

« Étude de cas sur la conception d'un projet de
construction modulaire en bois massif de deux
bâtiments de 4 étages »

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

Préparé par « Les Chantiers de Chibougamau Itée »

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

4 février 2025

WMT

Williams Munoz Toro

Auteur

Julie Frappier

Julie Frappier

Révisseure, Directrice
Services techniques

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	5
2.2.3	Budget global	5
2.2.4	Partenaires	5
2.2.5	Défis et risques généraux.....	6
3.	Détails de l'étude.....	6
3.1	Introduction	6
3.2	Objectifs.....	6
3.3	Méthodologie	6
3.4	Résultats.....	7
3.4.1	Développer et appliquer un processus de conception intégrée pour un projet de construction modulaire préfabriquée en bois massif.....	7
3.4.1.1	Processus de conception intégrée	7
3.4.1.2	Architecture.....	9
3.4.1.3	Ingénierie structurale	12
3.4.1.4	Ingénierie MEP	14
3.4.2	Conception de détails techniques.....	16
3.4.2.1	Solutions pour la structure	16
3.4.2.2	Tenue en service	18
3.4.2.3	Enveloppe du bâtiment	19
3.4.2.4	Logistique de préfabrication.....	19
3.4.2.5	Installation.....	20
3.4.3	Différences et ajustements d'amélioration entre les Phases 1 et 221	
3.5	Conclusions	23
3.6	Retombées et rayonnement des solutions développées et potentiel de reproductibilité pour l'industrie	23
3.7	Recommandations.....	23

4.	Bibliographie	25
----	---------------------	----

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude

La réalisation du projet « Les Pavillons du 49^e » a permis de développer et de mettre en service un processus de conception intégrée, adapté à la construction modulaire multiétagée. Ce rapport présente une étude de ce processus de conception intégrée et la coordination des différentes équipes impliquées dans la conception. Ce développement a débuté avec les premières rencontres techniques tenues dans la deuxième moitié de l'année 2021 et a été terminé vers la fin de l'étape de finition après l'érection de la phase 2, au deuxième semestre 2024.

L'étude présente l'analyse de l'interaction entre les différentes équipes qui doivent travailler « ensemble » afin de livrer les caractéristiques techniques qui ont donné forme au projet. Ces équipes, dont les pratiques ont été identifiées comme des « domaines critiques », sont les suivantes : architecture, ingénierie structurale, ingénierie MEP, acquisition de matériaux, fabrication de composantes, préfabrication modulaire et installation.

Le travail coordonné de ces domaines critiques a été suivi et les décisions ayant le plus d'influence sur le processus de conception intégrée ont été compilées. Les interactions ont été étudiées afin d'identifier avec plus de précision le domaine « à l'origine » de l'impact ainsi que le domaine qui était impacté. Le processus de conception intégrée développé a permis de s'attaquer plus rapidement aux impacts et de trouver ou créer des solutions consensuelles, qui évitent des problèmes majeurs plus tard dans le projet (fabrication de composantes, préfabrication de modules, et installation).

Les principales conclusions de l'étude indiquent que la construction modulaire multiétagée en bois massif a bénéficié de l'utilisation d'un processus de conception intégrée, qui a facilité l'identification de problèmes et des contraintes provenant des différents « domaines critiques ». Également, l'exercice de mettre en place un processus de conception intégrée au début des travaux a permis de repérer plus tôt les éléments qui requéraient le plus long temps pour être résolus.

Finalement, le suivi du processus de conception intégrée a inclus la coordination des travaux de finition correspondant à la fermeture du bâtiment. Cette étape finale de l'installation, qui a lieu après l'érection des modules, est cruciale dans l'objectif de sécuriser le fonctionnement de l'enveloppe et de donner l'apparence finale de l'intérieur du bâtiment.

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 l'un des premiers projets d'immeubles d'habitation modulaires en bois massif de 4 étages au Québec. Entièrement préfabriqués en usine dans les installations de Chantiers Chibougamau, les 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 par 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 « C Habitations ».

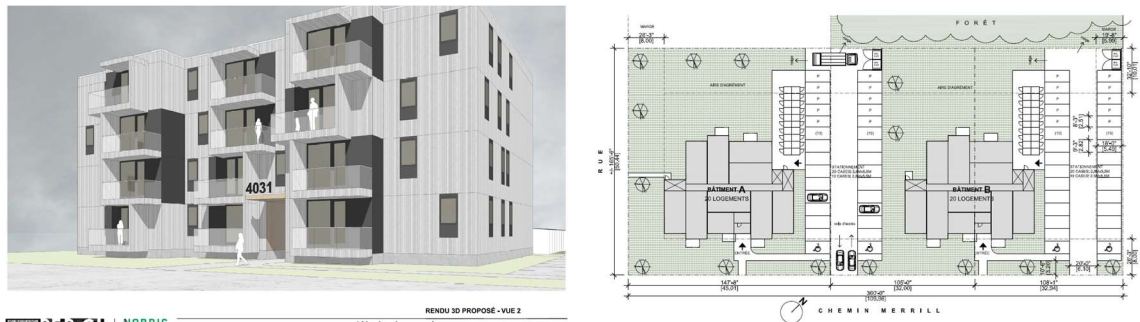


Figure 1 Esquisses : d'une des Phases et de l'emplacement des bâtiments.

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 des panneaux de bois lamellé-croisé pour les murs. Des poutres de bois lamellé-collé viennent supporter le module sur la périphérie. Les modules de corridor sont fabriqués d'un plancher de bois lamellé-croisé, ainsi que des murs en ossature légère. Les modules de cages d'escalier et d'ascenseurs sont constitués de panneaux de bois lamellé-croisé verticaux. Chaque tour (empilement de modules) d'appartement

gère ses propres charges sismiques et chaque module de cage d'ascenseur gère ses propres efforts sismiques. La charge latérale occasionnée par le corridor dans son axe faible est transférée aux modules d'appartement.

