

Démonstration de la faisabilité des systèmes de refend en
CLT pour un système de construction mixte et de la
faisabilité de l'analyse latérale pour une construction multi-
étage avec géométrie irrégulière.

Arbora A et B



Préparé par Jean-René Larose,
associé principal, L2C experts
conseils en structure

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

2021-03-24

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Larose', is positioned above a horizontal line.

Jean-René Larose

Auteur

Avis de non-responsabilité

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

Table des matières

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude.....	3
2. Introduction.....	4
2.1 Titre et lieu de réalisation du projet de construction	4
2.2 Description du projet de construction	5
2.2.1 Description du bâtiment innovant ou de la solution innovante	5
2.2.2 Échéancier global et durée	7
2.2.3 Budget global	7
2.2.4 Partenaires	7
2.2.5 Défis et risques généraux	7
3. Détails de l'étude	8
3.1 Introduction et hypothèses de départ	8
3.2 Objectifs	8
3.3 Méthodologie	8
3.3.1 Analyse dynamique des structures	9
3.4 Résultats et analyse	12
3.5 Conclusions	12
3.6 Retombées et rayonnement des solutions développées et potentiel de reproductibilité pour l'industrie	14
3.7 Recommandations	15
4. Bibliographie.....	15
5. Annexes	15

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude

Nous vous démontrons ici la faisabilité des systèmes de refend en CLT pour un système de construction mixte tel que nous l'avons expérimenté durant les travaux en lien avec la construction du bâtiment Arbora A ainsi que celle de la faisabilité de l'analyse latérale pour une construction multi-étage avec géométrie irrégulière telle qu'expérimenté dans la conception du projet Arbora B.

Il s'agit des deux premiers immeubles en ce genre dans la ville de Montréal qui sont nés du besoin de répondre à une partie du marché qui est de plus en plus intéressée aux constructions à moindre impact environnemental.

Grâce entre autres, à des simulations effectuées par ordinateur avec le fabricant Nordic et à la consultation du code du bâtiment de la Suisse, nous avons pu démontrer que le système de refend de tels bâtiments répond aux exigences du code du bâtiment en vigueur ici.

2. Introduction

Le quartier de Griffintown à Montréal abrite un complexe d'édifice qui détient un record mondial: Arbora constitue le plus grand complexe résidentiel construit en bois massif d'ingénierie au monde. Avec ses trois bâtiments de 8 étages d'une hauteur de 25 m, il cumule 55 515 m² et loge 434 unités d'habitation. Ce record pourra certes être effacé, mais Arbora possède un atout qui ne disparaîtra pas: la qualité esthétique de ses poutres et de ses colonnes en bois laissées apparentes. Le constructeur Sotramont a réuni une équipe de professionnels aguerris sur plusieurs niveaux pour réaliser cette première canadienne.



Le complexe occupe tout l'îlot délimité par les rues De la Montagne, Ottawa, William et Eleanor. Les bâtiments comportent 8 niveaux hors sol et 2 niveaux de stationnement en sous-sol. Les bâtiments A et C possèdent un podium de béton au rez-de-chaussée abritant des commerces. Les étages en bois (8 pour le bâtiment B et 7 pour les bâtiments A et C) sont destinés à un usage résidentiel. Sur les rues De la Montagne et Ottawa se dressent les appartements locatifs des bâtiments A et C alors que les condominiums du bâtiment B donnent sur les rues William et Eleanor. Arbora bénéficie également de 40% d'espaces verts aménagés au milieu des bâtiments. La Phase I est déjà certifiée LEED Platine et la Phase II vise le même niveau de certification. Pour Sotramont, l'utilisation du bois dans ce projet était naturelle après l'expérience positive vécue avec le projet TOD à Ville St-Laurent. La construction du projet Arbora s'est échelonnée de 2016 à 2019, les 3 bâtiments faisant l'objet de 2 phases successives.

Le succès du projet Arbora repose en grande partie sur la structure de bois apparente. De plus, son emplacement de choix n'est pas étranger ; le quartier de Griffintown, à deux pas du centre-ville de Montréal, étant extrêmement populaire.

