

« Étude de cas sur la conception et la construction
d'un bâtiment de construction modulaire en bois
massif de 4 étages »

« Les Pavillons du 49^e, Phases 1 et 2 »

Préparé par « Les Chantiers de Chibougamaou Itée »

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du Programme
d'innovation en construction bois

« 30 septembre 2025 »

WMT

Williams Munoz Toro

Auteur

Julie Frappier

Julie Frappier

Révisseuse, Directrice
Services techniques

Rénald Cloutier

Rénald Cloutier

Directeur des
Finances

Avis de non responsabilité

Le contenu et les résultats de ce rapport sont produits et présentés par le promoteur du projet. Le ministère des Ressources Naturelles et des Forêts (MRNF), ainsi que le Plan pour une Économie Verte 2030 (PEV) ne sont donc pas responsables du contenu de ce document.

Table des matières

1.	Sommaire exécutif et synthèse de l'étude.....	1
2.	Introduction	2
2.1	Titre et lieu de réalisation du projet de construction.....	2
2.2	Description du projet de construction.....	2
2.2.1	Description du bâtiment innovant ou de la solution innovante.....	2
2.2.2	Échéancier global et durée.....	4
2.2.3	Budget global	4
2.2.4	Partenaires	4
2.2.5	Défis et risques généraux.....	4
3.	Détails de l'étude.....	5
3.1	Introduction	5
3.2	Objectif.....	5
3.3	Méthodologie	6
3.4	Résultats.....	6
3.4.1	Développer et appliquer un processus de préfabrication modulaire adapté à la construction modulaire en bois massif multiétage	6
3.4.1.1	Base technique de l'approche de préfabrication	6
3.4.1.2	« Engineer-to-order » et “Make-to-order”	7
3.4.1.3	Acquisition de matériaux.....	9
3.4.1.4	Fabrication de composantes.....	10
3.4.1.5	Préfabrication modulaire	12
3.4.1.6	Installation.....	15
3.4.2	Différences et ajustements d'amélioration entre les <i>Phases 1</i> et 219	219
3.5	Conclusions	20
3.6	Retombées et rayonnement des solutions développées et potentiel de reproductibilité pour l'industrie	21
3.7	Recommandations.....	21
4.	Bibliographie	22

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude

Les Pavillons du 49^e – Phases 1 et 2 sont au cœur du développement de la technologie de préfabrication de bâtiments modulaires en bois massif au Québec. L'opportunité offerte par la réalisation de ce projet de deux blocs d'appartements a permis de concevoir et de mettre en service un procédé de préfabrication modulaire pouvant livrer des bâtiments d'au moins 4 étages, avec un système coordonné.

Le procédé développé au début du projet, vers la fin de l'année 2022, a reçu des ajustements et des modifications d'amélioration continue pendant la préfabrication, soit à l'intérieur d'une des phases et entre les deux phases. La version finale du procédé a été achevée pendant le premier semestre de l'année 2024, lors de la préfabrication du bâtiment *Phase 2*.

Le processus de préfabrication a été adapté pour appliquer des approches du type « *engineer-to-order* » et « *make-to-order* ». Dans le contexte de ce projet, l'approche « *engineer-to-order* » a été préférée parce que la majorité des systèmes ne pouvaient pas être produits à l'avance, dû aux étapes de développement, d'étude et essais, et d'ajustement de la performance. Lorsque le procédé sera utilisé pour des concepts de bâtiment déjà connus (ex. : architecture, ingénierie, configuration modulaire), l'option « *make-to-order* » deviendra l'approche préférée.

La flexibilité a été à la base de l'optimisation générale de ce procédé de préfabrication modulaire. En effet, des rétroactions provenant de la conception, de la préfabrication de composantes et des modules ainsi que de l'installation des bâtiments ont facilité l'incorporation des observations faites sur le terrain permettant ensuite de les transposer en une augmentation de productivité.

Finalement, le procédé demeure un outil flexible, pouvant être utilisé et modifié selon les exigences de préfabrication, notamment en ce qui concerne le niveau d'avancement du processus de conception intégrée, le type de configuration modulaire, le volume de production, le niveau de finition et les contraintes de préfabrication.

2. Introduction

2.1 Titre et lieu de réalisation du projet de construction

Titre : *Les Pavillons du 49^e*

Lieu de réalisation : Chibougamau, Québec

2.2 Description du projet de construction

Les Pavillons du 49^e est le premier projet d'immeubles d'habitation modulaires en bois massif de 4 étages au Québec et au Canada. Entièrement préfabriqués en usine dans les installations de Chantiers Chibougamau, les deux blocs d'appartements de quatre étages ont été construits à partir de 47 modules chacun, livrés et assemblés sur place. Chaque bloc compte 20 unités de logements locatifs, augmentant d'autant la disponibilité des habitations en forte pénurie dans la région, comme partout au Québec. La clientèle est multiple; des étudiants, des travailleurs temporaires ou permanents, des familles et des gens retraités ont loué les unités. La configuration des logements par bloc est répartie comme suit : 1 studio, 7 logements de deux chambres, dont 2 unités entièrement adaptables, et 12 logements de 3 chambres.

2.2.1 Description du bâtiment innovant ou de la solution innovante

Le projet *Les Pavillons du 49^e* de fabrication modulaire en bois massif représente une innovation pour le marché de la construction multiétage. Ce complexe d'immeubles d'habitation modulaires en bois massif au Québec est constitué de deux bâtiments de 4 étages, avec une superficie totale de 2226 m² par bâtiment et de 556.5 m² par étage. Le type d'occupation du projet est « Multi-résidentiel » tandis que l'usage principal tel que défini dans le code du bâtiment est celui de la catégorie « C Habitations ».

