

« Construire en bois au prix du béton, est-ce possible ?
Étude de coûts comparative
entre deux systèmes structuraux »

« Agrandissement des bureaux de
Jodoin Lamarre Pratte Architectes Inc. »

Préparé par :

En partenariat avec :

**JODOIN
LAMARRE
PRATTE
ARCHITECTES**

STRUCTURE=FUSION
BOIS INGÉNIEUX. BÂTIMENTS ASTUCIEUX.



Ce rapport a été réalisé dans le cadre du Programme de
vitrine technologique pour les bâtiments et les solutions
innovantes en bois

« 30 septembre 2019 »

Priscillia Champagne,
architecte

Auteur

Alice Richard,
rédactrice et chargée de
contenu

Réviseur

Nicolas Ranger,
architecte associé
principal

Approbateur

Avis de non responsabilité

Le contenu et les résultats de ce rapport sont produits et présentés par le promoteur du projet. Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs ainsi que le Fonds vert ne sont donc pas responsables du contenu de ce document.

Table des matières

1.	Sommaire exécutif et synthèse de l'étude	1
2.	Introduction.....	2
2.1	Titre et lieu de réalisation du projet de construction	2
2.2	Description du projet de construction	3
2.2.1	Description de la solution innovante	4
2.2.2	Échéancier global et durée	5
2.2.3	Budget global	5
2.2.4	Partenaires.....	6
2.2.5	Défis et risques généraux	6
3.	Détails de l'étude	8
3.1	Introduction et hypothèses de départ	8
3.2	Objectifs	9
3.3	Méthodologie	9
3.3.1	ISO 9001:2015.....	9
3.3.2	ISO 14064-2:2019.....	9
3.3.3	ASTM E1557-09 — Unifomat II	10
3.3.4	Processus de conception intégrée	10
3.3.5	Déroulement de l'étude	10
3.3.5.1	Étape 1 : Établir les critères de conception du projet.....	10
3.3.5.2	Étape 2 : Établir les objectifs financiers du projet	11
3.3.5.3	Étape 3 : Développement d'une volumétrie conceptuelle.....	11
3.3.5.4	Étape 4 : Analyse des options.....	11
3.3.5.5	Étape 5 : mesures de gestion du risque financier.....	12
3.3.5.6	Étape 6 : Arrimage des coûts et des solutions conceptuelles	13
3.3.5.7	Étape 7 : Retour d'expérience par Structure Fusion.....	13
3.4	Résultats et analyse	13
3.4.1	Analyse des coûts directs	13
3.4.2	Analyse des coûts indirects.....	16
3.5	Conclusions	18
3.6	Retombées et rayonnement des solutions développées et potentiel de reproductibilité pour l'industrie	18
3.7	Recommandations.....	20
4.	Bibliographie.....	21

Table des figures

Figure 1 : Historique des agrandissements	2
Figure 2 : Coupe schématique de la composition structurale.....	4
Figure 3 : Coupe schématique représentant l'assemblage NLVL.....	4
Figure 4 : Dalle de NLVL et vis, avant coulage de la dalle de béton	5
Figure 5 : Graphique comparatif des coûts directs de structure	15
Figure 6 : Coût comparés incluant les coûts indirects	17

Table des tableaux

Tableau 1 : Superficie de l'agrandissement	3
Tableau 2 : Risques et mesures de mitigation	7
Tableau 3 : Coût d'une structure de béton selon différentes sources.....	11
Tableau 4 : Présentation de divers systèmes structuraux en bois d'ingénierie	12
Tableau 5 : Estimations partielles liées aux décisions de conception	14
Tableau 6 : Comparatif des coûts directs de structure	14
Tableau 7 : Comparatif des coûts associés au temps de montage de la structure	16
Tableau 8 : Comparatif des coûts associés au traitement acoustique	16
Tableau 9 : Synthèse des résultats de l'étude.....	18

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude

Jodoin Lamarre Pratte architectes est une firme d'architecture établie à Montréal depuis 1958. La firme étant propriétaire¹ de l'immeuble abritant son siège social au 3200, rue Rachel Est, la Direction a décidé en 2016 de construire un agrandissement, afin de répondre aux besoins d'une équipe en croissance.

La volonté de construire le projet en bois émerge rapidement dans le processus de réflexion. Cet agrandissement est en effet une opportunité pour la firme de développer ses connaissances de ce mode constructif, de réduire l'empreinte environnementale de son bâti et de participer activement au développement de la construction en bois dans le secteur non-résidentiel au Québec.

Les ressources financières allouables au projet demeurent néanmoins limitées, et la construction en bois reste encore fréquemment associée à un surcoût par rapport aux autres méthodes de construction courantes. La firme se fixe alors l'objectif de construire son agrandissement en structure de bois à un coût inférieur ou égal à celui d'une structure en béton (structure des bâtiments existants) et de documenter ce processus au moyen d'une étude de coût comparative. L'objectif de l'étude faisant l'objet de ce rapport est de répondre à la question suivante : « Construire en bois au prix du béton, est-ce possible ? ».

En analysant le cas spécifique de la construction de l'agrandissement des bureaux de Jodoin Lamarre Pratte architectes, pour lequel une structure hybride bois-acier-béton utilisant un assemblage innovant pour les dalles structurales : du placage de bois stratifié cloué (NLVL), cette étude propose une étude de coût comparative entre la solution innovante développée et un scénario de base de construction en béton.

L'étude de coût comparative présentée ci-après vient combler un manque dans la littérature actuelle concernant la construction en bois au Québec, peu de documents se penchant en détail sur les coûts associés à une construction en bois. Les résultats de l'étude sont présentés en trois volets soit :

- une comparaison des coûts directs de structure;
- la même comparaison corrigées des surcoûts entraînés par des décisions conceptuelles;
- une comparaison des coûts directs de structures et des coûts indirects associés.

Ces résultats montrent qu'il reste du chemin à parcourir pour que les coûts directs d'une construction en bois soient compétitifs avec ceux d'une construction en béton (la structure hybride est 15% plus chère que le scénario de base). Cependant cet écart diminue beaucoup si l'on corrige le coût de la structure hybride des surcoûts entraînés par des décisions conceptuelles, difficiles à prendre en compte dans le scénario de base (la structure hybride devient seulement 3% plus chère que le béton). Enfin si l'on ajoute les coûts indirects liés aux systèmes structuraux, principalement le temps de chantier associé au montage de la structure et le coût lié au traitement acoustique, le surcoût du bois disparaît complètement, la structure hybride devenant même 0,5% moins chère que le scénario de base.

Enfin cette étude présente également un retour d'expérience sur le développement d'une solution innovante sur mesure, soit l'assemblage de NLVL, en collaboration entre les architectes, les ingénieurs et le fabricant de bois.

¹ Via l'entreprise Les Immeubles 3200 Rachel Inc.

2. Introduction

La firme d'architectes Jodoin Lamarre Pratte architectes, fondée en 1958, occupe depuis 1980 le bâtiment situé au 3200, rue Rachel Est à Montréal. Cette bâtisse industrielle construite en 1929 est localisée dans le quartier des Shop Angus. Elle a successivement été une usine de fabrication de compteurs à mazout, puis un garage de réparation automobile pour taxis.

Au fil des ans, le bâtiment a été adapté aux besoins grandissants de l'entreprise. En plus de plusieurs opérations de réaménagements intérieurs, il a été nécessaire d'augmenter la superficie de plancher par la construction d'agrandissements. Un premier agrandissement vers le Sud sur la rue Dézéry fut réalisé en 2008 pour accompagner la croissance de l'entreprise qui atteint alors 85 employés. Celui-ci comportait une structure de béton similaire au bâtiment existant. En 2018, la firme célébrait ses 60 années d'existence et atteignit également un nouveau record avec 122 employés permanents. Un second agrandissement s'imposait pour faire face à cette croissance.

L'architecture responsable et le développement durable font partie du rôle social de l'architecte et la firme a à cœur de créer des projets à faible empreinte carbone, qui fournissent un milieu de vie amélioré par l'utilisation de matériaux sains, où les occupants ont un accès privilégié à la lumière naturelle.

