

ÉTUDE

Impact de l'innovation technologique
et des technologies dans l'industrie
québécoise de la construction

14 avril 2021



Équipe de recherche :

Erik A. Poirier, PhD, Professeur

Ivanka Iordanova, PhD, Professeure

Daniel Forgues, PhD, Professeur

Claire Delarue, M. Ing.

Marouen Mejri, M. Ing.

Ahmed Boudaoura, M. Ing.

Isabelle Jutras

Emmanuelle Nonirit, M.Ing.

Sommaire exécutif

L'importance de l'industrie de la construction aux niveaux économique, environnemental et social est indéniable. Or, tant au Québec qu'à l'international, les constats fusent quant au besoin d'améliorer la performance et d'accroître la productivité de celle-ci (Groupe BIM Québec, 2018). Le virage numérique et la construction hors site sont vus par plusieurs comme étant les avenues les plus prometteuses pour améliorer de façon tangible la productivité et la création de valeurs pour ce secteur névralgique de l'économie québécoise. Par exemple, Koeleman et al. (2019) indiquent que le virage numérique en construction permettrait d'augmenter la productivité de l'industrie de 14 à 15 % et diminuerait les coûts de projets de 4 à 6 %. Lorsque jumelé à la construction hors site, le virage numérique permettrait de doubler la productivité sur le chantier (Poirier et al. 2015). De façon globale, une entreprise qui mise sur l'innovation a deux fois plus de chances d'accroître sa productivité de façon significative (Loosemore et Richard, 2015).

Malgré les avantages et retombées potentielles de saisir ces opportunités, l'industrie de la construction accuse toujours un retard en matière d'innovation technologique. En effet, l'industrie a entrepris son virage numérique beaucoup plus lentement et plus tard que les autres industries. Par exemple, seulement 25 % des entreprises en immobilier ou en construction se sont dotées d'une stratégie numérique, et seules 9 % déclarent être prêtes pour la numérisation de leurs pratiques selon une enquête menée auprès d'entreprises européennes, nord-américaines et asiatiques (EY, 2018). Le retard dans la modernisation et la mise en œuvre de technologies au sein de l'industrie affecte grandement sa productivité globale : en fait, celle-ci a stagné au cours des dernières décennies. Plusieurs raisons expliquent ce retard, notamment le manque de bénéfices clairs (Ozorhon et al., 2016) et l'incompréhension des implications du virage numérique sur les entreprises (Barbosa et al., 2017). De plus, des problèmes de flux de trésorerie et de faibles marges de profits engendrées par les pratiques d'approvisionnement basées sur le plus bas soumissionnaire et le transfert de risques, mènent à un sous-investissement chronique en innovation technologique, ce qui freine à son tour le virage numérique. En ce sens, les dépenses en informatique ne dépassent pas 1 % des revenus des entreprises en construction (Agarwal, Chandrasekaran et Sridhar, 2016).

Cela étant dit, plusieurs initiatives voient le jour à travers le monde et au Québec afin d'encourager et de supporter le virage numérique. Certains pays misent sur des mandats clairs rendant obligatoire l'utilisation du numérique lors de la construction, comme au Royaume-Uni, d'autres misent sur une approche plus démocratique, comme le Plan BIM 2022 en France. Au Québec, il n'existe pas de cadre formel pour la transformation numérique de l'industrie de la construction. La faiblesse de la demande et de cadre combinée aux barrières organisationnelles et financières mentionnées plus haut ont assurément un impact sur l'innovation technologique dans ce secteur avec comme conséquences une perte de valeur économique qui affecte la création de richesse pour l'ensemble de la collectivité. Autrement dit, il y a un

Les **innovations technologiques** sont l'ensemble des produits, services ou processus nouveaux (récents) ou largement améliorés par rapport à la technologie existante et qui engendre des opportunités d'amélioration de facteurs tels que la production, la rapidité d'exécution, le respect de l'environnement, la sécurité, etc. sur les chantiers de construction. L'innovation peut être présente sur le chantier, à distance dans les installations de votre entreprise ou ailleurs.

besoin criant de stimuler la réflexion pour trouver une nouvelle approche qui pourrait changer la façon de se former, de travailler et, ultimement, de bâtir.

Ainsi, une réflexion s'impose quant à la promotion et la mise en œuvre de l'innovation technologique dans l'industrie québécoise de la construction. En ce sens, une question se doit d'être étudiée en priorité : *Quel est l'impact de la technologie sur la productivité dans l'industrie québécoise de la construction ?* Pour y répondre, l'Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTO) et l'Association de la construction du Québec (ACQ), en collaboration avec le ministère de l'Économie et de l'Innovation (MEI), ont mandaté les chercheurs du Groupe de recherche en intégration et développement durable en environnement bâti (GRIDD) et de la Chaire de recherche industrielle sur l'intégration des technologies numériques en construction de l'École de technologie supérieure pour mener une étude portant sur l'usage de la technologie dans une optique d'accroissement de la productivité et d'encouragement de l'innovation au sein de l'industrie de la construction.

Le but de l'étude est de fournir un regard objectif sur des innovations technologiques qui sont soit déjà appliquées ou en cours de développement, mais également de brosser un portrait des conditions et des fins dans lesquelles elles doivent être déployées et leur impact (ou leur potentiel) sur la productivité dans le contexte québécois de la construction.

Les objectifs secondaires sont de :

- 1 Développer une classification ainsi qu'une caractérisation des différentes technologies en construction;
- 2 Comprendre les taux et les enjeux d'adoption des technologies en construction au Québec;
- 3 Quantifier l'impact potentiel de la technologie sur la productivité en chantier.

L'étude a été réalisée en trois temps : (1) une revue de littérature, (2) un sondage à grande échelle et (3) des études de cas.

En premier lieu, la revue de l'état de l'art en matière d'utilisation de la technologie en construction et son impact a permis de développer une classification de la technologie afin d'offrir un cadre de référence facilitant son analyse. Ainsi, une classification à cinq facettes est proposée, ce qui permet de catégoriser l'innovation technologique de la façon suivante :

- Selon l'étape du **cycle de vie de l'actif** dans laquelle l'innovation est mise en œuvre;
- Selon la **discipline** à laquelle l'innovation s'applique;
- Selon la **forme de l'innovation**, soit la dimension physique ou symbolique, que prend l'innovation;
- Selon la **fonction d'affaires** qui est supportée ou améliorée par l'innovation;
- Selon la **localisation** de l'innovation, c'est-à-dire où l'innovation sera mise en œuvre (chantier, bureau, etc.).

Par la suite, une évaluation des innovations récentes, incluant la construction hors site (CHS) et une revue de l'impact de celles-ci sur la productivité en chantier a permis d'identifier les éléments moteurs, les facilitateurs, les avantages et les obstacles à leur déploiement. Par exemple, il n'existe pas de consensus sur les acteurs de la chaîne d'approvisionnement qui influencent le plus la mise en œuvre de l'innovation dans le cadre d'un projet. En revanche, tous identifient le client comme moteur important de l'innovation. En matière de facilitateurs, l'implication des acteurs clés en amont dans le cadre d'un projet permet de

développer et d'introduire des innovations plus aisément. Finalement, le manque de temps ou de ressources financières, entre autres, est vu comme un obstacle à l'innovation en construction. Cela étant dit, plusieurs recherches démontrent l'impact positif de l'innovation technologique sur différents indicateurs en construction, notamment en termes de réduction des coûts, de réduction de l'échéancier et de l'accroissement de la productivité. De son côté, la CHS permet également l'accélération de la réalisation des projets de construction et de la réduction de l'échéancier. Toutefois, les impacts de la CHS se font sentir davantage au niveau de la productivité et de la qualité de l'ouvrage.

Un sondage panquébécois portant sur l'adoption et la mise en œuvre des innovations technologiques et de la CHS par les entreprises québécoises en construction a été réalisé de septembre 2020 à février 2021 à travers les réseaux de l'ACQ et de l'ACRGTO. Plus de 270 réponses ont été enregistrées sur la plateforme de sondage en ligne, dont 161 réponses identifiées comme étant valides. Le sondage a permis de comprendre les taux d'adoption, les barrières, les défis, les différentes approches et l'impact de la mise en œuvre de l'innovation technologique et de la construction hors site dans l'industrie québécoise de la construction. À cet effet, il est intéressant de noter que :

- Une très grande majorité des répondants (77 %) ont indiqué avoir un intérêt fort ou très fort pour l'innovation et l'utilisation des nouvelles technologies dans leurs projets.
- Une majorité de répondants (68 %) a déclaré avoir implanté et/ou utilisé une ou plusieurs innovations dans ses projets. Parmi les entreprises ayant indiqué avoir mis en œuvre une ou plusieurs innovations technologiques, 55 % d'entre elles ont indiqué avoir au moins une personne responsable de l'innovation ou de sa mise en œuvre.
- Plus de 50 % des répondants ont indiqué que les aides externes (subventions) et gouvernementales n'étaient pas suffisantes pour permettre aux entreprises de construction d'innover et de mettre en œuvre des technologies dans leurs projets.
- En contrepartie, 56 % des répondants ont indiqué avoir de la facilité, du moins en partie, à trouver de l'accompagnement pour la mise en œuvre des innovations technologiques.
- Pour les répondants dont les entreprises **n'ont pas** mis en œuvre une innovation technologique, les principales raisons de cette absence étaient le manque d'expérience en la matière (16 %), les contraintes de temps (14 %), l'absence de bénéfices clairs (12 %) et un contexte contractuel défavorable à la mise en œuvre des innovations (11 %). Fait intéressant, le manque de ressources financières et le contexte réglementaire ne sont pas des facteurs déterminants, même s'ils sont à considérer dans le processus d'innovation.
- Parmi les répondants dont les entreprises ont mis en œuvre une innovation technologique, les principaux éléments moteurs sont l'initiative de la direction (23 %), la volonté d'amélioration de la performance sur les projets (19 %) et le désir d'accroître la compétitivité de l'entreprise sur le marché (16 %).
- La mise en œuvre d'innovations technologiques à la demande des clients ne constitue pas une source de motivation élevée, alors que la revue de littérature leur accorde une certaine importance en tant que moteur de l'innovation.
- Les répondants dont les entreprises ont mis en œuvre une innovation technologique ont indiqué avoir des attentes en matière de gains au niveau du temps (13 %), de la productivité (12 %), des coûts (11 %) et de la qualité (10 %) liés à la mise en œuvre de celle-ci. Une forte majorité des

répondants a indiqué un haut taux de satisfaction à l'égard de la rencontre de ces attentes (71 % de notes 4 ou 5). Il est donc possible de conclure que les résultats attendus liés à l'implantation des innovations ont bel et bien été livrés et que les entreprises répondantes en sont satisfaites.

- La majorité des technologies identifiées par les répondants (57 %) est perçue comme ayant un impact important ou majeur (4 ou 5) sur la productivité.
- En parallèle, une majorité de répondants (58 %) ont indiqué être satisfaits quant au retour sur investissement (ROI) de la mise en œuvre de la technologie qu'ils ont identifiée.

Le sondage a permis d'identifier plus de 100 technologies et innovations précises et leurs impacts. Ces technologies ont été catégorisées selon les facettes dérivées du recensement des écrits, soit les facettes liées à la **forme** de l'innovation technologique, sa **localisation**, la **fonction d'affaires** qu'elle supporte et la **discipline** à laquelle elle s'applique. Une des facettes identifiées dans la revue, la facette de **cycle de vie** du projet et/ou de l'actif, a été mise de côté puisque le sondage ciblait la construction spécifiquement. Les éléments moteurs, les bénéfices obtenus et l'impact des technologies sur la productivité ont été identifiés et mesurés.

Le sondage portait également sur l'utilisation de la construction hors site (CHS) dans l'industrie québécoise de la construction. Parmi les 161 réponses complètes obtenues dans le cadre du sondage, 93 répondants (58 %) ont complété la section portant sur la CHS. De ces 93 répondants, 38 % ont indiqué avoir déjà pris part à des projets utilisant la CHS. Ainsi, pour le volet CHS, il est intéressant de noter que :

- La majorité des éléments préfabriqués appartiennent à la catégorie des éléments linéaires (41 %), soit des poutres, des tabliers de pont, des systèmes de charpente ou des ponceaux, par exemple.
- Les composantes ou sous-systèmes, les panneaux ouverts ou fermés sont mis en œuvre en proportions relativement égales par les répondants ayant adopté la CHS.
- Respectivement 7 % et 2 % des répondants ont indiqué que leurs entreprises utilisent la CHS pour la préfabrication de noyaux de services (« pods ») ou de modules complets et fermés (volumétriques).
- Les répondants ont recours à la CHS surtout pour les systèmes structuraux (52 %) et les principaux matériaux utilisés sont l'acier (42 %) et le béton (31 %).
- La CHS est utilisée sur moins de 25 % des projets pour au moins 50 % des répondants œuvrant dans les secteurs du génie civil et de la voirie et dans les secteurs institutionnels, commercial et industriel.
- Les taux de mise en œuvre de la CHS dans le secteur résidentiel demeurent relativement bas (+/-30 % des répondants indiquent utiliser la CHS). Ceci est quelque peu surprenant considérant que certains éléments structuraux, notamment les fermes de toit, sont presque exclusivement préfabriqués.
- Le domaine du génie civil et de la voirie possède le plus haut taux global de mise en œuvre de la CHS, avec 75 % des répondants indiquant une mise en œuvre de celle-ci.
- En termes d'impacts, les répondants indiquent que la CHS a le plus grand potentiel d'impact sur l'échéancier de projet (66 % avec un fort potentiel d'impact), suivi par la productivité de la main-d'œuvre (58 % avec un fort potentiel d'impact) et les coûts de projets (56 % avec un fort potentiel d'impact).
- Globalement, les répondants s'entendent pour dire que la CHS a un impact soit positif ou très positif sur le coût total de la construction (ce qui inclut le coût des travaux de construction et des frais associés à la construction), de même que sur les coûts de contingences.

- D'un autre côté, les répondants sont plus mitigés au niveau de l'impact de la CHS sur les coûts de conception et de modification à la conception. Ceci est en lien avec le processus de conception qui demande l'apport de plusieurs parties prenantes, notamment le fabricant/manufacturier ainsi que le temps requis pour développer un concept qui répond tant aux contraintes d'un projet comme tel, qu'aux contraintes liées à la fabrication et à l'assemblage sur le site.
- Finalement, les répondants s'entendent pour dire que la CHS a un impact soit positif ou très positif sur l'échéancier lors de la phase de réalisation, de même que sur l'échéancier global du projet.
- D'un autre côté, les répondants sont plus mitigés au niveau de l'impact de la CHS sur l'échéancier du projet en phase de conception. Évidemment, ceci est en lien avec la question précédente et le fait que le processus de conception dans le contexte de la CHS demande plus de temps en amont afin de développer un concept fonctionnel.

Finalement, afin d'approfondir certains des éléments identifiés dans la littérature et le sondage, quatre (4) études de cas portant sur des innovations technologiques porteuses et sur leur utilisation au Québec ont été réalisées. Les éléments moteurs, les avantages et les défis de mise en œuvre sont discutés pour les études de cas suivantes :

- Étude de cas 01 : Construction modulaire hors site pour le projet d'agrandissement de l'Hôpital Maisonneuve-Rosemont
- Étude de cas 02 : Système de construction abritée en hauteur sans grue sur un projet de résidence étudiante
- Étude de cas 03 : Compaction intelligente pour les projets routiers
- Étude de cas 04 : Inspection des ouvrages d'art par drone

Ce qui ressort de l'analyse des études de cas est l'importance du client comme élément moteur ou comme facilitateur de la mise en œuvre de l'innovation technologique. Dans les études de cas 01 et 02, l'impulsion pour l'innovation provenait du client tandis que dans les études de cas 03 et 04, la pertinence et le retour sur investissement étaient liés à la volonté du client. De plus, chacune des études de cas discutées démontre un impact positif, tangible, sur la productivité, en offrant un environnement de travail plus sécuritaire et propice aux ouvriers ou en permettant une planification et un suivi plus serré des travaux.

Ce rapport sur l'innovation technologique et de son impact sur l'industrie québécoise de la construction, notamment au niveau de la productivité, a permis de mieux comprendre les dynamiques derrière le processus d'innovation et de sa mise en œuvre. Longtemps vu comme étant un aspect crucial dans l'accroissement de la performance d'un des secteurs en importance pour l'économie québécoise, l'innovation en construction et la mise en œuvre des technologies semblent vouloir s'accélérer. Cela étant dit, il reste passablement beaucoup de travail à faire afin d'accompagner les entreprises œuvrant dans ce domaine. Selon les recherches effectuées dans le cadre de ce rapport, voici quelques pistes de réflexion pour améliorer l'implantation d'innovations et de technologies au sein de l'industrie québécoise de la construction :

- Centraliser la veille technologique afin de mettre en commun les ressources nécessaires pour identifier et suivre l'évolution des innovations et des technologies. Ceci est déjà en cours au sein des associations chapeautant l'étude.
- Offrir de l'accompagnement ciblé pour la mise en œuvre et amortir les coûts de l'innovation à plusieurs entreprises.
- Mettre en place des incitatifs à l'innovation dans le cadre de projets publics.
- Favoriser les modes d'approvisionnement dits intégrés qui favorisent l'apport des entrepreneurs généraux et spécialisés en amont du projet.

Table des matières

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Table des matières | 9 |
| Table des figures | 11 |
| 1 SECTION 01 : CARACTÉRISATION DES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES EN CONSTRUCTION ET DE LEURS IMPACTS | 15 |
| 1.1 Introduction | 15 |
| 1.2 Description de l'innovation technologique en construction | 15 |
| 1.3 La réinvention de la construction hors site | 22 |
| 1.4 Le nouvel élan de la CHS | 23 |
| 1.5 Les avantages, les barrières et les facteurs de succès de la CHS | 25 |
| 1.6 Conclusion | 27 |
| 2 SECTION 02 : SONDAGE PANQUÉBÉCOIS EN MATIÈRE D'INNOVATION TECHNOLOGIQUE EN CONSTRUCTION..... | 28 |
| 2.1 Introduction | 28 |
| 2.2 Profil des répondants | 29 |
| 2.3 L'innovation dans l'industrie de la construction québécoise | 31 |
| 2.4 Les technologies implantées et leurs impacts..... | 45 |
| 2.5 La construction hors site dans l'industrie québécoise | 65 |
| 2.6 Conclusion | 72 |
| 3 SECTION 03 : ÉTUDES DE CAS..... | 73 |
| 3.1 Introduction | 73 |
| 3.2 Étude de cas 01 : Construction modulaire hors-site pour le projet d'agrandissement de l'Hôpital Maisonneuve-Rosemont | 74 |
| 3.3 Étude de cas 02 : Système de construction abritée en hauteur sans grue sur un projet de résidence étudiante | 81 |

| | | |
|-----|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4 | Étude de cas 03 : Compaction intelligente pour les projets routiers | 86 |
| 3.5 | Étude de cas 04 : Inspection des ouvrages d’art par drone..... | 89 |
| 3.6 | Conclusion..... | 93 |
| 4 | Conclusion..... | 93 |
| | Références | 95 |
| | Annexe 01 – Méthodologie | 98 |
| | Structure du sondage | 98 |
| | Annexe 02 – Liste des innovations technologiques répertoriées | 101 |

Table des figures

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.1 : Classification des innovations à 5 facettes | 18 |
| Figure 1.2: Le passage de la construction conventionnelle vers la CHS (adapté de : Expert interviews, BCG Analysis) | 23 |
| Figure 1.3: Avantages de l'adoption de la CHS (adapté de : Vinodhan, 2015)..... | 25 |
| Figure 1.4: Les bénéfices de l'utilisation de la CHS (adapté de : McGraw-Hill Construction, 2018) | 26 |
| Figure 1.5 : Barrières et facteurs de succès de la CHS (adapté de : CITB, 2017) | 27 |
| Figure 2.1 : Types d'entreprise des répondants (N=161)..... | 29 |
| Figure 2.2: Répartition des réponses par nombre d'employés (N=161) | 29 |
| Figure 2.3: Répartition des réponses par chiffre d'affaires (N=161) | 30 |
| Figure 2.4: Répartition des réponses par secteur d'activité des projets (N=161) | 30 |
| Figure 2.5: Répartition des réponses par localisation des projets (N=161) | 31 |
| Figure 2.6: Intérêt des entreprises pour utiliser de nouvelles technologies dans leurs projets sur une échelle de 1 à 5, 1 étant pas d'intérêt et 5 étant un intérêt très fort (N=161) | 32 |
| Figure 2.7 : Répartition des types d'entreprises par notes d'intérêt pour l'innovation (N=161) | 32 |
| Figure 2.8 : Répartition du chiffre d'affaires par notes d'intérêt pour l'innovation (N=161).. | 33 |
| Figure 2.9 : Répartition du nombre d'employés des entreprises par notes d'intérêt pour l'innovation (N=161)..... | 33 |
| Figure 2.10 : Entreprises ayant mis en œuvre une ou plusieurs innovations technologiques (N=161) | 34 |
| Figure 2.11 : Entreprises ayant au moins un responsable de l'innovation (N=93) | 34 |
| Figure 2.12 : Mise en œuvre de l'innovation en fonction de la taille de l'entreprise (N=161) | 35 |
| Figure 2.13 : Chiffre d'affaires en fonction de la présence d'innovation dans l'entreprise(N=161)..... | 35 |
| Figure 2.14 : Taux d'innovation des entreprises par secteur(N=161) | 36 |
| Figure 2.15 : Innovations dans les entreprises en fonction de la localisation des projets (N=161)..... | 36 |
| Figure 2.16 : Innovations dans les entreprises en fonction de leur type (N=161)..... | 37 |
| Figure 2.17 : Facteurs influençant l'absence d'innovation au sein des entreprises (N=52) | 38 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2.18 : Avis des répondants sur l'accompagnement dans la mise en œuvre de la technologie (N=161)..... | 39 |
| Figure 2.19 : Avis des répondants sur l'accompagnement dans la mise en œuvre de l'innovation par taille d'entreprise (N=161) | 39 |
| Figure 2.20 : Avis des répondants sur l'accompagnement dans la mise en œuvre de l'innovation par taille d'entreprise dont l'entreprise compte au moins une personne dédiée à l'innovation (N=51) | 40 |
| Figure 2.21 : Moyens de soutien de l'innovation par les entreprises qui innovent (N=109).... | 41 |
| Figure 2.22 : Réinvestissement du chiffre d'affaires dans l'innovation (N=109)..... | 41 |
| Figure 2.23 : Répartition des types d'entreprises par investissement (N=109) | 42 |
| Figure 2.24 : Répartition du chiffre d'affaires par investissement (N=109)..... | 43 |
| Figure 2.25 : Répartition du nombre d'employés des entreprises par investissement (N=109) | 43 |
| Figure 2.26 : Répartition des secteurs d'activité par investissement (N=109)..... | 44 |
| Figure 2.27 : Éléments moteurs de l'implantation de la technologie dans l'entreprise (N=109 technologies) | 46 |
| Figure 2.28 : Bénéfices attendus liés à la mise en œuvre des technologies (N=109 technologies) | 47 |
| Figure 2.29 - Respect des attentes liées à la mise en œuvre des technologies (N=109 technologies) | 47 |
| Figure 2.30 : Notes de l'impact de la technologie sur la productivité de chantier (N=109 technologies) | 48 |
| Figure 2.31 : Satisfaction par rapport au ROI de la technologie mise en œuvre (N=109 technologies) | 49 |
| Figure 2.32 : Indicateurs utilisés pour l'évaluation des impacts de la technologie (N=109 technologies) | 49 |
| Figure 2.33 : Moyens de mesure des impacts de la technologie (N=109 technologies) | 50 |
| Figure 2.34 : Classification des innovations technologiques par forme (N=100 technologies) | 51 |
| Figure 2.35 : Classification des innovations technologiques par localisation (N=100 technologies) | 51 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2.36 : Classification des innovations technologiques par fonction d'affaires (N=100 technologies) | 52 |
| Figure 2.37 : Classification des innovations technologiques par discipline (N=100 technologies) | 52 |
| Figure 2.38 : Temps écoulé depuis l'implantation de la technologie dans l'entreprise (N=109 technologies) | 53 |
| Figure 2.39 : Proportion des projets où la technologie est utilisée (N=109 technologies) | 53 |
| Figure 2.40 : Éléments moteurs de l'implantation de la technologie par forme d'innovation technologique (N=100 technologies) | 54 |
| Figure 2.41 : Moteurs de l'implantation de la technologie par localisation (N=100 technologies) | 55 |
| Figure 2.42 : Moteurs de l'implantation de la technologie par fonction d'affaires (N=100 technologies) | 56 |
| Figure 2.43 : Moteurs de l'implantation de la technologie par discipline (N=100 technologies) | 57 |
| Figure 2.44 : Bénéfices de la technologie par forme (N=100 technologies) | 58 |
| Figure 2.45 : Bénéfices de la technologie par localisation (N=100 technologies) | 59 |
| Figure 2.46 : Bénéfices de la technologie par fonction d'affaires (N=100 technologies) | 60 |
| Figure 2.47 : Bénéfices de la technologie par discipline (N=100 technologies) | 61 |
| Figure 2.48 : Notes de l'impact de la technologie sur la productivité par forme (N=100 technologies) | 62 |
| Figure 2.49 : Notes de l'impact de la technologie sur la productivité par localisation (N=100 technologies) | 62 |
| Figure 2.50 : Notes de l'impact de la technologie sur la productivité par fonction d'affaires (N=100 technologies) | 63 |
| Figure 2.51 : Notes de l'impact de la technologie sur la productivité par discipline (N=100 technologies) | 63 |
| Figure 2.52 : Taux d'adoption de la CHS par les répondants ayant complété cette section du sondage (N=93) | 65 |
| Figure 2.53 : distribution des répondants ayant adopté la CHS (N= 34) | 66 |
| Figure 2.54 : Répartition des réponses par nombre d'employés - CHS (N=34) | 66 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2.55 : Répartition des réponses par chiffre d'affaires - CHS (N=34)..... | 67 |
| Figure 2.56 : Répartition des réponses par secteur d'affaires (N=34) | 67 |
| Figure 2.57 : Typologie des éléments assujettis à la CHS (N=34) | 68 |
| Figure 2.58 : Typologie des systèmes bâtis assujettis à la CHS (N=34)..... | 68 |
| Figure 2.59 : Typologie des matériaux utilisés dans la CHS (N=34) | 69 |
| Figure 2.60 : Taux de mise en œuvre de la CHS par secteur d'affaires (N=34)..... | 69 |
| Figure 2.61 : Potentiel en matière d'impact sur la réalisation de projets (N=34)..... | 70 |
| Figure 2.62 : Impact de la CHS sur les coûts associés à un projet de construction (N=34) | 71 |
| Figure 2.63 : Impact de la CHS sur les échéanciers associés à un projet de construction (N=34)..... | 71 |
| Figure 3.1:Structure organisationnelle et les liens contractuels du projet..... | 74 |
| Figure 3.2: Le projet d'agrandissement de l'hôpital Maisonneuve-Rosemont | 75 |
| Figure 3.3: Illustration de la réduction des effectifs au chantier par l'approche modulaire..... | 76 |
| Figure 3.4:Levage et positionnement des chambres modulaires..... | 79 |
| Figure 3.5: Système de construction abritée en hauteur..... | 82 |
| Figure 3.6: Système de planchers collaborants adaptables | 83 |
| Figure 3.7: Système de monorail..... | 84 |
| Figure 3.8: Composantes de l'IC (Liu et al. 2019) | 86 |
| Figure 3.9: Exemple d'équipement de compaction avec affichage d'indice de compaction (source: www.constructionequipment.com) | 87 |

1 SECTION 01 : CARACTÉRISATION DES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES EN CONSTRUCTION ET DE LEURS IMPACTS

1.1 Introduction

Cette section fait état d'un besoin imminent de stimuler la réflexion pour trouver une nouvelle approche qui pourrait changer la façon de se former, de travailler et ultimement, de bâtir. Les résultats d'une revue de littérature en matière d'impacts de l'innovation technologique sur la productivité en construction ainsi qu'un survol de la construction hors site et ses impacts sur la productivité dans l'industrie québécoise de la construction y sont présentés. Une caractérisation des technologies en construction a également été développée afin d'offrir un cadre de référence pour les classer et les analyser. Cette section permet de mettre en lumière deux des leviers les plus prometteurs pour accroître la productivité en construction au Québec soit : l'innovation technologique et la construction hors site (CHS).

1.2 Description de l'innovation technologique en construction

La notion d'innovation technologique demeure quelque peu floue. Il existe un consensus autour du fait que l'innovation peut prendre plusieurs formes, notamment celle d'un produit, d'un processus ou d'un service. L'innovation technologique quant à elle est considérée comme toute amélioration à une technologie existante. Elle peut s'appliquer entre autres aux pratiques d'affaires, à l'organisation du travail et aux relations externes (Ozorhon et al., 2016). D'un autre côté, elle peut être vue davantage comme la connexion entre des composantes, processus et techniques qui sont appuyés par des outils technologiques. De manière plus théorique, l'innovation peut correspondre à trois approches dans lesquelles elle est considérée : la notion de processus, celle de changement et celle de résultat (Kogabayev et al., 2017).

