

Barrières à l'utilisation de la préfabrication modulaire
volumétrique de bois au Québec : étude de cas du passage
d'un système préfabriqué unifamilial au multifamilial

par

Virginie Raissa MESSA SOKOUDJO

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

M. Sc. A

MONTRÉAL, LE 14 DÉCEMBRE 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Virginie Raissa Messa Sokoudjo, 2021



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Ivanka Iordanova, directrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Carlo Carbone, codirecteur
École de Design UQÀM

M. Francis Adel, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Caroline Frenette, examinateur externe,
Département de mathématiques, informatique et génie UQAR

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 29 NOVEMBRE 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné l'audace, la force et la patience durant de ce modeste travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé, à la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais tout d'abord adresser ma gratitude à la directrice de ce mémoire, Ivanka Iordanova, pour son soutien durant ces longs mois de recherche. Merci pour ta patience, tes encouragements et les connaissances que tu m'as transmises. Merci à Carlo Carbone, mon codirecteur, pour ta disponibilité et tes conseils qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je voudrais également remercier tous les membres du Groupe de Recherche en Intégration et Développement Durable (GRIDD) pour leurs conseils, leur gentillesse et leur disponibilité pour répondre à mes questions.

Un merci bien spécial pour les partenaires industriels, les interviewés qui se sont prêtés aux entrevues et tous les professionnels qui se sont prêtés à l'enquête. Sans vous ce projet n'aurait jamais abouti.

Pour conclure, un merci à ma famille et mes amis de votre précieux soutien durant ce projet.

Barrières à l'utilisation de la préfabrication modulaire volumétrique de bois au Québec : étude de cas du passage d'un système préfabriqué unifamilial au multifamilial

Virginie Raissa MESSA SOKOUDJO

RÉSUMÉ

La préfabrication aussi appelée construction hors site ou *off site construction* est envisagée pour augmenter la productivité stagnante du secteur de la construction. La construction hors site applique les méthodes utilisées dans l'industrie manufacturière pour produire en usine des parties d'ouvrages pour leur installation sur le chantier. Selon la littérature, par l'utilisation de la construction hors site, il serait possible de réduire la durée des projets, d'assurer une constante qualité, ainsi que d'améliorer l'environnement de travail et la sécurité des travailleurs.

Au Québec, dans le domaine de la construction hors site à ossature légère en bois, les fabricants ont développé des produits et systèmes préfabriqués qui sont employés majoritairement dans la construction résidentielle unifamiliale ou multilogement de basse densité, alors qu'ils pourraient être utilisés pour la construction résidentielle à plus haute densité ou d'immeubles d'une hauteur n'excédant pas six étages. Nous nous proposons dans ce travail de comprendre les causes de la faible utilisation de ces systèmes préfabriqués en ossature légère modulaire volumétrique de bois dans la construction multilogement.

La méthodologie de recherche s'appuie sur une étude de cas d'un projet de construction multilogement conçu avec des composants modulaires volumétriques à ossature légère en bois et envisageant l'utilisation du *Building Information Modeling* (BIM) pour la coordination du projet. La conception de ce projet n'a pas abouti à sa réalisation. Des entretiens semi-dirigés avec l'équipe de conception, nous ont permis d'identifier des enjeux tels que de la communication insuffisante entre les parties prenantes et des erreurs lors de l'estimation du coût du projet comme causes de cet échec. D'autres enjeux s'ajoutent pour expliquer pourquoi ce projet n'a pas été réalisé, notamment le manque d'expérience des acteurs avec l'utilisation de cette catégorie de construction hors-site, et l'utilisation limitée du BIM. Un déploiement adéquat de cette technologie aurait ouvert la voie à une meilleure gestion des informations, ce qui aurait amélioré la collaboration et aurait contribué à la réussite du projet.

Connaissant ces enjeux, les acteurs qui entreprendront des projets similaires auront une meilleure connaissance des barrières lors de l'utilisation de la préfabrication multilogement à ossature légère en bois, pourront identifier les risques d'échec de leurs projets et les mitiger avant que ça soit trop tard. Nous proposons dans ce rapport une série d'actions à mener et d'informations à disposer à chaque étape de la conception de projets préfabriqués à ossature légère en bois pour contourner les barrières précédemment évoquées.

Mots-clés : construction modulaire volumétrique, ossature légère en bois, building information modeling, barrières, construction multilogement, gestion de projets, gestion des informations.

A case study approach to identifying constraints and barriers to modular volumetric timber prefabricated systems utilization in Quebec

Virginie Raissa MESSA SOKOUDJO

ABSTRACT

Off-site construction is regarded as a solution to overcome the declining productivity in the construction industry. In the literature, many authors have highlighted the benefits of applying manufacturing based methods to produce parts of buildings prior to their installation on site. These benefits included reduced construction period, higher quality finished product, and better working conditions, to name a few.

In Quebec, manufacturers have developed light wood frame prefabricated products and systems that have been mostly used in single and low-density multi-family units. These products can also be used for buildings up to six storeys. The purpose of this study is to propose an overview of factors inhibiting the adoption of prefabricated light wood frame systems in higher multi-dwelling residential construction in Quebec. The case study method from an unsuccessful project designed with light wood frame prefabricated components help to expose the barriers faced by manufacturers in deploying their prefabricated systems in multi-unit residential construction from four to six storeys.

The case study methodology allows the researcher to gather better information and to develop theories about complex phenomena. Findings indicated poor communication between project stakeholders and errors in the project cost estimation as barriers in the project. Other difficulties included the lack of proper information management and the lack of experience of the stakeholders with this type of projects. From these results, professionals undertaking similar projects can have a better understanding of the use of multi-unit light wood frame prefabrication and would be able to identify and avoid the risks of failure in their projects. This report also proposes series of required actions and needed information at each stage of the design of prefabricated light timber frame projects to overcome the identified barriers.

Keywords: timber construction, barriers, information management, multi-unit construction, off-site construction.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Contexte de l'étude: la construction hors site	5
1.1.1 Historique.....	5
1.1.2 Définition	6
1.1.3 Les types de systèmes constructifs préfabriqués	11
1.2 Le bois pour la construction hors site	12
1.2.1 Bois comme matériau de construction.....	12
1.2.2 Le bois dans la construction hors site	14
1.2.2.1 Ossature légère en bois	14
1.3 Revue de l'adoption de la construction hors site au Canada	17
1.3.1 Approche méthodologique.....	19
1.3.2 Résultats.....	21
1.3.2.1 La gestion dans les projets préfabriqués	24
1.3.2.2 Changement organisationnel.....	26
1.3.2.3 Le coût de construction.....	29
1.3.2.4 L'intégration numérique et la CHS.....	31
1.3.3 Barrières à l'adoption de la CHS	34
1.4 Synthèse de la revue.....	37
1.4.1 Objectifs de recherche.....	38
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	41
2.1 Approche méthodologique de recherche : étude de cas.....	41
2.2 Étapes de réalisation de l'étude de cas.....	43
2.2.1 Revue de la littérature	43
2.2.2 Description du cas.....	44
2.2.3 Collecte de données	45
2.2.3.1 Considérations éthiques	47
2.2.4 Traitement et interprétation des données	48
2.3 Limites de la méthode de recherche.....	48
CHAPITRE 3 ETUDE DE CAS	51
3.1 Présentation du projet Innov144	51
3.1.1 Description du projet.....	51
3.1.2 Caractéristiques du projet	54
3.1.3 Organisation de l'équipe de projet.....	56
3.2 Résultats des entrevues	57
3.2.1 Barrières économiques.....	58
3.2.1.1 L'estimation du coût de projet	58
3.2.1.2 Marge de profit	59

3.2.2	Barrières liées à l'actif préfabriqué	59
3.2.3	Barrières techniques	62
3.2.3.1	Combinaison d'innovations	62
3.2.3.2	Adaptations nécessaires pour la préfabrication multilogement ..	63
3.2.4	Cadre réglementaire et mode de réalisation	64
3.2.5	Organisation du projet	66
3.2.5.1	Partage d'information dans le projet	66
3.2.5.2	Manque d'intégration numérique	67
3.2.6	Synthèse des entrevues	67
3.3	Sondage sur les barrières à l'utilisation de la CHS en bois	70
3.3.1	Profil des répondants	71
3.3.2	Informations nécessaires pour la conception	74
3.3.3	Outils numériques	78
3.3.4	Synthèse des résultats des sondages	80
CHAPITRE 4	DISCUSSION	82
CONCLUSION	89	
RECOMMANDATIONS	93	
ANNEXE I	RESUME DES BARRIERES A LA CHS DANS LA LITTERATURE ..	95
ANNEXE II	CODAGE D'ENTREVUES	99
ANNEXE III	ANALYSE COMPARATIVE DES BARRIERES DANS LA LITTERATURE ET DANS L'INDUSTRIE AU QUEBEC	101
ANNEXE IV	QUESTIONNAIRE D'ENTREVUE	105
ANNEXE V	FEUILLET D'INFORMATION	108
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	112	

LISTE DES TABLEAUX

B v		Page
Tableau 1.1	Catégories de systèmes préfabriqués	12
Tableau 1.2	Utilisations possible du bois dans un bâtiment.....	13
Tableau 1.3	Mots clés, leurs occurrences et les liens	25
Tableau 2.1	Intervenants aux entrevues.....	47
Tableau 3.1	Barrières à l'utilisation de la CHS recensées lors des entrevues.....	68
Tableau 4.1	Actions à mener durant la conception de bâtiments préfabriqués	84
Tableau 4.2	Informations requises durant la conception de bâtiments préfabriqués.....	85

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Produits préfabriqués en ossature légère : composants, panneaux et éléments volumétriques	16
Figure 1.2	Répartition des entreprises au Québec selon le système.....	16
Figure 1.3	CLT, NLT et GLULAM	17
Figure 1.4	Publications sur la CHS dans le monde et au Canada	19
Figure 1.5	Cadre méthodologique de la revue systématique de la littérature	20
Figure 1.6	Répartition des publications par pays	22
Figure 1.7	Relations entre les publications dans les pays	23
Figure 1.8	Réseau de mots clés sur la CHS.....	24
Figure 1.9	Étapes de déploiement du DfMA.....	28
Figure 1.10	Technologies de l'industrie applicables à la construction	32
Figure 2.1	Démarche de réalisation d'une étude de cas	42
Figure 2.2	Démarche méthodologique adoptée.....	43
Figure 2.3	Critère de choix entre l'étude de cas unique et de cas multiples	45
Figure 2.4	Codage thématique des entrevues	48
Figure 3.1	Vue aérienne du site du projet Innov144	52
Figure 3.2	Rendu projet Innov144 phase 2	53
Figure 3.3	Image et plan du système préfabriqué initial	55
Figure 3.4	Organisation de l'équipe de conception Innov144	57
Figure 3.5	Plan unité familiale avec le pod initial.....	60
Figure 3.6	Plans sommaire de logement avec pod multilogement.....	61
Figure 3.7	Configuration de deux pods multilogement dans un étage	62

Figure 3.8	Relations contractuelles entre les participants	64
Figure 3.9	Relations de coordination et de collaboration entre les participants.....	65
Figure 3.10	Type d'organisation des répondants	71
Figure 3.11	Répartition des répondants par secteur d'activité	72
Figure 3.12	Type de matériaux pour la préfabrication.....	73
Figure 3.13	Types de systèmes préfabriqués.....	74
Figure 3.14	Informations nécessaires à chaque phase de projet.....	75
Figure 3.15	Informations de projet par phase de projet	76
Figure 3.16	Informations à être fournies par le fabricant aux concepteurs.....	77
Figure 3.17	Moyens d'échange d'informations	78
Figure 3.18	Logiciels et leurs usages dans les projets préfabriqués.....	79
Figure 4.1	Suggestions d'amélioration de la gestion des projets préfabriqués	83

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

DfMA	Design for Manufacturing and Assembly
RIBA	Royal Institute of British Architects
BCA	Building and Construction Authority of Singapore
BIM	Building Information Modeling
CHS	Construction Hors Site
CII	Construction Industry Institute
CLT	Cross Laminated Timber
MIB	Modélisation des Informations du Bâtiment
NLT	Nail Laminated Timber
GLULAM	GLUE LAMinated Timber

INTRODUCTION

L’industrie de la construction est le quatrième secteur de l’économie québécoise mais enregistre une productivité faible comparativement à l’industrie manufacturière et à l’ensemble de l’économie (Conseil du Patronat du Québec, 2016). La réglementation lourde, la fragmentation et les méthodes de construction inefficaces caractérisant ce secteur jouent un rôle important dans ce faible taux de productivité (Deloitte, 2019). Un changement de méthodologie pour l’adoption de stratégie de production industrielle, permettrait d’augmenter entre cinq à dix fois la productivité de certaines parties dans l’industrie de la construction (Barbosa, 2017).

L’industrialisation de la construction vise à trouver des voies et des moyens pour réduire les gaspillages et pertes durant le cycle de construction; ceci afin d’améliorer la performance dans les projets et dans l’industrie (Boton & Forques, 2019). La construction hors site (CHS) est une approche d’industrialisation de la construction qui se différencie des techniques conventionnelles de la construction par l’utilisation de processus manufacturiers et rationalisés pour fabriquer des composants, des modules ou des éléments de construction, avant leur expédition et leur installation sur les chantiers de construction (Correia, Vicente, Azenha, & Ferreira, 2018). En intégrant des processus manufacturiers et le pré-assemblage de parties d’ouvrages en usine, la construction hors site offre des possibilités pour soutenir une construction plus rapide et plus efficiente (Quale & Smith, 2019).

Par le chevauchement d’activités en usine et sur chantier, la CHS offre l’avantage de réduire le temps de construction de projets (Gibb & Isack, 2003). Rogan, Lawson, & Bates-brkljac, (2000) recensent des projets des bâtiments développés et construits selon cette approche. Ainsi, la construction de l’hôtel Granada à Londres qui comprend 67 chambres reparties sur cinq étages s’est faite en 27 semaines. Soit une réduction de 100 jours comparativement à un projet similaire déjà construit suivant le mode de construction traditionnel. Les auteurs notent aussi le cas de l’hôpital de Kingston upon Thames qui comprend 132 lits et six blocs opératoires. La construction s’est faite en 19 semaines au lieu des 35 semaines initialement envisagées. Aussi, Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, (2020) lors d’entrevues avec des professionnels

du modulaire, ont pu noter qu'ils ont tous cité la réduction du temps de construction lors de l'utilisation de la CHS dans leurs projets. De leur côté, Sardén & Engström, (2010) trouvent que la CHS a le potentiel de répondre aux incertitudes propres à la construction en assurant une meilleure et constante qualité. Ainsi, l'utilisation de la CHS est apte à soutenir une transformation de l'industrie par la réduction systématique des incertitudes et erreurs dans les processus de gestion des projets de construction (Correia et al., 2018).

Bien plus qu'un changement de méthodologie, la transformation de l'industrie de la construction doit s'appuyer selon Koskela (2003), sur l'utilisation accrue de la technologie pour tendre vers une meilleure productivité. En examinant les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique on constate que l'accélération des développements technologiques s'est accompagnée d'une augmentation de performance. Ainsi nous pouvons noter que l'intégration numérique est un atout à la transformation de l'industrie de la construction. L'intégration numérique se base sur une meilleure gestion des informations afin d'améliorer ou optimiser les processus et en faisant communiquer les systèmes entre eux (Chikhi, 2018). L'intégration numérique en construction s'incarne présentement par le déploiement des outils et des pratiques de la modélisation des informations du bâtiment (MDB) encore appelé Building Information Modeling (BIM) (Poirier, Frenette, Carignan, Paris, & Forques, 2018). Le BIM utilise une maquette tridimensionnelle réunissant les caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un ouvrage afin de permettre aux différentes parties prenantes de collaborer à la conception, lors de la construction et lors de l'exploitation de l'ouvrage (Staub-French et al., 2018). Le déploiement à grande échelle du BIM et de l'environnement collaboratif qui le soutient aideraient à pallier aux problématiques de gestion fragmentée et de prise de décision inadéquate recensés dans l'industrie.

Dans la suite, nous nous intéresserons à l'utilisation de la CHS en ossature légère en bois pour la construction au Québec. En raison de sa légèreté, de sa facilité d'usinage, mais aussi de sa facilité d'approvisionnement, le bois est un matériau qui se prête facilement à la fabrication en usine donc à l'utilisation de la CHS (Cecobois, 2020). L'utilisation du bois en construction présente des avantages environnementaux, notamment : l'utilisation d'une ressource

recyclable, renouvelable en construction et la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Cecobois, 2021). Malgré le potentiel que représente l'utilisation de l'ossature légère en bois CHS pour la construction, elle reste sous-utilisée au Canada et au Québec (FPinnovations, 2016). Au Québec, bien que le bois soit l'un des matériaux les plus utilisé pour la construction de bâtiments, le code de construction permet l'utilisation des systèmes à ossature légère en bois dans des bâtiments allant jusqu'à six étages seulement depuis 2015 (Conseil national de recherches du Canada, 2015). Des entreprises ayant développé des systèmes préfabriqués en bois qu'ils ont utilisés dans des constructions unifamiliales, envisagent de déployer ces systèmes pour des constructions multiétages, mais souvent sans succès. Nous nous sommes interrogés sur les défis à cette implémentation.

L'objectif de ce projet de mémoire est d'identifier et comprendre les causes limitant l'implémentation de la CHS d'ossature légère en bois aux immeubles multilogement de moyenne hauteur. Ce travail de recherche s'articule en cinq chapitres. Le premier sera consacré à la revue de la littérature sur la construction hors site. Le deuxième chapitre exposera la démarche méthodologique adoptée. Le troisième chapitre présentera une étude de cas, incluant des entrevues et un sondage, sur un projet de construction modulaire hors-site, mené au Québec. Enfin, le dernier chapitre discutera les résultats de la recherche, ses limites actuelles et les propositions d'amélioration pour surmonter les limitations constatées.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Contexte de l'étude: la construction hors site

1.1.1 Historique

La faible productivité de l'industrie de la construction a été attribuée à la méthode ou technique de production utilisée (Koskela, 2003). La méthode de production fait référence à la manière dont sont utilisées les ressources pour aboutir à un produit fini. Selon Koskela & Vrijhoef (2001), la méthode actuelle pour la construction d'ouvrages présente trois déficiences : la complexité et l'unicité des ouvrages; une gestion fragmentée, et un manque d'innovation (Koskela & Vrijhoef, 2001). D'après Winograd, Liston, & Fischer, (2001); cette méthode est inefficiente à augmenter la productivité de l'industrie et représente une source d'erreurs potentielles (Winograd, Liston, & Fischer, 2001). Comme le mentionne Koskela (2003), la construction hors site est l'une des méthodes envisagées pour changer de la technique de construction actuellement utilisée (Koskela, 2003).

La CHS s'inspire des méthodes utilisées dans l'industrie manufacturière. Ces méthodes sont basées sur la production en chaîne de produits de masse qui résultent une économie d'échelle (Razkenari et al., 2019). La production en chaîne, aussi appelée chaîne de montage, s'inspire de la méthode mise en place par Henry Ford. Dans ce processus, la production se fait sous la forme d'une ligne d'assemblage. « Une ligne d'assemblage est un ensemble de stations de travail encore appelées postes de travail interconnectées entre elles à l'aide d'un moyen de transfert mécanisé (comme un convoyeur, un tapis roulant, un bol vibrant etc.). Le produit est transféré sur les stations pour subir les diverses opérations d'assemblage nécessaires jusqu'à l'obtention d'un produit fini » (Grine, Jaziri Jemni, & Boubaker, 2018, p1). Ainsi dans une chaîne de montage, la fabrication d'un produit complexe est simplifiée en la fabrication de composantes et le produit fini est l'assemblage de tous les composants. Les composantes sont chacune fabriquées en lieu différent ce qui permettrait de réduire le temps de production en

effectuant des opérations simultanément. De plus, cette succession d'opérations permet de contrôler la qualité du produit lors de sa production et d'aboutir à la production massive d'objets de qualité ((Grine et al., 2018), (Sardén & Engström, 2010)). Quant au principe d'économie d'échelle mentionné plus haut, il suppose que la production d'une grande quantité d'unités permet de réduire les coûts fixes de production rendant ainsi le produit plus abordable (Richard, 2005). Selon Roger (2010), la CHS devrait en plus de ces principes remplir trois conditions supplémentaires pour aboutir à une meilleure productivité à savoir : une vision claire de la performance attendue des produits ou processus préfabriqués, la capacité d'imaginer une topologie fonctionnelle et une connaissance des produits ou processus préfabriqués existants.

La construction hors site n'est pas nouvelle. L'idée de transposer les méthodes manufacturières en construction était déjà utilisée après les guerres mondiales. Le Corbusier en 1921 dans son ouvrage « Vers une architecture », expose et expérimente l'idée de construire une villa à partir d'éléments produits en série, soit manufacturés. Aux États-Unis, pour répondre à l'augmentation du coût de la main-d'œuvre, des panneaux de bois fabriqués en usine sont utilisés par le département de l'agriculture pour construire des maisons dès 1937 (Heyer & Blomquist, 1964). Dès 1975, l'entreprise japonaise Toyota lance dans l'une de ses divisions la production de maisons en utilisant son système de production avec lequel elle produit déjà des automobiles. Cette même année, le Canadian Journal of Civil Engineering publiait l'article de Pollner, Tso et Heidebrecht (1975) analysant les caractéristiques structurales des panneaux préfabriqués utilisés comme enveloppes de bâtiments au Canada. Afin de mieux comprendre le concept de CHS nous allons commencer par une définition.

1.1.2 Définition

Le concept de construction hors site apparaît sous des noms différents dans la littérature : méthodes modernes de construction (*Modern Methods of Construction* ou MMC) au Royaume-Uni; fabrication hors site ou construction hors site en Australie et aux États-Unis; systèmes constructifs industrialisés (*Industrialized Building Systems* ou IBS) en Malaisie et en

Chine. Elle est aussi désignée par les expressions : construction modulaire, construction en panneaux, construction industrialisée, préfabrication et pré-assemblage ou construction préfabriquée ((Hosseini et al., 2018), (Jin, Gao, Cheshmehzangi, & Aboagye-Nimo, 2018), (Durdyev & Ismail, 2019)). Ces expressions renseignent sur les caractéristiques de la CHS mais elle n'a pas de définition unanimement adoptée.

Le *Construction Industry Institute* (CII) définit la construction hors site comme la production de composants d'ouvrage à un lieu différent de leur lieu final d'intégration, avant leur installation à leur position finale dans le projet¹. Gibb & Pendlebury (2006), précisent que le lieu de fabrication doit être un environnement contrôlé ou une usine, et la fabrication doit s'appuyer sur des processus manufacturiers pour la production d'ouvrages. Le *Royal Institute of British Architects* (RIBA) désigne par les méthodes modernes de construction la combinaison de la fabrication d'ouvrage hors site et l'utilisation de processus améliorés sur le chantier (Waste & Resources Action programme, 2007). Selon le *Building and Construction Authority of Singapore* (BCA), la construction industrialisée reprend les principes de la production en chaîne, qui engendre une économie d'échelle et permet de fournir plus de produits de meilleure qualité et en moins de temps. Dans cette étude, la CHS est définie comme étant la planification, la conception, la fabrication et l'assemblage des éléments de construction dans un endroit autre que leur endroit d'installation final, le but étant de soutenir une construction rapide et efficiente. La CHS est une méthodologie qui s'inspire d'une variété d'approches industrielles dont le *Design for Manufacturing and Assembly* (DfMA) et des principes du *Lean Construction* (Staub-French et al., 2018). Nous décrirons ces deux approches dans la section suivante.

Le DfMA est la réunion du *Design for Manufacture* (DfM) et du *Design for Assembly* (DfA), qui sont des approches où la conception d'un produit est adaptée à un but donné (Filippi & Cristofolini, 2010). Le DfM adapte la conception aux contraintes de fabrication (productivité,

¹ “The practice of preassembly or fabrication of components both off the site and onsite at a location other than at the final installation location” (Construction Industry Institute (CII), 2002))

standardisation, approvisionnement) et vise la simplification d'un produit complexe en sous-assemblages ou composants (Gibb & Pendlebury, 2006). Le DfA adapte la conception afin d'optimiser le nombre de sous-assemblages ou composants afin de réduire les risques lors de la livraison et de l'assemblage (Gibb & Pendlebury, 2006). Rapporté à l'échelle d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art, le DfMA devient un processus qui implique la prise en compte, durant la conception, des contraintes de fabrication, des questions de constructibilité et d'assemblage au chantier (BCA, 2016). Ce processus amène un changement dans la relation entre la conception et la construction d'un actif. Le DfMA nécessite une intégration des acteurs de la fabrication, les fournisseurs, l'entrepreneur général et les sous-traitants spécialisés du projet dès le début du processus de conception. Ce principe facilite la conception et la réalisation des projets préfabriqués, mais en même temps, provoque un changement de l'organisation traditionnellement fragmentée en construction (Alfieri, Seghezzi, Sauchelli, Di Giuda, & Masera, 2020).

Le *Lean Construction*, adapte des principes du *Lean Manufacturing* aux spécificités de la construction. Cette méthode inspirée du *Lean* dans l'industrie automobile, vise la stabilisation et l'optimisation du flux de travail pour éliminer le gaspillage ou toute activité qui n'apporte pas de valeur ajoutée, dans le but de renconter les objectifs définis en amont (Institut de Lean Construction Canada). Il se définit de la façon suivante:

“Lean is a way to design production systems to minimize waste of materials, time, and effort to generate the maximum possible amount of value” (Koskela, Howell, Ballard, & Tommelein, 2002)

Ainsi, selon Koskela, Howell, Ballard et Tommelein (2002), l'utilisation du *Lean Construction* pour la conception des projets permettrait de réduire les pertes de matériels et de temps, et de générer la plus grande valeur possible pour le projet. Le *Lean Construction* repose sur trois axes, à savoir : 1) le découpage des travaux en tâches; 2) l'élimination des gaspillages et 3) la réduction de la variabilité et l'accroissement de la capacité du système de production à

répondre aux exigences posées en amont par le client (Koskela, Owen, & Dave, 2010). Le *Lean Construction* rejoint le DfMA dans la simplification de l'ouvrage en composants pour produire une valeur définie en amont de la conception. L'application combinée de ces deux approches s'avère bénéfique pour la CHS.

Les bénéfices recensés par Gibb & Isack (2003), Azman & Ahamad (2012), Mostafa, Ki Pyung, Tam, & Rahnamayiezekavat (2018), Abanda, Tah, & Cheung (2017) de l'utilisation de la CHS par rapport aux méthodes de construction traditionnelles incluent :

- a) la réduction du temps du projet,
- b) l'amélioration de la qualité des ouvrages construits,
- c) la réduction des incertitudes au cours du projet
- d) l'amélioration des conditions de travail,
- e) la réduction de l'impact négatif de la construction sur l'environnement.

Il n'est pas rare en construction, que des projets dépassent les délais prévus. Par le chevauchement des activités de fabrication en usine et des activités de construction sur site, la CHS offre l'opportunité de réduire le temps nécessaire à la construction. De plus, les processus déployés pour la CHS, offrent plus de fiabilité pour la livraison à temps des travaux. Selon leur étude menée au Royaume-Uni, Gibb et Isack, (2003) argumentent que la réduction du temps de construction de projet est la principale motivation des donneurs d'ouvrage pour adopter la CHS. Abanda et *al.* (2017) démontrent que l'utilisation CHS permet de réduire de 12% à 60% le temps de construction comparativement à un ouvrage réalisé entièrement sur chantier.

Un autre bénéfice de l'utilisation de la CHS est l'amélioration de la qualité des ouvrages construits. La fabrication en usine, parce qu'elle est effectuée dans un environnement contrôlé, permet de maintenir des conditions de stockage des produits optimales et de prévenir les éventuelles détériorations causées par l'exposition aux conditions climatiques (Zahibi, Habib, & Mirsaeedie, 2013). Aussi, les processus utilisés en usine ont moins de risque de varier lors de la production, ce qui permet de garantir des produits de qualité déterminée de façon constante (Blismas & Wakefield, 2009). Enfin, parce que la fabrication est effectuée

indépendamment des travaux au chantier, la CHS offre aussi la possibilité de produire un prototype, de l'analyser et d'effectuer les modifications éventuellement nécessaires avant l'installation, ainsi réduisant le risque de reprises dues aux erreurs de conception. Cet environnement de production plus contrôlé et plus sécuritaire, offre des possibilités de réduire les incertitudes inhérentes à la méthode de construction traditionnelle (Sardén & Engström, 2010). Ces incertitudes peuvent résulter de la fermeture de chantier à cause d'accidents, de reprises de travaux, d'inconformités ou de retards à cause de la fluctuation de la productivité horaire. Il en résulte gestion de la construction plus efficace, et une meilleure confiance et expérience de projet pour les acteurs du projet (Gibb & Isack, 2003).

Concernant l'amélioration des conditions de travail, l'utilisation de la CHS favorise un cadre de travail plus sécuritaire car en travaillant en usine on dénombre moins d'accidents qu'au chantier (Gibb & Isack, 2003). La fabrication de parties d'ouvrage en amont de l'installation peut aider à limiter la durée des travaux en hauteur, ce qui selon le CSTC 2.9.1 est un moyen les plus efficaces pour réduire les risques de chutes. Aussi, en déplaçant une partie des tâches hors du chantier, la CHS réduit le nombre de personnes nécessaires à la construction, ce qui, selon le LSTC 2.5.6 permet de limiter les risques d'accidents particulièrement dans les zones de travail où différentes équipes doivent effectuer des travaux simultanément. De plus, effectuer une partie des travaux en usine diminue la congestion de l'espace, ce qui a comme effet de réduire les risques d'accidents (Abanda et al., 2017). Lawson, Ogden, & Bergin, (2012) ont rapporté qu'à Singapour, l'utilisation de la CHS a permis de réduire de 80% les accidents lors de la construction comparativement à un projet similaire exécuté entièrement au chantier.

Les activités de construction sur site causent du bruit, génèrent des déchets et perturbent les activités environnantes (Gibb & Pendlebury, 2006). En utilisant la CHS, une partie de ces activités peut être déplacée loin du site, et ainsi, on peut réduire l'impact du projet sur l'environnement. Dans les projets où les activités de construction s'effectuent dans des zones à accès restreint ou lorsque les activités d'opération se poursuivent sur le site durant la construction (hôpitaux, aéroports, prisons), l'utilisation de la CHS minimise la mobilisation de

l'espace et la perturbation de ces activités. Il existe une pluralité de systèmes constructifs appliquant les principes de la CHS.

