

LA FILIÈRE BOIS, ARTEFACT ET CATALYSEUR POUR UNE CONSTRUCTION 4.0 AU QUÉBEC

par

Imen CHIKHI

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

MONTREAL, LE 7 DÉCEMBRE 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Imen Chikhi, 2018



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 ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Daniel FORGUES, directeur de mémoire
Département de Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

M. Conrad BOTON, président du jury
Département de Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

M. Érik A. Poirier, membre du jury
Directeur des pratiques intégrées, RÉGIS CÔTÉ & ASSOCIÉS

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

LE 30 OCTOBRE 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Pour favoriser mon insertion dans la vie socio-professionnelle au Québec, j'ai opté pour un retour aux études. J'hésitais entre un doctorat et un DESS, ce sera finalement une maîtrise. Et à l'École de technologie supérieure (ÉTS) pour être certaine de rencontrer l'industrie de la construction et ne pas me perdre dans le monde de la théorie, celui où tout va bien...

Après avoir exercé le métier d'architecte en France pendant plus de quinze ans, en tant que salariée, chef de projets et en libéral, une énième crise est arrivée dans le monde du bâtiment à laquelle il a fallu ajouter cette fois la vague du Building Information Modeling (BIM) dont l'implantation a été vécue comme une trahison par les PME d'architecture et a suscité une levée de boucliers à laquelle j'ai participé. À l'ÉTS, « les TI dans la construction » est le premier cours que j'ai suivi. Ce cours consacre une partie au BIM et j'avais le recul et la distance nécessaires pour comprendre rationnellement de quoi il s'agit et ce que ça engendre dans le monde du bâtiment, les répercussions sur ses différents acteurs. J'ai compris le bénéfice des TI dans la construction, la révolution du BIM et, j'ai alors pris le virage numérique. Mais j'avais un sentiment mitigé quant à la réalité de la situation dépeinte : le BIM présenté comme une piste dans le monde des solutions supposées guérir l'industrie de la construction au Québec; une industrie sclérosée par une organisation en silo. Je trouvais ce constat un peu (voir trop et volontairement) exagéré.

Forte de mon expérience assez complète en gestion de projets d'architecture et d'architecte juré de concours en marchés publics, ayant travaillé sur des projets d'envergure internationale avec équipes pluridisciplinaires et dans différentes langues mais avec un langage commun, je pensais que partout sur la planète, on ne peut démarrer un projet sans réunir architecte, ingénieur et économiste de la construction. Parfois même, en France, l'architecte peut jouer les trois rôles si elle en a les compétences et les diplômes. Une équipe de conception intégrée était pour moi un préalable évident à toute épure; une synthèse technique et une synthèse des lots architecturaux un préalable au démarrage des travaux et au lancement de la fabrication des éléments et terminaux des réseaux. Une première expérience professionnelle dans une grande

entreprise de construction québécoise m'a permis de réaliser à quel point il n'est pas évident de « se parler » entre professionnels et entre professionnels et entrepreneurs. Cependant, contrairement à la France où les architectes ne peuvent exercer au sein d'une entreprise de construction sous peine de perdre leur titre, au Québec c'est possible et c'est fréquent. Cette situation devrait faciliter le dialogue au sein des équipes de livraison de projet et surtout, permettre un environnement adéquat pour définir des objectifs communs et les moyens de les atteindre. Des chantiers importants sont en branle au Québec et sont une occasion d'améliorer l'industrie de la construction. Le virage numérique en est sans doute le plus important et il faut saisir cette force motrice qu'il impulse pour proposer et entamer d'autres changements et les stratégies d'accompagnements adéquates. Ce travail sur la Construction 4.0 s'inscrit dans le développement du virage numérique dans la construction au Québec. C'est un champ qui gagnerait à être développé en partenariat avec les constructeurs et les laboratoires de recherche universitaire.

REMERCIEMENTS

J'ai trouvé au GRIDD une ruche riche où des personnes ont encouragé et participé à l'élaboration de ce travail. Je tiens à les en remercier :

D'abord mon directeur Daniel Forgues, précurseur, esprit d'avant-garde et agitateur d'idées pour l'innovation continue et sa diffusion dans l'industrie de la construction au Québec et ailleurs;

Jeff et Isabelle et tous les étudiants et professeurs, chargés de cours et post-doctorants côtoyés pendant ces deux années de recherche;

la Société d'habitation du Québec, notre partenaire pour *l'Étude comparative de trois réalisations canadiennes en structure de bois massif préfabriquées*, ainsi que les entreprises et professionnels impliqués dans ces projets qui ont consacré du temps à nos entrevues pour documenter notre recherche;

Je voudrais remercier le Dr Erik A. Poirier pour la confiance qu'il m'a témoignée en m'offrant l'occasion de participer à une recherche avec le laboratoire TOPICS LAB pour BCFII. Il est aussi un modèle d'intégrité intellectuelle. Cette expérience partagée avec lui m'a permis d'enrichir mon sujet de recherche et de rencontrer l'équipe TOPICS, accueillante et volontaire dans la diffusion et le partage des connaissances;

Madame Christine Richard m'a apporté une aide et un soutien inestimables tout au long de ce travail; elle m'a aidée à comprendre les nuances de la structure de la langue québécoise dans un environnement d'expression scientifique, à optimiser la présentation de la structure de ma réflexion. Nul doute que son immense connaissance des deux langues constitue une ressource inestimable pour tous les étudiants de l'ÉTS qui la sollicitent.

Durant cette aventure, j'ai eu la chance de rencontrer trois femmes inspirantes : la Dre Souha Tahrani et la Dre Ivanka Iordanova chargées de cours à l'ÉTS et figures importantes de la R&D dans l'industrie de la construction au Québec. Elles ont aiguillé mes premiers pas dans le BIM

VIII

et dans la recherche. Et la Professeure Sheryl Staub-French du département de génie civil à UBC qui a amplifié mon goût de la recherche et auprès de qui j'ai contribué à un rapport de recherche pour BCFII, ce qui ce fut très enrichissant et formateur. Je tiens à les remercier toutes les trois et à leur témoigner ma reconnaissance pour tous leurs précieux conseils, leur écoute et leur humilité proportionnelle à leur immense savoir et pour leur enthousiasme toujours présent face aux idées que j'ai pu leur présenter ou aux questionnements dont je leur ai fait part.

Je voudrais remercier toutes les personnes que j'ai rencontrées durant mon expérience chez EBC, Nicolas St-Pierre d'abord mais aussi son équipe BIM : leur soutien et leurs encouragements continus ont été importants lorsque je jonglais entre travail et recherche.

Enfin, ceci n'aurait pas été possible sans l'amour et le soutien inconditionnels de mes parents et de ma sœur, je leur en suis infiniment reconnaissante.

LA FILIÈRE BOIS, ARTEFACT ET CATALYSEUR POUR UNE CONSTRUCTION 4.0 AU QUÉBEC

Imen CHIKHI

RÉSUMÉ

Les méthodes traditionnelles de livraison de projets peinent à faire émerger la productivité du secteur de la construction. La filière bois se démarque par sa capacité à allier innovation, technologie et économie, notamment par le biais de produits performants comme le CLT qui contribue à développer des échelles de structures importantes et des processus de fabrication et d'installation qui engendrent une amélioration de la productivité.

Le Québec s'est doté de la Vision 2030 pour le développement de la filière bois et l'export de produits et savoir-faire québécois à l'horizon 2030. Des incitatifs budgétaires ont aidé au développement de projets exemplaires. À partir d'une étude de cas comparative de trois réalisations canadiennes d'envergure, nous avons observé comment les technologies, l'organisation et les processus, en fonction du contexte, peuvent favoriser l'adoption de nouvelles méthodes de livraison de projets et atteindre des objectifs de productivité.

Parallèlement, l'observation de la modification des méthodes de livraison de projets de construction dans la littérature scientifique, particulièrement au Royaume Uni, nous a permis de faire émerger l'idée de Construction 4.0, en écho à l'industrie 4.0, où la *data*, sa génération et son traitement dictent la cadence et la productivité de la chaîne d'approvisionnement. Aussi, pour élaborer le cadre conceptuel de la Construction 4.0, nous proposons quatre piliers : 1) les approches intégrées, 2) le Lean Construction, 3) le DfMA et la fabrication hors site et 4) le BIM VDC. La filière bois, porteuse d'innovation, serait le catalyseur de cette nouvelle ère de la Construction 4.0 au Québec, car elle véhicule déjà des processus différents de par son inscription dans la filière sèche. Celle-ci implique une chaîne logistique différente sur chantier. Le gain de temps (pas de temps de préparation, d'attente et de séchage comme pour le béton) et une meilleure répartition de la main-d'œuvre par la fabrication hors site qui offre un environnement de travail plus sécuritaire; puis la technologie CNC qui lie les logiciels de conception aux ateliers de fabrication et qui permet un meilleur contrôle de la qualité avant le montage définitif et donc une réduction des reprises et des gaspillages.

Pour amorcer le virage Construction 4.0, nous répertorions les pratiques innovantes des chaînes de livraison de trois projets exemplaires. Nous dressons un constat du champ des possibles afin de proposer des stratégies et des actions réalistes. Nous les unissons à des axes et des objectifs d'initiatives en cours dans l'industrie de la construction autour du numérique, de l'innovation et de la productivité au Québec et au Canada pour proposer une feuille de route pour l'adoption de la construction 4.0 au Québec.

Mots clés : Construction 4.0, Approches Intégrées, Lean Construction, DfMA, BIM VDC, structures en bois massif préfabriquées, cadre TOPC

THE WOOD SECTOR, ARTIFACT AND CATALYST FOR A CONSTRUCTION 4.0 IN QUEBEC

Imen CHIKHI

ABSTRACT

Traditional methods of project delivery are struggling to bring out the productivity of the construction sector. The wood industry stands out for its ability to combine innovation, technology and efficiency, particularly through high-performance products such as CLT. The latter helps developing large scale structures and manufacturing and installation processes leading to an improvement in productivity.

Quebec has adopted Vision 2030 for fostering the development of the wood construction industry and facilitating exports of Quebec products and know-how by 2030. Budgetary incentives helped with the development of exemplary projects. Based on a comparative case study of three major Canadian projects, we observed how technologies, organization and processes, depending on the context, can support the adoption of new project delivery methods and achieve productivity goals.

At the same time, the observation of the modification of construction project delivery methods in the scientific literature, particularly in the United Kingdom, allowed us to bring up the idea of Construction 4.0, echoing Industry 4.0, where the data its generation and treatment dictate the pace and productivity of the supply chain. Also, to develop the conceptual framework of Construction 4.0, we propose four pillars: 1) integrated approaches, 2) Lean Construction, 3) DfMA and off-site manufacturing and 4) BIM VDC. The wood industry, a source of innovation, would be the catalyst for this new era of Construction 4.0 in Quebec since it already conveys different processes due to its inclusion in the dry industry. This involves using a different logistics chain on site. Time saving (no preparation, waiting and drying time as it is the case for concrete) and better distribution of labor through off-site manufacturing that provides a safer work environment; then the CNC technology that links the design software to manufacturing workshops and that allows better quality control before the final assembly, therefore, reducing rework and wastage.

To begin the Construction 4.0 turnaround, we list the innovative delivery chain practices of three exemplary projects. We draw a statement of the range of possibilities in order to propose realistic strategies and actions. We unite them with the goals and objectives of ongoing initiatives in the construction industry around digital, innovation and productivity in Quebec and Canada to propose a roadmap for the adoption of Construction 4.0 in Quebec.

Keywords: Construction 4.0, Integrated Approaches, Lean Construction, DfMA, BIM VDC, prefabricated mass-timber structures, TOPC framework

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 INDUSTRIE 4.0 ET CONSTRUCTION 4.0.....	6
1.1 Les principes de l'industrie 4.0.....	6
1.2 Une définition de la Construction 4.0.....	9
CHAPITRE 2 QUATRE PILIERS POUR DÉFINIR LA CONSTRUCTION 4.0 AU QUÉBEC.....	13
2.1 Chronologie des piliers suivant le modèle du Royaume-Uni	13
2.1.1 Approches intégrées.....	15
2.1.2 Lean Construction.....	17
2.1.3 DfMA.....	18
2.1.4 BIM et construction virtuelle.....	20
2.2 Processus et approches intégrées dans un environnement numérique.....	24
2.2.1 La synergie BIM - Lean Construction	24
2.2.2 BIM et DfMA	24
2.2.3 Cadre conceptuel.....	28
2.3 La filière bois, catalyseur de la Construction 4.0.....	29
2.3.1 Le retour du bois dans la construction au Québec	30
2.3.2 La VISION 2030 du Québec.....	32
2.3.3 LeanWood, programme de recherche européen	32
2.4 Discussion.....	33
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	37
3.1 Premier volet : recherche exploratoire, descriptive et explicative.....	37
3.2 Deuxième volet : études de cas.....	38
3.2.1 Critères de sélection des projets.....	38
3.2.2 Collecte de données	39
3.3 Analyse suivant le cadre TOPiC.....	44
3.3.1 Contexte	44
3.3.2 Technologies	46
3.3.3 Organisation.....	46
3.3.4 Processus.....	46
3.4 Validation des données et de l'étude	46
CHAPITRE 4 DES CRITÈRES DE LA CONSTRUCTION 4.0 DANS DES RÉALISATIONS CANADIENNES	49
4.1 1 ^{ER} Projet : Origine (Pointe-aux-Lièvres).....	51
4.1.1 Contexte	51
4.1.1.1 Caractéristiques du site et cadre réglementaire.....	51

	4.1.1.2	Le choix du bois.....	52
4.1.2		Organisation.....	52
	4.1.2.1	Équipes du projet.....	52
	4.1.2.2	Financement du projet.....	54
4.1.3		Technologies.....	54
4.1.4		Processus.....	56
4.1.5		Productivité et Innovation.....	57
4.2		2 ^e Projet : Arbora (Montréal).....	60
4.2.1		Contexte.....	60
	4.2.1.1	Caractéristiques du site et cadre réglementaire.....	60
	4.2.1.2	Le choix du bois.....	61
4.2.2		Organisation.....	62
	4.2.2.1	Équipes du projet.....	62
	4.2.2.2	La formation du manufacturier.....	64
4.2.3		Technologies.....	66
	4.2.3.1	Les exigences du donneur d’ouvrage.....	66
	4.2.3.2	Portée de la modélisation et des technologies utilisées.....	67
4.2.4		Processus.....	67
4.2.5		Productivité et innovation.....	69
4.3		3 ^e PROJET : Brock Commons (Vancouver).....	73
4.3.1		Contexte.....	73
	4.3.1.1	Caractéristiques du site.....	73
	4.3.1.2	Le choix du bois.....	74
4.3.2		Organisation.....	74
	4.3.2.1	Équipes du projet.....	74
	4.3.2.2	Financement du projet.....	76
4.3.3		Technologies.....	76
4.3.4		Processus.....	77
4.3.5		Productivité et innovation.....	79
4.4		Rappel des critères de la Construction 4.0 observés dans les trois projets.....	81
4.4.1		Bénéfices des approches intégrées et du Lean Construction (piliers 1 et 2).....	82
4.4.2		Bénéfices du DfMA et du BIM (piliers 3 et 4).....	83
4.5		Discussion.....	84
CHAPITRE 5 PROPOSITION D’UNE FEUILLE DE ROUTE POUR LA CONSTRUCTION 4.0 AU QUÉBEC.....			89
5.1		Les axes majeurs de trois initiatives pour la compétitivité de la construction au Québec.....	89
5.1.1		Axes majeurs de la Vision 2030.....	89
5.1.2		Axes majeurs du MESI pour « accroître la performance de la filière québécoise de la construction par le virage numérique ».....	90
5.1.3		Axes majeurs de la feuille de route pour le BIM au Canada.....	90
5.2		Stratégies 4.0 et Actions 4.0.....	92
5.3		Feuille de route Construction 4.0.....	97

CONCLUSION.....	101
RECOMMANDATIONS	103
ANNEXE I INITIATIVES ET PROGRAMMES NOTABLES AUTOUR DE LA CONSTRUCTION BOIS EN EUROPE.....	105
ANNEXE II QUESTIONNAIRES DES ENTREVUES SEMI DIRIGÉES	107
ANNEXE III TABLEAU COMPARATIF DES TROIS PROJETS	111
ANNEXE IV BIM ET LOD.....	113
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	115

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Les utilisations fréquentes du BIM VDC et les bénéfices23
Tableau 3.1	Points abordés dans l'étude de cas comparative.....45
Tableau 4.1	Principales caractéristiques des projets.....50
Tableau 4.2	Équipes du projet Origine53
Tableau 4.3	Contexte du projet.....61
Tableau 4.4	Équipes du projet ARBORA.....63
Tableau 4.5	Les processus utilisés sur chaque phase du projet67
Tableau 4.6	Équipes du projet75
Tableau 4.7	Tableau de synthèse des critères de la Construction 4.0.....82

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Les quatre révolutions industrielles et leurs principales innovations6
Figure 1.2	Les trois volets de l'Industrie 4.07
Figure 1.3	Les neuf technologies de l'industrie 4.0
Figure 1.4	Adaptation de trois volets de l'industrie 4.0 à la construction 4.09
Figure 2.1	Quatre piliers pour la définition de la construction 4.014
Figure 2.2	Caractéristiques et comparaison de différentes approches16
Figure 2.3	Exemple d'amélioration de conception et fabrication18
Figure 2.4	Approche traditionnelle vs approche DfMA pour la phase de construction.....19
Figure 2.5	Le BIM et le cycle de vie de l'ouvrage.....21
Figure 2.6	Key BIM actions for the DfMA approach at the various stages.....25
Figure 2.7	Model development and data required at the various stages26
Figure 2.8	Cadre conceptuel proposé pour la Construction 4.0 au Québec28
Figure 2.9	Exemples de bois massif d'ingénierie (s.d.; n.r.).....31
Figure 2.10	Le processus de LeanWOOD (2015).....33
Figure 2.11	<i>La Seine Musicale</i> en cours de réalisation34
Figure 3.1	Répertoire des entrevues et rôles des entités.....40
Figure 3.2	Données quantitatives Projet 1.....41
Figure 3.3	Données quantitatives Projet 2.....42
Figure 3.4	Événements publics pédagogiques autour des trois projets.....43
Figure 4.1	Site de Origine dans le quartier Pointe-aux-Lièvres51
Figure 4.2	Machine à commande numérique à Chibougamau54
Figure 4.3	Visualisation 3D des séquences de montage 1 à 9 de la structure bois55

Figure 4.4	Visualisation 3D des séquences de montage 10 à 16 de la structure bois .56
Figure 4.5	Représentation du modèle 3D des éléments principaux du concept structurel58
Figure 4.6	Mur de refend mis à l’essai en laboratoire chez FPI.....59
Figure 4.7	Localisation de ARBORA, Quartier de l’Innovation, Griffintown60
Figure 4.8	Plan masse du projet Arbora62
Figure 4.9	Photo du chantier Arbora 1 – Phase 1.....64
Figure 4.10	Prototype du complexe plancher bois-béton.....65
Figure 4.11	Prototypes des complexes des parois verticales.....65
Figure 4.12	Logiciels utilisés pour le projet Arbora66
Figure 4.13	Logiciels et plates-formes utilisées sur les différentes phases.....66
Figure 4.14	Synthèse des niveaux de maîtrise des outils et processus utilisés68
Figure 4.15	Arbora 1 - Dalle de balcon préfabriquée.....69
Figure 4.16	Évolution du chantier Arbora 2.....70
Figure 4.17	Arbora 3 – Début du chantier de la phase 3.....71
Figure 4.18	Arbora 1 – Intérieur d’un logement72
Figure 4.19	Vue aérienne du site du projet Brock-Commons.....73
Figure 4.20	Les principes réunis pour le développement de TWH.....74
Figure 4.21	Collaboration et boucles de rétroaction entre les équipes du projet76
Figure 4.22	Exemple de modèle produit par l’intégrateur BIM VDC CadMakers.....77
Figure 4.23	Centralisation des données chez l’intégrateur BIM VDC.....78
Figure 4.24	Prototype échelle 1 pour les tests d’assemblage79
Figure 4.25	Portion de façade d’angle préfabriquée en manutention.....80
Figure 4.26	Construction 4.0 Champs et piliers, interactions et hiérarchie84
Figure 5.1	Feuille de route de bS Canada pour l’adoption du BIM (2014)91

Figure 5.2	Éléments de la Vision 2030 qui relèvent de stratégies 4.0 et d’actions 4.0.....	93
Figure 5.3	Les 5 axes et 22 initiatives du MESI (2018).....	95
Figure 5.4	Éléments repris de la feuille de route bS Canada répertoriés	97
Figure 5.5	Feuille de route pour l’adoption de la construction 4.0 au Québec	98

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AECO	Architecture, Engineering, Construction and Operations
BIM	Building Information Modeling
CCB / CWC	Conseil Canadien du Bois / Canadian Wood Council
CCQ	Commission de la Construction du Québec
CLT	Cross Laminated Timber
DfMA	Design for Manufacturing and Assembly
DfX	Design For X
FHS	Fabrication Hors Site
FPI	FPIInnovations
GES	Gaz à Effets de Serre
GRIDD	Groupe de Recherche en Intégration et Développement Durable
IDM	Information Delivery Manual
MEP	Mécanique, électrique et plomberie
MVD	Model View Definition
NBIMS	National BIM Standards
NTIC	Nouvelles technologies de l'information et de la communication
PCI	Processus de Conception Intégrée
QRT	Question et Réponse Technique
R&D	Recherche et développement
SHQ	Société d'Habitation du Québec
TI	Technologies de l'information
TOPiC	Technology Operation Process in Context

TQC	Tel que construit
VDC	Virtual Design and Construction (conception et construction virtuelles)
WEF	World Economic Forum

INTRODUCTION

Contexte de la recherche

L'industrie de la construction continue d'accuser depuis quelques décennies un ralentissement de productivité contrairement à d'autres industries en croissance exponentielle. Le McKinsey Global Institute (2017) montre que cette situation n'est pas spécifique au Québec et liste quelques causes de ces faibles performances du secteur, communes à plusieurs pays : une réglementation lourde qui participe à la fragmentation de cette industrie, une dépendance large à des marchés publics et des contrats qui comportent des disparités dans la répartition des risques et des avantages. On relève une mauvaise gestion et une mauvaise exécution des réalisations de projets qui résultent des processus inappropriés en phases de conception et de développement. De plus, l'industrie de la construction est polluante et des freins économiques et organisationnels en réduisent la compétitivité ; pourtant, son rôle est crucial dans l'économie d'un pays (WEF, 2016).

Concomitamment, la quatrième révolution industrielle est amorcée à différents degrés dans plusieurs pays industrialisés, depuis l'Allemagne en 2011, et peu d'attention de la part des acteurs de l'industrie de la construction est portée à ce phénomène (Teuteberg et Osterreich, 2016). Qu'il s'agisse de *Smart Factory* ou Industrie 4.0, selon les noms choisis dans les différents pays, l'industrie manufacturière est bouleversée par l'intégration des technologies du numérique et de la connectivité qui appellent l'émergence de nouveaux processus (Rivest et al., 2017). Ces processus concernent autant les phases de conception, de production et d'exploitation du produit que la collaboration qui leur est propre.

L'industrie de la construction a déjà gagné à s'inspirer des autres industries pour améliorer sa productivité et en adapter les meilleures pratiques (Crotty, 2012) : le Lean Construction, inspiré des méthodes de production Toyota (industrie automobile) pour une optimisation et une amélioration continue, est une équation éprouvée pour la productivité et la chaîne de valeur d'un « produit construction » (Koskela, 2000). À l'ère du numérique, c'est le *Building Information Modeling* (BIM) fondé, en partie, sur l'utilisation d'outils numériques et de

conception paramétrique, inspiré également de logiciels de conception de l'industrie aéronautique et de l'industrie automobile, qui véhicule une philosophie de travail basée sur de nouveaux processus efficaces de collaboration et de gestion de projets dans l'industrie de la construction. Des mesures prises lors de la réalisation de projets de construction en BIM ont montré une économie des coûts de construction suite à une réduction du gaspillage des matériaux et des reprises de travaux pendant la phase chantier (McGraw Hill, 2012). Les plans de transition numérique des pays qui réalisent ce grand pas dans le 21^e siècle devraient englober la transition de l'industrie de la construction pour l'émergence, en marge de l'industrie 4.0, d'une industrie de la Construction 4.0 : une industrie compétitive, moins polluante et dont le numérique est un composant intrinsèque.

Ce 21^e siècle est aussi le siècle de l'engagement pour la réduction des impacts écologiques des industries polluantes (WEF, 2016). Dans la construction, recourir au bois plutôt qu'au béton serait une première étape (CCB, 2013) : le bois est une matière qui pousse, qui est renouvelable et qui est transformable, au contraire d'autres matériaux plus traditionnels comme le béton qui demande l'utilisation de ressources naturelles pourtant tarées à certains endroits du globe comme l'eau et le sable. En Allemagne et en Autriche où la R&D et le numérique sont étroitement liés à l'industrie de la construction, le numérique a permis de faire évoluer les bois transformés et d'ingénierie comme le *Cross Laminated Timber* (CLT) dans les années 1990. Le CLT possède une faible empreinte carbone et son utilisation dans une construction est un moyen de réduire l'empreinte carbone totale du bâtiment, notamment par la réduction de la pollution émise pendant le processus de construction (chantier et approvisionnement, Cecobois 2015). L'utilisation du CLT est de plus en plus répandue pour des projets de construction phares à portée pédagogique et témoins d'innovation et de productivité dans la construction. Ce sont des encouragements pour le recours à des processus de conception intégrée en vue de préfabrication et assemblage hors site tel le *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA). On réduit ainsi le temps de mise en œuvre sur chantier et les risques physiques liés à cette activité (RIBA, 2013), sans oublier la diminution des gaspillages, notamment en matériaux, avec l'application des principes du Lean Construction et l'augmentation de la fiabilité et de

l'exactitude de la planification par le recours à la simulation en *Visual Design Construction* (VDC).

Problématique et objectifs de la recherche

Les outils qui facilitent ces changements sont des produits des technologies de l'information (TI). Les processus qui favorisent ces changements s'inscrivent dans les philosophies du Lean Construction et du BIM. Encourager et développer continuellement le passage au numérique et les processus collaboratifs en lieu et place des barrières existantes entre les différents professionnels et entre les professionnels et les manufacturiers est un préalable à l'émergence de la Construction 4.0 (voir p. 9 pour la définition). Celle-ci implique aussi le recours à des matériaux moins polluants que ceux largement utilisés aujourd'hui comme le béton (Forgues, Botton, Chikhi, 2017).

Notre recherche vise à définir dans quelle mesure la filière bois, par le biais des structures en bois massif préfabriquées, pourrait engager le passage à la Construction 4.0 au Québec. En effet, la filière bois au Québec¹ s'est dotée d'une stratégie de développement à l'horizon 2030 avec la VISION 2030. Cette vision commune à FPInnovations, à la Société d'Habitation du Québec (SHQ) et au Conseil Canadien du Bois (CCB) repose sur un engagement à instaurer des environnements technologiques performants afin de garantir une production de qualité et compétitive (FPI White Paper 2016, Collot & Forgues 2016). On peut atteindre des objectifs de réduction des délais de construction de 50 % à 90 %, une réduction des déchets de 60 % à 80 % et la réutilisation de près de 90 % des matériaux d'un bâtiment en fin de vie utile (Forgues, Botton, Chikhi, 2017).

Dans la filière bois, la R&D avec l'implication des technologies dans la modification des processus de conception, de réalisation et du flux de l'information a bouleversé une partie du code de la construction en 2015. Ces technologies ont permis une évolution des structures en

¹ Selon les chiffres publiés par FPInnovations, en 2015 le Canada comptait un total de 592 entreprises spécialisées dans la préfabrication de bâtiments. Le Québec, à lui seul, en compte 176 parmi lesquelles 68 sont spécialisées en fabrication des produits de charpente en bois

bois massif préfabriquées qui dépassent 12 étages. Le projet Tall Wood (Vancouver) avec ses 18 niveaux en bois massif a contribué au changement d'échelle de conception des structures préfabriquées par le biais d'une structure hybride dont la mise en œuvre a pu être simulée grâce au BIM et la construction virtuelle. Jusque-là, les codes du bâtiment du Canada limitaient les constructions bois à 5 ou 6 étages. Parallèlement, au Québec, Origine et Arbora, deux autres projets de bâtiments multi-résidentiels conçus avec des structures préfabriquées en bois massif, ont, eux aussi, participé à l'évolution des codes de construction au Québec. La filière bois a réussi à faire évoluer le code de la construction en lui apportant un cadre pour les bâtiments multi-résidentiels en bois alors que ce matériau en était banni depuis 1941.

Question de recherche

En considérant les dernières avancées de la filière bois dans la préfabrication et son recours à des pratiques intégrées portées par de nouvelles technologies, quelles seraient les étapes pour qu'elle développe la Construction 4.0 au Québec ?

Objectif principal : définir une feuille de route qui permette aux entreprises québécoises, y compris celles qui ne sont pas dans la filière bois, d'effectuer la transition vers la Construction 4.0.

