

Une connexion pour des murs totalement préfabriqués afin
d'améliorer l'efficacité énergétique et la vitesse
d'assemblage sur chantier des bâtiments

Projet SOKIO

Préparé par

Étienne Julien, Chargé de projet



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

31 mars 2022

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "E. Julien", positioned above a horizontal line.

Étienne Julien

Auteur

Chargé de projet –
Oikos Construction

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "P. Blanchet", positioned above a horizontal line.

Pierre Blanchet

Réviseur

Professeur titulaire –
Titulaire du CIRCERB

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "P.-Y. Charest", positioned above a horizontal line.

Pierre-Yves Charest

Approbateur

Président – Directeur
général Oikos
Construction

Avis de non-responsabilité

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

Table des matières

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude	1
2. Introduction.....	2
2.1 Titre et lieu de réalisation du projet de construction.....	2
2.2 Description du projet de construction.....	2
2.2.1 Description du bâtiment innovant ou de la solution innovante.....	3
2.2.2 Échéancier global et durée.....	4
2.2.3 Budget global	5
2.2.4 Partenaires.....	5
2.2.5 Défis et risques généraux.....	6
3. Détails de l'étude	8
3.1 Introduction et hypothèses de départ.....	8
3.2 Objectifs.....	10
3.3 Méthodologie	10
3.3.1 L'étanchéité à l'air	10
3.3.2 Étude temps-mouvement	11
3.4 Résultats et analyse	12
3.4.1 Étanchéité à l'air.....	12
3.4.2 Étude temps-mouvement	16
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
5. Annexes	24

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude

Le projet SOKIO présenté dans le cadre du Programme de vitrine technologique pour les bâtiments et les solutions innovantes en bois était un prototype résidentiel unifamilial bâti à Beupré. La construction de 116 mètres de superficie a été assemblée à l'aide de murs et des caissons de toiture totalement préfabriqués. On mentionne totalement préfabriqué puisque ces murs comportent les fenêtres, les portes et le revêtement extérieur. Ces murs et caissons de toiture proviennent d'une technique de préfabrication fermée où ces éléments sont complètement isolés et étanches.

L'objectif de cette étude était de caractériser les performances en termes d'étanchéité à l'air et de rapidité sur chantier de la solution innovante. Des essais d'infiltrométrie ont été réalisés suivant la construction et 4 mois après la mise en service du bâtiment. Une étude temps-mouvement a également été effectuée permettant de comparer l'efficacité sur chantier d'une construction utilisant des murs préfabriqués conventionnels à l'efficacité du projet SOKIO.

Les performances en étanchéité à l'air de la solution innovante développée sont dans les cibles des normes les plus exigeantes en termes de comportement écoénergétique au Canada. Le projet Mistra, utilisant des murs préfabriqués conventionnels, s'est assemblé 2,5 fois plus rapidement que le projet SOKIO. Des pistes d'amélioration sont possibles pour améliorer ce rendement. Néanmoins, cette différence d'efficacité s'explique en grande partie par l'accessibilité à la structure des panneaux préfabriqués conventionnels de type ouvert. Cette distinction se veut l'essence même de la solution innovante développée qui, malgré une efficacité sur chantier déficiente, peut présenter des réductions de temps et de coût importantes sur l'ensemble d'un projet de construction.

La construction du projet SOKIO se veut un succès pour la première mise en chantier d'un tel système préfabriqué. Malgré des installations artisanales, l'entreprise Oikos Construction a pu développer à l'interne et avec ses partenaires des connaissances qui permettent de transporter, lever et adapter le système pour de futurs projets maximisant l'utilisation du bois.

2. Introduction

2.1 Titre et lieu de réalisation du projet de construction

Le projet SOKIO de l'entreprise Oikos Construction a été fabriqué au sein de l'entrepôt de l'entreprise au 580 Marius-Fortier à Québec et s'est assemblé sur chantier au 45 rue de l'Anse à Beauré.

2.2 Description du projet de construction

Le projet de construction a été un bâtiment résidentiel unifamilial développé à l'aide de la solution innovante de murs préfabriqués ici présentés. Le projet a été pensé avec certaines particularités pour surmonter rapidement des défis de conception associés à la géométrie des bâtiments. Bâti sur une fondation de béton conventionnelle, la construction de 116 mètres de superficie par étage a été complètement préfabriquée avec des murs et des caissons de toiture conceptualisés par Oikos Construction. Montée sur deux étages avec un plafond cathédrale, la structure du bâtiment est en ossature bois. Comme ces panneaux et caissons sont issus d'une méthode de préfabrication fermée, il est alors impossible de clouer les murs d'un étage à un autre de manière conventionnelle. C'est en ce sens que la structure du bâtiment a été gérée en collaboration avec l'entreprise Groupe Genius.



Figure 1 – Le chantier du projet SOKIO

2.2.1 Description du bâtiment innovant ou de la solution innovante

La solution innovante consiste en un système constructif de murs totalement préfabriqués qui se scellent automatiquement sur chantier. On mentionne totalement préfabriqué puisque ces murs comportent les fenêtres, les portes et le revêtement extérieur. Ces murs se caractérisent par un usinage atypique de la lisse et de la sablière en bois d'ingénierie (LSL) combiné à des matériaux de scellement fixés au pourtour des murs. Cette conception permet un enchevêtrement rapide des panneaux préfabriqués sur chantier en plus de sceller automatiquement les membranes pare-vapeur et pare-intempérie. De cette manière, le système permet une industrialisation plus complète des murs à ossature bois tout en permettant un processus de contrôle qualité intégré, et ce, de l'usine jusqu'à la livraison du bâtiment. Ce principe peut représenter un coût de fabrication moindre, une performance énergétique des bâtiments accrue, une capacité d'exportation améliorée et une utilisation plus importante des systèmes préfabriqués en bois dans la construction non résidentielle et multifamiliale. D'ailleurs, suivant la mise en œuvre réussie du prototype résidentiel, ce système a également été développé structuralement pour permettre son intégration au sein de bâtiments multiétagés.



Figure 2 - Les murs totalement préfabriqués du projet SOKIO

Aussi développés au sein de ce projet, des caissons de toiture totalement préfabriqués ont permis de rendre la solution innovante complète sur l'ensemble du bâtiment, et ce, sans pour autant complexifier le transport des composantes. Dans le contexte du projet SOKIO, les caissons de toiture étaient des panneaux isolés, étanches et arborant le revêtement métallique. Ces panneaux étaient disposés selon une pente de toiture de type 12/12, soit avec un angle de 45 degrés. Encore une fois, les panneaux, composés structuralement de poutrelles de toiture, ont été conceptualisés de manière à permettre un enchevêtrement rapide des caissons sur les murs de l'étage. Ces caissons étaient également fabriqués pour être en mesure de sceller automatiquement les membranes pare-vapeur et pare-intempérie.



Figure 3 – Un des caissons de toiture totalement préfabriqués du projet SOKIO

La réalisation de cette solution innovante n'a pas seulement permis de développer un système constructif complet pour la préfabrication en ossature bois, mais a également permis de développer des connaissances complémentaires qui propulsent l'entreprise à poursuivre le développement de cette technologie. En autres, ce projet a obligé l'entreprise à se débrouiller dans un environnement de fabrication temporaire qui a néanmoins suscité des réflexions quant aux principes industriels pour la fabrication des panneaux muraux et des caissons de toiture totalement préfabriqués. Pour permettre la réalisation du projet SOKIO, OIKOS Construction a notamment développé son propre système de transport et un système de levage des composantes préfabriquées efficace et sécuritaire.