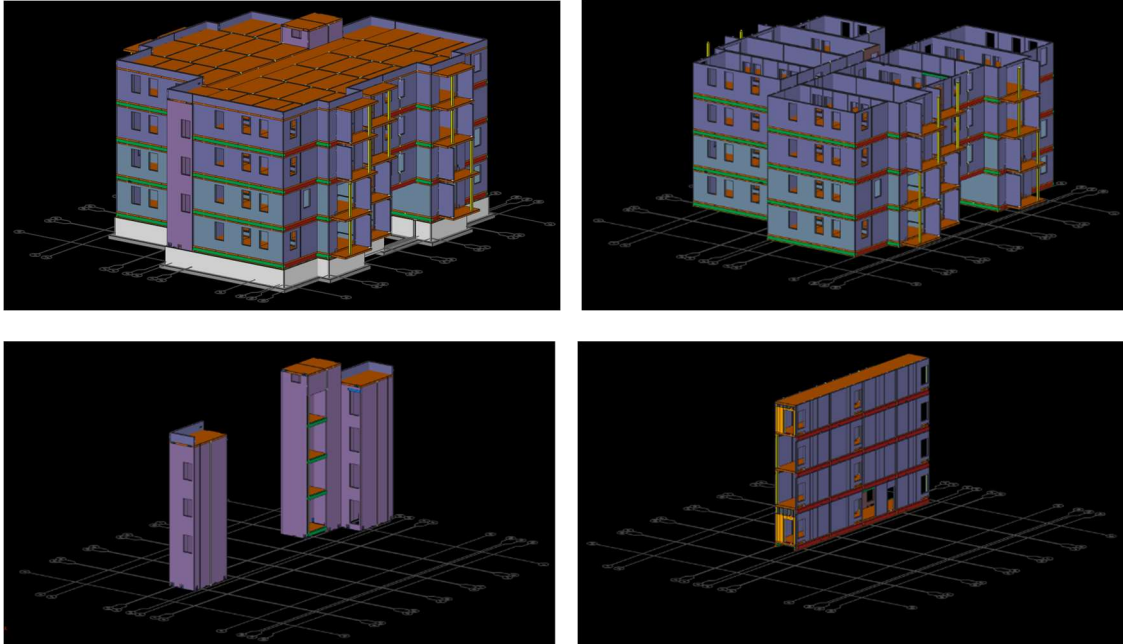


Figure 2 Vues 3D : bâtiment (en haut à gauche), unités d'habitation (en haut à droite), cages d'escaliers et ascenseur (en bas à gauche) et corridors (en bas à droite)

Le niveau de préfabrication des modules a été pensé de manière à avoir des modules avec une finition très avancée. Cette finition inclut les différentes couches de revêtement de l'enveloppe du bâtiment, les revêtements intérieurs de murs, de planchers et de plafonds, les différents éléments et dispositifs MEP, l'installation des cuisines et de salles de bain et les balcons. Une fois les modules terminés, ils étaient emballés et transportés dans un terrain d'entreposage en attendant l'érection.

La fermeture du bâtiment, c'est-à-dire, les travaux de finition des jonctions extérieures et intérieures, des connexions des éléments et dispositifs MEP, et les finitions d'apparence (peinture, corrections des défauts en lien avec le passage de matériaux et des travailleurs), a été effectuée après l'érection des modules. La figure 3 montre des images en lien avec le niveau de préfabrication des modules et la figure 4, des activités d'érection et de fermeture du bâtiment.



Structure et enveloppe



Finition intérieure



Éléments de MEP



Préparation finale et emballage

Figure 3 Niveau de préfabrication des modules



Érection de modules



Jonctions intérieures et installation de corridors



Bâtiment érigé et jonctions extérieures

Figure 4 Activités d'érection et de fermeture de bâtiment

2.2.2 Échéancier global et durée

La réalisation du projet « Les Pavillons du 49^e » a débuté en novembre 2021 et conclura pendant l'été 2025.

2.2.3 Budget global

Le budget global du projet a été 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

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 auxquels nous avons participé étaient de 1 ou 2 étages, maximum, 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. Dans ce sens, le développement d'un processus de conception intégrée sera crucial pour livrer un projet de cette envergure.

L'étude présente les faits saillants de cette démarche avec l'accent mis sur les éléments de conception ayant eu les impacts les plus significatifs sur le projet et notre courbe d'apprentissage.

3.2 Objectifs

Mettre en place un processus de conception intégrée, flexible, adapté à la construction modulaire multiétagée en bois massif.

3.3 Méthodologie

Une méthodologie à trois étapes a été adoptée dans l'objectif de développer et mettre en place le processus de conception intégrée :

- Étape 1 : Développer et appliquer un processus de conception intégrée pour un projet modulaire préfabriqué en bois massif.
- Étape 2 : Identifier les principaux détails techniques en lien avec le processus de conception intégrée.

- Étape 3 : Identifier et compiler les différences et les ajustements d'amélioration entre les phases 1 et 2 du projet.

3.4 Résultats

La présente étude a débuté juste quelques mois après le démarrage du projet, soit pendant le deuxième semestre de l'année 2021. À ce moment, le besoin d'une coordination plus étroite entre les équipes professionnelles est devenu évident afin d'assurer une conception adéquate du projet. Les sections suivantes montrent les résultats plus importants et significatifs de l'étude.

3.4.1 Développer et appliquer un processus de conception intégrée pour un projet de construction modulaire préfabriquée en bois massif.

L'analyse a commencé par un survol de littérature associée à la construction préfabriquée, avec un accent sur la préfabrication modulaire. En plus des connaissances compilées au cours des projets réalisés, une révision des certains ouvrages¹ provenant de l'Europe et de l'Amérique du Nord a été effectuée afin d'ajuster et d'améliorer l'analyse de l'étape de conception du projet « Les Pavillons du 49^e ». L'analyse des informations recueillies a permis de prévisualiser plus facilement les interactions potentielles entre les équipes professionnelles lors de l'étape de la conception.

3.4.1.1 Processus de conception intégrée

Le processus de conception traditionnelle utilisé pour la construction conventionnelle sur chantier a été mis à l'écart pour le projet dû à sa nature d'« ajustement par étape » à chaque fois que le projet passe d'une équipe de professionnels à une autre (ex. : de l'ingénierie de structure à l'ingénierie mécanique-électricité-plomberie – MEP) ou lorsqu'une équipe se joint à l'effort de conception. Afin d'éviter les corrections et les ajustements, un processus de conception intégrée a été développé spécialement pour le projet. Le diagramme suivant montre les principales différences entre un processus traditionnel et celui qui a servi comme exemple pour le projet « Les Pavillons du 49^e ».

Cette approche avec des rétroactions considérait la réalisation des rencontres hebdomadaires et des suivis constants entre les différents membres de l'équipe, dans le but d'accommoder toutes les perspectives de conception en continu, notamment celles de l'architecture, la préfabrication, l'ingénierie structurale, l'ingénierie MEP et l'installation. En plus de faciliter la conception et la participation des équipes professionnelles, l'approche facilite également la coordination avec les activités de fabrication de composantes structurales (bois massif et systèmes d'attache) et d'acquisition de matériaux (habillage des modules).

¹ Voir la bibliographie pour plus de renseignements.