Pour atteindre cet objectif, nous interrogerons, à travers des études de cas comparatives, la pertinence de grouper ce que nous avons identifié comme les quatre piliers de la Construction 4.0 pour définir les axes de ce cadre :

- Les approches intégrées;
- Le Lean Construction;
- Le BIM et la construction virtuelle;
- Le DfMA et la fabrication hors site (FHS).

Notre objectif secondaire consiste à répertorier les meilleures pratiques des projets étudiés et vérifier dans quelle mesure elles peuvent contribuer à définir des objectifs de la feuille de route proposée.

Structure du mémoire

Les deux premiers chapitres présentent la revue de littérature, puis la méthodologie adoptée pour une étude de cas comparative de trois réalisations canadiennes constitue le troisième chapitre. Le quatrième chapitre présente les résultats et l'analyse des pratiques recueillies et se termine par une discussion. Le cinquième chapitre revient davantage sur les défis observés dans les études de cas pour lister des recommandations avant de proposer une feuille de route pour l'adoption de la Construction 4.0 au Québec.

CHAPITRE 1

INDUSTRIE 4.0 ET CONSTRUCTION 4.0

La machine à vapeur et la production mécanique dans les industries du tissage et de l'extraction du charbon ont constitué les avancées majeures de l'industrie à la fin du 18^e siècle ; c'était la première révolution industrielle. À la fin du 19^e siècle, la deuxième révolution industrielle apporte de nouvelles énergies (pétrole, le gaz et électricité) et des inventions majeures comme le téléphone et le moteur à explosion. La théorie de la relativité d'Einstein, l'éclatement de la gamme des sons de Shoenberg et la libération de l'espace Euclidien, au début du 20^e siècle, annoncent la troisième révolution industrielle : le développement de la physique quantique, de l'électronique et de l'informatique entre autres. La quatrième révolution industrielle marque le début de ce 21^e siècle avec le développement du numérique et des interconnexions cyber-physiques, c'est l'Industrie 4.0.

1 ^{re} Révolution Industrielle	2 ^e Révolution Industrielle	3 ^e Révolution Industrielle	4 ^e Révolution Industrielle
<ul style="list-style-type: none"> •Machine à Vapeur •Production Mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> •Électricité •Production en série •Chaînes de montage 	<ul style="list-style-type: none"> •Électronique •Ordinateurs •Automatisation •TI 	<ul style="list-style-type: none"> •Internet •Numérique •Cyber physique •Interconnexions

Figure 1.1 Les quatre révolutions industrielles et leurs principales innovations

1.1 Les principes de l'industrie 4.0

L'Industrie 4.0 ou 4^e révolution industrielle a été officiellement déclenchée par le gouvernement allemand en 2011, lors de la foire de Hanovre. L'enjeu de cette nouvelle révolution est *the data* (la donnée ou les données), toutes ces informations collectées par les principales plateformes du web et les applications et appareils qui y sont connectés. Les données sont le nouveau pétrole en ce 21^e siècle (Kohler et Weisz, 2014, PWC, 2016), elles constituent une nouvelle forme de valeur ajoutée. C'est pourquoi le gouvernement allemand

s'est engagé pour la maîtrise des interfaces et des accès massifs aux données des personnes afin de les protéger et de protéger leur traitement. Concrètement, la 4^e révolution industrielle est l'engagement du gouvernement allemand auprès de l'industrie pour effectuer le virage numérique à grande échelle et à différents niveaux dans tous les secteurs. L'objectif est la réalisation de l'usine numérique ou usine connectée (PWC, 2016). Pour réaliser cet objectif, la place accordée à la R&D est confirmée et amplifiée par la création de l'Union pour la Recherche et la plate-forme « Industrie 4.0 » en 2013 (Kohler et Weisz, 2014) qui réunit l'industrie, les syndicats et des chercheurs autour de l'Industrie 4.0 sous le regard du gouvernement allemand.

Le but de l'Industrie 4.0, bien que guidée par le numérique, n'est pas d'automatiser davantage mais plutôt d'améliorer et d'optimiser l'automatisation en faisant communiquer les systèmes (Roland Berger, 2016, Kohler et Weisz, 2014) dans le but d'augmenter la valeur pour le client. Des rapports d'études publiés depuis 2013 (Kohler & Weisz, 2013, PWC, 2016, McKinsey, 2017, BCG, 2016) on peut dégager trois grands volets de l'Industrie 4.0 (Figure 1.2) et neuf technologies qui transforment la production industrielle (Figures 1.3).

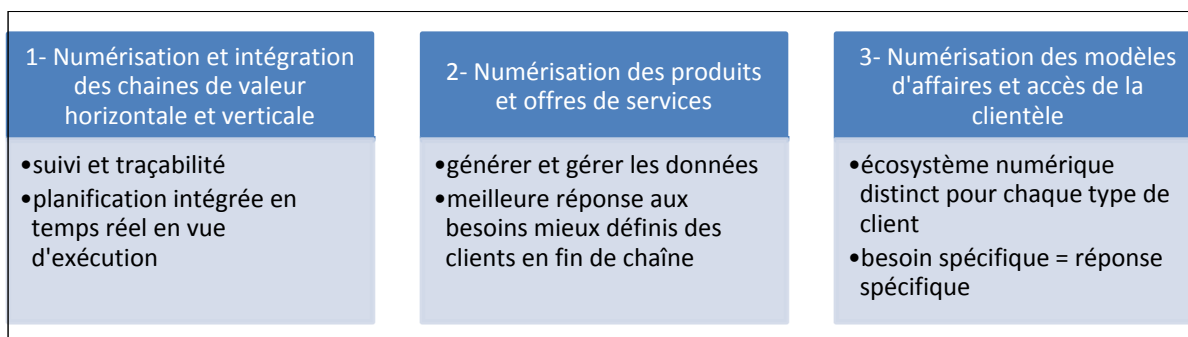


Figure 1.2 Les trois volets de l'Industrie 4.0
Adaptée de PWC (2016)

Les trois grands volets de l'Industrie 4.0 (figure 1.2) s'articulent autour de : 1) la numérisation et l'intégration des chaînes de valeur horizontales et verticales pour un meilleur suivi, une meilleure traçabilité pour une meilleure planification, 2) la numérisation des produits et offres de services pour une génération et une gestion des données qui permettent une personnalisation des services proposés et 3) la numérisation des modèles d'affaires et de l'accès à la clientèle

pour asseoir complètement un univers de service *customisé*. Le but ultime de l'optimisation et de l'amélioration continue en bout de chaîne vise surtout à fournir au client le produit qui répond à sa demande spécifique, ce qui confirme la valeur du produit.

La figure 1.3 montre les neuf technologies qui transforment la production industrielle.

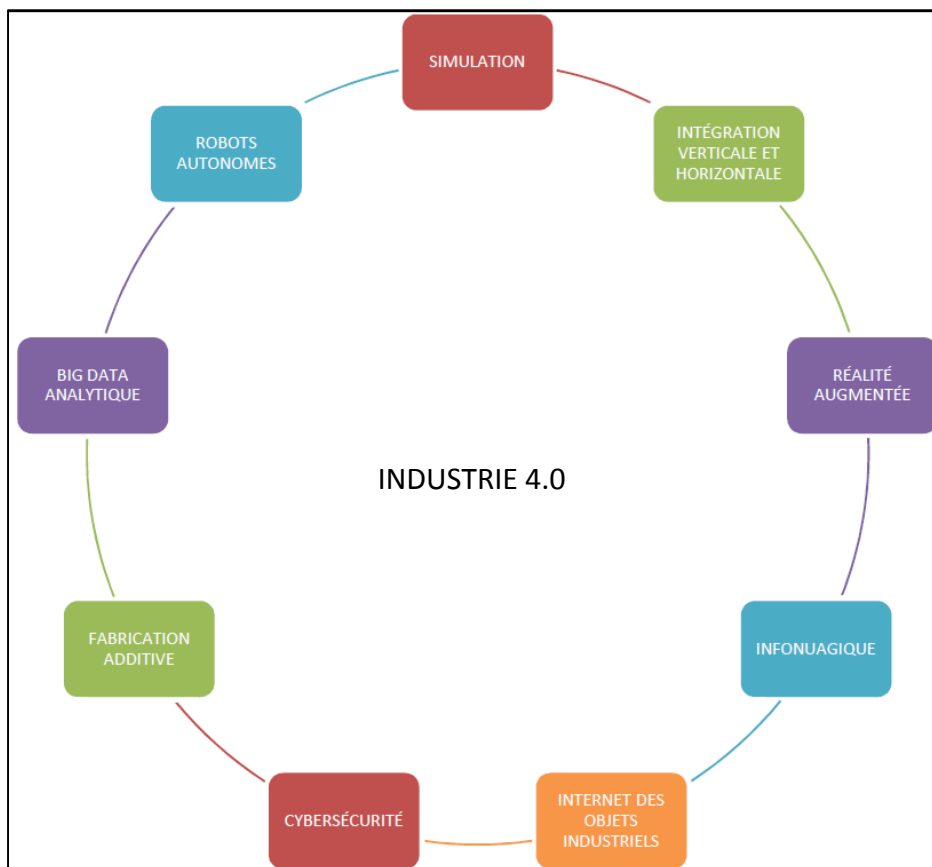


Figure 1.3 Les neuf technologies de l'industrie 4.0
Adaptée de BCG (2016)

Elles sont toutes intégrées à l'industrie de la construction, de manière disparate, selon les pays et leur niveau d'adoption du numérique dans la construction à travers le BIM. Le recours à l'une ou plusieurs de ces technologies dépend aussi du programme de l'ouvrage à construire et de sa destination.

1.2 Une définition de la Construction 4.0

Les trois volets de l'Industrie 4.0 (figure 1.2) montrent que l'idée maîtresse est de définir un profil ou une personne, définir ses besoins et exploiter toutes les informations collectées afin d'apporter une réponse sur mesure, le tout par le biais de la numérisation. Les constantes du processus sont : l'interopérabilité assurée par l'internet des objets (IoT), la disponibilité de l'information en tout temps (une omniscience du monde cyber-physique par la création de la copie du monde réel), le relai technique et la décentralisation des décisions (PWC, 2016). Le « sujet » pourrait ne pas être une personne mais un système, une industrie. Il s'agit alors de collecter assez de données pour comprendre le fonctionnement, identifier les besoins et apporter une réponse spécifique. Le numérique, la collecte des informations et leur traitement est le premier pont entre l'Industrie 4.0 et l'industrie de la construction.

La transition numérique dans l'industrie de la construction pourrait aboutir à la Construction 4.0. La figure 1.4 illustre notre proposition d'adapter les trois volets de l'industrie 4.0 (voir figure 1.2) au domaine de la construction afin de poser un cadre de la Construction 4.0.

Numérisation et intégration des chaînes de valeur horizontale et verticale	Numérisation des produits et offres de services	Numérisation des modèles d'affaires et accès à la clientèle
Suivi et traçabilité	Génération et gestion de données	Écosystème numérique distinct pour chaque type de client
Planification intégrée en temps réel en vue de l'exécution	Réponse de qualité aux besoins qui sont mieux définis	Besoin spécifique = réponse spécifique
Les trois volets de l'industrie 4.0 Adapté de PWC (2016)		
Conception paramétrique (BIM)	Génération et gestion de données (Approches intégrées et BIM)	Répertoire des spécificités contextuelles de chaque projet (Approches intégrées et outils numériques)
Planification simulée en vue de l'exécution (BIM et VDC)	Réponse de qualité aux besoins qui sont mieux définis (DfMA et Lean construction)	Besoin spécifique = réponse spécifique Livraison d'un bâtiment adapté au contexte Optimisation de son exploitation

Figure 1.3 Adaptation de trois volets de l'industrie 4.0 à la construction 4.0

Dans le premier volet de l'industrie 4.0 qui couvre la numérisation et l'intégration des chaînes de valeur, le suivi et la traçabilité ont leur pendant dans la construction 4.0 par le recours au BIM qui permet une conception paramétrique. Cette conception paramétrique assure un suivi de l'évolution des composants du modèle 3D. La planification intégrée en temps réel pour l'exécution dans l'industrie 4.0 rejoint l'idée de la simulation de la planification et de l'exécution dans la construction 4.0 par le biais du BIM et VDC. Dans le deuxième volet de l'industrie 4.0 qui couvre la numérisation des produits et offres de service, la génération des données et leur gestion a son équivalent dans la construction 4.0 avec pour processus concourants les approches intégrées et les processus liés au BIM. La réponse de qualité à des besoins définis dans l'industrie 4.0 trouve son pendant dans la construction 4.0 grâce aux principes du Lean Construction (élimination du gaspillage) et du Design for Manufacture and Assembly (voir chapitre 2). Enfin, le troisième volet traite de la numérisation des modèles d'affaires et de l'accès à la clientèle par la création d'un écosystème numérique distinct pour chaque type de client. Il s'agit d'apporter une réponse spécifique à chaque besoin spécifique. Dans un contexte de construction 4.0, ceci correspondrait à la création d'un répertoire des spécificités de chaque projet pour accompagner la production de bâtiments adaptés à leur contexte (le site et ses contraintes physiques et réglementaires) et qui offrent une qualité d'usage propice à l'optimisation de leur exploitation.

Ainsi, la Construction 4.0 apporte de nouveaux outils de conception, modélisation et de construction virtuelle avec le **BIM**. L'aspect paramétrique permet de pousser la simulation. Dans la cohérence d'une construction « intelligente » (*Smart Cities* et *Smart Buildings*) les projets et les matériaux doivent répondre aux critères d'une construction écologique et durable, économe en consommation de matières premières et en énergie (Kazazian, 2003). Elle oblige l'industrie de la construction à mener une réflexion sur des approches d'industrialisation qui nécessitent moins de ressources naturelles (p.ex. la filière sèche du bois) et des procédés de **préfabrication et de fabrication hors site** (FHS). Ces procédés demandent un environnement logistique adéquat et, pour qu'il soit le plus pertinent possible, ses exigences doivent être prises en compte dès la phase de conception du projet (Sacks et Partouche, 2009). **Les approches**

intégrées génèrent les processus les plus à même de tenir compte de telles exigences et d'y apporter les bonnes réponses.

Les approches intégrées permettent également d'intégrer les procédés de fabrication et préfabrication à la réflexion lors de la conception, ainsi que les procédés d'assemblage sur le site. La conception est dirigée en ce sens afin de réduire tous les gaspillages selon les principes du **Lean Construction**. On peut ainsi réaliser un **Design for Manufacture and Assembly** (DfMA) dont le succès dépend également du degré d'intégration de tous les acteurs de la chaîne de production du projet, pendant les phases de conception et de planification, et de l'implication des fabricants et des installateurs.

Ainsi, le cadre de la Construction 4.0 proposé conjugue sa mise en œuvre en quatre piliers :

- Les approches intégrées,
- Le Lean Construction,
- Le BIM,
- Le DfMA.

Le prochain chapitre expose plus en détail chacun de ces piliers et comment leur implication dans la réalisation de structures préfabriquées en bois d'ingénierie peut contribuer à faire de la filière bois le catalyseur de la Construction 4.0 au Québec. La section 2.3 expose comment cette filière se détache du reste de l'industrie (pas seulement au Québec) notamment par son matériau unique naturellement renouvelable, son évolution grâce à l'ingénierie et l'évolution des pratiques autour de la réalisation des projets de construction dont il est le principal composant.

CHAPITRE 2

QUATRE PILIERS POUR DÉFINIR LA CONSTRUCTION 4.0 AU QUÉBEC

L'industrie de la construction connaît une baisse de productivité depuis les années 1960 (Eastman et al., 2008). L'adoption du numérique dans cette industrie est une opportunité pour définir des objectifs de performance, comme l'a fait le Royaume-Uni à l'occasion de son plan *Construction 2025*. Cette performance est tributaire de l'adoption des outils numériques et plusieurs pays sont dans cette phase de transition numérique dans le bâtiment. Nous exposons ce qui lie les quatre piliers (BIM, DfMA, Lean Construction et les approches intégrées) et la manière de les interconnecter afin de définir le cadre de la Construction 4.0 au Québec.

2.1 Chronologie des piliers suivant le modèle du Royaume-Uni

Nous présentons les quatre jalons de la Construction 4.0 pour le Québec dans un ordre chronologique qui correspond aux étapes de l'évolution de l'industrie de la construction au Royaume-Uni. En effet, le Royaume-Uni a amorcé « un mouvement de changement dans l'industrie de la construction, pour une amélioration radicale du processus de construction (...) comme moyen de maintenir l'amélioration et de partager l'apprentissage » avec le rapport Egan (1998, p.18). Cette réflexion se poursuit aujourd'hui et les pistes d'amélioration sont continuellement explorées, actualisées et mises à jour afin de générer des solutions viables. Le plan *Construction 2025* établi en 2013 a pour dessein :

- La réduction de 33 % des coûts de construction;
- La réduction de 50 % du temps de réalisation des ouvrages;
- La réduction de 50 % des gaz à effets de serres (GES) des chantiers;
- L'augmentation du taux des exportations des produits de la construction de 50%.

En amont, les actions préconisées par le rapport Latham en 1994 et le rapport Egan en 1998 ont été entreprises pour la plupart. Au début des années 2000, le BIM au Royaume-Uni est inclus dans les programmes de développement de l'industrie de la construction avec l'objectif de réaliser progressivement les projets publics en BIM entre l'année 2011 et l'année 2016.

Nous retrouvons dans ces programmes les 4 piliers que nous proposons pour définir le cadre conceptuel de la Construction 4.0 (figure 2.1).

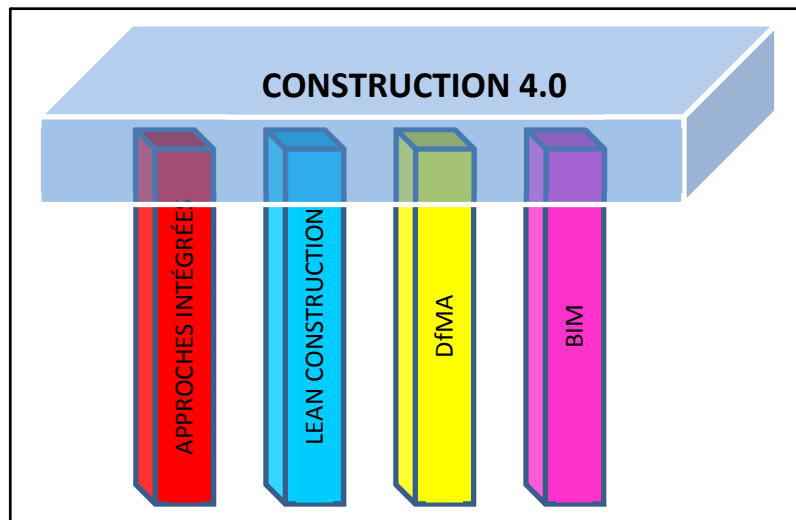


Figure 2.1 Quatre piliers pour la définition d'un cadre conceptuel pour la Construction 4.0

Ces quatre piliers proposés sont :

- Le recours aux processus et aux équipes intégrées (1^{er} pilier);
- « l' utilisation des techniques d'élimination des déchets et d'augmentation de la valeur pour le client »² soit le Lean Construction (2^e pilier);
- La mise en œuvre d' « un partenariat de la chaîne d'approvisionnement et de la production des composants » et la « conception des projets pour faciliter la construction en utilisant au maximum les composants et les procédés standards »³, soit le DfMA et la fabrication hors site (3^e pilier);
- Les technologies et processus du BIM et de la construction virtuelle (4^e pilier).

Nous définissons chacun des piliers dans les sections ci-après.

² Traduction libre de Egan, Rethinking Construction, 1998

³ Idem

2.1.1 Approches intégrées

Les approches intégrées englobent des pratiques multidisciplinaires telles la conception intégrée et les pratiques intégrées. Elles sont axées sur l'optimisation des processus de toutes les phases du projet (Forgues, Lavallée et al., 2014), à savoir la conception, la réalisation et l'opération. L'ensemble de ces phases composent la *chaîne d'approvisionnement* pour la réalisation de l'ouvrage (Egan, 1998). Or, un processus est un ensemble structuré et mesuré d'activités dont le but est de produire un extrant spécifié (Mandujano, Kunz, et al. 2015). Dans la mesure où les approches intégrées mettent l'accent sur l'optimisation et l'automatisation des processus (figure 2.2), notamment dans des contextes de BIM, de conception pour la fabrication et l'assemblage (DfMA) et de Lean Construction, ces approches deviennent indissociables des objectifs d'amélioration de la productivité dans l'industrie de la construction (Elvin, 2007; Forgues et Iordanova 2010).

La conception intégrée est définie par Elvin comme suit :

Integrated design is the concept that the design of a structure or a place really should be holistic, with everything proceeding apace and everything occurring at the right time, instead of having separate disciplines that get together episodically to say, 'Here's my paper, here's your paper.' It's more of an intertwining of the process. We think that design continues all the way through the project. (Young cité par Elvin, p. 13, 2007)

Les différents acteurs du projet sont réunis dès les premières étapes du projet ce qui transfère les efforts en amont (figure 2.2, (1) et (2)). Dans un contexte d'approches intégrées, l'emphasis est mise sur l'optimisation et l'automatisation des processus ou sur l'optimisation de la solution avec une concentration des efforts pendant la phase de conception du projet (ou de sa définition).

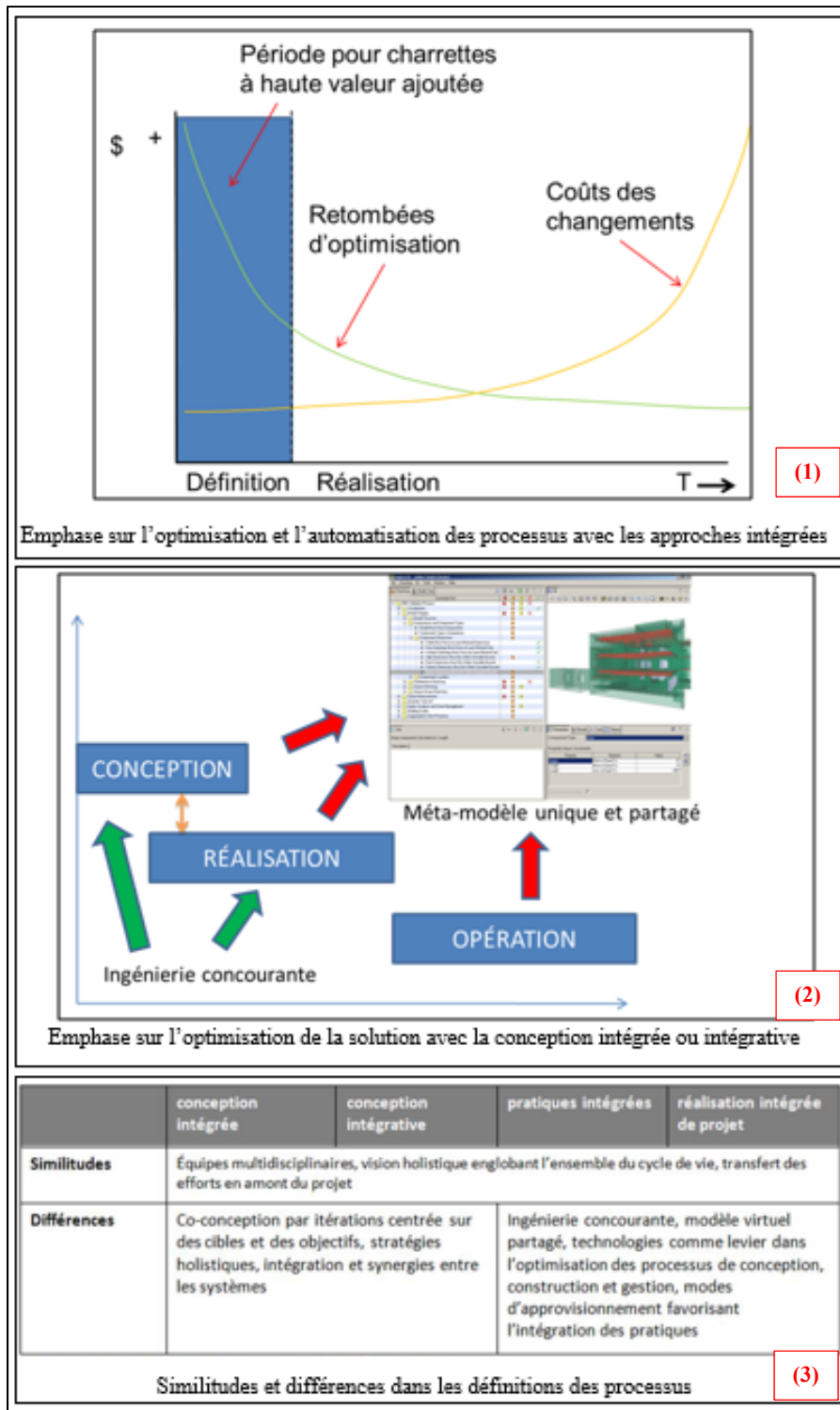


Figure 2.2 Caractéristiques et comparaison de différentes approches intégrées. Tirée de Forgues (s.d.)

La concentration des efforts durant cette phase engendre un gel de la conception une fois toutes les solutions envisagées et définies de manière concertée. Ceci réduit les changements éventuellement apportés en phase de réalisation et leurs coûts. Qu'il s'agisse de conception intégrée, de conception intégrative ou encore de pratiques intégrées ou de réalisation intégrée au projet (figure 2.2 (3)) elles appartiennent toutes au champ des pratiques intégrées et ont pour similitude la pluridisciplinarité des équipes qui permet le transfert des efforts en amont du projet et une vision holistique qui convoque l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage.

2.1.2 Lean Construction

Le Lean Construction, inspiré du Lean dans l'industrie automobile, apporte au projet de construction la dimension d'un système de production de valeur par l'élimination du gaspillage. Il est défini comme suit :

“Lean is a way to design production systems to minimize waste of materials, time, and effort in order to generate the maximum possible amount of value” (Koskela, et al., 2002)

Koskela (2000) élabore une théorie de la production de la construction qui repose sur 3 axes :

- 1- La transformation suivant les principes de production efficace par le découpage des travaux en tâches et la réduction de leur coût;
- 2- Le flux suivant les principes de l'élimination du gaspillage de temps (temps d'attente), la réduction de la variabilité et l'accroissement de la fiabilité;
- 3- La valeur qui est dans la fiabilité et la capacité du système de production à répondre aux exigences posées en amont (par le client).

Le flux de travail devient le vecteur de l'élimination des gaspillages dans le but de rencontrer les objectifs d'atteinte de la valeur définie en amont. « La valeur attendue par le client est définie, créée et réalisée tout au long du projet. Selon la pratique actuelle, on s'attend à ce que le propriétaire établisse, dès le début du projet, toutes les exigences qui serviront jusqu'à l'achèvement du projet, et ce, malgré la fluctuation des marchés, l'évolution de la technologie

et les pratiques commerciales changeantes » (Institut de Lean Construction Canada <http://www.lcicanada.ca/fr>). En ce sens, nous verrons comment le DfMA rejoint le Lean Construction dans la section 2.1.3.

2.1.3 DfMA

Le DfMA (*Design for Manufacture and Assembly*) est la réunion du *Design for Manufacture* et *Design for Assembly*. Il s'agit de définir les pièces qui vont constituer un élément et de réduire le nombre de ces pièces et le nombre d'étapes pour la phase de leur assemblage afin d'en réduire les coûts et l'effort de production et d'installation (figure 2.3). Parmi les principes du DfMA, la productivité, l'efficacité et l'élimination du gaspillage rejoignent les principes du Lean Construction. Ce processus amène un changement dans la relation entre la conception et la construction.

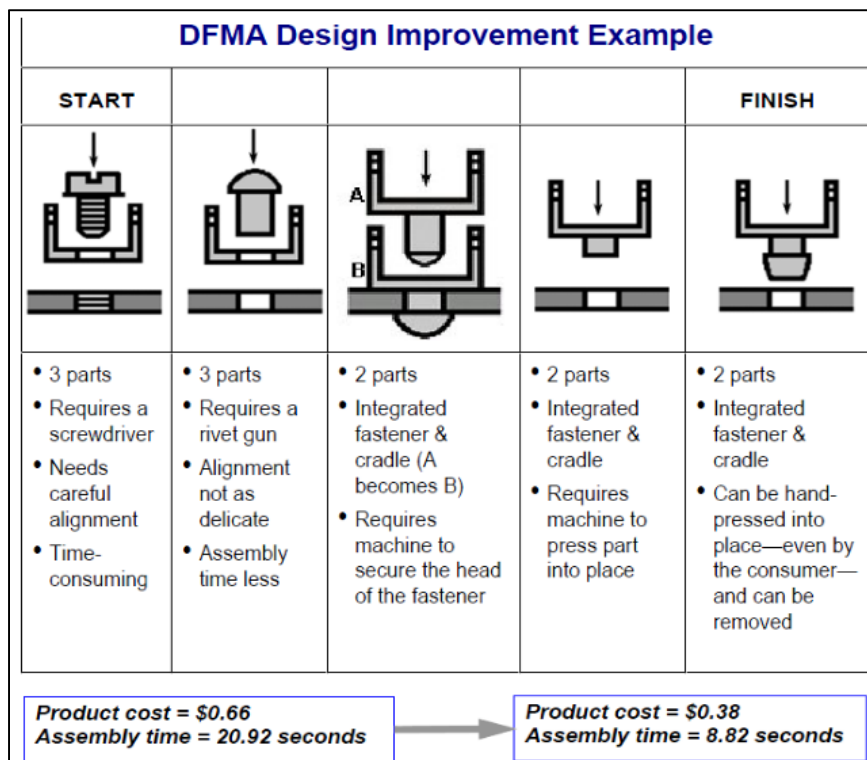


Figure 2.3 Exemple d'amélioration de conception et fabrication de composants grâce au DfMA. Tirée de ETECH (s.d.)

