Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: https://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/19782

To cite this version :

Mario BOURGAULT, Christophe DANJOU, Robert PELLERIN, Nathalie PERRIER, Conrad BOTON, Daniel FORGUES, Ivanka IORDANOVA, Erik POIRIER, Louis RIVEST, Laurent JOBLOT - Transformer le secteur de la construction par le numérique : un chantier ambitieux et nécessaire - 2021

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu

Arts et Métiers Institute of Technology

Transformer le secteur de la construction par le numérique : un chantier ambitieux et nécessaire

M. Bourgault, C. Danjou, R. Pellerin, N. Perrier, **Polytechnique Montréal**
C. Boton, D. Forgues, I. Iordanova, É. Poirier L. Rivest, **École de technologie supérieure, Montréal**
L. Joblot, LISPEN, **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**, **Cluny (France)**

L'industrie de la construction joue un rôle déterminant dans l'économie. Malgré son importance, elle fut longtemps décrite comme moins productive et innovante que d'autres secteurs. Depuis quelques années, cette situation semble changer et plusieurs acteurs reconnaissent la nécessité d'innover pour assurer la compétitivité des entreprises. De nouvelles formes de travail émergent grâce à l'introduction de technologies telles que : modélisation des données du bâtiment (BIM), réalité virtuelle et augmentée, préfabrication, objets intelligents, fabrication additive, technologies portables, automatisation, robotisation, etc. Au Québec, plusieurs grandes entreprises ont déjà adopté certaines de ces technologies, mais leur mise en œuvre reste encore embryonnaire, en particulier chez les petites entreprises. Selon nombre d'experts, l'utilisation des technologies doit être encouragée afin de créer une véritable transformation numérique de la construction au Québec. Ce chapitre propose une courte analyse de cette transformation et des pistes d'intervention pour le contexte québécois, à partir des tendances observées au niveau international.

I. LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION

L'industrie de la construction constitue un secteur important de l'économie québécoise. Cette industrie, qui couvre un très grand nombre d'activités[1], représentait 6% du PIB en 2018 et comptait pour des investissements[2] de près de 48 milliards $ (Commission de la construction du Québec [CCQ], 2019b). Le secteur public a investi plus de 18 milliards $ en 2018 dans la construction non résidentielle et les travaux de génie, contre 8,6 milliards $ pour le secteur privé[3].

[1] Au Québec, la loi R-20 subdivise l'industrie de la construction en quatre grandes catégories d'activités commerciales. Outre le i) secteur résidentiel, on retrouve la grande catégorie de bâtiments non résidentiels et travaux de génie : ii) travaux de génie civil et de voirie (ex. : routes), iii) les installations industrielles (ex. : usines), de même que iv) les bâtiments institutionnels (ex. : hôpitaux) et commerciaux (ex. : centres de distribution).

[2] Les investissements en construction représentent ici la valeur des dépenses engagées par les ménages, les entreprises et les administrations publiques pour construire des immeubles ainsi que les dépenses en immobilisations dans les travaux de génie liés au secteur non résidentiel.

[3] Statistique Canada. Tableau 34-10-0038-01 Dépenses en immobilisation et réparations, actifs corporels non résidentiels, selon le type de propriété et la géographie.

Ces chiffres ne représentent toutefois que la part directe du secteur de la construction. Une partie des secteurs manufacturier, du commerce et des services est reliée à l'activité générée dans la construction, créant des retombées économiques indirectes[4] considérables. À titre d'exemple, le PIB direct du secteur de la construction en 2014 ne représentait réellement que la moitié de la valeur ajoutée[5] totale des différents acteurs du réseau d'affaires de la construction (Deloitte et Conseil du patronat du Québec [CPQ], 2016).

Malgré son importance sur le plan économique, l'industrie de la construction au Québec, comme bien d'autres dans le monde – en France, par exemple (AIF, 2017) – fait face à de nombreux défis afin de pouvoir rejoindre d'autres secteurs plus productifs dont celui du manufacturier – la productivité horaire[6] du secteur de la construction au Québec était de 45,5 $ en 2018, comparativement à 57,0 $ pour le secteur manufacturier[7]. Ce décalage s'explique par un certain nombre de caractéristiques spécifiques au secteur de la construction.

En général, un projet de construction peut être défini comme une entreprise multiorganisationnelle, unique, temporaire et soumise à la problématique d'une livraison en un site précis où plusieurs firmes doivent être mobilisées pour une période donnée. D'autres phénomènes s'ajoutent à ces caractéristiques et contribuent souvent à la complexité des projets : besoins du client parfois imprécis et changeants, provoquant des coûts de changements importants; peu d'apprentissage d'ensemble car peu de répétitions; risques élevés dus à la nouveauté; incertitudes techniques, climatiques et même sociétales; coordination et processus décisionnels complexes entre équipes impliquées; conditions de réalisation changeantes; etc. (de Blois, Lizarralde, De Coninck, 2016).

Le secteur de la construction est également caractérisé par une forte fragmentation de l'ensemble de la chaîne de valeur à laquelle contribuent un nombre élevé d'intervenants. Outre les donneurs d'ouvrages (clients), on compte les professionnels de la construction (architectes, ingénieurs, etc.), les constructeurs eux-mêmes (entrepreneurs généraux et spécialisés), de même que les manufacturiers de matériaux et fournisseurs de toutes sortes (biens et services). Ce réseau d'acteurs indépendants impliqués dans la réalisation d'un ouvrage unique peut être très diversifié et hétérogène (Figure 1), rendant ainsi la gestion des travaux et la coordination plus difficile comparativement à d'autres secteurs plus fortement intégrés.

---

4 Les retombées indirectes représentent les effets chez les premiers fournisseurs du secteur de la construction et chez les fournisseurs subséquents.

5 La valeur ajoutée correspond à l'apport effectif d'un secteur dans l'économie. Pour estimer la valeur ajoutée d'un secteur, on doit soustraire de sa production brute les achats d'intrants intermédiaires réalisés auprès d'autres fournisseurs.

6 La productivité du travail est évaluée comme le rapport de la valeur ajoutée réelle aux heures travaillées.

7 Statistique Canada. Tableau 34-10-0480-01 Productivité du travail et mesures connexes par industrie du secteur des entreprises et par activité non commerciale, conformes aux comptes des industries.

