

Cadre conceptuel pour l'intégration du principe DfMA  
dans une plateforme numérique  
pour la construction modulaire en bois

par

Mathieu ROCHAT

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAITRISE  
AVEC MÉMOIRE EN GENIE DE LA CONSTRUCTION  
M. Sc. A

MONTREAL, LE 17 JANVIER 2024

ECOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Mathieu Rochat, 2023



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 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 EVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

M. Érik Poirier, membre du jury  
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Carlo Carbone, examinateur externe  
École de Design UQÀM

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

LE 19 DÉCEMBRE 2023

A L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE





## REMERCIEMENTS

Je remercie toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce mémoire, de proche comme de loin. Je tiens à remercier tout d'abord ma directrice de recherche, Ivanka Iordanova, pour son soutien et ses conseils pendant cette longue période de recherche. Je remercie également mon tuteur, Eli Gould, pour ses nombreuses connaissances transmises et son aide infaillible pendant la réalisation de ce projet.

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

Je tiens à remercier le programme Mitacs Accélération ainsi que mon partenaire industriel, le QWEB, pour leur soutien financier qui a permis la bonne réalisation de ce travail.

Un merci à tous les partenaires industriels qui ont accepté de me donner de leur temps afin de répondre à des entrevues et qui ont pu ainsi participer à l'aboutissement de ce projet.

Et enfin je voudrais remercier ma famille, mes parents, Thierry et Isabelle, pour leur soutien affectif et moral infaillible dans mes plus grands moments de doute, et mes amis qui m'ont donné le courage d'aller au bout de ce projet.



# **Cadre conceptuel pour l'intégration du principe DfMA dans une plateforme numérique pour la construction modulaire en bois**

Mathieu ROCHAT

## **RÉSUMÉ**

La construction hors site (CHS), ou préfabrication, est un des leviers d'amélioration de la productivité dans l'industrie de la construction. Selon la littérature, jumelé à la CHS, le virage numérique permettrait de doubler la productivité sur le chantier. La construction industrialisée est en train de révolutionner le secteur de la construction en améliorant la qualité et l'efficacité de la construction et en apportant une solution à la pénurie de main-d'œuvre dans le secteur de la construction. Cependant, des défis complexes tels que la standardisation, la conception pour la fabrication et l'assemblage (DfMA), et l'intégration de technologies émergentes subsistent.

L'industrie de la CHS en bois manque d'une plateforme de DfMA afin de faciliter la construction de structures préfabriquées modulaires en bois. Il existe un manque d'études concernant l'application dans des cas concrets d'utilisation des principes de la CHS et du concept de DfMA - un concept essentiel à la réussite d'un projet lorsqu'il fait appel à la préfabrication.

La revue de littérature a identifié les tendances actuelles et les solutions émergentes dans la CHS en bois. Elle a également mis en lumière l'utilisation de la méthodologie Design-Science comme une approche prometteuse pour l'innovation dans ce domaine. Nous avons suivi cette méthodologie, comprenant l'identification des besoins, la conception itérative, l'évaluation et la validation de la solution, ainsi que la communication des résultats. L'étape de validation comprend des entretiens semi-dirigés avec des experts de l'industrie afin d'améliorer la solution proposée.

Cette recherche a établi un cadre conceptuel d'une plateforme numérique DfMA innovante pour surmonter les défis relevés. Ce cadre conceptuel permet d'assurer l'application des principes DfMA et de simplifier les flux de données et d'informations dans l'écosystème d'un projet afin de favoriser l'utilisation de la préfabrication modulaire en bois dans la construction.

**Mots-clés** : construction hors site, modulaire en ossature de bois, DfMA, BIM, cadre conceptuel, plateforme numérique



# **Conceptual framework for integrating DfMA principles into a digital platform for modular light wood frame construction**

Mathieu ROCHAT

## **ABSTRACT**

Off-site construction (OSC), or prefabrication, is a key factor in improving productivity in the construction industry. According to the literature, the digital shift, combined with OSC, could double productivity on the job site. Industrialized construction is revolutionizing the construction industry by improving the quality and efficiency of construction and providing a solution to the construction industry's labor shortage. However, complex challenges remain, including standardization, design for manufacturing and assembly (DfMA), and the integration of new technologies.

A DfMA platform to facilitate the construction of modular prefabricated wood structures is lacking in the wood OSC industry. There is a lack of studies that link OSC to the DfMA concept, a concept that is essential to the success of a prefabrication project.

The literature review identified current trends and emerging solutions in timber OSC. It also highlighted the use of design science methodology as a promising approach to innovation in this field. We followed this methodology, including needs identification, iterative design, solution evaluation and validation, and communication of results. The validation stage includes semi-structured interviews with industry experts to improve the proposed solution as much as possible.

This research has established a conceptual framework for an innovative DfMA digital platform to address the identified challenges. This conceptual framework ensures the application of DfMA principles and to simplify data and information flows within the project ecosystem to promote the use of modular wood prefabrication in construction.

**Keywords** : off-site construction, timber-frame, DfMA, BIM, conceptual framework, digital platform



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	23
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE .....	25
1.1 Méthodologie de la revue de littérature .....	25
1.1.1 Recherche bibliographique .....	25
1.1.2 Différents axes de recherche.....	26
1.1.2.1 Construction hors site modulaire en bois.....	26
1.1.2.2 DfMA et BIM .....	27
1.1.2.3 Plateformes numériques.....	28
1.2 Construction hors site modulaire en bois.....	29
1.2.1 Contexte .....	30
1.2.2 Différents niveaux de construction hors site.....	30
1.2.3 Avantages et inconvénients.....	31
1.2.3.1 Avantages.....	32
1.2.3.2 Inconvénients / Freins .....	35
1.2.4 Le bois dans la construction hors site .....	37
1.2.5 Modèle commercial de construction hors site .....	38
1.3 DfMA et BIM .....	42
1.3.1 Définition et principes.....	42
1.3.1.1 DfMA.....	42
1.3.1.2 BIM.....	43
1.3.2 Intérêt des principes DfMA pour la CHS .....	43
1.3.2.1 Augmenter la flexibilité de la conception.....	44
1.3.2.2 Intégration dans le processus de fabrication hors site.....	44
1.3.2.3 Processus de livraison et d’assemblage sur site.....	45
1.3.2.4 Performance structurelle .....	46
1.3.2.5 Performance environnementale et durabilité .....	46
1.3.3 Obstacles à l’adoption du DfMA dans la CHS .....	47
1.4 Plateformes numériques.....	48
1.4.1 Définition .....	48
1.4.2 Différentes plateformes numériques pour différentes phases d’un projet.....	49
1.4.2.1 Plateformes en planification et conception .....	50
1.4.2.2 Plateformes pour la construction .....	55
1.4.2.3 Plateformes pour la mise en service et l’exploitation .....	58
1.4.3 Plateformes numériques adaptées à la construction hors site modulaire en bois.....	60
1.4.3.1 StrucSoft MWF Pro Wood.....	60
1.4.3.2 CadWork .....	61
1.4.3.3 Dietrich’s COB .....	61
1.4.3.4 3DExperience.....	62

1.5	Études de projets relevés dans la littérature .....	65
1.5.1	Brock Commons Tallwood House, Vancouver, Colombie-Britannique.....	65
1.5.2	Corvette Landing, Esquimalt, Colombie-Britannique .....	69
1.5.3	Logements BoKlok, Suède .....	71
1.6	Conclusion de la revue de littérature .....	73
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....		75
2.1	Objectifs de la recherche.....	75
2.2	Méthodologie de recherche.....	75
2.2.1	Définition et objectifs de la recherche Design-Science. ....	75
2.2.2	Justification de l'utilisation de la méthode Design-Science Research.....	77
2.3	Identification et définition du problème .....	78
2.3.1	Processus de définition du problème .....	78
2.3.2	Rôle de la littérature.....	78
2.4	Analyse des besoins et des opportunités .....	79
2.4.1	Collecte de données pour comprendre les besoins .....	79
2.4.2	Identification des opportunités pour l'innovation .....	80
2.4.3	Synthèse des besoins et des opportunités.....	80
2.5	Conception du système ou de la solution.....	81
2.5.1	Principes de conception .....	81
2.5.2	Modélisation conceptuelle .....	81
2.5.3	Conception itérative.....	82
2.6	Méthodes d'évaluation et de validation de la solution .....	82
2.6.1	Évaluation de la solution par rapport aux besoins identifiés .....	82
2.6.2	Tests et expérimentations.....	83
2.6.3	Réalisation de cas d'utilisation.....	83
2.6.4	Validation par des experts de l'industrie .....	83
2.6.5	Révision et amélioration .....	84
2.7	Communication des résultats .....	84
2.7.1	Présentation des résultats .....	84
2.7.2	Adoption par les parties prenantes.....	84
2.8	Synthèse du chapitre .....	85
2.8.1	Pertinence de la méthodologie <i>Design-Science</i> dans la recherche actuelle .....	86
2.8.2	Perspectives futures et recommandations .....	86
CHAPITRE 3 CONCEPTION DE LA SOLUTION : CADRE CONCEPTUEL D'UNE PLATEFORME DFMA POUR LA CONSTRUCTION HORS SITE .....		87
3.1	Introduction.....	87
3.1.1	Contexte de la conception.....	87
3.1.2	Objectifs du chapitre .....	88
3.2	Conception itérative du cadre théorique de la plateforme numérique DfMA.....	88



3.2.1	Méthodologie de conception itérative.....	88
3.2.2	Phase initiale : Identification des besoins .....	89
3.2.2.1	Identification des besoins dans la littérature.....	89
3.2.2.2	Etude de fonctionnement d'un manufacturier : AmeriCan Structures.....	91
3.2.3	Phase de modélisation conceptuelle.....	98
3.3	Évaluation et validation de la solution.....	108
3.3.1	Évaluation par des experts .....	108
3.3.1.1	Profil des répondants.....	109
3.3.1.2	Logiciels et plateformes utilisés par les répondants .....	109
3.3.1.3	Données échangées dans un projet hors site .....	111
3.3.1.4	Synthèse des entrevues .....	112
3.3.2	Cas d'utilisation : Maquette numérique.....	112
3.4	Conclusion de la phase de modélisation de la solution.....	117
	CHAPITRE 4 DISCUSSION .....	119
	CONCLUSION.....	121
	RECOMMANDATIONS .....	123
	ANNEXE I QUESTIONNAIRE D'ENTREVUE .....	125
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	127



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Articles relevés concernant la CHS modulaire en bois.....27
Tableau 1.2	Articles relevés concernant le DfMA et le BIM .....28
Tableau 1.3	Articles relevés concernant les plateformes numériques .....29
Tableau 1.4	Catégories de CHS Adapté de Gibb & Isack (2003, p. 3) .....31
Tableau 1.5	Avantages et inconvénients de la CHS .....32
Tableau 1.6	Récapitulatif des logiciels en fonction des phases d'un projet .....64
Tableau 3.1	Tableau récapitulatif des données utiles au processus de réalisation des murs.....97
Tableau 3.2	Synthèse des défis relevés.....98
Tableau 3.3	Logiciels de conception utilisés par les répondants .....110
Tableau 3.4	Plateformes de collaboration utilisées par les répondants .....110
Tableau 3.5	Données nécessaires lors des phases de conception et de fabrication .....111
Tableau 3.6	Quantité de détails d'ouverture modélisés .....115
Tableau 3.7	Récapitulatif des détails de murs modélisés .....116
Tableau 3.8	Données du cadre conceptuel validée avec l'étude de cas.....117
Tableau 4.1	Défis relevés pendant les entrevues avec les experts.....119



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Émission de CO <sub>2</sub> selon le mode de construction Tirée de Quale et al (2012).....34
Figure 1.2	Types de composants en bois massif Tirée de <i>Think Wood</i> (2018).....38
Figure 1.3	Comparaison entre une équipe de construction traditionnelle et une équipe de construction modulaire Tirée du rapport MBI (2019).....39
Figure 1.4	Comparaison des différentes phases de projets modulaires et conventionnels Tirée de Razkenari et al. (2020) .....40
Figure 1.5	Différents niveaux de préfabrication des produits manufacturés Tirée de Lessing et Brege (2018).....41
Figure 1.6	Organigramme du cadre DfMA axé sur la construction Adaptée de Rankohi et al. (2023).....49
Figure 1.7	Évolution du LOD sur un poteau en béton .....50
Figure 1.8	Trois types de configurateurs Tirée de Cao et al. (2021).....51
Figure 1.9	Interface des configurateurs SpaceMaker et Archistar .....52
Figure 1.10	Interface des configurateurs PrismApp et Kreo Modular .....52
Figure 1.11	Exemple de projet sur la plateforme Project Frog Tirée de myprojectfrog.com.....54
Figure 1.12	Systèmes d'intégration pour la construction numérique Tirée de Beddiar et al. (2021) .....56
Figure 1.13	Application Novade Tirée de novade.net.....57
Figure 1.14	Interface de la plateforme 3DExperience .....58
Figure 1.15	Modèle de la plateforme Invicara Tirée de invicara.com .....59
Figure 1.16	Modélisation via StrucSoft MWF Pro Wood Tirée de strucsoftsolutions.com .....60
Figure 1.17	Logiciel CadWork Tirée de cadwork.com.....61
Figure 1.18	Dietrich's COB pour la préfabrication Tirée de dietrichs.com.....62

Figure 1.19	Interface du logiciel CATIA sur la plateforme 3DExperience Tirée de 3ds.com.....	63
Figure 1.20	Brock Commons Tallwood House Tirée de NaturallyWood.com.....	66
Figure 1.21	Extrait de la séquence vidéo du modèle VDC et de l'assemblage sur site Tirée de CadMakers.com.....	67
Figure 1.22	Modèle VDC comprenant les systèmes MEP Tirée de CadMakers.com .....	68
Figure 1.23	Maquettes du projet Corvette Landing Tirée de Lang et al. (2019).....	69
Figure 1.24	Modèle paramétrique du projet Tirée de Lang et al. (2019).....	70
Figure 1.25	Différentes permutations d'un module Tirée de Lang et al. (2019) .....	70
Figure 1.26	Projet BoKlok Duetten, Hälsinggarden, Falun Tirée de BoKlok.com .....	72
Figure 1.27	Typologie des appartements (1 chambre, 2 chambres, 3 chambres) Tirée de BoKlok.com.....	72
Figure 2.1	Le processus d'une méthodologie de recherche Design-Science Adaptée de Kasanen et al. (1993) .....	77
Figure 3.1	Vue extérieure de l'entreprise.....	92
Figure 3.2	Section murs, fermes et poutrelles (de gauche à droite) .....	92
Figure 3.3	Relations contractuelles entre les parties prenantes d'un projet .....	93
Figure 3.4	Processus de réalisation des murs .....	94
Figure 3.5	Organigramme du cadre DfMA pour la construction hors site Adaptée de Rankohi et al. (2023) .....	99
Figure 3.6	Détail des données nécessaires à chaque étape du processus .....	100
Figure 3.7	Cadre conceptuel des flux d'information d'un projet hors site.....	101
Figure 3.8	Détail du partage d'information pour l'étape 1. Design conceptuel .....	102
Figure 3.9	Détail du partage d'information pour l'étape 2. Coordination spatiale .....	103

Figure 3.10	Détail du partage d'information pour l'étape 3. Conception technique.....	103
Figure 3.11	Détail du partage d'information pour l'étape 4. Fabrication.....	104
Figure 3.12	Détail du partage d'information pour l'étape 5. Livraison au chantier.....	105
Figure 3.13	Détail du partage d'information pour l'étape 6. Assemblage .....	105
Figure 3.14	Synthèse des formats d'échange utilisés pour un projet hors site.....	106
Figure 3.15	Représentation globale du cadre conceptuel proposé .....	107
Figure 3.16	Répartition des types de projets réalisés par les répondants .....	109
Figure 3.17	Processus de réalisation des modèles 3d.....	113
Figure 3.18	Exemple d'ouverture avec 3 linteaux .....	114
Figure 3.19	Visualisation du modèle sur un navigateur web .....	115
Figure 3.20	Types de murs modélisés pour le projet .....	116





## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

AEC	Architecture, Engineering and Construction
BIM	Building Information Modeling
CHS	Construction Hors Site
CLT	Cross Laminated Timber
DfMA	Design for Manufacturing and Assembly
ERP	Enterprise Resource Planning
GES	Gaz à Effet de Serre
GLULAM	Glue Laminated Timber
IPD	Integrated Project Delivery
LOD	Level Of Development
NLT	Nail Laminated Timber
PLM	Product Lifecycle Management
RIBA	Royal Institute of British Architects
VDC	Virtual Design and Construction



## INTRODUCTION

L'importance de l'industrie de la construction aux niveaux économique, environnemental et social est incontestable. Or, tant au Québec qu'à l'international, les constats fusent quant au besoin d'améliorer la performance et d'accroître la productivité de celle-ci (Groupe BIM Québec, 2018). Le virage numérique et la construction hors site (CHS) sont vus par plusieurs comme étant les avenues les plus prometteuses pour améliorer de façon tangible la productivité et la création de valeur pour ce secteur névralgique de l'économie québécoise. Par exemple, Koeleman et al. (2019) indiquent que le virage numérique en construction permettrait d'augmenter la productivité de l'industrie de 14 à 15 % et diminuerait les coûts de projets de 4 à 6 %. Lorsque jumelé à la construction hors site, le virage numérique permettrait de doubler la productivité sur le chantier (Poirier, Staub-French, & Forgues, 2015). La CHS demeure un levier important pour améliorer la productivité dans l'industrie québécoise de la construction. Depuis son origine dans les années 1930, la CHS est en train de se réinventer grâce aux nouvelles technologies.

La construction en bois massif, comme tout autre système de construction, bénéficie de l'application du BIM tout au long de son cycle de vie. Cela étant dit, parmi les principaux systèmes constructifs (acier, béton, bois), le bois est peut-être le système qui a reçu le moins d'attention en termes de développement d'outils et de plateformes pour soutenir les processus BIM. Par exemple, il a été constaté que les normes de données actuelles ne sont pas bien adaptées au développement de modèles BIM qui prennent en charge la conception et l'analyse de structures en bois massif (Nawari, 2012). Cette constatation est reprise par le groupe de recherche LeanWood (Le Roux, Bannier, Bossanne, & Stieglmeier, 2016) qui rappelle qu'un format d'échange de données normalisé est nécessaire pour soutenir le développement de projets collaboratifs, la planification et la collaboration, importantes pour le développement d'outils de Conception pour la Fabrication et l'Assemblage (*Design for Manufacturing and Assembly* (DfMA)) (Le Roux et al., 2016 ; Nawari, 2012). D'autre part, de nombreux pays européens ont développé des programmes complémentaires et des bibliothèques d'objets pour faciliter l'utilisation du bois massif dans la construction (Staub-French et al., 2018).

L'utilisation des principes du DfMA 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, Low, & Nair, 2018), la conception suivant ce principe permet d'évaluer différentes solutions possibles, et ainsi, la solution constructive choisie est optimale (Messa Sokoudjo, 2021).

L'objectif de ce projet de mémoire est de développer un cadre conceptuel pour une plateforme DfMA destinée à la construction hors site en bois. Ce travail de recherche est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre sera dédié à une revue de la littérature sur la construction hors site et les principes DfMA et BIM. Le deuxième chapitre exposera la méthodologie adoptée pour cette étude. Le troisième chapitre présentera la solution proposée pour le cadre conceptuel, en incluant une validation à travers des entretiens avec des experts. Enfin, le dernier chapitre discutera des résultats de la recherche, de ses limites actuelles et proposera des suggestions d'amélioration pour surmonter les contraintes identifiées.

# CHAPITRE 1

## REVUE DE LITTÉRATURE

### 1.1 Méthodologie de la revue de littérature

La réalisation d'une revue de littérature est la première étape dans le processus de recherche, car elle permet d'explorer et de synthétiser les connaissances existantes sur un sujet spécifique. Dans cette section, nous allons décrire la méthodologie que nous avons adoptée pour mener notre revue de littérature sur la construction hors site modulaire en bois, en mettant l'accent sur les principes de *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA) et de *Building Information Modeling* (BIM), ainsi que sur l'utilisation de plateformes numériques dans ce contexte.

#### 1.1.1 Recherche bibliographique

La première étape de la revue de littérature est la recherche bibliographique. Celle-ci permet de collecter des articles de journaux et d'autres documents intéressants dans les bases de données académiques à partir de mots-clés choisis au préalable. Les principaux moteurs de recherche et bases de données utilisés ont été : *Google Scholar*, *ScienceDirect (Scopus)* et *ResearchGate*. Étant donné le sujet de recherche, les principaux mots-clés utilisés ont notamment été : *off-site construction*, *prefabrication*, *modular construction*, *platform*, *DfMA*, *BIM*, *wood*, *timber*.

Cette recherche bibliographique conduit à plus d'une centaine d'articles collectés. Il convient ensuite de conserver uniquement les articles qui apportent une connaissance au sujet de recherche. Ce tri a été effectué à la suite des lectures des résumés qui valident ou non l'intérêt de l'article pour la présente revue de littérature. Ce processus a sélectionné un total de 25 articles pour la revue de littérature.

La recherche bibliographique a été approfondie en utilisant la méthode de *snowballing*. Le *snowballing* consiste à utiliser la liste de références d'un article ou les citations de cet article

pour identifier d'autres articles. Cependant, cette méthode pourrait bénéficier non seulement de l'examen des listes de références et des citations, mais aussi d'une manière systématique d'examiner où les articles sont effectivement référencés et où les articles sont cités. L'utilisation des références et des citations respectivement est appelée *backward snowballing* et *forward snowballing* (Wohlin, 2014).

### **1.1.2 Différents axes de recherche**

Pour structurer notre revue de littérature de manière méthodique, nous avons identifié trois axes de recherche distincts, chacun contribuant à une compréhension approfondie de notre sujet. Ces axes de recherches sont détaillés dans les parties suivantes.

#### **1.1.2.1 Construction hors site modulaire en bois**

Le premier axe de recherche étudié concerne tous les articles en lien avec la construction hors site en général, puis spécifiquement en bois. Cette recherche a permis de décrire le contexte de la CHS dans l'industrie de la construction, ses différentes spécificités ainsi que ses avantages et inconvénients. Les articles lus démontrent l'importance du bois dans la CHS ainsi que ses différentes utilisations. Enfin cette revue de littérature a permis de détailler les différents modèles d'affaire appliqués aux entreprises de construction modulaire hors site.

Le tableau 1.1 recense les 14 articles, parus entre 2003 et 2021, qui ont été relevés et conservés pour la rédaction du chapitre concernant la CHS modulaire en bois.

Tableau 1.1 Articles relevés concernant la CHS modulaire en bois

<b>Auteurs / Date</b>	<b>Titre</b>
Beddiar et al. 2021	Construction hors-site: DfMA, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment
Gibb et Isack 2003	Re-engineering through pre-assembly: client expectations and drivers
Han et Wang 2018	Identifying barriers to off-site construction using grey dematel approach: case of China
Hong et al. 2018	Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost-benefit analysis
Jiang et al. 2018	A SWOT analysis for promoting off-site construction under the backdrop of China's new urbanisation
Jin et al. 2018	A holistic review of off-site construction literature published between 2008 and 2018
Lessing et Brege 2018	Industrialized Building Companies' Business Models: Multiple Case Study of Swedish and North American Companies
Patlakas et al. 2015	A BIM Platform for Offsite Timber Construction
Quale et al. 2012	Construction Matters: Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States
Rapport MBI 2019	The U.S. Construction Industry: A National Crisis Looming
Razkenari et al. 2019	Industrialized Construction: Emerging Methods and Technologies
Razkenari et al. 2020	Perceptions of offsite construction in the United States: An investigation of current practices
Salama et al. 2020	Financial Modeling for Modular and Offsite Construction
Sonego et al. 2018	The role of modularity in sustainable design: A systematic review

### 1.1.2.2 DfMA et BIM

Le second axe de recherche a été l'étude des principes DfMA et BIM. La sélection d'articles pertinents sur le sujet a permis d'établir une définition simplifiée de ces principes ainsi que de détailler l'intérêts de ceux-ci pour la construction hors site.

Le tableau 1.2 recense les 7 articles, parus entre 2011 et 2019, qui ont été pertinents concernant cet axe de recherche.

Tableau 1.2 Articles relevés concernant le DfMA et le BIM

<b>Auteurs / Date</b>	<b>Titre</b>
Eastman et al. 2012	BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors
Molloy et al. 2012	Design for Manufacturing and Assembly: Concepts, architectures and implementation
Patlakas et al. 2015	A BIM Platform for Offsite Timber Construction
Razkenari et al. 2019	Industrialized Construction: Emerging Methods and Technologies
Redmond et al. 2015	Exploring how information exchanges can be enhanced through Cloud BIM
Smith 2011	Prefab architecture: a guide to modular design and construction
Staub-French et al. 2018	Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction

### 1.1.2.3 Plateformes numériques

Le dernier axe de recherche de cette revue de littérature a été les plateformes numériques dans les projets de construction. Cette section est axée sur les différents modèles de plateformes existants ainsi qu'un survol de quelques-unes intéressantes pour la CHS modulaires en bois.

Le tableau 1.3 liste les articles utilisés pour la rédaction de cette section. De nombreux sites ont également été consultés afin de trouver les outils utilisés dans l'industrie de la construction et plus spécifiquement pour la CHS.



Tableau 1.3 Articles relevés concernant les plateformes numériques

<b>Auteurs / Date</b>	<b>Titre</b>
Beddiar et al. 2021	Construction hors-site: DfMA, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment
Cao et al. 2021	Cross-phase product configurator for modular buildings using kit-of-parts
Staub-French et al. 2018	Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction
Yuan et al. 2018	Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings

Cette méthodologie de la revue de littérature nous a permis de rassembler des informations complètes et pertinentes sur la construction hors site modulaire en bois et ses liens avec le DfMA et le BIM et les outils numériques disponibles.

Dans les sections suivantes de cette revue de littérature, nous explorerons en détail chacun de ces axes de recherche. Nous analyserons les tendances, les développements récents, et les perspectives futures dans chacun de ces domaines, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de la construction hors site modulaire en bois dans le contexte du DfMA, du BIM, et des plateformes numériques.

## **1.2 Construction hors site modulaire en bois**

Le premier domaine de recherche exploré se concentre sur la construction hors site, en commençant par une perspective générale, puis en se focalisant plus précisément sur le secteur du bois. Dans un premier temps, le contexte de la construction hors site dans l'industrie de la construction est introduit, en mettant en évidence ses particularités ainsi que ses avantages et inconvénients. Ensuite un point est fait sur l'importance du matériau bois dans le domaine de la construction hors site et ses diverses applications. Enfin, cette partie détaille les différents modèles d'affaires adoptés par les entreprises œuvrant dans la construction modulaire hors site.

### **1.2.1 Contexte**

La construction traditionnelle dans les pratiques courantes du secteur mondial de la construction est la construction in situ des bâtiments. Cette méthode de l'industrie de la construction fait cependant face à de nombreux défis présent depuis longtemps tels que l'efficacité, la sécurité, la qualité, l'impact environnemental (Jiang, Mao, Hou, Wu, & Tan, 2018). Avec le développement de techniques de construction innovantes, la construction hors site (CHS) a commencé à révéler son importance pour relever ces défis. La CHS est une méthode de construction totalement différente qui comprend la préfabrication d'éléments ou de sous-assemblages d'un bâtiment dans un site de fabrication ou production, le transport de ces éléments et leur assemblage sur le site de construction (Jiang et al., 2018).

Le principe de la CHS est basé les méthodes de fabrication en usine. L'idée est de déplacer la construction au chantier vers des ateliers ou des usines afin de produire plus efficacement et dans un environnement contrôlé (Razkenari et al., 2019). La technique utilisée en usine se base sur la production en chaine de produits. La production peut être réalisée dans une ligne d'assemblage où le produit final est passé par plusieurs postes de travail successivement ou dans un fonctionnement par ilots où plusieurs modules sont produits en parallèles.

### **1.2.2 Différents niveaux de construction hors site**

La construction hors site ou la préfabrication est souvent assimilée à des techniques de construction modulaire complètes, où les unités constituent la structure et le corps du bâtiment. Cependant, la préfabrication peut-être subdivisée en quatre catégories, en fonction de l'importance croissante du degré de pré-assemblage (Gibb & Isack, 2003) :

- La fabrication de composants et le sous-assemblage (ex : fenêtres, portes)
- Le pré-assemblage non volumétrique (panneaux 2D)
- Le pré-assemblage volumétrique (3D)
- La construction modulaire (3D)

Tableau 1.4 Catégories de CHS  
Adapté de Gibb & Isack (2003, p. 3)

<b>Catégories</b>	<b>Définition</b>
Composants	Articles toujours fabriqués dans une usine et jamais envisagés pour une production sur site.
Systèmes à panneaux	Unités pré-assemblées qui ne créent pas d'espace utilisable, éléments plans utilisés pour la structure du bâtiment.
Systèmes volumétriques	Unités volumétriques pré-assemblées qui constituent la structure et le corps du bâtiment.
Systèmes modulaires	Unités préassemblées qui créent un espace utilisable et sont généralement entièrement finies en usine à l'intérieur, installées dans ou sur un cadre structurel indépendant.

### 1.2.3 Avantages et inconvénients

La construction hors site offre une nouvelle approche de la construction en déplaçant le processus de construction du bâtiment du chantier vers un environnement d'usine contrôlé (Jiang et al., 2018). Bien que la CHS n'en soit qu'au début de son application dans de nombreux pays (notamment en Chine) (Hong, Shen, Li, Zhang, & Zhang, 2018), cette technique de construction émergente a suscité une grande attention de la part du public en raison de ses avantages potentiels pour obtenir une meilleure performance des projets, comme la réduction de la durée du projet et la minimisation des déchets de construction (Jin, Gao, Cheshmehzangi, & Aboagye-Nimo, 2018). La CHS implique la modularité des produits de construction, qui est liée à la conception, la fabrication, la chaîne d'approvisionnement et l'évaluation du cycle de vie (Sonogo, Echeveste, & Galvan Debarba, 2018). Ces questions de construction contemporaines, qui comprennent la modélisation des données du bâtiment (BIM), la livraison intégrée des projets (IPD) et la durabilité environnementale, ont déjà suscité une attention croissante dans les milieux universitaires et industriels (Jin et al., 2018).

Les résultats d'une enquête réalisée par Gibb & Isack (2003) montrent les avantages et inconvénients de l'utilisation de la CHS dans les projets de grands clients du secteur de la

construction au Royaume-Uni. Beddiar et *al.* (2021) recensent également les avantages et les freins au développement de la CHS. Ces aspects sont regroupés dans le tableau suivant et détaillés dans les prochaines sections.