Avec 60 ans d'existence et près de 120 employés, Jodoin Lamarre Pratte figure parmi les grands bureaux d'architectes du Québec et défend depuis sa création des valeurs de créativité, de collaboration et de rigueur. Cet agrandissement était pour la firme une opportunité de faire la démonstration de son savoir-faire, de sa capacité à utiliser des techniques de construction avant-gardistes, de son engagement pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre, et de son support à la Charte du bois, développé par le Ministère de la Faune, des Forêts et des Parcs (MFFP).

La firme souhaitait donc construire cet agrandissement en bois d'ingénierie, mais la capacité financière de l'entreprise pour ce projet étant limitée, il fallait trouver une solution afin que le coût du projet ne soit pas rédhibitoire par rapport à une construction en structure de béton classique. La solution développée et sa performance financière par rapport à un scénario de base en béton fait l'objet du présent rapport.

2.1 Titre et lieu de réalisation du projet de construction

Projet de construction : Agrandissement des bureaux de Jodoin Lamarre Pratte Architectes Inc.

Lieu de réalisation : 3200 Rachel Est, Montréal, Québec, H1W 1A4

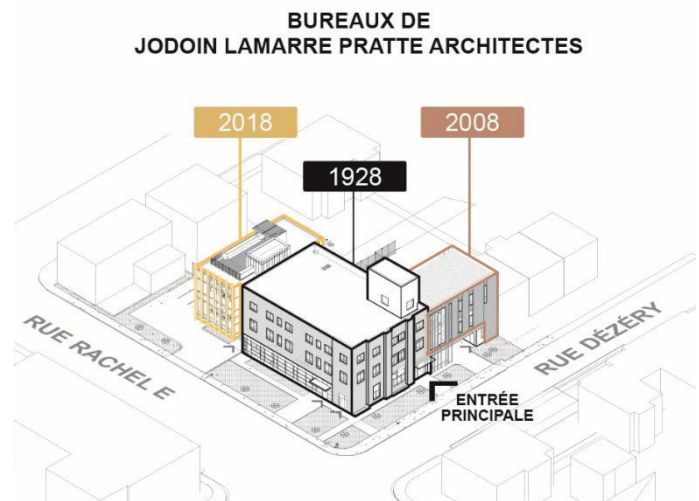


Figure 1 : Historique des agrandissements

2.2 Description du projet de construction

L'agrandissement des bureaux de Jodoin Lamarre Pratte architectes est localisé le long du mur Nord-est de la bâtisse d'origine, soit en continuité avec la façade de la rue Rachel Est. Tel que l'existant, le projet de construction s'élève sur trois étages. Il comporte l'ajout d'espaces de travail au rez-de-chaussée ainsi qu'au deuxième étage en continuité avec les espaces actuels, et la création d'un nouvel espace commun au premier étage, comprenant une cuisine, une salle à manger et une salle multifonctionnelle. Il permet de plus l'accès à une nouvelle terrasse au toit. La superficie brute totale ajoutée est de 516 m² répartie comme ci-contre.

Sous-sol	26 m ²
Rez-de-chaussée	118 m ²
Premier étage	170 m ²
Deuxième étage	176 m ²
Appentis d'accès au toit	26 m ²

Tableau 1 : Superficie de l'agrandissement

Ce projet de construction à vocation commerciale permet de revaloriser le bâtiment existant tout en lui permettant de continuer d'évoluer avec son usager. Afin de souligner notre engagement envers l'évolution des technologies du bâtiment au fil des années, nous souhaitons intégrer une structure en bois d'ingénierie dans la nouvelle construction. L'ensemble du bâtiment sert dès lors de parcours architectural, passant d'une décennie à une autre, et permettant d'observer les diverses techniques de construction possibles pour un même bâtiment.

Du point de vue de la rue, la façade avant, complètement vitrée et en saillie par rapport au bâtiment existant, vient animer l'intersection Rachel/Dézéry tout en reflétant la vocation du quartier en pleine évolution. Le volume ajouté vient d'ailleurs combler un vide important de la fabrique urbaine à l'emplacement proposé. En continuité avec la façade existante sur Rachel, l'agrandissement est développé telle une « vitrine de création technologique » contemporaine. Monté sur un piédestal, le volume vient exposer les avancées technologiques actuelles en termes de construction hybride en bois d'ingénierie, tout en permettant d'observer le quotidien des usagers. Les postes de travail et salle à manger servent d'arrière-plan à la démonstration architecturale.

Pour l'aménagement, le concept développé favorise le confort du personnel en développant une approche centrée sur la personne qui offre des aménagements de qualité, autant intérieurs qu'extérieurs, qui contribuent au bien-être au travail ainsi qu'à la créativité des personnes. Ainsi localisé, l'agrandissement vient s'insérer naturellement dans la prolongation du flux de circulation existant, où à chaque étage une nouvelle ouverture dans la façade existante est en lien direct avec les corridors principaux préalablement établis. Le seuil de transition entre les deux bâtiments est accentué par l'ajout d'un cadre enveloppant au pourtour des ouvertures ajoutées dans la façade de brique conservée. Ce point neutre entre les deux espaces vient souligner la différence entre les deux systèmes structuraux utilisés; structure de béton d'origine et structure hybride en bois d'ingénierie, béton et acier.



2.2.1 Description de la solution innovante

Afin d'atteindre l'objectif visé, soit réaliser un bâtiment en structure de bois d'ingénierie à coût inférieur ou égal à une structure de béton, la solution développée est une structure hybride (bois d'ingénierie, acier et béton) intégrant un nouvel assemblage de bois d'ingénierie pour les dalles structurales.

Ce nouvel assemblage, du bois en placage stratifié cloué, ou NLVL (nail-laminated veneer lumber), s'inspire des principes du bois lamellé-cloué (NLT, nail-laminated timber) (Binational Softwood Lumber Council and Forestry Innovation Investment Ltd, 2017). Le NLVL diffère du NLT en ce qu'il consiste en un assemblage cloué de placage de bois stratifié, au lieu d'un assemblage cloué de bois d'œuvre standard.

Cette solution innovante permet de réduire le coût par rapport à une structure en bois lamellé-croisé (CLT, cross-laminated timber) ou en NLT. Le facteur principal de réduction des coûts est l'utilisation de bois québécois de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*) de grade 1.55E. Ce bois est 30% moins cher que le grade 1.9E, produit principal sur le marché, parce qu'il présente plus de défauts visuels, et que sa résistance structurale est moins grande.

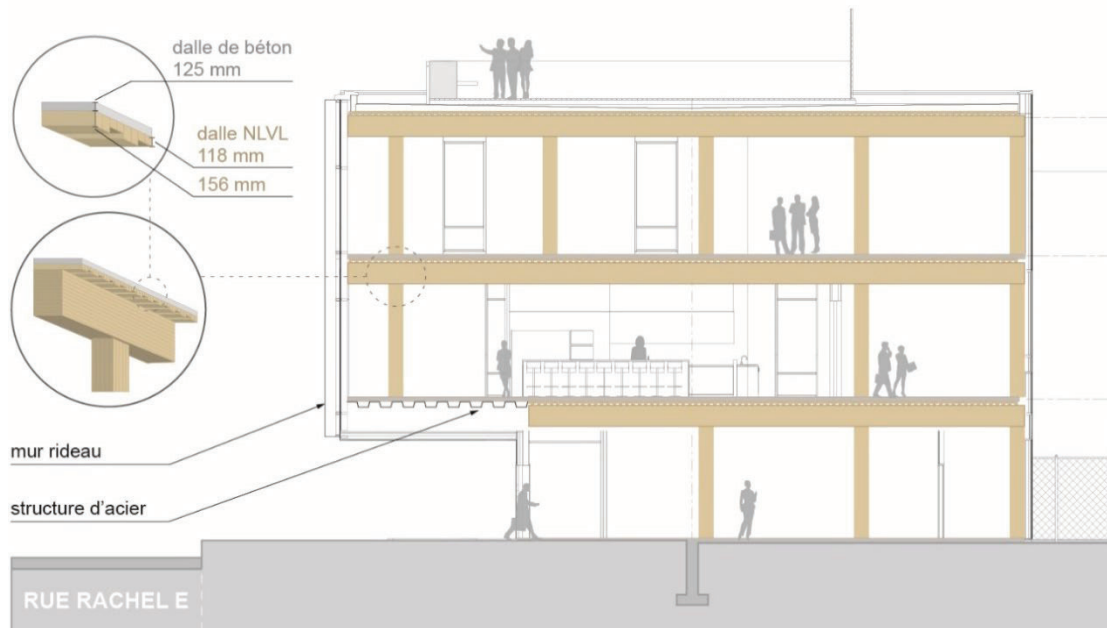


Figure 2 : Coupe schématique de la composition structurale

La présence de défauts visuels est compensée par la structure de l'assemblage. Puisque les morceaux de bois sont cloués ensemble sur leur plus grande surface, seulement la tranche inférieure de chaque morceau est visible. Le résultat reste visuellement satisfaisant sans nécessité un grade de bois supérieur.

