

Guide sur l'optimisation de la construction en bois massif



Photo : Panoramix

cecobois

Centre d'expertise
sur la construction
commerciale en bois

cecobois remercie Ressources naturelles Canada
et le ministère des Ressources naturelles
et des Forêts du Québec pour leur contribution
financière à la réalisation de ce guide.

PARTENAIRES



Avant-propos

Ce guide est un outil de référence pour aider les concepteurs à réaliser des constructions en bois massif optimales, efficaces et économiques. On y présente les systèmes et composants structuraux utilisés en construction en bois massif, les facteurs influençant l'optimisation d'une structure en bois massif ainsi que les aspects à considérer dans l'optimisation globale d'un bâtiment en bois massif. Ce guide met surtout l'accent sur les stratégies devant être considérées dans le processus de conception.

Équipe de rédaction

- Guillaume Bédard-Blanchet, ing., **cecobois**
- François Chaurette, ing., **cecobois**
- Sébastien Gagné, ing., **cecobois**

Comité de révision

- Fernando Junior Leblanc-Carrera, ing, P.Eng, Ponton Guillot
- Fournisseurs de produits :
 - Louis-Philippe Poirier, ing., M.Sc.A. | P. Eng., MASc, Nordic Structures
 - Simon Adnet, ing., P. Eng. , Nordic Structures
 - Gustavo Lozano Côrtes, ing. / Art Massif
 - Guillaume Brown, ing. / P. Eng. , Goodfellow
 - Pierre Levillain, Structure Fusion

Mises en garde

Bien que ce guide ait été conçu avec la plus grande exactitude possible, **cecobois** n'est nullement responsable des erreurs ou omissions pouvant découler de son usage. Le guide est complémentaire aux codes et normes, mais ne les remplace pas. Bien que ce guide illustre certaines bonnes pratiques d'utilisation du bois dans la construction en bois massif, les informations contenues dans ce guide sont présentées de manière globale afin de faciliter la compréhension du lecteur, sans toutefois être complètes. Ainsi, elles ne peuvent pas être utilisées telles quelles sans le recours au service d'un professionnel du bâtiment qualifié. Toute personne utilisant ce guide en assume donc pleinement tous les risques et toutes les responsabilités. Toute suggestion visant l'amélioration de notre documentation sera grandement appréciée et considérée lors de futures mises à jour.

Table des matières

AVANT-PROPOS	III
ÉQUIPE DE RÉDACTION	III
COMITÉ DE RÉVISION	III
MISES EN GARDE	III
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	VI
1 CENTRE D'EXPERTISE SUR LA CONSTRUCTION COMMERCIALE EN BOIS	1
2 INTRODUCTION À L'OPTIMISATION DES CONSTRUCTIONS EN BOIS MASSIF	2
3 CARACTÉRISTIQUES DES CONSTRUCTIONS EN BOIS MASSIF	4
3.1. Bénéfices environnementaux, biophilie et esthétisme	4
3.2. Résistance au feu et indice de propagation de la flamme	4
3.3. Résistance thermique	5
3.4. Acoustique	5
4 COMPOSANTS STRUCTURAUX	6
4.1. Poutres et colonnes	6
4.2. Panneaux et platelage en bois massif	14
4.3. Murs	29
4.4. Assemblages	30
4.5. Fermes, éléments sous-tendus, et arches	31
4.6. Structures hybrides	34
5 SYSTÈMES STRUCTURAUX	37
5.1. Systèmes gravitaires – Platelage et dalles	37
5.2. Systèmes de contreventement	40
6 OPTIMISATION DES STRUCTURES DE BOIS MASSIF	41
6.1. Collaboration entre l'équipe de conception et le fabricant	41
6.2. Facteurs influençant le coût des structures en bois massif	42
6.3. Optimisation du volume de bois	42
6.4. Autres paramètres influençant les coûts de la structure	47
7 STRATÉGIES D'OPTIMISATION HOLISTIQUE DE PROJETS	53
7.1. L'approche holistique	53
7.2. Utilisation des outils numériques et de conception paramétrique	54
7.3. Hybridation et coordination entre matériaux	55
7.4. Intégration mécanique/électrique/plomberie (MEP)	57
7.5. Optimisation de la hauteur de bâtiment	62
7.6. Exposition du bois versus systèmes d'intérieurs	63
7.7. Stratégie d'optimisation pour système de résistances latérale en bois.	63
8 ANNEXE	68
9 RÉFÉRENCES	69

Liste des figures

Figure 1 : Couche de carbonisation	4
Figure 2 : Bois d'œuvre	6
Figure 3 : Bois lamellé-collé	6
Figure 4 : Fabrication du BLC	7
Figure 5 : Bois lamellé-collé homogène (à gauche) et couronné (à droite)	8
Figure 6 : Exemple d'agencement des lamelles symétriques et non symétriques	8
Figure 7 : Classes de BLC canadiennes et européennes	9
Figure 8 : Presse automatisée par collage à chaud Kallasoe	10
Figure 9 : Exemple de modification de poutre pour un DRF requis de 60 minutes	11
Figure 10 : Agencement des axes	11
Figure 11 : Classe d'aspect architectural	12
Figure 12 : Sections droites et rectangulaires	12
Figure 13 : Sections constantes et courbes	12
Figure 14 : Arc Tudor et poutre cintrée à inertie variable	13
Figure 15 : Table d'assemblage d'une poutre de BLC cintrée	13
Figure 16 : Sections rondes et spéciales	13
Figure 17 : Propriétés géométriques de colonnes de différentes formes	13
Figure 18 : Bois de charpente composite	14
Figure 19 : Panneaux en CLT supportés par une structure à ossature légère en bois	14
Figure 20 : Bois lamellé-croisé	15
Figure 21 : Fabrication du CLT	16
Figure 22 : Levage d'un panneau en CLT avec et sans palonnier	18
Figure 23 : Systèmes d'ancrage au panneau CLT	18
Figure 24 : Outil de rapprochement (pince à clameaux)	19
Figure 25 : Exemples d'assemblage de panneaux en CLT pour les planchers et les toits	19
Figure 26 : Exemples d'assemblage de panneaux en CLT pour les murs	20
Figure 27 : Profondeur de carbonisation d'un panneau en CLT	21
Figure 28 : Platelage en bois lamellé-collé (BLC)	22
Figure 29 : Joints à rainures et languettes	22
Figure 30 : Joint mi-bois	22
Figure 31 : Platelage BLC en panneaux préassemblés en usine ou au chantier	23
Figure 32 : Profondeur de carbonisation d'un platelage en BLC	23
Figure 33 : Profil du platelage en bois de sciage	24
Figure 34 : Panneau en bois lamellé-cloué (NLT)	26
Figure 35 : Toit en NLT	26
Figure 36 : NLT composé de pièces de différentes hauteurs	26
Figure 37 : Panneau en bois lamellé-goujonné (DLT)	28
Figure 38 : Panneau en contreplaqué massif (MPP)	28
Figure 39 : Bois-béton composite – Système d'assemblage HBV	28
Figure 40 : Bois-béton composite – Système d'assemblage par vis	29
Figure 41 : Système de mur rideau Raico sur ossature de bois	30
Figure 42 : Ferme en bois massif	32

Figure 43 : Ferme plate	32
Figure 44 : Ferme en pente	32
Figure 45 : Détail d'extrémité de la ferme	33
Figure 46 : Mur à ossature avec un toit en bois massif	35
Figure 47 : Exemples de structures hybrides	36
Figure 48 : Poutre de bois avec pontage d'acier	36
Figure 49 : Répartition typique du coût d'un projet en bois massif	42
Figure 50 : Idéalisation d'un blanc de panneaux montrant les pertes potentielles associées	43
Figure 51 : Idéalisation d'un blanc de panneaux montrant les pertes potentielles associées à la découpe pour l'atteinte de la géométrie finale	43
Figure 52 : Idéalisation d'un blanc de panneaux montrant les pertes potentielles diminuées par la configuration de fabrication	43
Figure 53 : Modélisation d'un système structural pannes-poutres dans deux directions de 9 m x 8 m d'un secteur de salle de classes d'une école pour le calcul de ratio de consommation de bois	45
Figure 54 : Répartition du volume de bois	45
Figure 55 : Étude du volume de bois	45
Figure 56 : Modélisation d'un système structural poutres dans une direction de 4.5m x 8m d'un secteur de salle de classes d'une école pour le calcul de ratio de consommation de bois	46
Figure 57 : Répartition du volume de bois	46
Figure 58 : Étude du volume de bois	46
Figure 59 : Processus traditionnel de déroulement de projet (conception-soumission-construction)	53
Figure 60 : Processus d'échange dans un déroulement de projet conception-construction	53
Figure 61 : Temps par rapport à la valeur de l'implication du gestionnaire de construction/entrepreneur général	54
Figure 62 : Images montrant l'impact des percements pour la MEP en situation d'incendies	59
Figure 63 : Image montrant l'intégration des services MEP au-dessous des poutres	59
Figure 64 : Image montrant l'intégration des services MEP entre le platelage et les poutres dans les espaces créés par le rehaussement des pannes	60
Figure 65 : Système dalle sur colonnes	63
Figure 66 : Contreventement concentrique en bois	65
Figure 67 : Contreventements minimisant le nombre de connexions à concevoir, fabriquer et installer	65
Figure 68 : Exemple de contreventements utilisant des jambes de forces	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Platelage et dalles structurales – Plancher	37
Tableau 2 : Systèmes structuraux – Plancher	37
Tableau 3 : Platelage et dalle structurale – Toit	38
Tableau 4 : Systèmes structuraux et trames – Toit	39
Tableau 5 : Ossature contreventée	40
Tableau 6 : Murs de refend	40
Tableau 7 : Potentiel d'optimisation du ratio de consommation bois	47
Tableau 8 : Comparaison des indices de montage	52
Tableau 9 : Valeurs d'IPF et d'IDF pour certains types de bois	68

1 Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois

Le Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois (**cecobois**) est un organisme à but non lucratif dont la mission est d'appuyer sans frais les promoteurs, les développeurs ainsi que les firmes d'ingénieurs et d'architectes en matière d'utilisation du bois dans les constructions non résidentielles au Québec.

cecobois est votre ressource première afin d'obtenir :

- Des conseils techniques en matière de faisabilité et d'utilisation du bois ;
- Des renseignements et des services sur les solutions constructives en bois ;
- Des informations sur les produits du bois et leurs propriétés.

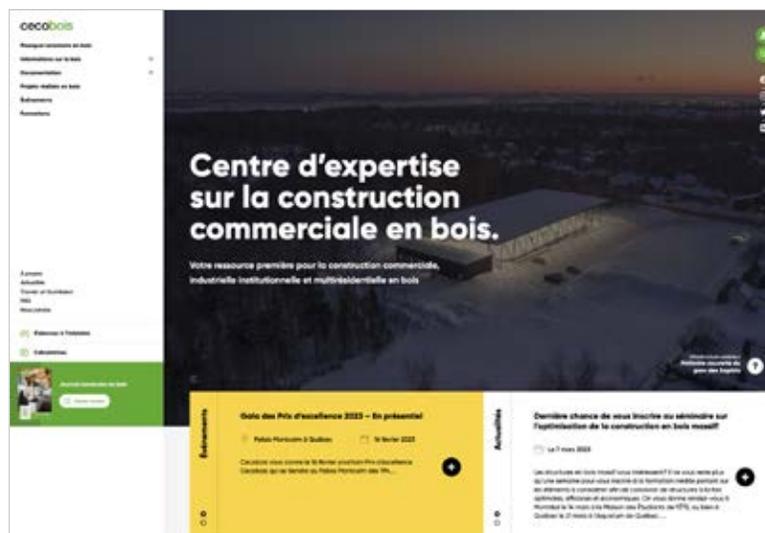
Nos services :

- Un accompagnement technique gratuit pour faciliter la conception de projets commerciaux, industriels, institutionnels et multirésidentiels ;
- Des formations dédiées aux professionnels du bâtiment, admissibles aux crédits de formation continue de l'Ordre des architectes du Québec et de l'Ordre des ingénieurs du Québec ;
- Des études de cas et un répertoire de projets pour inspirer et découvrir des réalisations en bois ;
- Un répertoire de fournisseurs de produits ou de services dans le domaine de la construction en bois ;
- Des publications techniques pour aider les professionnels à concevoir des structures en bois durables et conformes à la réglementation en vigueur ;
- Des outils de calcul pour aider les professionnels dans le prédimensionnement des éléments de structure ;
- Un journal et une infolettre pour diffuser l'actualité du domaine de la construction en bois ;
- Un outil Web pour évaluer les émissions de GES de vos bâtiments.

Contactez notre équipe dès les premières étapes de conception de votre projet

Notre équipe peut analyser avec vous les solutions en bois les mieux adaptées à votre projet.

Visitez notre site Internet www.cecobois.com



2 Introduction à l'optimisation des constructions en bois massif

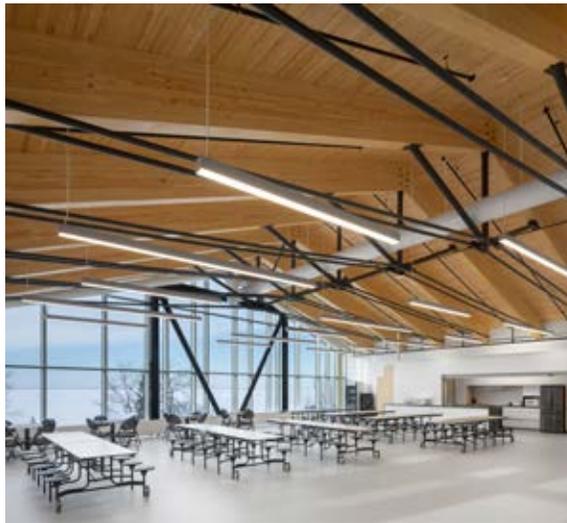
Les constructions en bois massif sont définies comme étant des constructions combustibles dans lesquelles on assure un certain degré de résistance au feu en utilisant des éléments structuraux en bois de grandes dimensions et en supprimant les vides de construction des planchers, des murs et des toits. Les éléments structuraux de ce type de construction font partie d'un système structural à poutres et colonnes de gros bois d'œuvre, de bois lamellé-collé ou de bois de charpente composite. Cela inclut également un système de dalles massives en bois lamellé-croisé, un platelage en bois d'œuvre ou en bois lamellé-collé ou d'autres éléments de bois de charpente composite. Tous ces éléments structuraux doivent avoir des dimensions supérieures à celles prévues pour la construction de gros bois d'œuvre et indiquées à l'article 3.1.4.7. de la division B du Code de construction du Québec, Chapitre 1 – Bâtiment, et Code national du bâtiment – Canada (modifié) (code ⁽¹⁾).

La réussite d'un projet en bois massif dépend des stratégies favorisant sa réalisation en y intégrant efficacement les produits en bois massif pour sa structure. Il est donc important de bien connaître les caractéristiques et les limites de ces différents produits et systèmes afin de réaliser des constructions à la fois optimisées et répondant aux besoins du client. De plus, une vision holistique en considérant le coût global de l'ensemble du projet et non seulement le coût de la structure s'avère une meilleure approche. Les points suivants représentent les éléments clés facilitant sa réussite.

Connaître les buts et les objectifs du client

Dès la phase d'avant-projet, il est important de connaître les buts et les objectifs du client par rapport à l'utilisation du bois pour le type de bâtiment prévu. Plusieurs raisons peuvent motiver ce choix :

- Esthétisme ;
- Biophilie ;
- Développement durable ;
- Préfabrication et diminution du temps de montage ;
- Poids de structure et diminution des charges aux fondations ;
- Coûts ;
- Etc.



ÉCOLE METIS BEACH INTERMEDIATE

Photo : Stéphane Groleau

Profiter des avantages de l'utilisation du bois

Le bois est un matériau issu d'une ressource renouvelable et son utilisation dans la construction permet de réduire les émissions de GES comparativement à l'acier et le béton ⁽²⁾. Le bois possède également une grande capacité isolante. De plus, les structures en bois massif possèdent une résistance au feu intrinsèque ce qui permet de les laisser apparentes.

Maximiser les bienfaits du bois exposé

Le bois est très apprécié par les usagers pour ses qualités esthétiques. Les structures en bois apparentes offrent une ambiance chaleureuse et favorise le bien-être des occupants. De plus, une structure en bois exposée peut contribuer à réduire le coût des produits de finition intérieure.

Connaître les caractéristiques des constructions en bois massif

La construction en bois comporte de nombreux avantages, mais aussi des défis. Une bonne connaissance des matériaux et des systèmes structuraux aidera les concepteurs à développer des stratégies efficaces et optimisées.



SIÈGE SOCIAL EDDYFI TECHNOLOGIE

Photo : Cecobois

Concevoir en fonction d'une construction en bois massif dès le début du projet

Il est possible, mais non optimal, de substituer les autres matériaux par du bois dans des projets initialement conçus avec ces différents matériaux. Changer un projet ayant été initialement pensé en fonction d'une structure d'acier ou de béton pour le convertir intégralement à une structure en bois massif ne permet pas de profiter pleinement des avantages d'une structure de bois bien optimisée.

Comprendre et tirer avantage de la chaîne d'approvisionnement et des possibilités de préfabrication

Chaque fournisseur possède des procédés optimaux en matière de fabrication. Certaines dimensions permettent d'optimiser la capacité des



USINE ART MASSIF

Photo : Art Massif

presses, de limiter les pertes, de simplifier les usinages et (ou) le montage, etc. L'industrie de la construction en bois massif offre une grande possibilité de préusinage des éléments. L'usinage des pièces de bois à l'usine assure la précision et la rapidité d'installation au chantier, de même qu'un niveau accru d'esthétisme du produit fini. Dans le cas des panneaux massifs en bois, il est également possible de réaliser à l'usine les différentes ouvertures et percements (mécaniques, électriques et plomberie portes, fenêtres), permettant ainsi l'érection et la fermeture du bâtiment en un temps record. Il est aussi possible d'installer en usine une bonne partie des ferrures des assemblages.

- **Optimiser les trames du bâtiment**

Les trames dépendent notamment de l'usage du bâtiment pour s'agencer avec l'architecture. D'autres aspects du projet peuvent aussi influencer la trame structurale comme les charges, la résistance au feu, l'acoustique, les passages mécaniques, etc. Elles doivent être définies très rapidement dès le début de la phase de conception puisqu'elles serviront par la suite de référence pour la coordination entre les différents intervenants dans le projet.

- **Uniformiser les éléments de bois et les assemblages**

L'uniformisation des éléments de bois et des assemblages permet d'optimiser les coûts de la structure tant sur le plan de la conception que de la fabrication.

- **Établir un écosystème collaboratif**

Comme tout matériau de construction, le bois comporte ses particularités. Cela est particulièrement vrai lors de l'introduction de nouvelles techniques de construction, de matériaux ou de méthodes que certains membres d'une équipe multidisciplinaire risquent de moins connaître. Il est donc important, dès la phase d'avant-projet, de réunir tous les intervenants afin de bien comprendre les objectifs et les enjeux de chacun qui pourraient avoir des répercussions sur certaines disciplines et, par le fait même, sur l'ensemble du projet. À titre d'exemple, la non-considération d'exigences en termes de ventilation pourrait avoir comme impact de masquer de façon inacceptable le côté esthétique de la structure en bois prévu au départ. Le choix et l'orientation des éléments structuraux doivent tenir compte des exigences de la mécanique du bâtiment de façon à créer un résultat harmonieux.

3 Caractéristiques des constructions en bois massif

3.1. Bénéfices environnementaux, biophilie et esthétique

Les nombreuses caractéristiques environnementales du bois en font un allié de taille dans la lutte contre les changements climatiques. Le bois est un matériau issu d'une ressource renouvelable et exploitée de manière durable au Québec [3]. Son utilisation dans la construction de bâtiments s'avère une solution pertinente dans un domaine qui génère énormément de gaz à effet de serre.

Lorsqu'on pense au bois, on pense à son caractère chaleureux. Cette perception ne relève plus du mythe : plusieurs études et recherches scientifiques [4] menées à travers le monde ont permis de mesurer les bienfaits du bois sur le bien-être. Leurs conclusions vont toutes dans la même direction, et ce, peu importe leur culture ou leur lieu géographique. Ce phénomène selon lequel le bois génère un sentiment de bien-être porte d'ailleurs un nom : la biophilie. Formée à partir de la racine grecque « bio » (vie) et du suffixe grec « phile » (qui aime), la biophilie est donc le fait d'aimer le vivant. En architecture, il désigne une conception qui se rapproche ou qui imite les conditions d'un environnement naturel. Plusieurs études démontrent clairement que la lumière naturelle, les plantes, l'eau, les paysages naturels, les sons de la nature de même que des matériaux naturels tels que le bois, peuvent favoriser une réduction du stress et une hausse de la bonne humeur et de l'attention.

Les différents revêtements ou éléments structuraux en bois exposés permettent de rehausser l'apparence d'une pièce en créant une ambiance riche et chaleureuse. Le bois est grandement apprécié autant par les professionnels de la construction que par les usagers pour ses qualités esthétiques. Les architectes le recommandent fréquemment pour rehausser l'apparence visuelle et créer un environnement invitant. Les différentes essences de bois et les finis offerts s'adaptent aisément à tous les styles de décors, du plus classique au plus contemporain.

3.2. Résistance au feu et indice de propagation de la flamme

La résistance au feu est un enjeu très important dans les bâtiments afin d'assurer la protection des occupants et des biens. Il est essentiel de ne pas confondre la notion de « résistance au feu » et celle d'« incombustibilité » des matériaux. Le degré de résistance au feu (DRF) est défini dans le code [1] comme « le temps en minutes ou en heures pendant lequel un matériau ou une construction empêche le passage des flammes et la transmission de la chaleur dans des conditions déterminées d'essais et de comportement, ou tel qu'il est déterminé par interprétation ou extrapolation des résultats d'essais comme l'exige le code national du bâtiment (CNB) [6] ». Durant cette période, le matériau doit également conserver son intégrité structurale. De manière générale, l'incombustibilité d'un matériau est associée à la limitation de la propagation du feu. Un matériau qui ne s'enflamme pas ne peut pas contribuer à la propagation du feu.

Le bois est certes un matériau combustible, mais il permet d'obtenir une bonne résistance au feu. En effet, lors d'incendie, il se crée en surface une couche de carbonisation qui isole la partie résiduelle de la chaleur, comme le montre la figure 1. Sous la couche de carbonisation, les résistances sont peu touchées. La fonction structurale des éléments en bois est donc toujours assurée, à condition que la section de bois résiduelle soit suffisante.

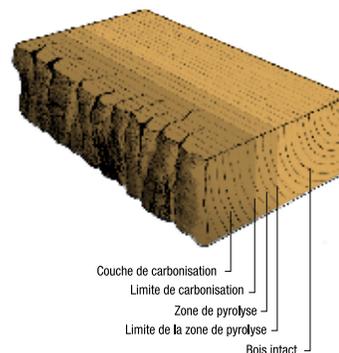


FIGURE 1 • Couche de carbonisation
Source : adaptée de CSA O177

La vitesse de combustion unidirectionnelle du bois est prévisible : 0,65 mm/min, soit environ 39 mm par heure. L'annexe B de la norme CSA O86 [2] permet ainsi aux ingénieurs de déterminer la section résiduelle des éléments en bois en condition d'incendie et de déterminer leur résistance. La méthodologie présentée à l'annexe B de la norme CSA O86 est une approche alternative pour déterminer le DRF d'éléments massifs en bois afin d'être conforme au CNB [5], tel qu'établi à partir d'essais conformément à la norme CAN/ULC-S101 [11]. Il est à noter toutefois que cette méthodologie est applicable à condition que la section transversale résiduelle de l'élément de bois massif soit supérieure à 70 mm lorsqu'il est chauffé sur les côtés opposés ou de 35 mm lorsqu'il est chauffé d'un seul côté.

Considérant leur résistance naturelle au feu, les structures en bois lamellé-collé ou en bois lamellé-croisé peuvent être laissées apparentes, si bien qu'elles nécessitent moins d'éléments de finition que les autres systèmes structuraux. De plus, le bois laissé apparent apporte chaleur et esthétisme au bâtiment, ce qui lui procure une valeur ajoutée et permet d'économiser sur les matériaux de finition et d'enveloppe.

Indice de propagation de la flamme

L'indice de propagation de la flamme (IPF) est une mesure de la combustion superficielle de la surface d'un matériau obtenue lors d'un essai normalisé conformément à la norme canadienne CAN/ULC-S102 [6].

Le code [1] exige des valeurs maximales d'IPF pour les revêtements intérieurs et les structures apparentes selon l'usage du bâtiment, leur endroit dans le bâtiment et la présence ou non de gicleurs. De manière générale, le code [1] prévoit trois catégories d'IPF :

- IPF entre 0 et 25 inclusivement ;
- IPF de 26 à 75 ;
- IPF au-delà de 75, mais inférieur à 150.

Les bois d'ingénierie tels que le bois lamellé-collé, le bois lamellé-croisé et le bois de charpente composite ont des valeurs d'IPF qui varient généralement entre 35 et 75. Les valeurs d'IPF du bois d'œuvre varient généralement entre 35 et 150. Certaines essences de bois d'œuvre peuvent cependant excéder la valeur de 150. Le tableau 2 en annexe fournit une liste détaillée des valeurs d'IPF et d'indice de dégagement des fumées (IDF) pour plusieurs produits du bois.

Il est toutefois possible d'améliorer l'IPF des produits du bois pour atteindre la valeur la plus exigeante du code [1], soit 25. Il existe deux façons : le bois ignifugé sous pression en conformité avec la norme CAN/CSA-O80 [7] et les enduits d'ignifugation. L'ignifugation sous pression peut être disponible pour certaines dimensions de bois d'œuvre, mais rarement disponibles pour les bois d'ingénierie. Les enduits d'ignifugation peuvent être appliqués en usine ou en chantier. Bien que ces enduits puissent permettre d'atteindre un IPF de 25, ils ne sont généralement pas permis pour les bâtiments dont le code [1] exige une structure incombustible en conformité avec la sous-section 3.1.5. Il est important de souligner également que les traitements d'ignifugation sous pression de même que les enduits d'ignifugation ne rendent pas le bois incombustible et n'augmente pas leur degré de résistance au feu.

3.3. Résistance thermique

Le bois est moins conducteur thermique que l'acier et le béton. L'utilisation d'une charpente en bois réduit donc les pertes de chaleur dues aux ponts thermiques. Cette diminution du transfert de chaleur à travers les parois des bâtiments réduit la consommation d'énergie pour le chauffage et la ventilation, tout en augmentant le confort des usagers. Des murs à ossature de bois qui sont isolés permettent ainsi d'atteindre plus facilement les valeurs de résistance thermique des normes les plus strictes en matière d'efficacité énergétique [4].

3.4. Acoustique

Le comportement acoustique est un autre aspect important dans un bâtiment. Bien que le bois possède des caractéristiques intéressantes en matière acoustique, des performances acoustiques élevées ne peuvent pas être atteintes avec le bois seul, de même qu'avec les autres matériaux de construction. Les défis reliés à l'utilisation du bois en matière d'acoustique ne sont pas reliés au bois lui-même mais au fait de le laisser apparent et de créer ainsi des surfaces lisses provoquant de la réverbération.

Un souci au traitement acoustique adéquat doit donc être apporté de façon à atteindre les performances souhaitées. Cette préoccupation en matière acoustique est moins présente avec les structures d'acier et de béton puisque la structure est généralement cachée par un revêtement qui va jouer le rôle de traitement acoustique. Avec le bois, au contraire, on souhaite le laisser apparent. Le traitement acoustique doit donc en tenir compte pour ne pas masquer au complet la surface de bois exposée de façon à conserver son caractère esthétique et biophilique.