1.2.1 Moteurs, facilitateurs et barrières de l'innovation

Plusieurs éléments influencent l'implantation de l'innovation technologique, que ce soit dans le cadre de projets ou de l'organisation. L'origine de l'innovation, ou en d'autres termes d'où provient l'innovation, ne fait pas consensus. Les avis sont partagés sur le fait que ce soit, soit le client (Loosemore et Richard, 2015), soit l'entrepreneur (Lim et Ofori, 2007), soit les fournisseurs et la demande du marché (Reichstein et al., 2005) qui jouent un rôle stratégique dans l'innovation en construction. Quoi qu'il en soit, le rôle crucial du client comme initiateur de l'innovation revient souvent, étant donné sa capacité d'influencer le marché en matière d'innovation.

À propos des organisations et des projets comme tels, plusieurs facteurs influenceront, soit positivement ou négativement, l'innovation technologique en construction. Le tableau 1.1 indique les éléments moteurs de l'innovation, soit les éléments qui correspondent aux principales motivations pour l'entreprise à entreprendre l'implantation d'une innovation. Le tableau 1.2 indique les éléments facilitant l'innovation, soit les éléments identifiés comme des facteurs permettant de surmonter les enjeux et les obstacles qui peuvent survenir lors de l'implantation d'innovations. Le tableau 1.3 indique les principaux obstacles à l'innovation, soit les éléments qui s'avèrent être des enjeux dans le processus d'innovation de l'entreprise.

Tableau 1.1 : Moteurs de l'innovation (adapté de Ozorhon et al., 2016)

| Moteurs | Détails de l'élément |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Environnement et durabilité | Utilisation de techniques de construction durable, diminution des impacts environnementaux et construction de bâtiments durables. |
| Tendance vers la conception intégrée | Capacités techniques, demandes du marché, opportunités. |
| Amélioration de la performance du projet | Plus de succès en termes de temps, coût, qualité et satisfaction du client. |
| Développement technologique | Utilisation des TIC et améliorations technologiques. |
| Exigences du client | Demandes de standards plus élevés en termes de temps, coût, qualité ou performance. |
| Niveau de compétitivité | Gain d'avantages compétitifs. |
| Règlements et législations | Amélioration des standards de performance. |
| Responsabilité sociale des entreprises (RSE) | Une stratégie RSE pour de meilleures performances en innovation et accroissement de la satisfaction client et de l'image de l'entreprise. |

Tableau 1.2 : Facilitateurs de l'innovation (adapté de Ozorhon et al., 2016)

| Facilitateurs | Détails de l'élément |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coopération entre les acteurs | Environnement coopératif, coordination et intégration des entreprises. |
| Implication précoce des entrepreneurs | Dans les phases de conception notamment. |
| Programme de récompenses sur l'innovation | Reconnaissance des efforts et du personnel, promotion de l'innovation, implication des employés. |
| Engagement des parties prenantes | Alignement des motivations et des intérêts. |
| Gestion de la connaissance | Conservation et diffusion des idées, des ressources et des compétences dans l'entreprise. |
| Leadership | Formation d'un esprit d'équipe, d'une vision et d'objectifs. |
| Politique de formation | Formation du personnel sur l'innovation et son utilisation, stage et apprentissage sur le terrain. |

Tableau 1.3 : Obstacles de l'innovation (adapté de Ozorhon et al., 2016)

| Obstacles | Détails de l'élément |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Manque de ressources financières | Ressources insuffisantes ou indisponibles pour l'innovation. |
| Implication temporaire des entreprises sur le projet | Participation de plusieurs équipes sur le court terme ou à des temps différents. |
| Manque d'expérience ou d'employés qualifiés | Absence de directeur de l'innovation, gestionnaires de technologies, de secteur R-D, de formation à l'innovation. Non-prise en compte des technologies dans le recrutement. |
| Bénéfices non perçus ou ROI tardif | Manque de bénéfices clairs ou rapides. |

| | |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Culture d'entreprise inadaptée | Réticence (ou résistance) aux changements, stratégies peu favorables à l'innovation, peu de gestion dans l'évolution des technologies. |
| Contraintes de temps | Dans l'introduction des nouvelles idées et le test des nouvelles technologies. |

1.2.2 Types d'innovation en construction

Dans la littérature, la classification des technologies dans la construction existe depuis plusieurs décennies. Les équipes de recherche évoquent une ou plusieurs manières de regrouper les technologies, mais la plupart se focalisent sur une seule dimension dans leurs travaux (Tatum, 1988). Les manières de classer les technologies sont multiples et variées. En construction, elles peuvent se traduire par des catégories simples comme la phase de projet (Jung et Gibson, 1999) ou les fonctions d'affaires (Jung et Joo, 2011), tandis que des dimensions peu utilisées peuvent être répertoriées comme le degré de changement de l'implantation de la technologie (Slaughter, 1998), son impact (Lim et Ofori, 2007) ou sa localisation physique ou symbolique (Barbosa et al., 2017).

Parmi les différentes dimensions identifiées dans la littérature, certaines se complètent et d'autres sont moins pertinentes dans le cadre de ce projet. Il faut également considérer que le nombre de facettes finales doit être suffisant pour donner une classification applicable au projet. Dans le cadre de l'étude, 5 facettes de l'innovation technologique ont été retenues :

- Le **cycle de vie de l'actif** permet de classer les innovations et les technologies en fonction de l'étape du cycle de vie du bâtiment.
Certaines technologies ne s'utilisent qu'à des étapes précises du projet. Par exemple, les technologies de chantier comme les drones, les lasers à balayage (*scans laser*) ou les robots seront plus souvent présents dans la phase construction. La période de planification aura davantage de technologies de l'information, étant donné qu'il s'agit d'une étape précoce dans le projet. Enfin, il est également possible de retrouver certaines technologies durant tout le cycle, telles que la modélisation du bâtiment et l'intelligence artificielle, car elles s'intègrent dans beaucoup de pratiques ou d'innovations.
- La **discipline** répertorie les secteurs des entreprises dans lesquels l'innovation peut s'appliquer.
Certaines innovations ont été conçues pour des disciplines particulières plutôt que pour des utilisations dans tous les corps de métiers intervenant dans un projet. C'est le cas notamment des outils à main et des équipements. De plus, en répertoriant par discipline, il est possible de s'inspirer des technologies propres à certaines disciplines afin de les adapter à d'autres pour obtenir des bénéfices similaires, tels que la sécurité, la qualité et la productivité, à l'instar d'innovations en construction inspirées d'autres secteurs d'activité.
- La **forme** concerne la dimension physique ou symbolique de l'innovation.
Cette facette permet de cerner le format que peut prendre la technologie utilisée dans un projet. Elle peut être matérielle, comme les technologies portatives et les machines, ou immatérielle (symbolique) comme les logiciels ou les processus innovants. Dans cette catégorie, il est également considéré que des innovations soient des composants d'autres technologies ou outils. Cela peut se traduire par une pièce améliorant un équipement existant, mais aussi le pilote d'un logiciel créé pour un usage informatique précis.

- La **fonction d'affaires** classe les innovations selon les activités générales de l'entreprise. Les éléments composant cette facette sont des activités internes qui ont des impacts sur la firme ou sur les projets. Ils concernent généralement les notions employées en gestion de projet, avec des activités liées aux coûts, au temps ou encore à la qualité. Les technologies présentes dans cette catégorie aident généralement les firmes à mener à bien leurs projets par des outils organisationnels, d'estimation et de gestion.
- La **localisation** concerne l'emplacement physique ou symbolique de l'innovation à l'utilisation. Cette dimension regroupe trois lieux principaux de la technologie. Elle peut être physiquement présente sur le site du projet, comme les machines, les matériaux ou les technologies portatives. Elle peut également avoir une localisation symbolique, que ce soit dans les bureaux des entreprises, avec les technologies numériques et de gestion ou bien dans un nuage numérique via des serveurs, en ce qui concerne les outils de collaboration numérique et de partage.

La Figure 1.1 illustre les cinq facettes retenues à cet effet, ainsi que les différentes sections qui les composent.

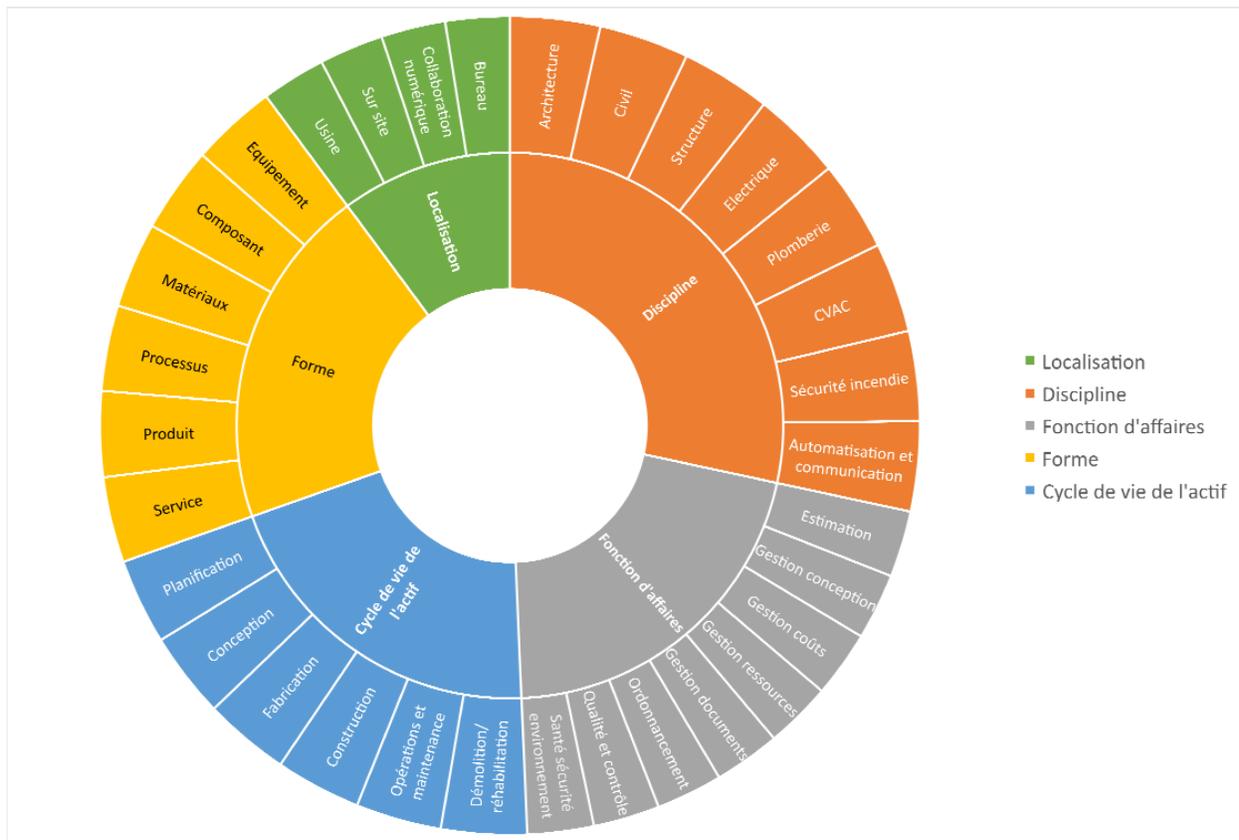


Figure 1.1 : Classification des innovations à 5 facettes

1.2.3 Impacts et potentiels de l'innovation technologique

Les liens théoriques entre l'amélioration ou l'implantation des technologies et la productivité sont démontrés. Toutefois, à l'exception des technologies de l'information, il est possible de constater que les investigations pratiques sur les impacts des technologies en construction sont encore peu nombreuses par rapport à d'autres secteurs. En revanche, certaines études ont démontré le potentiel de l'innovation

technologique en matière d'amélioration de la productivité. C'est notamment le cas du World Economic Forum (2016) qui estime qu'une augmentation de 1 % de la productivité mondiale permettrait une économie de 100 milliards de dollars par an. Une étude plus récente et plus poussée, focalisant uniquement sur la productivité de la main-d'œuvre de chantier, a révélé que le fait de transformer 36 secondes de chaque heure travaillée en travail direct, donc à valeur ajoutée, pourrait rapporter 5,4 milliards d'USD par an au produit intérieur brut (PIB) en Amérique du Nord (Neve et al. 2020). Ces 36 secondes peuvent être transformées de diverses façons par l'innovation numérique.

Plusieurs pistes d'innovations technologiques, qui jouent sur l'une ou plusieurs des facettes indiquées dans la figure 1.1, peuvent avoir un impact sur la productivité. Des principes comme l'automatisation et des technologies comme l'impression 3D peuvent compenser le manque de productivité sur site. Les innovations technologiques permettent également le suivi et l'analyse de la productivité via les caméras 360°, les balayages laser et les capteurs RFID. L'innovation technologique peut appuyer la prise de décision via l'intelligence artificielle et diminuer les efforts physiques, notamment via la robotique et les drones (Ottinger et al., 2020).

Dans le but d'identifier les technologies numériques permettant une amélioration de la productivité de chantier en Nouvelle-Zélande, Chowdhury et al. (2019) ont regroupé une trentaine de technologies numériques avec leurs fonctions clés et leurs impacts en construction dans leur étude de la littérature scientifique. Le tableau 1.4 regroupe les descriptions faites par les auteurs sur ces technologies, accompagnées des indicateurs associés qui ont un impact sur les projets de construction. Pour plus de clarté, les technologies numériques ont été catégorisées par localisation, inspiré des travaux de Barbosa et al. (2017). Les innovations « Multisites » sont celles qui peuvent être mises en œuvre à plusieurs localisations comme les technologies mobiles. Dans la liste du tableau, il est possible de remarquer cependant l'absence de certaines innovations numériques applicables en construction comme l'intelligence artificielle, l'internet des objets ou encore le jumeau numérique, alors que certaines technologies de la liste sont reliées à elles.

Les technologies de l'information (TI) en construction auraient davantage un impact sur la productivité dans la gestion des conceptions et de projets ainsi que l'administration générale des entreprises (Rivard, 2000). Une étude menée par le Construction Industry Institute (CII) aux États-Unis en 2001 a révélé (ou a permis de constater) que l'usage accru des TI permettait aux clients de sauver 2,1 % de leurs coûts de projet, tandis que les entrepreneurs en sauvaient 1,8 %. La même étude indique également un impact positif de l'utilisation accrue des TI, pouvant mener à une amélioration de 6,4 % pour les entrepreneurs en matière d'échéancier. L'étude a établi des relations plus mitigées entre l'utilisation des TI, la santé et sécurité et la reprise en chantier, voulant dire que les TI, à cette époque, avaient moins d'impacts sur ces deux éléments. Une autre étude menée par le CII en 2006 a démontré une amélioration de la performance de coûts de 3,3 % relatifs à une automatisation et une intégration plus accrue des technologies. En matière de productivité, comme mentionné, le virage numérique en construction permettrait d'augmenter la productivité de 14-15 % (Bertram et al., 2019).

De plus, certaines innovations sont vues comme étant des innovations clés qui ouvrent une multitude de possibilités. C'est notamment le cas de la modélisation des bâtiments (BIM) qui a un impact sur plusieurs aspects d'un projet de construction tout au long de son cycle de vie. Par exemple, la productivité de travail, grâce au BIM, serait considérablement augmentée (+75 % à +240 %) par rapport aux zones non modélisées (Poirier et al., 2015). Les bénéfices du BIM sont déjà bien exploités à l'international. Dans l'étude annuelle

du National BIM Standards (NBS) au Royaume-Uni (2018), 74 % des répondants locaux, réunissant des firmes de toute taille et de disciplines variées, utilisent le BIM couramment et 82 % sont d'accord pour dire que cette technologie est l'avenir de l'information dans les projets de construction. D'autres exemples de technologies en plein essor sont identifiables en construction.

L'intelligence artificielle (IA) en fait partie, notamment grâce à son implantation dans beaucoup d'innovations comme le jumeau numérique, la reconnaissance faciale et la robotique. En plus d'améliorer les planifications d'exécution, la gestion des tâches et la communication dans le projet, elle possède un potentiel de 40 % dans l'augmentation de la productivité de travail et permettrait, pour la machinerie mobile, une hausse de la productivité pouvant aller jusque 60 % (Roland Berger, 2020).

Tableau 1.4: Impacts des technologies numériques en construction (adapté de Chowdhury et al., 2019)

| Tri par localisation | Technologies numériques | Fonctions clés liées à la productivité | Gestion de projet | | | Performance | | | Ressources | | Autres | |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------|---------|--------------|------------|------------|--------------|---------|----------|---------------|
| | | | Coûts | Temps | Qualité | Productivité | Efficacité | Efficience | Main d'œuvre | Déchets | Sécurité | Collaboration |
| Chantier | Code barre et RFID | Automatiser l'acquisition de données, le suivi des coûts et les délais. Capacité d'acquisition de données pour identifier, suivre et tracer les matériaux et l'équipement. Peut être intégré au GIS pour le suivi de l'avancement de la construction. | | X | X | | | X | | | | |
| Chantier | Système d'information géographique / Géographic information system (SIG/GIS) | Fournit des informations spatiales (liées à l'emplacement) qui peuvent éliminer la collecte de données à forte intensité de main-d'œuvre. | X | | X | | | | X | | | |
| Chantier | Impression 3D | Fabrication additive. Réparation sur place sur zones inaccessibles ou avec des ressources limitées. | X | | | | | X | X | | | |
| Chantier | Infrarouge | La capture de données en temps réel et le contrôle à distance de plusieurs appareils (ex: téléphones cellulaires). | | | | | | | | | | X |
| Chantier | Robotique et véhicules autonomes | Automatiser et faciliter l'assemblage de tâches répétitives ou complexes sur chantier ; permettre les opérations à distance. | X | | | | X | X | | | X | |
| Chantier | Scan 3D / Lidar / Photogrammétrie | Capturer des images en direct sur le site utilisées pour suivre les écarts dans la conception telle que construite et prévue et faciliter la collecte de données. | | X | X | | | X | | | | |
| Chantier | Ultrasons | Utiliser des fréquences radio comme UWB et RFID pour naviguer dans un environnement sombre pour suivre l'emplacement de l'objet. | | | | | X | | | | | |
| Chantier | Dispositifs portables | Améliorer la visualisation et les performances de sécurité ainsi que la gestion des risques. Les dispositifs utilisent des technologies comme la RFID, UWB, GPS, et Bluetooth. | | | | | X | X | | | X | |
| Chantier | GPS | Aider à la gestion du matériel, au suivi de l'équipement, au stockage et au rappel d'information à des fins logistiques. | | | | | X | | X | | | |
| Collaboration numérique | 3D / 4D / CAD et prototypage virtuel | Simuler et optimiser le flux d'information et l'intention de conception entre les participants. Création d'une maquette numérique des aspects et activités du projet de construction. | X | | | | X | X | | | | X |
| Collaboration numérique | Modélisation de l'information du | Faciliter la représentation physique orientée objet du bâtiment, aider à la visualisation d'objets du | X | X | X | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|--|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|-----|
| | bâtiment / Building information modeling (MDB/BIM) | monde réel, à la coordination entre les acteurs du projet et à la production de documents de construction jusqu'à la livraison. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Collaboration numérique | Échange de données informatisées et (EDI) et Extensible markup language (XML) | Faciliter l'administration des contrats entre les entrepreneurs et les fournisseurs. Facilite l'échange d'information entre les parties commerciales. Rationaliser. | | | | | X | | | | | | | | | | | | | X |
| Collaboration numérique | Game technology | Faciliter la formation interactive de la sécurité et s'intégrer au BIM. | | | | | X | X | | | | | | | | | | | | X |
| Collaboration numérique | Informatique en nuage / Cloud computing | Fournir un accès virtuel à faible coût aux informations exploitées par Internet; permet l'abonnement aux services logiciels requis sans acheter de matériel individuel. | X | | | | | | | X | X | | | | | | | | | |
| Collaboration numérique | Réalité virtuelle | Fournir une plateforme 3D interactive en temps réel utile dans les étapes de pré-planification et de conception pour collaborer avec les parties prenantes pour l'examen de la conception et prendre en charge l'interface client. | | | | | | | | | | | | | | | | | | X |
| Bureau | Artificial neural network (ANN) | Émuler les fonctions cérébrales humaines pour reconnaître les modèles dans les processus. Analyse de gros volumes de données. | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bureau | Raisonnement par cas / Case-based reasoning (CBR) | Utiliser les connaissances récupérées de la situation précédente pour résoudre de nouveaux problèmes. | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bureau | Progiciel de gestion intégré / Entreprise ressource planning (PGI / ERP) | Aider à la planification et à la gestion des ressources organisationnelles en intégrant les fonctions commerciales à un système informatique centralisé. | | | | | | X | | | | | | | | | | | | |
| Bureau | Informatique contextuelle mobile / Context aware mobile computing | Accès sans fil à des données, des informations et des services spécifiques au contexte. | | | | | | | | X | | | | | | | | | | |
| Bureau | Technologies d'achat en ligne, WBPM, plateformes de paiement électronique et e-mail | Assister le contrôle et la surveillance des projets de construction grâce à internet. | X | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Multi-site | Appareil mobiles | Aider aux transactions sur internet par courriel ou réseau social (activé par la technologie Web 2.0). | | | | | | | | | | | | | | | | | | X X |
| Multi-site | Réalité augmentée | Combinaison d'images du monde réel et d'images virtuelles pour offrir une expérience en temps réel aux utilisateurs. | | X | X | X | X | | | | | | | | | | | | | X |
| Multi-site | Technologie multimédia | Aider l'enregistrement vidéo, le suivi de l'avancement du temps, le coût, la qualité du projet et stocker les informations au format numérique. | | | | | | | | X | | | | | | | | | | |
| Multi-site | Applications et logiciels | Dépôt de stockage pour les informations sur le projet et le traitement des données. | X | | | | | | | | | | | | | | | | | |

De manière plus générale, l'évolution des équipements et des matériaux dans les dernières décennies a eu un impact sur la productivité. Goodrum et Haas (2004) ont analysé plus de 200 activités de chantier sur une période de 22 ans via l'évolution technologique de leurs équipements et outils à main afin de voir l'évolution de la productivité de travail. Cette dernière aurait connu une augmentation moyenne de 30,9 % sur la productivité de travail sur les 200 activités évaluées, avec un taux d'amélioration annuel de 1,23 %. Globalement, les équipements ayant eu des améliorations sur les facteurs technologiques de l'étude (énergie, prise en main, aspect fonctionnel et traitement de l'information) ont au moins doublé la productivité de travail des activités associées par rapport aux équipements sans amélioration sur ces facteurs. De la même manière, Goodrum, Zhai et Yasin (2009) ont mené une étude similaire pour 100 activités par rapport à l'évolution des matériaux sur 27 ans. Sur cette période, la hausse de productivité de travail sur ces activités y est de 13,5 %, avec un taux d'amélioration annuel de 0,47 %. Les améliorations sur les facteurs technologiques de l'étude (poids, temps de cure, contrainte d'installation et modularité)

permettent au minimum de doubler la productivité de travail par rapport aux activités non améliorées et le poids et la modularité sont les facteurs ayant le plus grand impact sur la productivité de travail.

1.3 La réinvention de la construction hors site

La construction « hors site » (CHS) demeure un levier important pour améliorer la productivité dans l'industrie québécoise de la construction. Depuis son origine dans les années 1930, la CHS est en train de se réinventer grâce aux nouvelles technologies, telles que le BIM, le balayage laser, l'identification par radiofréquences (RFID) et autres technologies connectées, ou encore la fabrication numérique automatisée.

1.3.1 Introduction à la construction hors site

1.3.1.1 Définition

La CHS peut être définie comme la planification, la conception, la fabrication et l'assemblage des éléments de construction dans un endroit autre que leur endroit d'installation final, le but est de soutenir une construction rapide et efficace de structures permanentes de qualité et durables. La CHS implique une transition des opérations traditionnellement réalisées sur site vers un environnement de fabrication industrielle (Off-Site Construction Council - National Institute of Building Sciences).

Dans le cadre de ce rapport, le terme CHS englobe la construction « préfabriquée », « préassemblée », « industrialisée » et « modulaire » - termes souvent utilisés de façon interchangeable dans la littérature.

1.3.1.2 Les types de CHS

Les méthodes de CHS peuvent être classées de différentes manières, notamment selon les matériaux utilisés, les technologies, le secteur de marché de construction et l'étendue du préassemblage. En se basant sur le type du produit préfabriqué en usine, la CHS peut être classée en quatre catégories (CITB, 2017) :

1. Les composants et les sous-assemblages : toujours fabriqués en usine, ils ne sont jamais envisagés pour une production sur site (fourniture de portes, fenêtres, etc.) – non considérés dans ce rapport;
2. Préassemblage non volumétrique : des unités préassemblées ne créant pas des espaces utilisables (charpente, enveloppe, etc.);
3. Préassemblage volumétrique : des unités préassemblées créant des espaces utilisables. Elles sont entièrement finies en usine (salles de douches, chambre de logement ou d'hôpital, etc.);
4. Construction modulaire : des unités volumétriques préassemblées formant la structure et le tissu d'un bâtiment (maison, bâtiment au complet, etc.).

Ce rapport étudie l'innovation apportée par l'utilisation plus fréquente des catégories 2, 3 et 4 et leur impact sur la construction.

1.3.1.3 Les implications

Les entreprises de construction doivent s'impliquer stratégiquement dans la CHS. Le passage d'une approche de construction traditionnelle vers une approche hors site sera perturbateur. La figure 1.2 illustre une comparaison entre les deux méthodes :

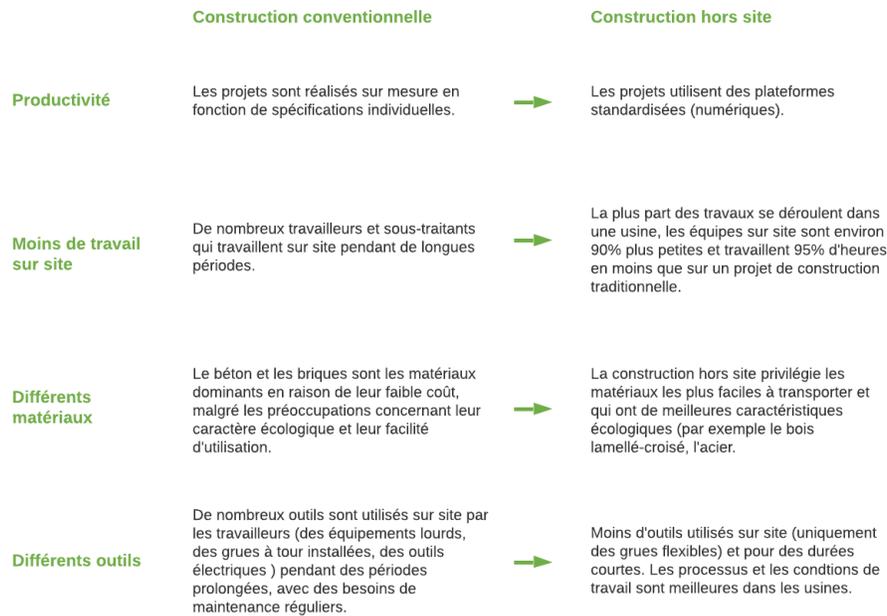


Figure 1.2: Le passage de la construction conventionnelle vers la CHS (adapté de : Expert interviews, BCG Analysis)

Plus précisément, la CHS signifiera plus de productivité, moins de travail sur site et une utilisation des matériaux et des outils différents. Cette évolution affectera plus au moins les chaînes d'approvisionnements des entreprises existantes, ces dernières devront s'adapter rapidement afin de tirer un maximum de profits (*The Offsite Revolution in Construction*, 2019).

1.4 Le nouvel élan de la CHS

Comme dans les autres secteurs économiques, les entreprises du secteur de la construction font face à une intégration accrue des technologies dans leurs pratiques d'affaires. Comme mentionné précédemment, ces technologies couvrent l'ensemble du cycle de production, soit de la conception jusqu'à l'installation et sont composées d'outils tels que les systèmes avancés de conception assistée par ordinateur, dont le BIM, les méthodes de contrôle numérique et d'autres technologies de production et de suivi, dans toutes les opérations (Grills, 2013).

1.4.1 La technologie au service de la CHS

Deux approches technologiques, BIM et l'automatisation, sont mises en lumière en tant que contributrices essentielles au succès de la CHS :

- Le couplage « BIM-CHS » permet de « Construire avant de construire ». Il s'agit d'une approche nécessaire afin de bien concevoir et de coordonner les détails de l'assemblage final avant de lancer la fabrication des différents éléments de construction. À titre d'exemple, l'utilisation du BIM et de la CHS a permis la livraison de la tour Apex House à Londres (28 étages pour 580 logements étudiants en moins de 11 mois) grâce à une planification et une efficacité d'assemblage inenvisageable sur un projet classique (Faure, 2019).

