée de l'élément
 - Résultat (DRF) est donc valide pour toute application (ratio de sollicitation)

- Charge limitée
 - Charge appliquée résulte en un effet de charge pondérée inférieur à la résistance pondérée de l'élément
 - Résultat (DRF) est donc valide pour un ratio de sollicitation équivalent ou moindre

 Attention aux évaluations ULC portant la mention « *Load Restricted* »

http://database.ul.com/cgi-bin/XYV/template/LISCANADA/1FRAME/showpage.html?&name=BXUVC.GuideInfo&ccnshorttitle=Fire+Resistance+Ratings&objid=1075952497&cfid=1073741824&version=versionless&parent_id=1075952496&sequence=1

Méthode d'essai CAN/ULC S101

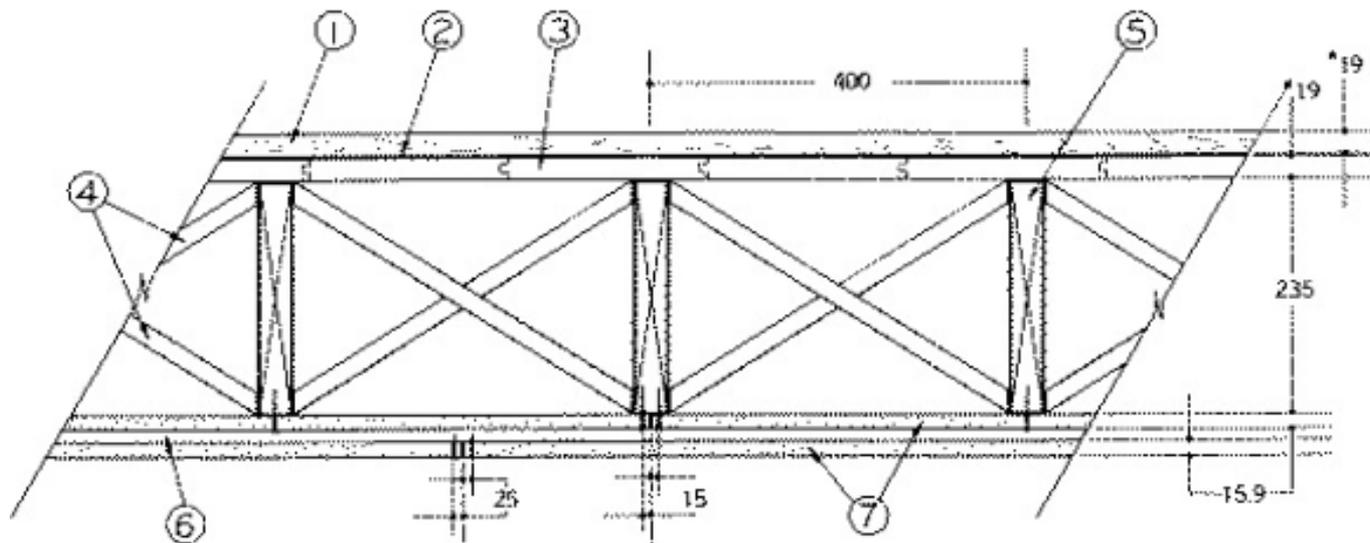
Éléments structuraux avec la mention « *Load Restricted* »

Design No. L511

July 24, 2014

Unrestrained Assembly Rating - 2 h

Load Restricted — Assembly evaluated in accordance with Working Stress Design methods, for use under Limit States Design methods; refer to information under Guide [BXUVC](#).



Méthode d'essai CAN/ULC S101

Éléments structuraux avec la mention « *Load Restricted* »

- Vérification à faire par l'ingénieur en structure afin de respecter les ratios de sollicitation des charges appliquées

Table 1

Type of Assembly	Percent Load Reduction (LSD-WSD) / LSD	Load Restricted Factor
W200x42 noncomposite steel beam	12%	0.88
W200x42 composite steel beam	29%	0.71
Floor / Roof supported by open web steel joists	4%	0.96
Floor supported by cold formed steel channels	4%	0.96
Floor supported by 38 by 235 mm wood joists	35%	0.65
Wall supported by 38 by 89 mm wood studs	18%	0.82
Steel columns	0%	None

http://canada.ul.com/wp-content/uploads/sites/11/2015/03/Information_Bulletin_2015-01AENG-ULC-S101-14.pdf

Résistance au feu – Bois – Généralités

Carbonisation = processus fondamental !

- Couche de carbonisation (bois brûlé) en périphérie
- Isolant qui protège la partie résiduelle de la chaleur
- Isolant qui réduit les effets de la chaleur (dégradation thermo-mécanique)
- Se définit comme la distance entre la face externe de l'élément initial et la position de la ligne de carbonisation (isotherme 300°C)
- Présume qu'elle ne procure aucune résistance, ni rigidité



Image : SP Trätekt [13]

Résistance au feu – Bois – Généralités

Sous la couche de carbonisation, la température est peu affectée (demeure « normale »)

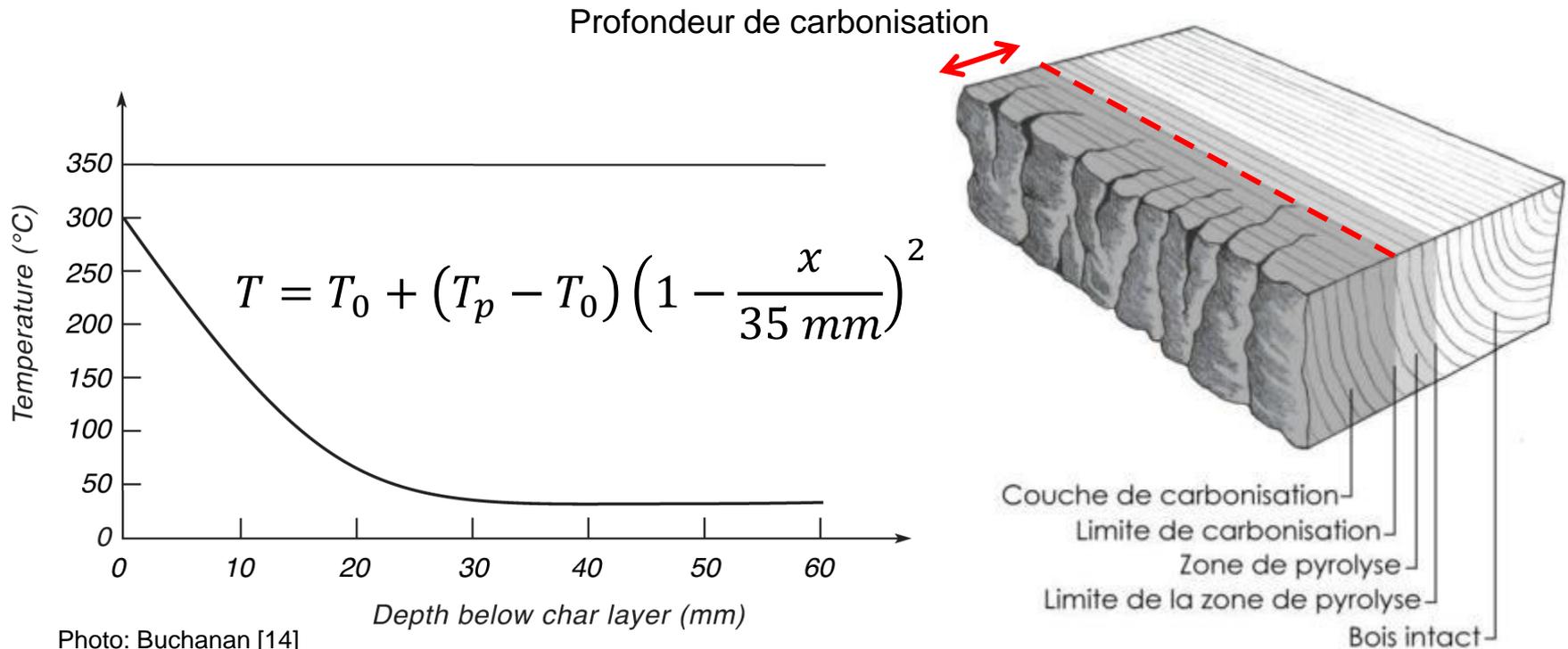


Photo: Buchanan [14]

Résistance au feu – Bois – Généralités

Sous la couche de carbonisation, les résistances sont peu affectées (demeurent « normales »)

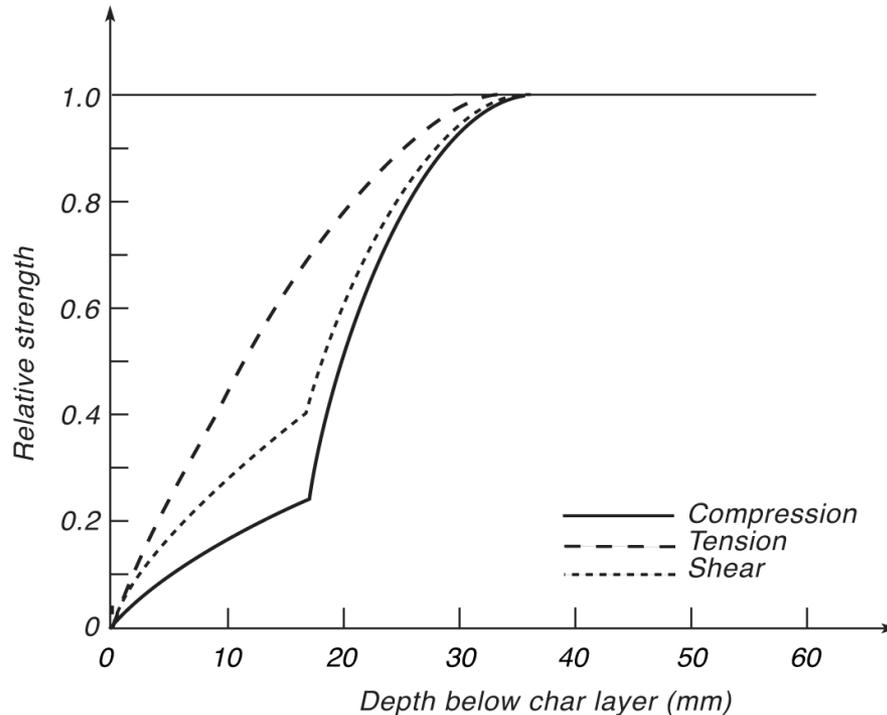
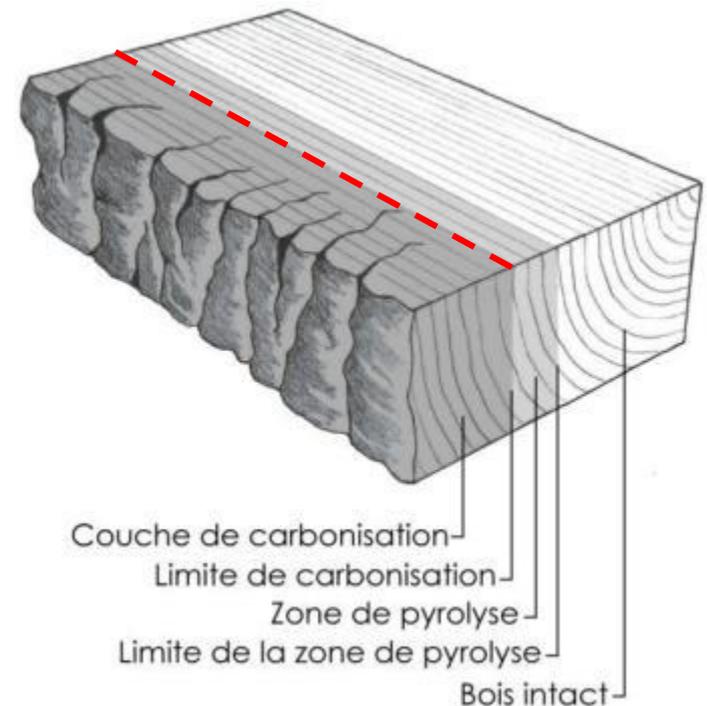


Photo: Buchanan [14]



Résistance au feu – Bois – Généralités

Sous la couche de carbonisation, les résistances sont peu affectées (demeurent « normales »)

