



**Reconception structurale d'un complexe  
hôtelier dans un esprit de préfabrication en bois**

**Par Filion Marie-Laure**

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de  
Maître ès sciences appliquées (M. Sc. A.) en ingénierie**

Jury :

Marc Oudjene, Ph. D., Professeur, Université Laval, Membre externe

Romain Chesnaux, Ph. D., Professeur, Université du Québec à Chicoutimi, Membre interne

Carlo Carbone, architecte, M Sc. A, Professeur, École de design, Université du Québec à Montréal,

Codirection

Sylvain Ménard, Ph. D., Professeur, Université du Québec à Chicoutimi, Direction

Québec, Canada

© Marie-Laure Filion, 2024

## RÉSUMÉ

Les propriétés écologiques du bois comparativement à celles des autres matériaux tel que le béton et l'acier font en sorte que son utilisation dans les bâtiments devient de plus en plus essentielle. La conception d'un bâtiment est une activité multidisciplinaire. Dans cette optique, il est important de connaître les enjeux de chaque discipline ainsi que de définir la collaboration nécessaire sur ces bâtiments ayant des particularités différentes.

La préfabrication est un processus dans lequel des parties du bâtiment sont fabriquées en usine puis acheminées via un transporteur au chantier. Ce type de construction a de nombreux avantages et pourrait être utilisé davantage au Québec si les intervenants apprennent comment bien l'aborder.

Ce projet de recherche vise à étudier l'interaction entre l'architecture, le génie industriel et le génie civil dans la conception d'un bâtiment en bois. Plus précisément, il s'agit d'une étude de cas sur le Club Med de Charlevoix afin de voir comment il aurait pu être réalisé en bois massif ainsi qu'en préfabrication de modules volumétriques.

Le contenu présenté dans ce mémoire par article met en évidence les considérations de trois disciplines pour la conception d'alternatives en bois du complexe hôtelier du Club Med de Charlevoix en bois préfabriqué. Un des objectifs est de permettre à l'industrie d'utiliser les conclusions générales obtenues afin de les guider lors de la conception de futurs bâtiments puisque le projet de maîtrise fait partie d'une chaire industrielle de recherche. Le cœur du mémoire est un article publié dans la revue MDPI Building le 19 avril 2023. Le projet faisant partie de la chaire industrielle de recherche sur les bâtiments écoresponsables en bois, il était également important de satisfaire les attentes du partenaire industriel Cima+. Une analyse de cycle de vie sur l'aspect de la construction est également réalisée afin de comparer les trois scénarios (béton, bois massif et préfabrication en bois).

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	i
TABLE DES MATIÈRES .....	ii
LISTE DES TABLEAUX .....	iii
LISTE DES FIGURES .....	iv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	v
REMERCIEMENTS .....	vi
AVANT-PROPOS .....	vii
CHAPITRE 1 .....	1
INTRODUCTION .....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique.....	3
1.3 Objectifs .....	4
1.4 Méthodologie .....	4
1.4.1 Acquisition de connaissances .....	5
1.4.2 Équipe encadrante et partenaire .....	6
1.4.3 Choix des logiciels .....	6
1.4.4 Choix des cas étudiés .....	7
1.4.5 Étapes du projet .....	9
1.5 Originalité de la recherche.....	10
CHAPITRE 2 .....	12
INTRODUCTION À LA PRÉFABRICATION .....	12
2.1 POURQUOI UTILISER LA PRÉFABRICATION.....	12
2.2 POINTS À PRENDRE EN CONSIDÉRATION SUR LA PRÉFABRICATION .....	14
2.3 PRINCIPES DE CONCEPTION .....	17
2.4 NIVEAUX DE PRÉFABRICATION .....	20
2.4.1 PARTICULARITÉS MODULAIRES VOLUMÉTRIQUE.....	22
2.4.2 CONSTRUCTIONS ANTÉRIEURES EN BOIS PRÉFABRIQUÉ .....	24
CHAPITRE 3 .....	26
ARTICLE 1: .....	26
« Analyse de la conception des stratégies du bois massif et du modulaire volumétrique en tant que reconception pour un hôtel déjà existant en béton » .....	26
3.1 PRÉSENTATION DE L'ARTICLE .....	26
3.2 APPORT SCIENTIFIQUE .....	26
3.3 LIEN AVEC LES OBJECTIFS DU MÉMOIRE .....	27
3.4 ÉTAT DE PUBLICATION ACTUEL.....	27
3.5 RÉSUMÉ DE L'ARTICLE.....	27
3.6 INTÉGRALITÉ DE L'ARTICLE.....	28
3.7 CONTRIBUTION DE L'ÉTUDIANTE.....	53
CONCLUSION .....	54
LISTE DE RÉFÉRENCES.....	56

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES ETUDIEES DES DIFFERENTES DISCIPLINES .....	10
TABLEAU 2: CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS TYPES DE PREFABRICATION .....	21
TABLEAU 3: CONSTRUCTIONS ANTERIEURES SIMILAIRES EN BOIS.....	25
TABLEAU 4 : NUMBER AND DIMENSIONS OF ROOM TYPES IN CLUB MED DE CHARLEVOIX .....	34
TABLEAU 5 : COLUMN–SLAB SYSTEM ASSUMPTION OF DIMENSIONS FOR WOODEN COLUMNS COMPARED WITH PLANNED CONCRETE DIMENSIONS .....	35
TABLEAU 6 : DECISION MATRIX FOR THE DIFFERENT ITERATIONS IN COMPLIANCE WITH THE SEVEN PARAMETERS' CRITERIA.....	36
TABLEAU 7 : GRAVITATIONAL LOADS' DESIGN DATA ACCORDING TO NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA (NBCC) (NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA., 2021) .....	38
TABLEAU 8 : PONDERATION FOR THE LOAD COMBINATIONS.....	39
TABLEAU 9 : FLOOR AREA OF EACH STOREY .....	42
TABLEAU 10 : PROPOSED NEW ROOM REPARTITION .....	42
TABLEAU 11 : NEW DIMENSIONS FOR EACH TYPE OF ROOM TO MEET TRANSPORT REQUIREMENTS.....	45
TABLEAU 12: SCENARIO COMPARISON .....	50
TABLEAU 13 : GAS EMISSION OF THE SCENARIOS (GESTIMAT., 2024) .....	52

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: ORGANIGRAMME DE LA METHODOLOGIE UTILISEE LORS DE LA MAITRISE.....	9
FIGURE 2. PHASING OF THE STUDY METHODOLOGY. ....	33
FIGURE 3 : OVERLAPPING WALL PARTITIONS ON THE 8 STOREYS OF THE ORIGINAL CONCRETE PLAN .....	41
FIGURE 4 : OVERLAPPING OF WALL PARTITIONS ON THE 8 STOREYS OF THE NEW PROPOSED MODULAR REPARTITION.....	42
FIGURE 5 : CROSS-SECTION OF A VOLUMETRIC MODULE COMPRISING ROOM/CORRIDOR/ROOM.....	44
FIGURE 6 : CROSS-SECTION OF TWO-STOREY SECTION INCLUDING MODULE/CORRIDOR PANEL/MODULE .....	44
FIGURE 7 : COLUMN–SLAB MODELLING WITH THE SAME GRID AS IN CONCRETE USING THE SOFTWARE RFEM.....	46
FIGURE 8 : STATIC ANALYSIS OF COLUMN–SLAB; VIEW FROM THE SIDE USING RFEM SOFTWARE .....	47
FIGURE 9 : VOLUMETRIC MODULAR MODELLING OF CLUB MED OF CHARLEVOIX USING RFEM SOFTWARE .....	47
FIGURE 10 : STATIC ANALYSIS OF VOLUMETRIC MODULAR MODELLING FOR THE WOODEN HOTEL USING RFEM .....	48
FIGURE 11 : EVOLUTION OF A TRADITIONAL CONSTRUCTION PROJECT; GREEN SOLID LINES REPRESENT CONTRACTS AND RED DOTTED LINES REPRESENT CHECKS.....	49
FIGURE 12 : EVOLUTION OF AN OFF-SITE CONSTRUCTION PROJECT .....	50

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

CIRCERB : Chaire de Recherche sur la Construction Écoresponsable en Bois

CLT : Bois lamellé-croisé (Cross-Laminated Timber)

CNB : Code national du bâtiment

CRSNG (NSERC) : Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (Natural sciences and engineering research council of Canada)

CSA : Association Canadienne de normalisation (Canadian Standards Association)

CWC : Conseil canadien du bois (Canadian Wood Council)

EPS : Épinette-Pin-Sapin

FROG : Réponse flexible à la croissance continue (Flexible Response to Ongoing Growth)

GLULAM ou BLC : Bois lamellé-collé (Glued-Laminated Timber)

LVL : Bois de placage stratifié (Laminated Veneer Lumber)

MEF : Méthode éléments finis

NLT : Bois lamellé-cloué (Nail laminated timber)

WCTE : Conférence mondiale sur l'ingénierie du bois (World Conference on Timber Engineering)

## REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier mon directeur de recherche M. Sylvain Ménard de m'avoir accompagné tout au long de mon parcours et pour les nombreuses opportunités complémentaires qui m'ont été proposées. J'aimerais également remercier mon codirecteur de recherche M. Carlo Carbone pour son transfert de connaissances et sa vision par rapport aux différents systèmes constructifs et la préfabrication.

Je remercie l'équipe du CIRCERB et plus particulièrement M. Pierre Blanchet pour le support logistique et financier relié à ma recherche. Merci également de m'avoir accueilli dans vos locaux pour la deuxième partie de ma maîtrise. Je tiens à remercier mon partenaire industriel du CIRCERB Cima+ et plus particulièrement François Leprince pour leur aide sur la compréhension du projet et leur temps pour m'aider à bien maîtriser les concepts d'ingénierie.

Je veux également en profiter pour remercier Guillaume Bédard-Blanchet de Cecobois pour son temps et son aide lors de mes problèmes de modélisation ainsi qu'Amy Heilig et Alex Bacon de Dlubal pour leur temps et leur aide avec mes différents modèles par éléments finis.

Je remercie mes collègues de cycle supérieur Mohamad Bader Eddin, Erik Nilsson, Alex Mary, Luc Girompaire et Charles Breton pour leurs nombreux conseils sur les études supérieures.

Je tiens à remercier mon copain Frédéric Brunet ainsi que mes parents Bernard Filion et Anne Delisle pour leur support et compréhension tout au long de mon projet. Ils ont été là pour me redonner le courage de surmonter les épreuves qui se présentaient à moi et me donner la force de continuer jusqu'à la fin.

Finalement, je tiens à remercier mes amis que j'ai rencontrés lors de mon année à Chicoutimi. Ils ont rendu ce séjour des plus agréables et m'ont accueilli parmi eux dans de nombreux projets (Megan Bergeron, Marjorie Bouchard, Marie-Béatrice Caron, Samuel Fontaine, Alexandre Leclerc, Antoine Méthot, Benjamin Quessy, Isaak St-Hilaire, et bien d'autres).

## **AVANT-PROPOS**

Ce mémoire est un mémoire par article. Ce faisant, le corps du mémoire est constitué d'un article scientifique. Lors de mes études à la maîtrise en ingénierie, j'ai écrit un article qui a été publié dans une revue avec révisions par les pairs (quatre experts du domaine) ayant un coefficient d'impact de 3.8. Il est présenté dans sa version soumise pour édition puisque les critères de mise en page de la revue scientifique et du mémoire sont différents. La revue littéraire réalisée apparaît donc dans l'introduction de l'article au chapitre 3. Cependant, une mise en contexte et introduction sur le sujet étudié vous sont présentés aux chapitres 1 et 2.

# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

---

## 1.1 Mise en contexte

L'utilisation du bois dans les nouvelles constructions est de plus en plus encouragée au Québec. En effet, la charte du bois existe depuis 2013 et elle a été bonifiée à de nombreuses reprises (Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, 2013). Le programme d'innovation en construction bois est une démonstration de la volonté gouvernementale à encourager le développement de constructions dans ce domaine (Programme d'innovation en construction bois, 2021).

Un nouveau marché est en plein essor : la construction préfabriquée industrielle. Ce marché est plus développé en Europe qu'au Québec et il est intéressant de constater les différences de perception. La croyance populaire en Amérique du Nord est que la préfabrication soit trop coûteuse alors qu'en Europe c'est la construction sur chantier qui est perçue comme trop coûteuse. Cette divergence face à la construction hors site vient de la disponibilité de la main-d'œuvre et du nombre d'usines disponibles à proximité des chantiers (Wimmers., 2021). La préfabrication comporte plusieurs niveaux ayant chacun des variantes (composantes, panneaux préfabriqués et modulaire volumétrique). Plus le niveau de préfabrication est avancé, plus il est possible d'avoir des gains de temps et de coûts lors de la construction (T. Connolly & al, 2018). Étant donné que les constructions non résidentielles en bois sont plus nombreuses en Europe qu'au Québec, la préfabrication est davantage utilisée dans certaines parties de l'Europe (Hansbert., 2021). Certaines usines du Québec produisent déjà des panneaux de bois préfabriqués et avec l'engouement du modulaire volumétrique, elles pourraient donc être modifiées et produire du modulaire volumétrique sans investissement supplémentaire démesuré (Hansbert., 2021).

Cette forte demande sur les industries pour les constructions rapides en préfabrication est produite par l'augmentation de la demande de surface habitable dans le monde (Hansbert., 2021). Les villes ayant des populations en croissance et une crise du logement, les entrepreneurs se doivent de

construire vite afin d'accommoder les gens. Les promoteurs souhaitent également accélérer la construction des bâtiments afin de faire un revenu plus rapidement.

Le bois est un matériau solide, mais ayant une masse volumique inférieure au béton et à l'acier. Lorsqu'il est utilisé en produit d'ingénierie tel que du lamellé-collé, il obtient une résistance supérieure à celle de l'acier pour un poids similaire tout en pouvant atteindre de longues portées. Son faible poids et sa bonne résistance lui apportent un grand attrait puisque ça peut permettre de diminuer la taille des fondations (Thinkwood, 2018). Toutefois, cela amène également le défi de la masse et de la reprise des charges latérales de l'édifice pour les résistances aux efforts sismiques.

Le projet actuel fait partie de la Chaire industrielle de Recherche sur la Construction écoresponsable en Bois (CIRCERB). Il s'agit d'une plateforme académique en étude supérieure qui est jumelée à l'industrie afin de développer des solutions aux enjeux et défis des constructions en bois. Pour ce faire, les activités de recherche sont divisées en trois catégories : concevoir, construire, exploiter. Ce projet se situe dans la catégorie construire.

Le partenaire industriel du projet est Cima+. Il s'agit d'une firme de génie conseil agissant dans les domaines de l'énergie et réseaux électriques, Industries et ressources, Bâtiments, Gestions de projet, Solutions et technologies opérationnelles, Infrastructures, Transport, Environnement et sciences de la terre, Acquisition de données et modélisation et Ingénierie. Dans le cadre de ce projet, c'est la division Ingénierie- Génie civil qui fournit les données de départ et apporte des conseils tout au long du processus. Le projet initial de la chaire de recherche impliquait la paramétrisation et l'optimisation du modulaire volumétrique dans la conception hôtelière. Nous souhaitions pouvoir paramétrer un bâtiment type et programmer un outil qui aurait proposé la conception optimale selon les dimensions souhaitées. Toutefois, le bâtiment à étudier n'était pas conçu pour ce concept et le projet a dû être réorienté afin de pouvoir réaliser une optimisation sur le Club Med de Charlevoix. Le bâtiment n'étant pas uniforme, il n'a pas été possible de réaliser une paramétrisation. Une étude multidisciplinaire du bâtiment spécifique a donc été réalisée.

## 1.2 Problématique

Le Club Med de Charlevoix est une construction dont la conception structurale a été réalisée par la firme CIMA+ de Québec. Constitué de trois bâtiments en béton armé et en acier, le complexe devait préalablement être en bois. Toutefois, face à des difficultés de conception et à un manque de connaissance de l'industrie, le bois a rapidement été écarté des matériaux potentiels.

Étant donné que le développement du village autour du Club Med devrait être fait en bois, il est intéressant d'analyser et de concevoir comment le Club Med aurait pu être réalisé en bois, en mettant l'accent sur la préfabrication.

L'enjeu principal vient du fait que les architectes ont l'habitude de faire des conceptions selon les trames conventionnelles de l'acier et du béton. Présentement, si le client ou l'ingénieur souhaite proposer une solution structurale alternative en bois, cela occasionne une transformation importante des plans, ce qui implique un grand nombre d'heures supplémentaires. Il est donc pertinent de venir mettre en évidence les différences lors de l'utilisation du bois comparativement au béton dans une construction. Il s'agit également d'analyser comment les conceptions de départ en béton peuvent être adaptées pour intégrer du bois.

De manière plus ciblée, la conception en bois peut être faite avec différents niveaux de préfabrication qui engendrent chacun des actes de modifications différents. La problématique scientifique est que les connaissances sur le niveau de préfabrication modulaire volumétrique sont peu nombreuses (Assaf & al., 2023).

Ce projet est donc une demande du partenaire industriel Cima + à la chaire industrielle de recherche sur la construction écoresponsable en bois (CIRCERB) afin de réaliser une étude de cas sur la reconception du complexe hôtelier du Club Med de Charlevoix dans un esprit de préfabrication en bois. Même si le choix d'une structure en béton armé a été fait, cette étude propose de réaliser un

schéma de conception en bois afin ultimement de comparer les avantages et inconvénients des deux types de structures.