2.1 Titre et lieu de réalisation du projet de construction

Titre : Bâtiments multi-résidentiels Arbora A et B

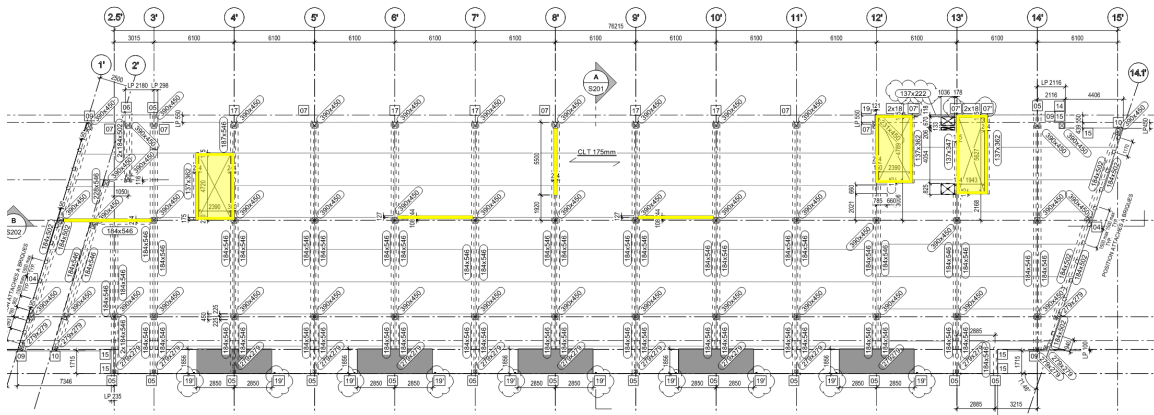
Lieu de réalisation : 290 et 305 Rue de la Montagne, Montréal, QC, H3C 2B2

2.2 Description du projet de construction

2.2.1 Description du bâtiment innovant ou de la solution innovante

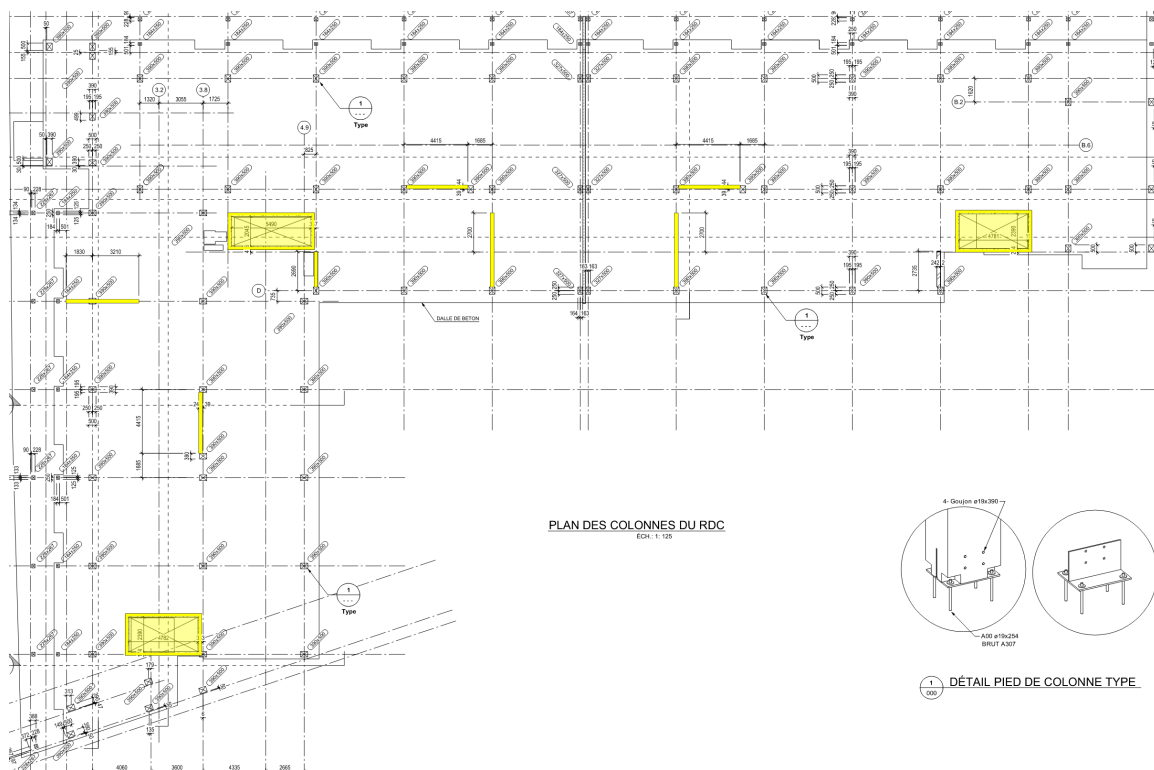
2.2.1.1 *Arbora A*

Le système de résistance aux charges latérales 100% en bois massif pour les étages 2 à 8 et 100% en béton pour les sous-sols et le rez-de-chaussée comprend les 14 murs de refend localisés comme suit :



2.2.1.1 *Arbora B*

Le système de résistance aux charges latérales à 100% en bois massif pour les étages 1 à 9 et à 100% en béton pour les sous-sols comprend les 10 murs de refend localisés comme suit :