Pour les planchers, le traitement acoustique s'effectue habituellement par le dessus. Pour atteindre la performance acoustique souhaitée, une masse résiliente désolidarisée telle qu'une chape de béton ou une chape sèche est souvent utilisée. Dans un souci d'optimisation, l'usage d'une chape sèche est une so-

lution intéressante puisqu'elle permet, entre autres, de diminuer la charge permanente, le temps de chantier et l'apport d'humidité au chantier.

La sous-section 8.3.2 du *Guide sur l'utilisation du bois dans les écoles primaires* [3] de Cecobois présente des solutions acoustiques performantes avec des structures de bois.

cecobois.com/documentation/documents-techniques/?t=guides

L'organisme WoodWorks fournit également un recueil d'assemblages types de planchers et de murs en bois massif avec leurs indices acoustiques.

woodworks.org/resources/inventory-of-acoustically-tested-mass-timber-assemblies/

4 Composants structureux

4.1. Poutres et colonnes

Les poutres et les colonnes utilisées dans les constructions en bois massif (gros bois d'œuvre) doivent être de dimensions égales ou supérieures aux dimensions indiquées au tableau 3.1.4.7 du Code [1]. Ces éléments structuraux peuvent être en bois d'œuvre, en bois lamellé-collé ou en bois de charpente composite.

4.1.1. Bois d'œuvre

Selon la norme CSA O86, le bois d'œuvre, en figure 2, est du bois de sciage produit par une usine de sciage sans autre usinage que le sciage, le rabotage et la coupe transversale. Il s'agit en quelque sorte d'éléments obtenus directement de la bille de bois. Les éléments de bois d'œuvre sont généralement utilisés pour des constructions de faible hauteur. Il est à noter que les éléments en gros bois d'œuvre ne sont généralement pas séchés et sont utilisés à l'état vert (teneur en humidité > 19 % à la mise en œuvre), donc sujets à du retrait important en service.



FIGURE 2 •
Bois d'œuvre

4.1.2. Bois lamellé-collé

Le bois lamellé-collé (Glued-Laminated Timber, GLT ou BLC), en figure 3, est le produit le plus utilisé pour les constructions en bois massif. Il est constitué de plusieurs éléments de bois d'œuvre de petites dimensions (lamelles) aboutés et collés les uns aux autres, face contre face, sous pression, à l'aide d'un adhésif hydrofuge. Le BLC québécois est généralement fabriqué avec de l'épinette noire et du pin gris. Il peut être fabriqué en éléments droits ou cintrés, de forme rectangulaire ou de formes diverses. Les éléments qui composent le BLC ont une épaisseur d'environ 35 mm ou plus mince pour des rayons de courbure prononcés. Ces lamelles sont séchées à une teneur en humidité qui varie entre 10 % et 15 % avant le collage afin de minimiser le retrait des poutres et des colonnes en service. La sélection du bois, de ses défauts et l'agencement des lamelles permettent d'obtenir un produit plus homogène possédant de plus petits défauts ainsi que des propriétés structurales supérieures au bois d'œuvre massif.



FIGURE 3 •
Bois lamellé-collé

Procédé de fabrication du bois lamellé-collé

Le procédé de fabrication du BLC est illustré à la figure 4. Les lamelles qui le composent sont d'abord séchées et généralement classées selon un essai de rigidité pour en déterminer leurs modules d'élasticité. Par la suite, le repérage et l'élimination des défauts dans les lamelles est effectué, puis on procède au taillage des entures multiples, à l'application de l'adhésif et à l'aboutage. Une fois le mûrissement de l'adhésif complété des joints aboutés, un rabotage des lamelles est réalisé. Ensuite, les lamelles jointées sont agencées selon leur position prévue dans l'élément de BLC puis encollées pour le montage final dans un gabarit pour la forme désirée, soit droite ou courbe. Une fois le mûrissement de l'adhésif terminé, la finition de l'élément de BLC est complétée par rabotage, usinage et ponçage.

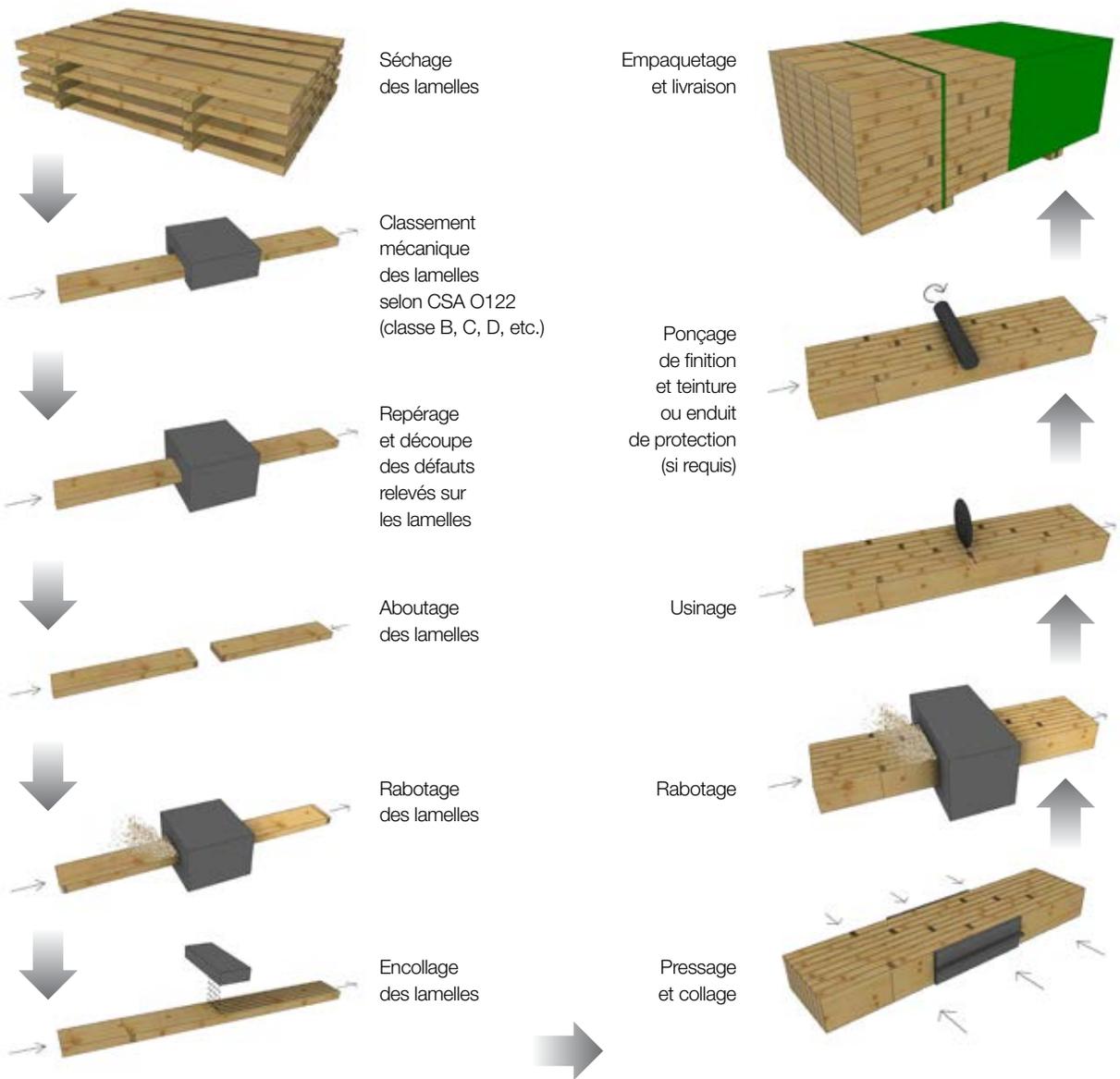


FIGURE 4 • Fabrication du BLC

Types de bois lamellé-collé

Il existe essentiellement deux types de BLC sur le marché au Québec (figure 5), soit un BLC « propriétaire » produit par l'entreprise Nordic Structures, le Nordic Lam, et un BLC conforme à la norme CSA O122 [8] produit par les entreprises Art Massif et Goodfellow. Alors que les produits Nordic Lam sont uniformes, les poutres fabriquées selon la norme CSA O122 sont dites « couronnées » car les lamelles de bois les plus résistantes sont placées près des faces supérieure et inférieure, là où les contraintes sont les plus élevées. Les colonnes soumises uniquement à des charges de compression et fabriquées selon la norme CSA O122 sont composées de lamelles de même résistance pour toute la section.



FIGURE 5 • Bois lamellé-collé homogène (à gauche) et couronné (à droite)

Agencement des lamelles

Pour atteindre les résistances des poutres de BLC indiquées dans la norme CSA O86, les lamelles doivent être classées et agencées selon la norme CSA O122. Tel que mentionné précédemment, les lamelles de résistance supérieure (de classe B, par exemple) sont placées près des rives de la poutre, alors que les lamelles de moindre résistance (de classe D, par exemple) sont près de la zone centrale ou de l'axe neutre. L'agencement des lamelles peut être 100 % symétrique par rapport à l'axe neutre (classes 20f-EX ou 24f-EX), ou non symétrique par rapport à l'axe neutre (classes 20f-E ou 24f-E) (figure 6).

L'agencement symétrique permet d'obtenir une résistance à la flexion égale à la rive supérieure et inférieure de la poutre. Par conséquent, la poutre peut être inversée et conserver ses propriétés structurales. Cet agencement est particulièrement intéressant dans le cas des poutres à portées multiples où les moments de flexion positif et négatif alternent tout au long de la poutre.

L'agencement non symétrique (20f-E ou 24f-E) est plus restrictif, car les lamelles de résistance supérieure sont

disposées du côté tendu de la poutre. Ce type d'agencement se limite généralement aux poutres en portée simple. De plus, puisque sa fabrication est plus complexe et rarement plus économique, cet agencement n'est habituellement pas proposé par les fournisseurs du Québec pour des poutres de faibles hauteurs. Les classes 20f-EX ou 24f-EX sont donc généralement utilisées.

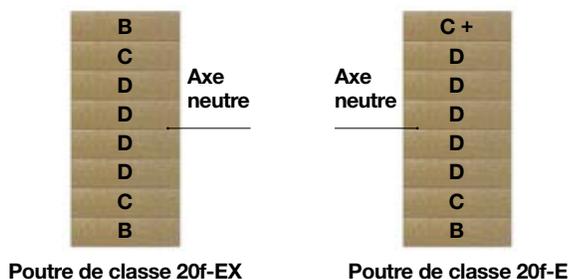


FIGURE 6 • Exemple d'agencement des lamelles symétriques et non symétriques

Le BLC propriétaire de Nordic Structures, Nordic Lam, est un produit homogène composé de lamelles identiques sur toute sa hauteur.

Classes de contraintes du bois lamellé-collé

Pour les poutres de BLC fabriquées selon la norme CSA O122, il y a deux classes de contraintes offertes en fonction des essences de bois utilisées. La classe 24f-EX utilise essentiellement le sapin de Douglas et le mélèze de l'Ouest, tandis que la classe 20f-EX est basée sur un groupe d'essences de pin et d'épinette. Les fabricants au Québec offrent généralement des produits de la classe 20f-EX. Ces deux classes de contraintes peuvent également être utilisées pour des colonnes soumises à la fois à des contraintes de compression et de flexion.

On retrouve également des classes similaires aux classes 20f-EX et 24f-EX aux États-Unis. Pour ces produits américains, il est toutefois important d'exiger qu'ils soient conformes à la norme canadienne CSA O122, de même qu'à la norme CSA O177^[9] qui porte sur le contrôle de qualité en usine. Il faut aussi être très vigilant en ce qui concerne les produits européens qui ont une désignation semblable, mais dont les propriétés structurales diffèrent beaucoup, ce qui peut porter à confusion. À titre d'exemple, une poutre de BLC européenne de classe GL24 est basée sur une résistance caractéristique de flexion de 24 MPa aux états limites. La classe canadienne 24f-EX est plutôt basée sur une résistance en flexion en unité impériale de 2400 lb/po² aux contraintes admissibles, ce qui correspond à une résistance prévue de 30,6 MPa aux états limites (figure 7).

Le BLC Nordic Lam s'appuie sur un rapport d'essai du Centre canadien des matériaux de construction (CCMC) et est fabriqué essentiellement d'épinette noire et de pin gris. Ses propriétés sont sensiblement équivalentes à la classe 24f-EX de la norme CSA O86. Étant uniforme sur toute sa section, le BLC Nordic Lam peut être utilisé à la fois pour les poutres, les colonnes et les éléments tendus.

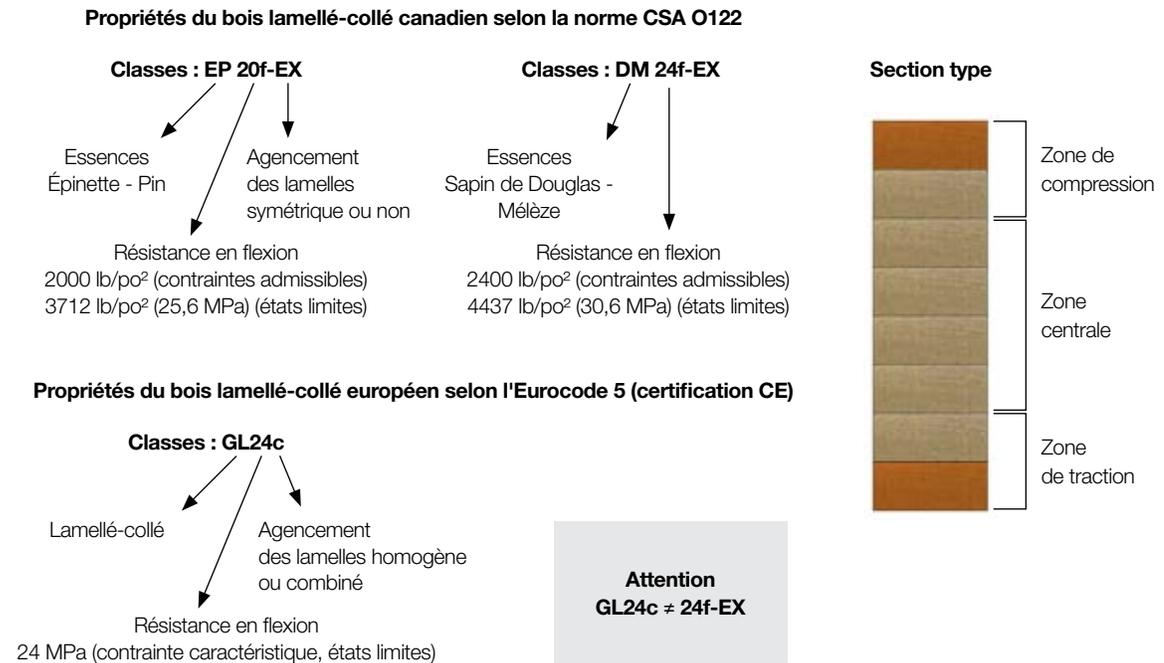


FIGURE 7 • Classes de BLC canadiennes et européennes

Pour les colonnes en BLC soumises uniquement à des charges de compression et fabriquées selon la norme CSA O122, il existe deux classes de contraintes offertes en fonction des essences de bois utilisées. La classe 16c-E utilise essentiellement le sapin de Douglas et le mélèze de l'Ouest, tandis que la classe 12c-E est basée sur un groupe d'essences de pin et d'épinette. Les fabricants au Québec offrent généralement des produits de la classe 12c-E. Tel que mentionné précédemment, ces colonnes sont fabriquées avec des lamelles de même résistance.



FIGURE 8 • Presse automatisée par collage à chaud Kallasoe
Photo : Cecobois

La norme CSA O122 offre également des classes de BLC pour les éléments tendus. Il s'agit des classes 18t-E pour les essences de sapin de Douglas et de mélèze de l'Ouest et 14t-E pour le groupe d'essences de pin et d'épinette. Cependant, ces deux classes ne sont généralement pas disponibles auprès des fabricants de BLC étant donné que les classes 24f-EX et 20f-EX procurent des résistances similaires en traction.

Dimensions disponibles

Plusieurs dimensions, longueurs et classes de contraintes existent sur le marché. Vous trouverez sur le site de cecobois un tableau qui résume les dimensions et les classes offertes par les différents fabricants du Québec et de l'Est du Canada ainsi qu'une liste des fournisseurs qui peuvent offrir ces produits.

Les dimensions des éléments de BLC sont limitées par la capacité des équipements de fabrication qui peuvent varier d'une usine à une autre ainsi que par les limites de transport. La plupart des fabricants ont toutefois leur gamme de dimensions optimales à plus faible coût, de façon à limiter les pertes de matière première dues à l'usinage.

À titre d'exemple, il existe des équipements de production automatisée par collage à chaud (figure 8) qui permettent de produire de manière simplifiée et plus économique des éléments structuraux pour des largeurs et des hauteurs courantes que l'on trouve sur le marché.

Résistance au feu

La fabrication des poutres selon la norme CSA O122 permet une utilisation optimale de la ressource d'un point de vue structural. Cependant, en cas d'incendie, les lamelles les plus résistantes sont aussi celles qui sont carbonisées en premier. Selon la méthodologie présentée dans l'annexe B de la norme CSA O86, le concepteur doit donc s'assurer que la section résiduelle de la poutre puisse résister aux charges prévues pour cette condition. Or, si une ou deux lamelles inférieures de la section originale n'existent plus, les propriétés unitaires de la poutre ne sont plus les mêmes puisque l'agencement des lamelles est modifié. Par conséquent, pour un certain degré de résistance au feu (DRF) exigé par le Code ^[1], le concepteur doit aviser le fabricant de façon à modifier la sélection et l'agencement des lamelles de la section originale de la poutre, tel qu'exigé à l'article B.2.2 de la norme CSA O86. La figure 9 ci-dessous illustre cette situation.

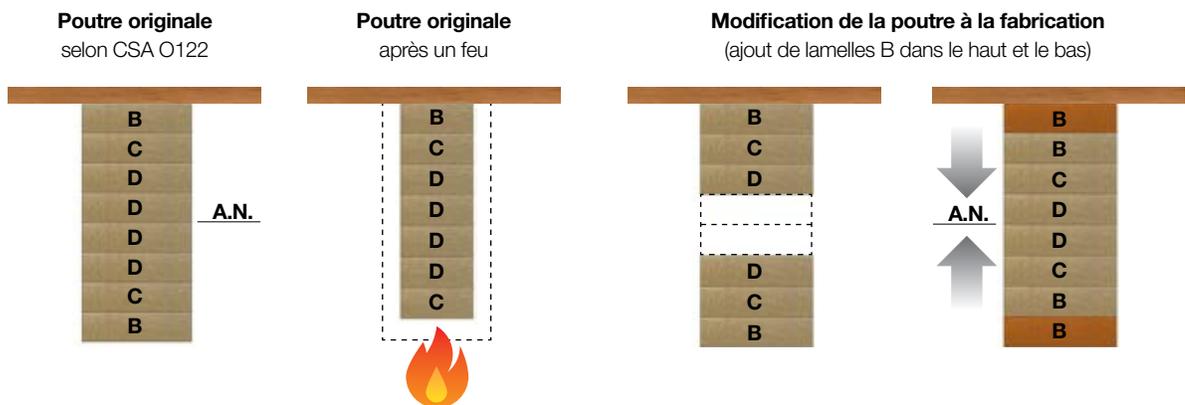


FIGURE 9 • Exemple de modification de poutre pour un DRF requis de 60 minutes

Puisque le BLC Nordic Lam est composé de lamelles identiques, il n'est donc pas requis de modifier l'agencement des lamelles pour sa résistance au feu.

Orientation des lamelles

Les poutres et les colonnes fabriquées selon la norme CSA O122 ont des résistances structurales différentes selon leur orientation par rapport à l'application des charges. Les résistances les plus élevées sont selon les lamelles placées à l'horizontale de façon à ce que la sollicitation en flexion se fasse autour de l'axe X-X (figure 10). Lorsque la sollicitation en flexion se fait selon l'axe Y-Y, la résistance globale de la poutre doit être basée sur la résistance unitaire de la lamelle la plus faible, soit basée sur du bois d'œuvre de classe n° 2 conformément à l'article 7.5.3 de la norme CSA O86. C'est le cas, par exemple, des poutres de rive qui doivent résister à la fois aux charges gravitaires et aux charges latérales de vent.

Dans le cas du BLC Nordic Lam, les résistances prévues (flexion, cisaillement, compression perpendiculaire au fil, module d'élasticité) sont les mêmes autour des deux axes puisque les lamelles sont identiques dans les deux directions.

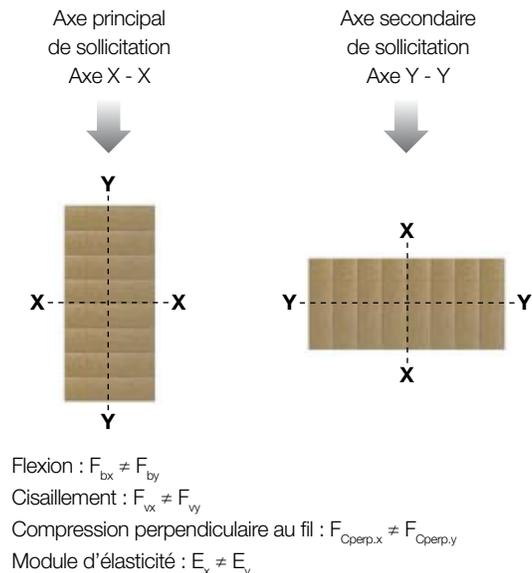


FIGURE 10 • Agencement des axes

Aspect visuel

La norme CSA O122 indique trois classes d'aspect visuel, soit industrielle, commerciale et qualité. Du point de vue de la résistance structurale, il n'y a pas de différence entre ces trois classes puisqu'il s'agit uniquement de la finition de la surface. Au Québec, les fabricants offrent généralement une seule classe d'aspect communément appelée « architecturale », en figure 11, qui correspond essentiellement à la classe « qualité » de la norme CSA O122 et dont les faces latérales sont exemptes de bavures de colle et sont bien poncées. Les nœuds lâches, les trous de nœud, les flaches et les poches de résine doivent être réparés à l'aide de bois sain ou d'un mastic hydrofuge et élastique. Un scellant de base est généralement appliqué en usine pour fournir une protection temporaire contre les intempéries durant la construction.

La classe industrielle peut être offerte par certains fabricants, mais avec une offre plus restreinte, généralement pour des applications où la structure sera recouverte de gypse.



FIGURE 11 • Classe d'aspect architectural

Formes géométriques

La construction en bois lamellé-collé offre beaucoup d'options en matière de formes géométriques pour les éléments structuraux. Il est possible, par exemple, de réaliser des sections droites et rectangulaires, constantes et courbes, à inertie variable, rondes ou spéciales.

Sections droites et rectangulaires

Les sections droites et rectangulaires sont les plus courantes et les plus économiques (figure 12). Elles sont fabriquées à partir d'un gabarit droit ne nécessitant pas d'ajustement pour des éléments de dimensions et de longueurs variables.

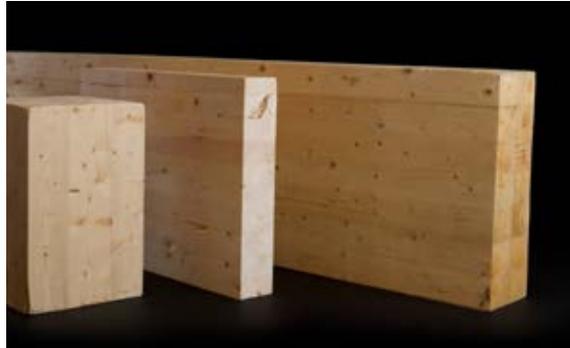


FIGURE 12 • Sections droites et rectangulaires

Sections constantes et courbes

Le procédé de fabrication des sections constantes et courbes (figure 13) est semblable à celui des sections droites et rectangulaires, sauf que le gabarit de montage doit être ajusté selon la courbure désirée. Un changement de courbure nécessite alors une modification du gabarit. Le niveau de répétitivité de pièces identiques aura donc un impact sur le coût de production de même que le niveau de courbure. Cela a également un effet sur le coût de production. Une courbure prononcée requiert des lamelles de bois de plus faible épaisseur, et les lamelles plus minces ne sont généralement pas standards en plus d'être réalisées à partir de lamelles plus épaisses resciées ou rabotées, ce qui cause une perte de matière première. Également, une plus grande quantité de lamelles nécessite plus de manipulations en termes de main-d'œuvre et plus d'adhésif.



FIGURE 13 • Sections constantes et courbes

Pour la vérification structurale des pièces courbes, contrairement aux pièces droites, il faut tenir compte de contraintes potentielles de traction perpendiculaire au fil. En effet, lorsque le moment de flexion tend à réduire la courbure des pièces, les contraintes résiduelles sont en traction perpendiculaire au fil. La norme CSA 086 tient compte de ces effets qui dépendent de la courbure.

Sections à inertie variable

Le bois lamellé-collé permet également la réalisation d'éléments de section à inertie variable tels que des arcs Tudor ou des poutres cintrées (figure 14) à inertie variable. Ce type d'éléments structuraux se fabrique aisément en usine (figure 15), mais exige plus de temps de préparation pour la fabrication du gabarit et une plus grande perte de matière première, d'où une augmentation du coût unitaire.



FIGURE 14 • Arc Tudor et poutre cintrée à inertie variable



FIGURE 15 • Table d'assemblage d'une poutre de BLC cintrée

Sections rondes ou spéciales

Il est possible de réaliser des sections rondes ou de formes géométriques spéciales (figure 16). Toutefois, le coût unitaire de ces sections est plus élevé. La première étape consiste à réaliser d'abord une section carrée ou rectangulaire. Par la suite, il faut machiner la pièce à l'aide d'un tour à bois, d'une moulurière ou

d'un équipement d'usinage à commande numérique (*Computer Numerical Control*, CNC), d'où une perte importante de matière première. De plus, une section ronde ou spéciale obtenue à partir d'une section carrée occasionne automatiquement une inertie plus faible, donc une résistance structurale inférieure.



FIGURE 16 • Sections rondes et spéciales

À titre d'exemple, pour réaliser une colonne ronde de 200 mm de diamètre, il faudrait utiliser une section carrée de plus ou moins 215 mm x 215 mm, soit légèrement supérieure à 200 mm pour permettre un jeu minimal à l'usinage (figure 17). En plus de nécessiter une opération additionnelle d'usinage, la fabrication de cette colonne ronde occasionne une perte de matière de l'ordre de 32 % par rapport à la section carrée initiale. De plus, cette section ronde procure une résistance structurale inférieure à la section carrée initiale. Une colonne ronde de 200 mm de diamètre, de 3 m de longueur et de classe 12c-E a une résistance en compression parallèle au fil 39 % inférieure à une colonne carrée de 215 mm x 215 mm de même longueur et de même classe.

Section initiale carrée
215 mm x 215 mm



Aire : $A = bd = 46\,225 \text{ mm}^2$
Inertie :
 $I = bd^3/12 = 178 \times 10^6 \text{ mm}^4$
Rayon de giration :
 $r = \sqrt{I/A} = 62 \text{ mm}$

Section ronde
 $\varnothing = 200 \text{ mm}$



Aire : $A = \pi r^2 = 31\,416 \text{ mm}^2$
Inertie :
 $I = \pi r^4/4 = 78,5 \times 10^6 \text{ mm}^4$
Rayon de giration :
 $r = \sqrt{I/A} = 50 \text{ mm}$

Perte d'aire de 32 %
Perte d'inertie de 56 %
Perte de rayon de giration de 19 %

FIGURE 17 • Propriétés géométriques de colonnes de différentes formes

4.1.3. Bois de charpente composite

Le bois de charpente composite regroupe essentiellement trois types de produits (en figure 18) : le bois de placage stratifié (Laminated Veneer Lumber, LVL), le bois de copeaux parallèles (Parallel Strand Lumber, PSL) et le bois de copeaux laminés (Laminated Strand Lumber LSL). Le plus commun est le LVL. Quant au PSL, il s'agit d'un produit unique dont la marque de commerce est le Parallam.