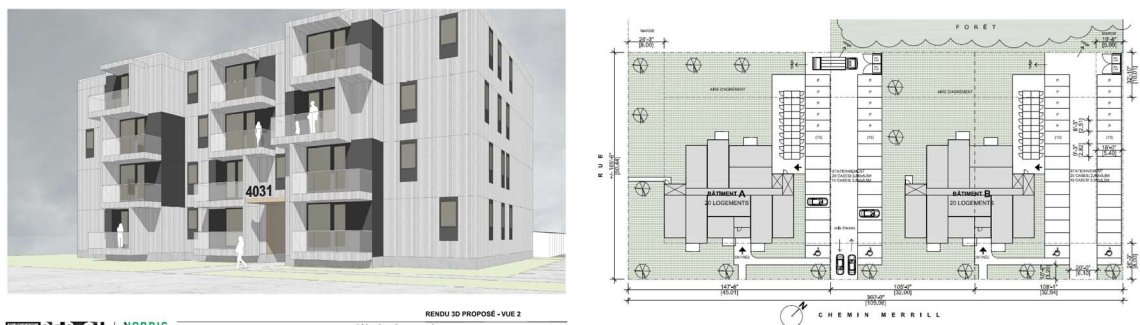


Figure 1 Esquisse et 'emplacement des bâtiments Phases 1 et 2.

La structure est fabriquée à partir de modules d'appartement, de modules de corridor et de modules de cages d'escalier et d'ascenseur (voir figure 2). Chaque module d'appartement est constitué de dalles de bois lamellé-croisé pour le plancher et le plafond, ainsi que de panneaux de bois lamellé-croisé pour les murs. Des poutres de bois lamellé-collé viennent supporter le plancher du module sur la périphérie. Les modules de corridor sont fabriqués d'un plancher de bois lamellé-croisé ainsi

que de murs en ossature légère. Les modules de cages d'escalier et d'ascenseurs sont constitués de panneaux de bois lamellé-croisé verticaux.



Structure et enveloppe



Finition intérieure



Éléments de MEP



Préparation finale et emballage

Figure 2 Niveau de finition lors de la préfabrication des modules

En plus de la structure, les finitions extérieures et intérieures ont été installées en usine, faisant du système un produit presque fini. Des matériaux tels que les isolants, les revêtements, la mécanique-électricité-plomberie, les meubles de cuisine et les salles de bain ont été installés à l'usine.

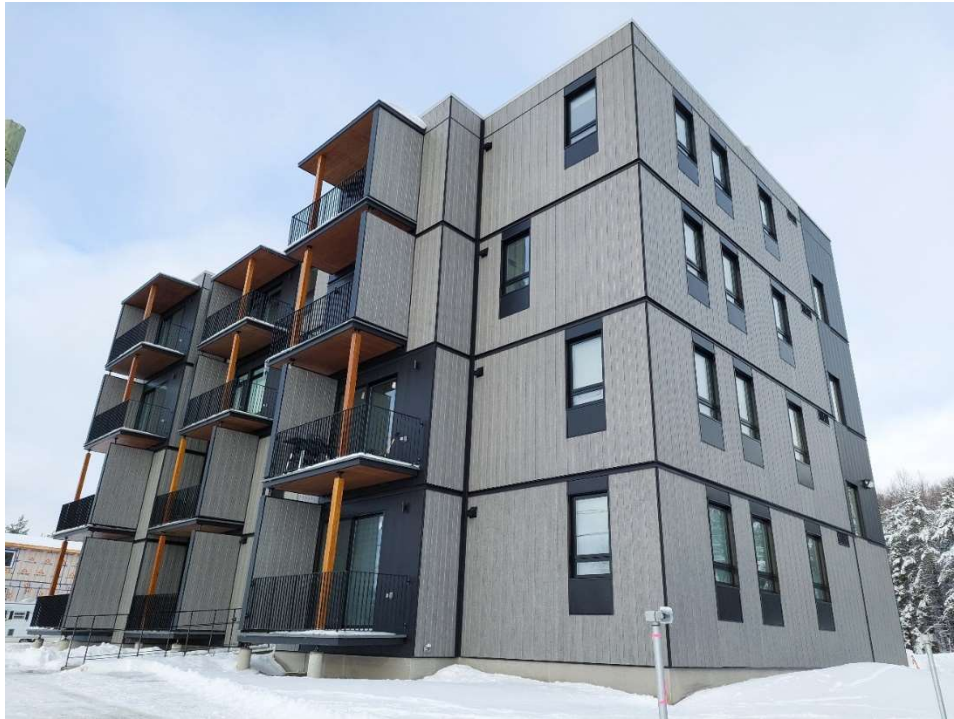


Figure 3 Bâtiment de la Phase 1 terminé

2.2.2 Échéancier global et durée

Le projet *Les Pavillons du 49^e* a débuté en novembre 2021 et conclura l'été 2026.

2.2.3 Budget global

Le budget global du projet est estimé à 14 233 911 \$.

2.2.4 Partenaires

Les Chantiers de Chibougamau n'a pas de partenaires pour la réalisation du projet.

2.2.5 Défis et risques généraux

Le principal risque lié au projet est le risque financier en lien avec un potentiel dépassement des coûts dû à la courbe d'apprentissage des équipes professionnelles et techniques.

3. Détails de l'étude

3.1 Introduction

Les Pavillons du 49^e est le premier projet multiétage (4 étages) de construction modulaire en bois massif au Québec et au Canada. La nature innovante du projet a imposé une reformulation de la stratégie de travail dû à l'envergure de la solution de construction envisagée. À ce jour, les projets modulaires complétés par Chantiers Chibougamau étaient de 1 ou 2 étages et leur réalisation s'appuyait sur des techniques de préfabrication modulaire développées pour de plus petits projets avec un faible nombre de modules à fabriquer. Dans le cas de *Les Pavillons du 49^e*, la présence de différents éléments dont la superficie, le nombre de modules, le nombre d'étages, le système structural et la stratégie de préfabrication a fait que les hypothèses de travail utilisées pour de projets moins vastes soient devenues désuètes.

L'hypothèse générale de départ était liée à la faisabilité d'un projet de cette envergure en utilisant un nouveau système de construction modulaire, développé et adapté à la taille du projet. Pour ce faire, une nouvelle façon de travailler en équipe devait être mise en place et une organisation des activités propre à la construction modulaire préfabriquée devait être développée.

Comme décrit dans le rapport présenté dans le cadre du PICB-007, lorsque le processus de conception intégrée avançait et dès que celui-ci présentait un niveau d'avancement important, le projet pouvait démarrer les étapes « physiques », c'est-à-dire celles directement reliées à la préfabrication. Voici les domaines critiques :

- Acquisition de matériaux ;
- Fabrication de composantes ;
- Préfabrication modulaire ;
- Installation.