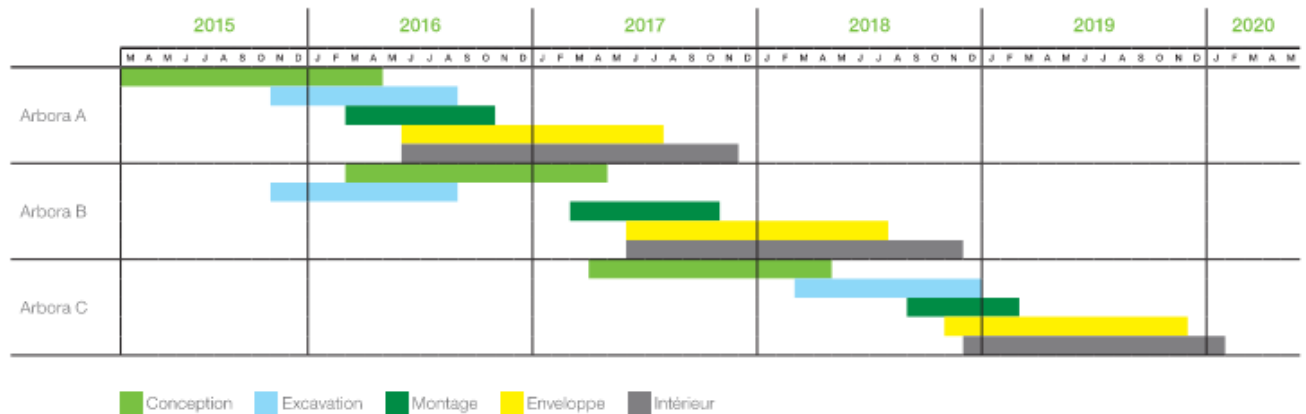
2.2.1.2 Descriptif Arbora A et B

Les deux bâtiments sont constitués de panneaux de CLT de 7 plis (244 mm) aux 2^{ème} et 3^{ème} niveaux et de panneaux de 5 plis (175 mm) à partir du 4^{ème} niveau. Plus précisément, la transition entre les deux épaisseurs de CLT se situe à 1,07 m au-dessus du plancher de CLT du 4^{ème} niveau. Il était en effet prévu, pour sécuriser le chantier, qu'une portion des panneaux de CLT dépasse des planchers afin de servir de garde-corps aux travailleurs pendant la construction. Les ingénieurs ont donc dû imaginer un système pour que le mur du 4^{ème} niveau ne présente pas de décrochage à 1 m du sol en raison de la transition entre les panneaux de CLT d'épaisseurs différentes. Le principe tire profit des deux configurations de panneaux de 7 plis existantes, soit la 7s et la 7l. Dans la configuration 7s, les plis sont tous alternés. Il est, par conséquent, possible de former un mur continu sur une face en positionnant un panneau de 5 plis sur un panneau 7s et en laissant 2 plis déborder du côté intérieur. Le mur présente donc un décrochement du côté de ces 2 plis, mais est continu de l'autre côté. On peut, cependant, supprimer le décrochement en usinant le panneau de 7 plis pour en retirer les 2 plis excédentaires jusqu'au plancher de CLT. C'est la solution adoptée pour les murs de refend des cages d'issue. Dans la configuration 7l, les plis extérieurs sont dans le même sens que le pli précédent. Pour assurer la continuité des plis de deux panneaux superposés, un panneau de 5 plis doit donc être positionné au centre du 7l en laissant un pli extérieur déborder de chaque côté. Le décrochement qui en résulterait sur les murs de chaque côté est alors supprimé par un usinage des plis extérieurs jusqu'au plancher. Les concepteurs ont opté pour cette solution pour les murs de refend situés dans les logements. Au 2^{ème} niveau, les panneaux de 7 plis sont retenus par des plaques d'ancrage prises dans le béton. Les panneaux sont reliés autant latéralement que

verticalement par des plaques d'acier clouées. À chaque étage, des ferrures de cisaillement relient les panneaux du mur de refend aux dalles du plancher.

2.2.2 Échéancier global et durée

Échéancier de construction des 3 phases d'Arbora



2.2.3 Budget global

Le budget pour la construction des deux édifices était de 94 millions.

2.2.4 Partenaires

Les différents partenaires ayant participé à la réalisation du projet sont :