2.2.2 Échéancier global et durée

Le projet ici présenté est l'aboutissement d'une idée qui remonte à 2016 du président et directeur général d'Oikos Construction, M. Pierre-Yves Charest. À ce moment, l'entreprise démarre un processus de brevetabilité de la technologie qu'elle poursuit d'ailleurs encore à ce jour. C'est par contre à l'hiver 2020 que l'idée s'est réellement matérialisée, et ce, avec la collaboration de la Chaire industrielle de recherche sur la construction écoresponsable en bois (CIRCERB). À ce moment, l'entreprise désire aller de l'avant avec la mise en chantier de ces murs préfabriqués et les premiers plans architecturaux émergent. De ces plans, les principaux prototypes du système ont été conçus et finalisés à l'automne 2020. Après la validation de la faisabilité technique du projet, c'est à l'hiver suivant, soit en janvier 2021, que l'entrepôt chez Oikos Construction devient temporairement l'atelier du projet SOKIO. On peut d'ailleurs voir au Tableau 1 l'avancement du projet SOKIO jusqu'à sa mise en chantier.

Tableau 1 – Échéancier globale du projet SOKIO

	Août-20	Sept-20	Oct-20	Nov-20	Déc-20	Janv-21	Févr-21	Mars-21	Avr-21	Mai-21	Juin-21
Prototype											
Terrain & Fondation											
Table de montage											
Ossature panneaux muraux											
Revêtement & fenêtre panneaux muraux											
Caissons de toiture											
Érection du 1er étage											
Érection du 2e étage											
Érection des pignons et de la toiture											
Etude temps-mouvement / Infiltrométrie											
Poursuite du processus de brevetabilité											

2.2.3 Budget global

Le tableau 2 présenté plus bas se veut la somme des montants injectés dans le projet SOKIO par les différentes parties prenantes. Bien sûr, les montants associés à l'entreprise Oikos Construction sont les montants associés à l'ensemble de la construction du bâtiment unifamiliale de même que les dépenses en recherche et développement pour permettre les conceptions des prototypes. Ces dépenses incluent donc l'ensemble des dépenses qu'elles soient admissibles ou non. Ces montants sont raffinés dans le tableau des dépenses admissibles prévu par le Programme.

Tableau 2 - Budget global du projet SOKIO

Partenaire	Montant	% de participation
MFFP - Programme vitrine technologique	200 000,00 \$	19,3%
OIKOS Construction	758 832,04 \$	73,4%
SHQ - Programme PADIQH	44 978,00 \$	4,4%
CIRCERB	5 000,00 \$	0,5%
MEI - Programme Premier Brevet	25 000,00 \$	2,4%
Total	1 033 810,04 \$	

2.2.4 Partenaires

Naturellement, les partenaires que l'on peut apercevoir au sein du tableau 2 à la section précédente ont tous eu un impact direct sur la réalisation du projet SOKIO. Mentionné plus tôt, le CIRCERB a été un réel catalyseur pour permettre la mise en chantier du projet. C'est d'ailleurs grâce au CIRCERB que l'entreprise a pu intégrer le Programme de vitrine technologique du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Également complémentaire au partenariat avec le CIRCERB, la SHQ et son programme PADIQH ont permis à l'entreprise d'instrumenter le bâtiment prototype

unifamilial à l'aide de capteurs de température, d'humidité et de déplacement. Ces données seront récoltées au fil des mois et même des années pour permettre un suivi continu des performances du bâtiment. Ces données ne sont pas sujettes à l'étude ici présentée, mais seront dans le futur des données utiles à la recherche et à l'amélioration continue du projet. Présent également au tableau 2 présenté plus haut, le MEI et son programme de Premier Brevet ont servi en amont à l'entreprise à débiter un processus de brevetabilité que l'entreprise poursuit toujours à ce jour.

Étant des sous-traitants contractuels au projet SOKIO, certaines entreprises ont aussi joué un rôle clé pour le succès de ce dernier. Abordées plus haut, l'ensemble des analyses structurales ont été réalisées par l'entreprise Groupe Genius. Avec leur collaboration, la technologie SOKIO a la capacité de s'adapter à différents types de structures et peut également être introduite dans des bâtiments multiétagés. Finalement, Oikos Construction a aussi pu compter sur la collaboration de l'entreprise Métotech pour la réalisation d'un système de transport adapté aux systèmes de murs préfabriqués. Cette réalisation a permis de mettre à l'essai de brillante façon les premiers transports de murs totalement préfabriqués.



Figure 4 - Système de levage et de transport des murs totalement préfabriqués

2.2.5 Défis et risques généraux

Différents défis et types de risques peuvent découler de l'élaboration d'une solution innovante comme celle développée par l'entreprise Oikos Construction. Du côté technique, force est d'admettre qu'il est important de consacrer beaucoup de temps pour acquérir une expertise suffisante au développement d'une nouvelle technologie. C'est en ce sens que Pierre-Yves Charest a dédié de nombreuses heures à la réflexion des problématiques et des solutions du projet. Abordée

dans l'étude technique de ce rapport, l'efficacité énergétique d'un bâtiment construit avec des murs totalement préfabriqués dépend beaucoup de la connexion développée en amont pour sceller les membranes de l'enveloppe du bâtiment efficacement. M. Charest a travaillé donc à développer cette expertise et a également cherché le soutien du CIRCERB pour approfondir cette expertise. Pour assurer l'efficacité des connexions, des essais ont été élaborés suite à la construction et des correctifs pouvaient être apportés si le système ne fonctionnait pas adéquatement.

Aussi, le système de murs et de caissons de toiture préfabriqués a demandé une précision accrue vis-à-vis ce qui est actuellement réalisé dans l'industrie de la préfabrication en bois. Cette nécessité à être davantage précis découle en partie de la mise en place du revêtement extérieur en atelier. De toutes les étapes du projet qui ont été intégrées au sein de l'atelier de fabrication, elle représente la plus difficile à industrialiser. En fait, l'action de réaliser le revêtement extérieur, du lambris de cèdre dans le cas de ce projet, en usine n'est pas concrètement difficile, mais la capacité d'anticiper l'assemblage sur chantier représente un défi. C'est d'ailleurs pourquoi un des prototypes fabriqués a servi à l'intégration et à la mise en place d'un système de mesures précises pour permettre la continuité esthétique du revêtement extérieur d'un panneau préfabriqué à un autre. Cette précision a été possible en outillant l'équipe de travail avec des instruments de mesure permettant de valider adéquatement le tolérancement dimensionnel requis.

Le transport des éléments préfabriqués est également un défi important pour assurer de livrer les composantes préfabriquées telles qu'elles ont été conçues. Avec les fenêtres, les portes et le revêtement extérieur, le transport devait être pensé autrement de ce qui est réalisé dans l'industrie actuelle où les murs sont couchés, empilés les uns sur les autres. C'est avec une bonne revue de ce qui se faisait ailleurs dans le monde, spécialement du côté européen, qu'il a été possible de schématiser des systèmes de transport adaptés aux besoins du projet. Les différentes modélisations et dessins techniques ont ensuite permis à Oikos Construction de collaborer avec un de ses sous-traitants, soit Métotech. Avec leur expertise et la connaissance des enjeux vis-à-vis le transport, il a été possible de générer une solution qui a permis de transporter les murs d'une manière à protéger le revêtement extérieur, les portes et les fenêtres.

Les enjeux réglementaires vis-à-vis l'assemblage atypique des composantes préfabriquées étaient bien réels. Pour adhérer au Code de Construction du Québec avec un système d'emboîtement de composantes fermées (inaccessible pour le clouage conventionnel), il était nécessaire d'établir une stratégie structurale adéquate et validée en ingénierie. Bien qu'une stratégie unique pour ce projet aurait pu être établie et être relativement simple, Oikos Construction trouvait important de pouvoir générer une solution structurale qui était adaptée au projet, mais qui pouvait également être adaptée à des bâtiments multiétagés. Avec l'aide de l'entreprise Groupe Genius, Oikos Construction a pu obtenir un système structural bien accessible vis-à-vis des fournisseurs connus (par exemple Simpson Strong-Tie) qui répond au défi réglementaire, et ce, pour une multitude de projets futurs.