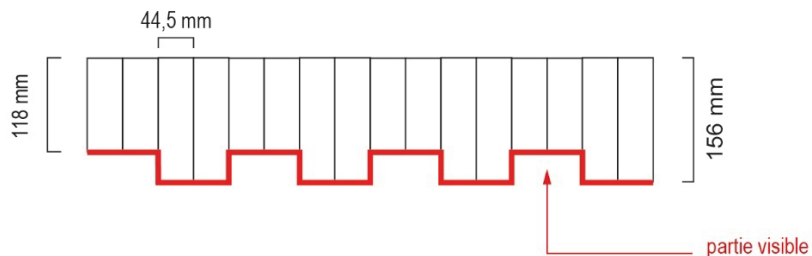


Figure 3 : Coupe schématique représentant l'assemblage NLVL

Pour compenser la moins grande résistance structurale, la dalle de NLVL a été couplée à une dalle de béton. Les deux dalles sont liées mécaniquement l’une sur l’autre à l’aide d’encoches dans la dalle de NLVL et de vis.



Figure 4 : Dalle de NLVL et vis, avant coulage de la dalle de béton

Dans cette configuration hybride, le coût au mètre carré de la structure de béton est fortement réduit par rapport à une structure tout béton conventionnelle car la quantité de béton requise est réduite d’environ 55% (dalle de 125 mm d’épaisseur au lieu de 275 mm pour une dalle structurale 100% béton).

De plus, cette solution génère des économies connexes liées à l’érection du bâtiment. La structure de bois étant construite en début de chantier (poutres, colonnes, dalle de NLVL), il est possible de marcher sur la dalle de bois et de réaliser plus facilement les travaux de préparation à la coulée du béton. La dalle de NLVL agit également en tant que coffrage et réduit ainsi le nombre d’étais temporaires nécessaires. Dans le cas de ce projet, une seule rangée d’étais était prévue, au centre de la portée. Enfin, grâce à des aires de travail plus libres (peu d’étais), et un système de plancher étanche (dès la coulée du béton), il était possible pour les sous-traitants des systèmes intérieurs de débiter leur travail beaucoup plus rapidement, réduisant donc les délais de construction. Ces économies sont intégrées dans notre analyse de coûts.

2.2.2 Échéancier global et durée

Le projet a duré 24 mois et s’est déroulé selon l’échéancier ci-dessous. Le bâtiment a été mis en service en décembre 2018, après 9 mois de construction.

2016		2017		2018																					
12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Étude de faisabilité			Conception – Plans et devis préliminaires						Plans et devis définitifs					Appel d'offres		Construction									

2.2.3 Budget global

Le coût global du projet est de ± 2 200 000 \$.

2.2.4 Partenaires

Jodoin Lamarre Pratte Architectes Inc. : Conception architecturale; collaboration avec l'ingénieur en structure et le fabricant de bois pour le développement de la solution innovante; gestion de la documentation à fournir au MFFP.

SDK et associés : Conception intégrée de la structure de bâtiment en collaboration avec le fabricant de bois pour intégration de la solution innovante dans un système structural hybride bois-béton-acier.

Structure Fusion : Conception, fabrication et installation en chantier des éléments structuraux en bois et en acier. Développement de la solution innovante, et collaboration avec les ingénieurs en structure et les architectes pour une bonne intégration au projet.

Pageau Morel : Conception des systèmes électromécaniques et plomberie intégrés.

JCB Construction : Entrepreneur général, gestion et coordination du chantier de construction.

2.2.5 Défis et risques généraux

Les défis et risques, ainsi que les moyens et stratégies prévus pour les réduire, sont présentés dans le tableau suivant.

Risques	Moyens et stratégies prévus pour réduire les risques
Risques techniques	
Le LVL étant plus dur que le bois d'œuvre standard, une méthode de clouage efficace devait être trouvée.	Des tests avec différents clous et marteaux pneumatiques ont été effectués.
L'épaisseur du LVL québécois étant inconstante, la production d'un panneau de dimensions précises et avec un fini uniforme est difficile.	Différentes méthodes pour négocier avec ces imprécisions ont été étudiées.
La légèreté du bois rend difficile l'atteinte des critères de vibration minimaux sans l'ajout d'une chape de béton, ce qui aide aussi beaucoup à l'acoustique (masse + couches diverses).	L'utilisation du béton en composite avec la dalle de bois devient donc économiquement viable.
La solution développée par le sous-traitant en structure est différente de celle incluse aux plans et devis de structure.	Des échanges continus et une coordination fréquente des documents ont été effectués durant le développement du projet, entre l'équipe de structure, d'architecture et le sous-traitant retenu.
Exposition trop longue du bois à l'humidité, développement de moisissures durant la construction.	Une membrane pare-air/pare-pluie a été laminée en usine sur les dalles de NLVL, assurant une protection supplémentaire au chantier. Un suivi journalier a été effectué par le surveillant de chantier en architecture afin d'assurer le contrôle, et une protection supplémentaire a été appliquée au besoin.
Problèmes d'érection en chantier de la structure de bois et d'acier, dû à un manque de coordination.	La réalisation de la structure bois et acier a été confiée au même sous-traitant afin de limiter les risques.

Conditions de sol différentes de celle anticipées, modifiant la structure et le coût de construction.	Des tests de sol complets ont été réalisés en début de projet et plusieurs forages ont été effectués sur le site afin de diminuer ce risque au minimum.
Deux colonnes structurales sont apparentes au rez-de-chaussée, exposées aux intempéries et au chocs potentiels des voitures et du déneigement.	Les deux colonnes apparentes ont été réalisées en acier et recouvertes de béton afin de maximiser leur durée de vie et offrir une protection aux chocs.
Risques financiers	
Les soumissions reçues dépassent le budget du client.	Une entente a été prise avec le sous-traitant lors de la réalisation des plans et devis sur un prix maximum garanti. Les pistes de réduction de coût ont été incluses au fur et à mesure du développement du projet.
Plusieurs situations non prévues surviennent durant la construction et font augmenter significativement les coûts de construction.	Des contingences de chantier de 10% ont été prévues sur le projet. La terrasse de bois prévue au toit a également été incluse en prix séparé inclus, ce qui permet de retirer un montant supplémentaire de 20 000\$ sur les coûts sans faire de modifications aux plans ou au contrat de construction.
L'Entrepreneur général fait faillite durant les travaux de construction, et il est requis de changer d'Entrepreneur en cours de chantier, ce qui amène des coûts supplémentaires.	L'appel d'offres a été réalisé sur invitation, à des entrepreneurs généraux reconnus et ayant une bonne viabilité financière. Un cautionnement d'exécution a également été demandé aux documents d'appel d'offres.
Autres risques (réglementaires, légaux, environnementaux)	
Refus d'octroi du permis de construction par la Ville de Montréal.	Plusieurs rencontres ont eu lieu à l'arrondissement Rosemont-La Petite Patrie à Montréal afin de sensibiliser les responsables d'octroi du permis au projet. Le projet a déjà été accepté par le Comité Consultatif d'Urbanisme (CCU).
Retard dans l'ouverture de l'agrandissement, nécessitant la location de nouveaux locaux à proximité.	Des locaux sont disponibles à proximité pour une location temporaire.
Risque réglementaire, en lien avec l'innovation technologique.	Toutes les dimensions des membrures de bois utilisées respectent les exigences minimales du Code de Construction du Québec.
Accessibilité sociale du projet, notamment par les riverains.	Chaque voisin a été rencontré (restaurant adjacent, propriétaire du triplex adjacent) et le projet a été expliqué, ainsi que son échéancier. Il a été indiqué dans les documents de soumission que tous les travaux seraient réalisés durant les heures normales de travaux.