Tableau 1.5 Avantages et inconvénients de la CHS

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients / Freins</b>
Réduction des délais	Freins culturels et facteur humain
Amélioration de la qualité	Freins organisationnels
Réduction de l'impact environnemental	Freins techniques et réglementaires
Amélioration des conditions de travail	

### 1.2.3.1 Avantages

#### Réduction des délais

Le premier avantage de la CHS est le gain de temps global des projets, ce qui conduit à un gain financier car les projets sont livrés dans les temps voire plus tôt. Le gain de temps dépend du niveau de préfabrication choisi pour le projet. Il est démontré qu'une réduction de temps allant de 10 à 20% par rapport à une construction traditionnelle est possible pour les chantiers optant pour une préfabrication de systèmes à panneaux. Une réduction de temps allant jusqu'à 50% est possible pour des projets utilisant de la préfabrication volumétrique ou modulaire (Beddiar et al., 2021).

L'avantage des systèmes préfabriqués modulaires est que les modules arrivent sur le chantier pour être installés avec les finitions intérieures et même du mobilier parfois. La réduction des délais peut s'expliquer par la parallélisation des différentes tâches. Par exemple, il est possible de réaliser les fondations sur le chantier pendant que les modules sont fabriqués en usine. Il convient ensuite de livrer les modules sur site pour l'assemblage et terminer la construction (Beddiar et al., 2021).

De plus, grâce aux divers avantages liés à la fabrication en usine, tels que l'environnement contrôlé ou la facilité de reproduction des tâches, le processus de construction hors site est beaucoup plus rapide que la construction sur site de systèmes équivalents (Beddiar et al., 2021).

### **Amélioration de la qualité**

Un autre avantage important de la CHS est l'augmentation de la qualité du produit fini. Il s'agit notamment de l'obtention d'une meilleure qualité des produits fabriqués en usine que celle qui peut être obtenue sur le site, de la cohérence de la qualité et du fait que les pièces sont plus susceptibles d'être conçues pour s'emboîter correctement (Gibb & Isack, 2003). La fabrication en usine permet également de réduire les défauts et non-conformités aux réglementations qui nécessitent des reprises avant la livraison du projet. Ainsi l'augmentation de la qualité conduit également à un gain financier car les coûts engendrés par les défauts sont grandement réduits (Beddiar et al., 2021).

La production en usine offre un environnement à l'abri des intempéries et autres dégradations liées aux conditions météorologiques, ce qui ne peut pas être le cas sur le site d'un chantier traditionnel. Cela protège alors les matériaux qui sont moins exposés aux dégradations et seront donc de meilleure qualité pour la préfabrication. De plus les outillages en usine, tels que les machines à commande numérique, assurent une plus grande qualité des produits fabriqués que ce qui pourrait être réalisé sur le chantier. Par ailleurs, il est possible de réaliser des tests en usine sur les produits manufacturés qui assurent alors leurs qualités et leurs performances (Beddiar et al., 2021).

### **Réduction de l'impact environnemental**

La CHS présente de nombreux avantages concernant la réduction de l'impact environnemental. Le premier étant la réduction des déchets allant jusqu'à 30%. L'optimisation des processus et la conception orientée pour la fabrication (DfMA) permettent de produire des pièces en limitant le surplus de matériau. De plus, la gestion des stocks est plus facilement réalisable dans une

usine que sur un chantier et il est possible de limiter les déchets d’emballage en optimisant les livraisons par camion (Beddiar et al., 2021).

L’industrie de la construction est une industrie qui génère énormément de GES. Un autre avantage de taille concernant la CHS est la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. En utilisant des matériaux renouvelables comme le bois ou des matériaux recyclés comme l’acier, la CHS peut réduire ses émissions de GES. Par ailleurs, il est plus envisageable d’utiliser une source d’énergie plus verte en usine que sur un chantier. De plus, le fait de centraliser la production dans une usine permet de limiter grandement les déplacements des ouvriers. Ainsi il est plus simple de valoriser les filières locales et de réduire les déplacements de véhicules, réduisant alors les émissions de GES (Beddiar et al., 2021). La figure 1.1 présente la production de CO<sub>2</sub> pour différentes entreprises de construction (modulaire ou conventionnelle) pour un même projet type.

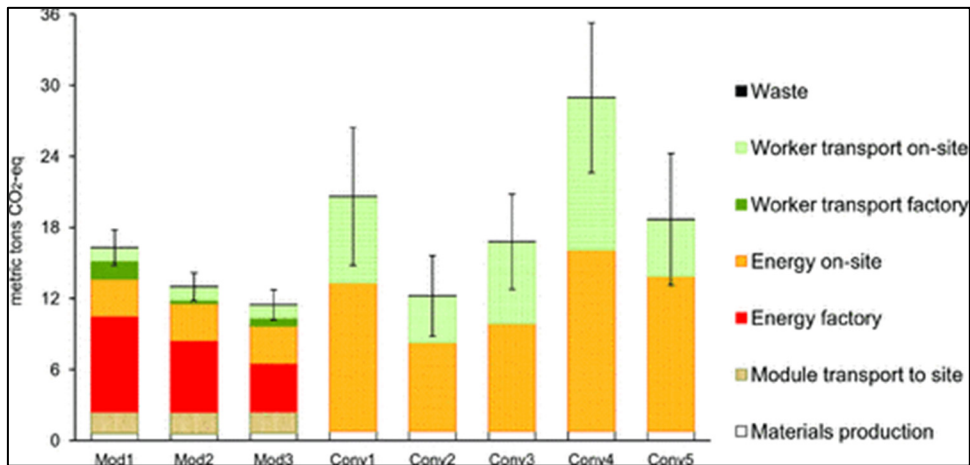


Figure 1.1 Émission de CO<sub>2</sub> selon le mode de construction  
Tirée de Quale et al (2012)

La réduction des nuisances sur le chantier est un autre avantage de la CHS. En effet, le fait de relocaliser une grande partie des travaux en usine réduit grandement le temps passé sur le chantier ainsi que la quantité de main-d’œuvre. Un chantier utilisant une construction modulaire peut réduire les flux de véhicules et d’ouvriers jusqu’à 80% (Beddiar et al., 2021).

De plus, la CHS réduit significativement les nuisances sonores et la production de déchets sur site, dégradant beaucoup moins le cadre de vie des riverains au chantier.

### **Amélioration des conditions de travail**

Le dernier avantage notable de la CHS est l'amélioration des conditions de travail des travailleurs. Premièrement la sécurité des ouvriers est nettement améliorée car les opérations à risque sur site sont diminuées. Le travail étant réalisé dans une usine, les ouvriers sont à l'abri des conditions météorologiques indésirables. Les technologies disponibles en industrie permettent d'utiliser des machines et des outils de précisions adéquats à chaque tâche. Tous ces avantages permettent de répondre au manque croissant de main-d'œuvre dans le secteur de la construction en proposant des métiers alternatifs moins pénibles (Beddiar et al., 2021).

#### **1.2.3.2 Inconvénients / Freins**

##### **Freins culturels et facteur humain**

L'industrie de la construction est l'une des industries qui évolue le plus lentement. Le passage d'un mode de construction traditionnel sur site à l'adoption de la CHS n'est pas facile car ces méthodes de construction traditionnelles sont appliquées dans le secteur de la construction depuis des décennies (Han & Wang, 2018). Bien que la CHS aie de nombreux avantages démontrés précédemment, la construction modulaire est vue comme un mode de construction qui bride les libertés architecturales et conduit à produire en série des bâtiments tous identique. Or il existe de nombreux exemple qui prouvent que ce n'est pas le cas et qu'il est possible de varier les formes de construction tout en utilisant la CHS (Beddiar et al., 2021).

##### **Freins organisationnels**

L'utilisation de la CHS dans les projets de construction implique de changer profondément les méthodes de conception. Le choix de réaliser le projet avec la CHS doit être fait tôt lors de la conception préliminaire, la conception sera alors orientée vers des principes DfMA (détaillés dans le prochain chapitre). Contrairement à un projet de construction traditionnel où la

conception se détaille de plus en plus avec l'avancée du chantier, un projet en CHS nécessite une conception détaillée avant de pouvoir commencer la préfabrication en usine. Il est donc primordial que les choix du client lors de la conception soient définitifs et que toutes les parties prenantes du projet soient impliquées au plus tôt en conception (Beddiar et al., 2021).

La charge de travail étant déplacée en amont du projet dû à une conception détaillée et complète requise pour la préfabrication, les coûts du projet seront plus importants lors de la conception et de la préfabrication. En effet la phase de construction sur site sera plus courte et consistera à assembler les modules et finaliser la construction. Cette méthode de construction implique donc un changement de fonctionnement concernant la trésorerie des entreprises (Beddiar et al., 2021).

La nécessité d'avoir une conception détaillée en amont du projet implique de choisir ses sous-traitant plus tôt qu'un chantier traditionnel, ce qui peut présenter un risque pour le projet en cas de changement de collaborateur au cours du projet. De plus la CHS étant une méthode de construction qui connaît une adoption lente, le nombre de fournisseurs disponible pour répondre à un projet en CHS est faible. Dans la plupart des cas de réalisation de chantiers en modulaire, il s'agit de grandes entreprises qui ont l'ensemble des compétences réunies, de la conception à la réalisation complète (Beddiar et al., 2021).

### **Freins techniques et réglementaires**

La réglementation concernant la CHS est beaucoup moins étoffée que pour la construction traditionnelle. De plus la réglementation en construction est principalement axée sur des ouvrages en béton. La CHS ne dispose pas assez de réglementation permettant de cadrer et de favoriser son utilisation.

La précision des assemblages de modules peut représenter un frein technique concernant la CHS. En effet, au vu de la qualité et de la précision des produits fabriqués en usine, il peut sembler contraignant de réaliser des assemblages de précision lors de la pose des modules préfabriqués sur le site de construction.



#### **1.2.4 Le bois dans la construction hors site**

L'utilisation du bois dans la construction exige une expertise poussée car il s'agit d'un matériau vivant et complexe à utiliser qui est souvent plus cher que le béton ou l'acier. Cependant ses nombreuses caractéristiques environnementales en font un allié de taille dans la lutte contre les changements climatiques. Son utilisation dans la construction de bâtiments, un secteur qui génère énormément de gaz à effet de serre (GES), s'avère ainsi une solution sensée appuyée par de nombreuses recherches et groupes environnementaux. Le bois est un matériau issu d'une ressource renouvelable et gérée de manière durable. Les forêts québécoises font parties des forêts les mieux gérées au monde et se régénèrent naturellement. De plus, en utilisant les produits du bois dans la construction, on encourage l'économie régionale. Par ailleurs, le bois est l'un des seuls matériaux de construction à emmagasiner du carbone, et ce, durant toute la durée de vie du bâtiment. En comparant les émissions de GES entre les trois matériaux de construction les plus utilisés, soit le bois, le béton et l'acier, et ce, tout au long du cycle de vie de ces derniers, la transformation du bois se positionne comme étant de loin le moins émetteur (Cecobois, 2022).

Par ailleurs, la CHS en bois devient accessible à des entreprises beaucoup plus petites. Alors que les systèmes hors-site à base de béton et d'acier ont tendance à provenir de conglomérats établis, l'écosystème commercial du bois hors site comprend un nombre important de micro, petites et moyennes entreprises (PME) (Patlakas, Livingstone, & Hairstans, 2015).

Pour la CHS, le bois est un matériau très intéressant car il est plus léger que ses concurrents (soit le béton et l'acier) et donc plus facile à manipuler en usine. De plus c'est un matériau sec contrairement au béton qui nécessite un temps de séchage, ce qui peut augmenter la productivité.

Les composants préfabriqués en bois peuvent comprendre des murs, des planchers et des fermes de toit à ossature légère ou des éléments en bois massif tels que des panneaux en bois

lamellé-croisé (CLT), des panneaux en bois lamellé-cloué (NLT), des panneaux en bois lamellé-collé (GLULAM).

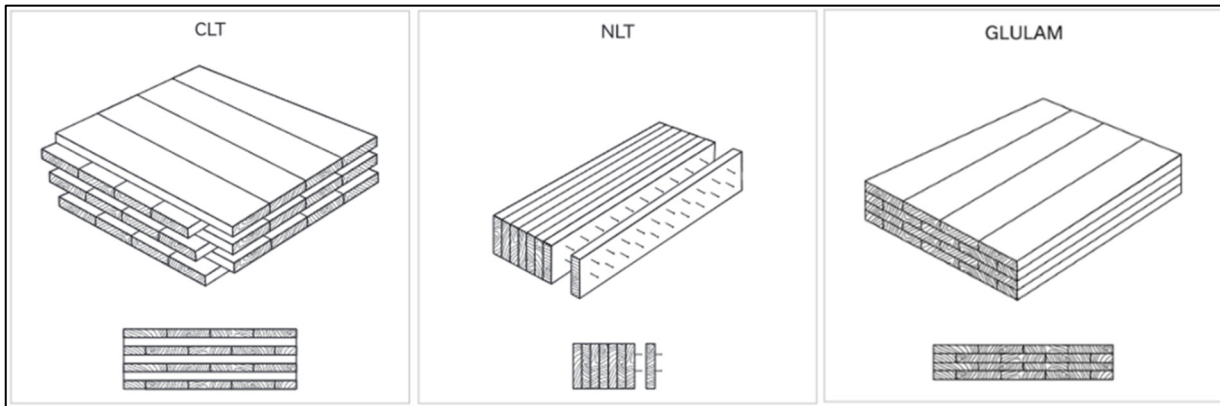


Figure 1.2 Types de composants en bois massif  
Tirée de *Think Wood* (2018)

### 1.2.5 Modèle commercial de construction hors site

Malgré les nombreux avantages de l'utilisation de la CHS par rapport aux méthodes de construction traditionnelles, un des plus grands défis auxquels la préfabrication est confrontée aujourd'hui est la différence entre le financement d'un projet de construction traditionnelle et un projet en construction modulaire hors site. En effet un projet hors site nécessite un capital initial plus important ce qui peut représenter un plus grand risque pour les divers investisseurs. Toute solution à ce problème devrait introduire une meilleure coordination entre les promoteurs, les banques, les partenaires financiers, les institutions de prêt, les fabricants et les entrepreneurs généraux (Salama, Figgess, Elsharawy, & El-Sokkary, 2020).

Les clients initient les projets de construction (traditionnels ou hors site) en fournissant des fonds et en déterminant la méthode de construction utilisée. La relation entre le client et l'équipe de projet pour la construction traditionnelle est illustrée dans la figure 1.3, où le client (*developer*) peut avoir des contrats avec différents concepteurs et consultants (par exemple, des consultants en architecture, en structure et en génie civil), et un autre contrat avec l'entrepreneur général qui peut engager différents sous-traitants. Pour la construction

modulaire et hors site, le client peut avoir un contrat avec le constructeur modulaire, comme le montre la figure 1.3, qui peut gérer la fabrication et peut ou non engager un entrepreneur général pour établir les fondations du bâtiment et les services sur le site (Salama et al., 2020).

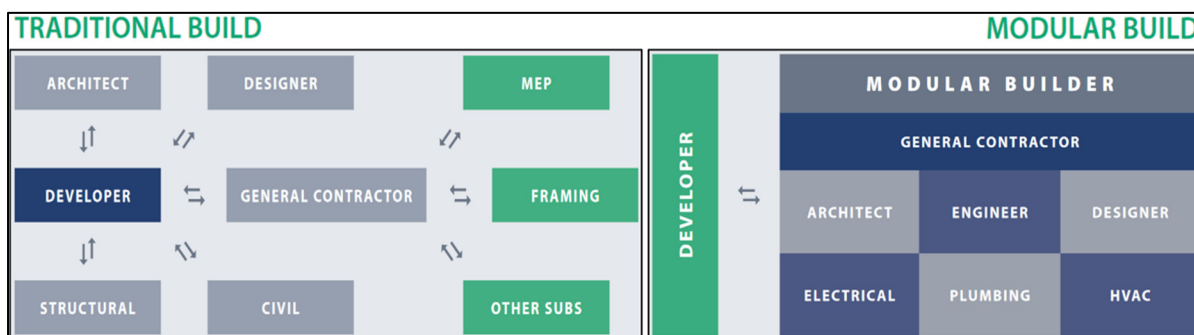


Figure 1.3 Comparaison entre une équipe de construction traditionnelle et une équipe de construction modulaire  
Tirée du rapport MBI (2019)

La planification est l'activité la plus importante de la méthode de construction hors site, car la complexité et les relations sont bien supérieures à celles de la construction conventionnelle. Dans le cas des bâtiments modulaires, la conception du projet doit prendre en compte la méthode de transport des modules qui fixe alors leurs dimensions limites. Par conséquent, plusieurs phases des projets doivent être bien pensées à l'avance, comme les permis spéciaux pour le transport des modules et l'équipement pour la manipulation et l'érection des modules. En outre, les projets modulaires augmentent l'interaction entre les activités et redéfinissent les relations qui seraient habituellement indépendantes dans les projets traditionnels. Par exemple, les activités de fabrication en usine et de travail sur site doivent être réalisées en parallèle afin de tirer le meilleur parti de la technique modulaire. Cependant, la construction sur site dépend strictement de l'achèvement complet de la conception du module. La figure 1.4 montre une comparaison de la relation entre les activités dans la méthode conventionnelle et la méthode modulaire (Razkenari, Fenner, Shojaei, Hakim, & Kibert, 2020).

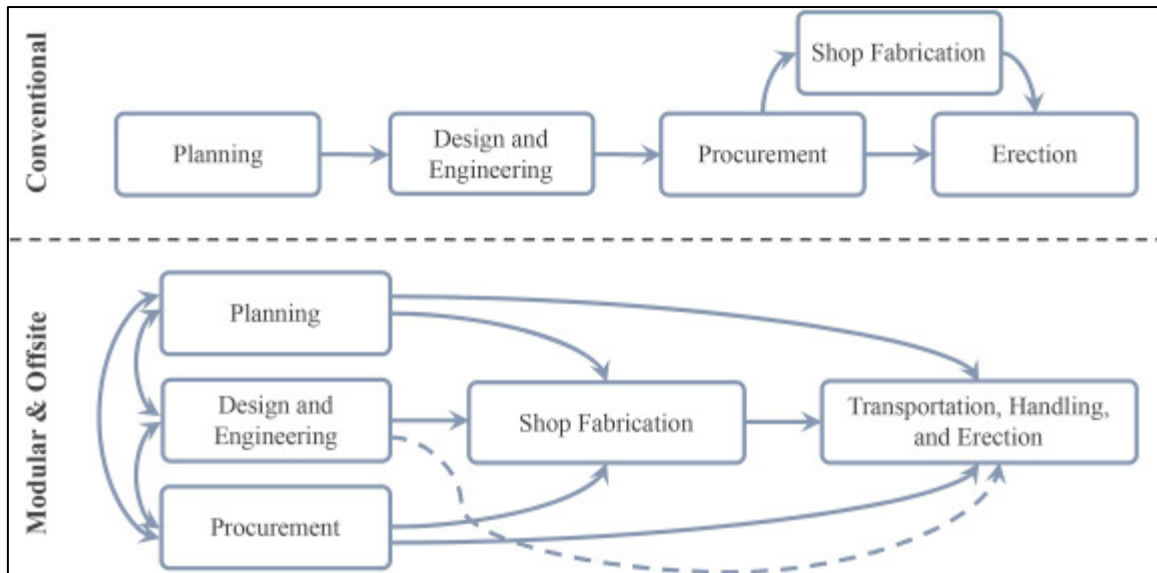


Figure 1.4 Comparaison des différentes phases de projets modulaires et conventionnels  
Tirée de Razkenari et al. (2020)

La méthode de réalisation du projet peut également affecter de manière significative le succès d'un projet modulaire ou préfabriqué, car une plus grande collaboration entre les professionnels est nécessaire dans les méthodes de construction hors site. À l'heure actuelle, la majorité des projets modulaires et hors site utilisent des contrats de conception-construction (*Design-Build*), mais les contrats de réalisation intégrée de projet (*Integrated Project Delivery*) commencent à avoir un impact majeur car ils facilitent le processus de prise de décision et améliorent la constructibilité et la coordination (Razkenari et al., 2020).

Du point de vue de l'industrie, d'autres facteurs importants qui influencent le processus hors site sont la stratégie de marché et le modèle commercial. Lessing et Brege (2018) ont étudié les caractéristiques des modèles d'entreprise de dix entreprises de construction industrialisées afin de mieux comprendre les tendances de l'industrie et les approches de développement stratégique. Ils ont identifié trois groupes d'entreprises : "orientation produit axée sur le marché", "orientation production avec forte prédéfinition du produit" et "orientation production avec des niveaux relativement faibles de prédéfinition du produit". Bien que les entreprises présentent différents niveaux d'intégration verticale et horizontale, elles ont toutes conçu leur modèle d'entreprise pour permettre une évolution rapide. Leur stratégie de marché

définit le niveau d'effort et de flexibilité qu'elles considèrent pour la conception de chaque produit, les entreprises de type "*Engineer-to-Order*" ayant le plus faible degré de prédéfinition tandis que les entreprises de type "*Select-Product-Variant*" (BoKlok par exemple) ont complètement éliminé la conception en proposant des produits finis et des plateformes de construction standardisés. Les entreprises qui proposent des bâtiments prédéfinis en tant que produits ont moins de flexibilité dans leurs choix de projets. Par conséquent, ces entreprises ont un marché spécifique comme point de départ et orientent leurs efforts de marketing vers des segments de clientèle identifiés afin de soutenir le retour sur leur investissement initial.

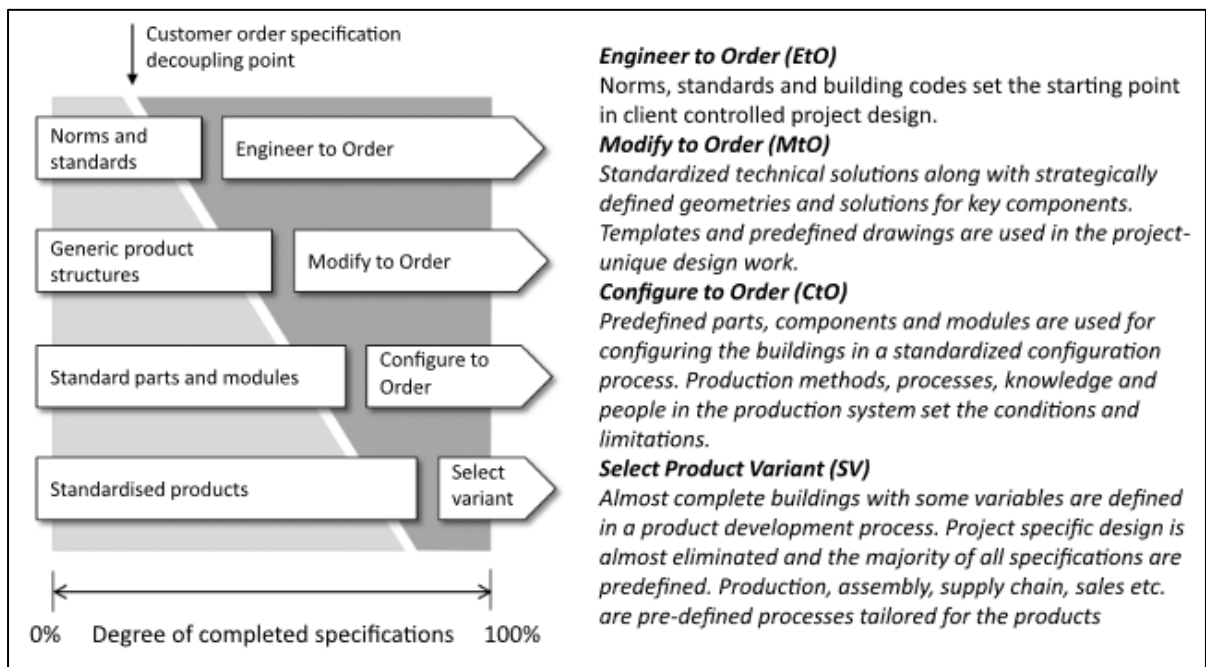


Figure 1.5 Différents niveaux de préfabrication des produits manufacturés  
Tirée de Lessing et Brege (2018)

Lessing et Brege (2018) considèrent que le développement efficace d'une plateforme est le principal défi de ces entreprises, qui doivent avoir une connaissance approfondie des besoins des clients et des tendances du marché. D'autre part, les entreprises basées sur des projets sont des entrepreneurs et des sous-traitants qui ont des niveaux de prédéfinition plus faibles dans leurs plateformes de produits pour permettre une plus grande implication du client dans le processus de conception du bâtiment.

Ainsi la construction hors site modulaire en bois semble offrir des avantages significatifs en termes de rapidité, de qualité, d'impact environnemental et de conditions de travail, mais elle nécessite une planification minutieuse et une adaptation culturelle pour être pleinement exploitée. Dans la partie suivante nous allons explorer les principes DfMA et BIM et leur adoption dans l'industrie de la construction hors site.

### **1.3 DfMA et BIM**

La construction hors site modulaire en bois est une approche qui offre de nombreux avantages en termes d'efficacité, de qualité et de durabilité dans le secteur de la construction. Cependant, pour exploiter pleinement son potentiel, elle repose sur l'application judicieuse de deux concepts clés : le *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA) et le *Building Information Modeling* (BIM). Cette partie de notre revue de littérature se penche sur ces deux concepts fondamentaux, en explorant leurs définitions, leurs principes, et leur rôle essentiel dans la construction hors site modulaire en bois.

#### **1.3.1 Définition et principes**

Dans cette section, nous plongerons dans les détails du DfMA et du BIM, en mettant en lumière leurs principes et en explorant comment ils sont mis en œuvre dans le contexte de la construction hors site modulaire en bois. Cette compréhension approfondie des concepts nous aidera à appréhender comment ils contribuent à l'optimisation des projets de construction hors site, améliorant ainsi la durabilité et l'efficacité de cette approche de construction.

##### **1.3.1.1 DfMA**

La conception pour la fabrication et l'assemblage (DfMA) est introduite pour faciliter la production de masse et la personnalisation de masse, en transférant des idées innovantes et des technologies de pointe vers la conception, la production et l'assemblage. En général, la conception pour X (DfX) est une approche de conception qui "intègre les critères de fabrication

et d'assemblage dans la conception, ainsi que pour le reste du cycle de vie du produit" (Molloy, Warman, & Tilley, 2012). La conception pour la fabrication (DfM) intègre les critères de fabrication dans le processus de conception du produit tandis que la conception pour l'assemblage (DfA) facilite le processus d'assemblage. La DfMA est une combinaison de la DfA et de la DfM qui met l'accent sur l'ingénierie simultanée ainsi que sur l'étude de produits alternatifs, la quantification des difficultés de fabrication et d'assemblage. Pour que la DfMA soit possible, le concepteur doit disposer de nombreuses informations sur les méthodes de fabrication et le cycle de vie du produit (Razkenari et al., 2019).

### **1.3.1.2 BIM**

La modélisation des informations du bâtiment (BIM) est conceptualisée comme un ensemble d'outils, de technologies et de processus en interaction (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2012) guidés par des principes, des normes et des règles pour soutenir le développement, la livraison, la gestion et la maintenance des actifs bâtis. L'un des principes centraux du BIM est la collaboration multidisciplinaire qui permet le développement d'une source unique de vérité pour les parties prenantes du cycle de vie d'un bien construit. De nombreuses sources affirment qu'une collaboration efficace basée sur le BIM présente des avantages distincts qui conduisent à une amélioration des performances du projet et à une meilleure valeur (Staub-French et al., 2018). Le BIM englobe de nombreux types d'interactions et soutient diverses pratiques articulées autour des informations sur le cycle de vie des actifs bâtis contenues dans des bases de données liées. Une façon de comprendre ces interactions et ces pratiques est de développer les utilisations de la BIM, qui sont liées aux buts et objectifs spécifiques du projet et/ou du propriétaire (Staub-French et al., 2018).

### **1.3.2 Intérêt des principes DfMA pour la CHS**

Les principes du BIM et du DfMA ont le potentiel d'améliorer le processus de la CHS dans un certain nombre de domaines. Cependant, la nature spécifique de l'industrie entraîne des défis particuliers dus aux exigences d'interface avec le processus de fabrication et à la concurrence

avec la construction traditionnelle sur site. Les intérêts majeurs de ces principes sont détaillés ci-après.

### **1.3.2.1 Augmenter la flexibilité de la conception**

L'un des problèmes récurrents de la CHS, quel que soit le matériau utilisé, est le manque de flexibilité dans le processus de conception et, finalement, dans le bâtiment achevé. En effet, la force du processus de fabrication industrielle réside dans la standardisation, qui se traduit par une gamme limitée d'options (Patlakas et al., 2015). Outre les limitations évidentes de la créativité en matière de conception que cela implique, il existe également une limitation au niveau de la réalisation. Les bâtiments sont par définition des produits uniques, adaptés à un site spécifique et, souvent, aux besoins spécifiques d'un client particulier. La standardisation inspirée de la fabrication a souvent été considérée comme une restriction critique par les concepteurs et les clients, entraînant une réponse limitée aux besoins des utilisateurs (Patlakas et al., 2015).

Selon Smith (2011), le BIM, et particulièrement le DfMA, peut remédier partiellement à cette limitation en donnant accès à un éventail beaucoup plus large de pièces constitutives. La possibilité d'opérer à différents niveaux de détail, du micro-niveau d'une fixation individuelle au macro-niveau d'un composant volumétrique, peut permettre une plus grande flexibilité dans la conception tout en encourageant la normalisation et la fabrication hors site lorsque cela est possible ou approprié. La capacité de développer des objets BIM au comportement intelligent profite aux systèmes hors site, car leurs paramètres prédéterminés peuvent être incorporés automatiquement dans la conception, ce qui donne au concepteur une plus grande liberté sans avoir à faire appel à des spécialistes externes (Patlakas et al., 2015).

### **1.3.2.2 Intégration dans le processus de fabrication hors site**

Le défi majeur de la réalisation vient principalement du besoin d'intégrer la conception au processus de fabrication. En effet, cela nécessite la définition d'un schéma ou d'une norme supplémentaire qui permettrait une intégration directe dans le processus de fabrication. Bien



que cela soit faisable en principe, il n'y a pas eu jusqu'à présent de modèle communément accepté. En effet, le BIM se heurte déjà à des obstacles en ce qui concerne une norme commune et l'approche "en silo fermé" adoptée par les fournisseurs de logiciels. Des solutions telles que les *Industry Foundation Classes* (IFC) sont prometteuses, mais elles ont des limites (Redmond, Hore, Alshawi, & West, 2012).