Finalement, la mise en place du revêtement extérieur, des portes et des fenêtres en amont au sein de l'atelier d'assemblage induit une certaine rigidité aux composantes totalement préfabriquées. Cette rigidité combinée à l'impossibilité d'avoir accès à l'intérieur des murs minimise la possibilité d'intervention sur chantier et rehausse l'importance du travail de conception en amont. La modélisation du bâtiment en amont permet en outre de prévoir adéquatement les dimensions des composantes totalement préfabriquées et de prévoir des connexions flexibles pour faciliter

l'assemblage sur chantier. Il reste que le risque de devoir modifier un mur sur chantier était toujours possible. Cette possibilité était bien réelle et représentait également un risque financier pour l'entreprise. Tout de même, l'utilisation d'outils de précision comme stipulé plus haut tout en intégrant du bois d'ingénierie aux systèmes constructifs a permis d'être exactement dans le tolérancement dimensionnel que permettent les connexions entre les composantes totalement préfabriqués. De plus, comme ce système est dérivé du modèle conventionnel de construction à ossature bois, il demeure que les ouvriers continuent de travailler dans un système leur étant connu et leur permettant d'être à l'aise avec les nouvelles technicités du projet.

3. Détails de l'étude

- À noter que cette étude reprend des sections d'un prochain article scientifique réalisé par Étienne Julien avec le CIRCERB. Toutes divulgations de l'étude ici présentée sont à proscrire avant la publication de l'article officiel.

3.1 Introduction et hypothèses de départ

La consommation énergétique lors de la phase d'exploitation d'un bâtiment est un des plus importants facteurs contributeur aux changements climatiques du secteur de la construction [1]–[4]. En développant et en adoptant des systèmes d'enveloppe du bâtiment performantes, il est possible de réduire la demande en chauffage et en climatisation [4]–[7], représentant toujours 66% de l'énergie totale utilisée par les bâtiments résidentiels canadiens en 2018 [8]. Au sein des climats froids, il semble extrêmement difficile de concevoir un bâtiment écoénergétique sans pouvoir compter sur une enveloppe du bâtiment performante thermiquement et étanche.

Les méthodes constructives optimisant la performance de l'enveloppe du bâtiment doivent par contre s'inscrire dans l'ensemble des considérations qui encadrent l'industrie de la construction. La demande pour diminuer les délais de fabrication, de construction et de livraison est réelle et doit aussi compter lors de l'élaboration des méthodes constructives innovantes. De ces méthodes, la préfabrication est d'ailleurs un moyen de construire pouvant significativement accélérer le processus, diminuer les coûts et assurer une qualité d'exécution [9]–[14].

Dans le contexte nord-américain, l'ossature légère en bois est une technique constructive flexible et bien documentée qui s'apprête bien aux principes de préfabrication. Issue d'un matériau renouvelable, la construction à ossature bois représente la technique constructive en bois la plus répandue en Amérique du Nord [15]. Réalisés en usine avant d'être assemblés sur chantier, les systèmes préfabriqués en ossature bois comme les murs à colombage, les poutrelles de plancher et les fermes légères de toit proposent un ensemble de caractéristiques intéressantes tant au niveau de la qualité, que des coûts et de la rapidité d'exécution. Comme ces éléments sont réalisés en amont, à l'abri des intempéries et conceptualisés sur logiciel, une grande précision peut être induite au projet en utilisant des équipements performants, mais également en impliquant les différentes parties prenantes dès la planification du projet. Le travail en industrie peut aussi permettre d'impliquer des processus d'assurance qualité visant à améliorer les assemblages [12], [16].

Dans le contexte québécois, la préfabrication en ossature bois peut générer des solutions en panneau ou des solutions modulaires. Malheureusement, les murs préfabriqués en ossature bois, soit les solutions en panneau, n'incluent majoritairement pas les fenêtres, les portes et le revêtement extérieur. Cette réalité crée une distinction importante entre le contrôle qualité que peut bénéficier les murs préfabriqués vis-à-vis les ouvrages modulaires.

C'est donc dire que même si les plans de protection de l'enveloppe du bâtiment des murs préfabriqués sont partiellement complétés (pare-vapeur et pare-intempérie), ces mêmes plans de protection, essentiels à la performance énergétique, peuvent toujours être altérés une fois sur chantier par des erreurs non désirées [17]. Comme une importante proportion des défauts d'un bâtiment proviennent du travail réalisé sur chantier, il est donc primordial de revoir les méthodes de design, de construction et de supervision [18].

Il est en fait important de pouvoir corriger ces erreurs non désirées sur chantier puisqu'à elles seules, ces erreurs peuvent générer une sous-performance de l'enveloppe via les ponts thermiques, la discontinuité de la barrière thermique et les infiltrations d'air [19]. De ces facteurs, les fuites d'air peuvent être responsables d'approximativement 30 [20] jusqu'à 50% [21] des pertes thermiques d'un bâtiment. De plus, les fuites d'air peuvent aussi jouer un rôle important dans le confort des occupants d'un bâtiment comme elles impactent la performance hygrothermique, la qualité de l'air et la performance des équipements de ventilation [20], [22]–[24].

La pratique semble démontrée que bien que l'on se concentre sur des matériaux pare-air, on remarque sur chantier des défauts inattendus affectant l'étanchéité à l'air de l'ensemble du bâtiment [18], [21], [24]. Ce constat est frappant considérant notre capacité à développer des systèmes et des bâtiments très étanches. Effectivement, en développant des essais et des protocoles d'inspections appropriés, il est possible de présenter d'excellentes performances en étanchéité [24], [25]. C'est d'ailleurs ce qu'ont démontré les nouveaux bâtiments du USACE avec leur taux de fuite moyen de 0,9 L/s·m² @ 75 Pa pour l'ensemble du bâtiment [26]. Le contexte industrialisé des structures préfabriquées favorise d'ailleurs l'intégration de suivis plus restrictifs telle que ceux développés par l'USACE [12], [25], [26]. C'est d'autant plus vrai pour les structures modulaires qui sont complétées à 90% et peuvent compter sur un environnement contrôlé pour la réalisation totale des détails d'étanchéité plus complexe [9], [27].

Les murs totalement préfabriqués en bois (MTPB) incluant le revêtement, les portes et les fenêtres sont une méthode de fabrication qui permet aux panneaux structuraux fermés de maximiser les avantages du contrôle de la qualité de la construction modulaire tout en simplifiant le transport et la machinerie sur chantier [10], [14]. Avec une performance accrue de l'enveloppe et des détails d'étanchéité sur la surface des MTPBs, l'importance de la jonction entre les panneaux devient alors un enjeu crucial pour la performance de l'enveloppe sur l'ensemble du bâtiment [22], [28]–[30].

Comme les MTPBs restreignent l'accès aux jonctions interpanneaux, il semble préférable de pouvoir générer un mécanisme en amont complétant la jonction automatiquement sur chantier. Certaines études portant sur ce genre de mécanisme se sont concentrées sur la fonctionnalité [29] et l'étanchéité aux intempéries [30]. Toutefois, dans un contexte de climats froids et d'accélération d'assemblage sur chantier, les connexions développées doivent tenir compte d'une multitude de critères [31]. Pour assurer l'intégralité de l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment, l'utilisation des MTPBs doit donc se faire en utilisant des jonctions étanches et disposées à gérer efficacement

l'humidité. Enfin, cette jonction doit également pouvoir répondre aux demandes de rapidité de l'industrie en permettant un assemblage rapide et aisé sur chantier.

3.2 Objectifs

Les objectifs cités du plan de projet à l'introduction du Programme de vitrine technologique ont toujours guidé l'entreprise dans la réalisation du projet SOKIO.

1	Développer un nouveau système utilisant le matériau bois en construction préfabriqué
2	Diminuer le temps de construction et augmenter l'efficacité en chantier
3	Diminuer les coûts tout en améliorant la performance de l'enveloppe du bâtiment

Figure 5 - Liste des objectifs visés par l'innovation lors de la soumission du Plan de Projet

Par la mise en chantier et la réalisation du bâtiment résidentiel unifamilial, l'entreprise a prouvé avoir été capable de développer efficacement le nouveau système préfabriqué dans son ensemble. L'entreprise ne se cache pas qu'elle a toujours poursuivi la cible d'être en mesure d'offrir un système améliorant l'efficacité sur chantier et la performance de l'enveloppe du bâtiment.