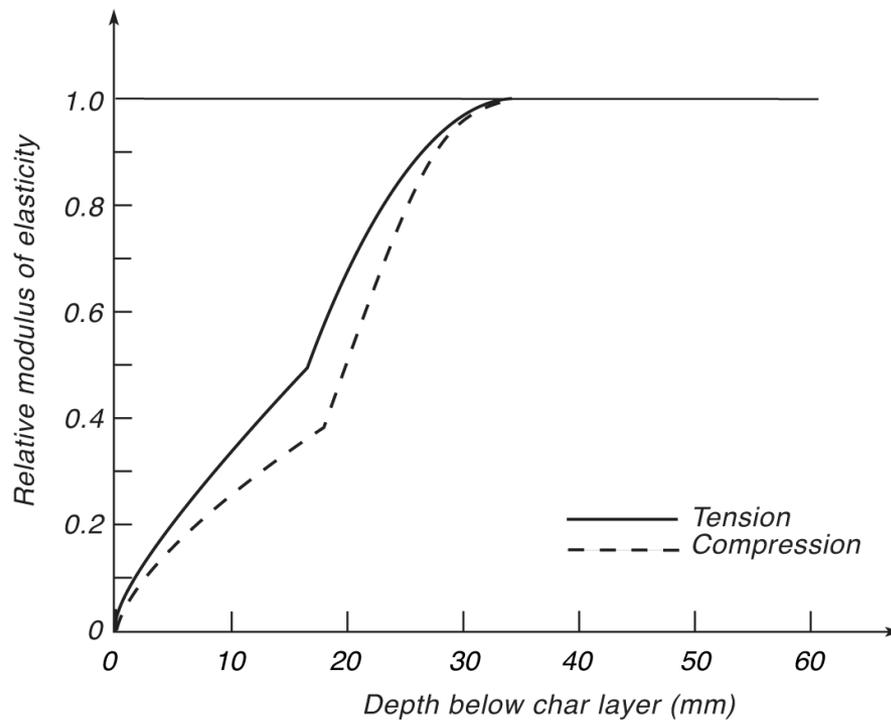
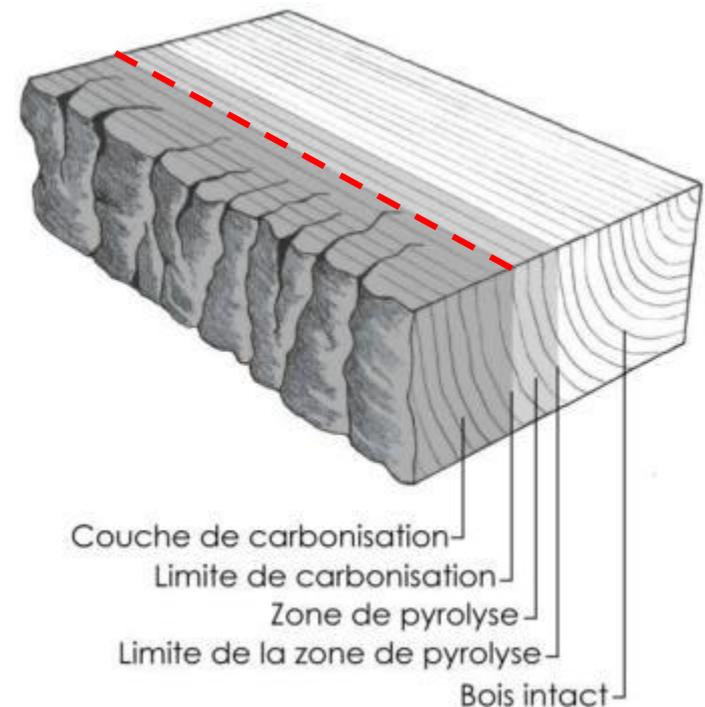


Photo: Buchanan [14]



Résistance au feu – Bois – Généralités

Vitesse de combustion unidimensionnelle (β_0)

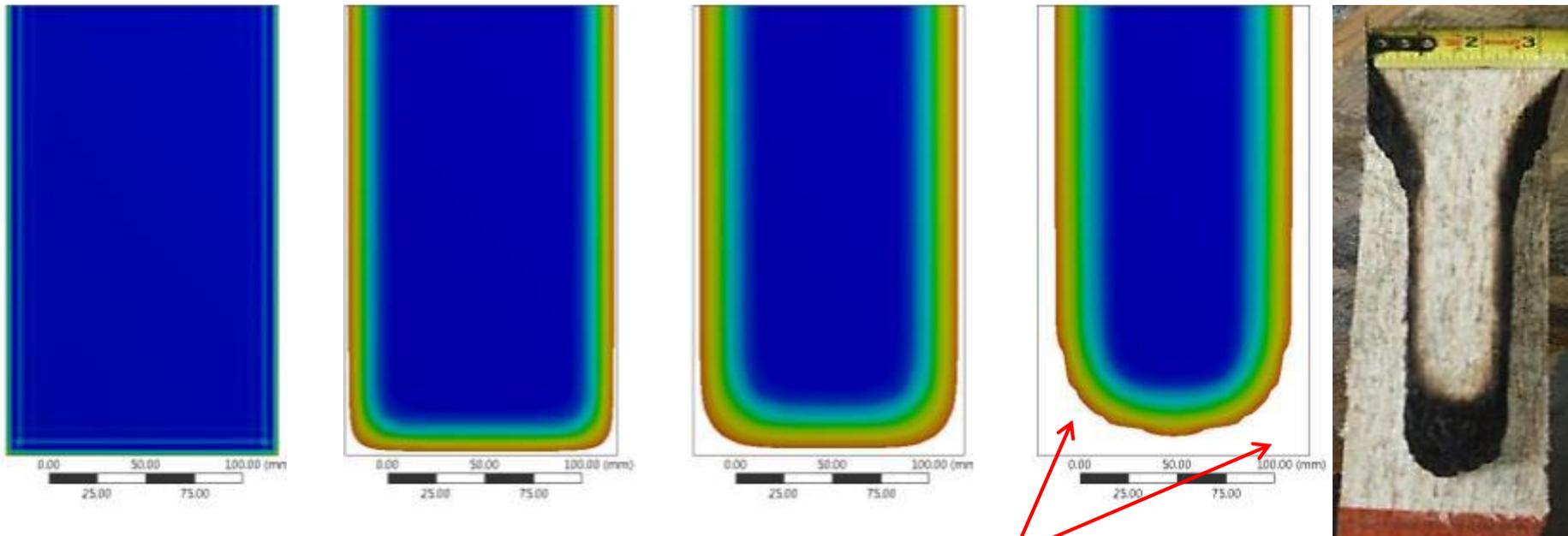
- Basée sur un transfert thermique unidirectionnel au travers une dalle semi-infinie thermiquement (élément « épais »)
- Profondeur de carbonisation, $d_{char,0} = \beta_0 \cdot t$
- Applicable aux éléments plats, sans coins (ex : CLT, platelage, etc.)



Résistance au feu – Bois – Généralités

Vitesse de combustion fictive (β_n)

- Développée afin d'inclure l'augmentation de transfert thermique aux coins (chaleur provient de 2 directions → pénètre plus rapidement et localement)

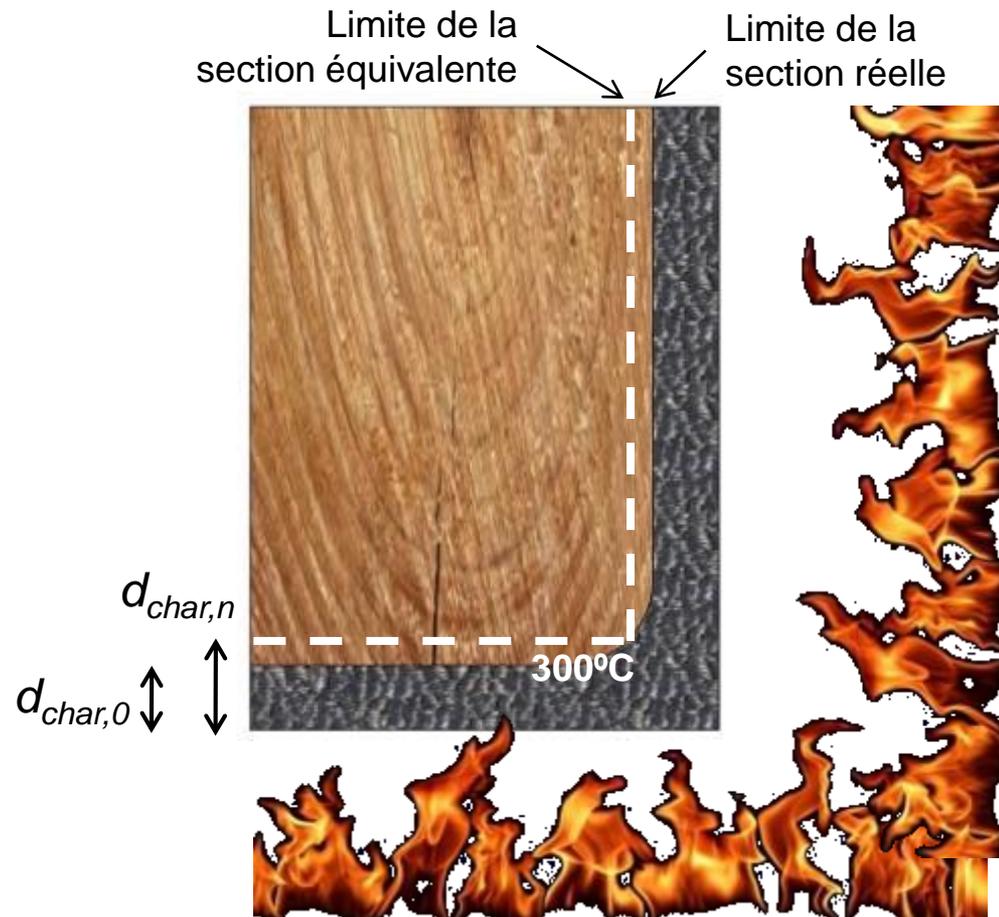


Effet des arrondis de coins

Résistance au feu – Bois – Généralités

Vitesse de combustion fictive (β_n)

- Permet de déterminer l'aire (A), le module de section (S) et l'inertie (I) d'une section rectangulaire équivalente
- Profondeur $d_{char,n} = \beta_n \cdot t$
- Applicable à toutes les faces exposées au feu
- Applicable aux éléments rectangulaires ou ronds



Résistance au feu – Bois – Généralités

Vitesse de combustion (β) selon CSA O86-19 [8]

Tableau B.4.2

Vitesses de combustion de calcul pour le bois et les produits à base de bois, mm/min

	β_o	β_n
Gros bois d'œuvre et platelage en madriers	0,65	0,80
Bois lamellé-collé	0,65	0,70
Bois de charpente composite	0,65*	0,70*
Bois lamellé-croisé	0,65	0,80

*Ces valeurs s'appliquent uniquement aux produits de bois de charpente composite à base de bois.



Résistance au feu – Bois – Généralités

Calcul de la couche carbonisée effective (d_{char}) [8]

- En négligeant les effets de coins, donc en utilisant β_n

$$\begin{aligned}d_{eff} &= d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \\ &= \beta_n \cdot t + k_0 \cdot d_0\end{aligned}$$

$$k_0 = 7 \text{ mm}$$

$$d_0 = \begin{cases} \frac{t}{20} & (\text{pour } t < 20 \text{ min}) \\ 1.0 & (\text{pour } t \geq 20 \text{ min}) \end{cases}$$

Résistance au feu – Bois – Généralités

Diminution de la section transversale résulte en une réduction de la capacité portante des éléments

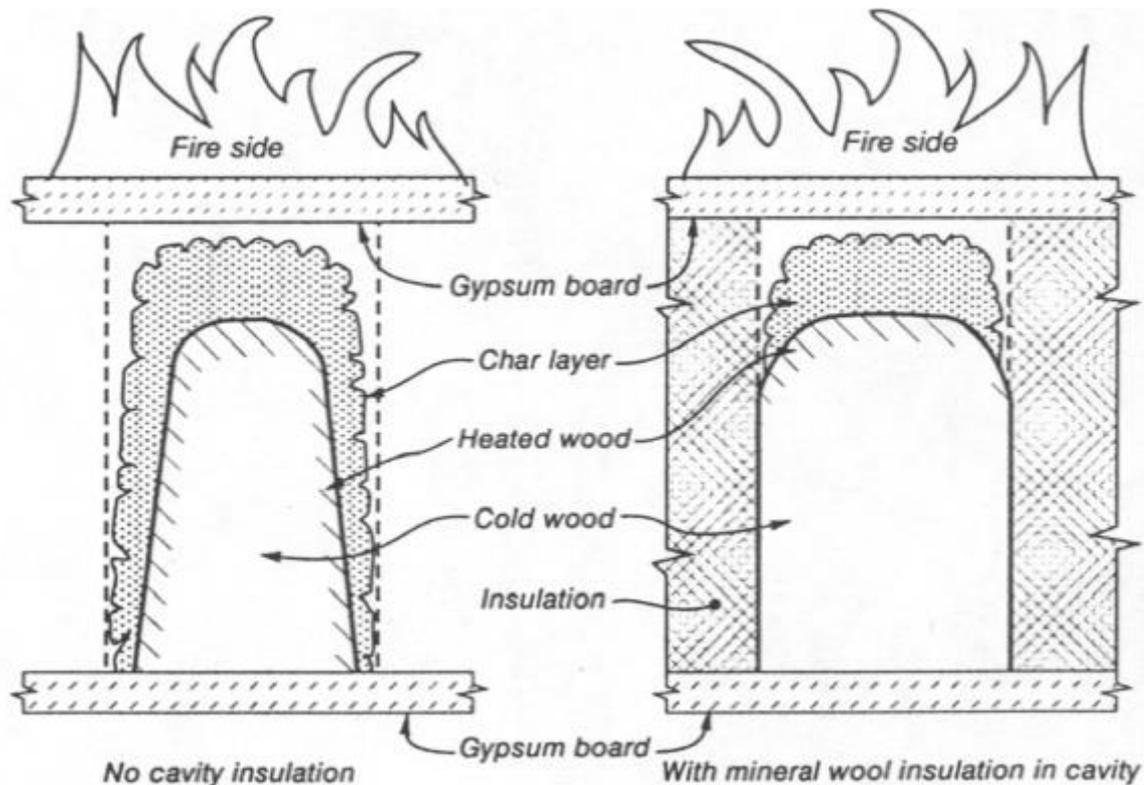


Image : Buchanan [14]

Résistance au feu – Bois – Généralités

Éléments en traction

- Efforts axiaux seront moindres (voir cas de chargement)
- Résistance peut être réduite suite à la réduction de la section transversale (carbonisation du bois)

Éléments en compression

- Mêmes principes que les éléments en traction
- Rupture par instabilité (flambage) plus probable suite aux réductions des résistances, de section transversale et/ou excentricité de la charge en fonction du temps (déplacement de l'axe neutre)
 - Facteur d'élançement (K_c) est fonction du temps (si réduction section transversale)

Résistance au feu – Bois – Généralités

Diminution de la section transversale résulte en une excentricité et effets P- Δ importants (flambage)