Ces activités ont été coordonnées dans l'objectif de créer un flux continu de matières jusqu'au moment de l'installation des modules et la fermeture des bâtiments. En plus du flux continu de matières, le procédé a été développé avec une logique de flexibilité dans le but d'incorporer des modifications pendant la préfabrication.

Finalement, le procédé a été conçu avec la possibilité d'inclure ou enlever des stations de travail en fonction de la planification des travaux de préfabrication et du niveau de finition à atteindre en usine. Les sections 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7 décrivent les principales observations réalisées lors de cette étape.

3.2 Objectif

Mettre en place un processus de préfabrication adapté à la construction modulaire multiétagée en bois massif.

3.3 Méthodologie

Une méthodologie à trois étapes a été mise en place afin d'assurer l'exécution des activités de préfabrication modulaire, d'installation et de fermeture des bâtiments modulaires.

- Étape 1 : Développer et appliquer un processus de préfabrication modulaire adapté à la construction modulaire multiétagée en bois massif.
- Étape 2 : Identifier les principaux défis techniques en lien avec la préfabrication modulaire pour des constructions multiétages.
- Étape 3 : Identifier et compiler les différences et les ajustements pour l'amélioration du procédé entre les Phases 1 et 2.

3.4 Résultats

La présente étude a été démarrée pendant le deuxième semestre de l'année 2022, une fois que des éléments de base du processus de conception intégrée ont été établis. Les travaux en lien avec l'acquisition de matériaux indiquent le début de la réalisation du projet du point de vue physique. De la même manière, l'installation des bâtiments et les activités de fermeture marquent la fin du projet de réalisation.

3.4.1 Développer et appliquer un processus de préfabrication modulaire adapté à la construction modulaire en bois massif multiétage

Les sous-sections suivantes décrivent les observations effectuées et des décisions prises selon le mode de conception intégrée pour chacun des domaines critiques. Dans le cas du présent rapport « PICB-008 », l'analyse couvrira la préfabrication modulaire, les ajustements et rétroactions et ainsi que l'installation des deux bâtiments. L'analyse des autres domaines critiques est présentée dans le rapport « PICB-007 ».

Pour l'étape de préfabrication modulaire, le procédé de fabrication a été conçu de manière à pouvoir recevoir et incorporer des rétroactions pendant les activités de chaque bâtiment (*Phases 1 et 2*). Ces rétroactions provenant des étapes de conception, de contrôle de qualité (pendant et après la préfabrication) et de l'érection et l'installation des bâtiments.

3.4.1.1 Base technique de l'approche de préfabrication

Le principe de la modularité cherche, parmi d'autres éléments, la réduction des coûts ainsi que la personnalisation de masse, avec des bénéfices tels que la diminution des risques et l'augmentation de l'efficacité (Li et al., 2019). Comme tous les autres procédés de fabrication, ce procédé de préfabrication modulaire est le produit de l'intégration de 4 éléments principaux : les systèmes physiques, les structures de décision pour les opérations, l'information et les humains (Huang, 2017). Ce dernier élément mène à la logique de production en lien avec la préfabrication modulaire.

Le procédé développé sert à accommoder la préfabrication modulaire tenant compte des variables telles que la taille du bâtiment, le volume du bois massif et la durée des activités de préfabrication. Le diagramme présenté à la figure 4 permet d'identifier quel type de stratégie de fabrication serait adopté dans le but de produire des systèmes modulaires multiétagés.

Dans le cas du projet *Les Pavillons du 49^e*, le processus de préfabrication a été adapté pour appliquer des approches du type « *engineer-to-order* » et « *make-to-order* » (Willner et al., 2014; Huang, 2017).

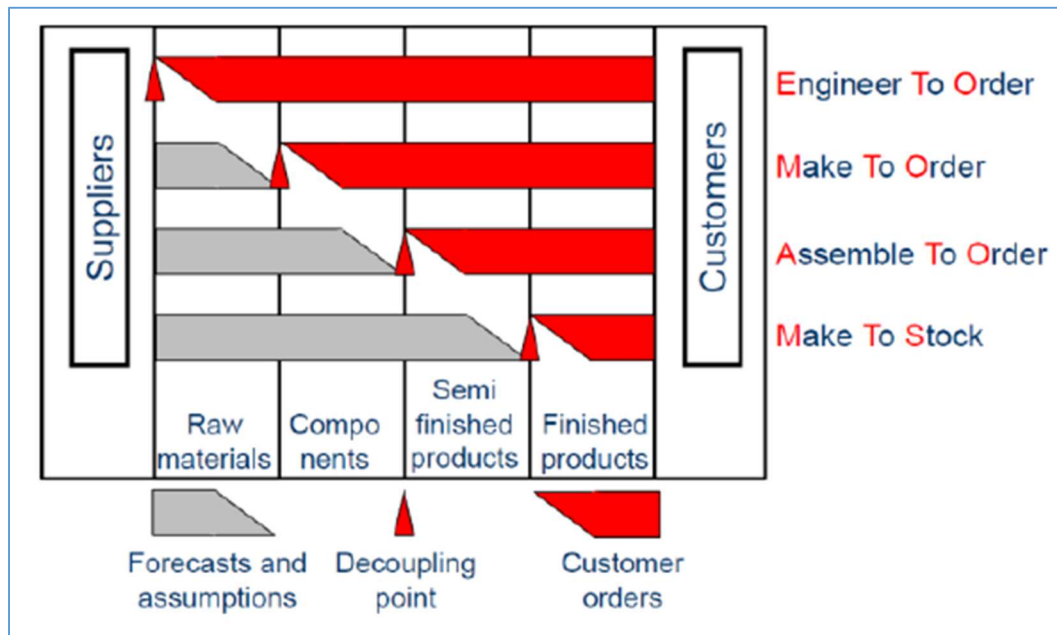


Figure 4 Stratégies de fabrication (Huang, 2017)

3.4.1.2 « *Engineer-to-order* » et « *Make-to-order* »

Ce projet innovant a exigé de développer, pendant l'étape de conception, la majorité des systèmes constitutifs des bâtiments. Ces systèmes correspondent à la structure de chaque module et du bâtiment, la configuration des modules et leur agencement, l'enveloppe, la finition intérieure, les systèmes MEP, les services (cuisine et toilettes) et la stratégie et méthodes d'interconnexion entre ces différents systèmes lors de l'érection. Le développement de ces systèmes constitutifs incluait également la logique de mise en préfabrication. Dans le contexte de ce projet, l'approche « *engineer-to-order* » (voir figure 5) a été préférée dû au fait que la majorité des systèmes ne pouvaient pas être produits à l'avance à cause des étapes de développement, d'étude et essais, et d'ajustement de la performance. Pour de prochains projets, où des systèmes constitutifs déjà connus et prouvés seraient requis, l'approche « *make-to-order* » pourrait prendre une plus grande importance.