### **1.3 Objectifs**

L'objectif principal de la recherche est de réaliser une simulation du Club Med de Charlevoix en bois alors qu'il est déjà existant en béton. En d'autres termes, ce travail vise une étude de cas de la caractérisation du Club Med de Charlevoix s'il avait été réalisé en bois de manière fidèle au plan ainsi qu'avec un haut taux de construction hors site. Ce travail vise à fournir des recommandations sur différents systèmes constructifs en bois lorsqu'une trame structurale est d'abord fournie pour un bâtiment hôtelier en béton.

Les objectifs secondaires sont de connaître les implications sur l'architecture, le génie industriel et le génie civil d'une reconception du projet en considérant une structure en bois au lieu de la structure en béton.

Implication un : Reconceptualisation des aménagements et de la planification.

Implication deux : Comprendre comment le choix d'un système constructif industrialisé impacte à la fois le système architectural et celui de structure.

Implication trois : Calcul et Simulation de cette nouvelle structure en bois.

### **1.4 Méthodologie**

Depuis le début de la recherche, les décisions ont été prises dans l'objectif de réaliser une étude de cas sur la simulation du Club Med de Charlevoix en béton vers le bois. La méthodologie présentée dans ce mémoire se divise selon l'acquisition de connaissances, l'équipe encadrante et partenaire, le choix des logiciels, le choix des cas étudiés et les étapes du projet.

### 1.4.1 Acquisition de connaissances

La méthodologie proposée débute par une revue de littérature sur la préfabrication en bois. L'objectif était de comprendre les différents types de systèmes, types de connexions et analyses à effectuer en plus de connaître les bâtiments similaires qui ont été réalisés en bois dans le monde.

De plus, des cours théoriques ont été réalisés afin d'acquérir des connaissances spécifiques sur l'initiation à la recherche, sur le matériau bois ainsi que sur la conception de structures en bois. À ce jour, tous les cours exigés par le programme de maîtrise en ingénierie profil recherche ont été réalisés à l'exception du séminaire qui est en cours.

Afin de parfaire les connaissances sur les constructions en bois, des formations données par l'organisme Cecobois ont été suivies :

- Construction de bâtiments de 5-6 étages à ossature en bois
- Séminaire sur l'optimisation de la construction en bois massif
- Calcul parasismique et les constructions en bois
- Conférence Cecobois 2024
- Forum Constructions bas carbone et biosourcé

Afin de compléter, la formation : The Future of Construction is ...Préfabrication par le Canadian Wood Council a été suivi. En plus des formations de Cecobois et du Conseil canadien du bois d'une journée chaque, de nombreuses présentations reliées à des études de cas et à la préfabrication ont été suivies lors du World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE) à Oslo en Norvège ainsi qu'à Woodrise à Bordeaux. Lors de ces deux conférences, l'étudiante a eu la chance de présenter les travaux d'un collègue. Afin de s'assurer que les solutions proposées dans le cadre de cette maîtrise soient acceptables du point de vue de l'industrie, des visites d'une journée ont été effectuées chez Lamco Forest Products, Arts Massif et chez RG Solution. Tous ces organismes ont l'objectif de promouvoir le bois.

### **1.4.2 Équipe encadrante et partenaire**

En plus du directeur de recherche, Sylvain Ménard présent depuis le début de la recherche, une codirection en architecture a été ajoutée au projet afin de pouvoir compléter la recherche. Lors des débuts du projet, il a été assez vite réalisé qu'une transformation vers un bâtiment modulaire volumétrique nécessite une réorganisation des cloisons, ce qui engendre des concepts architecturaux. L'étudiante ayant une lacune sur ces concepts, l'architecte Carlo Carbone a été ajouté à l'équipe encadrante.

Le partenaire Cima + a été contacté au début du projet et de manière ponctuelle afin de s'assurer que le projet allait selon les attentes. La rencontre initiale avec celui-ci a permis de récupérer les plans de structure et d'architecture du bâtiment ainsi qu'une modélisation par éléments finis du bâtiment en béton armé sur le logiciel ETABS.

### **1.4.3 Choix des logiciels**

Par la suite, une analyse des différents logiciels potentiels en conception en bois est faite. Il s'agit de déterminer quels logiciels sont adéquats pour le dessin, la modélisation et le calcul de structure en bois. Il faut également s'assurer que les codes et normes les plus à jour sont respectés et si ce n'est pas possible, de justifier pourquoi d'anciennes normes sont utilisées.

Différents outils de modélisation peuvent être utilisés afin de faire la conception de bâtiment. Ceux-ci ont chacun des avantages et des inconvénients. Au final, il s'agit de choisir un outil qui permettra de réaliser la conception la plus optimisée possible.

Lors de l'étude préliminaire, il avait été préétabli que l'idéal serait de dessiner et modéliser sur Cadwork, puis de transférer sur RFEM et ETABS. Par contre, suite à des tentatives, la communication inter logicielle n'est pas au point et il faut tout modéliser de zéro sur RFEM. Les logiciels RFEM et ETABS sont tous les deux des logiciels de conception par éléments finis avec des codes commerciaux.

Le logiciel RFEM de Dlubal a un module spécialement conçu pour les structures en bois et sera donc celui sélectionné lors de la conception des trois cas à l'étude. Au départ, l'intention était d'utiliser le fichier IFC afin de ne pas avoir à redessiner et pouvoir simplement modifier les sections. Par contre, il a rapidement été observé que le processus de conversion est laborieux puisque la modélisation comporte 515 sections dans deux matériaux différents. Il est donc important de ne pas en oublier, ce qui viendrait biaiser les résultats. Aussi, chaque connexion béton-béton est différente d'une connexion bois-bois, ce qui fait que chaque nœud devrait être validé méthodiquement. Aussi, bien que le fichier soit divisé par étage sur ETABS, lors de l'importation sur RFEM via un fichier IFC, il devient un seul bloc. Cela fait en sorte qu'il n'est pas possible d'isoler étage par étage pour voir les membrures et donc certaines sections centrales sont difficilement interceptables. Afin de limiter les sources d'erreur, il est plus simple et rapide de recommencer de zéros. Par contre, le modèle actuel servira de guide lors de questionnement.

Le logiciel ETABS est très pratique pour visualiser les modélisations du bâtiment en béton préalablement réalisées par l'entreprise Cima+. Il est possible d'y analyser les différents cas de chargement et hypothèses posées.

#### **1.4.4 Choix des cas étudiés**

Lors du choix des cas à étudier, les deux principaux cernés ont été une conception la plus près du bâtiment actuel ainsi qu'une transformation avec le plus de préfabrication possible.

Une transformation de type poteaux-dalles semble être celle nécessitant le moins de modifications sur le bâtiment et donc qui serait la plus adaptable rapidement pour une firme. Ayant un attrait pour la rapidité d'exécution des constructions modulaires volumétriques, cette option est également étudiée. Il s'agit également de l'option ayant le moins de connaissances par l'industrie et qui a un attrait scientifique. Par la suite, l'objectif sera de fournir des recommandations sur comment ces deux systèmes peuvent être fusionnés et optimisés.

## **Modélisation**

Une modélisation par éléments finis est réalisée sur le logiciel RFEM de Dlubal. Ce logiciel a été choisi pour sa facilité d'utilisation avec le matériau bois tel que le CLT dont les propriétés sont déterminées par les fabricants de bois comparativement à être modélisés avec des éléments de coque avec d'autres logiciels.

L'objectif de ces modélisations est de montrer que les solutions proposées sont réalisables structurellement. Avant de modéliser, les caractéristiques architecturales et structurales sont analysées.

## **Cas Poteaux-Dalles**

Lors de l'étude poteaux-dalles, il est important d'émettre des hypothèses de départ avant de débiter la modélisation. Pour ce faire, les dalles sont toutes modélisées comme étant du CLT 5 plis. Ce faisant, si l'interaction entre l'effort de sollicitation et l'effort de résistance est trop élevée, elles seront augmentées à 7 plis et si l'interaction est faible, elles seront diminuées à 3 plis. L'objectif n'étant pas de réaliser une construction optimisée de chaque composante, mais plutôt de démontrer que la solution proposée est réalisable. Également, le groupe d'essence de bois sélectionné est l'EPS (épinette, pin, sapin). Il s'agit du groupe d'essence le plus couramment utilisé dans les constructions en bois au Québec. Pour ce qui est des colonnes, elles ont comme première hypothèse d'être de la dimension la plus près possible de ce qu'elles sont en béton.

## **Cas Mixte Modulaire-Panneaux Préfabriqués**

Lors de l'étude du cas préfabriqué, certaines hypothèses doivent être émises avant de débiter la modélisation. En effet, les dimensions de modules sont dictées par les capacités des usines et vont affecter le cloisonnement et les dimensions du bâtiment. Puisque les modules doivent se superposer avec les mêmes dimensions pour le transfert des charges, un réarrangement architectural doit être réalisé avant la modélisation. Pour ce faire, des papiers calques sont utilisés afin de pouvoir superposer les étages les uns sur les autres. En effet, chaque cloison est dessinée sur le même

papier afin de visualiser s'il y a des empiètements ou non. À chaque itération et déplacement de chambres, un bilan du nombre de chambres totales et de chaque type de chambre est effectué. Certaines chambres ne pouvant pas être déplacées, une matrice de concepts clés est établie.

### 1.4.5 Étapes du projet

Afin de pouvoir répondre à l'objectif principal ainsi qu'aux objectifs secondaires, la figure ci-dessous montre les étapes à réaliser.

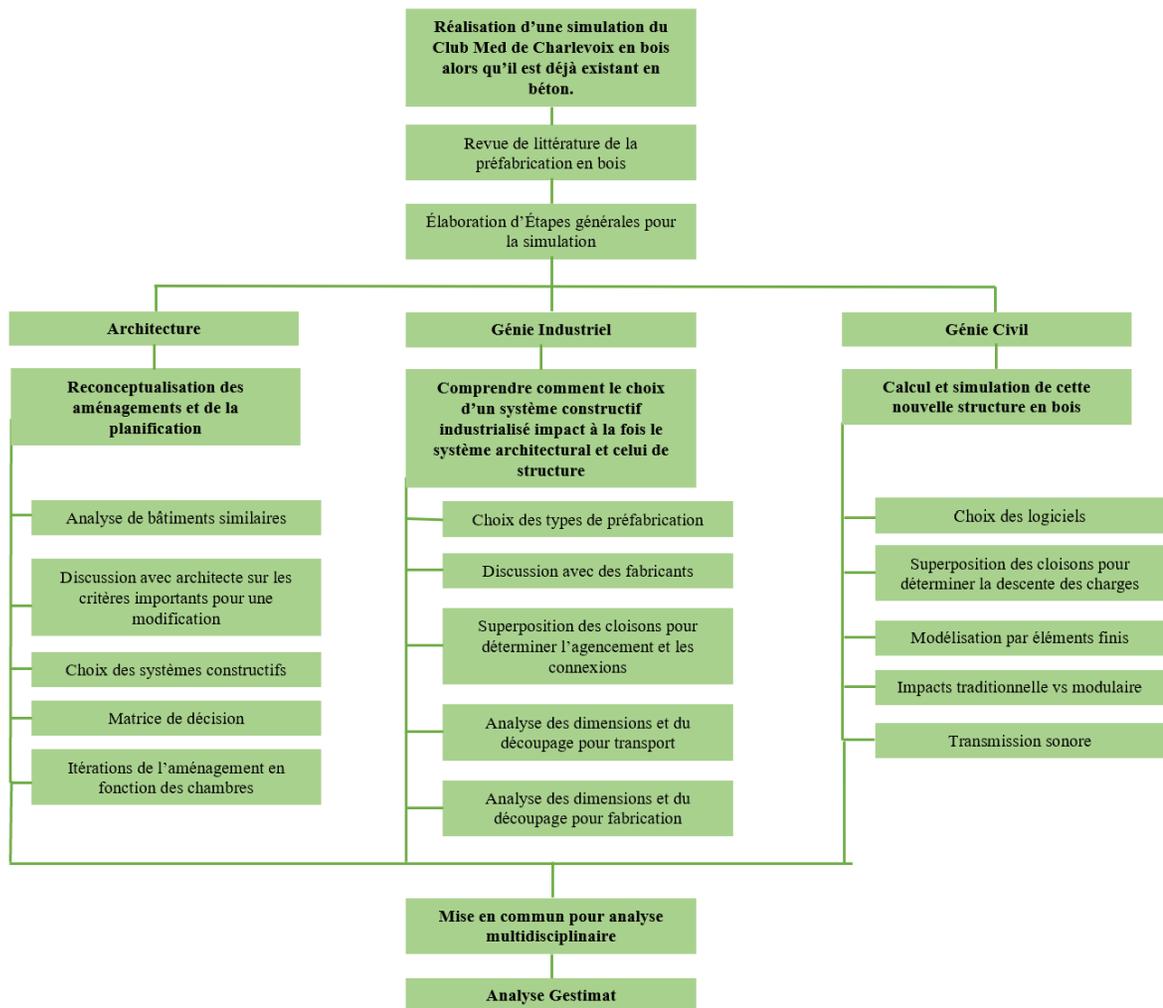


Figure 1: Organigramme de la méthodologie utilisée lors de la maîtrise

## 1.5 Originalité de la recherche

L'originalité de la recherche est basée sur trois axes principaux.

Le premier est la pluridisciplinarité des travaux réalisés. En effet, il ne s'agit pas d'une maîtrise classique de recherche axée uniquement sur la spécialisation du génie civil, mais une intégration des concepts du génie civil, de l'architecture et du génie industriel pour avoir une solution globale. Le tableau ci-dessous montre les caractéristiques étudiées dans chacune des disciplines.

**Tableau 1 : Caractéristiques étudiées des différentes disciplines**

<b>Discipline</b>	<b>Caractéristiques</b>
Génie Civil	<ul style="list-style-type: none"><li>• CNB 2010</li><li>• CSA-O86-19</li><li>• Analyse par éléments finis</li></ul>
Génie Industriel	<ul style="list-style-type: none"><li>• Capacité des usines</li><li>• Transportabilité des composantes</li></ul>
Architecture	<ul style="list-style-type: none"><li>• Déplacement de chambre</li><li>• Emplacement de colonnes</li><li>• Géométrie des corridors</li><li>• Utilisation de l'espace</li></ul>

Le code du bâtiment 2010 est utilisé même s'il ne s'agit pas du plus à jour afin de s'assurer que notre conception est comparable à celle réalisée sur le Club Med de Charlevoix existant qui lui a été réalisé avec ce code de 2010.

Tout projet de bâtiment devra éventuellement passer par ces trois disciplines, mais rares sont les occasions où elles sont toutes étudiées dans une même recherche afin d'obtenir des résultats comparatifs. En général, au Québec, le client engage une firme d'architecture qui réalise les plans et par la suite la firme d'ingénierie s'active dans le projet. Le projet actuel vient intégrer les deux disciplines dès le départ en plus d'apporter les particularités des manufacturiers. Il est important de cibler dès le départ les critères déterminants pour la réussite du projet selon les trois points de vue.

Le deuxième axe d'originalité est le sujet de la préfabrication en bois. Il s'agit d'une originalité scientifique puisqu'il s'agit d'un domaine de la construction industrielle peu exploré sur lequel le Québec est en retard comparativement à certains pays européens. À cet effet, les incitatifs

gouvernementaux actuels ont comme objectifs de bonifier les constructions sur site. Le contexte actuel n'est donc pas aligné sur la préfabrication. Ce faisant, peu de recherches ont été faites. Cela fait en sorte qu'il y a présentement un manque de connaissances et de normes reliées à celui-ci. Il est donc original de l'explorer afin de le maîtriser davantage. Si l'on souhaite l'utiliser plus fréquemment, il devient primordial de connaître les concepts clés pour la réussite du projet. Une originalité connexe est qu'au Québec, la façon de réaliser la préfabrication est différente d'ailleurs. Le Québec comprend de nombreuses petites usines comparativement à avoir peu de très grosses. Une uniformisation des façons de faire est donc nécessaire pour permettre à plusieurs usines de travailler sur un même projet d'envergure.

Le troisième axe d'originalité de cette recherche est l'étude des différents cas. Il n'y a pas un seul système constructif qui est étudié, mais trois. Cela permet de réaliser différentes comparaisons et conclusions afin de déterminer le bon type de transformation et ses implications selon le projet. Il s'agit d'une originalité puisque chacun occasionne des transformations différentes qui lui sont propres.

## **CHAPITRE 2 INTRODUCTION À LA PRÉFABRICATION**

### **2.1 POURQUOI UTILISER LA PRÉFABRICATION**

Le Canada se doit de changer sa façon de voir les constructions étant donné que les coûts de construction en chantier augmentent, que la main-d'œuvre est moins abondante et que la demande pour des bâtiments économes en énergie est en croissance. Les codes de constructions évoluent et changent pour adopter de nouvelles pratiques en construction (Wimmers., 2021).

La préfabrication en bois augmente autour du monde pour certaines raisons. La production efficace, la logistique bien pensée, la disponibilité élevée des matériaux, la qualité élevée constante, le temps de préparation réduit en chantier et le bon rapport qualité-prix font en sorte que ce procédé permet une flexibilité maximale (Hansbert., 2021). Il est également possible de noter une réduction du coût des projets, une réduction du temps de construction et une meilleure qualité des projets finaux (Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation).