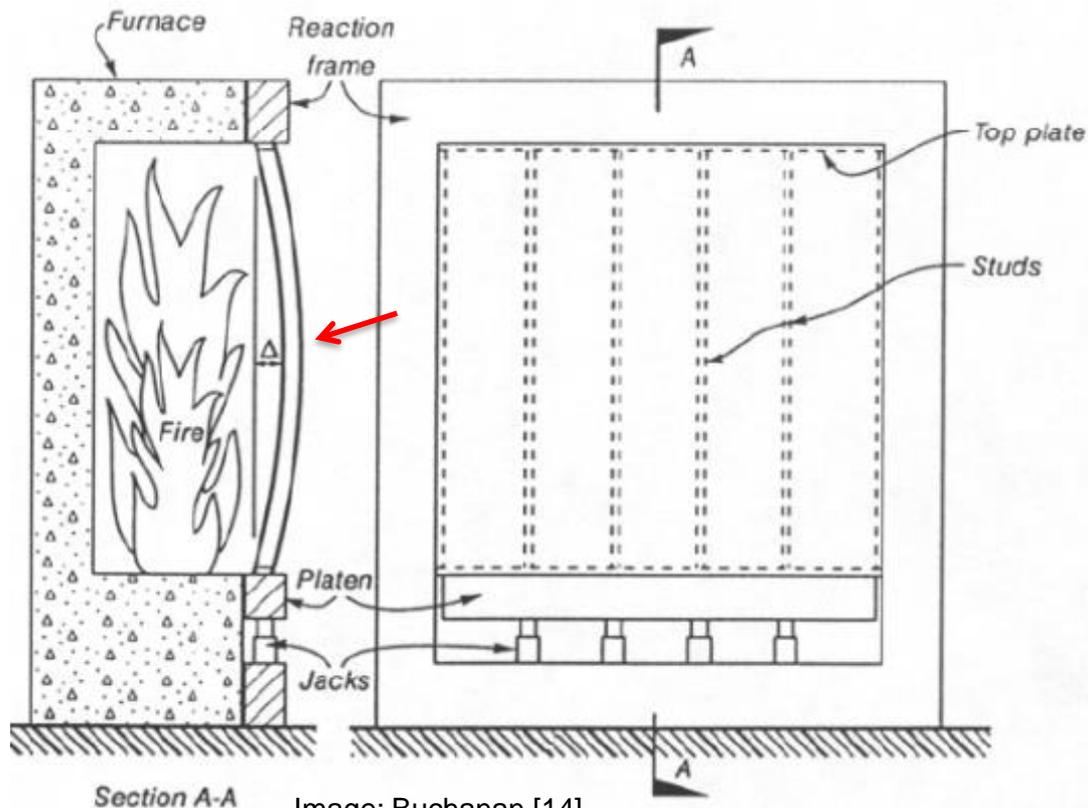


Image: Buchanan [14]

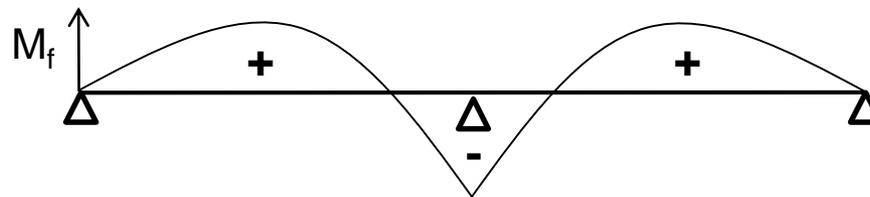


Photo: FPIinnovations

Résistance au feu – Bois – Généralités

Éléments en flexion

- Mêmes principes que les éléments en traction
- Éléments en portée simple
 - Vérification du M_{max} au travers de la portée
- Éléments en portée continue
 - Vérification du M_{max} au travers de la portée et aux appuis



Attention au support latéral des éléments fléchis

- Carbonisation réduit la section transversale et par conséquent peut augmenter l'élançement d'une poutre (facteur K_L)

Résistance au feu – Bois (ossature légère)



Résistance au feu – Bois (ossature légère)

Type de construction le plus courant

- Aussi appelé construction « plate-forme »
- Peut aussi être de type « claire-voie »

Consiste en des éléments de bois répétitifs de petites dimensions et recouverts d'un panneau structural (refend)

- Mur : inclut les montants, lisse, sablières et entremises
 - Sablières et entremises jouent un rôle structural
 - Sablières et entremises servent aussi de coupe-feu dans les murs !
- Plancher/toit : inclut les poutrelles, solives ou fermes

Résistance au feu – Bois (ossature légère)

Systemes peuvent fournir un excellent comportement en situation d'incendie, à la condition qu'ils soient bien construits (ex: dispositifs coupe-feu, intégrité des membranes protectrices, etc.)

- Plan détaillé et inspection de chantier sont requis (fortement recommandé!)

Résistance au feu doit être procuré par l'utilisation de plaques protectrices à cause des « petites » dimensions des éléments de bois

- DRF assigné à un assemblage (pas à un élément simple)

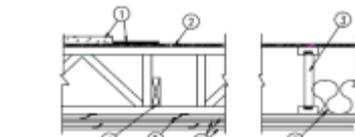
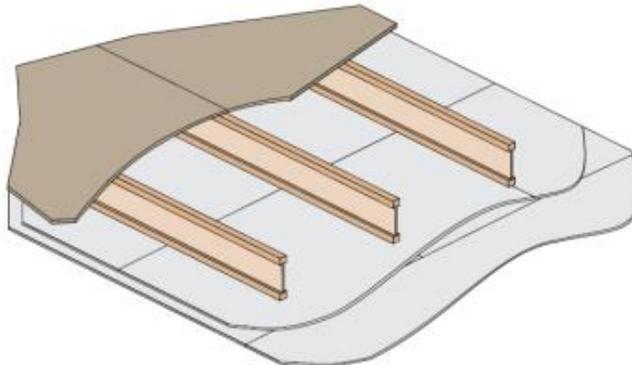
Résistance au feu – Bois (ossature légère)

Panneaux de gypse est la protection la plus courante

- Posés directement aux colombages, solives/poutrelles, et/ou aux fermes
 - Parfois installés sur des barres résilientes (acoustique)
- DRF majoritairement fourni par 1 ou 2 gypses Type X ou C
- Assemblages génériques (ex. : Annexes D-2.3 du CNBC)
- Assemblages propriétaires (selon fabricants)
- Habituellement pas de calculs structuraux à réaliser

Résistance au feu 60 minutes (assemblage de plancher et de toit)

Deux panneaux de gypse 5/8" de type X - Poutrelles BCI® et AJS®



1- Revêtement de plancher: Le revêtement est optionnel. (Avec légers ou revêtement standard)
2- Deux panneaux: Revêtement standardisé résistante de 60" minutes.
3- Membrane de résilience: Solive Ajourée 2000™, d'un minimum de 3 1/2" de hauteur, jusqu'à jusqu'à 2 1/2" de diamètre en 3/4" et 1/2" de diamètre en 1/2" de diamètre en 1/2". (Canadian Lumber) ou gypse par un bureau d'inspection ou une agence approuvée par le "United States Department of Commerce Board of Forest and the American Lumber Standard Committee". Les membranes de résilience doivent passer à une que celle de la NFPA.
4- Lierre continue: Lierre continue en 2x4 doit être à la membrane inférieure et sur la tête de la diagonale avec des clips de 2".

La membrane de plâtre résistante consiste en trois couches de panneaux de gypse de 5/8" avec la propriété Type X. Chaque feuille de panneau de gypse n'a pas plus de 4' de largeur. L'application des joints doit être faite par "Lafarge Plâtre America Finishes, C gypse board, Plâtre d'origine Dural Board Plus de 1/2" gypse board and Omega Plâtre (OS) Oppose Single/Double Plus d'origine C gypse board".

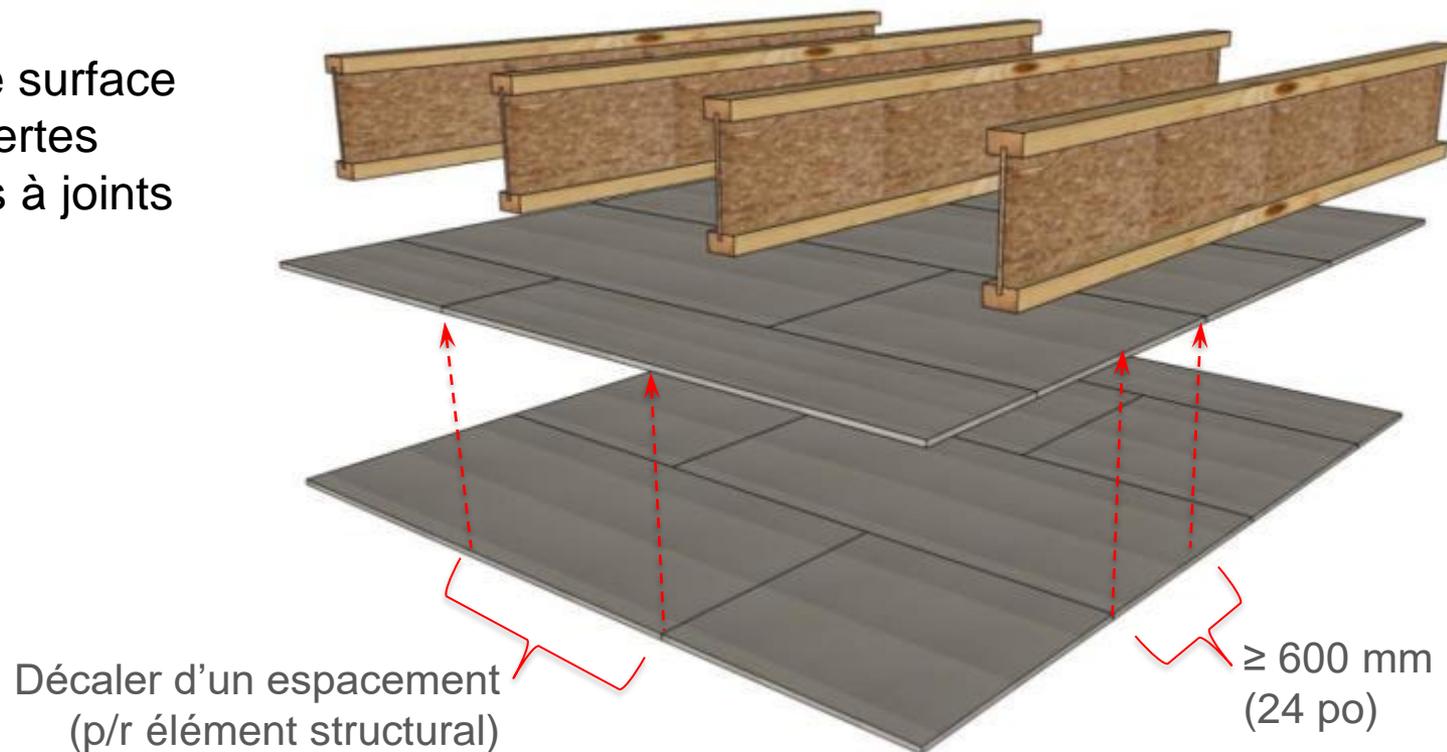
3- Barres résilientes: Barres résilientes d'un diamètre de 1/2" d'épaisseur et à un minimum de 2 1/2". Les barres résilientes s'insèrent progressivement sous les solives et s'alignent sur chaque solive résistante avec des vis de 1 1/2" de type 5 ou 3/2 1/2" de Solive Ajourée 2000 avec une tête à 30° en acier, les barres résilientes sont optionnelles.

Les détails d'assemblage sont en page 10 du manuel de l'utilisateur. Les détails de l'assemblage sont en page 10 du manuel de l'utilisateur. Les détails de l'assemblage sont en page 10 du manuel de l'utilisateur.

Résistance au feu – Bois (ossature légère)

Panneaux de gypse

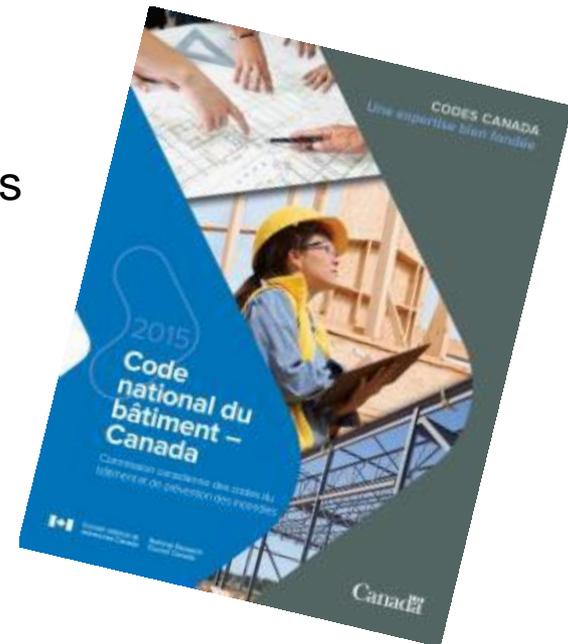
- Vis placées à 38 mm des extrémités (recommandé, lorsque possible)
- Si plusieurs panneaux : alterner les joints (sur la largeur et longueur)
- Panneaux de surface et vis recouvertes de composés à joints



Résistance au feu – Bois (ossature légère)

Méthode fondée sur la somme des éléments contributants (Annexe D-2.3 du CNBC [2])

- Entièrement révisée depuis le CNBC 2015
- Pour DRF d'au plus 90 min.
- Nouvelles configurations d'assemblages
- Ajout des poutrelles en I et ajourées/à plaques



Résistance au feu – Bois (ossature légère)

Tableau D-2.3.4.A (murs)

Type de paroi	Temps (min)	
	Porteur	Non-porteur
Contreplaqué D-Fir de 11 mm, résine phénolique	-	10 ⁽¹⁾
Contreplaqué D-Fir de 14 mm, résine phénolique	-	15 ⁽¹⁾
1 Gypse Type X de 12,7 mm	25 ⁽²⁾	25
1 Gypse Type X de 15,9 mm	40 ⁽²⁾	40 ⁽³⁾
2 Gypses Type X de 12,7 mm ⁽⁴⁾	50	80
<p>(1) Murs non-porteurs avec vides entre poteaux remplis d'isolant en fibres minérales. (2) Murs à ossature de bois. (3) Murs à ossature métallique. (4) Barres résilientes permises, lorsqu'installées au 400 mm, sans effet sur le DRF du mur.</p>		

Résistance au feu – Bois (ossature légère)

Tableau D-2.3.4.B (planchers)

Type de paroi	Barres résilientes	Temps (min)	
		Solives en bois ou métalliques	Solives ajourées métalliques
1 Gypse Type X de 12,7 mm 1 Gypse Type X de 15,9 mm	≤ 400 mm ⁽³⁾	25 40	- -
1 Gypse Type X de 12,7 mm 1 Gypse Type X de 15,9 mm	-	25 ⁽⁴⁾ 40 ⁽⁴⁾	25 40
2 Gypses Type X de 12,7 mm	≤ 400 mm ⁽⁵⁾	50	-
2 Gypses Type X de 12,7 mm	≤ 600 mm ⁽⁶⁾	45	-
2 Gypses Type X de 15,9 mm	≤ 600 mm ⁽⁶⁾	60	-
<p>⁽³⁾ Barres résilientes doivent être installées afin d'atteindre le DRF.</p> <p>⁽⁴⁾ Applicables aux solives de bois et solives ajourées à connecteurs métalliques.</p>			

Résistance au feu – Bois (ossature légère)

Tableau D-2.3.4.C (toits)

Type de paroi	Temps (min)
1 Gypse Type X de 12,7 mm	25
1 Gypse Type X de 15,9 mm	40
(1) Applicable aux solives en bois, ajourées à connecteurs métalliques et ajourées métalliques avec support de plafond ≤ 400 mm.	