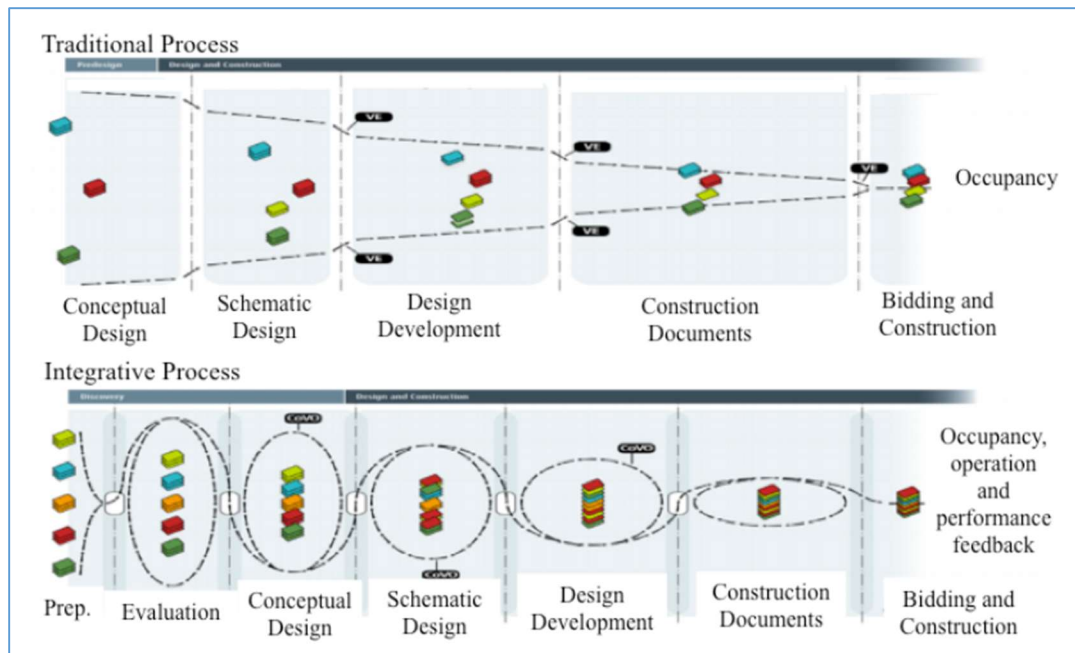


Figure 5 Processus de conception : a) traditionnelle et b) intégrée (Arroyo, 2014)

Lors des premières rencontres, il a été observé que les décisions dans un contexte de conception intégrée étaient influencées par plusieurs « sensibilités ». En effet, ces sensibilités ont été identifiées après comme étant des « domaines critiques » ayant une influence importante au moment de décider quoi et comment concevoir les solutions techniques pour le bâtiment. L'équilibre requis pour la faisabilité matérielle et la viabilité économique dépendaient de divers consensus. Les éléments suivants ont été identifiés comme les domaines critiques au moment de concevoir le projet :

- Architecture,
- Ingénierie structurale,
- Ingénierie MEP,
- Acquisition de matériaux,
- Fabrication de composantes,
- Préfabrication modulaire,
- Installation.

En tant qu'entreprise verticalement intégrée, la « Planification de la production de bois » constitue un élément de plus à considérer comme un « domaine critique ». Nonobstant, cet élément n'a pas été étudié et il a été regardé comme une contrainte standard, sans incidence directe sur la conception.

Les domaines critiques présentés dans la figure 6 ont eu une incidence directe sur la conception, ainsi que sur un ou plusieurs des autres éléments indiqués. Cette logique d'interaction observée pendant le développement et la mise en place du processus de conception intégrée a permis de choisir le meilleur compromis dans le but d'offrir un produit fini à haute valeur ajoutée.



Figure 6 Domaines critiques considérés pour l'étude.

Les sections suivantes décrivent des observations effectuées et des décisions prises selon le mode de conception intégrée pour chacun des domaines critiques. Dans le cas du présent rapport « *PICB-007* », l'analyse couvrira les domaines critiques directement liés à la conception, soient l'architecture, l'ingénierie structurale et l'ingénierie MEP. L'analyse des autres domaines critiques, plus en lien avec la préfabrication, sera présentée dans le rapport « *PICB-008* ».

3.4.1.2 Architecture

L'architecture doit tenir compte d'un nombre important de points de conception, commençant par l'esthétique et allant jusqu'à la tenue en service. L'architecte doit s'assurer que le bâtiment respecte l'esprit du design de son œuvre ainsi que les exigences imposées par les différentes réglementations. Il a été constaté que les décisions générées par l'équipe de conception avaient un impact sur les domaines critiques. Dans cet exercice, le domaine critique représenté par l'architecture générait des impacts ou bien était impacté par ces décisions. Le tableau 1 montre les plus importantes interactions trouvées lors de l'analyse.

Tableau 1 Architecture et observations d'impact

Domaine qui impactait	Décision ou élément	Domaine impacté
Fabrication de composantes Structure de base des modules	Meilleure isolation acoustique entre les appartements grâce au dédoublement des éléments de toit/plancher/mur	Architecture
Fabrication de composantes Structure de base des modules	Restrictions de la taille et de la hauteur des modules (et des espaces intérieurs) en raison du transport	Architecture
Structure de base des modules	Hauteurs d'étage plus grandes : escaliers plus longs, bâtiments plus hauts, mais avec des plafonds intérieurs plus bas	Architecture
Architecture	Présence de vides de construction entre les modules qui doivent être réglés pour rendre le bâtiment conforme au code de construction	Préfabrication modulaire
Structure de base des modules	Ajustements liés au mouvement différentiel des modules et aux déformations du bâtiment	Préfabrication modulaire Architecture
Préfabrication modulaire	Problèmes potentiels liés au déplacement des personnes à mobilité réduite entre des modules non parfaitement alignés en raison de petites différences dimensionnelles cumulatives durant l'installation	Architecture
Acquisition de matériaux	La procédure de conception entraîne une limitation des choix de matériaux et de la flexibilité dans la conception	Architecture

Par exemple, la nature innovante du projet « Les Pavillons du 49^e » a exigé le développement des assemblages acoustiques et d'enveloppe. Des essais ont été réalisés pour déterminer leur performance et ainsi s'assurer de respecter ou de surpasser les exigences du code du bâtiment. Dans ce cas particulier, chaque ajout ou changement des matériaux dans les assemblages avait un impact direct sur les activités de préfabrication modulaire. Le temps estimé pour installer chaque couche a été suivi attentivement afin d'équilibrer la performance de tenue en service et la performance économique, cette dernière affectée par des éléments tels la main-d'œuvre et le coût des matériaux.

Une fois que la compilation des besoins et des exigences en lien avec le bâtiment est terminée, c'est-à-dire, le nombre d'unités d'habitation et le nombre d'étages, les éléments d'espace entrent en jeu afin d'établir la taille des unités. Ces informations ont servi à déterminer le nombre de modules par unité d'habitation et incorporer à l'analyse les contraintes de fabrication de composantes et de préfabrication. Cette analyse globale a donné comme résultat la configuration de 47 modules requis pour compléter le bâtiment (unités d'habitation, corridors et cages d'escaliers et ascenseur).

Ainsi, l'architecture a été impactée par certains aspects de la fabrication de composantes en bois massif. En effet, la composition de la structure de chaque module, faite en bois lamellé-croisé (CLT), a imposé des contraintes sur les dimensions de chaque module ainsi que sur les chambres dans chacun des modules. La taille des modules devait permettre l'optimisation de la fabrication de composantes (principalement les panneaux en CLT) et, de la même manière, la taille des modules devait respecter la logique de l'espace (superficie) déterminé pour chaque chambre ainsi que pour les services y présents. À la figure 7, la combinaison des modules pour un étage (à gauche) et l'ensemble de modules pour une unité d'habitation (dans l'encadré noir, le module de chambres; dans l'encadré bleu, le module pour le salon et les services – cuisine et salle de bain).