Les bois de charpente composite sont généralement utilisés dans la construction à ossature légère en bois. Il est toutefois possible de les utiliser dans la construction en bois massif selon certaines conditions en lien avec la

résistance au feu. Comme pour le bois d'œuvre massif et le bois lamellé-collé, l'annexe B de la norme CSA O86 fournit les vitesses de combustion pour le bois de charpente composite. L'exigence de la dimension résiduelle minimale de 70 mm doit également être respectée.

Cependant, l'annexe B de la norme CSA O86 s'applique uniquement aux éléments de bois d'une seule pièce, ce qui exclut les éléments composés de plusieurs plis qui sont assemblés à l'aide de connecteurs métalliques tels que des clous, des vis ou des boulons. Il est à noter que les éléments en bois de charpente composite tels que le LVL et le LSL sont souvent offerts en éléments composés à partir de pièces de 44 ou 89 mm d'épaisseur. Le produit PSL est quant à lui offert généralement en une seule pièce de 44, 89, 133 et 178 mm d'épaisseur.



FIGURE 18 • Bois de charpente composite

4.2. Panneaux et platelage en bois massif

Les panneaux et les platelages en bois massifs sont utilisés principalement pour les planchers et les toits. Ils peuvent facilement être utilisés autant avec des systèmes en poutres et colonnes en bois massif ou en acier qu'avec une structure de murs à ossature légère, comme à la figure 19.

Les panneaux, et non les platelages, sont parfois utilisés pour les murs en combinaison avec un système de poutres et colonnes en bois massif ou en acier.



FIGURE 19 • Panneaux en CLT supportés par une structure à ossature légère en bois
Photo : Equilibrium

4.2.1. Panneaux en bois lamellé-croisé

Les panneaux en bois lamellé-croisé (Cross-Laminated Timber, CLT, figure 20) fabriqués en Amérique du Nord sont composés de plusieurs couches perpendiculaires de bois d'œuvre jointes à l'aide d'un adhésif structural entre chaque couche seulement, et non entre les planches. Selon l'épaisseur et le nombre de plis des panneaux en CLT, la disposition perpendiculaire des différentes couches permet de supporter les charges appliquées dans deux directions (longueur et largeur). Le panneau en CLT est un produit idéal pour réaliser des toitures en coin, c'est-à-dire en double porte-à-faux.

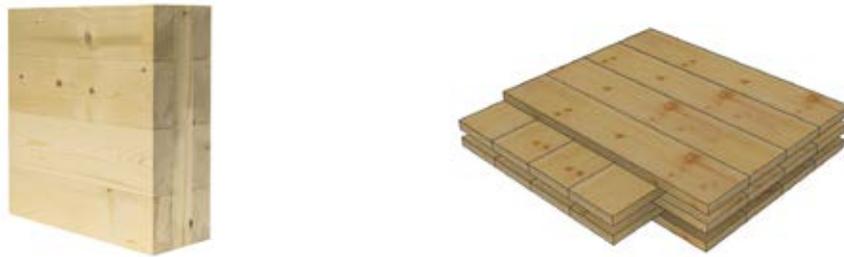
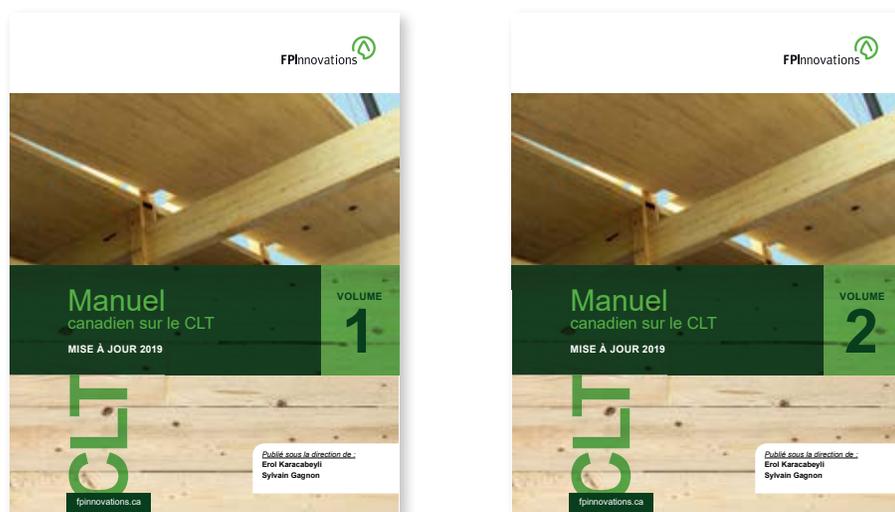


FIGURE 20 • Bois lamellé-croisé

Le *Manuel canadien sur le CLT* est un ouvrage de référence publié par FPIinnovations. Il est disponible gratuitement en ligne. web.fpinnovations.ca/fr/clt/

Ce manuel couvre différents sujets dont, entre autres, la fabrication, la conception, les assemblages, la résistance au feu, l'acoustique, l'enveloppe du bâtiment et la manutention.



Manuel canadien sur le CLT

Fabrication

Le procédé de fabrication du CLT est semblable à celui du BLC et est illustré à la figure 21.

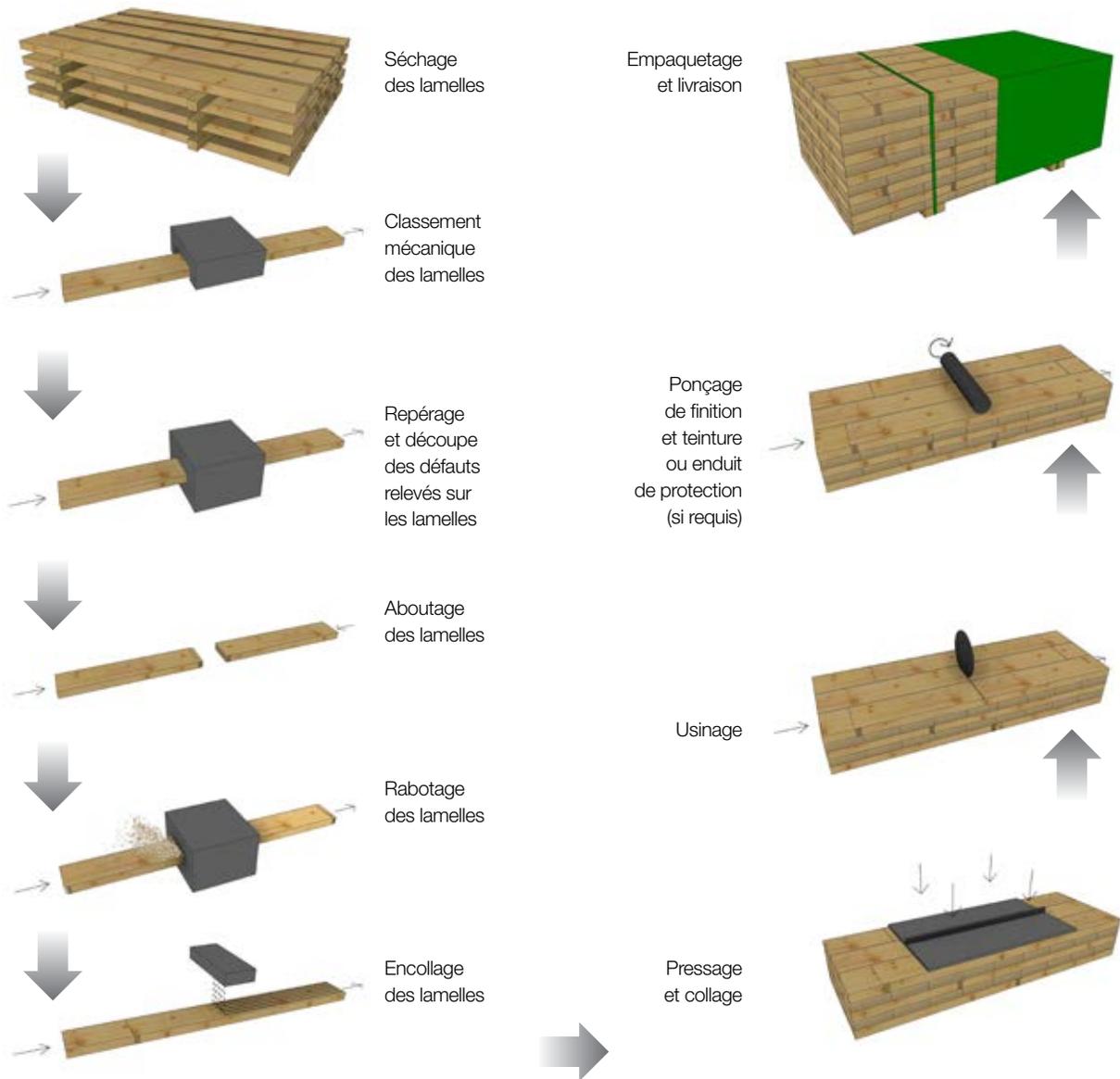


FIGURE 21 • Fabrication du CLT

Dimensions

Les panneaux en CLT sont offerts en épaisseurs qui varient généralement entre 105 mm (trois épaisseurs de lamelles) et 315 mm (neuf épaisseurs de lamelles). Ils sont fabriqués selon une largeur maximale de 2,7 m et une longueur maximale de 19,5 m. D'autres épaisseurs, dimensions et agencements peuvent être disponibles selon le fabricant. Vous trouverez sur le site de cecobois un tableau qui résume les dimensions et les classes offertes par les différents fabricants du Québec et de l'Est du Canada.

Essences de bois et classes de contraintes

Les règles de calcul du CLT sont indiquées au chapitre 8 de la norme CSA O86 qui reconnaît cinq classes de contraintes établies selon l'essence et la classe de bois utilisées.

Selon la norme CSA O86, les classes de contraintes du bois lamellé-croisé sont les suivantes :

E1 : Épinette-pin-sapin (EPS) MSR 1950F_b-1.7E dans toutes les couches suivant l'axe (direction) majeur (longitudinal) et EPS n° 3/Stud dans toutes les couches suivant l'axe mineur (transversal).

E2 : Sapin de Douglas-mélèze MSR 1650F_b-1.5E dans toutes les couches suivant l'axe (direction) majeur (longitudinal) et sapin de Douglas-mélèze n° 3/Stud dans toutes les couches suivant l'axe mineur (transversal).

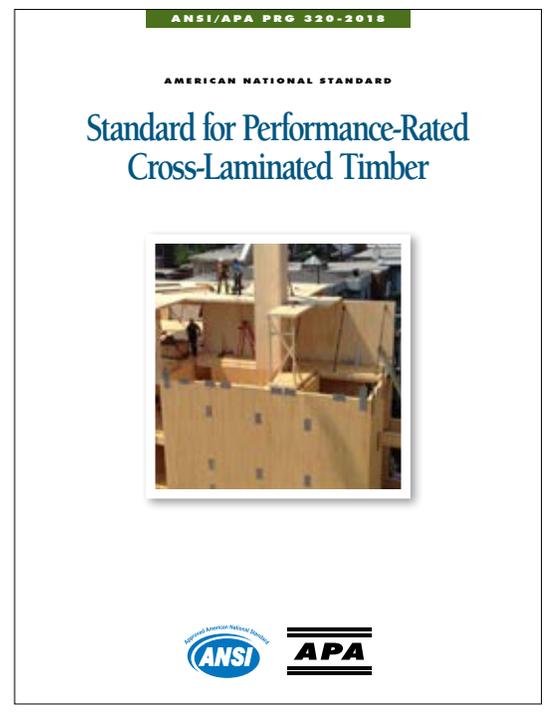
E3 : Résineux de l'Est, essences nordiques ou de l'Ouest MSR 1200F_b-1.2E dans toutes les couches suivant l'axe (direction) majeur (longitudinal) et résineux de l'Est, essences nordiques ou de l'Ouest n° 3/Stud dans toutes les couches suivant l'axe mineur (transversal).

V1 : Sapin de Douglas-mélèze n° 1/n° 2 dans toutes les couches suivant l'axe (direction) majeur (longitudinal) et sapin de Douglas-mélèze n° 3/Stud dans toutes les couches suivant l'axe mineur (transversal).

V2 : EPS n° 1/ n° 2 dans toutes les couches suivant l'axe (direction) majeur (longitudinal) et EPS n° 3/Stud dans toutes les couches suivant l'axe mineur (transversal).

Les classes de contraintes que l'on trouve au Québec et dans l'Est du Canada sont généralement les classes E1 et V2. Il est à noter que la norme CSA O86 requiert que le CLT utilisé au Canada soit fabriqué selon la norme ANSI/APA PRG 320.

apawood.org/Data/Sites/1/documents/standards/prg320/prg-320-2018.pdf



Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber

Classes d'apparence

Les panneaux en CLT sont généralement offerts en deux classes d'apparence, soit architecturale et industrielle. Les panneaux en CLT de classe d'apparence architecturale ont une finition extérieure soignée (généralement d'un seul côté) puisqu'ils sont destinés à être laissés apparents. Les panneaux en CLT de classe d'apparence industrielle ont une finition extérieure brute puisqu'ils sont destinés à être dissimulés.

Teneur en humidité et stabilité dimensionnelle

Le CLT est fabriqué avec des pièces de bois sec dont la teneur en humidité ne dépasse pas 19 %. Étant donné que le CLT est composé de plusieurs couches de pièces de bois installés perpendiculairement, il en résulte un panneau qui se caractérise par une excellente stabilité dimensionnelle dans le plan du panneau.

Installation et assemblages

L'installation des panneaux en CLT se fait généralement à l'aide d'une grue. Le chapitre 12 du *Manuel canadien sur le CLT* traite du levage et de la manutention du CLT. L'équipement utilisé dépend, entre autres, de la dimension et du poids du panneau à manipuler ainsi que de sa rigidité. Il existe également plusieurs types d'ancrages selon la situation. Les figures 22 et 23 montrent différentes méthodes de levage ainsi que différents systèmes d'ancrage pour ces panneaux.



FIGURE 22 • Levage d'un panneau en CLT avec et sans palonnier



FIGURE 23 • Systèmes d'ancrage au panneau CLT

Photo : MTC Solutions mtcsolutions.com/products/transport-anchor/

Il existe également sur le marché des outils spécialisés tels que des outils de rapprochement (figure 24) pour faciliter l'installation des panneaux en CLT.



FIGURE 24 • Outil de rapprochement (pince à clameaux)
Photo : Rothoblaas

L'assemblage des panneaux en CLT se fait généralement à l'aide de vis autotaraudeuses ou de clous. Des exemples d'assemblages sont montrés aux figures 25 et 26.

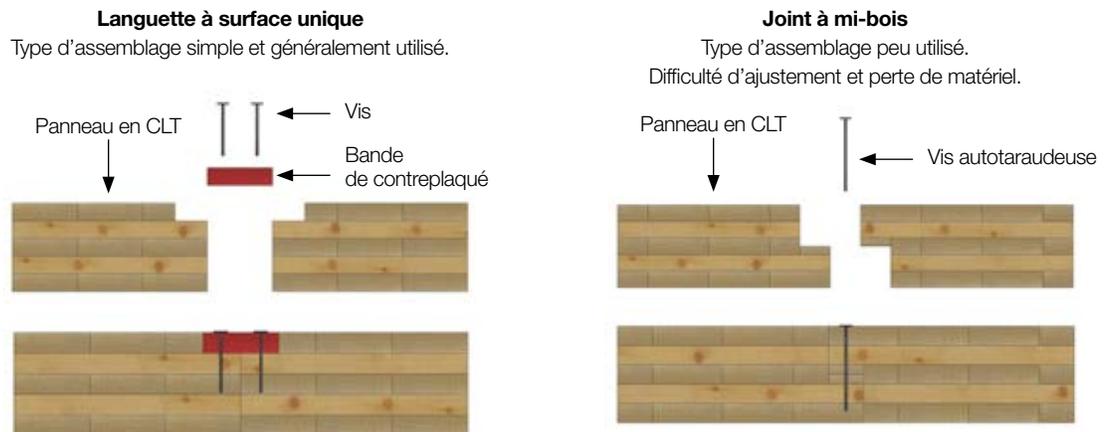
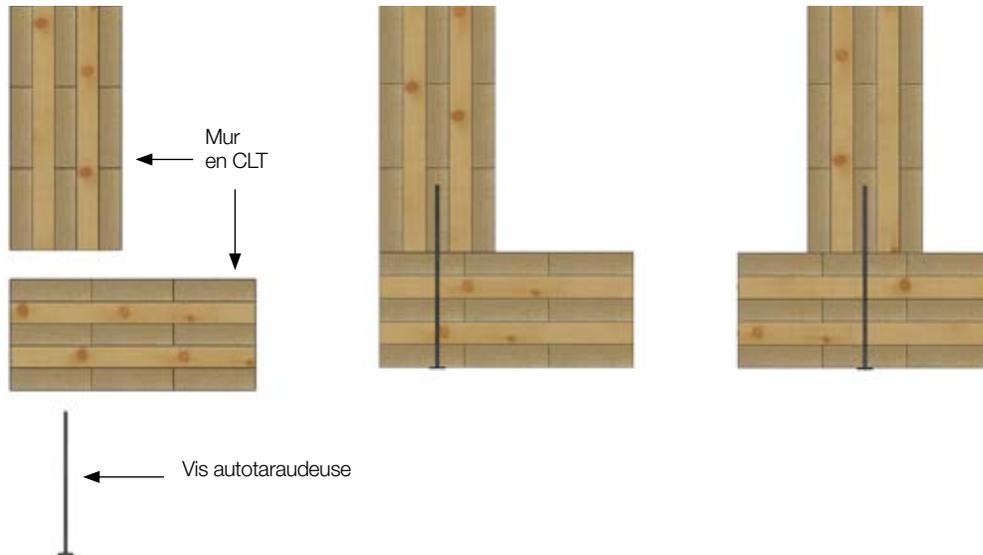
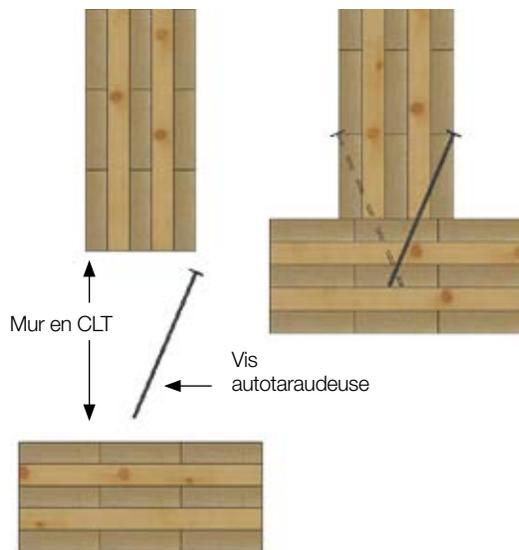


FIGURE 25 • Exemples d'assemblage de panneaux en CLT pour les planchers et les toits.
Adaptée du *Manuel canadien sur le CLT*, FPIInnovations

Vis autotaraudeuses installées à partir de l'extérieur (vue en plan)



Vis autotaraudeuses introduites à angle (vissage en biais) de l'intérieur (vue en plan)



Support métallique intérieur (vue en plan)

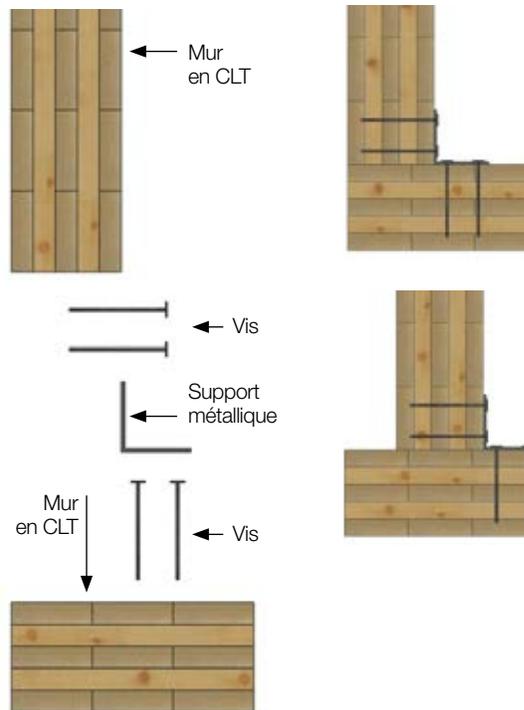


FIGURE 26 • Exemples d'assemblage de panneaux en CLT pour les murs. Adaptée du *Manuel canadien sur le CLT*, FPIInnovations

Degré de résistance au feu

Par son épaisseur, le CLT offre un bon DRF qui peut être déterminé selon la méthode de calcul de l'annexe B de la norme CSA O86 basée sur la vitesse de combustion du bois. Ainsi, les panneaux en CLT conviennent très bien pour réaliser des séparations coupe-feu lorsqu'un DRF est exigé.

La méthode de calcul de l'annexe B de la norme CSA O86 a pour but de vérifier la résistance de la section résiduelle de la pièce de bois, et ce, pour une charge réduite et une situation exceptionnelle d'incendie. Le CLT étant constitué de lamelles de bois croisées, ce sont uniquement les couches de lamelles parallèles à la portée qui contribuent à supporter la charge. Il faudra donc tenir compte de cette caractéristique dans le calcul de la section résiduelle du CLT. Pour une exposition au feu de 45 minutes du CLT de cinq plis de 175 mm d'épaisseur de la figure 27, il faut considérer une profondeur de combustion du bois de 36 mm selon la méthode de calcul de l'annexe B. Cependant, étant donné que la deuxième lamelle de bois est perpendiculaire à la portée et n'offre aucune résistance, la profondeur résiduelle sera plutôt de 105 mm ($175 - 35 - 35$).

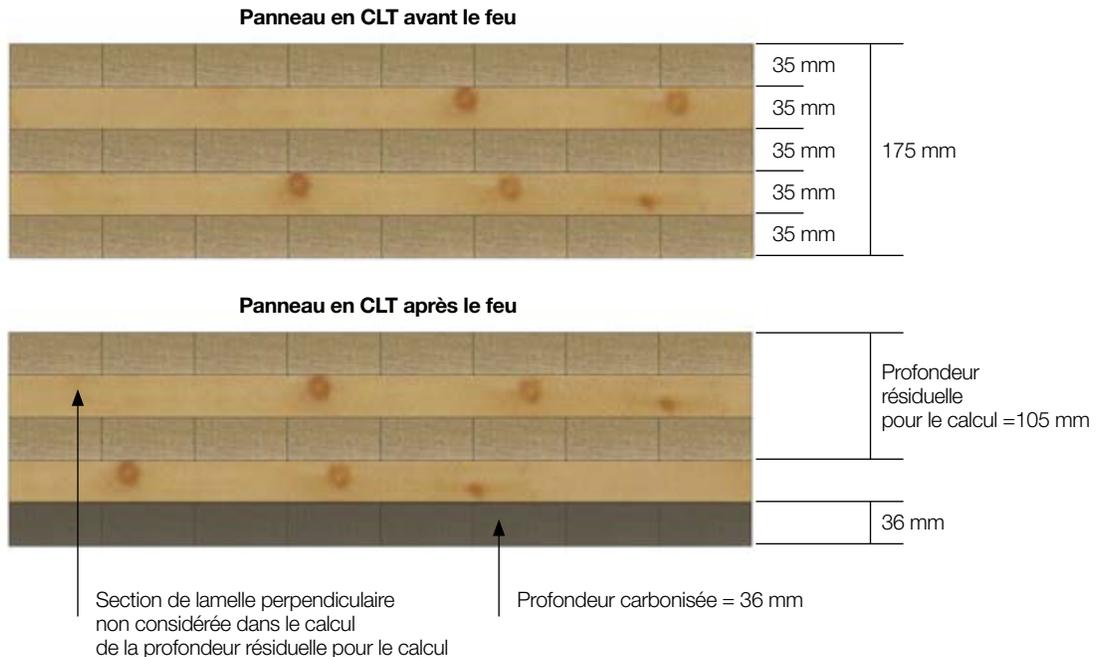


FIGURE 27 • Profondeur de carbonisation d'un panneau en CLT

Diaphragme et mur de refend

Les panneaux en CLT peuvent être utilisés pour construire des planchers, des toitures ou des murs. Le croisement des planches qui composent les panneaux en CLT leur confère une grande résistance au cisaillement, ce qui leur permet d'agir comme diaphragme et mur de refend. La résistance des diaphragmes et des murs de refend réalisés avec des panneaux en CLT est toutefois contrôlée par la résistance des détails d'assemblage entre les panneaux et aux jonctions de tout autre élément de transfert.

4.2.2. Platelage en bois lamellé-collé

Les platelages en BLC (figure 28) sont constitués d'éléments généralement emboutetés et cloués à leurs points d'appui. Ils sont utilisés comme revêtement de toit ou de plancher. Ces produits se caractérisent également par leur aspect esthétique élevé.



FIGURE 28 • Platelage en bois lamellé-collé (BLC)

Dimensions

Le platelage en BLC est constitué d'éléments dont la largeur varie généralement entre 127 et 406 mm, l'épaisseur entre 38 et 130 mm et la longueur jusqu'à

12 m environ, selon les fabricants.

Plusieurs profils de joints d'éléments sont offerts. Les plus courants sont les joints à rainures et à languettes (figure 29) pour des épaisseurs de l'ordre de 38 mm, et les joints mi-bois (figure 30) pour les épaisseurs de 60 mm et plus. Dans le calcul de la surface couvrante, il faut tenir compte de la perte de matière causée par le profilage des joints des éléments. Un élément dont la largeur totale est de 232 mm, par exemple, aura une largeur nette couvrante de 214 mm en tenant compte du joint mi-bois, d'où un rendement matière de 92 %.



FIGURE 29 • Joints à rainures et languettes



FIGURE 30 • Joint mi-bois

Essences de bois et classes de contraintes

Les essences les plus courantes sont l'épinette noire et le pin gris, mais d'autres essences peuvent aussi être disponibles selon les fabricants. La résistance du platelage en BLC doit être basée sur du bois d'œuvre de classe n° 2 conformément à l'article 7.5.3 de la norme CSA O86.

Teneur en humidité et stabilité dimensionnelle

La teneur en humidité maximale du platelage en BLC est généralement de l'ordre de 15 %. Contrairement aux panneaux en CLT qui sont très stables du point de vue dimensionnel dans le plan à cause du croisement des lamelles qui les composent, le platelage est plus sensible au retrait et au gonflement causés par les variations de teneur en humidité. Pour cette raison, les platelages en bois doivent être bien protégés des intempéries lors de l'installation pour éviter le gonflement, en particulier sur les grandes surfaces. Il est donc nécessaire de prévoir des joints de gonflement/retrait parallèles aux planches. Ces joints peuvent être situés sur le dessus des poutres pour éviter qu'ils ne soient visibles en dessous des panneaux. Il est également recommandé de recouvrir le platelage de membranes protectrices au fur et à mesure de l'installation du platelage.



PARC DES SAPHIRS

Photo : Construction Durand

Installation et assemblage

Le platelage en BLC est généralement livré au chantier en paquets. Étant donné qu'il faut installer les éléments du platelage un à un et ajouter un panneau de contreplaqué ou d'OSB par-dessus le platelage, le temps d'installation sera beaucoup plus long que l'installation de panneaux en CLT. Cependant, en étant fabriqué en grande longueur et largeur, le platelage en BLC permet

de réduire le nombre d'éléments par aire de toit et de plancher, ce qui diminue le temps de montage par rapport au platelage en bois de sciage. Ce produit peut être préassemblé en panneaux en usine ou au chantier et recouverts de contreplaqué et d'une membrane protectrice (figure 31). Le temps d'installation au chantier sera alors réduit considérablement. Pour les différents agencements possible, voir la section du platelage en bois de sciage.