La construction traditionnelle est utilisée depuis presque toujours et a fait ses preuves. Toutefois, elle nécessite beaucoup de main-d'œuvre sur site ; un vent de nouveauté avec l'innovation de la préfabrication peut sembler être une solution au manque de main-d'œuvre actuel. En effet, les travailleurs actuels ne veulent plus travailler sur les chantiers car les métiers de la construction sont très difficiles sur les risques de blessures impliquant des arrêts de travail (Hansbert., 2021). Bien souvent, un arrêt de travail sur la construction est causé par des blessures récurrentes. De plus, la nécessité de travailler dans des conditions météorologiques difficiles réduit l'attrait de travailleurs pour le domaine de la construction extérieure. Afin d'avoir des travailleurs de la construction, il faut moderniser le processus afin que ça devienne moins dur physiquement, que les travailleurs soient intéressés à travailler et qu'ils restent actifs plus longtemps. La préfabrication en usine est une solution envisageable pour résoudre ce problème (McCaughey., 2021) et (Hansbert., 2021). Selon

Hough & Lawson (2019), une construction modulaire volumétrique peut réduire d'environ 50% la main-d'œuvre nécessaire sur le site.

La préfabrication est également une solution d'un point de vue environnemental. La majorité des bâtiments qui seront présents dans les 50 à 70 prochaines années sont ceux que nous construisons aujourd'hui. En considérant les changements climatiques, il est important et logique de focaliser sur la minimisation de la demande en énergie et cela passe par de meilleures enveloppes du bâtiment (Boafo&al.,2016). Afin de répondre à la demande de bâtiment économe en énergie, les enveloppes des bâtiments devront avoir des constituants différents et être de 42 à 77 % plus lourdes et de 87 à 100% plus volumineuses. La préfabrication devient donc nécessaire pour réaliser de telles enveloppes étant donné que ce serait trop complexe et long à réaliser en chantier (Wimmers., 2021).

La préfabrication peut également être utilisée pour des bienfaits économiques et d'échéancier. Elle a l'avantage de procurer un gain de temps marquant sur l'échéancier. À cet effet, une tour de 57 étages (Mini Sky City) a nécessité seulement 19 jours de construction en chantier à Changsha, en Chine, grâce à l'utilisation de modules préfabriqués. Les 2736 modules ont été fabriqués quant à eux en 4,5 mois avant que la construction en chantier ne débute. (Boafo &al, 2016). Certains aspects peuvent être faits simultanément en chantier et en usine tel que la fabrication des murs en usine en même temps que la construction des fondations en chantier, ce qui fait en sorte que le temps de cycle est plus court. Avec un échéancier raccourci et une productivité accrue, la préfabrication permet d'augmenter la rentabilité puisqu'il y a moins de dépense de gestion et un revenu peut être perçu plus rapidement (McCaughey., 2021). Le gain de temps vient également réduire les risques de vandalisme puisque l'accès à l'intérieur du bâtiment lors de la construction est plus court (Cecobois., 2011). En plus de raccourcir l'échéancier, il est plus facile de prévoir l'avancement du projet et la main-d'œuvre nécessaire en usine, ce qui réduit les imprévus et permet une meilleure planification. Lors d'orages ou de tempêtes de neige, la construction en usine se poursuit contrairement à la construction traditionnelle en chantier (McCaughey., 2021).

La préfabrication a également des avantages techniques. Premièrement, l'environnement étant contrôlé, la température n'a pas d'influence sur la qualité des composantes en bois. Les risques de retrait, de gonflement ou de gauchissement des éléments sont presque nuls puisque les composantes sont produites dans un milieu avec des conditions contrôlées (Cecobois., 2011). Cependant, il ne faut pas négliger les enjeux de protections nécessaires en chantier afin de garder cet avantage. Deuxièmement, la préfabrication est une façon d'avoir une précision accrue puisque les logiciels utilisés pour la conception des composantes sont directement liés à la programmation des équipements de fabrication en usine. Les différentes coupes sont donc automatisées par le logiciel, ce qui garantit l'uniformisation et la précision. Cette précision est très pratique dans le cas de l'équerrage et des ouvertures. De plus, les appareils sont automatisés et programmés, ce qui fait que la production des éléments est accélérée. Cette augmentation de précision peut également aider à réduire les risques d'infiltration d'eau, ce qui pourrait permettre d'augmenter la durabilité du bâtiment (Cecobois., 2011).

En somme, lorsqu'elle est bien faite, la préfabrication apporte une haute précision, une haute efficacité énergétique, une grande productivité, une fabrication rentable, une utilisation optimisée des matériaux, une diminution des imprévus en chantier, un environnement de travail sain et une réduction du gaspillage. À l'exception du modulaire volumétrique, cela garde une grande flexibilité architecturale et réduit le transport (Wimmers., 2021). La préfabrication en général n'est pas un frein à la créativité puisque de nombreuses formes peuvent être réalisées. Par contre, par ses caractéristiques cubiques, le modulaire volumétrique n'a pas une grande variation de forme et peut mener à des bâtiments plus uniformes.

## **2.2 POINTS À PRENDRE EN CONSIDÉRATION SUR LA PRÉFABRICATION**

Bien que la préfabrication en bois ait beaucoup d'avantages et de points positifs, il est important de prendre en compte certaines de ses lacunes ou difficultés.

Premièrement, il n'est pas possible de préconstruire dans toutes les tailles et tous poids désirés étant donné que le transport des pièces préfabriquées est normé. Les dimensions maximales de chaque module sont donc prescrites par le mode de transport utilisé entre l'usine et le chantier. Selon le règlement sur les normes de charges et de dimensions applicables aux véhicules routiers et aux ensembles de véhicules routiers, le véhicule routier doit avoir une largeur maximale de 2,6m, une longueur maximale de 25m et une hauteur maximale de 4,15m à partir du sol. Certaines exceptions s'appliquent selon le type de véhicule utilisé (Publication Québec, 2023.). Toutefois, avec un permis spécial de circulation pour le transport de bâtiment préfabriqué, il est possible d'atteindre une longueur de 30m, une hauteur maximale jusqu'à 5m et une largeur maximale possible de 5,75m (Publication Québec, 2023.). Il est également possible qu'il y ait une grande distance entre l'usine de préfabrication et le chantier, ce qui augmente les coûts de transport et doit être pris en compte dans l'échéancier. Aussi, lors du transport, les modules nécessiteront une protection supplémentaire afin d'être livrés intacts au chantier. Cette protection engendre des coûts et du temps qui doivent être pris en compte. En plus d'avoir des dimensions maximales contrôlées par le transport, il faut prévoir que la grosseur des éléments préfabriqués est également dictée par la capacité des machines en usine. (Sun. & al, 2020).

Deuxièmement, une fois que les modules respectent les dimensions autorisées pour le transport, il faut également considérer la redondance structurelle des modules. Afin d'avoir un système structurel adéquat, des modules de même largeur doivent se superposer afin de pouvoir réaliser les connexions dans les coins des modules. Cela vient donc altérer la liberté d'aménagement architectural des cloisons. Également, afin d'avoir un projet qui reste plus économique sur la production, il faut avoir une redondance dans les dimensions des modules. Le manufacturier ne peut pas produire économiquement plusieurs modules uniques. Il faut en sélectionner quelques-uns et les répéter plusieurs fois dans le bâtiment.

Troisièmement, il faut prendre en considération que les imprécisions du chantier et celles de l'usine s'additionnent. Ce faisant, il est possible qu'un produit préfabriqué arrive au chantier, ne puisse pas

être modifié et ne soit pas compatible dans l'ordre de précision requis. Cela pourrait donc ralentir le chantier (Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation, 2019). L'usine a de la précision alors que le chantier crée de l'imprécision. La rencontre des deux procure un enjeu qu'il faut régler en amont. Pour ce qui est du matériau, il faut considérer qu'une conception hybride signifie qu'il existe des tolérances différentes pour chaque matériau. Chacun réagissant différemment aux conditions ambiantes, les fabricants doivent tenir compte de ces tolérances.

Quatrièmement, il existe un vide entre les responsabilités des différents intervenants reliés à la préfabrication. Les responsabilités du manufacturier se limitent à la production des composantes alors que celles de l'entrepreneur se limitent à la construction sur place. Il y a donc des responsabilités qui ne sont pas encadrées convenablement à la jonction des différentes disciplines telle que la coordination. Il faut déterminer par exemple, qui est responsable si un élément arrive abîmé au chantier. Ce faisant, il est essentiel de bien identifier le responsable de chaque étape du projet si l'on ne veut pas se retrouver avec des tâches non accomplies ou bien mal réalisées (Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation).

Cinquièmement, il est important de prendre en considération les caractéristiques physiques du site où la construction sera réalisée. Les modules prennent beaucoup d'espace au chantier s'ils ne sont pas installés directement à leur livraison. La vitesse de production des modules est dictée par la capacité de l'usine. Toutefois, l'échéancier général du projet doit prendre en considération tous les corps de métier et se synchroniser avec la capacité de l'usine et le trafic pour se rendre au chantier. Il faut aussi prévoir une enceinte rapide pour la protection contre les intempéries ainsi qu'une protection immédiate contre le feu. Lors de l'installation, il est important d'avoir prévu à l'avance le séquençage d'installation. Tous les métiers comptent les uns sur les autres pour respecter l'échéancier et le partage des ressources est essentiel.

## 2.3 PRINCIPES DE CONCEPTION

L'analyse et la conception d'un bâtiment en bois nécessite de multiples étapes et validations. Ce matériau est différent de l'acier et du béton puisqu'il est hétérogène. Il est important de valider chacune de ses caractéristiques. La structure spatiale tridimensionnelle des bâtiments en bois est en réalité une structure combinée multicouche dont les caractères des murs, des diaphragmes et du squelette structural doivent être pris en compte. L'analyse de l'ensemble de la structure du bâtiment incluant les détails de connexions inter éléments est une tâche très complexe à résoudre. Toutefois, en appliquant une moyenne des éléments de coque, le nombre d'inconnus peut être significativement diminué (J. Malesza, 2017).

Il existe différentes essences de bois ainsi que différents grades de bois. En plus de ces différences, il est possible d'utiliser différents systèmes constructifs tels que l'ossature légère, les systèmes poteau-poutre, les panneaux préfabriqués et même le modulaire volumétrique. Lors de l'utilisation d'éléments préfabriqués ou d'éléments faits pour résister aux efforts latéraux, des analyses supplémentaires sont nécessaires et généralement faites en utilisant la méthode des éléments finis (MEF). (Collins & al, 2005).

Les discontinuités telles que les ouvertures des portes et des fenêtres doivent être analysées d'avantage puisqu'il s'agit de zones généralement critiques. Certaines méthodes telles que le calcul des murs de refend manuel ont des clauses spécifiques pour ces irrégularités, mais il est important de s'assurer que le logiciel utilisé les analyse avec exactitude. Lorsque les éléments sont complexes à modéliser pour la modélisation du bâtiment en entier, il est possible de modéliser des sous-éléments du bâtiment pour ensuite les assembler et modéliser l'ensemble. (Collins&al, 2005).

Les charges latérales sont différentes des forces gravitaires puisqu'elles dépendent en grande partie de la géométrie du bâtiment et de son emplacement. Les efforts latéraux ne sont pas additionnés aux efforts gravitaires et ils doivent être étudiés dans toutes les orientations possibles. Il est souvent requis de faire des analyses dynamiques pour ce qui est des efforts sismiques. Le calcul de ces

différents efforts est décrit dans le code national du bâtiment. Les murs de refend sont conçus afin de résister aux efforts latéraux. Le comportement en cisaillement dans les murs en ossature bois peut être modélisé par deux ressorts hystériques dont les paramètres sont tels que ceux de parois plus détaillées en éléments finis (Collins&al,2005).

Lors de l'utilisation de modules volumétriques, il est important d'analyser si la force de frottement entre les différents modules est suffisante ou si des connexions spéciales sont à utiliser. Selon Collins & al 2005, lors d'efforts sismiques, les joints inters modulaires se comportent de manière inélastique. Le résultat obtenu par Augustino et Antwiafari en 2018 explique que lorsqu'il y a deux modules ou plus, les connexions deviennent essentielles. Dans leur étude, celles-ci ont été modélisées avec des ressorts représentant le frottement et l'attache mécanique.

De manière générale, le remplacement du béton par du CLT diminue le poids du bâtiment et augmente sa flexibilité, ce qui vient réduire l'accélération induite par des tremblements de terre. Il y a donc une diminution du cisaillement à la base. Par contre, face à l'approche conservatrice du coefficient de force lié à la ductilité ( $R_d$ ) et du coefficient de modification à la sur-résistance ( $R_o$ ), le cisaillement à la base lors des analyses se veut plus élevé comparativement au béton. Ce faisant, les dérives sismiques maximales inter étages sont supérieures et cela implique que davantage de murs de refend sont nécessaires avec des constructions en bois (T. Connolly &al, 2018).

L'analyse des connexions est généralement faite avec la méthode des éléments finis. Toutefois, la densité du maillage est un paramètre important. Une hypothèse est de le poser selon l'espacement des connecteurs estimés. Il est également possible de modéliser les connexions comme étant des ressorts représentant la relation force-déplacement dans chacune des directions et/ou rotations principales. (Collin&al, 2005).

Les connexions ont un effet sur la répartition des efforts internes et sur la déformation de la structure. Elles doivent donc être considérées de manière exhaustive. Plus particulièrement, comparativement

aux constructions sur site, les constructions avec modules volumétriques préfabriqués comportent davantage de joints et de connexions. Il existe donc des connexions intra modulaires, inter modulaires et modules-fondation.

Les connexions inter modulaires impliquent des joints horizontaux et verticaux avec les modules voisins. De manière générale, des connexions sur colonnes plutôt que sur poutres sont favorisées afin de permettre le passage de l'électromécanique. Elles doivent avoir une résistance, rigidité et ductilité suffisante tout en étant faciles d'installation en chantier. Les connexions intra modulaires font référence à des connexions plus standards puisqu'elles assemblent le squelette structural du module (Rajanayagam, H &al, 2021).

Il existe différents types de connexions traditionnelles décrites dans la norme CSA-O86-19 tels que les anneaux fendus, les boulons, les goujons, les tire-fonds, les disques de cisaillement, les pointes, les clous, les vis et les rivets. Le connecteur système Verbus est spécial puisqu'en plus de permettre des bâtiments en modulaire volumétrique à plusieurs étages, il permet également de fixer différentes caractéristiques architecturales comme un revêtement en brique. Dans un autre ordre de connecteur modulaire, Sendanayake a développé une connexion permettant la dissipation d'énergie lors des évènements sismiques. Ainsi, la connexion est faite pour devenir le point de défaillance et être remplacée au lieu d'abimer la structure. Il est important de considérer que les connexions soient localisées sur les faces extérieures des modules afin que l'assemblage soit plus facile en chantier et ainsi diminuer le risque d'erreur (Rajanayagam, H &al, 2021).

Avant de commencer une modélisation, il est pertinent de connaître la disposition des chambres lorsqu'elles sont superposées les unes sur les autres. De cette façon, il est aisé de cerner les croisements et ainsi déterminer quels seront les systèmes constructifs potentiels.

## 2.4 NIVEAUX DE PRÉFABRICATION

La préfabrication de structure en bois existe sous plusieurs formes. Chacune des variantes a ses avantages et ses inconvénients qui lui sont propres.

Le bois d'ingénierie peut être considéré comme le premier niveau de préfabrication. Il peut être utilisé via la charpente légère ou via le gros bois d'œuvre. Il est entre autres possible de faire des fermes légères de toit, des poutrelles ajourées à connecteurs métalliques, des poutrelles ajourées à âme en bois dentée et collée, des poutrelles en I, du bois lamellé-collé, du bois de placages stratifié (LVL), du bois de copeaux parallèles (PSL), des bois de copeaux longs lamifiés (LSL), des solives de rive et du bois jointé (Conseil Canadien du Bois, 2018).

Les panneaux préfabriqués sont le deuxième niveau de préfabrication en bois et peuvent être produits avec un ou deux côtés fermés. Les panneaux sont des éléments en deux dimensions qui peuvent servir à construire les toits, les murs porteurs et les planchers des différentes constructions. Il est possible de les concevoir en tant que mur rideau ou en tant que panneau isolé selon la demande (Wimmers., 2021).

Les modules volumétriques sont des constructions de bois préfabriqué en trois dimensions qui ont la forme de boîte. Ceux-ci sont acheminés depuis l'usine vers le chantier en un morceau lorsqu'ils sont finaux entre 80 et 95% (Boafo&al, 2016). La préfabrication modulaire est généralement utilisée dans les bâtiments de type cellulaire tels que les résidences étudiantes, les appartements et les hôtels. Dans ces cas, le module est compatible avec la grosseur d'une chambre (Hough & Lawson, 2019). Toutefois, si le modulaire est désiré dans un autre type de construction tel que des bâtiments à usage mixte, il est possible de réaliser une structure hybride comprenant du béton dans les premiers étages et du modulaire sur les étages supérieurs. Le modulaire représente le niveau de préfabrication le plus avancé. Le modulaire peut être construit selon deux plans de disposition. Premièrement, il est possible d'avoir des modules porteurs dont les charges sont transférées via les parois du module qui sont partiellement ouvertes. Dans ce type de système, il est important de différencier le diaphragme de module et le diaphragme d'étage afin de permettre un mouvement latéral uniforme. Lors de la construction, le diaphragme de module permet au module de garder sa rigidité et de pouvoir être installé. Une fois installé, le diaphragme de module fait partie du diaphragme d'étage pour transmettre les charges latérales. La deuxième disposition est des modules supportés dans les coins et dont les charges sont transférées via des poutres de rive et poteaux d'angle. Dans un tel système, il est important de prendre en considération la rigidité des poutres de plancher et de plafond ainsi que leurs connexions avec le poteau de coin (Ramaji & Memari, s.d.). Dans tous les cas, les modules vont généralement être assemblés dans leurs coins afin de pouvoir faire un transfert des charges latérales

efficace. Il existe principalement trois formes de systèmes de fabrication pour les modules : statique, linéaire et linéaire semi-automatisé. La production statique signifie que tout est amené au module et celui-ci ne bouge pas pendant la fabrication. La production linéaire quant à elle signifie qu'il y a plusieurs étapes. Les composantes sont produites une à la fois, puis assemblées. La production semi-automatisé comporte des lignes de production séparée pour chacune des composantes qui sont par la suite assemblées (Hough & Lawson, 2019). Toutefois, avant de déterminer si une construction modulaire sera utilisée ou non, différents facteurs doivent être analysés tels que les normes en cours, l'accès aux matériaux, la qualité du produit, la capacité de l'usine, les contraintes du site, la main-d'œuvre disponible et les permis nécessaires.