Découlant de l'introduction, jouant le rôle de revue de littérature, l'objectif de l'étude présentée ici était de concevoir et de caractériser un assemblage mécanique pour les murs totalement préfabriqués en ossature bois qui permet d'atteindre de hauts standards de performance énergétique et d'accélérer la construction sur site. Comme une étude plus complète sera publiée ultérieurement par le CIRCERB, les prochaines sections se concentreront sur la caractérisation du système vis-à-vis ses performances en termes d'étanchéité à l'air et de rapidité sur chantier.

3.3 Méthodologie

3.3.1 L'étanchéité à l'air

Pour caractériser de manière adéquate l'étanchéité à l'air du projet SOKIO, un essai normalisé a été réalisé suivant la norme ASTM E779 : *Standard test Methode for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization* [23]. Cet essai manuel a été possible avec l'équipement de la compagnie *Retrotec Model 6000* avec une précision de $\pm 5\%$ ou 0,25 Pa (la plus importante mesure des deux) sur la mesure. Deux essais de dépressurisation ont été réalisés suite à la construction du projet SOKIO : un essai suivant l'étanchéisation du bâtiment en juillet 2021 et un essai au mois d'octobre 2021, soit 4 mois après avoir complété l'assemblage de l'ensemble des composantes préfabriquées. Lors de l'essai, l'ensemble des fenêtres, portes, conduits de ventilation et foyer ont été scellés pour permettre de valider l'étanchéité des éléments préfabriqués. L'essai respectait également la condition sous laquelle :

$$\Delta T (^{\circ}\text{C}) \cdot \text{Hauteur du bâtiment (mètres)} < 200 \text{ m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Ces essais permettent de mesurer la quantité d'air que le bâtiment laisse passer par infiltration. Sachant le volume du bâtiment (V), un essai permet d'obtenir des lectures en pied cube par minute ($Q_{\Delta P}$), CFM en anglais, et permettent de calculer le nombre de changements d'air à l'heure (CAH) à une pression donnée (ΔP).

$$CAH_{\Delta P} = \frac{Q_{\Delta P}}{V} \cdot 60 \left(\frac{\text{min}}{\text{hr}} \right)$$

Équation 1 - Changement d'air à l'heure

La différence de pression exercée lors du test était de 20 à 50 Pa en prenant plusieurs mesures à chaque incrément de 5 Pa.

3.3.2 Étude temps-mouvement

L'étude temps-mouvement présentée ici relève de la compilation de données suivant une grille horaire avec l'ensemble des étapes d'achèvement du montage de la structure d'un étage. Le projet SOKIO et ses murs complètement préfabriqués étaient donc comparés au projet résidentiel unifamilial Mistra de la compagnie Oikos Construction. Le projet Mistra était un projet unifamilial ayant utilisé des murs en ossature bois conventionnels. Ces murs se composaient (de l'intérieur vers l'extérieur) de l'ossature de bois, d'un isolant semi-rigide (*Panneau isolant R-4 HP* combinant fibre de bois et isolant polystyrène expansé), d'une membrane pare-intempérie et de fourrures de bois. Ces murs représentent au Québec le cas conventionnel de murs préfabriqués à ossature bois ouverts. À titre comparatif, les murs complètement fermés du projet SOKIO se composaient (de l'intérieur vers l'extérieur) de fourrures de bois, d'une membrane polyéthylène, d'un panneau de type OSB, de l'ossature de bois remplie d'isolant en nattes, d'un panneau isolant rigide de type polystyrène expansé, d'un pare-intempérie, de fourrures de bois et du revêtement extérieur de type lambris de cèdre.

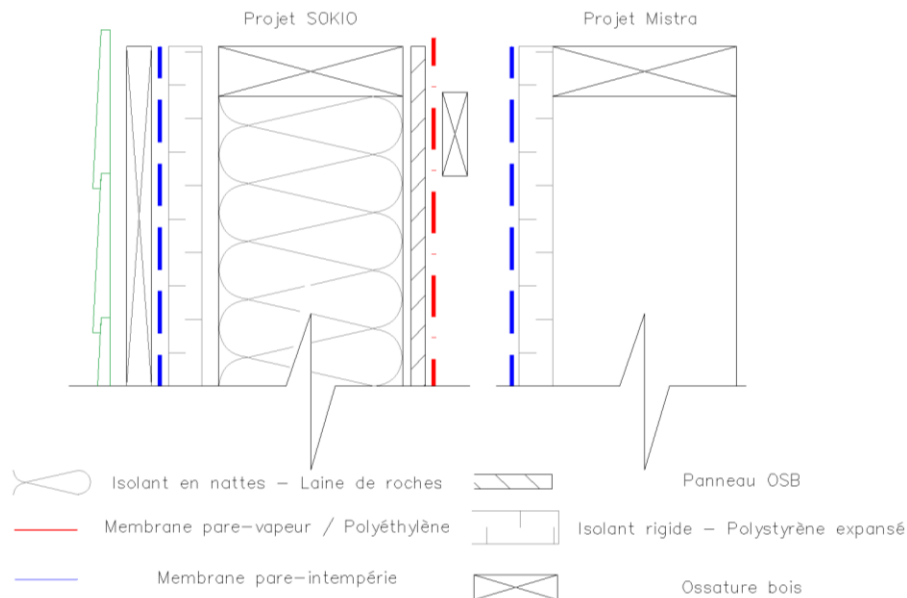


Figure 6 - Coupe typique architecturale SOKIO vs Mistra

Bien que le projet Mistra ait une superficie moins importante que le projet SOKIO, l'étude de temps-mouvement ici réalisée permet tout de même de comparer l'efficacité sur chantier des deux systèmes constructifs, le tableau 3 présente le détail de chacune des mises en chantier.

Tableau 3 - Dimension linéaire des mises en chantier des projets SOKIO et Mistra

		Projet Mistra	Projet SOKIO
		3 ouvriers sur chantier	5 ouvriers sur chantier
		92 mètres carrés	116 mètres carrés
Longueur des murs (mètres)	Mur 1	3,7	12,5
	Mur 2	7,3	9,6
	Mur 3	4,3	11,1
	Mur 4	6,1	4,3
	Mur 5	4,9	1,4
	Mur 6	8	5,3
	Mur 7	6,7	N/A
	Mur 8	6,1	N/A
	Total	47,1	44,2

3.4 Résultats et analyse

3.4.1 Étanchéité à l'air

Les résultats découlant des essais de dépressurisation sont présentés au tableau 4. Ces résultats ont été obtenus grâce au système d'acquisition de données développé par la compagnie *Retrotec* en conformité à la norme d'essai ASTM E779 présenté précédemment.

Tableau 4 - Performance en étanchéité à l'air du système SOKIO

	Étanchéité à l'air (CAH ₅₀)
SOKIO (0 mois après construction)	0,44 ± 1,3%
SOKIO (4 mois après construction)	0,46 ± 1,8%

Présentant un pourcentage d'écart de 4,5%, les résultats d'étanchéité à l'air du projet SOKIO proposent que le système soit résilient suite à la mise en chantier des murs totalement préfabriqués. Fabriqué en ossature bois, ce système est propice aux déformations dimensionnelles post-construction qui peuvent opérer sur des pièces de bois relativement à leur comportement naturel d'hygroscopicité et au déploiement des forces gravitaires lors de l'assemblage de la structure. Néanmoins, sur l'échelle courte terme étudiée, les performances en étanchéité à l'air sont demeurées dans les cibles des normes les plus exigeantes en termes de comportement écoénergétique au Canada. Avec ces performances, le système SOKIO et la connexion développée aux joints des différents panneaux préfabriqués sont en mesure de présenter une étanchéité respectant l'exigence des maisons *passives* telle que présentée au tableau 5. Bien que le projet SOKIO ne prétend pas à respecter l'ensemble des exigences de la norme *Passive House*, il demeure que cette capacité à générer un bâtiment étanche correspond bien à l'objectif que s'est fixé cette étude.