- L'automatisation au service de la CHS : actuellement, la majorité des robots utilisés dans la CHS n'effectuent que des tâches simples de fabrication ou d'assemblage. Ces robots devraient bientôt être en mesure de travailler avec différents types de matériaux tels que le béton (Faure, 2019).

1.4.2 Les marchés et les perspectives

La croissance du marché de la CHS sera plus rapide dans les régions qui ont une tendance à investir dans de nouveaux projets de construction plutôt que sur les projets de rénovation. L'adoption sera la plus forte dans les segments de construction qui présentent un ou plusieurs des facteurs suivants (Oliveira et al., 2017) :

- Un degré élevé de complexité, avec des composants multiples et/ou sophistiqués (ces composants bénéficieraient grandement des gains de temps découlant des méthodes hors site)
- Un degré élevé de répétitivité, au sein des projets, ce qui facilitera la normalisation.

Des exigences strictes en matière de qualité, de coût et de logistique sur site sont à prévoir et à mettre en œuvre. Dans une étude publiée en juin 2019, Bertram et al, pour le compte de la firme McKinsey, ont estimé, selon un scénario modéré, que la valeur marchande de la CHS dans les nouvelles constructions immobilières pourrait atteindre 130 milliards de dollars en Europe et aux États-Unis d'ici 2030.

1.4.3 Les nouveaux modèles d'affaires

Malgré l'intérêt croissant pour la CHS, peu d'entreprises ont su imposer un modèle d'affaires adapté à ce type de construction. En effet, la CHS implique un renouvellement des modèles d'affaires en construction afin d'accommoder et de pouvoir bénéficier des avantages que celle-ci permet (Goulding et al., 2019). Il est notamment question de revoir les participants de la chaîne d'approvisionnement et de leur implication dans le projet, de même que les stratégies d'affaires entourant cette approche.

Deux types d'entreprises ont vu le jour dans le cadre de la CHQ (*The Offsite Revolution in Construction*, 2019):

- Les fournisseurs de bout en bout :

Les entreprises de ce type possèdent leurs propres bureaux d'études et d'ingénierie. Elles fabriquent et préassemblent la plupart des composants dans leurs propres usines et gèrent activement l'assemblage final sur site. Il est essentiel pour ces entreprises de disposer d'un système de fabrication intégré afin de produire des composants hors site de qualité supérieure. Le modèle d'affaires des fournisseurs de bout en bout est actuellement le plus répandu, parmi les principaux exemples, on trouve Katerra aux États-Unis, Laing O'Rourke au Royaume-Uni et Daiwa House et Sekisui House au Japon.

- Les coordinateurs d'écosystème :

Ces entreprises limitent leurs rôles directs à la conception globale et à la gestion des relations avec les clients. Elles s'appuient sur des partenaires pour fabriquer les différents composants hors site selon leurs spécifications. Parmi les principaux exemples, on trouve Bryden Wood et Skanska, ces deux coordinateurs d'écosystèmes ont développé le concept de « l'usine volante ». Ils ont trouvé un bâtiment sous-utilisé à proximité d'un futur chantier de construction, et ils l'ont transformé en une usine temporaire avec de faibles technologies pour assembler les composants fournis par d'autres partenaires.

1.5 Les avantages, les barrières et les facteurs de succès de la CHS

1.5.1 Les avantages

La CHS est considérée comme une méthode de construction efficace et rentable. Elle permet d'assurer une construction durable et de qualité meilleure par rapport à la construction traditionnelle. Le principal avantage de la CHS est le chevauchement entre la fabrication à l'usine et la préparation des activités de construction sur site, ainsi que les gains de temps qui accompagnent les progrès simultanés de ces deux phases (Vinodhan, 2015). La figure 1.3 représente les principaux avantages liés à la pratique de cette méthode de construction.

En 2018, McGraw-Hill Construction a publié des statistiques qui montrent l'importance de la CHS dans l'amélioration de la productivité dans le secteur de la construction, notamment en ce qui concerne les répercussions sur le calendrier des projets, les coûts, la sécurité, la qualité et la réduction des déchets. Parmi 800 acteurs de l'industrie interrogés (des architectes, des ingénieurs et des entrepreneurs), 66 % ont indiqué qu'ils ont pu accélérer leurs calendriers de projets, 65 % ont pu réduire les coûts globaux de leurs projets et 77 % ont pu minimiser les déchets dans leurs chantiers de construction (figure 1.4).



Figure 1.3: Avantages de l'adoption de la CHS (adapté de : Vinodhan, 2015)



Figure 1.4: Les bénéfices de l'utilisation de la CHS (adapté de : McGraw-Hill Construction, 2018)

1.5.2 Les freins et les facteurs clés de succès

Selon la littérature, les freins au développement de la CHS sont culturels, mais également normatifs et réglementaires. Les réglementations doivent évoluer pour permettre à la CHS de devenir efficace. D'un autre côté, la CHS possède un potentiel extrêmement important, il suffit de bien comprendre les facteurs clés pour le succès de cette méthode de construction (CITB, 2017). Les principales barrières et facteurs clés pour la réussite de la CHS sont représentés dans la figure ci-dessous (figure 1.5).

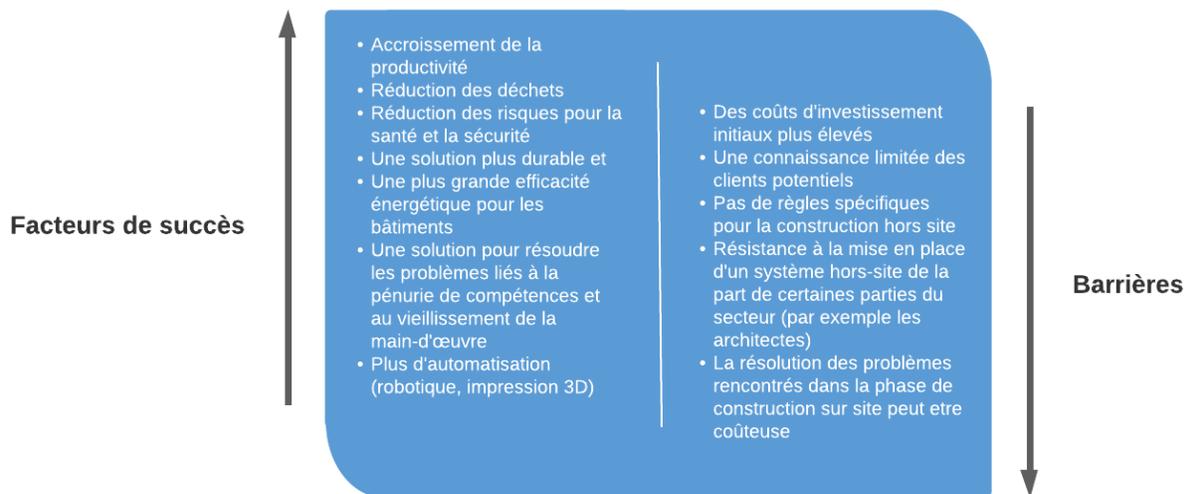


Figure 1.5 : Barrières et facteurs de succès de la CHS (adapté de : CITB, 2017)

De plus, développer la CHS demande un véritable changement dans le modèle organisationnel et logistique. Il est devenu nécessaire de mettre en place les ressorts d'une conception collaborative et d'inventer une nouvelle chaîne d'approvisionnement.

1.6 Conclusion

Deux des leviers les plus prometteurs pour accroître la productivité en construction au Québec ont été présentés dans cette section et sont au cœur de cette étude : l'innovation technologique et la construction hors site. Chacune de ces approches comporte son lot de défis et de barrières à leur mise en œuvre. La littérature indique entre autres comme barrières, le manque de ressources financières, l'implication temporaire des entreprises sur le projet, le manque d'expérience ou d'employés qualifiés, la culture d'entreprise inadaptée et les contraintes de temps. En revanche, lorsque bien implantées, ces approches promettent une véritable révolution dans l'industrie.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif était de comprendre l'impact de l'innovation technologique sur la productivité en construction. L'étude inclut la CHS comme innovation étant donné le lien étroit entre la CHS et les technologies émergentes. Dans ce contexte, cette section a présenté les deux concepts, leurs

défis et leurs avantages. De plus, une classification a été développée pour permettre de catégoriser les différentes innovations afin de comprendre leur champ d'action et de caractériser leur impact potentiel.

Dans la prochaine section, les résultats d'un sondage panquébécois portant sur l'adoption et la mise en œuvre des innovations technologiques et de la CHS sont présentés. Le sondage permet de comprendre les freins et les approches mises de l'avant par les entreprises pour soutenir le processus d'innovation. De plus le sondage donne un aperçu du taux d'adoption de la CHS au Québec. Finalement, un bon nombre d'innovations sont identifiées et leurs impacts discutés. Dans la dernière section, quatre études de cas sont présentées expliquant la mise en œuvre d'innovations spécifiques dans le secteur de la construction.

2 SECTION 02 : SONDAGE PANQUÉBÉCOIS EN MATIÈRE D'INNOVATION TECHNOLOGIQUE EN CONSTRUCTION

2.1 Introduction

Cette section présente les résultats d'un sondage panquébécois portant sur l'adoption et la mise en œuvre des innovations technologiques et de la CHS par les entreprises québécoises en construction. Le sondage a été conduit de septembre 2020 à février 2021 à travers les réseaux de l'Association de la construction du Québec (ACQ) et de l'Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTO). Plus de 270 réponses ont été enregistrées sur la plateforme de sondage en ligne, dont 161 réponses identifiées comme étant valides. Ainsi, nos données concerneront le profil des répondants, l'innovation dans l'industrie de la construction au Québec et les technologies implantées dans les entreprises avec leurs impacts. Un croisement des données avec le profil des entreprises répondantes a été effectué afin de mieux cibler les profils d'innovations et de mise en œuvre des technologies.

Le sondage permet de mieux comprendre les freins et les approches mis de l'avant par les acteurs québécois de la construction pour soutenir le processus d'innovation au sein de leur entreprise. Ainsi, le profil des répondants, leur niveau d'intérêt et leur appétit pour l'innovation, les différents types d'innovations et l'impact de celles-ci sont étudiés. Pour les entreprises n'ayant pas mis en œuvre d'innovations, les raisons derrière cette absence sont analysées. Finalement, l'impact de l'innovation technologique sur la productivité est approfondi. En parallèle, la mise en œuvre de la construction hors site est examinée. Le taux d'adoption, la typologie d'éléments constructifs, le domaine d'application ainsi que l'impact de celle-ci sont analysés et indiqués dans ce rapport. Finalement, des conclusions sont tirées et présentées en introduction à la troisième et dernière portion de cette étude.

2.2 Profil des répondants

Comme démontré à la Figure 2.1, la majorité des 161 répondants sont des entrepreneurs généraux (51 %) ou spécialisés (28 %) ainsi que de fournisseurs (12 %).

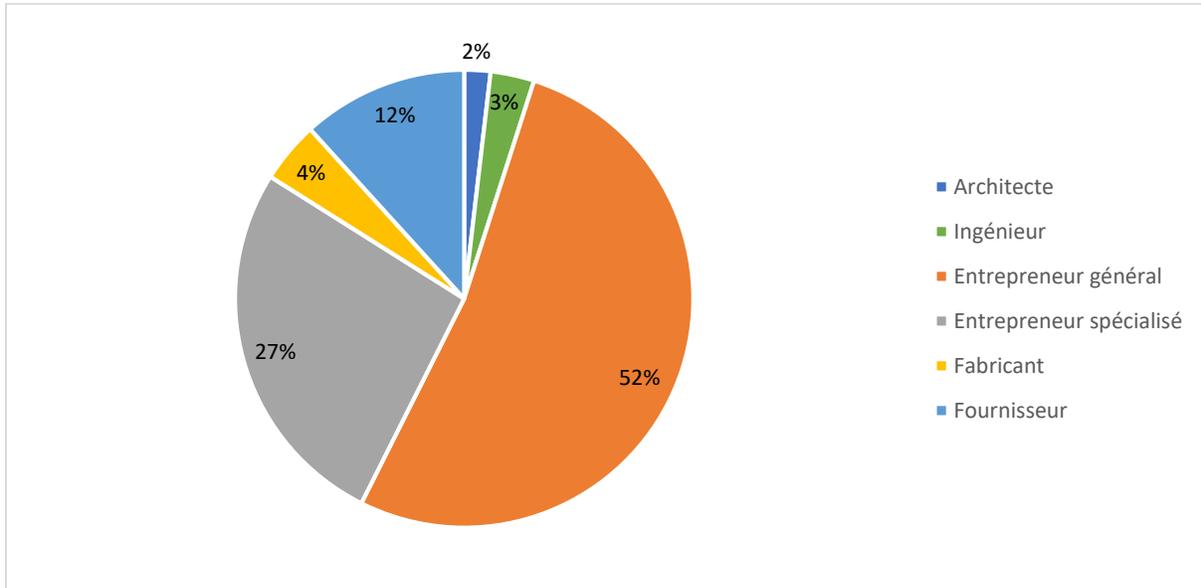


Figure 2.1 : Types d'entreprise des répondants (N=161)

Les entreprises répondantes sont en majorité des compagnies de plus de 50 employés. La Figure 2.2 démontre que près de 27 % d'entre elles ont entre 101 et 500 salariés, tandis que la Figure 2.3 démontre que 29 % des répondants déclarent un chiffre d'affaires compris entre 5 et 25 millions de dollars et 22 % entre 50 et 250 millions.

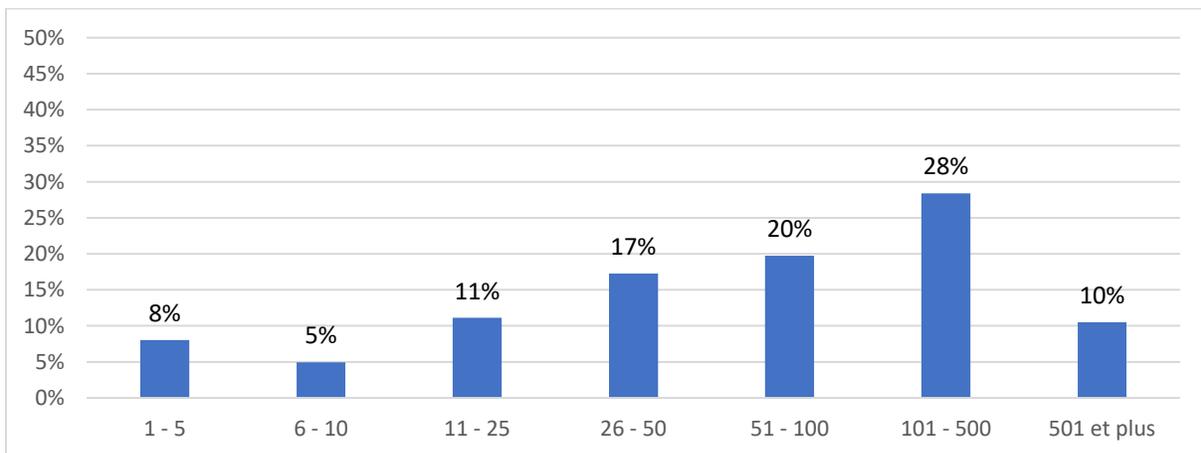


Figure 2.2: Répartition des réponses par nombre d'employés (N=161)

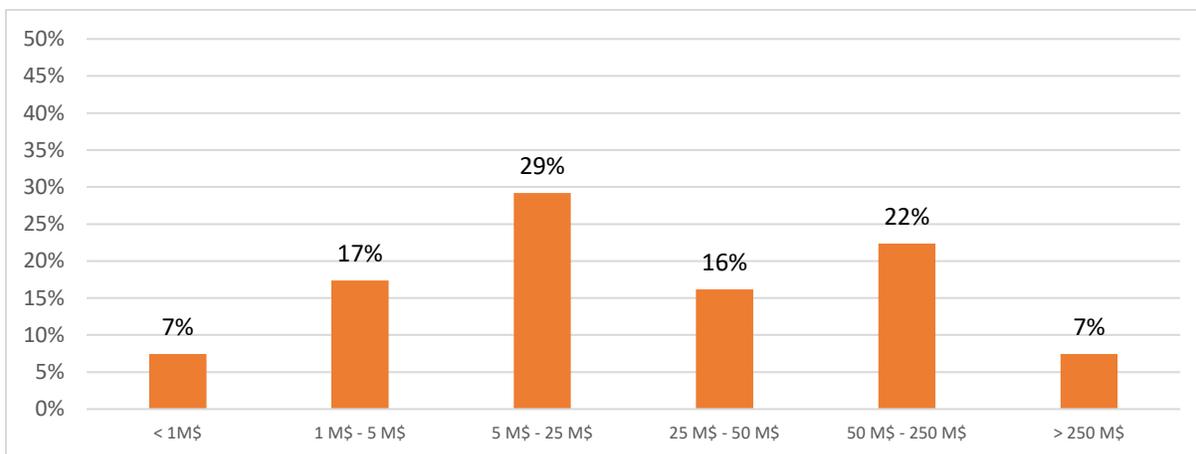


Figure 2.3: Répartition des réponses par chiffre d'affaires (N=161)

La répartition des secteurs d'activité (Figure 2.4) montre une proportion importante des répondants impliqués sur des projets de génie civil et voirie (28 %). Le résidentiel est le secteur le moins représenté dans l'échantillon (12 %).

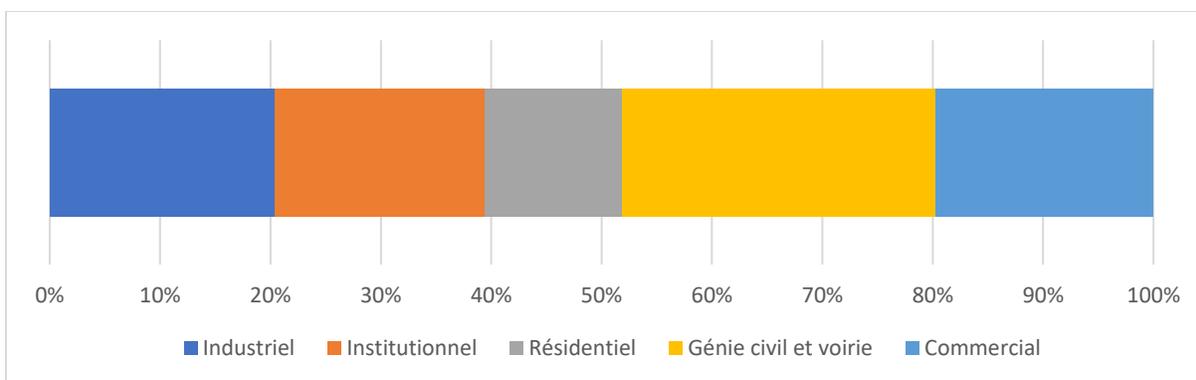


Figure 2.4: Répartition des réponses par secteur d'activité des projets (N=161)

La Figure 2.5 présente la répartition géographique de la localisation des activités d'affaires des répondants. Ainsi, 15 % des entreprises participent à des projets de construction à l'extérieur du Québec et 46 % travaillent dans toutes les régions de la province. La balance des répondants (40 %) déclare travailler dans des régions spécifiques du Québec. Parmi les régions les plus évoquées dans cette proportion, on retrouve la Montérégie (10,5 %), la Capitale-Nationale (9,2 %), Montréal (10,1 %), l'Estrie (9,2 %) et Laval (7,1 %).

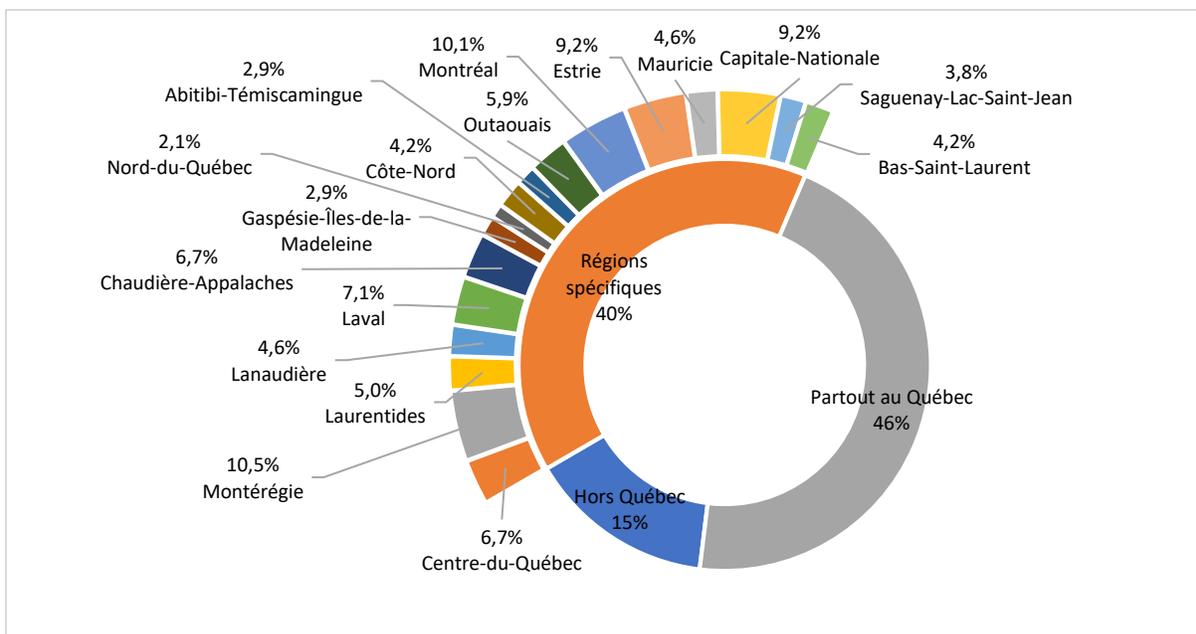


Figure 2.5: Répartition des réponses par localisation des projets (N=161)

2.2.1 Sommaire de la section

Sans surprise, une majorité d'entrepreneurs compose l'échantillon puisqu'il s'agissait du public visé par le sondage. Cependant, la taille et le chiffre d'affaires des répondants ne sont pas représentatifs de la majorité des entreprises de construction au Québec. En effet, selon la Commission de la construction du Québec (CCQ), 81 % des entreprises de construction québécoises avaient moins de 5 salariés en 2019 et la majorité des entreprises ont des projets dans le secteur résidentiel (CCQ, 2019). L'échantillon ne reflète donc pas la réalité de la majorité de l'industrie québécoise de la construction. Toutefois, les résultats permettent de comprendre la situation technologique des moyennes et des grosses entreprises du Québec. Ceci peut affecter les résultats sur les taux d'adoption et le type d'innovation mise en œuvre étant donné la capacité accrue des moyennes et grandes entreprises à consacrer temps et ressources à l'innovation dans leurs projets.

2.3 L'innovation dans l'industrie de la construction québécoise

Pour les fins de ce sondage, l'innovation technologique est définie de la manière suivante :

Les innovations technologiques sont l'ensemble des produits, services ou processus nouveaux (récents) ou largement améliorés par rapport à la technologie existante et qui engendre des opportunités d'amélioration de facteurs, tels que la production, la rapidité d'exécution, le respect de l'environnement, la sécurité, etc. sur les chantiers de construction. L'innovation peut être présente sur le chantier, à distance dans les installations de votre entreprise ou ailleurs.

La présentation des résultats se décline en 3 volets : 1) le niveau d'intérêt 2) la perception de la qualité du support gouvernemental pour encourager l'innovation, et 3) le degré d'innovation dans les projets en fonction de la taille, du chiffre d'affaires, de la répartition géographique et du type d'entreprise.

Le premier volet aborde l'intérêt des compagnies pour l'innovation dans leurs projets. Ainsi, 77 % des répondants indiquent un intérêt fort (4) ou très fort (5) pour l'innovation et l'utilisation des nouvelles technologies sur leurs projets (Figure 2.6).

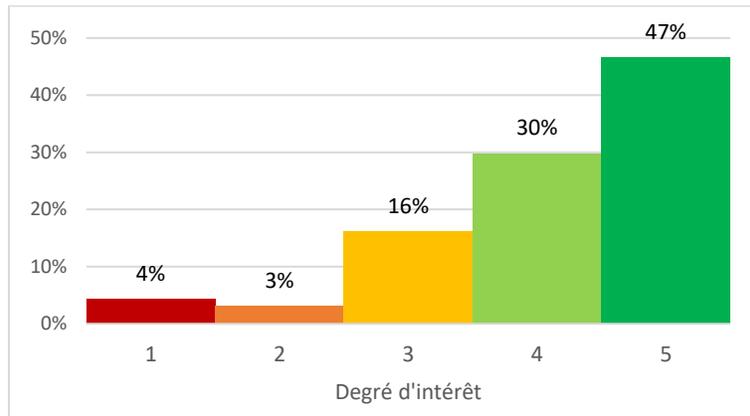


Figure 2.6: Intérêt des entreprises pour utiliser de nouvelles technologies dans leurs projets sur une échelle de 1 à 5, 1 étant pas d'intérêt et 5 étant un intérêt très fort (N=161)

2.3.1 Profil des entreprises ayant de l'intérêt pour l'innovation

En creusant un peu plus au niveau de l'intérêt des répondants pour l'innovation technologique (Figure 2.7), il est possible de constater qu'en termes relatifs, les fournisseurs affichent le plus d'intérêt pour l'innovation (84 % ayant un fort (16 %) ou très fort (68 %) intérêt) suivis par les entrepreneurs généraux (84 % ayant un fort (38 %) ou très fort (46 %) intérêt) et les fabricants (72 % ayant un fort (29 %) ou très fort (43 %) intérêt). Les entrepreneurs spécialisés, les architectes et les ingénieurs paraissent plus hésitants, mais restent intéressés.

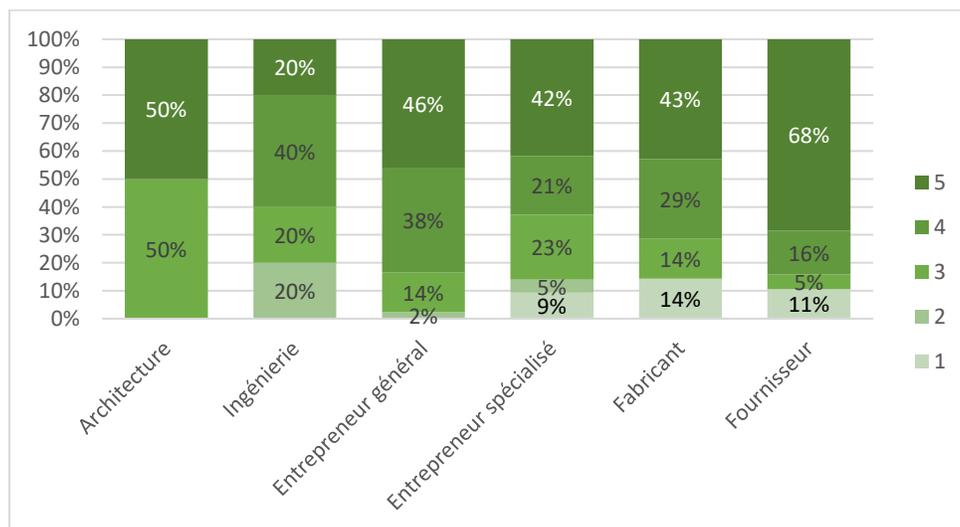


Figure 2.7 : Répartition des types d'entreprises par notes d'intérêt pour l'innovation (N=161)

Une tendance claire se dessine quant à l'influence du chiffre d'affaires sur l'intérêt à innover (Figure 2.8). Il est possible de remarquer que l'intérêt pour l'innovation technologique est très élevé pour les entreprises avec un chiffre d'affaires au-delà de 50 M\$. Inversement, les entreprises avec un chiffre d'affaires sous la barre du 1 M\$ possèdent moins d'intérêt pour l'innovation technologique. Les entreprises ayant un chiffre d'affaires entre 1 M\$ et 50 M\$ ont un intérêt marqué pour l'innovation somme toute avec approximativement les deux tiers des répondants dans ces catégories ayant un intérêt fort ou très fort.