- Sotramont
- LSR
- ALDO

2.2.5 Défis et risques généraux

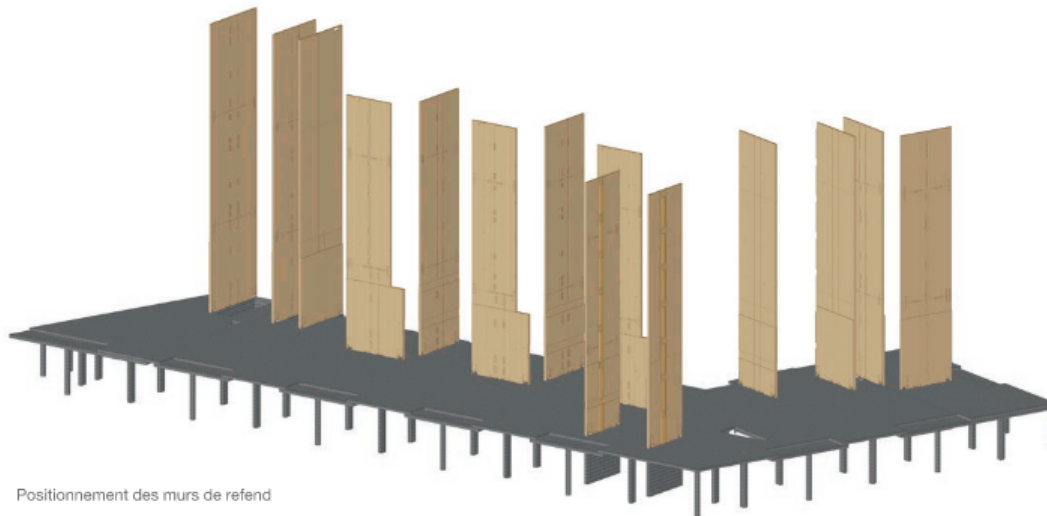
Le premier défi auquel nous avons dû faire face était la faible résistance sismique de la structure en bois. Nous avons donc dû augmenter le volume des composantes afin d'augmenter la résistance de l'immeuble et développer des solutions mixtes ou hybrides. Ensuite, nous avons aussi dû augmenter les délais de conception et de développement afin de pallier le manque d'équilibre entre la résistance du système en bois face aux séismes et l'élasticité face aux vents. De plus, le contexte d'une structure en force de L avec une masse excentré implique une analyse plus complexe des efforts latéraux.

3. Détails de l'étude

3.1 Introduction et hypothèses de départ

Cette étude présente les analyses de la performance latérales pour le bâtiment *Arbora A*, une construction mixte bois massif et béton, et *Arbora B*, une construction multi-étage avec géométrie irrégulière. Bien que ce phénomène, bois et béton et la géométrie irrégulière, aient des états de l'art bien documentés dans le béton, la réalité nord-américaine de la construction en bois massif est peu documentée et impose des exigences de performance multicritère. En effet, pour la performance latérale en bois massif, des informations provenant d'expériences européennes nous ont proposé des solutions efficaces.

Bien que des outils de calcul de performance soient utilisés pour le bois depuis des décennies, l'utilisation du CLT dans ce type de construction était entouré d'incertitude à cause du manque d'exemples canadiens. Des simulations numériques à l'aide logiciel tel que Etabs, ont permis de modéliser les différentes rigidités du CTL et les effets de l'excentricité. Un résumé de ces activités est présenté dans ce rapport.



3.2 Objectifs

- Nous avons deux objectifs, soit le développement d'un système de refend en CLT pour un système de construction mixte bois massif et béton et la démonstration de la faisabilité de l'analyse latérale pour une construction multi-étage avec géométrie irrégulière.

3.3 Méthodologie

Nous avons suivi les directives du CNBC 2005 afin d'obtenir des résultats conformes aux performances de celui-ci.

3.3.1 Analyse dynamique des structures

L'analyse dynamique itérative a été réalisée en étroite collaboration avec Nordic, fabricant du CLT. Plusieurs étapes et itérations ont été requises pour rendre le bâtiment conforme en termes de déplacement et de capacité.

1. Méthode dynamique – Analyse modale SRSS

En premier lieu, une analyse modale de la structure mixte bois et béton a été faite à l'aide de Etabs pour obtenir les modes fondamentaux du bâtiment selon la méthode SRSS. À partir de cette analyse préliminaire nous avons déterminé que les rigidités des assemblages et de du CTL en cisaillement avaient une influence majeure sur les résultats modaux.

2. Méthode enveloppe (Modèle flexible et modèle rigide)

Pour résoudre le problème modal et assurer la conformité et le confort du bâtiment nous avons effectué l'enveloppe des deux analyses suivantes :

- a. Modèle Rigide : Déterminer les forces dans la structure sous les sollicitations sismique et flèches

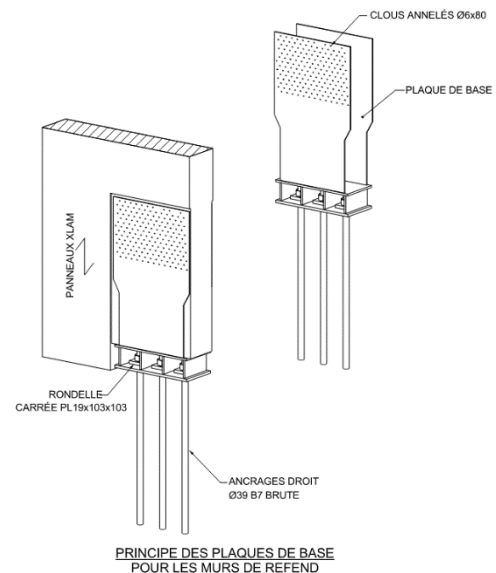
Ce modèle consiste en structure où les ancrages qui assemblent le CTL et le béton sont considérés parfaitement rigides ce qui nous permet d'obtenir l'effort maximal en séisme.