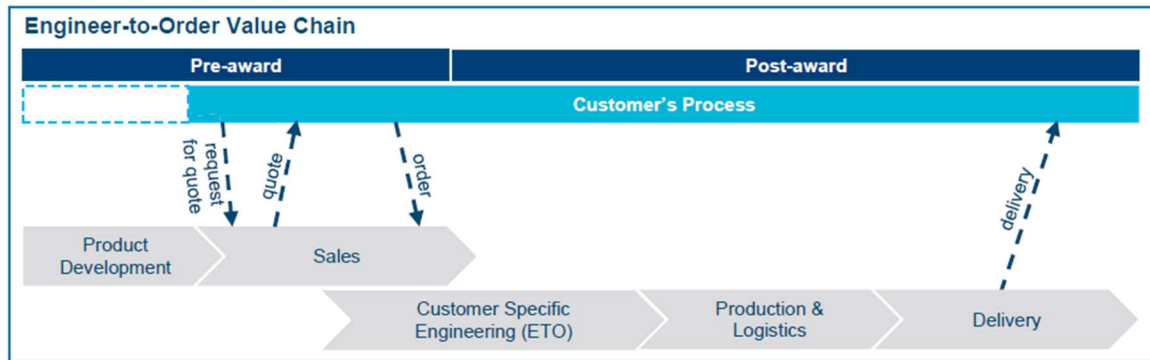


Figure 5 Diagramme d'une chaîne de valeur du type « engineer-to-order » (Willner et al., 2014)

Le développement du projet a nécessité plusieurs interactions avec le client ainsi qu'avec les autres intervenants de l'équipe du processus de conception intégrée. Ceci est représenté par l'étape « *Customer Specific Engineering - ETO* » dans la figure 5, où il peut être observé qu'il existe un chevauchement avec l'étape de vente, avant les étapes de production et logistique. Dans l'optique d'augmenter le volume de la production de bâtiments modulaires et d'assurer un minimum de reproductibilité du produit (ex. : bâtiment modulaire du type *Les Pavillons du 49^e*), l'approche « *engineer-to-order* » devrait transitionner vers une combinaison de « *engineer-to-order* » et « *make-to-order* ». Avec cette combinaison, les caractéristiques particulières d'un bâtiment (principalement des aspects de forme et d'apparence) coexisteront avec des éléments standardisés (ex. : système structural, stratégies MEP, sécurité incendie). La compilation ou production de ces derniers éléments pourrait débiter avant, car ils peuvent être fabriqués en continu dès la date de vente du projet.

L'optimisation de la production cible un maximum de répétition des opérations afin d'augmenter la productivité. Avec cette combinaison d'approches, il sera possible d'offrir de la variété, tout en utilisant l'approche de préfabrication modulaire et ses avantages lors de la réalisation de futurs projets.

De plus, la configuration des étapes de fabrication de chaque station de travail a été ajustée afin d'incorporer les séquences d'installation propres à chaque assemblage (plancher, murs, plafonds et toits). L'envergure du projet, ainsi que les solutions innovantes développées lors de l'étape de conception, ont entraîné des changements importants à la logique de préfabrication. Une nouvelle organisation du magasin de composantes d'habillage et de la stratégie de fabrication de composantes structurales en bois massif, coordonnée avec les projets conventionnels, a permis d'offrir un flux ininterrompu de matériaux.

Le développement et la mise en opération de ce processus ont impacté les domaines critiques de l'acquisition de matériaux, de la fabrication de composantes, de la préfabrication modulaire et de l'installation.

Les sous-sections suivantes présentent une compilation des principales observations en lien avec les impacts générés par le processus de conception intégrée ainsi que le développement du processus de préfabrication modulaire.

3.4.1.3 Acquisition de matériaux

Le domaine critique qu'est l'acquisition de matériaux a été au centre de la programmation de la préfabrication modulaire. Lors de la définition des éléments architecturaux, d'ingénierie et des matériaux MEP, l'équipe en charge de l'acquisition de matériaux supportait les discussions en fournissant de l'information liée à la disponibilité, le coût et la possibilité d'entreposage. Cette combinaison d'information a servi à la planification des achats et de la préfabrication modulaire. Le niveau d'organisation atteint a permis un juste équilibre entre l'espace disponible pour emmagasiner les matériaux et leur installation dans chacune des stations de travail. Le tableau 1 montre les plus importantes interactions trouvées lors de l'analyse.

Tableau 1 Acquisition de matériaux et observations d'impact

Domaine qui impactait	Décision ou élément	Domaine impacté
Architecture	Définition des matériaux d'habillage de modules	Acquisition de matériaux Préfabrication modulaire
Ingénierie structurale	Définition de systèmes d'attache	Acquisition de matériaux Préfabrication modulaire
Ingénierie MEP	Définition de systèmes MEP	Acquisition de matériaux Préfabrication modulaire
Préfabrication modulaire	Maximum d'achats locaux	Acquisition de matériaux

Le processus d'acquisition de matériaux a été réalisé de manière qu'il puisse respecter au maximum une logique de « juste-à-temps » pour éviter le coût lié aux gros inventaires. Également, ce processus doit optimiser l'utilisation d'espace d'entreposage afin de réduire une manipulation excessive des matériaux, car ceci entraîne des pertes par détérioration.

Une des décisions qui a impacté le domaine critique d'acquisition de matériaux est celle en lien avec un maximum d'achats locaux. Dans le cadre du projet *Les Pavillons du 49^e*, l'accent a été mis sur les achats locaux afin de réduire le coût des matériaux dû au transport. Cette décision a forcé l'équipe des acquisitions à trouver les éléments requis dans un rayon de distance optimisé et à s'assurer de la disponibilité de ceux-ci lors de la préfabrication modulaire. Cette stratégie permet en même temps de minimiser l'impact des émissions GES et de bonifier l'activité économique de la région et du Québec.