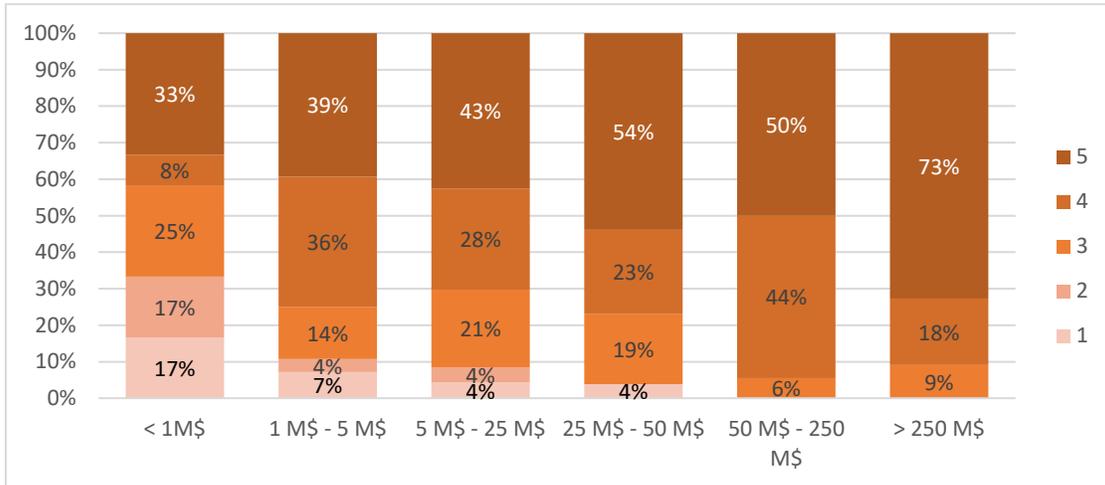


Figure 2.8 : Répartition du chiffre d'affaires par notes d'intérêt pour l'innovation (N=161)

En ce qui concerne l'intérêt pour l'innovation en fonction de la taille de l'entreprise (Figure 2.9), comme avec le chiffre d'affaires, les entreprises ayant plus de 100 employés démontrent un intérêt fort ou très fort pour celle-ci. Les réponses sont plus mitigées pour les entreprises ayant moins de 100 employés, avec un intérêt moins marqué pour les entreprises ayant moins de 5 employés (+/- 30 % ayant peu ou très peu d'intérêt pour l'innovation technologique). Pour les entreprises de 6 à 100 employés, l'intérêt est relativement fort, mais demeure tranché avec +/- 12 % d'entreprises démontrant peu ou pas d'intérêt pour l'innovation chez les entreprises ayant 6-10, 11-25 et 51-100 employés.

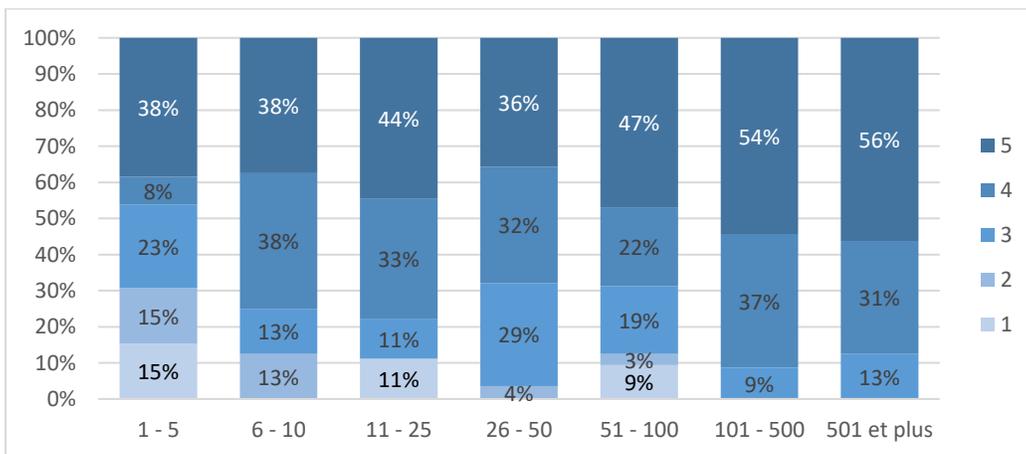


Figure 2.9 : Répartition du nombre d'employés des entreprises par notes d'intérêt pour l'innovation (N=161)

2.3.1.1 Discussion

L'intérêt pour l'innovation technologique est élevé pour la majorité des répondants au sondage, en particulier pour les entrepreneurs et les fournisseurs. Une tendance se dessine quant à l'influence de la taille et du chiffre d'affaires sur l'intérêt pour l'innovation technologique. Ceci est en lien avec les résultats des recherches passées indiquant un lien de causalité entre la taille d'une entreprise ou son chiffre d'affaires et son intérêt ou sa capacité à innover. Cela étant dit, il est à noter que la majorité des répondants de tous les groupes, exceptées les très petites entreprises, démontre un intérêt fort ou très fort pour l'innovation en construction au Québec.

2.3.2 Profil des entreprises ayant mis en œuvre au moins une innovation technologique

Ayant brossé le portrait des répondants et de leur intérêt pour l'innovation technologique en construction au Québec, cette section approfondit le taux d'innovation et de mise en œuvre de celle-ci dans les entreprises. À cet effet, 68 % des répondants déclarent avoir implanté et/ou utilisé une ou plusieurs innovations dans leur projet (Figure 2.10). Des entreprises ayant mis en œuvre une ou plusieurs innovations technologiques, 55 % des répondants ont indiqué avoir au moins une personne responsable de l'innovation et/ou de sa mise en œuvre (Figure 2.11).

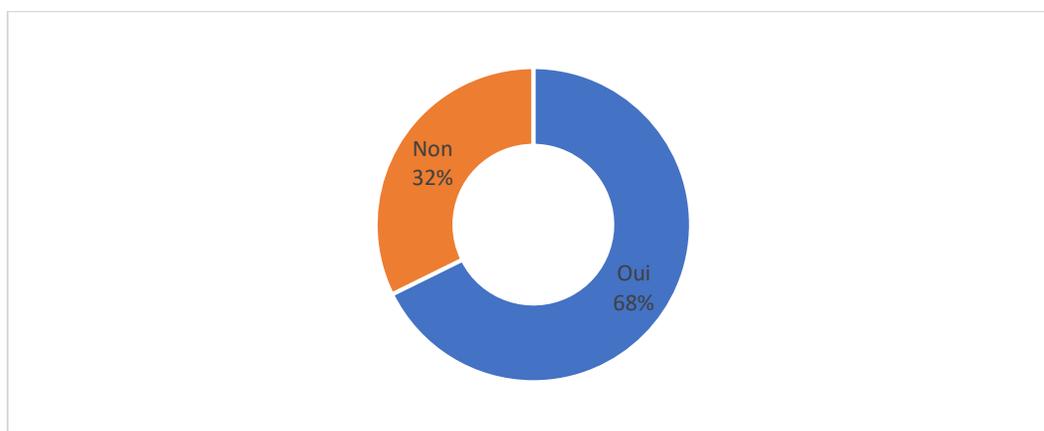


Figure 2.10 : Entreprises ayant mis en œuvre une ou plusieurs innovations technologiques (N=161)

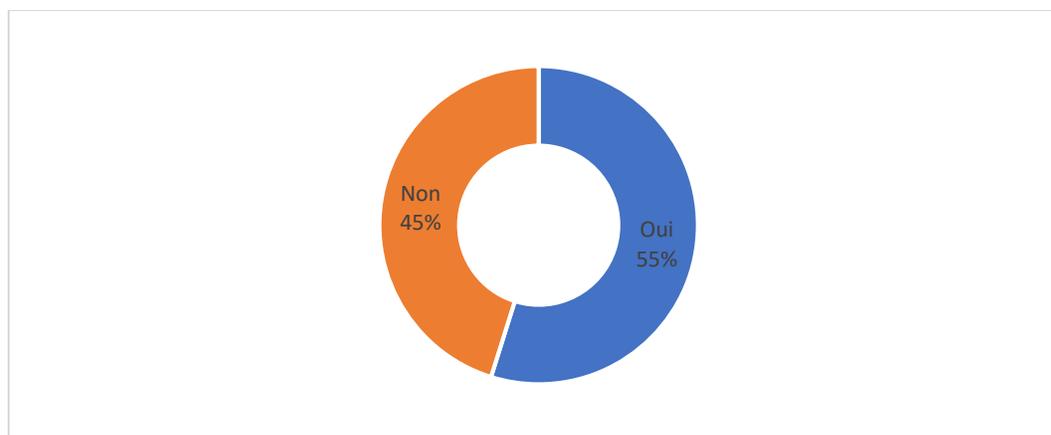


Figure 2.11 : Entreprises ayant au moins un responsable de l'innovation (N=93)

En examinant la mise en œuvre de l'innovation en fonction de la taille des entreprises, la même tendance qu'au niveau de l'intérêt marqué pour l'innovation se dessine, soit que les plus grandes entreprises ont à grande majorité mis en œuvre une ou plusieurs innovations technologiques (Figure 2.12). Dans les entreprises de 100 employés et moins, le taux d'innovation est plus variable avec environ 60 % des entreprises ayant mis en œuvre une ou plusieurs innovations dans leurs projets avec une exception marquée pour les entreprises comptant entre 11 et 25 employés qui ont un taux de mise en œuvre de l'innovation plus bas (40 %) que le reste.

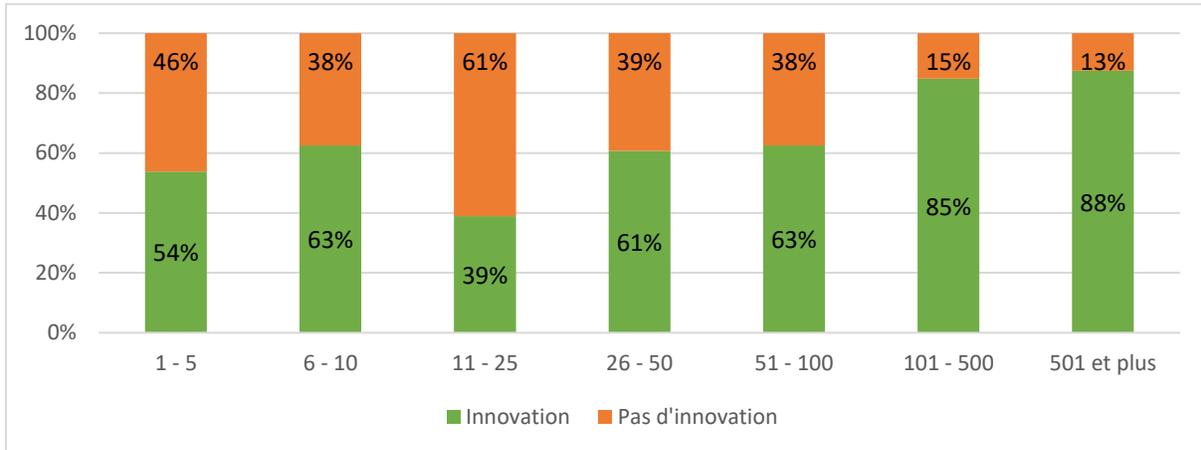


Figure 2.12 : Mise en œuvre de l'innovation en fonction de la taille de l'entreprise (N=161)

En faisant le même exercice au niveau du chiffre d'affaires, une tendance plus claire se dégage quant à la mise en œuvre de l'innovation technologique en fonction du chiffre d'affaires de l'entreprise. Il est donc possible de constater que les entreprises avec des chiffres d'affaires supérieurs à 25 M\$ mettent davantage en œuvre des innovations que celles ayant un chiffre d'affaires inférieur à 25 M\$ (Figure 2.13).

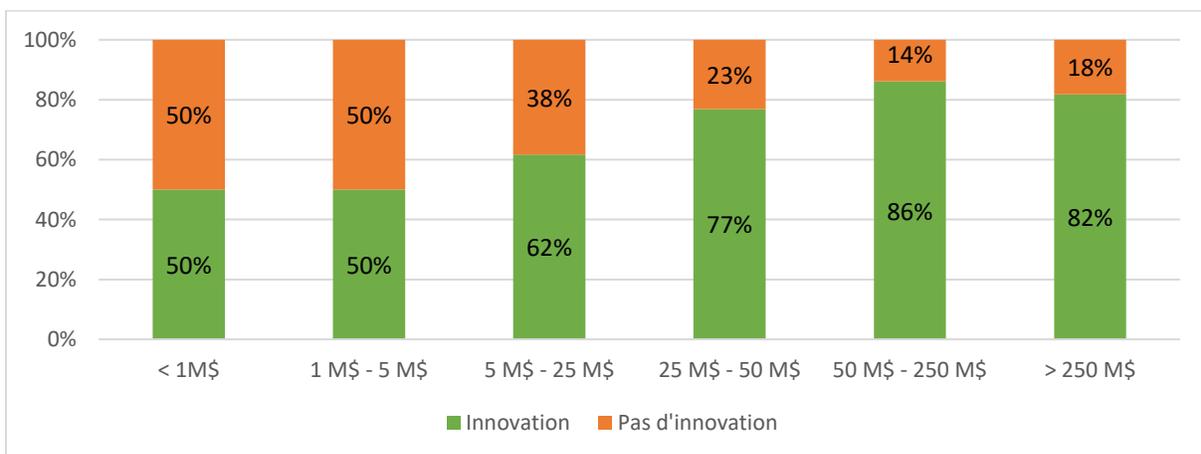


Figure 2.13 : Chiffre d'affaires en fonction de la présence d'innovation dans l'entreprise (N=161)

En considérant le taux de mise en œuvre d'innovations technologiques en fonction du secteur, aucun secteur ne se démarque comme étant « plus innovant » qu'un autre (Figure 2.14). Il est cependant intéressant de noter que les secteurs résidentiel et commercial ont un taux d'innovation moins important que les secteurs institutionnels, industriels et du génie civil et de la voirie. Il est important de noter qu'une

même entreprise peut œuvrer dans plusieurs secteurs, ce qui peut expliquer le faible écart entre les différents secteurs.

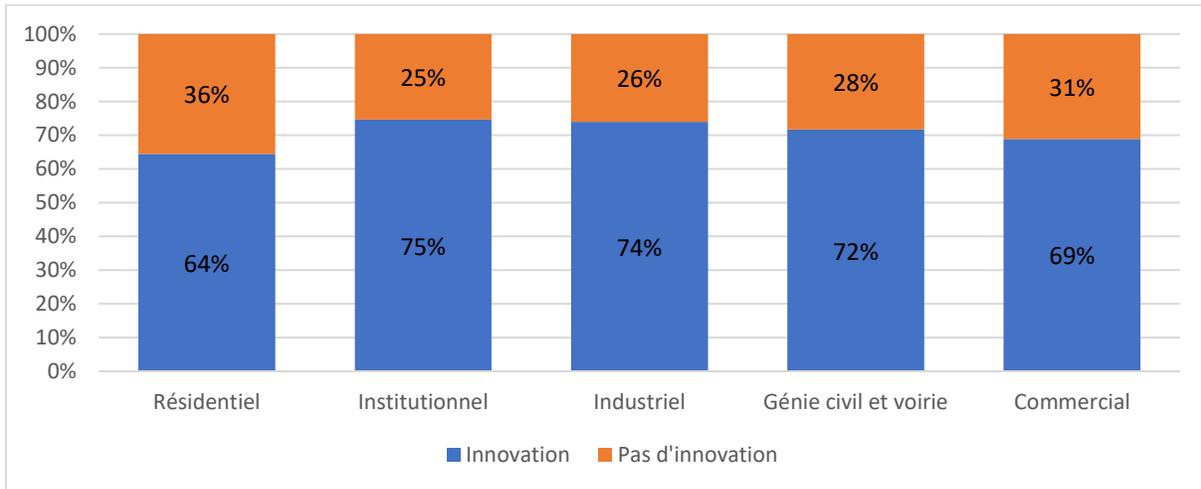


Figure 2.14 : Taux d'innovation des entreprises par secteur (N=161)

La Figure 2.15 démontre l'importance de l'innovation en fonction de la provenance des répondants. Ainsi, en observant la localisation des entreprises dans lesquelles se retrouvent les projets intégrant des innovations, les 3 régions du Grand Montréal (Laval, Montérégie et Montréal) récoltent le plus grand taux de réponse et démontrent un important taux de mise en œuvre d'innovation.

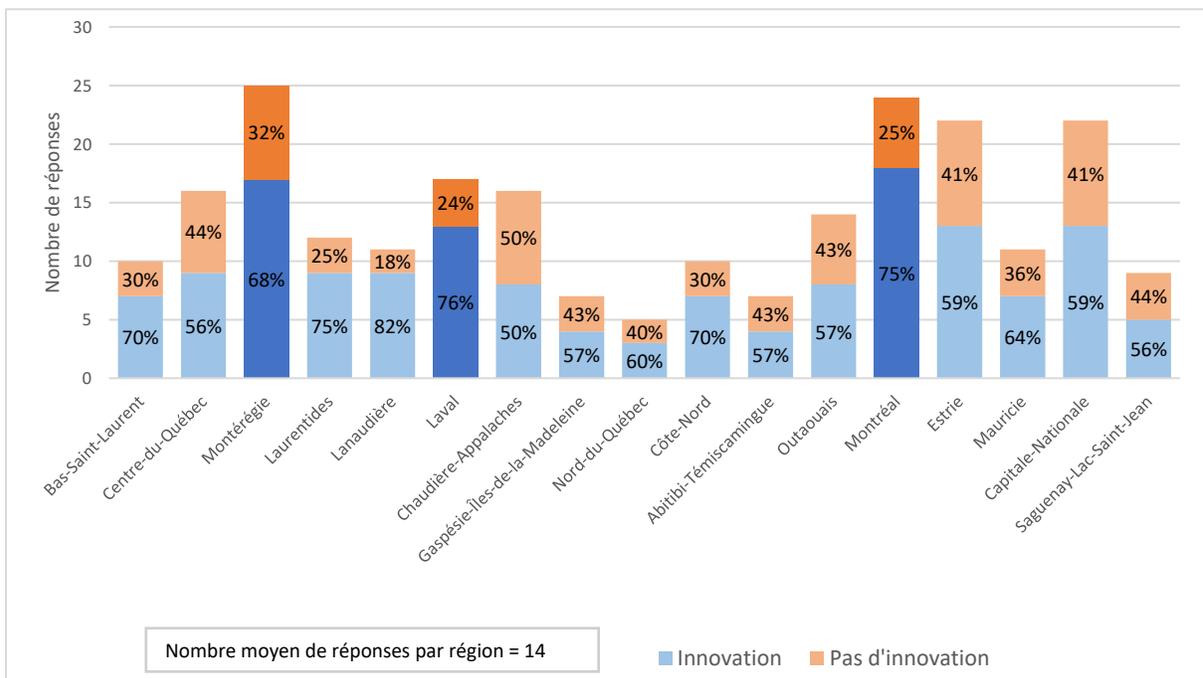


Figure 2.15 : Innovations dans les entreprises en fonction de la localisation des projets (N=161)

Enfin, la Figure 2.16 illustre la mise en œuvre d'innovations selon le type d'entreprise. C'est au niveau des entrepreneurs spécialisés que le taux d'innovation est le plus faible, tandis qu'une forte majorité des

entrepreneurs généraux (68 %) ont mis en œuvre une ou plusieurs innovations au sein de leur entreprise ou de leur projet. Il est intéressant de constater que les fournisseurs (84%), les fabricants (100%) et les architectes (100%) ont un haut taux d'innovation. Il faut cependant noter le faible taux de réponse du côté des firmes d'architectes, ce qui ne permet pas de tirer des conclusions.

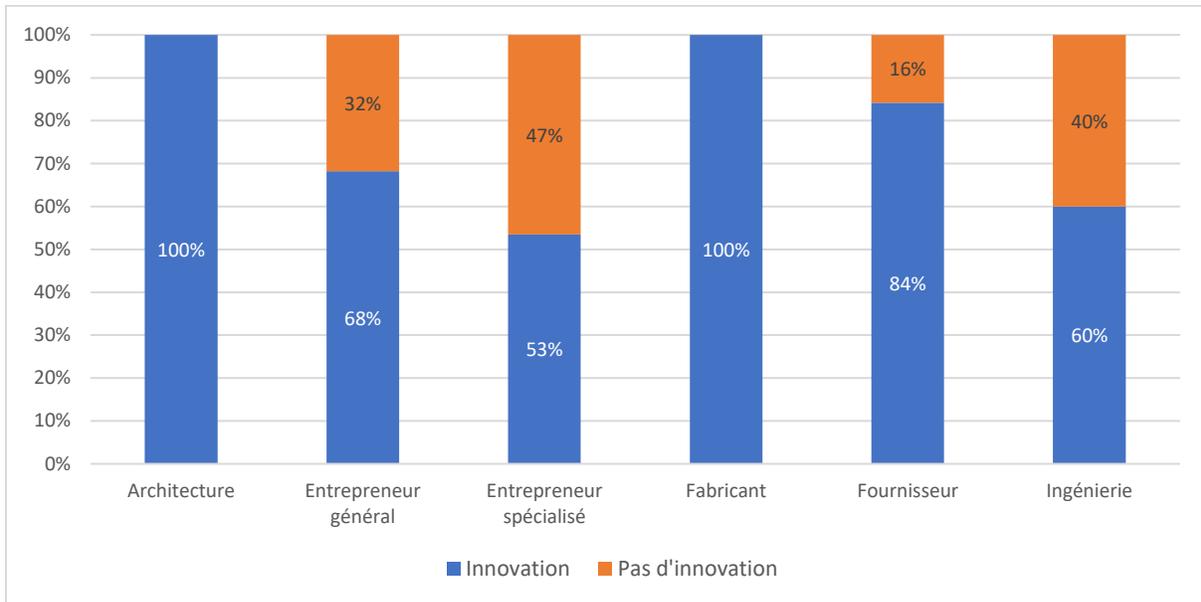


Figure 2.16 : Innovations dans les entreprises en fonction de leur type (N=161)

2.3.2.1 Discussion

En résumé, il est possible de constater que les régions les plus propices aux entreprises à innover sont denses et moyennement denses en termes de population (Le Québec économique, 2019) et sont situées dans la région du Grand-Montréal. On dégage un certain potentiel pour l'innovation de la part des entrepreneurs généraux et des fournisseurs. Les entrepreneurs spécialisés semblent moins portés à innover. Cependant, bien qu'ils soient moins investis dans l'implantation d'innovations que d'autres types d'entreprises, leur intérêt pour le sujet est encourageant pour l'évolution du nombre d'entrepreneurs qui utiliseront des innovations dans le futur. Pour le reste de l'analyse, il se dégage une certaine implication pour innover de la part des grandes entreprises (plus de 100 employés) et celles générant plus de 25 millions de dollars. Les secteurs industriel et institutionnel sortent du lot quant à l'utilisation d'innovations, mais l'implantation par secteur reste assez équilibrée.

2.3.3 Facteurs influençant l'absence d'innovation au sein des entreprises

En ce qui concerne les entreprises n'ayant pas mis en œuvre d'innovations, le sondage cherchait à identifier les facteurs influençant cette absence. La Figure 2.17 classe les facteurs les plus évoqués par ces entreprises. Ainsi, il est possible de constater que le manque d'expérience en la matière (16 %), les contraintes de temps (14 %), l'absence de bénéfices clairs (12 %) et un contexte contractuel défavorable à la mise en œuvre d'innovations (11 %) sont parmi les facteurs les plus importants. Le facteur « L'entreprise ne sait pas comment s'y prendre » est en lien avec le facteur du manque d'expérience, ce qui renforce le besoin d'accompagnement en matière d'innovation. Il est possible de conclure qu'un meilleur accompagnement des entreprises dans la démarche de l'innovation ne semble pas être une solution clé pour ces entreprises. Fait intéressant, le manque de ressources financières et le contexte

réglementaire ne sont pas des facteurs déterminants, même s'ils sont à considérer dans le processus d'innovation. Fait à noter, la notion de risque a été introduite par un répondant et est en lien avec la clarté des bénéfices. En effet la notion de risque vs bénéfices est à considérer dans la mise en œuvre de l'innovation. Autre élément à noter est l'influence du contexte contractuel, qui est reconnu comme étant un frein à l'innovation dans l'industrie de la construction.

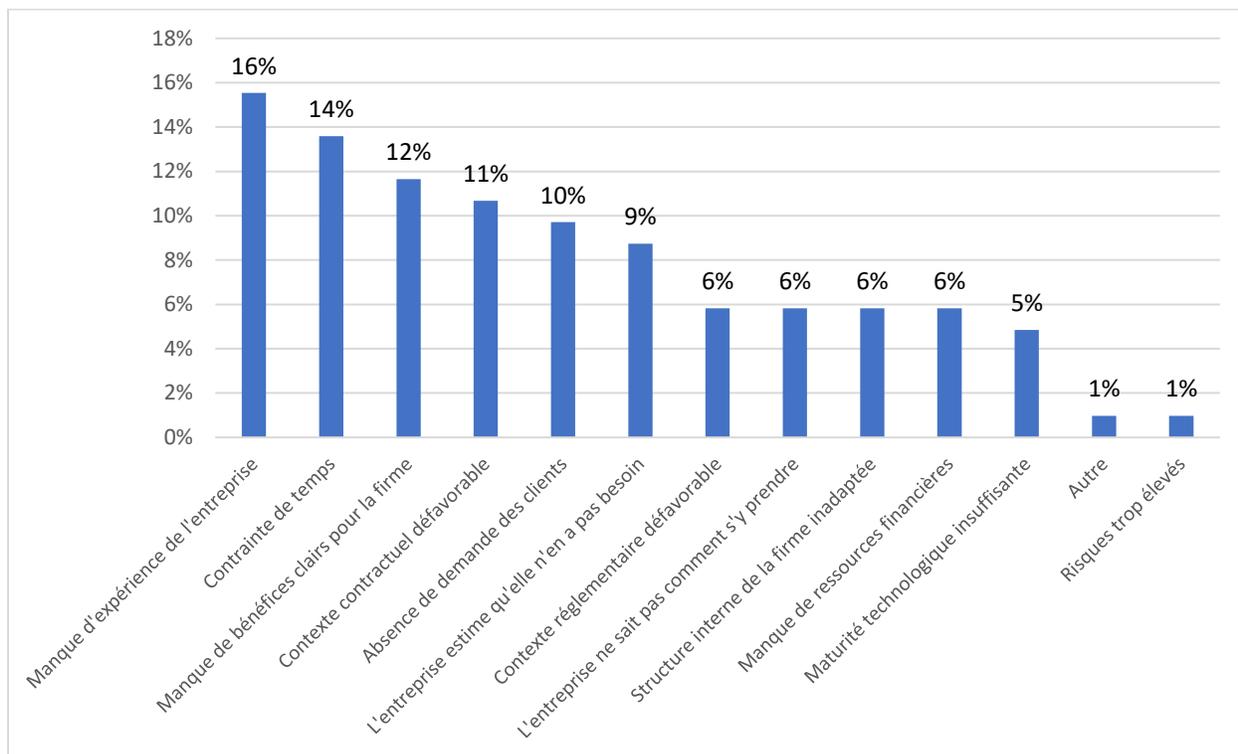


Figure 2.17 : Facteurs influençant l'absence d'innovation au sein des entreprises (N=52)

2.3.4 Aide et accompagnement pour l'innovation en construction

Les deux tendances identifiées portant sur l'influence de la taille et du chiffre d'affaires sur l'intérêt pour l'innovation peuvent s'expliquer par les défis qui s'imposent dans le processus d'innovation, notamment en matière d'accompagnement pour les entreprises (confirmé dans la Figure 2.17). En ce sens, investir pour innover peut représenter des risques considérables pour celles-ci. Dans plusieurs industries, ce risque est partagé par le gouvernement à l'aide de divers programmes de subvention ou d'exemptions fiscales pour encourager cette prise de risques.

Afin de comprendre les dynamiques d'innovation en construction au Québec, les répondants ont été sondés pour donner leur opinion sur les deux affirmations suivantes :

- Affirmation 01 : Les aides externes et gouvernementales sont suffisantes pour permettre aux entreprises de construction de développer les technologies dans leurs projets;
- Affirmation 02 : L'entreprise sait où se tourner pour obtenir de l'aide ou des conseils dans l'implantation de la technologie.

Concernant l'affirmation 01, plus de 50 % des répondants ont indiqué ne pas être, ou être totalement en désaccord avec le fait que les aides externes (subventions) et/ou gouvernementales sont suffisantes pour

appuyer la mise en œuvre de technologies dans leurs projets. Seulement 12 % des répondants étaient en accord avec cette affirmation. Concernant l'affirmation 02, les réponses étaient plus mitigées quant à la facilité de trouver de l'accompagnement pour la mise en œuvre des technologies, avec 44 % des répondants exprimant leur désaccord (Figure 2.18).