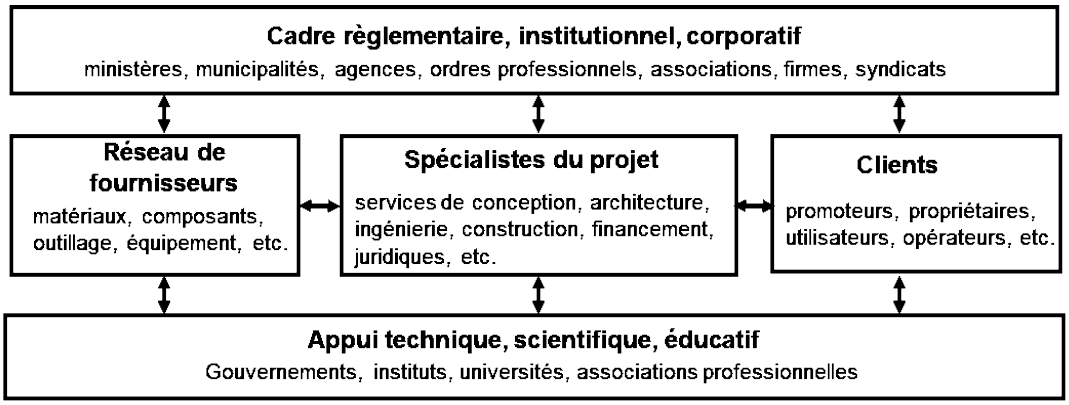

Figure 1. Principaux acteurs du secteur de la construction (adapté de Gann et Salter, 2000)

L'industrie est notamment caractérisée par un nombre élevé de petites et moyennes entreprises. En 2018, le pourcentage d'employeurs québécois du secteur ayant 5 salariés ou moins était de 82%, alors que 24 entreprises seulement sur 25 808 comptaient plus de 200 salariés (CCQ, 2019a, 2019b). Un autre trait important du milieu de la construction réside dans le fait que bon nombre des donneurs d'ouvrages pour le secteur non résidentiel sont des organisations publiques. Ainsi, parmi les 65 projets les plus importants (≥ 100 millions $) en cours au Québec en 2018, près de la moitié étaient financés par des organisations publiques : ministères, municipalités, agences publiques, etc. (CCQ, 2019a). Ce type de projets, et en particulier ceux de grande envergure, posent souvent des défis sur le plan de la définition, du financement et du contrôle des coûts, en plus des enjeux importants d'accessibilité sociale (Lehmann et Motulsky, 2013; SECOR/KPMG, 2012).

Enfin, bien que l'industrie de la construction joue un rôle prépondérant dans l'économie, les investissements en recherche et développement dans ce secteur sont relativement faibles. En effet, selon le Conference Board du Canada (2018), depuis 2000, les dépenses de recherche et développement réalisées par les entreprises dans le secteur de la construction au Canada s'établissent en moyenne à 0,08 % en pourcentage du PIB, ce qui est beaucoup plus faible que dans le secteur manufacturier (4,2 %), les mines, le pétrole et le gaz (0,67 %) et le secteur des services (0,82 %).

Devant tous ces défis, les appels à l'accroissement de productivité du secteur se font de plus en plus insistants tant au Canada qu'ailleurs dans le monde (Prieto, 2013). C'est ainsi qu'on observe graduellement diverses initiatives sur le plan de l'innovation qui démontrent la capacité bien réelle de transformation numérique chez plusieurs des firmes rattachées à ce secteur (Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations [CEFRIO], 2014); Centre d'études et de recherches pour l'avancement de la construction au Québec [CERACQ], 2015a, 2015b; Orstavik, Dainty et Abbott, 2015). Que ce soit au niveau de la gestion de projet, de la fabrication, de l'exécution, du suivi, de la surveillance, des techniques de construction ou encore des outils

utilisés, l'innovation transforme peu à peu les façons de faire traditionnelles de l'industrie de la construction.

II. TRANSFORMATION NUMÉRIQUE DU SECTEUR

Bien que les données indiquent un retard du secteur de la construction en termes d'adoption de technologies de pointe – une analyse de l'institut McKinsey effectuée en 2015 indique que la construction est l'un des secteurs les moins numérisés, devançant de peu le secteur de l'agriculture[8] –, plusieurs initiatives en cours suggèrent un changement graduel des pratiques dans cette industrie souvent considérée comme traditionnelle. Ce changement est insufflé à la fois par un souci d'être en phase avec les innovations observées au niveau international – voir exemples plus loin – mais aussi pour répondre à des enjeux nationaux importants : main-d'œuvre, compétitivité, développement durable, etc. La transformation numérique constitue l'une des voies privilégiées pour améliorer la performance globale du secteur à long terme[9] (Deloitte et CPQ, 2016).

Cette transformation numérique s'exprime de différentes façons. L'un des courants forts actuels repose sur le concept dit de la 4e révolution industrielle, aussi appelée « industrie 4.0 » (Drath et Horch, 2014), faisant référence à un ensemble de technologies permettant la capture des données en temps réel et un partage continu et instantané entre les différents intervenants, permettant ainsi une meilleure collaboration et une amélioration de la performance (Danjou, Rivest et Pellerin, 2017). Ce courant peut être défini comme le passage d'une réalisation et d'une gestion centrée sur des sources d'informations statiques (ex. : plans et devis papier) vers une réalisation et une gestion axée sur une source d'information regroupée et réutilisable à diverses fins (Poirier, Frénette, Carignan et Paris, 2018). Dans le secteur de la construction, la transformation numérique vise donc à permettre un accès plus rapide et plus étendu à l'information afin d'accroître la valeur ajoutée aux différents maillons de la chaîne de valeur (Grosso Sategna, Meinero et Volontà, 2019). L'exemple des technologies mobiles[10] illustre bien l'impact important que le numérique peut avoir sur les pratiques traditionnelles. Lorsqu'elles sont couplées avec des dispositifs de captation et de traitement automatiques de données, les technologies mobiles permettent de transformer les pratiques d'affaires, notamment en accélérant la prise de décision et ainsi mener à des gains importants de productivité.

---

[8] Deloitte, L'état du secteur de la construction et ses grands défis, 2018 et McKinsey & Company, « Reinventing construction : a route to higher productivity », 2017.

[9] L'augmentation de la productivité du secteur dépend également de facteurs « non technologiques » dont des modifications au cadre réglementaire; ces volets ne sont pas traités dans ce chapitre.

[10] Les technologies mobiles sont des appareils portables tels le téléphone intelligent, la tablette ou encore l'ordinateur portable.

Cette section présente les technologies et concepts clés dans le contexte de la Construction 4.0. Étant donné l'importance de la modélisation des données d'un bâtiment (en anglais, le *Building Information Modeling*, BIM) dans l'intégration de la gestion de l'information dans l'ensemble du cycle de vie d'un projet, une sous-section entière y est consacrée (sous-section B).