3.4.1.4 Fabrication de composantes

Au début du projet, le domaine critique « fabrication de composantes » était l'un des aspects les mieux maîtrisés chez Chantiers Chibougamau. L'ordonnance de fabrication ainsi que la coordination entre les différentes lignes de fabrication de produits à valeur ajoutée (poutrelles, bois lamellé-collé et bois lamellé-croisé) et de son atelier de fabrication de ferrures et systèmes d'attache en acier, permet un flux de production flexible. Ils peuvent être stockés et emballés pendant quelques jours ou semaines en attendant le transport vers les clients.

Dans le cas des composantes en bois massif pour la préfabrication modulaire et les systèmes d'attache associés, ceux-ci doivent être produits dans une logique de juste-à-temps, afin d'éviter de remplir l'espace de l'usine avec les matériaux de construction. Le tableau 2 montre les plus importantes interactions trouvées lors de l'analyse.

Tableau 2 Fabrications de composantes et observations d'impact

Domaine qui impactait	Décision ou élément	Domaine impacté
Ingénierie structurale	Dimensions et formes des composantes	Fabrication de composants Préfabrication modulaire Installation
Ingénierie structurale	Dimensions et formes des systèmes d'attache	Fabrication de composants Préfabrication modulaire Installation
Ingénierie MEP	Positionnement des perforations de passage de services MEP	Fabrication de composants Préfabrication modulaire Installation
Fabrication de composants	Ordre de fabrication de composantes	Préfabrication modulaire
Architecture Installation	Ordre de préfabrication des modules et entreposage avant l'installation	Fabrication de composants Préfabrication modulaire
Fabrication de composantes Préfabrication modulaire	Ajustements de fabrication (intra phases ou inter phases)	Fabrication de composants Préfabrication modulaire

Certaines procédures ont été ajustées dans l'objectif d'incorporer des améliorations provenant des observations réalisées pendant la préfabrication modulaire. Ces modifications prenaient, principalement, la forme et la réorganisation des activités d'usinage. Ce niveau de flexibilité a été possible grâce à la condition de « développement technologique » et « d'innovation » associée au projet *Les Pavillons du 49^e*. Dans certains cas, les ajustements se faisaient au sein d'une même Phase alors que, dans d'autres cas, les ajustements ont été incorporés pour la Phase 2.

La figure 6 montre le secteur d'usinage des panneaux CLT, qui étaient par la suite transportés vers le secteur d'assemblage de modules. Cette possibilité de réaliser les opérations d'assemblage juste à côté de l'usinage permettait d'incorporer des ajustements ou bien de reproduire certaines composantes pouvant présenter des problèmes lors de l'assemblage (dimensions, percements, etc.).

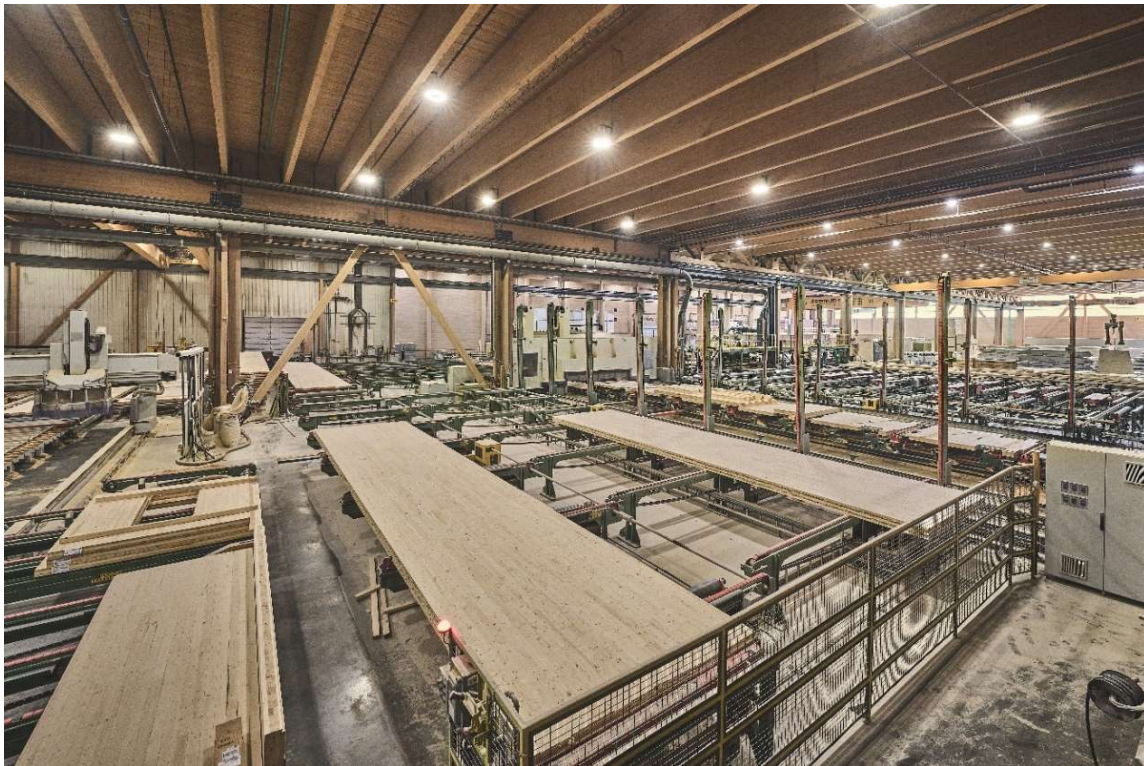


Figure 6 Usinage des panneaux CLT

Les composantes en bois lamellé-collé et en bois lamellé-croisé étaient fabriquées et usinées dans leurs lignes de production respectives pour ensuite se faire étiqueter et transporter au début de la ligne de préfabrication modulaire selon la planification générale du projet (voir figure 7). Les différentes pièces étaient alors empilées selon la séquence du montage de chaque module (modules de services, chambres, cages d'escalier ou d'ascenseur). Avant de confirmer leur utilisation pour l'assemblage de la structure des modules, une double vérification visuelle était effectuée dans le but de repérer des anomalies.