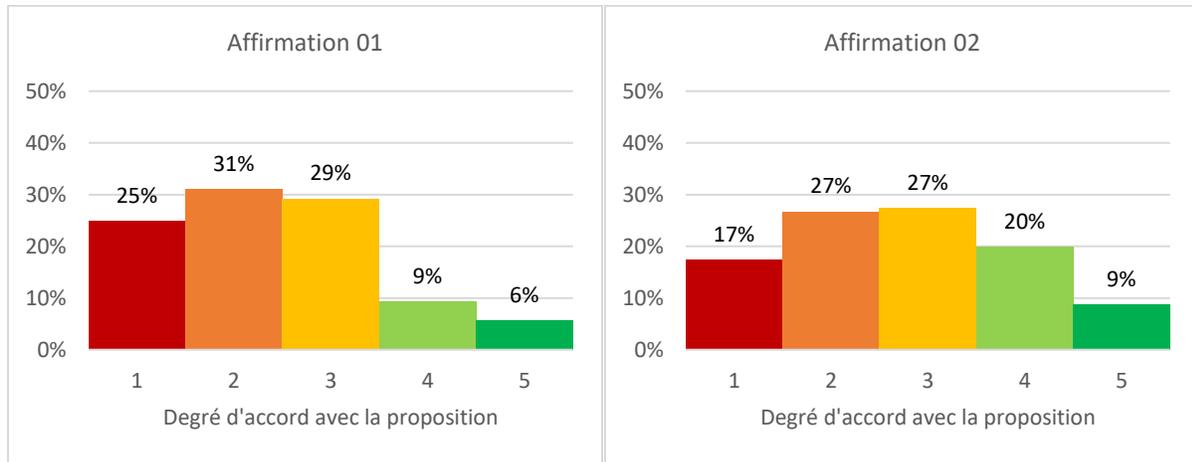


Figure 2.18 : Avis des répondants sur l'accompagnement dans la mise en œuvre de la technologie (N=161)

En creusant un peu plus l'affirmation 02 en fonction de la taille de l'entreprise (Figure 2.19), il est possible de constater que les entreprises de 51 employés et plus semblent savoir où se tourner en termes d'accompagnement dans leur processus de mise en œuvre de l'innovation et de la technologie. En effet, il serait logique de croire que ces entreprises savent où se tourner puisque celles-ci ont une ou plusieurs ressources dédiées à l'innovation au sein de leur entreprise (Figure 2.12). Or, comme indiqué dans la Figure 2.20, aucune tendance en ce sens ne se dégage.

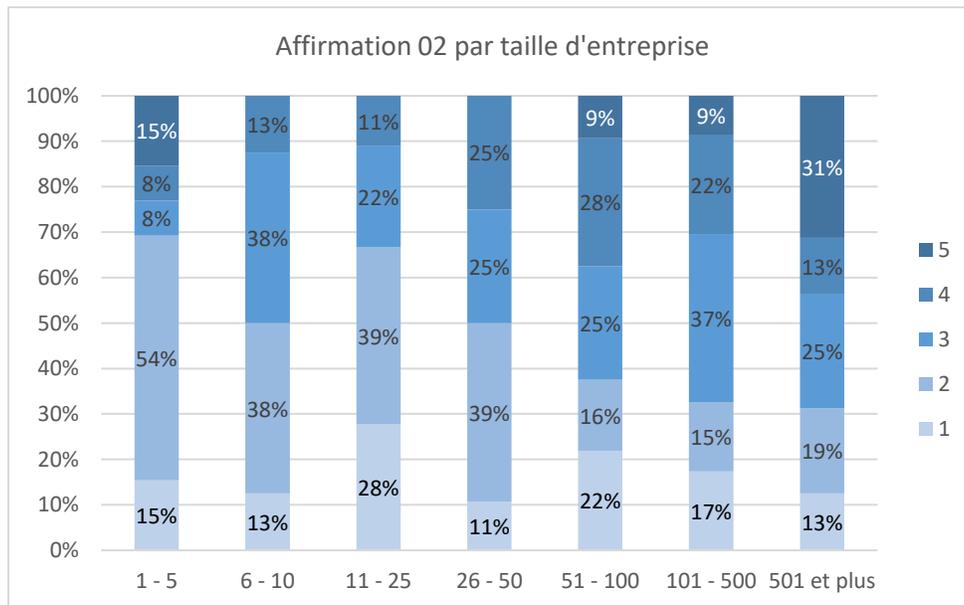


Figure 2.19 : Avis des répondants sur l'accompagnement dans la mise en œuvre de l'innovation par taille d'entreprise (N=161)



Figure 2.20 : Avis des répondants sur l'accompagnement dans la mise en œuvre de l'innovation par taille d'entreprise dont l'entreprise compte au moins une personne dédiée à l'innovation (N=51)

2.3.4.1 Discussion

Il est possible de constater qu'une grande portion des entreprises québécoises œuvrant en construction trouvent que les aides externes et/ou gouvernementales sont insuffisantes pour favoriser l'innovation dans l'industrie. De plus, les entreprises semblent plus ou moins savoir où se tourner pour se faire accompagner dans leur processus d'innovation. La mise en place de services spécialisés en accompagnement au sein des associations pourrait être intéressante afin de pallier ce manquement.

2.3.5 Mise en œuvre d'innovations technologiques en construction

Comme l'illustre la Figure 2.10 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, la majorité des répondants au sondage ont mis en œuvre une ou plusieurs innovations technologiques au sein de leur entreprise et/ou de leur projet. En premier lieu, il est question de comprendre les moyens de soutien pour la mise en œuvre de l'innovation. En d'autres termes, il est intéressant de comprendre comment les entreprises encadrent et supportent leur processus d'innovation. La Figure 2.21 illustre ces moyens en les classant en ordre d'importance. Ainsi, la participation à des formations et des conférences (16 %), le recours à des consultants (13 %), l'intégration de l'innovation dans la stratégie d'affaires de l'entreprise (11 %), le réinvestissement d'une partie des bénéfices dans l'innovation (11 %) et le recrutement d'employés compétents (10 %) sont parmi les moyens les plus populaires. On remarque que les partenariats avec les cégeps et les universités ne sont pas des moyens couramment mis en place dans le cadre de l'innovation (3 %).

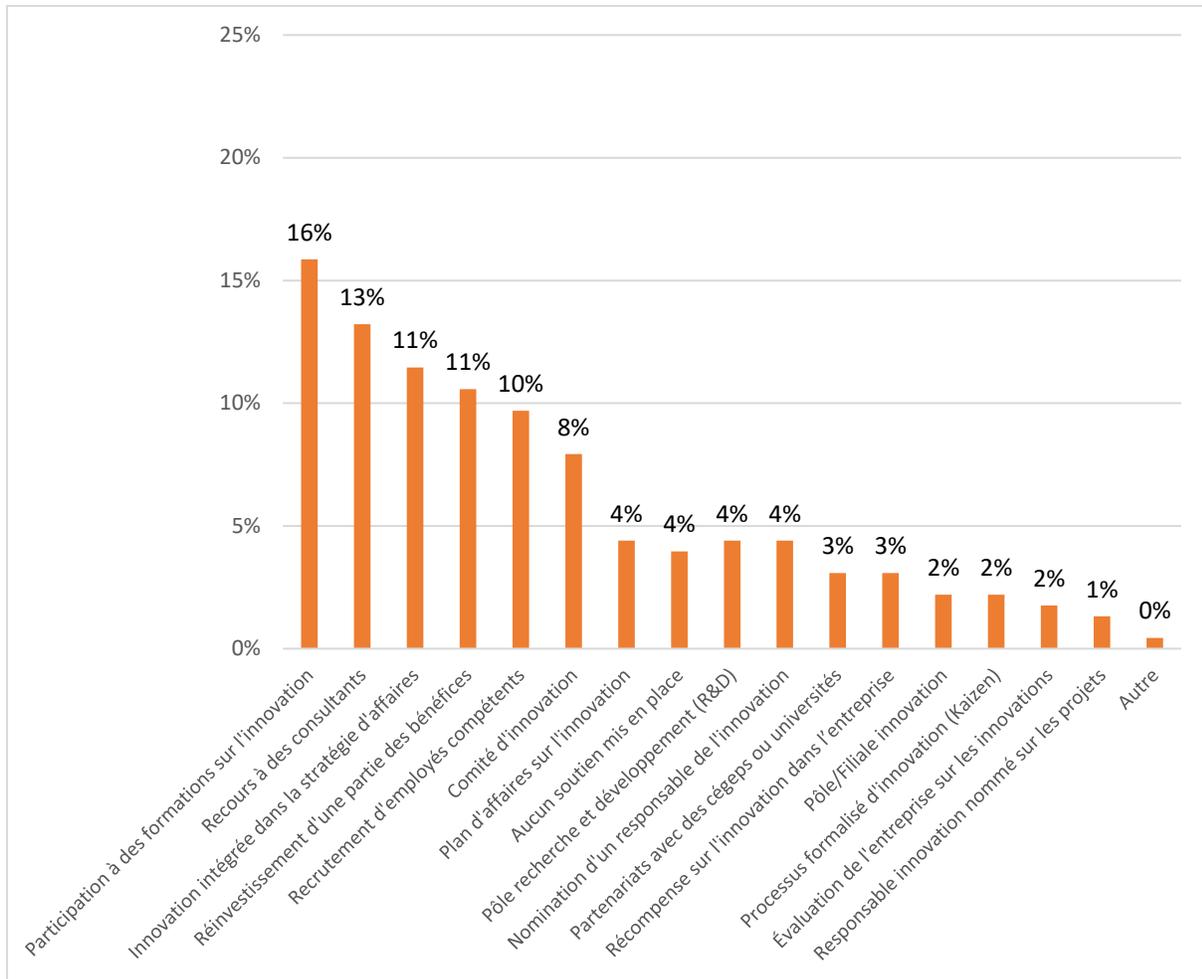


Figure 2.21 : Moyens de soutien de l'innovation par les entreprises qui innovent (N=109)

En matière d'investissement en innovation, la majorité des répondants investissent moins de 0,5 % de leur chiffre d'affaires annuel (66 %), tandis que 10 % des répondants déclarent réinvestir plus de 3,0 % de leur chiffre d'affaires dans l'innovation (Figure 2.22). Ceci est en lien avec les plus récentes données en matière d'investissement en R-D et en innovation en construction qui sont plus bas que les autres secteurs économiques, tels que les secteurs manufacturier et aérospatial.

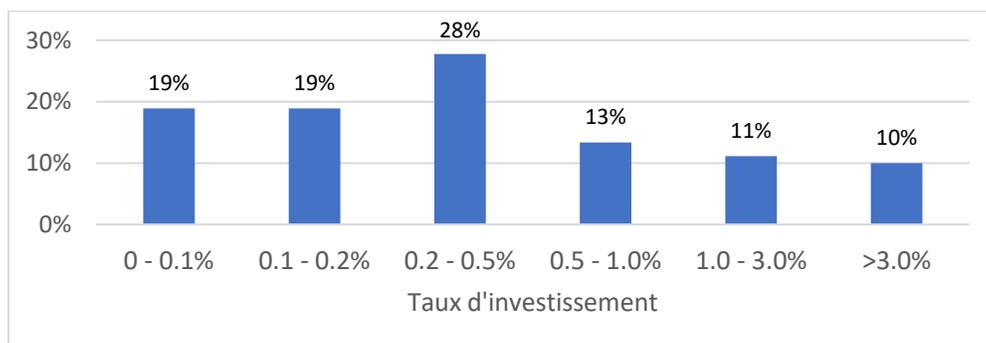


Figure 2.22 : Réinvestissement du chiffre d'affaires dans l'innovation (N=109)

En creusant davantage, notamment en ce qui a trait au taux d'investissement par type d'entreprise (Figure 2.23), il est possible de constater que les entrepreneurs généraux et spécialisés investissent majoritairement en deçà de 0,5 % de leur chiffre d'affaires en innovation. Il est également possible de constater que les fournisseurs et les fabricants investissent plus de 1 % de leur chiffre d'affaires en innovation. Du côté des architectes et des ingénieurs, le faible taux de réponses rend difficile de tirer des conclusions.

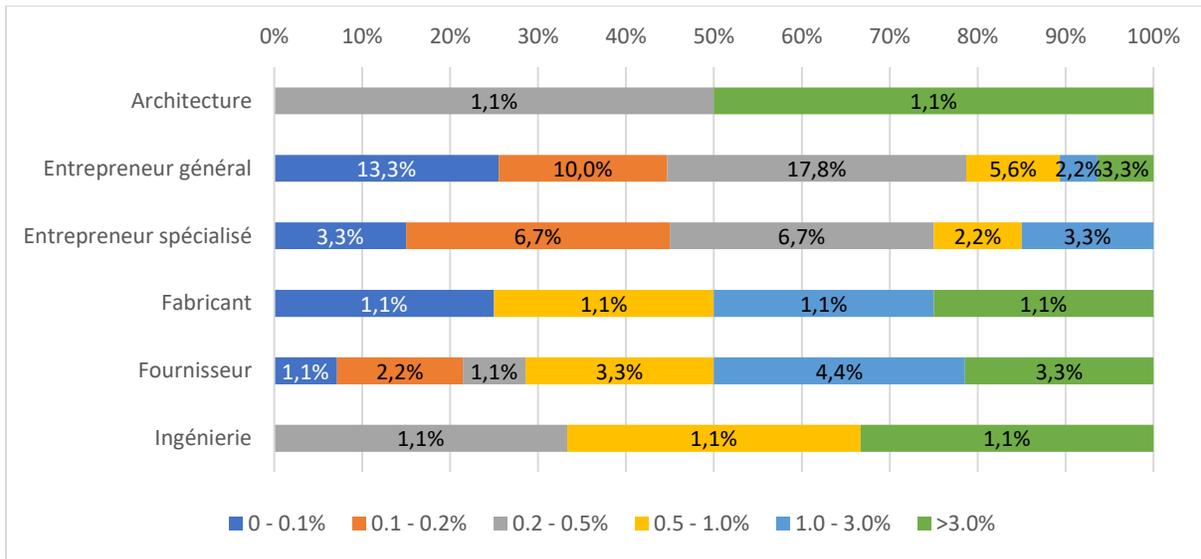


Figure 2.23 : Répartition des types d'entreprises par investissement (N=109)

En ce qui concerne le chiffre d'affaires des entreprises interrogées par rapport au réinvestissement en innovation (Figure 2.24), il est possible de constater que les entreprises générant 50 à 250 millions de dollars canadiens se positionnent davantage dans la fourchette 0,2-0,5 % du chiffre d'affaires réinvesti dans l'innovation. Celles générant 5 à 25 millions de dollars canadiens annuellement investissent davantage entre 0,5 et 1,0 % de leur chiffre d'affaires (CA). Aucune conclusion ne peut être tirée pour les entreprises générant 1 à 5 millions de dollars et plus de 250 millions de dollars de revenus, mais il est possible de remarquer tout de même la part importante d'investissement à plus de 3 % pour cette dernière catégorie.

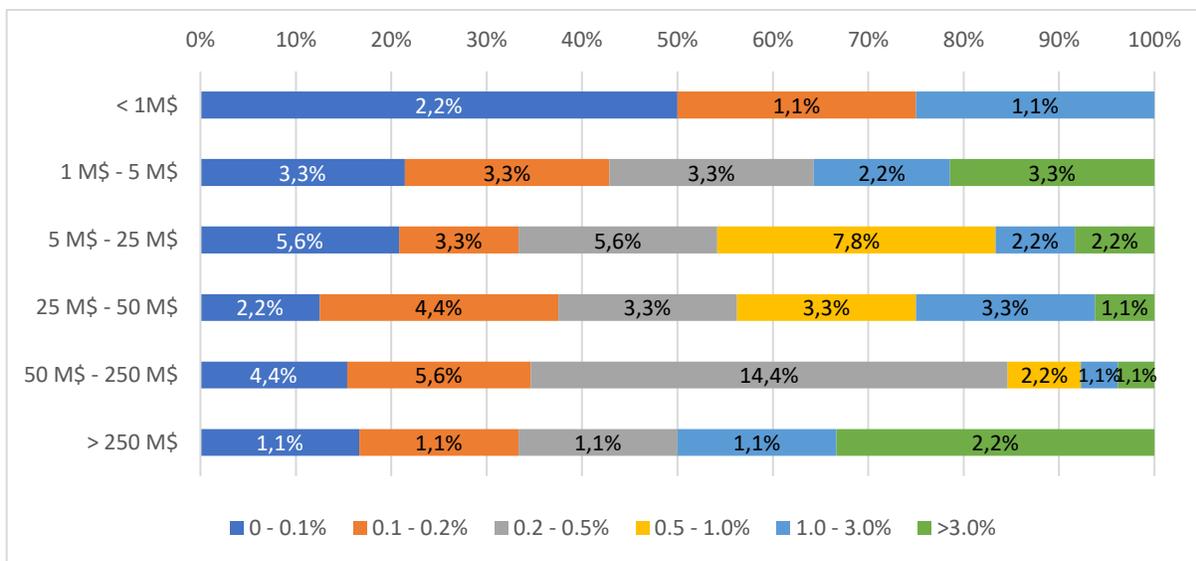


Figure 2.24 : Répartition du chiffre d'affaires par investissement (N=109)

Le troisième point étudié en rapport avec l'investissement dans l'innovation est la taille des entreprises (Figure 2.25). La majorité des compagnies à 101-500 employés, qui représentent plus d'un tiers du panel, réinvestissent entre 0,2 et 0,5 % de leur CA dans leur innovation. Pour les très grosses entreprises (plus de 500 employés), les proportions les plus fortes se trouvent dans les fourchettes 0.2-0.5 % et supérieures à 3 %. En ce qui concerne les petites entreprises (moins de 25 employés), le faible nombre de réponses de leur part ne permet pas de les intégrer dans l'analyse de manière fiable.

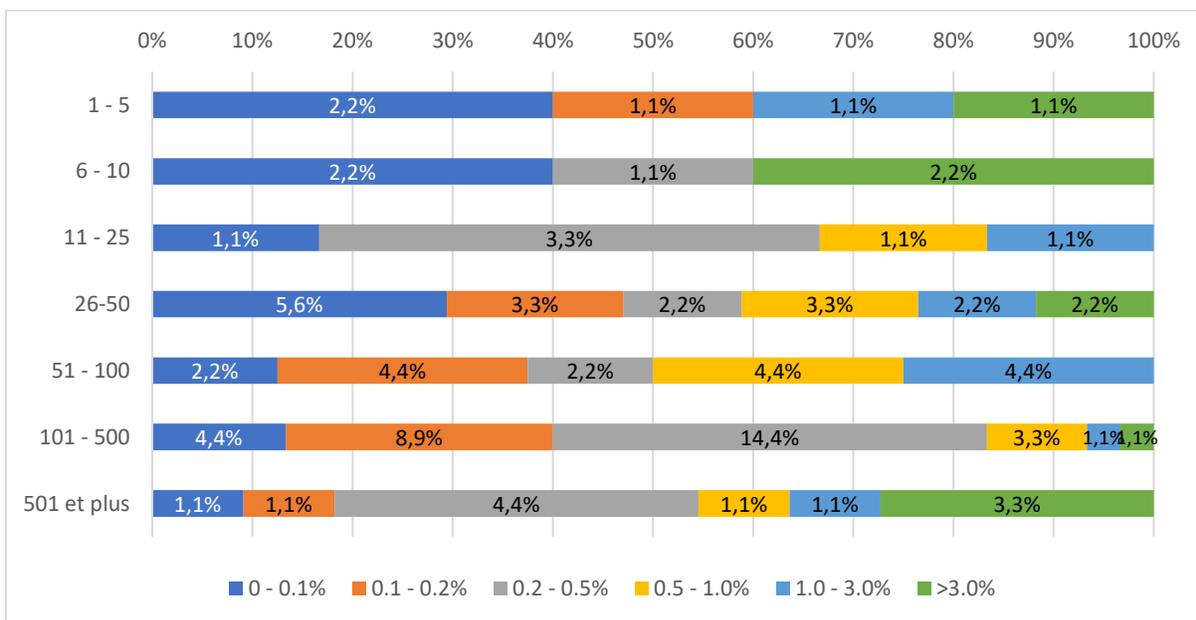


Figure 2.25 : Répartition du nombre d'employés des entreprises par investissement (N=109)

Enfin, en ce qui concerne le taux d'investissement en innovation en fonction du secteur d'activité des répondants, il est possible de remarquer une certaine homogénéité au niveau des réponses (Figure 2.26).

Ainsi, aucune tendance ne se dessine quant au secteur dans lequel les investissements en innovation seraient plus importants.

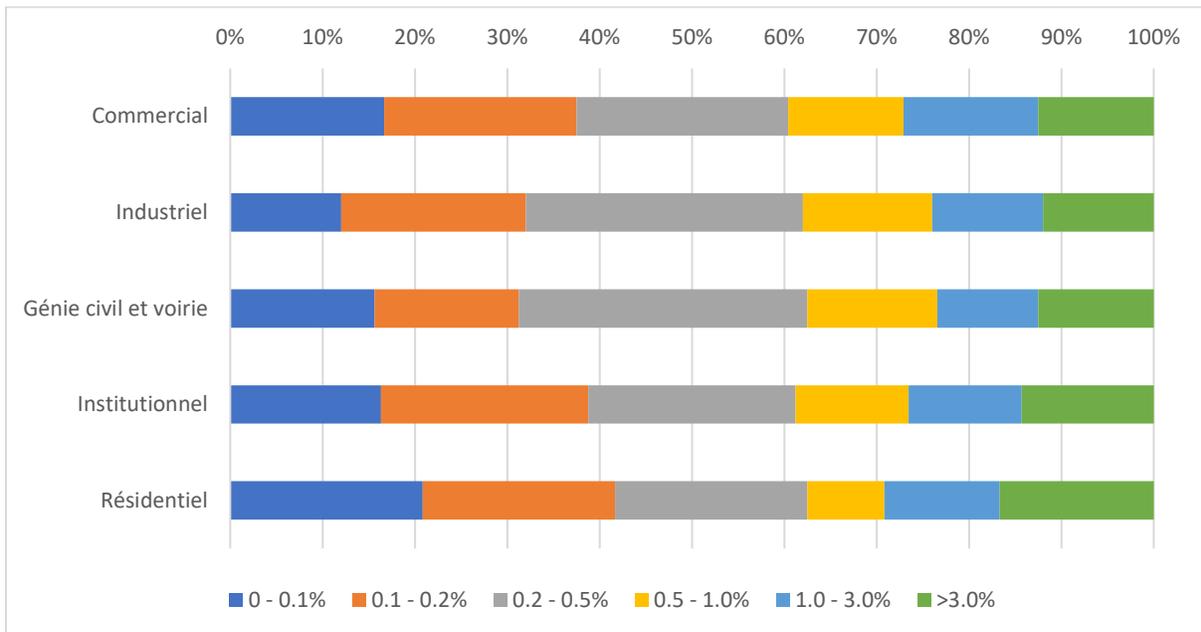


Figure 2.26 : Répartition des secteurs d'activité par investissement (N=109)

2.3.5.1 Discussion

En conclusion de cette analyse croisée, il est difficile de valider à priori l'hypothèse qu'une grande entreprise, en termes de taille ou de CA, aura davantage de capacité et de volonté d'investir en innovation que les petites ou moyennes entreprises. Cela étant dit, des investissements de plus de 3 % des revenus sont présents dans une proportion non négligeable de très grandes entreprises, mais le nombre de réponses de cette fourchette ne permet pas de tirer une conclusion sans équivoque. Une tendance assez homogène pour la répartition par chiffre d'affaires se décèle pour les investissements inférieurs à 1 % et par secteur dans les investissements entre 0,1 et 0,5 %. La taille et les types d'entreprises donnent des résultats beaucoup plus partagés.

2.3.6 Sommaire de la section

À partir des résultats de cette partie du sondage, il est possible de constater que :

- L'engouement pour un renouveau technologique auprès de l'échantillon de répondants est incontestable.
- Un désaccord marqué concernant la suffisance des aides externes pour l'innovation ressort du sondage, alors que les avis du panel sur le bon accompagnement des entreprises à ce sujet sont assez partagés.
- Plus de deux tiers des répondants déclarent innover dans leur projet, mais seulement la moitié d'entre eux ont un ou plusieurs employés dédiés à l'innovation à l'interne. Les raisons de ces chiffres ne sont pas encore claires.

- Dans les obstacles de l'innovation, le manque de bénéfices clairs pour les entreprises est bien plus présent que le manque de ressources financières. Cela se ressent dans les taux d'investissement des entreprises pour l'innovation.
- La majorité des répondants indique un taux d'investissement inférieur à 1 % du chiffre d'affaires, voire inférieur à 0,5 %. Cette donnée fait écho aux chiffres de Agarwal, Chandrasekaran et Sridhar (2016), qui déclare que le secteur de la construction investit moins de 1 % des revenus dans la recherche. Des investissements à plus de 3 % sont tout de même présents.

Il est donc possible de tirer la conclusion que les entreprises hésitent à innover, non par manque de moyens, mais plutôt par crainte de ne pas rentabiliser leur investissement ou par manque de temps.

2.4 Les technologies implantées et leurs impacts

Après avoir analysé les profils des répondants, leur volonté, leur capacité et les facteurs influençant (ou non) la mise en œuvre des innovations technologiques au sein de leur entreprise ou sur leur projet, le sondage s'est par la suite penché sur la caractérisation des innovations qui ont été mises en œuvre, leur genèse ainsi que leurs impacts. Chaque répondant devait nommer jusqu'à trois innovations. Ainsi, 109 exemples d'innovations technologiques ont été répertoriées. Chaque exemple développait les éléments suivants :

- La motivation derrière l'implantation de cette technologie
- Les résultats attendus
- Le respect ou non de ces attentes
- L'âge de la technologie
- Le taux de diffusion au sein de l'entreprise
- La satisfaction générale avec la technologie, et
- L'approche de suivi de la mise en œuvre et de son impact.

2.4.1 Éléments moteurs et attentes concernant la mise en œuvre d'innovations technologiques

En premier lieu, il est question des motivations qui ont poussé les entreprises à mettre en œuvre l'innovation technologique. Ainsi, les principaux éléments moteurs notés dans le sondage ayant mené à l'implantation de la technologie sont présentés à la Figure 2.27. Parmi les motivations exprimées, on constate que l'innovation a été mise en œuvre à l'initiative de la direction (23 %), qu'elle a été implantée en raison de la volonté d'amélioration de performance sur les projets (19 %) et aussi afin d'accroître la compétitivité de l'entreprise sur le marché (16 %). De façon surprenante, la mise en œuvre d'innovations technologiques à la demande des clients ne constitue pas une source de motivation élevée, alors que la revue de littérature leur accordait une certaine importance en tant que moteur de l'innovation.