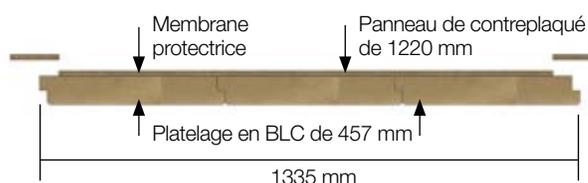


FIGURE 31 • Platelage BLC en panneaux préassemblés en usine ou au chantier

Degré de résistance au feu

Les planchers et les toits faits d'un platelage en BLC peuvent être utilisés dans les constructions en gros bois d'œuvre dont le DRF exigé est d'au plus 45 minutes en autant que les épaisseurs minimales indiquées à l'article 3.1.4.7 du code ^[1] sont respectées. Cependant, un DRF supérieur à 45 minutes peut être atteint en utilisant la méthode de calcul de l'annexe B de la norme CSA O86. Une épaisseur résiduelle d'au moins 35 mm après le temps d'exposition au feu exigé est toutefois requise selon cette méthode de calcul. Pour une exposition au feu de 45 minutes du platelage en BLC de 130 mm d'épaisseur de la figure 32, il faut considérer une profondeur de combustion du bois de 36 mm selon la méthode de calcul de l'annexe B. La profondeur résiduelle sera alors de 94 mm (130 – 36).

Panneau en bois lamellé-collé avant le feu



Panneau en bois lamellé-collé après le feu

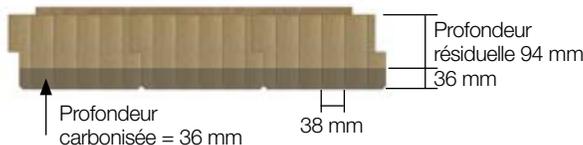


FIGURE 32 • Profondeur de carbonisation d'un platelage en BLC

Effet diaphragme

Les platelages en BLC doivent généralement être recouverts de panneaux d'OSB ou de contreplaqué pour assurer l'effet diaphragme. La fiche technique TT-097D^[12] de l'organisme APA fournit des informations concernant la conception des diaphragmes composés d'un platelage recouvert de panneaux de contreplaqué ou d'OSB.

4.2.3. Platelage en bois de sciage de sciage

Les platelages en bois de sciage sont constitués de planches emboutées et clouées les unes aux autres. Ils sont utilisés comme revêtement de toit ou de plancher. Ces produits se caractérisent par leur aspect esthétique élevé.

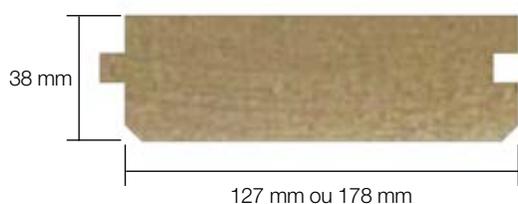
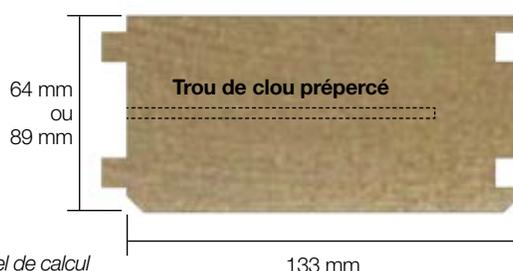


FIGURE 33 • Profil du platelage en bois de sciage. Adaptée du *Manuel de calcul des charpentes en bois*, Conseil canadien du bois^[10]

Dimensions

Les platelages en bois de sciage ou en madriers sont généralement produits en trois épaisseurs : 38 mm, 64 mm et 89 mm. L'épaisseur de 89 mm est toutefois rarement utilisée, d'autres produits tels que les panneaux en CLT et le platelage en BLC étant généralement plus simples à installer. La largeur des planches est de 127 mm et 178 mm pour les épaisseurs de 38 mm et de 133 mm pour les épaisseurs de 64 mm et 89 mm. Le platelage de 38 mm est à rainure et à languette simple tandis que les épaisseurs de 64 mm et 89 mm sont à rainures et à languettes doubles et nécessitent un clouage additionnel à l'horizontal par l'entremise des trous prépercés aux 760 mm c/c maximum pour fixer les planches juxtaposées les unes aux autres (figure 33). La longueur maximale des planches est habituellement de 4880 mm pour le platelage du groupe d'essences EPS et de 6100 mm pour le sapin de Douglas.



Essences de bois et classes de contraintes et d'apparence

Différentes essences de bois sont offertes selon le fabricant, généralement celles du groupe d'essences d'épinette-pin-sapin (EPS), de pin rouge ou de pin blanc, de sapin de Douglas ou de cèdre rouge.

Les platelages en bois de sciage sont disponibles en deux classes d'apparence soit « Select » et « Commercial ». La classe « Select » est utilisée pour des applications architecturales où l'aspect esthétique est important. Également, cette classe offre des résistances structurales plus élevées que la classe « Commercial ». À des fins de calcul, selon la norme CSA O86, la classe « Select » est équivalente à la classe « Select structural » du bois d'œuvre. La classe « Commercial » est utilisée

pour des applications non architecturales. À des fins de calcul, selon la norme CSA O86, la classe « Commercial » est équivalente à la classe n° 2 du bois d'œuvre.

Teneur en humidité et stabilité dimensionnelle

Le platelage est constitué d'éléments en bois de sciage séché au séchoir à une teneur en humidité moyenne de 15 % (maximum 19 %) avant le rabotage. Contrairement aux panneaux en CLT qui sont très stables du point de vue dimensionnel dans le plan à cause du croisement des lamelles qui les composent, le platelage est plus sensible au retrait et au gonflement causés par les variations de teneur en humidité. Pour cette raison, les platelages en bois doivent être bien protégés des intempéries lors de l'installation pour éviter le gonflement,

en particulier sur les grandes surfaces. Il est donc nécessaire de prévoir des joints de gonflement/retrait parallèles aux planches. Ces joints peuvent être situés sur le dessus des poutres pour éviter qu'ils ne soient visibles en dessous des panneaux. Il est également recommandé de recouvrir le platelage de membranes protectrices au fur et à mesure de l'installation du platelage.

Installation et assemblage

Le platelage en bois de sciage peut être posé selon trois méthodes :

1. Configuration irrégulière contrôlée

Cette configuration est la plus économique puisqu'elle permet d'utiliser des planches de longueurs variées. Elle doit avoir une longueur continue sur au moins trois portées, ce qui permet de considérer l'effet de continuité pour le calcul structural. L'agencement des planches doit toutefois respecter certaines règles (voir le *Manuel de calcul des charpentes en bois*, Conseil canadien du bois ^[10]). Cette configuration irrégulière n'est cependant pas autorisée pour les tabliers de pont. Cette configuration est habituellement moins appréciée par les architectes puisqu'elle comprend des joints transversaux visibles pouvant présenter des décalages.

2. Portée simple

Chaque planche du platelage est de même longueur et doit reposer sur deux appuis. Cette configuration est plus simple, mais généralement plus coûteuse et moins performante du point de vue de l'analyse structurale. Aucun joint de bout de planche n'est visible, ce qui est un avantage d'un point de vue esthétique.

3. Portées continues

Chaque planche est de même longueur et repose sur trois appuis et plus. Cette configuration requiert des planches de plus grande longueur, ce qui diminue le nombre de planches à manipuler, d'où une diminution du temps d'installation. Aucun joint de bout de planche n'est visible, ce qui est un avantage d'un point de vue esthétique. Cette configuration est également avantageuse sur le plan de l'analyse structurale en bénéficiant des portées continues.

Il faut toutefois porter une attention particulière lorsque des portées multiples sont utilisées puisque les appuis intermédiaires reçoivent jusqu'à 25 % plus d'efforts. Il faut également s'assurer que l'agencement des portées continues soit possible en tout point afin d'éviter qu'une des portées soit simple.

Le platelage est fixé sur ses appuis à l'aide de clous. Il est à noter que le platelage est généralement laissé apparent du côté plafond seulement. Étant donné que le platelage en bois de sciage est composé de planches de faible largeur et de courte longueur qui doivent être manipulées une à une, il est important de noter que le temps d'installation de ce type de platelage est plus élevé comparativement à d'autres.

Degré de résistance au feu

Les planchers et les toits faits d'un platelage en bois de sciage peuvent être utilisés dans les constructions en gros bois d'œuvre dont le DRF exigé est d'au plus 45 minutes en autant que les épaisseurs minimales indiquées à l'article 3.1.4.7 du Code ^[1] soient respectées. Cependant, un DRF supérieur à 45 minutes peut être atteint en utilisant la méthode de calcul de l'annexe B de la norme CSA O86. Une épaisseur résiduelle d'au moins 35 mm, après le temps d'exposition au feu exigé, est toutefois requise selon cette méthode de calcul.

Effet diaphragme

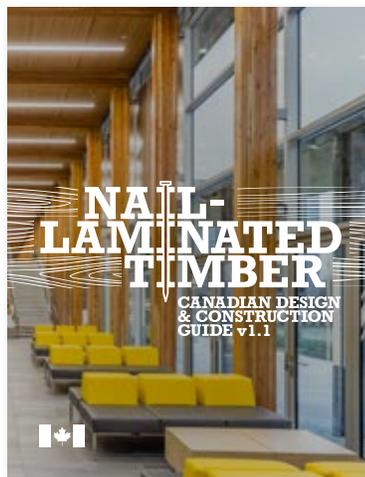
Les planchers et les toits en platelage de bois doivent généralement être recouverts de panneaux d'OSB ou de contreplaqué pour assurer l'effet diaphragme. La fiche technique TT-097D ^[12] de l'organisme APA fournit des informations concernant la conception des diaphragmes composés d'un platelage recouvert de panneaux de contreplaqué ou d'OSB.

4.2.4. Panneaux en bois lamellé-cloué

Les panneaux en bois lamellé-cloué (Nail-Laminated Timber, NLT, figure 34) sont composés d'éléments de bois d'œuvre de 38 mm de largeur et de 64 mm de hauteur ou plus juxtaposés et liés à l'aide de clous. Au début du XIX^e siècle, les panneaux en NLT ont été utilisés principalement pour des planchers d'usine, communément appelé « mill floor ». Ces panneaux étaient construits au chantier. De nos jours, on utilise les panneaux en NLT pour les planchers et les toits (figure 35). Publié par la Forest Innovation Investment, un organisme de Colombie-Britannique, un guide canadien concernant la conception et la fabrication des panneaux en NLT est disponible en ligne (<https://www.naturallywood.com/NLT>).



FIGURE 34 • Panneau en bois lamellé-cloué (NLT)



NLT Canadian Design & Construction Guide

Dimensions

Les panneaux en NLT sont faits à partir d'éléments de bois de sciage de 2x3, 2x4, 2x6 ou plus. Il est possible d'assembler des pièces de différentes hauteurs (par exemple 2x3 et 2x4) de façon à bonifier l'aspect visuel du produit et ainsi créer un effet esthétique intéressant, comme à la figure 36.

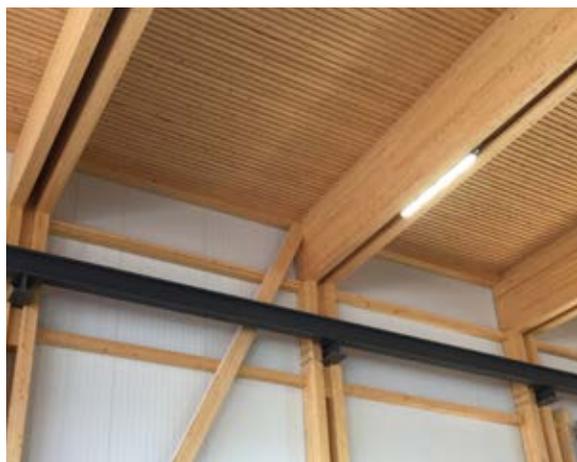


FIGURE 35 • Toit en NLT
Usine de Montmorency Structures de bois



FIGURE 36 • NLT composé de pièces de différentes hauteurs

Essences de bois et classes de contraintes

Le NLT est fabriqué à partir d'éléments de bois d'œuvre, généralement du groupe d'essences épinette-pin-sapin (EPS), classés visuellement (n° 2) ou mécaniquement (MSR). Les valeurs de résistance pour ce type de produit sont fournies dans le *Manuel de calcul des charpentes en bois* du Conseil canadien du bois et selon les règles de calcul de la norme CSA O86. Le NLT peut aussi être réalisé à partir de bois de charpente composite, qui a été le choix de bois retenu pour l'agrandissement des bureaux de JLP Architectes.



AGRANDISSEMENT DES BUREAUX DE JLP ARCHITECTES

Photo : Nanne Springer

Teneur en humidité et stabilité dimensionnelle

La teneur en humidité moyenne des panneaux en NLT est de 15 % (maximum 19 %). Comme pour les autres platelages en bois, le NLT doit être bien protégé des intempéries lors de l'installation pour éviter le gonflement, en particulier sur les grandes surfaces. Il est donc nécessaire de prévoir des joints de gonflement/retrait parallèles aux planches.

Installation et assemblages

Les éléments composant le NLT peuvent être posés selon les mêmes configurations que le platelage de bois d'œuvre à plat, soit une configuration irrégulière, en portée simple ou en portée continue. Le principal avantage du NLT est qu'il peut être fabriqué en usine ou par l'entrepreneur au chantier. Si des usinages sont requis (coupes, perçages, percements, etc.), il faut toutefois porter attention aux clous qui peuvent rendre la tâche plus difficile.

Degré de résistance au feu

Le NLT offre également une bonne résistance au feu et est une solution intéressante pour réaliser des séparations coupe-feu avec un DRF requis. Les planchers et les toits faits d'un platelage en NLT peuvent être utilisés dans les constructions en gros bois d'œuvre dont le DRF exigé est d'au plus 45 minutes en autant que les épaisseurs minimales indiquées à l'article 3.1.4.7 du code^[1] sont respectées. Un DRF supérieur à 45 minutes peut également être atteint selon les épaisseurs indiquées au tableau D-2.4.1 de l'annexe D du code^[1]. Il est à noter que l'annexe D du code^[1] est limitée toutefois à des DRF ne dépassant pas 90 minutes.

À titre d'exemple, le NLT ainsi que le CLT peuvent être utilisés comme solution de rechange pour les cages d'escalier dans les bâtiments de 5 ou 6 étages en ossature légères en bois. Cecobois a produit une fiche technique à ce sujet (cecobois.com/wp-content/uploads/2021/08/CECO-14234-Fiche-technique-Cage-escaliers-WEB.pdf).

Effet diaphragme

Tout comme les platelages en bois, il est possible de créer un effet diaphragme par l'ajout de panneaux de contreplaqué ou d'OSB sur le dessus du NLT.

4.2.5. Panneaux en bois lamellé-goujonné

Les panneaux en bois lamellé-goujonné (Dowel-Laminated Timber, DLT, figure 37) sont composés d'éléments en bois d'œuvre juxtaposés et liés à l'aide de goujons de bois dur. Aucune colle et aucun clou ne sont utilisés pour leur fabrication, ce qui en facilite l'usinage. Une large variété de profils architecturaux est proposée par les fabricants pour des considérations esthétiques ou acoustiques. Actuellement, il n'y a aucun fabricant de ce produit au Québec. Le seul fabricant au Canada est situé en Colombie Britannique. Comme le DLT n'est pas encore inclus dans la norme de calcul CSA O86, les informations techniques concernant ce produit proviennent directement du fabricant.

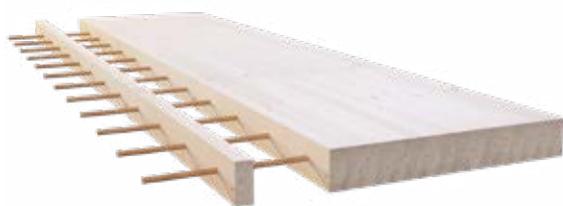


FIGURE 37 • Panneau en bois lamellé-goujonné (DLT)

4.2.6. Panneaux en contreplaqué massif

Les panneaux de contreplaqué massif (Mass Plywood Panel, MPP, figure 38) sont des contreplaqués dont l'épaisseur varie entre 50 et 300 mm. Ces panneaux sont fabriqués en largeur d'environ 3,6 m et en longueur d'environ 15 m. Ils sont faits de placages de 3 mm d'épaisseur approximativement, croisés (plus ou moins 80 % de plis parallèles et plus ou moins 20 % de plis perpendiculaires). Ces panneaux offrent une excellente stabilité dimensionnelle, leur teneur en humidité se situant entre 8 % et 12 % au moment de leur fabrication. Ils offrent également des propriétés structurales élevées ainsi qu'une bonne résistance au feu. Les panneaux MPP nécessitent toutefois plus d'adhésif que les panneaux en CLT. Il n'y a aucun fabricant de ce produit au Canada à l'heure actuelle, mais il en existe dans l'Ouest américain et en Europe.



FIGURE 38 • Panneau en contreplaqué massif (MPP)

4.2.7. Bois-béton composite

Pour des considérations acoustiques, on coule souvent une chape de béton sur les planchers. Cette chape de béton ne contribue aucunement à la résistance de la structure du plancher. Au contraire, elle ajoute une masse importante qui s'ajoute aux autres charges à supporter. Lorsqu'on utilise des panneaux massifs, il est possible et même avantageux de solidariser cette couche de béton aux panneaux de bois de façon à créer une dalle composite bois-béton. Pour assurer la liaison entre le béton et le bois, il existe différents moyens de fixation. Le système HBV (figure 39) consiste à encastrer et coller des plaques d'acier perforées dans les panneaux de bois. Le béton est par la suite coulé sur les panneaux de bois, créant ainsi une dalle composite structurale. On peut également assurer la liaison du béton au bois au moyen de vis autotaraudeuses (figure 40).

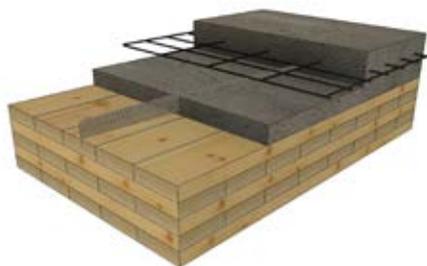


FIGURE 39 • Bois-béton composite - Système d'assemblage HBV



FIGURE 40 • Bois-béton composite - Système d'assemblage par vis

Ce système de dalle bois-béton composite permet de franchir des portées de l'ordre de 12 m et de faible profondeur, ce qui permet de diminuer la hauteur totale d'un bâtiment. Le *Guide pour la conception de planchers composites en bois-béton au Canada*, rédigé par FPInnovations, est disponible sur leur site Web, en anglais seulement.

web.fpinnovations.ca/fr/planchers-composites-bois-beton-une-approche-gagnante-de-construction-massive-en-bois/)

4.3. Murs

4.3.1. Murs de refends

Murs de refend en bois lamellé-croisé

Les panneaux en CLT possèdent de grandes résistances structurales, particulièrement en compression et en cisaillement dans le plan. Les panneaux en CLT permettent alors de réaliser des murs de refend de grande résistance. La section 11.9 de la norme CSA O86 fournit les hypothèses, les méthodes de calcul ainsi que des détails à ce sujet. Cependant, les directives fournies dans la section 11.9 de la norme s'appliquent uniquement aux conditions suivantes :

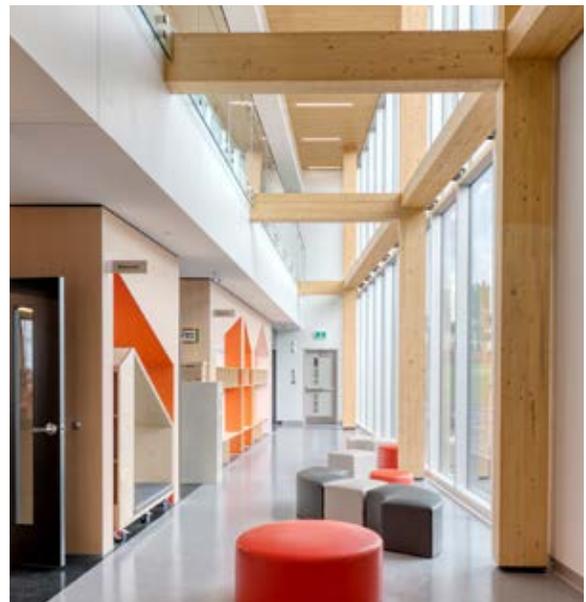
- Constructions en panneaux CLT de type plateforme pour lesquelles la structure résistante aux charges latérales est constituée de murs de refend en CLT.
- Les murs de refend en CLT reposent sur :
 - une plateforme constituée de panneaux CLT; ou
 - un appui ou une fondation en béton au niveau le plus bas.

Murs de refend en ossature légère

Pour les murs extérieurs des structures à poutres et poteaux en bois massif, il peut être avantageux d'utiliser des murs préfabriqués à ossature légère en bois plutôt que d'utiliser une ossature légère métallique construite sur place. De plus, les murs préfabriqués à ossature légère en bois peuvent être utilisés comme système de résistance aux forces latérales. Également, les murs préfabriqués en ossature légère en bois permettent d'accélérer la construction du bâtiment et offrent une meilleure performance thermique que les murs à ossature légère en acier. Ces murs sont fabriqués en usine avec beaucoup de précision et s'adaptent bien aux structures de bois massif. Aussi, les murs préfabriqués à ossature légère en bois peuvent être utilisés simplement comme murs de remplissage non porteurs.

4.3.2. Murs rideaux

Un mur rideau est un revêtement extérieur qui procure une fenestration maximale sur toute sa surface. Le mur rideau conventionnel est composé de panneaux de verre fixés à une ossature d'aluminium (meneaux). Ce système de mur rideau est autoportant. Il est déposé sur la fondation devant la structure du bâtiment et y est attaché.



MUR RIDEAU CONVENTIONNEL

École primaire de l'Aventure

Photo : Clément Robitaille

Il existe également des murs rideaux dont l'ossature est toute en bois. Les panneaux de verre sont fixés directement à la structure du mur (système de meneaux en bois, figure 41), ce qui pourrait réduire la quantité de béton aux fondations lorsque les meneaux servent également d'éléments porteurs à la structure, en limitant les surépaisseurs de murs de fondation vis-à-vis des colonnes chargées gravitairement.

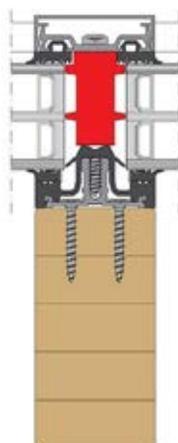


FIGURE 41 •
Système de mur rideau
Raico sur ossature
de bois

ÉDIFICE SMARTMILL

Photo : SmartMill

4.4. Assemblages

Il existe une différence fondamentale entre la conception des assemblages des structures d'acier et de bois. En structure d'acier, les assemblages sont généralement dimensionnés pour un pourcentage de la résistance en cisaillement des éléments à assembler. En structure de bois, les assemblages sont plutôt dimensionnés pour résister aux forces réelles dans les membrures. De plus, la dimension des membrures de bois doit souvent être réajustée à la hausse en fonction des assemblages.

Degré de résistance au feu

Un autre aspect à considérer dès le départ est le DRF exigé par le code^[1]. L'acier, même s'il s'agit d'un matériau incombustible, n'est pas très résistant au feu. Pour un DRF exigé de plus de 45 minutes, les assemblages doivent être protégés. La façon de le faire est de les dissimuler dans les éléments de bois en assurant le recouvrement nécessaire de bois selon le DRF requis (section B9, CSA O86). Dans les structures d'acier, il est possible d'utiliser des peintures intumescentes pour atteindre le DRF exigé. Il est à noter que ces peintures intumescentes sont généralement homologuées pour des structures d'acier uniquement. Sauf avis contraire du fournisseur de ces peintures, elles ne sont généralement pas homologuées pour des applications en contact avec des structures de bois.

Pour des DRF d'au plus 45 minutes, le Code^[1] autorise des structures en gros bois d'œuvre. Les dimensions minimales des éléments de bois et des informations concernant les assemblages sont données à l'article 3.1.4.7 du Code^[1].

Considérations à tenir compte dans la conception des assemblages

Plusieurs considérations doivent être prises en compte dans le choix et la conception des assemblages :

- Types de connecteurs (clous, vis, tire-fond, boulons, goujons, tiges collées, etc.) ;
- Résistance structurale requise ;
- Apparence, esthétique ;
- Résistance au feu ;
- Simplicité de conception ;
- Simplicité de fabrication ;
- Simplicité d'installation ;
- Coût ;
- Rigidité, ductilité ;
- Anisotropie du bois (propriétés différentes suivant la direction du fil du bois) ;
- Environnement corrosif ;
- Teneur en humidité et propriétés hygroscopiques du bois ;
- Etc.

L'ingénieur en structure du bâtiment, en collaboration avec l'architecte, doit fournir à l'ingénieur du fabricant les informations nécessaires pour lui permettre de réaliser la conception finale des assemblages. Étant donné que les structures en bois sont généralement laissées exposées pour leur aspect esthétique, un souci devra être également apporté concernant l'apparence des assemblages.

Types de connecteurs

Il existe plusieurs types de connecteurs disponibles pour la réalisation des assemblages destinés à la construction en bois. On retrouve tout d'abord les connecteurs conventionnels ou génériques qui sont donnés dans la norme CSA O86. Parmi ces connecteurs il y a les clous, les vis, les boulons, les goujons et les tire-fond. Il y a aussi les rivets, les anneaux fendus et les disques de cisaillement, mais ces connecteurs sont peu disponibles et rarement utilisés de nos jours.

Depuis plusieurs années déjà sont apparus des connecteurs dits « propriétaires » qui sont devenus très populaires en raison de leur performance. On retrouve notamment les vis autotaraudeuses et les clous spécialisés. Ces connecteurs sont généralement de provenance américaine ou européenne. Leurs caractéristiques structurales doivent alors être ajustées selon les normes canadiennes. Certains fournisseurs de ces connecteurs offrent toutefois une assistance technique au besoin.

Avec une gamme de connecteurs aussi élaborée, il peut devenir difficile pour un concepteur de faire des choix. *Le Guide de conception des assemblages pour les charpentes en bois* de Cecobois passe en revue les caractéristiques et les méthodes de calcul de ces différents connecteurs.

cecobois.com/documentation/documents-techniques/?t=guides

Éléments dissipateurs d'énergie

Une autre distinction importante à souligner entre les structures d'acier et les structures en bois concerne les éléments dissipateurs d'énergie en rapport aux charges sismiques. Dans le cas des structures d'acier, ce sont les membrures elles-mêmes qui agissent comme éléments dissipateurs d'énergie (fusibles). Dans le cas des structures en bois, ce sont plutôt les assemblages qui

agissent comme éléments dissipateurs d'énergie et non les membrures. La conception des assemblages du système de résistance aux charges sismiques a donc un effet important sur la conception de l'ensemble de ce système qui dépend du coefficient de ductilité, R_d . Dans ce cas, il peut être préférable que la conception des assemblages du système de résistance aux charges sismiques soit réalisée par l'ingénieur en structure du bâtiment. Si la conception des assemblages devait être effectuée par l'ingénieur du fabricant, l'ingénieur concepteur de la structure du bâtiment devra alors lui fournir ses exigences et ses hypothèses de calcul pour finaliser la conception des assemblages.

4.5. Fermes, éléments sous-tendus et arches

Les fermes, les éléments sous-tendus et les arches sont des composants performants qui permettent d'augmenter les portées tout en optimisant la matière.

4.5.1. Fermes

Les fermes sont des structures efficaces et peuvent atteindre des portées de l'ordre de 50 m. On les utilise principalement pour des toits de gymnases, des centres sportifs et des entrepôts.

Fermes tout bois

Construites en bois massif (bois d'œuvre ou bois lamellé-collé) selon les dimensions minimales indiquées au tableau 3.1.4.7. du Code ^[1], les fermes toutes en bois peuvent être laissées apparentes lorsque le DRF exigé est d'au plus 45 minutes (figure 42). Au besoin, il est possible d'obtenir des DRF supérieurs à 45 minutes en effectuant le dimensionnement des membrures et des assemblages en conformité avec la méthode de calcul indiquée à l'annexe B de la norme CSA O86.