Figure 7 Empilement de panneaux avant les opérations d'assemblage des modules

3.4.1.5 Préfabrication modulaire

La préfabrication modulaire est devenue le cœur de l'avancement technologique de ce projet innovant. En effet, la nature du projet, des bâtiments multiétages en deux Phases, a exigé le développement d'une nouvelle école de pensée chez Chantiers Chibougama. Ce changement a eu des impacts partant de la logique d'interaction avec les autres domaines critiques jusqu'à la mise en opération d'une ligne de préfabrication adaptée à des projets de plus grande envergure. Ce domaine critique peut être représenté par un diagramme d'Ishikawa modifié. Dans la figure 8 les flèches sont bidirectionnelles, ce qui indique les interactions ainsi que leur nature de rétro-alimentation entre les domaines critiques.

Ce diagramme sert à comprendre que chaque domaine critique (cause) a un impact sur le résultat (effet). Dans le cas du projet, la modification est entrée en jeu lorsque la logique d'interaction entre les domaines critiques a été incorporée. Ici, la possibilité d'interaction à double sens entre « l'effet » et « les causes » apparaît lorsque la chronologie des *Phases 1* et *2* y est incluse. La préfabrication et installation de chaque phase a pris près d'un an. Cette durée de temps a permis de compiler de nombreuses expériences, tant de préfabrication comme d'installation et de rétroagir afin d'optimiser le processus général.

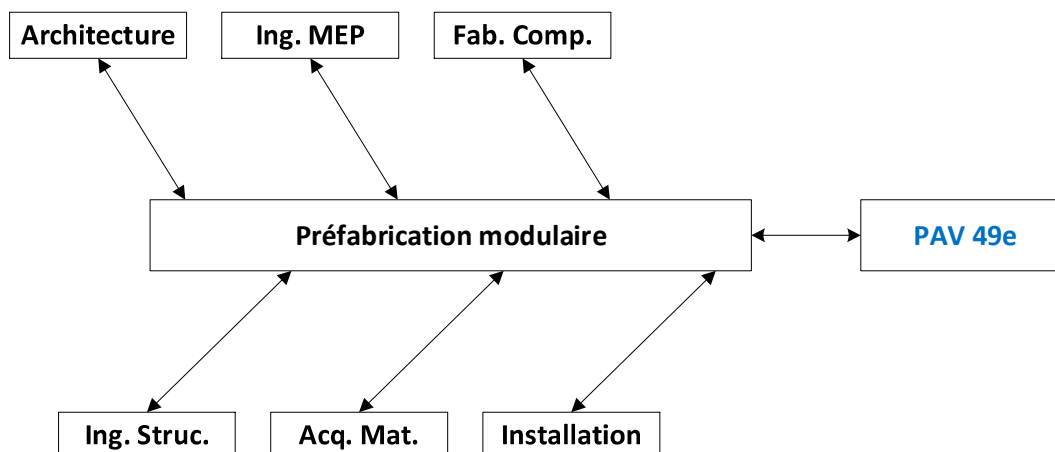


Figure 8 Diagramme d'Ishikawa modifié pour le domaine critique « Préfabrication Modulaire » et ses interactions

L'exercice a permis l'amélioration dynamique en continu du processus de conception intégrée modifié et des impacts plus importants sur la qualité du produit final. Cette logique a facilité l'incorporation des ajustements au cours d'une même *Phase* ainsi qu'entre les *Phases* du projet. Les derniers éléments d'interaction observés serviront également à renforcer les connaissances acquises lors de la réalisation d'autres projets modulaires.

Le tableau 3 montre les plus importantes interactions trouvées lors de l'analyse.

Tableau 3 Préfabrication modulaire et observations d'impact

Domaine qui impactait	Décision ou élément	Domaine impacté
Architecture Fabrication des composantes	Possibilités architecturales et structurales davantage limitées	Préfabrication modulaire
Architecture	Forme de la base du bâtiment	Ingénierie structurale Préfabrication modulaire
Architecture	Répétitivité difficile à obtenir	Fabrication de composantes Préfabrication modulaire
Ingénierie MEP	Type de séparations coupe-feu entre les modules adjacents	Préfabrication modulaire

L'espace de production a été réaménagé afin d'inclure deux stations de plus pour accroître le niveau de finition en usine pour les modules de la *Phase 2*. Dans ce cas, les expériences et les rétroactions compilées lors de l'étape d'installation de la *Phase 1* ont permis d'ajuster le procédé de préfabrication pour la *Phase 2*. L'objectif principal de cet ajustement étant de maximiser le nombre d'opérations effectuées sous conditions contrôlées, en usine, et de réduire le temps de finition sur le chantier. Dans la figure 9, à gauche encadrées en bleue, il est possible de voir les deux stations ajoutées, tandis qu'à droite le diagramme d'Ishikawa modifié montre l'interaction entre l'étape de préfabrication modulaire (en rouge) et celle de l'installation (en vert).

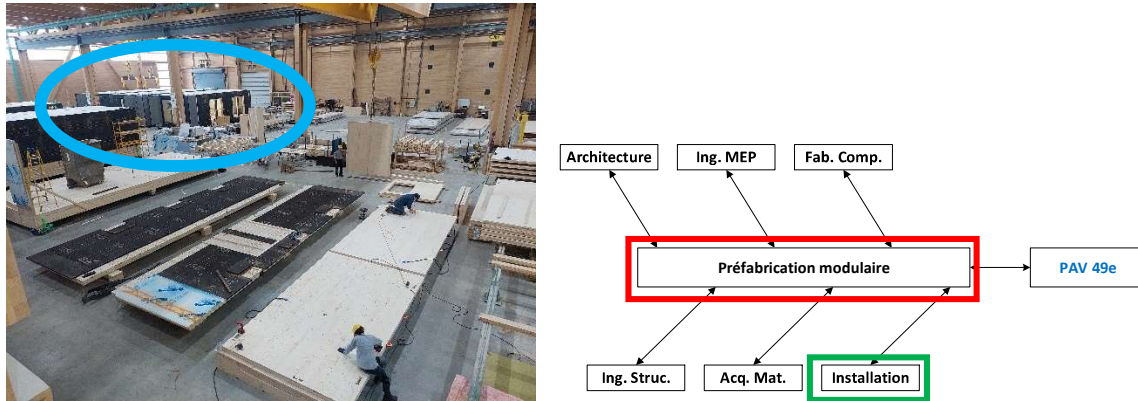


Figure 9 À gauche : ajout de deux stations pour finition. À droite : Impact de « Installation » sur « Préfabrication modulaire »

Certaines installations de dispositifs ont nécessité beaucoup de précision afin d'assurer les étapes postérieures de l'assemblage de modules, du transport et du stockage ou bien pour l'installation sur le chantier. La figure 10 montre une activité d'installation de systèmes d'attache structuraux (en noire sur l'image à gauche), qui est cruciale pour l'alignement vertical des modules.