Résistance au feu – Bois (ossature légère)

Tableau D-2.3.4.E (murs)

Type d'ossature	Temps (min)	
	Porteur	Non-porteur
Poteaux de bois ≤ 400 mm	20	20
Poteaux de bois ≤ 600 mm	15	15
Poteaux de tôle d'acier ≤ 400 mm	10	10
Poteaux de tôle d'acier ≤ 600 mm	10	-

Résistance au feu – Bois (ossature légère)

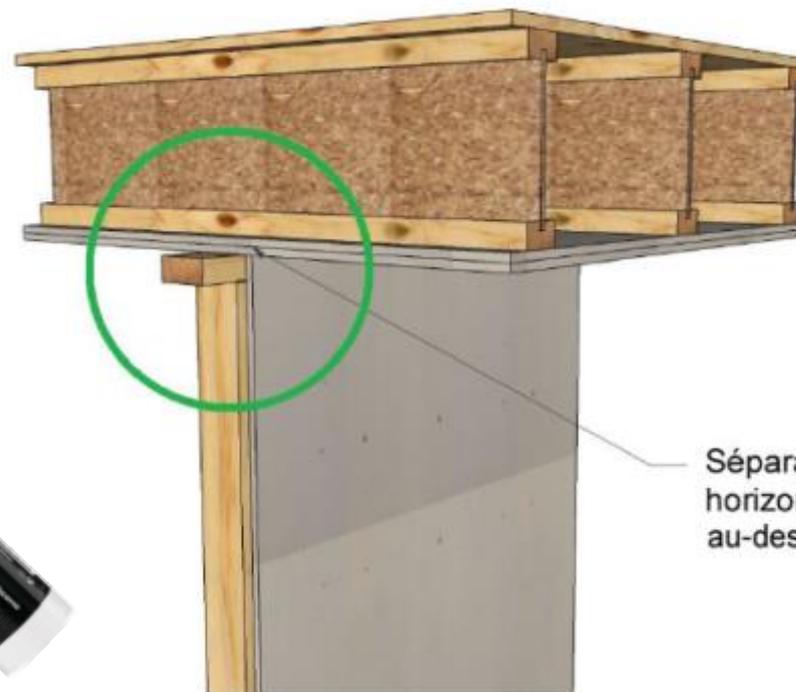
Tableau D-2.3.4.F (plancher/toits)

Type d'ossature	Élément structural	Temps, en min
Plancher ⁽¹⁾	Solives de bois, en I, ajourées et c. métalliques ≤ 600 mm Solives ajourées métalliques avec support de plafond espacés ≤ 400 mm	10 ⁽²⁾
Toit	Solives de bois ≤ 400 mm	10
	Solives ajourées métalliques avec support de plafond espacés d'au plus 400 mm	10
	Fermes de toit à connecteurs métalliques ≤ 600 mm	5
<p>(1) Barres résilientes permises sans effet sur le DRF.</p> <p>(2) Applicable aux éléments structuraux de plancher protégés seulement.</p>		

Résistance au feu – Bois (ossature légère)

INTÉGRITÉ et CONTINUITÉ des séparations coupe-feu sont fondamentales afin de fournir le niveau anticipé de compartimentation

- Protection des ouvertures/dispositifs d'obturation homologués CAN/ULC S115;
- Continuité/agencement des panneaux de gypse.



Séparation coupe-feu horizontale continue au-dessus de la cloison

Résistance au feu – Bois (ossature légère)

INTÉGRITÉ et CONTINUITÉ des séparations coupe-feu sont fondamentales afin de fournir le niveau anticipé de compartimentation

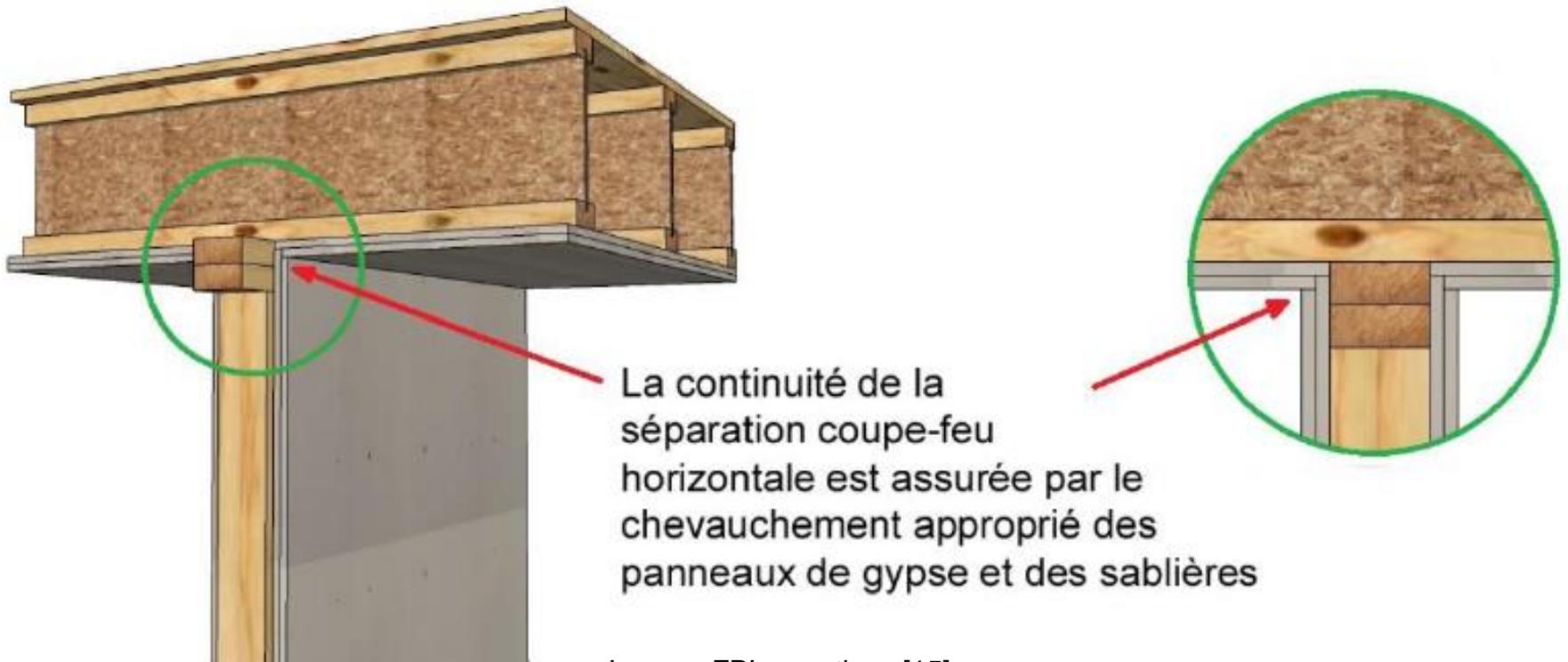
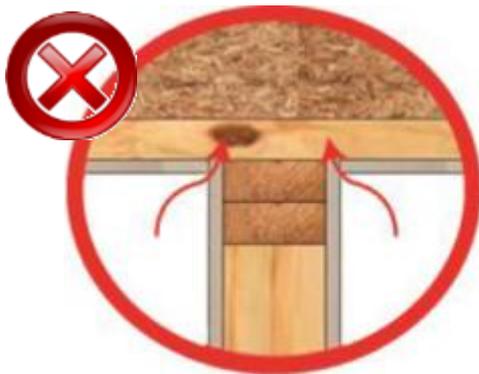
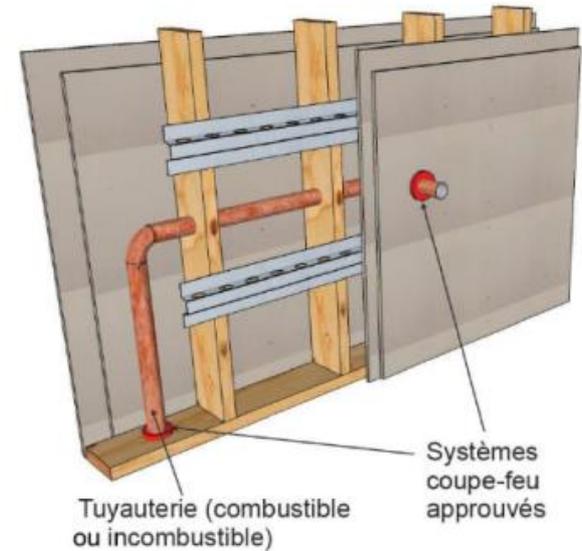
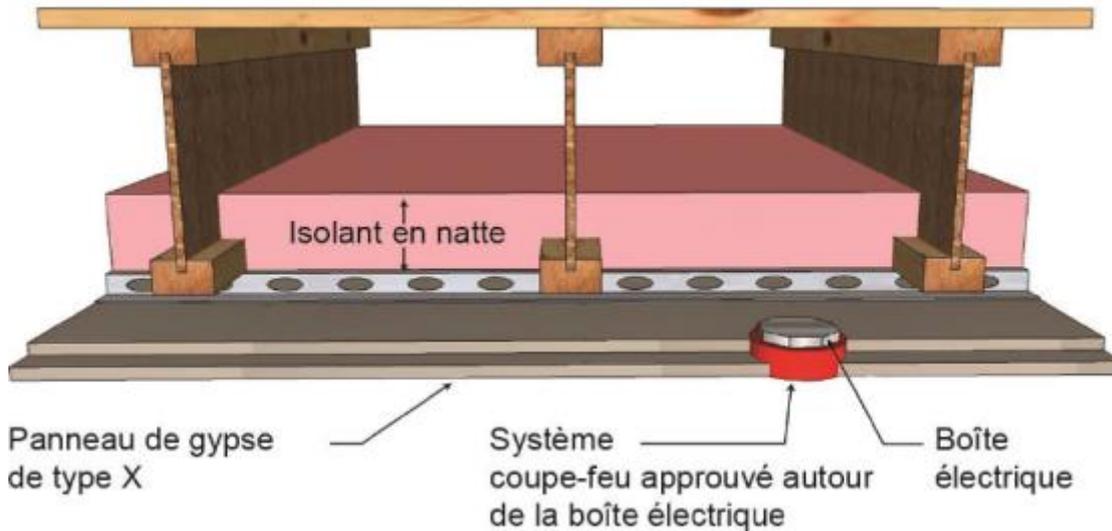
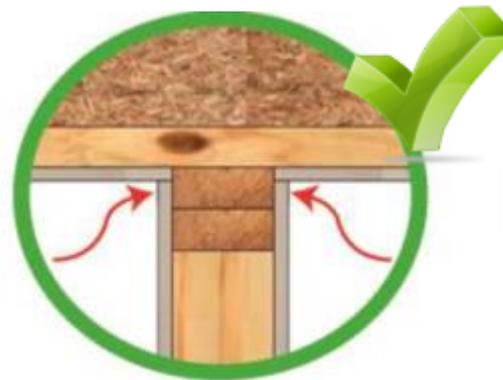


Image : FPIinnovations [15]