D'après Smith (2011), avec la CHS, la complexité du processus de fabrication industrielle vient s'ajouter à celle du BIM standard. La fabrication est un domaine distinct avec ses propres normes et schémas, généralement très développés, qui reposent souvent sur des ensembles de logiciels et des systèmes étrangers à l'industrie de l'architecture, l'ingénierie et la construction (AEC). De plus, leur tolérance à l'égard des formats inadaptés est bien moindre. Aujourd'hui, l'AEC fonctionne au mieux avec un processus BIM hybride où certains aspects sont intégrés dans un processus BIM tandis que d'autres restent externes. La fabrication ne permet pas ce passage d'un format à l'autre ; par conséquent, si l'on veut tirer pleinement parti des avantages du hors site, il faudra développer des normes adaptées. Dans ce domaine, le bois hors site a un avantage concurrentiel et peut être un pionnier, car ses systèmes ont tendance à être à la fois plus simples et à plus petite échelle que ceux du béton et de l'acier (Patlakas et al., 2015).

### **1.3.2.3 Processus de livraison et d'assemblage sur site**

La construction hors site a souvent fait l'objet de critiques quant à la qualité de la main-d'œuvre (Smith, 2011). Simultanément, le processus de livraison et de montage sur site est un point essentiel pour la faisabilité économique et la compétitivité de toute méthode de construction. La technologie BIM existante soutient ce processus via la modélisation nD (2D, 3D, etc.). Dans la fabrication hors site, tous les composants de la conception peuvent être reliés à un fabricant spécifique, et les données de gestion du projet et du programme peuvent donc être directement liées au modèle. Cela peut constituer un avantage comparatif pour la construction hors site par rapport aux méthodes standards où les composants du modèle sont indépendants du fabricant. Dans le même temps, la capacité inhérente au BIM de visualiser en 3D tous les composants du projet à tous les stades de la conception peut contribuer à la formation du personnel sur site, ce

qui permet de réduire les incertitudes et d'améliorer le processus d'assemblage. Comme précédemment, l'élaboration de normes, de schémas et d'opérations d'entrée/sortie appropriés pour ces éléments s'accompagne de défis importants (Patlakas et al., 2015).

#### **1.3.2.4 Performance structurelle**

L'entrée/sortie entre la partie architecturale et la partie structurelle est un défi fondamental pour tout processus BIM réussi. Les systèmes en bois posent des difficultés supplémentaires en raison des caractéristiques naturelles du matériau, qui est anisotrope, est affecté par la teneur en humidité et présente un fluage sous une charge soutenue. Les codes de conception structurelle contemporains, qui reflètent les progrès de la recherche, ont donné lieu à des problèmes de conception particulièrement difficiles, notamment au niveau des connexions. La nature propriétaire de nombreux systèmes en bois signifie que les outils de calcul sont souvent liés à un producteur spécifique (Patlakas et al., 2015).

Un processus BIM et DfMA pour la CHS en bois peut résoudre bon nombre de ces problèmes. De nombreux composants fabriqués industriellement ont des propriétés structurelles précalculées (au niveau micro de l'élément de fixation individuel) qui sont souvent étendues à des dispositions spécifiques (par exemple, pour l'espacement des solives par portée). Bien qu'il soit peu probable que cette approche permette d'atteindre l'optimisation d'une analyse structurelle complète sur mesure, elle présente des avantages évidents au stade de la conception schématique (Patlakas et al., 2015).

#### **1.3.2.5 Performance environnementale et durabilité**

L'avantage du BIM ici n'est pas tant d'améliorer le produit livrable que de fournir aux concepteurs plus d'informations sur les avantages comparatifs des produits fabriqués hors site. En particulier pour les systèmes à base de bois, dont les avantages en termes de durabilité sont bien connus et documentés, cela peut grandement aider et encourager davantage de concepteurs à les utiliser dans la pratique (Patlakas et al., 2015).

En résumé, l'adoption des principes DfMA et BIM dans la construction hors site, qui sont pour l'instant partiellement appliqués, peut offrir des avantages tels que l'augmentation de la flexibilité de conception, une meilleure intégration du processus de fabrication, une amélioration du processus de livraison et d'assemblage sur site, une optimisation de la performance structurelle et une promotion de la durabilité environnementale. Ces principes peuvent contribuer à transformer l'industrie de la construction en permettant une construction plus efficace, plus durable et plus innovante (Smith, 2011).

### **1.3.3 Obstacles à l'adoption du DfMA dans la CHS**

Un premier obstacle relevé dans la littérature est celui de la propriété intellectuelle. Les principaux acteurs de la construction qui utilisent des approches DfMA développent leurs propres systèmes et usines. Ces nombreux systèmes sont développés de manière isolée, mais pour que les véritables avantages se concrétisent, une approche universelle est nécessaire, ou au moins un degré élevé de croisement entre les systèmes. Ce n'est qu'à cette condition que l'approche DfMA et ses économies d'échelle pourront être réalisées (Building and Construction Authority & Bryden Wood, 2016).

Un autre problème évident est l'inertie de l'industrie face au changement. Pour les entrepreneurs principaux, la coordination des métiers et de la construction sur le site est leur raison d'être, et une grande partie de cette coordination se fait dans l'environnement de l'usine. Pour certains sous-traitants spécialisés, cette méthode de travail risque de disparaître presque complètement (londonstructureslab.com, 2022).

Il n'existe actuellement aucun modèle de passation de marchés éprouvé pour le DfMA. Le gouvernement doit également montrer la voie en adoptant la meilleure valeur plutôt que le meilleur prix, car actuellement une approche en usine peut être jusqu'à douze pour cent plus chère. Les principes DfMA doivent être appliqués dès les premières étapes de la conception pour en tirer ses avantages lors de la réalisation d'un projet hors site DfMA. C'est pourquoi il

est nécessaire de faire évoluer les modèles de passation de marchés pour prendre en compte ces modèles de réalisation (Kieran & Timberlake, 2004).

## **1.4 Plateformes numériques**

L'évolution rapide de la technologie numérique a révolutionné de nombreux aspects de notre vie quotidienne, y compris l'industrie de la construction. L'intégration de ces avancées technologiques dans la construction s'est manifestée par l'apparition de plateformes numériques. Ces plateformes ont profondément transformé la manière dont les projets de construction sont planifiés, conçus, exécutés, et gérés tout au long de leur cycle de vie.

Cette partie de notre revue de littérature se penche sur les plateformes numériques, en explorant leur définition, leur utilité, et leur diversité d'applications dans l'industrie de la construction. Les plateformes numériques jouent un rôle central dans la construction hors site en facilitant la simulation, l'échange de données, la communication, et la collaboration entre les différentes parties prenantes d'un projet. Leur importance dans l'industrie moderne de la construction ne peut être sous-estimé, et une compréhension approfondie de leur fonctionnement est essentielle pour saisir pleinement les opportunités qu'elles offrent dans le contexte de la construction hors site en bois.

### **1.4.1 Définition**

L'arrivée du numérique a grandement bouleversé l'industrie de la construction. Grâce aux outils digitaux qu'elles hébergent, les plateformes numériques permettent de faciliter la simulation, l'échange de données, la communication et la collaboration entre les parties prenantes du projet de construction. Ces plateformes connaissent, depuis quelques années, un développement intéressant et en particulier dans la construction hors site (Beddiar et al., 2021).

Selon Beddiar et al. (2021), une plateforme numérique peut être définie comme « l'ensemble des systèmes d'information utilisés pour gérer la conception, la construction (hors site ou sur site) et la maintenance du bâtiment ».

Les travaux de Rankohi, Bourgault, Iordanova, & Carbone (2023), ont établi un cadre conceptuel pour la mise en œuvre de la DfMA dans les projets de construction hors site, présenté en figure 1.6. Ce cadre est divisé en sept étapes basées sur le plan de travail 2020 du RIBA (*Royal Institute of British Architects*). La cinquième étape du RIBA a été divisée en deux sous-étapes : (5.1) fabrication et (5.2) construction/assemblage/fermeture afin de spécifier les tâches requises pour ces sous-étapes. Comme le montre ce cadre, un plan stratégique doit être suivi au cours de chaque phase pour faciliter la mise en œuvre de la DfMA axée sur la construction. Cette étude présente les bases théoriques pour la création d'une plateforme numérique pour la construction hors site.

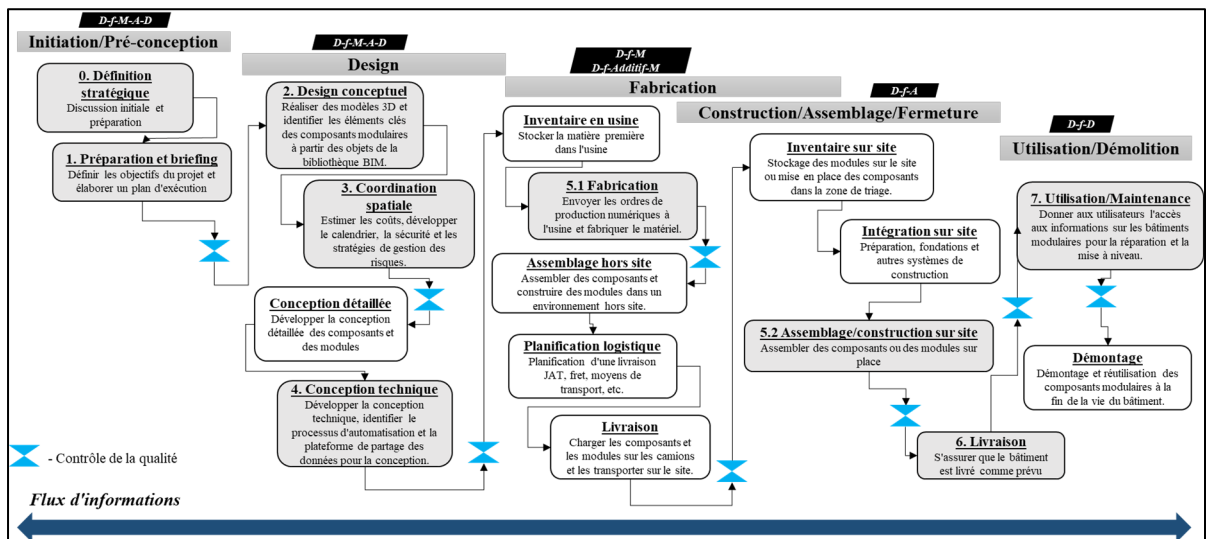


Figure 1.6 Organigramme du cadre DfMA axé sur la construction  
Adaptée de Rankohi et al. (2023)

## 1.4.2 Différentes plateformes numériques pour différentes phases d'un projet

Un projet de construction peut être décomposé en trois grandes phases : la planification, la conception et la construction. Une fois le bâtiment achevé vient la phase de mise en service puis d'exploitation. On peut aussi ajouter la phase de déconstruction lorsque le bâtiment arrive en fin de vie. Ces phases étant bien distinctes, il existe différentes plateformes répondant aux

besoins de chacune. Cependant, l'utilisation de multiples plateformes pour un même projet peut poser des problèmes de gestion de l'information, d'autant plus lorsque les principes DfMA doivent être appliqués pour des projets de construction hors site.

#### 1.4.2.1 Plateformes en planification et conception

De nos jours, une grande partie des projets de construction utilisent en phase de conception une maquette numérique. Ces modèles sont réalisés sur des logiciels de conception, tels que Revit d'Autodesk Inc. par exemple, puis peuvent être reliés à des plateformes numériques dans un environnement BIM afin de collaborer sur un modèle unique.

L'intérêt principal de la modélisation BIM est de centraliser la communication et le partage de données autour de la maquette numérique BIM. Un élément central lié aux utilisations BIM est le concept de niveau de développement (LOD), qui définit la quantité d'informations incluses dans un élément de modèle spécifique à un moment donné pour soutenir une utilisation BIM spécifique (Staub-French et al., 2018). Selon BIM Forum (2017), "le niveau de développement est le degré auquel la géométrie de l'élément et les informations jointes ont été réfléchies - le degré auquel les membres de l'équipe du projet peuvent s'appuyer sur les informations lorsqu'ils utilisent le modèle." Le BIM Forum définit et interprète six niveaux de développement (100, 200, 300, 350, 400, 500). Ainsi, la maquette numérique décrit les besoins du projet de manière croissante en fournissant à chaque étape un niveau de détail plus avancé (Beddiar et al., 2021). La figure 1.6 montre un exemple de progression du LOD pour un poteau en béton en béton préfabriqué.

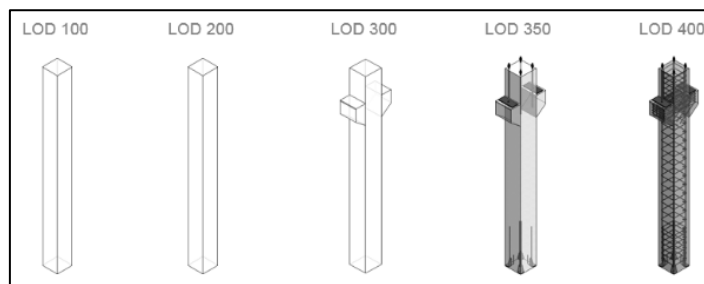


Figure 1.7 Évolution du LOD sur un poteau en béton

Concernant la CHS, dans de rares cas, il est possible de concevoir un projet de construction à partir d'une bibliothèque de composants (*kit of parts*). La maquette numérique est alors réalisée avec des composants préfabriqués qui sont directement liés aux fabricants et aux fournisseurs. Ce principe de conception exige une collaboration étroite entre les équipes de conception et de production. Il existe aujourd'hui des outils permettant d'automatiser et d'optimiser les différentes phases de conception d'un projet (Cao, Bucher, Hall, & Lessing, 2021). Ces outils sont nommés configurateurs et les trois principaux types sont détaillés dans les sections suivantes.

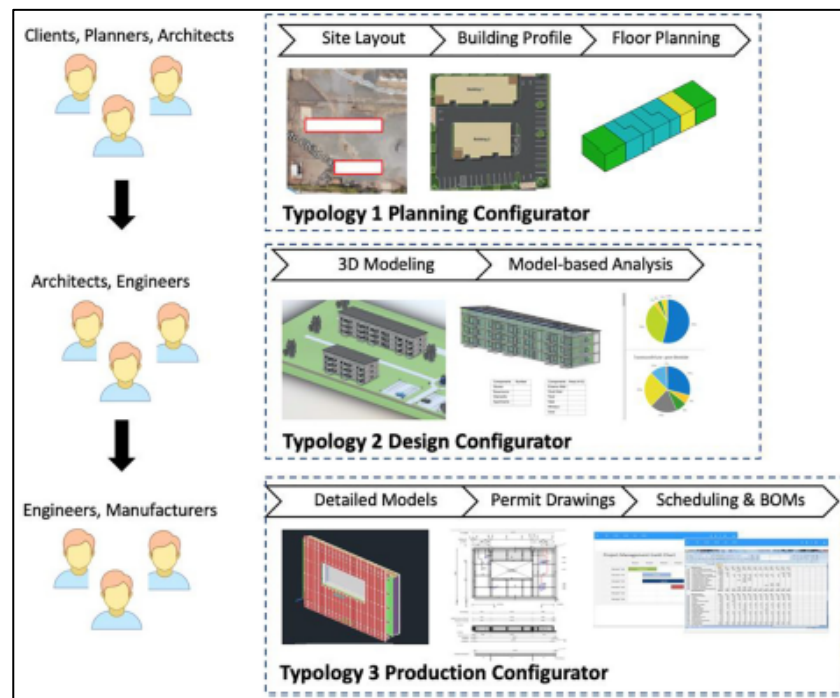


Figure 1.8 Trois types de configurateurs  
Tirée de Cao et al. (2021)

### Configurateur de planification

Le premier type représente les configurateurs pour le développement de projets qui prennent en charge la phase de planification du projet. Des exemples de ce type de configurateurs sur le marché sont SpaceMaker (Forma), Archistar, PrismApp, ou encore Kreo Modular (Skema). En général, cette étape implique les parties prenantes de l'immobilier, de l'architecture, de la

planification du site et le client. Les ingénieurs, les entrepreneurs et les fabricants ne participent généralement pas à cette étape du processus. Les produits visés pourraient être un modèle conceptuel de bâtiment créé par des cabinets d'architectes pour une planification précoce. L'objectif principal de l'application des configurateurs est de générer divers plans de développement, tels que des plans de site, des profils de bâtiment et des plans d'étage. Ces plans de développement sont évalués par les décideurs afin d'effectuer une sélection finale. La représentation des plans ne nécessite que des illustrations graphiques peu détaillées, telles que des géométries simples et des schémas filaires. Par rapport à une stratégie de conception traditionnelle, il existe deux avantages principaux apportés par les configurateurs de type 1. Premièrement, les promoteurs immobiliers permettent aux clients de concevoir de manière interactive les maisons qu'ils désirent en leur proposant des sélections. Deuxièmement, les algorithmes intelligents peuvent identifier des plans plus réalisables ou plus avantageux en utilisant des règles de configuration intégrées (Cao et al., 2021).

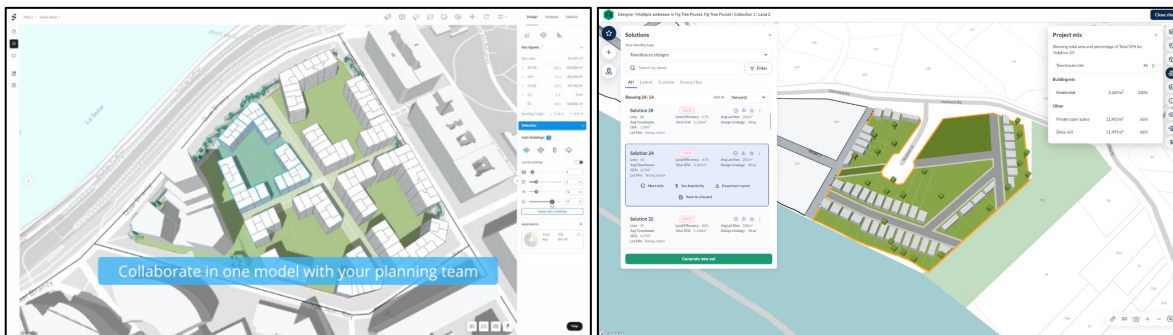


Figure 1.9 Interface des configurateurs SpaceMaker et Archistar

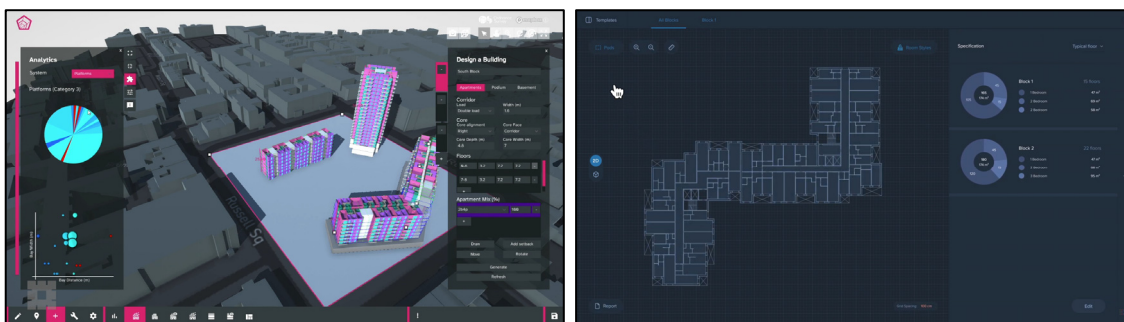


Figure 1.10 Interface des configurateurs PrismApp et Kreo Modular



## **Configurateur de conception**

Le deuxième type représente les configurateurs concernant la phase de conception du projet. Il s'agit de la situation la plus largement répandue pour les applications de configurateurs sur le marché. Dans ce scénario, les architectes, les ingénieurs et parfois les fabricants sont impliqués et collaborent sur les configurateurs. Les produits visés peuvent être un modèle de bâtiment détaillé configuré avec des modules prédéfinis, tels que des panneaux de bois. La principale différence entre les typologies 1 et 2 réside dans les résultats générés. Pour les configurateurs de la typologie 2, les plans de bas niveau de détail sont convertis en modèles BIM dans des applications de conception. Ces modèles BIM représentent le point de départ à partir duquel les concepteurs et les ingénieurs peuvent effectuer des développements ultérieurs, tels que des analyses techniques. Par exemple, le configurateur en ligne Project Frog permet aux utilisateurs d'envoyer les solutions de conception validées vers Autodesk Revit et de générer le modèle 3D via le script Dynamo (Cao et al., 2021). En plus du configurateur Project Frog, cette société propose également le plug-in KitConnect pour le logiciel Revit qui permet créer des conceptions modulaires en utilisant une base de données de kit préconçus ([projectfrog.com](http://projectfrog.com)).

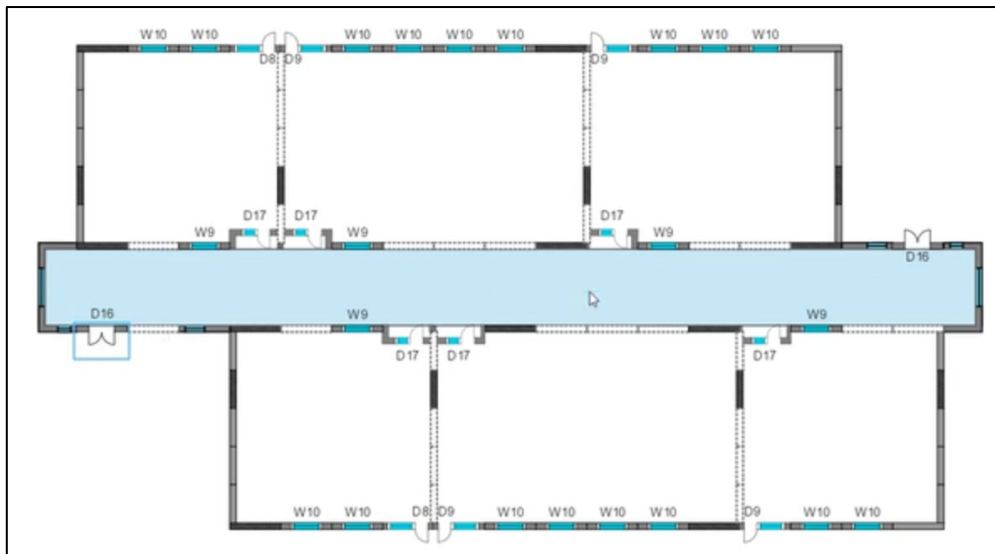


Figure 1.11 Exemple de projet sur la plateforme Project Frog  
Tirée de myprojectfrog.com

### Configurateur de production

Le dernier type est moins étudié et utilisé que les deux autres. Il représente les configurateurs qui soutiennent les projets de construction dans la phase de production du projet. Dans ce contexte, les produits typiques peuvent être des bâtiments planifiés, conçus, produits et assemblés par une entreprise verticalement intégrée, comme le modèle d'entreprise utilisé par BoKlok. Des travaux de recherche connexes ont été effectués dans le domaine du DfMA. Les ingénieurs et les fabricants adoptent généralement les principes DfMA au stade de la conception, avant le processus de fabrication. Yuan et al. (2018) intègrent les contraintes de fabrication et d'assemblage dans la phase de conception en adoptant une conception paramétrique DfMA. Les résultats des configurateurs comprennent des modèles d'information sur le bâtiment en 3D, ainsi que des données et de la documentation utile pour les machines à commande numérique, des plans et des nomenclatures (BOM) (Cao et al., 2021).

De plus en plus de configurateurs industriels essaient d'offrir une solution qui combine plusieurs typologies. Par exemple les configurateurs présentés plus haut, Kreo Modular et PrismApp, prennent en charge la planification ainsi que la conception. De plus, le configurateur

Project Frog est capable de fournir des livrables de conception et de fabrication. L'application de ces configurateurs intégrés peut faciliter la réutilisation des processus et des solutions techniques et la formation d'une chaîne d'approvisionnement stable. Par rapport aux configurateurs qui s'inscrivent dans une typologie unique, un configurateur intégré permet une continuité longitudinale qui permet aux parties prenantes de maintenir un environnement commun pour contrôler les données du projet. Cependant, peu d'études explorent le fondement théorique approprié pour soutenir l'intégration des configurateurs monophasés (Cao et al., 2021).

#### **1.4.2.2 Plateformes pour la construction**

L'utilisation de plateformes numériques en phase de construction d'un projet est une pratique répandue dans le secteur de la construction. Les principes de base pour ces plateformes sont le BIM, la conception et la construction virtuelle (VDC) et la planification des ressources d'entreprises (ERP). En phase de construction, le modèle devient la référence du chantier et représente directement ce qui doit être construit. En parallèle de cette maquette, le planning de coordination des sous-traitants sur le site du chantier est la deuxième référence importante. En combinant ces deux éléments clés, il est alors possible de produire une maquette VDC (Beddiar et al., 2021).

Pour le bon déroulement de la phase de construction sur chantier, l'entrepreneur général doit travailler avec ses sous-traitants de manière à planifier et optimiser le processus de réalisation de l'ouvrage. Le modèle numérique ainsi créé possède un niveau de définition LOD 350 comme expliqué dans la section précédente. Afin d'optimiser la construction et de réduire les conflits, la mise en place d'une plateforme digitale intégrant la planification, les ressources des entreprises et les informations des modèles BIM est nécessaire. La figure 1.11 schématise les différents systèmes requis pour le développement d'une plateforme de construction optimale (Beddiar et al., 2021).

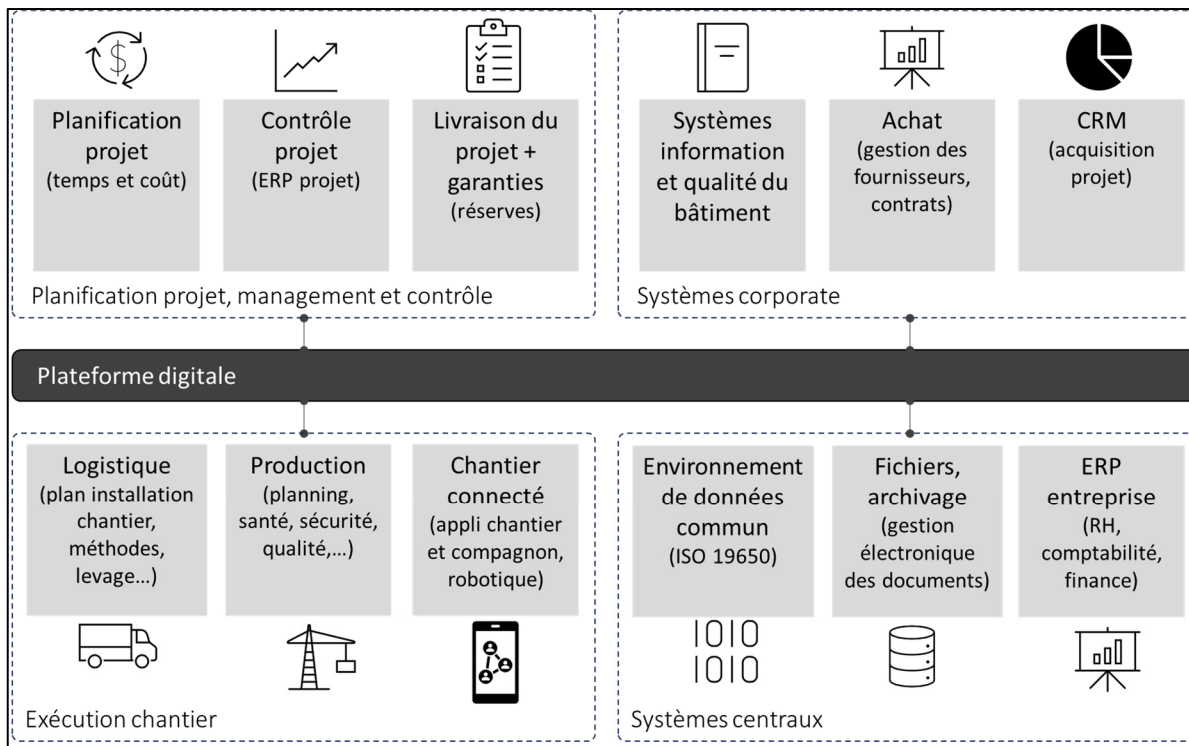


Figure 1.12 Systèmes d'intégration pour la construction numérique  
Tirée de Beddiar et al. (2021)

Par ailleurs, des solutions de plateformes numériques existent pour assister les activités de construction, on parle alors de « chantier connecté ». Ces outils permettent d'augmenter la productivité, d'améliorer la sécurité des ouvriers et d'optimiser le suivi de chantier. Ces solutions se présentent sous la forme d'extensions de logiciels ou d'applications mobiles, par exemple Novade (Beddiar et al., 2021).

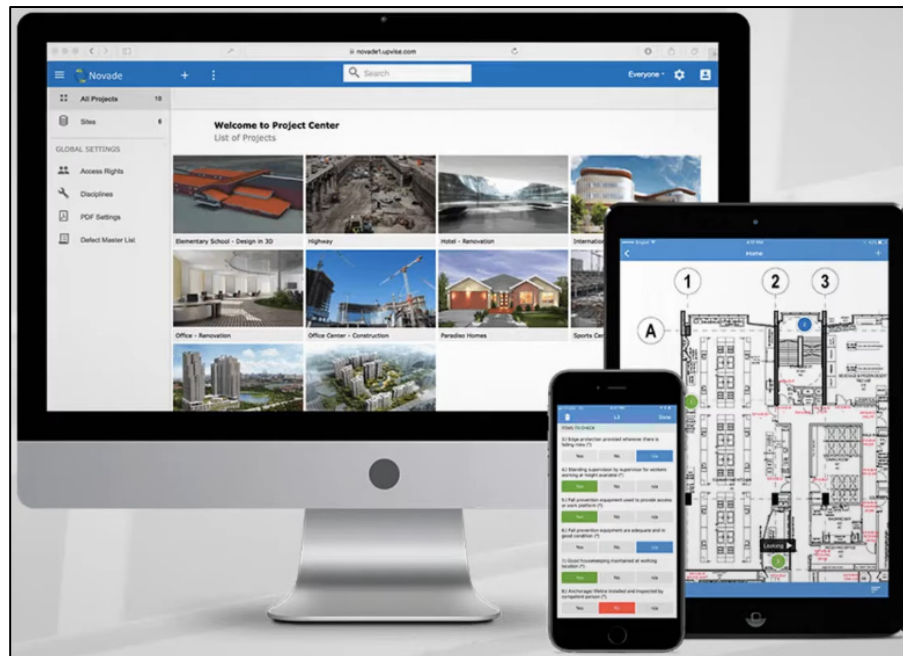


Figure 1.13 Application Novade  
Tirée de novade.net

Concernant la CHS, les plateformes numériques développées sont orientées vers la fabrication en usine des différents produits préfabriqués. Selon Beddiar et al. (2021), ces plateformes permettent aux fabricants de concevoir et d'optimiser leurs modules ainsi que d'améliorer l'échange d'information entre les fournisseurs et les sous-traitants autour des commandes des produits. Ce type de plateforme est conçu pour gérer une ligne de production tel le fonctionnement d'une usine industrielle. Afin que celle-ci soit la plus efficace possible, elle doit prendre en compte la conception, la production, la logistique, la planification ainsi que l'installation sur chantier. Une solution complète prenant en charge l'ensemble du cycle de vie du produit est la plateforme Dassault 3DEXperience. A titre d'exemple, le projet *Brock Commons Tallwood House* (présenté plus loin), a été réalisé avec cette plateforme. Bien qu'elle soit très performante, la plateforme 3DEXperience est onéreuse et nécessite de nombreuses heures de formation pour en maîtriser l'essentiel.