Le noyau de service est un niveau de préfabrication pouvant être intégré aux constructions avec panneaux préfabriqués ou avec modules. En effet, il s'agit d'éléments en deux ou trois dimensions hautement spécialisées qui sont fabriqués expédiés au chantier en état complètement finalisé. Ces noyaux peuvent avoir différentes dimensions en fonction de l'emplacement prévu et des limitations de transport. La différence entre un module volumétrique ou un noyau de service est que le noyau de service comprend des arrivées de plomberie, de ventilation ou d'électricité. L'installation étant toute faite, il ne reste plus qu'à faire les connexions une fois rendu au chantier (Wimmers, 2021).

Le tableau suivant se veut un résumé des principes des différents niveaux possibles.

**Tableau 2: Caractéristiques des différents types de préfabrication**

<b>Types de préfabrication</b>	<b>Descriptions</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>Applications contexte hôtelier</b>
<b>Composantes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1<sup>er</sup> niveau</li> <li>• Charpente légère ou Gros bois d'œuvre (Conseil Canadien du Bois, 2018)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité</li> <li>• Esthétique</li> <li>• (Cecobois, 2020, 2011, 2012; Beaucher, S., 2015; Levée&amp;al., 2018 et 2019; Levée, V. 2022).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peu d'économie de temps</li> <li>• (Levée&amp;al., 2018)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Structure charpente légère</li> <li>• Poutres/ colonnes en gros bois d'œuvre</li> </ul>
<b>Panneaux Préfabriqués</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2iem niveau</li> <li>• Deux dimensions</li> <li>• Murs ou Plancher</li> <li>• Panneaux entièrement complété ou semi-complété (Wimmers., 2021).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction échéancier</li> <li>• Reproductivité programmation</li> <li>• Économies monétaires</li> <li>• Réduction main-d'œuvre</li> <li>• (Beaucher, S., 2015; Cecobois., 2013; Wimmers., 2021 ; Lang, 2021)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haute expertise requise</li> <li>• Nécessite protection</li> <li>• Validations supplémentaires</li> <li>• Communication efficace nécessaire</li> <li>• (Wimmers., 2021; Labrecque, N., 2021 ; Wagner&amp;al, 2021)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monter murs rapidement</li> <li>• Cage d'escalier ou d'ascenseur</li> <li>• Dalle esthétique</li> </ul>

<b>Modulaire volumétrique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3iem niveau</li> <li>• 3 Dimensions</li> <li>• Bâtiments cellulaires</li> <li>• (Boafo&amp;al, 2016; Hough &amp; Lawson, 2019; Ramaji &amp; Memari, 2013.; Labrecque&amp;al., 2022; Gijzen, 2017)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction échancier</li> <li>• Économies monétaires</li> <li>• Réduction déchets</li> <li>• Acceptabilité plus rapide urbanisme</li> <li>• Réduction perturbation locale</li> <li>• Réduction d'impacts environnementaux (« Modular Construction Industry Growth and Its Impact on the Built Environment », 2018; Wozniak-Szpakiewicz&amp;Zhao, 2018; Wimmers, 2021; Hough &amp; Lawson, 2019; Baofo &amp; al, 2016; Gagné, S., 2021; R-Hauz., 2021; Noordzy&amp;al, 2021; Evins, 2012)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personnalisation limitée</li> <li>• Changements restreints</li> <li>• Coordination essentielle</li> <li>• Portée limitée</li> <li>• Transport limité</li> <li>• Connexions complexes</li> <li>• Logiciels couteux</li> <li>• Usines moins fréquentes</li> <li>• Manque de normes</li> <li>• (Wimmers, 2021; Cecobois, 2013; Ramaji &amp; Memari, 2013.; Cecobois, 2011; Hough &amp; Lawson, 2019; Baofo &amp; al, 2016; ())</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 module/ chambre</li> <li>• 1 module/ étage</li> <li>• Agrandissement (Czasopismo Techniczne, 2018)</li> </ul>
<b>Noyau de service</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3iem niveau</li> <li>• Inclus ventilation / plomberie / électricité</li> <li>• (Wimmers, 2021)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tâches complexes réalisées en usine</li> <li>• Étanchéité améliorée</li> <li>• Performances thermiques améliorées</li> <li>• (Wimmers, 2021)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessite protection</li> <li>• Difficulté main-d'œuvre</li> <li>• (Wimmers, 2021)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1/ bâtiment</li> </ul>

#### 2.4.1 PARTICULARITÉS MODULAIRES VOLUMÉTRIQUE

Pour un noyau structural en CLT ou en LVL, une approche possible est de considérer les murs comme étant monolithiques avec des connexions 100% rigides. Par contre, il a été démontré que cette hypothèse est erronée dans la pratique même avec de nombreuses fixations à rigidité élevée. Ce faisant, il est possible d'avoir une approche plus pragmatique en faisant en sorte que les propriétés des noyaux soient réduites de 50% afin de tenir compte des joints répartis le long des bordures des panneaux de bois. Une bonne stratégie à adopter dans l'élaboration de la rigidité des connexions et des noyaux est donc d'utiliser l'hypothèse du 50% en borne inférieure et l'hypothèse du 100% rigide en borne supérieure. Il est également possible d'utiliser les coefficients  $R_d$  et  $R_o$  de

1 et 1,3 respectivement si les conditions respectent celles de la norme CSA-086-14 (Connolly&al, 2018).

La variété des joints intra modulaires apporte une complexité face aux analyses dynamiques. Dans les constructions traditionnelles, il est fréquent qu'une déformation plastique se produise à la jonction poutre-connexion afin de dissiper l'énergie. Toutefois, la complexité des connexions modulaires rend ce phénomène moins fréquent. Afin de simplifier les analyses, une approche proposée est de faire une modélisation à deux niveaux. Le premier niveau consiste à modéliser les modules individuellement et les considérer comme une sous-trame 3D. Le deuxième niveau consiste à modéliser le bâtiment avec des sous-cadres 3D. Les efforts expérimentés par les sous-cadres sont par la suite utilisés pour modéliser plus en détail les différents modules (Ramaji&Memari, 2013.).

La conception structurale des modules n'est pas entièrement couverte par les codes et normes actuelles. La CSA Z252 :F23 (guide de la construction modulaire volumétrique – Processus de mise en conformité et d'approbation), la CSA Z250 :F21 (Processus de livraison des bâtiments modulaires volumétriques) ainsi que la A277-F16 (Mode opératoire visant la certification des bâtiments, des modules et des panneaux préfabriqués) fournissent une base normative, mais ne traite pas de l'entièreté de la conception structurale. Ce faisant, un point de départ est d'adapter les normes pour cadres structuraux. Il faut prendre en compte les effets de stabilité au balancement du groupe de modules une fois assemblé, le mécanisme de transfert des charges horizontales et verticales ainsi que l'intégrité structurale (Hough&Lawson, 2019).

Lors d'une analyse avec des modules faits en ossature légère, il est possible de modéliser uniquement les colonnes, murs de refend et planchers sur RFEM puisque toutes les charges gravitaires sont censées passer par ces éléments. La rigidité latérale des murs de cisaillement peut être représentée comme étant des diagonales avec rigidité non linéaire. Pour ce faire, les cadres doivent être modélisés avec des poutres et poteaux qui sont extrêmement rigides avec des articulations d'extrémité permettant la rotation dans les axes x et y (Labrecque&al., 2022).

En ce qui a trait à l'analyse des murs, celle-ci est traditionnellement réalisée avec des modèles de poutre analytique impliquant un grand nombre d'éléments finis et donc impliquant de nombreuses inconnues. Afin de faciliter l'analyse et la modélisation des murs simples, des planchers ou des toits, il est possible d'utiliser la méthode des éléments de coque. Des analyses ont d'ailleurs montré qu'en utilisant la méthode des éléments de coque il est possible d'avoir une meilleure réflexion du comportement réel du bâtiment et de réduire le nombre d'inconnues (Malesza, J., 2017).

#### **2.4.2 CONSTRUCTIONS ANTÉRIEURES EN BOIS PRÉFABRIQUÉ**

La préfabrication a prouvé être une solution pour une construction moins coûteuse dans un contexte de manque de main-d'œuvre (Noordzy & al, 2021). Afin de déterminer si la préfabrication est une solution à envisager ou non, certains critères doivent être pris en considération.

Pour ce qui a trait au coût, il faut prendre en considération les coûts et revenus totaux incluant la main-d'œuvre, les économies faites par l'échéancier et la mise en service plus rapide (McCaughey., 2021). Il faut aussi comparer le temps de cycle, la réduction des surcoûts associés aux risques et la gestion des frais généraux. D'autres éléments sont réduits avec la préfabrication et doivent être considérés tels que le contrôle des coûts, la planification des conflits et la surveillance de chantier (Acqbuilt., 2021). Cette comparaison de coûts plus complexe est profitable par exemple dans le cas de l'édifice Fondation CSN dont la structure en bois a coûté 30% de plus que ce qu'elle aurait coûté en béton, mais dont une économie équivalente a été réalisée sur la finition et le temps de montage (Cecobois., 2011).

Certaines constructions en bois préfabriquées identifiées dans le tableau 3 ci-dessous ont utilisé la préfabrication en bois avec des innovations différentes. Les constructions suivantes ont toutes su démontrer dans la phase préliminaire que le bois préfabriqué était une bonne option dans la philosophie du projet. Ces constructions ont chacune une innovation différente ou des similitudes qui

pourraient être applicables sur le projet de reconception en bois préfabriqué du Club Med de Charlevoix.

**Tableau 3: Constructions antérieures similaires en bois**

<b>Nom du bâtiment (lieu, date)</b>	<b>Particularités</b>	<b>Source</b>
Hôtel Jakarta (Amsterdam, 2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Première application d'un bâtiment modulaire à plusieurs étages en bois</li> <li>• Modules de CLT sur table de béton</li> <li>• 1 module par chambre</li> <li>• Plancher en béton, reste en CLT</li> <li>• 9 étages sur un axe et 5 étages sur l'autre</li> </ul>	Gijzen,2017
Résidence Hetherington (Malartic, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Principe Noyo</li> <li>• Modules entièrement finis</li> <li>• Murs de colombage en bois</li> <li>• Panneaux de murs préfabriqués</li> <li>• Réduction de déchet et de l'échéancier</li> </ul>	Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation
El-Sol Science and Arts Academy (Californie, 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colonnes intégrées dans les murs préfabriqués</li> <li>• Permet agrandissement dans le futur</li> <li>• Système FROG</li> <li>• Toutes les composantes préfabriquées à assembler en chantier</li> </ul>	Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation
Treet (Norvège, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hybride bois-béton</li> <li>• Modulaire</li> <li>• Utilisation du Power Floor (faire 4 étages sans modifier les modules)</li> <li>• Colonnes hautes de 14 étages</li> <li>• Cause un surcoût</li> </ul>	Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation
Patch 22 (Amsterdam, 2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bois massif et aménagement évolutif</li> <li>• Structure flexible, adaptable et durable</li> <li>• Séparation entre infrastructure et remplissage</li> <li>• Plan d'étage de 1-3 logements sans impacter la structure</li> <li>• Système de plancher en cassette préfabriquée avec sous-plancher modulaire</li> </ul>	Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation
Loggia Saint-Lambert (Saint-Lambert, 2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modules préfabriqués</li> <li>• 90% réalisé en usine</li> <li>• Temps d'exécution en chantier réduit</li> <li>• Promoteur principal est le fournisseur de modules</li> <li>• Construction résidentielle</li> </ul>	Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation
Brook Commons (Vancouver, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résidence étudiante</li> <li>• Panneaux de façade préfabriqués</li> <li>• 18 étages</li> <li>• Même plan de chambre répété sur 17 étages</li> <li>• Contreventement en béton</li> <li>• Système poteaux-dalles</li> </ul>	Fallahi &al., 2016  Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation
Origine (Québec, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tour écocondos de 13 étages</li> <li>• 100% bois massif</li> <li>• 92 unités d'habitation</li> <li>• Murs de 2-3 étages</li> <li>• Panneaux de CLT</li> <li>• Poutres et colonnes en BLC</li> <li>• Livraison des premières habitations avant la fin des étages supérieurs</li> </ul>	Levée&al., 2018

**CHAPITRE 3**  
**ARTICLE 1:**  
**« Analyse de la conception des stratégies du bois massif et du modulaire volumétrique en tant que reconception pour un hôtel déjà existant en béton »**

### **3.1 PRÉSENTATION DE L'ARTICLE**

Cet article présente les résultats d'une analyse multidisciplinaire entre l'architecture, le génie industriel et le génie civil. Le bâtiment du club med de Charlevoix existant en béton a été étudié afin de connaître les implications de ce même bâtiment en bois fidèle au plan de béton et en bois préfabriqué.

Pour ce faire, des discussions avec des architectes et des manufacturiers sont réalisées afin de connaître leur réalité par rapport aux constructions en bois. Par la suite, une modélisation par éléments finis sur le logiciel RFEM est réalisée afin de connaître les propriétés structurales des nouveaux bâtiments proposés. Finalement, des considérations générales ainsi qu'une analyse environnementale à l'aide de l'outil Gestimat sont réalisées.

### **3.2 APPORT SCIENTIFIQUE**

Cet article vise à démontrer la nature multidisciplinaire des constructions préfabriquées. Pour chaque système de construction étudié, les éléments architecturaux, industriels et de génie civil sont analysés afin de mettre en évidence leurs interdépendances. Le bois a été proposé comme alternative car de nombreuses analyses du cycle de vie ont montré que les produits en bois offrent des avantages environnementaux indéniables, tels qu'une empreinte environnementale réduite par rapport à d'autres matériaux, y compris le béton et l'acier. En outre, les bâtiments en bois sont associés à une réduction des émissions de gaz à effet de serre et à une diminution des déchets (Canadian wood council of Canada, 2021). La contribution scientifique de cet article repose sur

l'importance accordée au travail en équipe pluridisciplinaire et sur l'analyse comparative entre la construction en bois conventionnelle et la construction préfabriquée alternative à plusieurs étages.

### **3.3 LIEN AVEC LES OBJECTIFS DU MÉMOIRE**

Cet article est une réponse directe à l'objectif principal du mémoire, soit de réaliser une simulation de construction du Club Med de Charlevoix en bois alors qu'il est déjà existant en béton. Il vient également répondre aux trois objectifs secondaires, soit la reconceptualisation des aménagements et de la planification, la compréhension sur l'impact du choix d'un système constructif sur le système architectural et structural ainsi que la réalisation d'une simulation des nouvelles structures suggérées.

### **3.4 ÉTAT DE PUBLICATION ACTUEL**

L'article a été soumis au journal MDPI Building le 13 mars 2024 pour l'édition spéciale *Timber Buildings – Design for the Future*. L'éditrice de la revue a pris contact avec l'étudiante pour accuser la réception. Le 29 mars 2024, l'article a été retourné pour révisions mineures à la suite des commentaires de quatre réviseurs. Les commentaires ont été appliqués et l'article a été retourné à l'éditrice le 7 avril 2024. En date du 17 avril 2024, l'article a été accepté, puis publié le 19 avril 2024. L'article présent dans ce mémoire est la version soumise après les premières révisions mineures. Seules des modifications de mise en page ont été effectuées entre cette version et celle publiée. Le facteur d'impact de la revue est de 3.8.

### **3.5 RÉSUMÉ DE L'ARTICLE**

Les professionnels de la construction travaillent trop souvent en silos et utilisent des méthodes de conception et de construction traditionnelles. La demande croissante de constructions rapides et de haute qualité fait de la fabrication hors site une pratique courante. Des études ont montré que la

collaboration entre toutes les parties prenantes est un élément essentiel à la réussite de la construction de tels bâtiments.

Cette étude multidisciplinaire d'un hôtel existant en béton vise à explorer une conception structurelle alternative en bois massif ou en construction modulaire volumétrique. À cette fin, le plan en béton armé du Club Med de Charlevoix a été utilisé comme référence pour les deux systèmes structuraux différents. La première stratégie a consisté à étudier le CLT (bois lamellé-croisé) et les colonnes en lamellé-collé pour reproduire le plus fidèlement possible le système en béton armé (colonne-dalle), tandis que la seconde a impliqué une préfabrication maximale (construction modulaire volumétrique). Les stratégies de construction en bois massif et de construction modulaire volumétrique peuvent toutes deux permettre de réduire l'empreinte carbone. Une étude avec le logiciel Gestimat a été réalisée afin de le démontrer.

La principale conclusion est que le plan devrait être conçu dès le départ pour être soit traditionnel, soit préfabriqué, puisque des changements majeurs sont nécessaires si l'on choisit de passer d'un système à l'autre. En outre, lorsque les systèmes structurels maximisent la construction hors site, comme la construction modulaire volumétrique, les différentes professions doivent être impliquées dès le début de la planification. Cela est nécessaire pour éviter la duplication des tâches et la négligence de considérations telles que les dimensions manufacturables et l'organisation des cloisons.