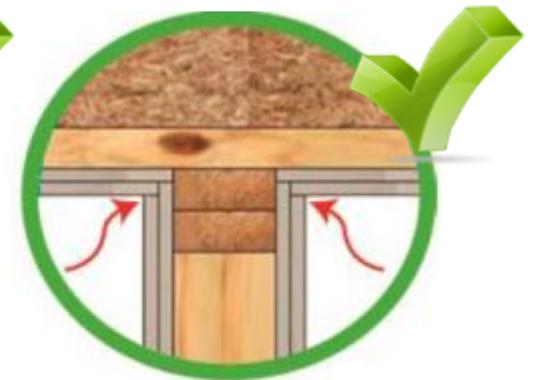
Résistance au feu – Bois (ossature légère)



a) Fuites potentielles



b) Support adéquat des jonctions

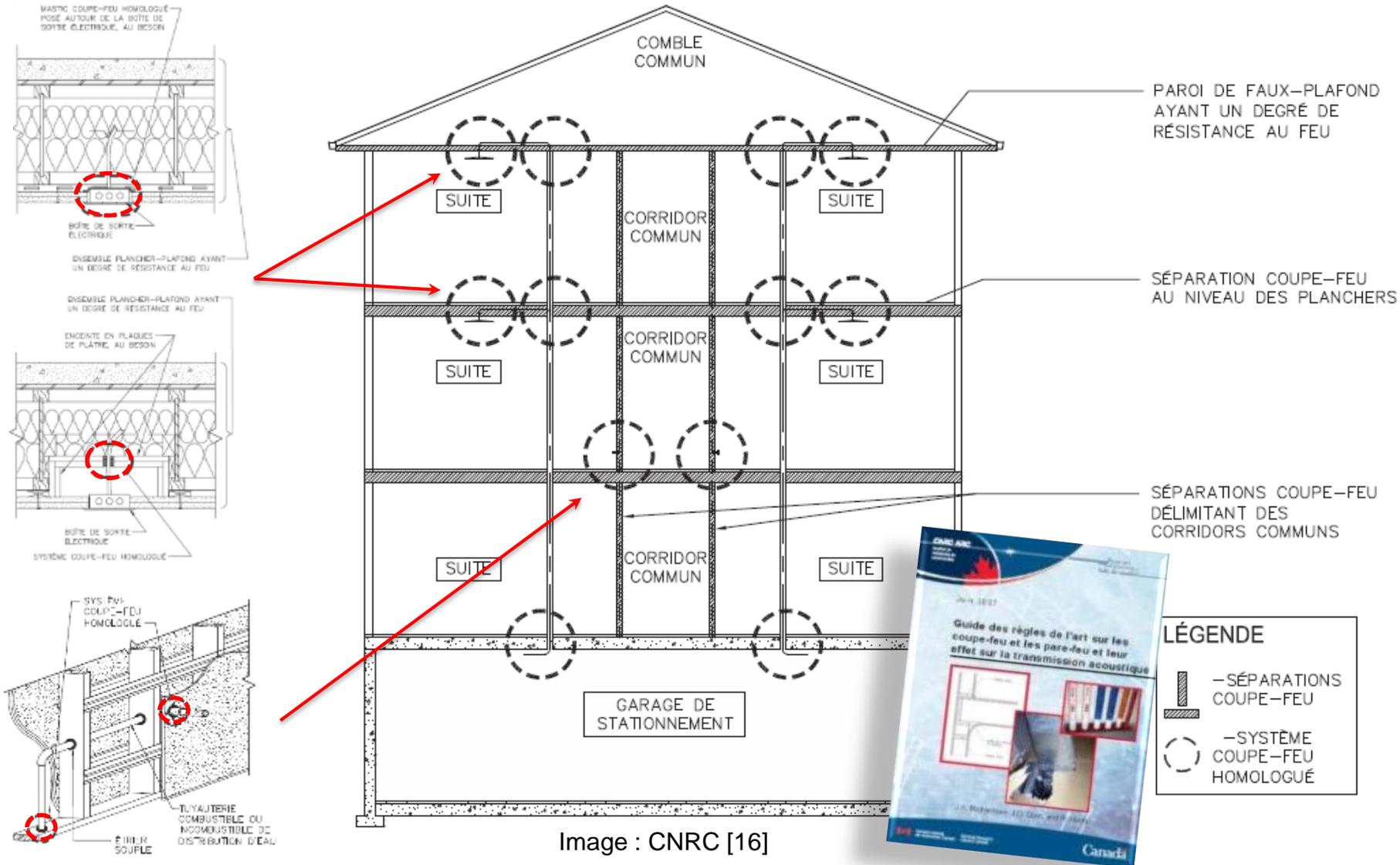


c) Chevauchement adéquat

Images :

FPIinnovations [15]

Résistance au feu – Bois (ossature légère)

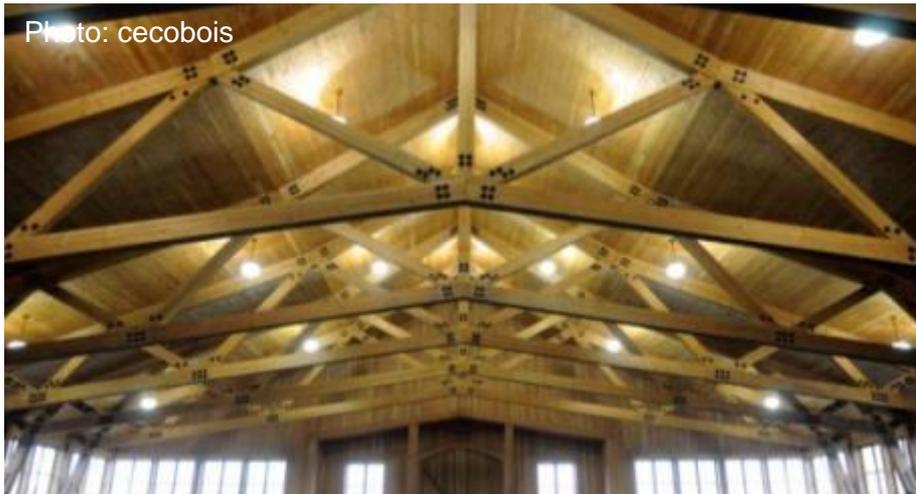


Résistance au feu – Bois (ossature légère)

Détails de construction sont importants

- Isolant dans les cavités
- Nombre de membranes protectrices
- Méthode de fixation des membranes
- Barres résilientes
- Pénétrations techniques
- Dispositifs coupe-feu
- Jonctions murs/cloisons-planchers/toits

Résistance au feu – Bois (construction massive)



Résistance au feu – Bois (construction massive)

Type de construction le plus courant

- « *Timber Frame* »...méthode de construction typique/ancienne
- Systèmes à poutres et colonnes (bois massif, lamellé-collé, SCL)
- Systèmes de dalles (CLT et SCL)
- Systèmes hybrides (bois-béton-acier)

Consiste en des éléments de bois de grandes dimensions

- Historique a démontré leur bonne performance au feu
- Offre une résistance au feu inhérente
- Conception « calculée » pour la résistance au feu (vs. approche prescriptive)

Résistance au feu – Bois (construction massive)

Annexe D-2.4 du Code – Bois massif [2]

- Valeurs conservatrices

Type de construction	Degré de résistance au feu			
	30 min	45 min	1 h	1½ h
Plancher de bois massif recouvert d'un revêtement (mill floor)	89 (3½")	114 (4½")	165 (6½")	235 (9¼")
Plancher de bois massif à rainure et languette (T&G) ou à languettes rapportées, recouvert d'un revêtement (panneau)	64 (2½")	76 (3")	-	-
Murs de bois massif en madriers verticaux porteurs	89 (3½")	114 (4½")	140 (5½")	184 (7¼")
Murs de bois massif en madriers horizontaux non-porteurs	89 (3½")	89 (3½")	89 (3½")	140 (5½")

Résistance au feu – Bois (construction massive)

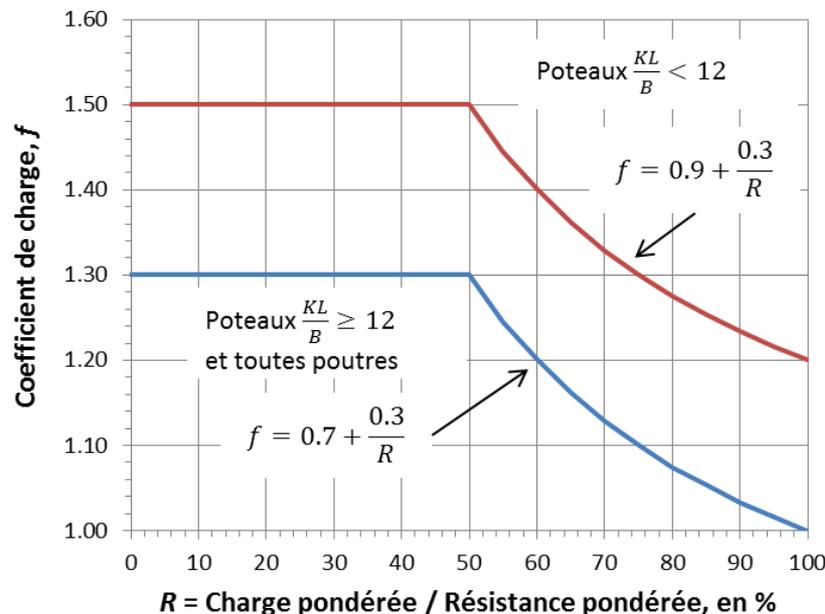
Annexe D-2.4 du Code – Bois massif [2]



Résistance au feu – Bois (construction massive)

Annexe D-2.11 du Code – Bois lamellé-collé [2]

- Pour DRF > 45 min seulement
- Valeurs conservatrices, surtout pour DRF > 1 h
- Flexion et compression seulement
- Calculs structuraux à réaliser par ingénieur en structure



Poutres

$$3 \text{ faces} \quad t = 0.1 \cdot f \cdot B \cdot \left[4 - \frac{B}{D} \right]$$

:

$$4 \text{ faces} : t = 0.1 \cdot f \cdot B \cdot \left[4 - 2 \frac{B}{D} \right]$$

Colonnes

$$3 \text{ face} : t = 0.1 \cdot f \cdot B \cdot \left[3 - \frac{B}{2D} \right]$$

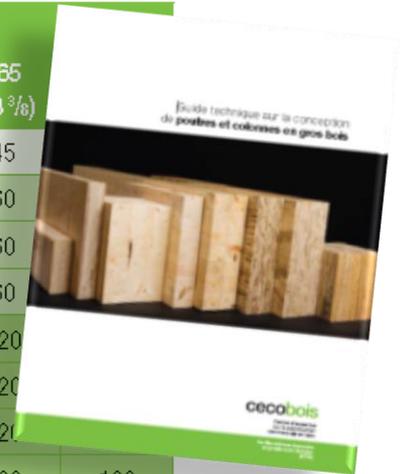
$$4 \text{ faces} : t = 0.1 \cdot f \cdot B \cdot \left[3 - \frac{B}{D} \right]$$

Résistance au feu – Bois (construction massive)

Annexe D-2.11 du Code [17]

TABLEAU 27 • Poutre en BLC sollicitée à 75 % et exposée au feu sur trois faces (en minutes)

Hauteur en mm (po)	Largeur en mm (po)										
	130 (5 1/8)	175 (6 7/8)	215 (8 1/2)	225 (8 7/8)	265 (10 3/8)	275 (10 7/8)	315 (12 3/8)	365 (14 3/8)	415 (16 3/8)	465 (18 3/8)	
152 (6)	45*	45	60	60	60	60	60	60	45	45	
190 (7 1/2)	45	45	60	60	60	60	60	60	60	60	
228 (9)	45	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
266 (10 1/2)	45	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
304 (12)	45	60	60	60	60	60	60	60	120	120	
342 (13 1/2)	45	60	60	60	60	60	60	60	120	120	
380 (15)	45	60	60	60	60	60	60	120	120	120	
418 (16 1/2)	45	60	60	60	60	60	60	120	120	120	120
456 (18)	45	60	60	60	60	60	60	120	120	120	120
494 (19 1/2)	45	60	60	60	60	60	60	120	120	120	120
532 (21)	45	60	60	60	60	60	60	120	120	120	120
570 (22 1/2)	45	60	60	60	60	60	60	120	120	120	120
608 (24)	45	60	60	60	60	60	120	120	120	120	120
646 (25 1/2)	45	60	60	60	60	60	120	120	120	120	120
684 (27)	45	60	60	60	60	60	120	120	120	120	120



Résistance au feu – Bois (construction massive)

Annexe B de la norme CSA O86-19 [8]

- Approche fondée sur la mécanique du bois (calculs structuraux)
- Bois massif, lamellé-collé, SCL et CLT
- Flexion, traction et compression
- Meilleures prédictions, surtout pour DRF > 1 h
- Éléments résiduels ≥ 70 mm (exposition de 2 côtés parallèles)

Annexe B (informative)

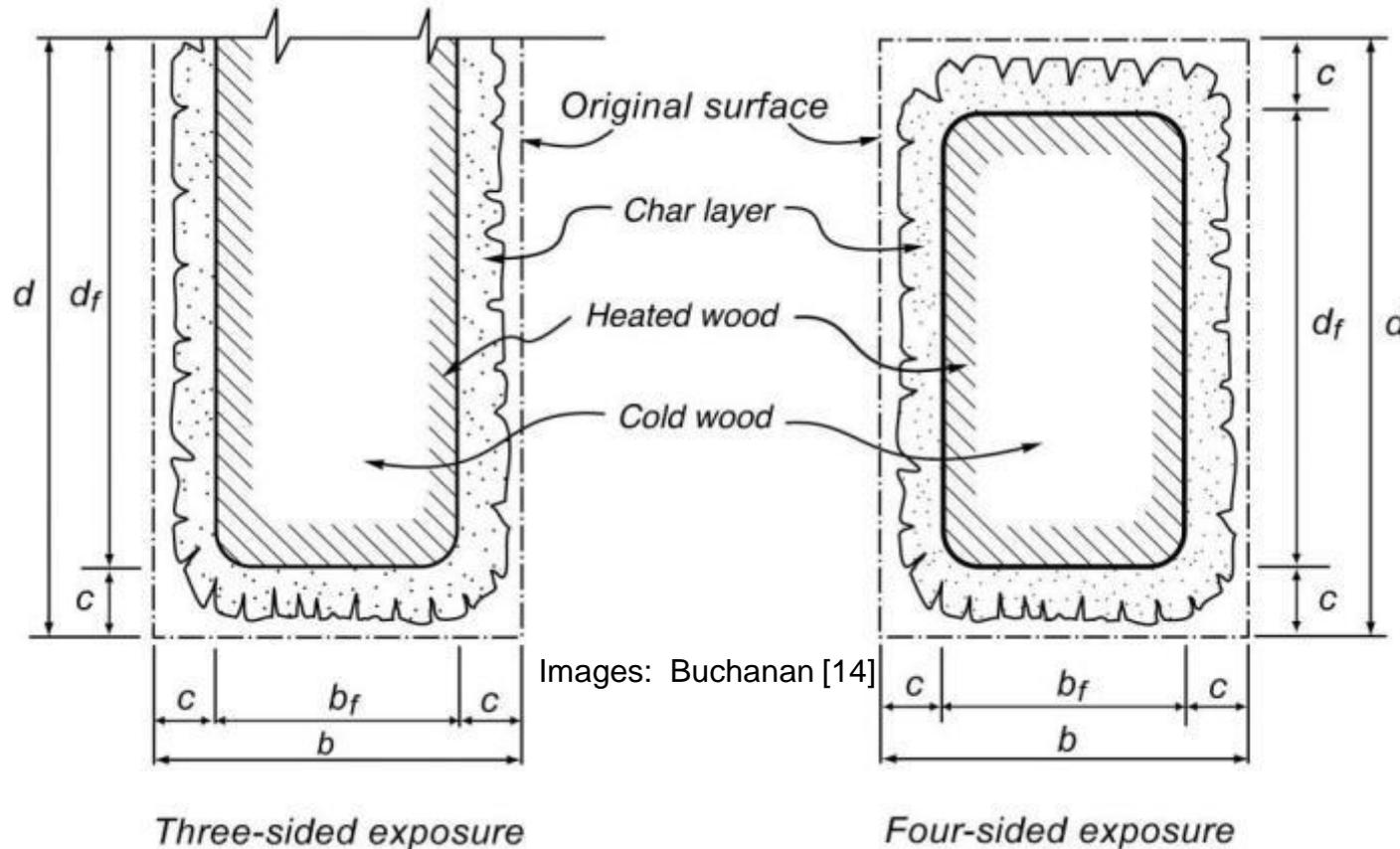
Résistance au feu des éléments en bois de grande section transversale