Les fermes peuvent être construites dans une grande variété de formes. Les plus courantes sont les fermes plates et les fermes en pente comme illustrées aux figures 43 et 44. Pour les fermes plates, un rapport portée/hauteur de 8/1 à 10/1 permet d'obtenir une bonne rigidité et un concept économique. Pour les fermes en pente, on préconise généralement des pentes de 4/12 ou plus.



FIGURE 42 • Ferme en bois massif



FIGURE 43 • Ferme plate

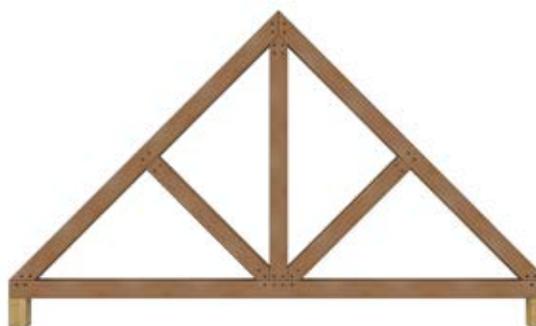
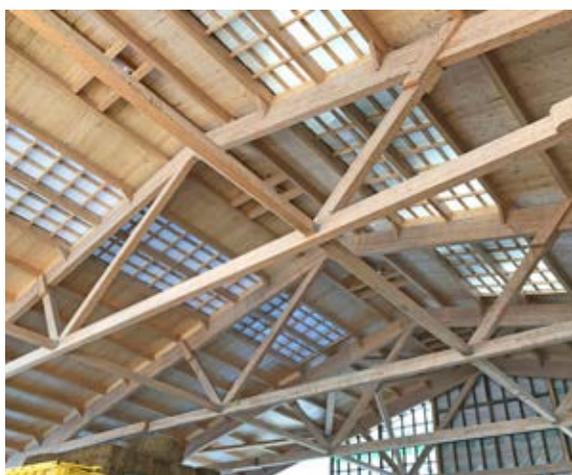


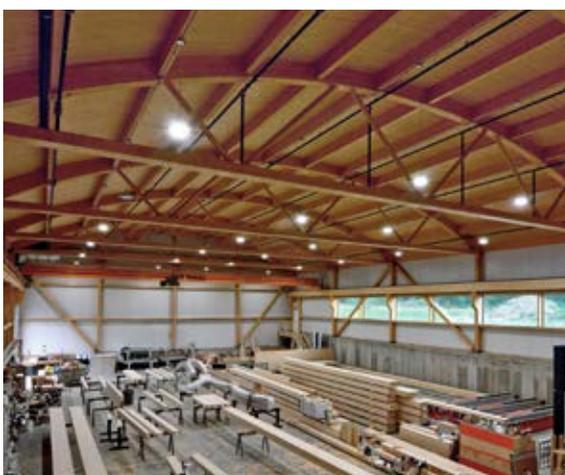
FIGURE 44 • Ferme en pente

Plusieurs autres formes de fermes sont également possibles. L'utilisation de membrures en bois lamellé-collé permet d'obtenir des formes courbées.



FERME BIOLOGIQUE ZWYGART

Photo : Ambiance bois



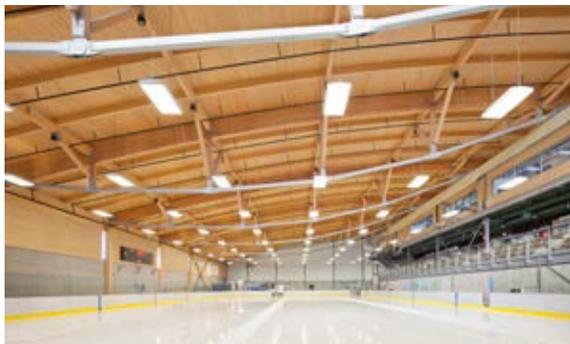
USINE ART MASSIF

Photo : Art Massif

Pour un résultat efficace et économique, il faut s'assurer d'un bon équilibre entre la dimension des membrures supérieures et inférieures et le nombre de membrures internes ou membrures d'âme de façon à minimiser le nombre d'assemblages à réaliser.

Fermes bois-acier

Les fermes hybrides bois-acier permettent habituellement d'atteindre des portées supérieures de l'ordre de 60 m. De plus, les assemblages sont plus faciles à réaliser, en particulier au talon. En effet, avec une membrure inférieure en acier, l'assemblage au talon de la ferme agit en butée, comme montré à la figure 45. Utiliser de l'acier pour la membrure inférieure permet également d'en diminuer la dimension, ce qui gêne moins la vision des spectateurs dans les gradins d'édifices sportifs, par exemple.



ARÉNA DE L'UQAC

Photo : Stéphane Groleau

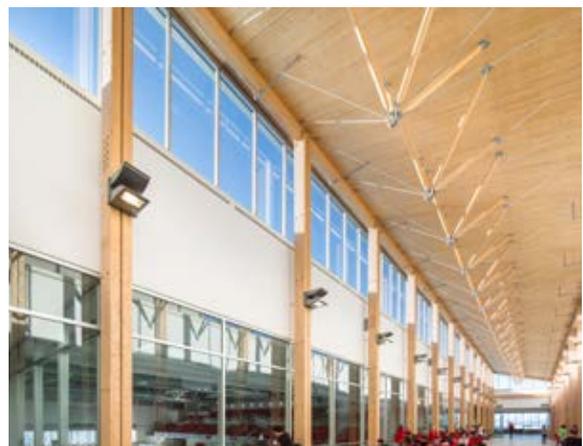
Pour plusieurs bâtiments, le Code ^[1] ne requiert pas de DRF pour le toit. Lorsqu'un DRF au toit est requis, ce type de fermes hybrides bois-acier est rarement utilisé puisque la partie acier de la ferme ne peut pas être laissée exposée. Pour respecter les exigences du Code ^[1] en matière de résistance au feu, il faut protéger les membrures en acier en les encapsulant à l'aide de panneaux de gypse, d'éléments de bois sacrificiels ou d'autres éléments protecteurs.



FIGURE 45 • Détail d'extrémité de la ferme
Aréna de l'UQAC

4.5.2. Éléments sous-tendus

Les éléments sous-tendus sont semblables aux fermes bois-acier, mais en plus simples. Ils sont généralement constitués de poutres en BLC ou de panneaux en CLT sous lesquels on installe un tirant en acier distancé par un ou plusieurs poinçons pour en augmenter l'inertie. En plus d'être sollicités en flexion, les poutres ou les panneaux en CLT sont également sollicités en compression alors que les tirants d'acier sont sollicités en traction. Des poinçons ou des contrefiches sont ajoutés pour reprendre les efforts de compression et créer une structure composite. Ceci permet de franchir économiquement de grandes portées. Tout comme les fermes bois-acier, la petite dimension du tirant d'acier permet d'obtenir une structure épurée. Ces structures sont généralement utilisées pour les toits plats ou à pente unique faible et lorsqu'aucun DRF n'est exigé.



PANNEAUX EN CLT SOUS-TENDUS

PEPS de l'Université Laval

Photo : Stéphane Groleau



AÉROGARE DE CHIBOUGAMAU-CHAPAIS

Photo : Maxime Brouillet



POUTRE SOUS-TENDUE

Gare fluviale de Lévis

Photo : Stéphane Groleau

4.5.3. Arches

Les arches en BLC représentent une forme structurale efficace pour la résistance aux charges verticales réparties sur de longues portées. La forme de l'arche permet en effet de réduire les moments de flexion jusqu'au point où lorsqu'une arche parabolique est utilisée sous un chargement uniformément réparti, les efforts de flexion disparaissent, entraînant uniquement des efforts de compression pure. Les efforts de poussée latérale sont cependant considérables et doivent être adéquatement repris par les fondations ou par un tirant dissimulé dans le sol. De plus, une vérification des efforts de traction perpendiculaire doit être minutieusement effectuée afin de ne pas occasionner des efforts parasites dans les arches.

Le BLC se prête particulièrement bien à la fabrication d'éléments courbes, comme les arches ou les résilles. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, il n'est pas nécessaire d'utiliser de la chaleur ou de l'humidité pour arriver à courber ces impressionnantes pièces en bois. Le cintrage se fait à température pièce par un système de pressage et, en quelques heures, l'adhésif est fixé et l'arche en bois est créée. La norme CSA O122 concernant le bois de charpente lamellé-collé indique les rayons de courbure minimaux en fonction des épaisseurs des lamelles utilisées pour la fabrication des éléments de bois lamellé-collé courbés.

Les structures en arches sont toutes indiquées pour des bâtiments nécessitant des structures de longues portées, notamment celles à vocations sportives. À titre



STADE DE SOCCER TELUS DE QUÉBEC

Photo : Stéphane Groleau

d'exemple, le Stade de soccer Telus de Québec est constitué d'arches en bois lamellé-collé dont la portée libre entre les appuis est de 68,5 m et qui procurent un dégagement de 18 m au centre de l'aire de jeu.

4.6. Structures hybrides

L'hybridation consiste à utiliser différents systèmes structuraux ou différents matériaux dans un même projet. Cette stratégie structurale peut être motivée par des raisons d'économie, de fonctionnalité ou d'efficacité, l'utilisation de plusieurs systèmes structuraux dans un même bâtiment permettant de bénéficier des avantages de chacun de ces systèmes.

4.6.1. Hybridation ossature légère en bois-bois massif

L'ossature légère en bois est reconnue pour son économie, alors qu'une structure en bois massif peut être laissée apparente pour ses qualités esthétiques. En jumelant ces deux systèmes structuraux, on peut ainsi privilégier la structure en bois massif dans les espaces publics où il aura un plus grand impact tout en générant des économies en utilisant l'ossature légère en bois dans les autres sections du bâtiment.

La maison Mazda de Saint-Félicien est un bel exemple de combinaison de ces deux systèmes de construction. Dans la salle d'exposition, une construction apparente à poutres et colonnes en bois lamellé-collé ainsi qu'un platelage de bois pour le toit ont été utilisés, ce qui apporte une ambiance chaleureuse aux clients. Pour d'autres sections du bâtiment telles que le garage et les bureaux, une ossature légère en bois a été utilisée, autant pour le plancher, pour la toiture que pour les murs. En plus d'être plus économique, l'utilisation de murs préfabriqués à ossature légère en bois a également permis d'accélérer la construction du bâtiment.



MAISON MAZDA SAINT-FÉLICIEN

Photo : Stéphane Groleau

Un autre exemple est d'utiliser des murs préfabriqués à ossature légère en bois avec un plancher ou un toit en panneaux en CLT ou en platelage de bois (figure 46). Les murs à ossature de bois peuvent à la fois servir de murs porteurs et de murs de refend. De plus, ces murs procurent une excellente isolation thermique.



FIGURE 46 • Mur à ossature avec un toit en bois massif

4.6.2. Hybridation bois-acier

Il peut également être avantageux d'utiliser l'acier avec le bois. Un toit ou un plancher, par exemple, peut être supporté par une structure d'acier (figure 47). La résistance structurale élevée de l'acier permet ainsi de réduire la dimension des poutres et des colonnes.



FIGURE 47 • Exemples de structures hybrides

À l'inverse, pour des raisons d'économie, on peut parfois utiliser un pontage d'acier supporté par une structure en bois massif (figure 48). Le pontage d'acier peut également agir comme diaphragme.



FIGURE 48 • Poutre de bois avec pontage d'acier



**PONTAGE MÉTALLIQUE SUR FERMES
ACIER-BOIS**

Photo : Cecobois

5 Systèmes structuraux

Ce chapitre présente un survol des principaux systèmes structuraux utilisés pour la construction en bois massif. Pour chaque système, les principales caractéristiques, les points forts et les points à surveiller y sont présentés.

5.1. Systèmes gravitaires – Platelage et dalles

Les tableaux ci-dessous font un survol des principaux systèmes gravitaires utilisés ainsi que leurs caractéristiques.

Tableau 1 : Platelage et dalles structurales - Plancher				
Composants	Épaisseur (mm)	Portées optimales ¹	Points forts	Points à surveiller
Platelage - Bois d'œuvre	64	1,2 m à 2,5 m	<ul style="list-style-type: none"> - Peu d'équipement nécessaire à l'installation - Produit de base - Idéal pour les petites surfaces 	<ul style="list-style-type: none"> - Lenteur d'installation - Portée multiple seulement si poutres secondaires rapprochées (longueurs des planches limitées) - CP ou OSB requis pour effet diaphragme
	89 ²	2,0 m à 3,5 m		
Platelage - Bois lamellé-collé	54-64	1,5 m à 2,5 m ⁽³⁾	<ul style="list-style-type: none"> - Polyvalence - Utilisation en portée multiple 	<ul style="list-style-type: none"> - Lenteur d'installation - CP ou OSB requis pour effet diaphragme - Produits spécifiques à chaque fournisseur
	80-89	2,0 m à 3,6 m		
	130	3,0 m à 5,2 m		
Dalle - Bois lamellé-cloué (NLT)	64	1,5 m à 3,0 m	<ul style="list-style-type: none"> - Fabrication en usine ou au chantier - Utilisation en portée multiple (selon certains critères) 	<ul style="list-style-type: none"> - Lenteur d'installation si réalisé au chantier - Percements difficiles par la présence des clous - CP ou OSB requis pour effet diaphragme
	89	2,4 m à 3,7 m		
	140	3,0 m à 5,2 m		
Dalle - Bois lamellé-croisé (CLT)	3 plis - 105	2,5 m à 3,0 m	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité d'installation - Grandes portées - Utilisation en portée multiple - Épaisseur totale des planchers (système poteaux-dalles) - Conception bi-directionnelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût / disponibilité - Installation à la grue uniquement - Ajout de 2 plis si résistance au feu requise
	5 plis - 175	5,0 m à 6,0 m		
	7 plis - 245	6,0 m à 7,5 m		

Note 1 : Ces portées sont approximatives et peuvent varier selon les applications (charges, portée simple ou continue, vibration, degré de résistance au feu, etc). La limite supérieure de la fourchette ne correspond pas à la valeur maximale de la portée.

Note 2 : Seulement disponible en Sapin de Douglas.

Note 3 : Épaisseur sans résistance au feu obligatoirement.

Tableau 2 : Systèmes structuraux - Plancher			
Composants	Portées optimales ¹	Points forts	Points à surveiller
Poteaux et poutres dans 1 direction 	5,0 m < A < 9,0 m B : selon le platelage ou la dalle	<ul style="list-style-type: none"> - Design épuré - Simplicité d'installation - Faible épaisseur du système - Passage simplifié de la mécanique dans une direction 	<ul style="list-style-type: none"> - Trame rectangulaire dictée par le type de platelage/dalle - Intégration de la MEP dans l'axe perpendiculaire aux poutres
Poteaux et poutres dans 2 directions 	5,0 m < A < 9,0 m 5,0 m < B < 9,0 m C : selon le revêtement	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité de la trame - Optimisation des sollicitations des poutres primaires en connectant les poutres secondaires directement aux colonnes 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre plus important de pièces à installer - Épaisseur totale du système - Tassement différentiel plus important si 2 axes perpendiculaires superposées - Intégration de la MEP dans les deux axes

Note 1 : Ces portées sont approximatives et peuvent varier selon les applications (charges, portée simple ou continue, vibration, degré de résistance au feu, etc). La limite supérieure de la fourchette ne correspond pas à la valeur maximale de la portée.

Tableau 3 : Platelage et dalle structurale - Toit

Composants	Épaisseur (mm)	Portées optimales ¹	Points forts	Points à surveiller
CP ou OSB	28	0,8 à 1,2 m	- Rapidité - Effet diaphragme	- Solution valable seulement si DRF 45 minutes maximum CNB (3.1.4.6) - Disponibilité
Platelage - Bois d'œuvre	38	1,0 m à 2,0 m	- Peu d'équipement nécessaire à l'installation - Idéal pour petites surfaces - Produit de base	- Lenteur d'installation - Portée multiple seulement si poutres secondaires rapprochées (longueurs des planches limitées) - CP ou OSB requis pour effet diaphragme
	64	2,0 m à 3,0 m		
	89 ²	2,6 m à 4,5 m		
Platelage - Bois lamellé-collé	38-44	1,2 m à 2,2 m	- Polyvalence - Utilisation en portée multiple	- Lenteur d'installation - CP ou OSB requis pour effet diaphragme - Produits spécifiques à chaque fournisseur
	54 - 64	2,0 m à 3,4 m		
	80 - 89	2,6 m à 5,0 m		
	130	4,2 m à 7,0 m		
Dalle - Bois lamellé-cloué (NLT)	64	1,2 m à 3,0 m	- Fabrication en usine ou au chantier - Utilisation en portée multiple	- Lenteur d'installation si réalisé au chantier - Percements difficiles par la présence des clous - CP ou OSB requis pour effet diaphragme
	89	2,4 m à 3,7 m		
	140	3,0 m à 5,2 m		
Dalle - Bois lamellé-croisé (CLT)	3 plis - 105	4,0 m à 5,5 m	- Rapidité d'installation - Grandes portées - Utilisation en portée multiple - Conception bi-directionnelle	- Coût / disponibilité - Installation à la grue uniquement - Limitations avec des éléments à courbure prononcée
	5 plis - 175	6,0 m à 8,5 m		
	7 plis - 245	8,0 m à 11,0 m		

Note 1 : Ces portées sont approximatives et peuvent varier selon les applications (charges, portée simple ou continue, vibration, degré de résistance au feu, etc). La limite supérieure de la fourchette ne correspond pas à la valeur maximale de la portée.

Note 2 : Seulement disponible en Sapin de Douglas.

Tableau 4 : Systèmes structuraux et trames - Toit

Composants	Portées optimales ¹	Points forts	Points à surveiller
Poteaux et poutres dans 1 direction 	$6\text{ m} < A < 9\text{ m}$ B : selon le platelage ou la dalle	<ul style="list-style-type: none"> - Design épuré - Simplicité d'installation - Faible épaisseur du système - Passage simplifié de la mécanique dans une direction 	<ul style="list-style-type: none"> - Trame rectangulaire dictée par le type de platelage/dalle - Intégration de la MEP dans l'axe perpendiculaire aux poutres
Poteaux et poutres dans 2 directions 	$6\text{ m} < A < 9\text{ m}$ $6\text{ m} < B < 9\text{ m}$ C : selon le platelage ou la dalle	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité de la trame 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre plus important de pièces à installer - Épaisseur totale du système - Intégration MEP dans les deux axes
Poteaux et fermes 	$15\text{ m} < A < 60\text{ m}$ B : selon le platelage ou la dalle	<ul style="list-style-type: none"> - Forme architecturale variée - Très grandes portées - Possibilité d'utilisation en collaboration avec l'acier - Possibilité de préfabrication - Optimisation des matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût - Trame rectangulaire dictée par le type de platelage/dalle - Longueur des éléments à transporter - Stabilité latérale des fermes
Poteaux, fermes et poutres 	$15\text{ m} < A < 60\text{ m}$ $6\text{ m} < B < 9\text{ m}$ C : selon le platelage ou la dalle	<ul style="list-style-type: none"> - Forme architecturale variée - Flexibilité de la trame - Très grandes portées - Possibilité d'utilisation en collaboration avec l'acier - Possibilité de préfabrication - Optimisation des matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût - Nombre plus important de pièces à installer - Trame rectangulaire dictée par le type de platelage/dalle - Longueur des éléments à transporter - Stabilité latérale des fermes
Arches 	$45\text{ m} < A < 90\text{ m}$ B : selon le platelage ou la dalle	<ul style="list-style-type: none"> - Très grandes portées - Efficacité structurale - Forme arrondie adaptée à l'usage - Optimisation du volume de bois dans l'arche 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût - Trame rectangulaire dictée par le type de platelage/dalle - Longueur des éléments à transporter - Limitations avec dalle de CLT (rayon de courbure) - Stabilité latérale des arches - Fondations souvent plus imposantes (poussées latérales)
Arches et poutres 	$45\text{ m} < A < 90\text{ m}$	<ul style="list-style-type: none"> - Très grandes portées - Espacement flexible entre les arches - Efficacité structurale - Forme arrondie adaptée à l'usage - Optimisation du volume de bois dans l'arche 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût - Trame rectangulaire dictée par le type de platelage/dalle - Longueur des éléments à transporter - Limitations avec dalle de CLT (rayon de courbure) - Stabilité latérale des arches - Panneaux à dévers à gérer - Fondations souvent plus imposantes (poussées latérales)

Note 1 : Ces portées sont approximatives et peuvent varier selon les applications (charges, portée simple ou continue, vibration, degré de résistance au feu, etc). La limite supérieure de la fourchette ne correspond pas à la valeur maximale de la portée.

5.2. Systèmes de contreventement

Les tableaux ci-dessous font un survol des principaux systèmes de contreventement utilisés ainsi que leurs caractéristiques.

Tableau 5 : Ossature contreventée			
Composants	Exemple d'assemblage	Points forts	Points à surveiller
Contreventement I/I ou I/I		<ul style="list-style-type: none"> - Sollicitation en traction/compression pure - Convient bien aux baies (presque) carrées 	<ul style="list-style-type: none"> - Flambage souvent critique (assemblage ou élément de bois)
Contreventement concentrique en chevron de bois IV/I ou I/I ou I<I ou I>I		<ul style="list-style-type: none"> - Grande capacité - Rapidité d'installation - Convient bien aux baies rectangulaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Valider la concentricité de l'assemblage
Contreventement en IXI avec tirants en acier		<ul style="list-style-type: none"> - Faible impact visuel - Possibilité d'ajuster la tension à tout moment - Fabrication simple 	<ul style="list-style-type: none"> - Reprise des efforts en traction uniquement - Efforts limités avec matériaux facilement disponible - Post tension minimale à prévoir
Contreventement en IXI en bois			<ul style="list-style-type: none"> - Conception et fabrication très précis - Plus de gestion et de coordination en fabrication au chantier - Nécessite plus d'assemblages pour transmettre et gérer les efforts.
Contreventement à aisselier		<ul style="list-style-type: none"> - Concept architectural et traditionnel - Libère de l'espace dans la baie 	<ul style="list-style-type: none"> - Engendre de la flexion dans les éléments en compression (poutre et colonne) - Reprise limitée d'efforts (connexions) - Faible rigidité

Tableau 6 : Murs de refend		
Composants	Points forts	Points à surveiller
Mur ossature légère bois	<ul style="list-style-type: none"> - Ajustement en place possible - Variété de connecteurs disponible - Économique - Préfabrication 	<ul style="list-style-type: none"> - Sections de murs sans ouvertures - Résistance et rigidité limité (assemblage et fixation, ductilité) - Vérifier limitation du Code pour les issues
Mur en CLT	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité de montage - Préfabrication - Degré de résistance au feu élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - Fixation des panneaux et ancrage - Ouvertures restreintes - Limitations du Code
Mur en béton	<ul style="list-style-type: none"> - Grande rigidité ; réduction du nombre de murs de refend nécessaire - Degré de résistance au feu très élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - Besoin de deux corps de métiers. - Lenteur d'exécution - Tassement différentiel avec le bois

6 Optimisation des structures de bois massif

Tout en considérant les multiples avantages qu'amène l'utilisation du bois massif dans un projet de construction, le coût du projet global demeure généralement un critère décisionnel d'une grande importance. Le développement récent des constructions en bois massif, l'évolution rapide des technologies, le degré d'innovation requis pour chaque nouveau projet ainsi que l'expertise en développement de plusieurs professionnels entraînent une difficulté à estimer avec justesse le coût réel des bâtiments construits en structure de bois massif. Une estimation juste doit inclure d'une part, le coût spécifique de la structure en bois et, d'autre part, ses répercussions sur le coût global du bâtiment. Minimiser la consommation de bois et d'autres matériaux dans un bâtiment permet une réduction du carbone émis à la fabrication. Les bénéfices liés à l'optimisation contribuent à l'amélioration du bilan environnemental du projet de construction.

Les sections 6 et 7 présentent les facteurs influençant l'optimisation des projets de construction en bois massif, sans toutefois limiter la créativité architecturale, ni dicter une unique façon de concevoir. Ces éléments permettront au concepteur de mieux évaluer les répercussions de leurs décisions sur les coûts d'un projet en bois massif. La section 6 présente les facteurs influençant directement l'optimisation de la structure en bois massif, alors que la section 7 aborde les stratégies d'optimisation holistiques du bâtiment en lien avec l'utilisation d'une structure en bois massif.

6.1. Collaboration entre l'équipe de conception et le fabricant

Une bonne communication entre les différents intervenants du projet influence le processus de conception et se reflète généralement sur le coût final.

Dans un projet de construction en bois massif, les rôles respectifs de l'ingénieur concepteur et du service technique du fabricant ne sont pas toujours clairement définis. La délimitation de ces rôles semble varier d'une région à l'autre, affectant parfois l'optimisation de la conception et la fluidité du projet.

La spécification des assemblages est un aspect important de la conception d'une structure en bois massif pour lequel les rôles et responsabilités ne sont pas toujours clairs. Dans plusieurs régions du monde, la spécification des assemblages est effectuée principalement par les ingénieurs en structure et le fournisseur en valide la faisabilité. Au Québec, on demande souvent aux fournisseurs d'inclure la conception et la fourniture des assemblages à leur contrat. Cette pratique donne aux fournisseurs la flexibilité de trouver la meilleure adéquation entre les connecteurs disponibles et leurs standards de fabrication, mais représente une charge supplémentaire pour ces fournisseurs ou les intégrateurs de structure de bois massif. Les intégrateurs de structure sont des entreprises qui ne fabriquent pas spécifiquement de produits. Elles peuvent planifier, coordonner, usiner et livrer des projets de construction utilisant plusieurs fournisseurs de matériaux.

De plus, dans une structure en bois massif, il est difficile de dissocier la conception des assemblages de la conception de la structure elle-même, car le choix et la dimension des assemblages influencent souvent les dimensions des membrures. Ceci est particulièrement vrai en conception parasismique car, contrairement aux structures d'acier, où les membrures sont les éléments dissipatifs d'énergie, ce sont les assemblages qui servent d'éléments dissipatifs d'énergie dans les structures en bois.

Il est donc essentiel que les principes d'assemblage soient définis par l'équipe de conception en tenant compte de différents paramètres tels que les efforts transmis, le positionnement et les dimensions minimales des sections de bois, la faisabilité, la facilité d'exécution et l'esthétisme. Pour faciliter la mise en œuvre et la faisabilité, les principes d'assemblages indiqués sur les plans de structure devraient inclure, au minimum et sans être exhaustif, l'information suivante :

- Principe de connexion et éléments de fixation ;
- L'esthétisme de connexion souhaité (assemblages visibles ou non visibles) ;
- Charges, direction de charge et surrésistances (éléments protégés sismiques) à l'assemblage ;
- Information sur la ductilité souhaitée (pour assemblages dissipateurs d'énergie) ;
- Degré de résistance au feu ;

- Traitements spécifiques des assemblages et de la quincaillerie (peinture, galvanisation, etc.) ;
- Etc.

Une étroite collaboration entre l'ingénieur concepteur et le fabricant favorise généralement la recherche d'une solution structurale optimisée et adaptée au projet qui tienne compte des besoins techniques et des pratiques courantes du fournisseur. Toutefois, la validation finale des assemblages est effectuée par l'équipe de conception. Ainsi, une approche par collaboration permet une polyvalence dans la conception tout en s'assurant de répondre aux besoins du client.

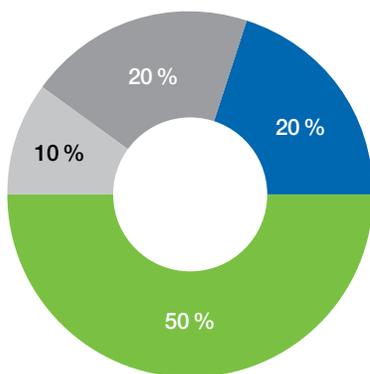
6.2. Facteurs influençant le coût des structures en bois massif

Dès les premières phases de conception, les concepteurs ont un rôle à jouer pour optimiser la structure afin d'en réduire le coût. Celui-ci dépend principalement :

- Du volume de bois consommé dans le projet ;
- Des paramètres liés à l'usinage, aux assemblages, à la finition, à la préfabrication, à la logistique, etc.