### **3.6 INTÉGRALITÉ DE L'ARTICLE**

**Design analysis of mass timber and volumetric modular strategies as counterproposals for an existing reinforced concrete hotel**  
**Marie-Laure Filion<sup>1,\*</sup>, Sylvain Ménard <sup>1</sup> , Carlo Carbone <sup>2</sup> and Mohamad Bader**

**Abstract:**

Construction professionals work in silos and use traditional design and construction methods. The growing demand for rapidly built and high-quality construction is making off-site manufacturing mainstream. Studies have shown that collaboration among all stakeholders is a necessary

component for success in the construction of such buildings. This multidisciplinary study of an existing concrete hotel aims to explore an alternative structural design in mass timber or volumetric modular construction. To this end, the reinforced concrete floor plan of Club Med de Charlevoix in Quebec, Canada, was used as a benchmark for two different structural systems. The first strategy investigated CLT (cross-laminated timber) and glulam columns to replicate the reinforced concrete system (column–slab), while the second involved maximum prefabrication (volumetric modular construction). Both mass timber and volumetric modular strategies can lead to a smaller carbon footprint. The main conclusion is that the plan should be designed from the outset to be either traditional or prefabricated, since major changes are required if the choice is made to switch from one system to the other. Moreover, when structural systems maximize off-site construction such as volumetric modular construction, the various professions need to be included during early planning. This is necessary to avoid task duplication and prevent the neglect of considerations such as manufacturable dimensions and partition organization.

**Keywords:** volumetric modular construction; building; modular construction; wood construction; industrialized construction; off-site construction; prefabrication; multidisciplinary; Canada

## **Introduction**

### *Prefabrication definition*

Pressures stemming from lagging productivity and quality in on-site construction have led to a renewed interest in off-site construction (Sutrinis & al., 2019). Off-site construction can be defined as building segments that are constructed in a factory and transported for final assembly on-site (Pan & Hon., 2020; Hussein & al., 2021). Svatoš-Ražnjević describes different levels of timber prefabrication (Svatoš-Ražnjević., 2022), categorizing them into 1D frame structures, 2D bearing walls, 3D volumetric modules, and a hybrid or combination of these three categories (Svatoš-Ražnjević., 2022; Assaf & al., 2023). Overall building composition can be placed in the following categories: 2D, 3D, hybrid podium, open building system, framed unit system, or hybrid cored-modular (Ramaji & Memari., 2013). For each of these, the construction process consists of two phases: production in the factory followed by on-site assembly. The level of prefabrication is established according to the

percentage of activities carried out in the factory (Sotorrío & al., 2023). The main differences between modular and traditional methods are greater need for collaboration, transportation, supply chain logistics, engineering requirements, and comprehensive design from the outset (Wilson & al., 2019; Pan & al., 2012; Choi & al., 2019). Off-site construction is not specific to any type of material. Timber has been proven to be suitable for every level of prefabrication and can help to increase productivity (Arup Rethinking Timber Buildings., 2019). In addition, certain tasks can be undertaken off-site, while other work, such as casting foundations, proceeds on-site. This overlapping of tasks leads to time savings (Arup Rethinking Timber Buildings., 2019).

### *Prefabrication advantages*

Off-site manufacturing is increasingly promoted for several reasons. The use of mass timber prefabrication reduces the project timeline, saves costs, and has a lower environmental footprint (Connolly & al., 2018). Modular construction can reduce on-site labour by approximately 50%, site management costs by 8% to 15%, and project scheduling by 30% to 50% (Hough & Lawson., 2019). In the specific case of a basic hotel design, the size of a room is generally compatible with a volumetric module (Hough & Lawson., 2019). These percentages usually depend on the type of project. For example, other authors, such as Wozniak-Szpakiewicz and Zhao, have described a schedule reduction of approximately 39% and a cost reduction of between 8 and 16% (Wozniak-Szpakiewicz & Zhao., 2020). Modules have the advantage of being factory-built to reduce material waste and can be transported to the construction site 80-95% completed. However, they sometimes require structural redundancy for transport. Therefore, they are complex structures, and the integration of 3D modelling and project management software is essential to federate design, fabrication, and construction data (Boafo & al., 2016). Another advantage of modularity is the potential for reuse. Modules can be designed to be disassembled at the end of a building's lifespan (NOORDZY., 2021). When compared to traditional constructions, the literature argues that off-site constructions are more sustainable, have better quality control, improve safety, produce less construction waste, and can reduce construction schedules (Hussein & al., 2021; Kosbar & al., 2023; Wuni & Shen., 2020; Abdelmageed & Zayed., 2020; Hu & al., 2019).

### Prefabrication difficulties

Most countries lag in the adoption of off-site construction (Sutrisna & al., 2019; Žegarac & Premrov., 2021). Timber volumetric modular buildings imply a complex and collaborative design process. Further, as their novelty requires more education for engineers, architects, and builders, professionals often opt for standardized steel or concrete construction models that are more prevalent in their studies (Khalfan & Maqsood., 2014). In Egypt, the application of off-site manufacturing in the construction sector faces significant challenges: experts and engineers indicate that high initial costs, longer lead times, and market demand uncertainties are the primary factors (Kosbar & al., 2023). Obstacles such as supply chain complexity (Hussein & al., 2021), unclear procurement methods (Salama & al., 2020), and cost uncertainties (Sutrinis & al., 2019) also challenge adoption. Payment and contractual distinctions also create impediments to off-site construction. For example, in traditional construction, the builder generally pays for materials when they are delivered on-site. However, with off-site constructions, manufacturers struggle financially because they finance and produce constructions before receiving payment. The planning and production of a module can start approximately 6 months prior to delivery; thus, during this process, manufacturers need to cover the costs of material and labour (Salama & al., 2020; Stein., 2016). Another difference between off-site and on-site construction is the responsibility transfer from the builder to the manufacturer of the material supply (Xu & al., 2021). Verifying the design of the structure to meet the expectations of the architect and engineer is a challenge, as builders deal with the construction on-site, but suppliers cannot verify that everything has been assembled as requested. For example, the supplier does not know if the volumetric module has been installed perfectly. In addition, the engineer is unable to verify the internal elements of finished walls of a volumetric modular construction.

### Problematic

While the “2015 Solid Timber Construction Report” summarizes 18 case studies regarding cost and schedule savings (Smith., 2015), few studies focus on the detailed processes and obstacles that impede collaboration between builders and suppliers in terms of the coordination of off-site prefabrication (Lopez & al., 2022). This is attributed to the fact that collaboration, in general, is lacking

(Bildsten., 2014). Moreover, there are limited publications available in the literature concerning the limitations and possibilities of low-rise multistorey timber prefabricated constructions' analysis (Svatoš-Ražnjević & al., 2022). Thus, designers struggle to propose an optimized design, since knowledge about volumetric modular design criteria is not sufficiently addressed by curriculums (Sun & al., 2020). These limitations include lack of integration, collaboration, and communication between project participants (Barati & al., 2013). Few studies deal with procurement management in off-site constructions and with decision-making tools to help practitioners select the appropriate procurement method and system (Assaf & al., 2023).

#### *How to increase prefabrication*

To increase uptake, the industry needs to enhance its competitiveness, improve the design process, and shorten the development cycle (Wang & al., 2023). Government policy should also include up-to-date industry courses and requirements along with job opportunities to enhance practical training (Adel & al., 2022). In a previous study, the procurement method was a significant barrier to the adoption of off-site construction. The critical factors in this method are price uncertainty, technical complexity, and design reliability (Agapidou., 2022). In the first steps of conception and throughout the process, it is recommended that an integrated design be implemented between architects, engineers, contractors, builders, and volumetric module manufacturers (Noordzy., 2021). Consequently, it is essential to identify the responsible party for each stage of the project to avoid unaccomplished or poorly executed tasks (Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation). A procurement model for volumetric off-site manufacturing has been proposed by Charlson and Dimka; they assert the requirement of a single point of responsibility that promotes integration (Charlson & Dimka., 2021).

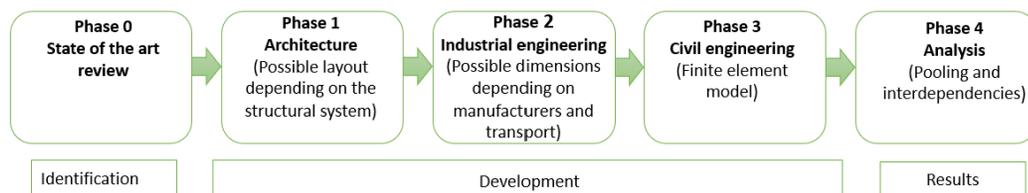
#### *Aim of the article*

This article aims to demonstrate the multidisciplinary nature of prefabricated building constructions. The reinforced concrete plan of Club Med de Charlevoix in Quebec, Canada, is studied to evaluate alternative timber construction and volumetric module strategies to closely replicate the existing plan

(post-slab). For each building system, architectural, industrial, and civil engineering elements will be analyzed to highlight their interdependencies. Timber was proposed as an alternative because numerous life-cycle analyses have shown that wood products offer undeniable environmental advantages, such as a reduced environmental footprint, over other materials, including concrete and steel. In addition, timber buildings are associated with lower greenhouse gas emissions and less waste (Canadian Wood Council., 2021). This paper's scientific contribution is based on the importance placed on multidisciplinary teamwork and on the comparative analysis between conventional and alternate prefabricated multistorey timber construction.

## Materials and Methods

The study approach for this article is divided into 5 phases, as shown in Figure 1.



**Figure 2. Phasing of the study methodology.**

### Phase 0: State-of-the-art review and building features

Phase 0 reviewed the state of the art in prefabrication and the challenges encountered in other similar buildings. The case study hotel was Building B of Club Med de Charlevoix in Quebec, Canada. The characteristics and plan of that as-built building were also studied. Building B houses all guest rooms, as opposed to building A, which contains the atrium, the pool, and all services and is not included in this study.

The building is found in a bucolic mountainous site; six storeys face the mountain and eight storeys face the St. Lawrence River. It has a height of 19 m facing the mountain and 25 m facing the water, a total area of 6582.28 m<sup>2</sup>, and a footprint of 994.52 m<sup>2</sup>. The building layout includes five room types; these are presented in Table 4.

**Tableau 4 : Number and dimensions of room types in Club Med de Charlevoix**

Type of Room	Number of Rooms	Width (m)	Area (m <sup>2</sup> )
G0	14	4.34	31.68
C3	32	3.80	33.74
C4	40	5.70	36.23
A3	20	3.80	41.45
A4	10	7.60	48.09

Type G0 rooms are those with an integrated mini kitchen and are allocated to hotel employees. C3 and A3 rooms are almost identical; however, C3 rooms are shorter to allow a wider corridor on the floors used as emergency exits. A4 rooms are the most luxurious room category, as they are the largest. C4 rooms are similar to A4 rooms but have smaller dimensions.

During Phase 0, a discussion was held with the engineering firm that developed the initial design for the concrete hotel. This meeting aimed to ensure that the proposed counterproposal study would meet the initial constraints and determine which parameters could be optimized for timber. These are listed below. Moreover, the objective was to understand which type of structural systems comparison would address the construction industry's enduring challenges. When an engineering firm receives a request to suggest an alternative to a reinforced concrete plan for a building, the objective is to maximize their options without transforming the initial building design. As a result of this meeting, five essential parameters and three optional ones were put forward to guide the project.

The essential parameters are as follows:

- Keeping the first two floors facing the water only, since the other side faces the rockface;
- Designing alternatives according to the same building code (2010);
- Avoiding foundation design for the new timber building;
- Conserving similar building organization, dimensions, and number of storeys.

The optional parameters are as follows:

- Conserving an equal or slightly higher number of G0 rooms;
- Conserving a similar column layout;
- Conserving a similar number of rooms of each type.

### Phase 1: Architecture

Phase 1 focused on the hotel's architecture. Whether using a post-and-slab construction system or a volumetric modular system, the aim was to analyze the consequences of a transformation from concrete to timber. To understand the particularities, a state-of-the-art review and meetings with architects were held. The first step dealt with analyzing the concrete architectural plan to understand the structural grid in relation to different room typologies.

For the column–slab system, assumptions were used to reproduce the glulam columns in dimensions as similar as possible to what they were in concrete as a first hypothesis since it is the quickest thing an engineer can do to see if it is realizable or not (see Table 5). These assumptions aimed to ensure that a consulting engineering firm is not required to go through the entire dimensioning process again, but the dimensions are not optimized.

**Tableau 5 : Column–slab system assumption of dimensions for wooden columns compared with planned concrete dimensions**

<b>Concrete Columns</b>	<b>Timber Columns</b>
275 × 400 mm	265 × 418 mm
275 × 500 mm	265 × 532 mm
275 × 600 mm	265 × 608 mm
350 × 500 mm	365 × 494 mm
600 × 275 mm	315 × 608 mm
600 × 600 mm	365 × 988 mm

A series of iterations were carried out to determine the possible new layout. Since volumetric modules of identical room widths had to be arranged to be aligned vertically, rooms needed to be rearranged. To this end, six different scenarios were devised and analyzed according to the seven parameters (see Table 6). The order of iterations was not significant. All of the iterations were concepts recommended in Phase 0. The weight of each criterion was established following discussions with architects. Following an agreement between four architects, the values obtained were subjective. During each iteration, an Excel spreadsheet was first used to visualize the proposed distribution by floor, as well as the dimensions of the corridors and the total dimensions of the building. Then, when

the proposal seemed appropriate, the superimposed volumetric wall modules were drawn to ensure feasibility.

**Tableau 6 : Decision matrix for the different iterations in compliance with the seven parameters' criteria**

Iterations	Compliance with Number of Rooms	Compliance with Room Type	Compliance with Corridor Dimension	Hotel Profitability	Compliance with Club Med Criteria	Minimization of Materials	Minimizing Modifications	Total
<b>Weight</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>25</b>
Close to concrete	4	2	1	1	5	1	0	14
Standardization	4	2	1	2	2	2	0	13
Profitability	3	2	3	2	2	2	0	14
Large rooms facing water	3	3	1	1	5	2	0	15
Pyramid	3	2	5	1	5	3	0	19
Additions	4	2	5	2	5	2	0	20

### Phase 2: Industrial Engineering

Phase 2 focused on industrial engineering in order to understand the industry challenges and possible optimizations. The aim was to find out how to apply the architectural peculiarities identified in Section 2.2 and to determine what modifications should be carried out. During this phase, it was essential to determine the appropriate type of prefabrication, since each possesses a unique potential. According to the building code requirements in Canada (National Research Council of Canada., 2021), light-frame construction cannot be used for buildings over six storeys. Therefore, CLT modules were used. However, the industry in Quebec is geared towards panelization more than towards modular volumetric construction. To gain a greater understanding of the reality of the industry and to be able to apply the necessary concepts to the project, meetings with manufacturers of light-frame timber and CLT volumetric modules were held.

A transportability study was also carried out to ensure that the desired modules would not only be simple to produce but also transportable without incurring additional costs. In doing so, the architecturally defined room dimensions needed to be revised to accommodate transport units without additional costs. For a small number of rooms with non-standard dimensions, the supplier may prefer paying for special transport rather than building numerous small modules. When modifying dimensions, the function of the rooms must be taken into consideration. In the case of a room used

as a living unit for employees, dimensions cannot be reduced, since the room is not only used as a place to rest but also as a living space (usually with additional amenities such as a small kitchen).

### Phase 3: Civil engineering

Phase 3 focused on the civil engineering aspects, ensuring that the architectural and industrial concepts were feasible and whether any structural modifications were required.

Two different eight-storey buildings were designed and modelled using the finite elements method (FEM). RFEM software was used both simulations (Dlubal Software., 2021), and it used the CSA O86-19 parameters and requirements (CSA O86-19., 2019). The first building was modelled using CLT for horizontal elements and glulam for vertical elements; the other building was modelled using volumetric modular construction. In the first model, the aim was to reproduce as closely as possible the same outlines of the concrete structure to compare them. The objective of the second model was to study volumetric modular construction. For modelling columns, 1D linear elements were used, whereas 2D plate elements were utilized for modelling slabs and cores. The materials in the columns were assumed to follow an equivalent isotropic linear elastic stress–strain law, given their exposure solely to axial loading. In contrast, the CLT wood was modelled with orthotropic linear elastic behaviour. The vertical gravity-load-resisting system was not the same for both concepts. For the column–slab concept, glulam columns were used as the vertical gravity-load-resisting system; for the modular concept, the wall of the volumetric modules was used.

For the column–slab concept, the beams were assumed to be 20f-EX-grade Douglas fir-larch, and the slab was assumed to be Nordic structure CLT (Nordic structures., 2024). All connections were considered, with only the moment in the plan of the section (y and z) fixed for the columns. The moment in the height of the column (x) was released. For the volumetric modular concept, wall, floor, and ceiling panels were first modelled, assuming that Nordic X-Lam 89-3s were used. In both construction systems, slabs, staircases, and elevators were modelled on Nordic Structures CLT. All loads were determined according to the National Building Code of Canada (2015) (NBCC) (National Research Council of Canada., 2021) and are shown in Table 7. Building B of the hotel under study falls into Group C, as it is primarily used for residential purposes.