Notes :

- 1) Cette annexe informative (non obligatoire) est rédigée dans un style normatif (obligatoire) pour en faciliter l'adoption par les utilisateurs de la norme ou les autorités compétentes qui souhaitent l'adopter formellement comme exigences supplémentaires à cette norme
- 2) Lorsque cette annexe informative (non obligatoire) n'est pas adoptée par les autorités compétentes du bâtiment comme exigences supplémentaires à cette norme, la méthodologie présentée fournit des informations qui peuvent être utiles aux utilisateurs de cette norme pour l'élaboration d'une solution de rechange conforme aux objectifs du *Code national du bâtiment — Canada* (CNB).



Résistance au feu – Bois (construction massive)



Exposition sur 3 faces $\left\{ \begin{array}{l} b_f = b - 2c = b - 2(\beta \cdot t + d_0) \\ d_f = d - c = d - (\beta \cdot t + d_0) \end{array} \right\} d_0 = \begin{cases} 7 \cdot \frac{t}{20}, t \leq 20 \text{ min} \\ 7 \text{ mm}, t > 20 \text{ min} \end{cases}$

Résistance au feu – Bois (construction massive)

Équations structurales de CSA O86-19 [18]

	Strength Adjustment Factor	Load Duration Factor	System Factor	Service Condition Factor	Treatment Factor	Curvature Factor	Size Factor ⁽¹⁾	Column Slenderness Factor ⁽²⁾	Beam Lateral Stability ⁽²⁾	Notch Factor
Bending	K_f	K_D	K_H	K_S	K_T	K_X	K_{Zb}	-	K_L	-
Compression	K_f	K_D	K_H	K_S	K_T	-	K_{Zc}	K_C	-	-
Tension	K_f	K_D	K_H	K_S	K_T	-	K_{Zt}	-	-	-
Shear	K_f	K_D	K_H	K_S	K_T	-	K_{Zv}	-	-	K_N
MOE (E_{05}) (Buckling)	K_f	K_D	K_H	K_S	K_T	-	-	-	-	-
MOE (E) (serviceability)	-	K_D	K_H	K_S	K_T	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ Factor shall be based on initial cross-section dimensions.
⁽²⁾ Factor shall be based on reduced cross-section dimensions.

Résistance au feu – Bois (construction massive)

Équations structurales de CSA O86-19 [8]

- Utilisation des charges spécifiées (ex: D+L)
- Ajustement des résistances

Tableau B.3.9
Coefficients de correction pour le calcul de la résistance au feu, K_{fi}

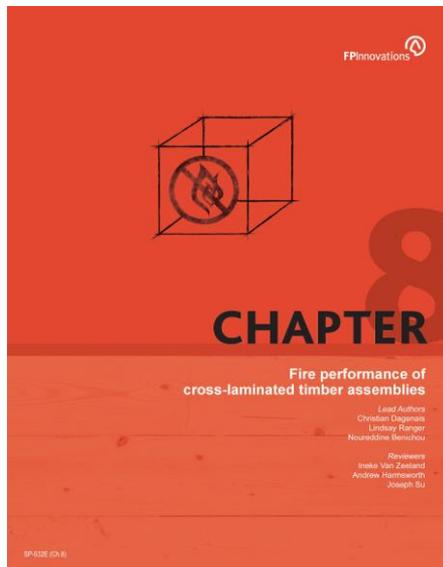
Produit	K_{fi}
Gros bois d'œuvre et platelage en madriers	1,5
Bois lamellé-collé	1,35
Bois de charpente composite	1,25
Bois lamellé-croisé	
— Classe de contraintes V1-V2	1,5
— Classe de contraintes E1-E3	1,25

Note : Le coefficient de correction pour le calcul de la résistance au feu, K_{fi} , convertit la résistance prévue en résistance moyenne.

Résistance au feu – Bois (construction massive)

Bois lamellé-croisé (CLT)

- Calculs structuraux à réaliser par ingénieur en structure
- CLT sont des éléments structuraux (R) et séparatifs (E I)...
- Murs sont susceptibles aux efforts combinés (effets P- Δ)



CANADIAN CLT HANDBOOK
2019 EDITION

Get your
copy at

> clt.fpinnovations.ca



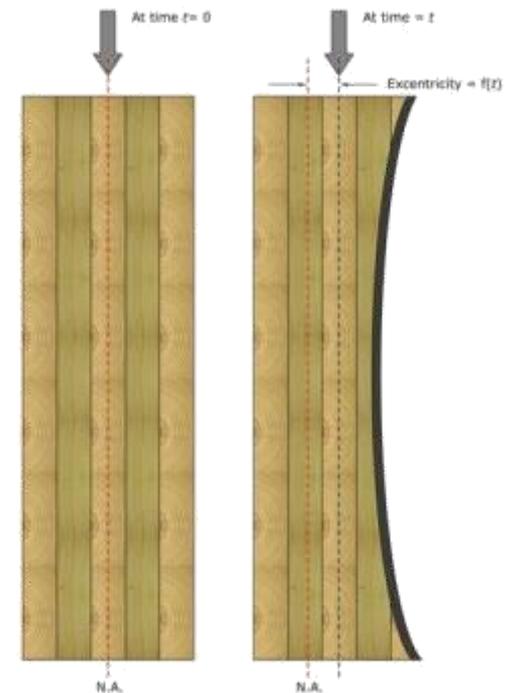
Résistance au feu – Bois (construction massive)

Bois lamellé-croisé (CLT) – Modes de rupture

Plancher
Intégrité*
(joint panneau-à-panneau)



Mur
Effets P- Δ

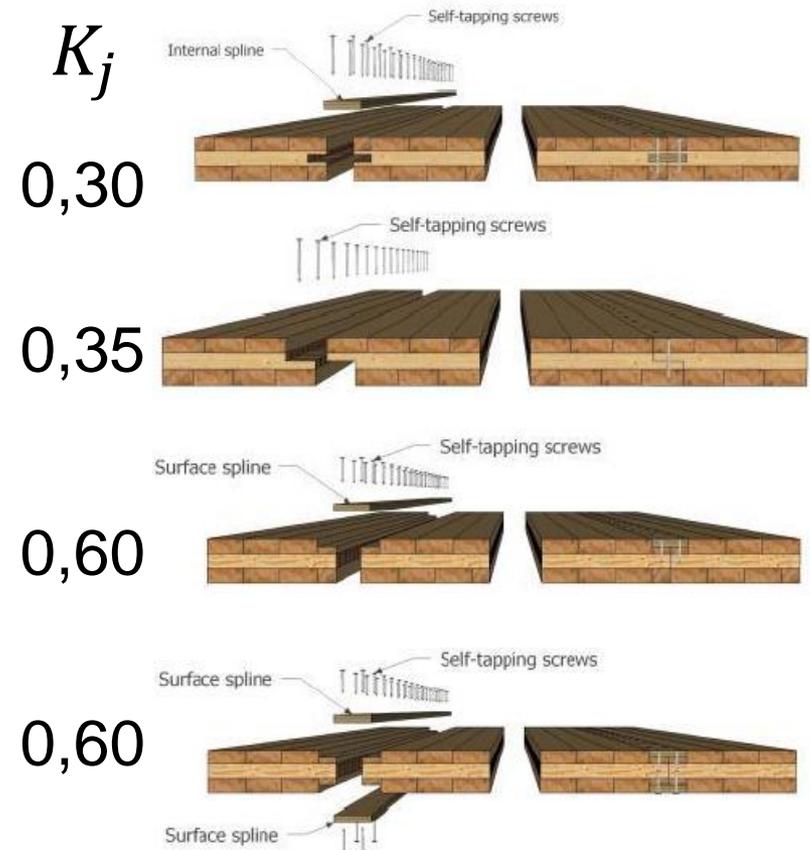


Résistance au feu – Bois (construction massive)

Bois lamellé-croisé (CLT) – Critère d'intégrité [19]

$$t_{int} = K_j \frac{h}{\beta_0}$$

- Plancher: joint le plus loin de la source/feu (ex: dessus)
- Mur: joint symétrique (préférence)



Résistance au feu – Bois (construction massive)

Bois lamellé-croisé (CLT) – Critère d'isolation [19]

Tableau 5

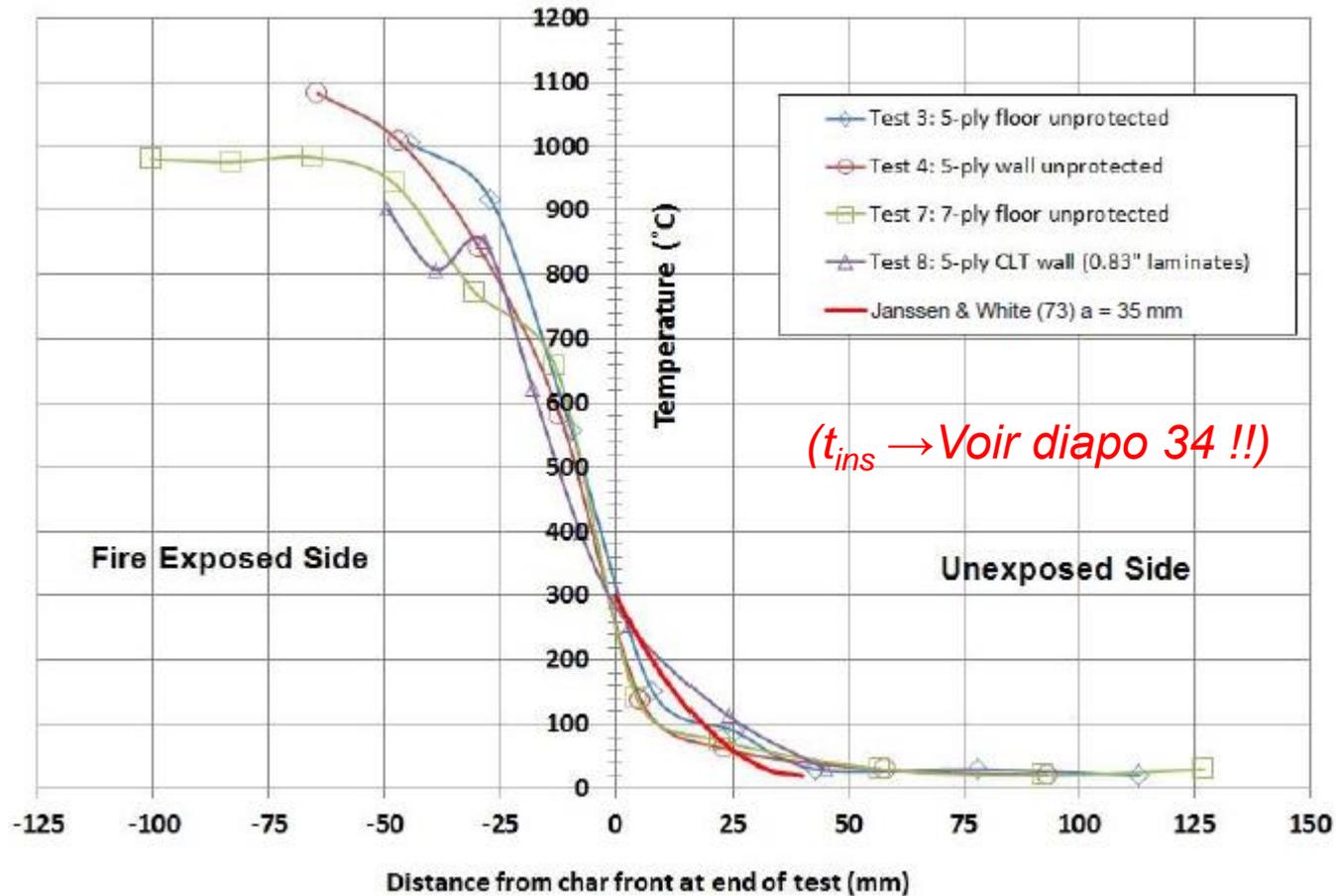
Élévations maximales de température sur la surface non exposée [12]