Tableau 2 : Risques et mesures de mitigation

3. Détails de l'étude

3.1 Introduction et hypothèses de départ

Le gouvernement québécois travaille depuis plus d'une décennie au développement d'une stratégie d'utilisation du bois dans la construction au Québec, avec pour objectif d'accroître l'utilisation de ce matériau dans la construction commerciale, institutionnelle, industrielle et multifamiliale, de créer et consolider des emplois, de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de créer des produits du bois à plus haute valeur ajoutée et de contribuer à l'enrichissement du Québec.

En tant que firme d'architecture majeure au Québec, travaillant principalement pour le secteur institutionnel, Jodoin Lamarre Pratte souhaitait tirer parti du projet d'agrandissement de ses propres bureaux pour développer une solution innovante en bois. Ce projet était une opportunité pour l'entreprise de développer ses connaissances dans ce type de système constructif, de réduire l'empreinte environnementale liée à son bâti, et de montrer son soutien à la stratégie québécoise d'utilisation du bois.

L'un des obstacles majeurs au développement de solutions en bois pour des immeubles à vocation non-résidentielle demeure l'aspect financier. Lorsque l'on aborde la possibilité d'une construction en bois d'ingénierie à la grande majorité des professionnels de l'industrie, ils sont régulièrement freinés par le surcoût qui lui est habituellement associé. Une brève analyse des projets majeurs réalisés en bois ces dernières années — par exemple ceux présentés dans les études de cas ou encore la section « Pourquoi construire en bois ? » du site internet de Cécobois (Cécobois, 2019) — permet de voir que l'argument économique ne figure pas à l'avant-plan des raisons poussant à construire en bois. Jodoin Lamarre Pratte architectes est une entreprise de type PME et ne dispose que de ressources financières limitées. L'optimisation des coûts pour son projet d'agrandissement était donc un enjeu important, et l'intégration d'une structure de bois allait devoir faire l'objet d'une étude approfondie de la solution la plus appropriée aux paramètres du projet.

Les bureaux existants sont composés de la bâtisse industrielle de 1928 et de l'agrandissement sur la rue Dézéry de 2008, qui sont des bâtiments en structure de béton. Il aurait donc semblé naturel de construire ce second agrandissement selon le même système constructif. La construction d'un agrandissement en structure de béton constitue donc notre « scénario de base », et la problématique à laquelle nous souhaitons apporter des éléments de réponse par le biais de cette étude était la suivante :

« Est-il possible de construire un bâtiment à vocation commerciale en structure de bois, à un coût inférieur ou égal à celui d'une structure de béton » ?

Pour répondre à cette question, et trouver la solution la plus adaptée à notre projet d'agrandissement, nous avons rencontré la société « Structure Fusion », une entreprise spécialisée dans la conception, la fabrication et l'installation de structures de bois massif et de structures hybrides et avons étudié plusieurs scénarios possibles pour la composition structurale du bâtiment soit :

- Une structure en CLT
- Une structure en NLT
- Une structure hybride : dalle structurale en NLVL avec poutres et colonnes de bois lamellé-collé
- Une structure hybride : dalle structurale en NLVL et système DELTABEAM² de Peikko

² Poutre composite d'acier creuse, rempli de béton au chantier.
<https://fr.peikko.ca/produits/deltabeam-slim-floor-structures/technical-information/>

3.2 Objectifs

L'objectif de cette étude était de réaliser une analyse comparative de coûts entre une structure en béton (scénario de base) et une structure en bois, afin de construire l'agrandissement des bureaux de Jodoin Lamarre Pratte architectes (bâtiment à vocation commerciale de trois étages) à un coût inférieur ou égal à celui d'une structure de béton.

3.3 Méthodologie

Les méthodologies que nous avons employées pour réaliser l'étude comparative des coûts et la réalisation du projet de construction sont principalement les suivantes :

- ISO 9001:2015 — Systèmes de management de la qualité (ISO, 2015)
- ISO 14064-2:2019 — Gaz à effet de serre – Partie 2 : Spécifications et lignes directrices, au niveau des projets, pour la quantification, la surveillance et la rédaction des rapports sur les réductions d'émission ou les accroissements de suppressions des gaz à effet de serre (ISO, 2019)
- ASTM E1557-09 — Standard Classification for Building Elements and Related Sitework – Unifomat II (ASTM International, 2015)
- Le processus de conception intégrée (PCI)

Les autres documents de référence que nous avons utilisés pour l'estimation des coûts de construction sont principalement :

- Building Construction Costs with RSMeans Data 2018, Stephen C. Plotner, Gordian®. (Plotner, 2018)
- Yardsticks for Costing 2017, Hanscomb, RS Means, Gordian® (Hanscomb, 2017)

3.3.1 ISO 9001:2015

Jodoin Lamarre Pratte est accréditée ISO 9001 depuis 1998. À ce titre nous avons développé un manuel de gestion de la qualité, maintenu à jour chaque année, dans lequel sont établis :

- Les engagements de la Direction et des employés de Jodoin Lamarre Pratte architectes pour la livraison de services professionnels d'excellence, et l'aboutissement à une qualité du produit fini, qui satisfait les exigences de nos clients.
- Les prescriptions nécessaires à l'établissement d'un Système Qualité qui visent principalement à réduire les erreurs et non-conformités par une plus grande maîtrise de nos procédés.
- Un processus de développement des projets visant une amélioration continue de la qualité de nos services, par un suivi efficace des étapes de planification et de réalisation, tout en implantant les meilleures pratiques de projet en projet réalisé.

Cette méthodologie est appliquée à tous nos projets, dont le projet d'agrandissement de nos bureaux.

3.3.2 ISO 14064-2:2019

Cette norme comprend des exigences pour la planification d'un projet ayant pour but de réduire les émissions de gaz à effets de serre (GES), pour l'identification et la sélection des sources, des puits et des réservoirs de GES pertinents pour le projet et le scénario de référence, ainsi que pour la surveillance, la quantification, la documentation, le rapport de réalisation du projet GES et la gestion de la qualité des données. Dans le cadre de ce projet, l'utilisation de la norme ISO 14064-2 est encadrée par le « Protocole de quantification des émissions de gaz à effet de serre attribuables à la fabrication de matériaux de structure pour divers scénarios de bâtiments ».

3.3.3 ASTM E1557-09 — Unifomat II

Nous utilisons la norme Unifomat II pour réaliser les estimations des coûts de construction et leur évolution au fur et à mesure que le projet se précise. Cette classification normée des différents items composant un système de construction (infrastructure, superstructure et enveloppe, aménagement intérieur, services, équipements et ameublements, etc.), eux-mêmes découpés en sous-items, permet un suivi précis et détaillé des coûts de chaque élément du projet. C'est selon cette méthodologie que nous avons procédé à l'analyse des coûts des différentes hypothèses possibles et réalisé la comparaison entre les coûts du scénario de base et ceux de la solution choisie.

3.3.4 Processus de conception intégrée

Le processus de conception intégrée consiste en une approche holistique à la conception des bâtiments. C'est une méthode différente et intentionnelle d'aborder la conception que nous utilisons dans de nombreux projets institutionnels majeurs et qui fait désormais partie intégrante de notre pratique. Nous avons donc utilisé ce processus dans le développement du projet d'agrandissement de nos bureaux en intégrant les parties prenantes suivantes : l'équipe d'architectes et techniciens affectés au projet, les usagers du bâtiment (représentés par la Direction), les ingénieurs en structure, le concepteur / fabricant / installateur de la structure de bois et le MFFP. Ce dernier a principalement été impliqué dans le cadre de la participation de ce projet au Programme de vitrine technologique pour les bâtiments et les solutions innovantes en bois.