**Tableau 7 : Gravitational loads' design data according to National Building Code of Canada (NBCC) (National Research Council of Canada., 2021)**

Item	Value	Units	Comments	Source
Location category	C			Structure Plan
Risk category	1		Normal	Structure Plan
<b>Dead Load</b>				
Self-weight	N.A.		Managed by RFEM	
Mechanic + architecture	1.5	kPa		Structure Plan
<b>Live Load</b>				
Roof	1	kPa		Table 4.1.5.3
Corridors	4.8	kPa		Table 4.1.5.3
Floors	1.9	kPa		Table 4.1.5.3
Stairs	4.8	kPa		Table 4.1.5.3
<b>Snow Load</b>				
Importance factor	1		ULS	Table 4.1.6.2A
	0.9		SLS	Table 4.1.6.2A
Sr (1/50)	0.6	kPa	Baie-St-Paul	Table C-2
Ss (1/50)	3.4	kPa	Baie-St-Paul	Table C-2
Snow load of the roof	3.32	kPa	ULS	4.1.6.2
	2.99	kPa	SLS	4.1.6.2

All elements were designed to comply with the ultimate limit state (ULS) and serviceability limit state (SLS) requirements. Load effects were obtained directly from RFEM structural analysis and wood verification for all load cases required by the NBCC. However, it should be noted that design of the connections was not within the scope of this paper. For all cases, surface loads were applied directly to floors and roofs. Table 8 illustrates the load combinations that were used in this study. In this table, D, L, and S represent dead, live, and snow loads, respectively. ULS is the ultimate limit state and SLS is the serviceability limit state.

**Tableau 8 : Ponderation for the load combinations**

Cases	D	L	S
ULS 1	1.4		
ULS 2	1.25	1.5	
ULS 3	1.25	1.5	1
ULS 4	1.25	1	1.5
ULS 5	1.25		1.5
SLS 1	1		
SLS 2	1	1	
SLS 3	1	1	0.31
SLS 4	1	0.3	0.9
SLS 5	1		0.9

#### Phase 4: Analysis

Finally, Phase 4 focused on understanding and assembling the various results obtained and making general recommendations. The results were analyzed to make recommendations and highlight the advantages, consequences, and characteristics of transforming a concrete hotel building plan into timber using a column–slab and a modular construction system. To carry out this analysis, information from phases one to three were combined to design an alternative building and validate its feasibility. Once these alternative timber buildings with column-slab and modular construction respect all parameters, Gestimat was used for a preliminary greenhouse gas emissions comparative analysis of the existing and alternative building designs (Gestimat., 2024). The Gestimat analysis concerns only GHG emissions from structural materials in the first phase of the building life cycle (production phase: extraction of raw materials, transport and manufacturing). It has been used for similar subject in other studies from Lecours and from Cardinal (Cardinal & al., 2024; Lecours & al., 2023).

## **Results and Discussion**

### Reconceptualization of developments and planning: Architectural analysis

Phase 1 of the methodology focused on the architectural aspect of rearranging the partition walls from the concrete hotel plan to wood. To this end, both structural systems were analyzed (mass timber and volumetric modular systems).

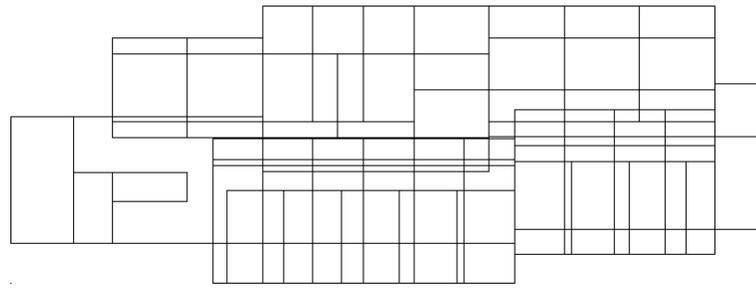
In traditional construction, the columns cross the building from bottom to top at the same point, and gravitational loads transfer through them. In a hotel, walls and columns are generally on the same

axes, and rooms are designed according to structural grids to avoid having columns in open spaces. Concrete slabs and timber panels do not have the same maximum span. Keeping the same column grid is not always possible. As an example, an added column that would potentially end up in the middle of a room is not architecturally acceptable. If this occurs, a counterproposal must be reorganized according to new grid lines or modlines.

As expected, redesigning the plan from concrete to timber implies a completely new structural grid, as timber is optimized with smaller spans. More or larger columns are required to achieve the same performance. From an architectural point of view, if columns are added, they should be at room intersections, or at room–corridor intersections, to avoid columns in rooms. From another point of view, if columns are enlarged, they should be increased only in the room space, since the corridors are already designed with the minimum dimensions allowed. Following a discussion with the industrial partner, the decision was made to increase the column sizes rather than add more. CLT slabs need to be designed with the correct panel dimensions. The existing building's non-rectangular geometry made it unsuitable for this type of slab. The numerous notches in the building, at inappropriate distances, meant that CLT panels would not be optimal, increasing material costs. To be optimal and economical from an industrial point of view, the building plan should follow a 2.7 m wide panel modular grid, since this is what Canadian manufacturers can produce.

In simulating modular volumetrics, Figure 5 shows the superimposition of the building's various partitions of the concrete plan. In a hotel context, the volumetric module system is generally considered as one module per room. The rooms need to be arranged so that they stack perfectly, with identical widths.

In the original Club Med of Charlevoix design, the partitions were not systematically aligned from one floor to the next, creating challenges for connections and module stacking. If a CLT module design is used, loads in walls must follow a vertical path.



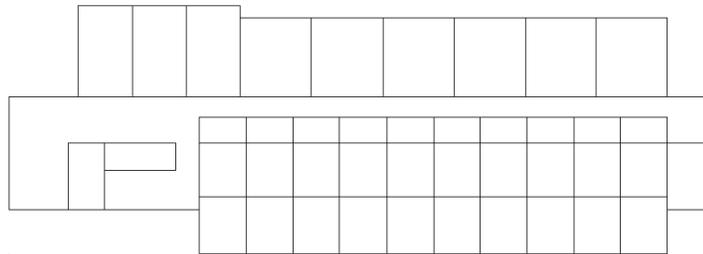
**Figure 3 : Overlapping wall partitions on the 8 storeys of the original concrete plan**

Corridor dimensions are important, as they are calculated based on the minimum dimension per person for fire evacuation. In the case of a horizontal walkway connected to another building, corridors can be used as an evacuation passage if a fire breaks out in other buildings, and, therefore, they must be wider. Hence, corridors cannot be reduced in width. Nonetheless, rooms need to be optimized compared to uninhabitable space, since corridors represent unprofitable space. Corridors facing various exits, staircases, and elevators must be widened to allow people to wait in front of them without impeding circulation.

Rooms that qualify as more luxurious are generally on the upper floors in order to take advantage of the best possible views. For example, Club Med's higher-end rooms must be on the upper floors and face the river. On the other hand, it is possible to create a room layout with a higher number of narrow rooms with a nice view in order to be more profitable and charge more for a larger number of rooms. Furthermore, for luxury rooms, it is possible to place them on the garden level if a courtyard or terrace is offered. As far as the number of rooms, alternative construction should aim to respect the original quantities. The hotel's profitability calculations are based on this number, but changing a structural system will always lead to a certain variation.

For the first simulation, the layout was designed to respect the building's exterior envelope as much as possible. However, the appropriate way to do this is to define a central corridor and place the rooms on either side of it. A corridor is generally as straight as possible. Considering all the above concepts, various iterations were carried out to obtain the final proposed solution. An alternate

modular geometry to the concrete layout was proposed for Club Med Charlevoix, as shown in Figure 6.



**Figure 4 : Overlapping of wall partitions on the 8 storeys of the new proposed modular repartition**

Figure 6 illustrates the superposition of partitions on hotel floors according to the proposed configuration. Table 9 summarizes the area associated with every storey. There is, therefore, an adequate load descent in the hotel walls, which are superimposed on the same axes, regardless of the floor.

**Tableau 9 : Floor area of each storey**

	<b>As-Built</b>	<b>Volumetric Modular</b>
Area of Storey 1–2 (m <sup>2</sup> )	542.84	587.04
Area of Storey 3–6 (m <sup>2</sup> )	949.17	932.20
Area of Storey 7–8 (m <sup>2</sup> )	717.49	766.18
Total area (m <sup>2</sup> )	6317.34	6435.23

The new proposal shown in Table 10 includes four additional rooms for permanent employees. These additional rooms can be used for internships or booked like the other types.

**Tableau 10 : Proposed new room repartition**

<b>Type</b>	<b>Number of Rooms</b>	<b>Difference from the Original Concrete Plan</b>
G0	18	+4
C3	36	+4
C4	36	-4
A3	20	0
A4	10	0
Total	120	+4

The quantity and position of the prestigious rooms remain the same in the alternate solution (facing the water and on higher floors). During the rearrangement, the narrowest rooms are placed facing the river so that they can be booked at a higher price, leading to greater profits. Design will vary from conventional construction to volumetric modular construction. Indeed, if the plans are drawn up for traditional constructions, moving to an alternate in volumetric modular construction will require rooms and dimensions to be modified, and the height of the building will be increased to account for structural redundancy. There is no universal plan for all construction systems: dimensions, grids, and arrangements will vary according to structural systems.

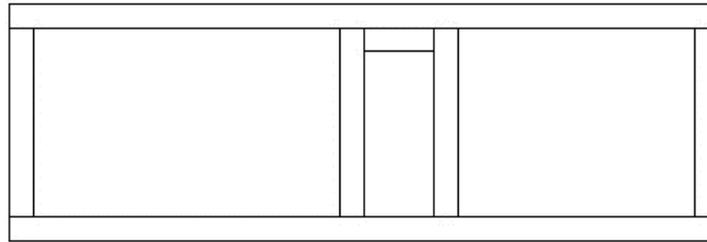
*Understanding how the choice of an industrialized construction system impacts both the architectural and structural systems: Industrial engineering analysis*

Phase 2 of the methodology focused on the industrial engineering aspect of the plan change from concrete to wood. To this end, both structural systems were analyzed.

It is important to note that before deciding on a volumetric modular strategy, it is necessary to ensure that the building site will have sufficient space to store the modules. If this is taken into account, a crane will be mobilized less often for setting the modules. There are various methods for raising the modules, including inclined cables positioned at the corner or edge, with or without a spreader beam. To reduce internal forces, prevent diagonal pulling in the module, and attain optimal static weight distribution it is common practice to employ a lifting frame or a main beam with crossbeams (Halfen., 2015).

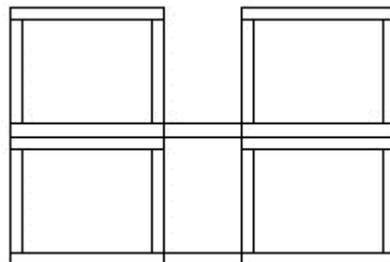
Within the column–slab alternate design, column dimensions cannot be established in the same way as concrete dimensions. Manufacturer catalogues include specific dimensions for the materials produced. From an optimization point of view, to avoid waste and unused materials, the geometry of the building plan must respect the manufacturer's optimal dimensions of CLT. Any timber design must consider modular and manufactured available dimensions to avoid waste.

For the modular simulation, modules had a length equal to the total width of the building. These structures included two bedrooms and corridor space, as illustrated in Figure 7.



**Figure 5 : Cross-section of a volumetric module comprising room/corridor/room**

Modular manufacturers suggested that the width of the existing hotel was too large for this type of module. Further, this type of layout can lead to poor sound insulation between the corridor and rooms. This is a critical issue to be avoided in hotel construction. A different layout for corridor management and sound transmission is illustrated in Figure 8. In this layout, each room is independent and has its own module. The corridor has a CLT slab floor. This saves headroom for the electromechanical equipment, since only one CLT slab is used for the floor, and there is no duplication with the ceiling. By having independent room modules, sound transmission is reduced in comparison with the previous layout.



**Figure 6 : Cross-section of two-storey section including module/corridor panel/module**

Indoor acoustic comfort is an important design consideration with volumetric modular and lightweight construction systems. To achieve a good indoor acoustic comfort and insulation in the hotel, the choice of modules is essential. Additionally, the location of the various ducts must be determined from the outset. Based on a modular case study by Getzner, 90% of sound transmission occurs through the module walls. To effectively minimize the transmission of sound and vibrations through these

walls, Sylomer elastic bearing strips can be employed. These strips ensure load transfer between modules and prevent the creation of sound and vibration bridges (Getzner., 2015).

In the analysis of transport regulations, an escort is required when the width of an element exceeds 3.75 m (Publication Québec., 2024). To minimize costs, dimensions should be optimized according to transport. Dimensioning according to manufacturability and transportability (dimensions and materials) is the basis of volumetric modular design. Since the construction industry supplies materials in pair inches, the proposed dimensions must be multiples of an even inch to avoid unnecessary cutting and waste. Alternate design dimensions must be as close as possible to the original dimensions, while still being less than 3.75 m, and an even multiple of an inch. In addition, six inches must be subtracted from the authorized transport dimensions to account for the protection that will be added to the modules for transport. To avoid the need for a transport escort, widths for G0 rooms were adapted while retaining the same surface area. However, by doing so, it was no longer possible to create two units per module. Therefore, this option was ruled out. To meet transport standards, the room's dimensions were slightly reduced or halved, as shown in Table 11.

**Tableau 11 : New dimensions for each type of room to meet transport requirements**

Type	Actual Dimensions (m)	New Modular Dimensions (m)	New Modular Dimensions (Imperial)	Transport Consideration
G0	4.34 × 7.30	4.32 × 7.32	14'-2" × 24'	1 escort
A3	3.80 × 10.91	3.65 × 10.90	12' × 35'10"	Sign "D" + flash
C3	3.80 × 8.80	3.65 × 8.80	12' × 28'10"	Sign "D" + flash
A4	7.60 × 6.33	2 * (3.65 × 6.35)	2 * (12' × 20'10")	Sign "D" + flash
C4	5.70 × 6.36	(2.5 × 6.36) + (3.2 × 6.36)	(8'2" × 20'10") + (10'6" × 20'10")	Sign "D" + flash

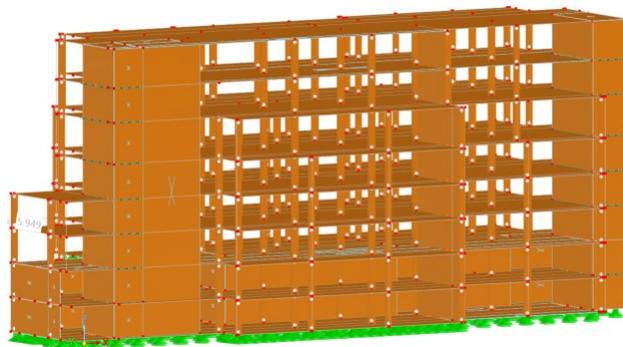
Moreover, the weight of the modules was an important factor. If modules are too heavy, they will require larger cranes and non-standard transport, which increases costs. Some module suppliers agree that increased variability can be achieved if the exterior finishing is carried out on-site. This step reduces the risk of damage during transport. In addition, when several modules are superimposed, weatherproofing and finishing is easier once the modules have already been

assembled. Discussions with module suppliers reveal a key challenge in ensuring the quality of modular constructions: the need for better monitoring of quality consistency from the factory to the construction site. A module could leave the factory with controlled quality but be incorrectly stored on-site.

*Modelling of the new wooden structure: Civil engineering analysis*

Phase 3 of the methodology focused on the civil engineering aspect of the alternate timber designs. Thus, both structural systems were analyzed with gravitational forces.

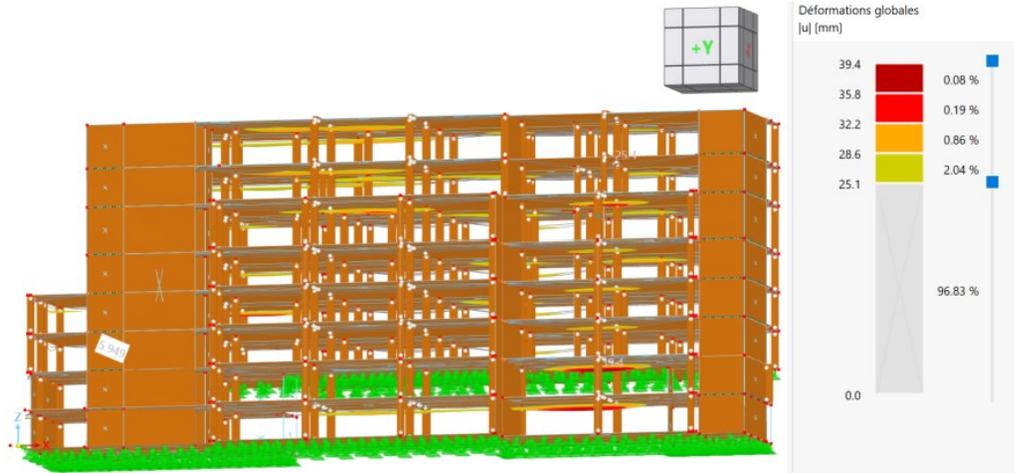
According to the 2015 Quebec Building Code, combustible constructions (made of wood) can have a maximum height of 18 m between the average ground level and the floor of the highest storey (National Research Council of Canada., 2015). Since the building in question had six floors on one side and eight on the other, verifications were needed: one side complies with the building code while the other side does not. The building's surface area was permissible according to the number of storeys. The Quebec building code allows 9000 m<sup>2</sup> for Group C buildings. The timber column–slab model was simulated to maintain the original concrete plan, as shown in Figure 9.



**Figure 7 : Column–slab modelling with the same grid as in concrete using the software RFEM**

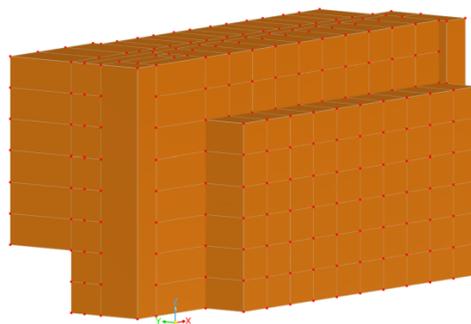
As expected, deflections were too high when using timber columns with the same dimensions and the same grid as the concrete columns. Increased CLT panel thickness or the addition of more columns was necessary. When analyzing the structural grid and the location of walls, some columns were added, and the thickness of panels was increased to reduce the deflections. As a result, only one major static problem is shown in Figure 10: a deflection of 39.44 mm under the D + L + 0.45 S load combination at the critical point. this span was too large. The staff rooms (G0) are

located on the two lower storeys, and their walls are not placed on the structural grid because they are narrower. Because of that, fewer columns are by the walls and the span is larger. Instead of having columns at every room wall, there are columns every two or three room walls.