Classe de résistance et épaisseur du CLT		Temps de défaillance (min)	Épaisseur réduite efficace (mm)	Température			Élévation de température sur la surface non exposée
				Four d'essai	Surface non exposée	Condition initiale	
Mur	E2 – 114 mm (3 plis)	106	97	992 °C	24 °C	23 °C	1 °C
	E1 – 175 mm (5 plis)	113	92	1015 °C	21 °C	21 °C	0 °C
	V2 – 105 mm (5 plis)	57	49	1050 °C	30 °C	21 °C	9 °C
Plancher	E2 – 114 mm (3 plis)	77 ⁽¹⁾	105	971 °C	22 °C	23 °C	1 °C
	E1 – 175 mm (5 plis)	96	105	982 °C	20 °C	20 °C	0 °C
	V2 – 105 mm (3 plis)	86	56	973 °C	60 °C	22 °C	38 °C
	V2 – 175 mm (5 plis)	124	89	1006 °C	27 °C	23 °C	4 °C
	V2 – 245 mm (7 plis)	178	105	1049 °C	30 °C	20 °C	10 °C

⁽¹⁾ L'essai a dû être interrompu à cause de problèmes de sécurité pour l'équipement. Le point de défaillance n'a pas été atteint

Résistance au feu – Bois (construction massive)

Bois lamellé-croisé (CLT) – Critère d'isolation [19]



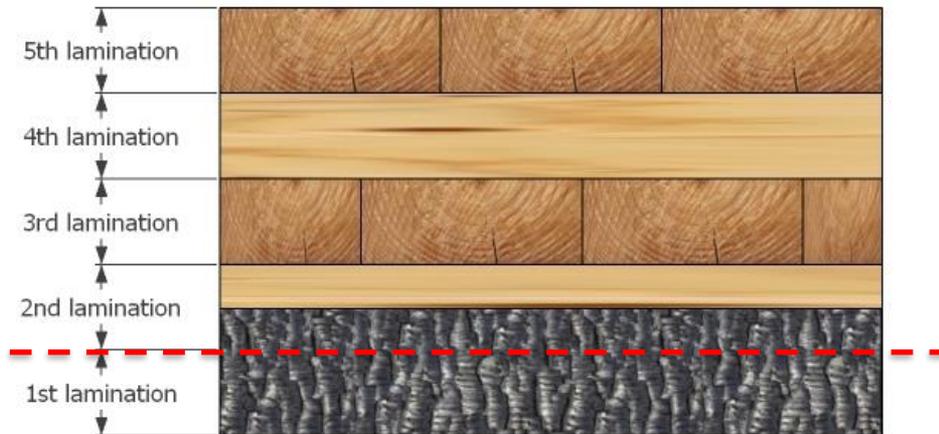
Résistance au feu – Bois (construction massive)

Bois lamellé-croisé (CLT) – Résistance mécanique [19]

- Vitesse de carbonisation (β_0 ou β_n) selon la position du 1^{er} plan de colle



$$\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$$

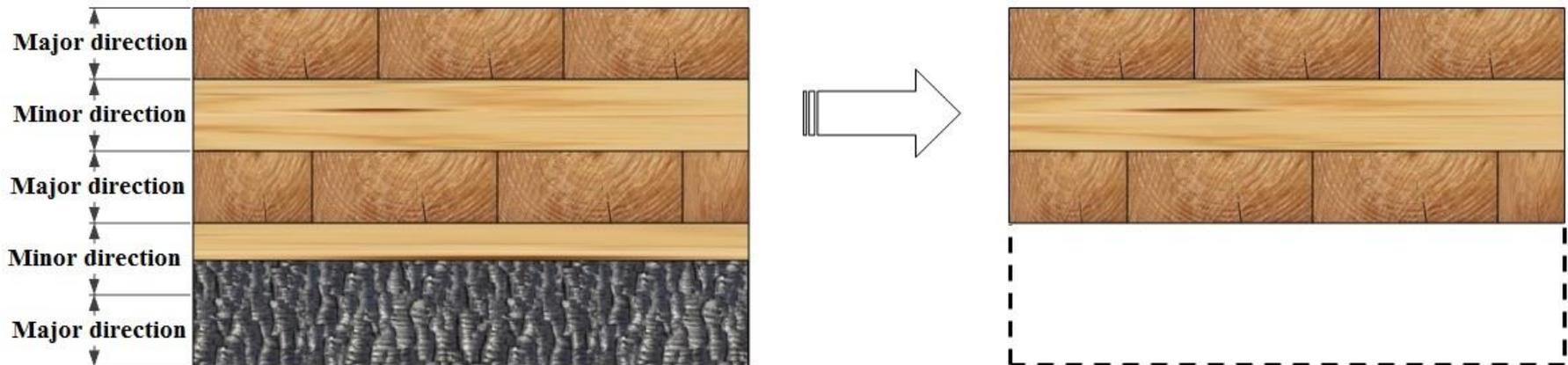


$$\beta_n = 0,80 \text{ mm/min}$$

Résistance au feu – Bois (construction massive)

Bois lamellé-croisé (CLT) – Résistance mécanique [19]

- Seules les couches parallèles au sens d'application de la contrainte doivent être prises en compte pour la détermination de la résistance au feu du CLT



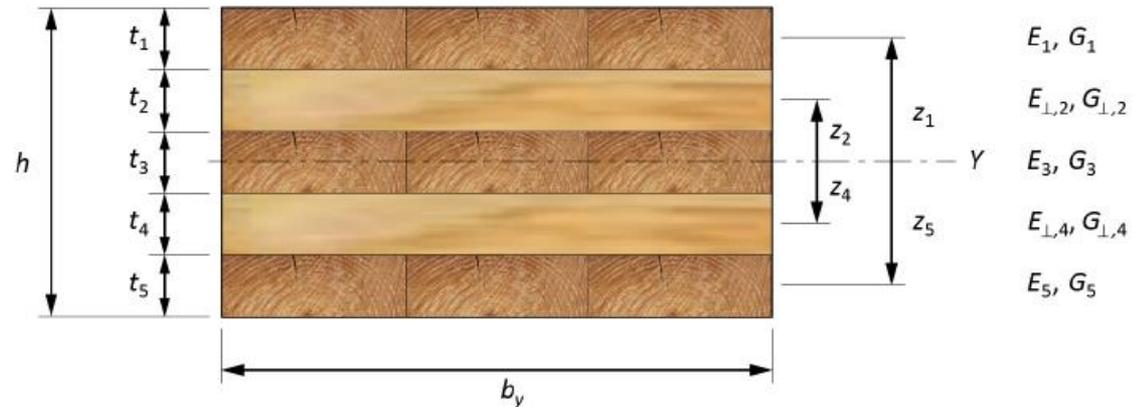
Résistance au feu – Bois (construction massive)

Bois lamellé-croisé (CLT) – Résistance mécanique [19]

- Propriétés de section (A, S, I) sont à calculer avec la section réduite

$$M_{r,y} = \phi F_b S_{eff,y} K_{rb,y}$$

$$\frac{P_f}{P_r} + \frac{M_f}{M_r} \left[\frac{1}{1 - \frac{P_f}{P_{E,v}}} \right] \leq 1$$



$$S_{eff,y} = \frac{(EI)_{eff,y}}{E} \frac{2}{h} \quad (EI)_{eff,y} = \sum_{i=1}^n E_i b_y \frac{t_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i b_y t_i z_i^2$$

Résistance au feu – Bois (construction massive)

Assemblages (attaches) doivent aussi fournir le niveau de performance requis...



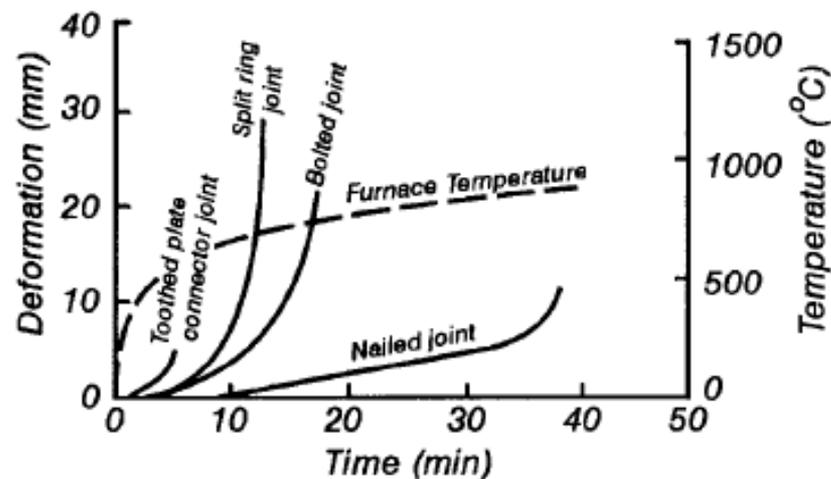
Solution : protéger toutes pièces métalliques contre le feu

- 38 mm de bois (1h), ou autre matériau préalablement approuvé
- Assemblages dissimulés (plaques internes et bouchons)
- Assemblages par contact bois-bois (vs. assemblages en cisaillement)

Résistance au feu – Bois (construction massive)

Assemblages (attaches)

- Comportement dépend de la température du métal
 - Température réduit considérablement la capacité des attaches
 - Métal est très conducteur de chaleur et peut ainsi la transférer de l'extérieur vers l'intérieur d'un assemblage
 - Génère et/ou accélère la carbonisation du bois
- Surface exposée des attaches a une grande influence sur le transfert de chaleur
 - Plaque : très grande surface
 - Boulon : petite surface
 - Clou : très petite surface



Résistance au feu – Bois (construction massive)



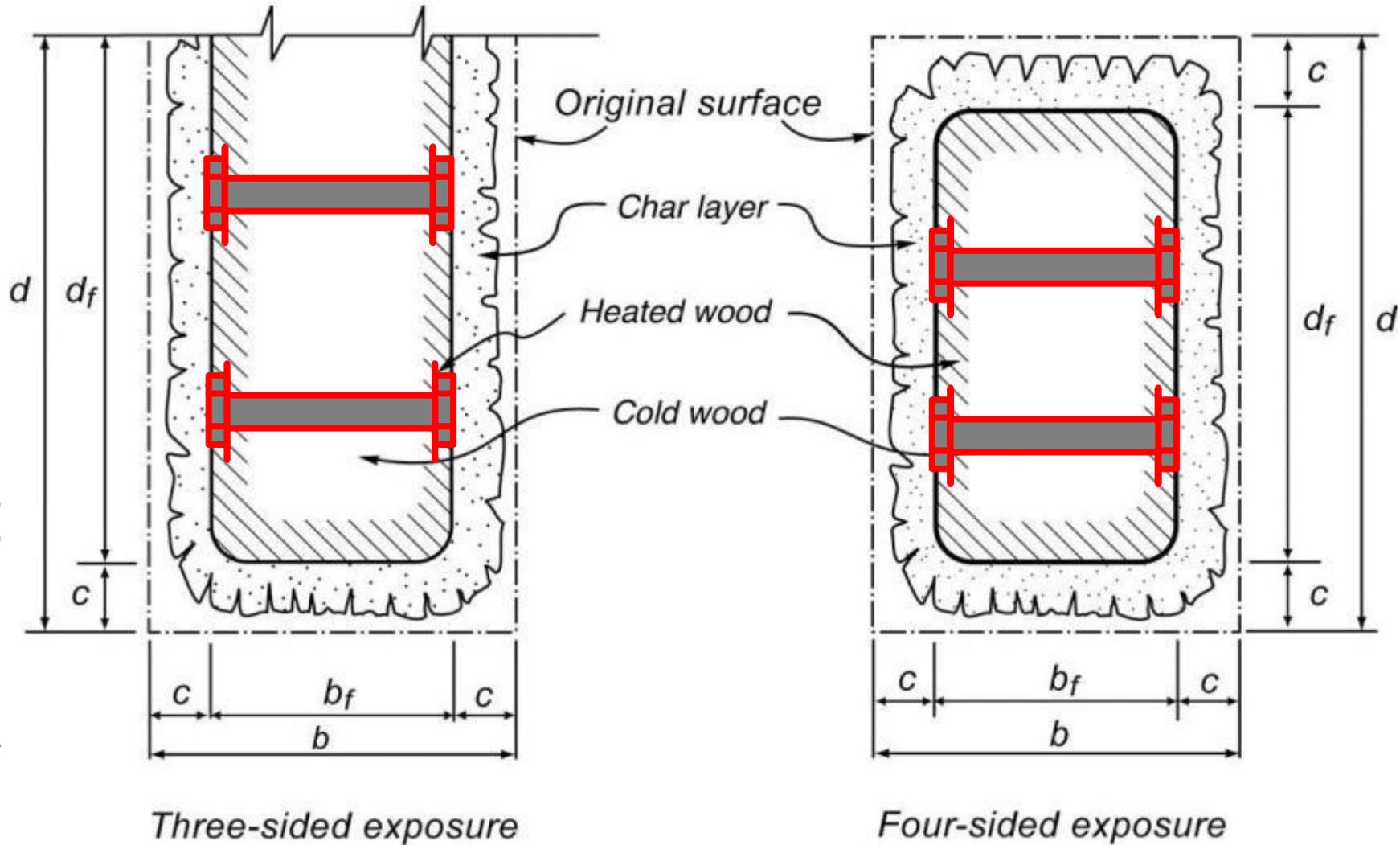
Résistance au feu – Bois (construction massive)



Résistance au feu – Bois (construction massive)



Résistance au feu – Bois (construction massive)



Adapté de: Buchanan [14]

Three-sided exposure

Four-sided exposure

Résistance au feu – Bois (construction massive)