1.1.3 **Les types de systèmes constructifs préfabriqués**

Les systèmes préfabriqués peuvent se classer de façon différente dépendamment du degré de travail sur site, des matériaux utilisés (béton, bois, acier, composite), de la taille, de la forme ou de la complexité des composants et des systèmes préfabriqués (Abosaod, Underwood, & Isikdag, 2010). Ces systèmes préfabriqués peuvent être utilisés indépendamment ou combinés ensemble selon le projet. Gibb et Isack (2003) ont produit une catégorisation des systèmes préfabriqués que cette recherche a adoptée et résumée dans le Tableau 1.1. La CHS y est décomposée en quatre sous-catégories dépendamment de la complexité du travail en usine : composants, panneaux, volumétrique et modulaire. Les composants sont les éléments préfabriqués les plus simples et ils s'adaptent bien à tout type de construction. Les panneaux sont des éléments flexibles qui peuvent servir à la structure, l'enveloppe, les partitions intérieures ou au revêtement extérieur du bâtiment. Ce système ne comprend généralement pas les équipements électriques ou de plomberie qui seront installés ultérieurement sur le chantier. Le système volumétrique, parce qu'il ne réunit que les services du bâtiment, peut s'adapter à tout type d'ouvrage, tant aux bâtiments résidentiels, les bâtiments commerciaux, qu'aux hôtels. Avec ce système les partitions, les équipements et une partie de la structure est faite en usine limitant le travail à faire sur site. De son côté, le modulaire est le type de système comprenant le plus d'éléments faits en usine. Il est peu modifiable une fois sur le chantier, mais il peut réduire jusqu'à 70% du travail à faire sur chantier dans certains cas (Gibb & Isack, 2003).

Tableau 1.1 Catégories de systèmes préfabriqués
Adapté de Gibb & Pendlebury (2006, p 3)

Catégories	Définition
Composants	Eléments simples, standardisés qui sont toujours fabriqués en usine.
Panneaux	Eléments linéaires ou plans utilisés pour la structure ou l'enveloppe de bâtiment. Ils offrent l'avantage d'être facilement transportables sur des camions.
Volumétrique	Unité tridimensionnelle renfermant un espace fournissant des services qui soutiennent les activités dans les espaces de vie. Généralement il s'agit de la cuisine ou la salle de bain. Également appelé noyau de service ou pod.
Modulaire	Unité qui rassemble les espaces de vie et de service d'un logement. Elle est entièrement préfabriquée et doit simplement être raccordée à la structure du site.

1.2 Le bois pour la construction hors site

1.2.1 Bois comme matériau de construction

Le bois est un matériau utilisé dans la construction depuis des siècles, tant pour les habitations que pour des ouvrages routiers (ponts) ou des édifices publics, tels que les bâtiments religieux (église, temple). Horyu-Ji, la plus ancienne pagode en bois (toujours existante) a été construite au VIIe siècle à Nara, au Japon. Ce monument toujours sur pied, prouve que l'usage du bois dans la construction multiétage est pérenne. Au Québec, 34% des bâtiments sont réalisés en bois(MTTP, 2020) et en 2015, dans le secteur résidentiel, 90% des bâtiments de moins de 4 étages étaient réalisés en bois (Decker, 2015). Le bois sous des formes différentes est utilisé dans toutes les parties de bâtiment. Le Tableau 1.2 résume les types d'utilisations possibles du

bois dans un bâtiment. Sur le plan structurel, il est utilisé pour former soit la fondation ou l'ossature (colonnes, poutres, poutrelles, dalles etc); pour l'enveloppe du bâtiment il sert pour construire la charpente de toit ou les montants de murs. Il est aussi utilisé pour confectionner l'aménagement intérieur, notamment pour les armoires et le mobilier ainsi que pour le revêtement extérieur du bâtiment.

Tableau 1.2 Utilisations possible du bois dans un bâtiment
Adapté de Decker (2015)

Illustration	Sous-ensemble	Éléments en bois
	1-Adaptation	Murs (montants de bois et contreplaqué)
	2-Structure	Murs, poutrelles, colonnes
	3-Enveloppe	Murs, charpente de toit
	4-Partition	Murs, planchers
	5-Equipement	Armoires, mobilier
	6-Revêtement	Revêtement de sols et murs, mur-rideau

En plus des multiples utilisations possibles du bois en construction, l'utilisation de ce matériau est avantageuse comparativement au béton et à l'acier car il provient des arbres qui représentent une ressource naturelle renouvelable disponible au Canada. En effet l'étendue des forêts exploitables représente 35% du territoire Canadien (MTTP, 2020), ce qui fait du bois un matériau disponible, connu et apte pour la construction au Québec.

Le bois se distingue des autres matériaux de construction par sa capacité d'isolation élevée. Par sa structure cellulaire ligneuse, le bois contient des cavités remplies d'air qui lui permettent de réguler les pertes thermiques à travers la structure, contribuant ainsi à réduire les dépenses énergétiques dans l'ouvrage (Cecobois, 2021). Cette structure contenant une multitude de

cavités d'air, lui permet aussi d'atténuer les bruits d'impact et améliorer le confort dans le bâtiment. L'utilisation du bois dans un bâtiment peut entraîner une économie d'énergie en plus d'améliorer le confort dans le bâtiment (Cecobois, 2019). De plus, tout au long du cycle de vie du bâtiment, le bois séquestre une plus grande quantité de gaz à effet de serre que le béton et l'acier. C'est le seul matériau utilisé en construction capable de capter et stocker le CO₂ présent dans l'atmosphère (Orlowski, 2019).

1.2.2 Le bois dans la construction hors site

L'utilisation du bois pour la CHS est intéressante car c'est un matériau léger et facilement usinable. En effet, dans des conditions normales, une unité de masse de bois pèse quatre fois moins que la même unité de béton et près de dix fois plus léger que celle en acier, ce qui est utile pour le déplacer le long de la ligne de production. De plus, comparativement au béton, le bois ne nécessite pas de temps de cure, sa fabrication en usine se fait donc en un temps plus court. Comparativement à l'acier qui nécessite des équipements lourds pour les tâches en usine, le bois nécessite des outillages plus légers et plus conventionnels.

Au Canada, selon une enquête de l'institut Canadian of Manufactured Housing (ISM) effectuée en 2015, 63% de produits préfabriqués pour la construction sont fait en bois. Ces produits comprennent des panneaux, des modules et des éléments volumétriques. Parmi les produits préfabriqués en bois disponibles au Québec on peut compter les structures à ossatures légères de bois telles que les poutrelles, les panneaux, les fermes de toit etc.

1.2.2.1 Ossature légère en bois

Le terme « ossature légère » désigne des éléments de bois de dimensions standardisées travaillant ensemble pour former l'ossature et assurer la résistance de l'ouvrage (Cecobois, 2017). On distingue trois catégories de produits préfabriqués en ossature légère : les composants, les panneaux ou les éléments volumétriques. Des exemples de ces produits sont représentés en Figure 1.1.

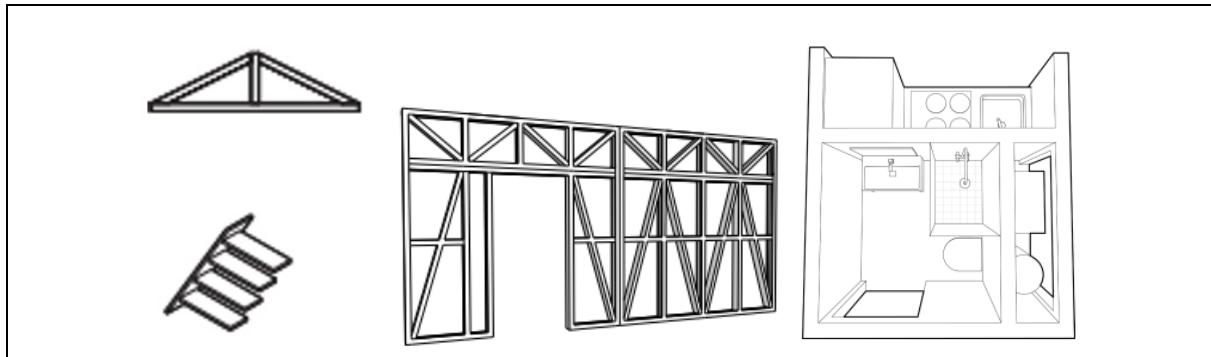


Figure 1.1 Produits préfabriqués en ossature légère : composants, panneaux et éléments volumétriques
 Tirée de Carbone et *al* (2020, p15-36-43)

Au Québec, ce segment de production représente une part importante du marché de la construction préfabriquée. Selon les chiffres publiés par FPInnovations, en 2015, la province comptait 68 entreprises spécialisées en fabrication des produits d'ossature légère en bois et ce chiffre est passé à 119 en 2020. Une cartographie des entreprises dans ce segment de production (Figure 1.2) montre qu'elles se répartissent essentiellement entre la construction en panneaux et la construction modulaire, sachant qu'une entreprise peut produire plusieurs types de ces systèmes constructifs.

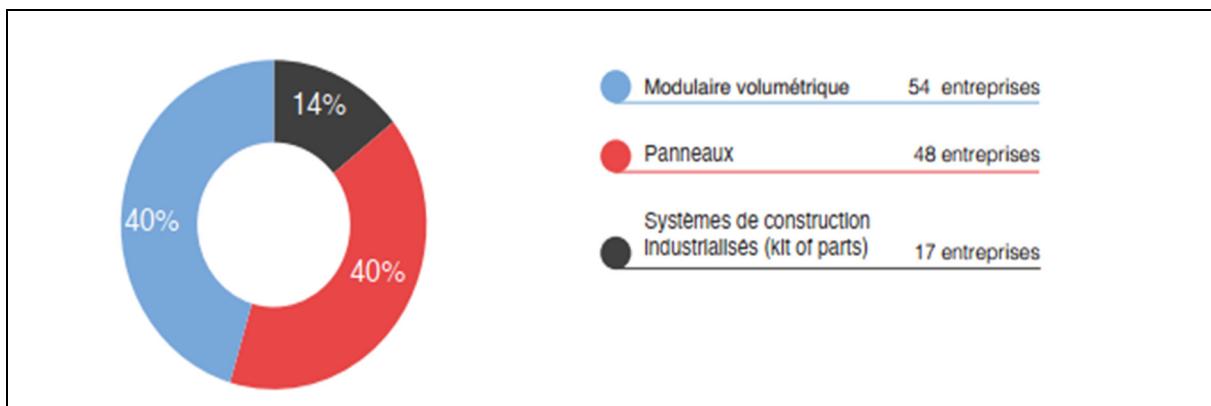


Figure 1.2 Répartition des entreprises au Québec selon le système
 Tirée de Carbone et *al* (2020, p 9)

Le nombre divers d'entreprises par type de produits laisse supposer autant de solutions préfabriquées possibles pour la construction. Les panneaux sont des systèmes flexibles qui peuvent permettre à l'industrie de créer un catalogue de solutions préfabriquées où les concepteurs pourraient faire leur choix dépendamment de leurs contraintes. Avec la construction modulaire volumétrique, le module s'adapte et se modifie en fonction du projet. Les produits de bois à ossature légère permettent de construire une variété d'actifs.

D'autres produits préfabriqués en bois sont aussi utilisés pour la construction, notamment le bois d'ingénierie tel que le bois lamellé croisé ou *Cross Laminated Timber* (CLT), le bois lamellé-cloué ou *Nail Laminated Timber* (NLT) le bois lamellé-collé ou *Glue-Laminated Timber* (GLULAM) et le bois massif. La Figure 1-3 présente ces trois systèmes de bois.

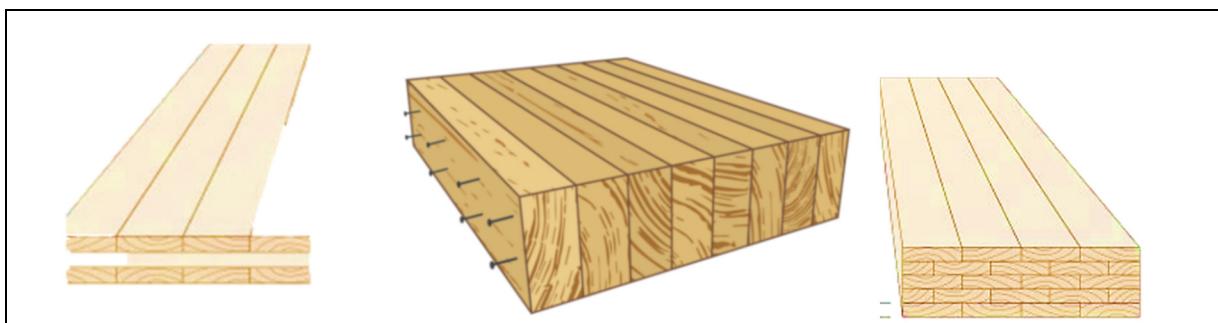


Figure 1.3 CLT, NLT et GLULAM
Tirée de Forestry Innovation Investment (2021)

Dans la suite de notre étude les termes CHS ou système préfabriqué désigneront les systèmes volumétriques. Aussi, nous étudierons spécifiquement les systèmes volumétriques à ossature légère en bois utilisés pour la construction de bâtiment n'excédant pas six étages.

1.3 Revue de l'adoption de la construction hors site au Canada

Une exploration bibliographique sur la CHS a été conduite sur une période de dix ans qui, selon (Jin et al., 2018), est une période adéquate pour comprendre les évolutions les plus récentes dans le domaine. La collecte des articles a été faite sur le moteur de recherche Scopus

car il donne accès au plus grand nombre de documents scientifiques en ligne et il a été le plus recommandé par les revues précédentes (Cobo, López-Herrera, Herrera-Viedma, & Herrera, 2011), Hosseini *et al.* (2018), (Chadegani *et al.*, 2013). La figure 1-4 présente les résultats de la recherche bibliographique qui a recensé les articles de journaux publiés depuis 2010, dont les mots clés, le titre ou le résumé comportait l'un des termes identifiés associés à la CHS. Ces termes comprennent: *off site manufacturing, off-site construction, prefabrication, industrialized building systems, industrialized construction, panelized construction, modular construction, modularization.*

Cette recherche a abouti à 2195 références dont 104 publications canadiennes. Comme l'indique la courbe, l'intérêt pour la CHS n'a cessé de croître et depuis 2016, on observe une croissance plus grande du nombre de publications. Devant cette littérature florissante, nous avons opté pour une revue systématique de la littérature pour examiner la production de la recherche. Par l'analyse scientométrique, la revue systématique de la littérature peint une vue d'ensemble d'un domaine de recherche contrairement aux revues manuelles (Hosseini *et al.*, 2018). L'analyse scientométrique est un outil descriptif et diagnostic permettant de mettre en évidence les tendances dans la recherche, les niches de recherche négligées, et les liens entre les concepts recherchés (Cobo, López-Herrera, Herrera-Viedma, & Herrera, 2011). Selon Jin *et al* (2018) cet outil est approprié pour explorer un domaine où la bibliographie est abondante (Jin *et al.*, 2018).

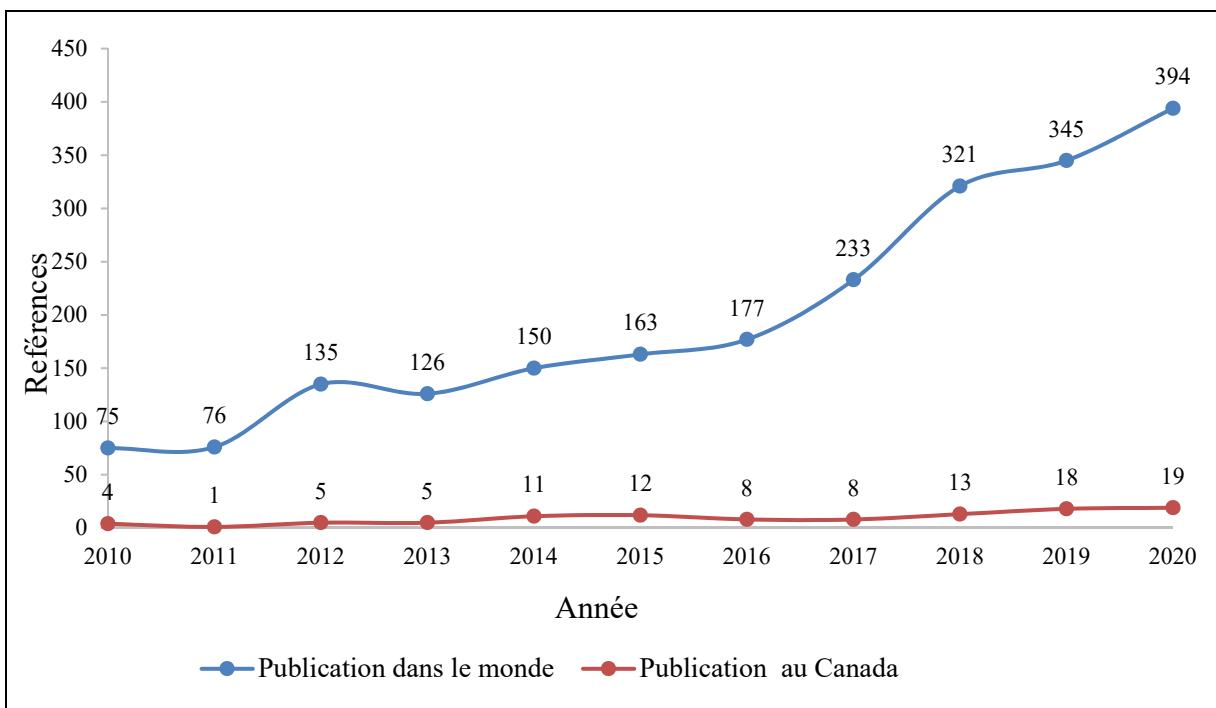


Figure 1.4 Publications sur la CHS dans le monde et au Canada

1.3.1 Approche méthodologique

Une revue systématique est la synthèse rigoureuse et reproductible de toutes les études existantes dans un domaine spécifié (Colombet, 2015). Elle tente « d'identifier, d'évaluer et de synthétiser toutes les preuves qui correspondent à des critères d'éligibilité prédéfinis afin d'améliorer l'état de connaissance propre à une question de recherche » (Cochrane, 2019). Par cette analyse, le chercheur tend à représenter les liens intellectuels au sein du système de connaissances scientifiques et facilite l'analyse d'un grand nombre d'articles ou d'une vaste bibliographie (Cobo, López-Herrera, Herrera-Viedma, & Herrera, 2011). La revue systématique ici présentée s'est faite en trois étapes : une recherche bibliographique, une analyse scientométrique et une analyse qualitative (Figure 1.5).

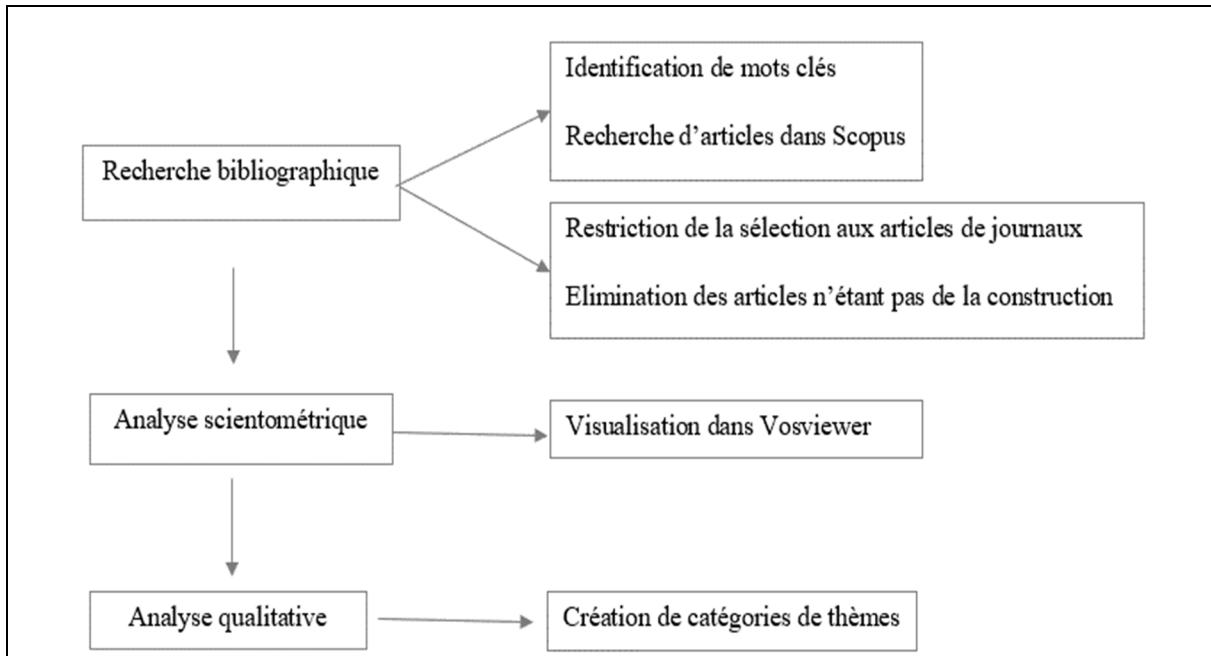


Figure 1.5 Cadre méthodologique de la revue systématique de la littérature

La première étape de la revue est la recherche bibliographique. La recherche bibliographique collecte les articles de journaux dans les bases de données académiques à partir de mots clés. Les mots clés représentent le contenu des études (Su & Lee, 2010) et fournissent une image précise de la production de connaissances scientifiques sur la question de recherche abordée (van Eck & Waltman, 2014). En raison de la diversité des expressions associées à la CHS, de nombreux mots clés ont été utilisés lors de la recherche notamment : *off-site manufacturing*, *off-site construction*, *prefabrication*, *prefabricated construction*, *industrialized construction*, *panelized construction*, *modular construction*.

Ensuite, vient l'analyse des références bibliographiques trouvées par la méthode scientométrique. L'analyse scientométrique ou *science mapping* tend à identifier les liens qui existent entre les publications à travers des relations de co-occurrence de mots clés, des relations de co-auteur ou par couplage bibliographique. Selon Van Eck et Waltman (2014), les mots clés fournissent un aperçu des questions de recherches abordées dans une publication. Une relation de co-occurrence de mots consiste à compter le nombre de publications où des mots sont cités ensemble. Plus ce nombre est important, plus les thèmes explorés par ces

recherches sont proches. Callon, Courtial, Turner et Bauin, (2016) affirment que par l'étude des mots-clés des documents nous pouvons connaitre les thèmes et axes de recherches les plus pertinents qui ont été explorés. Quant à l'analyse par co-auteurs, elle trouve les chercheurs, instituts de recherche ou pays liés les uns aux autres par le nombre de publications qu'ils ont rédigées conjointement (van Eck & Waltman, 2014). La connaissance des auteurs de publications les plus citées ensemble aident à définir le champ d'action et les limites des résultats de la publication. Ainsi, si une publication est citée dans plusieurs pays, son analyse est comprise comme généralisable à tout le domaine. Hosseini et *al.* (2018) expliquent que le manque de collaboration dans un axe de recherche démontre un désintérêt pour cet axe recherche. Le couplage bibliographique concerne le chevauchement des publications. Deux publications sont couplées bibliographiquement s'il y a une troisième publication qui est citée par les deux publications (Kessler & Brüll, 2015). Plus le nombre de références en commun est important, plus la relation ou les axes de recherche sont liés entre eux.

Le logiciel VOSviewer a été utilisé pour faire l'analyse scientométrique parce qu'il permet de représenter des grands réseaux bibliographiques. Le logiciel comptabilise le nombre de fois que les mots clés sont cités ensemble et regroupe par code de couleur les mots les plus cités ensemble. La séparation par code de couleur facilite l'analyse.

Enfin la dernière étape de la revue systématique est une analyse qualitative du contenu des publications. L'analyse qualitative permet un approfondissement des connaissances dans les références bibliographiques étudiées (Leedy & Ormrod, 2018). L'association de l'analyse qualitative à l'analyse scientométrique qui a identifié les axes de recherches les plus pertinents permet non seulement une exploration plus complète des avancées de la recherche, mais aussi d'identifier les potentialités de recherche (Jin et *al.*, 2018).

1.3.2 Résultats

Les résultats de la recherche bibliographique (figure 1-4) sont présentés à la section 1-3. L'analyse de la répartition des publications par pays résumée à la figure1-6 montre que la

Chine et les États-Unis sont les pays où l'on dénombre le plus de publications. Seules 66 publications canadiennes, soit environ 5% de l'ensemble des publications dans la littérature, y ont été recensées. Ainsi, au Canada relativement peu de publications scientifiques existent sur la CHS. La faible bibliographie au Canada relative à la CHS que nous avons obtenue via Scopus, qui pourtant couvre une gamme de revues plus large que les autres bases de données universitaires ((Falagas, Pitsouli, Malietzis, & Pappas, 2008), (Lee, Park, Lee, & Hyun, 2019)), montre que ce sujet est sous-exploré et offre ainsi encore de nombreuses potentialités de recherche.

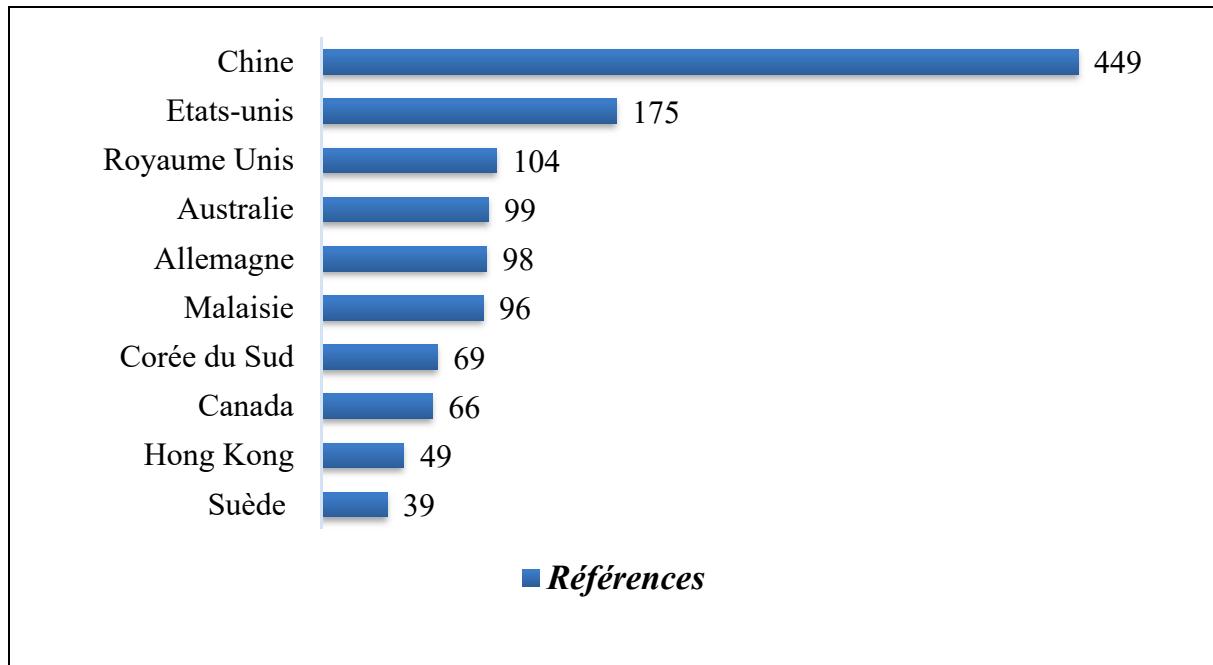


Figure 1.6 Répartition des publications par pays

Les liens de co-auteurs entre les références sont présentés à la Figure 1.7. Cette figure montre que l'exploration de la CHS au Canada est liée à celle des Etats-Unis. En effet, c'est le seul pays avec qui le Canada a des relations de co-auteurs. Le Royaume-Uni est le pays qui entretient le plus de liens de collaboration, soit avec quatre pays. Les pays qui ont le plus de références publiées (Chine, États-Unis, Royaume-Uni, Australie) ont peu de liens de

collaboration entre eux, ces publications doivent donc être prises dans leur contexte et sont peu généralisables à d'autres pays ((Hosseini et al., 2018), (van Eck & Waltman, 2014)).

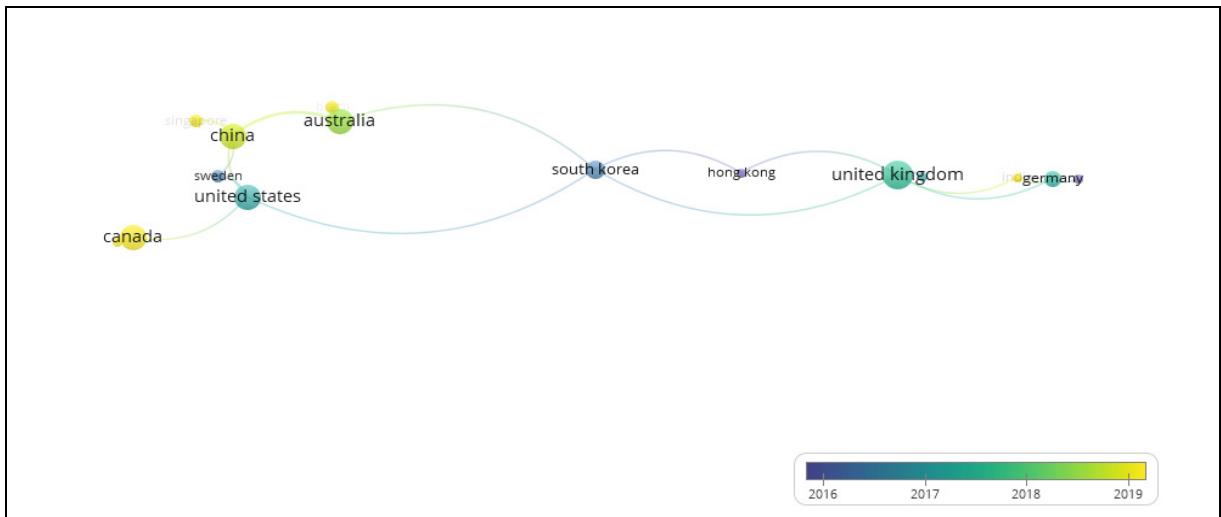


Figure 1.7 Relations entre les publications dans les pays

Pour l'analyse de co-occurrence des mots clés, nous avons recueilli près de deux mille mots clés à analyser après la recherche bibliographique. Nous avons exclu les mots génériques comme construction industry, modular construction, modularization, prefabricated construction, industrialized construction, buildings construction. Pour l'analyse, nous n'avons retenu que les mots cités au moins trois fois. La visualisation des réseaux de mots clés obtenus grâce au logiciel Vosviewer a permis de regrouper les mots clés en quatre catégories comme l'illustre la figure 1-8. Les mots les plus récurrents font référence à la structure physique de l'ouvrage (roof, stiffness, structural design, building, floor, timber, precast concrete, slabs) et à la gestion de projet (project management, decision making, construction methods). Ainsi à partir de ces quatre thématiques, deux axes de recherche émergent : « *le hardware* » ou l'aspect matériel et la gestion de projet. Cette observation est en cohérence avec Kagioglou et al. (1998) qui mentionnent que « le développement de produits innovants et l'amélioration des processus sont les deux principaux bénéfices de la préfabrication en construction ».