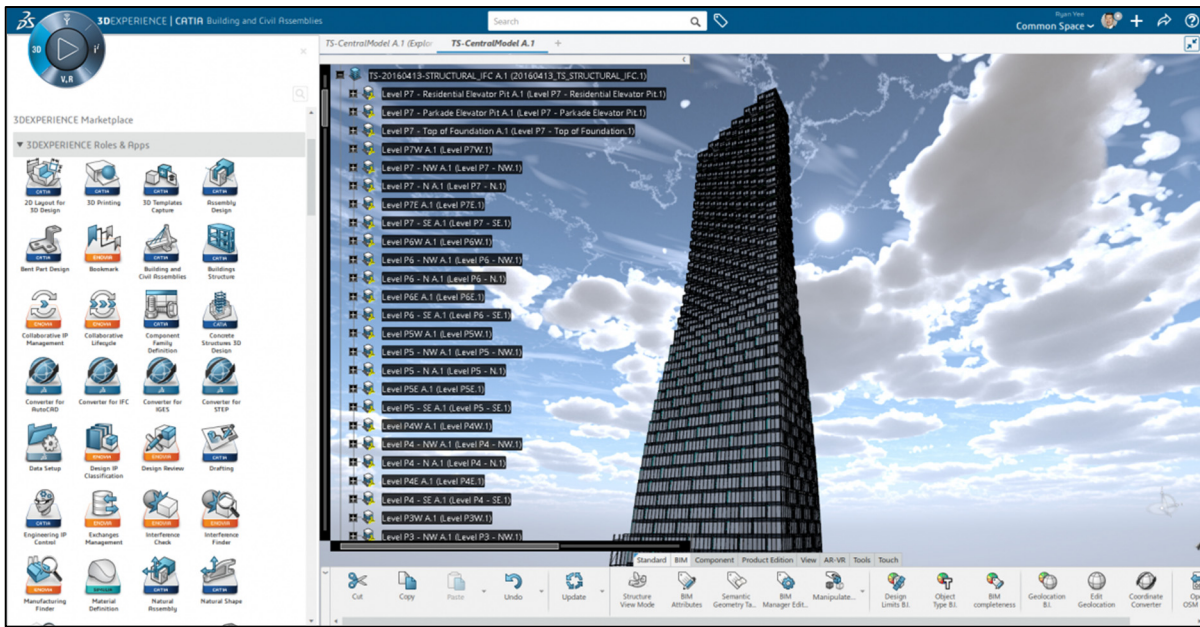


Figure 1.14 Interface de la plateforme 3DEXperience

### 1.4.2.3 Plateformes pour la mise en service et l'exploitation

Le dernier type de plateforme étudié présente les plateformes numériques pour la phase de mise en service du bâtiment ainsi que son exploitation. L'intérêt de ces plateformes est la conservation des données importantes concernant l'ouvrage pour le client et le suivi des performances du bâtiment facilitant ainsi la maintenance et l'entretien. L'archivage des données permet au client ou à l'utilisateur de conserver les documents importants liés à l'ouvrage tels que les informations réglementaires ou les modèles numériques. Le suivi des performances peut être réalisé à l'aide d'outils et de capteurs connectés permettant d'avoir une vue d'ensemble du fonctionnement du bâtiment. Une solution de ce type présente sur le marché est la plateforme Invicara qui propose une solution de jumeau numérique pour l'archivage du projet (Beddiar et al., 2021).

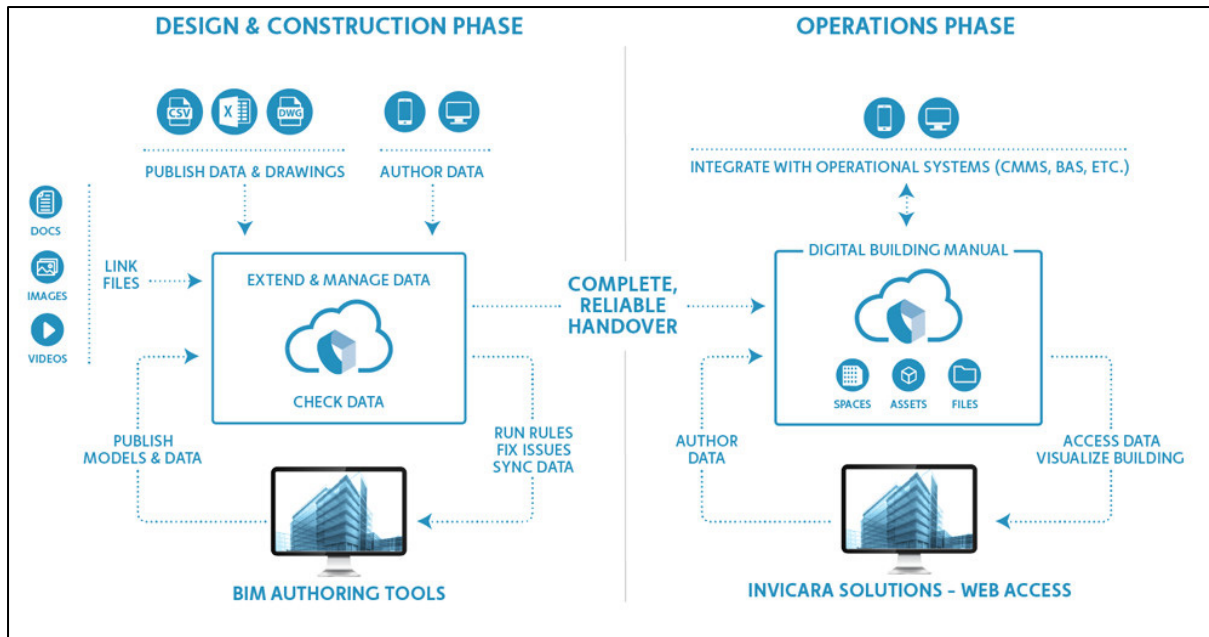


Figure 1.15 Modèle de la plateforme Invicara  
Tirée de invicara.com

Cette section de notre revue de littérature a exploré les différents types de plateformes numériques utilisées dans le domaine de la construction, en se concentrant sur leur rôle dans les différentes phases d'un projet, de la planification à la mise en service et à l'exploitation. L'utilisation de ces plateformes numériques, devenues des outils essentiels de l'industrie de la construction, a profondément transformé la manière dont les projets de construction sont planifiés, conçus, exécutés et gérés tout au long de leur cycle de vie. Elles apportent des avantages significatifs en termes d'efficacité, de qualité et de durabilité des projets. Cependant, il est important de noter que l'utilisation de multiples plateformes pour un même projet peut poser des défis en termes de gestion de l'information, nécessitant une coordination et une intégration efficaces. Ainsi il est essentiel de choisir et de mettre en œuvre les bonnes plateformes pour répondre aux besoins spécifiques de chaque phase d'un projet, tout en assurant une intégration et une bonne coordination. La compréhension de ces outils et de leur utilisation appropriée est essentielle pour tirer pleinement parti de leur potentiel dans le contexte de la construction hors site.



### 1.4.3 Plateformes numériques adaptées à la construction hors site modulaire en bois

Cette section a pour objectif de présenter quelques plateformes numériques présentes sur le marché qui sont adaptées à la CHS modulaire en bois.

#### 1.4.3.1 StrucSoft MWF Pro Wood

Le groupe StrucSoft propose le logiciel MWF Pro Wood pour réaliser des conceptions avancées en bois. Le produit est disponible sous la forme d'un plug-in à installer dans le logiciel Revit. Cette solution présente de nombreux avantages tels que :

- Modélisation à un haut niveau de détail
- Automatisation des processus de conception
- Utilisation de structures préconçues via une bibliothèque d'éléments
- Calcul de structure via Revit
- Détection des conflits avec intégration des éléments MEP
- Création de listes de matériaux et de plans de fabrication
- Création de sorties pour les machines de fabrication (CNC)

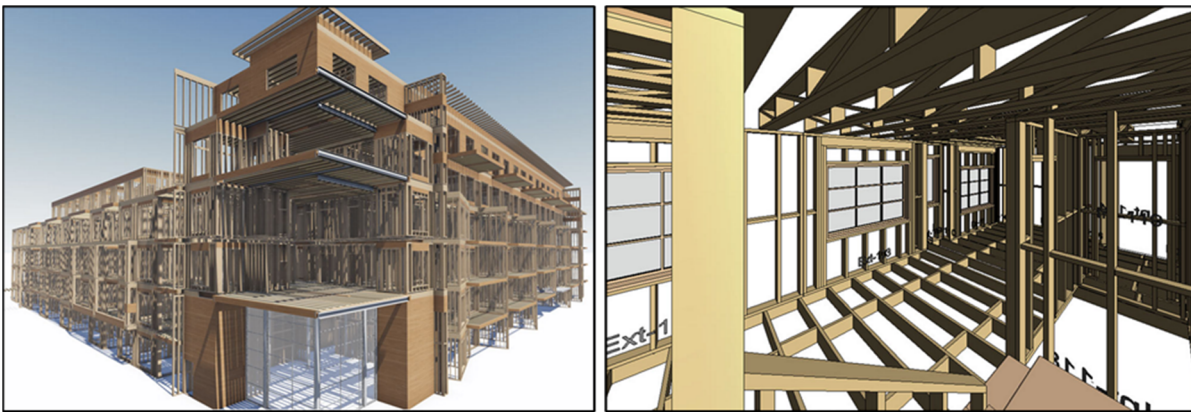


Figure 1.16 Modélisation via StrucSoft MWF Pro Wood  
Tirée de strucsoftsolutions.com



### 1.4.3.2 CadWork

Le logiciel CadWork est un des leaders du marché depuis 25 ans en termes de solution logicielle pour la conception de projet en bois, notamment en bois d'ingénierie. Une solution globale est proposée couvrant chaque étape d'un projet, de la conception à la gestion du chantier en passant par la production. Les avantages de cette solution sont listés ci-après :

- Logiciel performant qui a fait ses preuves et qui est en amélioration continue
- Utilisé principalement par les PME
- Fabrication et production simplifiée par une interface avec les centres d'usinages
- Gestion de la conception de manière automatisée
- Interopérabilité avec tous les acteurs d'un projet BIM via l'IFC
- Création de listes de matériaux et de plans de fabrication



Figure 1.17 Logiciel CadWork  
Tirée de cadwork.com

### 1.4.3.3 Dietrich's COB

L'entreprise Dietrich's est spécialisée dans la création de logiciel pour la construction en bois depuis 40 ans. Elle propose une solution de logiciels performants spécifiquement pour la construction hors site de modules 3D. Les avantages de cette solution sont les suivant :

- Solution complète de la conception, la fabrication, le transport à l'assemblage sur site
- Conception 3D détaillée jusqu'à intégration des systèmes MEP
- Conception automatisée des murs, planchers et toits
- Conception paramétrique et optimisée
- Calcul de structure intégré
- Interopérabilité avec les logiciel BIM via l'import IFC
- Découpage des éléments optimisés pour le transport
- Transfert des données modélisées vers les machines de centre d'usinage



Figure 1.18 Dietrich's COB pour la préfabrication  
Tirée de dietrichs.com

#### 1.4.3.4 3DExperience

Dassault Système a développé une plateforme complète, 3DExperience, qui dispose de plusieurs logiciels supportant toutes les phases d'un projet de construction y compris pour des méthodes de construction hors site. Cette plateforme possède les avantages suivants :

- Intégration des principes DfMA dans la conception
- Conception couvrant tous les niveaux de détails (de LOD 100 à LOD 500)
- Ingénierie collaborative pour la résolution des conflits
- Calcul de structure et simulations

- Modélisation 4D (VDC)
- Automatisation de la conception
- Génération automatisée des plans de fabrication
- Gestion des ressources et des finances du projet

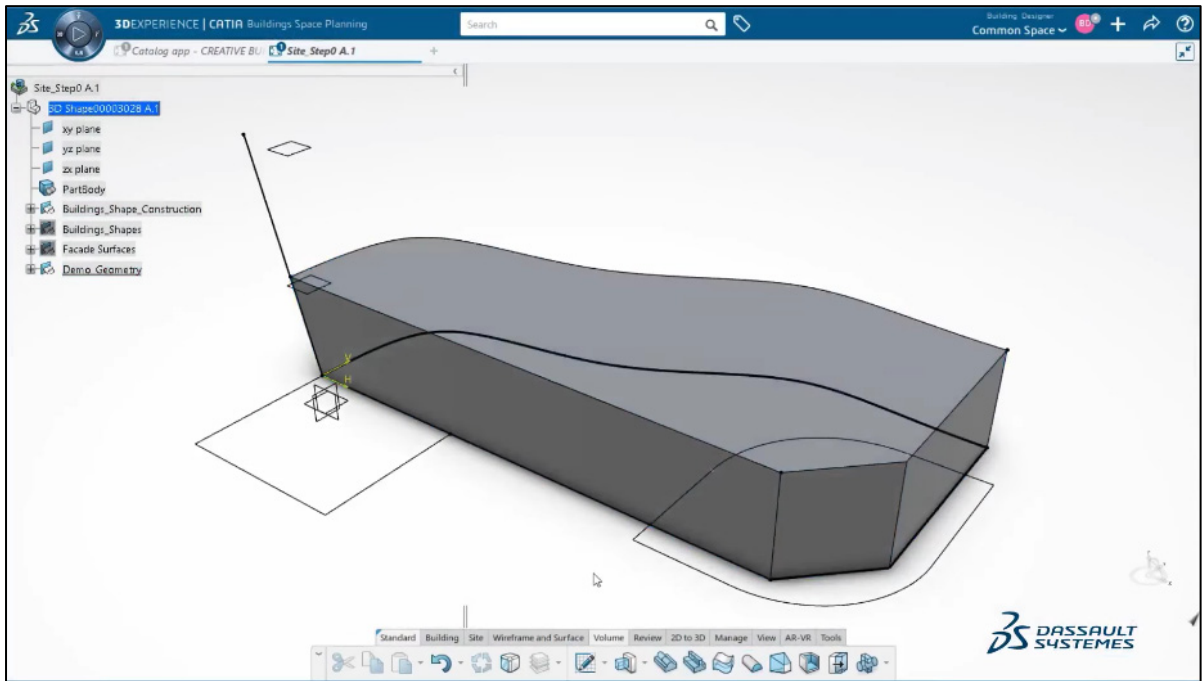

















Figure 1.19 Interface du logiciel CATIA sur la plateforme 3DEXperience  
Tirée de 3ds.com

Le tableau 1.6 est un récapitulatif non exhaustif des logiciels et plateformes qui peuvent être utilisés pour les différentes phases d'un projet de construction. Ce tableau démontre la fragmentation des types de logiciels en fonction de chaque phase d'un projet de construction ainsi que la nécessité d'utilisation d'une interface permettant de connecter ces outils entre eux et ainsi de fluidifier la communication et l'échange de données autour d'un projet.

Tableau 1.6 Récapitulatif des logiciels en fonction des phases d'un projet

Design conceptuel	Coordination spatiale	Conception technique	Fabrication	Livraison au chantier	Construction sur site
					
					
					
					
					
					

En conclusion, les plateformes numériques ont apporté une révolution significative à l'industrie de la construction, en transformant la manière dont les projets sont planifiés, conçus, exécutés, et gérés tout au long de leur cycle de vie. Ces outils ont permis une intégration plus fluide de la technologie numérique dans le secteur de la construction, facilitant la simulation, l'échange de données, la communication, et la collaboration entre les parties prenantes d'un projet.

Les plateformes numériques sont essentielles dans le contexte de la construction hors site, où elles jouent un rôle central en soutenant la conception modulaire, la planification, la fabrication, et la gestion globale des projets. Cependant, il est important de noter que l'utilisation de multiples plateformes et logiciels pour un même projet peut poser des défis en termes de gestion de l'information, nécessitant une coordination efficace.

Différents types de plateformes ont été examinés, chacun adapté à des phases spécifiques d'un projet de construction, de la planification à la mise en service et à l'exploitation. Ces plateformes ont évolué pour répondre aux besoins de l'industrie, offrant des avantages tels que l'automatisation des processus de conception, la centralisation des données, la gestion de la production, et le suivi des performances du bâtiment.

En fin de compte, une utilisation judicieuse et une intégration efficace de ces plateformes sont essentielles pour tirer pleinement parti de leur potentiel dans le contexte de la construction hors site. Elles contribuent à améliorer l'efficacité, la qualité et la durabilité des projets de construction, tout en favorisant une meilleure collaboration entre les acteurs du secteur. L'industrie de la construction continue d'évoluer grâce à ces avancées technologiques, ouvrant la voie à une construction plus efficace, durable et innovante.

## **1.5 Études de projets relevés dans la littérature**

Dans cette dernière partie de la revue de littérature, nous avons sélectionné trois projets de construction distincts qui ont été réalisés avec une préfabrication modulaire en bois. Ils démontrent des avantages de l'utilisation de la construction hors site.

### **1.5.1 Brock Commons Tallwood House, Vancouver, Colombie-Britannique**

Située sur le campus de l'Université de la Colombie-Britannique, la *Brock Commons Tallwood House*, haute de 54 mètres (18 étages), représente la première utilisation nord-américaine de produits en bois massif dans une tour d'habitation. Bien que la conception générale des résidences soit similaire, ce bâtiment se distingue par l'utilisation d'une structure hybride en bois massif. Les fondations, le rez-de-chaussée, la dalle du deuxième étage et les noyaux d'escaliers et d'ascenseurs sont en béton, tandis que la superstructure est composée d'assemblages de planchers préfabriqués en panneaux de bois lamellé-croisé (CLT) soutenus par des colonnes en bois lamellé-collé (GLT). Un système d'enveloppe préfabriquée a permis de fermer rapidement le bâtiment au fur et à mesure de l'érection de la structure, afin de protéger les éléments en bois des intempéries (Think Wood, 2018).



Figure 1.20 Brock Commons Tallwood House  
Tirée de NaturallyWood.com

En raison de la nature innovante de cet édifice, il était essentiel de comprendre comment le bâtiment serait construit, c'est-à-dire la séquence des opérations de montage des éléments préfabriqués, pour élaborer un plan réaliste permettant de réaliser le projet dans les délais et le budget impartis. C'est pourquoi lors de la phase de conception, un modèle virtuel de conception et de construction (VDC) du bâtiment a été créé via la plateforme CmBuilder proposée par l'entreprise CadMakers Inc. Ce modèle VDC était un modèle 3D complet composé de tous les éléments du bâtiment, de la structure aux finitions intérieures en passant par les systèmes mécaniques et électriques. CadMakers Inc, le consultant spécialisé en VDC, a travaillé à partir des dessins 2D et des modèles 3D des consultants en même temps que l'élaboration des documents de construction approuvés. Chaque détail, y compris l'excavation, a été inclus, ainsi que des géométries précises afin que tout processus de construction puisse être animé et que tout élément ou ensemble de composants puisse être exporté dans divers formats. Le modélisateur VDC a été impliqué dans le projet très tôt et a été chargé de recueillir toutes les



informations pertinentes sur le projet auprès des différents membres de l'équipe afin de créer un modèle virtuel unique du bâtiment avec un très haut niveau de détail (Think Wood, 2018).

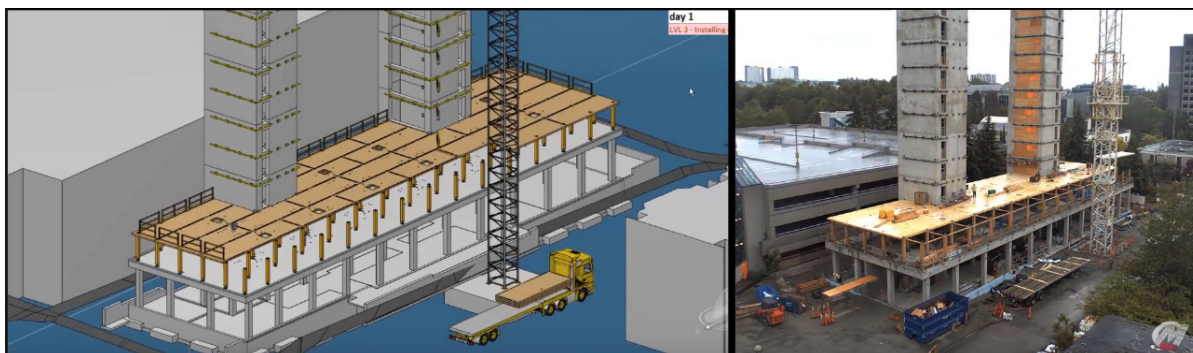


Figure 1.21 Extrait de la séquence vidéo du modèle VDC et de l'assemblage sur site  
Tirée de CadMakers.com

Lors de la phase de conception, l'intérêt d'un modèle aussi détaillé a été la résolution de conflits entre les différents corps de métier ainsi qu'une amélioration de la communication autour du projet. En phase de construction, le modèle a joué un rôle important concernant la planification et la coordination des opérations réalisées sur site. En effet, le modèle VDC présentait des simulations animées illustrant les séquences d'installation et de montage en lien avec le calendrier de construction (Think Wood, 2018).

Le mode de préfabrication choisi pour les éléments de structure et d'enveloppe a été le mode « kit de pièces ». Les systèmes mécaniques, électriques et de plomberie (MEP) ont été inclus dans le modèle VDC, ce qui a permis un niveau de préfabrication élevé pour les découpes nécessaires aux des différents corps de métier. Un tel niveau de détail sur le modèle a permis de réaliser un maximum de tâches hors site réduisant grandement le temps de construction sur site (Think Wood, 2018).

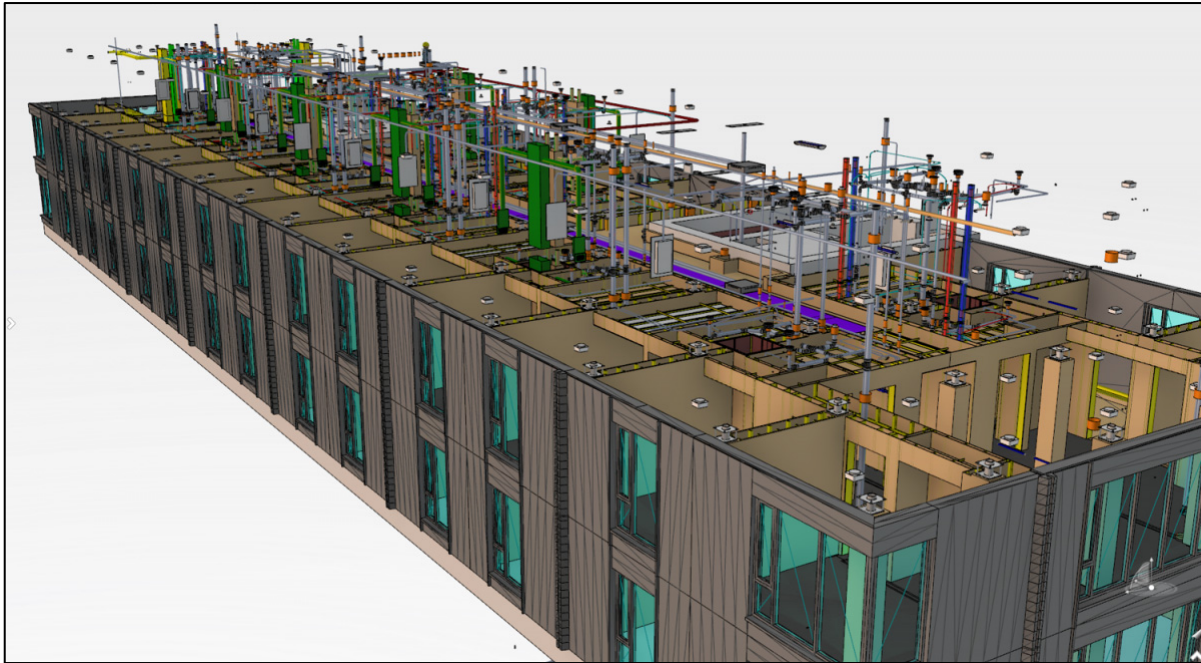


Figure 1.22 Modèle VDC comprenant les systèmes MEP  
Tirée de CadMakers.com

Ce projet a démontré avec succès l'innovation et la faisabilité de l'utilisation de produits en bois massif dans une tour d'habitation en Amérique du Nord. La conception hybride de ce bâtiment, combinant du béton pour les fondations et certaines parties structurelles avec des éléments en bois massif, a été rendue possible grâce à un modèle VDC détaillé. Ce modèle VDC a joué un rôle essentiel tout au long du projet, de la résolution des conflits entre les différents corps de métier à l'amélioration de la communication, en passant par la planification et la coordination des opérations de construction. Le recours à la préfabrication, ainsi que l'intégration des systèmes mécaniques, électriques et de plomberie dans le modèle VDC, a permis d'optimiser l'efficacité de la construction en réduisant le temps nécessaire sur site. En fin de compte, la Brock Commons Tallwood House représente un exemple réussi de l'application de méthodes de construction innovantes et durables, tout en mettant en valeur les avantages du bois massif dans la construction de grande hauteur.



### 1.5.2 Corvette Landing, Esquimalt, Colombie-Britannique

Le projet de construction Corvette Landing est un bâtiment à usage mixte de 12 étages situé dans la région d'Esquimalt en Colombie-Britannique. Cet édifice permet de répondre à un besoin de logement dans une zone où la densité des habitations individuelles et multifamiliales est encore faible. Conçu et développé sous la forme d'un bâtiment hybride en bois massif et en panneaux préfabriqués en bois avec des « cœurs » en béton, cette construction cherche à combiner une approche à faible empreinte carbone avec un haut niveau d'habitabilité et une construction accélérée (Lang et al., 2019).



Figure 1.23 Maquettes du projet Corvette Landing  
Tirée de Lang et al. (2019)

Ce projet a été conçu par la firme Lang Wilson Practice in Architecture Culture (LWPAC). Les concepteurs ont utilisé un système de conception paramétrique de construction personnalisable et modulaire en bois développé en interne. Ce système correspond à un configurateur qui combine les trois typologies présentées dans le chapitre précédent. Dans un premier temps et en fonction du contexte et des contraintes spécifiques au site, le modèle paramétrique remplit le volume disponible avec des modules. En fonction de l'espace disponible et des paramètres spécifiés, l'espacement des modules est généré automatiquement mais peut être ajusté manuellement. Ensuite les modules sont regroupés en fonction de la

typologie d'habitation souhaité (studio, 1 chambre, 2 chambres...). Ces données peuvent ensuite être envoyées vers un logiciel BIM pour réaliser un premier modèle (Lang et al., 2019).



Figure 1.24 Modèle paramétrique du projet  
Tirée de Lang et al. (2019)

Le niveau de détail du modèle augmente ensuite avec l'ajout des éléments de construction liés à chaque module et définis au préalable. A ce stade les données générées peuvent être utilisées pour réaliser un modèle VDC. Le dernier niveau de détail correspond aux informations relatives à la fabrication des modules qui peuvent être exportées à partir du modèle paramétrique d'information sur le bâtiment. Ainsi, les dessins d'atelier sont générés à partir du modèle 3D entièrement détaillé (Lang et al., 2019).

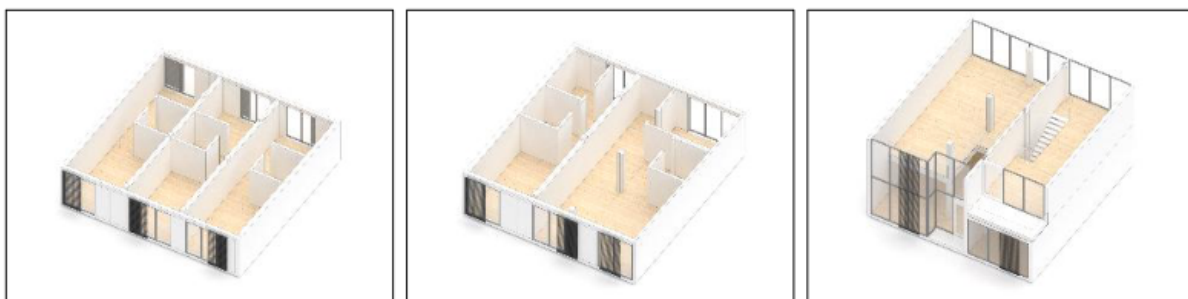


Figure 1.25 Différentes permutations d'un module  
Tirée de Lang et al. (2019)

Le projet Corvette Landing est un exemple concret d'application réussie d'une approche de conception et de réalisation novatrice dans la construction en bois massif. Il a pu aboutir à

l'aide d'une plateforme de conception et de construction innovante qui répond aux besoins d'aménagements urbains de 4 à 18 étages et de faible densité. Le projet a reçu des approbations importantes en raison de sa conception écologique et de son engagement envers la durabilité.

Cet exemple souligne également l'importance d'un changement de paradigme dans l'industrie de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction, avec une transition vers des flux de travail paramétrés et interdisciplinaires. Cette évolution est considérée comme essentielle pour améliorer la durabilité, l'efficacité et la qualité tout en maintenant l'abordabilité. Cependant, pour réussir cette transformation, il est impératif que toutes les parties prenantes de l'industrie adoptent de nouvelles technologies et approches axées sur le produit. Ce projet met en évidence la nécessité d'une révolution systémique pour favoriser l'innovation et l'amélioration continue dans la conception et la construction urbaine, avec un engagement envers des pratiques plus durables et efficaces.