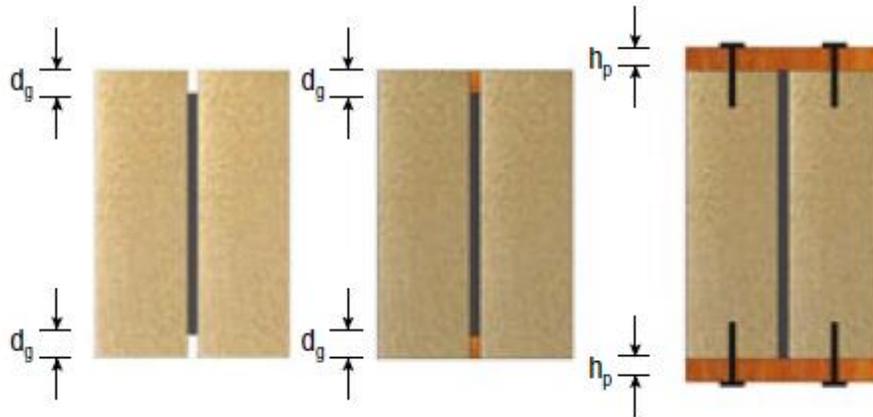
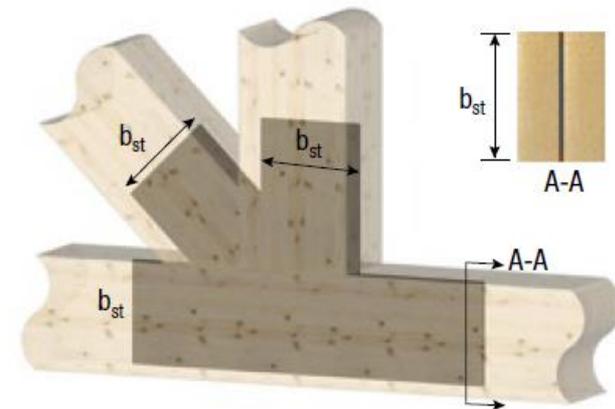


FIGURE 22 • Exigences dimensionnelles relatives à la protection des plaques d'acier (avec interstice à gauche, avec bande collée au milieu, et avec panneau de bois à droite)^[18]



$$t_{feu} = \left[\left(\frac{t_1}{\beta} \right) \left(1 - \eta^{0.17} \left(\frac{d}{t_1} \right)^{0.06} \right) \right] - 4 \text{ min}$$



Résistance au feu – Bois (construction massive)

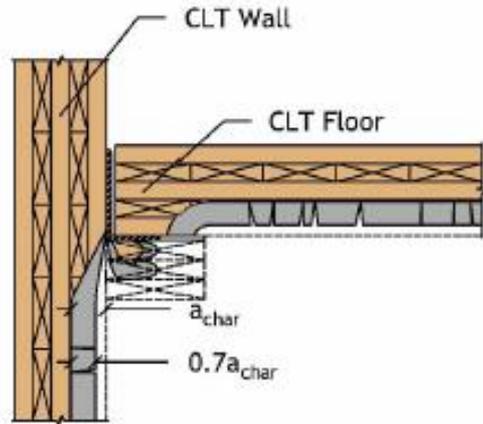


Figure 8-2. Char pattern due to char contraction

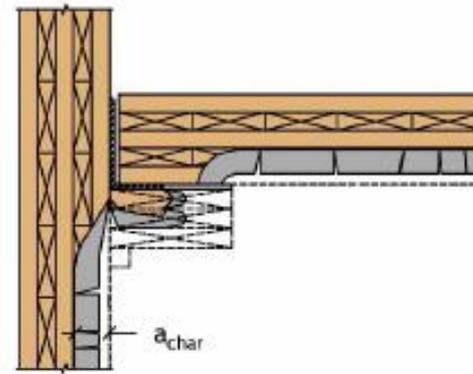


Figure 8-3. Char pattern with wood strip added

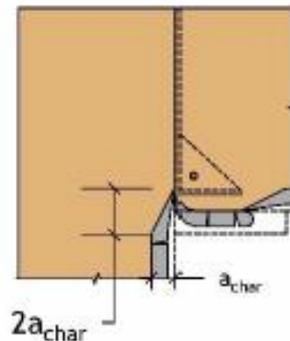
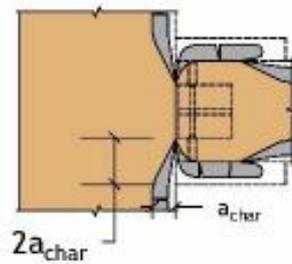
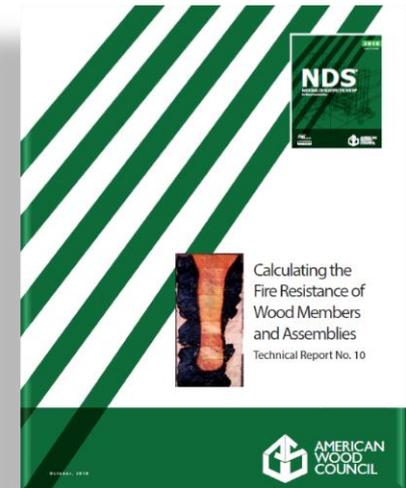


Figure 9-3. Char pattern due to char contraction

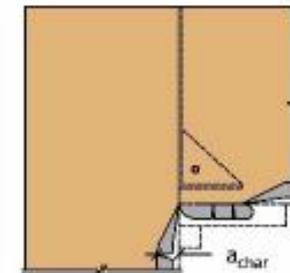
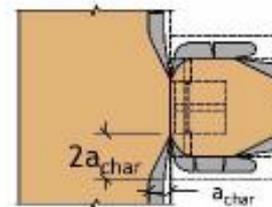
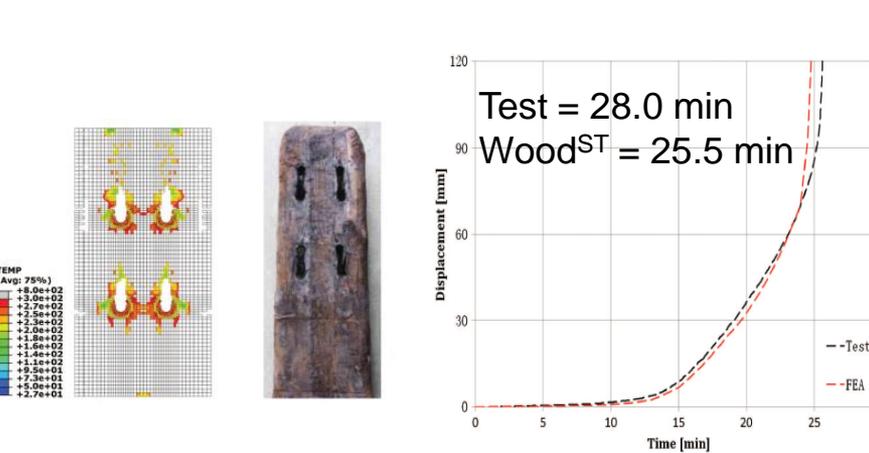
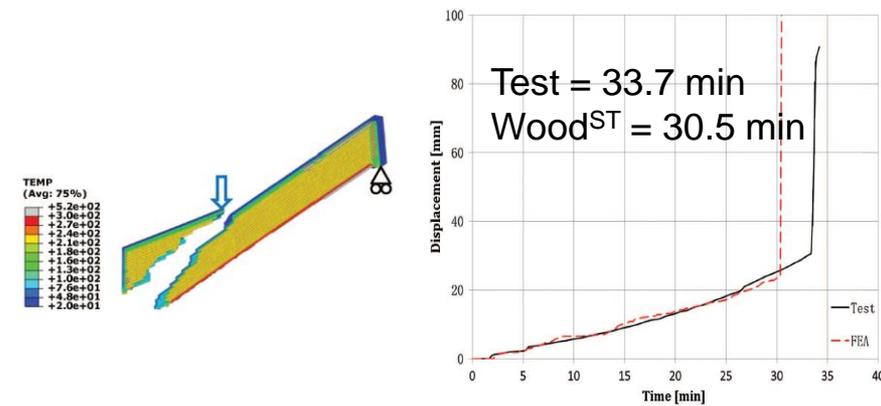
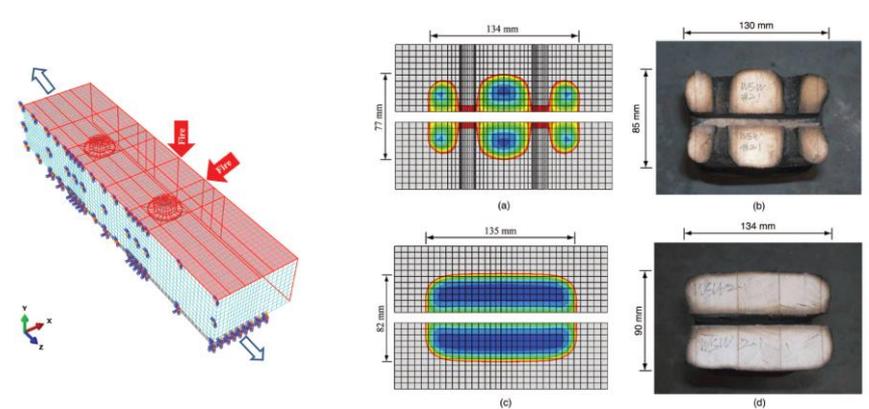
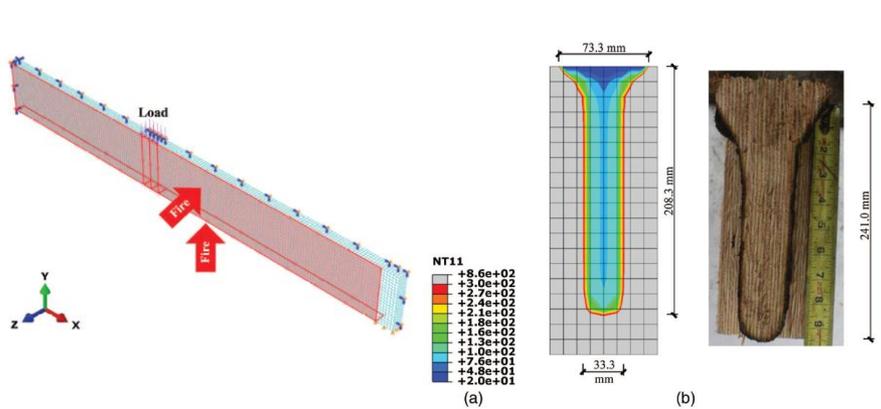


Figure 9-4. Char pattern with wood strip added

Résistance au feu – Bois (construction massive)

Modèles numériques pour calculs avancés [22]



Conclusion

Résistance au feu est une notion basée sur la performance

- Résistance au feu \neq Incombustibilité !!!
- Évaluée selon essai conformes à CAN/ULC S101
- Déterminée à partir de la somme des contributeurs (ossature légère)
- Calculée selon CSA O86-19 (construction massive)
- Fonction structurale
 - Poutres, colonnes, murs, planchers, toits
 - Peu importe le type de construction
- Fonction séparative
 - Murs, planchers/toits
 - Peu importe le type de construction

Références

1. NFPA (2012), « *NFPA 550 - Guide to the Fire Safety Concepts Tree* », National Fire Protection Association.
2. CNRC (2010), « *Code national du bâtiment – Canada* ». Conseil national de recherches du Canada.
3. ULC (2007), « *CAN/ULC S101 : Méthodes d'essais normalisées de résistance au feu pour les bâtiments et les matériaux de construction* », Underwriters Laboratories of Canada.
4. DBH (2012), « *New Zealand Building Code* », Department of Building and Housing. New Zealand Government.
5. EN1991-1-2 (2003), « *Eurocode 1 : Actions on structures - Part 1-2 : General actions - Actions on structures exposed to fire* », European Committee for Standardization.
6. ASCE (2005), « *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7 - 05)* », American Society of Civil Engineers.
7. AWC (2015), « *National Design Specifications for Wood Construction (ANSI/AWC NDS-2015)* », American Wood Council.
8. CSA O86-19 (2019), « *Engineering Design in Wood* », CSA Standards. Mississauga (Ont.).
9. NRCC (2011), « *User's Guide – NBC 2010: Structural Commentaries (Part 4 of Division B)* », National Research Council Canada.
10. ULC (2005), « *CAN/ULC S114 : Méthode d'essai normalisée pour la détermination de l'incombustibilité des matériaux de construction* ». Underwriters Laboratories of Canada.

Références

11. ASTM (2012), « *ASTM E119-12a: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials* », ASTM International.
12. ISO (1999), « *ISO 834-1: Fire-Resistance Test - Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements* », European Committee for Standardization.
13. SP Trätekt (2010), « *Fire Safety in Timber Buildings – Technical Guideline for Europe* », SP Trätekt (Sweden).
14. Buchanan A.H. (2002), « *Structural Design for Fire Safety* », University of Canterbury, Nouvelle-Zélande: John Wiley & Sons Ltd.
15. Dagenais C., Osborne L. et I. Van Zeeland (2015), « *Manuel pour la construction à ossature de bois de moyenne hauteur - Chapitre 6 : conception en matière de sécurité incendie* », FPInnovations.
16. Richardson J.K., Quirt J.D. et Hlady R. (2007), « *Guide des règles de l'art sur les coupe-feu et les pare-feu et leur effet sur la transmission acoustique* ». Conseil national de recherches du Canada.
17. Cecobois (2012), « *Guide technique sur la conception de poutres et colonnes en gros bois* ». Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois.
18. Dagenais C. et L. Osborne (2013), « *Development of a Canadian Fire-Resistance Design Method for Massive Wood Members* ». FPInnovations.
19. Dagenais C., Ranger L. et N. Benichou (2019), « *Manuel sur le bois lamellé-croisé: Chapitre 8 – Comportement au feu des éléments de charpente en bois lamellé-croisé* ». FPInnovations.

Références

20. Cecobois (2020) « *Guide de conception des assemblages pour les charpentes en bois – 2^e édition* », Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois.
21. AWC (2018), « *Calculating the Fire Resistance of Wood Members and Assemblies – Technical Report 10* », Leesburg (VA): American Wood Council.
22. Z. Chen, C. Ni, C. Dagenais et S. Kuan, « *WoodST: A temperature-dependent plastic-damage constitutive model used for numerical simulation of wood-based materials and connections* ». J.Struct.Eng., vol. 146(3), pp. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002524, 2020.

POUR NOUS JOINDRE

Christian Dagenais, ing., Ph.D.

christian.dagenais@fpinnovations.ca

+1-418-781-6753

fpinnovations.ca

blog.fpinnovations.ca