- b. Modèle flexible : Déterminer les flèches sous les charges de vent et sismique

Ce modèle consiste, en structure, à des ancrages qui permettent l'assemblage de CTL et de béton ont été modélisés avec un module de rigidité qui a été calculé par élément fini, ce qui nous permet d'obtenir le déplacement maximal en séisme et en vent. Nous avons pu connaître l'influence P-Delta de la structure.

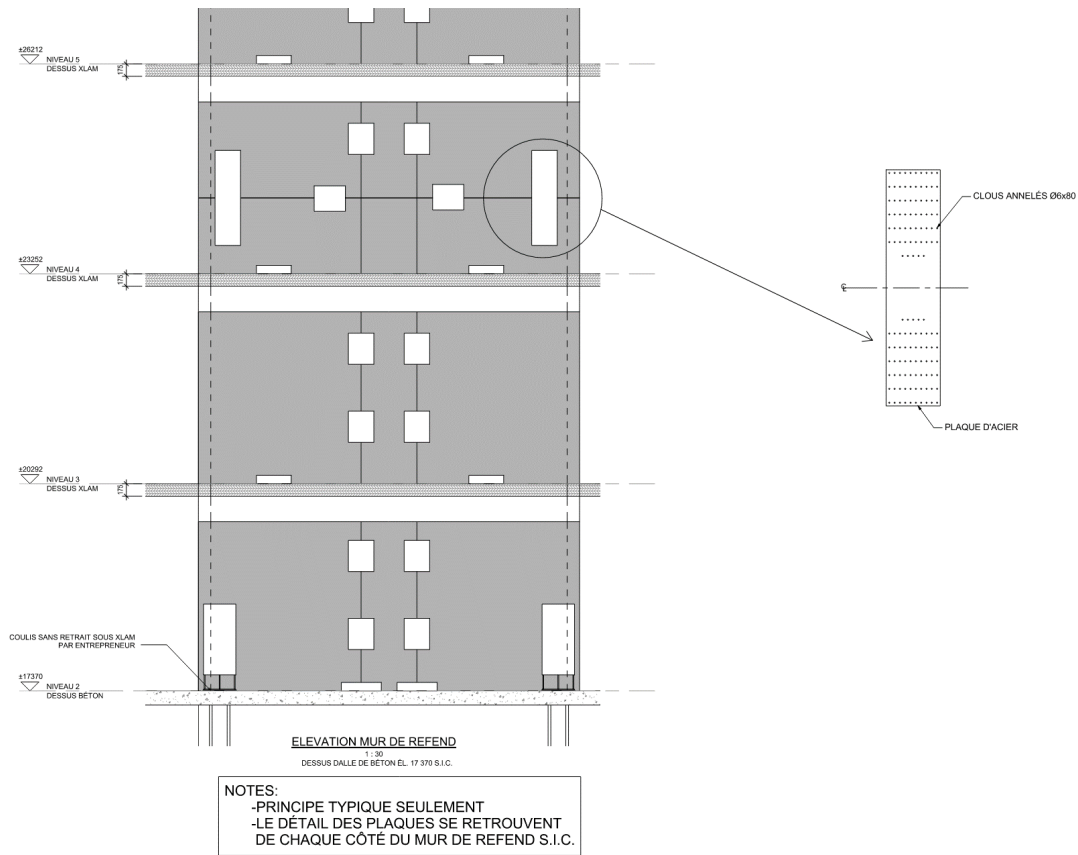
3. Évaluation de l'impact des connexions des murs de CLT aux extrémités pour évaluer l'impact sur les effets sur le système global et interaction CLT / béton

À partir de nos modélisations nous avons quantifié l'impact des assemblages acier-bois-béton qui ont augmenté les efforts dans nos diaphragmes autant pour la structure de bois et de béton. Leur effet s'est surtout fait ressentir au niveau des déplacements de la structure de bois qui ont dû être contrôlés pour limiter le décalage inter-étage qui assure le confort des occupants et la protection des finis.