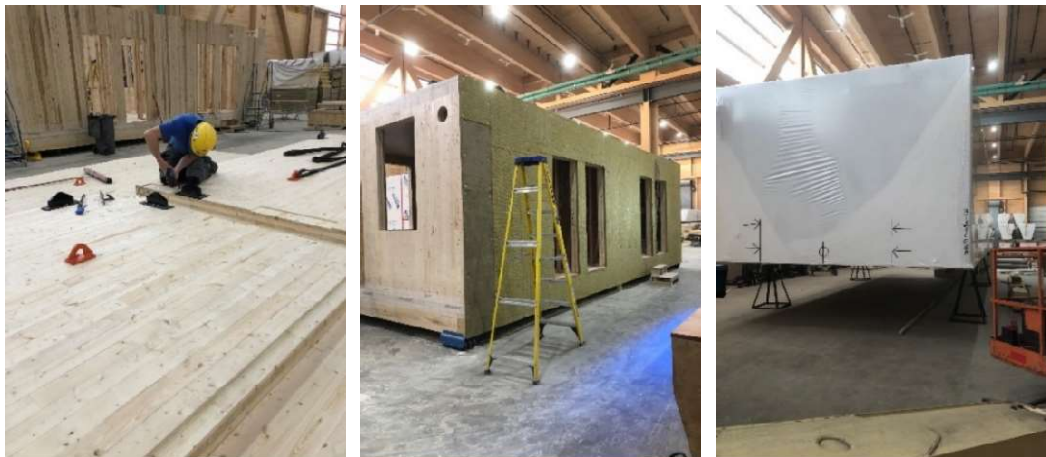


Figure 10 De gauche à droite : assemblage de la structure, installation de l'isolant, emballage de module pour les intempéries

3.4.1.6 Installation

L'étape d'installation des modules en chantier combinait quelques semaines d'entreposage et un court transport par camion (environ 4 km) entre le site d'entreposage et le site de chantier. L'étape d'entreposage s'est effectuée sans contretemps dans un endroit ample, où chaque unité modulaire, complètement emballée, était placée sur des pieux temporaires.



Figure 11 Transport des modules vers le chantier

L'étape d'installation continuait avec l'érection du bâtiment selon une séquence qui poursuivait une logique d'empilement et de connexion entre les modules, la possibilité d'une réaction rapide en cas d'intempéries et la sécurité de l'intégrité structurale du bâtiment. Les décisions prises en lien avec ce domaine critique étaient liées aux autres domaines critiques, principalement à l'architecture, l'ingénierie structurale, l'ingénierie MEP et la préfabrication modulaire.

L'étape d'installation dans le cadre du projet *Les Pavillons du 49^e* culmine lors de la finition faite sur le site de chantier, soit la « fermeture du bâtiment ». Bien que cette partie ne soit pas réalisée dans l'usine, elle demeure cruciale pour atteindre un haut niveau de qualité du produit final. En effet, dès la fermeture des jonctions jusqu'à la finition de la toiture, les travaux de « fermeture du bâtiment » assurent l'apparence de l'espace d'habitation, l'intégrité de l'enveloppe, l'intégrité structurale et, finalement, la bonne acceptabilité du produit.

Dans l'objectif d'obtenir un maximum d'information de cette étape, l'installation des modules a été appuyée par l'utilisation d'un drone, qui offrait une vue instantanée de l'érection du bâtiment (figure 12). En plus de cet outil, des multiples photos ont été prises afin d'enregistrer les activités liées à cette étape. Les images et vidéos produits par la caméra du drone permettront une analyse pausée des mouvements et une évaluation « *post-mortem* » de la séquence d'installation des modules. Cet outil et les images serviront également à développer de nouvelles séquences et de les adapter à différentes configurations de bâtiments modulaires (nombre d'étages, nombre de modules, orientation des modules par rapport aux axes du bâtiment, types de module, etc.).



Figure 12 Vue aérienne des Phases 1 et 2 à partir du drone pendant l'installation de la Phase 2

Le tableau 4 montre les plus importantes interactions trouvées lors de l'analyse.

Tableau 4 Installation et observations d'impact

Domaine qui impactait	Décision ou élément	Domaine impacté
Architecture	Configuration globale du bâtiment	Installation
Ingénierie structurale	Configuration du système de refend du bâtiment	Installation
Ingénierie MEP	Emplacements des jonctions et procédure de connexion des systèmes MEP	Installation
Préfabrication modulaire	Séquence de transport et d'érection	Installation
Préfabrication modulaire	Niveau de finition des modules	Installation

La figure 13 montre le niveau de précision des travaux de la fondation et d'alignement des modules préfabriqués. Ce niveau d'efficacité est dû à la coordination faite au préalable entre les équipes pendant la mise en marche du processus de conception intégrée. Dans ce cas particulier, l'installation de la fondation et des pieux a été vérifiée au laser et rectifiée au besoin avant le début de l'érection. En ce qui concerne le système d'attache entre les pieux et les balcons, celui-ci a été développé afin d'absorber l'écart d'alignement qui aurait pu rester après cette opération de vérification.



Figure 13 Installation des pieux pour les balcons



Figure 14 Érection des bâtiments



Figure 15 Niveau de finition intérieure atteint avant la mise en service

3.4.2 Différences et ajustements d'amélioration entre les *Phases 1* et *2*

La réalisation du projet en phases consécutives de préfabrication-installation, par bâtiment, a facilité l'incorporation des améliorations au procédé de fabrication et à la procédure d'installation. Cette révision dynamique des rétroactions a eu comme effet d'accélérer la courbe d'apprentissage et d'optimiser l'utilisation des ressources.