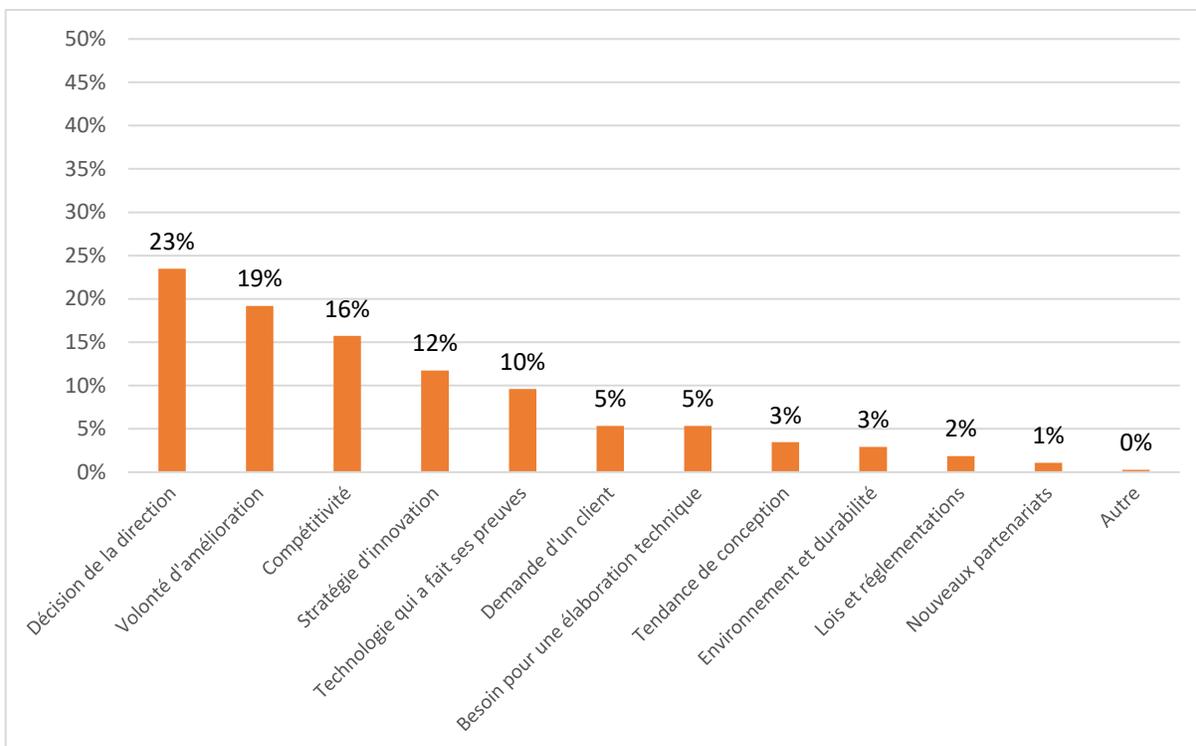


Figure 2.27 : Éléments moteurs de l'implantation de la technologie dans l'entreprise (N=109 technologies)

En termes d'attentes par rapport à l'implantation des technologies, il est possible de constater que les attentes les plus importantes concernent les gains au niveau du temps (13 %), de la productivité (12 %), des coûts (11 %) et de la qualité (10 %), (Figure 2.28). Lorsque demandé si les innovations implantées respectent ces attentes, la majorité des répondants indiquent un haut taux de satisfaction à cet égard (71 % de notes 4 ou 5) (Figure 2.29). **Il est donc possible de conclure que les résultats attendus liés à l'implantation des innovations ont bel et bien été livrés et que les entreprises en sont satisfaites.**

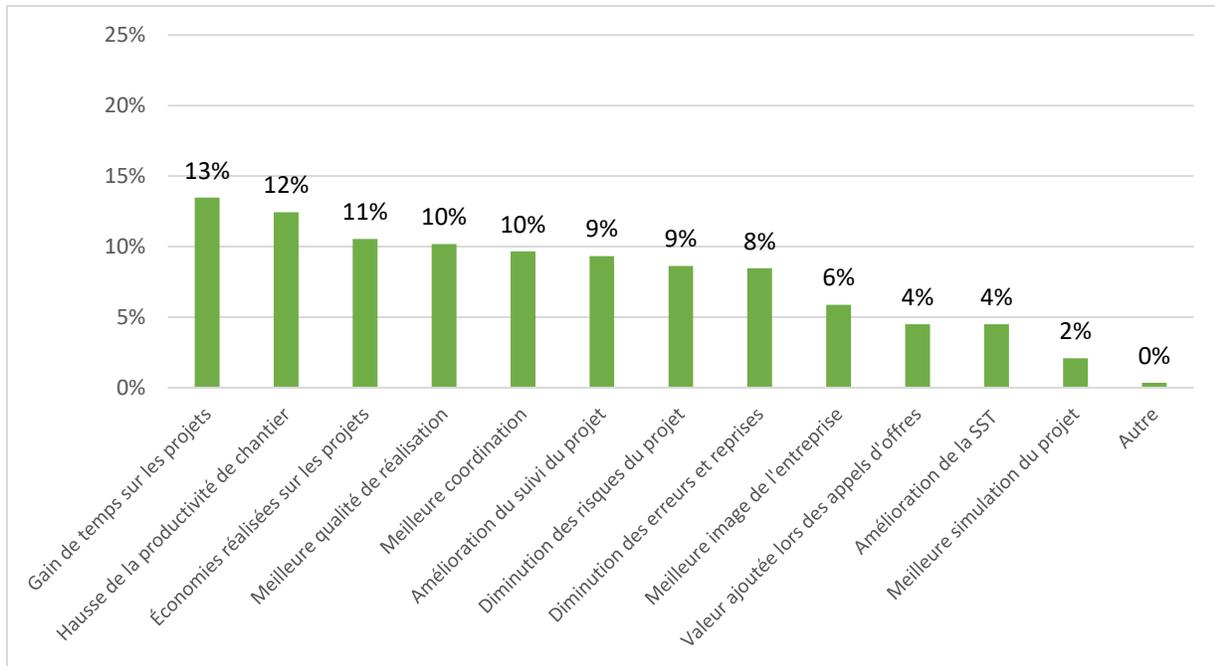


Figure 2.28 : Bénéfices attendus liés à la mise en œuvre des technologies (N=109 technologies)

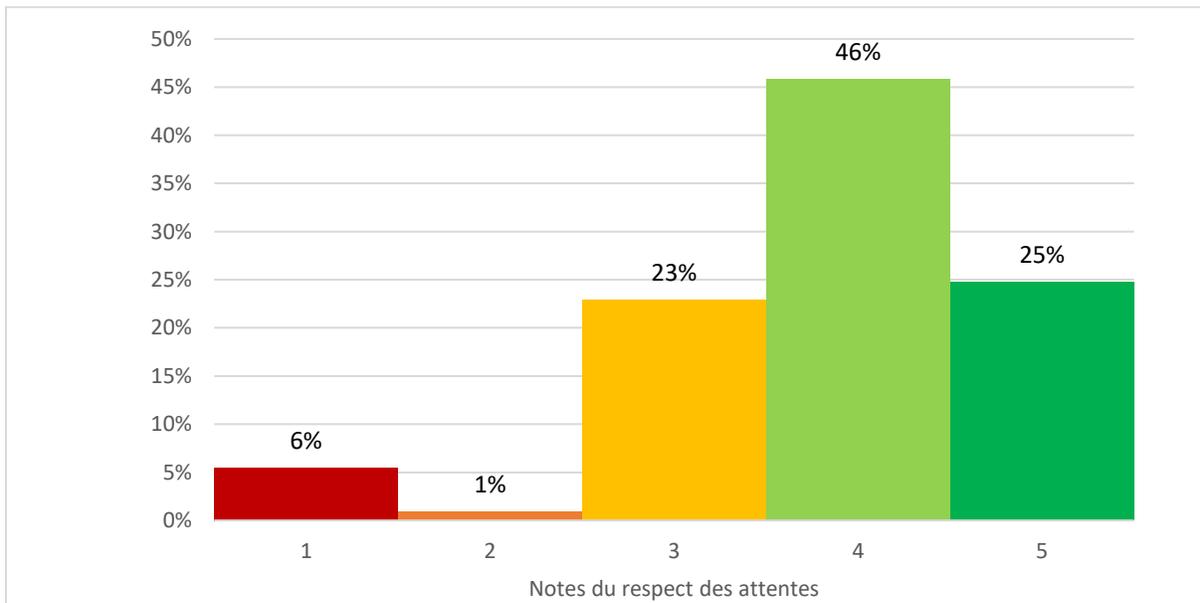


Figure 2.29 - Respect des attentes liées à la mise en œuvre des technologies (N=109 technologies)

2.4.1.1 Discussion

À partir des résultats présentés dans cette sous-section, il est possible de tirer les conclusions suivantes. Au niveau des éléments moteurs, la mise en œuvre des innovations technologiques se fait le plus souvent à la suite d'une décision de la part de la direction des entreprises répondantes. Ce qui motive la direction

à prendre cette décision demeure incertain et doit faire l'objet d'études subséquentes. Idem avec la stratégie d'innovation qui arrive 4^e comme élément moteur : comment l'innovation comme telle est ciblée au sein de la stratégie d'innovation doit être approfondie dans une étude ultérieure. En matière de bénéfices attendus, sans surprises, les gains de temps, l'accroissement de la productivité ainsi que la réduction des coûts sont les trois principales attentes liées à la mise en œuvre de l'innovation technologique. Dans une proportion importante, ces attentes ont été respectées.

2.4.2 Impacts la mise en œuvre d'innovations technologiques

Un des objectifs principaux de cette étude est de comprendre l'impact de la technologie sur la productivité en chantier dans l'industrie québécoise de la construction. Pour ce faire, les répondants devaient noter leur perception de l'impact de chaque technologie qu'ils avaient identifiée sur la productivité en chantier sur une échelle de 1 à 5, 1 étant pas d'impact et 5 étant un impact majeur. Ainsi, comme présenté dans la Figure 2.30, **il est possible de constater que 57 % des technologies identifiées sont perçues comme ayant un impact important ou majeur (4 ou 5)**. D'un autre côté, 14 % des innovations identifiées sont perçues comme ayant peu ou aucun impact (1 ou 2).

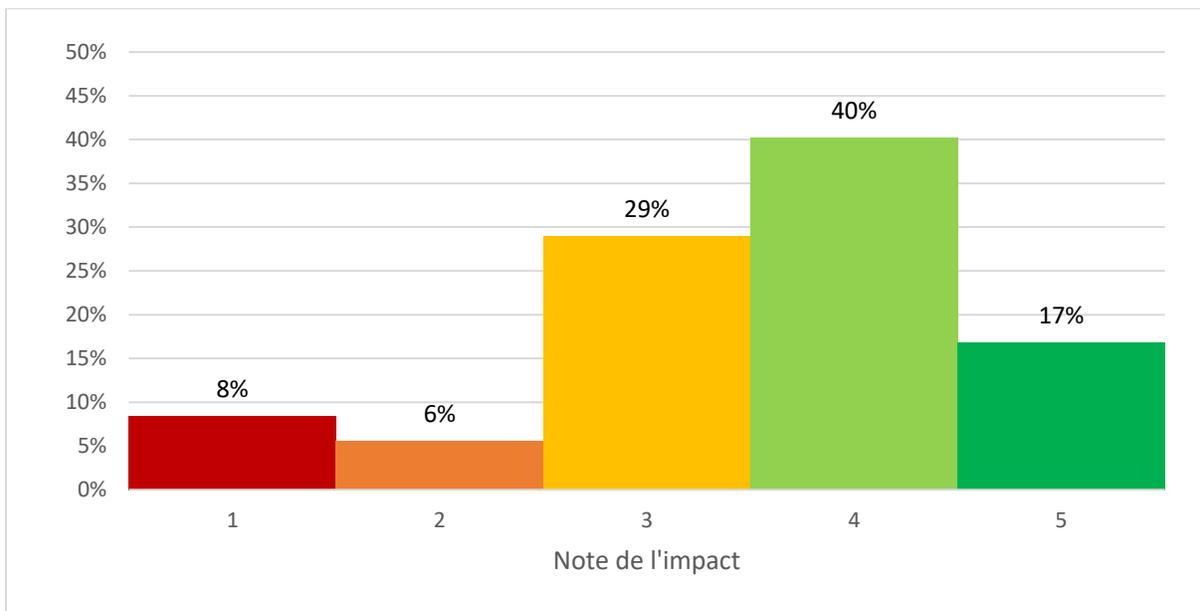


Figure 2.30 : Notes de l'impact de la technologie sur la productivité de chantier (N=109 technologies)

En parallèle, une proportion assez élevée de répondants (58 %) ont indiqué être satisfaits quant au retour sur investissement (ROI) par rapport à la mise en œuvre de la technologie qu'ils ont identifiée (

Figure 2.31). Fait à noter que dans 14 % des cas, aucune évaluation du ROI n'a été effectuée. Le ROI est en cours d'évaluation dans 25 % des cas. En croisant ces données avec le temps écoulé depuis l'implantation de ladite technologie, il est possible de constater que 81 % des technologies, dont le ROI est en cours d'évaluation, ont été mises en œuvre depuis moins de 2 ans au sein de l'entreprise.

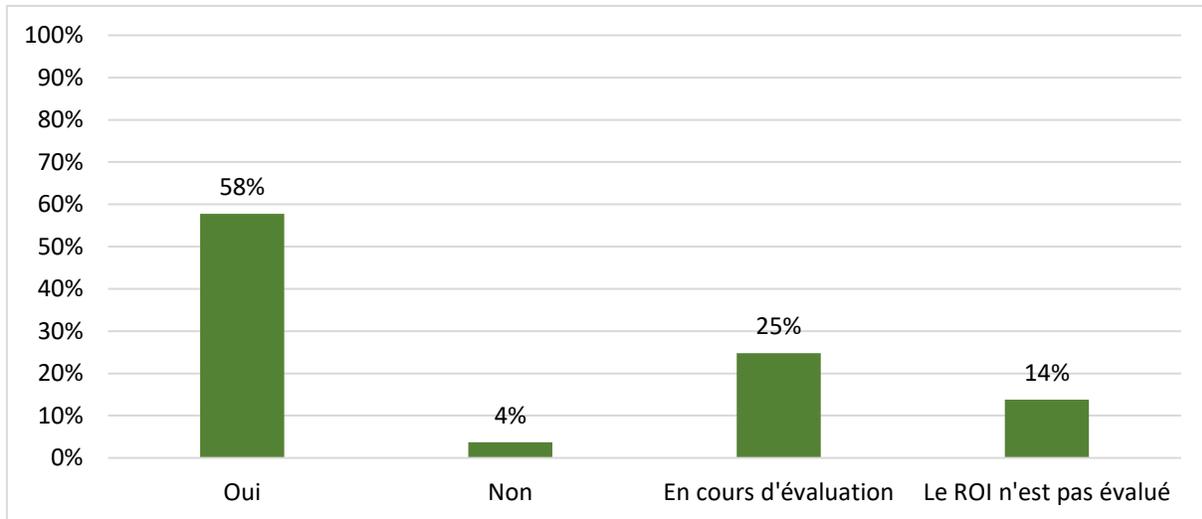


Figure 2.31 : Satisfaction par rapport au ROI de la technologie mise en oeuvre (N=109 technologies)

En termes d'évaluation de l'impact de la mise en œuvre de la technologie, les répondants ont été questionnés sur les indicateurs qu'ils utilisent. Ainsi, la productivité (26 %), les coûts (23 %) et l'échéancier (14 %) sont les 3 indicateurs les plus utilisés par les entreprises pour évaluer l'impact de la mise en œuvre de la technologie sur la performance de leurs projets (Figure 2.32).

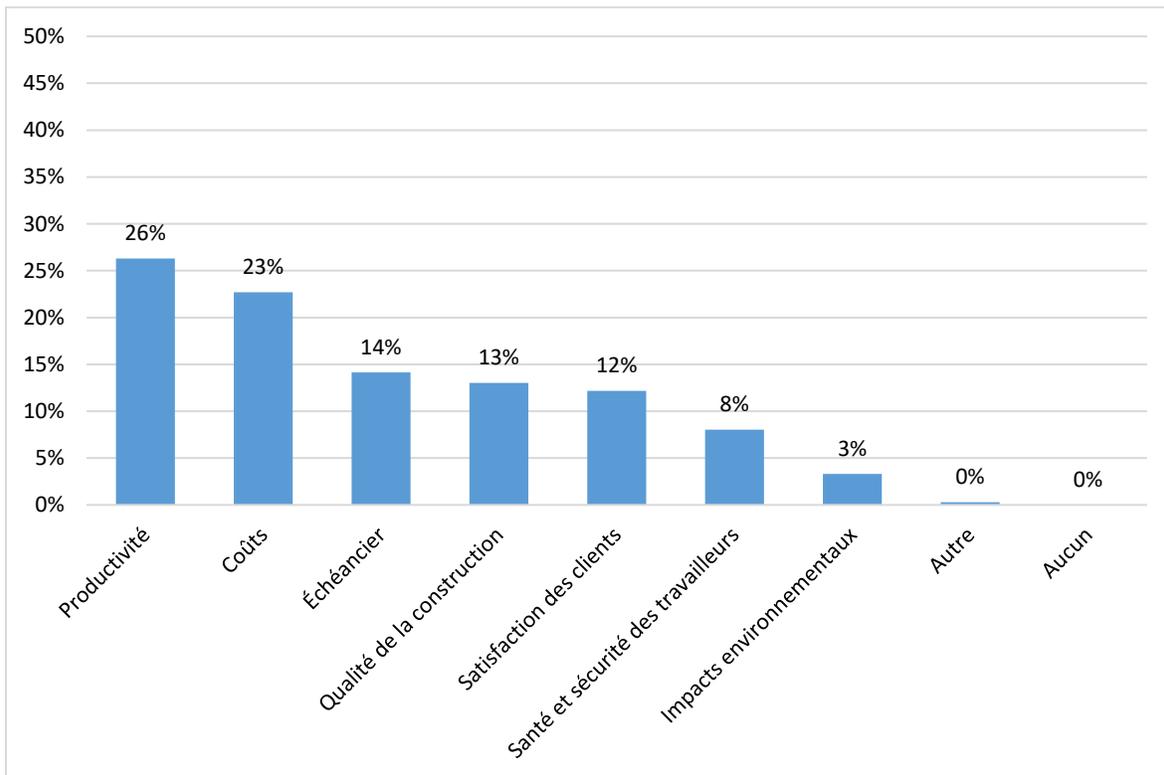


Figure 2.32 : Indicateurs utilisés pour l'évaluation des impacts de la technologie (N=109 technologies)

Enfin, comme illustrés dans la figure 2.33, les moyens de mesure des impacts des technologies se font en majorité par une comparaison avec des projets similaires (29 %), avec des tâches du projet auxquelles la technologie n'est pas appliquée (22 %), ou par sondage interne (23 %). À noter que 7 % des technologies n'ont aucune mesure de suivi de leurs impacts.

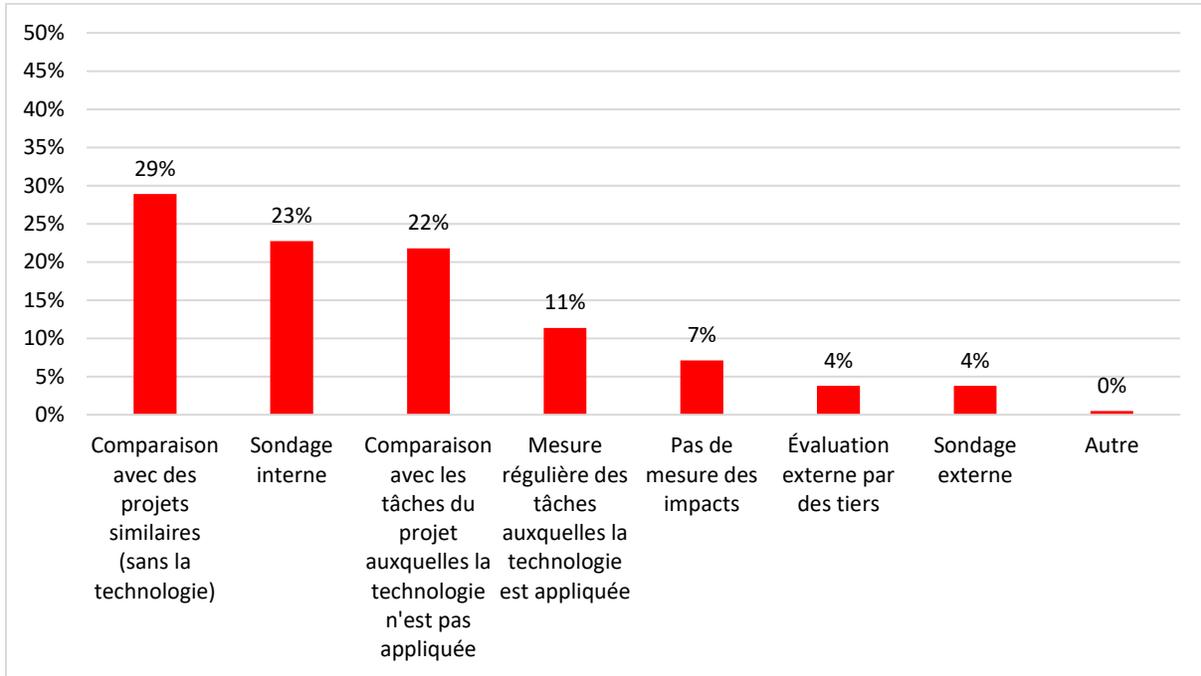


Figure 2.33 : Moyens de mesure des impacts de la technologie (N=109 technologies)

2.4.2.1 Discussion

Les innovations identifiées ont eu, en grande partie, un impact positif sur la productivité, lorsque celle-ci est mesurée. De plus, la majorité des répondants ont indiqué être satisfaits avec le ROI de la mise en œuvre de l'innovation technologique au sein de leur entreprise. En termes de mesure et de suivi de performance, la productivité constitue l'indicateur le plus utilisé pour mesurer l'impact de la technologie sur les opérations de l'entreprise, suivi de près par les indicateurs liés aux impacts sur les coûts de projets. Par ailleurs, les répondants utilisent la comparaison avec des projets antérieurs ou similaires, afin de mesurer l'impact. Les entreprises utilisent également des sondages internes afin d'effectuer un suivi de la mise en œuvre de la technologie.

2.4.3 Analyse des innovations technologiques répertoriées dans le sondage et de leur mise en œuvre

La dernière partie de cette analyse se penche sur les innovations technologiques et les technologies identifiées par les répondants. Sur les 109 technologies répertoriées, seules 100 ont pu être utilisées dans les statistiques de cette partie, notamment parce que la technologie identifiée n'était pas assez précise. Les technologies ont été catégorisées à l'aide de la classification développée en première partie de ce rapport (Rapport 01). L'analyse qui suit est basée sur les cinq facettes présentées auparavant, soit celles liées à la **forme** (Figure 2.34) de l'innovation technologique, à sa **localisation** (Figure 2.35), à la **fonction d'affaires** qu'elle supporte (Figure 2.36) et à la **discipline** à laquelle elle s'applique (Figure 2.37). La facette du **cycle de vie** a été mise de côté puisque le sondage ciblait spécifiquement la construction. Les 100

technologies ont donc été catégorisées en fonction des facettes mentionnées ci-dessus. Il est important de noter que certaines technologies peuvent correspondre à plusieurs éléments d'une même facette : ces technologies ont été classifiées comme étant multiformes (**forme**), multisites (**localisation**), **multidisciplinaires** et supportant de multiples **fonctions d'affaires**.

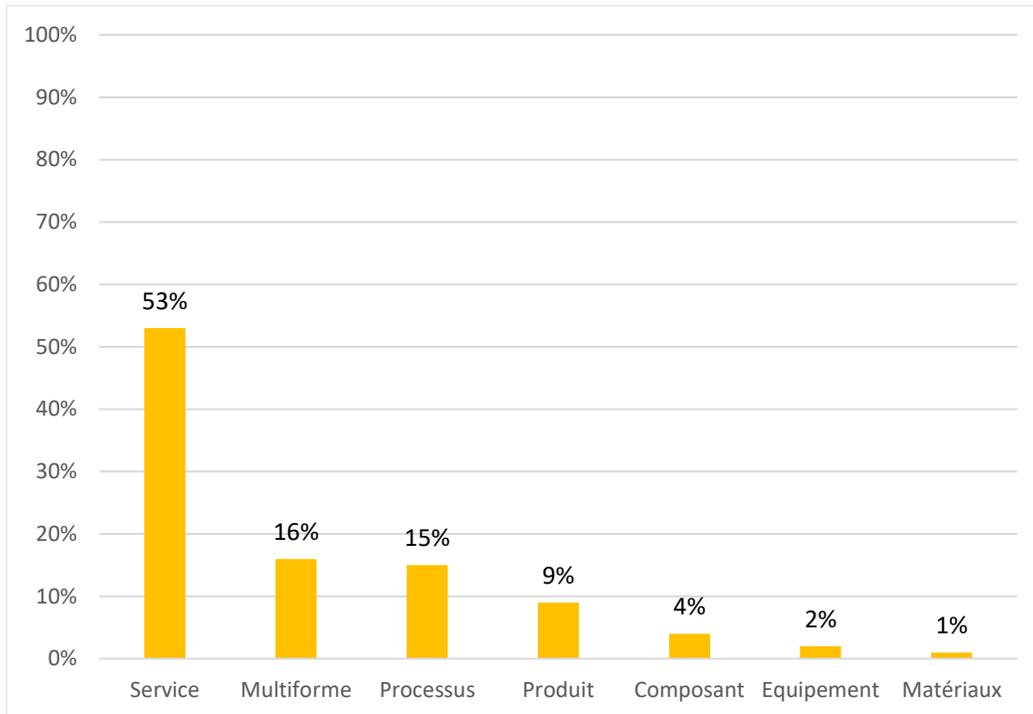


Figure 2.34 : Classification des innovations technologiques par **forme** (N=100 technologies)

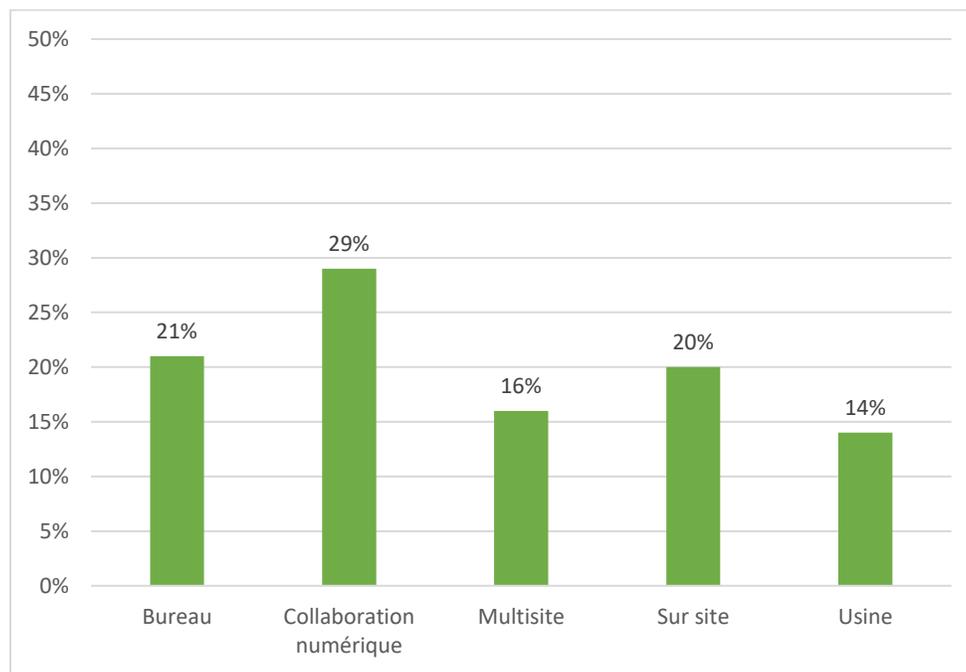


Figure 2.35 : Classification des innovations technologiques par **localisation** (N=100 technologies)

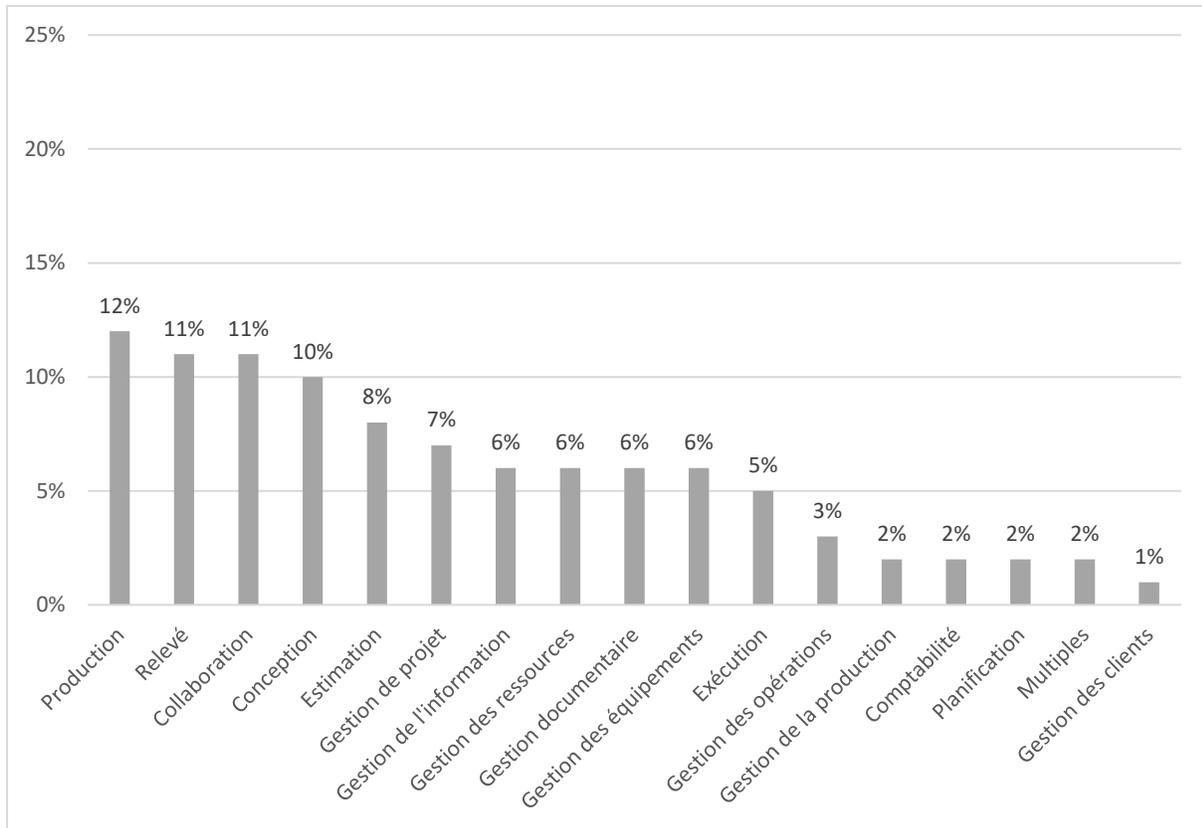


Figure 2.36 : Classification des innovations technologiques par **fonction d'affaires** (N=100 technologies)

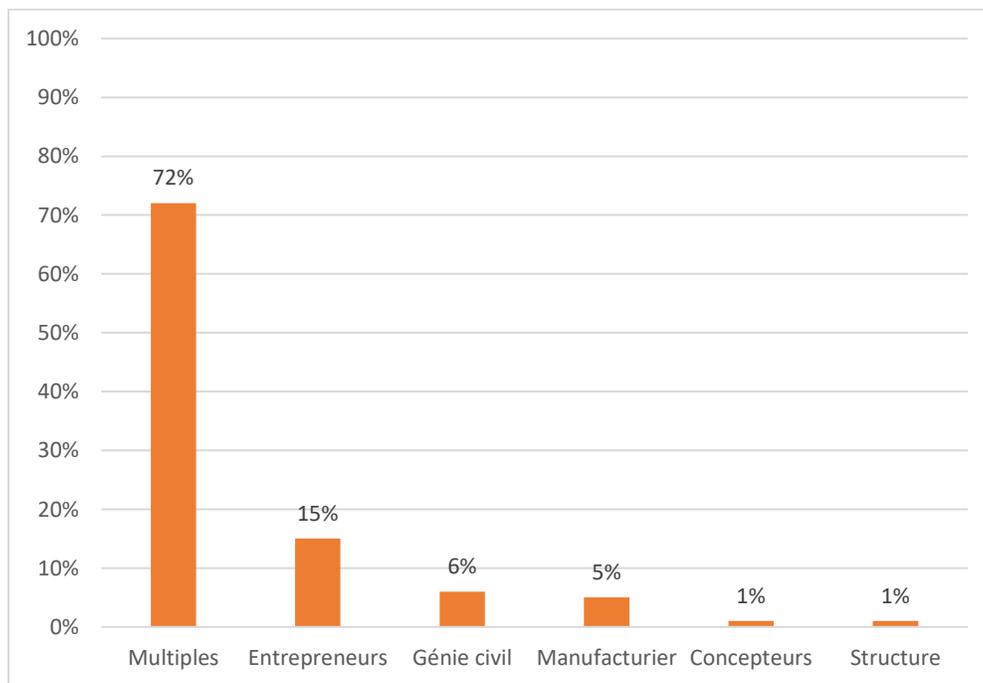


Figure 2.37 : Classification des innovations technologiques par **discipline** (N=100 technologies)

La Figure 2.38 illustre le temps écoulé depuis l'implantation de la technologie au sein de l'entreprise. Il est possible de constater que la majorité des innovations technologiques identifiées par les entreprises ont été implantées il y a moins de 3 ans (67 %).