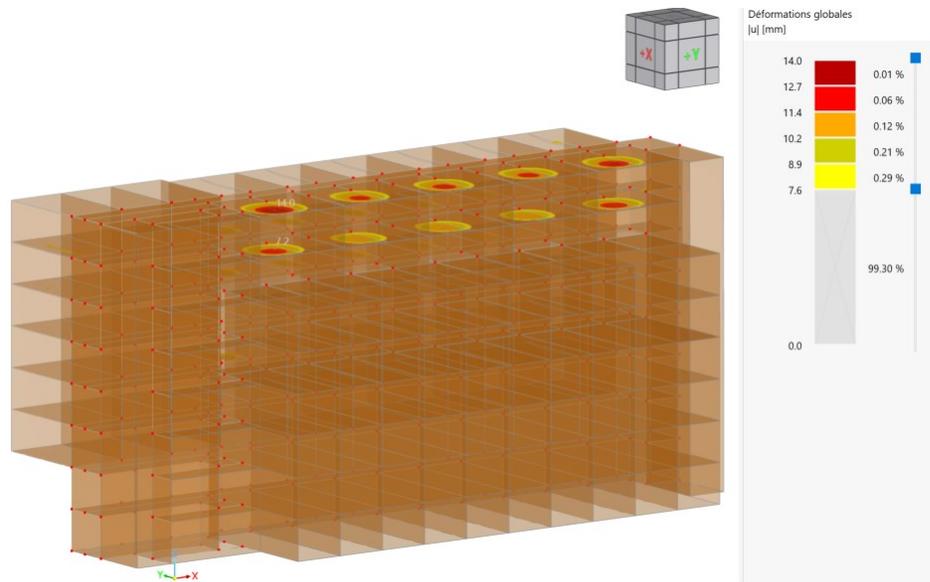
**Figure 8 : Static analysis of column-slab; view from the side using RFEM software**

The volumetric modular simulation considered volumes added to an on-site built podium or a concrete foundation. It is important to consider the different tolerances of different materials, as well as the possible tolerance of misalignment during module installation (Gijzen., 2017). Figure 11 depicts the modelling of each wall to reproduce the behaviour of the timber structure.



**Figure 9 : Volumetric modular modelling of Club Med of Charlevoix using RFEM software**

The largest deformation is 14 mm, as shown in Figure 12, using the load combination of  $D + 0.35L + 0.9S$ . The maximum deformation is at the top of the building because it is the area with the biggest span. The A4 rooms have double the width of the rooms under them. There is no middle wall in them.



**Figure 10 : Static analysis of volumetric modular modelling for the wooden hotel using RFEM**

With the volumetric modular design, there are two proposals for the height of the building and the height of the rooms. It is important to note that with volumetric modular construction, each module has its own floor and ceiling. Therefore, when they are aligned vertically, the total height is increased when compared to traditional constructions. If the region has a maximum permitted height in the code requirements, as in Quebec, it is possible to reduce the interior height of the modules. For the same number of floors, a modular building will always be taller compared to traditional buildings that only have one concrete slab that acts both as floor and ceiling. During the design phase, factory and transport standards are considered to limit simulation iterations. In these situations, BIM (building information modelling) can be very useful in coordinating all stakeholders and analyzing issues in advance. One difficulty encountered when modelling a building with volumetric modules is assigning connections. According to the literature, modular connections are generally made in the corners of the modules. However, one of the limitations of the software used (RFEM 6) is that such connections were not possible.

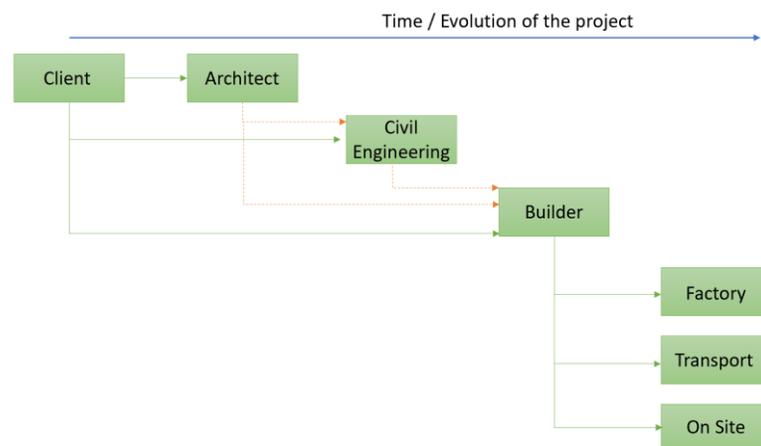
**Integration of the three disciplines (architecture, industrial engineering, and civil engineering)**

There are always interdependencies between disciplines. For the column–slab system, the concrete column grid does not apply to the timber building, since additional columns will be needed to reduce

deflections. Therefore, these must be considered in the architect's organization so that no columns end up in a room before the finite element model is produced by the engineer.

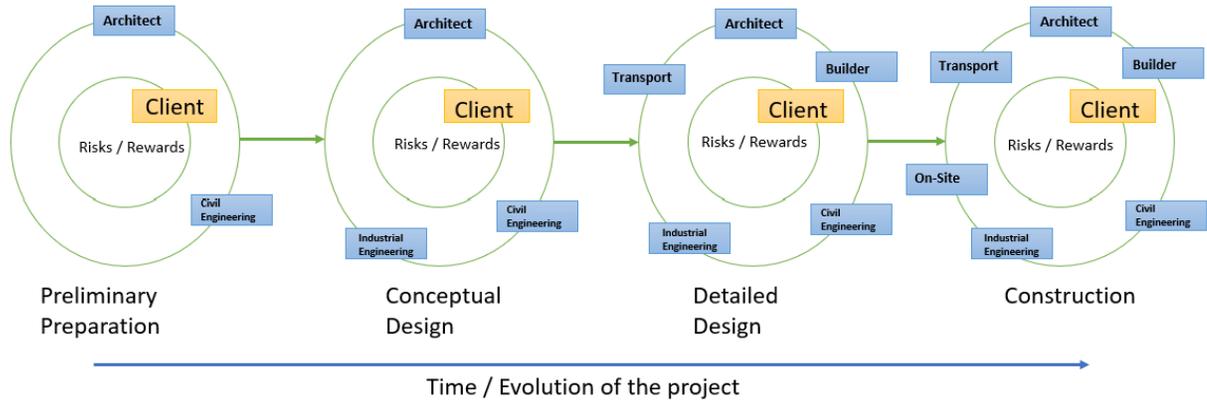
For the modular system, the volumetric module dimensions depend on the function of the room, as well as on what is permitted in terms of transport and factory capacity. The type of volumetric module that will be used will depend on what the industry can build in terms of required quantities and prescribed timeframe (light frame vs. CLT) but also depending on the building's function. Once the type of module has been chosen, the architect must ensure that the modules respect the dimensions acceptable to the carrier and that, in the plan, the rooms are arranged so that they stack perfectly, with identical widths. The architectural plan must also consider the location of luxury rooms and the dimensions of corridors. Then, once the choices have been made, the civil engineer can complete the finite element model to ensure that the building has the correct dimensions and materials.

As a rule, traditional buildings are built according to separate contracts. There is a designated professional who communicates with the client. Other professionals are responsible for conception and ensuring that everything is carried out according to the plans and specifications. This diagram is illustrated in Figure 13, where the green solid lines represent contracts, and the red dotted lines represent checks.



**Figure 11 : Evolution of a traditional construction project; green solid lines represent contracts and red dotted lines represent checks**

Following the results obtained in the case study, planning must include all stakeholders from the outset. This integrated project delivery model and its applicability in off-site construction is simulated in Figure 14.



**Figure 12 : Evolution of an off-site construction project.**

After the integration of the different disciplines, a comparative greenhouse gas emission analysis of the three structural simulations was carried out using the Gestimat tool developed by Cecobois (Gestimat., 2024). In the preliminary design of the two wooden structural simulations, certain assumptions were made in the GHG emissions analysis. Firstly, we used the typical modifiable six-storey office building to have representative quantities of reinforcement and connections. Secondly, the foundations and roof were not considered in the analysis because they were not part of the actual structural system comparison. Finally, as the building is non-traditional, with two half-storeys, four full storeys, and two reduced storeys, the total quantities were summed in Excel and entered as the equivalent of one storey instead of six in the software.

**Tableau 12: Scenario Comparison**

	Concrete (Reference)	Column–Slab	Volumetric Modular
Column (m <sup>3</sup> )	140	160	0
Slab (m <sup>2</sup> )	6317	6317	6435
Interior walls (m <sup>2</sup> )	7044	7044	7009
Exterior walls (m <sup>2</sup> )	3332	3332	3270

The reference scenario was based on the structural and architectural plans for Club Med Charlevoix as built in concrete. When modifying the typical building scenario for the volumes of the various elements, the proportional quantities of reinforcement were retained. The room walls were steel light-frame, with 92 mm studs spaced at 610 mm. Exterior walls were also considered as 92 mm steel light-frame studs but spaced at 406 mm. A fiberglass-reinforced gypsum sheathing was added to close the wall and be more comparable to the modular scenario. The load-bearing walls are made of reinforced concrete.

The column–slab scenario was carried out with glulam columns and CLT slabs. The default connection proportions of the standard scenario were retained for glulam: 27.5 kg steel plates/m<sup>3</sup> of glulam and 2.825 kg screws/m<sup>3</sup> of glulam. For CLT, no values are listed in the database. Therefore, a value of 1.39 kg nails/m<sup>3</sup> of wood was recommended by Cecobois. This is the traditional value for wood decking. Exterior walls were considered to be identical to the concrete scenario. Room walls are the same as in the concrete scenario. However, the load-bearing walls are considered with CLT, with the same connection proportions as the slab.

The volumetric modular scenario required more adjustments to the typical building, since CLT values are not included by default in the Gestimat software. A quantity of 1.39 kg of steel nails per cubic meter of CLT was considered, following Cecobois' suggestion. The building's interior and exterior walls are those of the volumetric modules.

We were then able to compare the total GHG emissions of the three scenarios for every material. The results are shown in Table 13. The resulting data illustrates timber's lower environmental footprint.

**Tableau 13 : Gas emission of the scenarios (Gestimat., 2024)**

	<b>Concrete (Reference)</b>	<b>Column–Slab</b>	<b>Volumetric Modular</b>
Steel (Kg CO <sub>2</sub> equivalent)	227,263	89,298	15,842
Concrete (Kg CO <sub>2</sub> equivalent)	578,023	0	0
Wood (Kg CO <sub>2</sub> equivalent)	0	157,742	258,312
Others (Kg CO <sub>2</sub> equivalent)	7375	7375	0
<b>Total (Kg CO<sub>2</sub> equivalent)</b>	<b>812,661</b>	<b>254,415</b>	<b>274,154</b>

## Conclusions

In conclusion, this study contributes to the field by highlighting timber structures as viable substitutes to reinforced concrete structures. However, as compared to on-site concrete, which offers flexibility, prefabricated timber systems require higher levels of design integration among all stakeholders. The goal is to facilitate the selection of suitable solutions from the initial stages of design, ultimately leading to the development of more efficient and cost-effective multistorey timber construction methods for practical use. Through a comprehensive exploration of multistorey timber design, the insights presented in this paper highlight all the issues and peculiarities when proposing an alternate timber design to a reinforced concrete baseline.

The redesign of a concrete hotel building into timber was studied for a post–slab and a modular transformation. The alternate timber design requires additional columns and increasing the thickness of the CLT panels. The geometry of the building is different, as some columns will have to be realigned, and the geometry of the CLT panels will have to be adapted. National building code regulations need to be validated regarding the building height and surface area for combustible structures.

The volumetric modular alternative involves reorganizing the rooms so that modules retain the same number and types of rooms in the final building. The width of these modules needs to be modified to comply with transport constraints and must be optimized according to the construction process. In

general, the aim is to have one or two modules per room and to build corridors with CLT panels to limit noise propagation and provide sufficient space for services. The luxurious rooms generally need to be placed at the top of the building, but still arranged so that they stack perfectly, with identical widths to the ones below. One remaining difficulty is the management of internal and inter-module connections. Finite element software is not ideal for this level of connection modelling. BIM (building information modelling) is essential to ensure good communication and collaboration between the various parties involved in volumetric modular construction projects. The construction site requires a staging area to temporarily store volumes before they are assembled.

The current study has shown a reduction for the timber scenarios from 812 661 Kg CO<sub>2</sub> for reinforced concrete to (254 415 and 274 154) Kg CO<sub>2</sub>.

The future trend should focus on maximizing the utilization of low-carbon materials by prioritizing the exploration of geometries that are better suited to specific structural systems and space requirements during the design process rather than the current approach of shaping designs around predetermined materials. The emphasis should be on adopting the design to fit the available materials and viable geometries rather than on forcing the materials to conform to pre-established designs and geometries.

### **3.7 CONTRIBUTION DE L'ÉTUDIANTE**

L'étudiante a contribué aux éléments suivants sur l'article :

- Effectuer une analyse approfondie de la littérature existante pour définir les objectifs scientifiques et organiser la démarche de recherche;
- Analyse des résultats;
- Conclusions tirées des résultats;
- Rédaction de l'article et ajustements en conformité avec les suggestions de l'équipe de direction;
- Création des figures et tableaux;
- Références.

## CONCLUSION

Ce projet de recherche avait comme objectif principal de réaliser une simulation du Club Med de Charlevoix en bois alors que sa conception originale était en béton armé. En d'autres termes, ce travail visait une étude de cas de la caractérisation du Club Med de Charlevoix s'il avait été réalisé en bois de manière fidèle au plan et de manière la plus préfabriquée possible. Au final, des recommandations sur différents systèmes constructifs en bois sont énoncées lorsqu'une trame structurale est déjà préétablie lors de la conception en béton et ne correspond pas à la trame pour une construction en bois. Du point de vue des objectifs secondaires, ils étaient axés de façon à connaître les implications d'une reconception du projet en considérant une structure en bois au lieu de la structure en béton en analysant l'architecture, le génie industriel et le génie civil.

Le projet faisant partie de la chaire industrielle de recherche sur les bâtiments écoresponsables en bois, il était également important de satisfaire les attentes du partenaire industriel Cima+.

Une revue de littérature a d'abord été réalisée afin de connaître les lacunes de l'industrie ainsi que d'en apprendre davantage sur la préfabrication en bois. Des résultats ont été obtenus pour chacun des objectifs secondaires.

Pour l'implication un : Reconceptualisation des aménagements et de la planification, il a été déterminé que les cloisons des murs devront être modifiées. Dans le réaménagement, il est toutefois important de considérer les dimensions des corridors ainsi que le nombre et le type de chaque chambre.

Pour l'implication deux : Comprendre comment le choix d'un système constructif industrialisé impact à la fois le système architectural et celui de structure, il a été déterminé que les dimensions des modules est le critère le plus important pour le fabricant ainsi que le transport. Il est également important de considérer un espace en chantier pour recevoir les modules ainsi que la mobilisation de la grue.

Pour l'implication trois : Calcul et Simulation de cette nouvelle structure en bois, la modélisation par éléments finis a montré qu'il n'est pas possible de garder la même grille de colonnes. Il faut donc en ajouter afin de respecter les déflexions permises.

Par la suite, une analyse avec le logiciel Gestimat a été réalisée afin de comparer la quantité de CO2 équivalent pour le scénario de référence en béton comparativement à ceux en bois. Nous obtenons 812 661kg pour la référence en béton, 254 415kg pour le poteaux-dalles et 274 154 pour le modulaire.

En conclusion, il est primordial que tous les intervenants soient consultés dès le départ d'un projet. Il faut penser autrement et mettre d'abord le matériau souhaité dans la conception avant la trame plutôt que de mettre la trame du bâtiment et par la suite prendre les décisions subséquentes. La tendance future devrait être de maximiser l'utilisation de matériaux à faible teneur en carbone en donnant la priorité à l'exploration de géométries mieux adaptées à des systèmes structurels spécifiques et à des exigences spatiales au cours du processus de conception, plutôt qu'à l'approche actuelle qui consiste à façonner les conceptions en fonction de matériaux prédéterminés.

Des travaux complémentaires pourraient poursuivre cette étude et la bonifier. En effet, une analyse sismique de la conception des trois scénarios est manquante dans cette étude, particulièrement en considérant la sismicité de la région de Charlevoix. Dans ce même ordre d'idées, une analyse de la protection incendie et une analyse du vieillissement des structures des différents scénarios seraient nécessaire si l'on voulait réellement réaliser le projet. Finalement, une analyse d'un bâtiment hybride serait pertinente afin d'aller chercher le meilleur de chaque matériau.

Les praticiens peuvent utiliser des résultats de cette recherche pour différents scénarios. En effet, bien qu'il s'agisse d'une étude de cas, celle-ci vient donner les bases de la préfabrication ainsi que les considérations que nul ne peut négliger dans l'approche d'un projet. La recherche a également mise de l'avant des considérations de conception tel que les dimensions à respecter dès les premières ébauches du bâtiment.