Afin de bien comprendre le potentiel d'optimisation des projets de construction en bois massif, l'analyse de la répartition des coûts typiques d'un projet permet d'orienter les efforts et le travail d'optimisation.

Un projet type peut se répartir de la façon suivante :



- Plan, ingénierie, charge de projet, administration
- Fourniture et finition bois
- Fourniture et finition acier
- Installation

FIGURE 49 • Répartition typique du coût d'un projet en bois massif

Ces éléments doivent être équilibrés avec discernement pour que l'optimisation de la structure se répercute effectivement sur une réduction du coût. À titre d'exemple, une réduction excessive du volume de bois peut résulter en une non-uniformisation des sections qui génèrent souvent des frais plus élevés en raison des assemblages et des usinages spécifiques. Généralement, l'optimisation est un bon dosage entre l'uniformisation à l'échelle du projet et l'optimisation de composants unitaires.

6.3. Optimisation du volume de bois

Le volume de bois représente environ 50 % du coût de fourniture d'une charpente en bois massif (figure 49). Dans un objectif de réduction de coût, une stratégie d'optimisation d'une structure peut donc viser à réduire le volume de bois.

Dans un premier temps, il est important de prendre conscience que le volume de bois d'un projet n'est pas équivalent au volume de bois réellement utilisé. La fabrication bois est principalement soustractive. C'est-à-dire que l'on procède à l'utilisation d'un blanc de pièce/panneau où la matière nécessaire pour le profilage, les ouvertures, etc. est enlevée. La fabrication des composants de bois apporte des contraintes et paramètres de base que les concepteurs doivent savoir et comprendre. Ce concept est essentiel pour comprendre l'origine des coûts d'un projet et comment les optimiser. Le rendement matière est défini comme le rapport entre la quantité nette de produits transformés et la quantité initiale de produits bruts consommés. Cette perte de matière doit être additionnée à l'ensemble du projet.

À titre d'exemple, un fournisseur produit un panneau en CLT avec une largeur de 2440 mm. Si la conception demande un panneau de 1500 mm de largeur, la différence de matériel entre les panneaux produits et ceux utilisés devront :

- Être réutilisés ailleurs dans le projet ;
- Être considérés en perte et absorbés sur la totalité du projet.

La représentation ci-bas (figure 50) démontre la perte possible de matériel de panneaux en CLT liée au procédé de fabrication.

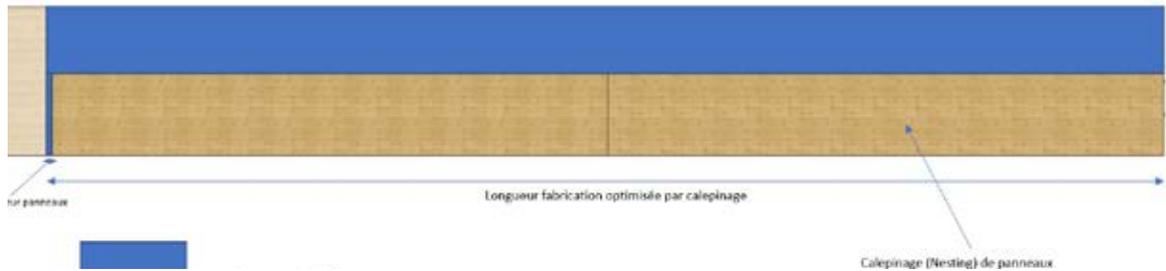


FIGURE 50 • Idéalisation d'un blanc de panneaux montrant les pertes potentielles associées

Les pertes associées au procédé de fabrication correspondent principalement aux :

- Surlongueurs pour la fabrication ;
- Épaisseurs des traits de scie ou outre outil de profilage et remise à la dimension finale des pièces ;
- Matières soustraites pour l'usinage de connexions ;
- Etc.

- Coupes à angles et à onglets nécessaires à l'adaptation à la forme du bâtiment ;
- Profils et formes finales des éléments de bois.

Les figures 51 et 52 présentent deux façons différentes de fabrication de pièces finales de bois lamellé-collé. La première représente un blanc de poutre où le profil final y est découpé. La deuxième représente une fabrication de lamelles en escalier. La longueur des lamelles sera déterminé par le fournisseur en prenant en considération la tolérance et la précision de positionnement pour laisser assez de matière pour le profilage et la découpe finale de la pièce.

Les pertes associées à la conception correspondent principalement aux :

- Dimensions des derniers panneaux installés ;
- Ouvertures à découper dans les composants ;



FIGURE 51 • Idéalisation d'un blanc de panneaux montrant les pertes potentielles associées à la découpe pour l'atteinte de la géométrie finale



FIGURE 52 • Idéalisation d'un blanc de panneaux montrant les pertes potentielles diminuées par la configuration de fabrication

Ces deux méthodes de fabrication ont chacune leurs avantages et inconvénients, principalement, l'un est plus facile de fabrication, mais possède plus de perte. Alors que l'autre est plus complexe de fabrication, mais utilise moins de matière première. Au final ce sera avec la collaboration du fabricant de choisir la méthode qui sera la plus adaptée. Dans tous les cas, les surcoûts liés à la perte matière ou à l'augmentation du temps de fabrication devront être absorbés sur le projet.

Partant de ce concept de rendement matière, il est possible de concevoir en fonction de la réutilisation des pertes ou d'ajuster la conception de façon à maximiser les paramètres d'utilisation au projet et d'autres paramètres permettant d'optimiser le volume de bois lors de la conception. De leur côté, les fabricants optimisent leur procédé de fabrication dans le but de minimiser les pertes liées à la fabrication.

6.3.1. Principaux paramètres influençant le volume de bois d'un projet

Lors de l'optimisation d'un projet en bois massif, certaines étapes clés influencent le volume de bois. La conception d'une trame optimisée et conforme comporte trois étapes, soit l'étude de code incluant la protection incendie, l'usage des espaces et l'optimisation de la sollicitation.

Étude de code et protection incendie

L'étude de code influencera la méthode qui sera utilisée pour la protection au feu de la structure. C'est la classification de l'article 3.2.2 du code^[1], et des articles connexes, qui dicte la possibilité d'utiliser ou non une structure combustible ainsi que le degré de résistance au feu requis. Selon la méthode de protection au feu du bois nécessaire, il est possible que les pièces de bois doivent être surdimensionnées. Certaines classifications nécessitent des dimensions minimales pour atteindre les allègements de l'article 3.1.4.6. du code^[1] concernant la construction en gros bois d'œuvre. Dans d'autres cas, la protection au feu est donnée par une section résiduelle, après carbonisation qui procure l'intégrité structurale de la charpente en situation d'incendie. De plus, certains projets nécessitent aussi la protection au feu des assemblages, ce qui peut également accroître le volume de bois consommé.

Usage des espaces

L'usage des espaces dicte une foule de détails affectant la quantité de bois à utiliser. Les charges à utiliser pour la conception dépendent directement de l'usage du bâtiment. Les charges d'usages sont dictées par le code [1] et, inévitablement, sont des paramètres de conception immodifiables. Cependant, l'usage modifie grandement des détails comme la composition des planchers pour l'insonorisation, le contrôle de la vibration ou des flèches, notamment. Ces compositions peuvent augmenter les charges permanentes et ajouter un volume considérable de bois pour satisfaire les critères de performance du bâtiment. L'utilisation des chapes de béton, qui sont habituellement coulées pour la performance acoustique des planchers, augmente la quantité de bois utilisée pour les planchers puisque les charges apportées par ces dalles doivent être reprises par la structure en dessous.

Optimisation de la sollicitation

L'optimisation de la sollicitation des éléments structuraux permet de rationaliser le volume de bois utilisé. La surcapacité et la réserve de résistance d'une structure sont importantes pour la sécurité des occupants. Les codes et normes de conception incluent déjà différents facteurs de sécurité pour tenir compte de la variabilité des matériaux et de la probabilité de dépassement des charges. En conception, il est intéressant de s'attarder à l'optimisation de la sollicitation des pièces pour se rapprocher des sollicitations maximales permises pour maximiser l'utilisation du bois.

En conclusion, l'optimisation du volume de bois est un principe important pour abaisser le coût d'un projet, mais cette optimisation ne se limite pas à une simple réduction du volume de bois. Elle nécessite un examen holistique de la structure en considérant notamment les opportunités offertes par l'uniformisation des éléments. Si à première vue, l'uniformisation augmente le volume de certaines pièces de bois, elle simplifie parfois la conception et l'exécution des assemblages des poutres sur les colonnes. Sachant que les colonnes ne représentent qu'un faible pourcentage du volume de bois total d'un projet, leur uniformisation peut s'avérer une stratégie pertinente d'un point de vue d'optimisation globale de la structure en plus de réduire le temps de conception et de faciliter la logistique d'usine et de chantier.

6.3.2. Répartition et modulation des volumes de bois

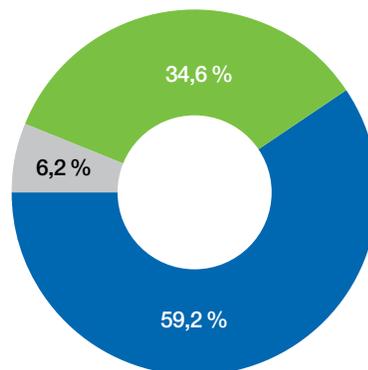
Dans un projet de construction en bois massif, le bois est principalement utilisé dans les dalles, dans les murs et dans l'ossature poutres-colonnes, mais avec des répartitions variables d'un projet à l'autre. Cette répartition permet d'identifier les potentiels d'optimisation les plus pertinents.

Les exemples illustrés aux figures 54 et 57 montrent que les dalles accaparent de 59 à 68 % du volume de bois du bâtiment contre seulement 6 à 11% pour les colonnes. Les dalles présentent donc un meilleur potentiel de réduction du volume total de bois que les colonnes de sorte que l'optimisation du volume de bois devrait donc se concentrer en priorité sur les dalles.

La répartition du volume de bois attribuable à un projet varie largement selon une abondance de facteurs. Cette répartition permet de bien visualiser et d'identifier les sources prioritaires d'optimisation. Ainsi, il est possible de mesurer facilement l'apport plus ou moins important de certains matériaux et prendre des décisions éclairées d'opter pour telle ou telle action d'optimisation. À titre d'exemple, en connaissant et mesurant l'importance de la proportion du volume de bois consommé dans



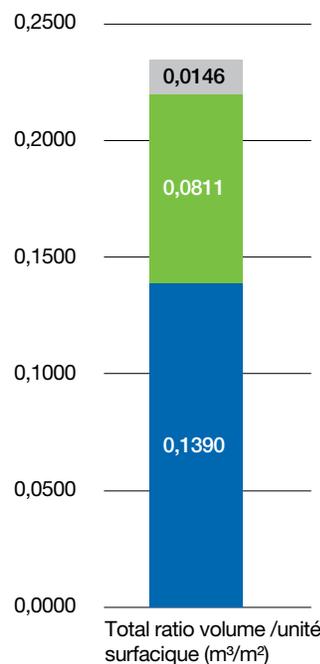
FIGURE 53 • Modélisation d'un système structural pannes-poutres dans deux directions de 9 m x 8 m d'un secteur de salle de classes d'une école pour le calcul de ratio de consommation de bois



■ % Dalle ■ % Poutre ■ % Colonnes

FIGURE 54 • Répartition du volume de bois

les dalles d'un projet de construction de bois massif, la priorisation de l'optimisation se fait naturellement.

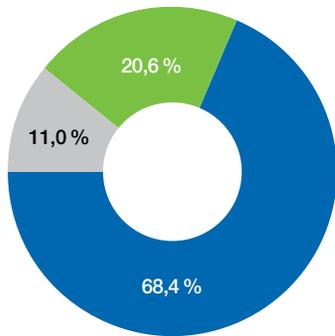


■ Ratio dalle ■ Ratio poutre ■ Ratio colonnes

FIGURE 55 • Étude du volume de bois

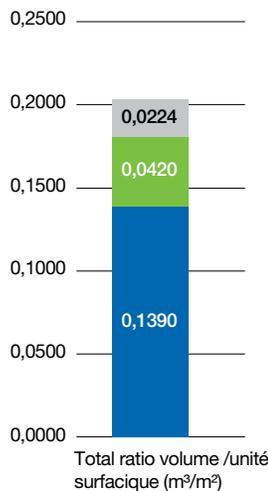


FIGURE 56 • Modélisation d'un système structural poutres dans une direction de 4,5 m x 8 m d'un secteur de salle de classes d'une école pour le calcul de ratio de consommation de bois



■ % Dalle ■ % Poutre ■ % Colonnes

FIGURE 57 • Répartition du volume de bois



■ Ratio dalle ■ Ratio poutre ■ Ratio colonnes

FIGURE 58 • Étude du volume de bois

6.3.3. Indicateur de performance : Ratio consommation matière/ unité de surface

Bien que tout ne soit pas mesurable par indicateurs et qu'un indicateur unique soit impensable, les indicateurs de performance (Key Performance Indicator, KPI) sont utilisés en gestion pour mesurer l'efficacité d'un procédé ou d'un processus. Ces éléments ne doivent pas nécessairement être l'unique point de décision, mais peuvent orienter et alimenter une démarche de progression et d'optimisation.

Comme dans tout processus d'optimisation, il est important de pouvoir en analyser la performance suivant des données quantifiables et mesurables. La conception est un processus itératif analysant les bénéfices et les inconvénients de chacune de ces récurrences. Pour l'optimisation de bâtiments en bois massif, des mesures quantifiables sont intéressantes pour permettre une meilleure analyse des solutions d'optimisation sur une base comparative. Pour ce faire, cette section traitera d'un ratio de consommation matière.

$$\text{Ratio de consommation matière} = \frac{\text{Volume de bois utilisé (m}^3\text{)}}{\text{Surface de bâtiment couverte par le bois utilisé (m}^2\text{)}}$$

Le ratio de consommation matière doit être bien compris et appliqué pour être un indicateur efficace. Il permet de comparer facilement des concepts entre eux pourvu que ceux-ci démontrent des dispositions similaires (usages, localisation, système structural, etc.). Il est intéressant à connaître et à valider pour s'assurer qu'un concept structural de construction de bois massif ne soit pas complètement hors limites et, si c'est le cas, pour identifier les sources de la déviation de ce ratio.

Une fois cet indicateur déterminé, il est possible d'avoir une piste des coûts basée sur les volumes de bois massif consommés. Les figures 55 et 58 montrent respectivement les ratios de consommation matière des exemples des figures 53 et 56. Bien que le coût d'une construction en bois massif dépende fortement du volume de bois utilisé, le ratio de consommation matière n'est pas un indicateur suffisant pour tirer des conclusions sur le coût. D'autres considérations entrent en ligne de compte, comme l'indice de performance au montage de structure qui sera abordé ultérieurement dans ce guide.

Le ratio de consommation matière peut servir à faire une pré-évaluation d'un budget de projet rapidement. Cet indice doit être utilisé avec justesse afin d'être représentatif puisqu'il sert seulement à comparer des projets similaires. Une erreur que commettent parfois les professionnels est de se servir de ces indices pour des projets qui ne sont pas analogues. Pour des projets hybrides acier-bois, par exemple, le ratio de consommation de bois est difficilement équivalent à un projet tout bois, de même que pour des projets ayant des connexions en acier démesurément importantes. Dans ces cas, faire l'évaluation d'un coût de projet basé uniquement sur un volume de bois sera loin de la réalité. Les contributions des différents postes budgétaires (bois, acier, etc.) doivent être similaires pour obtenir une évaluation fiable d'un projet de structure de bois massif.

Tableau 7 : Potentiel d'optimisation du ratio de consommation bois				
	Séparation horizontale (figure 53)	Séparation verticale (figure 56)	Écart	
			(Qte)	(%)
Trame Classe	8 m x 9 m	8 m x 9 m		
Trame Structure	8 m x 9 m	8 m x 4,5 m		
Type Structure Bois	Pannes Poutres (2 directions)	Pannes Poutres (1 direction)		
Indice consommation (m³/m²)	0,235	0,203	0,031	13,4 %

Note : Le tableau ci-dessus démontre le potentiel d'optimisation du ratio consommation de bois suivant deux scénarios. Celui de gauche s'adaptant à une trame optimisée pour un système structural en acier et celui de droite ayant un système structural adapté au bois. Il est possible de valider le potentiel d'optimisation grâce à l'indice de consommation de bois. Chaque baisse de 0,01 m³/m² évitée grâce à une optimisation, à un coût de 2500 \$/m³ (coût fictif), peut représenter une économie de 25 \$/m² sur le projet. Cette simple vérification peut permettre de faire des comparatifs rapides sur les projets.

6.4. Autres paramètres influençant les coûts de la structure

Les frais unitaires touchent la transformation des produits et sont influencés par la complexité du travail à effectuer.

6.4.1. Répétitivité et uniformisation

La conception durant laquelle sont définis les éléments et les membrures du projet est une phase critique. L'optimisation du volume à outrance peut résulter en une multiplication de produits (dimensions de pièces hétéroclites, etc.). Au contraire, regrouper et uniformiser certains éléments comme les membrures, les assemblages, les techniques de fabrication, de logistique ou d'installation, permet l'optimisation efficace d'une structure en bois massif.

Uniformiser des pièces de charpente et des détails d'assemblages permet déjà de simplifier le processus, de la conception à l'exécution. Dans les étapes subséquentes, l'uniformisation permet ensuite l'utilisation de gabarits de fabrication ou d'installation pour faciliter la fabrication, l'usinage et le montage. Cependant, dans le

cas des pièces non uniformisées, une progression des technologies numériques dans la gestion de projet et la fabrication permet, avec très peu de temps de mise en route, d'ajuster les équipements de fabrication.

Contrairement au marché européen, dans l'industrie nord-américaine du bois lamellé-collé, il n'existe pas d'uniformité de dimensions et de classes de résistances communes à tous les fournisseurs. Chacun utilise ses propres dimensions selon la matière qui lui est disponible et même la norme CSA 0122 permet cette différence de dimension. Les produits certifiés par le CCMC sont aussi différents en termes de dimension et de résistances. Cette disparité crée un défi pour les concepteurs quand vient le temps de spécifier les matériaux sur leurs plans et devis. L'ouverture du marché et une saine concurrence entre les fournisseurs sont bonnes pour un marché en santé. Les fournisseurs sont habitués et habiles à changer rapidement des sections équivalentes et à les présenter aux professionnels concepteurs. Dans un contexte de projet conventionnel (conception-soumission-construction), la coordination en conception arrive souvent bien avant les contrats avec les fournisseurs.

Les concepteurs devraient se coordonner en amont, tout en laissant une marge de modification pour s'adapter aux différents fournisseurs. Cette marge de manœuvre a le potentiel d'éviter certains conflits pendant un processus de projet. Un exemple serait de laisser certains axes de références fixes tout en permettant une légère modification des dimensions des poutres et colonnes, ce qui est facile à coordonner par l'équipe de professionnels.

6.4.2. Usinage

La complexité des pièces a un effet sur le coût d'usinage. En général, le temps d'usinage, et donc le coût, augmente avec la complexité de la pièce. L'arrivée des machines à commandes numériques (CNC) dans la fabrication des pièces en bois massif a de beaucoup facilité les usinages complexes, tout en conservant une précision de fabrication. Ces machines éliminent le temps nécessaire au traçage et au mesurage des éléments à usiner et sont habituellement équipées d'outils de plus grandes dimensions que les outils manuels utilisés par les charpentiers. Aussi, le principal gain à l'utilisation de machines CNC pour la découpe est la précision et la constance de la qualité d'usinage. La facturation des machines à commandes numériques comprises dans les coûts de production des fournisseurs dépend notamment du coût d'usinage multiplié par le nombre d'heures de fabrication.

La découpe d'une poutre ou d'un panneau est une succession d'usinages (macro d'usinages) plus ou moins complexes. Les macros d'usinages sont les stratégies utilisées par les machines CNC. Généralement, les usinages transversaux tels que les coupes de bout (droite ou à onglet) et les entailles sont moins longs à exécuter que les usinages longitudinaux comme les resurfaçages et le profilage CNC.

Le Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) permet une adaptation de la conception en fonction des standards de l'industrie et des procédés de fabrication des fournisseurs. Cette méthode de conception est plus facile à réaliser dans un contexte de projet intégrant un fournisseur en amont dans le processus de conception.

6.4.3. Assemblages de structure

Les assemblages permettent de relier des éléments de structure pour former un ensemble stable et résistant. De nombreuses optimisations sont possibles selon le choix d'assemblage. Tel que vu précédemment, les assemblages des structures de bois massif sont dimensionnés en fonction des sollicitations demandées et non en fonction des capacités des éléments, comme c'est le cas pour les structures d'acier. Cela est dû au procédé de fabrication des éléments de bois qui enlève de la matière (fabrication soustractive) alors qu'en acier, il est possible d'ajouter de la matière (fabrication additive) par soudage, par exemple. La matière enlevée par la fabrication diminue la résistance d'une pièce de section pleine. Les normes et les équations de calcul prennent habituellement compte de cette matière soustraite aux éléments.

Les points suivants présentent la performance et l'optimisation des assemblages :

- Le coût unitaire des assemblages est à considérer et doit être analysé dans sa globalité en incluant le coût d'installation. Un indicateur de \$/kN supporté peut être intéressant pour analyser et comparer différentes solutions d'assemblages ;
- La facilité d'usinage : la fabrication des pièces nécessite différents types d'usinages pour s'adapter aux connexions entre éléments (réservations, poches, rainures, etc.). Les différentes solutions d'assemblages influencent le temps d'usinage. Certains types d'usinages sont difficiles à réaliser, voire même impossibles. Puisque les coûts d'usinage sont directement dépendants du temps requis à la fabrication, il est important de privilégier des solutions d'assemblages qui permettent des stratégies d'usinages faciles, rapides et coûteuses ;
- La facilité d'assemblage : les assemblages bien conçus peuvent contribuer à faciliter le montage en permettant une mise en place rapide et précise ;

- La précision : un assemblage bien conçu permet de s'adapter aux réalités et aux tolérances de chantier. L'un des points à considérer est l'accumulation de tolérances d'installation qui s'additionnent et peuvent causer des manquements à la verticalité des colonnes. Les zones de transition entre les matériaux sont aussi à prendre en considération. Les détails d'assemblages doivent s'ajuster aux tolérances qui peuvent varier selon les matériaux ;
- L'uniformisation : celle-ci peut sembler contraire à l'optimisation, mais dans un contexte d'optimisation globale de projet, cette uniformisation simplifie la conception, l'usinage, l'installation, etc.

Les assemblages de la structure contribuent grandement à faciliter le montage et donc à réduire les coûts. Il est important de choisir les types d'assemblages adéquats et bien adaptés à la structure que l'on souhaite construire.

Le choix du traitement des assemblages doit être considéré en conception puisqu'il peut influencer la qualité du projet par le nombre de défaillances à réparer ou à corriger. De plus, les interventions de retouches peuvent représenter des coûts supplémentaires, mais sont facilement évitables par de bons choix de conception. Principalement, les éléments d'acier noir ne devraient jamais être utilisés pour les parties de structure qui resteront apparentes. Avec l'exposition aux intempéries durant le chantier, l'huile de protection présente sur l'acier noir combinée à une oxydation de surface peut produire des taches et altérer la finition des pièces de bois. L'acier utilisé dans les assemblages et la quincaillerie devraient donc minimalement avoir un traitement qui les protégera durant le chantier, même si les conditions d'utilisation ne nécessitent pas un tel traitement.

6.4.4. Finition des pièces

La finition du bois ajoute un coût à la structure et toutes les pièces de bois ne nécessitent pas le même niveau de finition. Il est souvent bénéfique pour les coûts d'un projet de partitionner le niveau de finition notamment en fonction de l'exposition visuelle des pièces. Il est donc intéressant de bien identifier les endroits en fonction de

leur rôle esthétique pour que les fournisseurs ajustent le niveau de finition approprié à chaque pièce. Le niveau de finition va influencer :

- La réparation des défauts ;
- La finition de surface : sablage, resciée, non fini, etc. ;
- Le produit de finition ou de protection appliqué : teinture, huile, etc.

Les caractéristiques esthétiques du bois massif peuvent être améliorées par l'utilisation de teinture et d'huile de finition. Les changements hygrométriques peuvent apporter d'importantes modifications de dimensions. Il est primordial de bien choisir les produits de finition adaptés au bois massif. Un produit mal adapté aux changements dimensionnels du bois pourra s'abîmer esthétiquement en créant des microfissures sur le revêtement de surface, détériorant la qualité esthétique du projet. Dans un premier temps, il est important d'utiliser des produits pouvant s'ajuster au retrait ou au gonflement du bois. Les produits filmogènes, comme certains vernis et peintures, qui créent un film de surface sur le bois et ayant peu ou pas d'élasticité sont à proscrire.

Des produits tels que les teintures et les huiles de finition créent une barrière qui ralentit les transferts d'humidité pour atteindre l'équilibre hygroscopique entre le bois et l'air ambiant, ce qui limite la possible création de gerces de séchage et permet de conserver une belle qualité de surface dans le temps.

La technique d'application du produit de finition est autant importante que la qualité du produit lui-même. Une bonne préparation de surface permettra d'éliminer des contaminants qui altéreraient la qualité esthétique. Il faut noter toutefois que le bois possède une variation naturelle. L'utilisation de produits de finition comme une teinture ou une huile sur une surface de bois créera toujours certaines inégalités de teinte.

6.4.5. Logistique d'usine

La logistique d'usine est habituellement gérée par le fabricant lui-même et correspond principalement à la manutention des matériaux à l'intérieur de l'usine. Normalement, cette logistique reste interne à l'usine, mais certaines conceptions peuvent exiger des manutentions plus complexes influençant les coûts et les délais de production. C'est le cas de certaines formes de structure de bâtiment composées d'éléments courbes. Ces éléments sont beaucoup plus complexes à gérer à l'intérieur de l'usine de fabrication, puisqu'ils sont plus difficilement manipulables et occupent une surface de plancher plus importante.

Le degré de finition demandée peut également influencer la logistique d'usine. À titre d'exemple, si de gros panneaux en CLT ont besoin d'une finition, cela peut nécessiter des retournements de panneaux ce qui complique la logistique d'usine.

Les fournisseurs de structure de bois massif livrent habituellement les projets en « juste à temps ». En d'autres mots, ils ordonnent la production afin de minimiser le stockage à l'usine et pour alimenter les chantiers sans interruption. Si pour une quelconque raison l'ordonnement initial est compromis, il peut en résulter de stocker temporairement entièrement ou en partie le projet. Cette situation crée des besoins de protection temporaire, peut affecter la qualité et augmenter les coûts. Une bonne coordination entre les intervenants du projet et principalement une communication transparente entre l'entrepreneur général et le fournisseur sont les clés d'une réalisation de projet bien optimisée.

6.4.6. Logistique de transport

Il existe plusieurs modes de transport pour livrer les éléments de structure au chantier : camion, train, bateau conteneurs ou hors conteneurs, etc. Chaque mode de transport comporte ses contraintes et pour un même mode de transport, certaines juridictions et (ou) états sont plus contraignants que d'autres. Pour les projets au Québec, le mode de transport habituellement préconisé est le transport routier pour sa polyvalence et son efficacité.

Chaque mode de transport a des contraintes en ce qui concerne le poids, la dimension du chargement (largeur, hauteur, longueur), la continuité des pièces constituant le chargement, la longueur excédentaire arrière, etc.

Se référer au site du Ministère des transports du Québec (MTQ) pour de l'information concernant le cadre réglementaire pour le transport routier.