Tableau 5 - Exigences de normes connues pour l'étanchéité à l'air [24], [32], [33]

Normes	Cibles d'étanchéité à l'air pour l'ensemble du bâtiment (CAH ₅₀)
Novo-climat 2.0	1,5
Net Zero Energy	1,0
Passive House	0,6
CNEB 2017	Aucune cible*

*Le Code national de l'énergie pour les bâtiments en vigueur au Canada n'a toujours pas de cible pour l'ensemble du bâtiment. Le Code prescrit l'utilisation de système d'étanchéité présentant un taux de fuite d'air ne dépassant pas 0,2 L / (s · m²)

Mentionnée en introduction, une des raisons qui peut expliquer la performance en étanchéité du projet SOKIO consiste en la capacité du système de profiter d'un environnement industriel contrôlé pour l'ensemble de la confection des murs à ossature bois. La mise en place et le scellement de la membrane pare-vapeur intérieur et de la membrane pare-intempérie extérieure, toutes deux ayant la capacité de servir comme système pare-air, peuvent ainsi se réaliser sous un contrôle qualité adéquat. Les défauts sur chantier pouvant causer des infiltrations d'air sont alors limités tout en permettant d'uniformiser les méthodes de scellement, et ce, indépendamment de l'expérience des travailleurs mobilisés à gérer les détails d'étanchéité.

De ces méthodes de scellement, l'enrubannage au pourtour des MTPBs à l'aide de ruban adhésif spécialisé semble une autre raison [18] expliquant la performance en étanchéité du système SOKIO.

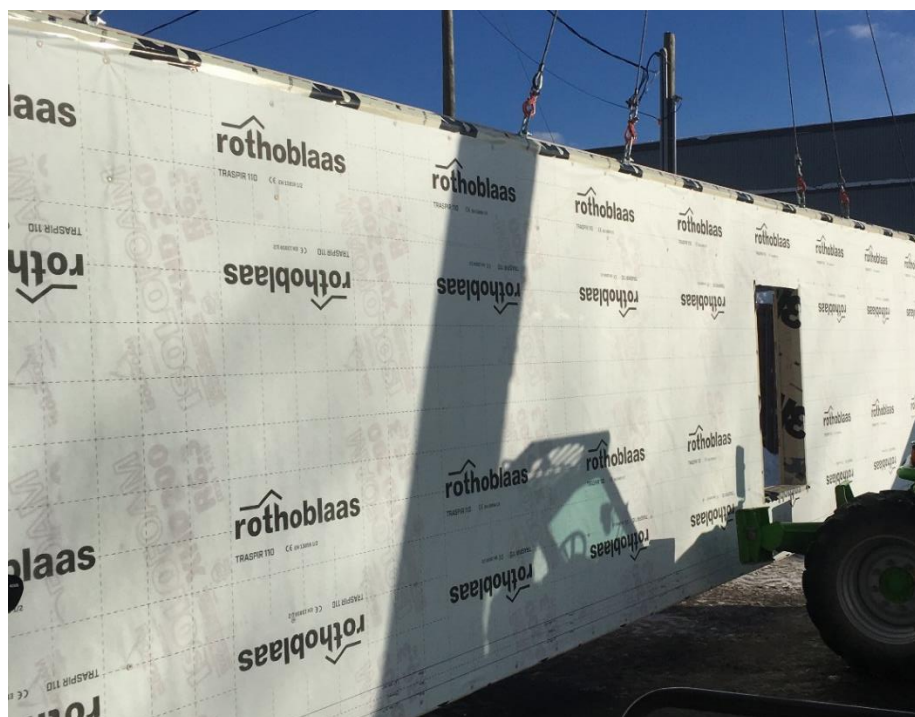


Figure 7 - Système pare-intempérie/pare-air extérieur avec scellement au pourtour du panneau

Sachant que la majorité des rubans adhésifs de construction utilisent des adhésifs sensibles à la pression et qu'ils adhèrent bien sur des surfaces comme le contreplaqué ou les panneaux d'OSB [34], il semble alors efficace de sceller les membranes sur des substrats solides en bois. Ces substrats solides, dans ce cas-ci les lisses et sablières en LSL au pourtour des panneaux, permettent d'appliquer une bonne pression sur les adhésifs lors de leur mise en place. Ces substrats solides rendent également possible le scellement des membranes sur des surfaces lisses et uniformes. Cela minimise la possibilité d'avoir des canaux de passage d'air dû à des surfaces irrégulières comme on peut voir à la figure 6. De plus, les membranes utilisées lors du projet avaient toutes en commun d'avoir des dimensions pouvant couvrir la totalité de la surface des MTPBs. De cette manière, il n'y avait aucun joint de membranes à la surface des murs.



Figure 8 - Essai en laboratoire - Canal d'air au scellement de deux membranes polyéthylène sur une surface flexible, soit l'isolant en nattes de laine de roche

Mentionnée en introduction, bien que les stratégies abordées jusqu'ici permettent une étanchéité à l'air accrue à la surface des MTPBs, l'importance de la jonction entre les panneaux demeure un enjeu crucial pour la performance de l'enveloppe sur l'ensemble du bâtiment. Pour assurer cette performance, le mécanisme développé pour le scellement automatique des panneaux entre eux se devait d'être étanche à l'air et de gérer efficacement les transferts d'humidité.

Concept bien abordé par l'APCHQ [35], les transferts d'humidité affectent les performances de l'enveloppe du bâtiment et le confort des occupants d'un bâtiment. Il est donc important d'utiliser une barrière pare-vapeur efficace pour minimiser les transferts d'humidités au sein des murs d'ossatures bois. En termes d'étanchéité à l'air, plusieurs stratégies existent pour arriver à développer un système pare-air efficace. Toujours proposé par l'APCHQ, même si le pare-intempérie extérieur est largement utilisé comme une solution pare-air efficace, il semble plus

approprié de générer un système pare-air intérieur pour limiter le risque de condensation au sein de la cavité murale [36], [37]. C'est d'ailleurs dans cette mesure que la majorité des entrepreneurs en construction au Québec préfèrent sceller la membrane pare-intempérie extérieure et la membrane pare-vapeur intérieure. Cette solution semble en effet optimale [18] pour assurer un système pare-air continu sur l'ensemble du bâtiment.

La compréhension et l'intégration de ces concepts dans l'élaboration de la connexion autoscillante des MTPBs semblent également une autre raison pour laquelle le système a montré de bons résultats d'étanchéité à l'air. En effet, cette connexion a été capable d'intégrer deux plans de protection assurant l'étanchéité à l'air et la gestion de l'humidité. Un premier plan de protection du côté intérieur utilisait un produit spécialisé incorporant le butyle. Ce matériau permettait au système d'assurer sa fonction pare-vapeur, mais également sa fonction pare-air. Largement utilisé dans l'industrie de la construction pour ces capacités d'étanchéisation, le butyle est un matériau également employé dans les gabarits d'essai d'étanchéité à l'air du Services de l'Enveloppe du Bâtiment de l'entreprise UL Canada. Utilisé au sein des bons produits, ce matériau peut permettre d'assurer une étanchéité complète en plus d'être flexible vis-à-vis les changements dimensionnels de la structure.



Figure 9 – Essai en laboratoire - Élongation du produit de butyle entre deux membranes polyéthylène pare-vapeur

À l'image du premier plan de protection placé du côté intérieur, le joint autoscillant jouant le rôle du deuxième plan de protection doit pouvoir offrir une continuité des fonctions de l'enveloppe du bâtiment. Placée du côté extérieur, la membrane pare-intempérie est utilisée pour ses fonctions d'étanchéité à l'eau, d'étanchéité à l'air et de perméabilité à la vapeur d'eau. Cette capacité à laisser passer la vapeur d'eau permet à l'enveloppe du bâtiment de rejeter l'humidité qui aurait pu s'introduire dans la cavité murale. Cela permet aux murs extérieurs d'un bâtiment de réduire l'humidité relative pouvant générer de la condensation. C'est en ce sens que pour le projet SOKIO, le deuxième plan de protection du joint autoscillant entre panneaux préfabriqués se composait d'une mousse polyuréthane haute densité précomprimé et auto-expansible. Grâce à matériau, ce

deuxième plan de protection a la capacité de remplir le joint entre les panneaux préfabriqués de manière à s'ajuster au mouvement de la structure au fil du temps. Cette mousse, imprégnée d'une résine acrylique, est également étanche à l'air, étanche à l'eau et perméable à la vapeur. Elle permet donc de générer cette continuité entre les membranes pare-intempérie des murs préfabriqués assemblés sur chantier.