A) Construction 4.0 : une réponse aux enjeux et aux besoins en transformation numérique de l'industrie de la construction

L'application des principes de l'Industrie 4.0 au secteur de la construction, mieux connue sous le nom de la Construction 4.0, offre un potentiel considérable pour répondre aux défis de l'industrie. À l'échelle des projets, on note, entre autres, le défi de la gestion de l'information – abondance de documentation, variété dans la nature des documents, multiplicité des textes règlementaires, pluralité des formats d'échange (Kubicki, 2006; Björk, 1999; Guerriero, 2009; Boton, 2009) – qui découle de la structure fragmentée de l'industrie (Harty et Laing, 2010). Le réseau complexe de liens entre les entreprises engagées dans un projet nécessite une gestion efficace du flux d'informations techniques qui doivent être clairement communiquées entre les parties prenantes. Il s'agit là de l'un des plus grands défis de l'industrie, car c'est sur la qualité des données recueillies et transmises que repose en grande partie l'efficacité du processus de prise de décision et, donc, la performance des projets de construction. Comme l'Industrie 4.0, la Construction 4.0 implique donc une notion d'exploitation et de partage des données afin de supporter la prise de décision (ou de réaction) en temps réel ou quasi réel. Ces décisions seront pour la plupart décentralisées et certaines d'entre elles pourront même être prises de façon automatique par des systèmes, sans intervention humaine.

Bon nombre de pratiques et de technologies sont actuellement développées pour concrétiser la vision proposée par la Construction 4.0. En voici quelques exemples (Alliance Industrie du Futur [AIF], 2017; Bowmaster et Rankin, 2019) :

- ***l'automatisation du travail et la robotique collaborative (cobotique)*** : pour guider les gestes des travailleurs ou pour réaliser des tâches manuelles répétitives sur les chantiers, comme les robots de maçonnerie ;
- ***les véhicules aériens sans pilote (également appelés drones)*** : pour analyser en continu les données qui peuvent aider à surveiller des sites, suivre l'avancement des travaux, la qualité et la sécurité des opérations, etc. ;
- ***les étiquettes RFID (en anglais, radio frequency identification)*** : par exemple, pour identifier et localiser des matériaux en chantier ;
- ***l'impression 3D ou la fabrication additive*** : pour fabriquer un objet en 3D par ajout de matière couche par couche à partir d'un modèle numérique 3D (par opposition à l'usinage, i.e., la fabrication par retrait de matière) ;

- ***les machines intelligentes (intelligence artificielle)*** : pour prendre des décisions en temps réel sur l'état de l'avancement des travaux sur le chantier à partir d'images captées par des caméras et traitées par des machines ou des systèmes capables d'apprendre sur la construction d'un bâtiment et d'anticiper les besoins d'intervention;
- ***les matériaux augmentés ou avancés***[11] : pour obtenir un avantage marqué du point de vue de la performance – conductivité thermique, dureté, efficacité, biodégradabilité, etc. –, comparativement aux matériaux conventionnels couramment utilisés (Pôle de recherche et d'innovation en matériaux avancés au Québec [PRIMA Québec], 2018);
- ***les outils d'analyse prédictive*** : pour identifier rapidement – à l'aide, par exemple, d'images et vidéos capturées par drones – les problèmes potentiels d'exécution et de performance au cours d'un projet et les communiquer aux acteurs via smartphones ou tablettes pour mieux anticiper les risques de délais et de dépassement de coûts ;
- ***la réalité virtuelle*** : pour visualiser une idée de design de bâtiment en 3D ;
- ***la numérisation (ou le scanner) laser 3D*** : pour reproduire la forme d'un site en capturant sur le terrain les données nécessaires à la création d'une image de nuages de points qui sera ensuite intégrée dans un logiciel BIM ;
- ***les travailleurs et équipements augmentés***[12] : pour collecter les données sur les conditions de travail – à l'aide, par exemple, de capteurs dans les équipements de protection individuels – et pour augmenter les connaissances du travailleur sur le terrain – au moyen de la réalité augmentée[13] ;
- ***les technologies et les applications mobiles***[14] : pour effectuer diverses tâches sur le chantier : gestion des listes de déficiences, des visites de chantier, des mises en service, rapports automatiques, collaboration en temps réel, etc.

Ces nouvelles technologies présentent un potentiel important non seulement pour l'amélioration de la productivité, la collaboration et la gestion de l'information, mais aussi pour réduire les délais d'un projet, augmenter la qualité des biens livrables bâtis, améliorer la santé et la sécurité en chantier, et favoriser l'atteinte de cibles environnementales (Poirier et al., 2018). Au Québec, de

[11] Les matériaux, tels le béton, le ciment ou les vitres, peuvent être « augmentés » par la technologie afin d'améliorer leurs propriétés physiques ou fonctionnelles (PRIMA Québec, 2018).

[12] Les travailleurs peuvent être « augmentés », par exemple, par des robots collaboratifs ou des exosquelettes dans le but d'amplifier, de guider ou de faciliter les gestes des travailleurs. De même, les équipements peuvent être « augmentés » par des capteurs pour collecter les données sur les conditions de travail, localiser les travailleurs ou encore prévenir les risques.

[13] Munis de casques connectés, les travailleurs peuvent visualiser en 3D l'ensemble des couches d'un bâtiment (réseau électrique, plomberie, climatisation) en réalité augmentée durant la construction en vue de mieux comprendre le projet et anticiper les problèmes.

[14] Une application mobile est un type d'application logicielle qui fonctionne sur une technologie mobile.

telles innovations technologiques font de plus en plus leur entrée sur les chantiers de construction. À titre d'exemple, les robots et les drones qui, équipés de caméras, peuvent prendre des images dans des zones parfois dangereuses afin de suivre l'évolution d'un chantier[15,16]. Au Québec, 340 entreprises sont présentement actives dans le domaine des matériaux augmentés et la construction constitue un secteur d'application privilégié avec ses panneaux composites[17] et ses matériaux de construction écoresponsables[18] et autoréparants[19] (PRIMA Québec, 2018). Plusieurs entreprises utilisent également différentes applications mobiles pour la gestion de projet et de chantier (CERACQ, 2015b). Parmi les nombreuses retombées liées à l'utilisation de ces applications, outre l'amélioration de la capture et de l'échange d'information dans la phase d'exécution, le gain de temps demeure le bénéfice le plus cité (Frenette, 2014; Usman et Said, 2012). À Montréal, on développe actuellement une technologie de visualisation qui s'appuie sur la réalité augmentée pour faciliter les échanges d'informations à distance lors des travaux publics ou la gestion des infrastructures[20]. La communication visuelle à distance est assurée par une technologie mobile en réalité augmentée permettant à un employé sur le terrain de recevoir les directives d'un autre employé au bureau qui communique à l'aide d'un casque de réalité virtuelle et d'une application de virtualité augmentée installée sur un ordinateur de bureau. Cette technique permet de superposer des objets virtuels en 3D et du texte devant des objets de construction réels.