La conception doit prendre en compte le mode de réalisation du projet et sa chaîne logistique (BCA, 2016). L'exemple de DfMA le plus compréhensible et le plus répandu est sans doute celui du mobilier IKEA : l'interaction entre la conception et toutes les autres étapes de la chaîne de production est visible dans le produit fini, sa mise à disposition pour ses usagers et le degré de facilité de transport et d'assemblage. Rapporté à l'échelle d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art, le DfMA devient un processus qui implique un assemblage sur site (O'Rourke, 2013), ce qui veut dire que les parties à assembler sont des éléments qui font l'objet d'une fabrication hors site et dont l'approvisionnement est à inclure dans la chaîne logistique du projet, ce qui est très différent du mode traditionnel (figure 2.4).

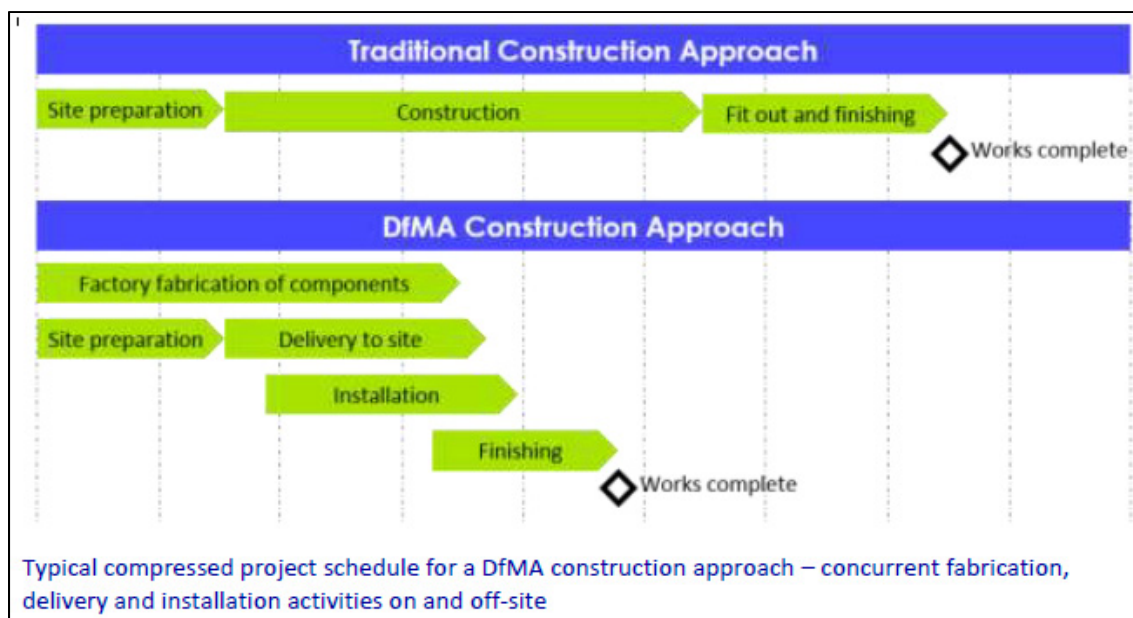


Figure 2.4 Approche traditionnelle vs approche DfMA pour la phase de construction
Tirée de Bryden Wood – BCA (2016)

La figure 2.4 montre comment, en phase de construction, les étapes de fabrication des composants sont parallèles aux phases de préparation du site, de la livraison et de l'installation. Ceci révèle la nécessité d'une logistique rigoureuse pour une livraison juste à temps et justifie pourquoi le recours au DfMA requiert une implication en phase de conception de la part des gestionnaires de projet et des planificateurs (idem) notamment ceux en charge de la chaîne logistique. Concrètement, pour la conception de structures de grande envergure par exemple,

il faudra veiller à ce que les éléments préfabriqués qui devront être acheminés sur site remplissent les conditions requises par le cadre administratif du transport routier. Dans le cas où le recours à des convois spéciaux est nécessaire, il faut prévoir l'échéancier adéquat (délais d'obtention des autorisations, coût de transport et temps de transport) et l'intégrer à l'échéancier global du projet. Il est plus rentable d'observer des dimensions standards, dans la mesure du possible.

2.1.4 BIM et construction virtuelle

Le BIM regroupe des technologies au service d'un ensemble de processus collaboratifs pour la conception et la réalisation de projets de construction. Le modèle BIM (ou maquette numérique fédérée) est le support commun à tous les intervenants et permet l'interopérabilité nécessaire en phase de conception (Manuel Canadien de la MDB, 2017, AIA, 2008). Le BIM englobe également les processus de communication entre les différents intervenants et son rôle se prolonge dans le cycle de vie du projet construit, son exploitation et sa maintenance (Eastman et al., 2008) grâce à l'utilisation des modèles qui représentent le Tel Que Construit (TQC) à jour ; ces modèles sont produits par les professionnels, les constructeurs et les sous-traitants (figure 2.5).

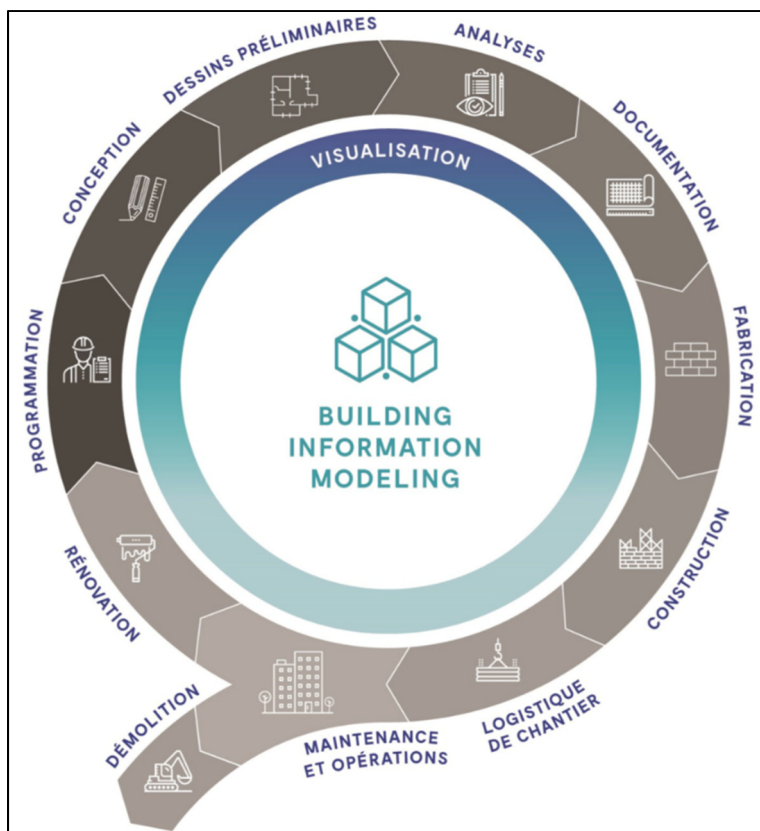


Figure 2.5 Le BIM et le cycle de vie de l’ouvrage
Groupe BIM du Québec (2017)

Le Visual Design Construction (VDC) est une partie complémentaire du BIM qui fait le lien entre la conception BIM et la construction (Skrupac, 2018). Il est défini par Fisher et Kunz (2011) :

“The use of integrated multidisciplinary performance models of design-construction projects to support explicit and public business objectives”

La construction virtuelle réunit des équipes pluridisciplinaires autour de modèles qui représentent le produit, l’organisation et le processus ou POP (Khanzode et al., 2006) (comme pour le BIM – figure 2.5). Les maquettes numériques sont un support pour la prise de décision. Elles aident à la qualification des enjeux du projet, autant pour les concepteurs que pour les investisseurs. C’est donc un support important pour la définition des coûts de construction et l’équilibre du budget; elles permettent aussi l’optimisation des solutions (Skrupac, 2018). En

cela, il rejoint les principes de la conception intégrée axée sur l'optimisation de la solution qui concentre les efforts pendant la phase de définition des éléments du projet (voir section 2.1.1).

Le VDC (ou construction virtuelle) permet également de visualiser la cohabitation des différents systèmes du bâtiment et joue un rôle important dans la réalisation d'une synthèse technique des lots MEP (Staub-French & Fischer, 2001, Staub-French & Khanzode, 2003). Le résultat du VDC ou de la construction virtuelle est vérifié, entre autres, par le degré de fiabilité de la planification définitive des travaux (Fallahi et al., 2016), d'autant que l'intégration de la gestion et de l'évaluation des risques permet de les minimiser au cours de l'exercice VDC. Les modèles numériques sont des supports pour la diffusion des données et des propriétés des objets qui les peuplent et pour visualiser les processus, pour planifier, vérifier et intervenir le cas échéant (Mandujano, Kunz, et al. 2015). Donc toutes les étapes du chantier peuvent être simulées sous forme de séquences, quelle que soit la méthode de planification choisie. Tous les éléments de l'ouvrage peuvent être construits virtuellement et une itération entre la conception et la construction virtuelle permet d'optimiser les interactions entre les différentes activités ainsi que les ressources inhérentes à chacune d'entre elles et ce à chaque phase de la construction (tableau 2.1).

Dans un contexte de structures préfabriquées en bois massif, la construction virtuelle est un outil très efficace qui permet la simulation des séquences d'assemblage. La prévisualisation des séquences de construction permet une meilleure compréhension de la part de tous les acteurs du projet, aussi bien les manœuvres impliqués dans la séquence que le planificateur qui doit estimer le temps nécessaire pour la réalisation de la séquence et l'inclure dans son échéancier 4D (Fallahi et al, 2016). Aussi, un processus itératif entre la simulation ou la visualisation et la conception optimise la revue de la conception. Celle-ci engendre une optimisation des éléments à assembler afin de faciliter l'opération sur chantier. On peut aussi déplacer certains assemblages hors site afin de réduire le travail sur chantier (Al Hussein et al., 2016). On réduit ainsi les risques sur chantier et on offre un environnement de travail avec de meilleures conditions de santé-sécurité pour les ouvriers.

Tableau 2.1 Les utilisations fréquentes du BIM VDC et les bénéfices d'après McGraw Hill (2012), TOPIC's (2016), Fallahi & al. (2016)

Utilisations fréquentes	Bénéfices
<ul style="list-style-type: none"> • Visualisation • Visualisation & Coordination • Visualisation de la préfabrication • Visualisation des séquences d'assemblage • Revue de la conception • Analyse structurelle et analyse énergétique • Analyse des systèmes du bâtiment (MEP, éclairage, ...) • Évaluation des paramètres LEED • Simulation 4D, contrôle et planification • Estimation des coûts 5D • Coordination technique • Modélisation et analyse des données et des conditions du site et de l'existant • Planification et organisation de l'utilisation du site • Suivi des matériaux et des ressources • Gestion des espaces • Gestion, planification et maintien des actifs • Fabrication numérique 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des coûts • Réduction des gaspillages • Réduction des risques • Réduction du temps dans la prise de décisions • Amélioration de la fiabilité de la planification • Amélioration de la gestion des risques • Optimisation des solutions d'assemblages • Optimisation des séquences d'assemblages • Meilleure précision et meilleur niveau de détails des composants • Évolution de la maquette numérique en temps réel = meilleure itération entre les équipes de conception

Le BIM est donc un support important pour les approches intégrées (Eastman et al., 2009, Fischer et Kunz, 2011) ainsi que la construction virtuelle. Leurs principales utilisations et bénéfices ont été répertoriés dans différents rapports académiques et de l'industrie. Le tableau 2.1 ci-dessus en présente une synthèse et ces différents sujets sont abordés dans les sections qui traitent des modèles numériques dans ce mémoire.

2.2 Processus et approches intégrées dans un environnement numérique

Les projets BIM demandent des niveaux élevés de collaboration et des approches intégrées. Pour qu'une stratégie d'adoption du BIM soit efficace, elle doit être alignée sur la stratégie d'entreprise, en fonction d'un examen des processus opérationnels internes et externes et des flux de travail de l'organisation. En effet, adopter le BIM implique un changement dans les technologies et dans les processus (Eastman et al., 2009, Crotty 2012). La technologie seule n'apporte aucun changement significatif à une entreprise : elle doit être adaptée à l'infrastructure organisationnelle pour renforcer le processus opérationnel (Sacks, Koskela, et al.; 2010, Crotty 2012).

2.2.1 La synergie BIM - Lean Construction

Les synergies entre le Lean Construction et le BIM génèrent un potentiel pour l'amélioration des projets de construction (Sacks, Koskela et al., 2009). En effet, le BIM favorise le changement des processus de collaboration en les orientant vers des pratiques qui optimisent les flux de travail. Ces optimisations de processus sont axées sur le Lean (Sacks et al. 2010). Si nous considérons le VDC comme un processus (Mandujano, Kunz, et al. 2015), nous nous intéressons au flux de travail pour la production plutôt qu'au produit (Koskela, 2007). Ainsi, la synergie entre BIM-VDC et Lean Construction est établie comme une approche de la conception qui peut transformer le processus de conception autant que le processus de construction dans son ensemble. Ainsi, c'est l'ensemble du processus de livraison du projet qui devient porteur d'une synergie.

2.2.2 BIM et DfMA

La simulation possible par les processus et outils du BIM permet d'enrichir l'itération entre la conception et la fabrication avant même la construction. Le but est toujours d'éliminer les sources de gaspillage de matériels et de temps. La méthode DfMA peut réduire le temps de fabrication et d'installation des composantes et donc réduire le coût global du projet (Huang et Zhang, 2001). La collaboration est essentielle pour l'utilisation du DfMA (O'Rourke, 2013) et

les outils du BIM en facilitent la coordination. Le plan de développement du BIM pour le DfMA élaboré pour BCA-Singapour en 2016 par Bryden Wood préconise des pratiques pour chacune des six étapes du projet (figure 2.6)



Figure 2.6 Key BIM actions for the DfMA approach at the various stages
Adaptée de Bryden Wood – BCA (2016)

La figure 2.6 illustre les actions préconisées par ce guide pour chacune des six étapes du projet. Celles-ci sont regroupées en deux catégories : la première catégorie est celle du développement du projet en trois étapes, de l'avant-projet sommaire (APS ou *stage 1*) à la conception détaillée (*stage 3*), tandis que la seconde catégorie est celle de la réalisation et regroupe les étapes de pré-construction (*stage 4*), construction (*stage 5*) et livraison (*stage 6*). Pour chacune des six étapes, des « actions » sont préconisées pour peupler le modèle BIM, allant de la modélisation volumétrique en phase APS avec l'intégration des contraintes physiques et réglementaires du

site en parallèle de la stratégie d'adoption du BIM et du DfMA, à la vérification de la conformité du TQC à l'étape de livraison du projet (étape 6 – *stage 6*).

Stage 1 Project Brief Development	<ul style="list-style-type: none"> • Spatial definition of modules • Establishment of volumes • Define basic parameters (room, names, numbers, key dimensions, areas, volumes)
Stage 2 Concept Design Development	<ul style="list-style-type: none"> • Overall modules or assemblies with approximate quantities, size, shape, location and orientation • Basic architectural elements included • DfMA elements identified
Stage 3 Detailed Design Development	<ul style="list-style-type: none"> • Increased detail level with definition and modeling of all architectural, structural and MEP elements including DfMA components • Accurate specification, size, shape, function and location
Stage 4 Pre-Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Fully coordinated model with all disciplines integrated • Include supply chain input • All components modelled and parameters populated for scheduling • Model is suitable for fabrication and assembly
Stage 5 Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Model is updated to reflect construction process and design changes / modifications made on site • Model is fully coordinated and disciplines are integrated and current
Stage 6 Post completion	<ul style="list-style-type: none"> • Model is issued for facility operation and maintenance in « as built » and accurate state • Model is updated to reflect changes to the building overtime

Figure 2.7 Model development and data required at the various stages
Adaptée de Bryden Wood – BCA (2016)

La figure 2.7 définit les données qui devront peupler les modèles produits à chacune des étapes. Dès l'APS (étape 1) les paramètres de base doivent être intégrés (définition des espaces, leur étiquetage avec nom, surfaces ...). Le modèle de conception détaillé (phase 3) doit figurer les composants détaillés des lots architecturaux et techniques ainsi que les éléments objets du DfMA. Pour les étapes de la phase de construction, le premier modèle produit à l'étape de pré-construction (*stage 4*) doit être un modèle totalement coordonné, ce qui veut dire que les interférences entre les différentes disciplines ont été relevées, révélées et réglées et que la synthèse technique et la synthèse des lots architecturaux ont été réalisées avec succès. La réalisation est reflétée dans la simulation du modèle conformément à l'échéancier du projet.

En effet, les modèles BIM doivent être chargés des paramètres pour la conception et la coordination étroite (Eastman et al, 2009) et de données et d'attributs pour la fabrication. Ces modèles, qui comportent déjà des bibliothèques, peuvent à leur tour devenir des bibliothèques, des sources d'objets et de procédés reproductibles ultérieurement (Machado et al., 2016) tout en offrant des possibilités de personnalisation et de contrôle des paramètres de fabrication.

Les programmes gouvernementaux pour l'implémentation du DfMA et du BIM pour DfMA à Singapour et au Royaume Uni s'appuient sur des études de cas pour des bâtiments développés et construits selon ces deux piliers. Les résultats mesurés de ces pratiques sont les suivants (Bryden Wood et RIBA, 2013, Bryden Wood et BCA, 2016) :

- Réduction de 20 % à 60 % du temps de chantier : augmentation de la productivité et réduction des risques de retard grâce à un meilleur contrôle de l'environnement de travail (réduction des risques d'accidents, moins d'aléas climatiques qui peuvent causer des arrêts, etc.);
- Plus grande fiabilité de l'échéancier;
- Réduction de 20 % à 40 % des coûts de construction;
- Réduction de 70 % de la main-d'œuvre sur chantier : optimisation du nombre de travailleurs et des processus de mise en œuvre grâce à la simulation 4D et les études de constructibilité;
- Amélioration des conditions de santé et sécurité pour la main d'œuvre;
- Réduction des besoins en main-d'œuvre qualifiée sur chantier qui manque dans certains secteurs : la main d'œuvre en usine coûte moins cher que sur chantier et plus efficace donc meilleure productivité;
- Amélioration de la qualité de la construction suite à un contrôle qualité plus efficace et une meilleure mise en œuvre (réduction des défauts et reprises sur chantier de près de 70%);
- Réduction de l'impact sur l'environnement notamment grâce à la réduction de la pollution sur site suite au non recours à des liants;
- Réduction du nombre de QRT : le manque d'informations sur site relatives à la conception génère environ 8% des retards sur chantier (NEC cité par RIBA 2013);

- La flexibilité du bâtiment;
- Les possibilités de déconstruction du bâtiment et la réutilisation des composants (participer à une économie circulaire).

Ces points peuvent être regroupés en 4 grands thèmes qui sont récurrents dans les programmes d'amélioration de l'industrie de la construction :

- 1- Amélioration de la qualité ;
- 2- Réduction du coût du cycle de vie ;
- 3- Amélioration de performances environnementales ;
- 4- Amélioration des conditions de sécurité des équipes de chantier.

2.2.3 Cadre conceptuel

Chacun des quatre piliers que nous posons pour une définition de la Construction 4.0 pour le Québec met en exergue la nécessité d'une collaboration entre le manufacturier et la conception bien en amont du chantier. Ce déplacement d'un intervenant de la fin du cycle de développement du projet vers le début révèle la position centrale (ou de pivot) occupée par les approches intégrées (figure 2.8).

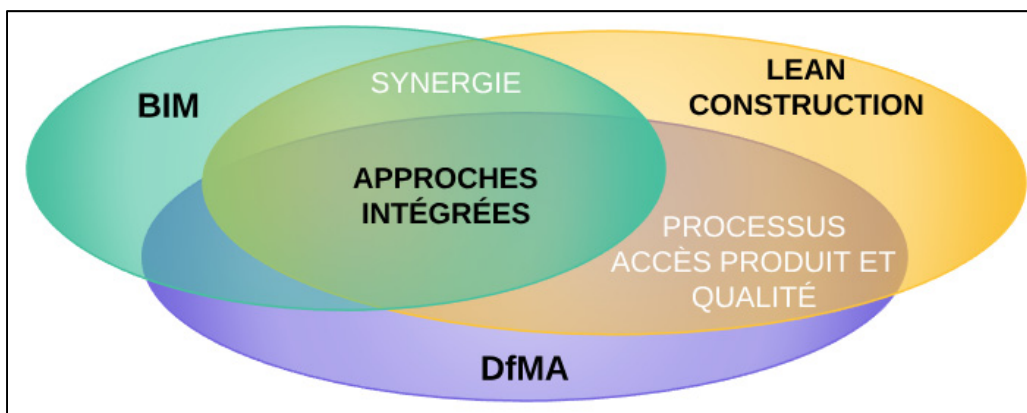


Figure 2.8 Cadre conceptuel proposé pour la Construction 4.0 au Québec

En effet, le DfMA souligne l'importance de la conception pour optimiser la réalisation de l'ouvrage notamment par la réduction des gaspillages. Cette démarche apporte une valeur à

l'ouvrage et rejoint les principes du Lean Construction. C'est donc dès l'étape de la conception que les bons processus doivent être définis ainsi que les outils nécessaires à leur application. La conception doit intégrer les contraintes et les spécificités des méthodes de livraison des projets dont la combinaison BIM-VDC est un « facilitateur »; c'est un moyen éprouvé pour la migration vers des approches intégrées et favoriser leur implémentation.

De ce qui précède, rappelons que la concentration des efforts en phase de conception du projet de construction aide au gel de la conception après une concertation pour les solutions envisagées. Cette pratique relève des approches intégrées et participe à la réduction des risques de changements en phase de construction. Par ricochets, cette démarche aide à l'élimination du gaspillage et rejoint les préconisations du Lean Construction pour la création de la valeur du le produit bâtiment. Il est question d'économie de matériaux mais aussi de temps.

Cette économie de temps, sans pour autant compresser le temps de conception, peut impliquer des chevauchements de phase, comme pour un processus de DfMA où les étapes de fabrication des composants est parallèle aux phases de préparation du site, par exemple. Ce qui se traduit sur le chantier par la nécessité d'une gestion rigoureuse de l'occupation des espaces par les différentes équipes et les espaces d'approvisionnement (flux et temps). La visualisation des séquences chantier grâce au BIM permet de réaliser différentes simulations avant d'opter pour la plus sécuritaire et plus économique. De plus, avec le BIM 4D et le BIM 5D, ce sont l'échéancier et la gestion des coûts qui peuvent être simulés afin d'être optimisés. Ainsi, nous prenons comme prémisse que la réunion des approches intégrées, du Lean Construction, du DfMA et du BIM sont les quatre éléments que nous proposons pour la composition de notre cadre conceptuel. L'étude de cas comparative au chapitre 4 nous permettra de confirmer ou infirmer tout ou partie de ce cadre.

2.3 La filière bois, catalyseur de la Construction 4.0

Nous avons vu dans les sections précédentes comment le manufacturier est sollicité plus tôt dans la chaîne de livraison du projet de construction, dès que les piliers de la construction 4.0

sont convoqués. Ce rôle est amplifié dans le cadre de la filière bois, plus spécifiquement dans le cas des structures en bois massif préfabriquées. Le recours à ces structures relève des processus spécifiques aux filières sèches. Nous les retrouvons dans l'utilisation de l'acier par exemple. L'avantage majeur du bois par rapport à l'acier c'est qu'il s'agit d'une ressource naturelle renouvelable et que, dès le départ, l'empreinte CO₂ du projet est réduite de par la quantité absorbée par les sections de bois. Au Québec, la charte du bois (2013) a engendré la VISION 2030 pour le développement de la productivité de la filière bois. Depuis 2017, des objectifs de développement de la productivité du secteur de la construction dans un environnement numérique font l'objet de grands chantiers du MESI. En Europe, c'est le projet de recherche et développement Lean Wood qui vise le développement de la filière bois et des outils et processus qui lui sont reliés. Ces programmes et initiatives autour du bois incitent à l'utilisation du numérique dans le processus de livraison de projets de structures préfabriquées en bois massif. Nous en présentons les particularités et leurs éléments concordants avec les quatre piliers que nous proposons pour la définition de la Construction 4.0.

2.3.1 Le retour du bois dans la construction au Québec

Le bois revient dans la construction au Québec, notamment avec la publication du guide *Bâtiments de construction massive en bois d'au plus 12 étages* (2105) qui place la province en tête des juridictions d'Amérique du Nord à édicter les règles de construction de ce type de bâtiments. Le bois lamellé-collé qui était, dans les années 1960, le seul composé permettant d'atteindre des portées importantes pour des poutres utilisées dans la construction de gymnases et autres lieux publics de grande échelle, est rejoint par le lamellé croisé (CLT pour *Cross Laminated Timber*) développé depuis les années 1990 en Autriche et en Allemagne. Ce produit possède une stabilité structurelle et des résistances mécaniques largement vérifiées en Australie où il est utilisé pour ses caractéristiques de résistance sismique ainsi que sa stabilité aux chocs d'explosions testée par le US Army Corp (Forest Business Network et CECOBOIS, 2017). Le CLT compose les planchers et les parois verticales structurelles de plusieurs réalisations exemplaires à travers le monde (Dovetail, 2016, FPI White Paper 2016). Aux côtés du GLT (*glue lamintaed timber* ou lamellé collé) et du PSL (*parallel strand lumber* ou bois à copeaux

parallèles) le CLT est le produit le plus utilisé au Canada notamment car il est le seul à figurer dans la norme CSA-O86 « Règles de calcul des charpentes en bois ».



Figure 2.9 Exemples de bois massif d'ingénierie (s.d.; n.r.)

Les résultats positifs de la R&D et des nouvelles technologies dans l'industrie de la construction se situent, entre autres, dans l'automatisation des processus d'assemblage et de fabrication de produits de bois d'ingénierie et ont contribué au développement d'autres échelles d'édifices construits en bois. Des avancées technologiques ont permis une évolution des structures pour la réalisation de constructions qui dépassent 12 étages (en Colombie-Britannique, voir chapitre 4), notamment grâce à la conception de structures hybrides et ce bien que les codes n'autorisaient pas la construction d'édifices de plus de 6 niveaux. La filière bois a cet avantage, par rapport aux autres filières de l'industrie de la construction, d'avoir un support additionnel des gouvernements pour la R&D (financement de la part du Conseil Canadien du Bois et de Ressources Naturelles Canada). Ces supports permettent le développement de produits et de procédés de préfabrication spécifiques à cette filière, sachant que pas moins de 58 PME québécoises sont concernées (Collot, Forgues et Rivest, 2016).

2.3.2 La VISION 2030 du Québec

La Vision 2030 est portée par le Bureau de Promotion des Produits du Bois du Québec (QWEB) et réunit FPInnovations, la Société d'Habitation du Québec (SHQ) et des organismes et entreprises de la filière bois. En 2015, l'idée majeure était de faire de la filière bois la filière exportatrice de systèmes de construction verte sur le thème du « sur-mesure de masse » que nous retrouvons dans l'industrie 4.0 (chapitre 1). En 2016, une feuille de route pour l'amélioration de la compétitivité des PME québécoises dans la préfabrication et l'export de leur savoir-faire vers les États-Unis et d'autres continents (FPInnovations, SHQ, RTHQ 2016) dessine quatre axes majeurs pour la Vision 2030. Trois de ces axes sont des recommandations pour la transition de l'industrie manufacturière québécoise vers le BIM : 1) l'instauration d'un environnement de projet favorable, 2) la mise en place d'un environnement technologique adéquat et 3) l'optimisation de la logistique et de l'installation au chantier : « Un plan d'action sera alors mis en place par la SHQ dans le cadre du projet VISION 2030 pour encourager le développement du BIM au sein de l'industrie du bâtiment préfabriqué en bois ». (Congrès Vision 2030, 2015). L'Étude d'opportunité du BIM pour la préfabrication de bâtiments résidentiels de Collot, Forgues et Rivest (2016, p.44) conclut que « l'approche du BIM permet de stimuler la collaboration et la productivité du projet, notamment durant la phase de conception » et c'est durant cette phase que tous les efforts doivent être concentrés afin d'optimiser la suite du processus. Le programme de recherche et développement LeanWood vient donc compléter cette vision puisqu'il se concentre sur l'ensemble du processus de livraison d'un ouvrage préfabriqué en bois massif.