Il est toujours important de concevoir en fonction des limitations liées au mode de transport et d'évaluer les options possibles pour les dépasser en fonction des paramètres du projet. Certains facteurs tels que la distance entre le fournisseur et le chantier, ou encore l'atteinte d'un niveau de préfabrication en usine intéressant, peuvent influencer le choix de dépasser la réglementation standard de transport afin de faciliter des étapes ultérieures en chantier. Quand les portées des éléments de bois massif font entre 18 et 22 m, des joints de transport sont souvent nécessaires pour conjuguer le transport, la fabrication et le montage au chantier. La position de ces joints de transport doit être étroitement étudiée pour privilégier les zones de moindres sollicitations.

6.4.7. Logistique de chantier

Plusieurs paramètres et contraintes peuvent favoriser la logistique de chantier :

- L'espace disponible pour le stockage des matériaux est un enjeu important et devra être considéré dès la conception. Un faible espace de stockage en chantier pourrait justifier un niveau de préfabrication plus élevé de façon à minimiser les besoins de stockage en chantier ;
- Dans le cas d'espace de stockage restreint, la livraison devrait être coordonnée en « juste à temps » suivant les besoins de la séquence de montage. Pour une livraison par camion, le chargement devrait être réalisé selon une logistique inverse de montage ;
- L'emballage des pièces et des panneaux doit aussi être optimisé par le fabricant pour préparer des paquets de formes régulières et uniformes pouvant s'empiler facilement et former des paquets regroupant des pièces suivant la séquence de chantier.

Les coûts et les frais de montage sont principalement liés aux facteurs suivants :

- L'accessibilité (proximité de l'implantation de la grue au chantier qui influence la flèche de grue) ;
- La dimension et le poids des pièces, l'adaptation aux capacités des grues et appareils de levage ;
- L'utilisation d'équipement de levage spécialisé (palonnier, étaie, etc.) ;
- Le nombre de pièces ;
- La mobilisation et la démobilitation de chantier (séquence des travaux, influence de la conception sur la séquence) ;
- La complexité du travail à effectuer ;
- Du travail en hauteur.

Le nombre de pièces à installer influence directement le temps de montage. Le nombre de levées de grue peut donner un bon aperçu du temps de chantier nécessaire et du coût de chantier. Pour des levages conventionnels de pièces, le nombre de levées à l'heure varie normalement d'environ trois à six. L'indicateur du nombre de levées à l'heure n'est pas le seul critère qui permet de déterminer et d'identifier un coût de montage, mais dans un contexte standard, il est un bon indice. De plus, cet indicateur peut permettre d'améliorer le montage en amont en optimisant la conception des structures. À titre d'exemple, il est parfois possible de prévoir des portées multiples des poutres ou des dalles afin de limiter le nombre de levées de grue et d'optimiser le temps montage.

Les équipes de montages des entrepreneurs spécialisés pour les constructions de bois massif sont normalement constituées de peu de travailleurs. Souvent, ces équipes sont composées de quatre à six charpentiers pour une grue. Pour certains chantiers de plus grande envergure, l'ajout d'une deuxième équipe de travailleurs est possible.

6.4.8. Possibilité de prémontage des structures

Normalement, les fournisseurs livrent au chantier des pièces usinées. Toutefois, un niveau plus élevé de préfabrication en usine peut accélérer les travaux en chantier. La préfabrication peut aller de la préinstallation de ferrures jusqu'au prémontage de composants.

Avec les aléas de chantier, le travail effectué peut facilement devenir fastidieux et altérer la qualité d'exécution. La préfabrication ou la préinstallation ont l'avantage d'être réalisées dans des conditions d'usine mieux contrôlées qu'en chantier. Elle permet principalement d'augmenter la qualité du produit livré et également de réduire les coûts de chantier lorsque ces étapes sont réalisées au sol dans un environnement contrôlé, avec un outillage et les engins de levage adaptés et à la portée des travailleurs. Pour que cette étape soit bénéfique au projet, il faut qu'elle puisse permettre :

- Le travail à l'abri des intempéries ;
- Une diminution du travail en hauteur ;
- L'utilisation d'outils spécialisés facilement accessibles ;
- Etc.



PRÉFABRICATION PAR USINAGE DE COMPOSANTS

Photo : Cecobois



PRÉINSTALLATION D'ASSEMBLAGES ET DE FERRURES EN USINE

Photo : Cecobois



ASSEMBLAGES 2D DE COMPOSANTS AU SOL EN USINE OU AU CHANTIER

Photo : Cecobois



PRÉMONTAGE TRIDIMENSIONNEL EN USINE OU AU SOL

Photo : Cecobois

Indice de performance au montage de structure

L'indicateur du nombre de levées de grue / unité de surface peut servir à optimiser le temps de chantier des bâtiments de bois massif en jouant sur le type de trame et d'utilisation du bois. Dans le tableau ci-dessous, l'exemple démontre la modification d'un système structural de même disposition, celui de gauche avec poutres/pannes dans deux directions et celui de droite avec poutres dans une direction et dalle dans l'autre direction. On peut voir que le système de droite devrait présenter une réduction du temps de montage d'environ 1/3 par rapport au système avec poutres/pannes dans deux directions.

Tableau 8 : Comparaison des indices de montage				
	Séparation horizontale	Séparation verticale	Écart	
			(Qte)	(%)
Indice Montage (levées/100 m ²)	15,3	9,7	5,56	36,4 %

Note : Le tableau ci-dessus démontre le potentiel d'optimisation selon l'indice de montage suivant deux scénarios. Celui de gauche s'adaptant à une trame optimisée pour un système structural en acier et celui de droite ayant un système structural adapté au bois.

Synthèse du chapitre 6

- Collaborer avec le fournisseur dès le début si possible :
 - Définir les rôles, qui prend la responsabilité des assemblages sismiques ?
- Connaître les types de pertes associés à la fabrication et à la conception du bois massif, tel que :
 - Les surlongueurs pour la fabrication ;
 - Les matières soustraites pour l'usinage des connexions ;
 - Les dimensions des derniers panneaux installés ;
 - Les ouvertures à découper dans les composants.
- Uniformiser les profilés dans une certaine mesure permet, entre autres :
 - Une répétition des éléments à fabriquer, autant pour les profilés que pour les assemblages ;
 - De faciliter la logistique d'usine et de chantier.
- Optimiser la sollicitation des profilés.
- Les dalles en bois consomment une grande partie du bois du bâtiment. Il faut chercher à optimiser les dalles pour réduire la quantité de bois utilisé.
- Utiliser des indicateurs de performance, comme :
 - Le ratio consommation matière/unité de surface (m³/m²) ;
 - Le nombre de levées de grue à l'heure ou par unité de surface.
- Être conscient des logistiques d'usinages, de transport et de chantier telles que :
 - Les éléments de forme complexe sont difficiles à gérer ;
 - Des assemblages supplémentaires sont à prévoir pour les pièces dont la longueur dépasse les limites normales du type de transport utilisé ;
 - L'espace disponible pour l'entreposage des matériaux peut être limité au chantier et à l'usine ;
 - Le nombre de pièces à installer influence directement le temps de montage, un niveau de préfabrication plus élevé peut l'accélérer.

7 Stratégies d'optimisation holistique de projets ayant de fortes influences sur les coûts

Ce chapitre donne des pistes d'optimisation de projets dans leur globalité grâce à des technologies qui permettent de réduire les coûts, d'accélérer les délais de constructions et d'améliorer la qualité des produits. Tous les aspects liés à la construction d'un projet doivent être mis en commun pour maximiser l'optimisation sur la globalité d'un bâtiment de construction de bois massif.

L'approche initiale de conception est un élément important qui influencera le déroulement du projet dans les phases subséquentes. Les approches conventionnelles conception-soumission-construction « Design-bid-build » ont souvent tendance à favoriser le travail en silo où l'échange d'information est moins favorisé (figure 59). On voit alors une équipe de projet sur la défensive et un projet s'étirant dans le temps par la transition entre la phase conception et la phase construction.

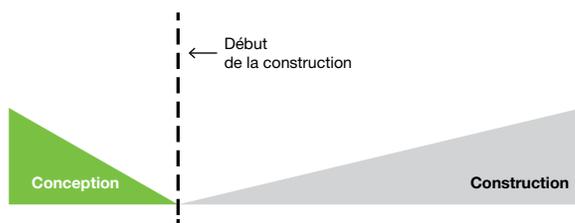


FIGURE 59 • Processus traditionnel de déroulement de projet (conception-soumission-construction)

Des approches de gestion de projets novatrices ont récemment été adoptées et s'appliquent très bien aux projets de structure de bois massif. Les projets de conception intégrée favorisent les échanges et la coordination entre les disciplines, comme illustré à la figure 60. Les modes d'attribution de contrat de type conception construction permettent d'intégrer tous les professionnels et, parfois, les fournisseurs avant le début des travaux de construction. Cette méthode d'attribution ne s'applique pas à tous les projets, notamment dans les projets publics. Cependant, cette façon de faire est plus naturelle dans les projets privés et totalement adaptée aux projets de constructions de bois massif.

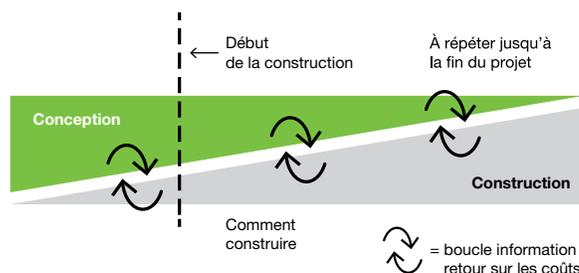


FIGURE 60 • Processus d'échange dans un déroulement de projet conception-construction

7.1. L'approche holistique

Pour avoir une représentation honnête d'un coût de projet de construction en bois massif représentatif de la réalité, il est important d'avoir une approche holistique. L'erreur la plus fréquemment commise est de se limiter à un comparatif du coût des matériaux de structure. Dans les projets de construction, on constate régulièrement un comparatif par un coût surfacique de bâtiment. Cet indicateur est important, mais s'il ne prend pas en compte la vision globale d'un projet, il pourrait compromettre la décision d'utiliser ou non une structure en bois massif en se limitant à un seul critère de sélection.

L'optimisation d'un projet de construction en bois massif passe par d'habiles décisions d'intégration, de logistique et de coordination du projet. Les solutions holistiques doivent donc être considérées dès le début du projet, car elles agissent sur l'entièreté de ce dernier.

La biophilie et l'esthétique sont des propriétés intrinsèques du matériau bois auxquelles il est difficile d'attribuer une valeur monétaire, d'autant plus que leur perception varie en fonction des personnes. C'est pourquoi certaines décisions d'utilisation du bois massif à des fins esthétiques ou biophiliques sont difficiles à chiffrer. La biophilie et l'esthétique apportent cependant une plus-value au projet et sont des critères d'optimisation à considérer.

L'emploi du bois massif comme structure principale pour la construction d'un bâtiment peut influencer le choix des matériaux de finition, d'enveloppe ou les systèmes mécaniques, par exemple. Ces matériaux ne sont généralement pas comptabilisés dans les postes budgétaires attribués à la structure du bâtiment, mais peuvent se répercuter positivement ou négativement sur le coût global du projet. C'est pourquoi la vision holistique peut motiver et prouver que l'utilisation d'une structure de bois est économiquement profitable pour le projet.

Finalement, cette approche nécessite une collaboration étroite entre les différents acteurs du projet afin de s'assurer que les besoins, les répercussions et les caractéristiques soient pris en compte et analysés de façon à pouvoir prendre la meilleure décision possible pour le projet.

7.2. Utilisation des outils numériques et de conception paramétrique

La conception de bâtiment dans son ensemble est un processus itératif qui est rarement exact d'un premier jet. La quantité innombrable d'inconnus en début de conception tant sur le plan architectural, structural ou technique, apporte inévitablement des modifications en cours de projet. De ce fait, le processus de conception doit s'adapter à ces modifications si petites soient-elles.

Les modifications peuvent être de toutes sortes, qu'elles concernent les matériaux disponibles, la géométrie ou les charges. Dans un processus normal, plus les changements arrivent tardivement, plus leurs coûts s'accroissent et moins il reste de marge pour modifier un projet, comme illustré à la figure 61.

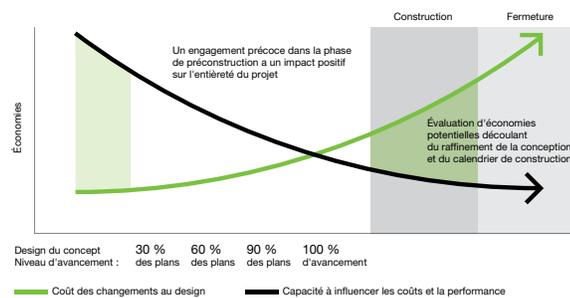
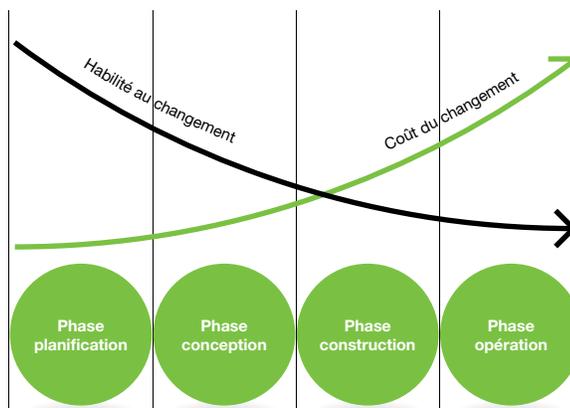


FIGURE 61 • Temps par rapport à la valeur de l'implication du gestionnaire de construction/entrepreneur général

Source : newsroom.kiewit.com/kieways/cmgc-what-you-need-to-know/

L'apport grandissant du numérique dans la construction a permis de faire des avancées considérables. La paramétrisation de la conception permet d'automatiser une partie du travail. À titre d'exemple, pour une poutre simple, il est facile pour l'ingénieur de faire le calcul de tête ou avec une calculatrice. Pour une dizaine de poutres, la création d'un chiffrier ou d'une table de calcul est de mise. En revanche, pour le calcul de plusieurs centaines de poutres ayant toutes des portées, des cas de chargements ou des formes structurales différentes, des outils plus poussés sont essentiels. La technologie actuelle par la paramétrisation permet de simplifier cette étape en débutant par la détermination des paramètres influençant la conception, ensuite en formulant la conception graphique ou numérique ou un mélange des deux. En rétroaction, il est possible de réajuster très facilement certains paramètres pour raffiner et adapter la conception.

Un bénéfice important de la paramétrisation est de créer un pont vers l'étape de fabrication des pièces de bois, en transmettant par exemple, le flux de données vers les machines d'usinage. Après les étapes de conception, la phase de construction permet aussi d'intégrer le paramétrique et principalement de faciliter la gestion de chantier dont l'ordonnancement des travaux.

La conception et la fabrication numérique permettent une meilleure optimisation du processus de réalisation d'un projet. L'apport du Building Information Management (BIM) est un atout considérable au projet pour optimiser la communication et la coordination entre les différents intervenants d'un projet, autant à la conception, à la construction qu'à l'exploitation d'un projet. Le principal défi à l'introduction des technologies numériques concerne la grande quantité d'informations générées.

La paramétrisation dans le processus de conception d'un bâtiment en bois massif peut se faire à différents niveaux. De façon non exhaustive, voici des exemples où l'utilisation des technologies numériques de conception paramétrique peut influencer positivement des projets de bois massif :

- Obtenir une disposition (trame) et une position (implantation) optimales de colonnes ;

- Automatiser et optimiser des assemblages adaptés au bois massif alliant calcul, géométrie, fabrication et exécution ;
- Optimiser les coûts par des solutions itératives multicritères (conception générative) ;
- Analyser et optimiser les matériaux ;
- Etc.

L'interopérabilité est la capacité de deux ou plusieurs outils numériques de pouvoir communiquer et transférer de l'information entre eux. De plus en plus de ponts et liens entre logiciels se développent et permettent de tirer le maximum de potentiel des outils. Ces instruments se développent présentement à très grande vitesse et touchent tous les aspects d'un projet de construction.

L'industrie de la construction est en déficit sur le plan technologique par rapport aux autres secteurs de l'économie. Par contre, le secteur de la construction qui traite les projets de construction en bois massif est en avance sur l'intégration des technologies numériques comparativement aux autres disciplines touchant à la construction. En effet, l'utilisation des technologies numériques telles que des machines à commande numériques (CNC), l'utilisation de logiciels intégrant des paramètres pour la conception (conception assistée par ordinateur, CAO), la gestion de la fabrication (fabrication assistée par ordinateur, FAO) et la géométrie 3D (dessin assisté par ordinateur, DAO) font partie de l'industrie de la construction de bois massif depuis plusieurs années.

7.3. Hybridation et coordination entre matériaux

L'hybridation consiste à combiner deux matériaux ou plus afin d'apporter des solutions structurales plus optimales. Pour ce faire, il est important de bien connaître les particularités des différents matériaux et de leur mise en œuvre afin de s'assurer d'une implantation sans difficulté pendant la phase d'exécution et d'exploitation du bâtiment. Une bonne planification est également nécessaire dès la phase de conception en limitant les mobilisations en chantier des différents fournisseurs de produits et en contrôlant les zones transitaires.

L'industrie de la construction est un amalgame complexe de micro-industries s'unissant pour livrer un projet. La plus grande contrainte à sa bonne réalisation réside souvent dans la communication entre ces secteurs. D'un côté, il y a les fournisseurs de produits, de l'autre les entrepreneurs. Entre les deux, les architectes et les ingénieurs intègrent et coordonnent le tout. La communication entre les intervenants est la clé du succès d'une combinaison optimale et efficiente de plusieurs matériaux pour réussir ainsi pleinement l'hybridation d'un projet.

Utiliser le bon matériau au bon endroit

L'utilisation raisonnée des matériaux fait partie intégrante de l'optimisation d'un projet. Il existe plusieurs formes d'hybridation de projets en bois. À titre d'exemple, il est possible d'effectuer une combinaison de structures en bois massif, en ossature légère en bois, en acier ou en béton. Afin de bien réussir un projet d'hybridation, il est important de bien connaître les particularités des différents matériaux et de leur mise en œuvre. La bonne performance d'un produit ne veut pas dire qu'il est compatible avec tous les matériaux et dans toutes les configurations. Il est donc indispensable de prévoir et de bien analyser le potentiel de mixité des matériaux avant leur intégration. Le potentiel de préfabrication, de même que le degré de précision (tolérances) dans la mise en œuvre des différents matériaux doivent aussi être pris en compte.

Chaque matériau possède des caractéristiques intrinsèques qui le rendent plus optimal qu'un autre selon certains critères. Il est aussi bon à noter que la somme des optimums spécifique à chaque matériau ne génère pas nécessairement un optimal global. La vision holistique telle que présentée à la section 7.1 est toujours de mise.

Communication et planification : la clé pour réussir un projet hybride

Pour bien réussir un projet hybride, il faut, dans un premier temps, être conscient de la chaîne d'approvisionnement de projet et comprendre la dynamique des intervenants. Il est primordial de privilégier la communication et la collaboration des différents acteurs, et ce, dès la phase de conception. L'hybridation des matériaux amènent un chevauchement des corps de métier sur le chantier qui dépendent l'un de l'autre dans l'exécution des travaux. Un chevauchement trop important

de différents corps de métier sur un chantier crée des dépendances dans l'exécution de travaux. Ces dépendances entre les corps de métiers rend le chantier non optimal et, par effets collatéraux, génère un allongement des calendriers d'exécution et une augmentation des coûts.

Dès la phase conception, il faut bien délimiter les phases des différents intervenants et limiter les tâches ayant des interdépendances qui nécessitent des mobilisations et des démobilisations de chantier. L'entrepreneur général sur le projet doit aussi s'assurer de coordonner les différents intervenants suivant la séquence d'exécution en chantier.

Les zones de transition et d'interactions entre les différents fournisseurs de matériaux sont souvent les points critiques d'une réalisation de projet. La séparation et la délimitation par phases en conception permettent de simplifier le niveau de coordination entre les intervenants. Pour tous les projets de construction, la communication pendant la phase de conception permettra une meilleure coordination entre les intervenants du projet.

Les zones de transition de matériaux demandent des efforts accrus de coordination. De ce fait, les plans et devis doivent présenter minimalement les informations de transition comme des détails de principes et des notes de coordination pour officialiser la collaboration entre les différents intervenants. Certaines notes aux plans permettront d'officialiser le « qui fournit quoi », ainsi que de débiter la coordination entre les différents corps de métier.

Certains entrepreneurs spécialisés sont capables de fournir et de combiner adéquatement plusieurs matériaux. Cette dynamique de projet permet de diminuer le nombre d'intervenants (sous-traitants) nécessaires à sa réalisation. La coordination entre les différents matériaux est aussi facilitée puisqu'elle est gérée par le même intervenant. Certains projets publics peuvent rendre difficile l'incorporation d'intégrateurs de structure pour la fourniture de matériaux multiples. Le processus d'appel d'offres comme celui du Bureau des soumissions déposées au Québec (BSDQ), par exemple, sépare les différents matériaux qui doivent être gérés dans des lots d'attributions distincts. Il est donc préférable à voir au cas par cas selon le processus de projet.

Les outils et les plateformes de collaboration sont des méthodes intéressantes pour favoriser les échanges, les interactions et l'accès aux données, maquettes et autres informations servant comme base de communication. Ce sont les bases du Building Information Modeling ou Management (BIM). Ces outils numériques seront très certainement de plus en plus utilisés et faciliteront l'intégration des structures hybrides.

Tolérances : tenir compte des limites des matériaux dès la conception

La zone transitoire d'un projet en bois massif et en structure d'acier ou de béton demande une coordination entre les différents matériaux. Normalement, ce seront différents fournisseurs qui produiront les éléments du projet. Les bonnes pratiques en matière de plans et devis devraient minimalement présenter quelques détails types qui tiennent compte des tolérances de fabrication et d'installation des matériaux. La problématique de tolérances entre matériaux la plus fréquemment répertoriée sur les chantiers de bois massif concerne tout ce qui touche la compatibilité entre la précision bois et celle du béton. Le béton a plusieurs impondérables : positionnement de l'armature, stabilité des coffrages lors de la coulée, positionnement des ancrages préscellés, niveaux à respecter, etc. Ces situations inattendues rendent difficiles les sorties avec le béton.

Les détails et les jeux d'assemblages nécessaires à une installation et un montage sans tracas doivent être initialement réfléchis dès la conception initiale.

7.4. Intégration mécanique/électrique/plomberie

L'introduction des systèmes mécaniques, électriques et de la plomberie (MEP) dans un bâtiment a longtemps été la spécialité négligée dans les premières phases de projets. Les conduits de ventilation occupent particulièrement beaucoup d'espace en raison des grandes dimensions qui leur sont nécessaires. La coordination des systèmes mécaniques dans les projets se déroulait jadis dans les phases subséquentes des projets et même parfois en chantier. L'arrivée des technologies numériques permet un meilleur contrôle de la coordination et une préfabrication facilitée. Pour tous types de matériaux, il existe toujours des façons pour faciliter

l'intégration des MEP par un rehaussement de la structure globale afin d'y laisser l'espace nécessaire à leur passage. Ces modifications entraînent des conséquences sur la globalité du bâtiment.

L'importance de l'intégration des systèmes MEP est capitale, particulièrement lorsqu'ils sont associés à une structure de bois massif :

- Les systèmes structuraux utilisant des poutres rabaissées (« Drop Beams ») créent des obstacles au libre passage des systèmes MEP. Il est donc essentiel de bien intégrer le tout en avant-projet ;
- L'un des objectifs du choix de structures de bois massif réside dans la volonté de laisser le bois exposé. C'est alors que l'on accorde toute l'importance à la coordination afin de bien projeter et d'intégrer visuellement cette mécanique au projet ;
- Le haut niveau de préfabrication qu'offre cette industrie nécessite une prise en charge en amont des systèmes mécaniques afin de coordonner avec précision les percements et les ouvertures nécessaires au passage de certains conduits.

Bien qu'une partie de la gestion de la mécanique du bâtiment s'effectue encore au chantier, les outils de conception des systèmes mécaniques contiennent des fonctions permettant d'intégrer la coordination avec la conception de la structure en bois massif. La coordination MEP et structure de bois avant le chantier est primordiale, car les outils pour travailler manuellement les pièces de bois massif sont de grandes tailles et s'utilisent difficilement en chantier, surtout pour le travail en hauteur.

Plusieurs recettes permettent d'insérer la mécanique efficacement dans les projets. Les sections qui suivent donnent certains conseils sur les points à ne pas négliger pour réaliser cette intégration.

7.4.1. Traitements des systèmes mécaniques

MEP apparent

Les systèmes mécaniques laissés apparents doivent être traités séparément. Le choix de certains matériaux par rapport à d'autres, ainsi que les traitements à apporter sur les systèmes (peinture, formes des conduites pour leur intégration à l'architecture du projet), doivent impérativement se manifester hâtivement afin d'être incorporés adéquatement.

Laisser les systèmes MEP exposés en tout ou en partie nécessite une prise en charge rapide et une coordination accrue et le coût de ce choix peut devenir un enjeu.

Si des percements doivent être laissés apparents, une coordination supplémentaire doit être considérée pour bien positionner les éléments de la mécanique, les intégrer visuellement et architecturalement au projet.

MEP non apparent

Dans les systèmes structuraux en acier ou en béton, la mécanique du bâtiment passe habituellement sous la structure. Sous une dalle de béton, la coordination est simplifiée puisqu'il y a peu d'obstacles au libre passage des conduits des systèmes MEP. Le traitement esthétique des conduits est aussi simplifié par l'ajout d'un plafond suspendu.

Dans les structures de bois massif, les services MEP voués à être cachés doivent être coordonnés pour s'assurer d'être bien intégrés esthétiquement. L'utilisation de plafonds architecturaux suspendus pour cacher la mécanique dans un bâtiment en bois est certainement envisageable, mais les vides techniques horizontaux

et les plénums sont réglementés aux articles 3.6.4 et 3.1.11.5 de la division B du code. Ces espaces réservés au passage de la mécanique doivent dans la plupart des cas soit avoir un IPF inférieur à 25, être remplis d'isolant incombustible et (ou) être giclés.

7.4.2. Positionnement, percements et ouvertures pour les systèmes MEP

MEP à travers la structure

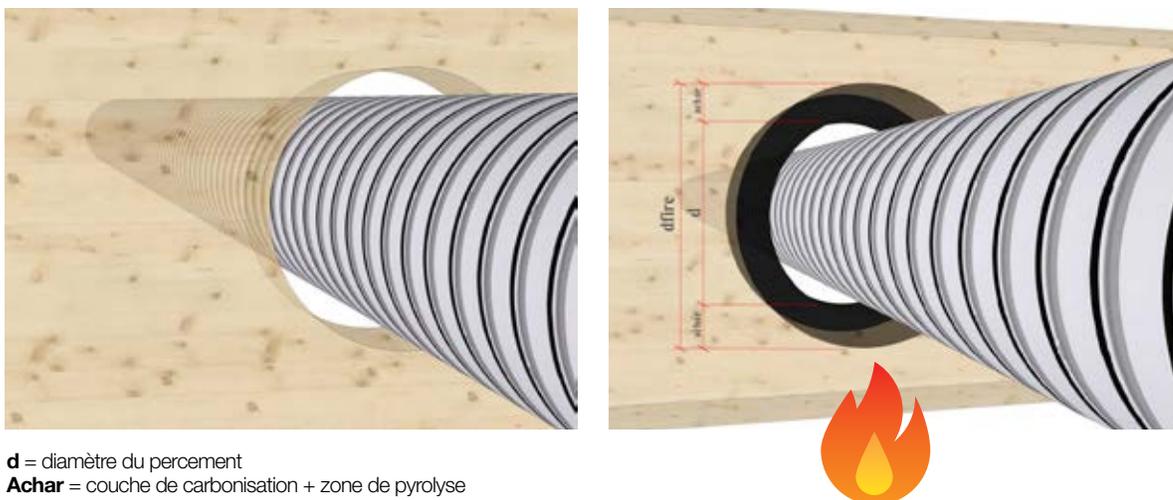
Le fait de passer les systèmes MEP à travers une structure de bois massif comporte certains défis de logistique et de coordination de projet. Comme les percements ne peuvent pas ou difficilement être déplacés en chantier, leurs emplacements doivent être planifiés en préfabrication.