Comptant sur ces deux plans de protections, le système SOKIO remplit ainsi son objectif de générer une jonction autoscillante étanche à l'air et qui gère de façon efficace les transferts d'humidité. L'étude publiée ultérieurement par le CIRCERB sur le projet SOKIO présentera également des données comparatives entre différents scénarios de jonction autoscillante testés en laboratoire.

3.4.2 Étude temps-mouvement

Les résultats découlant du suivi temps-mouvement pour les projets Mistra et SOKIO sont présentés au tableau 6.

Tableau 6 - Étude temps-mouvement Mistra vs SOKIO

	Projet Mistra		Projet SOKIO	
	Longueur (m)	Temps (min)	Longueur (m)	Temps (min)
Mur 1	3,7	5	12,5	22
Mur 2	7,3	6	9,6	22
Mur 3	4,3	7	11,1	26
Mur 4	6,1	3	4,3	16
Mur 5	4,9	5	1,4	14
Mur 6	8	9	5,3	19
Mur 7	6,7	12		
Mur 8	6,1	7		
Total	47,1	54	44,2	119

Comptant sur une mise en chantier de 8 murs totalisant 47,1 mètres, le projet Mistra présentait une moyenne de 5,9 mètres par murs préfabriqués regroupant l'ensemble de ces murs entre 4,3 et 8 mètres de longueur. Le projet SOKIO pour sa part a généré une mise en chantier de 6 murs totalisant 44,2 mètres de longueur. Regroupant l'ensemble de ces murs entre 1,4 et 12,5 mètres, il est possible de constater que le projet SOKIO avait deux séquences de murs assez distinctes. Les trois premiers murs assemblés sur chantier présentaient une moyenne de 11,1 mètres alors que les trois derniers murs présentaient une moyenne de 3,7 mètres. Cette différence notable a également entraîné des répercussions sur les temps de construction alors que les trois premiers murs ont pu être assemblés en moyenne en 23,3 minutes vis-à-vis une moyenne de 16,3 minutes pour les trois derniers murs.

Néanmoins, même si les dimensions de la deuxième séquence d'assemblage du projet SOKIO s'apparentent davantage à celles du projet Mistra, il reste que le temps moyen pour la mise en chantier du projet Mistra était de 6,8 minutes par mur préfabriqué, soit 2,4 fois plus rapide que le

projet SOKIO. De plus, cette mesure de performance entre les deux chantiers ne tient pas compte du nombre d'ouvriers présents sur chacun des chantiers. Présenté précédemment au tableau 3 de la méthodologie, le projet conventionnel comptait sur 3 ouvriers de chantier alors que le projet d'innovation SOKIO comptait 5 ouvriers sur chantier. En tenant compte de cet élément, il est possible de développer une mesure d'efficacité des mises en chantier tel que présenté au tableau 7.

Tableau 7 - Efficacité des mises en chantier - Mistra vs SOKIO

Mesure de productivité (m/min · ouvrier)	
Mistra	SOKIO
0,291	0,074

Ainsi, pour l'assemblage d'un étage préfabriqué en ossature bois, le projet Mistra est presque 4 fois plus efficace que le projet SOKIO. À première vue, cette mesure peut être perçue comme un objectif raté vis-à-vis ce qui était attendu par le projet. Néanmoins, il est important de comprendre ce qui est à l'origine de cette différence d'efficacité et si l'impact sur l'ensemble du projet de construction est également négatif.

Dans un premier temps, il est important de considérer que le projet SOKIO se voulait le premier prototype construit avec la solution innovante développée. C'était donc la première mise en chantier de ce type d'ouvrage pour l'ensemble des ouvriers sur chantier. Assurément, certaines leçons et certaines adaptations pourraient mener à augmenter l'efficacité. De ces leçons, une première réflexion vis-à-vis la longueur des murs était partagée par l'ensemble de l'équipe. En effet, en observant plus attentivement la différence de temps entre les trois premiers murs assemblés et les trois derniers murs du projet SOKIO, on s'aperçoit que les trois premiers murs, considérablement plus longs, ont pris presque 1,5 fois plus de temps à être assemblés en moyenne. Des facteurs qui peuvent expliquer cette différence, il est clair que le temps pour ajuster adéquatement les ancrages ralentissait la cadence des ouvriers.



Figure 10 - Levage du premier mur de 12,5 mètres du projet SOKIO

Pour assurer le levage sécuritaire des murs de grande dimension (10 mètres et plus), il est nécessaire de multiplier les ancrages prévus par le plan d'ingénierie. Même si ces ancrages sont disposés en amont au sein de l'atelier de préfabrication, il est nécessaire une fois sur chantier de s'assurer de bien disposer les élingues et manilles. D'installer davantage d'élingues et de manilles correspond donc à une opération plus longue. Aussi, pour le levage d'un mur de grande dimension, il est aussi important d'utiliser une poutre de levage qui répartit équitablement les charges à chacun des points d'ancrage. Les murs sont ainsi plus stables et n'ont pas tendance à vouloir fléchir au point central permettant de préserver la rectitude de ces longs panneaux préfabriqués. L'ensemble de ces éléments ne sont pas individuellement contraignants, mais expliquent tout de même une part des retards vis-à-vis un assemblage conventionnel de murs préfabriqués en ossature bois. Ces éléments pourraient simplement être corrigés en tentant de diminuer et standardiser la longueur des murs complètement préfabriqués développés par Oikos Construction.

Réduisant le temps d'assemblage des murs préfabriqués conventionnels, l'empilement des panneaux sur la remorque de transport facilite grandement le coup d'envoi du levage de la structure. Pouvant par contre être dommageable aux éléments disposés aux surfaces des murs préfabriqués conventionnels, le grutier a un accès facile aux murs disposés sur la remorque de transport et procède sans hésitation à la levée de ces murs. La méthode de transport développée par Oikos Construction pour la solution innovante a été conçue pour protéger les surfaces des murs complètement préfabriqués. Ayant le revêtement extérieur d'un côté et la membrane pare-vapeur de l'autre, ces murs sont disposés dans un système de transport vertical qui les isole les uns des autres et protègent leur surface. Pourtant, cette méthode nécessite de disposer et retirer soigneusement les murs verticalement, eux qui sont stockés de manière serrée. Le grutier doit donc être plus vigilant au lancement du levage des murs complètement préfabriqués demandant plus de temps. Ce système ne pouvant être complètement modifié comme ces murs se doivent d'être transportés à la verticale, des ajustements pourraient quand même être réalisés dans le futur pour faciliter le travail des grutiers.



Figure 11 - Système de transport et mise en chantier du projet Mistra

Assurément la plus grande différence entre les deux chantiers, l'accessibilité à l'intérieur de la structure en ossature bois facilite énormément le travail des ouvriers pour la mise en chantier de murs préfabriqués en ossature bois. Pour le projet Mistra, les ouvriers comptaient sur des murs de plus petites dimensions en moyenne que pour le projet SOKIO en plus de pouvoir avoir accès à l'intérieur de la structure en ossature bois. Ces différences sont importantes puisqu'elles permettent

aux ouvriers de compter sur des murs beaucoup plus flexibles et malléables tout en leur permettant de se fixer des points d'ancrage à l'intérieur de la structure en ossature bois pour diriger et forcer un changement dimensionnel aux murs. Rapidement, les ouvriers peuvent donc altérer et déplacer les murs à leur aise pour les mettre en place. Par la suite, l'accès à l'intérieur de la structure leur permet également de fixer temporairement les murs entre eux et au sol en clouant rapidement la structure de bois. La solution innovante développée a par contre ce défaut où l'ensemble de la structure est fermé. Les murs complètement fabriqués, ayant les portes, fenêtres, le revêtement extérieur et l'OSB du côté intérieur, sont donc beaucoup plus rigide et complexifient la manipulation. Prévu pour respecter les cadres normatifs du Code national du Bâtiment 2015 et du Code de Construction du Québec, le système structural développé se veut simple à implanter, mais demeure plus long à réaliser. De plus, bien que les murs du projet SOKIO cadraient très bien dans les tolérancements dimensionnels, la structure peut parfois prendre certaines courbures entre la fabrication et la mise en chantier. Ces changements dimensionnels doivent être corrigés sur chantier en générant assez de force pour recadrer les murs. Ces efforts déployés par les ouvriers sont de plus en plus difficiles dépendamment de la longueur et de l'accessibilité à la structure. C'est pourquoi les ouvriers du projet SOKIO devaient trouver des méthodes alternatives pour générer ces forces et être en mesure de cadrer les murs adéquatement. Ces méthodes improvisées sur chantier ont par contre été utiles et doivent dans un projet futur être pensées en amont pour permettre de positionner parfaitement et rapidement les murs complètement préfabriqués. Pour ce projet, ces méthodes ont tout de même été une autre source de ralentissement de la mise en chantier.