## LISTE DE RÉFÉRENCES

- Abdelmageed, S., & Zayed, T. (2020). A study of literature in modular integrated construction - critical review and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124044>.
- Acqbuilt. (2021, 16 novembre). *Off Site Construction* [Présentation Orale]. Workshop The Future of Construction is...Prefabrication!, En ligne.
- Adel, M., Cheng, Z., & Lei, Z. (2022). Integration of building information modeling (bim) and virtual design and construction (VDC) with stick-built construction to implement digital construction: a Canadian general contractor's perspective, 12(1337), 1337–1337. <https://doi.org/10.3390/buildings12091337>.
- Agapiou, A. (2022). Factors influencing the selection of a procurement route for UK off-site housebuilding. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law*, 175(1), 3–15. <https://doi.org/10.1680/jmapl.20.00027>.
- Arup Rethinking Timber Buildings: Seven Perspectives on the Use of Timber in Building Design and Construction; ARUP: London, UK, 2019.
- Assaf, M., Hussein, M., Abdelkhalik, S., & Zayed, T. (2023). A multi-criteria decision-making model for selecting the best project delivery systems for offsite construction projects, 13(571), 571–571. <https://doi.org/10.3390/buildings13020571>.
- Augustino, D.S., and Antwi-Afari, B.A., (2018). "Parameterized Modelling of Global Structural Behaviour of Modular Based Two-Storey Timber Structure." Master Thesis, Linnaeus University, Department of Building Technology, Växjö, Sweden.
- Barati, R.; Charehzehi, A.; Preece, C.N. Enhancing planning and scheduling program by using benefits of BIM-based applications. *Civ. Environ. Res.* 2013, 3, 41–48.
- Beaucher, S. (2015). *Le plus haut multirésidentiel en bois de l'est du continent*. 8.
- Bildsten, L. (2014). Buyer-supplier relationships in industrialized building. *Construction Management and Economics*, 32(1-2), 146–159. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.812228>.
- Boafu, F., Kim, J.-H., & Kim, J.-T. (2016). Performance of modular prefabricated architecture: case study-based review and future pathways, 8(6), 558–558. <https://doi.org/10.3390/su8060558>.
- *cadwork is the market leader for CAD / CAM.* (s. d.). cadwork. Consulté le 8 septembre 2022, à l'adresse <https://en.cadwork.com/indexL1.jsp?did=5644>
- Canadian Wood Council. (2021, 22 septembre). *Green - the Canadian Wood Council - CWC.* The Canadian Wood Council - CWC. <https://cwc.ca/en/why-build-with-wood/sustainable/green/>
- Cardinal, T., Alexandre, C., Elliot, T., Kouchaki-Penchah, H., & Levasseur, A. (2024). Climate change substitution factors for Canadian forest-based products and bioenergy. *Ecological Indicators*, 160, 111940. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111940>
- Cecobois. (2011). *Les bâtiments commerciaux préfabriqués à ossature légère de bois.* [https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/CECO-1731\\_Fiche\\_Batiments\\_Prefabrique\\_WEB.pdf](https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/CECO-1731_Fiche_Batiments_Prefabrique_WEB.pdf)
- Cecobois. (2011). *Une première en Amérique du Nord, L'édifice Fondation CSN.* <https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/CECO->
- Cecobois. (2012). *L'immeuble à bureaux de GlaxoSmithKline*. 8.
- Cecobois. (2012). *Systèmes préfabriqués à ossature légère en bois pour bâtiments commerciaux, Les cas d'Ultramar et Tim Hortons.* [https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/cecobois\\_Ultramar\\_TimHorton.pdf](https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/cecobois_Ultramar_TimHorton.pdf)
- Cecobois. (2013). *Guide technique sur la construction modulaire en bois.*
- Cecobois. (2013). *L'agrandissement du campus de l'UQAT*. 8.
- Cecobois. (2020.) *L'avantage environnemental des systèmes de construction en bois dans le contexte des changements climatiques.* [https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/CECO-784\\_Fiche-avantage\\_enviro\\_WEB.pdf](https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/CECO-784_Fiche-avantage_enviro_WEB.pdf)
- Cecobois. (2020.) *Les bois d'ingénierie du Québec.* [https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/CECO-830\\_Fiche\\_Bois-dingenierie2012\\_WEB.pdf](https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/CECO-830_Fiche_Bois-dingenierie2012_WEB.pdf)
- Cecobois. (2023, 21 mars). *Conception des systèmes et des trames structurales* [Présentation Orale]. Séminaire sur l'optimisation des constructions en bois massif.
- Charlson, J., & Dimka, N. (2021). Design, manufacture and construct procurement model for volumetric offsite manufacturing in the UK housing sector. *Construction Innovation*, 21(4), 800–817. <https://doi.org/10.1108/CI-10-2019-0108>.

- Choi, J. O., Chen, X. B., & Kim, T. W. (2019). Opportunities and challenges of modular methods in dense urban environment. *International Journal of Construction Management*, 19(2), 93–105. <https://doi.org/10.1080/15623599.2017.1382093>.
- Collins, M., Kasal, B., Paevere, P., & Foliente, G. C. (2005). Three-Dimensional Model of Light Frame Wood Buildings. I: Model Description. *Journal of Structural Engineering*, 131(4), 676-683. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:4\(676\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:4(676))
- Connolly, T., Loss, C., Iqbal, A., & Tannert, T. (2018). Feasibility Study of Mass-Timber Cores for the UBC Tall Wood Building. *Buildings*, 8(8), 98. <https://doi.org/10.3390/buildings8080098>.
- Conseil Canadien du Bois. (2018). *Manuel de calcul des charpentes en bois 2018 : l'ouvrage de référence complet pour le calcul des charpentes en bois au Canada*. Conseil canadien du bois.
- CSA O86-19; Engineering Design in Wood. CSA Group: Toronto, ON, Canada, 2019.
- Czasopismo Techniczne. (2018). Modular construction industry growth and its impact on the built environment. *Czasopismo Techniczne*, 12. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.18.178.9666>
- Dlubal Software GmbH, RFEM Version 6.03; Structural Engineering Software for Analysis and Design: Tiefenbach, Germany, 2021.
- ETABS. (s. d.). csi america. Consulté le 10 juillet 2022, à l'adresse <https://www.csiamerica.com/products/etabs>
- Fallahi, A., Poirier, E. A., Staub-French, S., Glatt, J., & Sills, N. (2016). Designing for Pre-Fabrication and Assembly in the Construction of UBC's Tall Wood Building. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*. <https://doi.org/10.29173/mocs26>
- Gagné, S. (2021, novembre). Construction modulaire. *Avantages, défis et environnement*.
- *Gestimât, V2.0*. (2024). Cecobois. Retrieved March 15, 2024, from <https://gestimat.ca>
- Getzner (2015). Solid timber apartment building by Meickl. Case study report, Bürs, Austria: Getzner Engineering a quiet future.
- Gijzen, R. P. T. (2017). *Modular cross laminated timber buildings*. Master's Thesis, Delft University of Technology, Pays-Bas.
- Halfen (2015). "Deha spherical head lifting anchor system." Langenfeld, Germany: Halfen.
- Hansbert, O. (2021, 16 novembre). *Why is prefabrication of wood increasing around the world [Présentation Orale]*. Workshop The Future of Construction is...Prefabrication!, En ligne.
- Hough, M. J., & Lawson, R. M. (2019). Design and construction of high-rise modular buildings based on recent projects. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 172(6), 37–44. <https://doi.org/10.1680/jcien.18.00058>.
- Hu, X., Chong, H.-Y., & Wang, X. (2019). Sustainability perceptions of off-site manufacturing stakeholders in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 227, 346–354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.258>.
- Hussein, M., Eltoukhy, A. E. E., Karam, A., Shaban, I. A., & Zayed, T. (2021). Modelling in off-site construction supply chain management: a review and future directions for sustainable modular integrated construction. *Journal of Cleaner Production*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127503>.
- Khalfan, M.M.A.; Maqsood, T. (2014). Current state of off-site manufacturing in Australian and Chinese residential construction. *Journal of Construction Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/164863>.
- Kosbar, M. M., Elbeltagi, E., Mahdi, I., Kassem, M., & Ehab, A. (2023). Off-Site Manufacturing: Determining Decision-Making Factors. *Buildings*, 13(11), 2856. <https://doi.org/10.3390/buildings13112856>.
- Labrecque, N. (2021). *Conception d'un système structural permettant l'utilisation de l'ossature légère modulaire dans les bâtiments de grande hauteur*. (mémoire de maîtrise, Université Laval). Saisi de <https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/e13db34c-01fc-4d2e-bb17-b4670ce61df1>
- Labrecque, N., Ménard, S., Oudjene, M., & Blanchet, P. (2022). Finite Element Study of Hyperstructure Systems with Modular Light-Frame Construction in High-Rise Buildings. *Buildings*, 12(3), 330. <https://doi.org/10.3390/buildings12030330>
- Lang, O. (2021, 16 novembre). *Intelligent City*[Présentation Orale]. Workshop The Future of Construction is...Prefabrication!, En ligne.
- Lawson, M., Ogden, R., & Goodier, C. (s. d.). *Design in Modular Construction*. 76.
- Lecours, S., Nguyen, T.-T., Sorelli, L., Blanchet, P., & Durand, K. (2023). Optimizing composite floors for sustainability and efficiency: Cross laminated timber, concrete types, and ductile notch connectors

- with enhanced shape. *Cleaner Engineering and Technology*, 14, 100635. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100635>
- Levée, V. (2022). *Le Majella : 100 jours pour construire cinq étages en ossature légère*. <https://cecobois.com/wp-content/uploads/2022/04/CECO-14790-Etude-de-cas-Majella-Web.pdf>
  - Levée, V., Beaulieu, G., Dagenais, C., Frenette, C., Latulippe, A., T. Bellavance, S. (2018). *ÉCOCONDOS DE LA POINTE-AUX-LIÈVRES QUÉBEC*. 36.
  - Levée, V., Bolduc-Guay, C., Lavoie, K., Beaulieu, G. (2019). *Les condominiums du 8 Duplessis, Le luxe se construit en bois*.
  - Lopez, R., Chong, H.-Y., & Pereira, C. (2022). Obstacles preventing the off-site prefabrication of timber and MEP services: qualitative analyses from builders and suppliers in Australia, 12(1044), 1044–1044. <https://doi.org/10.3390/buildings12071044>.
  - Malesza, J. (2017). Effective Model for Analysis of Wood-Framed Timber Structures. *Archives of Civil Engineering*, 63(2), 99-112. <https://doi.org/10.1515/ace-2017-0019>
  - McCaughey, G. (2021, 16 novembre). *Off Site Construction the Profit is in the Process* [Présentation Orale]. Workshop The Future of Construction is...Prefabrication!, En ligne.
  - Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. (2013). Charte du bois. Saisi le 18 juillet 2023 de <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/charte-du-bois/>
  - MSBQ - Regroupement des Manufacturiers de structures de bois du Québec. (2020, 16 octobre). MSBQ. Consulté le 06 août 2022, à l'adresse <https://msbq.org>
  - National Research Council of Canada; Canadian Commission on Building and Fire Codes. National Building Code of Canada 2015; National Research Council of Canada: Ottawa, ON, Canada, 2015.
  - NOORDZY, G. E. R. T., & WHITFIELD, R. I. C. H. A. R. D. (2021). The new hotel development project life cycle: doing the right new hotel project holistically, and doing it the right way. *Journal of Modern Project Management*, 8(3). <https://doi.org/10.19255/JMPM02715>.
  - Noordzy, G., Whitfield, R., Saliot, G., & Ricaurte, E. (2021). Modular Construction. *The Journal of Modern Project Management*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.19255/JMPM02715>
  - *Nordic Structures | Nordic.ca | Engineered Wood | Documentation | Technical Documents*. (s. d.). <https://www.nordic.ca/en/documentation/technical-documents#nordicxlam>
  - Ormarsson, S., Vessby, J., Johansson, M., & Kua, L. (2019). Numerical and Experimental Study on Modular-Based Timber Structures. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*, 471-478. <https://doi.org/10.29173/mocs128>
  - Pan, W., & Hon, C. K. (2020). Briefing: modular integrated construction for high-rise buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer*, 173(2), 64–68. <https://doi.org/10.1680/jmuen.18.00028>.
  - Pan, W., Dainty, A. R. J., & Gibb, A. G. F. (2012). Establishing and weighting decision criteria for building system selection in housing construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(11), 1239–1250. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000543](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000543).
  - Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation. *Neuf cas d'intégration de systèmes de construction préfabriqués* (2019). <http://www.habitation.gouv.qc.ca/fileadmin/internet/publications/Neuf-cas-integration-Rapport-final.pdf>.
  - *Programme d'innovation en construction bois*. (2021). Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/transformation-du-bois/programme-innovation-construction-bois/>
  - Publications Québec. C-24.2, r. 31 - *Règlement sur les normes de charges et de dimensions applicables aux véhicules routiers et aux ensembles de véhicules routiers*. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/C-24.2, r. 31>
  - Publications Québec. C-24.2, r. 35 - *Règlement sur le permis spécial de circulation*. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/C-24.2, r. 35/>
  - Rajanayagam, H., Poologanathan, K., Gatheeshgar, P., Varelis, G. E., Sherlock, P., Nagaratnam, B., & Hackney, P. (2021). A-State-Of-The-Art review on modular building connections. *Structures*, 34, 1903-1922. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.114>
  - Ramaji, I. J., & Memari, A. M. (2013, February). Identification of structural issues in design and construction of multi-story modular buildings. In *Proceedings of the 1st residential building design and construction conference* (pp. 294-303).
  - R-Hauz. (2021, 16 novembre). *Build your own Story* [Présentation Orale]. Workshop The Future of Construction is...Prefabrication!, En ligne.
  - Salama, T., Figgess, G., Elsharawy, M., & El-Sokkary, H. (2020). Financial modeling for modular and offsite construction. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 10(2), 207–213. <https://doi.org/10.35940/ijeat.B2085.1210220>.
  - Sébastien Gagné, S.G. (2022). *Construction modulaire*

- Smith, R. Solid Timber Construction, Process Practice Performance; Report Sponsored by American Institute of Architects; USDA Forest Products Laboratory and FPI Innovations: Madison, WI, USA, 2015.
- Sotorrió Ortega, G., Cobo Escamilla, A., & Tenorio Ríos, J. A. (2023). Industrialized construction and sustainability: a comprehensive literature review. *Buildings*, 13(11), 2861–2861. <https://doi.org/10.3390/buildings13112861>.
- Stein, A. Disruptive Development: Modular Manufacturing in Multifamily Housing. Master's Thesis, University of California, Berkeley, CA, USA, 2016.
- Sun, Y., Wang, J., Wu, J., Shi, W., Ji, D., Wang, X., & Zhao, X. (2020). Constraints Hindering the Development of High-Rise Modular Buildings. *Applied Sciences*, 10(20), 7159. <https://doi.org/10.3390/app10207159>.
- Sutrisna, M., Cooper-Cooke, B., Goulding, J., & Ezcan, V. (2019). Investigating the cost of offsite construction housing in western Australia. *International Journal of Housing Markets and Analysis*, 12(1), 5–24. <https://doi.org/10.1108/IJHMA-05-2018-0029>.
- Svatoš-Ražnjević Hana, Orozco, L., & Menges, A. (2022). Advanced timber construction industry: a review of 350 multi-storey timber projects from 2000-2021. MDPI. <https://doi.org/10.18419/opus-12508>.
- *The future of construction is . . . prefabrication. Prefabrication!* (2022). Canadian Wood Council. <https://intelligent-city.com/wp-content/uploads/2021/11/2021-Nov-16-Prefabrication-Workshop-Brochure-and-Program.pdf>
- Think Wood, *The Business Case For Building With Wood*. [https://www.hanleywooduniversity.com/media/course/5951/story\\_content/external\\_files/HWU\\_AR\\_ThinkWood\\_ADV18-Dec.pdf](https://www.hanleywooduniversity.com/media/course/5951/story_content/external_files/HWU_AR_ThinkWood_ADV18-Dec.pdf)
- Wagner, H. J., Alvarez, M., Groenewolt, A., & Menges, A. (2020). Towards digital automation flexibility in large-scale timber construction : Integrative robotic prefabrication and co-design of the BUGA Wood Pavilion. *Construction Robotics*, 4(3-4), 187-204. <https://doi.org/10.1007/s41693-020-00038-5>
- Wang, Y., Bian, S., Dong, L., & Li, H. (2023). Multiresolution modeling of a modular building design process based on design structure matrix. *Buildings*, 13(9), 2330–2330. <https://doi.org/10.3390/buildings13092330>.
- Wilson, J. Design for Modular Construction: An Introduction for Architects; American Institute of Architects: Washington, DC, USA, 2019.
- Wimmers, G. (2021, 16 novembre). *Prefabrication, to be or not to be!* [Présentation Orale]. Workshop The Future of Construction is....Prefabrication!, En ligne.
- Wozniak-Szpakiewicz, E., Zhao, S. (2018). Modular construction industry growth and its impact on the built environment. *Czasopismo Techniczne*, 12. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.18.178.9666>
- Wuni, I. Y., & Shen, G. Q. (2020). Barriers to the adoption of modular integrated construction: systematic review and meta-analysis, integrated conceptual framework, and strategies. *Journal of Cleaner Production*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119347>.
- Xu, J., Ye, M., Lu, W., Bao, Z., & Webster, C. (2021). A four-quadrant conceptual framework for analyzing extended producer responsibility in offshore prefabrication construction. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124540. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124540>
- Žegarac Leskovar, V., & Premrov, M. (2021). A Review of Architectural and Structural Design Typologies of Multi-Storey Timber Buildings in Europe. *Forests*, 12(6), 757. <https://doi.org/10.3390/f12060757>.