Figure 1.8 Réseau de mots clés sur la CHS

Au terme de notre revue systématique de la littérature, peu d'articles sur la CHS ont été retrouvé au Canada. Sachant que la Chine est le plus grand contributeur de la recherche (Figure 1.6), que le matériau qui y est le plus utilisé pour la préfabrication est le béton, et connaissant la relativement faible collaboration entre les pays, l'aspect *hardware* exploré dans la recherche ne semble pas le plus pertinent dans le contexte de cette recherche sur les barrières à l'utilisation de la construction préfabriquée modulaire volumétrique en ossature légère en bois. Dans la suite de notre analyse nous explorons la gestion des projets préfabriqués.

1.3.2.1 La gestion dans les projets préfabriqués

Du logiciel VOSviewer nous avons extrait le Tableau 1.3 qui présente les mots clés les plus cités recensés dans la littérature, le nombre d'occurrences et le nombre de liens de chaque mot cité. Dans ce tableau, on note que les mots se référant à l'aspect matériel sont les plus cités.

Moins de douze expressions se rapportent à la gestion de projets sur la cinquantaine de mots clés obtenus par l'analyse scientométrique des articles. Les enjeux qui sont identifiés par ces mots clés concernant la gestion des projets utilisant CHS sont entre autres : *project management, decision making, information management, BIM, construction methods, cost*, etc. Nous avons procédé à une analyse plus approfondie de ces thèmes dans la section suivante.

Tableau 1.3 Mots clés, leurs occurrences et les liens

Mots clés	Nombre d'occurrences	Nombre de liens
Buildings	69	207
Housing	37	109
Design	107	272
Manufacture	70	213
Architectural design	62	210
Product design	58	196
Structural design	58	181
Testing	47	121
Stiffness	44	98
Walls	39	97
Precast concrete	63	162
Concrete	53	149
Reinforced concrete	41	109
Project management	52	153
Life cycle	40	150
Decision making	42	121
Supply chain	36	110
Sustainable development	37	120
Cost	37	112
Building Information modeling	34	106
Information management	32	101

1.3.2.2 Changement organisationnel

L'utilisation de la CHS contribue à changer l'organisation fragmentée et linéaire utilisée dans les projets vers un modèle où tous les acteurs du projet travaillent ensemble dès la conception au sein d'une équipe ((Goulding, Rahimian, Arif, & Sharp, 2015), (Wuni & Shen, 2020)). L'organisation la plus fréquente ou traditionnelle dans les projets de bâtiment consiste à intégrer de façon séquentielle les acteurs du projet. Dans cette organisation, le donneur d'ouvrage ou client conclut d'abord un contrat avec des professionnels pour la conception ; il lance ensuite un appel d'offres basé sur les plans et devis préparés par les concepteurs et enfin, le client négocie une seconde entente avec les constructeurs en vue de la réalisation de l'ouvrage (CCDC, 2018). En plus de ces acteurs, les constructeurs engagent des fournisseurs de biens et services pour les matériaux, les équipements de construction et pour les technologies définies par les professionnels pour la réalisation du projet. Comparativement à ces pratiques, dans les industries manufacturières (automobiles, aéronautiques, navales) les départements de conception et de production sont intégrés au sein d'une même organisation et travaillent ensemble (Stephen Kieran & Timberlake, 2004). Ainsi, l'utilisation de la CHS qui s'inspire des méthodes manufacturières, voudrait réunir aussi, dès la conception, tous les acteurs du projet, du concepteur au constructeur, ainsi que les fournisseurs de services et les acteurs de la chaîne logistique du projet. Un tel processus de conception intégrée permettrait de réduire les reprises sur le chantier, les avenants (délais et coûts supplémentaires) s'y afférent, et de créer un climat de collaboration propice à la productivité (Abanda et *al.*, 2017).

Un autre changement que veut apporter l'utilisation de la CHS est l'organisation de l'équipe de projet. Dans l'organisation traditionnelle de projet, la conception est sommaire lorsqu'elle est soumise aux constructeurs pour l'appel d'offres et les détails sont intégrés plus tard dans le projet (Gao, Low, & Nair, 2018). Cette conception en silo entraîne souvent des modifications et changements lors de la construction. En effet, généralement lorsque les concepteurs réalisent leur mandat, les plans établis ne fournissent pas suffisamment d'informations pour permettre aux constructeurs de faire une offre de soumission exacte (ICDC, 2016). Il s'ensuit des ralentissements sur le chantier, des réclamations et des avenants de modification. Par exemple,

généralement durant la conception, les éléments mécaniques du bâtiment sont représentés de façon symbolique. Leur forme, leurs caractéristiques et les exigences spécifiques à leur installation ne sont connues que plus tard pendant la construction. Dans un tel contexte, c'est durant la phase de construction du bâtiment que les équipes doivent déterminer comment intégrer et coordonner ces éléments, ce qui occasionne soit des démolitions, soit le ralentissement des travaux. Dans les deux cas, il y'a des surcoûts pour le projet. En utilisant la CHS, l'intégration de tous les acteurs dans une seule équipe durant la conception engage une discussion sur les méthodes d'exécution, l'assemblage en amont des travaux sur le chantier et permet d'adapter la conception. La conception en équipe préconisée dans la CHS permettrait ainsi d'optimiser la solution constructive choisie. En effet, en travaillant en collaboration, les acteurs peuvent mieux évaluer les solutions constructives possibles (Durdyev & Ismail, 2019). En plus de la collaboration, l'utilisation des principes du DfMA (figure 1-9) dans la CHS permet de proposer au client la solution optimale répondant à ses besoins. Étant donné que le DfMA est un processus itératif d'optimisation et d'amélioration des produits (Gao et al., 2018), la conception suivant ce principe permet d'évaluer différentes solutions possibles, ainsi la solution constructive choisie est optimale.

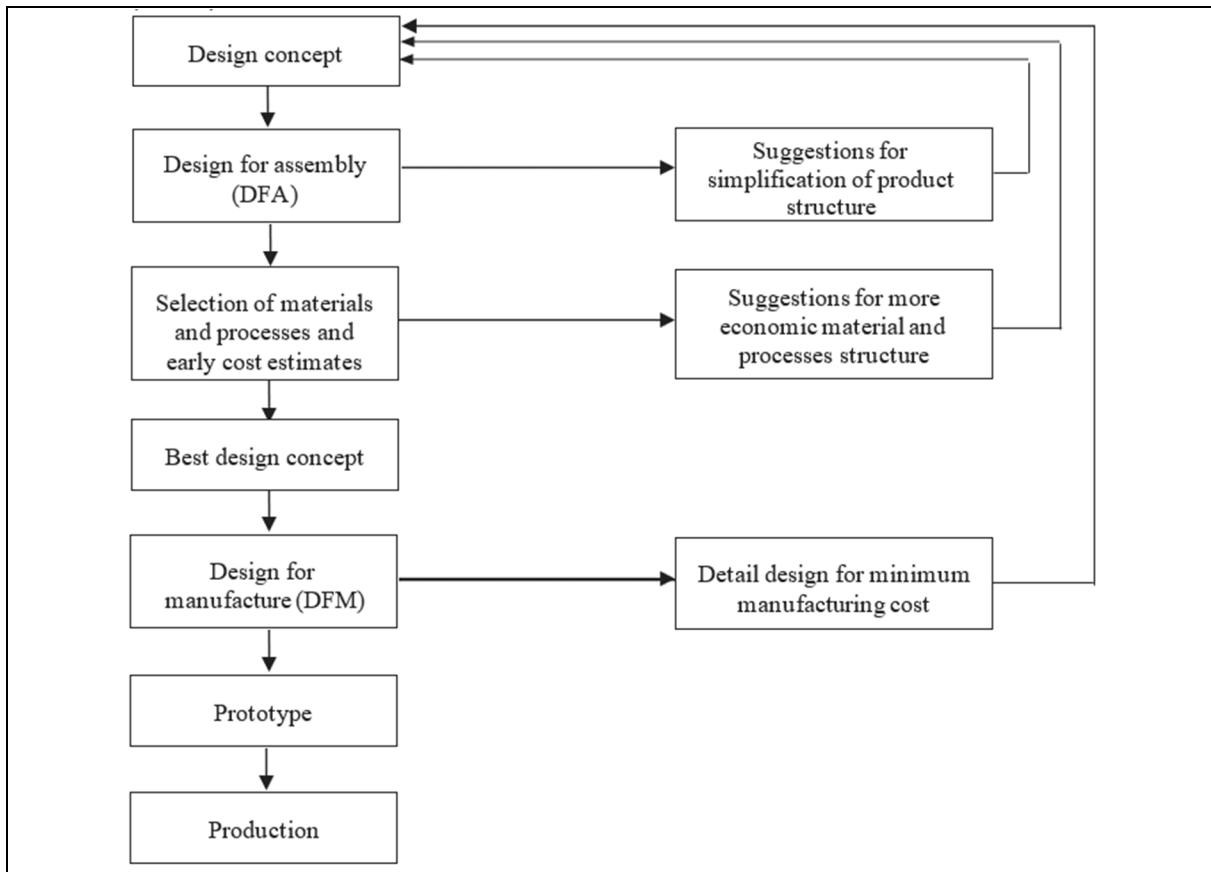


Figure 1.9 Étapes de déploiement du DfMA
Adaptée de Gao et al (2018)

L'utilisation de la CHS offre des potentialités pour une meilleure gestion des projets de construction. Toutefois, cette méthodologie a une faible flexibilité aux changements après la conception. En effet, une fois la fabrication amorcée, tout changement impliquerait un arrêt de la production et une reprise de la conception (Mao, Shen, Pan, & Ye, 2015) causant une augmentation des délais et des surcoûts pour le projet. Cet inconvénient est supplié dans l'industrie automobile par les phases de test avant le lancement de la production. Malheureusement l'unicité des projets en construction rend impossible le recours aux phases de test avant le lancement de la production comme dans l'industrie automobile. Azhar (2011) affirme qu'en modélisant virtuellement l'ouvrage, la coordination des maquettes des corps de

métiers, la détection des conflits et la résolution des demandes d'information lors de l'utilisation du BIM aideraient à annuler les modifications lors de la construction.

Aussi pour Bryde, Broquetas, & Volm (2013), l'utilisation du BIM permettrait de s'assurer qu'il n'ait pas besoin de modification une fois la conception terminée, ce qui pallierait au manque de flexibilité de la CHS. Ainsi l'utilisation combinée de la CHS et du BIM est avantageuse. Néanmoins, Sardén & Engström (2010) montrent que ce type de gestion crée des risques dans la gestion de projet. En effet, en travaillant ensemble, le partage de responsabilités entre les acteurs change. La conception n'est plus seulement la responsabilité de l'architecte mais de toute l'équipe, notamment du constructeur et du fabricant de composant préfabriqué dont les rôles sont essentiels dans la conception (Brege, Stehn, & Nord, 2014).

En somme, l'utilisation de la CHS transforme l'organisation, les moyens et acteurs impliqués de la conception à la réalisation de projets. Cette méthode de construction aide à réduire les incertitudes et les reprises dans le projet. Pour arriver à ces bénéfices, des conditions préalables doivent être remplies telles que le recrutement des constructeurs et des fabricants dès la conception et l'utilisation de contrats collaboratifs.

1.3.2.3 Le coût de construction

Le dépassement des coûts est un problème récurrent dans les projets de construction que l'utilisation de la CHS devrait aider à solutionner (Kenley, Kanjanabootra, Ouyang, & Wynn, 2012). Cette affirmation fait toutefois l'objet de controverse. Blismas & Wakefield (2009), Sun et al. (2020) et Rahman (2014) citent le coût de construction du projet comme barrière à l'utilisation de la CHS dans leurs investigations sur les freins à l'utilisation de la CHS. En effet, selon certains chercheurs, les avantages de l'utilisation de la CHS que sont la réduction du temps de construction, la réduction des immobilisations (main d'œuvre, matériel, espaces) au chantier et la réduction des reprises sur le chantier, entraînent des économies de coût dans le projet ((Durdyev & Ismail, 2019), (Gao et al., 2018), (Gibb & Isack, 2003), (Mao et al., 2015)).

Cependant, ces gains sont perçus pour l'ensemble du projet et ne sont pas toujours quantifiables. Par exemple, lorsque les reprises sont réduites et le temps de construction est respecté dans un projet, le client n'a pas de budget supplémentaire à investir et les constructeurs peuvent se tourner vers d'autres projets plus rapidement, mais ils ne réalisent pas d'entrée financière supplémentaire, ce qui peut limiter leur perception du gain réalisé. Gibb & Isack (2003) dans leur étude sur l'avis de gestionnaires de projet sur la CHS, montrent que malgré la réduction des coûts préliminaires, du temps de construction en saison d'intempéries et la réduction de 10% des immobilisations sur le chantier, peu de clients ont perçu le coût comme une raison favorable pour utiliser la CHS à l'avenir.

Selon Kenley et *al* (2012), les clients perçoivent plus aisément la réduction sur les éléments de coûts tels que les coûts pour la conception, les coûts de production, les coûts de logistique (grutage, transport), que le surcoût occasionné par les délais du projet ou le coût des immobilisations. Aussi, dépendamment des pays, ces coûts d'opération peuvent créer des gains ou des pertes. Dans un marché où la main-d'œuvre représente un coût élevé comme à Hong Kong ou en Australie, la réduction du coût de la main-d'œuvre peut entraîner un gain financier notable (Kenley et *al.*, 2012). De même, dans un environnement où il y a une pénurie de main-d'œuvre comme au Québec, la réduction du coût de la main-d'œuvre occasionne des gains. Ce gain sera toutefois relativement bas dans un environnement où il y a une main-d'œuvre abondante et abordable. La diminution des coûts liés à la CHS ne sera donc pas significative comparativement aux autres coûts d'opération. Ainsi la réduction des coûts dans les projets préfabriqués n'est pas systématique, mais dépendante des processus qui, s'ils ne sont pas pris en considération, peuvent-être à l'origine d'erreurs et de pertes (Gbadamosi et *al.*, 2019).

Selon Ishikawa (1962) les causes d'un problème peuvent s'articuler autour de cinq catégories ou les 5M : méthode, matériel, matière, moyen et main-d'œuvre. En transposant cette théorie à l'estimation du coût de construction pour comparer les méthodes traditionnelles avec la CHS, il faudrait comparer ces cinq facteurs entre eux. Ainsi, la comparaison entre les coûts basée sur les coûts de main-d'œuvre et d'opération ne prend pas en compte les autres critères qui

influencent le coût de construction, (Kenley, Kanjanabootra, Ouyang, & Wynn, 2012) elle est donc incomplète.

Le *Construction Industry Institute* (CII) estime qu'entre 25 et 50 % des dépassements des coûts de construction sont dus à des erreurs de communication entre les acteurs impliqués dans la conception et la construction de projet. Ainsi le coût de construction d'un projet utilisant une stratégie préfabriquée peut être plus élevé qu'un projet réalisé entièrement sur site, à cause des défis de communication et de collaboration entre les acteurs impliqués dans le projet. Lors d'une analyse des stratégies de préfabrication utilisées dans différents pays, Carbone et *al.* (2020) montrent que la réussite du projet préfabriqué repose sur une collaboration entre les parties prenantes et des processus de coordination systématiques depuis la conception jusqu'à la construction. La collaboration et la communication pourraient être améliorées par l'utilisation d'outils numériques comme le BIM (Boton & Forques, 2019).

1.3.2.4 L'intégration numérique et la CHS

Selon Sardén & Engström (2010), les processus traditionnels de construction sont source d'incertitudes, tandis que l'utilisation de processus de gestion inspirés par le manufacturier aideraient à surpasser ces incertitudes. L'une des stratégies à adopter de l'industrie manufacturière est l'utilisation d'outils technologiques (Goulding et *al.*, 2015), particulièrement les technologies de l'information (Staub-French et *al.*, 2018). Les outils technologiques applicables dans la construction (figure 1-10) comprennent entre autres l'internet des objets (IoT), la simulation ou réalité virtuelle, l'infonuagique, la fabrication additive ou impression 3D, l'utilisation des robots autonomes, la réalité augmentée, des technologies mobiles, le Big Data et le BIM ((Gerbert, Castagnino, Rothballer, Renz, & Filitz, 2016), (Razkenari et *al.*, 2019)). Le déploiement du BIM est l'approche technologique la plus en vue pour impacter l'industrie de la construction tant à l'échelle mondiale qu'au Québec (Poirier et *al.*, 2018).

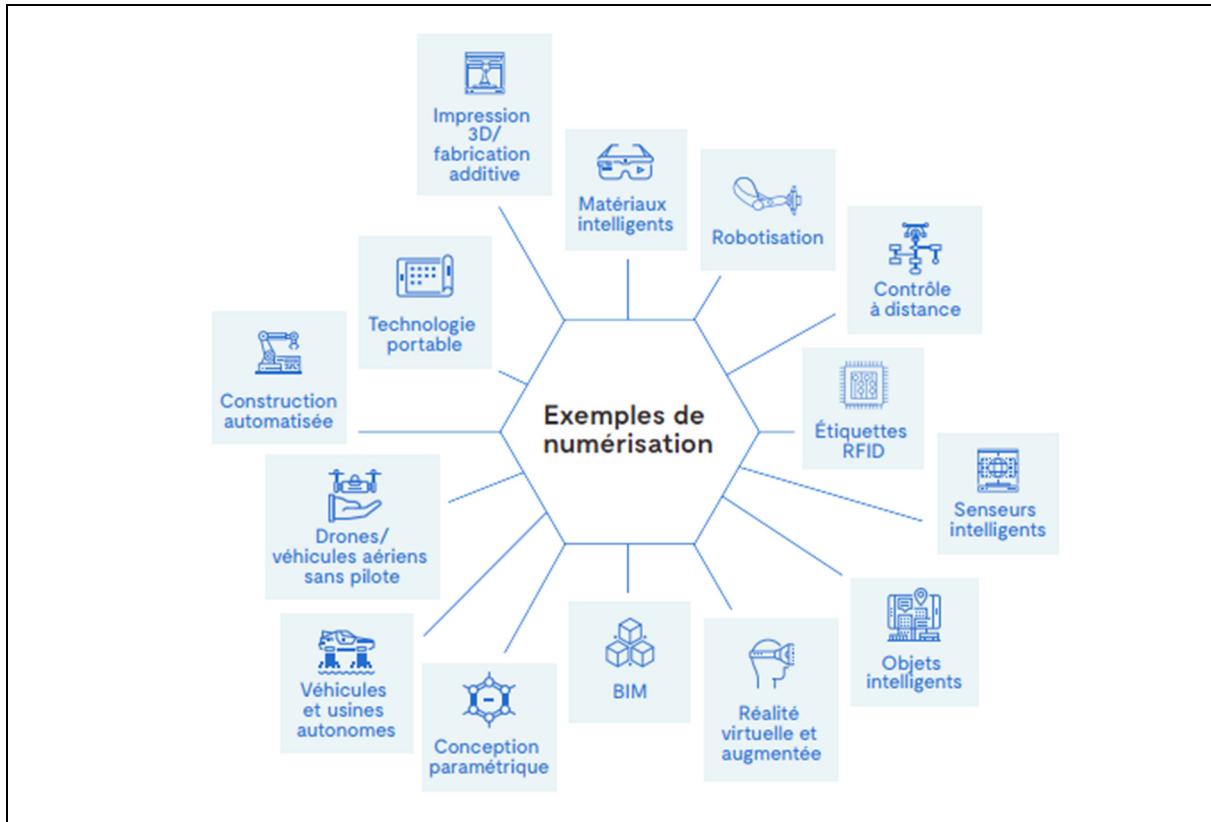


Figure 1.10 Technologies de l'industrie applicables à la construction
Tirée de Poirier et al (2018)

Selon la norme ISO 19650-1 le BIM (encore appelé modélisation d'informations de la construction), est l'utilisation d'une représentation numérique partagée d'un actif pour faciliter les processus de conception, de construction et d'exploitation. Plus qu'une technologie de visualisation, le BIM est aussi une méthodologie et un mode d'organisation de travail comme le désigne BIMeInitiative :

“Building Information Modelling is a set of technologies, processes and policies enabling multiple stakeholders to collaboratively design, construct and operate a facility in virtual space.” (bimdictionary.com)

Ainsi l'approche BIM de la construction réunit trois composantes : la technologie, des processus de gestion optimisés et une organisation collaborative du travail. Les divers usages du BIM comprennent entre autres l'estimation du coût de projet, l'analyse des performances énergétiques, la simulation de la construction et autres (Kenley et al., 2012).

Dans l'approche BIM, l'ensemble des activités du projet s'organise autour d'une maquette numérique qui permet de modéliser en trois dimensions les caractéristiques physiques et les informations nécessaires durant le cycle de projet de l'actif envisagé ((Anumba et al., 2012), (Tang, Chong, & Zhang, 2019)). Cette gestion centralisée est favorable à l'intégration de systèmes préfabriqués dans les projets car en effet, les études de Carbone et *al.* (2020) et de Gibb et Isack (2003) montrent qu'un environnement de collaboration est propice à l'utilisation de la CHS. Mostafa et *al.* (2018), ont questionné des professionnels en Australie et ont démontré que la maquette BIM dans les projets préfabriqués permet un échange transparent et simplifié entre les acteurs. Ces technologies facilitent aussi la collaboration associée à un environnement de partage, aident à établir des relations de collaboration efficaces entre les différentes parties prenantes ((Rezgui et *al.* 2013); (Nath et *al.* 2015)).

Grâce à cet outil technologique, les différents acteurs ne travaillent plus dans des environnements propres à chaque entreprise mais dans un environnement partagé de projet. Ainsi par les outils technologiques déployés, le BIM faciliterait l'utilisation de la CHS qui nécessite une collaboration en rassemblant virtuellement les acteurs et les informations nécessaires. En plus d'aider à la collaboration, le BIM sert d'outil d'aide à la décision durant le cycle de vie d'un projet (ISO 19650-1). Comme l'approche BIM organise l'ensemble des informations et activités du projet autour de la maquette numérique, il est possible par cette construction virtuelle de l'ouvrage, de simuler son fonctionnement. A partir de cette simulation, il est possible d'analyser les performances de l'actif construit par rapport aux objectifs prévus et de prendre les décisions nécessaires pour corriger les erreurs éventuelles.

En plus de l'analyse des principaux axes de recherche explorés par la littérature sur la CHS, à partir des articles sélectionnés lors de l'analyse scientométrique et par un processus de

recherche (*backward et forward snowballing*) nous avons recensé et résumées les barrières à l'utilisation de la CHS dans la littérature dans la section suivante.

1.3.3 Barrières à l'adoption de la CHS

Les barrières ou contraintes limitant l'utilisation de la CHS ont été l'objet de recherche de plusieurs auteurs, notamment Gibb & Isack (2003), Blismas & Wakefield (2009), Rahman (2014), Mao et al. (2015), Abanda et al. (2017) et Han & Wang (2018). Mao et al., (2015) ont étudié les principaux facteurs qui freinent les promoteurs et donneurs d'ouvrage à utiliser la CHS en Chine. Par une revue des recherches précédentes sur la CHS et des entretiens avec des donneurs d'ouvrage, ils ont identifié 18 barrières. L'analyse factorielle des liens de corrélation entre ces barrières a permis de les regrouper en cinq catégories, à savoir réglementations et politiques gouvernementales, innovation technologique, chaîne d'approvisionnement de l'industrie, coût et demande du marché. Selon les auteurs, la barrière la plus dominante des cinq regroupements est la réglementation et la politique gouvernementale. Han et Wang (2018) complètent cette analyse et présentent la plus récente revue de l'ensemble de la littérature sur les barrières à l'utilisation de la CHS. Par une analyse documentaire extensive, une enquête par questionnaire et des entrevues avec les professionnels ils recensent 35 barrières qu'ils regroupent en cinq grappes. Par la méthode Grey DEMATEL, ils ont montré les liens de cause à effet entre ces barrières. À partir de leur analyse, ils ont identifié 19 barrières causes et 16 effets. En classant les causes par ordre d'importance, ils ont constaté que le manque de réglementation et la résistance de l'industrie sont les deux premières causes de la faible implantation de la CHS dans les projets en Chine. Il est important de noter qu'en Chine, l'État est très impliqué dans les projets ces facteurs pourraient être perçus différemment au Canada.

Larsson, Eriksson, Olofsson, et Simonsson (2014) ont investigué les barrières limitant l'utilisation de la CHS dans les projets d'infrastructures en Suède. Ils ont trouvé neuf

catégories. Le manque d'innovation dans l'industrie et les contrats de type design-bid-build sont les barrières les plus importantes évoquées par les professionnels interrogés.

Kamar, Azman, & Nawi (2014) dans la stratégie malaysienne d'implémentation de la CHS, ont réalisés trois enquêtes en deux ans auprès de contracteurs du domaine. Leur étude a permis de constater que les défis économiques posés par la CHS sont la principale cause de sa faible utilisation. Ces défis comprennent le coût de construction élevé comparé à des projets traditionnels similaires, les importants investissements en amont nécessaires et la difficulté à atteindre l'économie d'échelle attendue. De plus, selon les entrepreneurs interrogés, l'organisation de projet et l'utilisation de la technologie sont décisifs pour le succès de tels projets. Zhai, Reed, et Mills (2014) ont mené une enquête similaire en élargissant les répondants à plus de groupes professionnels, notamment aux concepteurs, entrepreneurs spécialisés et fabricants. Ils ont abouti à dix-neuf barrières regroupées en six catégories, à savoir la constructibilité, le climat social, la performance architecturale, le coût, la chaîne d'approvisionnement et les étapes préparatoires.

En Australie, Blismas et Wakefield (2009) se sont intéressés aux barrières lors de l'investigation sur les futures étapes de l'implémentation de la CHS. Ils identifient neuf catégories de barrières similaires à celles trouvées par Gibb & Isack (2003) en Grande Bretagne et Arig & Egbu (2009) aux États-Unis. Blismas et Wakefield (2009) montrent aussi que l'utilisation de la CHS offre des opportunités pour pallier le manque de main-d'œuvre en Australie, mais l'incapacité des fabricants locaux à répondre à la demande et le manque d'intégration numérique sont des priorités à considérer.

Aux États-Unis, Razkenari et *al* (2020) ont conduit une enquête sur les barrières à l'utilisation de la CHS auprès de professionnels et ont identifié neuf barrières à l'utilisation de la CHS. Par ordre d'importance, ils identifient celles-ci : la réglementation manquante, l'utilisation de la méthode du plus bas soumissionnaire, la résistance au changement, les importants investissements initiaux nécessaires, la difficulté à atteindre l'économie d'échelle, le manque de possibilités de répétition, les risques liés à l'implémentation de nouveautés, la chaîne

d'approvisionnement, le manque d'esthétique et l'impact négatif sur l'environnement à cause des grandes distances de transport. Les auteurs montrent que l'importance de chaque barrière est fonction du rôle du répondant (concepteur, donneur d'ouvrage, entrepreneurs, académique). À partir de l'analyse précédente, Sun et *al* (2020), classent les barrières les plus critiques à chaque étape du projet. Ils remarquent que les questions économiques ne sont importantes que lors de la planification du projet et que les phases de conception et d'assemblage sont les plus contraignantes.

En somme, chacune des recherches sur les barrières à l'utilisation de la CHS a été faite dans un contexte particulier, et les résultats sont peu transférables (Han & Wang, 2018). Rahman (2014) dans une perspective d'identifier des barrières généralisables à des contextes divers, a effectué une recherche de barrières limitant l'utilisation de la CHS en Chine et en Grande Bretagne. Selon Blismas et Wakefield (2009), les contextes de la Grande Bretagne, des États-Unis et l'Australie sont similaires. Ces pays ont des expériences de projets préfabriqués et les gouvernements ont mis sur pied des initiatives pour encourager l'utilisation de la CHS, alors que la Chine a une historique d'utilisation de la CHS plus récente mais avec un grand nombre d'ouvrages construits. Ainsi une analyse des facteurs limitant l'utilisation de la CHS dans ces deux contextes différents donnerait une vision globale du domaine (Rahman, 2014). De cette étude, l'auteur identifie 26 barrières dont l'inflexibilité aux changements de conception de la CHS et les questions économiques sont les plus importantes. Par une analyse statistique, ils regroupent ces barrières en sept catégories selon leur origine, à savoir : les barrières liées au coût, aux compétences et à l'expérience, à la motivation et à la culture, aux outils et aux normes, au marché des MMC, à l'industrie, à l'interface et à la flexibilité, et au type de projets. De plus, les auteurs remarquent que les petites entreprises ont identifié deux fois plus de barrières que les grandes, donc un ratio de 26 à 13. Un autre constat montre que les répondants de l'équipe managériale ont eu des réponses divergentes, tandis que les répondants d'organisations de concepteurs ont eu plus de 19 barrières similaires.

Dans le cadre de notre étude, partant de l'approche de classification de Han & Wang (2018), nous avons regroupé les barrières à l'utilisation de la CHS en six catégories, à savoir : les

barrières économiques, les problèmes dus à la CHS, le manque d'expérience, les contraintes de l'industrie, les barrières légales et les problèmes techniques lors du déploiement de la CHS. Le tableau A-I-1 en Annexe-I p.89 présente plus spécifiquement chaque catégorie, les barrières qui sont comprises dans cette catégorie et les références bibliographiques où elles sont citées.