La distinction entre les murs préfabriqués ouverts ou fermés des chantiers Mistra et SOKIO se veut l'essence même de la solution innovante développée par l'entreprise Oikos Construction. Bien que l'inaccessibilité à l'intérieur de la structure soit une contrainte à l'installation de la solution, ce système permet tout de même de maximiser l'industrialisation des murs préfabriqués en ossature bois. La réalisation du projet se veut un succès en ce sens permettant d'innover et de proposer une solution alternative à ce qui se fait sur le marché actuel en ossature bois. De plus, bien que l'efficacité sur chantier de la solution innovante reste à être optimisée, il demeure que ce système peut avoir un impact positif sur l'ensemble d'un projet de construction. Comme abordé par Bekdik & al. [14], les projets de type modulaire peuvent réduire les temps de livraison de 20 à 50%. Bien que la solution innovante présentée ici ne cadre pas comme un projet modulaire, la capacité du projet SOKIO à maximiser l'industrialisation des murs préfabriqués permet à cette solution innovante de se rapprocher de l'industrie modulaire et de ses avantages. Somme toute, échelonner sur différentes journées durant le mois de mai et de juin 2021, la mise en chantier du projet SOKIO s'est déroulée sur 4 jours (2 demi-journées pour les murs préfabriqués et 3 jours pour la toiture préfabriquée). Considérant Bekdik & al. et les éléments industrialisés par la solution innovante, il est possible de retrancher de 25 à un peu plus de 35% au temps estimé par la SCHL pour un projet résidentiel unifamilial conventionnel [38]. Cette réduction est possible en réalisant les premières étapes du projet en parallèle à la fabrication des éléments préfabriqués. Bien que cette comparaison soit faite dans un contexte résidentiel unifamilial, il est possible de penser que ces réductions de temps sont tout à fait possibles pour les bâtiments non résidentiels et multifamiliaux. Fait très intéressant abordé par Bekdik & al. [14], il serait également possible de réduire de 5,6 fois les coûts de transport par mètre carré expédié d'éléments préfabriqués en panneau versus les éléments préfabriqués en module (pour une distance d'environ 250 kilomètres).

Tableau 8 - Échéancier typique au Québec d'un projet résidentiel unifamilial [38]

	Semaine - Projet conventionnel SCHL															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Implantation, excavation et semelles	■															
Fondation et remblayage		■														
Ossature			■	■												
Portes et fenêtres					■											
Plomberie, chauffage et électricité						■	■									
Revêtements extérieurs de finition								■	■							
Isolation thermique, pare-air/pare-vapeur										■	■					
Revêtements intérieurs de finition												■	■			
Peinture, armoires et appareils														■	■	
Aménagement paysager																■

Tableau 9 - Estimé d'un échéancier d'un projet résidentiel unifamilial avec le système SOKIO (4 à 6 semaines de réduction possible)

	Semaine - Projet innovant SOKIO															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Implantation, excavation et semelles	■															
Fondation et remblayage		■														
Préfabrication de la structure	■	■	■	■												
Système préfabriqué SOKIO					■											
Plomberie, chauffage et électricité						■	■									
Revêtements intérieurs de finition								■	■							
Peinture, armoires et appareils										■	■					
Aménagement paysager												■	■			

3.5 Conclusions

L'étude de ce rapport technique se penchait sur deux aspects importants de la solution innovante développée. Dans le cadre de ces objectifs, l'entreprise OIKOS Construction a ainsi voulu caractériser l'étanchéité à l'air et la rapidité d'assemblage sur chantier. Suivant la norme d'essai ASTM E779, les essais normalisés de type *Blower Door* ont permis de valider les performances d'étanchéité à l'air de la solution innovante. Réalisés en deux temps à 4 mois d'intervalle, les essais de dépressurisation ont montré que le système de murs totalement préfabriqués présente des valeurs de changement d'air par heure se classant parmi les normes les plus exigeantes en termes de comportement écoénergétique au pays. Les méthodes de scellement des membranes pare-vapeur et pare-air jumelées à la jonction autoscillante développée permettent ainsi d'offrir un système pouvant améliorer la performance de l'enveloppe du bâtiment. Finalement, bien que l'efficacité de l'assemblage sur chantier des murs complètement préfabriqués reste à optimiser, la littérature permet de croire que dans un contexte industriel bien adapté, la solution innovante pourrait réduire de 25 à 35% l'échéancier d'un projet cette solution. Ce système permettrait également de

réduire de manière importante les coûts de transport. Se réalisant sans accros, le projet SOKIO et son système structural versatile montrent que la solution innovante est maintenant prête à être utilisée dans les bâtiments non résidentiels et multifamiliaux.

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

L'industrialisation des murs préfabriqués en ossature bois n'a jamais été aussi loin au sein du marché québécois. Les murs totalement préfabriqués font leur émergence dans l'Ouest canadien de même qu'en Europe et ce projet permet maintenant au marché préfabriqué en ossature bois du Québec de joindre ces initiatives innovantes. L'industrialisation complète des murs préfabriqués en ossature bois est une opportunité pour le marché de palier aux désavantages de l'industrie en panneau et l'industrie modulaire. Sans prétendre à remplacer les solutions actuelles en panneau et les solutions modulaires, les murs totalement préfabriqués permettent en autres de profiter au maximum des installations industrielles pour produire un système de qualité et réduire l'échéancier total d'un projet de construction. Comme cette étude l'a montré, ce contexte industriel peut permettre de développer des enveloppes du bâtiment performantes et susceptibles de réduire la consommation énergétique lors de la vie utile des bâtiments.

De plus, les murs totalement préfabriqués présentent l'opportunité de jumeler la maximisation de l'industrialisation de la construction tout en limitant les coûts associés au transport de composantes totalement préfabriquées. La solution innovante développée ici est un système intégrant de murs et de caissons de toiture totalement préfabriqués permettant en autres l'expédition de ces composantes dans des conteneurs de transport standardisés. En comptant sur une solution complète sur l'ensemble du bâtiment, il est donc possible d'accroître les possibilités d'expédition d'un tel système.

Le projet SOKIO a également été une opportunité pour l'entreprise Oikos Construction de collaborer avec des intervenants du milieu permettant de contribuer à la solution innovante. De ces contributions, l'entreprise Groupe Genius a permis de développer un système structural adapté au prototype résidentiel unifamilial développé, mais qui permettra dans le futur l'introduction de cette solution innovante au sein des bâtiments non résidentiels et multifamiliaux. C'est ainsi une autre opportunité pour accroître l'utilisation du bois dans le marché non résidentiel et multifamilial.

3.7 Recommandations

Même si ce projet se veut un succès, il faut tout de même être conscient que la réalisation de ce premier prototype résidentiel unifamilial s'est produite au sein de l'entrepôt de l'entreprise Oikos Construction. Bien que cet entrepôt ait permis la fabrication des éléments préfabriqués, il demeure que ces installations étaient artisanales et ont alourdi de manière importante la durée du projet. La littérature permet de croire qu'il est possible de réduire de manière importante l'échéancier total d'un projet utilisant un système aussi industrialisé que celui développé. Il demeure tout de même que des installations industrielles devront être adaptées à ce type de solution innovante. Comme ce projet était une première itération de ce système, une multitude d'améliorations peut émerger d'un travail post-mortem intéressant. Énumérées tout au long de cette étude, un bon nombre d'améliorations peuvent permettre d'augmenter l'efficacité sur chantier et minimiser les risques futurs d'un tel projet.