2.3.3 LeanWood, programme de recherche européen

LeanWood est un programme de recherche européen mené par une vingtaine de partenaires académiques et industriels. L'objectif principal du programme est la coopération pour développer de nouveaux modèles et processus et pour la préfabrication en bois massif. Les principales caractéristiques du Lean sont appliquées à l'ensemble de la chaîne de production et aux processus de planification et de construction. Des méthodes et des modèles pour une transition optimale de la phase de planification à la phase de production sont réalisés grâce à

la collaboration entre les architectes et les ingénieurs, ainsi qu'à la planification des fabricants (LeanWood, 2017).

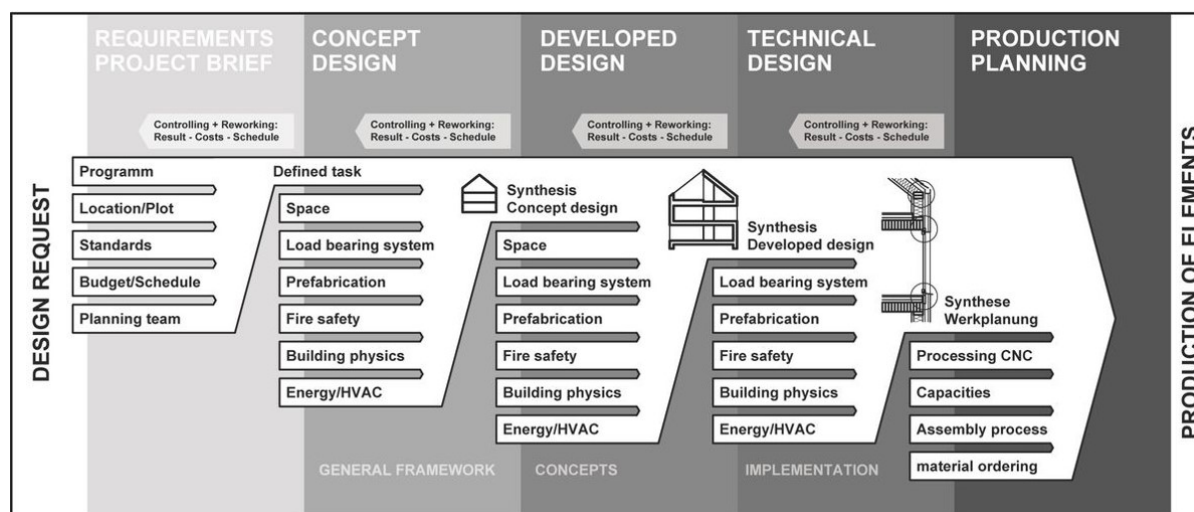


Figure 2.10 Le processus de Lean WOOD (2015)

Le programme définit une vue d'ensemble pour appuyer un processus de livraison de projet en bois massif préfabriqué le plus efficace possible (figure 2.10). Dans ce processus, la rétroaction et le contrôle sont des éléments clés et rejoignent les principes du Lean Construction et du DfMA. Aussi, les acteurs du projet sont impliqués en amont et collaborent activement tout au long des phases successives du processus de livraison de l'ouvrage. Cette collaboration est aussi exigée par le matériau *bois transformé* puisque la résistance au feu est une caractéristique qui est conférée au complexe CLT (ou autre complexe LVL par exemple) par son épaisseur ou le nombre de couches de bois qui le composent. Aussi, les professionnels de structure, le manufacturier et les consultants en code de sécurité incendie sont invités à se concerter dès les stades précoces de conception.

2.4 Discussion

Nous pouvons constater que les deux initiatives Visions 2030 et Lean Wood sont complémentaires bien qu'elles n'aient pas de liens à ce jour. C'est pourquoi il nous semble

pertinent de mettre en exergue dans quelle mesure leurs caractéristiques peuvent appuyer et contribuer à notre définition de la Construction 4.0.

Outre le matériau bois, ce sont les procédés et les technologies qui portent ces initiatives. Le CLT est en soi un produit DfMA (Bryden Wood, 2016) et les processus de développement et fabrication des bois d'ingénierie sont tributaires d'une fabrication numérique quelle que soit l'échelle du composant. Le cas du bâtiment *La Seine Musicale* (figure 2.11) réalisé en France en 2017 illustre comment le DfMA est préconisé pour la réalisation de structures complexes.



Figure 2.11 *La Seine Musicale* en cours de réalisation
Shigeru Ban et De Gastines Architectes, Usai et Stehling (2018)

Ce cas montre aussi que le bois est le matériau de prédilection pour alléger le poids de structures complexes (voir aussi chapitre 4) et leur permettre de développer un caractère auto-portant pour des formes libérées de l'angle droit. L'étude de cas portée par Usai & Stehling (2018) conclut qu'il est important de lier la modélisation préliminaire à la chaîne logistique et d'approvisionnement du projet, de lier la conception paramétrique aux conditions réelles d'installation et de finalisation de l'installation qui dictent les marges de tolérance à prévoir (voir également Kasbar, 2017) et la réalisation d'un prototype détaillé afin de parer le plus possible aux aléas du chantier. Enfin, ce projet ayant été conçu et réalisé suivant les processus

et techniques du DfMA et de fabrication numérique mais sans BIM, les auteurs insistent sur les facilités que son utilisation aurait apportées au projet (Usai et Stehling, 2018).

Si les études de cas menées de concert entre les laboratoires de recherche universitaire et leurs partenaires industriels conscients de l'importance de la R&D pour l'amélioration du secteur font état des changements souhaitables et des moyens d'y parvenir, il semble qu'une politique gouvernementale soit nécessaire pour provoquer ces changements ou au moins les amorcer⁴. Les exemples de l'Allemagne pour l'industrie 4.0 et du Royaume Uni pour l'amélioration du secteur de la construction montrent bien que seuls des engagements des gouvernements par le biais de programmes à long termes parviennent à réaliser ces changements. En plus de la Vision 2030 spécifique à la filière bois, le MESI a commandé un rapport pour *Accroître la performance de la filière québécoise que la construction par le virage numérique* (Poirier et al., 2018), qui corrobore la position du BIM comme clé de voute de ce virage. Ce rapport définit cinq axes et 65 recommandations. Le temps de ces programmes peut prendre la feuille de route comme support de discussion et de diffusion de la situation actuelle, de la situation attendue ou désirée, de la ligne du temps et des étapes importantes ou jalons, des incitatifs prévus et des partenaires impliqués. Prendre les mesures des objectifs permettrait une évaluation intermédiaire pour voir comment réorienter le chemin, le cas échéant. C'est l'objet de notre cinquième chapitre.

⁴ L'annexe I présente des initiatives et programmes notables autour du bois en Europe.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Notre étude de cas comparative de trois réalisations canadiennes souligne comment l'application de tout ou partie des piliers que nous avons désignés pour une définition de la Construction 4.0 a un impact sur la productivité et la place de l'innovation dans chacun des projets. Notre méthodologie combine deux volets : une recherche exploratoire, descriptive et explicative constitue le premier volet tandis que le deuxième volet utilise l'étude de cas comme support de recherche. Les quatre dimensions du cadre TOPiC (*Technology, Operation and Process in Context*) sont convoquées pour analyser les trois projets puisque l'équilibre de ces dimensions révèle le succès de l'implémentation du BIM.

3.1 Premier volet : recherche exploratoire, descriptive et explicative

La combinaison des démarches exploratoire, descriptive et explicative est préconisée pour l'étude des phénomènes nouveaux dont nous voulons approfondir la connaissance et l'expliquer (Dufour, 2010). En effet, nous sommes aux débuts de l'Industrie 4.0 et nous explorons quel serait le cadre de la Construction 4.0 au Québec. La démarche descriptive répond à notre souci d'approfondir notre connaissance du phénomène. En effet, le recours aux structures préfabriquées en bois massif conçues et réalisées grâce aux outils numériques est un phénomène nouveau dont nous souhaitons décrire les impacts sur la chaîne de livraison d'un projet de bâtiment multi-résidentiel (Lean Wood 2016, Le Roux 2016). La démarche explicative nous permet d'exposer les quatre piliers que nous proposons pour tester un cadre théorique et le confirmer ou l'infirmer afin d'élaborer nos recommandations. Nous les proposerons sous la forme d'une feuille de route pour l'adoption de la construction 4.0 au Québec.

La revue de littérature nous a permis d'établir le manque et de justifier notre démarche pour le combler. En effet, notre recherche de références scientifiques, académiques et auprès de

l'industrie nous a permis de dresser une liste des publications de référence et de constater que les seules utilisations du terme Construction 4.0 sont :

1. le programme du gouvernement de Belgique pour l'implémentation large du BIM dans l'industrie de la construction depuis 2015 (Digital Wallonie 2017);
2. le rapport *Digitization in the Construction Industry, Building Europe's Road to « Construction 4.0 »* du groupe Roland Berger édité en 2016, où la construction 4.0 est présentée comme la tendance de l'industrie de la construction à adopter les outils numériques pour la logistique des chantiers dans les trois pays germanophones (Allemagne, Suisse et Autriche);
3. l'amorce d'une définition de la Construction 4.0 dans les grands chantiers du MESI en 2017.

Aussi, notre approche pour la définition de la construction 4.0 pour le Québec et notre objectif de tracer une feuille de route pour son adoption concordent avec les démarches amorcées par le MESI en 2018 pour relancer la productivité de l'industrie de la construction par le virage numérique.

3.2 Deuxième volet : études de cas

L'étude de cas a été choisie comme méthode de recherche afin de valider ou infirmer les quatre piliers que nous posons pour une définition de la construction 4.0 pour le Québec et recueillir les meilleures pratiques dans le cadre de réalisations canadiennes qui ont utilisé tout ou partie de ces piliers.

3.2.1 Critères de sélection des projets

Les projets sélectionnés devaient recourir à au moins deux des quatre piliers que nous avons posés pour notre cadre conceptuel de la construction 4.0, à savoir : 1) les approches intégrées, 2) le Lean Construction, 3) le DfMA et la fabrication hors site, 4) le BIM. Les trois projets utilisent le DfMA déjà par leur utilisation du CLT qui est un produit DfMA (Bryden Wood, 2016). De plus, les projets devaient être l'objet de la conception -réalisation d'une structure de

bois massif préfabriquée puisque nous prenons la filière bois comme catalyseur de la construction 4.0 au Québec. Le souci d'un accès direct à l'information par l'observation épisodique des chantiers a limité le périmètre géographique de notre champ d'investigation au territoire canadien. Enfin, nous avons choisi ces trois réalisations car elles ont contribué à faire évoluer le code du bâtiment du Québec et du Canada depuis 2015 et elles ont été développées en parallèle des nouvelles normes de construction en bois massif d'ingénierie (Cecobois, FPInnovations et Forest Innovation Industry 2015, 2016, 2017).

3.2.2 Collecte de données

Les données qualitatives ont été récoltées lors d'entrevues semi-dirigées avec un ou plusieurs intervenants pour chaque projet tel que répertorié dans la figure 3.1. Les questionnaires des entrevues figurent à l'annexe II.

Projet	Date	Contexte entrevue	Intervenant-es	Rôle de l'entité
Projet 1	2017.03.29	Entrevue	Ing. bois	Membre du consortium Professionnel
			Représentant consortium NEB	Constructeur et installateur structure bois
Projet 2	2016.09.21	Chantier	Directeur construction	Donneur d'ouvrage constructeur exploitant
	2016.10.07	Entrevue	Directeur construction et VP Construction	Donneur d'ouvrage constructeur exploitant
	2016.10.19	Entrevue	Ing. bois chargé de projet	Professionnel constructeur installateur structure bois
	2016.10.25	Réunion	Directeur construction	Donneur d'ouvrage constructeur exploitant
			Chef de projet + Directeur de projet	Professionnel Architectes
			Ing. MEP	Professionnel MEP
			Ing. bois	Professionnel constructeur installateur structure bois
	2017.03.29	Entrevue	VP Construction	Donneur d'ouvrage constructeur exploitant
	2018.02.23	Entrevue	VP Construction	Donneur d'ouvrage constructeur exploitant
Projet 3	2016.10.20	Réunion	Chercheur 1	TOPICS LAB- UBC
	2017.03.17	Visio-Réunion	Chercheur 1	TOPICS LAB- UBC
	2017.03.24	Visio-Réunion	Chercheur 1	TOPICS LAB- UBC
	2017.06.13	Entrevue	Chercheur 2	TOPICS LAB- UBC
Les 3 projets	2017.05.03	Réunion Présentation	VP construction	Donneur d'ouvrage constructeur exploitant

Figure 3.1 Répertoire des entrevues et rôles des entités

Certaines entités ont plusieurs rôles simultanés : ainsi, pour les projets 1 et 2 nous retrouvons la même entité pour la conception de la structure bois et son installation, tandis que, pour le projet 2, c'est la même entité qui est à la fois donneur d'ouvrage, constructeur et exploitant. Cette simultanéité des rôles corrobore notre désignation des approches intégrées comme un des quatre piliers pour une définition de la construction 4.0 pour le Québec et nous y reviendrons avec plus de détails au chapitre 4 après avoir vu à la section 3.3 l'importance du

donneur d'ouvrage- exploitant pour l'orientation du projet et la définition de ses objectifs atteignables.

Les entrevues ont permis également de définir la nature des informations complémentaires qui nous ont été transmises sous forme de données quantitatives (fichiers numériques .pdf et .png) par courriel ou au moyen des plateformes de partage. Ces données sont répertoriées dans la figure 3.2 pour le projet 1 et dans la figure 3.3 pour le projet 2

DOCUMENT		Type de fichier
Aperçu du projet, les grandes lignes		
Organisation et planification du projet		
4	liste de tous les intervenants et missions	
Économie du projet, matériaux (évolution des coûts et quantités)		
Vue d'ensemble du bâtiment, réseaux et volumes (espaces techniques)		
15	captures d'écran de maquettes 3D de tous les réseaux (deux ou trois) captures d'écran avec exemple de détection des conflits (deux ou trois)	PNG
19	Plans : plan du s-sol plan du RdC plan d'étage courant plan de toiture 1 plan pour chaque typologie d'appartement	PDF
Intérieur du bâtiment, composition des éléments de structure, liaisons des structures mixtes, liaisons structure-enveloppe		
Extérieur du bâtiment, composition des éléments de structure, liaisons des structures mixtes		
Préfabrication et montage, éléments du produit fini		

Figure 3.2 Données quantitatives : Projet 1

Pour le projet 1, les données quantitatives (plans des niveaux et captures d'écrans des modèles numériques) nous ont permis de visualiser la structure du bâtiment et la hiérarchie de ses différents niveaux afin de comprendre la logique et les contraintes de la chaîne logistique pour l'approvisionnement du chantier.

DOCUMENT		Type de fichier
Aperçu du projet, les grandes lignes		
1	calendrier, dates jalons du projet	PDF
Organisation et planification du projet		
4	liste de tous les intervenants et missions	
5	calendrier du projet	PDF
6	phases du projet et durée (conception, soumissions, chantier)	PDF
Économie du projet, matériaux (évolution des coûts et quantités)		
9	tableaux des surfaces par unité et par niveau et pour l'ensemble du bâtiment	
10	évolution des coûts de construction au m2 (ou pi2) pour l'option bois et comparaison avec l'option béton qui était prévue	
Vue d'ensemble du bâtiment, réseaux et volumes (espaces techniques)		
14	captures d'écrans des maquettes de structure béton (socle du bâtiment, soubassement et fondations)	PNG
15	captures d'écran de maquettes 3D de tous les réseaux (deux ou trois) captures d'écran avec exemple de détection des conflits (deux ou trois)	PNG
17	coupe longitudinale de l'ensemble du bâtiment : niveaux et altimétries, circulations verticales,	PNG
19	Plans : plan du s-sol plan du RdC plan d'étage courant plan de toiture 1 plan pour chaque typologie d'appartement	PDF
Intérieur du bâtiment, composition des éléments de structure, liaisons des structures mixtes, liaisons structure-enveloppe		
20	plan et coupe des noyaux de circulations (escaliers et ascenseurs) avec informations et détails en dessin du traitement au feu	PDF
21	plan de calepinage des panneaux préfa bois (planchers et voiles)	PDF
22	coupe détail qui indique la composition de chaque type de plancher bois présent dans le bâtiment avec indication des différentes épaisseurs et des dimensions des panneaux	PDF
23	composition des différents types de colonnes + dimensions	PDF
24	dessins détails des connexions bois / béton	PDF
25	détail des liaisons et connexions entre les différents types de panneaux bois	PDF
26	détail de liaison escalier métal et plancher bois	PDF
Extérieur du bâtiment, composition des éléments de structure, liaisons des structures mixtes		
27	élévation principale du bâtiment avec niveaux et altimétries	PDF
28	élévation d'un module de façade	PDF
29	détail en coupe d'un module de façade	PDF
30	détail en coupe : jonction panneau de façade inclue fenêtre et jonction avec plancher bois	PDF
31	configuration des gaines techniques	PDF
33	coupe détail de la composition de la toiture	PDF
Préfabrication et montage, éléments du produit fini		
34	dessins d'atelier pour la préfabrication	PDF

Figure 3.3 Données quantitatives : Projet 2

Pour le projet 2, les données quantitatives (documents graphiques 2D et captures d'écrans des modèles numériques) nous ont permis de :

- visualiser la structure du bâtiment et la hiérarchie de ses différents niveaux afin de comprendre la logique et les contraintes de la chaîne logistique pour l'approvisionnement du chantier (comme pour le projet 1);
- visualiser les composants préfabriqués et comprendre leur position dans le bâtiment.

Nous avons complété ces données par les informations recueillies en assistant à des conférences sur chacun des bâtiments et/ou en participant aux visites de chantiers (figure 3.4). En effet, chacun des projets ayant reçu des subventions fédérales et/ou nationales et visant une certification LEED, il y a une incitation à la diffusion pédagogique auprès du public par le biais de conférences gratuites et/ou des visites gratuites des chantiers.

Projet	Type d'évènement	Date	Organisation et Présentateur
Projet 1	Conférence	18-oct-17	ISM et Université McGill conférence de Simon Gallagher, Ing. NORDIC
	Visite de chantier	03-mai-17	CECOBOIS NEB
Projet 2	Visite Libres	1 et 2 8 et 9 avril 2017	CECOBOIS SOTRAMONT
Projet 3	Conférence	22-févr-17	ISM et Université McGill conférence de Tania Luthi, Ing. Fast + Epp

Figure 3.4 Événements publics pédagogiques autour des trois projets

La figure 3.4 répertorie l'ensemble des diffusions publiques auxquelles nous avons pris part, que ce soit les visites de chantier encadrées par CECOBOIS ou les conférences organisées par les Ingénieurs en Structure de Montréal (ISM) dans les amphithéâtres de l'université McGill.

Nous avons apporté un autre niveau de complément à nos données par l'étude des publications sur chacun des projets par des organismes impliqués dans leur développement tels que FPIInnovations, CECOBOIS, British Columbia Forest Innovation Industry (BCFII). Le laboratoire TOPICS de UBC a suivi l'évolution du projet 3. Deux rapports de recherche en

rendent compte ainsi que deux mémoires de maîtrise sans oublier des articles de conférence (Poirier et al., 2016, Fallahi et al., 2016, Kasbar 2017). Nous avons étudié l'ensemble de ces documents.

3.3 Analyse suivant le cadre TOPiC

Nous avons procédé à l'analyse des données quantitatives et qualitatives en fonction des 4 dimensions du cadre TOPiC (Technology, Organization, Process in Context).

C'est d'abord le cadre TOP qui a été développé afin de procéder à une évaluation cohérente des projets BIM dès 2007 par Staub-French et Khanzode. Il fait écho au cadre POP de Fischer et Kunz (section 2.1.4) où le produit correspond à la technologie (Staub-French, Forgues, Iordanova et al., 2011). La dimension du contexte vient compléter ces trois dimensions depuis 2014 (Poirier et al., 2014, Poirier, 2015) pour former le cadre conceptuel TOPiC : *technology, organization, and process in context*. Le cadre TOPiC est appliqué par des laboratoires de recherche tels le GRIDD (ÉTS) et TOPICS LAB (UBC) pour des études de cas, unique ou multiple, de livraison de projets avec les outils, technologies et processus du BIM. Ce cadre permet d'appréhender de manière complète et équilibrée les différents aspects du projet afin d'en répertorier les meilleures pratiques (Staub-French, Forgues, Iordanova et al., 2011). Étant donné l'ampleur de la dimension numérique dans la construction 4.0, ce cadre qui a été dessiné à l'intention des projets BIM, est applicable à notre étude. Nous expliquons la portée de chacune des dimensions et nous répertorions dans le tableau 3.1 les intervenants du projet impliqués dans chacune des dimensions ainsi que leurs rôles.

3.3.1 Contexte

Le contexte aborde les caractéristiques du site de chacun des projets, ses aspects réglementaires, les contraintes d'exploitation et d'insertion du projet dans son environnement immédiat et les répercussions sur le processus de livraison du projet suivant les processus collaboratifs (Poirier, Forgues, Staub-French, 2014). Nous évoquons également les contraintes de desserte pour l'approvisionnement du chantier et pour les occupants une fois le bâtiment

livré. En amont, nous aurons décrit le contexte de l'émergence de l'idée du projet, les attentes et objectifs du donneur d'ouvrage et ses premiers partenaires lors des phases préliminaires du projet.

Tableau 3.1 Points abordés dans l'étude de cas comparative
selon les dimensions du cadre conceptuel TOPiC.

Adapté et traduit de Staub-French, Forgues, Iordanova et al. (2011), Poirier et al., (2015)

Dimension	Qui ?	Quoi ?
Technologie	Donneur d'ouvrage	Spécifie des exigences claires et réalisables
	Donneur d'ouvrage + Équipe de projet	Définit l'utilisation du modèle, sa portée et le niveau de détail nécessaire à l'atteinte des objectifs
Organisation	Donneur d'ouvrage	Révisé la structure organisationnelle (gestion de projets) et la répartition des coûts Encourage et participe à l'implémentation des incitatifs adéquats pour le BIM collaboratif
	Donneur d'ouvrage + Équipe de projet	Nécessité de l'implication précoce de toutes les disciplines clés
Processus	Donneur d'ouvrage + Chaîne d'approvisionnement	Définition des objectifs communs conformément aux objectifs de la réalisation
	Chaîne d'approvisionnement	Élaboration conjointe du plan d'exécution BIM et définition claire des rôles et responsabilités des différentes disciplines ainsi que les processus et matrice des échanges
Contexte	Tous	Caractéristiques physiques du site, cadre réglementaire, préparation de l'industrie, contexte d'affaires

3.3.2 Technologies

La dimension de la technologie porte sur les logiciels et plateformes utilisées en technologies de l'information et du numérique afin d'assurer l'interopérabilité nécessaire à l'approche des pratiques intégrées. Le choix de ces technologies est aussi défini par les donneurs d'ouvrages en fonction de leur souhait de disposer de l'information pour leur exploitation de l'ouvrage réalisé. Ainsi, cette dimension a une influence sur le niveau de l'information apportée au modèle, donc sur le niveau de maturité du BIM (cf. section 2.2.2). Cet aspect relève du processus et de l'organisation que nous exposons ci-après.

3.3.3 Organisation

L'organisation porte sur la structure organisationnelle du système de livraison de projet suivant les processus collaboratifs (voir chapitre 2), soit les rôles et les responsabilités et le degré de collaboration entre les différentes disciplines. L'organisation dépend du système de livraison de projet qui dicte l'implication des différents acteurs aux différentes étapes (voir section 2.2)

3.3.4 Processus

Le processus décrit la collaboration des équipes du projet et les mécanismes et actions pour la génération de l'information et des éléments nécessaires à la livraison du projet avec le souci de la productivité. Les itérations sont soulignées ainsi que, le cas échéant, la centralisation des données pour une diffusion efficace de l'information.

3.4 Validation des données et de l'étude

L'innovation et la productivité recensées et répertoriées pour les trois cas ont permis de procéder à une première validation des données. Elles sont exposées dans le chapitre 4. La seconde validation a fait l'objet d'un rapport élaboré pour la SHQ en mai 2017. Les points saillants de ce rapport sont repris dans les chapitres 4 et 5, qui traitent successivement de

l'étude de cas comparative et de la feuille de route proposée pour l'adoption de la Construction 4.0 au Québec.

CHAPITRE 4

DES CRITÈRES DE LA CONSTRUCTION 4.0 DANS DES RÉALISATIONS CANADIENNES

Notre étude comparative traite de trois réalisations canadiennes récentes de programmes multi-résidentiels avec une structure de bois massif préfabriquée d'au moins huit étages. Ces trois réalisations sont :

- **Origine** situé à Pointe-aux-Lièvres, près de Québec,
- **Arbora** situé à Montréal,
- **Brock Commons**, plus largement désigné par Tall Wood House (TWH), situé sur le campus de l'Université de Colombie Britannique (UBC) à Vancouver.

Ces trois ouvrages répondent aux normes du code du bâtiment du Canada en vigueur depuis 2015, dont ils ont contribué à faire évoluer le cadre. En effet, le développement de la conception et de la fabrication de leurs éléments intervenait en même temps que le développement des cadres réglementaires du Québec et de la Colombie-Britannique pour l'utilisation du bois dans les programmes multi-résidentiel ainsi que les normes et exigences de sécurité incendie sur le chantier et pendant l'exploitation des bâtiments.

Chacun des projets a sollicité au moins trois des quatre piliers que nous avons désigné pour une définition de la Construction 4.0 pour le Québec. Nous exposerons comment chacun des projets a développé des solutions de productivité et des innovations techniques pour répondre aux défis rencontrés autour de la structure en bois massif préfabriquée. Nous verrons comment :

- Les approches intégrées, le BIM et le DfMA utilisés sur Origine ont participé au développement de la conception et à la création de solutions innovantes.
- Le BIM, le DfMA et l'évolution des approches intégrées ont participé au développement d'Arbora et leur rôle dans les innovations observées sur ce projet.
- TWH a utilisé chacun des quatre piliers : les approches intégrées, le Lean Construction couplé au DfMA et le BIM pour optimiser la productivité et développer l'innovation.

Les principales caractéristiques des projets sont répertoriées ci-dessous (tableau 4.1) à savoir la composition des bâtiments (nombre de niveaux et d'unités résidentielles, surfaces) les coûts, les certifications visées et le cadre réglementaire.

Tableau 4.1 Principales caractéristiques des projets

	ORIGINE	ARBORA	UBC
Nombre de bâtiments	1	3	1
Nombre de niveaux et hauteur	13 niveaux dont 2 en béton 40.9 m de hauteur	2 bâtiments de 8 niveaux avec 1 niveau en béton 1 bâtiment de 9 niveaux tout en bois	18 niveaux dont 1 en béton 53 m de hauteur
Nombre d'unités résidentielles	92	434	305 (404 lits)
Surface totale	NC	51 515 m ²	15 400 m ²
Coût	25 M \$	130 M \$	51,5 M \$
Certifications visées en conception	LEED	LEED OR	LEED OR
Certification sous approbation en construction	LEED ARGENT	LEED PLATINE	LEED OR
Cadre réglementaire	LEED Code du bâtiment du Québec Code du bâtiment du Canada	LEED Code du bâtiment du Québec Code du bâtiment du Canada	LEED ASHRAE 90.1-2010 Code du bâtiment de CB Code du bâtiment du Canada Code de sécurité incendie de CB

Le projet ARBORA visait au départ une certification LEED OR. Nous verrons dans la section qui lui est consacrée que c'est finalement la certification LEED PLATINE qui est envisagée

en cours de construction. C’est aussi le seul projet qui comporte trois parties (immeubles) ; nous verrons comment les pratiques et usages autour des quatre piliers pour la Construction 4.0 ont évolué pour chaque partie.

4.1 1^{ER} Projet : Origine (Pointe-aux-Lièvres)

Le projet Origine est situé dans un éco-quartier de Pointe-aux-Lièvres. Il s’agit d’une tour de 92 condos répartis sur treize niveaux, dont douze en bois massif. Elle a été conçue pour être en 2015 l’une des plus hautes tours de programme multi-résidentiel au monde.