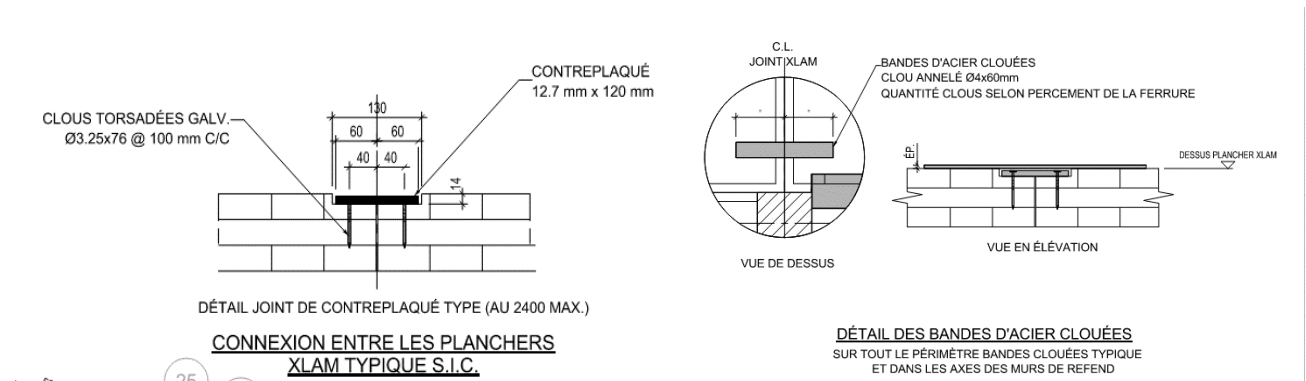
4. Évaluation des effets p-delta de la structure et impact sur les forces globales de la structure

À partir des déplacements, prenant en compte les efforts sismiques et de vent, nous avons protégé nos éléments contre l'instabilité des déplacements en rigidifiant les assemblages acier-bois et acier-béton-bois.

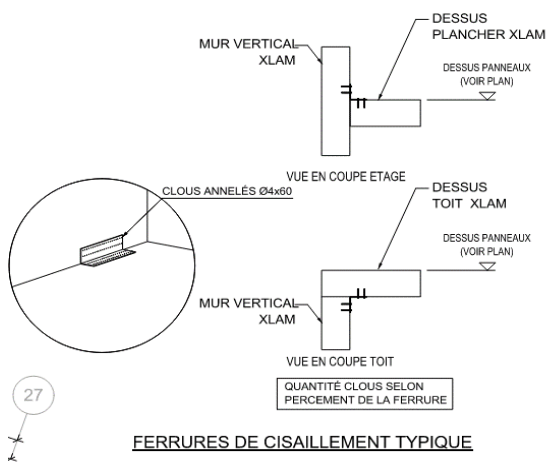


- Facteur de sur-résistance appliqué sur les éléments qui devaient être protégés et qui ne participait pas à la dissipation d'énergie dans la structure.

Pour s'assurer de développer de la ductilité dans le bois massif et dans l'armature de béton nous avons évalué les valeurs de sur-résistance des assemblages d'acier travaillant en tractation et la



plastification de l'armature dont le but est de dissiper de l'énergie.



Nous avons donc modulé à la hausse la résistance des ferrures travaillant en cisaillement et des diaphragmes. Les diaphragmes ont des éléments collecteurs conçus avec un contreplaqué qui permet de joindre les CLT pour les efforts de cisaillement et des plaques d'acier qui sont nécessaires pour transférer les efforts de traction dû à la flexion du diaphragme.

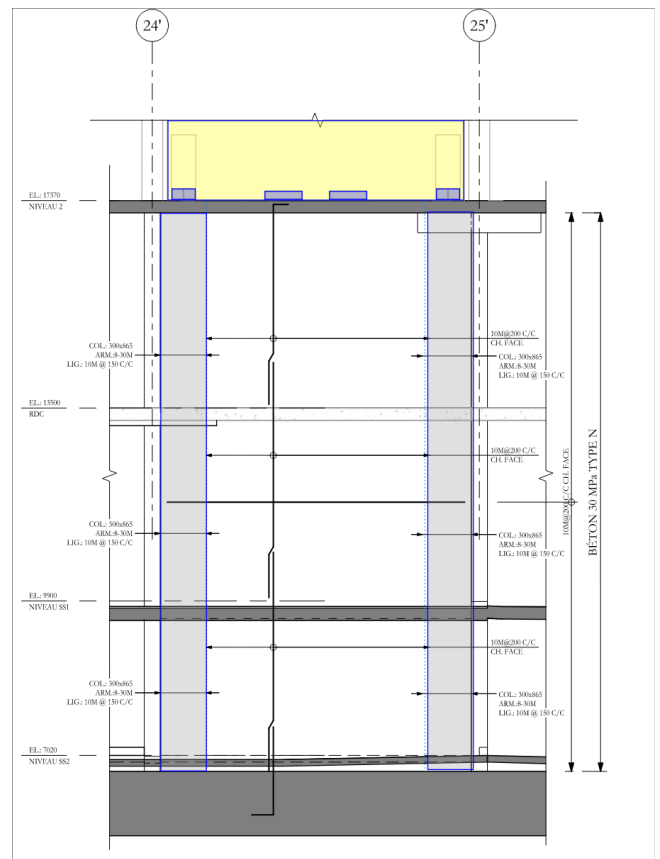
Des ferrures supplémentaires sont requises entre les murs de refend en CLT et les planchers de CLT pour solliciter la masse vers le système de reprise des charges latérales.