De plus, certains percements peuvent affecter la résistance structurale des éléments. Les percements créés pour l'insertion des systèmes mécaniques doivent être bien analysés par l'ingénieur en structure du projet afin de s'assurer que leur dimension et leur position ne causent pas de problématiques sur le plan structural. Il existe des solutions de renforts qui peuvent être analysées si les études structurales démontrent des manques en matière de résistance.

Percement et feu

Le code ^[1] et la norme CSA 086 ne sont pas encore exhaustifs concernant la baisse de résistance causée par un percement de structure de bois massif exposé au feu. En revanche, il est logique de calculer la surface interne d'un percement exposé au feu comme étant la surface du percement d'origine agrandie de l'épaisseur de la combustion, comme illustré à la figure 62.

$$D_{\text{fire}} = \text{achar} + d + \text{achar}$$



d = diamètre du percement
Achar = couche de carbonisation + zone de pyrolyse

FIGURE 62 • Images montrant l'impact des percements pour la MEP en situation d'incendies

MEP en dessous

Passer la mécanique en dessous des poutres est la façon habituellement préconisée par les concepteurs puisqu'elle est la plus simple à réaliser (figure 63). Il suffit de connaître l'espace requis pour les systèmes MEP et de l'ajouter à la hauteur libre nécessaire à l'usage du bâtiment et à la hauteur du système de plancher pour connaître la hauteur interétage minimale à considérer. Dans la pratique, cette façon d'intégrer la mécanique est plus simple, mais elle réhausse le bâtiment et engendre régulièrement d'importants coûts additionnels.



FIGURE 63 • Image montrant l'intégration des services MEP au-dessous des poutres

MEP au-dessus

Dans le cas de bâtiments avec pannes et poutres en deux directions, il est parfois possible de surélever les pannes secondaires par rapport aux poutres principales dans le but de passer certains conduits entre les poutres principales et le platelage sur la hauteur des pannes (figure 64). Dans ce cas, la mécanique peut aussi être passée au-dessous des pannes dans la direction longitudinale aux poutres principales permettant de maximiser l'espace requis au libre passage des systèmes MEP. Les espaces ainsi créés pour les passages mécaniques sont définis par l'espacement et la hauteur des pannes.

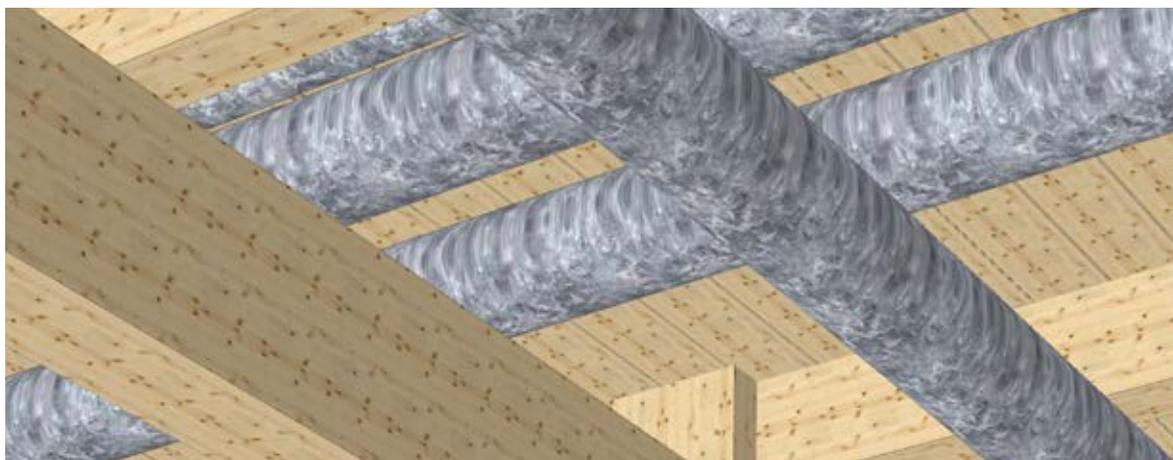


FIGURE 64 • Image montrant l'intégration des services MEP entre le platelage et les poutres dans les espaces créés par le rehaussement des pannes

Puits mécaniques

L'utilisation de puits mécaniques horizontaux ou verticaux peut servir de solutions alternatives aux systèmes proposés. L'avantage de l'utilisation de puits mécaniques est de pouvoir traiter la mécanique non apparente et de concentrer le bois exposé dans certains secteurs.

Un puits mécanique vertical peut servir à acheminer les systèmes MEP aux étages. Des puits mécaniques horizontaux peuvent dans certains cas être localisés dans des corridors où l'introduction visuelle du bois est moins nécessaire en termes de biophilie. Il est aussi intéressant de travailler avec la trame dans le but de limiter les poutres rabaissées dans les zones de puits mécaniques horizontaux. Cette technique permet habituellement de limiter la hauteur inter-étage. Certains types de configuration de projets se prêtent mieux à ce travail. Un corridor

central avec des logements ou des salles de part et d'autre du corridor peut être une configuration adéquate pour l'insertion d'un puits mécanique horizontal.

Une autre configuration possible d'un puits mécanique est de le positionner autour d'une cage de béton.

Une autre solution pour les puits mécaniques horizontaux est de les localiser au pourtour du bâtiment, ce qui permet de distribuer la ventilation près des fenêtres extérieures.



PROJET DE BUREAU COMPLAN

Réalisé par Cargo Architecture ; photo montrant l'intégration d'un puits mécanique horizontal au pourtour du bâtiment
Photo : Stéphane Groleau

Certains détails et solutions de dédoublement de poutres peuvent permettre une intégration des systèmes MEP à des endroits stratégiques pour une distribution horizontale.

Systèmes de plancher rehaussés accessibles

Les systèmes de plancher accessibles et rehaussés par rapport à la structure principale du plancher d'un bâtiment sont encore peu développés au Québec. Ces systèmes sont une solution compatible avec les projets de bois massif et offrent plusieurs avantages. L'espace sous ce plancher reste accessible et peut être utilisé pour la distribution des systèmes MEP. Ces planchers utilisent habituellement des panneaux modulaires qui

peuvent facilement être retirés pour donner accès au plénum créé sous le plancher afin de permettre de futures maintenances et améliorations. Souvent, les fabricants de ces systèmes peuvent offrir une solution complète intégrant notamment la ventilation provenant du plancher. De plus, ce plénum est normalement constitué de matériaux ayant un IPF inférieur à 25 (dalle de béton au plancher et panneaux incombustibles pour le système de plancher rehaussé), ce qui simplifie le traitement des vides de construction pour leur conformité au code ^[1].

L'un des freins à l'introduction de ce système est qu'il représente un coût additionnel et demande une coordination accrue en avant-projet. L'industrie de la construction est conservatrice et l'utilisation de systèmes innovants bouleverse les façons de faire établies. Les références de hauteur des étages sont souvent basées sur les hauteurs de plancher fini et les planchers rehaussés sont introduits ultérieurement dans un projet. Des détails architecturaux et structuraux doivent donc être bien coordonnés de façon à compenser la hauteur du système de plancher. Avec les outils numériques à la disposition des professionnels, rien n'est impossible à leur implantation.



HOHO TOWER DE VIENNE

Intégration de la mécanique dans des systèmes de plancher rehaussés

Photos : Cecobois

7.5. Optimisation de la hauteur de bâtiment

La hauteur interétage touche globalement l'optimisation d'un projet. Les projets utilisant des poutres abaissées créent des obstacles qui empêchent le libre passage sous le plafond. La façon simple d'y remédier est de conserver l'espace nécessaire pour les systèmes MEP en augmentant la hauteur interétage. Cette modification

a des répercussions importantes sur d'autres éléments de fourniture dans le bâtiment :

- Plus d'éléments de systèmes d'intérieur ;
- Plus d'enveloppe extérieure (isolation, étanchéité, revêtement) ;
- Plus de volume d'air à traiter pour le chauffage et la climatisation ;
- Etc.

La hauteur du bâtiment peut être optimisée par de judicieux choix de conception alliés à une bonne coordination des systèmes MEP. Le choix d'un système et d'une trame structurale adapté à l'usage du projet, mais principalement la gestion de cette dernière en fonction de la mécanique du bâtiment, peut apporter une optimisation et des économies substantielles. Ces choix ont peu d'effets sur la fourniture de la structure elle-même, mais à l'échelle des coûts de bâtiment, cela représente de fortes économies.

Certains systèmes propriétaires s'allient bien avec les projets de bois massif et permettent de minimiser la hauteur interétage. Des systèmes innovants ont été développés dans le but de simplifier la conception des passages MEP aussi simplement que dans les projets dalles sur colonnes en béton. La création d'une dalle sans poutre rabaissée permet le libre passage des conduits dans toutes les directions. La hauteur interétage épargnée peut permettre d'économiser sur le coût des matériaux et de maximiser le potentiel de superficie d'un bâtiment sur un terrain en ajoutant un étage, par exemple.

C'est le cas du système de poutres Deltabeam de Peikko qui peut s'adapter avec des systèmes de dalles de bois massif et qui possède un potentiel de réduction de hauteur interétage intéressant. Il est certain que l'ajout de poutres deltoïdes augmente le coût du projet. Il y a lieu d'analyser si les bénéfices de la réduction potentielle de coût de fourniture des éléments autres surpassent le coût supplémentaire de cet ajout.

Le système de dalles en CLT sur colonnes (figure 65) est aussi intéressant pour le potentiel de réduction de la hauteur interétage. Ce système structural est cependant contraignant pour une adaptation du bâtiment à l'usage (colonnes rapprochées selon la largeur disponible des panneaux en CLT).

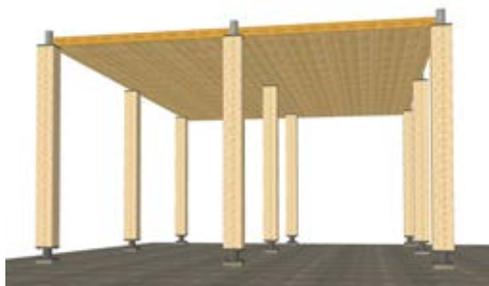


FIGURE 65 • Système dalle sur colonnes

Différents systèmes innovants ont été développés en Europe pour limiter cette contrainte et permettent de faire des trames plus adaptables à l'usage d'un bâtiment. Cependant, l'utilisation de ces systèmes peut demander des essais pour être en conformité avec les codes et normes canadiens.

7.6. Exposition du bois versus systèmes d'intérieurs

L'un des bénéfices de l'utilisation du bois massif est sa possibilité de le laisser apparent. Les structures des autres matériaux sont habituellement traitées différemment. Il est assez rare de laisser les matériaux de structure apparents. Les matériaux couvrant les structures servent normalement de protection contre l'incendie et, par le fait même, de matériaux de finition architecturale.

Les structures de bois massif destinées à être laissées apparentes permettent d'optimiser la finition des systèmes d'intérieurs. Les caractéristiques intrinsèques du bois massif de qualité esthétique et de performances en situation d'incendie permettent de laisser le bois exposé, ce qui permet de diminuer l'utilisation de systèmes d'intérieurs :

- Plafonds architecturaux ;
- Protection contre l'incendie ;
- Traitement acoustique ;
- Création de vides techniques.

7.7. Stratégie d'optimisation pour système de résistances latérale en bois

L'objectif de cette section n'est pas d'expliquer comment concevoir les systèmes de contreventement, mais comment bien réfléchir à leur intégration globale dans un bâtiment.

Les tableaux 5 et 6 du chapitre 5 présentent des solutions structurales d'intégration des systèmes de résistance aux charges latérales avec leurs points forts et leurs points à surveiller. Une structure de bois massif peut aussi être jumelée avec des systèmes de contreventements utilisant d'autres matériaux comme l'ossature légère en bois, l'acier ou le béton. Lorsque différents

systèmes de reprise des charges latérales sont utilisés dans un même bâtiment, le code prévoit certaines dispositions ou restrictions afin de rendre le système compatible sur le plan des déformations, de la rigidité ou de la dissipation d'énergie.

La disposition des contreventements est habituellement spécifiée suivant des considérations d'usage et d'exploitation (ouvertures, etc.) en plus d'être suffisante pour stabiliser et rigidifier le bâtiment (contrôle des déformations). Mais en planifiant et en coordonnant ces détails avec l'équipe de projet, il est possible d'optimiser leur intégration et de contribuer à la qualité architecturale du projet de façon holistique.

La coordination entre les professionnels est donc cruciale dans le choix et le positionnement des contreventements, particulièrement par rapport aux ouvertures. Dans certains cas, il est possible de bien intégrer des fenêtres fixes au-devant de contreventements, ce qui est plus difficile à réaliser avec des ouvertures mobiles ou des portes. Dans tous les cas, il est important que le tout soit bien intégré architecturalement pour éviter que cela ne soit perçu comme des erreurs de coordination.

Systèmes de stabilisation latérale en bois massif

Les systèmes de cadres contreventés en bois massif permettent d'exposer le bois, rehaussant ainsi l'esthétique architecturale du projet. En effet, la structure étant habituellement positionnée à l'intérieur de l'enveloppe du bâtiment, les contreventements peuvent être intégrés aux façades en les laissant exposés pour participer à la finition architecturale du bâtiment. Avec une bonne coordination

d'équipe, ils peuvent être positionnés devant certaines ouvertures ou murs rideaux apportant une intégration visuelle à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment. L'édifice GSK et le Centre technologique de résidus industriels montrent l'intégration réussie des colonnes et contreventements à la façade architecturale des bâtiments. Pour maximiser l'esthétique, il est important de bien identifier les pièces visibles de l'extérieur pour que le fournisseur apporte une attention particulière à la finition du côté extérieur qui devrait normalement être non visible.



ÉDIFICE GSK

Photo : Richard Desjardins



CENTRE TECHNOLOGIQUE DES RÉSIDUS INDUSTRIELS (CTRI)

Photo : Christian Perreault

Les assemblages des contreventements sont des points névralgiques puisque les contreventements triangulés nécessitent plusieurs assemblages qui doivent s'adapter à la configuration des membrures et des pièces de bois. Cela crée souvent des géométries plus complexes et un nombre d'assemblages important ayant chacun leur propre spécification à concevoir et à réaliser. Idéalement les points de travail des contreventements devraient se situer aux axes neutres (concentriquement, figure 66) des pièces de bois dans les baies de façon à ne pas induire des efforts parasites de moment dans les membrures et connexions.



FIGURE 66 • Contreventement concentrique en bois

Comme les ossatures contreventées en bois massif peuvent travailler en traction ou en compression, il est plus simple de ne pas croiser les pièces de contreventements dans un même plan pour les raisons suivantes :

- Minimiser le nombre de nœuds d'assemblages à concevoir et à fabriquer ;
- Difficultés à obtenir un comportement d'assemblage symétrique en traction et en compression (flambement, rigidité et résistance).

En conséquence, il est souvent plus simple d'utiliser des configurations minimisant le nombre de nœuds d'assemblages complexes, quitte à avoir des contreventements plus imposants travaillant en traction-compression, comme illustré à la figure 67. Ces contreventements devraient être conçus pour être installés avec un angle optimal d'environ 45° pour permettre une répartition des efforts horizontaux et verticaux à peu près semblables. Cela évite aussi de créer des singularités pour les différents collecteurs sismiques.

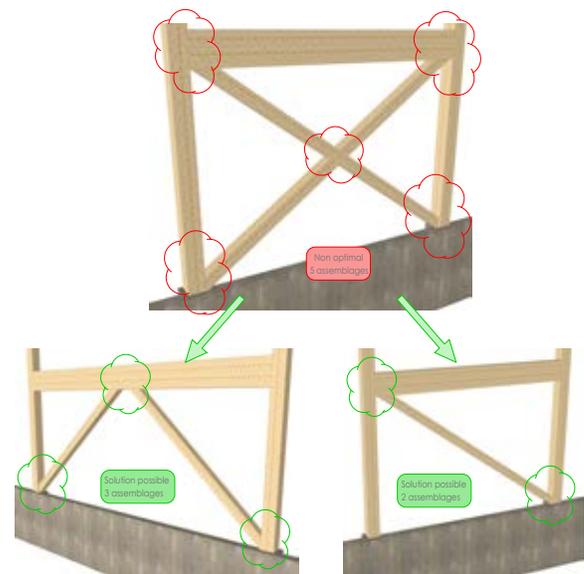


FIGURE 67 • Contreventements minimisant le nombre de connexions à concevoir, fabriquer et installer

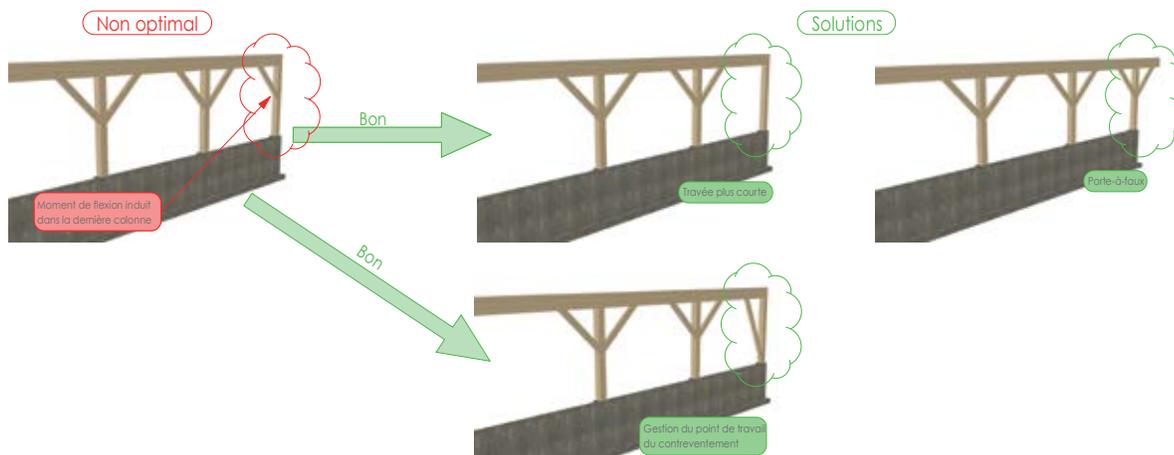


FIGURE 68 • Exemple de contreventements utilisant des jambes de forces

Les contreventements utilisant des jambes de force ou des aisseliers (knee brace, figure 68) présentent de faibles rigidités en plus d'introduire un moment de flexion dans les poutres et/ou dans certaines colonnes. Il est donc important de bien étudier et de valider un tel système avant de les spécifier.

Pour la dissipation d'énergie sismique, les systèmes de résistance aux forces sismiques utilisant le bois massif sont actuellement mal définis et détaillés dans la norme et dans le Code national du bâtiment. Comme la ductilité du système de contreventement dépend directement du type d'assemblage intégré du système, le détail des assemblages est important et peut difficilement être dissocié des hypothèses de l'ingénieur concepteur. Il est important qu'une communication efficace soit établie entre le concepteur et l'ingénieur qui effectuera la conception des assemblages pour s'assurer, entre autres, que le bâtiment réponde aux hypothèses de conception des professionnels en termes de rigidité, de dissipation d'énergie ou de résistance.

L'hybridation de systèmes de contreventement en bois massif permettent de bénéficier des bonnes performances de dissipation d'énergie qu'offrent les murs de cisaillement en ossature légère en bois. Les détails d'assemblages seront une partie importante à réaliser et à coordonner pour s'assurer de la bonne transmission des efforts entre les deux systèmes.

Dans le bâtiment multiétagé, les murs de cisaillement en CLT sont une autre avenue intéressante, car les composants préfabriqués permettent une mise en œuvre rapide des cages et murs de refends. De multiples recherches sont en cours présentement pour développer des systèmes efficaces pour dissiper l'énergie et minimiser les efforts de remise en service du bâtiment dans le cas d'un séisme d'ordre majeur.

Systèmes de contreventement utilisant d'autres matériaux que le bois

Les structures de bois peuvent facilement être combinées avec des systèmes de résistances aux forces latérales (SFRS) en acier ou en béton. Pour ce faire, les détails du système de contreventement doivent être effectués suivant les normes applicables pour chacun de ces matériaux en conformité avec le code national du bâtiment (CNB 2015). Comme différents corps de métier assurent l'exécution en chantier, la coordination devient un enjeu critique, surtout pour la séquence des opérations et leur déroulement en chantier.

Les systèmes de contreventement en acier sont bien documentés et peuvent se combiner avantageusement à une structure en bois massif. À titre d'exemples, certains systèmes de contreventements en acier permettent de dissiper beaucoup d'énergies et de résister à de grands efforts. Inversement, il est aussi possible d'opter pour la légèreté des contreventements en y intégrant des solutions de câbles ou de tirants effilés travaillant seulement en traction.

La mixité avec le béton est aussi intéressante, car elle permet de transférer d'importants efforts, contribuant ainsi à diminuer la quantité de contreventement nécessaire au bâtiment.

Synthèse du chapitre 7

- Prioriser une approche conception-construction intégrée pour favoriser les échanges avec l'entrepreneur et, idéalement, le fournisseur de bois massif pendant la conception.
- Considérer le coût de projet dans son ensemble et non seulement par le coût de la structure de bois. Le choix du bois peut influencer les matériaux de finition, d'enveloppe ou les systèmes électromécaniques :
 - La biophilie et l'esthétisme apportent une plus-value au projet par les propriétés intrinsèques du bois, lesquelles sont difficilement chiffrables monétairement.
- Éviter des modifications tardives : plus elles surviennent tard, plus leur coût est important.
- Utiliser les outils numériques pour faciliter la paramétrisation et le transfert de données entre les différents intervenants du projet.
- Utiliser le bon matériau au bon endroit par une hybridation intelligente des matériaux :
 - Connaître les caractéristiques et les tolérances des matériaux ;
 - Réfléchir à l'ordonnement des travaux pour éviter les chevauchements des différents corps de métiers ;
 - Définir clairement qui fournit quoi aux zones de transition de matériaux ;
 - Prévoir des détails types montrant la tolérance et les jonctions des matériaux.
- Intégrer le passage des systèmes électromécaniques en avant-projet :
 - Déterminer si la mécanique est apparente ou non ;
 - Penser aux vides de construction ;
 - Avant la construction, prévoir les ouvertures dans les poutres et dalles, les renforts d'ouvertures et la perte de section de ces ouvertures en cas de feu ;
 - Prévoir le passage de la mécanique à des endroits où les poutres peuvent être moins profonde ou absente (corridors) et où l'apparence du bois est moins nécessaire ;
 - Penser au système de plancher rehaussé.
- Certains systèmes permettent de limiter la hauteur inter-étage des bâtiments, ce qui réduit les matériaux d'enveloppe extérieure et de finition intérieure, limite le volume d'air intérieur à chauffer et ventiler et peut-être permettre l'ajout d'un étage additionnel. Le coût de ces systèmes doit toutefois être analysé.
- Laisser des contreventements en bois massif apparents peut être architecturalement intéressant. Les croisements des diagonales devraient toutefois être évités pour faciliter les assemblages.
- Chacun des systèmes de contreventements possibles nécessitent une bonne coordination au chantier et une validation du transfert adéquat des efforts. Les types de contreventements possibles sont, entre autres :
 - Murs de contreventement en CLT ;
 - Murs de contreventement en ossature légère en bois ;
 - Murs de contreventement en béton ;
 - Diagonales en structure de bois, d'acier, de câbles ou de tirants.

8 Annexe

Tableau 9 : Valeurs d'IPF et d'IDF pour certains types de bois

PRODUIT		Indice de propagation de la flamme (IPF)	Indice de dégagement des fumées (IDF)
Bois de construction de 19 mm d'épaisseur ^[32]			
Bouleau	jaune (merisier)	105 - 110	-
Noyer		130 - 140	-
Bois de construction de 19 mm d'épaisseur ^[31]			
Cèdre	blanc de l'Est	50	135
	de l'Ouest	60	100
	jaune de la côte du Pacifique	50	90
Sapin	gracieux (argenté du Pacifique)	69	58
	baumier	50	75
	de Douglas	40	80
Pruche	de l'Ouest	75	25
	de l'Est	40	110
Mélèze	de l'Est (ou laricin)	35	60
Chêne	rouge ou blanc	100	100
Pin	blanc de l'Est	85	100
	gris	55	135
	de Murray (ou pin tordu)	60	115
	à bois lourd (ou pin jaune ou pin ponderosa)	105 - 230	-
	rouge	180	70
	blanc de l'Ouest (ou pin argenté)	75	-
Peuplier faux-tremble	(tremble)	180	55
Épinette	rouge	65	175
	de Sitka	74	74
	blanche de l'Ouest	50	70
Érable	(parquets)	104	157
Bois de construction ^[33]			
Bois de construction de minimum 16 mm d'épaisseur		≤ 150	≤ 300
Bois de charpente composite ^[34]			
PSL	Parallam ^{MD} (min. 89 mm, à plat)	35	25
LVL	Brisco Mfg. (min. 140 mm, sur les côtés)	35	30
LSL	TimberStrand ^{MD} (min. 89 mm, à plat)	75	85
Bois lamellé-croisé ^[34]			
CLT	Panneau 3 plis EPS classe E1 (min. 105 mm)	35	40
	Panneau 3 plis EPS classe V2 (min. 99 mm)	40	30
Bois lamellé-collé ^[35]			
Platelage lamellé-collé (Nordic Structures), 64 mm d'épaisseur		40	55
Revêtement structural ^[33]			
Contreplaqué	Sapin de Douglas, 11 mm d'épaisseur	≤ 150	≤ 300
	Peuplier, 11 mm d'épaisseur	≤ 150	≤ 300
	Épinette, 11 mm d'épaisseur	≤ 150	≤ 300
Revêtement de sol ^[33]			
Bois dur ou tendre, revêtu ou non de vernis, de spar ou d'uréthane		≤ 300	≤ 300

9 Références

- [1] Conseil national de recherches du Canada (2015). *Code de construction du Québec – Chapitre I - Bâtiment, et Code national du bâtiment – Canada 2015 (modifié)*
- [2] CSA O86 (2019) *Règles de calcul des charpentes en bois, édition 2019*, Ottawa, Canada, Conseil canadien des normes
- [3] Cecobois (2021). *Guide sur l'utilisation du bois dans les écoles primaires*, Québec, Canada, 104 p.
- [4] Cecobois (2019). *Bâtiments municipaux en bois*, Québec, Canada, 106 p.
- [5] CNB (2015). Conseil national de recherches du Canada (2015). *Code national du bâtiment – Canada 2015*
- [6] CAN/ULC-S102 (2018). *Standard Method of Test for Surface Burning Characteristics of Building Material and Assemblies*, Ottawa, Canada, Conseil canadien des normes
- [7] Série CSA O80 (2021) *Préservation du bois, édition 2021*, Ottawa, Canada, Conseil canadien des normes
- [8] CAN/CSA O122 (2016) *Bois de charpente lamellé-collé, édition 2021*, Ottawa, Canada, Conseil canadien des normes
- [9] CSA O177 (2023) *Règles de qualification des fabrications de bois de charpente lamellé-collé, édition 2023*, Ottawa, Canada, Conseil canadien des normes
- [10] CCB (2021). *Manuel de calcul des charpentes en bois 2021*, Ottawa, Canada, Conseil canadien du bois

PARTENAIRES



Dépôt légal Bibliothèque nationale du Québec
Dépôt légal Bibliothèque nationale du Canada

Mai 2024

cecobois

Centre d'expertise
sur la construction
commerciale en bois

www.cecobois.com