1.4 Synthèse de la revue

L'industrie de la construction au Québec connaît un retard de productivité comparé au secteur manufacturier au Québec (Conseil du Patronat du Québec, 2016). Une des voies pour y pallier et pour demeurer compétitive dans un marché concurrencé par d'autre pays, est d'inciter l'industrie de la construction québécoise à se transformer en adoptant des stratégies et des outils développés dans l'industrie manufacturière, dont la productivité a augmenté de 10% depuis 2007 (Conseil du Patronat du Québec, 2016). L'intégration des méthodes de production manufacturière en construction s'appuient sur deux leviers : l'utilisation de la fabrication en usine (ou construction hors site) et l'intégration numérique. L'utilisation de la construction hors site dans un projet comparativement à une exécution traditionnellement effectuée entièrement sur chantier permet d'améliorer le suivi de la conformité et qualité de la construction, de minimiser le gaspillage de matériaux et de réduire le temps construction. L'intégration numérique a pour but d'optimiser les processus en faisant communiquer les systèmes et les intervenants de tout l'écosystème du projet (Poirier et *al.*, 2018).

Dans la stratégie de déploiement de la construction hors site dans les projets résidentiels au Québec, le bois est le matériau le plus utilisé. Selon les données du Québec Wood Export Bureau (QWEB) datant de 2019, sur 119 entreprises québécoises spécialisées dans la préfabrication des bâtiments, 80% d'entre elles utilisent des produits en bois. Bien que cette présence semble une voie prometteuse, nous constatons qu'au Québec, l'utilisation de la préfabrication en bois se fait presque essentiellement dans des projets de construction d'unités familiales de logement ou de bâtiments de deux étages tout au plus. Sachant que ces systèmes pourraient être utilisés pour la construction de bâtiment allant jusqu'à six étages, nous nous sommes interrogés sur les barrières limitant l'utilisation de la CHS en bois pour ce type de

projets. A travers une revue de la littérature, nous avons recensé six catégories de barrières à l'utilisation de la CHS que sont : les barrières économiques, celles liées à l'actif préfabriqué, les barrières organisationnelles, les barrières techniques, les barrières légales ou liées au cadre réglementaire et des barrières dues à la culture de l'industrie. Sachant que ces barrières ont été relevées pour des actifs en matériaux divers (béton, acier, bois massif) et que le contexte de l'industrie québécoise de l'ossature légère en bois reste le système le plus utilisé, nous nous sommes interrogés si ces barrières existent aussi au Québec et si ces causes peuvent expliquer la faible utilisation constatée de la CHS.

1.4.1 Objectifs de recherche

Explorer la cohérence des barrières recensées dans la littérature avec les réalités de l'industrie sera l'objectif principal de notre étude. D'autres objectifs spécifiques sont :

- a) quelles différences doivent être prises en compte lors de l'utilisation de systèmes préfabriqués pour la construction unifamiliale à la construction multilogement ?
- b) qu'est-ce qui distingue les projets de moyenne hauteur des projets pour lesquels la préfabrication est actuellement utilisée?
- c) quelles solutions proposer pour permettre une plus grande utilisation de la CHS au Québec?

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

L'exploration de la littérature faite au chapitre précédent, montre que l'utilisation de la CHS dans les projets de construction est peu documentée au Canada et que les analyses des études réalisées dans d'autres pays ne sont pas suffisantes pour expliquer la faible utilisation de la CHS propre au contexte canadien. Dans le cas particulier du Québec, l'industrie compte plus d'une centaine d'entreprises travaillant avec des systèmes préfabriqués mais ces systèmes ne sont déployés essentiellement pour les unités familiales et les petits immeubles. Comprendre les causes qui limitent l'utilisation de ces systèmes lors de la construction d'immeubles de plus grande envergure (un maximum de six étages) est l'objectif de notre recherche.

Cette interrogation a conduit à d'autres questions sous-jacentes notamment :

- a) qu'est-ce qui distingue les projets de moyenne hauteur des projets pour lesquels la préfabrication est actuellement utilisée?
- b) quelles solutions proposer pour permettre une plus grande utilisation de la CHS au Québec?

Pour répondre à ces questions, nous avons adopté l'approche méthodologique de l'étude de cas. Ce chapitre expose une description de l'approche méthodologique adoptée, ses étapes, les instruments de collecte et d'analyse des données, ainsi que quelques considérations éthiques.

2.1 **Approche méthodologique de recherche : étude de cas**

Une approche méthodologique de recherche est l'outil qui, selon Gérard (1998), permet de répondre à la question de recherche. Pour répondre aux questions de recherche, nous proposons l'étude de cas car l'utilisation de la CHS au Québec a été peu documentée. L'étude de cas permet d'explorer et de comprendre de manière intensive des phénomènes récents, non compris ou non examinés (R. Yin, 2009). Par une analyse intensive d'une seule ou plusieurs unités, l'étude de cas aide à comprendre et à caractériser une plus grande classe d'unités similaires afin de proposer ou de construire une théorie (Gerring, 2004). L'utilisation d'une

telle approche est adaptée lorsque le domaine est peu connu afin de mieux définir un problème, de générer des idées, ou de recueillir des données sur un concept émergent (Astolfi, 1993).

Néanmoins, l'étude de cas comme méthode de recherche ne permet pas la généralisation des résultats qu'elle permet d'obtenir (Kathy, Corbière, & Larivière, 2020). Pour Stake (1994) le fait de rechercher une généralisation pourrait distraire le chercheur des éléments particuliers ou spécifiques qui caractérisent le phénomène étudié. Gagnon (2005) propose de recourir à des méthodes quantitatives de recherches pour pallier à cette faiblesse quant à la généralisation (Gagnon, 2005). Ainsi, il propose une démarche rigoureuse et systématique de mise en place de l'étude de cas où la fiabilité et la validité des données sont démontrées (Kathy et al., 2020). Les auteures Kathy, Corbière et Larivière (2020) montrent que les autres démarches de réalisation de l'étude de cas développées par Stake (1994), Rosenberg et Yates (2007), Martinson et O'Brien (2010) et Yin (2018) s'inscrivent dans les étapes proposées par Gagnon (2005).

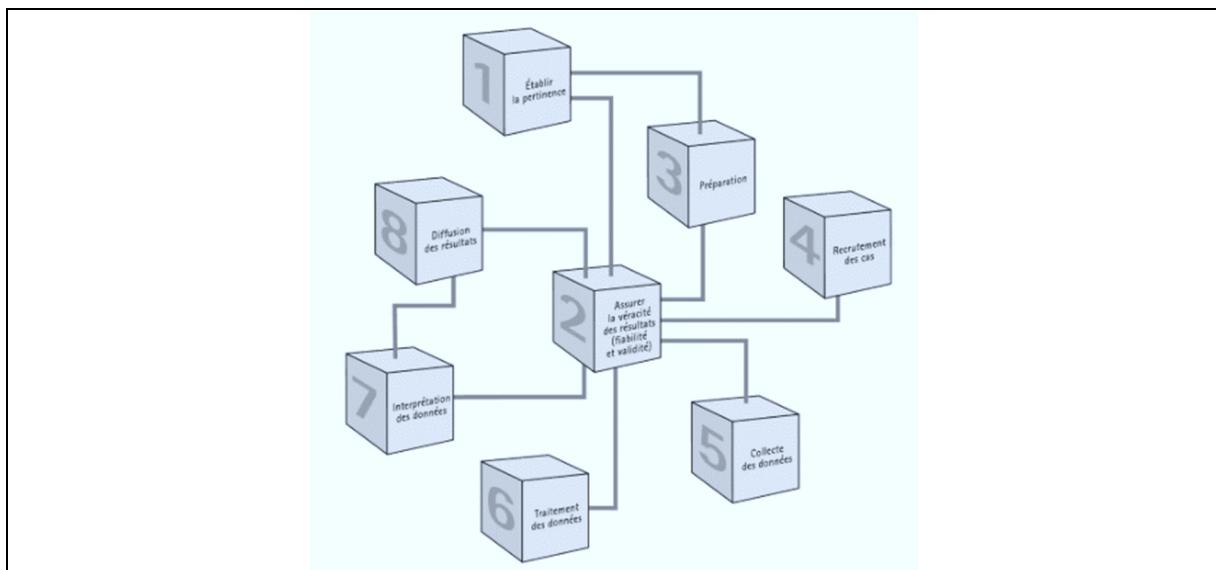


Figure 2.1 Démarche de réalisation d'une étude de cas
Tirée de Gagnon (2012)

En s'inspirant de la démarche développée par Gagnon (2012) et présentée à la Figure 1.1, notre méthodologie a suivi cinq étapes : une revue de la littérature et des meilleures pratiques, le choix du cas à étudié, la collecte et enfin le traitement des données. Une description de chaque étape est donnée dans la section suivante.

2.2 Étapes de réalisation de l'étude de cas

La Figure 2.2 résume les étapes de la démarche suivi. Chaque partie de cette section décrit une ou plusieurs étapes, les activités qui y sont réalisés ainsi que l'objectif visé par chacune.

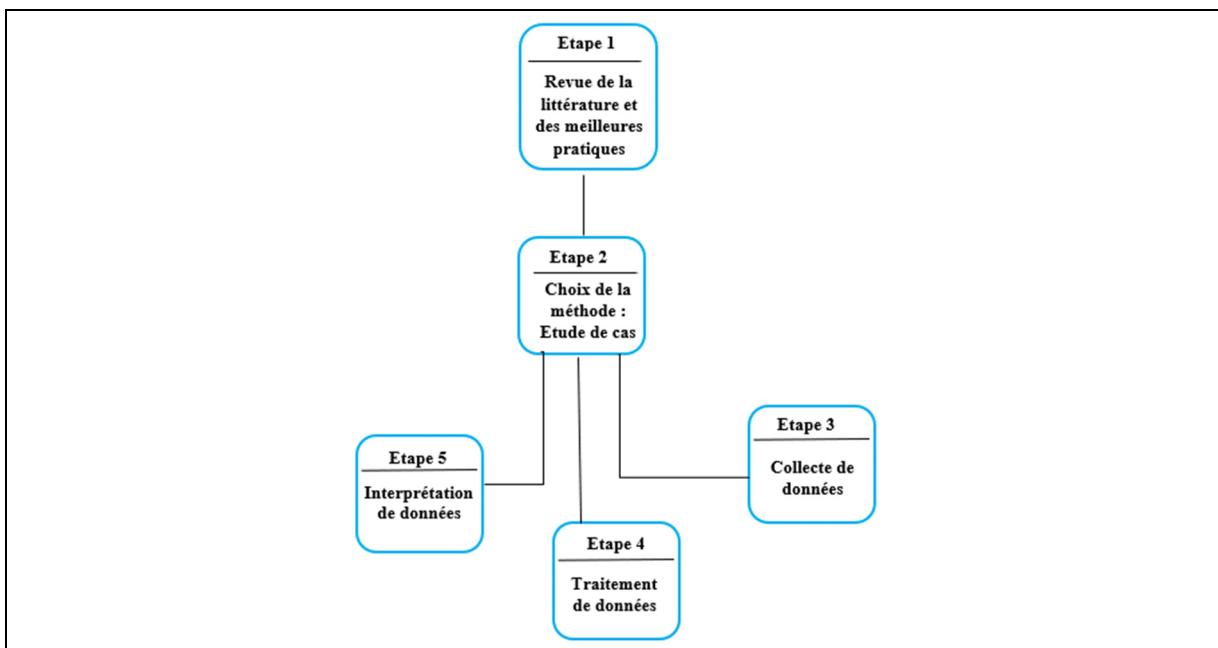


Figure 2.2 Démarche méthodologique adoptée
Adaptée de Gagnon (2012)

2.2.1 Revue de la littérature

Notre recherche a débuté avec une revue de la littérature et des meilleures pratiques, qui a permis d'explorer les innovations dans la construction préfabriquée au cours de la dernière décennie et de mieux cerner le contexte de l'étude. Cette revue des travaux présentée au

Chapitre 1 a mis en lumière les avantages de l'utilisation de la CHS que sont la réduction du temps de projet, la réduction des gaspillages, les économies des coûts d'immobilisations et sa capacité à valoriser des ressources locales. Par cette revue, il a aussi été possible d'identifier les barrières à une plus grande utilisation de la CHS que sont les barrières économiques, les problèmes dus à la CHS, le manque d'expérience, les contraintes de l'industrie, les barrières légales et les problèmes techniques lors du déploiement de la CHS. Il a relevé que l'utilisation du BIM et des technologies de partage contribueraient de relever ces barrières. Toutefois, ces recherches étant effectués dans des contexte différent de celui de notre étude, nous nous sommes tournés vers une étude de cas pour identifier des freins plus représentatifs de notre réalité.

2.2.2 Description du cas

Une fois la méthodologie adoptée, la seconde étape de la recherche est de déterminer le type d'étude cas qui aidera à répondre au mieux à la question de recherche. Yin (2018) classe les études de cas en deux catégories : les études de cas uniques et les études de cas multiples. Kathy, Corbière et Larivière (2020) résument les critères de sélection entre les types d'études de cas. Ce résumé est à la Figure 2.3. Ainsi d'après le but de notre étude d'aller vers un domaine peu exploité, à la vue des ressources et du temps alloué à la recherche, nous avons opté pour une étude de cas unique.

	Etude de cas unique	Etude cas multiples
Buts	<ul style="list-style-type: none"> • Tester une théorie déjà reconnue (Gagnon, 2012). • Etudier un phénomène unique, extrême ou encore peu exploité à ce jour (Yin, 2018). • Etudier un phénomène de façon dans son évolution dans le temps. • Générer des idées sur un nouveau concept ou de prétester un questionnaire (Letrillart et al., 2009). 	<ul style="list-style-type: none"> • Décrire un phénomène, générer ou vérifier une théorie (Benbasat et al., 1987). • Produire une compréhension plus générale d'un phénomène (Benbasat et al., 1987). • Souligner les similitudes ou les différences entre plusieurs cas (Gagnon, 2012). • Etudier des cas se produisant généralement dans des situations variables (Gagnon, 2012).
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de données plus restreint, donc la collecte et l'analyse de données demandent moins de temps et de ressources (Yin, 2018). 	<ul style="list-style-type: none"> • Assurance d'une meilleure confidentialité et de l'anonymat des sujets participant à l'étude (Gagnon, 2012).
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Transférabilité des résultats limitée (Yin, 2018) 	<ul style="list-style-type: none"> • Exigence de ressources et de temps importants due au volume de données recueillies (Gagnon, 2012). • La réplication du processus de recherche à chacun des cas doit être assurée lors de l'étude du phénomène (Yin, 2018).

Figure 2.3 Critère de choix entre l'étude de cas unique et de cas multiples
Adaptée de Kathy et al. (2020)

Le projet qui fera l'objet de notre étude est Innov144. Ce projet convient à notre étude car il recourait à la préfabrication modulaire volumétrique à ossature légère en bois pour la conception et la réalisation de deux immeubles de quatre et six étages au Québec. De plus, la conception du projet n'a pas abouti à sa réalisation. L'analyse d'un tel cas nous a semblé bénéfique pour ressortir les barrières rencontrées à l'utilisation de la CHS dans les immeubles.

2.2.3 Collecte de données

La méthode de l'étude de cas peut utiliser à la fois des preuves quantitatives et qualitatives (Yin K., 2014). Par une collecte de données qualitatives, le chercheur tente de comprendre les phénomènes observés tels qu'ils sont vécus et interprétés par ses acteurs (Roger & Raoul, 2016). Pour cela, il essaie de pénétrer à l'intérieur de l'univers à travers ses acteurs, leurs

pensées, leurs observations et leurs interprétations en rapport avec la situation étudiée. Les données issues de l'analyse qualitative sont étoffées, contextuelles et détaillées (Wahnich, 2006). L'analyse quantitative veut décrire, expliquer, prédire en se fondant sur l'observation de faits ou d'événements. L'analyse quantitative veut établir des corrélations entre les variables en observation. Elle permet la généralisation des résultats et améliore la validité externe d'une analyse qualitative (Teddlie et Tashakkori, 2009). Dans ce projet, nous avons opté pour utilisation complémentaire de ces techniques qui, selon Roger et Raoul (2016), aide à maîtriser le phénomène sous toutes ses dimensions et donne des résultats de recherche supérieurs aux méthodes d'analyse uniques.

Notre approche repose sur trois outils de collecte de données : un examen de la documentation, des entrevues semi-structurées et un questionnaire. L'examen de la documentation concernait les documents de projet mis à la disposition des chercheurs : compte rendu des réunions de conception, plans sommaires du projet, rapport du donneur d'ouvrage sur les projets préfabriqués. Des entretiens semi-directifs ont ensuite été menés pour approfondir le point de vue des acteurs de la conception sur les causes de l'échec du projet. Au total, cinq personnes ont été rencontrées dans le cadre d'entrevues de 45-60 minutes. Ces entretiens se sont déroulés par appel vidéo à cause des restrictions sanitaires en lien avec la COVID-19. Une copie des questions des entrevues est en annexe de ce document (Voir ANNEXE IV p. 105). Enfin, le questionnaire d'enquête avec des professionnels de l'industrie. Ce sondage avait pour but d'élargir le champ de la recherche et de fournir une compréhension plus large de la question de recherche. La comparaison des résultats obtenus auprès de l'équipe de projet avec ceux obtenus d'autres professionnels de la conception permettront de vérifier la concordance des barrières identifiées dans notre cas d'étude avec ceux d'autres projets dans l'industrie ou, au contraire, d'identifier des écarts, de nouvelles interprétations de la situation. Ce sondage permet d'améliorer la validité externe de notre étude. Le sondage s'est fait sur Limesurvey et un lien a été transmis à chaque répondant. Le logiciel aide à assurer la confidentialité et l'anonymat des réponses. Treize réponses ont été reçues.

2.2.3.1 Considérations éthiques

La validation du questionnaire d'enquête s'est faite par le comité d'éthique de la recherche de l'École de technologie supérieure. La politique et les règles en matière d'éthique et d'intégrité en recherche (résolution CA-185-1455) de l'ÉTS reconnaît la nécessité de prendre des précautions particulières lorsqu'il s'agit de recherches ayant notamment recours à des participants humains. À cet effet, une demande de certificat éthique a été produite et approuvée par l'établissement d'enseignement supérieur de la chercheure (ÉTS). Un formulaire d'informations sur le projet et de consentement a été remis à chacune des personnes rencontrées en entrevue par voie électronique. Ce formulaire présente les éléments suivants : le nom des chercheurs de la présente recherche, la source de financement, l'invitation à participer au projet de recherche, la nature du projet, les objectifs du projet de recherche, le déroulement de l'entrevue, les avantages ou les bénéfices pour les participants, les inconvénients ou les risques associés à la participation au projet, les aspects reliés à la confidentialité, la participation volontaire et enfin, le droit de retrait. Afin de préserver l'identité et la confidentialité des participants lors du traitement des données d'entrevues, un code a été attribué à chaque participant suivant le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Intervenants aux entrevues

Abréviations	Rôle dans le projet
GRT	Maitre d'ouvrage
Ing	Ingénieur structure
AR	Architecte
EG	Promoteur + Entrepreneur général
Fab	Fabricant de composants préfabriqués

2.2.4 Traitement et interprétation des données

Généralement, la collecte et le traitement des données se font itérativement (Gagnon, 2012). Comme l'étude de cas utilise des sources de données multiples, (R. K. Yin, 2018) propose de les transcrire dans leur intégralité dans un premier temps, puis de les organiser, épurer et classifier de façon pertinente avant de les analyser. Au cours de notre recherche, les propos recueillis et transcrits ont été classées suivant un codage thématique ou axial. Le codage thématique consiste à attribuer un code à des segments de texte constituant ainsi des unités d'idées (Kathy et al., 2020). Ces idées ont ensuite été regroupées, classées afin de créer des catégories d'idées similaires ou thèmes. À partir de ces thèmes, le chercheur essaie de produire des explications plausibles au phénomène étudié. Le chercheur peut en analyser les relations entre les différents thèmes ainsi que leur concordance avec la littérature. Dans notre approche de recherche, le codage thématique a quatre niveaux : idées (phrases), sous-catégories, catégories et thèmes, comme le montre la Figure 2.4.

Qui Parle	Phrases	Sous-catégories	Catégories	Thèmes
GRT	l'objectif était de réaliser 144 unités			
GRT	il n'y a jamais levé le drapeau pour dire ça va couté			
EG	le prix n'était pas ce à quoi s'attendait le client			
EG	ils commencent ici et après nous on commence là.			
EG	On a confié la tâche de l'estimation au fabricant			
EG	s'assurer que tout se passe bien au niveau de l'asset			
AR	le préfabricateur fournit un prix			
GRT	le principal le joueur est le fabricant			
GRT	rapports entre les sous-traitants et l'entrepreneur gé			
	l'entrepreneur général/ le promoteur changent de rôle			
Ing	Le fabricant ne veut pas être gérant de construction			
EG	ce n'est pas rentable			
AR	composantes du projet qui relevait du pré fabricant			
EG	le risque était grand pour chacun.			
GRT	Il y'a un partage de responsabilité			
Ing	tout le monde devrait être responsabilisé de la même			
Ing	faire un organigramme décisionnel			
		attentes des autres		
			Responsabilités du fabricant	
		Changement par rapport au mode classique		
			Partage de responsabilités	Impact sur les autres acteurs

Figure 2.4 Codage thématique des entrevues
Tirée de l'ANNEXE II p 99

2.3 Limites de la méthode de recherche

La méthodologie utilisée dans le cadre de ce projet de recherche présente certaines limites. Premièrement, l'étude de cas est une méthode ne s'appliquant qu'à des contextes spécifiques

et ses résultats ne peuvent donc pas être généralisés. Pour pallier à cette faiblesse, nous avons eu recours à une enquête complémentaire à l'étude de cas unique. De plus, le projet étudié est un projet résidentiel, les barrières à sa réalisation ne seraient pas généralisables à tout type de bâtiment en hauteur. De plus, l'utilisation de données qualitatives recueillies lors des entretiens individuels rend subjectifs les résultats, car ceux-ci sont issus d'opinions, non de faits reproductibles. Il y a de fortes chances que si les entretiens avaient été repris une semaine ou un mois plus tard, certaines des réponses auraient été différentes. Pour ce qui est des données quantitatives obtenues par le questionnaire, les limites se situent principalement au niveau de l'honnêteté et de la compréhension des répondants. Enfin, l'interprétation des résultats des différents instruments de collecte demeure subjective et ne peut donc pas être considérée une affirmation.

CHAPITRE 3

ETUDE DE CAS

L'objectif de ce travail de recherche est de comprendre les barrières qui freinent l'utilisation de la construction modulaire volumétrique en ossature de bois légère pour les projets d'immeubles de moins de six étages au Québec. L'exploration de la littérature ne nous a pas permis de trouver des barrières propres à notre contexte ou d'exemples similaires qui permettraient d'expliquer la faible utilisation actuelle des systèmes préfabriqués. Ainsi, nous avons opté pour l'étude du projet Innov144, dans la ville de Québec, conçu avec un système modulaire volumétrique à ossature de bois légère. À cause des restrictions sanitaires liées à la pandémie de COVID-19, ces investigations se sont faites par des entrevues en vidéoconférence. Les entrevues se sont déroulées avec cinq membres de l'équipe de conception du projet et chaque entrevue une durée approximative de 45-60 minutes. A la suite de ces entrevues, une enquête auprès d'autres concepteurs et professionnels de la construction préfabriquée a été réalisé. Ceci, afin de valider la pertinence des barrières identifiées par l'analyse des entrevues. Ce chapitre résume les caractéristiques du projet Innov144 ainsi que les causes suggérées par les personnes interviewées à sa non-réalisation. Aussi, nous présenterons les points de vue d'autres professionnels sur les barrières à l'utilisation de la CHS dans les projets d'immeubles et nous terminerons par une analyse comparative des barrières recueillies dans notre étude à celles recensées dans la littérature.

3.1 Présentation du projet Innov144

3.1.1 Description du projet

Le projet Innov144 est situé sur la rue Gabriel-Lajeunesse à Beauport, entre un organisme du service public (CIUSS) de la Ville de Québec et la résidence pour retraités les jardins d'Évangéline. Il est aussi à proximité d'un passage piéton du côté sud-est, de pistes cyclables et des commerces qui sont à moins de 400m côté nord-est. Cette situation géographique du projet près de lieux de service peut créer des enjeux de respect de l'environnement tel le bruit

et les délais de la construction. La Figure 3.1 présente une vue aérienne du site tirée de l'application Google Map, ainsi qu'une empreinte du bâtiment envisagée et la position des édifices adjacents.

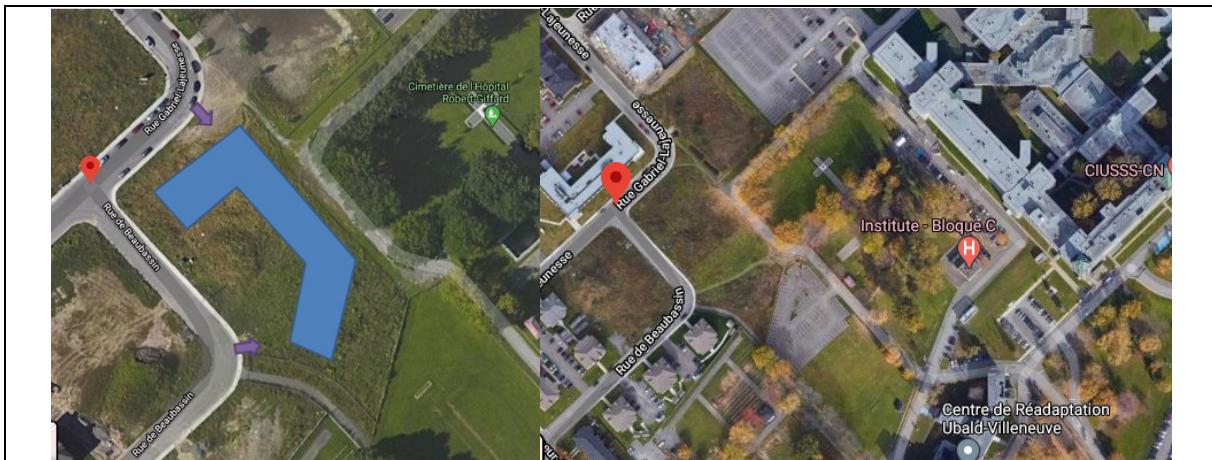


Figure 3.1 Vue aérienne du site du projet Innov144

Le projet prévoyait la construction de 144 unités de logements communautaires répartis dans deux immeubles de quatre et six étages chacun pour répondre au besoin en logement dans le secteur. Les besoins en logement de ce secteur habité par des personnes seules, des familles et des ménages à faible revenu (Gouvernement du Québec, 2015) a conduit à la conception d'une pluralité d'unités notamment des logements ayant une chambre ($3^{1/2}$), deux chambres ($4^{1/2}$) et trois chambres ($5^{1/2}$) chacun. La construction de ces immeubles a été envisagée en deux phases. Dans la suite de notre étude, nous désignerons par Innov144, la deuxième phase de ce projet qui est celle que nous étudierons lors de cette étude.

Le projet est un bâtiment de six étages qui se ramène à quatre étages en façade de la rue Gabriel-Lajeunesse. Selon le compte rendu des réunions de conceptions qui a été mis à notre disposition, ce bâtiment à usage locatif d'une hauteur maximale de 21m (Figure 3.2), comprenait deux étages de stationnements souterrains. Au niveau du rez-de-chaussée, le bâtiment est séparé en deux parties par un corridor. Les deux premiers étages de la partie du bâtiment à six étages comprenaient des salles de réunions et des maisons de ville et tous les

autres étages du bâtiment sont constitués d'appartements. La Figure 3.2 présente un rendu 3D du bâtiment et le plan d'étage du rez-de-chaussée tels que reçus des documents du projet.



Figure 3.2 Rendu projet Innov144 phase 2
Tirée de AR (2019)

Les requis pour le projet Innov144 présentaient quelques particularités, notamment : l'utilisation de la construction modulaire à ossature légère en bois, l'atteinte d'une meilleure efficacité énergétique et le déploiement des outils BIM pour assurer la coordination entre les éléments préfabriqués et la mise en place au chantier. Ces caractéristiques seront plus amplement présentées dans la prochaine section.

3.1.2 Caractéristiques du projet

L'une des spécificités du projet Innov144 est l'usage de la construction modulaire à ossature légère en bois. Ce choix a été motivé par plusieurs facteurs :

- a) respecter l'échéancier de construction qui était court. En effet le début du chantier de construction était prévu à l'été 2020 et l'arrivée des locataires pour l'été 2021 (Accès Logis, 2019).
- b) limiter le travail sur le chantier pour les corps de métier par une organisation de chantier efficace car on a une densité de services proches ce qui limite les zones d'entreposage et représente un défi pour l'approvisionnement (SHQ, 2019).
- c) favoriser le savoir-faire québécois notamment en termes d'innovation technologique.
- d) construire en lien avec l'environnement du projet. En effet, des écoquartiers sont près du site de construction ce qui influença l'équipe de conception à proposer de meilleures capacités énergétiques et environnementales.

Le type de système constructif préfabriqué adopté pour ce projet est une combinaison entre le noyau de service ou pod en bois, les panneaux et les composants. En effet, cette unité préfabriquée renferme, en plus des espaces de services que sont la salle de bains et la salle mécanique, des composants (armoires de cuisine, portes) des raccords de plomberie et des murs préfabriqués. Ce système préfabriqué conçu pour la construction de maisons représenté à la Figure 3.3 comprend des murs préfabriqués isolés à ossature légère en bois, deux garde-robés, une cuisine avec armoires, des luminaires, des réservations pour les appareils électroménagers, ainsi qu'une salle de bain avec bain ou baignoire, toilette, armoires, éclairage, robinetterie et réservation de plomberie. Ce système développé par le fournisseur de composants préfabriqués pour la construction d'unités de logements unifamiliales a été par la suite adapté par les concepteurs du projet Innov144 pour qu'il puisse rejoindre la variété de logements et leur position dans les immeubles envisagés.



Figure 3.3 Image et plan du système préfabriqué initial
Tirée de Fab (2021)

Une autre caractéristique du projet Innov144 est l'utilisation du BIM. À la suite de la phase 1 du projet où la coordination a été enjeu pour les participants, les concepteurs dans la phase 2 ont discuté de l'utilisation du BIM pour limiter cet enjeu de coordination. En plus de la coordination l'utilisation du BIM d'après les documents de projet avait pour but de :

- a) permettre une conception collaborative et plus efficiente,
- b) produire des plans et devis plus précis,
- c) assurer la coordination entre les éléments préfabriqués et la mise en place en chantier,
- d) favoriser l'échange de données dans le projet.