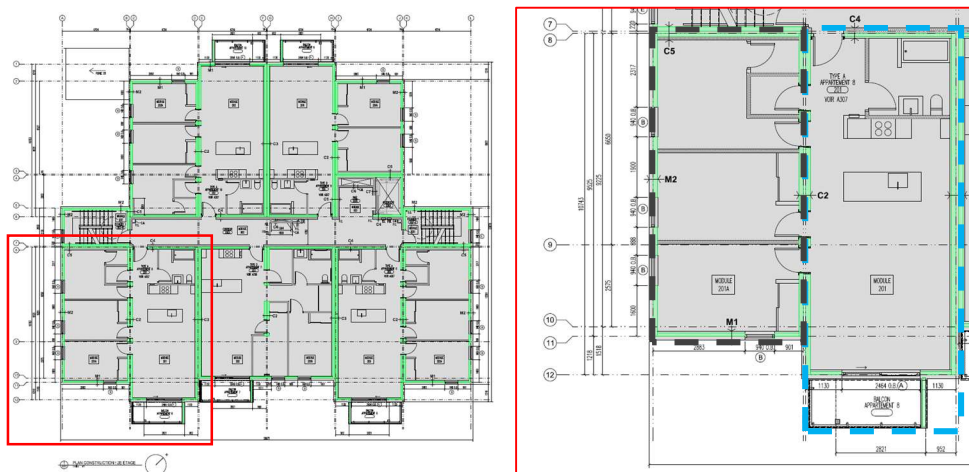


Figure 7 Plan d'un bâtiment et configuration d'une unité d'habitation

La figure 8 montre le cheminement de l'idée, dès la création du concept jusqu'à sa réalisation. Les multiples interactions observées indiquent que l'objectif d'offrir un bâtiment de construction modulaire préfabriqué prêt à être habité entraîne le besoin d'apporter un regard global du projet. Ce regard global a été possible en développant et suivant le processus de conception intégrée.

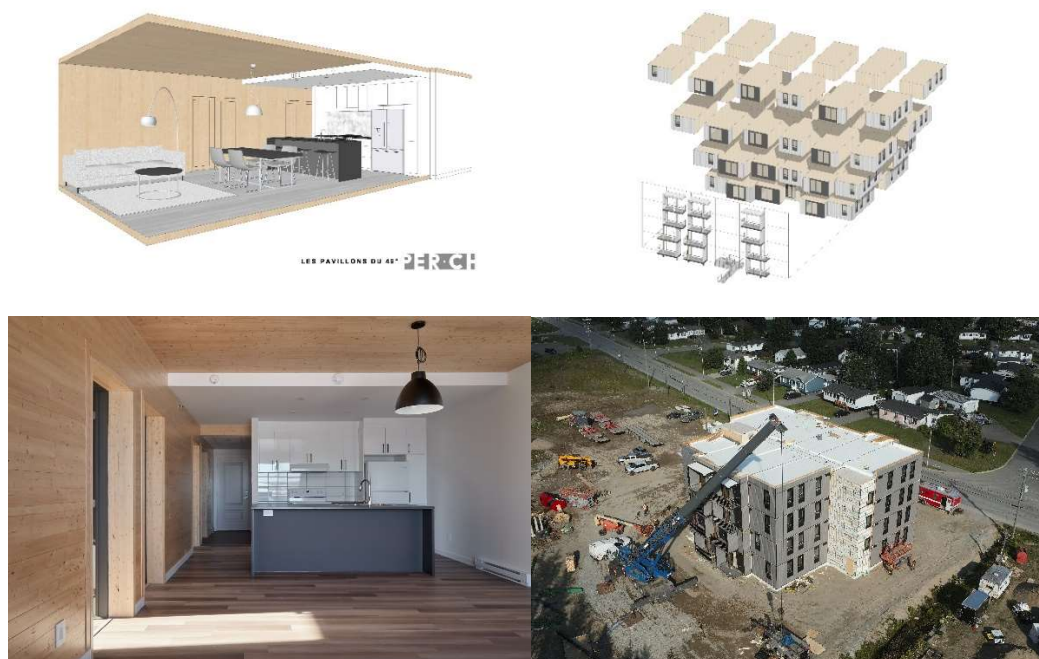


Figure 8 Cheminement de l'idée dès la conception à la réalisation.

Finalement, la combinaison de contraintes a eu des impacts sur d'autres domaines critiques, notamment celui de l'Acquisition de matériaux. En effet, les dimensions finales de chaque module ont permis de faire le choix final des matériaux pour l'habillage et l'enveloppe du bâtiment. Dans ce cas en particulier, les matériaux vendus en panneaux (ou autre unité de surface) devaient permettre un maximum d'utilisation et un minimum de gaspillage. De plus, tous les matériaux de l'habillage extérieur devaient faciliter l'installation de « systèmes de fermeture » pour les jonctions entre les modules adjacents (dans le sens vertical et horizontal).

3.4.1.3 Ingénierie structurale

L'ingénierie structurale a été un défi de taille pour ce premier projet modulaire multiétage. Bien que la hauteur et l'aire du bâtiment ne soient pas une nouveauté en soit, le fait de coordonner et d'arrimer l'ingénierie structurale à la préfabrication modulaire, à l'installation et aux autres domaines critiques observés pour ce projet modulaire multiétages a comporté plusieurs compromis et ajustements. Le tableau 2 montre les plus importantes interactions trouvées lors de l'analyse.

L'agencement des modules, qui donnait la forme conceptuelle aux bâtiments, a eu un impact significatif sur la logique de l'ingénierie structurale. Un exemple de ceci est offert par le système de refend choisi pour résister aux charges latérales. En effet, des cages d'escalier et d'ascenseur en « claire-voie » coexistent avec des modules installés en « plateforme ». Ceci implique la fabrication de modules « par étage », dans le cas des habitations, et des modules d'une hauteur équivalente à plusieurs étages, dans le cas des cages d'escalier et d'ascenseur.

Le concept de préfabrication modulaire, développé en utilisant des boîtes en CLT très rigides et lourdes, a eu un impact sur la configuration du transfert des charges. Dans le cas du projet « Les Pavillons du 49^e », chaque empilement de modules (tour de modules) avait un comportement indépendant par rapport à la tour adjacente. Le tout a été « solidarisé » par un système de diaphragme au niveau du toit. Ce système novateur a permis d'alléger tant la préfabrication de chaque module comme l'installation du bâtiment.

Le type de construction modulaire choisi a demandé le développement de systèmes d'attache spécialement conçus pour assurer l'intégrité structurale des modules et des bâtiments. Des vis auto-taraudeuses ont été retenues pour la préfabrication des modules, principalement pour les joints de panneau à panneau. Pour le bâtiment, des systèmes d'attache spéciaux ont été conçus pour les charges de cisaillement intermodales et pour l'alignement lors de l'érection du bâtiment. La combinaison de systèmes d'attache a permis une préfabrication modulaire efficace et une érection rapide.