B) Le BIM : pierre angulaire de la Construction 4.0

Parmi les nombreuses transformations numériques en cours dans le monde de la construction, l'adoption du BIM représente, pour plusieurs observateurs professionnels et académiques, la clé de voûte pour permettre le déploiement de la Construction 4.0. Le concept du BIM peut se résumer ainsi : générer et échanger l'information de projet dans une seule base de données partagée entre tous les acteurs d'un projet. En effet, la mise en œuvre du BIM permet de rapprocher les fonctions de planification de la séquence réelle d'exécution d'un bâtiment ou d'un ouvrage en permettant notamment la visualisation de la réalisation projetée à l'échelle du temps

15 https://www.aqmat.org/lintelligence-artificielle-chantier-de-pomerleau/

16 https://www.aqmat.org/lintelligence-artificielle-chantier-de-pomerleau/

17 Les matériaux composites sont composés d'au moins deux composants dont les propriétés sont complémentaires. Ces matériaux possèdent des propriétés que les composants seuls n'ont pas.

18 Un matériau écoresponsable (aussi dit *écomatériau*) est un matériau de construction qui répond non seulement aux critères de performances physiques et fonctionnelles exigés des matériaux de construction en général (durabilité, sécurité, résistance, etc.), mais aussi à des critères environnementaux tout au long de son cycle de vie.

19 Les matériaux autoréparants (comme le béton autoréparant) ont des microcapsules intégrées remplies d'une sorte de colle qui s'ouvrent en cas de fissure. Le matériau de réparation activé permet de réparer la fissure.

20 https://ville.montreal.qc.ca/idmtl/realite-virtuelle-et-realite-augmentee-technologies-de-pointe-au-coeur-de-linnovation-a-montreal-partie-2/

d'une maquette numérique (la planification 4D) et des coûts escomptés (la planification 5D) (Wang, Yung, Luo et Truijens, 2014). Le BIM sert de plateforme de partage de connaissances et de données tout au long de la chaîne de valeur de la construction, en plus d'être un outil d'aide à la décision durant le cycle de vie d'un projet. Sur ces aspects, le BIM diffère de la stratégie 4.0 en ce sens qu'il permet de centraliser une foule de données exploitées ou évaluées par des humains de manière asynchrone, plutôt qu'en temps réel ou quasi réel.

L'adoption du BIM est devenue un standard de la construction dans plusieurs pays (McAuley, Hore et West, 2017). À titre d'exemple, la GSA (General Services Administration) aux États-Unis exige des pratiques issues du BIM depuis 2007 pour les projets gouvernementaux, alors que le gouvernement du Royaume-Uni oblige la réalisation de projet supportée par le BIM (au moins une maquette 3D) depuis 2016 pour tout projet public[21]. L'utilisation du BIM permet à l'Agence de l'environnement du Royaume-Uni de réaliser des économies d'environ 600 000 £ par an – soit plus d'un million de dollars par an – dans la gestion du transfert de données des projets d'investissement aux opérations (University of Cambridge, 2020). La Finlande, la France et Singapour sont également considérés comme des leaders mondiaux en matière d'adoption du BIM. Au Canada, plusieurs organismes publics, comme Infrastructure Alberta et le ministère de la Défense nationale, utilisent largement le BIM ou sont en voie d'exiger son application sur certains projets (Poirier et al., 2018). Services publics et Approvisionnement Canada est en voie de mettre en place certaines normes BIM pour faciliter la transition vers le numérique, rejoignant ainsi des pays comme les États-Unis et la Finlande. Au Québec, la Société Québécoise des infrastructures exige le BIM sur ses grands projets depuis 2016.

Selon l'EU BIM Task Group (2016), groupe soutenu et financé par la Commission européenne, les possibilités liées à la transformation numérique et au déploiement du BIM sont en effet nombreuses :

- une plus grande productivité du secteur, résultant en un accroissement de la valeur générée par celle-ci ;
- une meilleure qualité des biens publics construits ;
- une capacité accrue d'adapter l'environnement bâti aux défis de développement durable et des changements climatiques ;
- un environnement bâti qui soutient la nécessité d'une économie circulaire ;
- une augmentation de la transparence du réseau d'affaires de la construction et de ses performances ;
- de nouvelles opportunités de croissance du secteur grâce à des exportations et des offres de services supplémentaires ; et

[21] http://www.bicp.ie/bicp-global-bim-study

- un réseau d'affaires plus fort et plus qualifié en technologies numériques, attirant des talents et des investissements.

Les résultats d'une étude menée en 2017 par le Groupe BIM Québec auprès de 40 experts sur le déploiement du BIM dans l'industrie de la construction au Québec ont également permis d'identifier plus d'une trentaine d'opportunités grâce à l'utilisation du BIM (Poirier et al., 2018). Outre l'amélioration de la qualité des ouvrages, de la communication, de la gestion et de la qualité de l'Information, les cinq éléments les plus mentionnés par les experts sont l'importance des gains en efficacité (35% des experts), la diminution des risques en chantier (33%), la possibilité de préfabrication et d'intégration des manufacturiers (25%), la réduction des déchets (23%) ainsi que l'amélioration du transfert des données de construction vers la gestion des actifs (20%).

On constate donc que les avantages du BIM vont au-delà du partage de données à travers la chaîne de valeur de la construction. En fait, ils s'étendent sur tout le cycle de vie de l'actif bâti et se déclinent en bénéfices substantiels sur le plan économique – réduction des coûts de construction, diminution de la durée du projet, baisse des reprises en chantier, et réduction des coûts d'entretien et d'opération (BIM Industry Working Group, 2011; EU BIM Task Group, 2016 : GSA, 2007 ; Poirier et al., 2018; Roland Berger, 2016). On observe également, sur le plan environnemental, une réduction du gaspillage en chantier, une optimisation de l'utilisation de l'énergie en mode opération et la possibilité d'évaluer le cycle de vie complet de l'actif en opération. Finalement, le BIM peut aussi apporter des bénéfices sur le plan social : normes de santé et de sécurité plus élevées, engagement et consultation publique améliorés, etc.