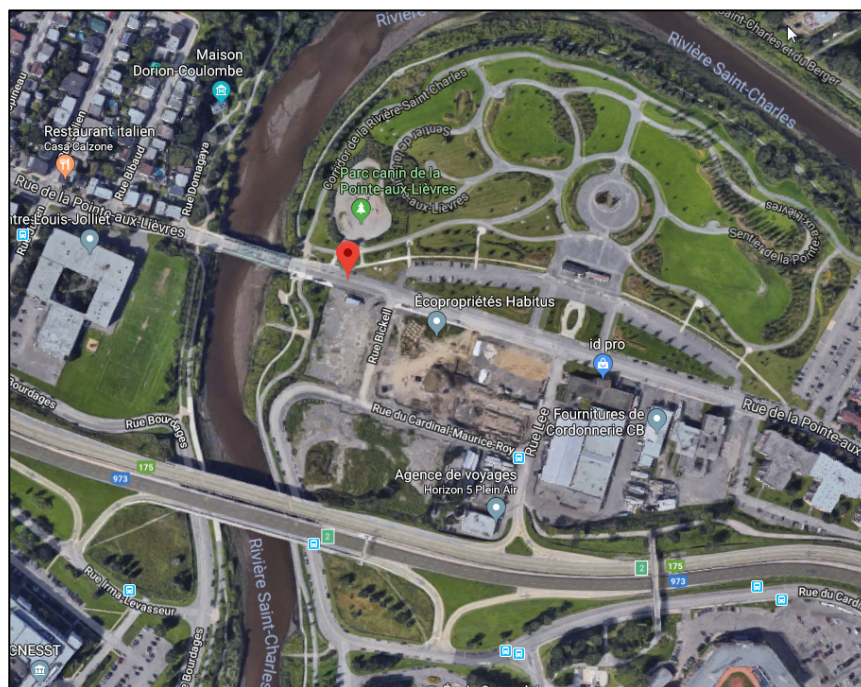


Figure 4.1 Site de Origine dans le quartier Pointe-aux-Lièvres

4.1.1 Contexte

4.1.1.1 Caractéristiques du site et cadre réglementaire

L’éco-quartier Pointe-aux-Lièvres se développe autour de trois projets pour répondre à la volonté de la ville de Québec de redonner vie à un ancien secteur industriel au nord de Nouvo-

Saint-Roch. Le site nécessitait une décontamination ; elle a entièrement été prise en charge par la ville. Le site étant excentré (figure 4.1) et en cours de développement, il n'y a pas eu de contraintes particulières liées à la circulation des véhicules pour l'approvisionnement du chantier. Les espaces nécessaires pour la manœuvre des grandes sections préfabriquées qui composent la structure étaient disponibles aux abords du futur bâtiment. Les conditions de sol ne permettaient pas la construction d'un bâtiment du gabarit et du poids d'Origine en utilisant le béton, à moins de construire des fondations conséquentes et coûteuses.

4.1.1.2 Le choix du bois

Le choix du bois est dicté par plusieurs facteurs :

- Le projet est un élément du développement de l'éco-quartier, le bois est donc une option naturelle pour sa faible empreinte carbone sur tout le cycle de vie du projet.
- Les conditions de sol étant défavorables à l'utilisation du béton, le choix du bois pour réaliser la structure allège le poids total du bâtiment et permet des fondations moins importantes et moins coûteuses que pour une construction en béton. Aussi, le poids total du bâtiment en superstructure est équivalent à celui de la masse de terre excavée pour ses fondations. Il n'y a donc pas de charges supplémentaires pour le sol.
- Enfin, le dernier facteur et non le moindre est l'organisation du consortium de ce projet. En effet, NEB est composé entre autres de NORDIC structures, bureau d'ingénierie du bois (voir section 4.2.1).

4.1.2 Organisation

4.1.2.1 Équipes du projet

NEB est le consortium du projet. Son organisation est la suivante est organisé autour de :

- 1- Yvan Blouin Architecte,
- 2- EBC entreprise de construction québécoise (bâtiment, génie-civil et mines),
- 3- NORDIC Structures, bureau d'ingénierie du bois et entreprise de fabrication et installation de structure en bois massif préfabriquées. NORDIC est connectée aux

chantiers de Chibougamau et, de ce fait, a la spécificité de posséder sa propre chaîne indépendante de fabrication et d’approvisionnement, directement reliée à son bureau d’ingénierie.

En plus des membres de ce consortium, d’autres intervenants ont été impliqués pour la structure en béton, la MEP, ainsi que les experts consultés pour la sécurité incendie, Technorm et GHL (voir tableau 4.2 où (c) indique les membres du consortium NEB qui est le promoteur du projet).

Tableau 4.2 Équipes du projet Origine (source CECOBOIS 2018)

Promoteur	Consortium NEB
Architecture (c)	Yvan Blouin
Ingénieur bois (c)	NORDIC
Génie Civil	Groupe Conseil SID inc.
MEP	Genecor Experts-Conseils
Consultants en code	Technorm et GHL Consultants
Entrepreneur Général (c)	EBC
Monteur de la charpente	Les constructions FGP
Laboratoires	FPInnovations et Conseil National de Recherches du Canada

Les équipes réunies autour du projet devaient répondre aux exigences de la construction d’une tour complète en bois massif visant une certification LEED. Des charrettes de conception intégrée étaient organisées avec les différents corps de métiers, à une fréquence hebdomadaire. Elles ont permis l’optimisation de la trame structurale en CLT à laquelle l’architecte a adapté la configuration des logements.

4.1.2.2 Financement du projet

Le manque d'information des compagnies d'assurance au sujet du bois massif comme matériau de construction a incité une augmentation des primes. Il a fallu rassurer et informer les interlocuteurs des résultants des expérimentations au feu et des avis favorables émis par les pompiers. L'accueil du public, plus aguerri au sujet des constructions écologiques en bois, a favorisé les ventes de condos. Enfin, suite à son évolution, le projet a été jugé apte à bénéficier du financement de RNCan par le biais de l'Initiative de démonstration de bâtiments en bois de grande hauteur (IDBBGH), aux côtés de Brock Commons à Vancouver (projet 3).

4.1.3 Technologies

Les technologies du BIM et du numérique ont été utilisées dans ce projet pour la fabrication numérique des éléments de la structure en bois massif. L'utilisation du logiciel CadWork, spécifique au dessin et à l'usinage des pièces de bois, a permis la fabrication numérique à partir des fichiers des dessins d'atelier directement reliées aux machines de fabrication en usine (figure 4.2).



Figure 4.2 Machine à commande numérique à Chibougamau
Tirée de NORDIC et CECOBOIS (2018)

Les maquettes de structure 3D modélisées sur CadWork ont permis de visualiser les séquences de montage de la structure de bois (figures 4.3 et 4.4)

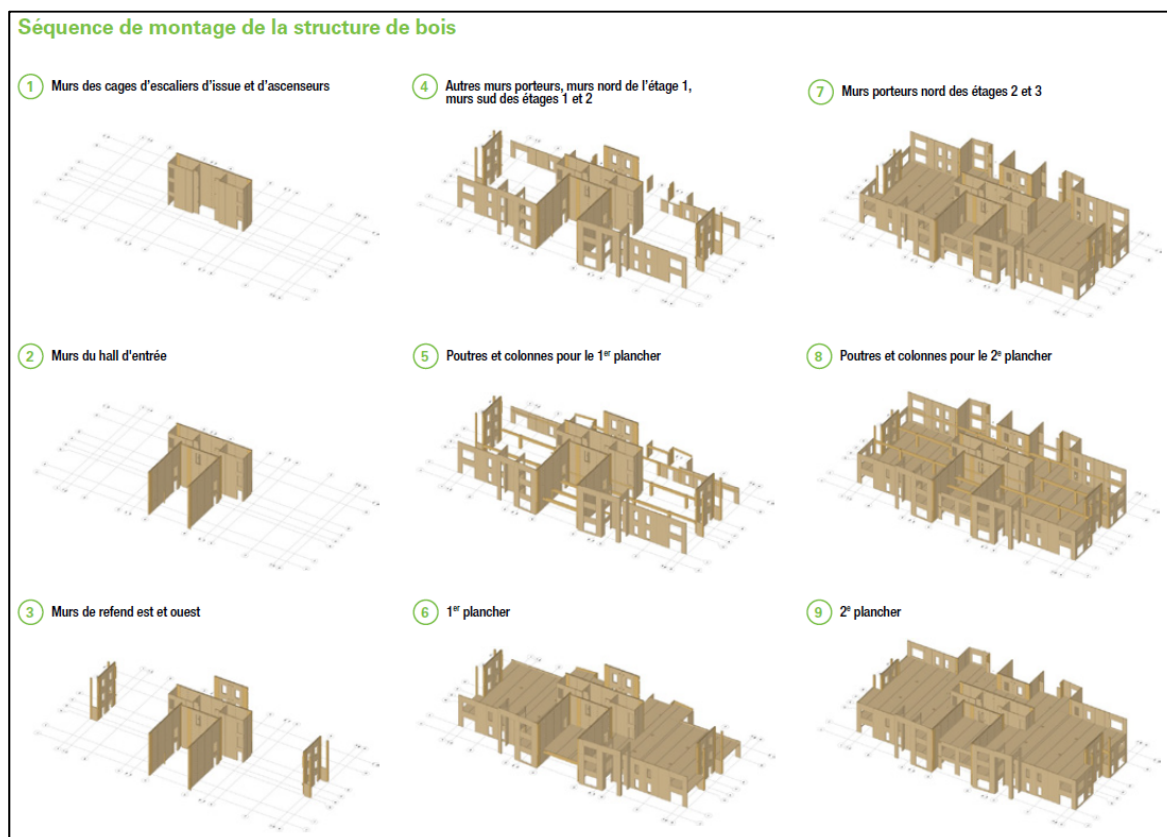


Figure 4.3 Visualisation 3D des séquences de montage 1 à 9 de la structure bois (NORDIC et CECOBOIS (2018))

Cette première figure de montage représente la progression des séquences 1 à 9, du niveau zéro jusqu'au plancher du niveau 2 : on commence par les cages des circulations verticales (escaliers et ascenseurs) qui sont le noyau du bâtiment puis on érige les murs de refend latéraux et les autres murs porteurs du niveau supérieur (séquence 3 et 4). Les poutres et colonnes du premier plancher sont mises en œuvre pour supporter le plancher du niveau 1. On comprend ainsi la logique structurelle et la progression de l'assemblage qui ressemble à un mikado géant.

Cette seconde figure illustre les séquences 10 à 15 pour les niveaux 3 à 6. Les autres niveaux supérieurs suivent la même logique et la séquence 16 représente la séquence complète.

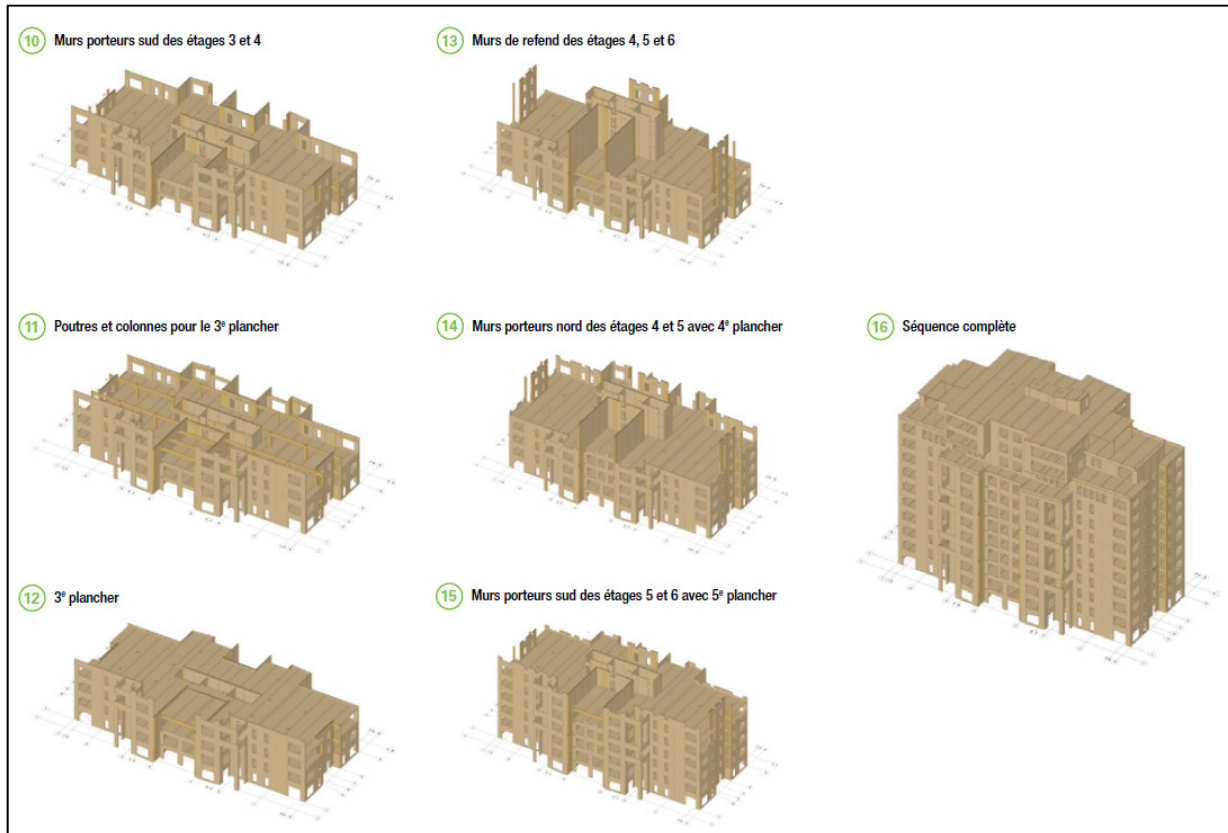


Figure 4.4 Visualisation 3D des séquences de montage 10 à 16 de la structure bois NORDIC et CECOBOIS (2018)

4.1.4 Processus

Les sous-traitants ont dû être formés tout au long du projet et ce dès les premières étapes. L'organisation en consortium conception / réalisation / fabrication a créé un cadre favorable pour le développement des approches intégrées avec une implication du manufacturier au niveau de la conception (voir 4.1.2) avec des échanges itératifs qui ont abouti à l'optimisation de la structure. Sur le chantier, c'est une autre phase de formation qui a eu lieu, pour prendre en charge la sécurité des intervenants notamment lors des manutentions.

Les éléments de la structure sont préfabriqués et découpés avec une précision millimétrique grâce aux machines numériques. Comme pour une charpente métallique, elles arrivent sur

chantier avec des numéros et des références qui indiquent leur position dans la structure globale. C'est ici que se cristallise l'importance de la chaîne d'approvisionnement et son lien avec la fabrication : les pièces doivent être chargées sur les plates-formes de transport de manière à être déchargées selon leur ordre d'installation une fois livrées sur le chantier. Ceci permet un gain de temps et a un impact direct sur la productivité du projet.

4.1.5 Productivité et Innovation

La durée totale du chantier est de 16 mois. Le temps de montage de la structure en bois est de 5 mois (décembre 2016 à avril 2017). Les équipes du projet ont mentionné qu'un chantier équivalent réalisé avec une structure en béton aurait nécessité un temps de chantier supplémentaire de 4 à 6 mois. La formation des équipes a permis une amélioration de la cadence de montage de la structure : il a fallu trois mois pour monter sept planchers au début du chantier et seulement un mois pour monter cinq planchers en fin de chantier.

Il a fallu fabriquer des panneaux de CLT de 9 plis, pour la première fois à Chibougamau. Ceci créait une difficulté dans le temps de montage d'un panneau du fait du délai de réaction de la colle ; ce temps est incompressible. Les équipes ont réussi à optimiser les temps de montage et à réduire de plus de 40% le temps nécessaire à l'assemblage des panneaux de CLT.

L'étude diffusée par FPI, CECOBOIS et CWC au printemps 2018 répertorie des défis rencontrés sur le développement et la mise en œuvre de la structure en bois massif du projet Origine et les solutions innovantes apportées par les équipes. S'il est le bâtiment le plus haut actuellement en bois massif au Québec, c'est parce que les équipes ont su s'affranchir de noyaux en béton armés pour prodiguer la résistance structurelle nécessaire pour stabiliser cette tour de 92m de hauteur. La séquence structurelle en 3D (figure 4.5) montre le principe de fonctionnement.

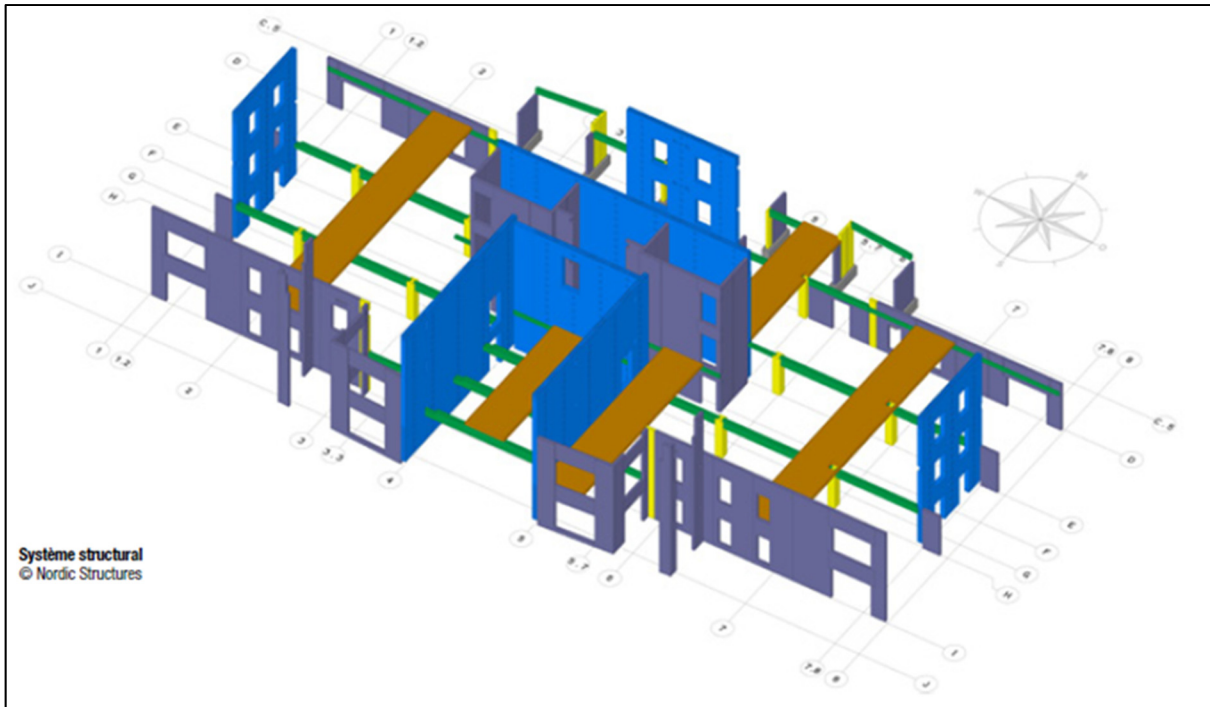


Figure 4.5 Représentation du modèle 3D des éléments principaux du concept structurel
Tirée de NORDIC et CECOBOIS (2018)

Les éléments en bleu représentent les murs de refend principaux en CLT. Les planchers (en marron) jouent le rôle de diaphragme dans leur transfert des charges latérales vers les murs. Les éléments en violet représentent les porteurs en CLT qui accueillent et résistent aux charges gravitaires. Les poutres (en vert) sont supportées par les colonnes (en jaune) qui leur permettent de traverser le bâtiment sur toute sa longueur. Ce sont des éléments en lamellé-collé qui viennent compléter le système de résistance aux charges gravitaires. Pour arriver à cette solution, des tests ont été menés dans les laboratoires de FPI pour développer les solutions de résistance aux charges latérales (figure 4.6).



Figure 4.6 Mur de refend mis à l'essai en laboratoire chez FPI
Tirée de CECOBOIS et FPI (2018)

4.2 2^e Projet : Arbora (Montréal)

Ce projet multi-résidentiel est situé au cœur du Quartier de l'Innovation à Griffintown, au sud-ouest de Montréal (Fig. 4.7). Il est composé de trois bâtiments répartis sur 8 niveaux qui occupent un ilot en triangle. En 2017, ARBORA était le plus grand complexe résidentiel au monde (51 515 m²) avec une structure CLT.



Figure 4.7 Localisation de ARBORA, Quartier de l'Innovation, Griffintown

4.2.1 Contexte

4.2.1.1 Caractéristiques du site et cadre réglementaire

Autrefois friche industrielle, le site a dû être décontaminé. La situation en centre-ville rend l'accès difficile pour l'approvisionnement du site. Des coûts importants ont été engendrés pour bloquer momentanément certaines rues et réserver des places de stationnement pour les équipes de chantier. Bien que la structure en bois ait allégé le poids total du bâtiment, il a fallu creuser dans la roche pour dégager le volume requis pour les deux niveaux de sous-sol en béton

destinés au stationnement et pour les fondations en béton. Au total, 434 unités de condos, maisons urbaines et appartements locatifs sont situés dans les bâtiments organisés autour d'un jardin et une piscine pour les résidents. Le tableau ci-après reprend les principales informations du projet.

Tableau 4.3 Contexte du projet

Nombre de bâtiments	3
Étages	Phase 1 et phase 3 : 1 étage en béton + 7 étages en bois massif
	Phase 2 : 9 étages en bois massif
Unités	434
Surface	51 515 m ²
Coût Total	130 M \$
Certification	LEED PLATINIUM
Cadre régulateur	LEED, Code du bâtiment du Canada, Code du bâtiment du Québec

Le coût total du bâtiment révélé est de 130 M\$ pour un total de 51 515 m² soit une moyenne de 2500 \$/m². Nous verrons dans les prochaines sections les spécificités de chaque phase.

4.2.1.2 Le choix du bois

Offrir un bâtiment en bois massif dans cette zone où la concurrence dans l'immobilier est très forte permet au promoteur de se démarquer et d'offrir une alternative attractive pour satisfaire une clientèle différente, consciente des enjeux du développement durable. De plus en plus, les avantages des caractéristiques techniques du bois massif garantissent (Tall to Taller Wood Buildings Congress, 2016) :

- Une meilleure résistance au feu ;
- Une meilleure acoustique ;
- Une meilleure résistance sismique et structurelle ;
- Une meilleure étanchéité qui permet d'optimiser l'inertie du bâtiment.

De plus, le coût est de 2500\$/m² en moyenne pour ce bâtiment en bois. Le coût d'un bâtiment équivalent en béton est inférieur de quelques centaines de dollars.

4.2.2 Organisation

4.2.2.1 Équipes du projet

Le projet est constitué de trois bâtiments dont chacun représente une phase indépendante, soit le bâtiment Arbora 1 pour la phase 1, le bâtiment Arbora 2 pour la phase 2 et le bâtiment Arbora 3 pour la phase 3 (figure 4.8).

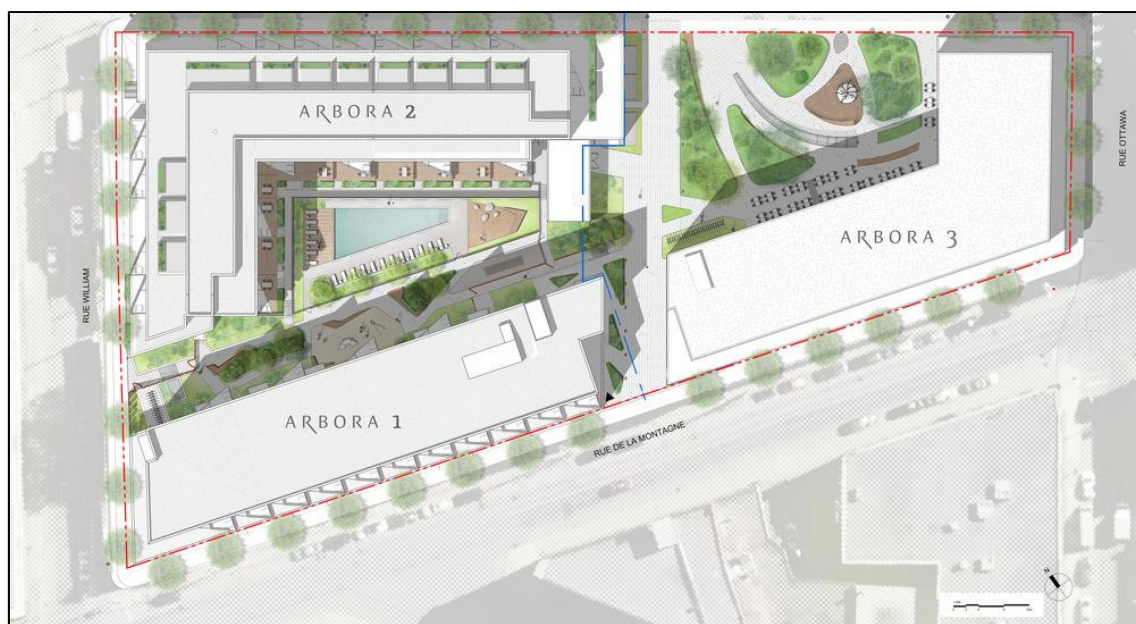


Figure 4.8 Plan masse du projet Arbora
où chaque bâtiment représente une phase du projet (site internet ARBORA)

Aussi, des changements et des évolutions sont intervenus notamment parmi les participants (voir tableau 4.5). Il y a eu un changement d'architecte entre la phase 1 et la phase 2.

Tableau 4.4 Équipes du projet ARBORA

Promoteur constructeur	SOTRAMONT GLS GESDEV
Architecture	Lemay + CHA (phase 1) Provencher-Roy (phase 2 et phase 3)
Design intérieur	Humà Design
Ingénieur bois	NORDIC
Ingénieur béton	Les Consultants LGL
Ingénieur civil	Equiluqs Ingénierie
MEP	Bouthillette Parizeau
Acoustique	MJM Conseillers en acoustique
Consultants enveloppe du bâtiment	PTVD inc.
Consultants LEED	Eco-Habitation
Consultants Code du bâtiment	CLEB FPInnovations CECOBOIS
INTEGRATEUR BIM	Phase 3 uniquement

La structure mixte (figure 4.9) a nécessité la présence d'ingénieurs civil et ingénieurs béton aux côtés des ingénieurs bois.



Figure 4.9 Photo du chantier Arбора 1 – Phase 1

4.2.2.2 La formation du manufacturier

Afin de parer au manque de préparation de l'industrie quant aux procédés constructifs des complexes de façades et de planchers développés sur ce projet, SOTRAMONT a fabriqué des prototypes à l'échelle 1 (figures 4.10 et 4.11).



Figure 4.10 Prototype du complexe plancher bois-béton



Figure 4.11 Prototypes des complexes des parois verticales
(murs intérieurs avec isolants et murs extérieurs avec isolants et bardages)

4.2.3 Technologies

4.2.3.1 Les exigences du donneur d'ouvrage

L'utilisation du BIM est une volonté de SOTRAMONT qui est donneur d'ouvrage et constructeur-promoteur. SOTRAMONT est soucieux d'utiliser les nouvelles technologies de la construction dans ses réalisations car elles facilitent la gestion de projet et la coordination des équipes, l'économie des coûts de construction et la gestion du cycle de vie de l'ouvrage.

Le projet se divise en trois bâtiments et chacun des bâtiments représente une phase du projet (voir section 4.2.4 Processus). Pour la première phase, le donneur d'ouvrage a formé ses équipes sur les logiciels BIM de Autodesk Revit et Navis Works Manage. L'ingénieur structure bois qui est aussi l'installateur a travaillé sur Cadwork (figure 4.12)

SOFTWARE	USE
REVIT	Design (architecture, steel structure, concrete structure, MEP)
CADWORK	Mass-timber structure, shop drawing, mass-timber fabrication drawing
Navisworks	Coordination

Figure 4.12 Logiciels utilisés pour le projet Arbora

En complément de ces logiciels, des plates-formes collaboratives des produits Autodesk ont été utilisées, telle que BIM Glue et BIM 360 (figure 4.13)

Building	Phase and time	Technology
Phase 1	Phase 1 (2016/ 2017)	BIM 1 & 2 – Glue – Cadwork & CNC
Phase 2	Phase 2 (2017/ 2018)	BIM 2 & 3 – Glue + BIM 360 – Cadwork & CNC
Phase 3	Phase 3 (exp. 2019)	BIM 3 – BIM 360 – Cadwork & CNC

Figure 4.13 Logiciels et plates-formes utilisées sur les différentes phases

4.2.3.2 Portée de la modélisation et des technologies utilisées

SOTRAMONT a requis des professionnels qu'ils utilisent Autodesk Revit pour la conception et Autodesk Navisworks pour la coordination. Le LOD requis pour la modélisation est 450 (voir annexe IV). L'objectif de SOTRAMONT est de pouvoir exploiter les modèles pour la 7D (gestion des actifs et exploitation).

4.2.4 Processus

Pour la phase 1 du projet, l'intégrateur BIM était dans l'équipe des architectes et la coordination a été réalisée par l'équipe de SOTRAMONT. Cette situation n'était pas satisfaisante, le processus des échanges et de la coordination n'était pas optimal. Aussi, pour les phases subséquentes, SOTRAMONT a décidé d'engager au sein de son équipe un intégrateur BIM externe expérimenté.

L'intégrateur BIM a commencé sa mission au début de la construction de la phase 2. Pour la phase 3, SOTRAMONT a jugé que l'intégrateur BIM serait impliqué dans tous les processus et toutes les phases du projet soit dès le début de la conception. Aussi, pour la phase 3, SOTRAMONT a opté pour l'adoption du PCI (processus de conception intégrée).