6. Analyse de la structure de bois seule et sur le podium de béton pour voir l'impact de la rigidité de la structure de béton sur la rigidité globale

La structure de bois a été analysé comme si elle était directement posée sur une structure podium beaucoup plus rigide. Ce test a permis de valider que les refend du podium participent à la flexibilité de la structure donc à sa période fondamentale et sa ductilité. Nous avons donc pu isoler la période fondamentale de la structure de bois pour valider le confort sous les charges de vents.

7. Interaction ancrage mur CLT avec structure de béton et armature

Finalement, la jonction entre le CTL et le béton a été modélisé comme un élément ressort avec une rigidité en traction équivalente. Des colonnes d'armatures et d'étriers confinent les ancrages de la jonction dans le béton. Ce détail permet d'assurer le développement des ancrages de manière à ce que les efforts se rendent jusqu'aux fondations.

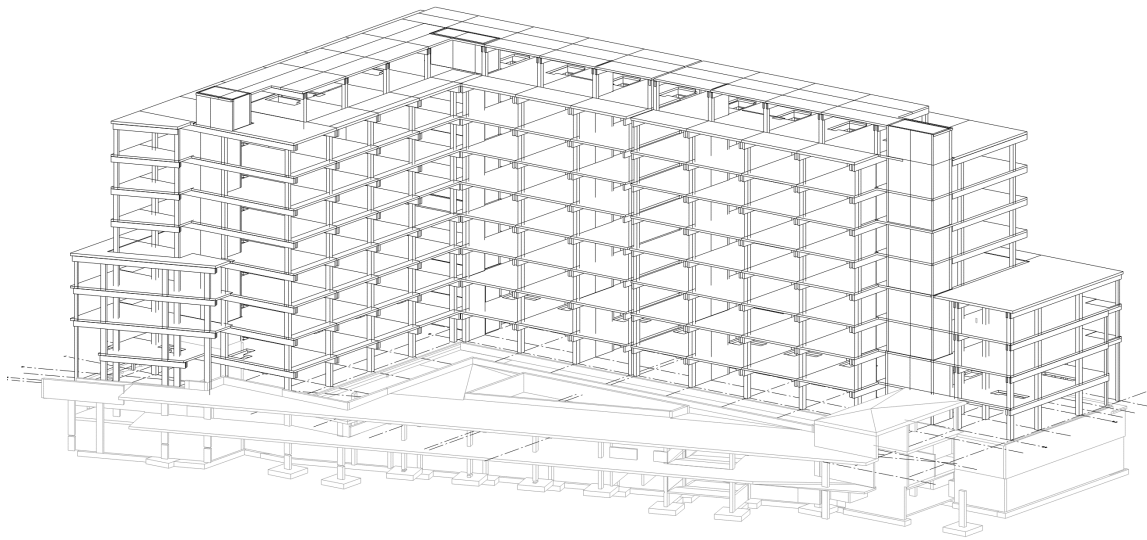
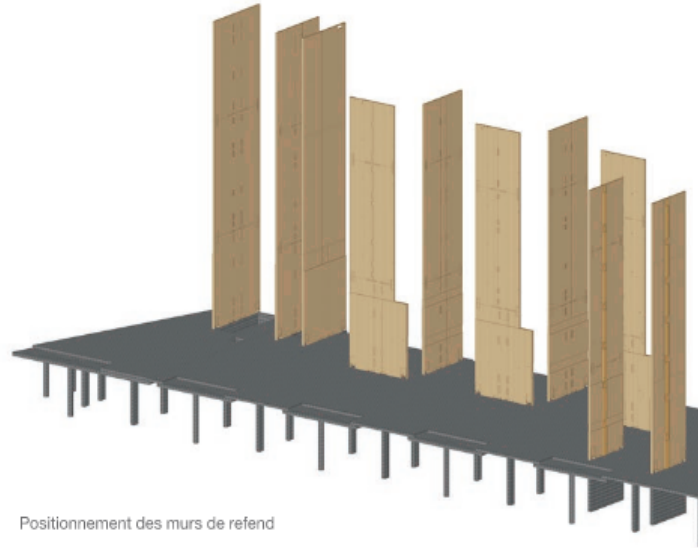


3.4 Résultats et analyse

Afin de surpasser les obstacles causés par le manque de prescription au code canadien sur les solutions aux systèmes latéraux, nous avons utilisé les codes suisses SIA pour démontrer la ductilité des assemblages.

De concert avec le fabricant Nordic, nous avons réalisé des simulations électroniques en faisant des itérations qui ont démontrées l'influence de chacun des morceaux tel que le CLT, les ancrages en tractions, les ancrages en cisaillement et les liens du diaphragme.