Dans le but de démontrer l'impact du BIM sur la performance des projets, un modèle a été développé par PwC sous la direction du UK BIM Task Group pour mesurer les bénéfices du BIM à chaque étape du cycle de vie d'un projet (PricewaterhouseCoopers LLP, 2018). Le modèle regroupe les bénéfices en différentes catégories : gains de temps, économies de matériel, économies de coûts, amélioration de la santé et de la sécurité, réduction des risques, amélioration de l'utilisation et de la qualité des actifs, etc. Le modèle fournit également des lignes directrices sur la façon de quantifier les bénéfices pour chaque catégorie. Par exemple, les gains de temps résultant de l'usage du BIM peuvent être traduits en termes monétaires en calculant la réduction correspondante des coûts directs de la main-d'œuvre. Si les gains de temps entraînent une accélération de l'exécution du projet, la valeur actuelle nette[22] du projet peut également augmenter. De même, les économies de matériaux peuvent être estimées en calculant la variation de la quantité de chaque type de matériau utilisé et en appliquant ensuite le coût de chaque type à la réduction calculée.

[22] La valeur actuelle nette correspond à la rentabilité d'un projet après avoir considéré l'investissement initial requis pour le financer.

L'utilisation du BIM agit donc comme catalyseur d'améliorations et de changements qui vont bien au-delà des fonctions de modélisation, de partage et d'échange de l'information. Les bénéfices directs qui en résultent se traduisent en économies réelles. Les entreprises en construction qui envisagent le passage au BIM se doivent de saisir pleinement les bénéfices qui y sont liés et de quantifier leurs impacts directs sur la performance des projets afin qu'elles puissent non seulement justifier les coûts de transition vers le BIM, mais aussi assurer la viabilité du processus d'implantation du BIM (Poirier et al., 2015).

Les concepts de Construction 4.0 et du BIM rallient aujourd'hui un grand nombre d'acteurs de l'industrie. L'effort de diffusion se poursuit, non sans difficultés. La véritable embûche réside dans sa mise en œuvre qui requiert un plan de transformation structuré ainsi qu'un plan de déploiement à l'ensemble des acteurs (AIF, 2017).

III. ÉTAT DE LA SITUATION AU QUÉBEC

A) Portrait de la transformation numérique dans l'industrie québécoise de la construction

Au Québec, l'industrie de la construction se transforme de différentes façons et intègre de plus en plus les technologies et les approches issues de la Construction 4.0 pour favoriser la compétitivité des entreprises québécoises. Selon une étude réalisée en 2016 (Deloitte et CPQ, 2016), les moyens les plus utilisés actuellement pour innover comprennent, sans s'y limiter, les technologies mobiles, la conception intégrée[23], le BIM, la préfabrication et d'autres innovations en lien avec les matériaux (polymères, matériaux recyclés, etc.). Plusieurs grandes entreprises utilisent déjà le BIM au Québec depuis des années.

D'ici 2025, on estime que la transformation numérique à grande échelle de la construction non résidentielle permettra de réaliser des économies de coût global annuel de 13 à 21 % lors des phases d'ingénierie et de construction et de 10 à 17 % durant l'exploitation de l'ouvrage (Gerbert, Castagnino, Rothballer, Renz et Filitz, 2016). Au Québec, uniquement en ce qui a trait aux dépenses en immobilisation, cela représenterait entre 3 et 5 milliards $ d'économies par année (Poirier et al., 2018).

Bien que l'industrie québécoise de la construction participe au courant 4.0, elle reste toutefois en retard par rapport à sa contrepartie européenne et américaine. En effet, un sondage mené en 2015 par le Groupe de recherche en intégration et développement durable en environnement bâti (GRIDD) en collaboration avec le CERACQ révélait un taux d'adoption moyen du BIM de 31 %

[23] La conception intégrée est un processus de collaboration entre les intervenants qui couvre le cycle de vie complet d'un projet. Ce processus nécessite une équipe de conception multidisciplinaire qui comprend les compétences nécessaires pour résoudre de façon intégrée et optimale toutes les exigences de conception découlant des objectifs fonctionnels, environnementaux et économiques (CERACQ, 2015a).

pour l'ensemble de l'industrie québécoise de la construction, avec néanmoins des écarts importants selon le type d'entreprises : ingénieurs-conseils (62%), architectes (41%), sous-traitants, fabricants et donneurs d'ouvrage (20%) et entrepreneurs généraux (12%) (Forgues, Tahrani et Poirier, 2015). Ce taux d'adoption du BIM correspond bien à d'autres données publiées par Statistique Canada qui démontraient récemment que seulement 31,4 % et 38,8 % des entreprises québécoises en construction avaient introduit respectivement des innovations de produits et de procédés entre 2015 et 2017 (Figure 2).

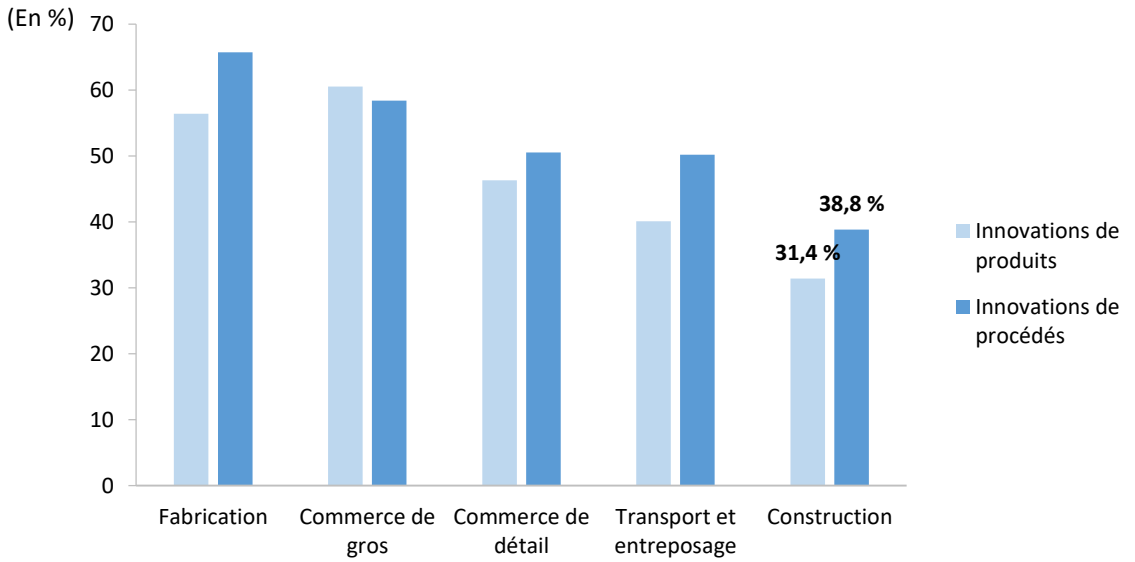

Figure 2 : Pourcentage d'entreprises québécoises ayant introduit des innovations de produits et de procédés entre 2015 et 2017 (adapté de Statistique Canada[24])

La même enquête menée par le GRIDD a permis d'identifier les principaux bénéfices pour les entreprises ayant adopté le BIM (Forgues et al., 2015). Parmi ces bénéfices, on note l'amélioration de la compréhension du projet, l'amélioration de la coordination multidisciplinaire, l'élimination de conflits spatiaux entre les éléments 3D (par la détection d'interférences), l'amélioration de la communication entre les membres de l'équipe de projet et la réduction du temps de coordination.