Tableau 4.5 Les processus utilisés sur chaque phase du projet

Bâtiment	Phase et durée	Processus
Arbora 1	Phase 1 (2016/ 2017)	Processus Traditionnel Préfabrication de la structure en bois massif Réalisation prototypes pour la formation des sous-traitants (fig. 4.10 & fig. 4.11)
Arbora 2	Phase 2 (2017/ 2018)	Approches intégrées Conception intégrée Préfabrication de la structure en bois massif Réalisation prototypes pour la formation des sous-traitants (fig. 4.10 & fig. 4.11)
Arbora 3	Phase 3 (2018 / prévu 2019)	Processus de conception intégrée Niveau de préfabrication plus avancé

L’utilisation des technologies et des processus ont évolué de phase en phase, ainsi que les niveaux de préfabrication et donc la maturité du BIM et des approches intégrées. La Figure 4.14 reprend les logiciels et processus utilisés sur les phases du projet et les évolutions de leurs maturités.

Items	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Niveau de préfabrication de la structure en bois massif et d’autres composants			
TI et BIM utilisés pour la conception et la réalisation			
TI et BIM utilisés pour la préfabrication et l’érection de la structure			
Niveau de maturité du processus de conception intégrée			
<div><div></div> N/A <div></div> Débutant <div></div> Intermédiaire <div></div> Maîtrise</div>			

Figure 4.14 Synthèse des niveaux de maîtrise des outils et processus utilisés dans le cadre du projet 1

Le découpage du projet en trois phases avec une phase pour chacun des trois bâtiments a permis aux équipes de tirer des leçons à chaque étape et de mettre en œuvre des solutions avec une amélioration des pratiques et des différents outils. Aussi, le niveau de maturité du BIM utilisé a été crescendo au fur et à mesure des phases, jusqu’à l’implication d’un intégrateur BIM externe pour Arbora 3 qui est la dernière phase du projet. Cette initiative est cohérente avec le développement des pratiques intégrées puisque le premier bâtiment a été développé et réalisé selon un mode contractuel traditionnel, puis le Design-Build a régi la réalisation de la phase 2 alors que la phase 3 a été complètement développée selon un cadre PCI. Il en est de même pour le niveau de préfabrication des éléments de structure. Pour Arbora 1, ce sont les éléments principaux de structure qui étaient préfabriqués ainsi que les dalles des balcons dont les pentes étaient intégrées également à la préfabrication (figure4.15). Pour Arbora 3, SOTRAMONT développe des procédés afin d’intégrer une partie de la MEP aux planchers de bois.



Figure 4.15 Arbora 1 - Dalle de balcon préfabriquée avec intégration des pentes

4.2.5 Productivité et innovation

Pour la phase 1, la cadence des équipes a permis la réalisation de la structure béton et bois en 145 jours. Il a fallu 320,5 jours pour la mise en œuvre des façades. Pour la phase 2, la moyenne a été communiquée en surface/jour et le chiffre est de 170m²/jour pour la structure en bois massif uniquement (figure 4.16). Il n'y a pas de mesures disponibles pour la phase 3 actuellement puisqu'en juin 2018, l'assemblage de la structure bois n'était pas amorcée (figure 4.17).

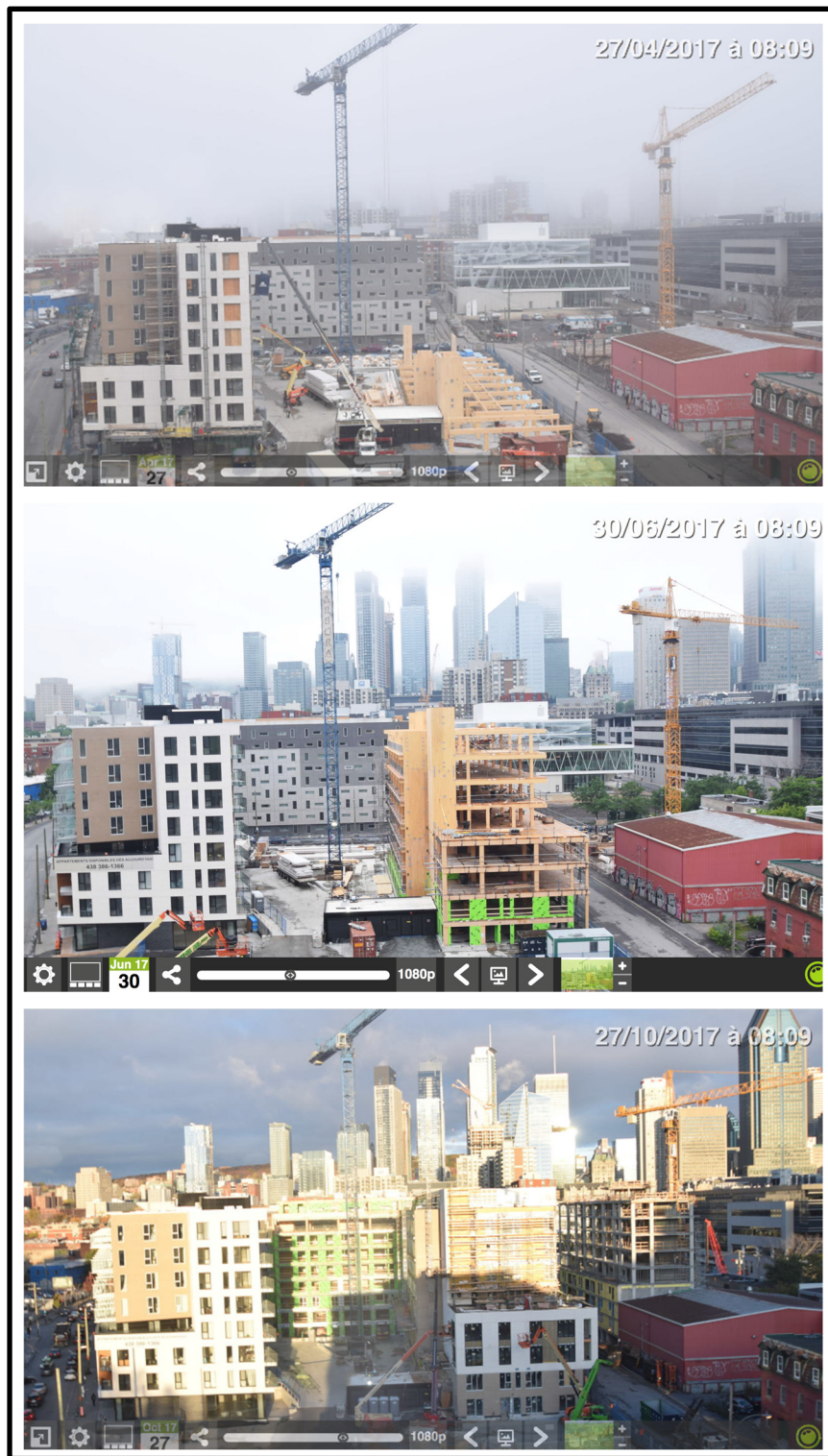


Figure 4.16 Évolution du chantier Arbora 2
Avril 2017 à Octobre 2017. (source : Devisubox)



Figure 4.17 Arpora 3 – Début du chantier de la phase 3
Juin 2018 (source : Devisubox)

L'innovation sur le projet Arpora a été d'abord dans le choix de l'utilisation du bois pour un complexe multi-résidentiel de cette envergure. Sotramont étant à la fois constructeur et exploitant de l'ouvrage, des exigences de qualité ont eu une influence sur les procédés constructifs et de mise en œuvre ainsi que sur la construction, par ricochets. L'état d'esprit des gestionnaires de cette compagnie porte un réel intérêt pour l'innovation et l'écologie, comme le révèlent leurs autres réalisations (projet TOD sur la rive sud). L'implication de l'équipe pour faire évoluer les contraintes de sécurité incendie en centre-ville pour un tel ouvrage a révélé un engagement sur le long terme pour l'évolution des pratiques et dans l'intérêt des usagers. D'ailleurs, Arpora est le seul des trois bâtiments dont des éléments de structures en bois massif ne sont pas encapsulés et restent visibles à l'intérieur des espaces domestiques (figure 4.18). C'est une manière de « redonner au bois ses lettres de noblesse »⁵.

⁵ Citation d'un directeur de Sotramont lors d'une entrevue en mars 2017 (voir tableau 3.1 section 3.2.2)



Figure 4.18 Arbora 1 – Intérieur d'un logement
avec poutre et colonne apparentes (site ARBORA)

Le bois apparent à l'intérieur des logements a plusieurs bénéfices sur la santé des occupants : d'après des études menées au Japon⁶, il y a un effet apaisant et qui augmente la qualité du sommeil; cette qualité de sommeil, à son tour, a un effet sur l'augmentation des performances intellectuelles et aide à maintenir un bon état de santé général.

⁶ 66th Annual Meeting of the Japan Wood Research Society, 2016

4.3 3^e PROJET : Brock Commons (Vancouver)

Le campus de l'Université de Colombie-Britannique a dû répondre au besoin de résidences étudiantes pour l'accueil des 2640 lits prévus d'ici 2019. Le projet UBC TallWood propose également de satisfaire les besoins d'espaces de sociabilité exprimés par les étudiants qui viennent des banlieues alentour. À ce jour, ce projet reste la plus haute tour en bois massif au monde.

4.3.1 Contexte

4.3.1.1 Caractéristiques du site

La densité du site a posé les contraintes de sécurité incendie et d'un environnement sécuritaire indépendamment des choix de structure pour le bâtiment. La taille réduite de la parcelle disponible (figure 4.19) a dicté la solution architecturale : seule une tour est susceptible de contenir le grand nombre nécessaire en espaces de sommeil (chambres partagées) et en espaces communs pour les équipements publics.



Figure 4.19 Vue aérienne du site du projet Brock-Commons.
Tiré de TOPICs (2016)

4.3.1.2 Le choix du bois

La certification LEED OR est une obligation pour tous les es bâtiments réalisés depuis 2008 sur le campus d'UBC. Le bâtiment Brock Common est appelé à devenir, à terme, une source académique d'informations pour les étudiants et les chercheurs qui pourront également accéder aux données relatives à l'exploitation d'un bâtiment de grande hauteur. C'est déjà le cas avec plusieurs bâtiments récents du campus. Le projet retenu Brock Common est le lauréat de l'appel à idées de 2013. Il a bénéficié de financements conséquents grâce à l'utilisation du bois massif comme composant principal pour satisfaire aux critères de durabilité du plan d'aménagement du campus de UBC.

4.3.2 Organisation

4.3.2.1 Équipes du projet

De nombreux professionnels, consultants, entrepreneurs et firmes de génie conseil ont été sollicités sur ce projet. Nous en retrouvons certains sur les deux précédents projets exposés comme GHL consultant pour le code du bâtiment. Le tableau 4.6 répertorie les intervenants et leur rôle. Dès le départ, des principes fédérateurs ont été définis pour favoriser la collaboration autour de ce projet (figure 4.20).



Figure 4.20 Les principes réunis pour le développement de TWH
Tiré de Fallahi et al. (2016)

La conception intégrée a été appuyée par la diffusion de solutions de conception éprouvées sur des projets déjà réalisés. Le recours à la préfabrication et l'usinage ont facilité le contrôle des coûts.

Tableau 4.6 Équipes du projet

Propriétaire –donneur d’ouvrage	Université de Colombie-Britannique Représentée par UBC Properties Trust pour la gestion du projet
Architecte	Acton + Ostry Architects
Architecte Conseil	Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH
Ingénieur structure bois	Fast + Epp
MEP et protection incendie	Stantec Ltd.
Consultants code du bâtiment	GHL Consultants Ltd.
Consultants enveloppe et technique du bâtiment	RDH Building Science Inc.
Acoustique	RWDI AIR Inc
Génie Civil	Kamps Engineering Ltd
Paysage	Hapa Collaborative
<i>Virtual Design & Construction Integrator</i> (intégrateur BIM)	CadMakers Inc
Gérant de la Construction	Urban One Builders
Manufacturier structure bois massif	Structurlam Products Ltd
Installateur structure bois massif	Seagate Structures
Éléments béton	Whitewater Concrete Ltd.

Aussi, des moyens importants ont été déployés pour sélectionner les professionnels les plus expérimentés. L'architecte Conseil Hermann Kaufmann est le professeur responsable du programme de recherche Lean Wood présenté dans le chapitre 2. L'équipe de recherche du laboratoire TOPICs a suivi l'évolution du projet et l'a documenté notamment en proposant des métriques pour l'analyse de sa productivité.

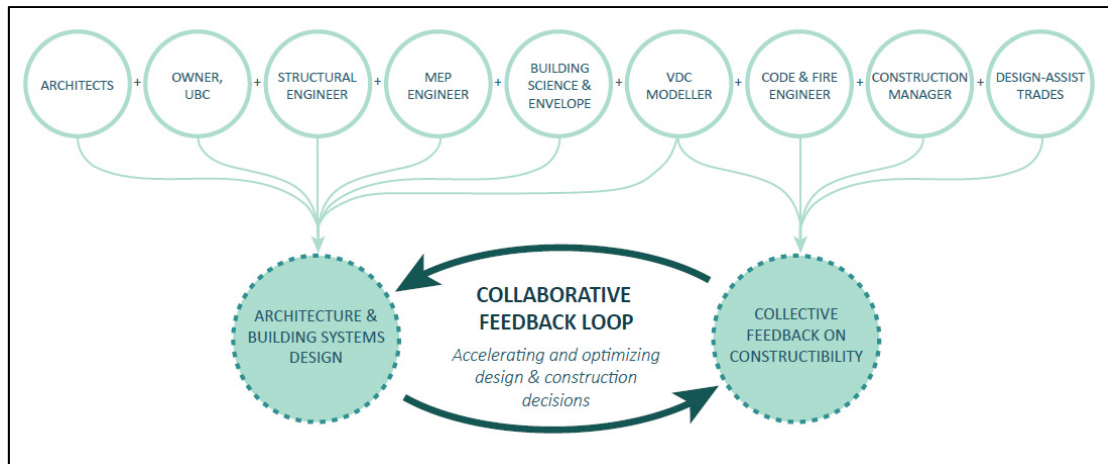


Figure 4.21 Collaboration et boucles de rétroaction entre les équipes du projet
Tiré de Gilmore (2017)

4.3.2.2 Financement du projet

En tant que projet de démonstration, le bâtiment a bénéficié d'un important support financier de la part de Ressources naturelles Canada (NRCan) via l'Initiative de démonstration de bâtiments en bois de grande hauteur (IDBBGH), aux côtés d'Origine au Québec (projet 1), Binational Softwood Lumber Council (BSLC), FPInnovations et deux autres partenaires gouvernementaux pour un total de 8.904.000\$. La participation des consultants déjà impliqués dans la rédaction des réglementations qui régissent l'exploitation et la sécurité incendie du campus ont rassuré les compagnies d'assurances et les familles des étudiants (futurs usagers) quant à la sécurité incendie du bâtiment.

4.3.3 Technologies

Étant donnée l'échéancier serré, chaque professionnel utilisait ses outils 2D et / ou 3D (Autocad, SketchUp, VectorWorks, ...) et l'intégrateur BIM VDC était l'unique concepteur des modèles numériques utilisés pour la coordination, la revue de la conception et la fabrication via la plateforme 3D Experience de Dassault Systems (figure 4. 22).



Figure 4.22 Exemple de modèle produit par l'intégrateur BIM VDC CadMakers
Tiré de TOPICs Lab (2017)

Les maquettes étaient mises à jour en temps réel notamment pendant les séances de PCI et permettaient ainsi l'itération du processus de revue de la conception et l'optimisation des solutions de construction bien en amont du chantier.

4.3.4 Processus

La conception intégrée a régi le projet. Aussi, le rôle de l'intégrateur VDC/BIM (Cadmakers) dépassait largement celui associé à cette fonction au Québec (voir projet 2). La plateforme PLM a permis l'intégration des modèles des différentes disciplines et leur contrôle qualité. La centralisation des données pour la validation des coûts et les simulations / vérification de la constructibilité ont été également gérés par l'intégrateur (figure 4.23).

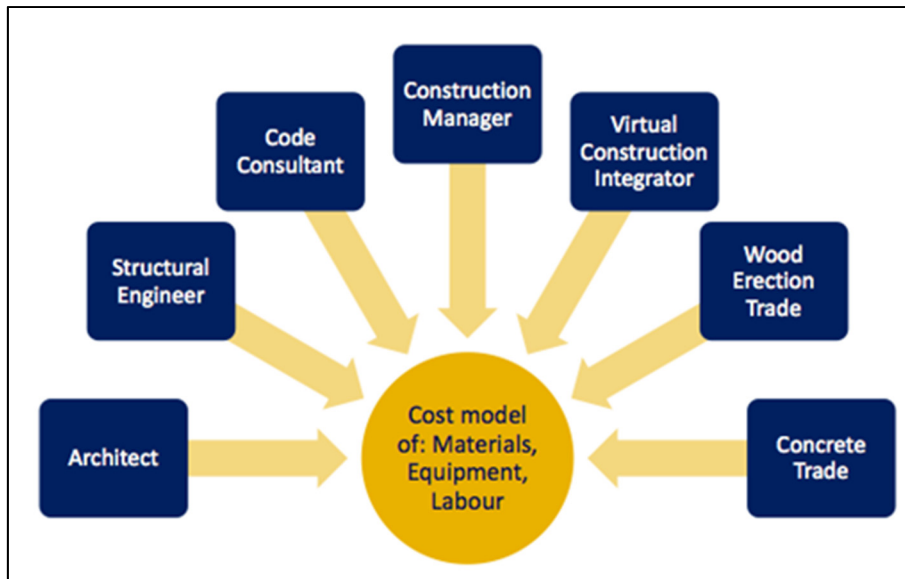


Figure 4.23 Centralisation des données chez l'intégrateur BIM VDC
Tiré de TOPICs Lab (2017)

Des réunions complémentaires à trois charrettes de conception intégrée ont réussi à satisfaire les exigences de l'échéancier serré (8 mois) qui comprenait l'obtention des autorisations nécessaires en parallèle de la phase de conception. De plus, des stratégies ont été adoptées pour optimiser le temps, tel que :

- Exploiter le retour d'expérience de la construction de la phase II du bâtiment Ponderosa (campus UBC).
- Définir les contraintes du projet avec minutie.
- Impliquer un intégrateur BIM VDC de manière totale, y compris pour la prise en charge de l'interopérabilité. Ainsi, tous les dessins et modèles ont été produits avec les outils de prédilections de leurs auteurs puis l'intégrateur s'est chargé de leur migration vers les formats nécessaires à la coordination BIM et fabrication numérique (figure 4.23).
- Réaliser des prototypes à l'échelle 1 (voir figure 4.24).
- Solliciter les autorités tout au long du processus de conception.



Figure 4.24 Prototype échelle 1 pour les tests d'assemblage
Tirée de TOPICs Lab (2016)

4.3.5 Productivité et innovation

Les mesures de productivité ont été prises tout au long du chantier par l'équipe de TOPICs Lab désignée pour documenter l'étude. Les meilleures performances pour la structure en bois massif sont de 2.4 jour/niveau. Au total, les éléments préfabriqués (structure bois massif, panneaux de l'enveloppe) et le second œuvre ont été achevés en 2.5 mois. Aussi, la structure a pu être optimisée : il n'y a pas de poutres, les panneaux de planchers CLT ont des trous pré-perçés en usine pour assurer la continuité du passage des colonnes de plancher à plancher sur tous les niveaux en bois de la tour (Figure 4.24).

L'innovation sur ce projet réside d'abord dans les processus collaboratifs adoptés pour le démarrage du projet et qui ont duré sur toute la phase de construction. La position de l'intégrateur BIM VDC au cœur des équipes de conception et de fabrication a permis de faciliter le travail itératif nécessaire entre concepteurs/fabricants/installateurs pour optimiser

les systèmes à construire avant le démarrage du chantier. C'est donc ce processus de conception en vue de fabrication et assemblage (DfMA) qui est le point crucial de ce projet, dans la mesure où les performances des échelles et des niveaux de préfabrication (figure 4.24 et 4.25) n'auraient pu être atteintes sans ce processus.



Figure 4.25 Portion de façade d'angle préfabriquée en manutention
Tirée de TOPICs Lab (2016)

4.4 Rappel des critères de la Construction 4.0 observés dans les trois projets

Nous avons listé des leçons apprises, dans un premier temps. Dans un second temps, nous avons réuni dans un tableau de synthèse (tableau 4.7), les critères (ou piliers) de la Construction 4.0 présents sur chacun des trois projets.

Les leçons apprises pour chacun des projets sont les suivantes :

- **Projet Origine** : Un meilleur dimensionnement des sections qui composent la structure en bois massif en intégrant les contraintes de manutention sur site est nécessaire. Il faut favoriser des dimensions et des poids moins importants et plus appropriés aux latitudes des mouvements des personnes qui travaillent sur le chantier.
- **Pour Arbora** : Un intégrateur BIM est nécessaire ainsi que former les équipes du projet (professionnels et entreprises) aux structures en bois massif. Il y a aussi la nécessité du cadre PCI et la gestion du partage d'information qui sont relevés. Le manque de disponibilité des logiciels pour la conception en vue de fabrication est un élément soulevé. Le recours au géo-référencement des maquettes pour la préfabrication et le pré-montage est une avenue à développer.
- **Pour Brock Commons** : Le cadre PCI est important dans un contexte de recours à des solutions innovantes. Il en est de même pour l'implication d'un intégrateur BIM VDC pour les optimiser.

Cette étude de cas a pour objectifs, également, de répertorier quels sont les piliers ou critères de la construction 4.0 présents pour chaque bâtiment et quel en est le medium. Le tableau 4.7 les répertorie par projet.

Tableau 4.7 Tableau de synthèse des critères de la Construction 4.0 observés sur les trois projets

	Critères			
Projet	Approches intégrées	Lean Construction	DfMA et FHS	BIM
1	Consortium concepteur, constructeur, fabricant, installateur	Préfabrication Fabrication numérique des sections de la structure	CLT Nouvelles dimensions de panneaux de CLT	Fabrication numérique Visualisation 3D
2	Collaboration des acteurs du projet dans le contexte du contrat Design Build en phase 2 PCI en phase 3	Évolution de la préfabrication sur les trois phases	CLT	Évolution de son utilisation sur les trois phases
3	PCI avec réunions complémentaires aux charrettes de conception intégrée	DfMA sur tout le projet est couplé au Lean Construction	Présent sur l'ensemble du projet	Intégrateur BIM VDC dès la conception préliminaire

Les approches intégrées sont présentes sous la forme du PCI sur les trois projets. Le Lean Construction a pour medium la préfabrication sur les trois projets. C'est le CLT, par exemple qui joue le rôle de medium pour le DfMA puisque c'est un produit DfMA (voir chapitre 2) et la FHS et confirme la présence de ce pilier. Le BIM est présent sur tous les projets, à différents niveaux de maturité et pour différentes utilisations.

4.4.1 Bénéfices des approches intégrées et du Lean Construction (piliers 1 et 2)

- Réduction significative du temps de main d'œuvre sur site étant donné la filière sèche à laquelle le bois est assujéti (pas de préparation sur site avant la mise en œuvre);
- Réduction significative du nombre de travailleurs sur site (-75%) par rapport à un chantier équivalent pour un bâtiment en béton. Ceci a un effet direct sur la productivité sur site et les conditions de travail sur site puisque les flux sont réduits;
- Réduction des coûts de main-d'œuvre sur site;
- Réduction de 90% du trafic de véhicules lié à l'approvisionnement du site.

4.4.2 Bénéfices du DfMA et du BIM (piliers 3 et 4)

Des avantages significatifs ont été identifiés dans le contexte de la préfabrication lorsque le BIM et le DfMA sont combinés. Le gain de temps est réel, cependant, le modèle doit être complété et coordonné avant le début de la production et de la fabrication des composants.

Les principaux avantages de la combinaison BIM – DfMA pendant la conception sont les suivants :

- Permet de réduire le temps habituellement nécessaire pour la conversion des dessins d'architecture en dessins de fabrication (ou dessins d'atelier);
- Améliore la coordination entre la conception (les professionnels) et la fabrication (les fabricants et les installateurs);
- Élimine le risque d'erreur dans l'interprétation humaine des dessins 2D;
- Réduit le temps du dessin de fabrication et le temps de l'étape d'approbation;
- Réduit de manière significative le temps de vérification des informations pour la fabrication;
- Favorise et améliore la collaboration entre les techniciens et les ingénieurs autour des modèles numériques;
- Permet une visualisation et une simulation qui facilite la compréhension de l'assemblage des composants;
- Fournit des solutions modélisées qui sont réalisables;
- Optimise le flux de communication par l'élimination de la duplication d'informations (qui est a été identifiée comme une source de gaspillage);
- Permet la création et l'utilisation de bibliothèques de composants standards.

Pendant la phase de construction, cette combinaison :

- Réduit significativement le nombre de demandes d'information sur site;
- Optimise le flux de la main d'œuvre
- Optimise tous les flux de la chaîne d'approvisionnement
- Permet un chantier plus propre (moins de matières résiduelles)

4.5 Discussion

Cette étude de cas comparative de trois réalisations canadiennes exemplaires a mis en exergue les possibilités offertes par l'intégration des technologies du numérique dans l'industrie de la construction, avec des processus adéquats aux structures préfabriquées en bois massif. Chacun des projets a développé des avenues d'innovation relatives aux procédés et processus de conception et fabrication des structures en bois massif, avec un impact sur les performances du bâtiment du point de vue structurel, acoustique et de traitement au feu. Divers vecteurs de changements sont alors matérialisés.

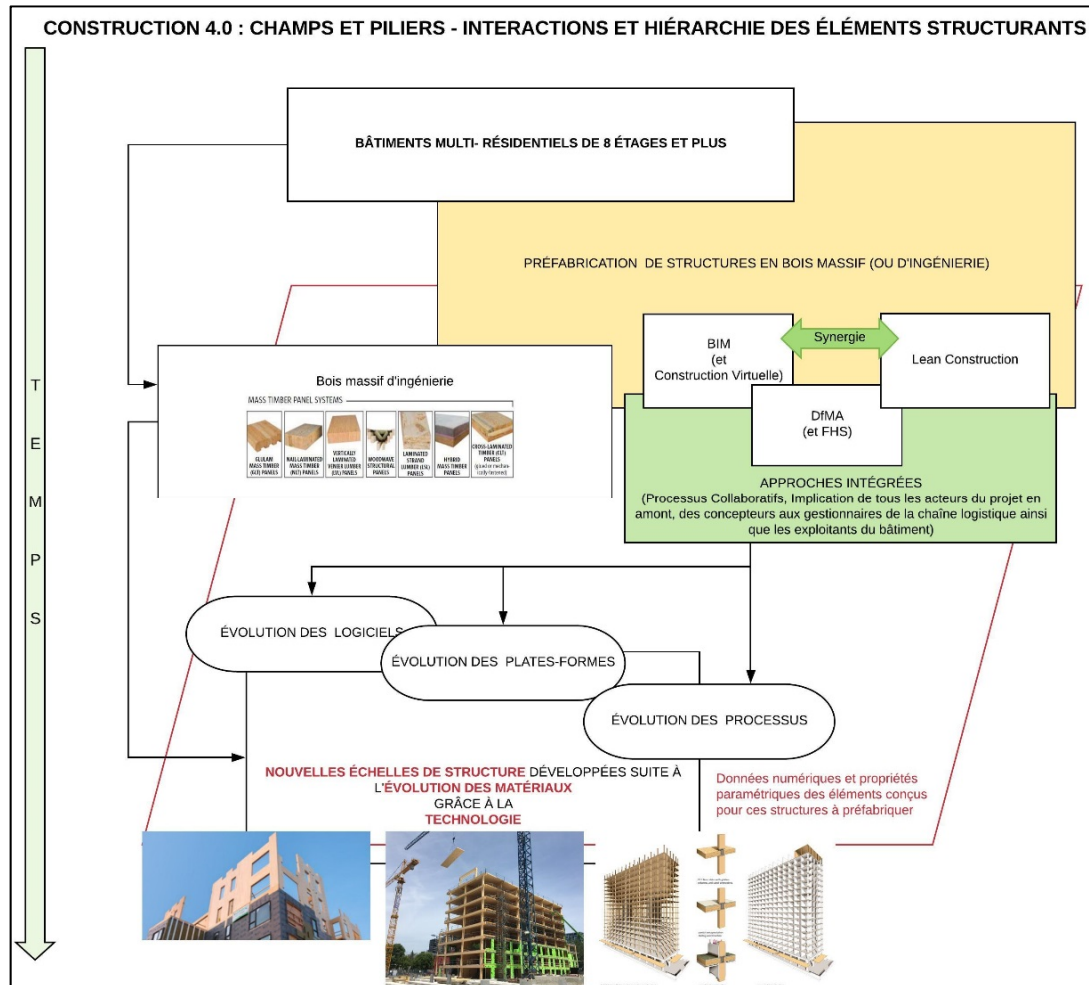


Figure 4.26 Construction 4.0 Champs et piliers, interactions et hiérarchie des éléments structurants

La technologie a permis une évolution du matériau bois et sa ré-introduction dans les codes de construction des bâtiments multi-résidentiels de plus de six étages au Québec. Ce sont aussi les performances de productivité qui sont observées. Ainsi, les champs et les piliers qui participent de l'espace-temps⁷ de la Construction 4.0 ont été observés sur ces trois projets (Figure 4.26 ci-contre). Il résulte de ces expériences trois bâtiments écologiques exemplaires, à peine plus chers que leur équivalent en béton, étant donné leur volet de production. En effet, au niveau du Lean, la théorie de la production de Koskela traite de la transformation, du flux et de la valeur, soit le cadre TFV. Pour que cette valeur puisse être réalisée, la variabilité qui caractérise l'industrie de la construction doit être réduite (Koskela, 2003) et c'est ce qu'a permis le recours au BIM et à la construction virtuelle sur les trois projets, particulièrement le projet Brock Common. En effet, c'est ce projet qui a été développé suivant des processus BIM et DfMA à maturité, dans un champ d'approches intégrées optimum via le PCI. Aussi, la recherche exhaustive conduite en parallèle par l'équipe du laboratoire TOPICs⁸ de UBC a démontré l'efficacité de la combinaison que nous proposons pour cadre conceptuel où le manufacturier est convoqué plus tôt dans la chaîne d'approvisionnement du projet de construction. La variabilité, talon d'Achille de la construction, est maîtrisée dans ce projet par l'utilisation du BIM et de la simulation 4D qui permettent d'optimiser la chaîne logistique de livraison des composants (livraison juste à temps) ainsi que les séquences d'installation. Des mesures et des indicateurs de performance ont été dérivés de la planification soigneusement élaborée (Kasbar, 2017) et les gains de temps pour les installations par rapport aux temps prévus en phase de simulation ont été observés. Avec le PCI, l'intervention des manufacturiers et installateurs en amont dans la chaîne de livraison du projet, auprès de professionnels qui seraient peu aguerris aux pratiques de construction en bois massif d'ingénierie, a permis le transfert des connaissances nécessaires pour le développement de la conception de la structure et des autres composantes du bâtiment avec le dessein de simplification des assemblages pour faciliter la fabrication et l'installation. Le processus itératif entre la visualisation, la simulation et la revue de la conception a encouragé l'amélioration continue. Des innovations sont

⁷ Voir à ce sujet les travaux de Bergson, Bachelard et Auffray

⁸ Il y a eu plusieurs publications entre les années 2016 et 2017 dont certaines sont répertoriées dans nos références bibliographiques. Voir également section 3.2.2 p. 43

présentes également dans l'optimisation de la structure, tel que l'élimination d'un composant, la poutre, supposé être un archétype charnière du système poteaux/poutres/planchers. Cette élimination participe de la création de la valeur de ce bâtiment (Kasbar et al., 2017) : c'est un volume important de matériau en moins, et du temps de manutention et d'assemblage en moins.