Le PCI est guidé par des objectifs fonctionnels, environnementaux et économiques clairement définis et il couvre le cycle de vie d'un bâtiment. Il prend la forme d'ateliers de conception intégrée tout au long du développement du projet. Pour le projet ici-visé, nous avons mené cinq ateliers de conception intégrée :

1. Établir les critères de conception (objectifs fonctionnels et environnementaux)
2. Volumétrie conceptuelle : scénarios structuraux possibles
3. Analyse des options selon les critères de conception, les objectifs économiques et les exigences techniques
4. Gestion du risque financier et évaluation de la possibilité d'obtenir une subvention
5. Retour et compte-rendu de l'expérience vécue par le fabricant de bois

3.3.5 Déroulement de l'étude

Avec ces outils méthodologiques en main, notre étude s'est déroulée en huit grandes étapes présentées ci-après.

3.3.5.1 Étape 1 : Établir les critères de conception du projet

La première étape consistait à établir les critères de conception pour le projet. Cette étape visait à établir des grands principes, ou objectifs conceptuels, à atteindre pour la réalisation de ce projet d'agrandissement.

Ces critères ont été déterminés par le biais d'un premier atelier de conception PCI, et sont les suivants :

- Bâtiment de trois étages, en continuité avec la volumétrie du bâtiment existant, pour une superficie brute totale de plus ou moins 500 m².
- Alignement des étages en lien direct avec le bâtiment existant
- Respect des gabarits imposés par la réglementation municipale (alignement en façade, hauteur maximale, taux d'implantation, etc.)
- Flexibilité de l'espace et des aménagements
- Résistance au feu de 45 minutes entre les étages
- Assemblage mince et performant maximisant la hauteur libre sous dalle
- Qualité acoustique propice aux aires administratives ouvertes (réduction des bruits aériens et des bruits d'impact)
- Éclairage naturel maximisé (possibilité de mur-rideaux en façade)
- Empreinte carbone réduite

3.3.5.2 Étape 2 : Établir les objectifs financiers du projet

Une fois ces critères de conception définis, il a fallu établir des objectifs financiers pour le projet. Comme mentionné précédemment, l'aspect économique est rarement l'argument phare en faveur d'une construction en bois et si nous décidions d'aller vers ce type de solution, il convenait d'établir des limites budgétaires précises encadrant cette solution.

Notre scénario de base étant celui d'une construction en structure de béton, nous avons rassemblé des données historiques d'estimations, associées à la section B10 d'Unifomat II. Elles couvrent les coûts directs associés à la structure et excluent les coûts indirects, comme les frais d'administration et de profit de l'entrepreneur général. Ces données proviennent de trois sources :

- Les données du marché actuel, fourni par l'ingénieur en structure selon son expérience sur des projets similaires
- Les coûts réels de l'agrandissement de 2008, indexés selon les données du gouvernement fédéral (Statistiques Canada, 2018)
- Des données théoriques tirées de « Yardsticks for Costing 2017 » (Hanscomb, 2017)

Ces trois sources proposent les coûts suivants :

Source	Coût (\$ / m ²)
Données du marché actuel (ingénieur en structure)	375
Coût réels indexés (agrandissement de 2008)	516 (400 x 1,29)
Données théoriques (Yardsticks)	448

Tableau 3 : Coût d'une structure de béton selon différentes sources

Nous avons ensuite fait la moyenne de ces différentes sources soit : $\text{coût moyen} = \frac{375+516+448}{3} = 448$.

La cible budgétaire initiale pour la structure de l'agrandissement (ligne B10 de l'estimation Unifomat II) a donc été établie à 450 \$/m².

3.3.5.3 Étape 3 : Développement d'une volumétrie conceptuelle

Une fois les critères de conception et les objectifs financiers définis, nous avons, par le biais d'un second atelier de conception intégrée, développé une volumétrie conceptuelle. Cet atelier a principalement consisté en un échange préliminaire entre les architectes et les ingénieurs en structure afin d'évaluer les différents scénarios structuraux possibles pour le projet d'agrandissement, permettant par la suite de faire une analyse de coûts des différentes options.

3.3.5.4 Étape 4 : Analyse des options

Cette quatrième étape a donné lieu au troisième atelier de conception intégrée, tenu entre le client, les architectes, les ingénieurs, et le fabricant / concepteur Structure Fusion. L'objectif de cet atelier était de déterminer quelles options respectant les limites budgétaires, la volumétrie et les critères de conceptions établis étaient envisageables pour l'intégration d'une structure en bois d'ingénierie dans le projet de construction.

Le fabricant / concepteur et l'ingénieur en structure ont présenté les différents systèmes structuraux en bois d'ingénierie, leurs avantages et inconvénients respectifs ainsi que leur coût total pour le projet. Ces coûts ont été estimés par Structure Fusion sur les bases de la volumétrie conceptuelle (maquette 3D) fournie par les architectes. Cette présentation est résumée dans le tableau ci-dessous :

SYSTÈME	COÛT	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
CLT	303 000\$	Utile pour portées bidirectionnelles	Non rentable pour les dalles unidirectionnelles avec béton composite, à cause des plis transversaux inutilisés dans la direction perpendiculaire à la portée et du déplacement de l'axe neutre dans le système.
NLT	249 500\$	Utile pour dalle composite unidirectionnelle	Le problème de cette application se pose lorsque l'on a des longues portées avec une face apparente. Cela a pour effet de faire passer l'épaisseur à 190 mm faisant ainsi considérablement augmenter le coût de la fibre. Le fait d'avoir une face apparente élimine aussi les possibilités d'avoir de la flache. L'approvisionnement est plus difficile, spécialement pour les projets d'envergure. Bois provient majoritairement de l'extérieur du Québec. Impossible de se procurer du 2" x 8" de 8 mètres, la production devient alors plus complexe et nécessite des joints en longueur.
NLVL + poutres bois lamellé-collé (hypothèse retenue)	217 000 \$	Possibilité de produire le LVL aux dimensions prêtes pour la fabrication, donc sans joints en longueur et à l'épaisseur de dalle désirée sans augmenter le coût de la fibre. Subvention potentielle auprès du MFFP pour développement d'une solution innovante.	Nouveau type d'assemblage, données inconnues au moment de la prise de décision.
NLVL + poutres peikko (delta beams)	246 000 \$	Maximise l'espace sous la dalle de bois car aucune poutre en-dessous.	Problématique liée à l'intégration de portes-à-faux, coût élevé des poutres Peikko (>30 000\$).

Tableau 4 : Présentation de divers systèmes structuraux en bois d'ingénierie

Cette rencontre a également été l'opportunité d'évaluer la possibilité d'avoir recours à un nouvel assemblage, en utilisant ce projet comme prototype, tant pour l'architecte que pour le fabricant. Les arguments en faveur de cette solution étaient la qualité d'expert du client (Jodoin Lamarre Pratte architectes), l'échelle de projet facile à gérer et la flexibilité de l'échéancier. De plus développer une solution innovante en bois ouvrait la possibilité d'obtenir une subvention du MFFP au titre du Programme de vitrine technologique pour les bâtiments et les solutions innovantes en bois.

3.3.5.5 Étape 5 : mesures de gestion du risque financier

Lors d'un quatrième atelier PCI, nous avons présenté l'hypothèse retenue au comité du MFFP pour évaluer le potentiel d'obtention d'une subvention, et les programmes qui pourraient s'appliquer à la solution mise de l'avant. Cet atelier a été réalisé en présence du client, des architectes, du fabricant de bois et des représentants du MFFP.

De plus, la solution sélectionnée étant un nouvel assemblage, présentant plusieurs variables inconnues au niveau de la fabrication du produit fini, une entente a été conclue entre Jodoin Lamarre Pratte architectes et Structure Fusion afin d'établir un partenariat pour le développement de la structure de bois.

3.3.5.6 Étape 6 : Arrimage des coûts et des solutions conceptuelles

Une fois la solution innovante sélectionnée (voir 2.1.1) le développement des plans et devis s'est fait en partenariat constant avec Structure Fusion. Celui-ci était présent à toutes les rencontres de coordination entre les architectes et les ingénieurs en structure, permettant l'échange d'information et la validation itérative des principes structuraux établis par l'ingénieur de Structure Fusion et l'ingénieur de SDK.