Plus récemment, les résultats d'une autre enquête menée par l'Association des architectes en pratique privée du Québec (AAPPQ, 2017) sur l'utilisation du BIM auprès de ses membres révélaient que son usage aurait trois fois plus d'incidences positives que négatives sur les pratiques d'affaires des architectes. Le BIM serait ainsi vu comme ayant un fort potentiel pour améliorer la coordination et la collaboration au sein de l'équipe de projet, stimuler l'industrie de la

[24] Statistique Canada. Tableau 27-10-0155-01 Introduction de différents types d'innovation, par industrie et taille de l'entreprise.

construction, bonifier les relations entre les parties prenantes du réseau d'affaires, et améliorer la qualité des ouvrages ainsi que celle des processus de déploiement de projets.

Afin d'encourager l'usage intensif du BIM et des nouvelles technologies, différents acteurs se mobilisent pour appuyer la transformation numérique dans le secteur de la construction au Québec. Parmi ces intervenants, on retrouve le CERACQ, le GRIDD, le Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) ainsi que plusieurs chaires de recherche dans le secteur de la construction. Le Groupe BIM Québec, né de la volonté des principaux acteurs BIM au Québec, contribue également à mieux intégrer les contraintes et spécificités du Québec, et mieux développer les opportunités de cette nouvelle pratique professionnelle. La Table multisectorielle BIM-PCI (processus de conception intégrée) constitue une autre initiative pour mobiliser les acteurs du secteur. Initiée en 2011 par le GRIDD, cette table de concertation vise à rapprocher les principaux acteurs de l'industrie afin d'établir une marche à suivre pour une transition numérique dans l'industrie (GRIDD, s.d.). Finalement, le gouvernement du Québec a voté une enveloppe de 11 millions $ sur 5 ans au budget 2018-2019 pour supporter la transformation numérique dans l'industrie québécoise de la construction. L'initiative québécoise pour la construction 4.0 (www.constructionnumerique.ca) est subventionnée à même ce poste budgétaire.

Malgré toutes ces initiatives, l'industrie de la construction au Québec peine à entreprendre pleinement le virage numérique alors que la Construction 4.0 prend son essor ailleurs dans le monde – certaines entreprises aux États-Unis ont atteint le plus haut niveau de maturité d'utilisation des technologies mobiles en construction et les grandes entreprises en construction en France déploient déjà plusieurs technologies à l'échelle industrielle (AIF, 2017; CERACQ, 2015b). Ce retard se résume principalement aux disparités, d'une entreprise à l'autre, sur le plan de l'implantation et de l'utilisation de nouvelles technologies (comme le BIM), en plus d'une forte résistance au changement dans leur adoption (Deloitte, 2019). La transformation numérique dans l'industrie québécoise de la construction pose en fait de nombreux défis – tels la lourde charge des coûts de transition pour les petites entreprises de l'industrie – qui viennent ralentir la courbe d'adoption de nouvelles pratiques.

B) Conditions pour soutenir la transformation du secteur au Québec

Au niveau national, les défis liés à la transformation numérique sont nombreux. Le secteur de la construction présente en fait de nombreuses caractéristiques structurelles uniques pouvant entraver le virage numérique. Parmi celles-ci, la faible taille des entreprises en construction limite leur capacité à prendre le virage numérique. L'unicité de chaque projet de construction – deux ouvrages ne seront jamais identiques (type de sol, etc.) – peut également expliquer la réticence de l'industrie à s'automatiser et à adopter de nouvelles technologies d'information

comparativement aux autres industries (Childress, 2013; Forgues et Staub-French, 2011; Gu et London, 2010; Hewage et Ruwanpura, 2009). À ces caractéristiques s'ajoutent la durée limitée des projets, la mobilité de la main-d'œuvre et des entreprises, qui se déplacent d'un site à l'autre, l'instabilité de la main-d'œuvre ainsi que l'instabilité cyclique – l'activité de construction varie en fonction des investissements publics ou privés, entraînant des périodes de forte activité ainsi que des périodes où l'activité se trouve ralentie (CCQ, 2020). Le secteur de la construction repose également sur un grand nombre de parties prenantes dont les intérêts et les besoins peuvent différer, même en matière d'innovation.

Les bénéfices liés à la transformation numérique ne se réaliseront donc pleinement que si les acteurs de l'industrie travaillent tous ensemble (Poirier et al., 2018). En effet, avec plus de 25 000 entreprises de construction au Québec en 2019, le processus de transformation numérique doit nécessairement passer par la collaboration et la transition collective. La collaboration est devenue impérative dans le secteur de la construction – les résultats d'une étude menée par le CERACQ (2015b) montrent que, bien que certaines entreprises au Québec se montrent innovantes en adoptant, par exemple, les technologies mobiles, l'utilisation de ces technologies se fait, en général, encore pour un usage personnel (e.g., consultation de documents). Ce processus doit également être encouragé par une structure favorable et un soutien de tous les acteurs de l'industrie.

En effet, la transformation repose au départ sur les initiatives des entreprises individuelles – adoption de nouvelles technologies et de nouveaux processus, innovation de modèles d'entreprise, amélioration de la culture et de l'organisation de l'entreprise, etc. Toutefois, l'action individuelle ne peut suffire pas dans un secteur aussi fragmenté et horizontal : bon nombre des défis doivent être relevés collectivement. Le secteur dans son ensemble a donc une responsabilité. Il doit établir de nouvelles formes de collaboration entre les entreprises de la construction ou améliorer les formes existantes. Enfin, certaines initiatives peuvent être adoptées par le gouvernement, agissant à la fois comme régulateur et comme donneur d'ouvrage clé de grands projets d'infrastructure (World Economic Forum, 2016).

Ce n'est qu'en prenant appui sur des axes d'intervention précis que le virage numérique sera pleinement entrepris par l'industrie québécoise de la construction.