### **1.5.3 Logements BoKlok, Suède**

L'entreprise BoKlok a été créée en 1995 par les fondateurs d'IKEA et de Skanska (promoteur immobilier/constructeur suédois). Cette société a pour but de concevoir des logements neufs abordables pour des familles à faible revenu. Pour répondre à cette demande, BoKlok a opté pour la construction hors site et le modulaire en bois avec une ultra standardisation. Le produit principal proposé par BoKlok est un bâtiment de deux à quatre étages avec des appartements standardisé comprenant une, deux ou trois chambres (Lessing & Brege, 2018). Les appartements sont livrés entièrement équipés et les clients reçoivent également un bon d'achat de fournitures chez IKEA.



Figure 1.26 Projet BoKlok Duetten, Hälsinggarden, Falun  
Tirée de BoKlok.com

Sur la figure 1.26, on remarque bien la réplication des modules entre les différentes typologies d'appartement. En effet l'entreprise BoKlok a mis en place une *supply chain* complète pour produire ces logements. Tous les appartements sont réalisés en construction bois modulaire fabriqué en usine avec un très haut niveau de finition selon des principes de *lean production* (Beddiar et al., 2021).

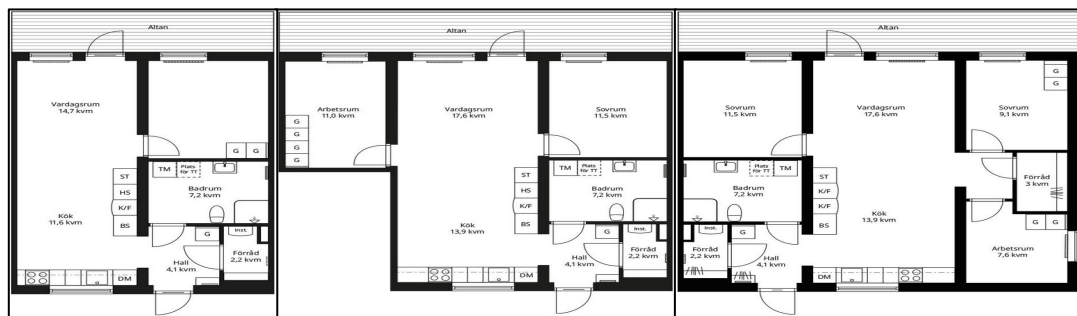


Figure 1.27 Typologie des appartements (1 chambre, 2 chambres, 3 chambres)  
Tirée de BoKlok.com

BoKlok est une entreprise qui possède sa propre usine et qui contrôle tout le processus qui accompagne le bâtiment, de la recherche de clients à la livraison du produit fini en passant par la planification, la préfabrication et l'assemblage. Ce type d'entreprise verticalement intégrée utilise alors une plateforme interne fermée développée par ses équipes et répondant à ses besoins (Hall, Whyte, & Lessing, 2020).

La firme s'est étendue aux pays nordiques voisins et possède aujourd'hui une branche au Royaume-Uni. Au fil du temps, BoKlok a proposé des nouveaux produits comme des maisons individuelles tout en conservant le même principe de production. C'est ainsi que BoKlok a construit depuis sa création plus de 14000 logements en Suède, en Finlande, en Norvège et au Royaume-Uni, à un rythme d'environ 1200 logements par an.

Ainsi, cette entreprise a réussi à répondre de manière innovante à la demande de logements abordables pour les familles à faible revenu. Grâce à son approche axée sur la construction hors site, le modulaire en bois et une ultra standardisation, BoKlok a créé une supply chain efficace, produisant des appartements de haute qualité avec un niveau élevé de finition. En contrôlant tout le processus de la recherche de clients à la livraison du produit fini, en passant par la préfabrication et l'assemblage, BoKlok a pu étendre son succès aux pays nordiques voisins et au Royaume-Uni, en maintenant un rythme de production soutenu. Cette approche verticalement intégrée et sa capacité à innover tout en conservant ses principes de production en font un acteur clé dans le secteur de la construction de logements abordables.

## **1.6 Conclusion de la revue de littérature**

Cette revue de littérature a permis de faire un état des lieux global des méthodes utilisées pour la construction hors site et mettre en lumière les lacunes et manquements qui freinent son adoption dans l'industrie de la construction aujourd'hui. Après avoir explicité les différents principes liés à la CHS modulaire en bois puis les principes DfMA appliqués dans une

démarche de projet BIM, l'étude des plateformes numériques a permis de comprendre le fonctionnement des différents outils développés et utilisés par les entreprises de construction.

Une première recommandation soulevée à l'issue de la lecture de nombreux articles est le besoin de développer des outils d'aide à la décision et des outils d'évaluation de la constructibilité pour la construction de bâtiments préfabriqués. Ensuite il serait intéressant d'automatiser la logique de conception par le développement de programmes intégrés (extensions logicielles) appliqués aux logiciels BIM existant. Un autre point récurrent dans les recommandations relevées est la nécessité de développer une bibliothèque d'objets en ligne pour les composants en bois afin d'améliorer la productivité en phase de conception.

La revue des plateformes numériques existantes sur le marché a montré le manque d'un tel outil spécifiquement adapté à la préfabrication modulaire en bois. En effet les plateformes existantes ont été conçues et sont utilisées dans le cadre de projets de construction utilisant des méthodes traditionnelles et sont inadaptées à la CHS.

Ainsi il serait possible de décrire la plateforme numérique qui paraît idéale pour la construction hors site modulaire en bois. Le premier point qui semble important est la collaboration de toutes les parties prenantes du projet autour du même outil. La plateforme doit supporter toutes les étapes, de la planification à l'installation sur site en passant par la conception, la fabrication et la logistique. Le niveau de détail des modèles doit évoluer en fonction de l'avancement du projet. La conception doit être paramétrique et s'appuyer au maximum sur une base de données de composants. Les contraintes de fabrication ainsi que celles du transport des modules sont prises en compte dès les premières étapes de conception. La phase de construction est accompagnée par un modèle VDC afin d'optimiser l'assemblage et de faciliter la communication des intervenants pour livrer au mieux le projet.

## CHAPITRE 2

### OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

#### 2.1 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de cette recherche est de mettre en place un cadre conceptuel détaillé pour une plateforme numérique innovante qui répond à plusieurs besoins critiques dans le domaine de la construction hors site en bois. Tout d'abord, elle vise à garantir la mise en œuvre efficace des principes DfMA, en facilitant l'utilisation de composants et d'assemblages préfabriqués en bois, permettant ainsi une construction plus rapide, économique et durable. De plus, cette plateforme cherche à simplifier les flux de données et d'informations au sein de l'écosystème d'un projet, en favorisant la collaboration transparente entre les différents acteurs, tels que les architectes, les ingénieurs, les fabricants et les entrepreneurs. Enfin, elle ambitionne de promouvoir l'utilisation généralisée de la préfabrication modulaire en bois, en fournissant des outils et des ressources pour concevoir et mettre en œuvre des solutions de construction écologiques et à haute performance, contribuant ainsi à une industrie de la construction plus efficace et durable.

#### 2.2 Méthodologie de recherche

Dans cette partie nous allons présenter la méthodologie de la recherche *Design-Science*, détailler les objectifs de celle-ci et justifier son application dans le cadre de cette recherche.

##### 2.2.1 Définition et objectifs de la recherche Design-Science.

La recherche *Design-Science* (en français : recherche en sciences de la conception), est une méthodologie de recherche qui se concentre sur la création et le développement de solutions pratiques et innovantes pour résoudre des problèmes du monde réel, tout en s'appuyant sur des principes scientifiques rigoureux. Cette approche de recherche vise à combiner la théorie et la pratique de manière systématique pour concevoir, construire et évaluer des artefacts, des

systemes, ou des processus qui contribuent à la résolution de problèmes concrets (Rocha, Formoso, Tzortzopoulos Fazenda, Koskela, & Tezel, 2012).

Plusieurs concepts clés caractérisent la recherche *Design-Science* comme le "cycle de conception", la "création itérative" et la "réflexion critique".

**Cycle de Conception (*Design Cycle*)** : Le cycle de conception est une séquence itérative d'étapes de recherche et de développement, de la compréhension du problème initial à la création et à l'évaluation de solutions potentielles. Chaque itération permet d'affiner la conception en fonction des retours d'expérience et de la réflexion critique (Kasanen, Lukka, & Siitonen, 1993).

**Création Itérative (*Iterative Creation*)** : Dans la méthodologie *Design-Science*, la création est un processus itératif qui implique la génération de prototypes, de modèles ou de solutions partielles, suivie de l'analyse, de l'évaluation et de l'ajustement continu. Cette approche permet d'améliorer progressivement la solution en réponse aux besoins changeants ou aux problèmes identifiés (Kasanen et al., 1993).

**Réflexion Critique (*Critical Thinking*)** : La réflexion critique est une composante essentielle de la méthodologie *Design-Science*. Elle consiste à évaluer constamment les choix de conception, les hypothèses sous-jacentes et les résultats obtenus. Cette réflexion guide les ajustements et les améliorations tout au long du cycle de conception (Kasanen et al., 1993).



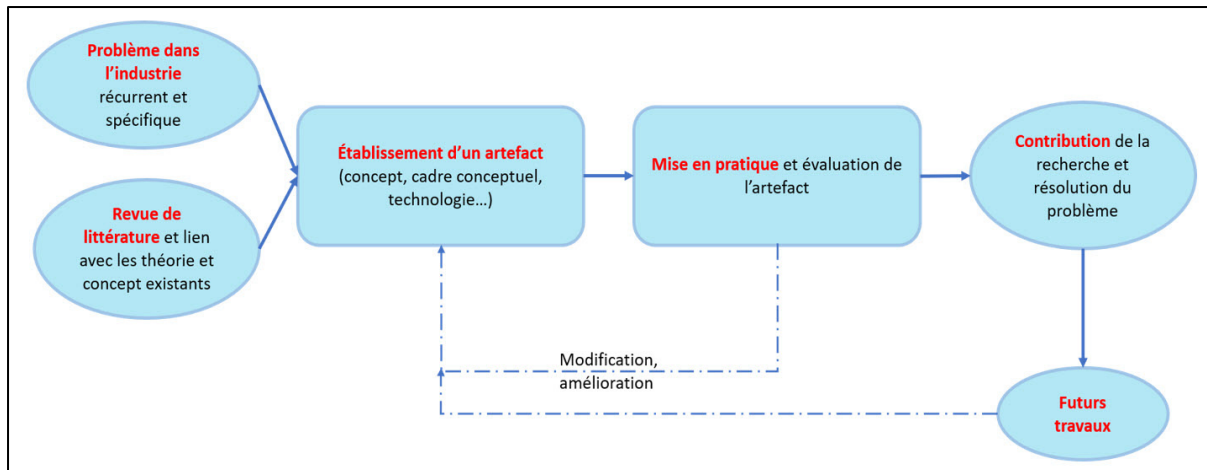


Figure 2.1 Le processus d'une méthodologie de recherche Design-Science  
Adaptée de Kasanen et al. (1993)

L'objectif principal de la recherche *Design-Science* (DSR) est de produire des connaissances applicables et d'améliorer l'efficacité, la qualité, ou la performance dans divers domaines, en mettant l'accent sur l'innovation et la création de solutions tangibles (Rocha et al., 2012). Cette méthodologie met en évidence l'importance de la recherche-action, de la collaboration interdisciplinaire et de l'itération continue pour parvenir à des résultats concrets et scientifiquement fondés.

### 2.2.2 Justification de l'utilisation de la méthode Design-Science Research

L'approche *DSR* est particulièrement appropriée pour ce projet de recherche en raison de sa nature pratique et orientée vers la création de solutions réelles. La création d'un cadre conceptuel pour une plateforme DfMA pour la construction hors site nécessite une compréhension profonde des besoins des parties prenantes, la conception de solutions novatrices et leur validation dans un environnement réel. Ce chapitre explore comment la méthodologie *Design-Science* fournit une structure efficace pour aborder ces défis.

## **2.3 Identification et définition du problème**

Pour entreprendre avec succès la création d'un cadre conceptuel d'une telle plateforme, il est impératif de commencer par une identification précise du problème à résoudre. Cette section examine en détail les étapes cruciales de l'identification et de la définition du problème, qui constituent le point de départ essentiel de la méthodologie *Design-Science*.

### **2.3.1 Processus de définition du problème**

La première étape consiste à réaliser une analyse approfondie de la situation actuelle dans le domaine de la construction hors site en bois. Cela implique la collecte de données pertinentes, la revue de la littérature, et l'examen des tendances et des pratiques courantes (Hevner, 2007). La revue de la littérature et l'examen des tendances et des pratiques courantes ont été réalisés dans le chapitre précédent.

À partir de l'analyse de la situation actuelle, il est crucial d'identifier les besoins non satisfaits ou les problèmes existants. Ces besoins peuvent être liés à la qualité, à la durabilité, à l'efficacité, aux coûts, ou à d'autres aspects de la construction hors site en bois. Cette analyse se fera via une étude de fonctionnement dans une entreprise de manufacture de structures en ossature légère de bois - AmeriCan Structures.

Suivant la méthode de DSR, une fois que les besoins de l'industrie ont été identifiés, il est nécessaire de définir des objectifs clairs pour la solution que vous allez concevoir. Les critères de succès doivent également être établis pour évaluer la performance de la solution.

### **2.3.2 Rôle de la littérature**

La revue de la littérature joue un rôle essentiel dans la définition du problème d'un point de vue théorique. Elle a permis de découvrir les travaux de recherche antérieurs, les meilleures pratiques de l'industrie, les défis rencontrés par d'autres chercheurs ou praticiens, et les

approches innovantes qui ont été explorées dans des contextes similaires. La littérature a fourni un contexte important pour comprendre le problème et orienter la recherche future.

Ainsi, le problème de recherche est le manque d'une plateforme numérique conçue pour le soutien de projets de construction en préfabrication modulaire en bois et qui intègre les concepts DfMA tout au long du processus. Les opportunités résident dans la création de solutions modulaires en bois innovantes, rentables et durables pour répondre à la demande croissante de constructions rapides et respectueuses de l'environnement. Ce projet cherche à explorer comment le DfMA peut être appliqué de manière spécifique à la construction hors site en bois.

## **2.4 Analyse des besoins et des opportunités**

Après avoir identifié et défini clairement le problème de recherche, la prochaine étape critique est d'analyser les besoins des parties prenantes et d'explorer les opportunités pour une solution innovante (Hevner, 2007). Cette section se penche sur le processus d'analyse des besoins et des opportunités, en utilisant la méthodologie *Design-Science* comme cadre pour guider cette exploration.

### **2.4.1 Collecte de données pour comprendre les besoins**

La première étape de l'analyse des besoins consiste à engager activement les parties prenantes pertinentes. Cela inclut les architectes, les ingénieurs, les entrepreneurs généraux, les manufacturiers, les propriétaires de projets et d'autres acteurs clés de l'industrie de la construction hors site en bois.

La collecte de données peut être réalisée par le biais d'entrevues en face à face, d'entrevues téléphoniques ou de questionnaires. Ces méthodes permettent de recueillir des informations qualitatives et quantitatives sur les besoins, les préoccupations et les attentes des parties prenantes. La méthode choisie pour cette recherche est la réalisation d'entrevue semi-dirigées

à l'aide de questionnaires. Ces entrevues ont permis de collecter des données et également de valider la solution proposée à l'aide du processus de conception itérative.

La revue de la documentation existante, telle que les rapports de projet, les études de cas, les normes de l'industrie et les publications académiques, a également fourni des informations pour comprendre les besoins actuels et les défis auxquels l'industrie est confrontée.

#### **2.4.2 Identification des opportunités pour l'innovation**

L'analyse des tendances actuelles de l'industrie de la construction hors site en bois peut révéler des opportunités d'innovation. Cela peut inclure des avancées technologiques, des changements de réglementation, des préoccupations environnementales ou des demandes émergentes des clients.

L'examen des solutions existantes sur le marché, telles que les plateformes DfMA actuelles ou les technologies de construction hors site en bois, permet de mieux comprendre les lacunes et les opportunités pour une innovation améliorée.

#### **2.4.3 Synthèse des besoins et des opportunités**

Une fois que les données sur les besoins et les opportunités ont été collectées, il est essentiel de les synthétiser de manière à éclairer le processus de conception à venir. Cette synthèse peut prendre la forme de listes de besoins prioritaires, de diagrammes de flux ou de matrices de décision.

La méthodologie *Design-Science* encourage également une réflexion critique à ce stade, en s'assurant que les besoins et les opportunités sont clairement définis et hiérarchisés (Rocha et al., 2012). Cette étape est fondamentale pour orienter le processus de conception ultérieur du cadre conceptuel de la plateforme DfMA et pour s'assurer que la solution créée répondra de manière efficace aux défis identifiés.

## **2.5 Conception du système ou de la solution**

La conception du système ou de la solution est au cœur de la méthodologie *Design-Science* (Kasanen et al., 1993). Après avoir identifié les besoins et les opportunités dans le domaine de la construction hors site de structures modulaires en bois, la création d'une solution innovante et pratique a été l'étape suivante. Cette section explore les étapes du processus de conception, en utilisant la méthodologie *Design-Science* comme guide.

### **2.5.1 Principes de conception**

La conception dans le contexte de *Design-Science* repose sur plusieurs principes clés :

- Orientée vers les Besoins : La conception doit être étroitement alignée sur les besoins identifiés des parties prenantes, en cherchant à résoudre les problèmes spécifiques qui ont été mis en lumière (Hevner, 2007).
- Simplicité : Les solutions conçues doivent être simples, évitant la complexité inutile. L'objectif est de maximiser l'efficacité tout en minimisant les coûts et les ressources nécessaires (Hevner, 2007).
- Intégration : Les composants du système ou de la solution doivent être conçus de manière à s'intégrer harmonieusement les uns aux autres, créant ainsi une solution globale cohérente (Hevner, 2007).
- Innovation : La créativité et l'innovation sont encouragées. Les chercheurs sont incités à explorer de nouvelles approches et à repousser les limites de la solution (Hevner, 2007).

### **2.5.2 Modélisation conceptuelle**

La modélisation conceptuelle est une étape clé de la création du système ou de la solution. Elle implique la création de représentations visuelles ou abstraites de la solution proposée. Cela

peut inclure des schémas, des diagrammes, des maquettes ou même des simulations (Rocha et al., 2012). Dans le cas de cette recherche, la solution proposée prendra la forme de différents diagrammes de fonctionnement et des schémas de principes.

### **2.5.3 Conception itérative**

La conception dans la méthodologie *Design-Science* est un processus itératif. Cela signifie que la solution n'est pas figée dès le départ, mais qu'elle évolue au fil du temps en réponse aux retours d'expérience, à la réflexion critique et aux ajustements nécessaires. Chaque itération de conception améliore la solution jusqu'à ce qu'elle atteigne une forme optimale (Rocha et al., 2012).

Dans le contexte actuel de la recherche, la solution proposée est un cadre conceptuel (*framework*) de plateforme numérique DfMA adaptée pour le mode de construction hors site de structures modulaires en bois.

## **2.6 Méthodes d'évaluation et de validation de la solution**

Une fois la solution initiale créée, il est nécessaire de procéder à une évaluation et à une validation pour déterminer si la solution répond aux besoins et aux critères de succès établis. Cette section examine les méthodes d'évaluation et de validation dans le cadre de la méthodologie *Design-Science*.

### **2.6.1 Évaluation de la solution par rapport aux besoins identifiés**

Avant de procéder à des tests ou à des expérimentations, il est important de comparer la solution créée aux besoins identifiés. Cette étape permet de vérifier si la solution est alignée sur les besoins et les critères de succès établis lors de la définition du problème. Les méthodes courantes pour cette évaluation incluent la création de matrices de comparaison et la revue des spécifications de conception (Kasanen et al., 1993).

## **2.6.2 Tests et expérimentations**

Les tests et les expérimentations sont des moyens concrets d'évaluer la performance de la solution proposée (Kasanen et al., 1993). Cette étape peut impliquer des évaluations réalisées par des éventuels utilisateurs telles que des retours d'expérience et des commentaires sur la solution proposée. Cela peut inclure des enquêtes ou des questionnaires. Une autre méthode d'évaluation qui peut être utilisée est la comparaison de la solution proposée avec des solutions existantes. Cette comparaison permet d'évaluer les avantages concurrentiels du prototype réalisé. Cependant dans le cadre de cette recherche et au vu de la solution proposée, il n'a pas été réalisé de tests ou d'expérimentations à cause de la limite du temps de cette recherche de maîtrise.

## **2.6.3 Réalisation de cas d'utilisation**

La validation de la solution peut également être effectuée par la réalisation de cas d'utilisation réels ou simulés (Rocha et al., 2012). Cette étape permet de mettre en évidence la manière dont la solution se comporte dans des situations concrètes. Les cas d'utilisation peuvent inclure la réalisation d'un projet hors site à petite échelle ou la simulation d'un projet de construction complet. Dans le cadre de cette recherche, cette méthode a été partiellement utilisée dans le cas d'un mini projet au sein de l'entreprise AmeriCan Structures et avec d'autres intervenants de l'industrie.

## **2.6.4 Validation par des experts de l'industrie**

La solution proposée peut être validée par des experts de l'industrie sur le sujet d'étude. Dans le cadre de cette recherche, des entrevues semi-dirigées ont été conduites dans lesquelles quatre acteurs de la construction hors site en bois ont répondu dans le but de valider la solution proposée.

### **2.6.5 Révision et amélioration**

Il est important de noter que l'évaluation et la validation peuvent révéler des défis ou des problèmes non anticipés. Dans le cadre de la méthodologie *Design-Science*, ces découvertes ne sont pas des échecs, mais plutôt des opportunités d'amélioration. En conséquence, il est courant de réviser et d'ajuster la solution en fonction des résultats de l'évaluation et de la validation (Kasanen et al., 1993).

## **2.7 Communication des résultats**

Après avoir évalué, validé et affiné la solution proposée pour une plateforme DfMA adaptée à la construction hors site, il est essentiel de communiquer les résultats à la communauté académique, à l'industrie et à d'autres parties prenantes. Cette section explore les méthodes et les étapes pour une communication efficace des résultats de la recherche.

### **2.7.1 Présentation des résultats**

La présentation des résultats est une étape cruciale pour partager les découvertes de la recherche avec un public plus large. Les méthodes pour présenter les résultats obtenus peuvent inclure la rédaction de rapports de recherche ou de publications, ou la réalisation de présentations lors de conférences académiques ou d'événements de l'industrie.

### **2.7.2 Adoption par les parties prenantes**

Il est essentiel d'obtenir l'adoption de la solution par les parties prenantes clés, dans notre cas, les architectes, les entrepreneurs généraux, les manufacturiers et les propriétaires de projets. Pour favoriser cette adoption, plusieurs mesures sont envisageables :

Le développement de cas d'utilisation pilotes : Collaborer avec des acteurs de l'industrie pour mettre en œuvre la solution sur des projets pilotes, démontrant ainsi son efficacité en conditions réelles.



Les études de cas : Créer des études de cas décrivant comment la solution a été utilisée avec succès dans des projets spécifiques, mettant en évidence les gains en efficacité et les économies réalisées.

La communication des résultats de la recherche maximiserait son impact, en contribuant à l'innovation et à l'amélioration du secteur de la construction hors site. En partageant ces résultats, en favorisant l'adoption de la solution et en évaluant son impact, cette recherche contribuera à façonner positivement l'industrie.

## **2.8 Synthèse du chapitre**

Ce chapitre a exploré en détail la méthodologie de recherche *Design-Science* appliquée au sujet de la création d'un cadre conceptuel d'une plateforme DfMA pour la construction hors site de structures modulaires en bois. À travers les différentes étapes de cette méthodologie, nous avons tracé un parcours rigoureux et créatif pour résoudre les défis complexes de l'industrie de la construction.

Nous avons débuté l'aperçu de la méthodologie *Design-Science*, en mettant en avant les principes fondamentaux qui guident ce processus de recherche créative. Les étapes suivantes ont inclus l'identification et la définition du problème, l'analyse des besoins et des opportunités, la conception du système ou de la solution, ainsi que l'évaluation et la validation de la solution. Chacune de ces phases a joué un rôle crucial dans le développement du cadre conceptuel de la plateforme DfMA.

Enfin, nous avons abordé la manière de communiquer les résultats de recherche, en insistant sur l'importance de partager les conclusions, de favoriser l'adoption de la solution par les parties prenantes et de mesurer son impact sur l'industrie.

### **2.8.1 Pertinence de la méthodologie *Design-Science* dans la recherche actuelle**

La méthodologie de recherche *Design-Science* est optimale dans le cas de la recherche actuelle. Elle offre un cadre structuré pour résoudre des problèmes complexes, tout en favorisant l'innovation et la créativité. Dans le contexte de la recherche sur la construction modulaire en bois, cette méthodologie a permis de canaliser la démarche, de clarifier les objectifs et de guider la création d'une solution tangible.

Un aspect particulièrement significatif de la méthodologie *Design-Science* réside dans son caractère itératif. Elle encourage l'expérimentation, la révision constante et l'apprentissage continu, ce qui correspond parfaitement aux besoins de recherche contemporains. La capacité à s'adapter aux découvertes en cours de route, à tirer des leçons des succès et des échecs, et à affiner constamment la solution représente un atout précieux dans un monde en constante évolution.

### **2.8.2 Perspectives futures et recommandations**

Dans le cadre de cette recherche sur un cadre conceptuel d'une plateforme DfMA pour la construction hors site, les perspectives futures sont prometteuses. À mesure que la méthodologie *Design-Science* continue d'évoluer, il est essentiel de rester à l'affût des dernières avancées et des nouvelles technologies qui peuvent être intégrées dans la solution.

En conclusion, la méthodologie de recherche *Design-Science* offre un cadre puissant pour résoudre des problèmes complexes et pour innover dans des domaines tels que la construction hors site. En suivant cette méthodologie de manière systématique, créative et itérative, il est possible d'apporter des contributions significatives à ce domaine d'étude et de façonner positivement l'avenir de l'industrie. La recherche a pour but de transformer les pratiques de construction, d'améliorer l'efficacité et la durabilité, et de répondre aux besoins changeants de l'industrie.

## **CHAPITRE 3**

### **CONCEPTION DE LA SOLUTION : CADRE CONCEPTUEL D'UNE PLATEFORME DFMA POUR LA CONSTRUCTION HORS SITE**

#### **3.1 Introduction**

L'étape de recherche et de définition des besoins relevés dans la revue de la littérature a été effectué dans le premier chapitre de ce mémoire.

Ce chapitre marque la première étape pratique du processus de recherche, cherchant à concrétiser les idées théoriques en une solution tangible répondant aux besoins de l'industrie de la construction hors site en bois. Pour ce faire, nous présenterons d'abord le contexte de la conception puis les objectifs du chapitre.

##### **3.1.1 Contexte de la conception**

La définition d'un cadre conceptuel d'une plateforme numérique DfMA pour des projets de construction hors site en bois est la solution proposée à la problématique de recherche. Cette plateforme a pour objectif de faciliter la mise en œuvre des principes de DfMA tout en simplifiant les flux de données et d'informations au sein de l'écosystème d'un projet de construction hors site.

La nécessité d'une plateforme numérique DfMA se fonde sur le constat que, malgré la croissance de la construction hors site et de la préfabrication en bois, il existe actuellement un manque d'outils spécifiques adaptés à ces besoins. Les outils BIM existants ont été conçus principalement pour des projets de construction traditionnels, ce qui limite leur efficacité dans le contexte de la préfabrication.

### 3.1.2 Objectifs du chapitre

Ce chapitre se consacre à la première phase du processus de conception du cadre conceptuel (*framework*) de la plateforme DfMA. Il vise à introduire les principaux aspects de cette conception, à expliquer le contexte dans lequel elle s'inscrit, et à définir les objectifs spécifiques à atteindre.

Les principaux objectifs de ce chapitre sont les suivants :

- Décrire les étapes de conception itérative qui ont guidé le processus de développement du *framework* de la plateforme.
- Présenter une vue d'ensemble de la modélisation conceptuelle de la plateforme et de son architecture.
- Préparer le terrain pour la prochaine phase de validation du *framework* de la plateforme.

Ce chapitre constitue la première étape pratique de la recherche, qui est de transformer les idées théoriques en une solution concrète qui répondra aux besoins de l'industrie de la construction hors site en bois. La méthodologie *Design-Science* continuera à guider cette approche, favorisant la créativité, l'innovation, et l'itération constante pour aboutir à une solution robuste et efficace.

## 3.2 Conception itérative du cadre théorique de la plateforme numérique DfMA

Dans cette partie, nous aborderons en détail les différentes étapes de cette conception itérative, du recueil des besoins à la réflexion critique et à l'ajustement constants. Nous explorerons également comment cette méthodologie s'applique à la création du cadre conceptuel de la plateforme DfMA pour répondre aux défis spécifiques de la construction hors site en bois.

### 3.2.1 Méthodologie de conception itérative

La conception de la plateforme DfMA pour la CHS repose sur une approche itérative, conforme à la méthodologie *Design-Science*. Cette méthodologie privilégie la création

progressive et l'amélioration constante de la solution en réponse aux besoins changeants et aux enseignements tirés des étapes précédentes.

### **3.2.2 Phase initiale : Identification des besoins**

La phase d'identification se décompose en deux étapes dans le cadre de cette recherche. La première étape, consiste à présenter les besoins identifiés dans la revue de la littérature. Cette étape vise à comprendre les défis majeurs auxquels l'industrie est confrontée, notamment le manque de connaissances, le besoin de collaboration, l'absence de normes spécifiques et les coûts de conception supérieurs. Ensuite, nous décriront l'étude de cas spécifique qui a été réalisée, celle d'American Structures, une entreprise spécialisée dans la construction de structures préfabriquées en bois. Lors de cette étude de cas, des entrevues ont également été menées avec des experts de l'industrie. Cette étude de fonctionnement permettra de mieux comprendre les besoins et les processus de l'industrie, contribuant ainsi à la conception du cadre conceptuel de la plateforme.

#### **3.2.2.1 Identification des besoins dans la littérature**

La première étape consiste à identifier les défis liés à l'adoption de la DfMA dans les projets de construction hors site. La revue de la littérature a permis de recueillir les connaissances les plus complètes et les plus pertinentes et d'élargir les connaissances dans le domaine de la recherche sur la DfMA axée sur la construction hors site. Les principaux défis identifiés sont explicités ci-après.

Le premier défi le plus fréquemment évoqué est « l'insuffisance de connaissances pertinentes et d'expérience pratique » (Wuni & Shen, 2020). Les professionnels de la conception, tels que les architectes et les ingénieurs, ont souvent une formation pratique insuffisante dans le domaine de la DfMA. Cette lacune en termes de connaissances et d'expérience a entraîné des difficultés techniques lors de la mise en œuvre de la DfMA axée sur la construction (Gao, Jin, & Lu, 2020). Selon une autre étude, les professionnels n'ont pas réussi à appliquer de manière

adéquate les outils et techniques DfMA à chaque phase du projet, ce qui les a empêchés de répondre efficacement aux besoins du client (Gosling, Jia, Gong, & Brown, 2016).