L'estimation des coûts a également été un processus itératif, réalisé en collaboration étroite entre les architectes, les ingénieurs et le fabricant. Ce travail a tout d'abord permis d'orienter les décisions conceptuelles et structurales, comme par exemple le choix du type de système structural pour la cage d'escalier, le choix des matériaux pour les murs de contreventement, l'intégration du traitement acoustique, etc. L'estimation a ensuite été ajustée et revalidée par Structure Fusion lors du dépôt des plans et devis définitifs à 50% d'avancement.

En parallèle, les détails du scénario de base (structure de béton) ont été affinés dans le cadre du développement du rapport pour la quantification de la réduction des émissions de GES du projet (Jodoin Lamarre Pratte architectes, 2019). Les mêmes hypothèses que celles utilisées pour ce rapport ont été utilisées pour développer l'analyse de coûts comparative.

3.3.5.7 Étape 7 : Retour d'expérience par Structure Fusion

Une fois le projet construit, une rencontre a été organisée avec Structure Fusion afin que le fabricant puisse faire un compte-rendu de son expérience sur ce projet innovant. Ce cinquième et dernier atelier PCI rencontre a notamment permis de mieux comprendre les difficultés rencontrées par le fabricant dans la production de la dalle de NLVL, la non-atteinte de ses objectifs de rentabilité et les possibilités d'amélioration du processus de fabrication pour d'éventuels projets futurs.

3.4 Résultats et analyse

Cette section présente les résultats de notre étude de coûts comparative dont l'objectif était de répondre à la question suivante : « **Est-il possible de construire un bâtiment à vocation commerciale en structure de bois, à un coût inférieur ou égal à celui d'une structure de béton** » ?

3.4.1 Analyse des coûts directs

Comme expliqué précédemment, l'estimation des coûts et l'arrimage des objectifs financiers avec les solutions conceptuelles et structurales a été un processus itératif, affiné au fur et à mesure du développement du projet. Le tableau ci-dessous présente les coûts associés aux options possibles pour divers éléments du projet de construction, et les décisions prises suite à cette évaluation financière.

ÉTAPE	THÈME À L'ÉTUDE	COMMENTAIRES SF	COÛTS ASSOCIÉS	DÉCISIONS
2017-10-31 Plans définitifs	Structure mur de contreventement axe G (acier ou bois)	Le mur étant relativement étroit, il serait plus simple de le construire en acier car les connexions avec le CLT seront complexes.	Inclus dans le coût de la structure	Mur de contreventement de l'axe G à faire en acier
2017-11-27 Plans Définitifs	Intégration du traitement acoustique (profilé nervuré). Alternances simple ou double et continuité du profilé	Le coût du profilé nervuré est le même qu'il s'agisse d'une alternance simple ou double. Surcoût si le profil n'est pas cannelé sur toute la longueur.	Ajout de 31,74 \$ / m ² de la dalle NLVL (+ 11 000 \$)	Profil cannelé à alternance double, sur toute la longueur des panneaux de NLVL
2017-11-27 Définitifs	Structure de la cage d'escalier (acier ou bois)		CLT : 39 304 \$ Acier : ± 55 104 \$	Structure de la cage d'escalier en CLT
2017-12-05 Définitifs	Structure du soffite (acier ou bois)	Nécessité d'une structure en acier pour soutenir le mur-rideau vu la configuration du bâtiment	+/- 18 000 \$ (non-prévu dans l'estimation initiale)	Structure du soffite en acier
2017-12-22 Définitifs	Grade visuel murs de CLT (Surcoût associé à un grade « fini » pour la face exposée des panneaux de CLT)		2 600 \$ (2 panneaux grade « fini ») 3 780 \$ (soufflages gypse)	Laisser CLT apparent plus économique, mais finalement recouvert pour une question d'uniformité esthétique.

Tableau 5 : Estimations partielles reliées aux décisions de conception

Nous avons ensuite pu réaliser l'étude comparative des coûts entre le scénario de référence (développé dans le rapport de quantification des émissions de GES) et le projet construit. Ces coûts sont présentés au Tableau 6.

	SUPERFICIE	SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE EN BÉTON			PROJET CONSTRUIT BOIS-BÉTON-ACIER		
	m ²	\$ / m ²	\$	Méthodologie	\$ / m ²	\$	Méthodologie
Concept Cont. design 20% Cont. chantier 10%	464	495	229 680	Coût théorique + contingences	582	270 104	Prix budgétaire fourni par SF en 07/2017 + contingences
Préliminaires Cont. design 10% Cont. chantier 10%	464	460	213 440	Coût théorique + contingences	528	244 788	Prix budgétaire fourni par SF en 09/2017 + contingences
Définitifs 50% Cont. design 5% Cont. chantier 10%	516	439	226 524	Coût théorique + contingences (5% contigence design utilisée)	514	265 211	Estimation validée par SF 11/2017 + contingences
Définitifs 100% Cont. chantier 10%	516	439	226 524	Coût définitifs 50% (incluant cont. utilisée et cont. chantier)	513	264 502	Estimation définitive + contingences
Soumission Cont. chantier 10%	516	483	249 120	Coût définitif 100% + majoration marché *	592	305 418	Coût de soumission réel + contingences
Chantier	516	483	249 120	Coût soumission (incluant 10% changements chantier)	554	286 098	Coût final des travaux ³

Tableau 6 : Comparatif des coûts directs de structure

³ Ce coût a été obtenu en ajoutant au coût de soumission les deux directives de chantier concernant la structure (valeur 8 445 \$).

* Lors de l'ouverture des soumissions, la proposition de prix du plus bas soumissionnaire conforme pour la structure était de 277 653 \$, soit 15% de plus que l'estimation finale. Cette hausse n'est pas anormale vu les conditions actuelles du marché et aurait probablement été présente si le projet avait été construit en béton. On peut néanmoins considérer que le caractère innovant du produit est un facteur supplémentaire de hausse des coûts. Nous avons donc appliqué une majoration de 10% entre le montant de l'estimation finale et le coût de soumission pour le scénario de base.

Prendre note que les coûts indiqués dans le Tableau 6 incluent les coûts directs de la superstructure (Section B10 d'Unifomat II), ainsi que les pourcentages d'augmentation des coûts associés aux contingences de design et contingences de chantier telles que décrites ci-après :

Contingences de design (Cont. design) : dans des projets typiques, une variation de coûts d'environ 10% est à prévoir entre le préliminaire et le définitif. Cette variation, généralement à la hausse, est souvent due à des demandes supplémentaires du client (ajouts au programme) et/ou au fait que les interventions se précisent dans les différentes disciplines (mécanique-architecture-structure) amenant des ajouts dans les autres disciplines. Les résultats des études des laboratoires obtenus entre temps peuvent également engendrer des ajouts dans toutes les disciplines (sols contaminés, état des sols en place, niveaux du roc en place, amiante, plomb, moisissures...)

Contingences de chantier (Cont. chantier) : nous avons appliqué une majoration de 5% au coût de soumission pour obtenir le coût de construction du scénario de base afin de refléter les changements ayant lieu au chantier. Pour le projet construit, le taux de variation réel est de 3%. La structure étant préfabriquée en usine, il est raisonnable de penser que la variation entre le coût soumis par le fabricant et le coût d'installation serait moins importante que pour une structure de béton.

L'écart entre le coût de la structure de béton (249 120 \$ ou 483 \$/m²) et la structure hybride (286 098 \$ ou 554 \$/m²) est de 15%.

Le graphique ci-dessous présente les données du Tableau 6 sous forme d'histogramme. Pour la structure hybride, les données liées à des décisions de conception spécifiques ont été isolées. Ces deux décisions principales sont :

- L'ajout du profil nervuré pour la dalle NLVL (+ 11 000 \$)
- La construction de la structure d'acier afin de supporter le mur rideau et laisser les colonnes en retrait pour créer un volume en saillie sur la rue Rachel (+ 18 000 \$).