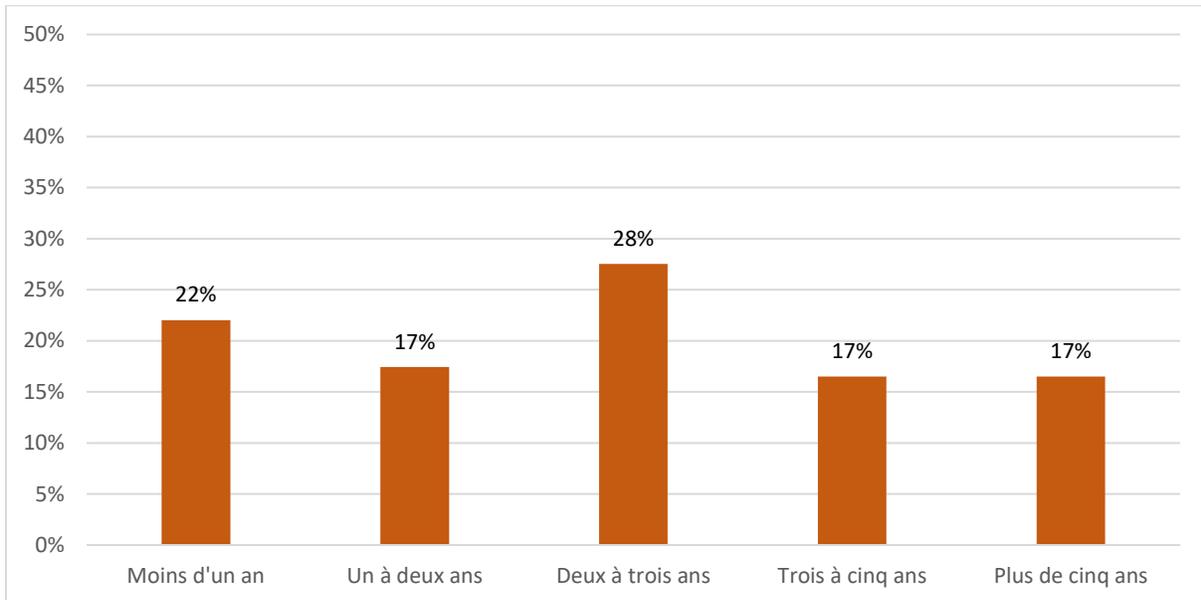


Figure 2.38 : Temps écoulé depuis l'implantation de la technologie dans l'entreprise (N=109 technologies)

Quant à la proportion des projets où les innovations technologiques répertoriées sont utilisées, la Figure 2.39 démontre qu'elle est relativement élevée. En effet, 39 % d'entre elles sont appliquées dans 75 à 100 % des projets des répondants.

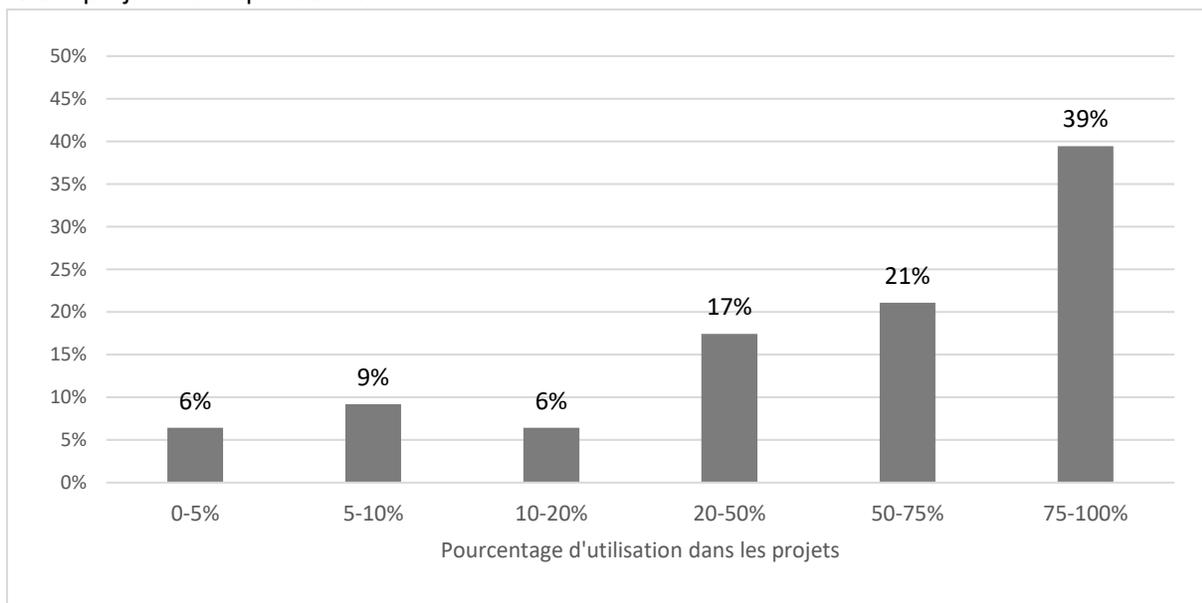


Figure 2.39 : Proportion des projets où la technologie est utilisée (N=109 technologies)

Les éléments moteurs pour la mise en œuvre des technologies identifiées (réf. Figure 2.27) ainsi que les bénéfices obtenus (réf. Figure 2.28 confirmé) ont par la suite été analysés par facette et sont présentés dans les prochaines figures. Il est important de noter que les éléments qui représentent 2 % et moins dans les Figure 2.34 à Figure 2.37 sont exclus de l'analyse.

Au niveau des éléments moteurs de l'implantation de la technologie par forme d'innovation technologique (Figure 2.40), la décision de la direction est un facteur majoritaire pour les innovations technologiques de services et de composantes. La volonté d'amélioration est un élément moteur important pour les innovations technologiques de produits et de services. La compétitivité quant à elle est un élément moteur principal pour les innovations technologiques multiformes et de processus. Quoique globalement faible, la demande d'un client a été mentionnée comme élément moteur pour l'innovation technologique pour les innovations multiformes et des services. Finalement, il est intéressant de noter que la stratégie d'innovation, l'environnement et la durabilité sont considérés principalement comme éléments moteurs pour les innovations technologiques de composantes.

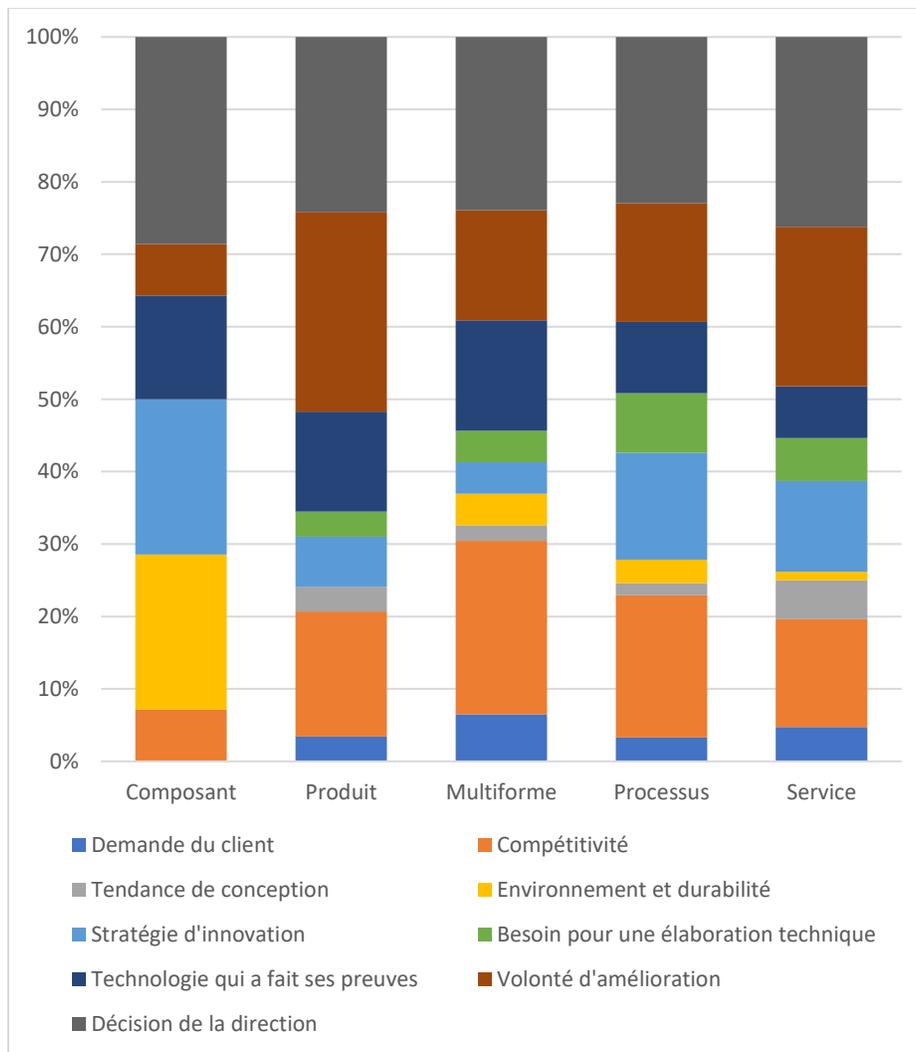


Figure 2.40 : Éléments moteurs de l'implantation de la technologie par forme d'innovation technologique (N=100 technologies)

Pour la facette concernant la localisation (Figure 2.41), toutes proportions gardées, la décision de la direction et la volonté d'amélioration sont un moteur d'innovation important pour les innovations technologiques étant mises en œuvre dans plusieurs localisations (multisite) ainsi qu'au niveau du bureau. La compétitivité est un élément moteur principal de la mise en œuvre des innovations technologiques sur les chantiers de construction. L'environnement et la durabilité sont des éléments moteurs pour la mise en œuvre d'innovations technologiques en usine. Finalement, la demande du client et les tendances de conception sont des éléments moteurs pour la mise en œuvre d'innovations liées à la collaboration numérique.

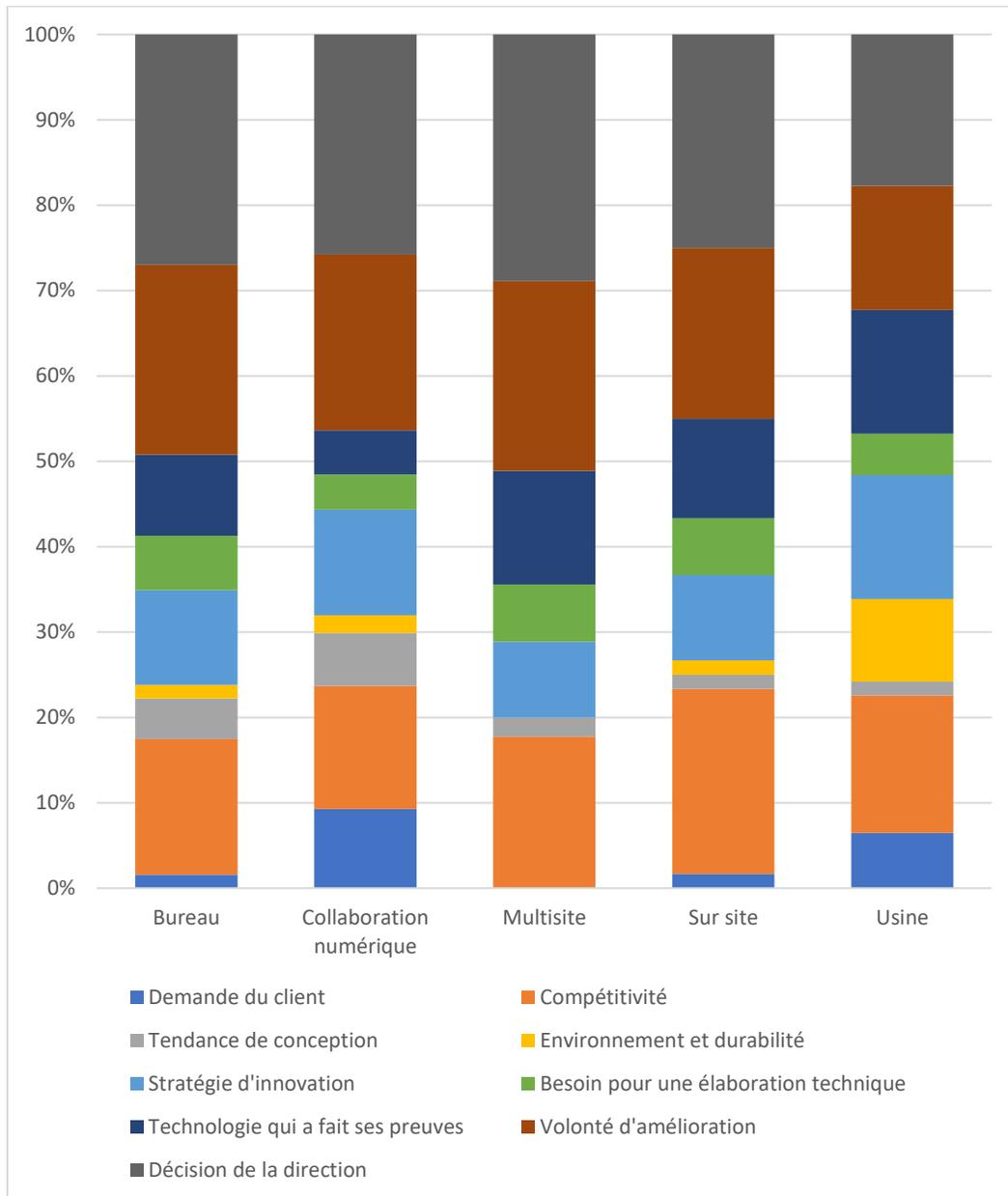


Figure 2.41 : Moteurs de l'implantation de la technologie par localisation (N=100 technologies)

Pour la facette concernant les fonctions d'affaires (Figure 2.42), la décision de la direction arrive en tête comme moteur pour la mise en œuvre de technologies liées à l'estimation, la gestion de projets et la gestion des équipements. La volonté d'amélioration quant à elle est un moteur important pour les innovations technologiques liées à la gestion des opérations. Les technologies ayant fait leurs preuves représentent un élément moteur important pour les innovations technologiques supportant l'exécution, la gestion de l'information et la gestion des équipements. La stratégie d'innovation de l'entreprise compte pour les innovations technologiques soutenant la collaboration, la gestion de projets et la production. L'environnement et la durabilité comptent pour les innovations épaulant la production et l'exécution. La compétitivité est un élément moteur principal de la mise en œuvre des innovations technologiques supportant l'exécution de projets, la gestion des opérations et la gestion des ressources. Finalement, la demande du client est un élément moteur pour la mise en œuvre d'innovations supportant l'exécution de projet et la gestion des ressources.

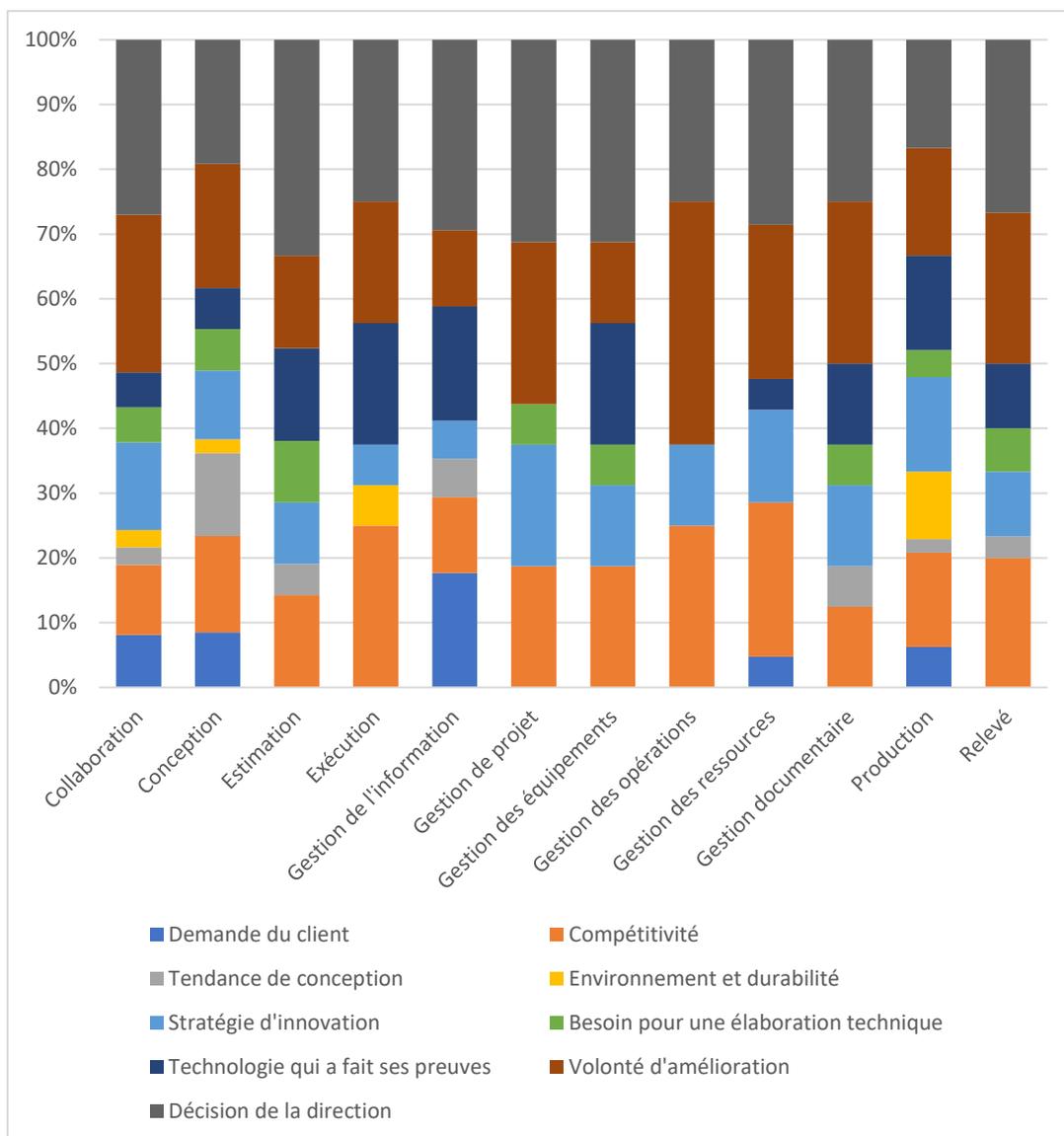


Figure 2.42 : Moteurs de l'implantation de la technologie par fonction d'affaires (N=100 technologies)

Finalement, pour la facette concernant la discipline (Figure 2.43), outre les tendances générales concernant la décision de la direction et la volonté d'amélioration comme moteurs de l'innovation, il est intéressant de noter l'environnement et la durabilité comme moteur pour les innovations technologiques implantées dans les secteurs du génie civil et manufacturier. La stratégie d'innovation est un élément moteur surtout dans le secteur manufacturier et au niveau des entrepreneurs dans une moindre mesure.

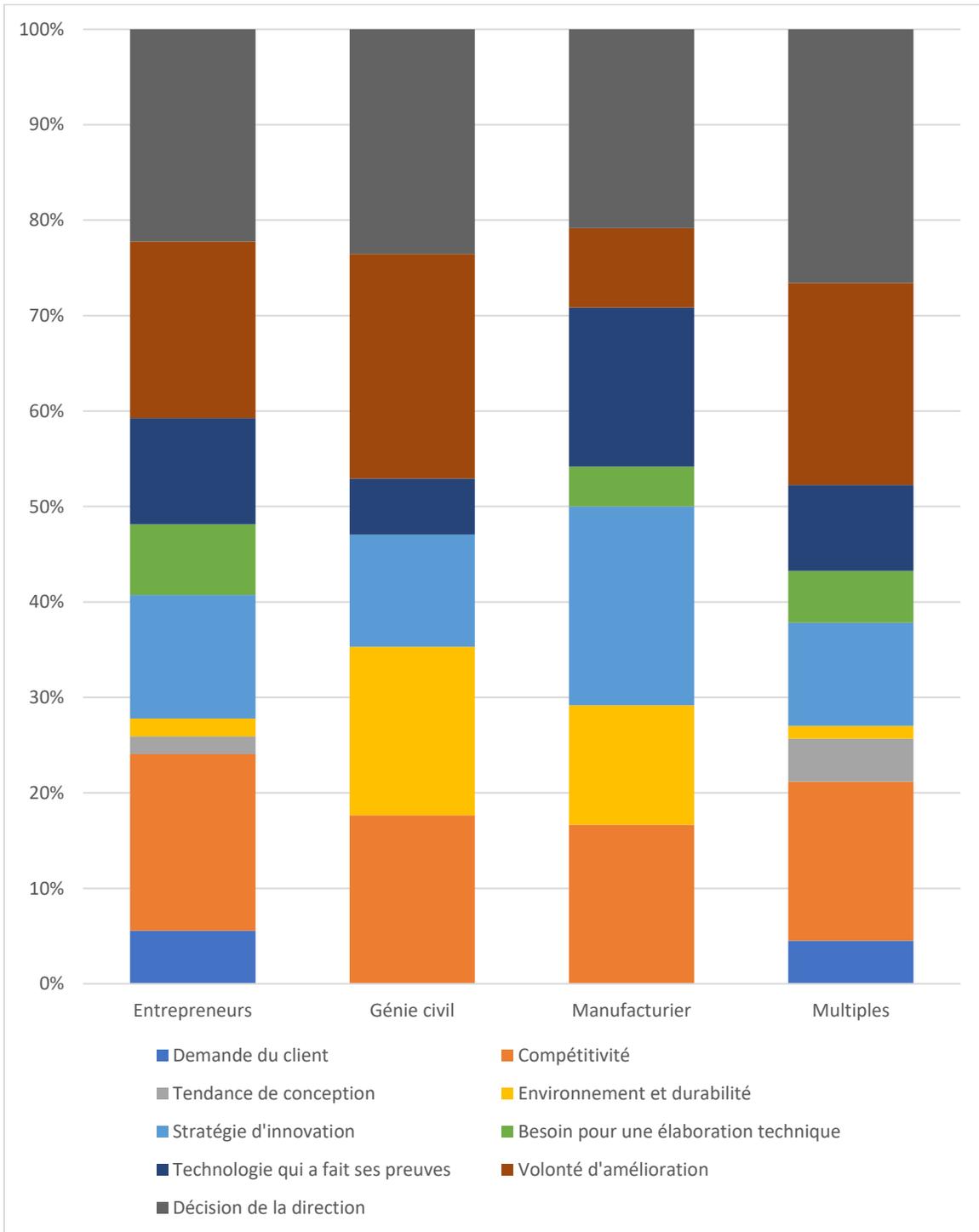


Figure 2.43 : Moteurs de l'implantation de la technologie par discipline (N=100 technologies)

Au niveau des bénéficiaires, les formes d'innovations technologiques (Figure 2.44) ayant les plus gros impacts sur la productivité et les coûts sont les innovations de services, les produits et les innovations en matière de composants. Les innovations technologiques de processus et de service ont l'impact le plus important au niveau de l'échéancier, tandis que les innovations en matière de composants ont l'impact le plus marqué sur la durabilité et l'environnement ainsi qu'au niveau de la satisfaction du client. Les innovations technologiques prenant multiples formes et celles de produit ont un impact marqué sur la qualité de la construction ainsi que sur la santé et la sécurité du travail.

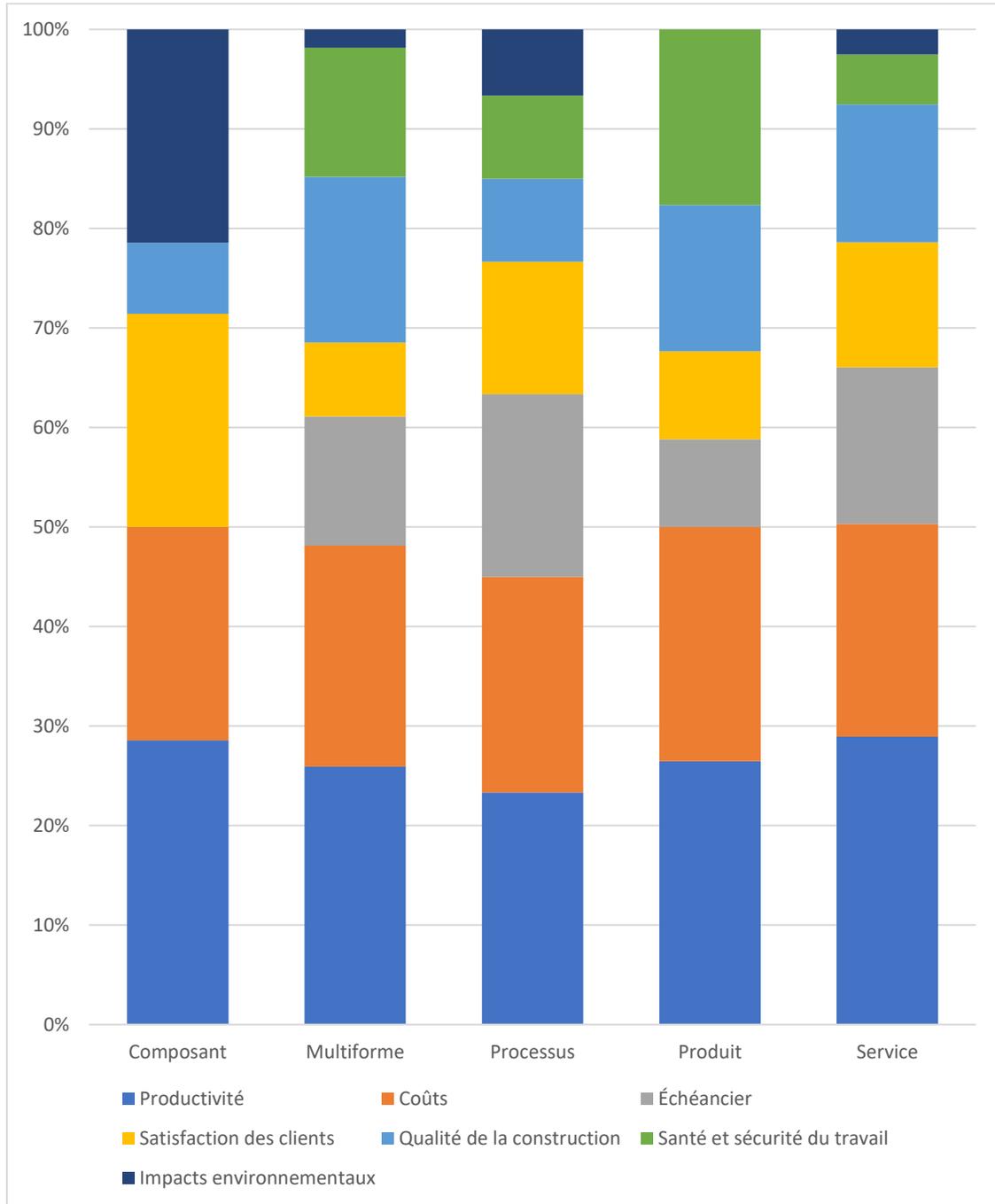


Figure 2.44 : Bénéfices de la technologie par forme (N=100 technologies)

La localisation des innovations technologiques identifiées (Figure 2.45) démontrant les plus gros impacts sur la productivité et les coûts sont au bureau et sur le site. Les innovations technologiques « multisites » et celles supportant la collaboration numérique ont un impact marqué au niveau de l'échéancier et de la qualité de la construction. Les innovations technologiques mises en œuvre en usine ont les plus grands impacts environnementaux, tandis que celles mises en œuvre sur le site ont, sans surprise, les plus grands impacts au niveau de la santé et de la sécurité du travail. Finalement, la satisfaction du client a un impact de façon relativement uniforme à travers toutes les localisations.