Enfin il avait été envisagé pour la construction de ces immeubles, une meilleure efficacité énergétique notamment l'obtention d'une côte d'indice solaire passif (ISP). L'ISP est un système de reconnaissance du niveau de performance énergétique des bâtiments qui dépassent d'au moins la moitié des exigences de la partie 11 du Code de construction du Québec. La cote ISP reconnaît le haut niveau de performance dès qu'une construction nécessite moins de 50 kWh/m².an (de plancher habitable) en chauffage sur toute une année, pour une unité de logement. Pour arriver à cette performance, les propositions suivantes étaient en discussion:

- a) l'installation d'un chauffage passif qui permet de profiter des gains solaires et de la chaleur provenant des eaux grises ce qui a pour effet de réduire le temps de chauffage de l'eau.
- b) l'utilisation d'un système de ventilation récupérateur de chaleur,

c) l'optimisation de la fenestration et la réduction des ponts thermiques.

3.1.3 Organisation de l'équipe de projet

La gestion de projet s'est organisée en mode conception-construction (*design-build*). C'est-à-dire que le client octroie un contrat unique pour la conception et la construction de l'ouvrage à un intervenant : ici, le promoteur. Le client dans ce projet a été assisté par deux organismes (SHQ et la ville de Québec) nommé ici consultants. De plus, pour faciliter la gestion des équipes du projet, le client a proposé une gestion en type processus de conception intégrée (PCI). La réalisation de projet à travers le PCI en intégrant tous les participants dès la planification du projet réduit les incertitudes et risques dans le projet. Le PCI abandonne le travail en îlots isolés et successifs pour un processus de conception collaboratif, itératif et multidisciplinaire (Forgues & Dionne, 2015). Le travail devient alors coopératif c'est-à-dire que les choix conceptuels sont adoptés par un consensus de toutes les parties prenantes et chaque membre de l'équipe partage les responsabilités quant à la solution proposée, contrairement au processus traditionnel qui attribue à une seule personne la responsabilité de la conception (Forgues & Dionne, 2015). Cette approche offre une meilleure capacité à répondre aux besoins du client par la participation de tous et l'optimisation itérative de la solution conceptuelle ((Jobidon et al., 2019); (Rumane, 2016); (El Asmar et al., 2013)). La figure ci-dessous décrit l'organisation de l'équipe de conception du projet:

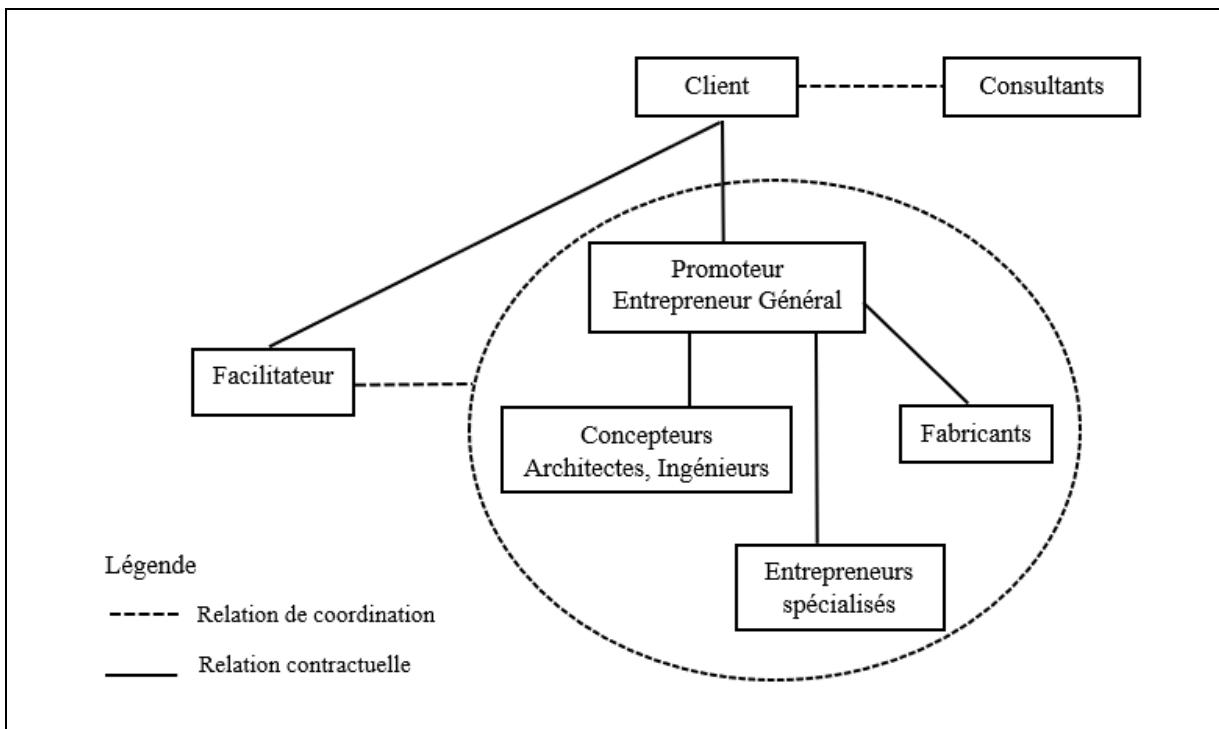


Figure 3.4 Organisation de l'équipe de conception Innov144

Dans la suite, nous présenterons un résumé des entrevues qui avaient pour but d'identifier les barrières recensées à l'utilisation de la CHS.

3.2 Résultats des entrevues

Après la transcription et l'analyse des entrevues, un consensus ressort des propos exprimés par l'ensemble des répondants : l'estimé élevé du coût de construction pour le projet a été le frein majeur à sa réalisation. De plus, d'autres barrières s'ajoutent à cet enjeu économique. Il s'agit de barrières liées à l'actif préfabriqué, les barrières organisationnelles, les barrières techniques, les barrières légales ou liées au cadre réglementaire et des barrières dues à la culture de l'industrie. Nous analyserons dans la suite chacun de ces éléments et les relations entre eux.

3.2.1 Barrières économiques

Le coût prévisionnel du projet était plus élevé que le budget du client ce qui a empêché sa réalisation « une mésentente financière a fait échouer le projet » (Ing, AR). Les répondants évoquent deux causes à ce fait : la méthode d'estimation du coût de projet et la marge de profit du projet.

3.2.1.1 L'estimation du coût de projet

L'estimation détaillée d'un projet consiste à évaluer le coût des travaux. Le coût des travaux doit prendre en compte les quantités de matériaux nécessaires ; leurs coûts ; le coût de la main-d'œuvre et le coût des équipements nécessaires à la réalisation de chaque tâche du projet. À partir des plans et des documents de projet, l'estimateur quantifie tous ces éléments et attribue un prix à chaque tâche (Sabol, 2008). Pour ce projet, « la conception architecturale et structurale n'était pas encore abouties pour pouvoir faire une estimation précise » (GRT). Selon l'architecte « On a travaillé ensemble pour optimiser le pod » néanmoins le fabricant n'avait pas assez d'éléments pour « mettre un coût sur la production de ce pod ». Le promoteur admet que leur estimation pour la soumission au client était imprécise.

Aussi, l'estimateur se base sur le découpage du bâtiment en ces différentes fonctions, présenté au Tableau 1.2. Ensuite, à partir de chaque catégorie, il peut définir un prix pour chaque élément du projet. Cependant ici « l'estimateur du promoteur a compté le projet comme si c'était en panneaux préfabriqués alors qu'ici le fabricant fournissait en plus des murs et des fenêtres, le mobilier intérieur et d'autres équipements (plomberie, électricité) » (Ing) ce qui a pu entraîner une double évaluation de certaines lignes de prix. En effet, le fabricant aurait eu une ligne de prix plomberie et le promoteur aussi. Sans un descriptif clair des tâches spécifiques à chacun, il y'a risque de facturation double d'une même tâche.

3.2.1.2 Marge de profit

L'estimation détaillée d'un projet inclue la marge de profit de l'organisation. L'utilisation de la construction modulaire volumétrique en ossature légère en bois est encore faible dans l'industrie (GRT), les entreprises fournissant ce système ont développé un modèle d'affaire basé sur la construction unifamiliale. Dans la construction multilogement, la marge de profit par unité de logement est inférieure de celle dans la construction unifamiliale, mais compensée par le nombre plus important d'unités construits. Ce changement n'a pas été pris en compte par le fabricant dans l'estimation de son système selon l'entrepreneur général qui dit « la côte du fabricant est plus importante que la côte d'un entrepreneur général ». Ainsi, cette différence a une incidence sur le prix du projet.

En plus, le projet comportant de nombreux éléments novateurs inconnus (EG) « l'estimateur de l'entrepreneur a introduit des marges supplémentaires pour tenir compte de ces innovations ». En effet, l'estimateur n'avait pas de références pour estimer ces innovations et a révélé des difficultés à « quantifier réellement ce qui a été fait ». La conséquence est la suivante : « ils augmentent leurs marges de profit pour absorber les imprévus au cours du processus » (Client). Une de ces innovations qui n'ont pas été prises en compte, selon l'ingénieur, est le coût d'opération dû à la production en usine. En effet, la production en usine implique des moyens différents de ceux fait au chantier et les prix unitaires ne peuvent être les mêmes. L'ingénieur souligne ici ce manquement dans l'estimation du coût du projet. À cela l'EG ajoute « l'estimation du travail restant après la fabrication n'est pas clair » et le manque de standard sur les éléments préfabriqués rend impossible de « mettre un coût précis sur ce système, il a fallu s'ajuster ».

3.2.2 Barrières liées à l'actif préfabriqué

En plus, des barrières économiques, l'utilisation de la CHS a induit plus de travail pour les concepteurs ce qui a freiné la réalisation du projet. L'architecte révèle qu'ils ont effectué cinq fois plus d'heures de conception que pour un projet classique mais n'avait pas encore atteint des plans permettant au fabricant d'avoir les dessins dont il a besoin pour la soumission d'un

prix de production. En effet, en plus de la trame architecturale qui est fonction du nombre d'unités d'appartements et des exigences du client, il a fallu trouver comment positionner le pod à différents endroits dans le bâtiment. Pour y arriver à partir du pod initial développé par le fabricant, ils ont développé deux prototypes de pod représentés à la Figure 3.6 en fonction du type d'appartement. Le pod initial représenté à la Figure 3.5 comprend des murs préfabriqués isolés à ossature légère en bois, deux garde-robés, une cuisine avec armoires, luminaires et réservations pour appareils électroménagers, ainsi qu'une salle de bain avec bain ou baignoire, toilette, armoires, éclairage, robinetterie et réservation de plomberie.

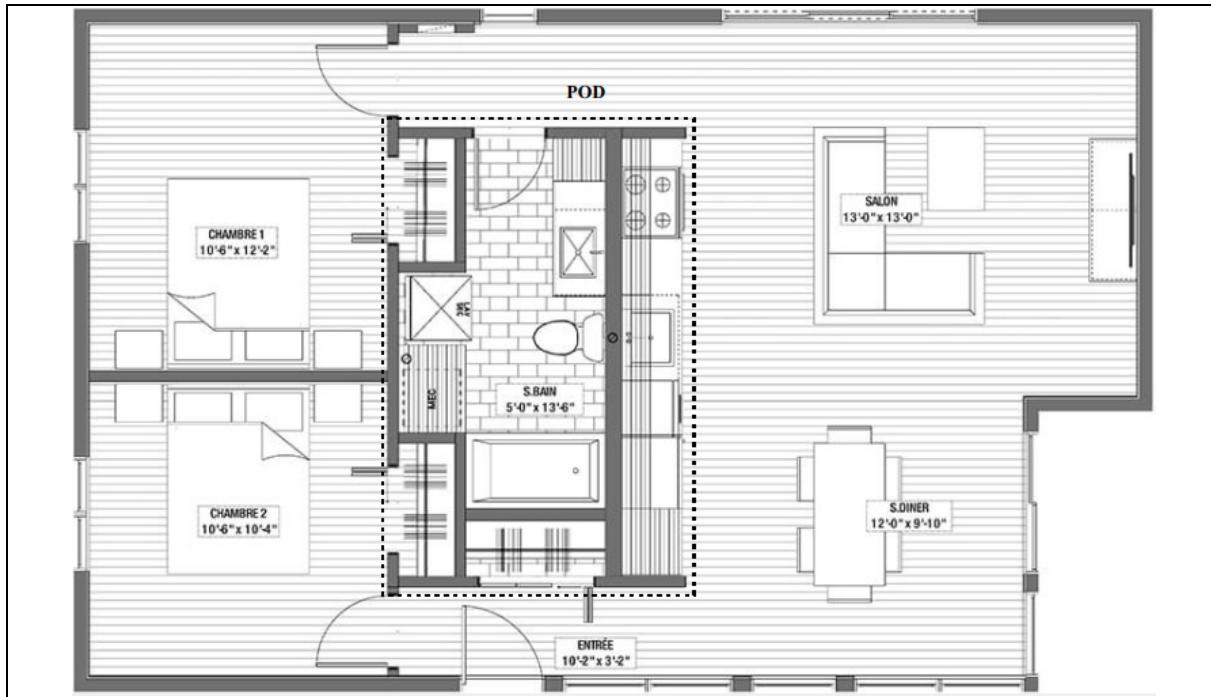


Figure 3.5 Plan unité familiale avec le pod initial
Tirée de Fab (2021)

La configuration de ce pod ne répondait pas aux exigences du projet, il a fallu l'adapter pour les diverses configurations d'appartements du projet. Les nouvelles configurations du pod regroupent, en plus des éléments précédents, une buanderie, un îlot dans la cuisine, le chauffe-eau, l'échangeur d'air, les électroménagers de la cuisine, la salle de bain, et la ventilation des chambres.

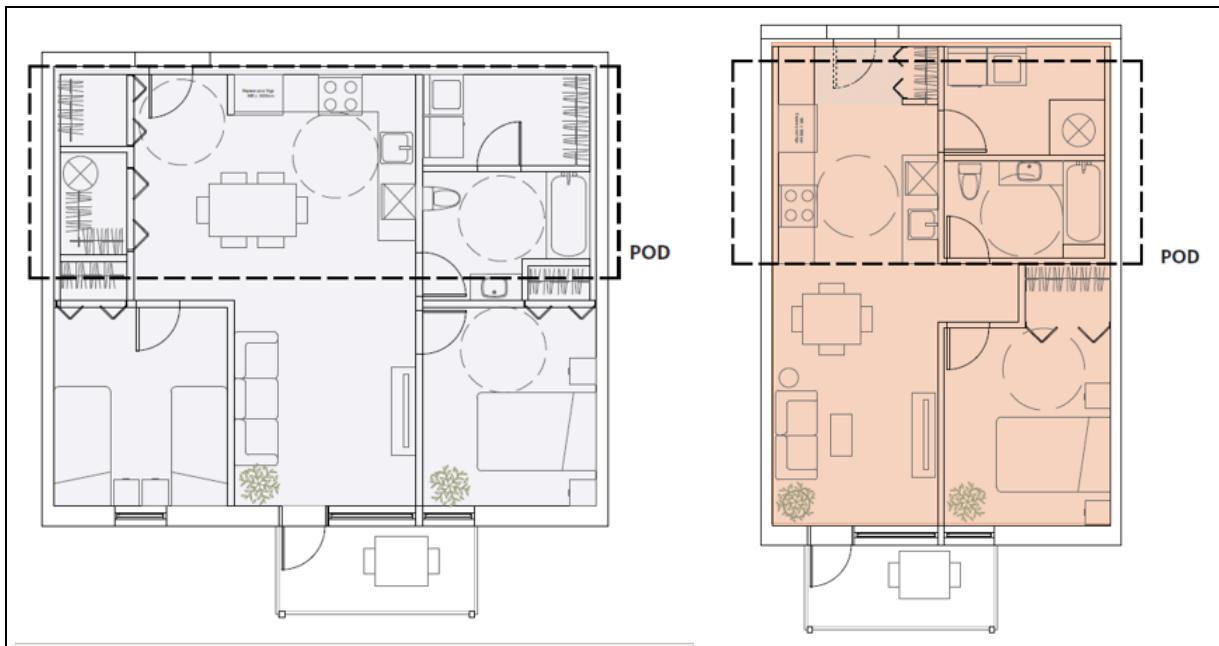


Figure 3.6 Plans sommaire de logement avec pod multilogement
Tirée par AR (2019)

La Figure 3.7 présente un des aménagements du bâtiment avec les appartements conçus avec le prototype de pod multilogement. Ce changement a entraîné une modification de l'esthétique de tout l'ouvrage comme le fabricant précise « projet est passé de très beau projet à deux boîtes carrées ». Ainsi l'utilisation de la CHS implique de nombreux changements qui peuvent limiter son utilisation par les professionnels.



Figure 3.7 Configuration de deux pods multilogement dans un étage
Tirée par AR (2019)

3.2.3 Barrières techniques

3.2.3.1 Combinaison d'innovations

Dans le projet Innov144, en plus de la préfabrication modulaire en ossature légère en bois plusieurs autres innovations étaient envisagées, notamment : une meilleure efficacité énergétique, une meilleure isolation et l'utilisation de la modélisation des données du bâtiment pour assurer la coordination entre la préfabrication et le travail sur le chantier. Aussi, le client s'attendait que « le projet coûte moins cher que des immeubles de même envergure dans le marché » (GRT). Sachant que c'était une première pour l'équipe d'utiliser la CHS pour des bâtiments de six étages, ces nombreuses innovations supplémentaires ont ralenti le processus. Un manque de compréhension des processus à déployer pour répondre à ses attentes est remarqué par le client « ça en fait trop pour une première fois ». Pour l'ingénieur il aurait fallu une analyse de valeur pour pondérer ces innovations et déterminer ce qui est faisable ou pas. Pour l'architecte il aurait fallu pondérer ces objectifs, car les innovations augmentent les risques dans le projet.

3.2.3.2 Adaptations nécessaires pour la préfabrication multilogement

La Figure 1.2 montre que 40% des entreprises l'industrie de la préfabrication font du modulaire volumétrique mais essentiellement ce sont des « PME qui fabriquent des maisons » (GRT). Pour passer à des bâtiments de plus grande envergure certains paramètres doivent être pris en compte, notamment :

- a) la gestion des accès et circulations y compris accès pour chaises roulantes. Comme l'explique l'architecte, dans un projet unifamilial, les circulations sont conçues en fonction du pod, alors que dans ce projet, les stationnements intérieurs prévus aux étages inférieurs ont induit une trame structurelle à laquelle devait correspondre la conception.
- b) la récurrence du pod dans le bâtiment. En effet, un même pod doit pouvoir prendre différentes positions dans l'espace et se répéter à différents étages. Le fabricant fait remarquer que dans un contexte unifamilial ce n'est pas le cas, chaque pod correspond à un style unique de logement. Ainsi, parce que le pod est unique dans le bâtiment, le fabricant n'avait pas envisagé les connexions entre des pods, ni des configurations multiples pour son produit.
- c) les nouvelles connexions du pod au bâtiment, notamment connexion de l'étage courant avec l'étage du dessous, et connexion avec le pod sur le côté n'étaient pas prévues dans le développement initial.
- d) les raccordements des éléments mécaniques sont à revoir car la mécanique nécessaire à une maison et pour des immeubles de 4 à 6 étages est différente.
- e) les caractéristiques spécifiques telle l'étanchéité à l'eau et à l'air, la résistance au feu, l'isolation entre les murs préfabriqués et ceux construits sur site sont à évaluer car le pod n'était pas conçu pour répondre aux standards de la construction d'immeubles (AR, Ing).

« Tous ces éléments inconnus représentent des risques d'échec de projet » (EG).

3.2.4 Cadre réglementaire et mode de réalisation

Le mode de réalisation du projet était un contrat de conception-construction (clé en main), c'est-à-dire que le client n'est lié contractuellement qu'avec un répondant - ici, le promoteur-constructeur. Les membres de l'équipe de conception sont liés au promoteur-constructeur. Les relations contractuelles entre les participants sont illustrées à la Figure 3.8.

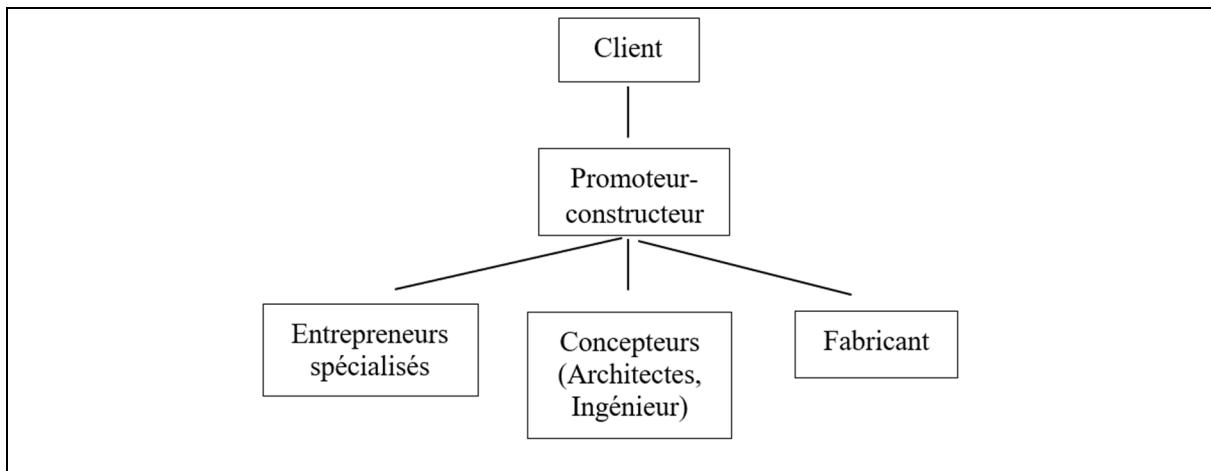


Figure 3.8 Relations contractuelles entre les participants

En revanche dans ce projet, les participants sont unanimes que le principal acteur est le fabricant. L'entrepreneur « a confié la tâche de l'estimation au fabricant »; le GRT complète : « Le fabricant est le principal acteur. Il devait nous avertir sur ce qu'on est capable de faire. » L'architecte souligne aussi « il y avait beaucoup de paramètres de conception qui relevait du fabricant ». Ces relations de coordination et de collaboration entre les participants sont illustrées à la Figure 3.9. La Figure 3.9 et les propos recueillis montrent que dans le projet les relations de coordination ne suivent pas les liens définis par les contrats. En effet, bien qu'un contrat de type conception-construction lie tous les participants, le fabricant est la plaque tournante de la conception. Ce qui d'après Forques et Dionne (2015) restreint l'atteinte d'une efficacité.

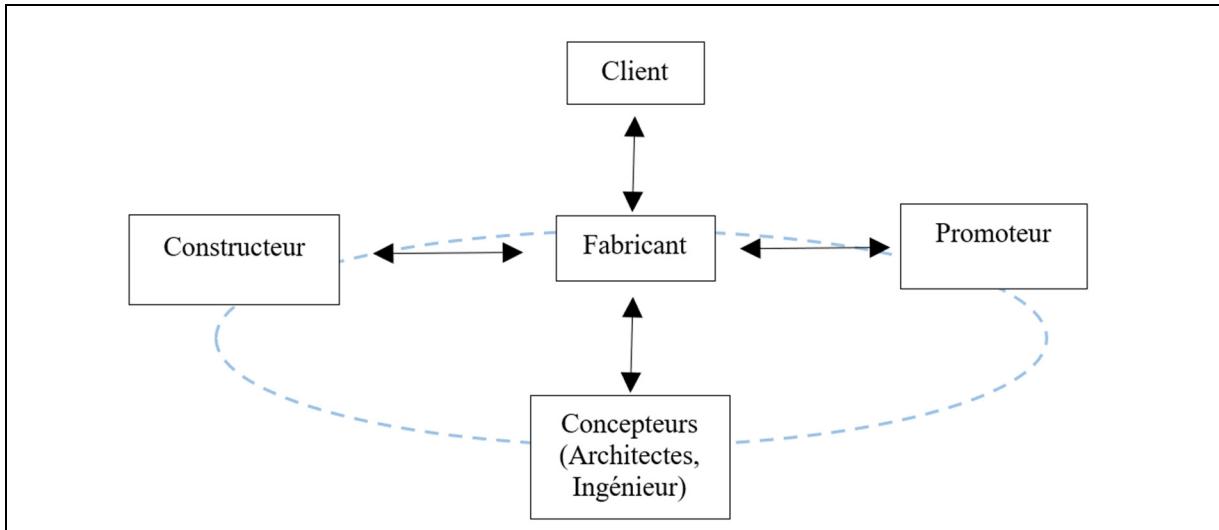


Figure 3.9 Relations de coordination et de collaboration entre les participants

Selon le contrat c'est le promoteur qui devait être le référent de tous les acteurs mais dans la pratique c'est le fabricant qui joue ce rôle. Cette fonction de requérant, change des responsabilités traditionnellement assurées par le fabricant. D'habitude, celui-ci est un fournisseur de produits qui n'intervient qu'en phase de réalisation, donc ne participe pas à la coordination des tâches mais exécute celles qui lui sont attribuées. Donc on peut légitimement s'interroger sur sa capacité à assumer des fonctions centrales, telles que présentées sur la Figure 3.9. Ce manque de considération de l'impact de ce changement peut engendrer des conflits dans la gestion de projet comme le souligne l'ingénieur : « il faudrait un organigramme décisionnel plus adapté »; et le fabricant : « il manquait un intégrateur pour tout coordonner ». En effet, de nombreuses responsabilités supplémentaires étaient attendues du fabricant et l'organisation du projet et les contrats doivent prendre en compte ce changement. Ce changement a causé du souci au fabricant qui s'estime être le seul à devoir porter la responsabilité des tâches effectuées en équipe.

3.2.5 Organisation du projet

Pour s'assurer de la réussite de projet préfabriqué, la collaboration c'est-à-dire une transmission efficace des informations entre les intervenants est nécessaire (Abanda et *al.*, 2017). Pour ce faire, la connaissance des objectifs de projet et le partage des informations seront clés selon les interviewés.

3.2.5.1 Partage d'information dans le projet

Selon l'architecte, le projet Innov144 n'a pas abouti car le budget prévisionnel des travaux n'était pas connu par les concepteurs, tandis que : « en connaissant le budget on peut prendre de meilleures décisions, faire le choix des solutions les plus appropriées ». Cet avis a été appuyé par le fabricant car pour lui les informations de projet tel que le budget, l'échéancier et le descriptif détaillé aident dans la prise des décisions sur la méthode de fabrication et la logistique. Généralement définis dans le programme de projet, dans le projet Innov144 « ces informations n'était pas claires durant la conception » (Ing) et ce manque d'information a contribué à l'échec du projet. L'ingénieur appuie cette hypothèse quand il dit « il faudra clarifier certaines informations de projet notamment le budget et les objectifs avant le début de toute conception ».

Selon plusieurs participants, plus que la disponibilité des informations de projet, « il faudrait un modèle de coordination et de gestion des informations transparente à toutes les étapes » (GRT, AR, Fab). En effet, le fabricant, l'ingénieur et l'architecte ont relevé n'avoir pas disposé d'informations sur l'échéancier du projet tandis que l'entrepreneur général et le client eux disposaient de cette information. Cette information est nécessaire pour planifier la production en usine, et définir un calendrier de production. Bien que les répondants aient travaillé ensemble pour leurs tâches grâce au PCI, le client révèle qu'ils « n'étaient pas au même niveau d'informations » (GRT). On peut donc comprendre l'entrepreneur quand il ajoute : « il faut communiquer efficacement pour que chacun mène sa tâche » (EG).

3.2.5.2 Manque d'intégration numérique

La performance et la collaboration sont supportées par la technologie et une approche interdisciplinaire intégrée de la construction. Ainsi, le BIM est nécessaire en construction car il se définit comme une base de données réunissant les caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment ou d'un actif (Poirier et al., 2018). A travers cette modélisation, le BIM favorise la mise à disposition des informations pour tous dans un environnement accessible à tous. De cette maquette il est possible d'extraire les quantités et documents nécessaires à l'estimation. Parce qu'il centralise les informations dans une base de données, le BIM permet à tout intervenant impliqué en aval d'extraire les informations et les documents nécessaires à la tâche à exécuter et d'être au même niveau d'information que les autres. Le BIM améliore la coordination et la collaboration au sein de l'équipe de projet. Malgré ces bénéfices potentiels, BIM a été utilisé de façon assez restreinte pendant le projet étudié ici.

3.2.6 Synthèse des entrevues

En somme, les barrières recueillies lors des entrevues peuvent être classées en six catégories à savoir :

- a) les barrières économiques,
- b) les barrières liées à l'actif préfabriqué,
- c) les barrières organisationnelles,
- d) les barrières techniques,
- e) les barrières légales ou liées au cadre réglementaire et
- f) les barrières dues à la culture de l'industrie.

Le Tableau 3.1 présente ces barrières ainsi que les propos dans le codage d'entrevues qui les soutiennent.