C) Axes d'intervention prometteurs dans le secteur de la construction au Québec

Comme dans d'autres secteurs où l'on observe des efforts importants pour prendre le virage numérique, tels le commerce de détail, l'éducation ou le transport, le secteur québécois de la construction doit se doter d'une stratégie permettant de mettre en œuvre les changements technologiques nécessaires à sa transformation. C'est ce qui ressort de l'étude publiée par BIM Québec sur le déploiement des outils et des pratiques de la modélisation des données du

bâtiment au Québec. Le rapport propose une stratégie composée de cinq grands axes d'intervention, qui se déclinent en 20 initiatives, pour orienter et structurer la transformation de l'industrie. Le Tableau 1 résume les axes et initiatives proposés.

Tableau 1. Axes d'intervention pour stimuler l'adoption des technologies en construction au Québec (adapté de Poirier et al., 2018)

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

Finalement, dans leur stratégie économique favorisant l'innovation de la construction au Québec, Deloitte et le CPQ (2016) présentent deux exemples d'intervention afin de soutenir l'innovation, le

transfert technologique et le développement des compétences et des pratiques. La première intervention consiste à encourager l'investissement privé en capital, main-d'œuvre et innovation pour augmenter la productivité, alors que la seconde vise à soutenir le virage vert dans les produits et les procédés liés à la construction.

CONCLUSION

Le secteur de la construction joue un rôle prépondérant dans l'économie québécoise. La productivité du travail de ce secteur reste toutefois plus faible que celle d'autres secteurs, dont celui du manufacturier. Cet écart s'explique par un certain nombre d'enjeux majeurs auxquels doit aujourd'hui faire face l'industrie de la construction : globalisation du secteur, pénurie de main-d'œuvre, défis en matière de développement durable, etc. En réponse à ces enjeux, l'industrie devra entre autres travailler sur un vecteur clé de productivité pour soutenir la compétitivité de ses entreprises : l'innovation.

Alors que le courant Construction 4.0 prend son essor dans le monde, le Québec accuse toujours un retard dans l'adoption des technologies dans la construction. Pourtant, les bénéfices liés à l'adoption des technologies 4.0 dans le secteur de la construction sont nombreux : amélioration de la productivité, de l'efficacité des modes de gestion et de production, de la qualité des ouvrages bâtis, de la collaboration au sein des équipes de projet, de la santé et sécurité des travailleurs, du respect de critères et de lois gouvernementales en matière de développement durable, etc.

Pour tirer pleinement avantage des bénéfices liés à l'innovation, de nombreux défis devront être relevés, le plus important étant la forte résistance au changement de l'industrie. En effet, alors que des entreprises envisagent d'adopter les nouvelles technologies, d'autres ne semblent pas encore prêtes à entreprendre le virage numérique, surtout les petites firmes (AAPPQ, 2017).

En dépit des obstacles, l'industrie québécoise de la construction assiste tout de même, depuis déjà quelques années, à l'émergence de diverses initiatives – plans d'action, axes d'intervention, pistes de solution concrètes – impliquant les acteurs du secteur. Ces actions devront comprendre notamment une gouvernance harmonisée du virage numérique, l'élaboration d'une feuille de route pour mesurer la progression de l'industrie, la formation de réseaux de soutien pour diffuser l'information, l'instauration d'un réseau académique favorisant la recherche, l'innovation et la diffusion des connaissances, et l'accroissement de la demande pour l'innovation dans le contexte de projets publics.

Références

Alliance Industrie du Futur. (2017). *Études filières industrie du futur. Synthèse des impacts et des recommandations*. Repéré à http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2017/09/2017_09_AIF_document-a-telecharger_Etudes-Filieres-Industrie-du-Futur-Septembre-2017.pdf

Association des architectes en pratique privée du Québec. (2017). *Impact économique et profil statistique des établissements privés d'architecture au Québec*. Repéré à http://www.aappq.qc.ca/content/file/rapport-aappq-janvier-2017-version-finale-sans-4.pdf

BIM Industry Working Group. (2011). Management for value, cost & carbon improvement: A report for the Government Construction Client Group. Repéré à https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/BISBIMstrategyReport.pdf

Björk, B.-C. (1999). Information Technology in Construction–domain definition and research issues. *International Journal of Computer Integrated Design And Construction*, *1*(1), 1-16.

Boton, C. (2009). Gestion de l'information au sein des projets de construction: De l'expérience luxembourgeoise à la propositiond'un modèle de système d'information pour l'Afrique, Université Senghor d'Alexandrie.

Bowmaster, J. et Rankin, J. (2019, Mai). A research roadmap for off-site construction: automation and robotics. Article présenté au Modular and offsite construction summit (2019 MOC Summit), Banff, Alberta, Canada.

Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations. (2014). Construction 2.0. L'efficacité par le numérique. Repéré à https://cefrio.qc.ca/media/1324/construction-20-lefficacite-par-le-numerique.pdf

Centre d'études et de recherches pour l'avancement de la construction au Québec. (2015a). Processus de conception intégrée (PCI). L'efficacité énergétique des bâtiments & réduction des impacts sur l'environnement. Repéré à https://ceracq.ca/wp-content/uploads/2015/03/Guide-conception-integree-CERACQ.pdf

Centre d'études et de recherches pour l'avancement de la construction au Québec. (2015b). Construction 2.0 Guide des technologies mobiles. Repéré à https://ceracq.ca/wp-content/uploads/2015/11/Guide-de-Tech.-Mobiles.pdf

Childress, V.W. (2013). Building construction and building information modeling.*Technology and Engineering Teacher*, *73*(4), 24.

Commission de la construction du Québec. (2019a). Statistiques annuelles de l'industrie de la construction 2018. Repéré à https://www.ccq.org/-/media/Project/Ccq/Ccq-Website/PDF/Recherche/StatistiquesHistoriques/2018/intro_tableaux_2018.pdf

Commission de la construction du Québec. (2019b). Rapport annuel de gestion 2018. Repéré à https://www.ccq.org/-/media/Project/Ccq/Ccq-Website/PDF/Communications/RapportsAnnuels/rapport_annuel_2018.pdf

Commission de la construction du Québec. (2020). L'industrie de la construction. Tiré de https://www.ccq.org/fr-CA/En-tete/qui-sommes-nous/industrie-de-la-construction

Conference Board du Canada. (2018). Recherche-développement des entreprises. Repéré à https://www.conferenceboard.ca/hcp/provincial-fr/innovation-fr/berd-fr.aspx

Danjou, C., Rivest, L. et Pellerin, R. (2017). Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie. Article présenté au 12e Congrès international de génie industriel (CIGI 2017), Compiègne, France.

de Blois, M., Lizarralde, G., De Coninck, P. (2016). Iterative project processes within temporary multi-organizations in construction: the self-, eco-, re-organizing projects. *Project Management Journal*, *47*(1), 27–44. doi: 10.1002/pmj.21560