Le deuxième défi souvent cité dans la littérature concerne le manque d'environnements collaboratifs au sein de l'industrie de la construction (Wuni & Shen, 2020). En effet, pour une mise en œuvre réussie de la DfMA axée sur la construction, il est impératif d'impliquer précocement les parties prenantes du projet dans le processus de conception, de favoriser une communication ouverte, de promouvoir la collaboration et de faciliter le partage d'informations (Abueisheh, Manu, Mahamadu, & Cheung, 2020). Il a été observé que l'absence d'implication des parties prenantes du projet lors de la phase de conception, notamment dans les projets adoptant des méthodes de livraison traditionnelles, entrave de manière significative la mise en œuvre efficace de la DfMA axée sur la construction (Song, Mohamed, & AbouRizk, 2009).

Le troisième défi le plus fréquemment mentionné concerne l'absence de cadres législatifs, de codes, de directives et de normes spécifiques pour la mise en œuvre de méthodes DfMA axées sur la construction (Song et al., 2009). La littérature met en évidence le fait que le nombre limité de directives, de codes et de normes industrielles dans différents pays crée un manque de métriques de conception systématiques et entrave le développement de meilleures pratiques en matière de DfMA axée sur la construction (Bakhshi, Chenaghloou, Pour Rahimian, Edwards, & Dawood, 2022).

Le quatrième défi relevé concerne des "coûts de conception supérieurs" par rapport aux méthodes traditionnelles qui est vu comme un obstacle à la mise en œuvre appropriée des approches DfMA dans les projets de construction (Jin et al., 2018). Ce coût supplémentaire est attribué à plusieurs facteurs, notamment le besoin d'investissements organisationnels supplémentaires, tels que la main-d'œuvre spécialisée et les compétences techniques requises, la nécessité d'évaluer les performances pendant la conception et les premiers prototypes, le manque de développement du marché et la concurrence limitée entre les solutions DfMA axées sur la construction, ainsi que les exigences complexes de conformité aux normes (Gosling et al., 2016). De plus, la CHS étant une approche nouvelle pour la grande majorité des participants

au projet, une baisse de productivité apparaît souvent pendant la période d'apprentissage et d'adaptation avant de voir cette productivité augmenter (Poirier et al., 2021).

La reconnaissance de ces défis fondamentaux est essentielle pour orienter la démarche de conception de la plateforme DfMA. L'objectif étant de proposer une solution innovante qui abordera au mieux ces problèmes.

Dans la partie suivante, nous développerons l'étude de cas particulière menée sur AmeriCan Structures, entreprise avec laquelle le groupe de recherche a pu travailler en collaboration. Cette analyse opérationnelle nous permettra d'acquérir une meilleure compréhension des exigences et des procédures de l'industrie, ce qui contribuera à l'élaboration du cadre conceptuel de la plateforme numérique.

### **3.2.2.2 Etude de fonctionnement d'un manufacturier : AmeriCan Structures**

#### **Présentation de l'entreprise**

Située à Thetford Mines, au Québec, AmeriCan Structures est une entreprise spécialisée dans la conception et la fabrication de structures préfabriquées en bois pour le multi-résidentiel. Elle a été fondée en 2002 par monsieur René Leclerc, un ex-entrepreneur général ayant plus de 20 ans d'expérience dans le domaine de la construction résidentielle et commerciale de bâtiments. L'entreprise produit principalement des murs, des poutrelles de plancher et des fermes de toit en ossature légère de bois. AmeriCan Structures a contribué à de nombreux projets d'envergure au Québec et ailleurs au Canada, ainsi qu'à l'international.



Figure 3.1 Vue extérieure de l'entreprise

L'entreprise est composée de deux parties : les ateliers d'usine situés au RDC découpés en 3 départements (la section d'assemblage des murs, la section d'assemblage des fermes de toit et la section d'assemblage des poutrelles de plancher) et les bureaux situés au-dessus des ateliers.

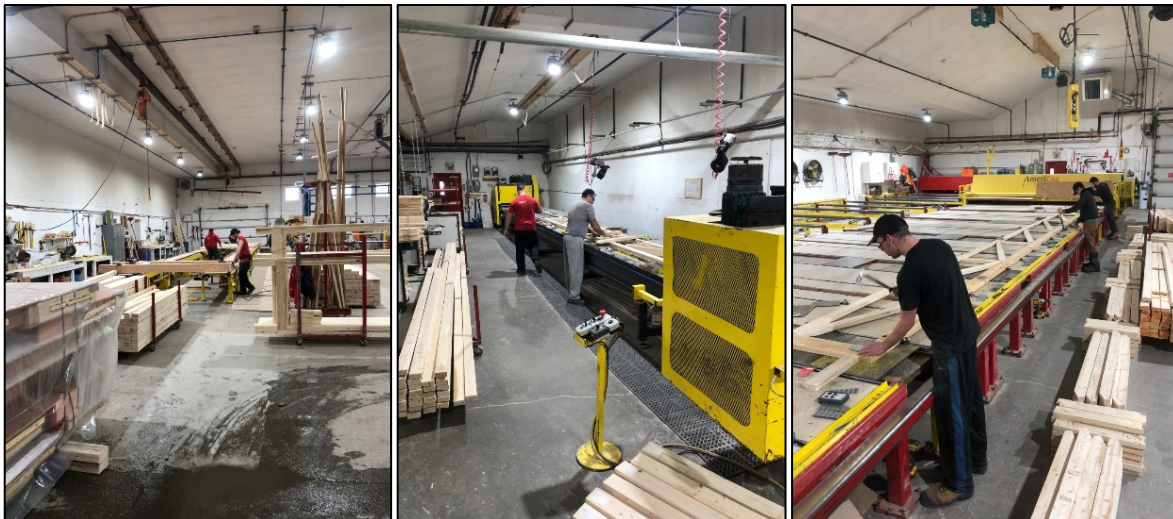


Figure 3.2 Section murs, fermes et poutrelles (de gauche à droite)

### Mode de fonctionnement contractuel

Dans la majeure partie des projets réalisés par AmeriCan structures, l'entreprise est sous-traitante d'un installateur qui a été sélectionné par l'entrepreneur général et intervient dans une phase où la conception est généralement déjà 'gelée' par les architectes. Les murs en ossature



légère de bois représentent leur principale production (70%) suivi des poutrelles de plancher (20%) et des fermes de toit (10%).

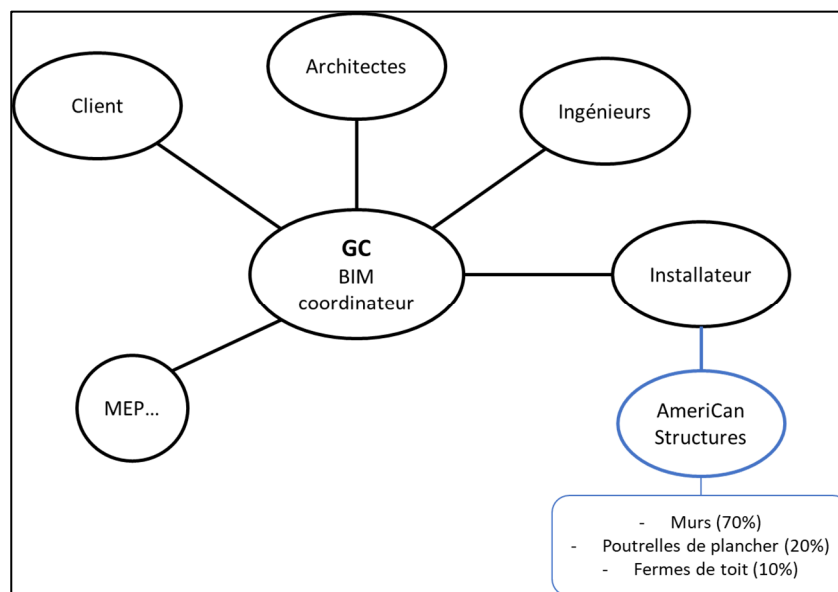


Figure 3.3 Relations contractuelles entre les parties prenantes d'un projet

La figure 3.3 représente les relations contractuelles dans la majorité des projets réalisés par AmeriCan Structures. L'entrepreneur général (GC) fait appel à un coordinateur de projet BIM pour gérer l'échange d'information entre les différents intervenants. Ainsi, intervenant en tant que sous-traitant de l'installateur, American Structures n'a pas de droit de décision au cours du projet et n'est pas concertée pendant la phase de conception, impliquant alors une étape de reconception des plans plus détaillée et utilisable pour la phase de fabrication.

### Processus de réalisation des murs en ossature légère de bois

Les murs en ossature légère de bois étant leur produit majoritaire, nous nous sommes intéressés à leurs processus de réalisation. Ce processus allant depuis l'acceptation du projet à la livraison sur le site est détaillé dans le schéma suivant :

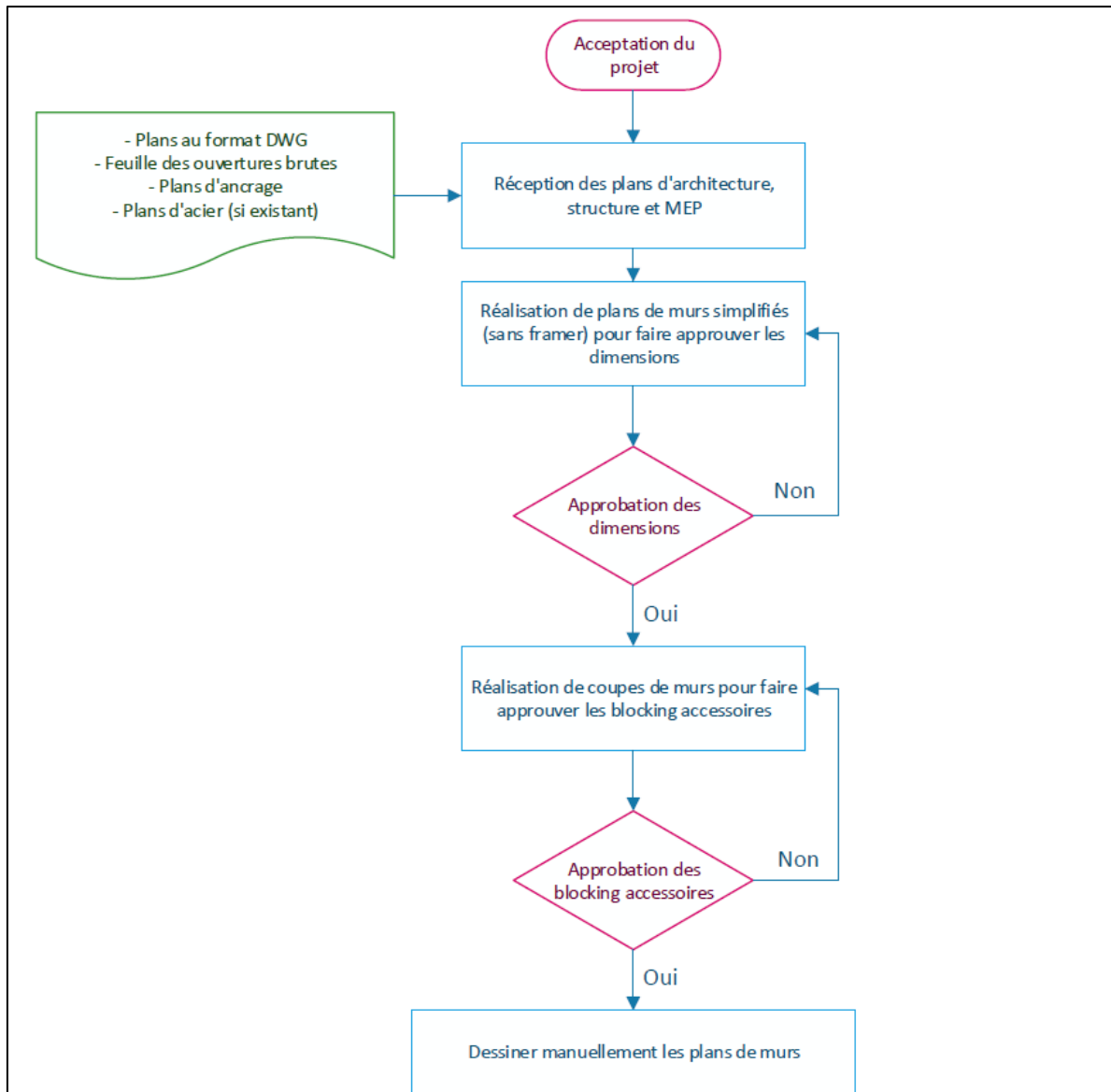


Figure 3.4 Processus de réalisation des murs

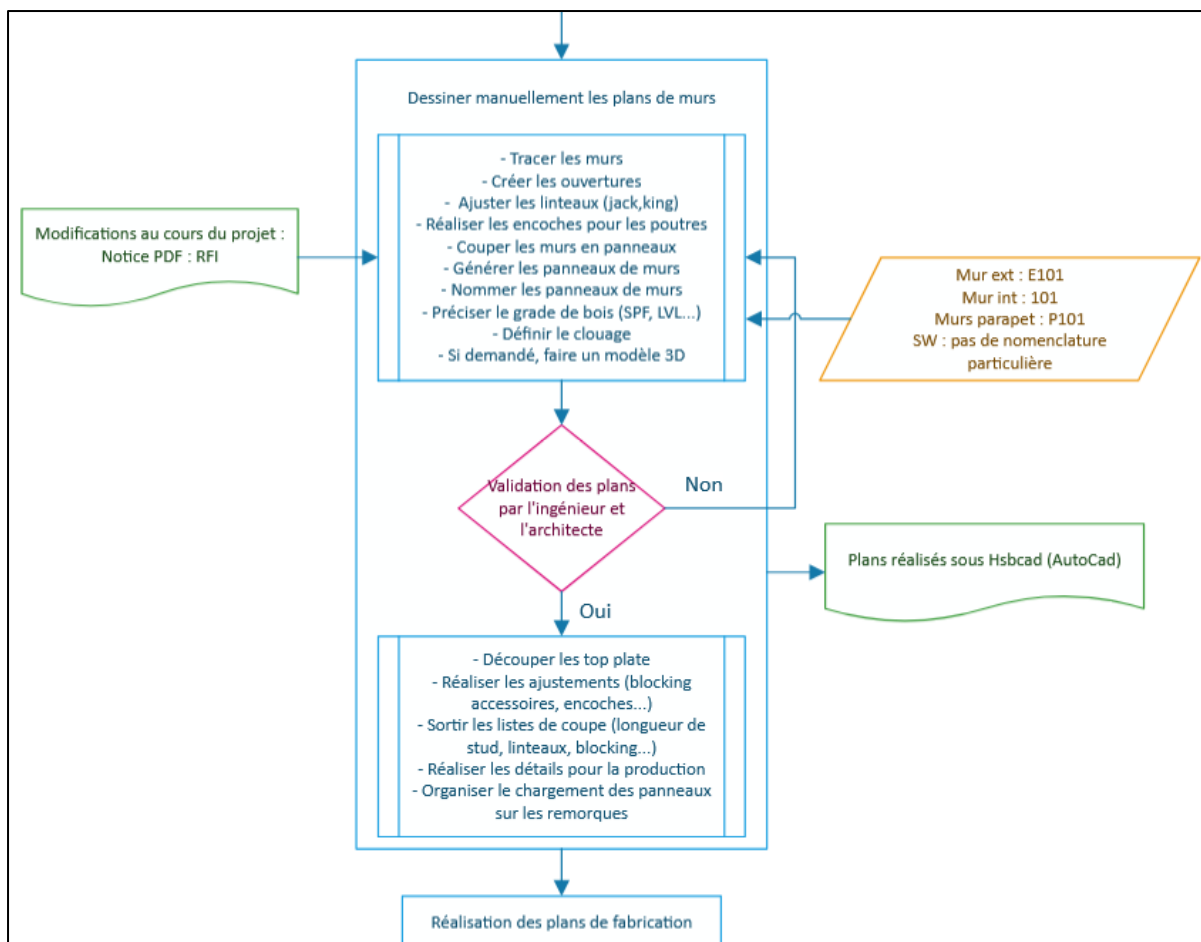


Figure 3.4 Processus de réalisation des murs (suite)

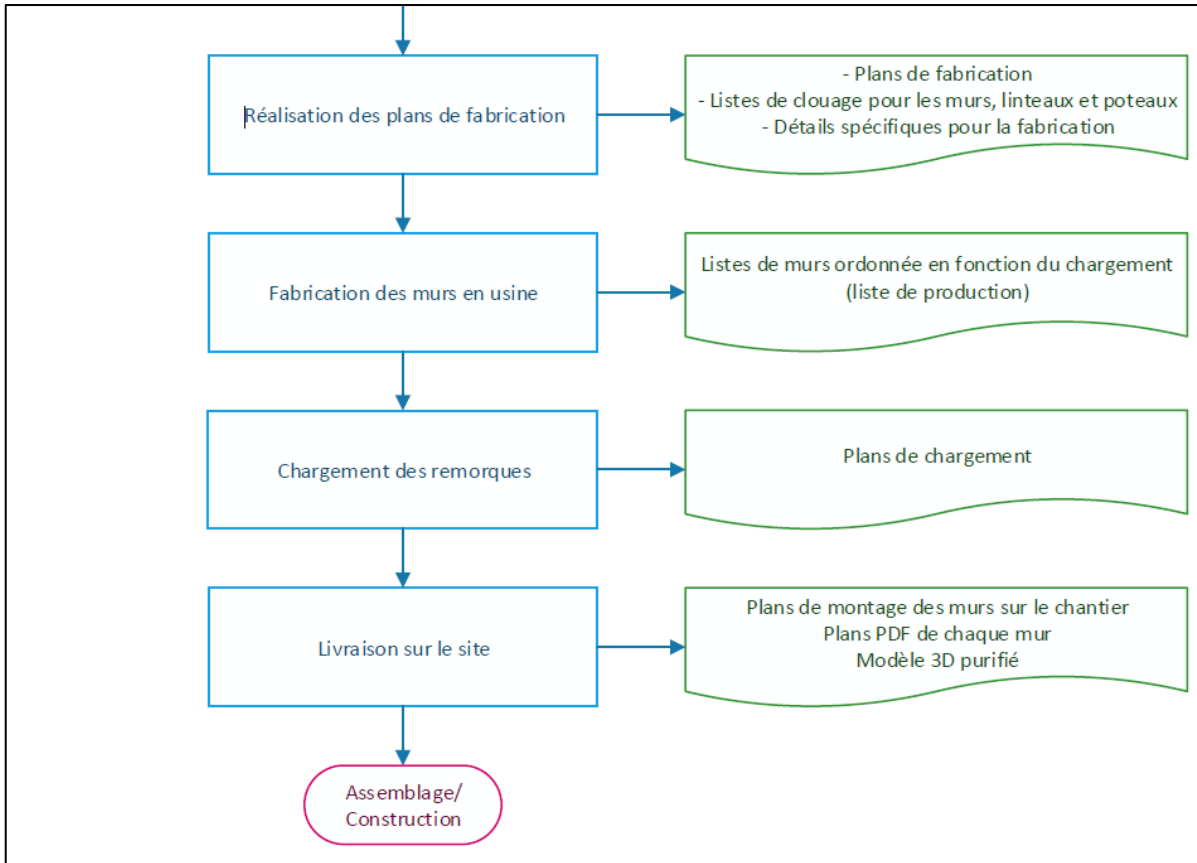


Figure 3.4 Processus de réalisation des murs (suite)

Ce diagramme de flux détaillé précise quelles actions sont réalisées (dans les blocs bleus), quelles données sont requises et émises (blocs verts), les étapes de validations (losanges roses) et les règles de nomenclature (blocs jaunes). A l'aide de ce diagramme nous avons pu identifier les données qui transitent au long de ce processus ainsi que le format de ces données échangées. Le tableau 3.1 récapitule les données recueillies.

Tableau 3.1 Tableau récapitulatif des données utiles au processus de réalisation des murs

<b>Données</b>	<b>Format d'échange</b>
Plans d'architecture	Plan DWG
Plans structure	Plan DWG
Plans MEP	Plan DWG / Plan PDF
Plans d'ancrage	Plan DWG
Plans d'acier	Plan DWG
Notice de modification (RFI...)	Détail de plan PDF
Dimension des ouvertures	Feuilles des ouvertures PDF
Localisation d'éléments particuliers sur les murs	Détail de plan PDF
Délai de fabrication	Document PDF
Plans de fabrication	Plan DWG / Plan PDF
Liste de clouage	Document PDF
Liste de murs	Document PDF
Plans de chargement	Plan PDF
Plan de montage des murs	Plan PDF
Modèle 3D du projet pour la fabrication	Plan DWG / Fichier 3D

L'étude complète de ce processus a permis d'identifier les différentes informations qui transitent depuis la reconception chez le manufacturier jusqu'à livraison des murs en ossature légère de bois.

A la suite des entrevues réalisés avec plusieurs intervenants industriels, une synthèse des besoins relevés dans l'industrie a été effectuée. Le tableau 3.2 résume les défis relevés dans la littérature et les défis relevés dans l'industrie.

Tableau 3.2 Synthèse des défis relevés

Défis relevés dans la littérature	Défis relevés dans l'industrie
Coûts de conception supérieurs aux méthodes traditionnelles	Manque de qualité des plans reçus
Absence de cadres législatifs	Manque de coordination entre le manufacturier et l'architecte lors de la phase de conception
Manque d'environnements collaboratifs	Manque d'efficacité de la communication avec les parties prenantes au projet
Manque d'expérience des professionnels	Manque de connaissance des logiciels utilisés

La prochaine étape de la recherche consiste à traduire ces besoins en spécifications concrètes pour le cadre conceptuel de la plateforme DfMA.

### 3.2.3 Phase de modélisation conceptuelle

Une fois les besoins identifiés, la phase suivante consiste à élaborer une modélisation du cadre conceptuel de la plateforme DfMA. Cette phase inclut la création de représentations visuelles, telles que des diagrammes de flux, des schémas conceptuels, et des maquettes, pour illustrer la structure et les composants clés du cadre conceptuel.

Les travaux de Rankohi, Bourgault, Iordanova, & Carbone (2023), qui ont établi un cadre conceptuel pour la mise en œuvre de la DfMA dans les projets de construction hors site, présenté dans le chapitre 1, ont été la base théorique de notre étude. Nous nous sommes concentrés sur les étapes allant du design conceptuel à l'assemblage/construction sur site.

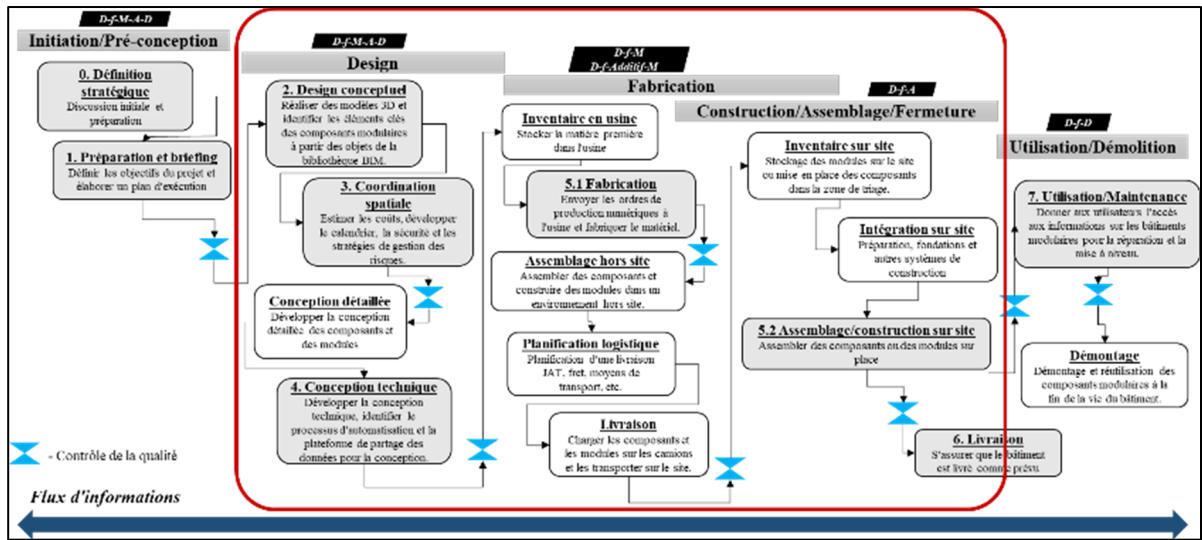


Figure 3.5 Organigramme du cadre DfMA pour la construction hors site  
Adaptée de Rankohi et al. (2023)

L'étape suivante a été de simplifier ce processus en six grandes phases renumérotées :

1. Design conceptuel,
2. Coordination spatiale,
3. Conception technique,
4. Fabrication,
5. Livraison au chantier,
6. Assemblage/Construction sur site.

Ensuite nous avons précisé les différentes données nécessaires à la bonne réalisation de ces six phases du processus de réalisation d'un projet hors site. Nous avons synthétisé ces informations dans un diagramme de flux présenté en figure 3.6.

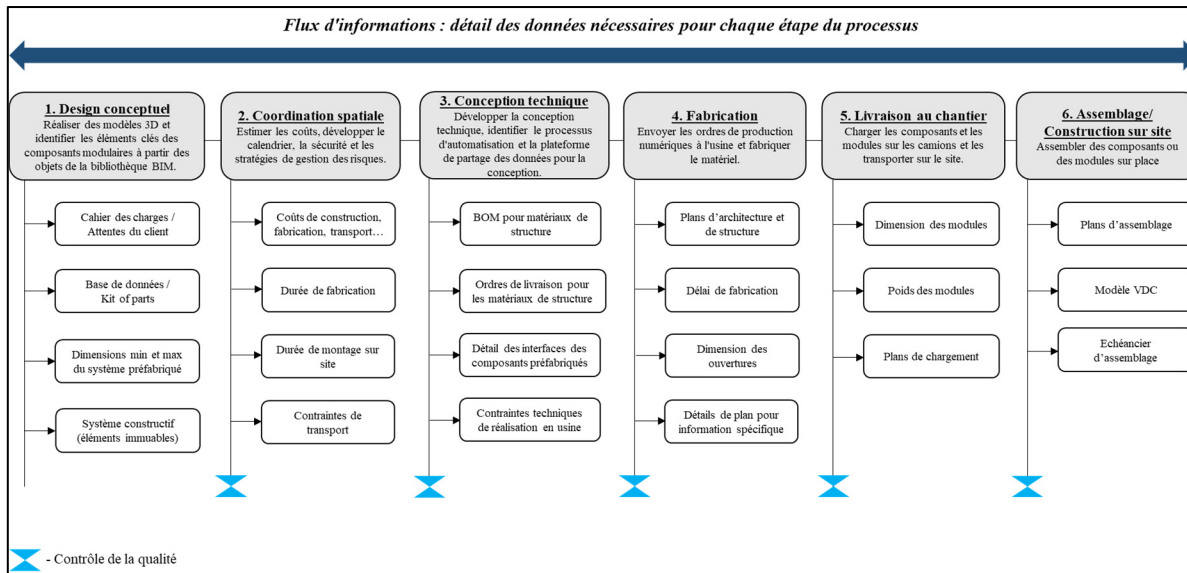


Figure 3.6 Détail des données nécessaires à chaque étape du processus

Ce diagramme représente la première itération pour la création de la solution. Pour chaque étape nous avons listé les informations jugées pertinentes nécessaire au succès de cette étape. Par exemple, pour que l'étape 1. Design conceptuel se déroule correctement, il est nécessaire d'avoir les attentes du client, une bibliothèque d'éléments 3D, les dimensions limites du système préfabriqués et les éléments de construction immuables (parties en béton par exemple).

Après plusieurs itérations et échanges avec les professionnels du secteur de la construction hors site, nous avons abouti à un diagramme plus complet en indiquant à chaque étape quelle était la partie prenante qui intervenait majoritairement. Ainsi, comme visible sur la figure 3.7, dans l'étape 1. Design conceptuel, des informations ont été rajoutées comme le budget du projet et la conformité aux lois locales.



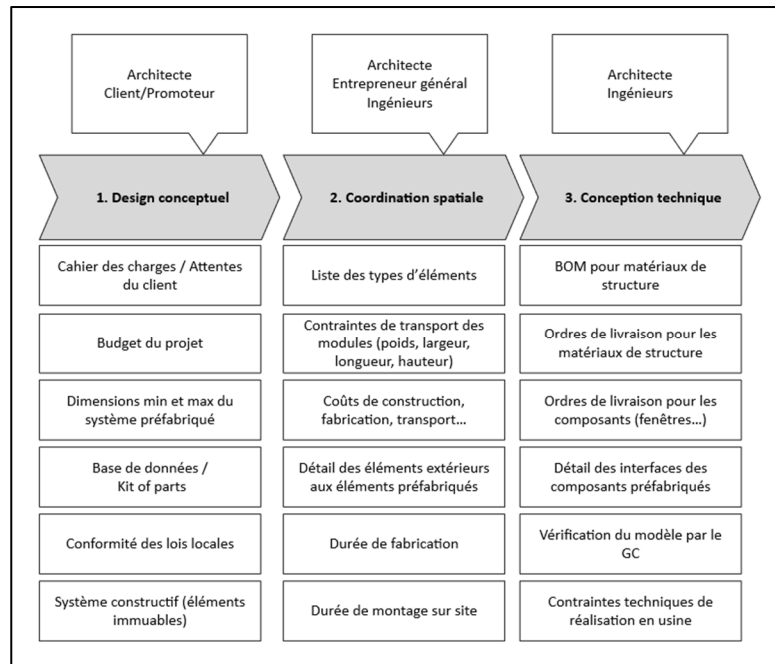


Figure 3.7 Cadre conceptuel des flux d'information d'un projet hors site

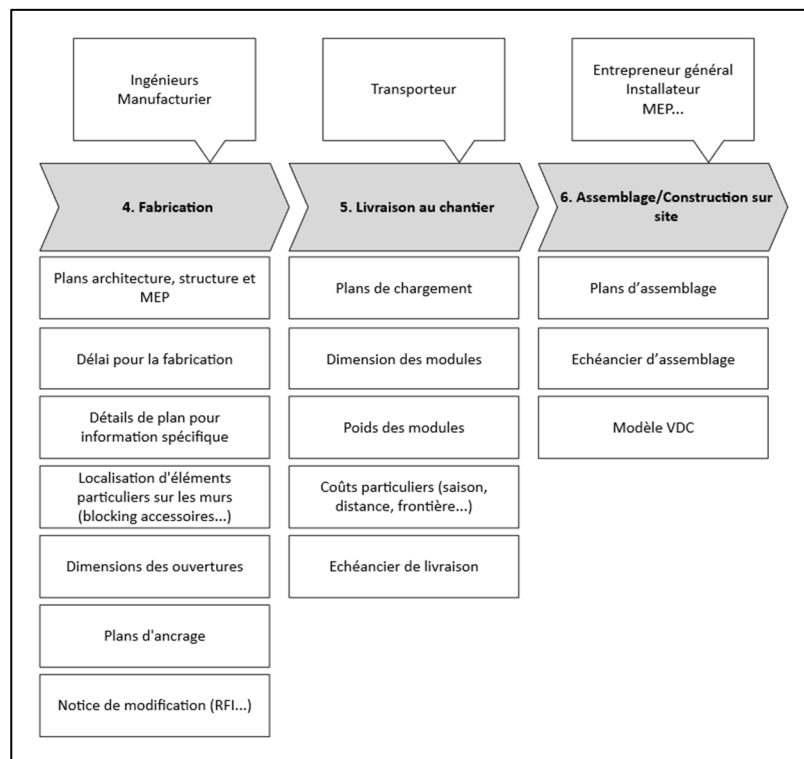


Figure 3.7 Cadre conceptuel des flux d'information d'un projet hors site (suite)

Ensuite nous avons cherché à préciser pour chaque donnée au sein d'une étape de qui provenait cette information, pour qui elle était nécessaire et sous quel format celle-ci transitait. Le format d'échange indiqué représente le format actuellement utilisé dans le cadre de ces échanges. La figure 3-8 représente ce flux d'information pour l'étape 1. Design conceptuel.