L'industrie de la construction ne fait qu'amorcer sa transition vers le numérique avec le BIM. Le chemin à parcourir sera long pour atteindre une efficacité dans la gestion de la production comparable à celle que l'on retrouve dans le domaine du manufacturier. Notre hypothèse portait sur le potentiel de transformation supérieur au reste de l'industrie de la construction offert par la préfabrication dans la filière bois pour des projets multi-résidentiels de plus de six étages; ce potentiel permettrait à la filière bois⁹ de prendre le gouvernail de la Construction 4.0. Il ressort de l'analyse comparative des trois réalisations canadiennes qu'il y a d'ores et déjà des réalisations qui confirment cette hypothèse. Ce sont des initiatives remarquables et uniques pour l'instant. Cependant, les méthodes de développement et de livraison utilisés dans ces projets, pour un programme multi-résidentiel, sont reproductibles avec le recours à des structures préfabriquées en bois massif d'ingénierie.

Avec l'initiative Vision 2030, le Québec se positionne au niveau international pour assurer un leadership et agir comme catalyseur pour le développement d'une Construction 4.0 : la réunion des professionnels de la construction et des manufacturiers du bois ouvre le champ des pratiques intégrées et permet d'orienter la solution constructive en début de conception suivant des possibilités de préfabrication et d'assemblage. Cette conception peut évoluer, dans un souci de productivité et de réduction du gaspillage suivant les principes du Lean Construction. Les outils du BIM et du VDC, idéalement présents tout au long de la chaîne, prennent en charge les informations (données) et leur traitement en fonction des besoins du projet. Le programme du MESI pour « accroître la performance de la filière québécoise par le virage numérique » participe des mêmes objectifs finaux de la Vision 2030. Ces deux programmes, dans leurs axes

⁹ Rappelons que sur 152 PME québécoises spécialisées dans la préfabrication, 58 sont spécialisées en produits de charpente en bois (FPInnovation, 2015)

et objectifs comportent des points qui relèvent de la stratégie 4.0 et des actions 4.0. Nous proposons, dans le prochain chapitre, une feuille de route pour une Construction 4.0 au Québec.

CHAPITRE 5

PROPOSITION D'UNE FEUILLE DE ROUTE POUR LA CONSTRUCTION 4.0 AU QUÉBEC

Afin de proposer une feuille de route pour le déploiement de la Construction 4.0 au Québec, nous constituons un terreau avec des éléments de la Vision 2030 (2016), des éléments du rapport du MESI pour *Accroître la performance de la filière québécoise de la construction* (Poirier et al., 2018) et des éléments de la feuille de route de Building Smart Canada (bS Canada) pour l'adoption du BIM (2014). De ces éléments nous définissons ce qui relève des actions et ce qui relève des stratégies pour la Construction 4.0.

5.1 Les axes majeurs de trois initiatives pour la compétitivité de la construction au Québec

5.1.1 Axes majeurs de la Vision 2030

La Vision 2030 est spécifique à la filière bois au Québec. Les quatre axes qui la composent sont :

- 1- Mettre en place un environnement favorable ;
- 2- Améliorer la compétitivité ;
- 3- Favoriser l'innovation ;
- 4- Favoriser l'exportation.

Ce sont les trois premiers axes que nous retenons pour la mise en œuvre d'une feuille de route pour l'adoption de la Construction 4.0 au Québec suivant les quatre piliers que nous avons définis. Chacun de ces axes comporte des objectifs et des propositions pour les atteindre. Cependant, ils ne sont pas inscrits dans le temps et n'ont que l'horizon 2030 comme repère temporel. À l'instar des programmes élaborés et mis en œuvre au Royaume Uni, nous préconisons la définition de jalons à courts termes et à moyens termes avec des prises de mesures aux cinq ans. Certaines de nos recommandations formulées dans notre rapport pour la SHQ (Forgues, Botton, Chikhi, 2017) sur la recherche et le développement ont été adoptées à

savoir des programmes de recherche universitaire ouverts à la maîtrise dès l'automne 2018 sur le BIM comme opportunité pour le développement des structures en bois massif à l'université de Laval.

5.1.2 Axes majeurs du MESI pour « accroître la performance de la filière québécoise de la construction par le virage numérique »

Bien que l'adoption du BIM ne fasse pas l'objet d'une politique en soi, son intégration aux programmes de construction d'institutions québécoises majeures comme la SQI participent à son déploiement chez des sous-traitants sollicités sur des projets d'envergure. C'est un contexte qui a permis aux chercheurs du GRIDD de continuer à dresser des constats sur la situation du BIM et son évolution au Québec et de proposer des orientations à prendre pour une amélioration du secteur de la construction par l'adoption du numérique. Ainsi, cinq axes, 22 initiatives et 65 actions composent le rapport du MESI (Poirier et al., 2018) pour accroître la performance du secteur de la construction au Québec. Ces cinq axes sont :

- Axe 1 : leadership et gouvernance;
- Axe 2 : engagement et accompagnement;
- Axe 3 : collaboration et exécution;
- Axe 4 : formation et enseignement;
- Axe 5 : recherche et développement.

Pour ce programme, une feuille de route est prévue prochainement pour circonscrire les 22 initiatives et 65 actions; elle fait l'objet de la deuxième partie de la stratégie du MESI.

5.1.3 Axes majeurs de la feuille de route pour le BIM au Canada

Pour le déploiement du BIM dans le secteur de la construction et son arrimage aux nouvelles pratiques du numérique, nous n'avons pu recenser que la « Feuille de Route pour la Modélisation de l'Information du Bâtiment et de son Cycle de vie dans la Communauté Canadienne de l'AICPG » de Building Smart Canada en 2014 (figure 5.1).

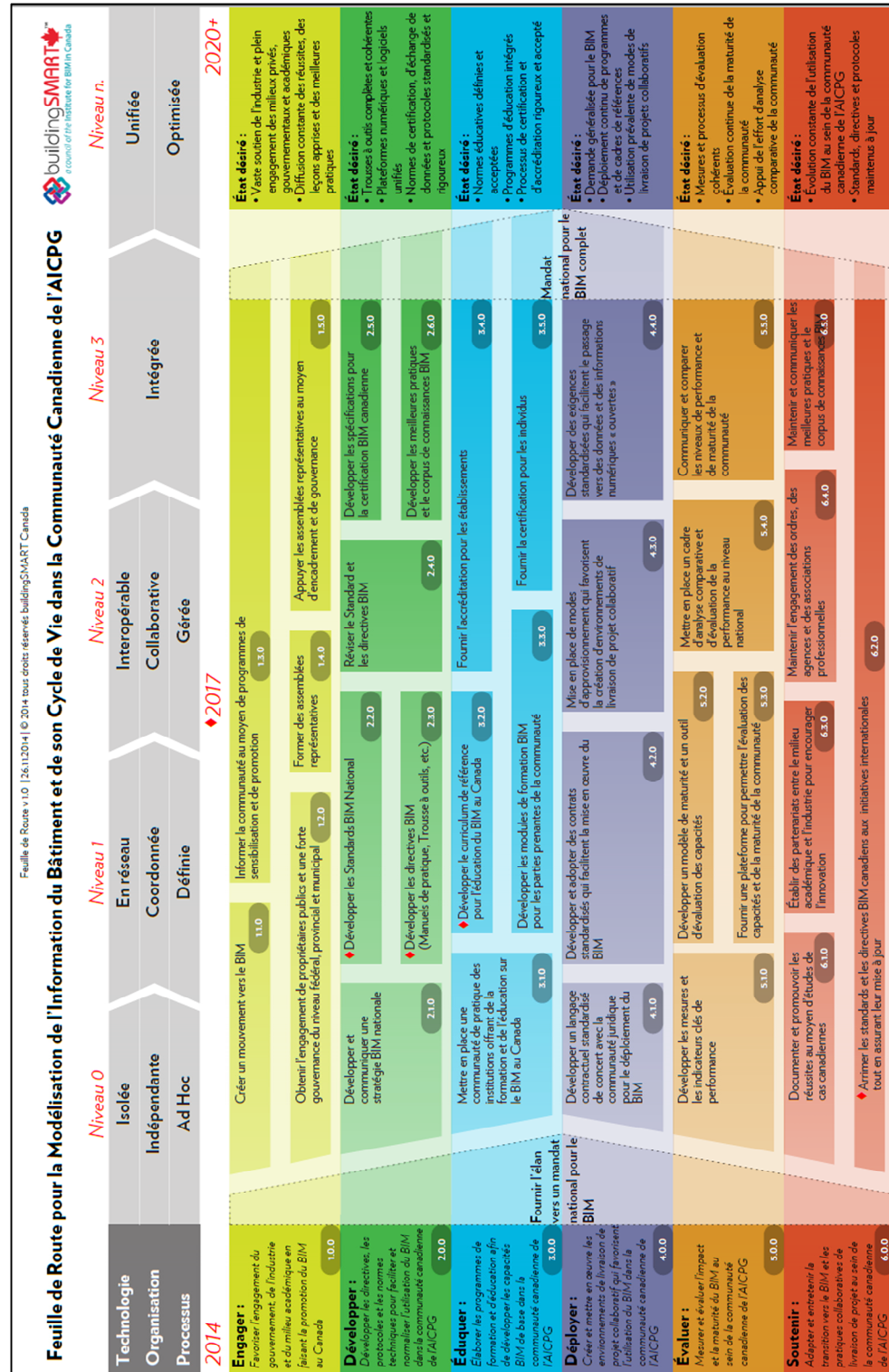


Figure 5.1 Feuille de route de bS Canada pour l'adoption du BIM (2014)

Cette feuille de route est organisée suivant les dimensions TOP (Technologie, Organisation, Processus, voir chapitre 3) autour de six axes :

- 1- Engager : favoriser l'engagement du gouvernement de l'industrie et du milieu académique en faisant la promotion du BIM au Canada ;
- 2- Développer : développer les directives, les protocoles et les normes techniques pour faciliter et normaliser l'utilisation du BIM dans la communauté canadienne de l'AICPG;
- 3- Éduquer : élaborer des programmes de formation et d'éducation afin de développer les capacités BIM de base dans la communauté canadienne de l'AICPG ;
- 4- Déployer : créer et mettre en œuvre les environnements de livraison de projet collaboratif qui favorisent l'utilisation du BIM dans la communauté canadienne de l'AICPG;
- 5- Évaluer : mesurer et évaluer l'impact et la maturité du BIM au sein de la communauté canadienne de l'AICPG ;
- 6- Soutenir : adapter et entretenir la transition vers le BIM et les pratiques collaboratives de livraison de projet au sein de la communauté canadienne de l'AICPG.

Le temps de cette feuille de route débute en 2014, concentre une trentaine de propositions sur l'année 2017 et pose l'horizon 2020+ comme terme pour un état désiré des situations suite aux changements qui seraient engagés (voir aussi annexe V). Nous retenons cinq des initiatives de cette feuille de route sur trois de ses axes. La prochaine section présente une synthèse des éléments que nous retenons sur les trois champs d'axes majeurs présentés.

5.2 Stratégies 4.0 et Actions 4.0

De ce qui précède, nous avons répertorié des éléments pour définir des stratégies et des actions pour l'adoption de la construction 4.0 au Québec. Les figures suivantes intègrent les axes et propositions des initiatives présentées en amont : la couleur verte désigne ce qui relève de la Stratégie 4.0 et la couleur jaune désigne ce qui relève des Actions 4.0. La figure 5.2 présente les éléments de Visions 2030 répertoriés en stratégies 4.0 et actions 4.0.

Axes VISION 2030	Objectifs VISION 2030	Actions Proposées VISION 2030
1- METTRE EN PLACE UN ENVIRONNEMENT FAVORABLE	1.1- Favoriser l'utilisation de la préfabrication dans le secteur de la construction	1.1.1 Mettre en place un organisme regroupant les intervenants du secteur (Conseil québécois des bâtiments préfabriqués, grappe provinciale ou autres)
		1.1.2 Diffuser davantage d'informations et d'outils favorisant l'adoption de la préfabrication par les donneurs d'ordre, les architectes et les ingénieurs
	1.2- Encourager la préfabrication dans les politiques d'achats publics	1.2.1 Favoriser les processus de conception-construction (design build) et de conception intégrée dans l'octroi de contrats d'achats publics
		1.2.2 Permettre la démonstration de systèmes de construction préfabriqués innovants dans les projets financés par des fonds publics
		1.2.3 Intégrer l'utilisation de la préfabrication comme un moyen de lutter contre les changements climatiques dans les politiques d'achats publics
	1.3- Développer et encourager l'utilisation de la modélisation des informations du bâtiment (BIM)	1.3.1 Appuyer le développement de programmes de formation sur l'utilisation du BIM
		1.3.2 Développer des solutions BIM adaptées aux constructions multifamiliales préfabriquées et favoriser leur utilisation par les manufacturiers et les professionnels du bâtiment
2- AMÉLIORER LA COMPÉTITIVITÉ	2.1- Réduire les coûts de production	2.1.1 Effectuer une analyse des structures de coûts
		2.1.2 Effectuer une analyse de besoins des entreprises en automatisation des processus opérationnels
		2.2.3 Effectuer une analyse de besoins des entreprises en automatisation et déterminer les seuils de rentabilité de tels investissements
		2.2.4 Favoriser les investissements pour la mécanisation, l'automatisation et la robotisation de la fabrication
	2.3- Intégrer davantage les TI	2.3.1 Favoriser le développement et l'acquisition de logiciels pour l'estimation, la production et la commercialisation
		2.3.2 Effectuer une analyse sur l'intégration des technologies de l'information dans l'industrie québécoise des bâtiments préfabriqués, les besoins de l'industrie et les seuils de rentabilité de tels investissements
	2.4- Assurer un bassin de main-d'œuvre qualifiée	2.4.1 Effectuer une analyse des besoins des entreprises en main-d'œuvre
		2.4.2 Développer des programmes de formation pour les professions et métiers liés à la préfabrication
		2.4.3 Appuyer le recrutement et la rétention de la main-d'œuvre
	2.5- Optimiser le transport	2.4.5 Effectuer une analyse du potentiel d'optimisation de la logistique complète de transport
		2.4.6 Soutenir le développement de systèmes de chargement des composants préfabriqués en conteneurs
3- FAVORISER L'INNOVATION	3.1 Accroître l'innovation dans les domaines des produits, services, procédés, commercialisation et modèles d'affaires	3.1.1 Appuyer la recherche et développement (R et D) en construction préfabriquée par l'innovation dans les produits de standardisation
		3.1.2 Appuyer la création et le fonctionnement d'un regroupement sectoriel en recherche industrielle pour le secteur des bâtiments préfabriqués
		3.1.3 Favoriser l'intégration des innovations dans le secteur de la construction en favorisant les liens entre les intervenants de la chaîne de valeur de la construction (architectes ingénieurs, constructeurs, développeurs, fournisseurs, etc.) via des projets mobilisateurs et en appuyant le financement d'une partie des risques et des surcoûts liés à l'utilisation de produits innovants.
		3.1.4 Adapter les cadres réglementaires pour faciliter l'intégration de solutions et produits innovants.

Figure 5.2 Éléments de la Vision 2030 qui relèvent de stratégies 4.0 et d'actions 4.0

Comme vu précédemment, la Vision 2030 est structurée en 4 axes. Nous en avons retenu les trois premiers. Chacun des axes est à son tour divisé en plusieurs objectifs. De ces objectifs découlent des actions proposées. Pour chacun de ces niveaux de structure (objectifs et actions) nous avons retenus les points qui convergent vers la Construction 4.0. Ainsi, mettre en place un environnement favorable est une stratégie préalable à l'encouragement de la préfabrication

dans le secteur de la construction. Améliorer la compétitivité est une action 4.0 à entreprendre au même titre que favoriser l'innovation. Ces deux actions permettent de développer des stratégies 4.0 telles que « intégrer davantage les TI dans l'industrie de la construction » et « optimiser le transport des composants de structures préfabriquées ». D'autres actions sont énumérées telles que :

- Permettre la démonstration de systèmes de construction préfabriqués innovants dans les projets financés par des fonds publics.
- Intégrer l'utilisation de la préfabrication comme moyen de lutter contre les changements climatiques dans les politiques d'achats publics.
- Effectuer une analyse de besoins des entreprises en automatisation des processus opérationnels.
- Favoriser les investissements pour la mécanisation, l'automatisation et la robotisation de la fabrication.

Ces trois derniers points convergent vers un environnement favorable à l'adoption du DfMA qui est notre 3^e pilier pour la Construction 4.0.

Les cinq axes et vingt-deux initiatives du MESI sont représentés dans la figure 5.3 en éléments convergents vers les actions et stratégies de la Construction 4.0. Les axes leadership et gouvernance et formation et enseignement sont répertoriés en stratégies 4.0. Des initiatives issues de ces axes sont répertoriées en actions 4.0 telles que l'« inscription des corps publics comme donneurs d'ouvrage exemplaires en matière de construction en utilisant les possibilités du numérique » et « la définition des nouvelles approches collaboratives à la livraison de projet et à son cycle de vie ».

Axes	Initiatives
1 Leadership et gouvernance	A1.1 Faire converger les pôles de gouvernance afin de coordonner les efforts visant à initier et soutenir le virage numérique au Québec
	A1.2 Inscrire les corps publics comme donneurs d'ouvrage exemplaires en matière de construction utilisant les possibilités du numérique
	A1.3 Accroître la demande en matière de BIM par les donneurs d'ouvrages
	A1.4 Développer et soutenir une stratégie québécoise de transition vers le numérique pour l'industrie de la construction mettant de l'avant des cibles claires et des mesures suffisantes et concrètes
2 Engagement et accompagnement	A2.1 Créer un mouvement vers le BIM afin de briser l'inertie
	A2.2 Mettre en place des incitatifs pour la prise du virage par les entreprises et les institutions
	A2.3 Faire la promotion des meilleures pratiques dans la livraison et le maintien de notre environnement bâti
	A2.4 Élargir le bassin de projets par secteur d'activité
Axe 3 Collaboration et exécution	A3.1 Mettre en place un cadre politique, légal et financier favorable au déploiement du BIM
	A3.2 Développer des standards afin de normaliser le travail là où il gagne à être normalisé
	A3.3 Cadrer les rôles et responsabilités des acteurs de projet et les adapter aux nouvelles pratiques numériques
	A3.4 Définir de nouvelles approches collaboratives à la livraison de projet et à son cycle de vie
Axe 4 Formation et enseignement	A4.1 Orienter les curricula et les méthodes d'enseignement et de formation vers les pratiques émergentes
	A4.2 Appuyer le développement de programmes de formation adaptés aux différents besoins de la filière en matière de BIM
	A4.3 Assurer l'accessibilité à l'enseignement et à la formation de qualité
	A4.4 Soutenir l'évaluation des compétences individuelles
5 Recherche et développement	A5.1 Encourager et accroître les partenariats entre l'académique et l'industrie
	A5.2 Mettre sur pied (ou consolider) un centre québécois dédié à l'intégration des nouvelles technologies en construction
	A5.3 Développer une plateforme de partage et de centralisation des connaissances et d'outils liés au virage numérique
	A5.4 Mettre en place un système d'étalonnage pour l'industrie pour mesurer les bénéfices du BIM et favoriser le développement d'une culture d'amélioration continue

Figure 5.3 Les 5 axes et 22 initiatives du MESI (2018) répertoriés en stratégies 4.0 et actions 4.0

Enfin, depuis la feuille de route de Bs Canada pour l'adoption du BIM au Canada, nous retenons les points suivants :

- Axe 4 : Déployer
 - 4.3 Mise en place de modes d'approvisionnement qui favorisent la création d'environnements de livraison de projet collaboratif.
 - 4.4 Développer des exigences standardisées qui facilitent le passage vers des données et des informations numériques « ouvertes ».
- Axe 5 : Évaluer
 - 5.4 Mettre en place un cadre d'analyse comparative et d'évaluation de la performance au niveau national.
- Axe 6 : Soutenir
 - 6.1 Documenter et promouvoir les réussites au moyen d'études de cas canadiennes.
 - 6.2 Arrimer les standards et les directives BIM canadiens aux initiatives internationales tout en assurant leur mise à jour.
 - 6.3 Établir des partenariats entre le milieu académique et l'industrie pour encourager l'innovation.

La figure 5.4 présente ces propositions en stratégie 4.0 et actions 4.0. Ainsi, les axes du déploiement et de l'évaluation sont répertoriés en actions 4.0 qui vont permettre de développer les stratégies pour une « évaluation continue de la maturité de la communauté » et l'« appui de l'effort de son analyse comparative ». L'« évaluation constante de l'utilisation du BIM au sein de la communauté » est un état désiré qui correspond à une action 4.0; elle rejoint notre proposition de prendre des mesures à intervalles réguliers afin de jauger l'évolution des pratiques autour des propositions de notre feuille de route afin de dresser un état des lieux et rectifier les directions le cas échéant.

Axes	Initiatives	État désiré
4 Déployer : créer et mettre en œuvre les environnements de livraison de projet collaboratif qui favorisent l'utilisation du BIM dans la communauté canadienne de l'AICPG	<ul style="list-style-type: none"> o 4.3 Mise en place de modes d'approvisionnement qui favorisent la création d'environnements de livraison de projet collaboratif o 4.4 Développer des exigences standardisées qui facilitent le passage vers des données et des informations numériques « ouvertes » 	Demande généralisée pour le BIM; déploiement continu de programmes et de cadres de références; utilisation de modes de livraison de projets collaboratifs
5 Évaluer : mesurer et évaluer l'impact et la maturité du BIM au sein de la communauté canadienne de l'AICPG	<ul style="list-style-type: none"> o 5.4 Mettre en place un cadre d'analyse comparative et d'évaluation de la performance au niveau national 	Mesures et processus d'évaluation cohérents; Évaluation continue de la maturité de la communauté; appui de l'effort d'analyse comparative de la communauté
6 Soutenir : adapter et entretenir la transition vers le BIM et les pratiques collaboratives de livraison de projet au sein de la communauté canadienne de l'AICPG	<ul style="list-style-type: none"> o 6.1 Documenter et promouvoir les réussites au moyen d'études de cas canadiennes o 6.2 Arrimer les standards et les directives BIM canadiens aux initiatives internationales tout en assurant leur mise à jour o 6.3 Établir des partenariats entre le milieu académique et l'industrie pour encourager l'innovation 	Évaluation constante de l'utilisation du BIM au sein de la communauté canadienne de l'AICPG; standards; directives et protocoles maintenus à jour

Figure 5.4 Éléments repris de la feuille de route bS Canada répertoriés en actions 4.0 et stratégies 4.0

De ces analyses et comparaison des initiatives et feuille de route québécoises et canadiennes, nous avons répertorié des actions 4.0 et des stratégies 4.0. Elles nous servent à composer notre feuille de route pour la Construction 4.0 au Québec.

5.3 Feuille de route Construction 4.0

Notre feuille de route est structurée en deux temps : le premier est celui du court terme et s'étale de 2019 à 2022, le second est le temps d'un moyen terme soit de 2023 à 2030. Nos propositions résultent, outre notre étude de cas comparative, de notre analyse d'autres études de cas dont nous avons aussi répertorié les défis, les leçons apprises et les recommandations, à savoir :

1. Approches intégrées (pilier 1 – P1) et au Lean Construction (P2) : développer les formations dans le cadre d'une stratégie de mise en œuvre de la Construction 4.0, avec des formations sur les approches intégrées pour que les professionnels apprennent à

travailler ensemble dans un esprit d'équipe de maîtrise d'œuvre (architectes, ingénieurs, estimateurs, planificateurs, coordonnateurs). Cette formation permettrait aussi aux professionnels et aux entrepreneurs et fabricants / installateurs d'apprendre à collaborer avec le « manufacturier » en amont de la chaîne de réalisation du projet.

2. DfMA (pilier 3 – P3) et BIM (pilier 4 – P4) : concevoir des programmes de formation sur le BIM pour le DfMA comme c'est le cas en UK avec le centre de formation en ligne *Offsite Management School* destiné à tous les acteurs du projet. Ces formations devraient être axées sur le développement des connaissances autour des niveaux de maturité du BIM et savoir définir lequel est nécessaire dans un contexte de DfMA et ce qu'il implique du point de vue organisationnel. Ceci permettrait de bien choisir les outils appropriés (technologies, logiciels et plates-formes) pour respecter un niveau de rigueur dans la conception et une utilisation spécifique des bibliothèques d'objets et des composants destinés aux éléments à préfabriquer. Ainsi, la définition du niveau approprié pour le développement du modèle (LOD) à chaque étape du projet peut être facilitée et les concepteurs et les fournisseurs formés pourront développer les bibliothèques de composants nécessaires pour alimenter (ou peupler) les modèles et répondre aux exigences des dessins d'atelier.

Ces propositions figurent parmi d'autres dans notre feuille de route présentée dans la double page suivante (Figure 5.5).

CONCLUSION

Ce travail avait pour objet de proposer le cadre de la filière bois comme catalyseur pour définir la Construction 4.0 pour le Québec. Quatre piliers ont été identifiés : les approches intégrées, le Lean Construction, le DfMA et le BIM. L'étude de cas comparative que nous avons menée sur trois réalisations canadiennes emblématiques a permis de confirmer la pertinence de chacun de ces piliers. Cette étude a également mis en exergue les possibilités de la filière bois comme porteuse d'innovation pour la conception et l'esthétique de bâtiments multi-résidentiels, pour les performances structurelles de ces bâtiments grâce aux caractéristiques de produits de bois d'ingénierie comme le CLT et, enfin, leurs performances énergétiques et leur caractère durable étant donné les réductions de pollution et de recours aux énergies durant le cycle de vie de l'ouvrage.

Adopter les principes de la Construction 4.0 permettrait d'atteindre les objectifs de la Vision 2030 définis pour le développement de la filière bois au moyen des produits de préfabrication pour le multi-résidentiel au Québec, dans un premier temps et, dans un second temps, ouvrirait les avenues d'exportation du savoir-faire québécois. Pour un avenir proche, notre feuille de route propose des actions et des stratégies qui demandent l'implication d'acteurs volontaires et conscients du changement souhaitable à opérer dans l'industrie de la construction. Certaines de nos préconisations dans le rapport réalisé pour la SHQ en 2017 ont été amorcées comme les formations sur les bois et la subvention de programmes à la maîtrise sur les structures en bois massif à l'université de Laval dès cet automne.

C'est le moment pour l'industrie de la construction d'avoir le vent en poupe grâce au souffle de la transition numérique dans l'industrie québécoise, c'est enfin une opportunité de *flagship* pour ce domaine qui représente la part la plus importante du PIB du Québec et dont les produits finaux, à savoir les bâtiments et les infrastructures, sont ceux dans lesquels nous passons plus des trois quarts de notre vie.