4. Bibliographie

- [1] J.-A. Chayer, "Les impacts environnementaux d'un bâtiment et les outils pour les évaluer," in *Colloque Gestionnaires techniques - Société d'habitation du Québec*, 2018, Accessed: Nov. 24, 2021. [Online]. Available: http://www.habitation.gouv.qc.ca/fileadmin/internet/documents/SHQ/colloque_gestionnaire_technique/2017/CGT-2018-10-impacts-environnement-batiments.pdf.
- [2] C. K. Chau, T. M. Leung, and W. Y. Ng, "A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings," *Appl. Energy*, vol. 143, no. 1, pp. 395–413, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.APENERGY.2015.01.023.
- [3] M. Beccali, M. Cellura, M. Fontana, S. Longo, and M. Mistretta, "Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 283–293, Nov. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.05.040.
- [4] S. J. Hong, J. H. Arehart, S. M. Asce, W. V. Srubar, and A. M. Asce, "Embodied and Operational Energy Analysis of Passive House-Inspired High-Performance Residential Building Envelopes," 2020, doi: 10.1061/(ASCE).
- [5] IPCC, "Global warming of 1.5°C An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change," 2018.
- [6] United Nations Environment Programme, "2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector," 2021. Accessed: Jan. 11, 2022. [Online]. Available: www.globalabc.org.
- [7] M. H. Wu, T. S. Ng, and M. R. Skitmore, "Sustainable building envelope design by considering energy cost and occupant satisfaction," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 31, pp. 118–129, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.ESD.2015.12.003.
- [8] Natural Resources Canada, "Residential Sector - Energy Use Analysis," *National Energy Use Database*, 2018. <https://oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/showTable.cfm?type=AN§or=res&juris=00&rn=11&page=0>.
- [9] F. E. Boafo, J. H. Kim, and J. T. Kim, "Performance of modular prefabricated architecture: Case study-based review and future pathways," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 8, no. 6. MDPI AG, Jun. 15, 2016, doi: 10.3390/su8060558.
- [10] K. Orlowski, "Assessment of manufacturing processes for automated timber-based panelised prefabrication," *Buildings*, vol. 9, no. 5, 2019, doi: 10.3390/buildings9050125.
- [11] F. Sanna, R. Hairstans, K. Leitch, D. Crawford, J. Menendez, and D. Turnbull, "Structural optimisation of timber offsite modern methods of construction," in *World Conference on Timber Engineering 2012, WCTE 2012*, 2012, vol. 3, pp. 369–377.

- [12] A. S. Sosa, F. Riola-Parada, and A. Santana-Sosa, "A Theoretical Approach Towards Ressource Efficiency in Multi-Story Timber Buildings Through BIM and LEAN," 2018, Accessed: Nov. 01, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/331354920>.
- [13] H. M. Said, T. Chalasani, and S. Logan, "Exterior prefabricated panelized walls platform optimization," *Autom. Constr.*, vol. 76, pp. 1–13, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.AUTCON.2017.01.002.
- [14] B. Bekdik, J. Pörzgen, S. S. Bull, and C. Thuesen, "Modular construction: From projects to products," *Archit. Eng. Des. Manag.*, vol. 14, no. 1–2, pp. 95–108, 2018, doi: 10.1080/17452007.2017.1360760.
- [15] Think Wood, "Designing sustainable, prefabricated wood buildings," 2018. Accessed: Mar. 21, 2020. [Online]. Available: <http://go.hw.net/AR072018-3>.
- [16] R. e. Smith and J. D. Quale, *Offsite Architecture: Constructing the future*, Illustrate. 2017.
- [17] D. Lopez and T. M. Froese, "Analysis of Costs and Benefits of Panelized and Modular Prefabricated Homes," in *Procedia Engineering*, 2016, vol. 145, pp. 1291–1297, doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.166.
- [18] T. Kalamees, Ü. Alev, and M. Pärnalaas, "Air leakage levels in timber frame building envelope joints," *Build. Environ.*, vol. 116, pp. 121–129, May 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.02.011.
- [19] J. Alencastro, A. Fuertes, and P. de Wilde, "The relationship between quality defects and the thermal performance of buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 883–894, 2018, Accessed: Apr. 21, 2021. [Online]. Available: <https://pearl.plymouth.ac.uk>.
- [20] M. Prignon and G. Van Moeseke, "Factors Influencing Airtightness and Airtightness Predictive Models: A Literature Review ," *Energy Build.*, vol. 146, pp. 87–97, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.062.
- [21] M. Bell, J. Wingfield, D. Miles-Shenton, and J. Seavers, "Low carbon housing: lessons from Elm Tree Mews. Project Report.," *Joseph Rowntree Found.*, 2010.
- [22] J. M. Menendez Amigo, "Optimisation of Timber Frame Closed Panel Systems for Low Energy Buildings," 2017.
- [23] ASTM International, "Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization 1," *Astm E 779 - 03*, vol. i, pp. 1–11, 2010, doi: 10.1520/E0779.
- [24] BC Housing, "Illustrated guide: Achieving airtight buildings," no. September, p. 56, 2017.
- [25] B. Middleton and D. Moelis, "Designing and Building the World's Largest & Tallest Passive House Building - The House at Cornell Tech, Roosevelt Island, New York City," New York, 2017. Accessed: Apr. 01, 2020. [Online]. Available: www.handelarchitects.com.

- [26] A. Zhivov, D. Herron, J. L. Durston, M. Heron, and G. Lea, "Airtightness in New and Retrofitted U.S. Army Buildings," *Int. J. Vent.*, vol. 12, no. 4, pp. 317–330, 2014, doi: 10.1080/14733315.2014.11684026.
- [27] T. Kalamees, "Airtightness and thermal bridges of 32 lightweight detached houses," 2005. Accessed: Apr. 30, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/266276074>.
- [28] A. Asiz, I. Smith, and V. Menendez, "Air leakage and moisture deposition of prefabricated light-frame wood building," 2008.
- [29] L. Scott, "Developments in Closed Panel Timber Frame Connection," 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/283497196>.
- [30] K. Orlowski, K. Shanaka, and P. Mendis, "Manufacturing, modeling, implementation and evaluation of a weatherproof seal for prefabricated construction," *Buildings*, vol. 8, no. 9, 2018, doi: 10.3390/buildings8090120.
- [31] K. Orlowski, K. Shanaka, and P. Mendis, "Design and Development of weatherproof seals for prefabricated construction: A methodological approach," *Buildings*, vol. 8, no. 9, Aug. 2018, doi: 10.3390/buildings8090117.
- [32] Canadian Commission on Building and Fire Codes, *National Energy Code of Canada for Buildings 2017*, Fourth edi. National Research Council Canada, 2018.
- [33] Transition Énergétique Québec (TEQ), "Exigences techniques: Maison et Petit bâtiment multilogement," 2018.
- [34] M. Jucienė and V. Dobilaitė, "Impact of climatic effects and various surfaces on the tack of adhesive tapes for building & construction," *J. Build. Eng.*, vol. 42, p. 102825, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.102825.
- [35] APCHQ, *L'ABC de l'enveloppe des bâtiments dans le secteur résidentiel*, 4ième ed. 2012.
- [36] J. Langmans, R. Klein, and S. Roels, "Hygrothermal risks of using exterior air barrier systems for highly insulated light weight walls: a laboratory investigation," 2012.
- [37] R. Trempe, "Séminaire sur l'enveloppe du bâtiment," 2020, p. 245.
- [38] La Société canadienne d'hypothèques et de logement, "Construction de maison à ossature de bois - Canada," 2013. [Online]. Available: www.schl.ca.

5. Annexes