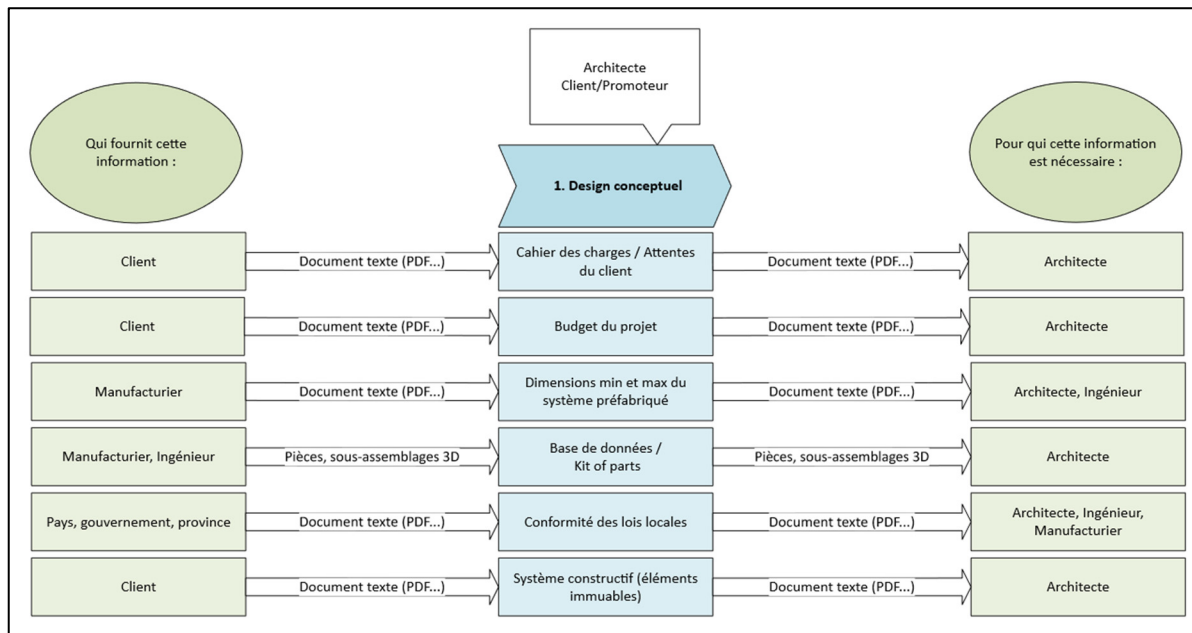


Figure 3.8 Détail du partage d'information pour l'étape 1. Design conceptuel

Dans cette phase du projet les parties prenantes qui agissent majoritairement sont l'architecte et le client. Le client fournit son cahier des charges, le budget du projet et le choix de système constructif. Pour la bonne réalisation de cette étape, le manufacturier doit fournir les dimensions limites du système préfabriqué et avec l'ingénieur, ils doivent fournir une bibliothèque d'éléments préfabriqués (*kit of parts*, panneaux ou modules). Enfin toutes les parties prenantes doivent se conformer aux lois locales pour la bonne réalisation du projet.

Les détails de partage d'information pour les cinq autres phases d'un projet hors site sont présentées dans les figures suivantes.

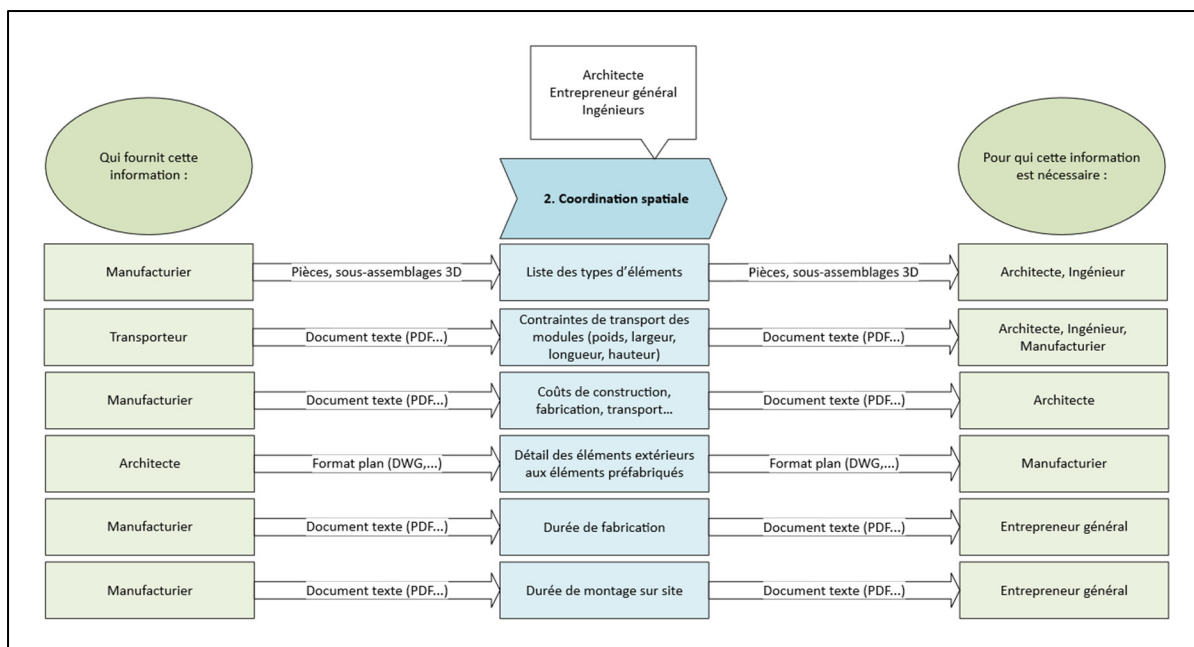


Figure 3.9 Détail du partage d'information pour l'étape 2. Coordination spatiale

Dans cette phase de coordination spatiale, les parties prenantes qui agissent majoritairement sont l'architecte, l'entrepreneur général et les ingénieurs.

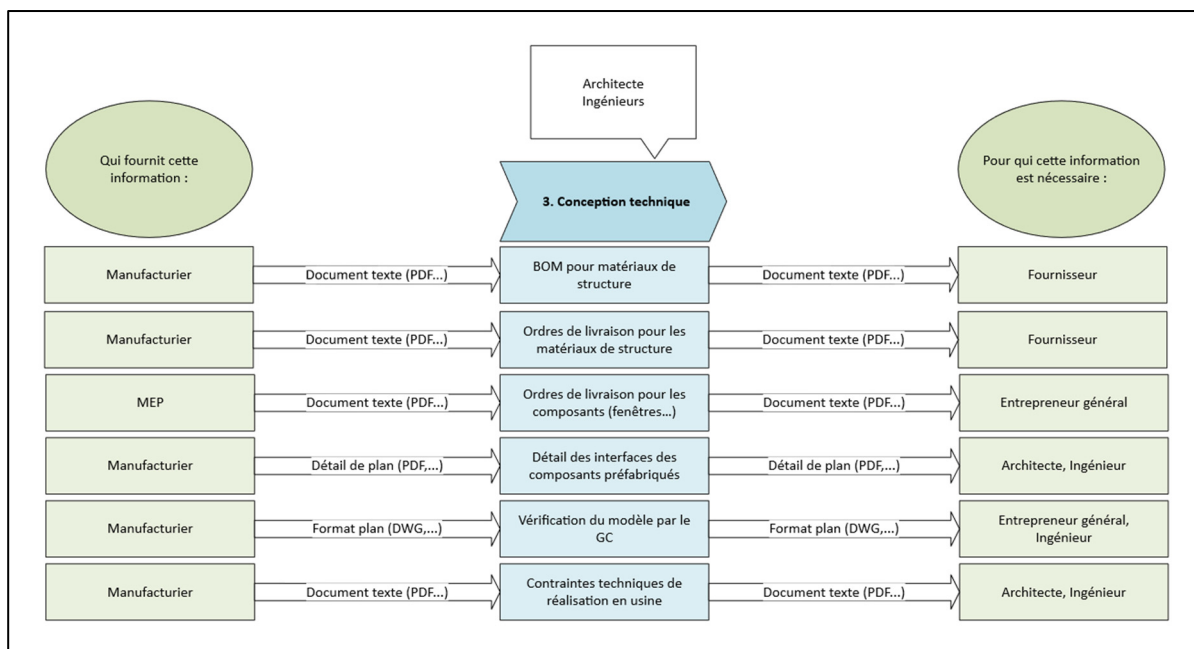


Figure 3.10 Détail du partage d'information pour l'étape 3. Conception technique

Pour la phase de conception technique, ce sont les ingénieurs et l'architecte qui sont les parties prenantes qui agissent majoritairement.

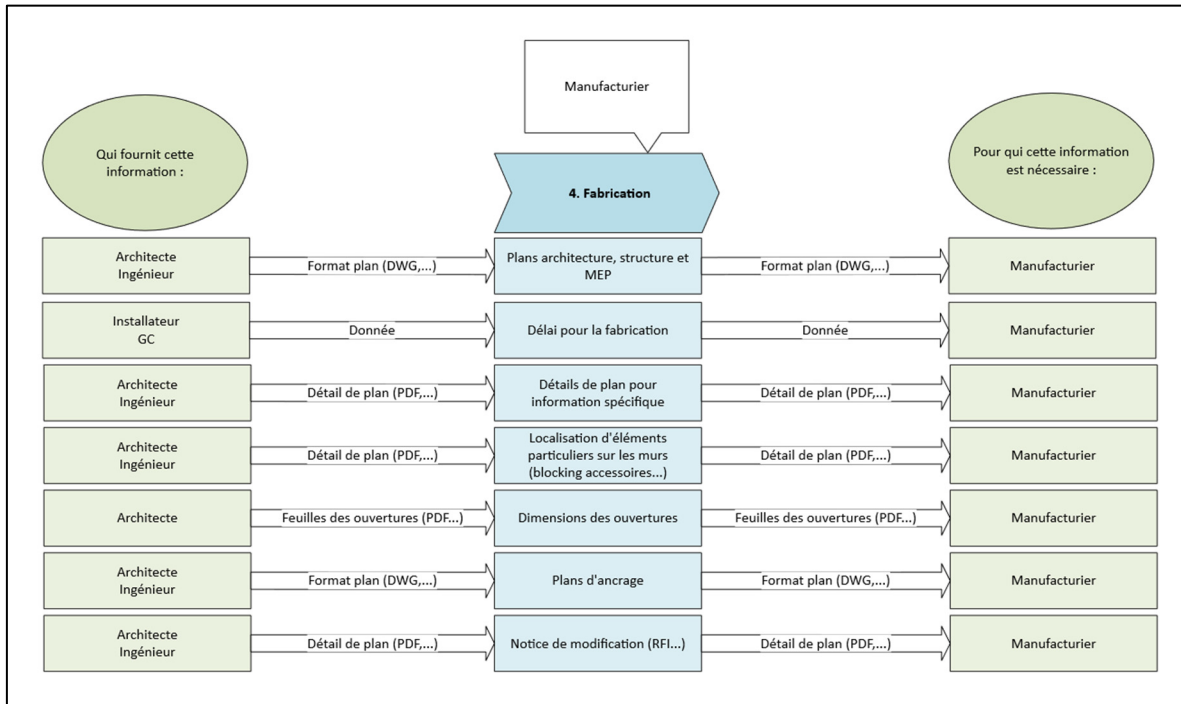


Figure 3.11 Détail du partage d'information pour l'étape 4. Fabrication

La phase de fabrication concerne uniquement le manufacturier car c'est lui qui réceptionne toutes les données liées au projet et fabrique en usine ce qui a été conçu au préalable par les ingénieurs et l'architecte.

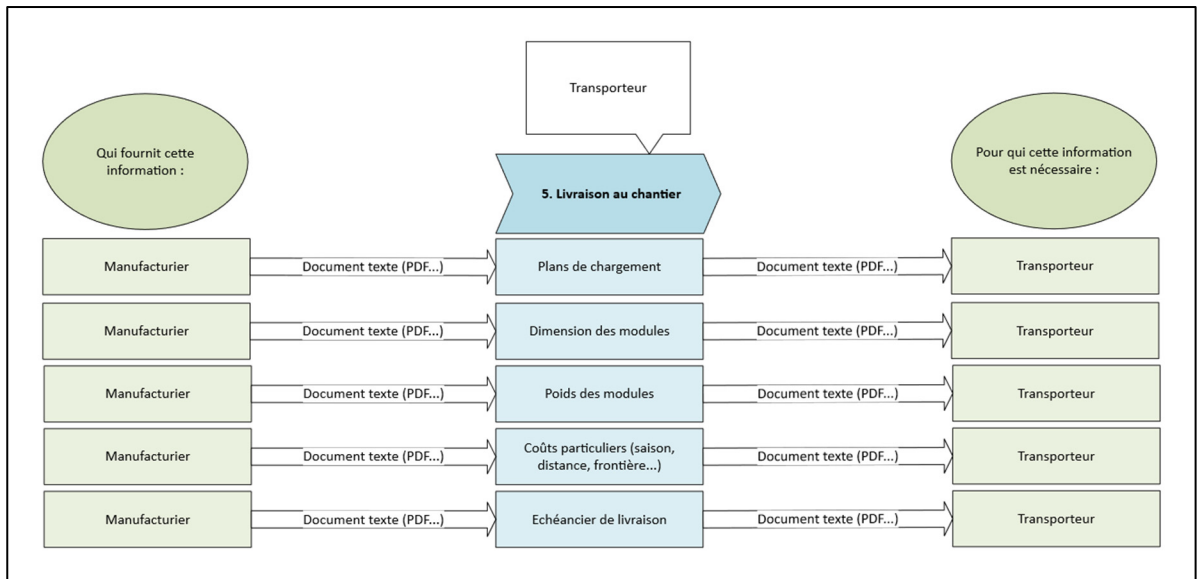


Figure 3.12 Détail du partage d'information pour l'étape 5. Livraison au chantier

Pour la phase de livraison, le transporteur récupère les produits manufacturés et les livre sur le site du chantier selon l'échéancier de livraison.

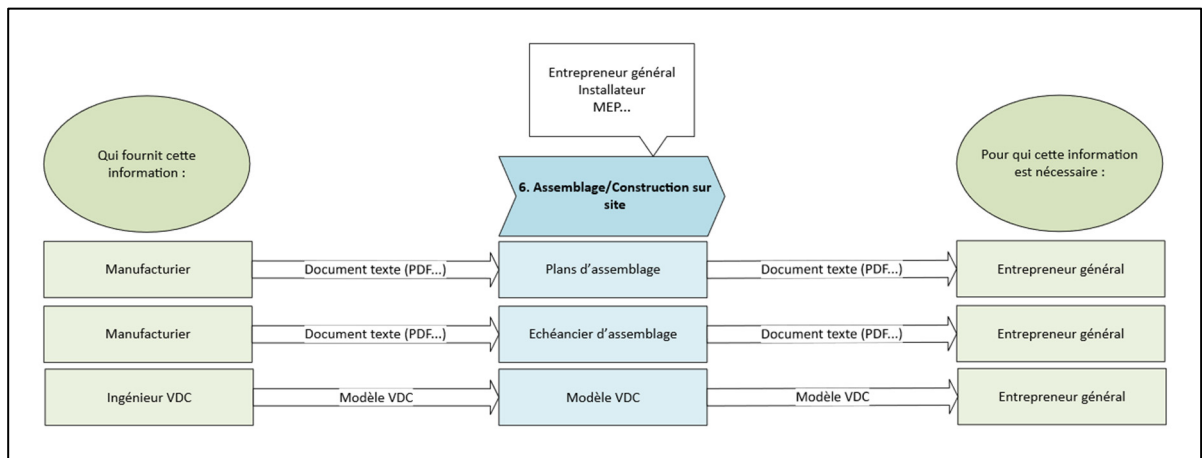


Figure 3.13 Détail du partage d'information pour l'étape 6. Assemblage

L'étape finale d'assemblage sur site concerne principalement l'entrepreneur général ainsi que ses sous-traitants qui assemblent les éléments préfabriqués selon l'échéancier d'assemblage et le modèle VDC.

Une synthèse des formats d'échange utilisés pour le partage d'information selon chaque étape de réalisation d'un projet hors site est présentée dans la figure 3.9 :

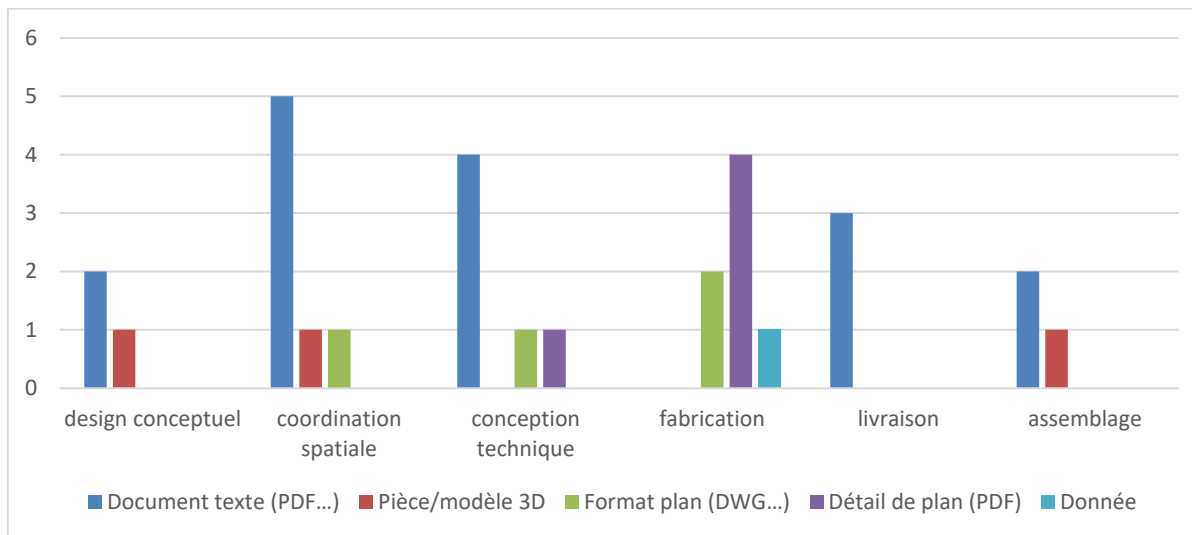


Figure 3.14 Synthèse des formats d'échange utilisés pour un projet hors site

On peut voir que le format de fichier PDF est le format majoritairement utilisé à toutes les phases d'un projet. Dans l'objectif de centraliser l'information dans une maquette commune, il est important de réduire un maximum l'utilisation du format PDF et de favoriser des formats BIM tels que le IFC (*Industrial Foundation Classes*) et le BCF (*BIM Collaborate Format*).

Ainsi après plusieurs itérations et modifications de la solution initiale proposée, nous sommes parvenus à une première version d'un cadre conceptuel de plateforme numérique DfMA pour la construction hors site, présenté dans la figure 3.15. Cette représentation offre une vue d'ensemble du cadre conceptuel de la plateforme, en mettant en évidence les principales fonctionnalités et les interactions entre les différents participants.

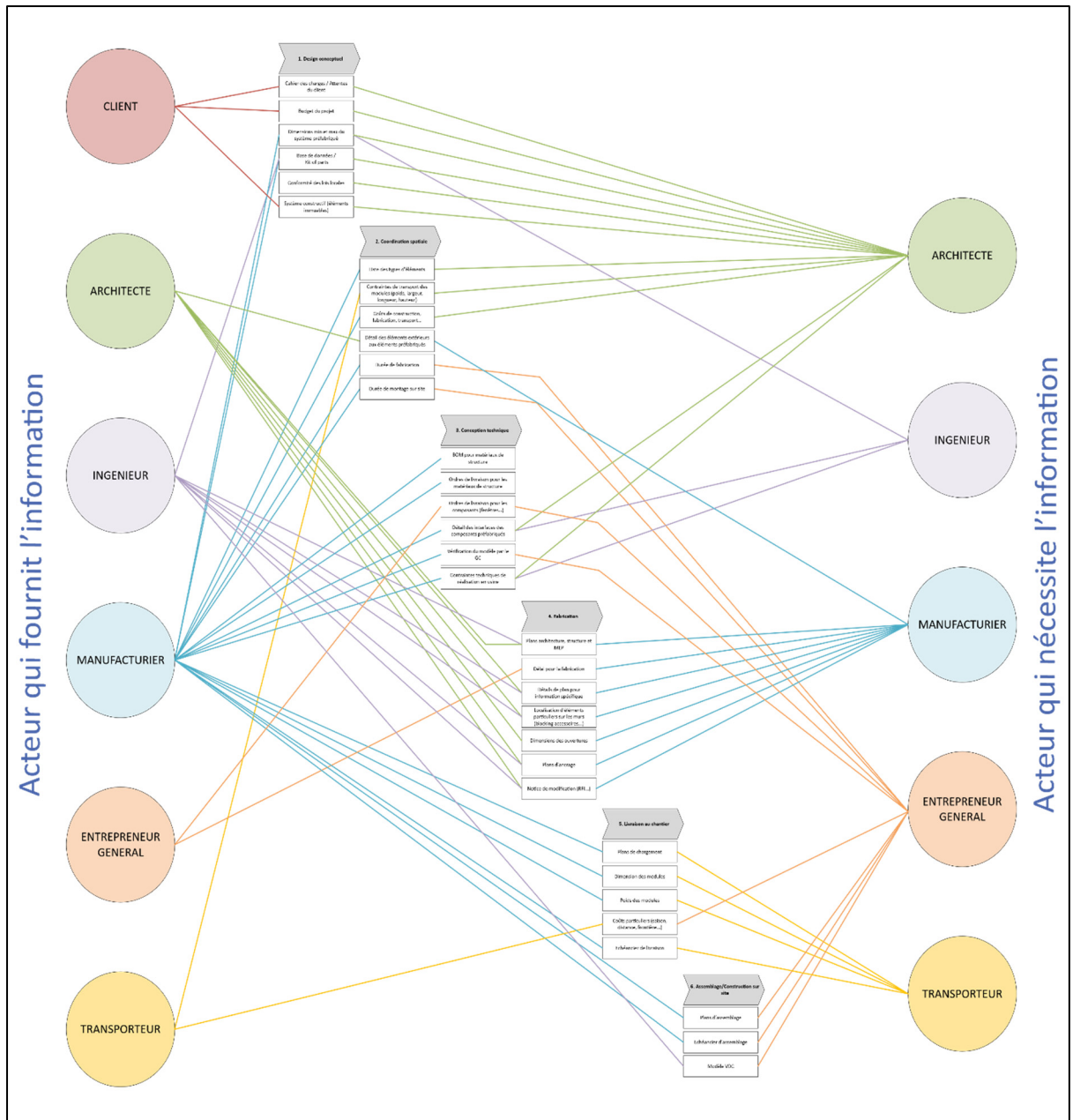


Figure 3.15 Représentation globale du cadre conceptuel proposé

Cette représentation permet de visualiser les interactions entre toutes les parties prenantes et pour toutes les phases d'un projet hors site. Ce schéma de flux d'information simple a été réalisé à l'aide du logiciel Microsoft Visio qui permet de produire des diagrammes en format vectoriel. Le schéma à taille réelle est disponible à la toute fin de ce document.

Ce cadre conceptuel a pour objectif d'être intégré dans une plateforme numérique de collaboration pour des projets hors site. Son utilisation est telle que les acteurs qui doivent fournir les informations sont notifiés afin de pousser cette information vers les acteurs qui vont en avoir besoin. Par exemple, pour la phase 1. Design conceptuel, pour la donnée « dimensions min et max du système préfabriqué », le manufacturier reçoit une notification qui lui indique de fournir cette information à l'architecte et à l'ingénieur sans que ceux-ci n'aient à le demander.

L'étape suivante consiste à faire valider le cadre conceptuel proposé à des experts de l'industrie et dans un cas d'utilisation.

### **3.3 Évaluation et validation de la solution**

La validation de la solution est une étape importante pour s'assurer que le cadre conceptuel proposé réponde aux besoins identifiés. Cette phase permet également d'évaluer la performance globale de la solution dans le contexte de l'adoption de la DfMA dans les projets de construction hors site en bois. Dans cette section, nous réaliseront une évaluation de la solution par des experts à l'aide d'entrevues et de questionnaires, et une étude de cas d'utilisation dans un projet test.

#### **3.3.1 Évaluation par des experts**

Des experts de l'industrie de la construction et du DfMA ont été sollicités à l'aide de questionnaires et d'entrevue semi-dirigées pour évaluer la conformité du cadre conceptuel de la plateforme DfMA proposée aux meilleures pratiques et aux normes de l'industrie. Un total de quatre experts a accepté de répondre à l'enquête menée. Cette partie synthétise et analyse les résultats des entrevues et des questionnaires.



### 3.3.1.1 Profil des répondants

Toutes les entreprises choisies pour répondre à cette enquête travaillaient avec des systèmes préfabriqués en bois. Les répondants comprenaient deux architectes et deux manufacturiers canadiens qui réalisent des projets au Québec, en Ontario et aux États-Unis. L'expérience des répondants dans le domaine de la construction hors site variait entre 5 et 25 ans. Le nombre de projets réalisés en préfabriqué avec le bois comme matériau principal était compris entre 5 et plus de 200 projets. Les types de projets réalisés étaient majoritairement des constructions résidentielles (unifamiliales ou multifamiliales) et des constructions commerciales. La répartition des types de projets réalisés est présentée en figure 3-10.

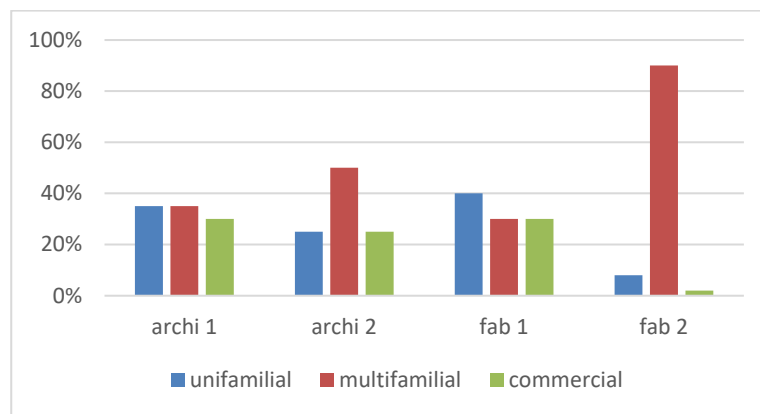


Figure 3.16 Répartition des types de projets réalisés par les répondants

### 3.3.1.2 Logiciels et plateformes utilisés par les répondants

Cette partie s'intéresse aux logiciels et aux plateformes collaboratives utilisés par les répondants durant la réalisation de leurs projets préfabriqués en ossature légère en bois. Le tableau 3.3 recense les différents logiciels de conception utilisés par les répondants. On peut déjà noter que quatre entreprises dans le secteur de la construction utilisent en tout sept logiciels différents, ce qui peut expliquer la difficulté de communication et de collaboration au sein d'un même projet. On peut aussi noter que le logiciel Revit est majoritairement utilisé mais pas de manière unanime dans toutes les entreprises.

Tableau 3.3 Logiciels de conception utilisés par les répondants

	<b>AutoCad</b>	<b>SketchUp</b>	<b>Revit</b>	<b>Rhinoceros</b>	<b>Cadwork</b>	<b>Solidworks</b>	<b>Alpine</b>
Archi 1	X	X	X				
Archi 2	X	X	X	X			
Fab 1			X	X	X	X	
Fab 2	X (Hsbcad)						X

Ensuite, nous nous sommes intéressés aux moyens numériques par lesquels se font les échanges d'informations avec les autres intervenants et en interne au cours d'un projet. Le tableau 3.4 recense les différentes plateformes collaboratives utilisées par les répondants. Seulement une entreprise consultée utilise une plateforme numérique adaptée à la construction (BIM Collaborate Pro). D'autres plateformes non spécifiques à la construction telles que Teams et Dropbox sont largement utilisées. L'utilisation traditionnelle du courriel est aussi largement répandue chez tous les répondants.

Tableau 3.4 Plateformes de collaboration utilisées par les répondants

	<b>BIM Collaborate Pro</b>	<b>Microsoft Teams</b>	<b>Dropbox</b>
Archi 1	X		X
Archi 2			X
Fab 1		X	
Fab 2		X	

L'analyse de ces résultats met en lumière l'utilisation diversifiée des logiciels de conception et des plateformes collaboratives. De plus, la prédominance de plateformes non spécifiques à la construction ainsi que l'usage courant du courrier électronique indiquent une opportunité d'amélioration dans l'adoption de solutions numériques plus adaptées à ce domaine.