Deloitte et Conseil du patronat du Québec. (2016). Étude sur l'écosystème d'affaires de la construction au Québec. Repéré à https://www.cpq.qc.ca /wp-content/uploads/2016/04/cpq-construction270516.pdf

Deloitte (2019). Vers la création d'une grappe dans le secteur de la construction. Rapport final remis au ministère de l'Économie et de l'Innovation. Repéré à https://www.cpq.qc.ca/workspace/uploads/files/rapport_final_remis_au_mei_1.pdf

Drath, R. et Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or hype? *IEEE Industrial Electronics Magazine*, *8*(2), 56-58. doi: 10.1109/MIE.2014.2312079

EU BIM Task Group (2016). Handbook for the introduction of building information modelling by the European public sector. Strategic action for construction sector performance: driving value, innovation and growth. Repéré à http://www.eubim.eu/wp-content/uploads/2017/07/EUBIM_Handbook_Web_Optimized-1.pdf

Frénette, S. (2015). Améliorer les processus de communication sur les chantiers de construction à l'aide des technologies mobiles et des technologies infonuagiques. Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure, Montréal.

Forgues, D., Staub-French, S. (2011). Improving efficiency and productivity in the construction sector through the use of information technologies.

Forgues, D., Tahrani, S. et Poirier, E. (2015). Sondage 2015 – Adoption du BIM et des approches intégrées au Québec. Repéré à http://gridd.etsmtl.ca/fr/archives/1356

Gann, D. M. et Salter, A. J. (2000). Innovation in project-based, service-enhanced firms: the construction of complex products and systems. *Research Policy*, *29*(7-8), 955–972. doi: 10.1016/S0048-7333(00)00114-1

General Services Administration. (2007). GSA BIM Guide Overview. Repéré à https://www.gsa.gov/cdnstatic/GSA_BIM_Guide_v0_60_Series01_Overview_05_14_07.pdf

Gerbert, P., Castagnino, S., Rothballer, C., Renz, A. et Filitz, R. (2016). Digital in engineering and construction. The transformative power of building information modeling. Repéré à http://futureofconstruction.org/content/uploads/2016/09/BCG-Digital-in-Engineering-and-Construction-Mar-2016.pdf

Groupe de recherche en intégration et développement durable en environnement bâti. (s.d.). Table multisectorielle. Repéré à http://gridd.etsmtl.ca/fr/table-multisectorielle

Grosso Sategna, L., Meinero, D. et Volontà, M. (2019). *Digitalising the construction sector. Unlocking the potential of data with a value chain approach*. Repéré à https://issuu.com/cece_europe/docs/final_nobianche2-ied_consulting_-_f

Gu, N., London, K. (2010). Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Automation in Construction*, *19*(8), 988-999.

Guerriero, A. (2009). La représentation de la confiance dans l'activité collective. Application à la coordination de l'activité de chantier de construction, Nancy-Université INPL.

Harty, J., Laing, R. (2010). Removing barriers to BIM adoption: Clients and code checking to drive changes. Handbook of research on building information modeling and construction informatics: Concepts and technologies (pp. 546-560): IGI Global.

Hewage, K.N., Ruwanpura, J. Y. (2009). A novel solution for construction on-site communication–the information booth. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *36*(4), 659-671.

Kubicki, S. (2006). Assister la coordination flexible de l'activité de construction de bâtiments, Une approche par les modèles pour la proposition d'outils de visualisation du contexte de coopération, Université Henri Poincaré, Nancy I.

Lehmann, V. et Motulsky, B. (2013). *Communication et grands projets. Les nouveaux défis.* Québec : Presses de l'Université du Québec.

McAuley, B., Hore, A. et West, R. (2017). BICP Global BIM Study - Lessons for Ireland'sBIM Programme. Repéré à http://arrow.dit.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1016&context=beschrecrep

Orstavik, F., Dainty, A. et Abbott, C. (2015). *Construction Innovation*. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.

Poirier, E. A., Frénette, S., Carignan, V. et Paris, H. (2018). Accroître la performance de la filière québécoise de la construction par le virage numérique. Étude sur le déploiement des outils et des pratiques de la modélisation des données du bâtiment au Québec. Repéré à https://5147b3bb-4760-4d06-beca-a82606abf82e.filesusr.com/ugd/672f48_ac1725fcd7a04483a818107b29da9079.pdf

Poirier, E., Staub-French, S., Forgues, D. (2015). Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action-research. *Automation in Construction*, *58*, 74-84. doi: 10.1016/j.autcon.2015.07.002

PricewaterhouseCoopers LLP. (2018). BIM level 2 benefits measurement – Summary guide. Repéré à https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/1._pwc_summary_guidance_to_bbm.pdf.

Prieto, B. (2013). Systemic innovation and the role of program management as enabler in the engineering & construction industry. *PM World Journal*, *2*(3), 1-11. Repéré à https://pmworldlibrary.net/wp-content/uploads/2013/03/pmwj8-mar2013-prieto-systemic-innovation-program-management-role-SecondEdition.pdf

Pôle de recherche et d'innovation en matériaux avancés au Québec. (2018). Les matériaux avancés : un secteur stratégique pour le Québec. Repéré à http://www.prima.ca/sites/default/files/prima_portrait_materiaux_avances_2018.pdf

Roland Berger. (2016). Think. Act. Beyond mainstream. Digitization in the construction industry. Building Europe's road to "Construction 4.0.". Repéré à https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/tab_digitization_construction_industry_e_final.pdf

SECOR/KPMG (2012). Étude sur la gestion actuelle du plan québécois des infrastructures et sur le processus de planification des projets. Repéré à https://www.tresor.gouv.qc.ca/fileadmin/PDF/publications/e/Etude/Etude_SECOR-KPMG.pdf

SQI - Société québécoise des infrastructures (2019). *Rapport annuel 2018-2019*. Tiré de https://www.sqi.gouv.qc.ca

University of Cambridge, Centre for Digital Built Britain. (2020). PwC BIM Benefits Methodology and Report. Tiré de https://www.cdbb.cam.ac.uk/BIM/BBM

Usman, N. et Said, I. (2012). Information and communication technology innovation for construction site management, *American Journal of Applied Sciences*, *45*(8), 1259-1267. doi :10.3844/ajassp.2012.1259.1267.

Wang, X., Yung, P., Luo, H. et Truijens, M. (2014). An innovative method for project control in LNG project through 5D CAD: A case study, *Automation in Construction*, *45*, 126-135. doi: 10.1016/j.autcon.2014.05.011

World Economic Forum. (2016). Shaping the future of construction: A breakthrough in mindset and technology. Préparé en collaboration avec The Boston Consulting Group. Repéré à http://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report__.pdf