Tableau 3.1 Barrières à l'utilisation de la CHS recensées lors des entrevues

Catégories	Barrières recueillies lors des entretiens
Économiques	Si l'on transfère la majorité des coûts du projet chez un sous-traitant d'usine (fournisseur de mur, plancher, d'éléments préfabriqués), on vient d'augmenter environ de 20% les coûts de notre projet
	Mésentente financière de l'ordre de 5% du coût prévisionnel avec le budget
	Il faut une analyse de la valeur des décisions prises lors de la conception
	Les innovations impliquent des surcoûts,
	Le financement d'accès-logis devraient tenir compte du coût des éléments novateurs
Liés à l'actif préfabriqué	On avait plus de travail à cette étape de la conception que pour un projet traditionnel (AR)- Besoin de plus de temps de conception (EG)
	La maquette n'était pas assez aboutie pour fournir les éléments nécessaires au fabricant- la conception en équipe est nécessaire
	Manque de données sur l'assemblage
	Le projet est passé de très beau projet à 2 boîtes carrées
	On a beaucoup travaillé pour être capable d'avoir un pod qui puisse se placer à différentes places dans le bâtiment.
Manque d'expérience	Manque d'expérience des fabricateurs (Le pod se développait pendant le projet-AR).
	Il y'a un manque de compréhension sur comment fonctionne cette industrie.
	L'estimation s'est faite selon les standards de la préfabrication en panneau
	Il faut de la communication pour que chacun mène sa part.
	Beaucoup d'incompréhension et d'informations manquantes
	S'assurer que tout se passe bien au niveau de l'assemblage
Culture dans l'industrie	Accès logis est à risque tous les projets ne se réalisent pas- difficile de vouloir être novateur dans un contexte de programmes normés gouvernemental très rigide.
	Le promoteur connaissait le gabarit économique de nos projets.
	Ils ne comprenaient pas comment fonctionnent cette industrie (ING)
	Ce n'était pas un projet standard - éléments innovants inconnus.
	Combinaisons d'innovation
	Coûte moins cher que dans le marché
Cadre réglementaire	Pas de cadre réglementaire pour encadrer toutes ces innovations maintenant et crainte pour les conséquences futures
	Manque de connaissance du fabricant
	Responsabilités pas clairs
Organisation du projet	Manque de budget défini au départ
	Tout le monde devrait être responsabilisé de la même façon
	Faire un organigramme décisionnel
	L'estimation s'est faite selon les standards de la préfabrication en panneau
	Il faudrait un mode de réalisation adapté assurant une certaine transparence
	Besoin de plus de temps de conception

Pour réaliser une analyse synthétique de ces résultats obtenus lors d'entrevues, nous en ferons une comparaison avec les barrières recueillis dans la littérature. Cette comparaison (résumée ANNEXE III p.101) montre que toutes les barrières relevées dans la littérature ont aussi été trouvées pendant notre étude de cas. De plus, une nouvelle catégorie de barrière a émergée, l'organisation du projet. Concernant l'organisation du projet, les entrevues ont révélé que le manque d'informations a été déterminant pour l'échec du projet. Les barrières comprises dans cette catégorie concernent les outils de communication et les moyens de coordination entre les acteurs. Les autres barrières trouvées dans la littérature sont bien présentes dans les barrières recensées dans l'étude de cas. Pour les barrières économiques, le coût élevé de la construction, les difficultés de financement et l'analyse de valeur versus coût sont les éléments relevés dans la littérature et s'ajoute la combinaison d'innovations dans le projet Innov144. Ainsi, le coût élevé comparativement à une construction traditionnelle est une barrière à l'utilisation de la CHS au Québec. Il est nécessaire d'analyser ce coût pour déterminer quels sont les éléments de coût qui changent en utilisant la CHS.

Sur le plan technique ou les barrières liées à l'actif préfabriqué, sachant que le projet s'est arrêté en phase de conception, seules les barrières à cette étape ont été recensées concernant l'actif. Les barrières relevées lors des entrevues sont : la plus longue durée de conception, la nécessité de passer de la conception en îlot à une conception en équipe, les difficultés concernant la répétitivité de l'actif et l'esthétique du bâtiment. Le manque d'expérience est aussi une barrière partagée par les intervenants. En effet, le manque de connaissance du fabricant de la construction multilogement (particulièrement des moyens d'assemblage et le manque de connaissance des autres participants des spécificités de la préfabrication modulaire) n'ont pas facilité la conception. Selon la littérature, ce manque d'expérience est dû au manque de cas pratiques, de formation et d'ouvriers qualifiés en usine. Dans le cas de notre étude, les mêmes causes ont été relevées, notamment le manque de formation sur la CHS a été très préjudiciable lors de l'estimation du coût de projet. Aussi, ce manque d'expérience a créé des freins, notamment à l'assemblage. Le fabricant n'avait fait de cas similaire donc il ne savait

pas comment devait se faire l’assemblage des pod, ni si ces connexions répondaient aux critères énoncés par le client.

Pour les barrières liées à l’industrie, le manque de transparence, la culture du plus bas prix, l’environnement conflictuel où les entrepreneurs doivent se compromettre pour obtenir des contrats et le manque d’incitatifs pour aider au développement de produits préfabriqués sont les causes relevées. L’environnement fragmentée de l’industrie de la préfabrication est aussi relevé par quelques participants mais ils ne la perçoivent pas comme une barrière à la réussite de projet mais plutôt comme une avenue pour réorganiser l’industrie par les organismes gouvernementaux.

Sur le plan réglementaire, le manque de normes et de standards propres à la préfabrication crée de l’incertitude et peur de futures invectives dans l’avenir, ce qui freine l’utilisation de la CHS. En effet, le client a mentionné le cas de projets effectués sans normes et des années plus tard quand la norme a été établie ils ont dû répondre à leur choix face à cette norme qui n’existait pas. Il faudrait des contrats plus adaptés aux tâches à effectuer, et s’éloigner du choix du plus bas soumissionnaire.

3.3 Sondage sur les barrières à l’utilisation de la CHS en bois

A la suite des entrevues présentées à la section 3.2, nous avons procédé à une enquête. Comme expliqué à la section 2.2.3 cette enquête permet d’élargir les résultats de l’étude d’un cas unique à une plus grande variété de projets préfabriqués. Le sondage a été conduit d’avril à mai 2021 et transmis à plus d’une vingtaine de professionnels du domaine de la préfabrication en bois au Québec. Dix réponses ont été enregistrées sur la plateforme de sondage en ligne Limesurvey et trois réponses ont été reçues par courriel. De ces réponses seules 11 réponses ont été identifiées étaient complètes et valides. Cette section résume et analyse les résultats de ce questionnaire d’enquête.

3.3.1 Profil des répondants

Les entreprises ciblées pour cette enquête utilisaient toutes la préfabrication légère à ossature de bois. Les répondants sont en majorité des fabricants de composants préfabriqués comme le montre la Figure 3.10 mais certains fabricants se sont aussi identifiés comme architecte, ingénieur et entrepreneur général. Cette identification révèle la stratégie d'implémentation de certains acteurs qui contrôlent tout le processus depuis la conception jusqu'à la construction en passant par la fabrication.

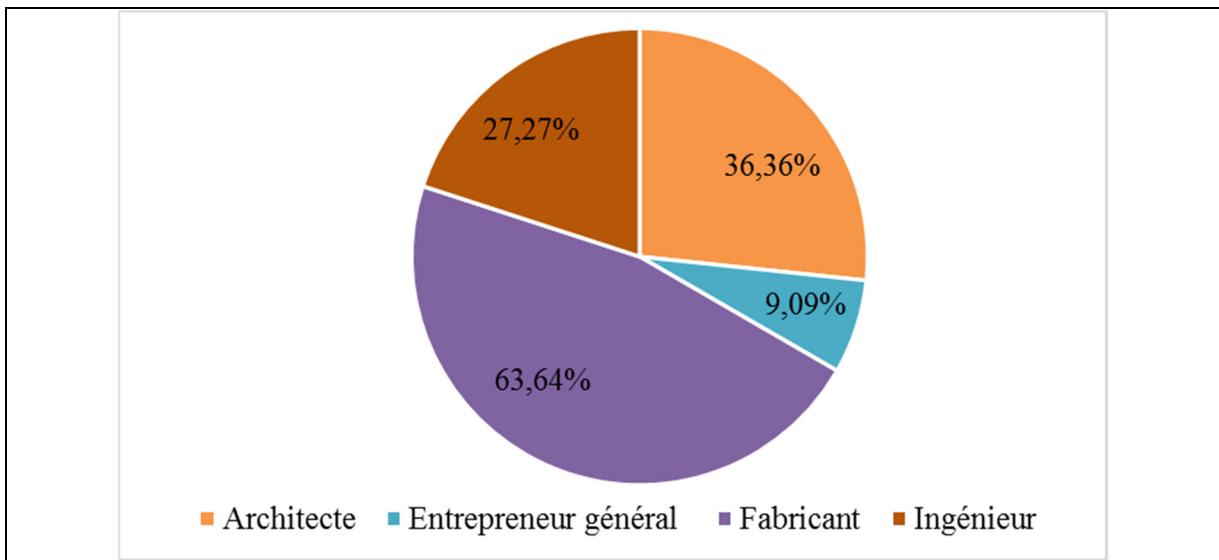


Figure 3.10 Type d'organisation des répondants

La répartition des secteurs d'activité (Figure 3.11) montre une proportion équilibrée entre les secteurs multifamilial (81,82 %), institutionnel (72,73 %) et commercial (54,55 %). Le résidentiel unifamilial est le secteur le moins représenté dans l'échantillon (18,18 %). Il est important de noter qu'une même entreprise peut œuvrer dans plusieurs secteurs. Cette répartition en contradiction avec les chiffres de FPIInnovations sur la répartition des entreprises dans le secteur de la préfabrication s'explique par critères de sélection des répondants. En effet, pour mieux cerner les barrières à l'utilisation de la construction modulaire volumétrique en

ossature de bois légère pour les projets d'immeubles nous avons choisi des répondants ayant déjà conçu ou réalisés des projets d'immeubles en composants préfabriqués.

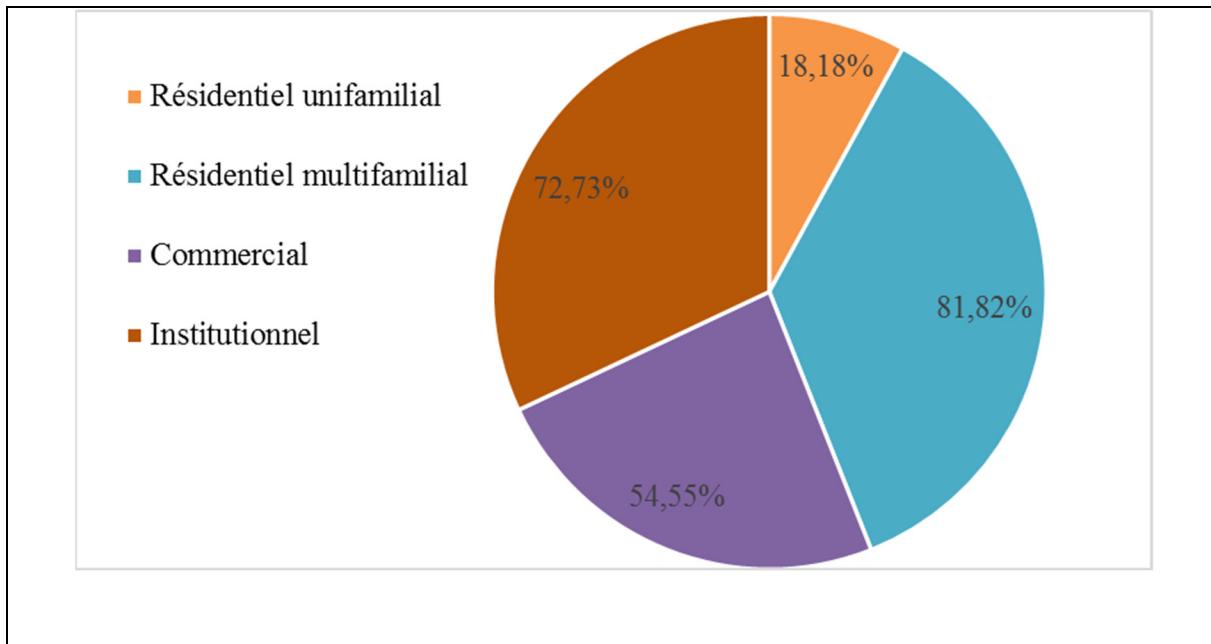


Figure 3.11 Répartition des répondants par secteur d'activité

Ces entreprises travaillent en majorité avec des matériaux en bois comme le montre la Figure 3.12. Toutefois, certaines utilisent aussi des structures hybrides avec du composite (18,18 %) et de l'acier (9,09 %). Ces résultats sont aussi dus aux critères de choix de nos répondants.

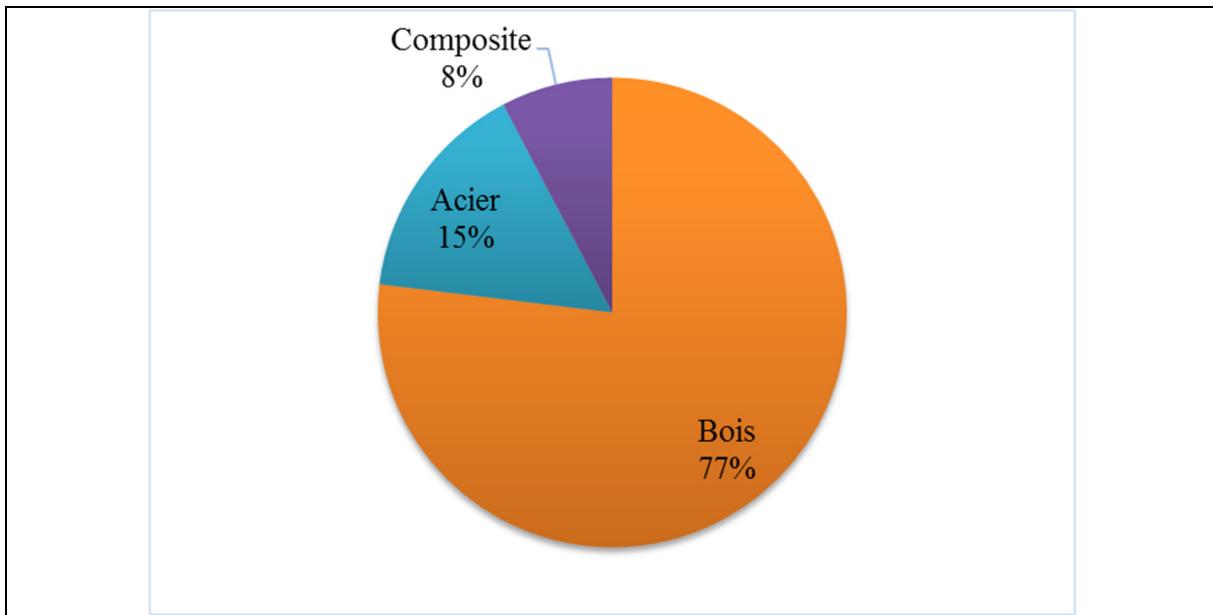


Figure 3.12 Type de matériaux pour la préfabrication

Les systèmes constructifs les plus utilisés parmi les répondants appartiennent à la catégorie des éléments linéaires (63,64 %), soit des poutres, poutrelles ou des systèmes de charpente (Figure 3.13). La préfabrication modulaire volumétrique, les *pods*, les panneaux et la préfabrication de sous-systèmes sont mis en œuvre en proportions relativement égales par les répondants. Seulement 9,09 % des répondants ont indiqué que leurs entreprises utilisent la CHS pour la préfabrication de composants tel que portes, fenêtres (qui sont exclus de la définition de CHS). Ainsi les entreprises adoptent des systèmes flexibles et adaptables à la variété de projets multifamiliaux, institutionnels et commerciaux qu'ils accomplissent.

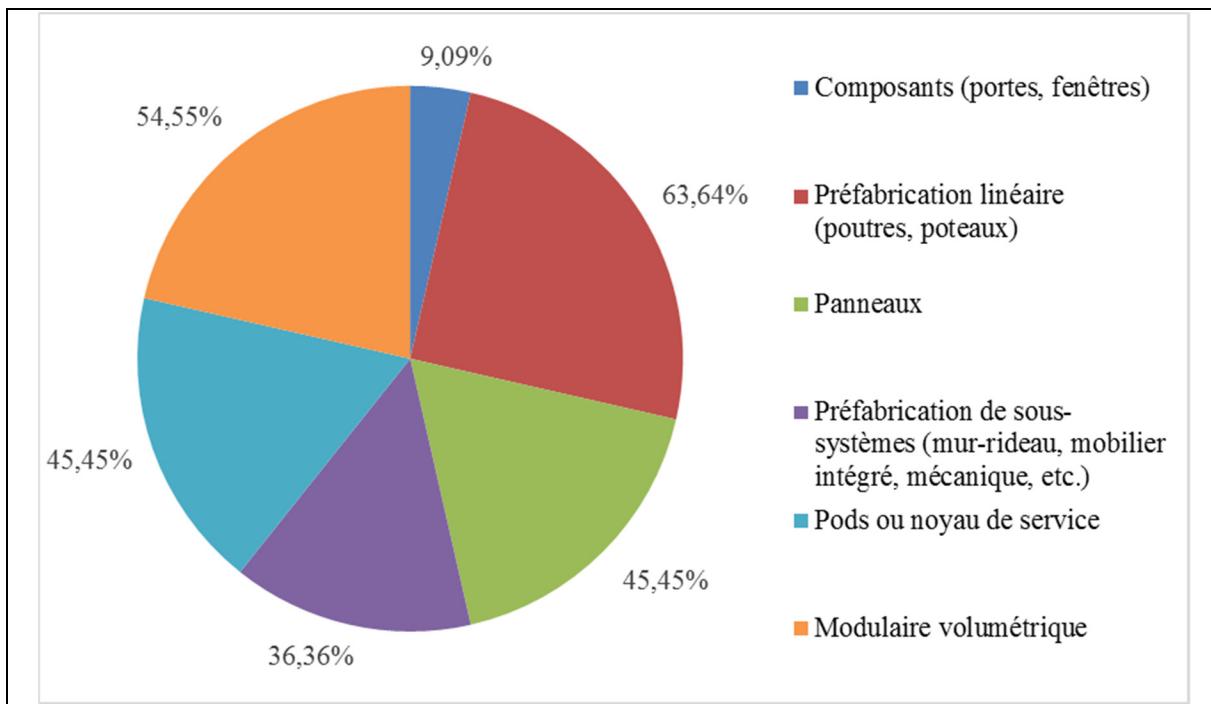


Figure 3.13 Types de systèmes préfabriqués

En somme, une majorité de fabricants utilisant des systèmes préfabriqués en bois composent l'échantillon. Les systèmes utilisés sont aussi divers que les secteurs d'activités des répondants. Il est à noter que le multifamilial tel que défini ici, ne précise pas s'il s'agit de duplex, triplex ou d'hauteur plus importante (quatre à six étages), ni le nombre d'unités de logements de ces bâtiments. La taille réduite de l'échantillon ($N=11$) ne permet pas de généraliser ces résultats à la totalité des entreprises utilisant la construction préfabriquée au Québec, mais de donner un aperçu de la gestion pratiquée dans les projets préfabriqués multilogement dans l'industrie.

3.3.2 Informations nécessaires pour la conception

Cette partie s'intéresse aux informations dont les répondants ont besoin durant la conception de leurs projets préfabriqués en ossature légère en bois et à quel moment de la conception ces informations devraient être disponibles. L'analyse des Figure 3.14 et Figure 3.15 présentant les résultats de l'enquête auprès des professionnels montre que les phases du processus les plus

en amont sont celles nécessitant le plus d'informations, notamment les phases d'avant-projet et de conception préliminaire sont des étapes critiques.

Pendant l'étude de faisabilité, le budget du projet (36,36%), les attentes du client (18,18%) et le type de technologie de préfabrication envisagée doivent être définis. Le budget ressort comme l'information la plus attendue de la phase d'étude de faisabilité du projet. La Figure 3.15 clarifie quelles informations sur la technologie de préfabrication sont nécessaires, notamment : les dimensions maximales et minimales admissibles, la liste des équipements inclus dans le composant préfabriqué, et la technologie mise en œuvre pour sa fabrication en usine.

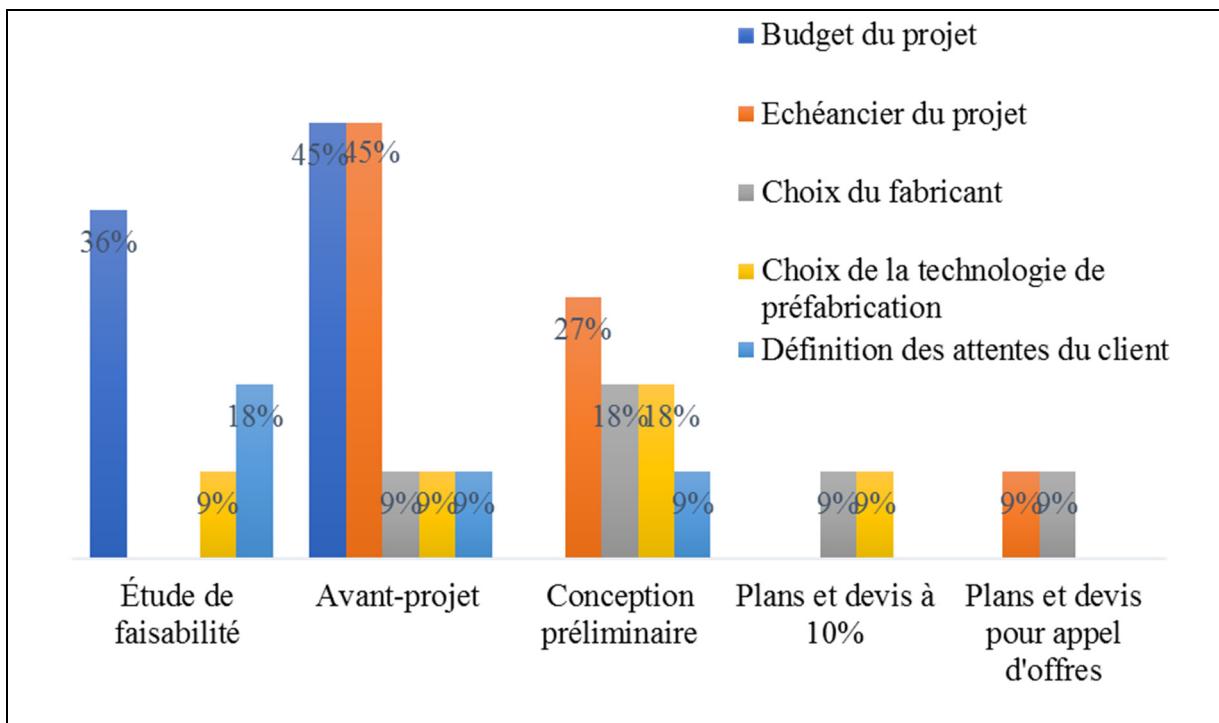


Figure 3.14 Informations nécessaires à chaque phase de projet

Durant l'avant-projet, en plus des informations précédentes, les informations les plus attendues sont le budget et l'échéancier du projet 45,45% respectivement (voir Figure 3.14). A cette étape de projet, le choix du fabricant doit être fixé afin de mettre à disposition certaines informations

sur le composant préfabriqué notamment les dimensions minimales et maximales admissibles du composant, un descriptif détaillé des étapes de fabrication en usine ainsi que les délais requis pour la fabrication, les détails d'assemblage et la description des matériaux, installations et équipements inclus dans le composant préfabriqué lors de sa fabrication.

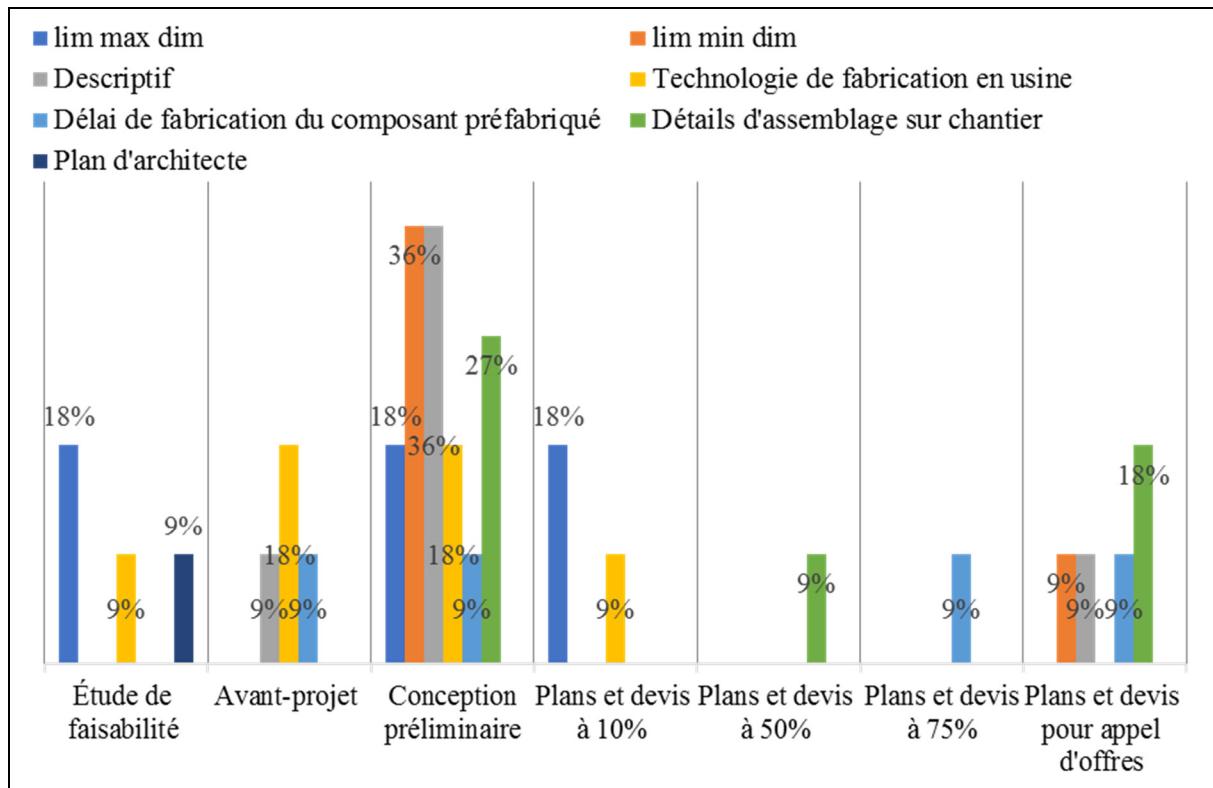


Figure 3.15 Informations de projet par phase de projet

Durant la conception préliminaire, le budget n'est plus attendu mais, le choix du fabricant et le choix de la technologie de fabrication sont encore plus nécessaires : 18,18% chacune au lieu de 9,09% en phase d'avant-projet. En effet, comme le montre la Figure 3.15, à cette étape, le plus grand nombre d'informations sur le composant préfabriqué est nécessaire : limites dimensionnelles, descriptif, délai de fabrication, technologie de fabrication et détail d'assemblage sur le chantier. C'est la phase d'arrimage de la conception à la préfabrication et à l'assemblage.

L'établissement des plans et devis nécessitent à part égale (9,09%) le choix du fabricant, la technologie de fabrication et l'échéancier. La présence du fabricant permet, lors de l'établissement des plans et devis à 10% d'avancement, de connaître la géométrie du système préfabriqué; ensuite, pour les plans et devis à 50%, son aide est nécessaire pour les détails d'assemblage sur le chantier; puis à l'étape plans et devis à 75%, il fournit le délai de fabrication en usine et la technologie de préfabrication adoptée; et enfin, lors des plans et devis d'appel d'offre, en plus des informations précédentes, il est attendu que le fabricant fournit une description détaillée des matériaux, installations et équipements inclus dans le composant préfabriqué. Dès lors, on constate avec la Figure 3.16 que les livrables attendus du fabricant varient à chaque étape de la conception. Cette conclusion est en accord avec les propos du client lorsqu'il déclarait que le fabricant était un acteur majeur et primordial au processus.

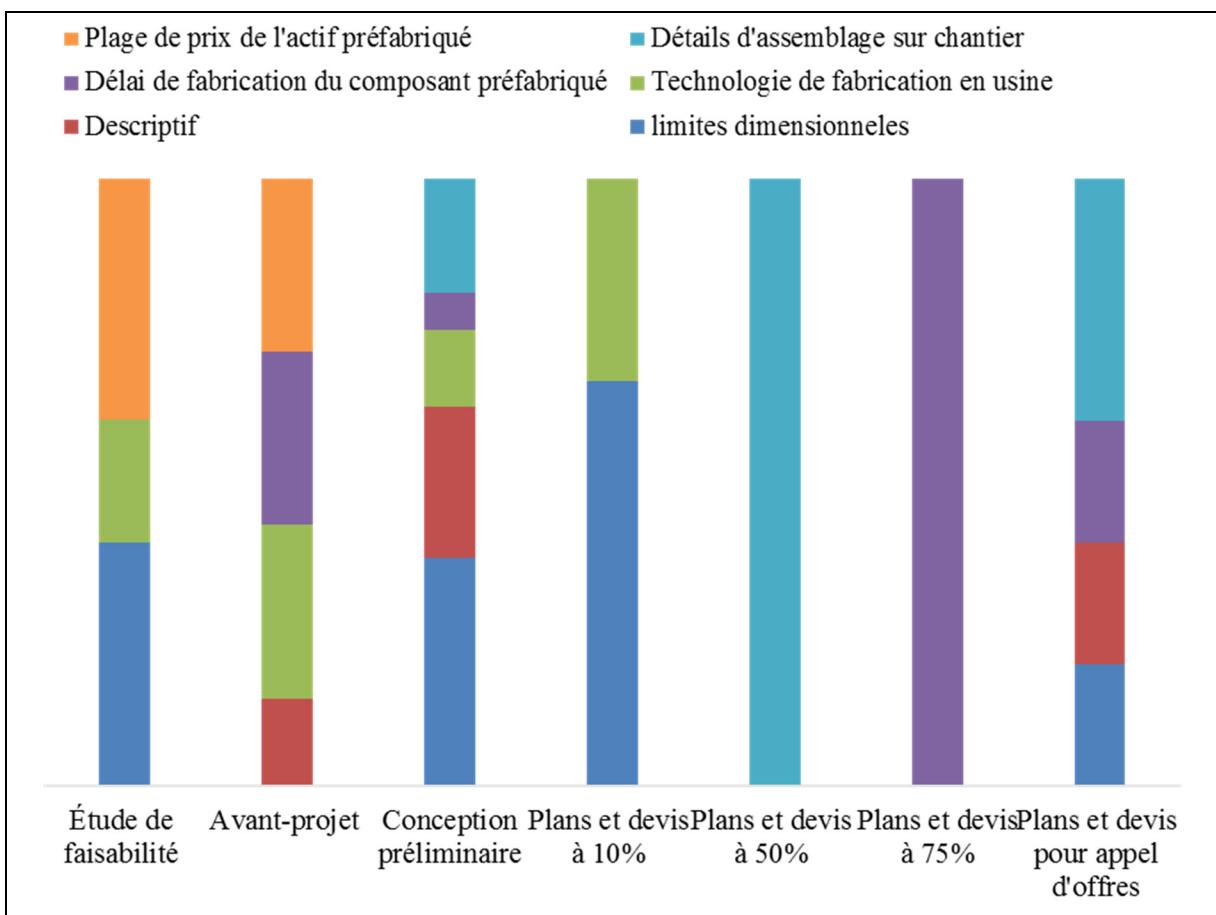


Figure 3.16 Informations à être fournies par le fabriquant aux concepteurs.

3.3.3 Outils numériques

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés aux moyens numériques par lesquels se font les échanges d'informations avec les autres intervenants. Pour communiquer entre participants plus de deux tiers des répondants utilisent des outils technologiques récents, plateforme d'échange (45,45%); BIM (36,36%) et système interne en entreprise (9,09%). Néanmoins, les moyens traditionnels que sont le courriel (36,36%) et les documents papier (9,09%) restent courants.