En excluant ces deux items de la comparaison, l'écart entre le coût de la structure hybride (257 083 \$ ou 498 \$/m²) et celui de la structure du scénario de base (249 120 \$ ou 483 \$/m²) n'est plus que de 3%.

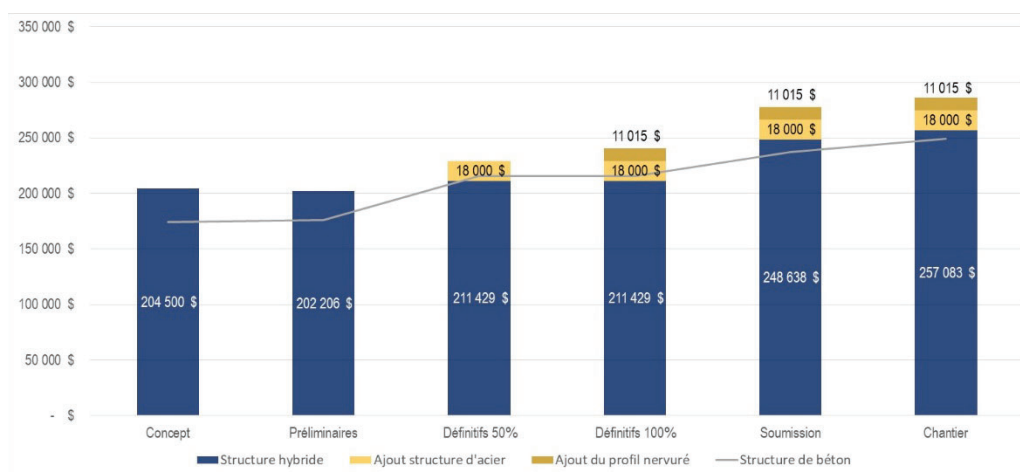


Figure 5 : Graphique comparatif des coûts directs de structure

Il est cependant difficile d'exclure ces deux items, tant ils sont imbriqués dans le processus de conception. Malgré les coûts supplémentaires engendrés par ces modifications, elles ont été apportées afin d'obtenir un produit fini exemplaire et répondant aux besoins autant techniques qu'esthétiques. La subvention du MFFP a également permis d'explorer davantage les capacités du produit développé et les limites de son application.

3.4.2 Analyse des coûts indirects

Alors que les Tableaux 4, 5 et 6 ainsi que la Figure 5 présentent une analyse de coûts comparatives pour les coûts reliés à la superstructure (Section B10 d'Uniformat II), il est également possible de s'intéresser aux coûts indirects, sur lesquels les choix de systèmes structuraux ont un impact. Nous avons distingué deux coûts indirects principaux :

- Les coûts de temps de chantier pour le montage de la structure
- Les coûts d'intégration d'un traitement acoustique

Le temps de montage de la structure hybride a été similaire à celui d'une structure en NLT, puisque le nombre de levées était comparables. Cependant, il a été réduit de plusieurs semaines par rapport à celui nécessaire pour l'érection d'une structure de béton. Ces coûts sont présentés dans le tableau suivant.

	SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE EN BÉTON	PROJET CONSTRUIT BOIS-BÉTON-ACIER	ÉCART
Temps de montage	± 28 jours de coffrage (étalement et coffrages de dalles) et bétonnage	10 jours montage structure bois	
	28 jours de cure	25 jours coffrage partiel, bétonnage, cure	
	± 56 jours	35 jours	21 jours
Coût journalier moyen	850 \$ ⁴	850 \$	
	47 600 \$	29 750 \$	17 850 \$

Tableau 7 : Comparatif des coûts associés au temps de montage de la structure

	SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE EN BÉTON	PROJET CONSTRUIT BOIS-BÉTON-ACIER	ÉCART
Type de traitement acoustique	Tapis en rouleau standard	Profilé nervuré sur dalle de NLVL	
Superficie	347 m ²	347 m ²	
Coût au m ²	60 \$ ⁵	31,74 \$	28,26 \$
Coût total	20 820 \$	11 015 \$	9 805 \$

Tableau 8 : Comparatif des coûts associés au traitement acoustique

⁴ Coût journalier moyen (approximatif) pour administration, profits et organisation de chantier selon données du projet construit

⁵ (Plotner, 2018)

Les données de ces deux tableaux sont présentées dans le graphique ci-dessous.

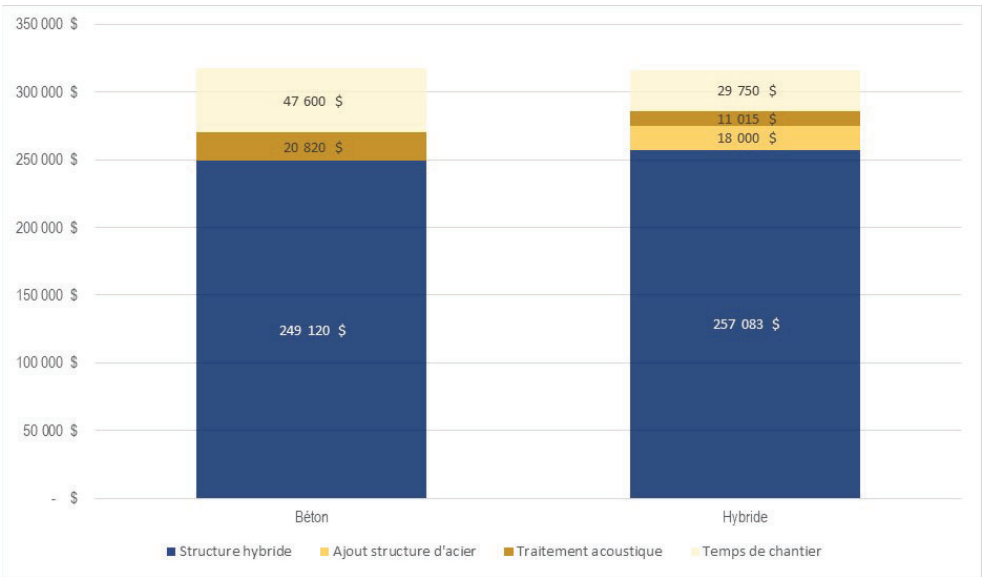


Figure 6 : Coût comparés incluant les coûts indirects

Lorsqu'on prend en compte les coûts indirects, l'écart de coût entre la structure hybride et la structure de béton diminue considérablement. **La structure hybride (315 848 \$) devient même légèrement moins chère (-0,5 % ou 1 692 \$) que le scénario de base (317 540 \$).**

3.5 Conclusions

Ce projet innovant en structure hybride bois, acier, béton a été l'opportunité non seulement d'explorer les possibilités d'un nouvel assemblage, le NLVL, mais également de mettre en valeur du LVL de grade 1.55E, un produit sous-utilisé dans le marché actuel.

Cet agrandissement des bureaux de Jodoin Lamarre Pratte architectes, qui se veut une vitrine d'innovation technologique, a également été l'opportunité de mener une étude de coûts détaillée, afin de savoir s'il était possible de construire un bâtiment en structure de bois à un coût égal ou inférieur à celui d'une structure de béton.

Les résultats présentés distinguent trois comparaisons possibles entre la structure hybride et le scénario de base. (1) En incluant uniquement les coûts directs de la structure (ligne B10 d'Unifomat); (2) En soustrayant aux coûts directs de la structure hybride les surcoûts liés à des décisions conceptuelles spécifiques; (3) En incluant dans la comparaison des coûts indirects liés aux choix des systèmes structuraux. Les trois résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau ci-dessous (coûts au chantier).

	SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE EN BÉTON	PROJET CONSTRUIT BOIS-BÉTON-ACIER	ÉCART	
	\$	\$	\$	%
Coûts directs de la structure	249 120	286 098	36 978 \$	15
Coûts de la structure moins les surcoûts associés à des décisions conceptuelles	249 120	257 083	7 963 \$	3,2
Coûts directs et indirect de la structure	317 540	315 048	-1692 \$	-0,5

Tableau 9 : Synthèse des résultats de l'étude

Ces trois analyses mènent à des résultats assez différents, et montre qu'il est difficile de tirer des conclusions définitives quant à l'écart exact de coûts entre la structure hybride et le coût d'une structure similaire en béton. En effet tout projet de construction comporte son lot d'incertitude, et la variation de coûts peut dépendre d'une multitude de facteurs qu'il n'est pas nécessairement évident d'isoler, ou d'appliquer au scénario de base. Cette étude propose néanmoins une analyse financière sur un projet construit, et viens ainsi combler un manque dans la littérature actuelle, qui jusqu'à présent s'est davantage intéressée aux avantages environnementaux, esthétiques, ou de bien-être des usagers que peuvent présenter des constructions en bois.

3.6 Retombées et rayonnement des solutions développées et potentiel de reproductibilité pour l'industrie

La solution innovante développée, soit des dalles structurales composites NLVL + béton sur charpente de bois lamellé-collé, est une bonne option pour augmenter la distance entre les axes des éléments de support (poutres et colonnes) par rapport à celle qu'on pourrait atteindre avec des dalles de NLVL ou de NLT non composites. Les portées sont ainsi similaires à celles d'une structure tout béton, pour lequel l'épaisseur totale des dalles auraient été plus importante. Cet assemblage est donc une option intéressante si l'apparence du bois est recherchée avec peu de colonnes tout en limitant la déformation et les vibrations.

Bien que le recours au LVL pour la fabrication de dalles composites bois/béton s'avère avantageux d'un point de vue structural, à savoir qu'il permet des planchers plus minces pour une même portée, une utilisation plus large ou plus économique ne peut être envisagée sans que la variation d'épaisseur des pièces de LVL ne soit d'abord adressée.

Malheureusement, le procédé actuel de fabrication du LVL ne permet pas d'envisager des pièces sans variations d'épaisseurs.

Si ce produit s'avère intéressant pour le marché, des investissements en équipements (moulurière, couteaux pour la colle, équipements de manutention) devront être considérés avant de pouvoir aller de l'avant avec la fabrication de ce produit.

Du point de vue du fabricant de bois, la fabrication des panneaux NLVL s'est avérée plus laborieuse que prévue sa rentabilité est discutable :

- Les panneaux ont été trop lourds pour les équipements et ont ajouté beaucoup de temps de manipulation.
- Le LVL est beaucoup plus difforme que ce qui était prévu et les heures usine de calibrage n'étaient pas comptées.
- L'usure de la machinerie et des couteaux pour le calibrage a aussi coûté beaucoup plus cher qu'escompté.

En effet, les pièces de LVL variaient en épaisseur ce qui a nécessité leur rabotage afin d'uniformiser leur épaisseur et pour assurer la rectitude des panneaux une fois assemblés. Le LVL par la nature de sa fabrication n'a pas une épaisseur constante : un 44 mm nominal aura en réalité entre 40 et 48 mm, parfois le spectre complet dans une même pièce. Le LVL est pressé à pression constante et non pas à épaisseur constante. Ce fait a obligé le fabricant de bois à calibrer 100% des lamelles de LVL.

L'opération de rabotage s'est révélée compliquée étant donné la présence de rangs de colle sous les premières couches de placage mince ainsi que la présence de cire de scellement sur certains lots de LVL. Puisque la colle utilisée contient des agents de remplissages tel le "COCOB", de la farine d'écaille de noix et autres, elle est extrêmement abrasive. Ceci use les couteaux traditionnels extrêmement rapidement et limite la production quant aux vitesses de rabotage et aux épaisseurs de matériel qui peuvent être enlevées à chaque passe. Chaque lamelle a donc dû passer entre 2 à 5 fois par l'étape de rabotage. Un affûtage plus fréquent des couteaux et leur dégomment a été nécessaire. Le planage des lamelles a fait apparaître également de la colle de couleur foncée à une multitude d'endroit sur les faces du LVL, ce qui peut être un enjeu visuel potentiel pour certains clients.

Le design des panneaux nervuré a demandé beaucoup de minutie (en dessin et en production) pour que les lamelles s'enchaînent de façon à ne pas rompre l'alternance souhaitée. Du fait de ce design particulier, les panneaux ont été fabriqués "à l'envers", soit la face visible vers le haut. Cette contrainte a engendré de la manutention supplémentaire. Compte tenu du poids du LVL qui est sensiblement plus dense (donc plus lourd) que le bois ÉPS (épinette-pin-sapin), le poids des plus gros panneaux (224 mm d'épaisseur) en faisait les plus lourds réalisés à ce jour et les équipements du fabricant de bois étaient en limite de capacité pour la manutention. Pour l'ensemble de ces raisons, le temps de fabrication des panneaux, qui devait être plus rapide que le NLT conventionnel, s'est avérée beaucoup plus long et coûteux.

Cependant, si ces enjeux de fabrication sont adressés, ce nouvel assemblage propose des opportunités intéressantes. Il crée notamment un nouveau débouché pour le LVL de grade 1.55E, un produit actuellement sous-utilisé sur le marché. Ce nouveau débouché permettrait de réduire les pertes dans l'industrie du bois, et pourrait aider l'industrie du LVL Québécois à augmenter sa rentabilité de façon significative. De plus sa fabrication, entièrement en usine présente des pistes intéressantes d'optimisation des coûts. Sa fabrication est réalisée en environnement contrôlé, les aléas climatiques n'ont donc aucun aléa sur le processus de fabrication. De plus, aucun certificat de compétence n'est requis pour le travail en usine, ce qui augmente le bassin de main d'œuvre potentielle.

3.7 Recommandations

Ce projet, par sa nature de prototype, a présenté un certain nombre de défis, tant pour l'équipe d'architectes et d'ingénieurs, que pour le client et le fabricant de bois. Plusieurs pistes d'optimisation sont néanmoins possibles :

- Meilleure connaissance des caractéristiques du NLVL, de ces coûts, ces avantages et inconvénients, permettant de prendre des décisions plus éclairées et plus en amont du processus de conception.
- Développement de tableaux de résistance pour ce système structural afin de guider les concepteurs dans leurs choix.
- Amélioration du procédé de fabrication des dalles NLVL permettant d'améliorer son uniformité, d'accélérer la production et de rendre son coût compétitif.

Concernant l'amélioration du procédé de fabrication une moulurière serait une solution envisageable. Cependant la nature de la colle utilisée pour le LVL (colle phénol résorcinol avec des agents de remplissage très abrasifs) présente des défis supplémentaires pour pouvoir passer le LVL dans une moulurière.

4. Bibliographie

- ASTM International. (2015). ASTM E1557-09. *Standard Classification for Building Elements and Related Sitework - UNIFORMAT II*. West Conshocken, Pennsylvanie, États-Unis: ASTM International.
- Binational Softwood Lumber Council and Forestry Innovation Investment Ltd. (2017). *Nail Laminated Timber, Canadian Design & Construction Guide*.
- Cécobois. (2019). *Étude de cas*. Récupéré sur Cécobois: www.cecobois.com/fr/publications/etude-de-cas
- Hanscomb. (2017). *Yardsticks for Costing*. Rockland: RSMeans, The Gordian Group.
- ISO. (2015). ISO 9001:2015. *Système de management de la qualité*. Récupéré sur ISO: <https://www.iso.org/fr/standard/62085.html>
- ISO. (2019). ISO 14064-2:2019. *Gaz à effet de serre - Partie 2 : Spécifications et lignes directrices, au niveau des projets, pour la quantification, la surveillance et la rédaction des rapports sur les réductions d'émissions ou les accroissements de suppression des GES*.
- Jodoin Lamarre Pratte architectes. (2019). *Rapport de quantification des émissions de gaz à effet de serre dans le cadre du programme de vitrine technologique pour les bâtiment : agrandissement et réaménagement des bureaux de Jodoin Lamarre Pratte Architectes*. Montréal.
- Plotner, S. C. (2018). *Building Construction Costs with RSMeans Data*. Rockland: The Gordian Group Inc.
- Statistiques Canada. (2018). *Indices des prix de la construction de bâtiments, selon le type d'immeuble*. Récupéré sur Statistiques Canada: www150.statcan.gc.ca