Les exemples les plus importants de l'amélioration du procédé sont :

- Le maintien du temps de préfabrication des modules tout en augmentant le niveau de finition.
- La diminution de 4 à 2 1/2 jours d'installation sur chantier entre les *Phases 1* et *2*.

Ces deux éléments ont généré une augmentation de la productivité et des réductions des coûts importantes liées à l'utilisation de l'espace, des ressources humaines, et des équipements en usine et sur le chantier de construction. Il est important de mentionner que d'autres éléments tels la gestion du projet ainsi que la coordination d'activités, ont vu des améliorations semblables, bien que plus difficiles à quantifier.



Figure 16 Projet Les Pavillons du 49^e : Phase 1 à gauche; Phase 2 à droite

Des futurs projets profiteront de cet avancement de la courbe d'apprentissage et ajouteront avec leurs propres défis d'autres éléments d'amélioration. Les éléments ayant eu les impacts les plus significatifs sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5 Éléments « à impact significatif » modifiés entre les Phases 1 et 2

Domaine critique	Phase 1	Phase 2
Fabrication de composantes	Retournements non nécessaires des panneaux CLT	Changement du sens des panneaux CLT pour l'usinage
Préfabrication modulaire	Niveau de finition intérieure générant trop de travaux de finition sur le chantier	Augmentation du niveau de finition intérieure en usine
Installation	Alternance excessive lors de l'utilisation des poutres de levage différentes Utilisation de poutres de levage secondaires qui rendaient difficile la stabilisation rapide des modules	Séquence de levage révisée Élimination de l'utilisation des poutres de levage secondaires

3.5 Conclusions

L'analyse de l'information compilée permet d'offrir les conclusions suivantes :

- La coordination de la préfabrication, le respect des échéances et le contrôle de qualité ont été des éléments cruciaux pour le succès du projet de construction modulaire. Une coordination efficace de la préfabrication a permis de réduire les délais et les coûts, tout en améliorant la précision et la qualité des modules produits. Le contrôle de qualité, quant à lui, a assuré que chaque module fini répondait aux standards requis, minimisant ainsi les risques de défauts et les besoins de retouches à l'usine ou sur le chantier.
- La préfabrication modulaire a permis de réduire les délais et les coûts tout en améliorant la qualité des modules produits. La précision d'installation garantit la stabilité et l'intégrité structurale du bâtiment. Enfin, la finition assure l'apparence et la bonne acceptabilité du produit. Ces trois concepts sont interconnectés et nécessitent une coordination étroite entre les équipes professionnelles et techniques pour garantir le succès du projet.
- Le procédé de préfabrication développé et mis en service a démontré son efficacité et flexibilité pour produire des bâtiments en bois massif modulaires de 4 étages. Deux bâtiments, sous la forme « préfabrication-installation » ont été livrés. Le procédé développé a été ajusté et amélioré pendant les étapes de préfabrication et installation ainsi qu'entre les phases. Cette caractéristique de manufacture flexible a permis d'augmenter le niveau de finition en usine et de réduire significativement le temps d'érection entre les *Phases 1* et *2*.

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

Les Pavillons du 49^e – Phases 1 et 2 servent comme démonstration technologique pour la construction modulaire en bois massif. Cette innovation représente une alternative réelle à la construction sur le site de chantier, tout en profitant des avantages de la préfabrication modulaire en usine sous conditions contrôlées.

Le projet permet de vérifier la pertinence de l'utilisation du bois massif, spécialement du bois lamellé-croisé (CLT), pour la préfabrication modulaire. Le produit offre une énorme versatilité structurale en étant utilisé pour des applications telles les plancher, les murs, les toits et les plafonds des modules. Cette combinaison, à laquelle s'ajoute le bois lamellé-collé comme élément de renforcement, et une conception innovante spécialement développée pour la construction modulaire, octroi aux modules et au bâtiment final des propriétés structurales de haute performance.

La préfabrication modulaire permet d'apporter aux chantiers de construction des systèmes constructifs présentant un haut niveau de finition, ce qui réduit considérablement le temps d'érection et de fermeture des bâtiments. Cet élément d'augmentation de productivité aura un impact positif sur le secteur de la construction résidentielle.

La construction modulaire en bois massif peut devenir un autre outil pour le développement de projets multiétagés destinés au marché résidentiel du Québec, spécialement là où la pénurie de main-d'œuvre et le manque d'intérêt pour la réalisation de projets réduit encore plus la disponibilité de logements.

3.7 Recommandations

La réalisation et l'analyse de l'expérience permettent d'offrir les recommandations suivantes :

- *Les Pavillons du 49^e – Phases 1 et 2* ont servi comme démonstration technologique pour des bâtiments allant jusqu'à 4 étages. Afin de compléter la courbe d'apprentissage et de continuer à améliorer la technologie, d'autres projets devraient être réalisés.
- Des projets de plus grandes superficies et de plus d'étages aideraient à mieux comprendre les enjeux logistiques en lien avec le volume de préfabrication, de transport et d'installation de bâtiments modulaires en bois massif.
- D'autres projets, avec d'autres groupes d'intervenants (ex. : qui participent au processus de conception intégrée), serviront à identifier des problématiques liées à l'espace disponible pour l'érection, la distance à parcourir avec les modules finis vers le site de chantier et la coordination des équipes d'installation à distance.

4. Bibliographie

Huang, T. 2017. Development of Small-scale Intelligent Manufacturing System (SIMS) — A case study at Stella Polaris AS. Master's thesis in Industrial Engineering. Faculty of Engineering Science and Technology, Arctic University of Norway. 71 p.

Li, H., Yang, M. and Evans, S. 2019. Classifying different types of modularity for technical system. *Int. J. Technology Management*, Vol. 81, Nos. 1/2, pp.1–23.

Willner, O., Powell, P., Duchi, A. and Schönsleben, P. 2014. Globally Distributed Engineering Processes: Making the Distinction between Engineer-to-order and Make-to-order. *Variety Management in Manufacturing. Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP 17 (2014) 663 – 668.* www.sciencedirect.com