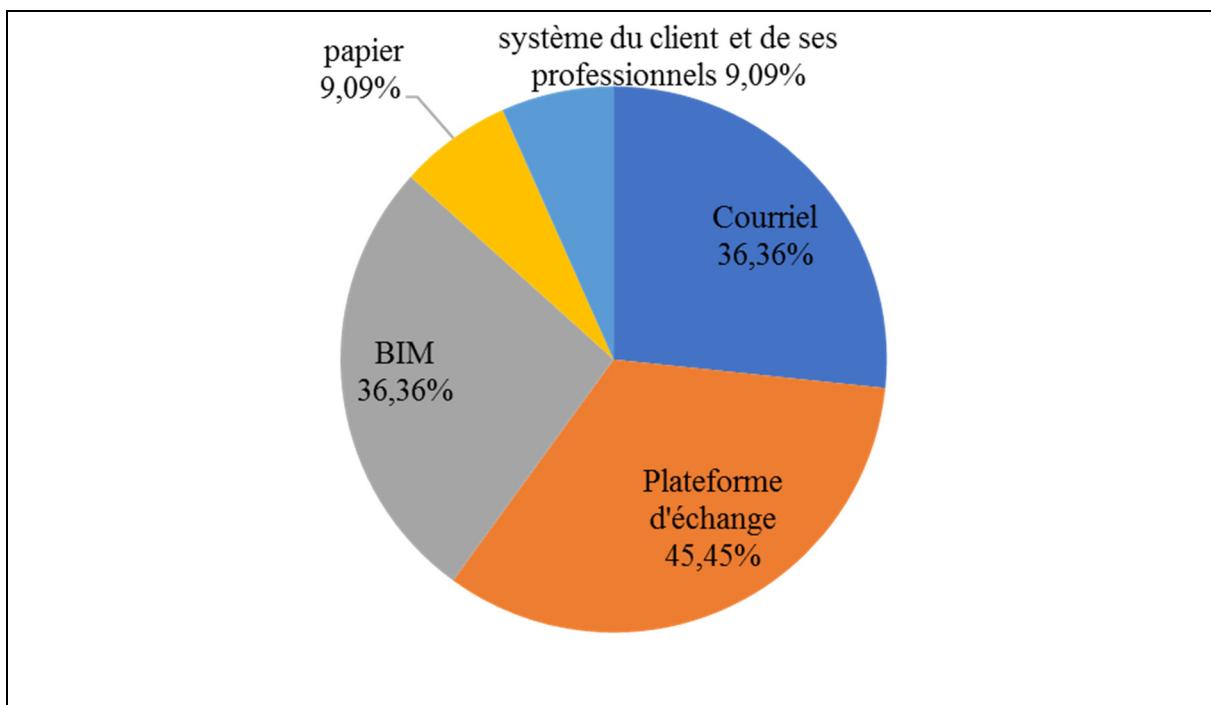


Figure 3.17 Moyens d'échange d'informations

Pour effectuer les tâches dans les projets préfabriqués en ossature légère en bois, une pluralité d'outils sont utilisés. La Figure 3.18 présente les logiciels utilisés par les répondants pour effectuer leur tâches durant la conception de leurs projets. On remarque que le logiciel Cadwork est celui qui permet d'effectuer le plus de tâches (huit). Néanmoins, il est peu utilisé par les professionnels. En effet, la Figure 3.18 montre pourcentage d'utilisation de 9,09% pour

chaque tâche. En termes de nombre de tâches effectuées suivent AutoCAD 2D&3D et StrucSoft permettent d'effectuer sept tâches successives chacune. Bien qu'elles effectuent le même nombre de tâches on note que les logiciels AutoCAD 2D&3D ont un plus haut taux d'utilisation particulièrement pour la modélisation et le dessin des plans. StrucSoft permet de faire de l'estimation et de la logistique. Revit Architecture & MEP est la plateforme suivante. Elle permet d'effectuer, en plus de la modélisation, la division en éléments préfabriqués, le dessin d'assemblage et le relevé quantitatif. SketchUp et Woodwork quant à eux sont des logiciels utilisés uniquement pour la conception architecturale des ouvrages. Les plateformes SAFI et FORTE WEB sont utilisées pour la conception et le calcul des éléments structuraux, notamment les poutrelles.

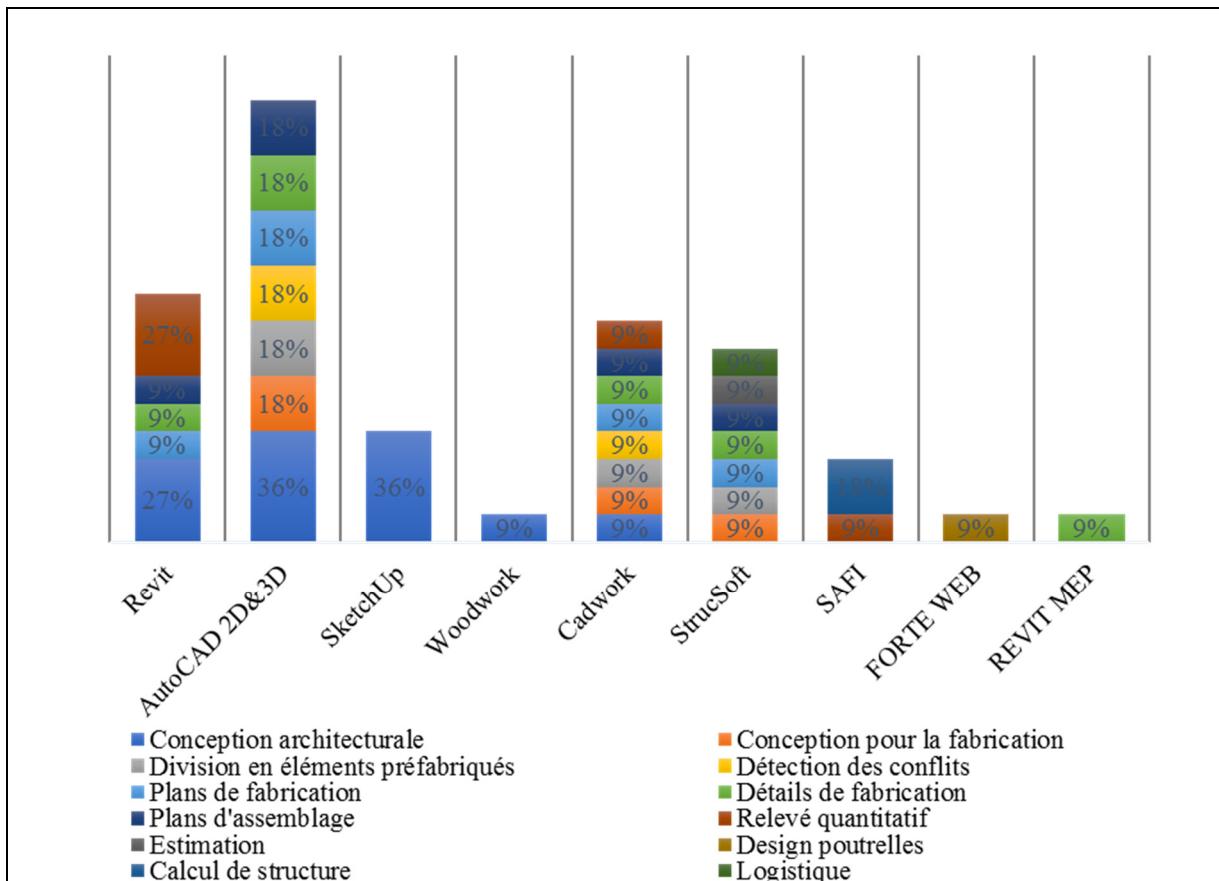


Figure 3.18 Logiciels et leurs usages dans les projets préfabriqués

3.3.4 Synthèse des résultats des sondages

Au terme de notre enquête, nous pouvons affirmer que les barrières relevées lors des entrevues sont pertinentes pour l'industrie. En effet, partant d'un échantillon utilisant les systèmes préfabriqués à ossature légère en bois dans la réalisation de leur projet d'immeubles, nous avons identifiés des enjeux économiques, de partage d'informations et de collaboration comme éléments clés à la réussite de projet. Sachant que des barrières similaires ont été recensées lors de l'étude de cas, il est possible de valider les barrières recensées à la section 3.2.6. Bien plus, il a été possible d'identifier le potentiel des technologies BIM pour suppléer aux barrières recensées. Ainsi la conclusion de la revue de littérature qui soulignait que la combinaison de la CHS et de BIM serait potentiellement plus efficace pour une plus grande implémentation de la CHS est vérifiée. Toutefois, la pluralité des plateformes disponibles et la diversité des applications possibles avec ces plateformes nécessite une certaine organisation. Il est essentiel de définir les usages du BIM, les moyens mis en jeu et les résultats attendus.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Cette recherche visait à comprendre les barrières qui causent la faible utilisation de la CHS modulaire volumétrique à ossature légère en bois au Québec. Selon les résultats de l'étude de cas et l'enquête, les six catégories d'enjeux relevés dans la littérature (voir Annexe-I) sont aussi notées comme barrières à l'utilisation de la CHS dans les projets au Québec. Le coût élevé des constructions utilisant des systèmes préfabriqués comparativement au système traditionnel, est l'enjeu économique qui a été recensé dans la littérature et dans les entrevues. Ce coût élevé est induit par le manque d'expérience dans l'industrie et de l'utilisation des processus de la construction traditionnelle pour l'estimation du coût dans les projets préfabriqués. Ces causes ont aussi été identifiées par Mao (2015) qui montre, cependant, que le coût élevé pourrait être compensé par le gain de temps, l'absence de reprise et une économie de ressource (Mao et *al.*, 2015). Parmi les autres barrières relevées par les entrevues, l'organisation de projet a été répertoriée, mais elle est peu développée dans la littérature. Si Gibb et Isack, (2003); Goodier et Gibb (2005); Blismas et Wakefield (2008); Razkenari et *al.* (2020); Zhai, Reed et Mills (2014) ont montré qu'il est nécessaire que tous les acteurs du projet soient réunis dès la conception, mais ils n'ont proposé aucune autre spécification. Selon les répondants de l'enquête, il ne s'agit pas juste de rassembler tous les acteurs dès la conception, mais il faut faire une répartition claire des responsabilités de chaque participant, allouer plus de temps à la conception et s'assurer que tous les intervenants soient au même niveau d'informations.

Pour améliorer le partage d'information et la communication, Abanda et *al.* (2017) suggèrent l'implémentation du BIM. Selon ces auteurs, la maquette BIM servirait de base de données grâce à laquelle il serait possible à toute personne d'extraire les informations nécessaires à l'accomplissement de sa tâche et d'être au même niveau d'information que toutes les autres parties prenantes, puisque les informations et les décisions du projet seraient accessibles à tous en tout temps grâce à la maquette. Plus que des outils de communication, il est nécessaire

d'avoir de la transparence entre les parties prenantes. Selon les répondants de notre enquête, un changement dans les contrats afin de prendre en compte les besoins et spécificités de la CHS est primordial. Les contrats de coopération tels que les contrats de type réalisation intégrée du projet (*Integrated Project Delivery* ou *IPD*), et conception-construction seraient des stratégies à déployer selon les répondants. La Figure 4.1 résume quelques suggestions proposées par les répondants pour améliorer l'organisation dans les projets préfabriqués.

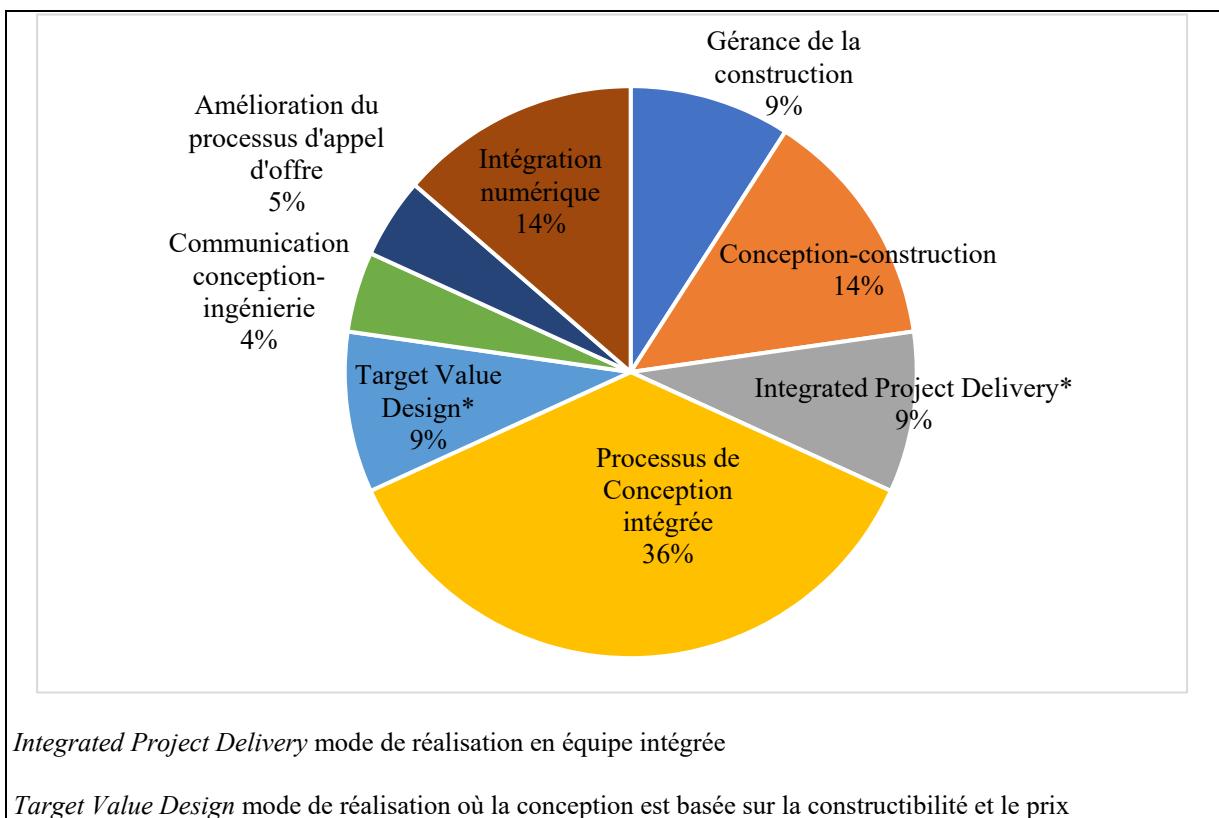


Figure 4.1 Suggestions d'amélioration de la gestion des projets préfabriqués

Pour compléter ces suggestions, en s'inspirant de la série d'actions stratégiques définies par le BCA pour assurer l'implémentation effective du DfMA à Singapour en 2016, et se basant sur les résultats des entrevues et de l'enquête auprès de professionnels, nous proposons une série d'actions à mener durant les phases de la conception d'un projet préfabriqué à ossature légère en bois afin de faciliter sa réalisation (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Actions à mener durant la conception de bâtiments préfabriqués

Étapes	Actions à mener
Étude de faisabilité	<p>Définir les attentes et objectifs de la préfabrication pour le projet.</p> <p>Choisir la technologie de préfabrication.</p> <p>Description des processus de fabrication en usine.</p>
Avant-projet	<p>Choix du fabricant.</p> <p>Définir les rôles de chaque intervenant, l'organigramme décisionnel et les points de contrôle.</p> <p>Définir les stratégies et moyens de communication et d'échange entre les intervenants.</p>
Conception préliminaire	<p>Effectuer l'analyse des attentes, objectifs du projet, les peaufiner, les catégoriser et définir les exigences prioritaires.</p> <p>Préparer les maquettes ou modèles et dessins d'ateliers pour extraire les quantités de matériaux.</p>
Plans et devis	<p>Faire la coordination BIM avec les autres systèmes construits au chantier.</p> <p>Définir et communiquer le processus logistique, de la fabrication en usine, le transport, la séquence d'assemblage sur le chantier.</p> <p>Finaliser la conception des éléments préfabriqués du projet.</p>

Sun et *al* (2020) constatent que les barrières recensées à l'utilisation de la CHS sont sous-jacentes à des problèmes lors de la phase de planification et de conception. Pour Wuni et Shen (2020) les éléments clés pour la réussite de la conception du projet sont d'assurer une bonne collaboration, une communication effective et le partage des informations entre les acteurs du projet. Leurs conclusions s'alignent avec celles des répondants de notre étude pour qui la phase

d'avant-projet est celle où les informations sur le budget, l'échéancier, la technologie de fabrication, la capacité de production du fabricant et les attentes du client sont essentielles. Pour faciliter la communication durant la conception, nous recommandons à chaque étape de la conception de disposer de certaines informations qui aideraient à la réussite du projet (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 Informations requises durant la conception de bâtiments préfabriqués

Étapes	Informations à fournir
Étude de faisabilité	Budget de projet. Géométrie et dimensions du système préfabriqué envisagé. Conception collaborative.
Avant-projet	Échéancier du projet. Descriptif des matériaux, installations, réservations et équipements inclus dans le système préfabriqué. Délai de fabrication du système préfabriqué en usine.
Conception préliminaire	Dimensions minimales et maximales du système préfabriqué. Plans ou modèle détaillés du système préfabriqué. Détails des interfaces (connexions) des composants préfabriqués avec les autres systèmes du bâtiment.
Plans et devis	Dessins d'ateliers pour la fabrication. Échéancier de livraison et chaîne logistique pour le transport des éléments de l'usine vers le chantier. Nombre d'éléments préfabriqués nécessaires au projet et le calendrier de fabrication en usine.

En plus d'analyser et comparer les barrières relevées de la littérature avec celles du contexte de la préfabrication en bois au Québec, notre étude avait comme objectif de répondre à deux interrogations à savoir :

- d) quelles différences doivent être prises en compte lors de l'utilisation de systèmes préfabriqués pour la construction unifamiliale à la construction multilogement ?
- e) qu'est-ce qui distingue les projets de moyenne hauteur des projets pour lesquels la préfabrication est actuellement utilisée?
- f) quelles solutions proposer pour permettre une plus grande utilisation de la CHS au Québec?

Les conclusions de notre investigation à ces questions sont résumées dans ce qui suit.

Lorsqu'on passe de la construction unifamiliale à la construction multilogement, il faudrait prendre en compte les aspects suivants : le changement de configuration et de caractéristiques du système préfabriqué, la gestion des accès et circulations y compris l'accès pour chaises roulantes, la gestion de la récurrence du système préfabriqué dans le bâtiment, les raccordements du système préfabriqué au bâtiment notamment les raccordements avec l'étage du dessous, raccordements sur les côtés et le raccordement des éléments mécaniques. Il faut aussi tenir compte de la réglementation en matière de résistance au feu, d'insonorisations, des autres aspects normatifs de bâtiments plus denses et il faut s'assurer que le composant préfabriqué puisse occuper des positions différentes et s'adapter à différents types de logement. De plus, dans ce type de projet, plus d'acteurs sont amenés à collaborer. Il faudrait avoir des contrats détaillant de façon exhaustive les responsabilités de chacun et il faut veiller par des mécanismes à la bonne transmission des informations entre eux.

Pour aider à la réalisation de projets d'immeubles futurs utilisant les composants préfabriqués à ossature légère en bois, nous recommandons d'adopter un contrat collaboratif et de s'assurer que les objectifs et livrables attendus à chaque phase sont clairement connus de tous les intervenants dès de début de la conception. De plus, il faudrait élaborer un cadre réglementaire, multiplier les incitatifs de recherche sur la CHS pour développer des produits adaptés à la construction multilogement. Aussi, nous recommandons une plus grande utilisation de la technologie BIM pour la coordination et le partage d'informations dans le projet.

CONCLUSION

L'utilisation de composants préfabriqués n'est pas nouvelle et est assez courante dans les projets. Une plus grande intégration de la préfabrication modulaire volumétrique apporterait des bénéfices plus grands; et combiné à l'utilisation de la technologie, ces leviers entraîneraient un changement dans l'industrie. En dépit de ce potentiel, l'utilisation de la construction modulaire volumétrique en ossature de bois légère pour les projets d'immeubles reste faible. Ce mémoire se proposait d'explorer les barrières qui freinent l'utilisation de la construction modulaire volumétrique en ossature de bois légère au Québec. Plus particulièrement, qu'est ce qui freine l'utilisation des produits préfabriqués déjà connus, pour des projets de plus grande envergure?

Dans un premier temps, il a fallu définir la notion de CHS car plusieurs concepts et termes sont associés à la CHS dans la littérature. Ainsi, il a été possible d'examiner les caractéristiques propres à chaque concept et sélectionner la définition plus pertinente pour notre recherche.

En second lieu, au moyen d'une revue systématique de la littérature, il a été possible par une analyse des mots clés les plus cités, de dresser un portrait de l'évolution de la recherche en la CHS au cours de la dernière décennie. De cette revue, deux axes de recherche émergent : « *le hardware* » ou le développement de produits plus performants et la gestion de projet. Au Canada, la recherche est peu approfondie comparativement à la Chine et aux États-Unis qui sont les pays où l'on retrouve le plus de publications.

Au Québec, de nombreuses entreprises ont développé des systèmes préfabriqués à ossature légère en bois aptes à la construction de projet d'immeubles pouvant aller jusqu'à six étages. Malgré cela, ces systèmes sont majoritairement utilisés pour la construction d'immeubles de trois étages et moins. Pour explorer les barrières propres à l'industrie québécoise, limitant l'utilisation de systèmes à ossature légère en bois dans la construction de quatre étages et plus; nous avons opté pour l'étude de cas unique. En effet, la littérature présentait peu de documentation sur l'utilisation de systèmes préfabriqués à ossature légère en bois pour la

construction de projets d'immeubles de plus de quatre étages. Nous nous sommes intéressés au projet Innov144 qui prévoyait la construction de deux immeubles de quatre et six étages utilisant la construction modulaire volumétrique en ossature de bois légère, mais il n'a pu être réalisé. À travers des entrevues avec les acteurs de la conception de ce projet, nous avons pu identifier six catégories de barrières au succès de projet. Ces barrières sont des barrières économiques, des barrières liées à l'actif préfabriqué, des barrières organisationnelles, des barrières techniques, des barrières légales ou liées au cadre réglementaire et des barrières dues à la culture de l'industrie. Particulièrement pour les barrières dans l'industrie, le manque d'expérience des acteurs de la conception de ce projet, nous a permis de relever quels éléments devraient être adaptés lors du changement d'utilisation de systèmes de la configuration d'unités familiales à celle de projets d'immeubles. Pour surmonter ces différentes barrières, les personnes interviewées ont proposé quelques solutions. Par exemple, pour l'estimation du projet, le client pourrait allouer un budget pour tenir compte des innovations nécessaires. Aussi, le changement du mode organisationnel vers un autre qui faciliterait plus la collaboration. De plus, les participants ont suggéré de mettre en place des moyens pour améliorer le partage d'informations entre les acteurs du projet par l'utilisation d'environnement de données partagées basé sur la modélisation des informations du bâtiment ou BIM.

Afin de vérifier la concordance de ces résultats à d'autres projets utilisant la construction modulaire volumétrique en ossature de bois légère, nous avons mené une enquête auprès de professionnels de ce secteur à l'aide d'un questionnaire. Ce sondage a permis de valider les barrières issues de la revue de littérature et des entrevues, ainsi que d'identifier les informations nécessaires à différentes étapes de projet. Ainsi, pour dépasser ces barrières, il est suggéré d'utiliser un environnement collaboratif dès la phase de conception pour améliorer la gestion des informations. De plus, des modifications doivent être apportées aux contrats pour tenir compte des nouvelles tâches et responsabilités des parties prenantes.

Même si les outils méthodologiques utilisés ont permis d'identifier et valider des barrières à la CHS, ce seul cas ne suffit pas pour généraliser les conclusions de cette étude à l'ensemble de l'industrie. Idéalement, d'autres études de cas sont nécessaires pour couvrir tout le cycle de

projet et étudier les variétés de systèmes à ossature légère disponibles. De plus, il faudrait utiliser les informations relevées pertinentes au cours d'un projet réalisé pour valider l'efficacité qu'ils apportent.

RECOMMANDATIONS

Quelques actions contribueraient à la poursuite des avancées de la recherche. Il serait très enrichissant pour l'industrie du bois dans le secteur multi-résidentiel, de documenter les projets réalisés et de diffuser les bonnes pratiques, recommandations et conclusions de projet préfabriqués afin d'éduquer l'industrie. Une telle documentation contribuerait à réduire le manque de connaissance sur la CHS et son application. De plus, de telles informations fourniraient aux instituts de recherche des données adéquates pour de futures recherches. Nous recommandons d'organiser des ateliers de réflexion sur ces problématiques avec les professionnels et des chercheurs. Aussi, il faudrait développer un programme de formation destiné aux futurs professionnels (architectes, ingénieurs) axé notamment sur les procédés de fabrication et les particularités de la CHS. Des pistes de recherche à approfondir seraient: le lien entre le succès final d'un projet préfabriqué et l'utilisation du BIM; un outil de sélection du type de système préfabriqué, spécifique à chaque projet. Enfin, il serait intéressant, éventuellement, de comparer l'atteinte des objectifs des projets en termes de coûts, d'échéancier, de qualité et de satisfaction des clients et des intervenants dans le cadre de projets préfabriqués réalisés au Québec

ANNEXE I

RESUME DES BARRIERES A LA CHS DANS LA LITTERATURE

Tableau-A I-1 Barrières recensées à l'utilisation de la CHS

Categories	Barriers	References
Economic issues	High initial investment cost for manufacturers	Jaillon and Poon (2009), (Lovell and Smith 2010), (Zhai, Reed, & Mills, 2014), (Kamar, Azman, & Nawi, 2014), (Razkenari et al. 2020)
	Higher construction cost including transportation cost and craneage cost	Jaillon and Poon (2009), Pan et al. (2007), (Kamar, Azman, & Nawi, 2014)
	Increased design fees due to redesign from non-IBS to IBS drawings.	Blismas and Wakefield (2008), (Nawi, Shaharanee, Hashim, Azman, & Ibrahim, 2015)
	High bidding price	(Han & Wang, 2018)
	cost versus value perception	(Choi, Chen, & Kim, 2019)
	Longer capital payback period	(Zhai, Reed, & Mills, 2014)
	Difficulty to obtain finance	(Sun et al., 2020)
OSC-related issues	Shortage of market demand	Lovell and Smith (2010)
	Longer lead-in time for pre-planning and design stage.	Blismas and Wakefield (2008), (Goodier and Gibb, 2005), (Razkenari et al. 2020), (Zhai, Reed, & Mills, 2014)
	Traditional design process unsuited to OSC.	Blismas and Wakefield (2008)
	Not easy to modify design scheme especially once manufacture has begun.	Blismas et al. (2005), Jaillon and Poon (2009), Pan et al. (2007), (Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, 2020)
	Transportation technology of prefabricated elements and access to the construction site.	Blismas and Wakefield (2008), Blismas et al. (2005) Jaillon and Poon (2009), (Choi, Chen, & Kim, 2019)
	Difficulty to the storage of prefabricated elements.	Blismas et al. (2005), Jaillon and Poon (2009)
	Durability of prefabrication unproven.	Lovell and Smith (2010)
	Severe environmental impact due to long transportation distances.	(Larsson, Eriksson, Olofsson, & Simonsson, 2014), (Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, 2020)

Tableau-A I-1 Barrières recensées à l'utilisation de la CHS (suite)

Categories	Barriers	References
OSC-related issues	Monotony of structure type or Impaired aesthetics	(Larsson, et al., 2014), (Jaillon and Poon 2009), (Razkenari et al., 2020)
	Low tolerances increase problems when fitting components on site	Blismas and Wakefield (2008), (Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, 2020)
Lack of skills	Lack of practices and experiences	(Nawi, Shaharanee, Hashim, Azman, & Ibrahim, 2015), Goodier and Gibb (2005), Mohamad Kamar et al. (2009), (Kamar, Azman, & Nawi, 2014), (Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, 2020), (Mao, 2015)
	Organizational mechanism and culture	Pan et al. (2007)
	Monopoly of techniques	Mohamad Kamar et al. (2009), Patil and Kant (2014)
	Education and training still focused on current practices and lack in formation for prefabrication	(Nawi, Shaharanee, Hashim, Azman, & Ibrahim, 2015), Blismas and Wakefield (2008)
	Fragmented prefabricated industry structure	(Nawi, Shaharanee, Hashim, Azman, & Ibrahim, 2015), Mao (2015)
	Unable to achieve good communication, coordination and collaboration among stakeholders.	Blismas et al. (2005), Polat (2010), (Kamar, Azman, & Nawi, 2014), (Choi, Chen, & Kim, 2019), (Sun et al., 2020)
	Unbalance and uncertainty between component supply and demand	(Han & Wang, 2018), Mao (2015)

Tableau-A I-1 Barrières recensées à l'utilisation de la CHS (suite)

Categories	Barriers	References
Industry social issues	Risk adverse culture	Pan et al. (2007)
	Construction adversary culture	(Larsson, Eriksson, Olofsson, & Simonsson, 2014), (Han & Wang, 2018)
	Reluctance to innovation	Pan et al. (2007), (Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, 2020)
	Lack of related organizations, such as local R&D institutes and services, lack of testing institute for prefabricated components,	Mohamad Kamar et al. (2009), Pan et al. (2007), Mao (2015)
	Lack of skilled industrial worker	(Han & Wang, 2018)
	Lessons and attitudinal barriers due to historic failures	Pan et al. (2007)
	Dependence of traditional construction method.	(Mohamad Kamar et al., 2009), (Mao, 2015)
	lack of adequate technical knowledge of the IBS method	(Nawi, Shaharanee, Hashim, Azman, & Ibrahim, 2015)
	Lack of awareness of prefabrication by the market and public / design specifications and drawings.	Lovell and Smith (2010), Mohamad Kamar et al. (2009)
	Size and load restrictions on transportation.	Polat (2010)
	Lack of large-scale and repetition possibilities.	(Larsson, Eriksson, Olofsson, & Simonsson, 2014), (Kamar, Azman, & Nawi, 2014), (Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, 2020)
	increase risks due to new solutions and methods	(Larsson, Eriksson, Olofsson, & Simonsson, 2014), (Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, 2020)
	Strong focus on lowest bid price	(Larsson, Eriksson, Olofsson, & Simonsson, 2014), (Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, 2020)
	Small site dimensions in dense urban area	Jaillon and Poon (2009)

Tableau-A I-1 Barrières recensées à l'utilisation de la CHS (suite)