Tableau 2 Ingénierie structurale et observations d'impact

Domaine qui impactait	Décision ou élément	Domaine impacté
Ingénierie structurale	Haute rigidité de module pour permettre un niveau de finition quasiment total	Préfabrication modulaire Installation
Architecture	Configuration globale des modules donnant la forme conceptuelle aux bâtiments	Ingénierie structurale Préfabrication modulaire Installation
Ingénierie structurale	Tours de modules d'appartement indépendantes au niveau de la distribution des efforts latéraux	Préfabrication modulaire Installation
Ingénierie structurale	Le système de résistance aux forces latérales a donc été conçu sans ductilité, c.-à-d. à l'élastique et besoin de quantité et de grosseur d'attaches (vis, clous, plaques) supérieures pour transférer les efforts	Fabrication de composantes Préfabrication modulaire Installation
Ingénierie structurale	Systèmes d'attache à installation rapide	Préfabrication modulaire Installation

3.4.1.4 Ingénierie MEP

L'ingénierie MEP (mécanique-électricité-plomberie) a été un des points critiques lors de la conception. En effet, la logique de préfabrication de modules associée à une connexion « par élément » sur place n'est pas un domaine très connu ni maîtrisé par les firmes d'ingénierie MEP « conventionnelles ». Ceci a eu comme effet un nombre important d'échanges entre le sous-traitant MEP, l'ingénierie structurale, le coordonnateur de la préfabrication et l'acquisition de matériaux. Le tableau 3 montre les plus importantes interactions trouvées lors de l'analyse.

Tableau 3 Ingénierie MEP et observations d'impact

Domaine qui impactait	Décision ou élément	Domaine impacté
Architecture	Configuration des modules d'habitation et des services	Ingénierie MEP Préfabrication modulaire Installation
Préfabrication modulaire	Utilisation de vides techniques verticaux MEP	Installation
Ingénierie structurale	Modélisation de la structure ayant rendu plus facile l'organisation des éléments MEP	Ingénierie MEP
Ingénierie MEP	Développement d'une stratégie de connexion rapide entre les modules	Fabrication de composantes Acquisition de matériaux Préfabrication modulaire Installation
Ingénierie MEP	Gestion des pentes des tuyaux	Préfabrication modulaire
Ingénierie MEP	Utilisation d'un vide technique pour les services	Ingénierie structurale Ingénierie MEP Préfabrication modulaire Installation

L'entièreté de ce domaine critique a été affectée par les dimensions des modules, les espaces inter-modules, les passages inter-modules, la résistance au feu et la sécurité incendie, les configurations des modules (habitation-corridor-cages d'escalier/ascenseur) et l'installation. Dans le contexte de la préfabrication modulaire, des ajustements en continu ont été apportés afin d'accommoder les préoccupations provenant des autres domaines critiques. Tous les ajustements réalisés devaient respecter les codes et normes associés (mécanique-électricité-plomberie), donc un niveau très élevé de coordination a été requis.

Le passage des différents types de services entre les modules (ex. : intra-habitation et inter-habitation) a été identifié comme un élément complexe de la conception (voir figure 9). Ces passages assurent la continuité de la fourniture de services entre les modules et se manifestent en forme de pénétrations aux niveaux vertical (murs) et horizontal (planchers). Ces conditions d'opération amènent diverses complications lors de la conception d'un bâtiment modulaire. En effet, chacune de ces pénétrations doit être également un obstacle efficace au passage du feu et de la fumée entre les modules et à la propagation du feu dans les interstices ou les vides de construction, qui se trouvent à plusieurs endroits dans un bâtiment modulaire.



Figure 9 Vues du bâtiment « fini », en haut, et des éléments de plomberie (en bas)

La réalisation des modèles 3D de la structure (communément utilisés pour modéliser les composantes en bois massif à fabriquer) a permis de mieux visualiser la position des pénétrations, d'ajuster leurs emplacements et de les accommoder de manière efficace. De façon analogue, le modèle 3D a rendu plus facile le positionnement des systèmes d'évacuation de fluides qui utilisent des circuits en pente, tant dans les modules d'habitation comme dans les corridors. Finalement, la modélisation de la structure a servi également pour définir le meilleur emplacement pour des vides techniques verticaux où les systèmes MEP ont été installés pour passer d'un étage à l'autre.

3.4.2 Conception de détails techniques

La conception du projet « Les Pavillons du 49^e » a nécessité le développement de solutions techniques pouvant offrir une performance globale sans questionnement. La viabilité et la qualité de l'innovation résident sur le fonctionnement combiné entre chacune de ces solutions techniques et l'équilibre budgétaire.

La majorité des détails techniques ont été développés par l'équipe de conception et répondaient aux exigences combinées de faisabilité technique et de viabilité économique. Dans les situations où la problématique dépassait le niveau d'expérience ou de connaissance des membres de cette équipe, les détails techniques ont été développés avec la collaboration de consultants externes. Lorsque requis, ces détails ont été soumis à des essais et/ou des modélisations dans le but de confirmer la performance espérée. Les sections suivantes montrent les principales solutions développées dans l'étape de conception du projet « Les Pavillons du 49^e ».

3.4.2.1 *Solutions pour la structure*

Arrangement vertical des modules

Une des options de conception retenues pour le projet a été celle de considérer des tours de modules à fonctionnement structural indépendant. Dans ce cas, une série d'habitations modulaires, soit des unités modulaires de « services » et de « chambres » juxtaposées, ont été empilées sur 4 étages, dans le but de former une « tour de modules » en plateforme.

Cet arrangement permettait que chaque « tour » puisse résister de manière indépendante à l'action des charges latérales. Afin d'assurer un transfert adéquat des mouvements inter-étages, des systèmes de connexion ont été spécialement développés pour résister aux charges de cisaillement (séismes et vents). Également, ces systèmes de connexion servaient pour assurer un alignement avec un minimum d'écart lors de l'érection des bâtiments. Dans le but d'harmoniser les mouvements induits par les charges latérales, toutes les « tours de modules » ont été « attachées » au niveau du toit, à l'aide d'un diaphragme de transfert. La figure 10 montre le concept des tours indépendantes, représentées par les lignes verticales (4 pour chaque tour et 4 couleurs pour représenter chaque étage) et la plaque de diaphragme du toit.