### 3.3.1.3 Données échangées dans un projet hors site

Dans la suite des entrevues nous nous sommes intéressés aux données échangées au cours d'un projet hors site. Nous avons demandé aux répondants quelles étaient les informations nécessaires au bon déroulement de la phase de conception pour les architectes et de la phase de fabrication pour les manufacturiers. Ces données sont rassemblées dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 Données nécessaires lors des phases de conception et de fabrication

<b>Données pour la phase de conception</b>	<b>Données pour la phase de fabrication</b>
Détails de fabrication du manufacturier	Dimensions du projet
Détails des connexions utilisées par le manufacturier	Dimensions exactes de la structure (fini extérieur et intérieur)
Détails des systèmes d'ancrage utilisés	Dimensions brutes des ouvertures/MEP
Connexions et espace entre les modules	Détails des éléments utilisés (fenêtres, portes...)
Dimensions limites du manufacturier	Informations structurelles (charges appliquées)
Contraintes de transport	
Calcul de rentabilité des modules pour améliorer l'estimation	

Les dimensions précises sont une donnée qui est souvent mentionnée par les architectes et les manufacturiers. Pour les architectes, la principale difficulté est de réaliser des plans assez précis sans connaître le manufacturier à l'avance, le niveau d'avancement maximum des plans peut aller jusqu'à 30% avant que le fabricant soit choisi. Pour les manufacturiers, la plus grande perte de temps vient du manque de qualité et de précision des plans reçus. A cela s'ajoute le temps passé à communiquer avec les architectes et ingénieurs afin préciser ces informations manquantes.

Les données pour les phases de conception et de fabrication recueillies lors des entrevues correspondent aux données renseignées dans le cadre conceptuel proposé, ce qui permet de valider une partie de la solution.

#### **3.3.1.4 Synthèse des entrevues**

En se basant sur un échantillon d'utilisateurs de systèmes préfabriqués en bois dans la réalisation de projets immobiliers principalement, nous avons mis en évidence des défis de partage d'informations et de collaboration en tant que facteurs essentiels à la réussite des projets. Ainsi nous avons pu valider une partie du cadre conceptuel proposé dans la partie 3.2, plus particulièrement les données des phases 1. Design conceptuel et 4. Fabrication. En effet, les informations fournies par les répondants sont identiques aux données décrites dans le cadre conceptuel. De plus, nous avons identifié le potentiel des technologies BIM associées aux concepts DfMA pour relever ces défis. Par conséquent, la conclusion de la revue de la littérature, qui suggérait que la collaboration de toutes les parties prenantes du projet autour du même outil, qui supporte toutes les étapes du projet, améliorerait la communication et le partage d'information, est confirmée. Cependant, la variété des plateformes disponibles et la diversité des applications possibles exigent une certaine organisation.

La partie suivante présente l'étude de cas réalisée dans le but d'évaluer dans la pratique le cadre conceptuel proposé. Cette étude de cas a été menée dans l'entreprise de AmeriCan Structures dans le cadre d'un projet test de construction hors site en bois.

#### **3.3.2 Cas d'utilisation : Maquette numérique**

L'entreprise AmeriCan Structures a répondu à un projet intitulé « Maquette Numérique » proposé par le Bureau de promotion des produits du bois du Québec (QWEB). Les participants au projet ont été AmeriCan Structures en tant que manufacturier et VEITAS Engineers en tant que bureau d'ingénieurs. Aucun architecte n'a pu travailler sur le projet. L'objectif initial du projet était de produire une maquette numérique d'un prototype de projet préfabriqué en bois avec une bonne répétabilité conçu en collaboration entre tous les participants.

Le premier sous objectif du projet a été de créer une bibliothèque organisée en catégorie d'éléments IFC. La première étape a été de recenser puis de modéliser les différents types d'ouvertures de murs proposés par le manufacturier. Ces ouvertures ont été classées en fonction du nombre de linteau (*header*), allant de un à cinq. Concernant les logiciels de modélisation utilisés, le manufacturier travaille avec HSBcad qui est une extension du logiciel AutoCad. Pour la modélisation des détails en 3d, le choix s'est porté sur le logiciel Cadwork. La figure suivante représente le processus de réalisation des détails d'ouverture.

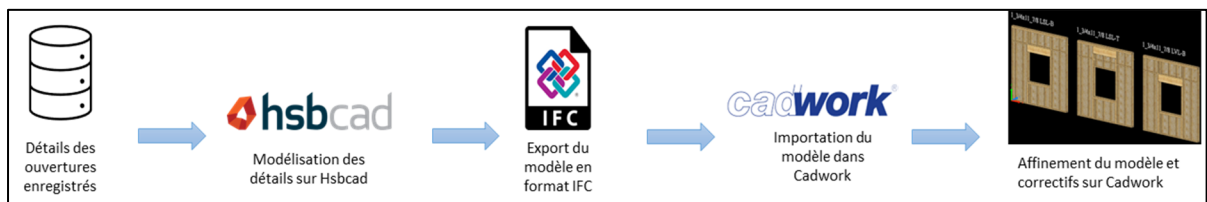


Figure 3.17 Processus de réalisation des modèles 3d

Les dimensions du mur dans lequel les ouvertures ont été réalisées ont été définies au début du projet. Il s'agit d'un mur de 10 pieds de long, de 10 pieds de haut et de section 2x6 pouces, incluant un revêtement d'un côté. L'espacement des montants (*studs*) est de 16 pouces. L'ouverture est placée au centre du mur et mesure 4 pieds de long et de haut. Un exemple d'une ouverture avec 3 linteaux est présenté en figure 3.12.



Figure 3.18 Exemple d'ouverture avec 3 linteaux

La nomenclature utilisée pour identifier les ouvertures est celle utilisée par le manufacturier. Par exemple : 2x10+S-B signifie que la section des linteaux est de 2x10 pouces, qu'il y a une planche de *sheathing* (S) entre chaque linteau et que les linteaux sont situés en bas de la partie haute (B).

Une fois les modèles réalisés sous Cadwork, il a été possible de les exporter en fichiers HTML et ainsi de les visualiser sur un lecteur web sans utiliser de logiciel spécifique. L'utilisation concluante de l'export de modèles 3d en format de fichier ouvert permet valider le processus de réalisation des modèles 3d et ainsi une partie du cadre conceptuel proposé.

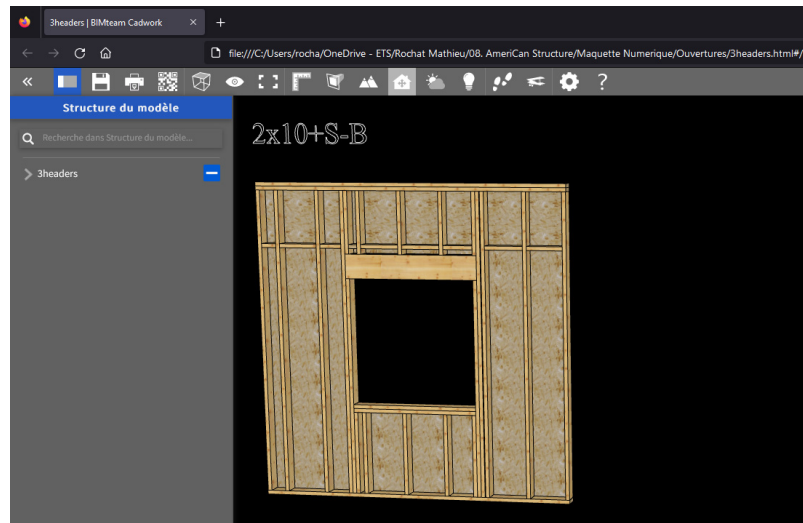


Figure 3.19 Visualisation du modèle sur un navigateur web

Un total de 154 ouvertures a été modélisé, réparti en fonction du nombre de linteaux selon le tableau suivant.

Tableau 3.6 Quantité de détails d'ouverture modélisés

<b>Nombre de linteaux</b>	1	2	3	4	5
<b>Quantité de détails</b>	33	53	58	7	3

Une fois le détail des ouvertures modélisés nous nous sommes intéressés aux types de murs pour le projet. Il a été convenu de prendre comme exemple un projet existant d'AmeriCan Structures et de modéliser les différents types de murs associés à ce projet. Les différents détails de murs ont été modélisés selon le même processus de réalisation que les ouvertures. La figure 3-14 représente les 11 types de murs qui ont été modélisés.

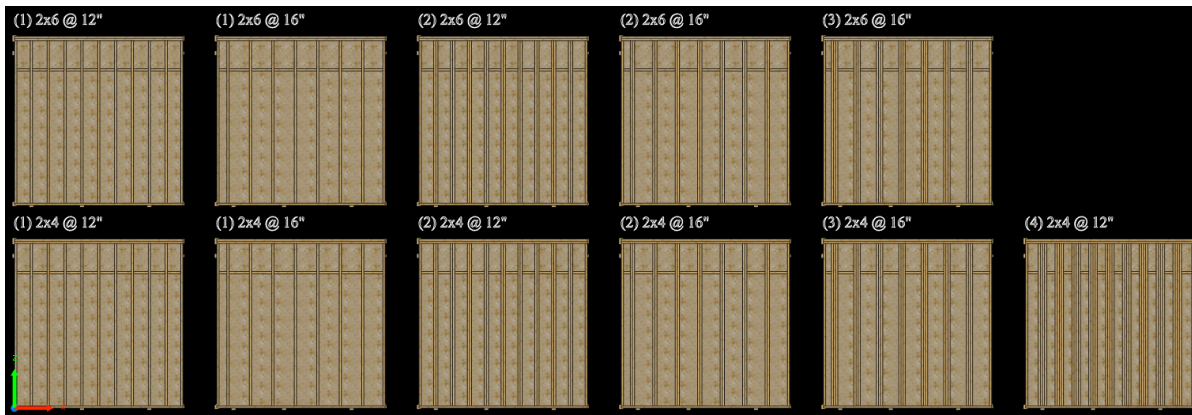


Figure 3.20 Types de murs modélisés pour le projet

Le détail de ces murs réside dans le nombre de montants à chaque espacement, leur espacement et leur section. Le tableau 3.7 synthétise ces détails.

Tableau 3.7 Récapitulatif des détails de murs modélisés

		Espacement des montants	
		12"	16"
1	Section des montants		
		2x4	X
	2x6	X	X
2	Section des montants		
	2x4	X	X
	2x6	X	X
3	Section des montants		
	2x4		X
	2x6		X
4	Section des montants		
	2x4	X	

Après avoir modélisé les ouvertures et les murs sur Cadwork, l'objectif était de réaliser une bibliothèque de détails accessible sur un site web avec les fichiers en format HTML. Pour réaliser cette étape, un consultant externe a été mandaté par American Structures.



L'utilisation du cadre conceptuel proposé en solution dans le cadre de cette recherche a pu être partiellement testé dans le cadre du projet test « Maquette numérique ». En effet, pour ce projet nous avons pu uniquement valider des données concernant la phase 1. Design conceptuel.

Tableau 3.8 Données du cadre conceptuel validée avec l'étude de cas

<b>Donnée</b>	<b>Validation dans le projet test</b>
Cahier des charges	Donnée principale du projet
Budget du projet	Non appliquée dans ce projet
Dimensions min et max du système préfabriqué	Donnée recueillie chez le manufacturier
Base de données/Kit of parts	Réalisée avec le logiciel Cadwork et export en format HTML
Conformité des lois locales	Non appliquée dans ce projet
Système constructif (éléments immuables)	Panneaux de murs préfabriqués

Le projet test n'a pas pu aboutir selon les objectifs définis au départ, à savoir la réalisation d'un prototype de maquette numérique pour préfabriqué en bois avec une bonne répétabilité et conçu en collaboration. La raison principale à cet échec est le manque de temps pour la réalisation du projet dans sa totalité. Ceci a impliqué une validation partielle du cadre conceptuel proposé dans cette recherche.

### 3.4 Conclusion de la phase de modélisation de la solution

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons identifié les principaux défis de la construction hors site en bois dans la littérature et dans l'industrie, notamment le manque de connaissances, le besoin de collaboration, l'absence de normes spécifiques, et les coûts de conception supérieurs. L'objectif de répondre à ces défis a motivé la conception du cadre conceptuel proposé en solution à cette recherche.

Nous avons ensuite détaillé la phase de modélisation conceptuelle, où nous avons créé une représentation visuelle du cadre conceptuel de la plateforme numérique, en mettant en évidence les principales fonctionnalités et les interactions entre les différents acteurs du processus. Ce cadre conceptuel a été réalisé en suivant les principes du DfMA et en intégrant les concepts du BIM. Cette phase a permis de définir les données nécessaires à chaque étape du processus de construction hors site en bois.

Enfin, nous avons évalué notre solution en faisant appel à des experts de l'industrie via des entrevues et en réalisant une étude de cas d'utilisation dans le cadre d'un projet test. Les résultats de cette évaluation ont confirmé partiellement la pertinence de notre cadre conceptuel. Bien que le projet test n'ait pas abouti aux objectifs initiaux en raison de contraintes de temps, il a néanmoins permis de valider partiellement notre solution.

La méthodologie itérative, les données recueillies auprès des experts de l'industrie et l'étude de cas d'utilisation ont renforcé la validité de notre cadre conceptuel. La prochaine étape consistera à poursuivre le développement de cette plateforme et à la valider de manière plus approfondie dans des projets réels de construction hors site en bois.

## CHAPITRE 4

### DISCUSSION

Cette recherche visait à établir un cadre conceptuel de plateforme numérique DfMA pour la construction hors site en bois. Nous sommes parvenus à proposer une solution sous la forme de cadre conceptuel détaillant les données requises pendant les phases d'un projet de construction hors site. Ce cadre conceptuel précise également les acteurs fournissant et utilisant ces données et le moyen de transfert de celles-ci. L'établissement de ce cadre conceptuel a permis de contribuer à la recherche théorique en approfondissant les travaux qui ont pu être réalisés précédemment sur ce sujet. De plus, il apporte une contribution pratique puisqu'il peut directement être intégré dans une plateforme existante ou participer à la création d'une plateforme qui permet son application.

Durant les entrevues semi-dirigées avec des questionnaires (voir Annexe-I), des discussions avec les experts de l'industrie ont soulevé de nombreux défis qui restent à relever et qui freinent l'utilisation de la préfabrication modulaire dans les projets de construction. Le cadre conceptuel proposé dans cette recherche offre une solution pour aborder une partie de ces défis. Les principaux défis sont recensés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Défis relevés pendant les entrevues avec les experts

<b>Défis relevés freinant l'utilisation de la CHS</b>
Absence de codes et de normes de conception pour les éléments préfabriqués
Absence de réglementations et d'incitations gouvernementales
Absence d'un système contractuel adéquat à la préfabrication, les contrats actuels de conception-soumission-construction ne sont pas adaptés à la CHS
Absence de standardisation dans la fabrication des produits en ossature légère de bois
Responsabilités pas claires entre l'entrepreneur général, l'architecte, l'ingénieur et le manufacturier
Nécessité d'un lien contractuel entre le client, l'architecte et le manufacturier

Selon les répondants à nos entrevues, il est primordial de réaliser un changement dans les relations contractuelles afin de prendre en compte les besoins et les spécificités de la CHS. Une solution proposée serait de mettre en place des contrats de coopération tels que les contrats de type *Integrated Project Delivery* (IPD), conception-construction ou encore conception intégrée.

La seconde suggestion proposée par les répondants pour améliorer la phase de conception et de planification est de clarifier le partage d'information entre les acteurs du projet et ainsi faciliter la collaboration et la communication. Durant ces phases, les informations sur le budget, l'échéancier, la technologie de fabrication, la capacité de production du fabricant et les attentes du client sont essentielles.

D'autres suggestions d'améliorations ont été proposées telles que la réalisation d'un catalogue commun aux manufacturiers afin de standardiser les types de murs, planchers, ouvertures, etc, ou encore la réalisation de calculs de rentabilité des modules préfabriqués afin d'améliorer l'estimation budgétaire d'un projet modulaire.

Par ailleurs, il a été soulevé pendant les entrevues que l'éducation et la formation sont encore axées sur les pratiques actuelles de construction traditionnelles telles que la construction en béton et manquent de formation à la préfabrication et à l'utilisation de matériaux biosourcés comme le bois, qui est une ressource largement disponible au Canada et avantageuse en termes d'impact environnemental.

Ainsi pour favoriser la réalisation de projets immobiliers utilisant un système préfabriqué en bois, nous recommandons l'adoption d'un mode de contrat collaboratif et l'utilisation d'environnements numériques collaboratifs au plus tôt dans le projet. De plus, il est nécessaire d'élaborer un cadre réglementaire adapté au mode de construction préfabriqué.

## CONCLUSION

L'utilisation de composants préfabriqués est une pratique courante dans les projets de construction. Cependant, l'adoption plus étendue de la préfabrication modulaire volumétrique offre des avantages considérables. En combinant cette approche à la technologie, elle peut potentiellement transformer l'industrie de la construction. Malgré ce potentiel, la construction modulaire volumétrique en ossature de bois légère pour les immeubles est encore peu fréquente. Cette étude a proposé un cadre conceptuel pour l'intégration des concepts DfMA dans une plateforme numérique pour la construction modulaire en bois.

Pour commencer, nous avons réalisé une revue de la littérature pour clarifier la notion de construction modulaire volumétrique en ossature de bois légère, car de nombreux concepts et termes sont liés à cette approche dans la littérature. Ensuite, nous avons étudié les méthodes de construction hors site, en mettant en évidence les lacunes et les obstacles qui entravent son adoption dans l'industrie de la construction. L'étude explore les principes de la construction hors site modulaire en bois, les concepts DfMA dans le cadre d'une approche BIM de projet, et les plateformes numériques utilisées par les entreprises de construction. Plusieurs recommandations ont émergé de cette analyse. Tout d'abord, la nécessité de développer des outils d'aide à la décision et d'évaluation de la constructibilité pour les bâtiments préfabriqués. De plus, d'automatiser la conception à l'aide de programmes intégrés appliqués aux logiciels BIM existants. La création d'une bibliothèque en ligne pour les composants en bois est également recommandée pour améliorer l'efficacité de la phase de conception.

Par la suite nous avons utilisé la méthodologie de recherche *Design-Science* afin de répondre à la problématique de recherche. Cette méthodologie nous a permis de développer une solution sous la forme de cadre conceptuel de plateforme numérique intégrant les concepts DfMA pour la construction hors site. Après avoir relevé les principaux défis de la construction hors site en bois en se basant sur la littérature et l'étude d'un manufacturier, nous avons pu établir les fondements du cadre conceptuel proposé. La phase de modélisation itérative a permis d'aboutir à une représentation visuelle de cette solution en mettant en lumière les principales

fonctionnalités et les interactions entre les différents acteurs du projet. Cette phase a également défini les données nécessaires à chaque étape du processus de construction hors site en bois.

Enfin, nous avons évalué notre solution en sollicitant l'avis d'experts de l'industrie par le biais d'entretiens et en menant une étude de cas d'utilisation dans le cadre d'un projet test. Les résultats de cette évaluation ont partiellement confirmé la pertinence de notre cadre conceptuel. Bien que le projet pilote n'ait pas atteint ses objectifs initiaux en raison de contraintes de temps, il a néanmoins contribué à valider partiellement notre solution.

Cependant cette recherche s'est confrontée à plusieurs limites. Tout d'abord il est important de préciser que la validation de la solution n'a pu être que partielle. En effet pour valider la solution dans son ensemble, il est nécessaire de valider toutes les informations qui sont fournies dans ce cadre conceptuel. La deuxième limitation de cette recherche réside dans l'étape de validation par les experts. En effet l'échantillon de répondants est faible et il aurait été intéressant d'interroger des experts ne provenant pas du secteur du bois mais qui appliquent les principes DfMA dans l'industrie du béton ou de l'acier par exemple, afin de réaliser une comparaison voire un parallèle. Une dernière limitation peut être le manque de robustesse dans l'application de la méthodologie de recherche, ce qui peut principalement d'expliquer par un manque de temps.

La méthodologie itérative, les données recueillies auprès des experts de l'industrie et l'étude de cas d'utilisation ont renforcé la validité de notre cadre conceptuel. Une prochaine étape consisterait à poursuivre le développement de cette plateforme et à la valider de manière plus approfondie au sein de projets réels de construction hors site en bois.

## RECOMMANDATIONS

Certaines mesures favoriseraient la recherche future sur ce sujet. Dans un premier temps il semble important de réaliser une validation plus complète de la solution proposée dans cette recherche. Puis, afin d'aboutir cette recherche, de chercher à implémenter ce cadre conceptuel dans une plateforme existante ou de créer une plateforme qui permet son application ; pour ensuite la tester dans un environnement réel avec un projet hors site concret. Il serait intéressant également de prendre en compte la modélisation de l'impact environnemental d'un projet modulaire.

De manière plus générale, documenter et partager les réalisations dans le domaine de la construction préfabriquée, ainsi que diffuser les meilleures pratiques, recommandations et conclusions de projets, serait extrêmement bénéfique pour l'industrie du bois. Cette documentation contribuerait à combler le déficit de connaissances sur la CHS et son application. De plus, elle fournirait aux instituts de recherche des données essentielles pour leurs futures études. Par ailleurs, la mise en place d'un programme de formation destiné aux futurs professionnels, notamment les architectes et les ingénieurs, centré sur les processus de fabrication et les spécificités de la construction préfabriquée, serait judicieuse. Enfin, il serait intéressant d'approfondir la recherche sur plusieurs aspects, notamment le lien entre l'utilisation du BIM et des concepts DfMA et le succès final des projets modulaires en ossature légère de bois, ainsi que la création d'un outil de sélection de systèmes préfabriqués adaptés à chaque projet.





## ANNEXE I

### QUESTIONNAIRE D'ENTREVUE

#### **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 » et combien de projets ?
- d) Combien de projets préfabriqués avez-vous réalisés avec le bois comme matériau principal ? Et de quels types ? (résidentiel, hôtels, industriel, institutionnel, commercial...)
- e) Sur ces projets quel système préfabriqué a été utilisé ? (panneaux préfabriqués, noyaux de service, volumétrique, ...)

#### **Partie 2 : Logiciels et plateformes de conception utilisés**

- a) Quels logiciels de conception utilisez-vous en entreprise ? Plus spécifiquement pour les projets préfabriqués ? Y'a-t-il des spécificités pour la conception en bois ?
- b) Comment se font les échanges d'information et de données concernant un projet en interne et avec les intervenants externes ? Utilisez-vous une plateforme de collaboration ? Si oui, laquelle ?
- c) De quelles fonctionnalités avez-vous besoin concernant les logiciels/plateformes que vous utilisez ?
- d) Quelles sont les tâches qui prennent le plus de temps ? Comment pensez-vous qu'elles peuvent être améliorées ?
- e) Les outils actuels vous satisfont-ils pour relever les défis de la préfabrication ? Si non, quels sont points à améliorer ?

**Partie 3 : Défis liés à la fabrication**

- a) Dans un projet de préfabrication, quel est l'impact du moment de votre implication sur l'efficacité de votre travail et sur la qualité et le succès du projet ?
- b) Comment se fait l'échange d'information avec les autres intervenants au projet ?
- c) Quelles sont les données venant du manufacturier nécessaires à la bonne conception du projet ?

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abueisheh, Q., Manu, P., Mahamadu, A.-M., & Cheung, C. (2020). Design for safety implementation among design professionals in construction: The context of Palestine. *Safety Science*, *128*, 104742. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104742>
- Bakhshi, S., Chenaghloou, M. R., Pour Rahimian, F., Edwards, D. J., & Dawood, N. (2022). Integrated BIM and DfMA parametric and algorithmic design based collaboration for supporting client engagement within offsite construction. *Automation in Construction*, *133*, 104015. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104015>
- Beddiar, K., Cléaux, A., & Chazal, P. (2021). *Construction hors-site: DfMA, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment*. France : Dunod. (ISBN: 9782100822829).
- Building and Construction Authority, & Bryden Wood. (2016). *BIM for DfMA (Design for Manufacturing and Assembly) Essential Guide*. Singapore.
- Cao, J., Bucher, D. F., Hall, D. M., & Lessing, J. (2021). Cross-phase product configurator for modular buildings using kit-of-parts. *Automation in Construction*, *123*, 103437. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103437>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2012). BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. *Construction Economics and Building*, *12*(3), 101-102. <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v12i3.2749>
- Gao, S., Jin, R., & Lu, W. (2020). Design for manufacture and assembly in construction: a review. *Building Research & Information*, *48*(5), 538-550. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1660608>
- 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>
- GBQ. (2018). *Rapport annuel Groupe BIM du Québec*.
- 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>
- Gosling, J., Jia, F., Gong, Y., & Brown, S. (2016). The role of supply chain leadership in the learning of sustainable practice: toward an integrated framework. *Journal of Cleaner Production*, *137*, 1458-1469. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.029>
- Hall, D. M., Whyte, J. K., & Lessing, J. (2020). Mirror-breaking strategies to enable digital manufacturing in Silicon Valley construction firms: a comparative case study. *Construction Management and Economics*, *38*(4), 322-339. <https://doi.org/10.1080/01446193.2019.1656814>
- 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>
- Hevner, A. R. (2007). A Three Cycle View of Design Science Research, *19*.

- Hong, J., Shen, G. Q., Li, Z., Zhang, B., & Zhang, W. (2018). Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost-benefit analysis. *Journal of Cleaner Production*, 172, 649-660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.171>
- Jiang, R., Mao, C., Hou, L., Wu, C., & Tan, J. (2018). A SWOT analysis for promoting off-site construction under the backdrop of China's new urbanisation. *Journal of Cleaner Production*, 173, 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.147>
- 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>
- Kasanen, E., Lukka, K., & Siitonen, A. (1993). The Constructive Approach in Management Accounting Research. *Journal of Management Accounting Research*, 5, 243-264.
- Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating architecture: how manufacturing methodologies are poised to transform building construction*. New York : McGraw-Hill.
- Koeleman, J., Ribeiro, M. J., Rockhill, D., Sjödin, E., & Strube, G. (2019). Decoding digital transformation in construction. *McKinsey & Company: Chicago, IL, USA*. Repéré à <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/decoding-digital-transformation-in-construction>
- Lang, O., Wilson, C., Blackman, C., Gillespie, R., Krieg, O. D., & Uddin, S. (2019). Development of a Design-Driven Parametric Mass Timber Construction System for Modular High-Rise Urban Housing. *Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings*, 333-340. <https://doi.org/10.29173/mocs111>
- Le Roux, S., Bannier, F., Bossanne, E., & Stieglmeier, M. (2016). Investigating the interaction of building information modelling and lean construction in the timber industry. Communication présentée au World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria.
- Lessing, J., & Brege, S. (2018). Industrialized Building Companies' Business Models: Multiple Case Study of Swedish and North American Companies. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(2), 05017019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001368](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001368)
- Messa Sokoudjo, V. R. M. (2021). *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* (Mémoire de maîtrise). ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, Montréal, Canada.
- Modular Building Institute (MBI). (2019). *The U.S. Construction Industry: A National Crisis Looming*. Repéré à <https://growthzonesitesprod.azureedge.net/wp-content/uploads/sites/2452/2021/06/national-crisis-looming-whitepaper.pdf>
- Molloy, O., Warman, E., & Tilley, S. (2012). *Design for Manufacturing and Assembly: Concepts, architectures and implementation*. (S.l.) : (s.n.).
- Nawari, N. (2012). BIM Standardization and Wood Structures. Dans *Computing in Civil Engineering (2012)* (pp. 293-300). Clearwater Beach, Florida, United States : American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784412343.0037>
- Patlakas, P., Livingstone, A., & Hairstans, R. (2015). A BIM Platform for Offsite Timber Construction, 8.

- Poirier, E., Iordanova, I., Forgues, D., Delarue, C., Mejri, M., Boudaoura, A., ... Nonirit, E. (2021). *Étude sur l'état des lieux en matière d'usage des technologies en construction*.
- Poirier, E., Staub-French, S., & Forgues, D. (2015). Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action-research. *Automation in Construction*, 58, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.002>
- Quale, J., Eckelman, M. J., Williams, K. W., Sloditskie, G., & Zimmerman, J. B. (2012). Construction Matters: Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States. *Journal of Industrial Ecology*, 16(2), 243-253. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00424.x>
- Rankohi, S., Bourgault, M., Iordanova, I., & Carbone, C. (2023). Developing a Construction-Oriented DfMA Deployment Framework. *Buildings*, 13(4), 1050. <https://doi.org/10.3390/buildings13041050>
- 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>
- Redmond, A., Hore, A., Alshawi, M., & West, R. (2012). Exploring how information exchanges can be enhanced through Cloud BIM. *Automation in Construction*, 24, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.003>
- Rocha, C., Formoso, C., Tzortzopoulos Fazenda, P., Koskela, L., & Tezel, A. (2012, 1 janvier). Design science research in lean construction : process and outcomes. *IGLC 2012 - 20th Conference of the International Group for Lean Construction*.
- Salama, T., Figgess, G., Elsharawy, M., & El-Sokkary, H. (2020). Financial Modeling for Modular and Offsite Construction. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 10(2), 207-213. <https://doi.org/10.35940/ijeat.B2085.1210220>
- Smith, R. E. (2011). *Prefab architecture: a guide to modular design and construction*. Hoboken, NJ : Wiley.
- Sonego, M., Echeveste, M. E. S., & Galvan Debarba, H. (2018). The role of modularity in sustainable design: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 176, 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.106>
- Song, L., Mohamed, Y., & AbouRizk, S. M. (2009). Early Contractor Involvement in Design and Its Impact on Construction Schedule Performance. *Journal of Management in Engineering*, 25(1), 12-20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(2009\)25:1\(12\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(2009)25:1(12))
- Staub-French, S., Poirier, E., Calderon, F., Chikhi, I., Zadeh, P., Chudasma, D., & Huang, S. (2018). Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction, 101.
- Think Wood. (2018). Designing sustainable, prefabricated wood buildings. Repéré à [https://www.thinkwood.com/wp-content/uploads/2020/08/Designing-Sustainable-Prefabricated-Wood-Buildings\\_Think-Wood-CEU-1.pdf](https://www.thinkwood.com/wp-content/uploads/2020/08/Designing-Sustainable-Prefabricated-Wood-Buildings_Think-Wood-CEU-1.pdf)
- Wohlin, C. (2014). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. Dans *Proceedings of the 18th International Conference on*

- Evaluation and Assessment in Software Engineering - EASE '14* (pp. 1-10). London, England, United Kingdom : ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>
- Wuni, I. Y., & Shen, G. Q. (2020). Barriers to the adoption of modular integrated construction: Systematic review and meta-analysis, integrated conceptual framework, and strategies. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119347>
- Yuan, Z., Sun, C., & Wang, Y. (2018). Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings. *Automation in Construction*, 88, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.021>