Categories	Barriers	References
Legal issues	Lack of design codes and standards for prefabricated components	(Nawi, Shaharanee, Hashim, Azman, & Ibrahim, 2015), Blismas and Wakefield (2008), Goodier and Gibb (2005), Mohamad Kamar et al. (2009), (Choi, Chen, & Kim, 2019)
	Lack of construction quality acceptance criteria	(Han & Wang, 2018)
	Inadequate skills qualifications	Blismas and Wakefield (2008), (Zhai, Reed, & Mills, 2014)
	Lack of governmental regulations and incentives	(Larsson, Eriksson, Olofsson, & Simonsson, 2014), Blismas and Wakefield (2008), Lovell and Smith (2010), Mohamad Kamar et al. (2009)
	Lack of an adequate contract system/Design-bid-build contracts Strong focus on lowest bid price.	(Nawi, Shaharanee, Hashim, Azman, & Ibrahim, 2015), (Larsson, Eriksson, Olofsson, & Simonsson, 2014)
	Lack of adequation in responsibilities due to the design contract	(Nawi, Shaharanee, Hashim, Azman, & Ibrahim, 2015)
Technical issues	Complex interfacing	(Kamar, Azman, & Nawi, 2014)
	Freeze design earlier with much detail	(Kamar, Azman, & Nawi, 2014), (Choi, Chen, & Kim, 2019), Mao (2015)
	Insufficient level of IT	(Kamar, Azman, & Nawi, 2014), (Blismas & Wakefield, 2009), (Rahman, 2014)
	Assembly issues of components/ logistic of on-site assembly	(Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, 2020), (Zhai, Reed, & Mills, 2014)
	Complexity of connections	(Sun et al., 2020)
	Distance from factory to site	(Choi, Chen, & Kim, 2019)
	Fabricator capability	(Choi, Chen, & Kim, 2019), (Zhai, Reed, & Mills, 2014)

ANNEXE II

CODAGE D'ENTREVUES

Tableau-A-II-1 Tableau de codage des entrevues

Catégories	Propos	Interviewé
Economiques	Si on transfère la majorité des coûts du projet chez un sous-traitant d'usine (fournisseur de mur, plancher, d'éléments préfabriqués), on vient d'augmenter environ de 20% les coûts de notre projet	Ing
	Mésentente financière de l'ordre de 5% avec le budget	AR
	Les innovations impliquent des surcoûts, ça va couter cher	AR
	On a surestimé le coût en plus pour tenir compte du risque	EG
	Le prix n'était pas ce à quoi s'attendait le client	EG
	Analyse de la valeur des décisions	Ing
	Le financement d'accès-logis devraient tenir compte du coût des éléments novateurs	AR
Liés à l'actif préfabriqué	On avait plus de travail à cette étape de la conception que pour un projet traditionnel	AR
	Besoin de plus de temps de conception	EG
	Tolérance dimensionnelle des modules et des ajustements au chantier à prendre en compte	AR
	Maquette pas assez aboutie pour fournir les éléments nécessaires au fabricant-	
	La conception en équipe est nécessaire	AR
	Manque de données sur l'assemblage	EG
	Le risque était grand pour chacun.	
Manque d'expérience	Le projet est passé de très beau projet à 2 boîtes carrées	Fab
	On a beaucoup travaillé pour être capable d'avoir un pod qui puisse se placer à différentes places dans le bâtiment.	AR
	Manque d'expérience des fabricateurs (Le pod se développait pendant le projet).	AR
	Il faut rentrer en R&D pour insonorisation, coupe feux, circulation autour du pod, les dimensions spécifiques et l'esthétique, les circulations pour des chaises roulantes	AR
	L'utilisation de pod était nouvelle	AR
	Il n'y a pas de référence dans la production de pod pour ce type de projet	EG
	Il y'a un manque de compréhension sur comment fonctionnent cette industrie.	Ing
	L'estimation du travail restant après la fabrication n'est pas claire.	EG
	L'estimation s'est faite selon les standards de la préfabrication en panneau	EG
	Il faut de la communication pour que chacun mène sa part.- beaucoup d'incompréhension et d'informations manquantes-	GRT
	S'assurer que tout se passe bien au niveau de l'assemblage	EG

Tableau-A-II-1 Tableau de codage des entrevues (suite)

Catégories	Propos	Interviewé
Manque de l'industrie	Accès logis est à risque, tous les projets ne se réalisent pas difficile de vouloir être novateur dans un contexte de programmes normés gouvernemental très rigide.	GRT
	Le client et le promoteur attendaient que le fabricant fournisse un prix	AR
	L'industrie n'est pas standardisée	GRT
	Le promoteur connaissait le gabarit économique de nos projets.	GRT
	Ils ne comprenaient pas comment fonctionnent cette industrie	Ing
	Ce n'était pas un projet standard - éléments innovants inconnus-Combinaisons d'innovation	GRT
	Le client s'attendait que le projet coûte moins cher que dans le marché	GRT
Cadre réglementaire	Pas de cadre réglementaire pour encadrer toutes ces innovations maintenant et crainte pour les conséquences futures	GRT
	Manque de connaissance du fabricant	GRT
	Responsabilités pas clairs	AR, EG
Organisation du projet	Manque de budget défini au départ	Ing
	Tout le monde devrait être responsabilisé de la même façon	Fab
	Il faut un organigramme décisionnel	GRT
	L'estimation s'est faite selon les standards de la préfabrication en panneau	EG
	Le principal le joueur est le fabricant	GRT
	L'entrepreneur général/ le promoteur et le fabricant changent de rôles.	GRT
	Il faudrait un mode de réalisation adapté assurant une certaine transparence	GRT
	Besoin de plus de temps de conception	EG
	Responsabilités pas clairs	EG

ANNEXE III

ANALYSE COMPARATIVE DES BARRIERES DANS LA LITTERATURE ET DANS L'INDUSTRIE AU QUEBEC

Tableau-A- III-1 Correspondance entre les barrières dans la littérature et des barrières lors des entretiens

Catégories	Barrières dans la littérature	Barrières entretien correspondantes
Economic issues	Higher construction cost including transportation cost and craneage cost	Écart de 5% avec le budget
	Increased design fees due to redesign from non-IBS to IBS drawing	50% plus du prix de conception
	Cost versus value perception	Analyse de la valeur des décisions manquante
	Difficulty to obtain finance	le financement d'accès-logis devraient tenir compte du coût des éléments novateurs
OSC-related issues/ Lié à l'actif	Longer lead-in time for pre-planning and design stage	On avait plus de travail à cette étape de la conception que pour un projet traditionnel (AR)- Besoin de plus de temps de conception (EG)
	Traditional design process unsuited to OSC	la conception en équipe est nécessaire
	Monotony of structure type and impaired aesthetics	On a beaucoup travaillé pour être capable d'avoir un pod qui puisse se placer à différentes places dans le bâtiment
		le projet est passé de très beau projet à 2 boîtes carrées

Tableau-A- III-1 Correspondance entre les barrières dans la littérature et des barrières lors des entretiens (suite)

Catégories	Barrières dans la littérature	Barrières entretiens correspondantes
Lack of skills	Lack of practices and experiences	Manque d'expérience des fabricateurs (Le pod se développait pendant le projet-AR); les autres ne comprennent pas comment fonctionnent cette industrie
	Organizational mechanism and culture	faire un organigramme décisionnel le besoin d'une équipe de conception interne au manufacturier modèle assurant une certaine transparence- il manquait un intégrateur
	Inadequate skills qualifications	Manque de connaissance du fabricant
	Education and training still focused on current practices and lack in formation for prefabrication	estimation s'est faite selon les standards de la préfabrication en panneau
	Unable to achieve good communication and collaboration among parties / coordination	il faut de la communication pour que chacun mène sa part.- beaucoup d'incompréhension et d'informations manquantes-
	Unbalance and uncertainty between component supply and demand	s'assurer que tout se passe bien au niveau de l'assemblage
Industry social issues	Construction adversary culture	Accès logis est à risque tous les projets ne se réalisent pas- difficile de vouloir être novateur dans un contexte de programmes normés gouvernemental très rigide.
	Lack of related organizations, such as local R&D institutes and services, lack of testing institute for prefabricated components, lack of experienced design consultancy and production facility logistics	Nous étions la R&D du fabricant

Tableau-A- III-1 Correspondance entre les barrières dans la littérature et des barrières lors des entretiens (suite)

Categories	Barrières dans la littérature	Barrières entretiens correspondantes
Industry social issue	Dependence of traditional construction method	L'entrepreneur connaissait le gabarit économique de nos projets.
	Lack of awareness of prefabrication by the market and public	Ils ne comprenaient pas comment fonctionnent cette industrie (ING)
	increase risks due to new solutions and methods	Ce n'était pas un projet standard, il y'avait beaucoup d'éléments innovants inconnus et les innovations impliquent des surcoûts
	Strong focus on lowest bid price	Le client espérait que le projet coûte moins cher que dans le marché
Legal issues	Lack of design codes and standards for prefabricated components	Pas de cadre réglementaire pour encadrer toutes ces innovations maintenant et crainte pour les conséquences futures
	Lack of governmental regulations and incentives	
	lack of an adequate contract system design-bid-build contracts	Il faudrait des contrat plus adapté
	lack of adequate responsibilities due to the design contract	Responsabilités pas clairs entre l'entrepreneur général/promoteur et le fabricant
Technical issues	Freeze design earlier with much detail	Point de contrôle budgétaire après la trame structurale et les esquisses
		On avait plus de travail à cette étape de la conception que pour un projet traditionnel (AR) mais le fabricant avait besoin de plus de détail (EG)
	Unsufficient level of IT	
	Assembly issues of components/ logistic of on-site assembly	
	Complexity of connection	Manque de données sur l'assemblage
Organisation du projet		Manque de budget défini au départ
		tout le monde devrait être responsabilisé
		faire un organigramme décisionnel
		estimation s'est faite selon les standards de la préfabrication en panneau
		Il faudrait un mode de réalisation adapté
		Besoin de plus de temps de conception

ANNEXE IV
QUESTIONNAIRE D'ENTREVUE
GUIDE D'ENTRETIEN

Partie_1 : Informations Générales

- a) Quel est votre titre d'emploi ?
- b) Quel rôle joue votre entreprise dans le projet ? Et à quelle phase devient-il intervenant du projet ?
- c) Combien d'années d'expérience avez-vous dans l'industrie de la construction ? Combien d'années dans le 'hors-site' ?
- d) Combien de projets préfabriqués avez-vous réalisés avec le bois comme matériau principal ?
- e) Quel type de projet (...) ?
- f) Sur ces projets quel système préfabriqué a été utilisé (...) ?

Partie_2 : Défis actuels de la construction préfabriquée en bois

- a) Quelles sont les tâches qui prennent le plus de temps ? Comment pensez-vous qu'elles peuvent être améliorées ?
- b) Quels outils technologiques avez-vous utilisés (logiciels, scan 3D...) ? Quels impacts ont-ils eu sur le projet ?
- c) Quelles sont les difficultés auxquelles vous avez été confrontés ?
- d) Quel est l'impact de la gestion actuelle du projet ? Quels sont les points à améliorer ? (Chaine d'approvisionnement, type de contrats)
- e) Comment pensez-vous que les outils numériques peuvent aider ?

Partie_3 : Défis liés à la conception

- a) Les outils actuels vous satisfont-ils pour relever les défis de la préfabrication ? Sinon, quels sont points à améliorer ?

Partie_4 : Défis liés à la fabrication

- a) Quand avez-vous été intégré au projet ?
- b) Quel est l'impact du moment de votre implication sur l'efficacité de votre travail?
- c) Comment se fait l'échange d'information entre les intervenants au projet ?

Partie_5 : Défis liés au travail sur site

- a) Qui sont les parties impliquées pour l'assemblage des éléments en usine et sur site ?
- b) Y'a-t-il des instructions spécifiques d'assemblage du fabricant ?
- c) Quels outils numériques utilisez-vous pour l'assemblage ?

ANNEXE V

FEUILLET D'INFORMATION

PROJET DE RECHERCHE

TITRE : Les barrières à l'utilisation de construction 'hors site' en bois

CHERCHEURS RESPONSABLES : Ivanka Iordanova, Professeure au département de Génie de la construction – École de technologie supérieure (ÉTS)

Carlo Carbone, Professeur à l'École de Design –
Université du Québec à Montréal (UQAM)

ÉTUDIANTE : Virginie Raissa Messa Sokoudjo, étudiante à la maîtrise en génie de la construction – ÉTS

Le présent projet de recherche vise à améliorer la productivité en construction par l'utilisation plus fréquente de la construction en bois avec la fabrication en usine. En effet, la construction hors site permettrait d'augmenter la productivité de l'industrie qui stagne par rapport aux autres secteurs de l'économie. Ainsi, les objectifs principaux du présent projet de recherche sont :

- Identifier les barrières à l'utilisation de la fabrication en usine dans les projets.
- Identifier un mode organisationnel et un mode de réalisation adaptés à la construction hors site.

PARTICIPATION

Vous êtes invité(e) à participer à ce projet de recherche. Après avoir lu le présent document et accepté de participer au projet, nous vous demanderons de prendre part à une entrevue conduite par les membres de l'équipe de recherche. Les questions qui vous seront posées portent sur les défis de la construction hors site en bois. La durée de l'entrevue est estimée à 45 minutes.

L'entrevue sera enregistrée pour aider à la retranscription. Vous êtes libre de refuser ou d'accepter l'enregistrement de l'entrevue.

Votre participation est volontaire, ce qui signifie que vous êtes libre de refuser de participer. Vous pouvez mettre fin à votre participation en tout temps au cours de l'entrevue en avisant le membre de l'équipe de recherche. Aucune justification ne vous sera demandée. Une fois l'entrevue terminée, vous pourrez vous retirer du projet tant que le chercheur possédera la clé de correspondance qui permet de relier vos réponses à votre identité.

CONFIDENTIALITÉ

Les données recueillies dans le cadre de ce projet seront confidentielles, dans les limites prévues par la loi. Elles seront conservées par la chercheure principale de ce projet de recherche dans un serveur sécurisé par le GRIDD pendant 2 ans. Elles ne seront utilisées que pour l'avancement des connaissances dans le domaine.

Afin de préserver votre identité et la confidentialité de vos renseignements, un numéro de code vous sera attribué. La clé du code reliant votre nom à vos données sera conservée par la chercheure responsable de ce projet de recherche. Les enregistrements acquis durant l'entrevue seront conservés pour la durée du projet et détruits par la suite. Elles pourront être publiées dans des rapports, des articles, faire l'objet de discussions scientifiques, ou être utilisées à des fins d'enseignement. Dans aucun de ces cas, il ne sera possible de vous identifier.

CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES

Le comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS a autorisé la conduite du présent projet de recherche avec la référence H20200907. Pour toute question en lien avec vos droits en tant que participant à la recherche, vous pouvez communiquer avec la coordonnatrice du comité d'éthique de la recherche de l'École de technologie supérieure au (514) 396-8800 poste 7807.

PERSONNES-RESSOURCES

Si vous avez des questions ou besoin d'informations complémentaires au sujet du projet ou de votre participation, vous pouvez communiquer avec Ivanka Iordanova, Chercheure responsable (ivanka.iordanova@etsmtl.ca) ou Virginie Raissa Messa Sokoudjo, étudiante (virginie-raissa.messa-sokoudjo.1@ens.etsmtl.ca).

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abanda, F. H., Tah, J. H. M., & Cheung, F. K. T. (2017). BIM in off-site manufacturing for buildings. *Journal of Building Engineering*, 14, 89-102. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.10.002>
- Abosaod, H., Underwood, J., & Isikdag, U. (2010). A Classification System for Representation of Off-Site Manufacturing Concepts Through Virtual Prototyping. Communication présentée au 9th International Detail Design in Architecture Conference.
- Alfieri, E., Seghezzi, E., Sauchelli, M., Di Giuda, G. M., & Masera, G. (2020). A BIM-based approach for DfMA in building construction: framework and first results on an Italian case study. *Architectural Engineering and Design Management*, 16(4), 247-269. <https://doi.org/10.1080/17452007.2020.1726725>
- Anumba, C., Butler, R. M., Bjørkhaug, L., Ceton, G., Dubler, C., East, B., ... Leicht. NBIMS-USTM V2 (2012).
- Astolfi, J.-P. (1993). Trois paradigmes pour les recherches en didactique. *Revue française de pédagogie*, 103(1), 5-18. <https://doi.org/10.3406/rfp.1993.1293>
- Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- Azman, M. N. A., & Ahamad, M. S. S. (2012). Comparative Study on Prefabrication Construction Process, 14.
- Barbosa, L. M. (2017). *MGI-Reinventing-Construction-*. Mckinney Global Institute.
- Blismas, N., & Wakefield, R. (2009). Drivers, constraints and the future of offsite manufacture in Australia. *Construction Innovation*, 9(1), 72-83. <https://doi.org/10.1108/14714170910931552>
- Boton, C., & Forques, D. (2019). Comprendre l'impact du numérique sur la gestion de projet en construction. *Lien social et Politiques*, (81), 41-60. <https://doi.org/10.7202/1056303ar>

- Brege, S., Stehn, L., & Nord, T. (2014). Business models in industrialized building of multi-storey houses. *Construction Management and Economics*, 32(1-2), 208-226. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.840734>
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971-980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>
- Callon, M., Courtial, J.-P., Turner, W. A., & Bauin, S. (2016). From translations to problematic networks: An introduction to co-word analysis: *Information (International Social Science Council)*. <https://doi.org/10.1177/053901883022002003>
- Carbone, C., Iordanova, I., Bourgault, M., Lemieux-Aid, M., Messa Sokoudjo, V. R., & Belanger, C. (2020). *Trois manières de voir l'industrie du bâtiment préfabriqué*.
- CCDC. (2018). Guide des modes de réalisation des projets de construction.
- Cecobois. (2019). *Guide technique sur la conception de bâtiments à ossature légère en bois* (2^e édition). (S.l.) : Bibliothèque nationale du Québec.
- Cecobois. (2020). Systèmes structuraux - ossature légère en bois. *Cecobois*.
- Cecobois, L. (2021). Le bois comme outil de lutte contre les changements climatiques en construction. *Construire en bois*, p. 20.
- Chadegani, A. A., Salehi, H., Yunus, M. M., Farhadi, H., Fooladi, M., Farhadi, M., & Ebrahim, N. A. (2013). A Comparison between Two Main Academic Literature Collections: Web of Science and Scopus Databases. *Asian Social Science*, 9(5), p18.
- Chikhi, I. (2018). *La filière bois, artefact et catalyseur pour une construction 4.0 au Québec* (M.Sc A). ETS, Montréal.
- Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2011). Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 62(7), 1382-1402. <https://doi.org/10.1002/asi.21525>
- Cochrane. (2019). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*. (S.l.) .

Colombet, I. (2015). Revue systématique et méta-analyse en médecine palliative. *Médecine Palliative : Soins de Support - Accompagnement - Éthique*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.medpal.2015.04.001>

Conseil du Patronat du Québec, D. Inc. (2016). *Étude sur l'écosystème d'affaires de la construction au Québec*.

Conseil national de recherches du Canada. (2015). Chapitre 1 - Bâtiment. Dans *Code de construction Québec* (14^e éd., Vol. 1 et 2). (S.l.) : (s.n.).

Construction Industry Institute (CII). (2002). Prefabrication, Preassembly, Modularization, and Offsite Fabrication in Industrial Construction: A Framework for Decision-Making. Univ. of Texas, Austin, TX.

Correia, L. G., Vicente, R., Azenha, M., & Ferreira, T. M. (2018). A systematic review of Prefabricated Enclosure Wall Panel Systems: Focus on technology driven for performance requirements. *Sustainable Cities and Society*, 40, 688-703. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.027>

Decker, S. A. (2015). *Développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif pour la construction bois : prise en compte du confort des usagers, de l'impact environnemental et de la sécurité de l'ouvrage* (Doctorat). Bordeaux.

Deloitte. (2019). *Vers la création d'une grappe dans le secteur de la construction*.

Durdyev, S., & Ismail, S. (2019). Offsite Manufacturing in the Construction Industry for Productivity Improvement. *Engineering Management Journal*, 31(1), 35-46. <https://doi.org/10.1080/10429247.2018.1522566>

Falagas, M., Pitsouni, E., Malietzis, G., & Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses. *FASEB journal : official publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, 22, 338-42. <https://doi.org/10.1096/fj.07-9492LSF>

Filippi, S., & Cristofolini, I. (Éds). (2010). Adopting the DGLs-CF in the Field. Dans *The Design Guidelines Collaborative Framework: A Design for Multi-X Method for Product Development* (pp. 101-171). London : Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-772-1_4

- Gagnon, Y.-C. (2005). *L'Étude de Cas Comme Méthode de Recherche: Guide de Réalisation.* (S.1.) : PUQ.
- Gagnon, Y.-C. (2012). *L'étude de cas comme méthode de recherche.* (S.1.) : PUQ.
- Gao, S., Low, S. P., & Nair, K. (2018). Design for manufacturing and assembly (DfMA): a preliminary study of factors influencing its adoption in Singapore. *Architectural Engineering and Design Management*, 14(6), 440-456. <https://doi.org/10.1080/17452007.2018.1502653>
- Gbadamosi, A.-Q., Mahamadu, A.-M., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Manu, P., Mahdjoubi, L., & Aigbavboa, C. (2019). Offsite construction: Developing a BIM-Based optimizer for assembly. *Journal of Cleaner Production*, 215, 1180-1190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.113>
- Gerbert, P., Castagnino, S., Rothballe, C., Renz, A., & Filitz, R. (2016). *Digital in Engineering and Construction: The Transformative Power of Building Information Modeling.* The Boston Consulting Group.
- Gerring, J. (2004). What Is a Case Study and What Is It Good for? *The American Political Science Review*, 98(2), 341-354.
- Gibb, A., & Isack, F. (2003). Re-engineering through pre-assembly: client expectations and drivers. *Building Research & Information*, 31(2), 146-160. <https://doi.org/10.1080/09613210302000>
- Gibb, A., & Pendlebury, M. (2006). Glossary of terms :Buildoffsite,Promoting Construction Offsite, London.
- Goulding, J. S., Rahimian, F. P., Arif, M., & Sharp, M. D. (2015). New offsite production and business models in construction: priorities for the future research agenda. *Architectural Engineering and Design Management*, 11(3), 163-184. <https://doi.org/10.1080/17452007.2014.891501>
- Grine, A., Jaziri Jemni, M., & Boubaker, O. B. (2018). Gestion et Equilibrage d'une chaîne de montage par la démarche Lean, 11, 19-26.
- Han, Y., & Wang, L. (2018). Identifying barriers to off-site construction using grey dematel approach: case of china. *Journal of Civil Engineering and Management*, 24(5), 364-377. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.5181>

Heyer, O. C., & Blomquist, R. F. (1964). Stressed Skin Panel Performance After Twenty-five Years of Service.

Hosseini, M. R., Martek, I., Zavadskas, E. K., Aibinu, A. A., Arashpour, M., & Chileshe, N. (2018). Critical evaluation of off-site construction research: A Scientometric analysis. *Automation in Construction*, 87, 235-247. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.002>

ICDC. (2016). *Manuels de pratique de design-construction*. Institut Canadien du Design-Construction.

Jin, R., Gao, S., Cheshmehzangi, A., & Aboagye-Nimo, E. (2018). A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018. *Journal of Cleaner Production*, 202, 1202-1219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.195>

Kamar, K. A. M., Azman, M. N. A., & Nawi, M. N. M. (2014). IBS survey 2010: Drivers, barriers and critical success factors in adopting industrialised building system (IBS) construction by G7 contractors in Malaysia. *Journal of Engineering Science and Technology*, 9(4), 490-501.

Kathy, D., Corbière, M., & Larivière, N. (2020). L'étude de cas: Illustration d'une étude de cas multiples visant à comprendre la participation au travail de personnes présentant un trouble de la personnalité limite. Dans *Méthodes qualitatives, quantitatives et mixtes, 2e édition: Dans la recherche en sciences humaines, sociales et de la santé*. (S.l.): PUQ.

Kenley, R., Kanjanabootra', S., Ouyang', C., & Wynn', M. (2012). Procuring OSM: base-line models of off-site manufacture business processes in Australia, 10.

Kessler, S., & Brüll, L. (2015). New Production Concepts for the Process Industry Require Modular Logistics Solutions. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 87(9), 1240-1245. <https://doi.org/10.1002/cite.201500047>

Koskela, L. (2003). Is structural change the primary solution to the problems of construction? *Building Research & Information*, 31(2), 85-96. <https://doi.org/10.1080/09613210301999>

Koskela, L., Howell, G., Ballard, G., & Tommelein, I. (2002). The foundations of lean construction. Dans *Design and Construction*. (S.l.): Routledge.

- Koskela, L., Owen, B., & Dave, B. (2010). Lean construction, building information modelling and sustainability, 9.
- Koskela, L., & Vrijhoef, R. (2001). Is the current theory of construction a hindrance to innovation? *Building Research & Information*, 29(3), 197-207. <https://doi.org/10.1080/09613210110039266>
- Larsson, J., Eriksson, P. E., Olofsson, T., & Simonsson, P. (2014). Industrialized construction in the Swedish infrastructure sector: Core elements and barriers. *Construction Management and Economics*, 32(1-2), 83-96. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.833666>
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Bergin, R. (2012). Application of modular construction in high-rise buildings. *Journal of Architectural Engineering*, 18(2), 148-154. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000057](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000057)
- Lee, J., Park, M., Lee, H.-S., & Hyun, H. (2019). Classification of Modular Building Construction Projects Based on Schedule-Driven Approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001656](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001656)
- Leedy, P., & Ormrod, E. (2018). *Practical Research: Planning and Design, 12th Edition*. (S.1.) :
- Mao, C., Shen, Q., Pan, W., & Ye, K. (2015). Major Barriers to Off-Site Construction: The Developer's Perspective in China. *Journal of Management in Engineering*, 31(3), 04014043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000246)
- Mostafa, S., Ki Pyung, K., Tam, V. W. Y., & Rahnamayiezekavat, P. (2018). Exploring the status, benefits, barriers and opportunities of using BIM for advancing prefabrication practice: *International Journal of Construction Management*: Vol 20,(No 2).
- Orlowski, K. (2019). Automated manufacturing for timber-based panelised wall systems |. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102988>
- Poirier, E. A., Frenette, S., Carignan, V., Paris, H., & Forques, D. (2018). *Accroître la performance de la filière québécoise de la construction par le virage numérique*.

Pollner, E., Tso, W. K., & Heidebrecht, A. C. (1975). Analysis of Shear Walls in Large-Panel Construction. Repéré à <https://cdnsciencepub.com/doi/10.1139/l75-032>

Quale, J., & Smith, R. E. (2019). *Offsite Architecture: Constructing the Future*. (S.l.) : Routledge.

Rahman, M. M. (2014). Barriers of Implementing Modern Methods of Construction. *Journal of Management in Engineering*, 30(1), 69-77. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000173](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000173)

Razkenari, M., Bing, Q., Fenner, A., Hakim, H., Costin, A., & Kibert, C. J. (2019). Industrialized Construction: Emerging Methods and Technologies. Dans *Computing in Civil Engineering 2019* (pp. 352-359). Atlanta, Georgia : American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482438.045>

Razkenari, M., Fenner, A., Shojaei, A., Hakim, H., & Kibert, C. (2020). Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices. *Journal of Building Engineering*, 29, 101138. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101138>

Richard, R.-B. (2005). Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. *Automation in Construction*, 14(4), 442-451. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.09.009>

Rogan, A. L., Lawson, R. M., & Bates-brkljac, N. (2000). Value and Benefits of Modular construction.

Roger, R. (2010). Five Degrees of Industrialised Building Production. Dans *new perspective in industrialisation in construction – A State of the Art Report* (pp. 15-27). (S.l.) : Task Group 57 du Conseil International du Bâtiment (CIB) et ETH Zurich.

Sardén, Y., & Engström, S. (2010). Modern methods of construction: a solution for an industry characterized by uncertainty? *Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal(CiVEJ)*, Vol.2(No.1), 10.

Staub-French, S., Poirier, E. A., Calderon, F., Chikhi, I., Zadeh, P., Chudasma, D., & Huang, S. (2018). *bim-dfma-for-mass-timber-construction*.

Stephen Kieran, & Timberlake, J. (2004). *refabricating ARCHITECTURE: how manufacturing methodologies are poised to transform building construction*. (S.l.) : (s.n.).

- Su, H.-N., & Lee, P.-C. (2010). Mapping knowledge structure by keyword co-occurrence: a first look at journal papers in Technology Foresight. *Scientometrics*, 85(1), 65-79. <https://doi.org/10.1007/s11192-010-0259-8>
- Sun, Y., Wang, J., Wu, J., Shi, W., Ji, D., Wang, X., & Zhao, X. (2020). Constraints Hindering the Development of High-Rise Modular Buildings. *Applied Sciences*, 10(20), 7159. <https://doi.org/10.3390/app10207159>
- Tang, X., Chong, H.-Y., & Zhang, W. (2019). Relationship between BIM Implementation and Performance of OSM Projects. *Journal of Management in Engineering*, 35(5), 04019019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000704](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000704)
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2014). Visualizing Bibliometric Networks. Dans Y. Ding, R. Rousseau, & D. Wolfram (Éds), *Measuring Scholarly Impact: Methods and Practice* (pp. 285-320). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13
- Waste & Resources Action programme. (2007). *Current practices and future potential in modern methods of construction* (Rapport No. 003-1).
- Winograd, T., Liston, K., & Fischer, M. (2001). Focused Sharing of Information for Multidisciplinary Decision Making by Project Teams. *Journal of Information Technology in Construction*, 6, 69-82.
- Wuni, I. Y., & Shen, G. Q. (2020). Critical success factors for management of the early stages of prefabricated prefinished volumetric construction project life cycle. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(9), 2315-2333. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2019-0534>
- Yin, R. (2009). *Case Study Research: Design and Methods* (4th Edition, Vol. 5). Thousand Oaks, Californie : SAGE Publications.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: design and methods* (Sixth edition). Los Angeles : SAGE.
- Zahibi, H., Habib, F., & Mirsaeedie, L. (2013). Towards Green Building: Sustainability Approach in Building Industrialization. *International Journal of Architecture and Urban Development*, pp. 49-56.

Zhai, X., Reed, R., & Mills, A. (2014). Factors impeding the offsite production of housing construction in China: an investigation of current practice. *Construction Management and Economics*, 32(1-2), 40-52. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.787491>