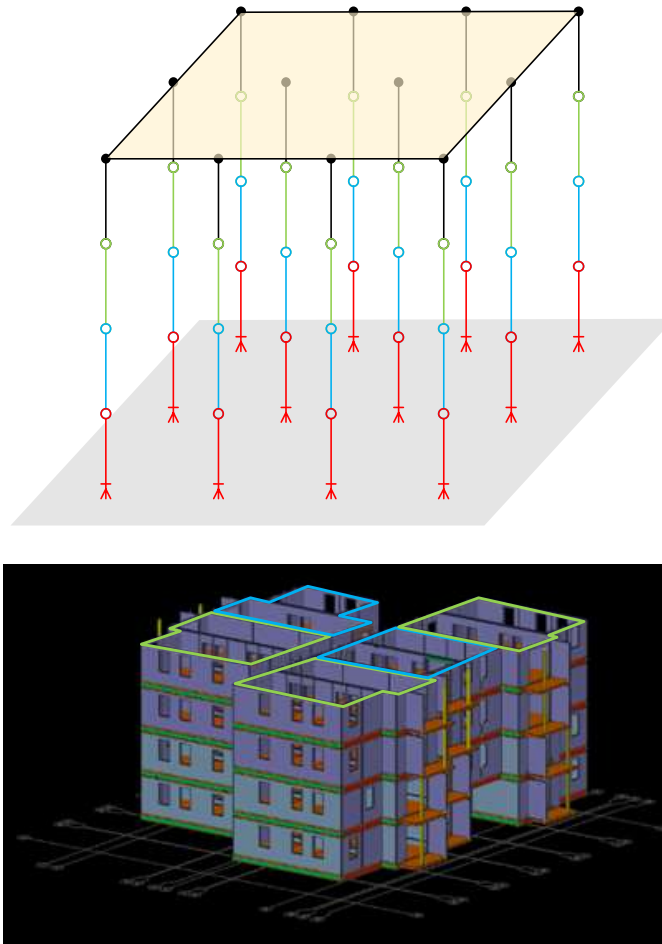


Figure 10 En haut : concept des « tours de modules indépendantes » et diaphragme de toit. En bas : modèle 3D avec les contours supérieurs de chaque « tour de modules » en vert ou en bleu.

Système de refend

Les charges latérales agissant sur le bâtiment proviennent principalement des séismes et des vents. Afin d'assurer l'intégrité structurale du projet « Les Pavillons du 49^e », un système de refend a été développé spécialement pour ce type de construction modulaire. Le système propose plusieurs éléments allant de l'unité de base (module) aux modules de déplacement vertical (cages d'ascenseur et d'escaliers). Voici une liste de ces éléments :

- Modules avec système de refend (murs et planchers)
- Tours verticales (4 étages) en « plateforme » avec système de transfert de mouvement latéral
- Diaphragme de toit pour harmoniser les déplacements au niveau du bâtiment
- Cages d'ascenseur et d'escaliers avec murs de refends en « claire-voie » avec systèmes d'ancrage de retenue verticale
- Corridors avec sections de mur de refend et de systèmes d'ancrage de retenue verticale

Cette combinaison permettait également d'accommoder les systèmes MEP (déplacements et déformations harmonisés) et facilitait tant la préfabrication modulaire comme l'installation des modules lors de l'érection. De plus, l'utilisation des cages d'ascenseur et d'escaliers en « claire-voie » aidait à optimiser les propriétés du bois et des panneaux CLT. Ainsi, le système de refend développé pour ces bâtiments démontre la démarche flexible requise lorsque des systèmes préfabriqués modulaires sont utilisés pour la construction multiétage.

3.4.2.2 Tenue en service

Tests acoustiques

Parmi les activités de recherche et développement réalisées se trouvent les tests et modélisations acoustiques des assemblages de mur et de plancher. Des éléments concernant les bruits d'impact, de transmission aérienne et de flanking ont été étudiés afin de mieux comprendre les interactions entre la préfabrication modulaire et la performance acoustique du bâtiment. Dans le cadre de la conception du projet « Les Pavillons du 49^e », des essais et des modélisations ont été effectués pour étudier la performance acoustique. Un exemple de ces essais est présenté à la figure 11. Pour cet assemblage de plancher, une performance acoustique minimale de 60 (pour les indices STC et IIC) était envisagée.

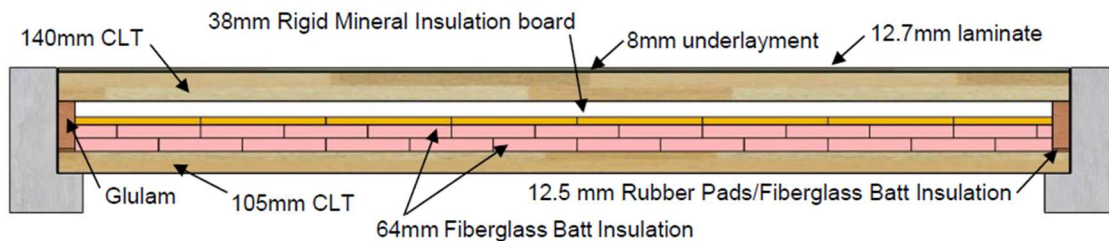


Figure 11 Assemblage de plancher soumis à des essais acoustiques (source : NRC-CNRC, 2023)

Détermination du tassement

Cet élément d'analyse est lié à l'accommodement de la structure érigée et aux déformations des composantes en bois générées par l'écrasement et l'hygroscopicité du bois et l'humidité relative de l'environnement. Dans le cas du présent projet, les calculs ont été concentrés sur le tassement vertical des modules en plateforme, soient les « tours des modules », la « tour de corridors » et les modules en « claire-voie ». De plus, les mouvements relatifs entre ces sous-systèmes ont été étudiés afin de déterminer les tolérances de construction requises pour le fonctionnement intégral du bâtiment, incluant la circulation des personnes.

Les mesures de déformations continueront avec le suivi post-installation qui sera réalisé par l'équipe de FPInnovations. Après un ou deux cycles annuels, il sera possible de visualiser le comportement de la structure et d'ajuster les hypothèses de calcul développées lors de l'étape de conception.

3.4.2.3 Enveloppe du bâtiment

L'enveloppe développée pour le projet respecte les exigences de la réglementation en vigueur. Afin de visualiser la performance de l'enveloppe une fois le bâtiment installé, des modélisations ont été effectuées, à l'aide de consultants externes, pour plusieurs configurations de mur et de plancher. La modélisation a permis d'accélérer la compréhension du comportement thermique et « d'essayer » des assemblages basés sur différentes stratégies de conception. La modélisation a été une solution efficace tout en étant moins dispendieuse que des essais au laboratoire.

La préfabrication a reçu un impact indirect provenant des résultats de la modélisation de l'enveloppe. En effet, le choix de matériaux et l'ordre d'installation de chaque couche impactent le temps de production des modules. Cet élément a été étudié pendant l'exercice de modélisation. La figure 12 montre un des assemblages de mur extérieur modélisé. Les résultats ont servi pour confirmer ou modifier le choix des matériaux.