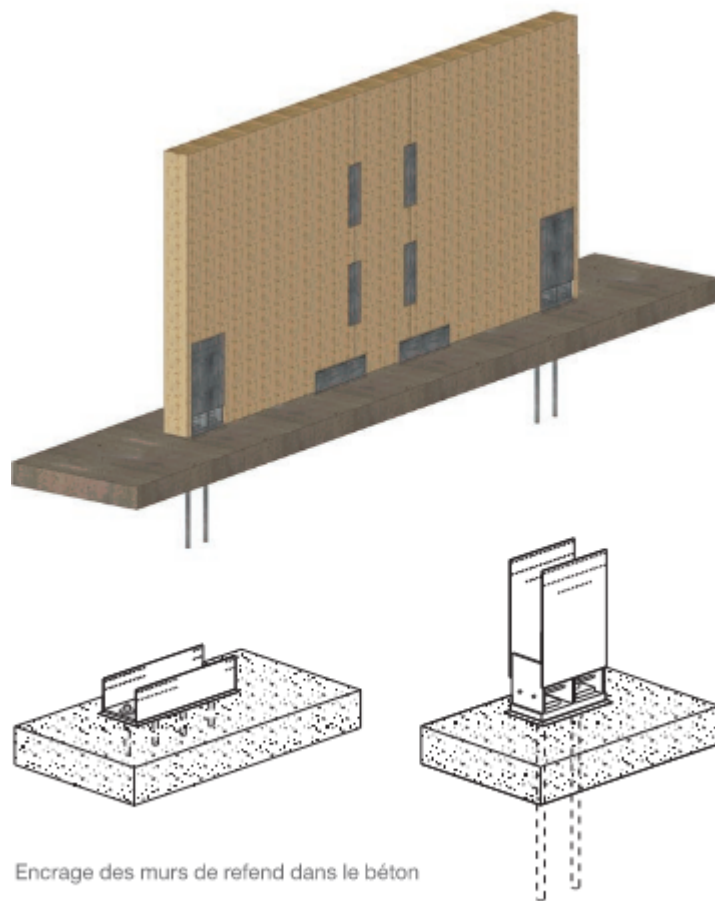
Pour conclure, les systèmes de refend en CLT pour un système de construction mixte et pour un système de construction multi-étage avec géométrie irrégulière atteint des valeurs de sécurité nécessaires pour rencontrer les prescriptions du code national du bâtiment.



3.5 Conclusions

- Au cours de la conception, nous avons compris la dynamique d'une structure de bois massif sur un podium en béton.
- L'exercice de démonstration a aussi permis de comprendre le dynamique d'une structure de bois massif avec un centre de rigidité et un centre de masse grandement excentré.

- Même si le code canadien n'a aucun prescrit de ductilité pour le bois massif, les tests d'assemblages du code SIA de la Suisse ont permis de combiner une ductile de $R_d : 2$ pour le béton et le bois.
- Les tests de Nordic sur le décalage en cisaillement ont permis d'obtenir les valeurs numériques pour la conception d'un modèle analytique réaliste.
- Notre assemblage des murs de bois massif et de béton ont atteint les prescriptions de protection du publique requis par le CNBC.
- Nous pouvons donc faire des formes créatives et excentriques en structure sans compromettre la performance latérale d'un bâtiment en bois massif.



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

Nous avons constaté de nombreuses retombées et opportunités de rayonnement pour les systèmes de refend en CLT :

- Documentation montrant la résistance en cisaillement d'un mur refend en CLT;
- Démonstration de l'influence du déplacement sur le décalage en cisaillement des panneaux;
- Démonstration que le flux de cisaillement n'est pas cumulatif dans les assemblages de panneaux mais unique aux valeurs différentielles de moment et de cisaillement;
- Démonstration que pour un bâtiment de 8 étages le vent contrôle les déplacements tandis que le séisme domine les efforts;
- Démonstration qu'un podium en béton permet aussi de développer une ductilité dans les deux systèmes.



3.7 Recommandations

- Étudier une solution hybride avec l'ascenseur en béton et les autres murs en CLT;
- Étudier une solution de décalage du système latérale comme il est possible de le faire en béton ou en acier;
- Évaluer la contribution en ductilité et en rigidité des assemblages poteau-poutre en bois massif dans le comportement de service (vent) et ultime (séisme);
- Étudier et tester des nouveaux types d'assemblages qui pourraient permettre d'obtenir le Rd :3.5.

4. Bibliographie

- CSA A23.3 – Calcul des ouvrages en béton
- CSA S16 – Règles de calcul des charpentes en acier
- CSA 086 - Règles de calcul des charpentes en bois
- CTL manuel
- Nordic structure
- SIA 265 Construction en bois - Spécifications complémentaires

5. Annexes

Aucune annexe