RECOMMANDATIONS

Il serait très enrichissant pour l'industrie du bois dans le secteur multi-résidentiel de documenter les phases 2 et 3 du projet Arbora et de répertorier dans le détail l'évolution des pratiques sur l'ensemble de ce projet qui serait un cas d'étude unique et complet. Notre recherche a été limitée par un manque de moyens matériels : des subventions sont indispensables pour mener une recherche exhaustive sur des réalisations exemplaires comme ce fut le cas pour le laboratoire TOPICS et le bâtiment Brock Commons. C'est une pratique à adopter et diffuser au Québec. L'industrie de la construction devrait s'engager encore plus auprès du milieu académique afin de permettre de dresser un constat réaliste de la situation actuelle. Car on ne peut prescrire les bons remèdes sans un bon diagnostic.

ANNEXE I

INITIATIVES ET PROGRAMMES NOTABLES AUTOUR DE LA CONSTRUCTION BOIS EN EUROPE

<p>AUSTRIA</p>  
<ul style="list-style-type: none">• BIM appliance in timber industry• Legal and normative framework• Norms (BIM level 2 and BIM level 3)• Standardization committees• National Task Force for BIM in timber industry <p>Software and Platforms</p> <ul style="list-style-type: none">• BIMM.EU with Dietrich : Plug-in for Autodesk Revit<ul style="list-style-type: none">• Visualization, Analysis, Machine handoverwww.dietrichs.com www.bimm.eu• CREE : Generic BIM Objects<ul style="list-style-type: none">• www.creebyrhomborg.com• http://www.creebyrhomborg.com/en/technology/cree-components/ <p>Source : LeanWood</p>
<p>FRANCE</p> 
<p>National Plan for Building's Digital Transition PTNB (<i>Plan de Transition Numérique dans le Bâtiment</i>)</p> <p>French Experimental Norm to meet European Norm</p> <p>Dictionnaries and Databases, Willigness for OpenBIM, Guidelines</p>    <p>Wood Software : CadWork, Dietrich</p> <p>BIM & WOOD Stream (<i>Filière BIM et Bois</i>) 2015</p>   <p>(Wood and Furnitures)</p> <p>Source : LeanWood</p>

Figure-A I-1 Initiatives en Autriche et en France

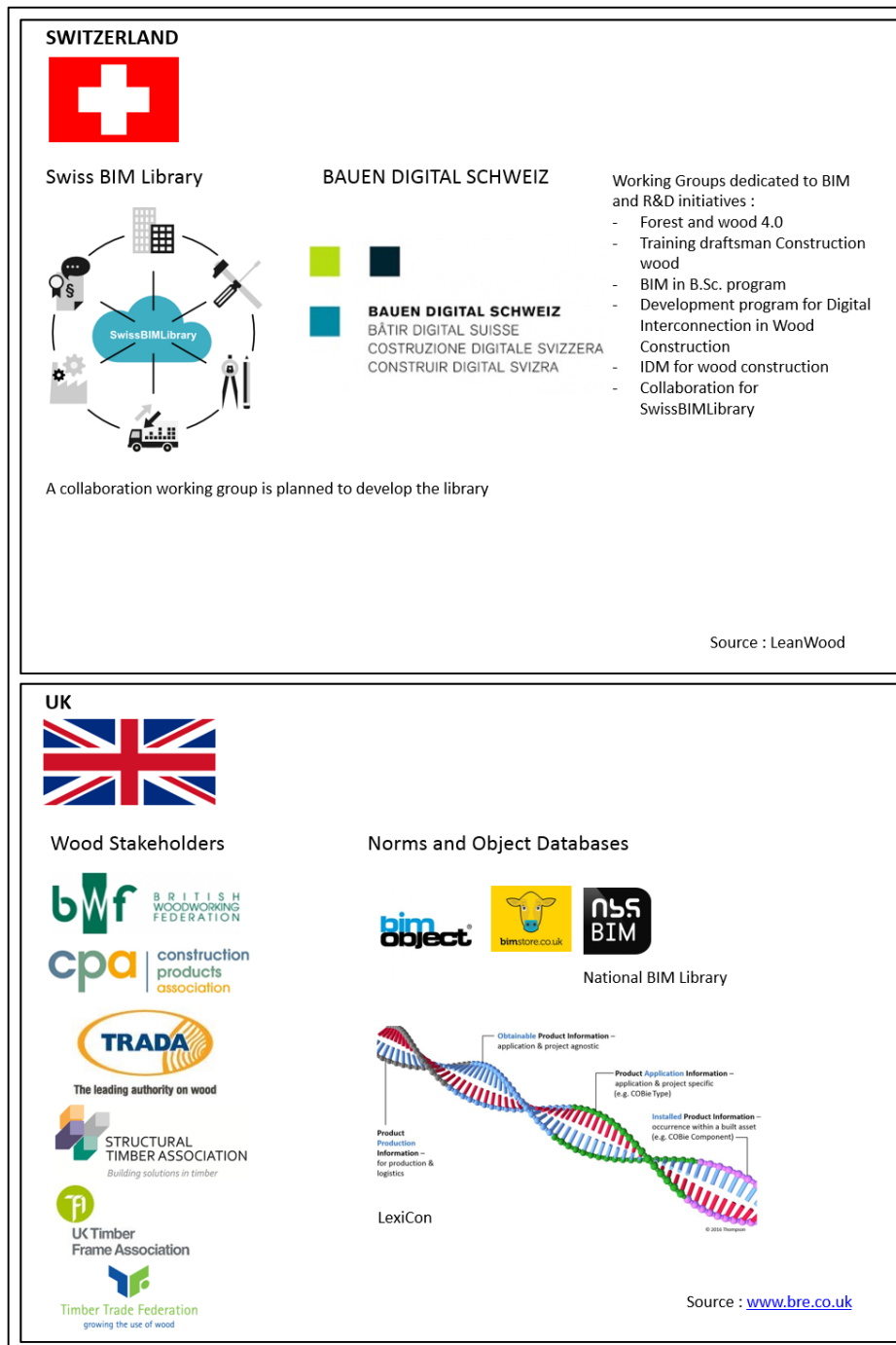


Figure – A I-2 Initiatives en Suisse et au Royaume-Uni

ANNEXE II

QUESTIONNAIRES DES ENTREVUES SEMI DIRIGÉES

1- Questionnaire soumis par courriel à SOTRAMONT suite au premier rdv de contact et visite de chantier de la phase 1

- Quels sont les enjeux de ce projet pour SOTRAMONT?
- À quel moment du processus du projet a-t-il été décidé d'utiliser le BIM?
- Quel niveau BIM a été décidé et quand ? (y a-t-il eu un plan d'exécution BIM proposé et approuvé - environnement technologique chez SOTRAMONT avant et pendant le projet? Logiciels utilisés ?)
- Est-ce que la préfabrication bois a été adoptée simultanément?
- Quel est le niveau de préfabrication bois défini et attendu : niveau 1 (composants préfabriqués) ou niveau 2 (pré-assemblage) ?
 - o Comment / par qui a-t-il été défini?
 - o En quoi cela a pu modifier l'organisation de la conception et le niveau de sa définition?
- Quel type de contrat (design bid build, CMAR ...)?
- Qui sont les intervenants pour :
 - a. préfabrifications bois
 - b. BIM? (concepteurs architectes et BET) - Pourriez-vous nous communiquer les noms et coordonnées (courriel + téléphone)?
- Avez-vous eu recours à la participation des entrepreneurs / constructeurs en phase conception (NORDIC plus spécifiquement)?
- Où se situe le gestionnaire BIM : chez le client ou chez l'un des concepteur (architectes, ingénieurs) ou un des entrepreneurs (NORDIC)?
- Influence de NORDIC sur l'échéancier (optimisation? simplification?)
- Combien de maquettes BIM actuellement? (une par discipline et une commune?)
- Échange des informations et flux de données : une matrice a-t-elle été mise en place ou bien y a-t-il un référent pour la communication?

- Avez-vous eu recours à des autorisations spéciales par rapports aux codes en vigueur ?
Si oui, lesquelles?
 - la conception du bâtiment en a-t-elle été modifiée?
 - si oui à quel degré?
- Quelle a été l'utilisation du BIM pour optimiser les travaux d'installation et d'assemblage ?
- Chaîne d'approvisionnement :
 - par rapport à d'autres réalisations quelles sont les différences pour cette réalisation en bois préfabriqué?
 - d'autres points forts et points faibles?
- Retour d'expérience pour la première phase :
 - Quels seraient les points notables à éliminer? améliorer? oubliés et à considérer pour les prochaines phases?

2- Questionnaire soumis à NORDIC par courriel après la première entrevue pour Arbora 1

- Quels sont les enjeux de ce projet pour NORDIC?
- Depuis quand NORDIC travaille en BIM ?
- Quels sont les logiciels BIM que vous utilisez?
- À quel moment du processus du projet a-t-il été décidé d'utiliser le BIM?
- À quel moment ou phase avez-vous commencé à intervenir dans le projet Arbora?
- Quels sont les éléments gérés par votre gestionnaire BIM pour ce projet? Est-ce différent par rapport à d'autres projets? Si oui, en quoi ?
- Échange des informations et flux de données : une matrice a-t-elle été mise en place ou bien y a-t-il un référent pour la communication?
- Quel est le format d'échange des fichiers?
- Quel niveau BIM a été décidé pour Arbora et quand? Est-ce le même niveau de définition pour vos autres projets en général ou bien chaque projet a un LOD différent?
- Quel est le niveau de préfabrication bois défini et attendu : niveau 1 (composants préfabriqués) ou niveau 2 (pré-assemblage) ?

- Avez-vous développé une bibliothèque d'objets : pour tous vos projets? pour celui-ci spécifiquement ?
- Quelles a été l'utilisation du BIM pour optimiser les travaux d'installation et d'assemblage ?
 - o Plus spécifiquement pour les loggias préfabriquées et pré-enduites (couche d'étanchéité) pourriez-vous nous fournir une description du processus ou un VDC?
 - o Est-ce que d'autres éléments ont été réalisés suivant un procédé similaire? Lesquels?
- Comment vit la maquette BIM chez NORDIC : fréquence de la mise à jour? son utilité après la réalisation du projet?
- Avez-vous eu une Influence sur l'échéancier (optimisation? simplification? logiciel utilisé)
- Avec quel intervenant sur le projet avez-vous les échanges les plus fréquents et les plus importants, qui ont une influence sur le développement du projet? (concepteur? ingé. MEP ? autres?)
- Retour d'expérience pour la première phase :
 - a. Quels seraient les points notables à éliminer? améliorer? oubliés et à considérer pour les prochaines phases?

Pourriez-vous me faire parvenir des images (screen-shots ou autres) de vos maquettes BIM / VDC pour illustrer ces points?

3- Questionnaire commun aux trois études de cas pour la deuxième série d'entrevues semi-dirigées

QUESTIONS PAR SUJET
<p>1. CONTEXTE</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caractéristiques du site • Motif pour le choix du bois • Enjeux bois <ul style="list-style-type: none"> ○ Montage financier ○ Réglementation <ul style="list-style-type: none"> ▪ Municipale ▪ Code incendie ▪ Sécurité sur chantier ○ Préparation de l'industrie <p>2. PROCESSUS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Promoteur • Mode de sélection des professionnels qualitatifs par rapport PCI • Professionnels autre qu'architecte, ingénieurs? (<u>Patenaude</u>, expert incendie gérant, gestionnaire de projet, construction rôle) ORGANIGRAMME • Cadre de conception : <ul style="list-style-type: none"> ○ Critères de départ ○ PCI : comment s'est déroulé ○ Implication <u>Nordic</u> dans les choix structuraux • Exigences BIM quoi, comment, utilisés en PCI, gestion coordination 3D problèmes • Leçons apprises et changements phase subséquente • Cadre de construction (gérant ou autre? Entente avec <u>Nordic</u> <ul style="list-style-type: none"> ○ Planification et séquençage de l'assemblage ○ <u>Mock-up</u> ○ Coaching des sous-traitants • Leçons apprises et changements phase subséquente <p>3. BÂTIMENT</p> <p>Innovations</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fondations • Structure • Enveloppe • Circulations verticales • Préfabrication et assemblage • Mesures de productivité • Leçons apprises

Figure –A II-1 Questionnaire commun aux trois projets étudiés

ANNEXE III

TABLEAU COMPARATIF DES TROIS PROJETS

PHASE DU PROJET	NOM DU PROJET	UBC - Tall Wood	ARBORA	ORIGINE
Vue d'ensemble du projet	VOLET ADMINISTRATIF	PCI	TRADITIONNEL	Consortium NEB (Archi / entreprise/ promoteur
	Sources de financement	Publics et privés	Privé	Privé + subventions publiques
	Montant total de l'investissement	51,5 M \$	130 M \$	25 M \$
	Coût de la structure bois			3,3 M \$
	PROGRAMME DU BÂTIMENT (vue d'ensemble)	Résidence universitaire Services	Logements (multi-résidentiel) Commerces Services Stationnements	Logements (multi-résidentiel) Stationnements Services
	Nombre d'unités habitables (total)	305	434	94
	Nombre total de niveaux	18	8	13
	Nombre de niveaux en bois	17	7	12
	Nombre de niveaux en béton	1	1 + parkings en sous-sol	1
	Fondations		Béton	
INTERVENANTS EN PHASE CONCEPTION *	Superstructure principale		Bois	
	Éléments intérieurs *		Bois et Gypse	
	Enveloppe (façades et toiture) *		Panneaux de bardage (composés mixtes non structurels)	
	Dimensions extérieures du bâtiment (L x l x h) en m	Hauteur : 53		Hauteur : 40.9
	Superficie totale en m2	15.400	51.515	
	Composition des équipes de conception	architecte paysagiste conseil conception structure bois IGH gestionnaire de projet (AMO) ingénieurs structure	architecte architectes d'intérieur paysagiste ingénieurs structure béton ingénieurs structure bois	architecte ingénieurs structure béton ingénieurs structure bois ingénieurs MEP ingénieurs civil

Figure –A III-1 Tableau comparatif dressé pendant
la construction des trois projets en mars 2017

ANNEXE IV

BIM ET LOD

Quatre niveaux de maturité BIM et leur utilisation sont définis par NBIMS. En fonction des besoins du projet et du degré d'interopérabilité requis, un niveau de maturité du BIM est choisi. Chaque niveau correspond aux objectifs de l'utilisation du BIM et au degré d'intégration de l'information : visualisation, coordination, conception, exploitation, etc.

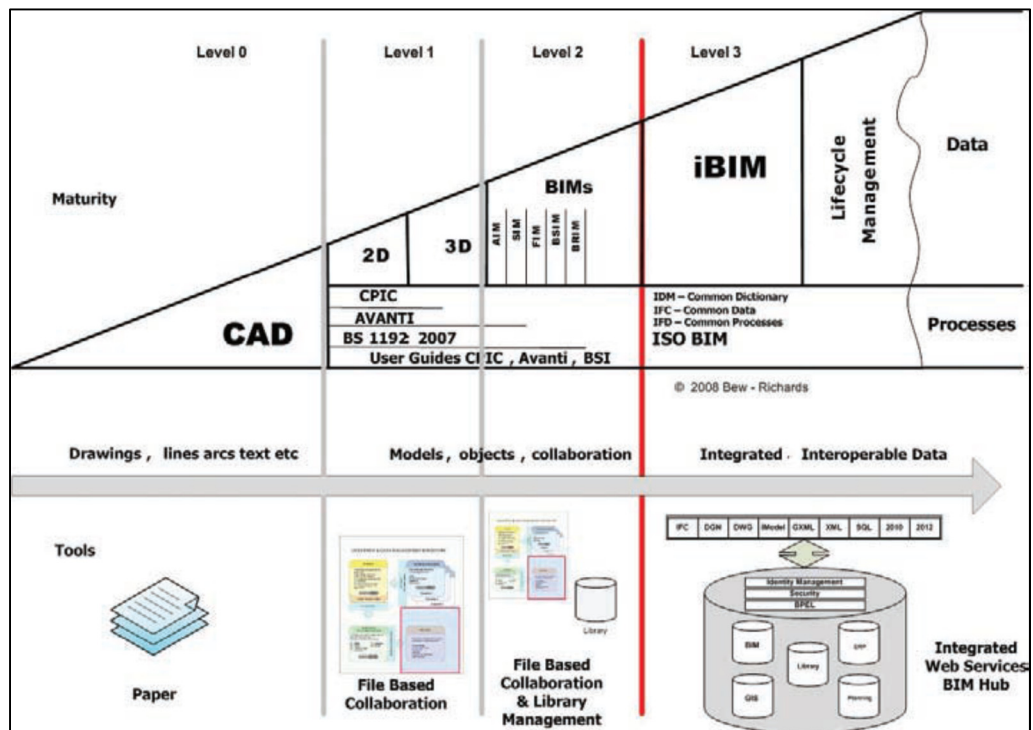


Figure -A IV-1 Les niveaux du BIM et les formats associés
Tiré de NBIMS-UK (s.d.)

En fonction des objectifs définis, la quantité de données et le type de données qui peuplent le modèle varient également. Au niveau 2, les objets qui peuplent le modèle sont assez développés pour alimenter des bibliothèques d'objets. Ces objets peuvent aussi provenir de bibliothèques déjà constituées. Le niveau 3 est celui d'une information encore plus intégrée et le modèle numérique est chargé d'informations qui vont permettre d'accompagner l'ouvrage à travers tout son cycle de vie. En fonction du niveau du BIM et de son usage, le nombre de

modèles et leur découpage est défini : il peut y avoir un seul modèle partagé, plusieurs modèles partagés ou encore un découpage des modèles partagés, en plus du modèle fédéré. Ainsi, on dessine le modèle suivant un niveau de développement (level of development ou LOD) et un niveau d'information défini (level of information LOI).

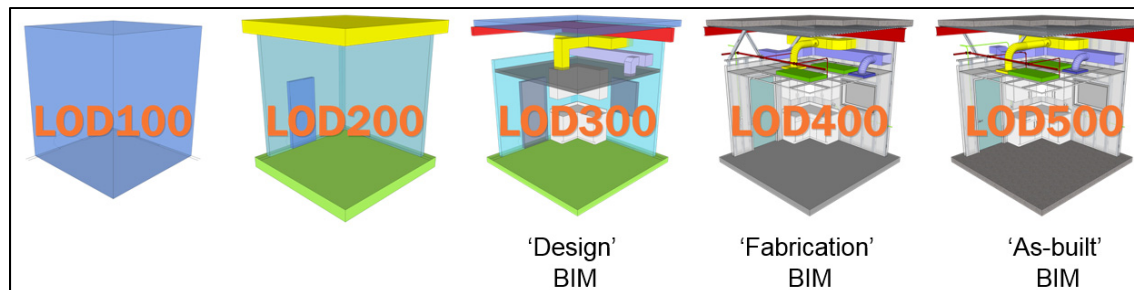


Figure -A IV-2 Les LOD et les utilisations du BIM associées
Tiré de TOPICS Lab (s.d.)

La figure ci-dessus associe des LOD à des utilisations du BIM et phases de projets. Aussi, pour les phases de fabrication, le niveau LOD minimum requis est 400 tandis que le niveau de LOD des TQC est de 500. Pour mémoire, le LOD 450 minimum était requis sur le projet Arbora 1 de la part du donneur d'ouvrage qui est aussi le constructeur du projet et l'exploitant du bâtiment (voir chapitre 4).

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Auffray, J-P., (1998) L'espace-temps, Éd. Flammarion, Coll. Dominos
- Barlish, K., Sullivan, K. (2012). How to measure the benefits of BIM - A case study approach. *Automation in construction*, vol. 24, 149-159.
- Building and Construction Authority, Bryden Wood. (2016). *BIM for DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) Essential Guide*, Singapore.
- Bryden Wood, (2017). Data Driven Infrastructure, From digital tools to manufactured components, Digital Built Britain
- Bryden Wood, (2018). Platforms, Bridging the gap between construction + manufacturing, Digital Built Britain
- Boston Consulting Group, Gerbert, P., Castagnino, S., Rothballer, C., Renz, A., Filitz, R., The Transformative Power of Building Information Modeling, Digital in Engineering and Construction, (2016)
- Bowyer, J., Bratkovitch, S., Howe, J., Fernholz, K., Frank, M., Hanessian, S., Groot, H., Pepke, E. (2016). Modern Tall Wood Buildings : Opportunities for Innovation. Dovetail Partners Inc.
- Canadian Practice Manual for BIM, vol.1 : A Primer, IBC, 2016
- Chikhi, I., Forgues, D., Botton, C. (2017). Utilisation du bois massif pour la construction en hauteur. Étude comparative des projets Origine, Arbora, Tall Wood. (Rapport de recherche) GRIDD, SHQ.
- Collot, P., Forgues, D., Rivest, L. (2016). Étude d'opportunité du BIM pour la préfabrication des bâtiments résidentiels. (Rapport de recherche) GRIDD, SHQ.
- Collot, P., Forgues, D., Rivest, L. (2016). Analysis framework of off-site manufacturing solutions : case study of a powerhouse complex. *Modular and Off-site Construction*, Edmonton, Canada, September 29- October 01, 2016.
- Construction Product Association. (2016) The Future for Construction Product Manufacturing, Digitilisation, Industry 4.0 and the Circular Economy. London : CPA
- Dagenais, C., Harmsworth, A., Mehaffey, J., Loughheed, G., Heikkila, R. (2014). Design and Construction of Tall Wood Buildings : A Guide for Fire-safety Design. World Conference on Timber Engineering, Québec City, Canada, August 10-14, 2014.

- Dubois, A., Gadde, L.-E. (2002), The construction industry as a loosely coupled system: implications for productivity and innovation, *Construction Management Economy*, vol. 20, 621–631
- Eastman, C., Listonm K., Sacks, R., & Teicholz, P. (2008) *BIM Handbook : A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*, John Wiley & Sons, Inc.
- Egan, J. (1998), Rethinking construction, The report of the construction task force, Department of Trade Industry, London, UK.
- Elvin, G., (2010) Principles of integrated practice in architecture, *Journal of architectural and planning research*, Winter 2010, vol. 7, n. 4
- Elvin, G., (2007) *Integrated practice in architecture : Mastering design-build, fast-track and Building Information Modeling*, John Wiley & Sons, Inc.
- Fallahi, A., Poirier, E.A., Staub-French, S., Glatt, J., & Sills, N. (2016), Designing for Pre-Fabrication and Assembly in the Construction of UBC's Tall Wood Building. Modular and Off-site Construction, Edmonton, Canada, September 29- October 01, 2016.
- Fallahi, A., Poirier, E.A., Moudgil, M., Tannert, T., & Staub-French, S. (2016). UBC Tall Wood Building Case Study, (design and preconstruction phase), Forestry Innovation Investment BC Wood first program (Rapport de recherche). Vancouver : UBC BIM TOPICS LAB.
- Fallahi, A., Kasbar, M., Poirier, E. A., & Staub-French, S. (2017). UBC Tall Wood Case Study, (Construction phase), Forestry Innovation Investment BC Wood first program. (Rapport de recherche). Vancouver : UBC BIM TOPICS LAB.
- Fereday, S., Potter, M. (2013). From Lonely BIM to Design for Manufacture and Assembly (DfMA) : a learning curve for SME. www.thestructuralengineer.org
- Filippi, S., Cristofolini, I. (2010). *The Design Guidelines Collaborative Framework, A Design for Multi-X Method for Product Development*, Springer-Verlag, London.
- Fisher, M., Kunz, J. (2012). Virtual Design and Construction : Themes, Case Studies and Implementation Suggestions, CIFE Working Paper #097, Version 14, Stanford : CIFE.
- FPIinnovations. (2013). Technical Guide for the Design and Construction of Tall Wood Buildings in Canada.
- Green, M. (2012). Tall Wood, the Case Study for all Tall Wood Buildings, How Mass Timber Offers a Safe, Economical, and Environmentally Friendly Alternative for Tall Building Structures. Canadian Wood Council.

- Huang, S., Zhang, H., Kuo, T. (2001) Design for Manufacture and Design for « X » : Concepts, Applications, and Perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41, 241-260.
- HM Government (2013) Construction 2025, Industrial Strategy : government and industry in partnership, United-Kingdom.
- Jureidini, J., Al-Hussein, M., & al. (2016). 3D/4D Visualization Framework for Modelling off-site Productivity of Modular Construction Housing. *Modular and Off-site Construction*, Edmonton, Canada, September 29- October 01, 2016.
- Johnson, J., Heptonstall, I., Fraser, N., Mc Carthy, S., Davie, K., Magdani, N., Stacey, S. (2013). RIBA Plan of Work 2013, Designing for Manufacture and Assembly, Newcastle upon Tyne 2016
- Kaustinen, M., Kuan, S. (2016). What is Holding Back the Expanded Use of Prefabricated Wood Building Systems?. (White Paper Innovation Series 2016) FPInnovations.
- Kohler, D., Weisz, J-D., La France doit s'inspirer du projet "Industrie 4.0" allemande. Le Monde Économie du 14 novembre 2014.
- Khanzode, A., Staub-French, S. (2007). 3D and 4D Modelling for Design and Construction Coordination: Issues and Lessons Learned. *ITcon*, 12. Pp 381-407.
- Khanzode, A., Fischer, M., Reed, D., Ballard, G. (2006). A Guide to Applying the Principles of Virtual Design & Construction (VDC) to the Lean Project Delivery Process, CIFE Working Paper #093, Stanford : CIFE.
- Koskela, LJ, Ballard, G, Howell, G and Tommelein, I. (2002). The foundations of lean construction. *Design and construction: building in value*, Butterworth Heinemann, Oxford, United-Kingdom, pp. 211-226.
- Koskelas, Lauri, (2003). Is structural change the primary solution to the problems of construction? *Building research & Information*, 31:2, 85-96, DOI: 10.1080/09613210301999
- Larsson, M., Kaiser, A., Girhammar, U.A. (2012). Case Study Houses 2.0 : Mass-Customized Multi-Storey Timber Buildings - Competitive high-rise timber structures from an architectural and engineering point of view. World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand, July 15-19, 2012.
- LeanWood Project <http://www.holz.ar.tum.de/leanwood/about-leanwood/>

- Le Roux, S., & al. (2016). Investigating the Interaction of Building Information Modelling and Lean Construction in the Timber Industry. *World Conference on Timber Engineering*, Vienna, Austria, August 22-25, 2016.
- Machado, M., Underwood, J., & Fleming, A.J. (2016). Implementing BIM to streamline a design, manufacture, and fitting workflow: a case study on a fit-out SME in the UK, Manchester : University of Salford.
- Mandujano, M.,G., Kunz, J., & al., .(2015) Use of Virtual Design and Construction, and its Inefficiencies, from Lean Thinking Perspective. Proc. *23rd Annual Conference of the Int'l. Group for Lean Construction*. Perth, Australia, July 29-31, 2015. pp. 836-845.
- Nawari, N. (2012). BIM Standardization and Wood Structures. *Computing in Civil Engineering*, 293-300.
- Oesterreich, T. D., Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 2016, vol. 83, 121-139.
- O'Rourke, O. (2013). The Future of DfMA is the Future of Construction, *Engineering Excellence Journal*, 2013.
- Poirier, E.A. (2015). Investigating the impact of BIM on AICO, ÉTS Montréal.
- Poirier, E.A., Staub-French, S., Forgues, D. (2014). Dimensions of Interoperability in the AEC Industry. *Construction Research Congress*, Georgia, 2014.
- Poirier, E.A., 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*, 2015, vol.58, 74-84.
- PwC. (2016). Industry 4.0: Building the Digital Enterprise - Engineering and Construction Key Findings. 1–36. doi:10.1080/01969722.2015.1007734.
- reThink Wood (2016) , Mass Timber in North America, Expanding the possibilities of wood building design.
- Roland Berger GmbH. (2016). Digitization in the Construction Industry Building Europe's Road to Construction 4.0. 1–16. www.rolandberger.com.
- Sacks, R., Dave, B., Koskela, L. J., & Owen, R. L. (2009). Analysis framework for the interaction between Lean Construction and Building Information Modelling. Manchester: University of Salford.

- Skipac, B., (2018). The inherent value in leveraging a virtual Design & Construction (VDC) process, AIA Knowledge Net
- Staub-French, S., Forgues, D., Iordanova, I., et al., (2011). Building Information Modeling (BIM) 'Best Practices' Project Report, An Investigation of 'Best Practices' through Case Studies at Regional, National, and International Levels
- World Economic Forum, Boston Consulting Group, (2016). Shaping the future of construction, A breakthrough in mindset and technology,
- Tall to taller wood buildings, Journey and perspective for the future, Presentation at modular & offsite construction, summit by Rory KOSKA - supported by Michael GIROUX CWC Pdt. Edmonton sept 2016.
- Taylor, J., Dossick, C., Garvin, M., (2011). Meeting the Burden of Proof with Case Study Research. ASCE Journal of Construction Engineering and Management, 137(4): 303-311.
- Usai, S., Stehling, H. (2018). La Seine Musicale, A Case Study on Design for Manufacture and Assembly. *Humanizing Digital Reality*, Paris, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6611-5_18
- Wong et al., (2010), Attributes of building information modelling implementation in various countries, Architectural Engineering and Design Management, 2010, vol.6, 288-30