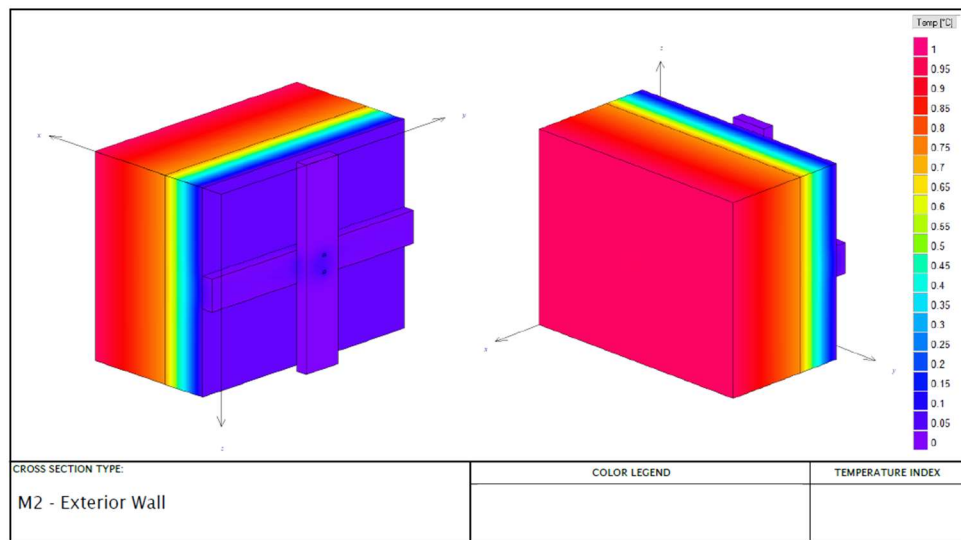


Figure 12 Assemblage de mur modélisé pour la performance thermique (RDH pour Nordic, 2022)

3.4.2.4 Logistique de préfabrication

Un des éléments clés pour la réussite du projet a été le développement et la mise en place d'une logistique de fabrication spécialement adaptée pour la construction modulaire multiétage. Dans le cas du projet « Les Pavillons du 49^e », les volumes de matériaux de construction et d'habillage dépassaient largement ceux des projets modulaires précédents (ex. : École Riverside).

Dans le cas de l'acquisition de matériaux (ex. : ceux qui ne sont pas produits par notre entreprise), un système d'achat graduel a permis d'alimenter les étapes d'habillage (finitions extérieures et intérieures) des modules. La figure 13 présente le concept d'une zone de stockage de matériaux adjacente à la ligne de production qui permettait d'organiser les différents matériaux afin d'alimenter chaque station de préfabrication. Un des éléments de rétroaction en lien avec la coordination de la préfabrication a donné lieu à l'incorporation de 3 stations de travail de plus afin d'accueillir une augmentation des travaux de finition en usine.

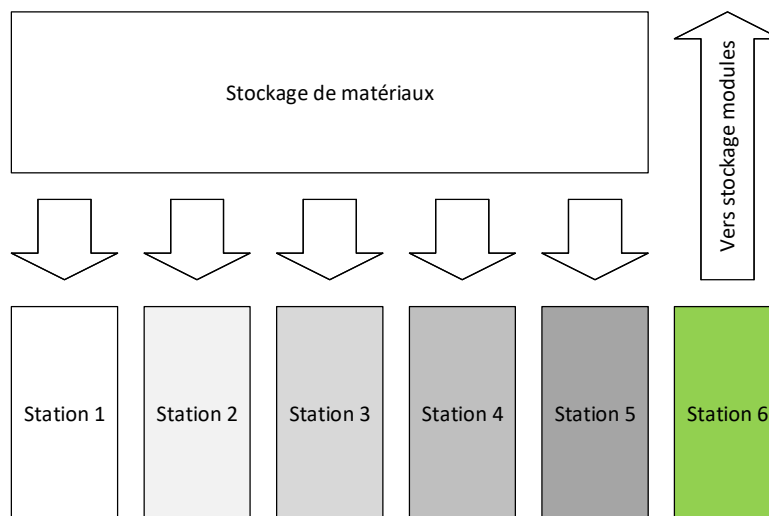


Figure 13 Concept de ligne de préfabrication et stockage de matériaux

La fabrication de composantes de base (bois lamellé-collé et bois lamellé-croisé) a été réalisée en coordination avec la fabrication de structures en bois massif « conventionnelles ». Cet ajustement a facilité la création d'un flux constant (*juste à temps*) de composantes structurales pour la ligne de préfabrication modulaire. Ceci a éliminé le besoin de stocker des composantes en bois massif de grande taille qui occupent beaucoup d'espace.

3.4.2.5 Installation

Cette étape a nécessité beaucoup d'attention, car elle s'agit de l'instance où la précision de la conception, représentée par des modèles numériques et des calculs, rencontre la réalité de la mise en service. Afin d'assurer l'efficacité de cette opération, l'équipe de conception a mis en place une cellule de travail consacrée à coordonner les éléments suivants :

- Transport des modules
- Séquence d'installation
- Sécurisation de l'intégrité structurale (modules, tours, ensemble)
- Risques d'intempéries
- Connexions éléments MEP
- Fermetures des jonctions (extérieures et intérieures)
- Qualité finale du produit

L'installation a commencé avec le transport des modules sur le chantier. L'ordonnance du transport devait suivre la séquence accordée avec l'équipe de conception et se faisait un module à la fois. Le levage des modules a été conçu de manière à optimiser l'utilisation de la grue et d'aller en assurant l'intégrité structurale des modules. Dans ce sens, l'érection des modules s'est effectuée selon l'ordre suivant :

- Les tours de la section avant;
- la tour de corridors;
- les cages d'escaliers et ascenseur; et
- les tours de la section arrière.

La fermeture du toit, incluant le diaphragme de toit et la finition de toiture, marquait la fin des gros travaux d'érection des modules.

L'installation continuait avec la fermeture des jonctions intérieures et extérieures ainsi que la finition intérieure, notamment la peinture et les ajustements des surfaces de planchers et des murs entre les différents systèmes modulaires installés. Dans cette même étape, les ascenseurs sont installés et mis en opération.

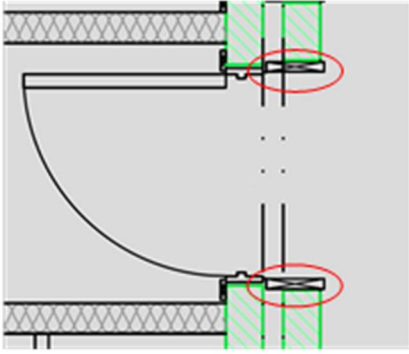
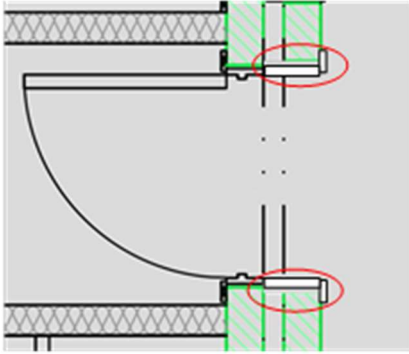
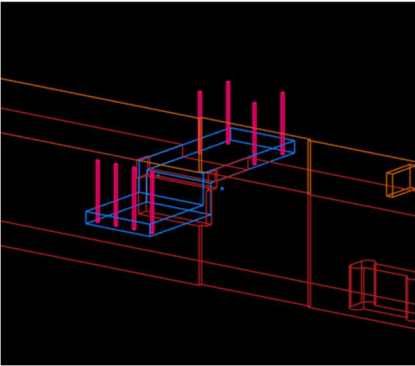
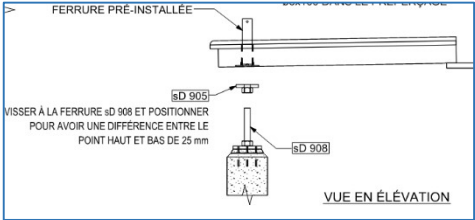
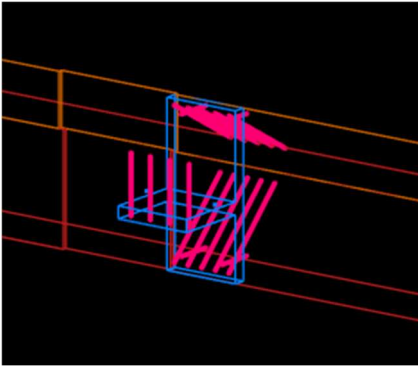
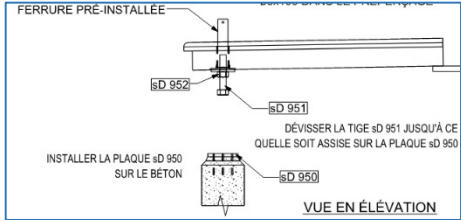
Cette étape a bénéficié de la rétroaction apportée par l'apprentissage acquis avec le premier bloc (Phase 1). En effet, l'expérience de la première installation a été utilisée pour améliorer la procédure d'installation pour la Phase 2.

3.4.3 Différences et ajustements d'amélioration entre les Phases 1 et 2

La réalisation du projet en deux phases a rendu plus facile l'incorporation d'améliorations et d'optimisations à la conception. La rétroaction constante a été un outil qui a permis d'identifier l'impact des décisions de conception sur la réalisation du projet. Bien que la plupart des rétroactions aient été analysées et les ajustements faits immédiatement pour les deux bâtiments (phases 1 et 2), certaines des rétroactions se sont manifestées lors de l'installation des modules dans l'étape d'érection. Les éléments ayant eu les impacts les plus significatifs sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 Éléments « à impact significatif » modifiés entre les Phases 1 et 2

Domaine critique	Phase 1	Phase 2
Architecture	Ouvertures de porte : Alignement difficile à atteindre entre les modules adjacents, car le cadrage était trop ajusté aux dimensions de l'ouverture. L'installation de la finition pour la jonction (dans l'ellipse en rouge) requérait de nombreux ajustements sur place.	Ouvertures de porte : Changement du type de cadrages de porte afin d'augmenter la tolérance d'alignement. Ce type de cadrage permettait d'aligner les ouvertures plus rapidement et d'uniformiser la forme du cadre sur toute la largeur de la jonction.

		
Ingénierie structurale	Balcons (1) : Ferrure d'attache des dalles de balcon aux modules en forme de « Z » (intersection axe X et plan Z-Y) portant des risques de condensation (ferrure allant de l'extérieur à l'intérieur du bâtiment)  Balcons (2) : Modules de RDC difficiles à aligner au niveau des balcons du 1^{er} étage et la fondation (intersection axe Z et plan X-Y), car la ferrure et la tige ont été préinstallées dans le béton rendant le boulonnage compliqué. 	Balcons (1) : Modification des ferrures des balcons par étage (intersection axe X et plan Z-Y) avec forme de « T » horizontale pour rester à l'extérieur du bâtiment, toute en réduisant les risques de condensation.  Balcons (2) : Systèmes d'attache des balcons du 1^{er} étage à la fondation installée dans la dalle CLT (intersection axe Z et plan X-Y) et avec un ajustement final avec soudure sur place auprès de la plaque installée sur le béton. 

3.5 Conclusions

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

- D'après l'expérience acquise lors de la réalisation du projet « Les Pavillons du 49^e », il a été constaté que le développement et l'application du processus de conception intégrée sont cruciaux pour l'objectif d'offrir un produit modulaire final de haute qualité et reproductible dans le temps (ex. : phases 1 et 2).
- Le processus de conception intégrée a permis de concentrer les efforts de manière coordonnée et d'arriver à un concept de bâtiment prêt à être préfabriqué. Dans ce contexte, l'identification de domaines critiques ainsi que des impacts de l'interaction entre ceux-ci a aidé à réduire au maximum les erreurs et, par conséquent, a rendu plus rapide le processus de préfabrication.
- Le processus de conception intégrée a permis également à notre entreprise de repérer les inconvénients liés à l'envergure du projet et à y incorporer des ajustements préventifs en vue des étapes de préfabrication et d'installation des bâtiments. Ceci s'applique à tous les domaines critiques identifiés lors de l'étude.

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

Le type d'exercice réalisé lors de l'étape de conception du système de bâtiment modulaire multiétage pourrait servir comme référence au moment de penser à la réalisation de nouveaux projets modulaires. En effet, l'identification des domaines critiques et des interactions à différents niveaux entre eux devient une activité cruciale pour assurer la réussite du projet.

La logique du processus de conception intégrée développée pour ce projet pourrait donner un nouvel élan aux différents corps professionnels intéressés à ce type de construction modulaire. De nouvelles équipes de conception pourraient voir le jour et développer des processus de conception intégrée plus poussés et novateurs au Québec.

Les résultats de l'exercice ont eu un impact très positif et ont permis une augmentation de la productivité générale du projet (conception et préfabrication). Ceci a le potentiel de reproduction pour d'autres initiatives de construction modulaire multiétagée en bois massif.

3.7 Recommandations

La compilation d'information réalisée au cours de l'étape de conception permet les recommandations suivantes :

- Choisir et mettre en contact les différents corps professionnels et techniques le plus tôt possible, dès que le projet a été approuvé pour réalisation.

- Identifier les domaines critiques avec l'impact le plus significatif sur le projet.
- Identifier les interactions entre les différents domaines critiques.
- Comprendre les impacts potentiels des choix techniques sur les différents domaines critiques.
- Faire un suivi des solutions techniques apportées afin de voir leur pertinence lors de futurs projets.
- Lorsque possible, réaliser des visites techniques pendant la préfabrication afin de constater l'impact des décisions « virtuelles » sur les opérations « réelles ».

4. Bibliographie

ARROYO, Paz. *Exploring decision-making methods for sustainable design in commercial buildings*, Thèse (Ph. D.), University of California, Berkeley, 2014, 222 p.

HAIRSTANS, Robert. *Off-site and industrialised timber construction: Delivering quality and efficiency*, 2^e éd., High Wycombe, 2019, 241 p.

Smith, R. E. *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*, 1^e éd., Hoboken, 2010, 366 p.

STAIB Gerald, DÖRRHÖFER Andreas et ROSENTHAL Markus. *Components and systems: Modular construction*, 1^e éd., Munich, 2008, 239 p.

NRC-CNRC. *Acoustic testing of Nordic CLT Floor Assemblies*. Report no. A1-020508.8F, 2023.