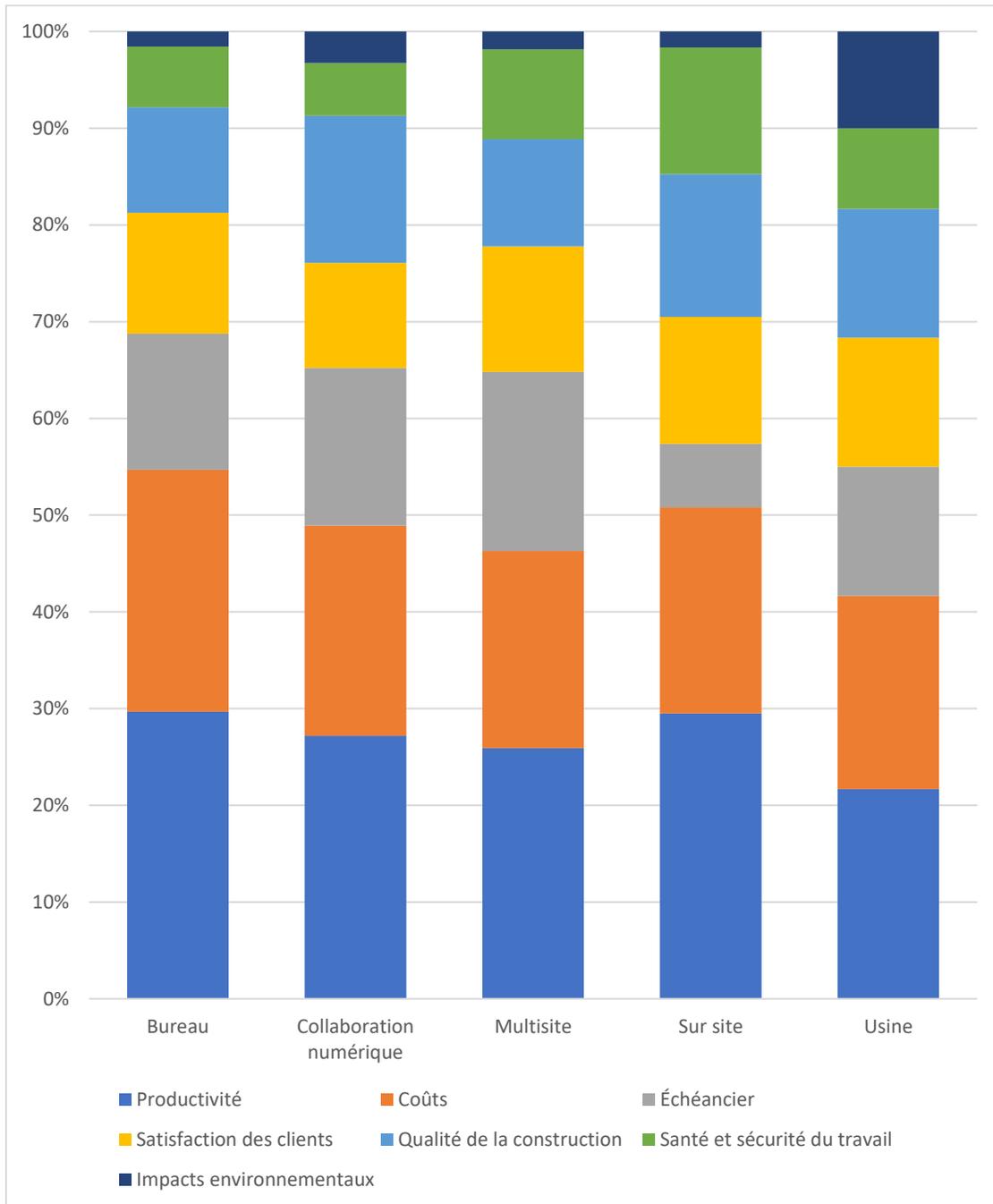


Figure 2.45 : Bénéfices de la technologie par localisation (N=100 technologies)

Les innovations technologiques en lien avec la fonction d'affaires (Figure 2.46) ayant les plus grands impacts sur la productivité et les coûts sont les technologies supportant la collaboration, la gestion de l'information, la gestion des ressources, la gestion documentaire ainsi que le relevé des conditions existantes. Au niveau de l'échéancier, les innovations supportant la collaboration, la conception, l'estimation et la gestion des opérations ont un impact marqué. La satisfaction des clients est vue comme étant assurée principalement en mettant en œuvre des innovations technologiques soutenant la gestion de projets et la gestion des ressources. Quant à elles, les innovations technologiques épaulant la gestion de l'information, la gestion de projet, la gestion documentaire ainsi que la production ont un impact sur la qualité de la construction. Les innovations technologiques supportant la production, la gestion des équipements et la gestion des opérations ont le plus d'impact au niveau environnemental. Finalement, les innovations soutenant l'exécution, la gestion des équipements et des opérations de même que le relevé des conditions existantes ont le plus grand impact en matière de santé et sécurité du travail.

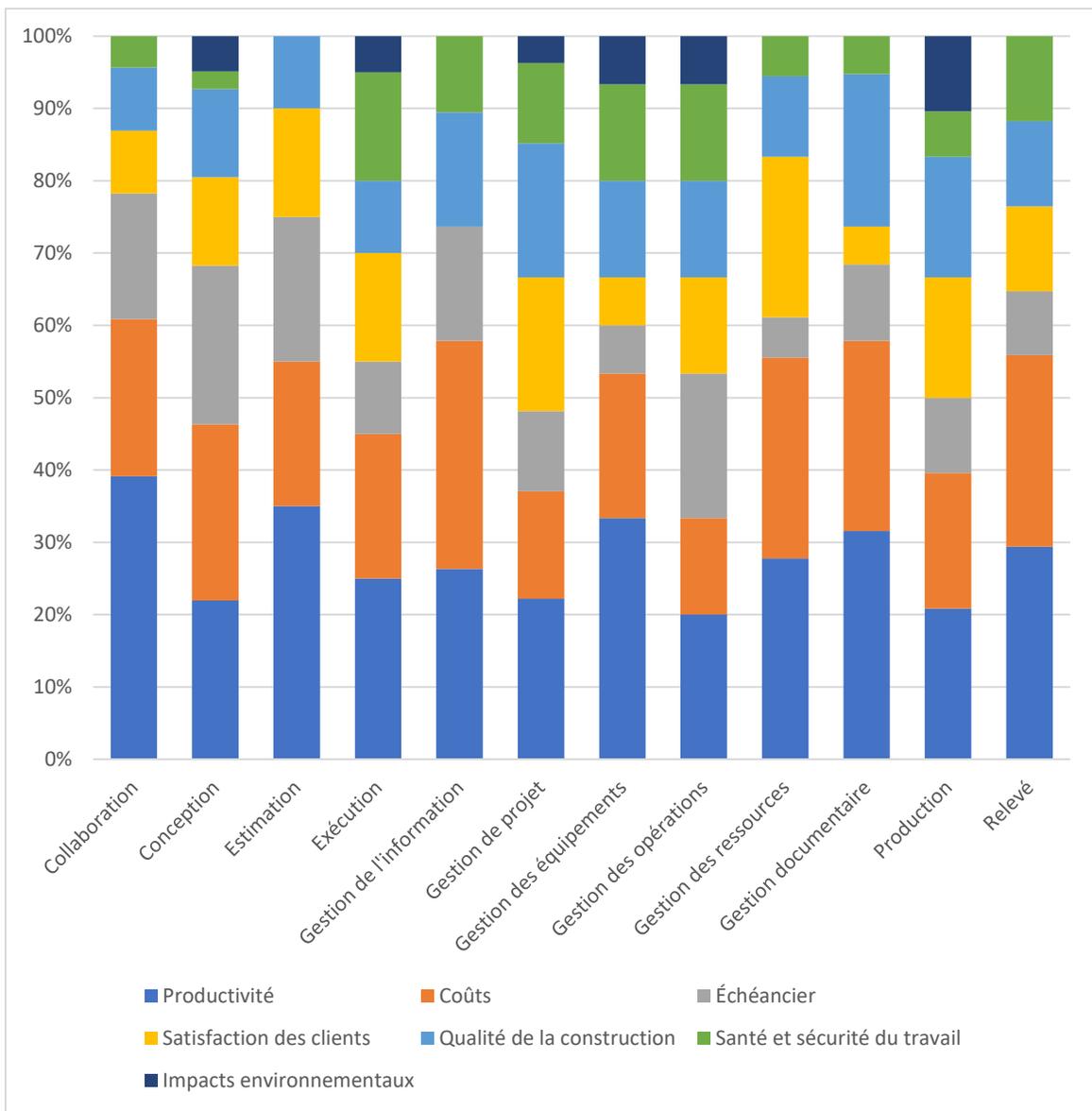


Figure 2.46 : Bénéfices de la technologie par fonction d'affaires (N=100 technologies)

Finalement, en termes de bénéfice perçu de la mise en œuvre de l'innovation technologique par discipline (Figure 2.47), les technologies du secteur manufacturier ainsi que celles appliquées ou reliées à plusieurs disciplines ont un impact marqué sur la productivité et les coûts. Les innovations ciblées par les entrepreneurs ont un impact marqué sur l'échéancier tout comme celles ayant un impact sur plusieurs disciplines. La technologie dans toutes les disciplines, à l'exception du volet manufacturier, a un impact sur la qualité de la construction ainsi que sur la santé et la sécurité du travail. Cependant, les impacts environnementaux sont importants principalement dans le secteur manufacturier.

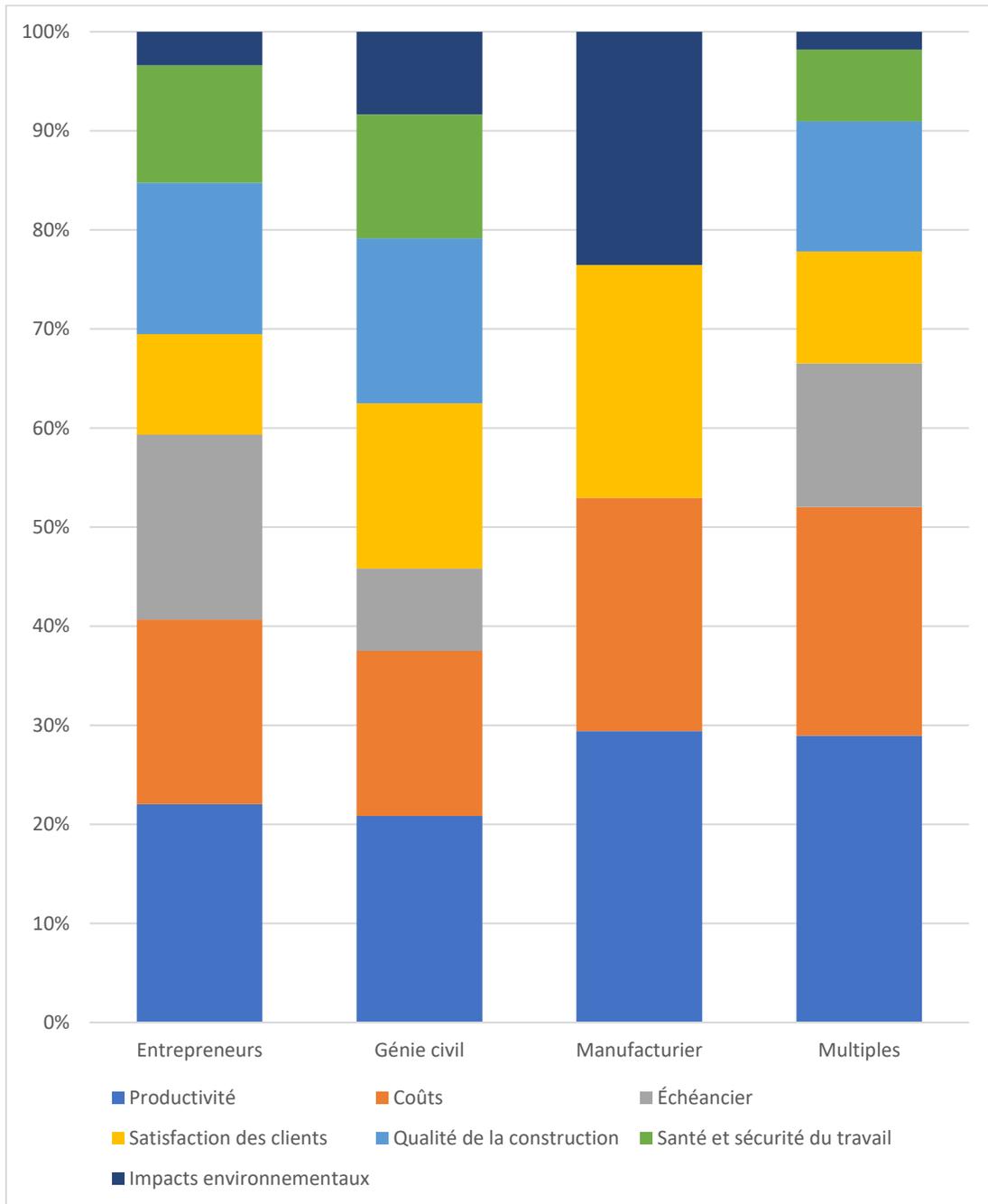


Figure 2.47 : Bénéfices de la technologie par discipline (N=100 technologies)

Enfin, pour récapituler, les notes des répondants sur l'impact de la technologie sur la productivité (réf. Figure 2.30) pour chaque facette et chaque élément (Figure 2.48 à Figure 2.51), il a été possible de constater que 57 % des technologies identifiées sont perçues comme ayant un impact important ou majeur (4 ou 5). Évidemment, cette proportion est maintenue à travers les quatre facettes et leurs éléments. Il est donc intéressant ici de s'attarder sur quels éléments récoltent les plus hautes notes, et ceux qui récoltent les plus faibles notes.

Au niveau de la forme (Figure 2.48), les innovations de produits et de processus ont les plus hautes notes relativement aux autres éléments, tandis que les innovations de composants sont vues comme ayant un impact plus faible sur la productivité. Il est notamment question de l'impact environnemental comme impact majeur pour les innovations de composants tel qu'illustré à la Figure 2.44.

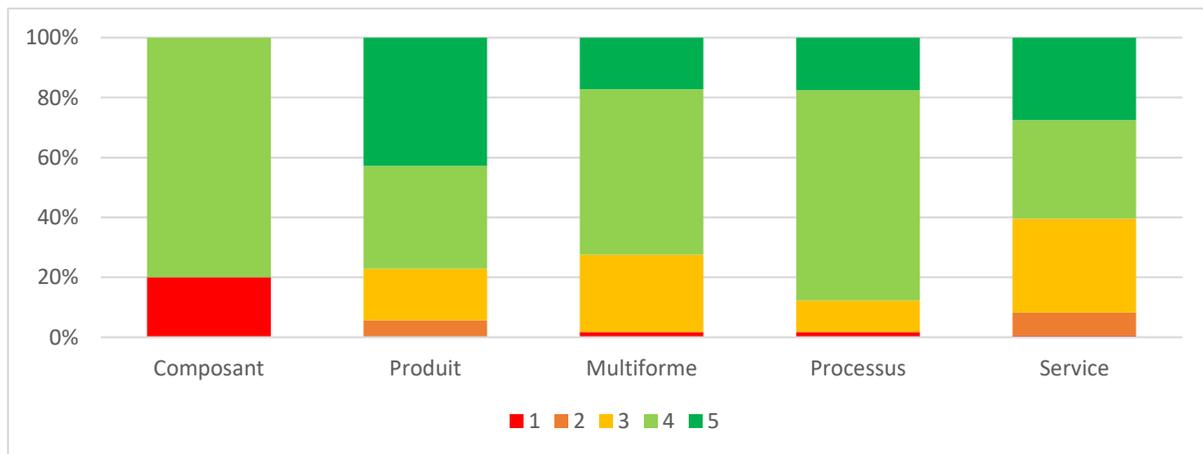


Figure 2.48 : Notes de l'impact de la technologie sur la productivité par forme (N=100 technologies)

En matière de localisation (Figure 2.49), les innovations technologiques s'appliquant sur plusieurs sites ont la note la plus élevée, suivies par celles mises en œuvre sur le site et en usine. Fait à noter, presque 50 % des innovations technologiques supportant la collaboration numérique et 40 % des innovations mises en œuvre au bureau ne sont pas vues comme ayant un impact marqué sur la productivité.

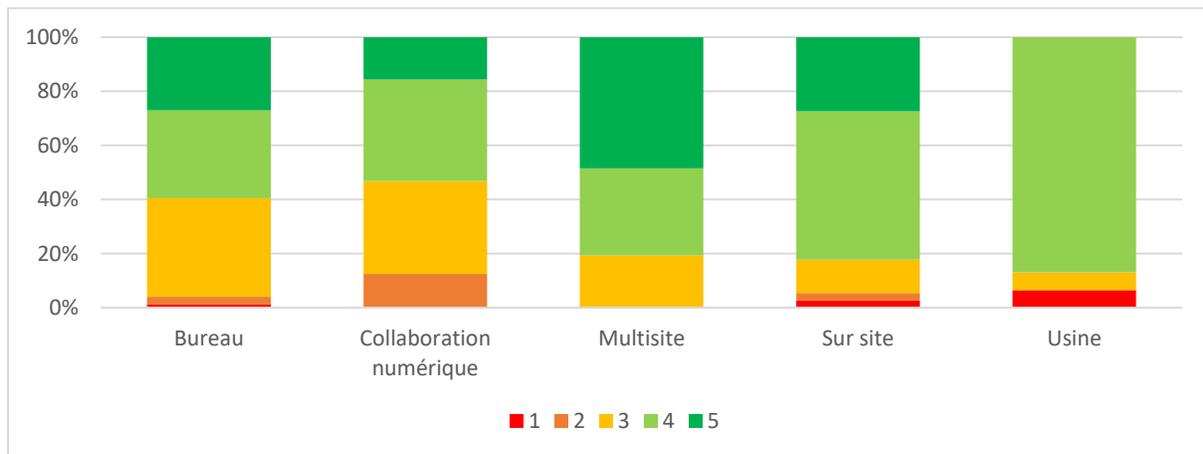


Figure 2.49 : Notes de l'impact de la technologie sur la productivité par localisation (N=100 technologies)

Les innovations technologiques en lien avec la fonction d'affaires (Figure 2.46) ayant les plus grands impacts sur la productivité sont les innovations supportant l'exécution et la gestion de projet, la gestion des équipements, la gestion des ressources et la production. Les innovations supportant la collaboration, la conception, la gestion de l'information et la gestion des ressources reçoivent des notes moins importantes. Ceci est quelque peu en contradiction avec les résultats illustrés à la Figure 2.46, notamment au niveau de la collaboration.

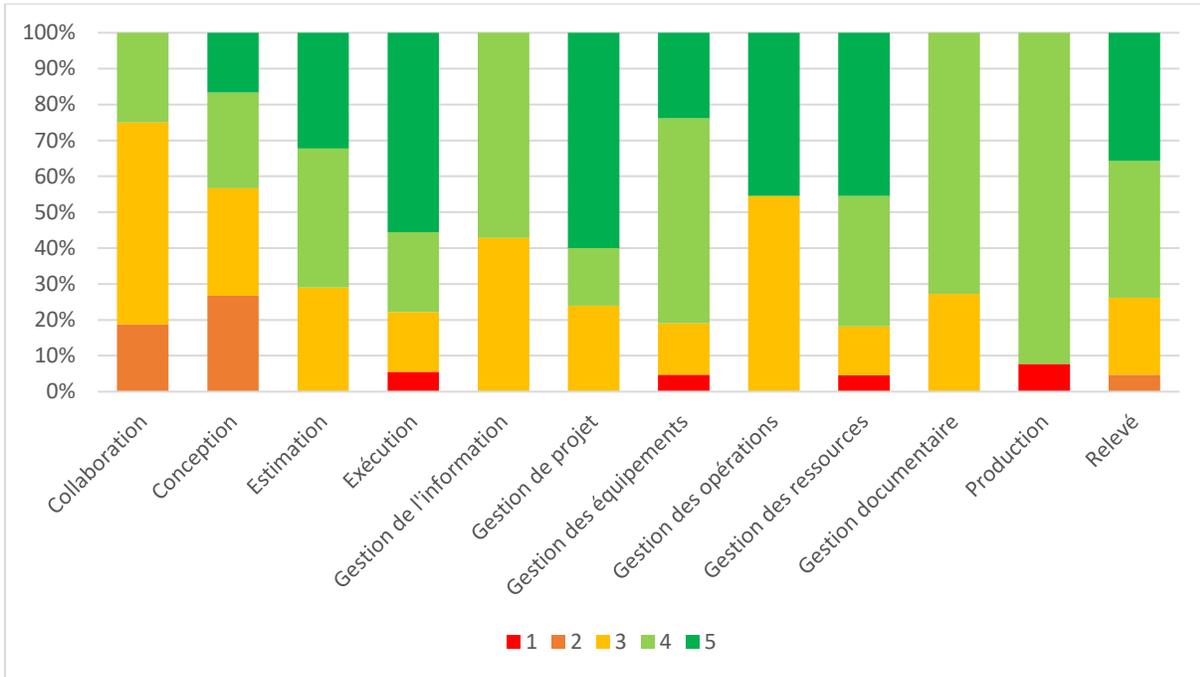


Figure 2.50 : Notes de l'impact de la technologie sur la productivité par fonction d'affaires (N=100 technologies)

Finalement, les innovations technologiques mises en œuvre par les entrepreneurs et les entreprises œuvrant dans le secteur du génie civil sont identifiées comme ayant un impact important sur la productivité, tandis que 25 % des innovations technologiques mises en œuvre dans le secteur manufacturier n'ont pas d'impact sur celui-ci.

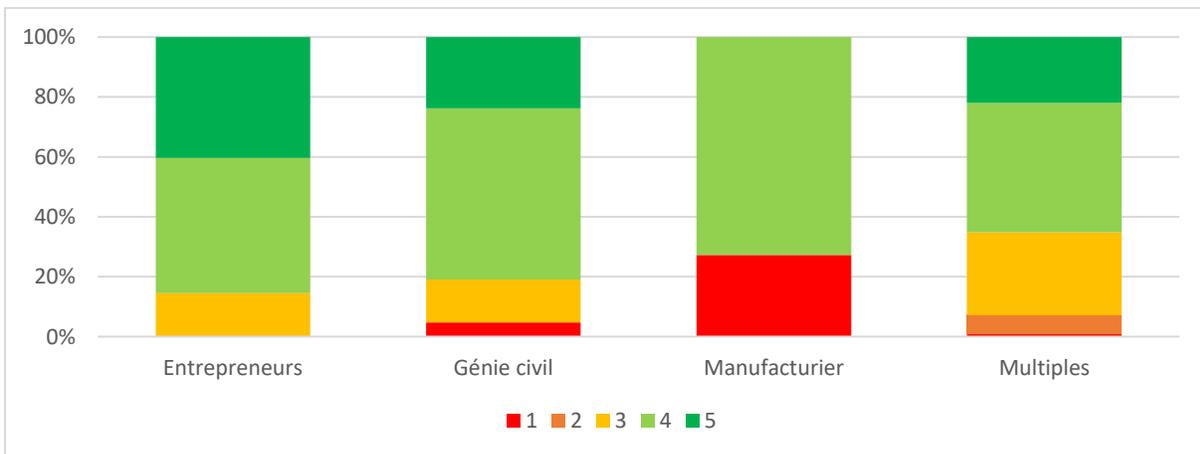


Figure 2.51 : Notes de l'impact de la technologie sur la productivité par discipline (N=100 technologies)

2.4.3.1 Discussion

En approfondissant l'analyse des innovations technologiques et en utilisant la stratégie de classification de ces innovations par facette, il est possible de détailler davantage les éléments moteurs ainsi que les bénéfices obtenus de la mise en œuvre de ces innovations technologiques. Certains éléments moteurs, tels que la décision de la direction, la volonté d'amélioration ou la compétitivité sont présents à travers les différentes facettes et leurs éléments de façon plus ou moins harmonisée, même s'il existe des variations. D'autres éléments moteurs, tels que les demandes d'un client, l'environnement et la durabilité ainsi que le fait qu'une technologie ait fait ses preuves, sont plus variables et s'appliquent à des innovations plus spécifiques.

De façon similaire, certains bénéfices, notamment les gains en productivité et la réduction des coûts, sont présents en proportion relativement égale à travers la majorité des éléments des différentes facettes. Les impacts sur l'échéancier, la santé et la sécurité du travail de même que la qualité de construction sont plus variables et sont issues de catégories d'éléments plus spécifiques selon la facette.

Finalement, en analysant l'impact des innovations technologiques sur la productivité en fonction des facettes, il est possible de mieux cerner quels types d'innovation auront un impact plus important que d'autres. C'est spécialement le cas pour la classification des innovations selon la fonction d'affaires.

Il est important de noter que les éléments rassemblant différents types d'innovations dans chacune des facettes (multiforme, multisites, ou multidisciplinaire) méritent une attention particulière. Dans leur forme actuelle, elles regroupent un nombre élevé d'innovations disparates, ce qui rend plus difficile l'interprétation des résultats liée à ces catégories. Il serait nécessaire de les développer davantage pour obtenir un niveau de précision additionnel.

2.4.4 Sommaire de la section

À partir des résultats de cette partie du sondage, il est possible de constater que :

- Les éléments moteurs présentés dans le cadre de cette étude diffèrent de ceux identifiés dans l'état de l'art. L'entreprise joue un rôle central à ce niveau-là, en dépit du client. Au Québec, le client n'est pas vu comme élément moteur clé dans l'initiative des processus d'implantation technologique (Figure 2.27).
- Les entreprises québécoises considèrent la productivité comme étant prioritaire dans la mise en œuvre des technologies au sein de leur entreprise et de leurs projets. Elle figure en tête de liste dans les attentes et les indicateurs résultants. Les répondants ont l'air plutôt satisfaits de l'impact des technologies qu'ils ont implantées sur la productivité de leur entreprise.
- Les entreprises québécoises effectuent le suivi de la performance de l'implantation de la technologie en proportion assez importante, ce qui est intéressant et important pour la bonne gouvernance du processus d'innovation.
- Les entreprises semblent motivées à intégrer la technologie dans leurs projets dans une proportion relativement élevée. Cette motivation provient en grande partie de l'interne, c'est-à-dire de décisions de la direction et du développement d'une stratégie en innovation. Ces éléments moteurs mériteraient plus d'attention. Évidemment, ces motivations intrinsèques sont liées à des informations et des données provenant de l'externe.

2.5 La construction hors site dans l'industrie québécoise

Cette partie du rapport porte sur l'analyse des pratiques liées à la construction hors site (CHS) au sein des entreprises québécoises œuvrant dans l'industrie de la construction. L'objectif de ce volet du sondage était d'identifier le type de CHS, les systèmes préfabriqués et le taux d'adoption au Québec. De plus, l'impact de la CHS sur des indicateurs de performance des projets de construction a été sondé. En guise de rappel et pour les fins de ce sondage, la CHS est définie de la manière suivante :

La CHS peut être définie comme la planification, la conception, la fabrication et l'assemblage des éléments de construction dans un endroit autre que leur endroit d'installation final, le but est de soutenir une construction rapide et efficace de structures permanentes de qualité et durables. La CHS implique une transition des opérations traditionnellement réalisées sur site vers un environnement de fabrication industrielle (Off-Site Construction Council - National Institute of Building Sciences, s. d.).

2.5.1 Profils des répondants

Parmi les 161 réponses complètes obtenues dans le cadre du sondage, 93 répondants (58 %) ont complété la portion portant sur la CHS. De ces 93 répondants, 38 % ont indiqué avoir déjà pris part à des projets utilisant la CHS (Figure 2.52).

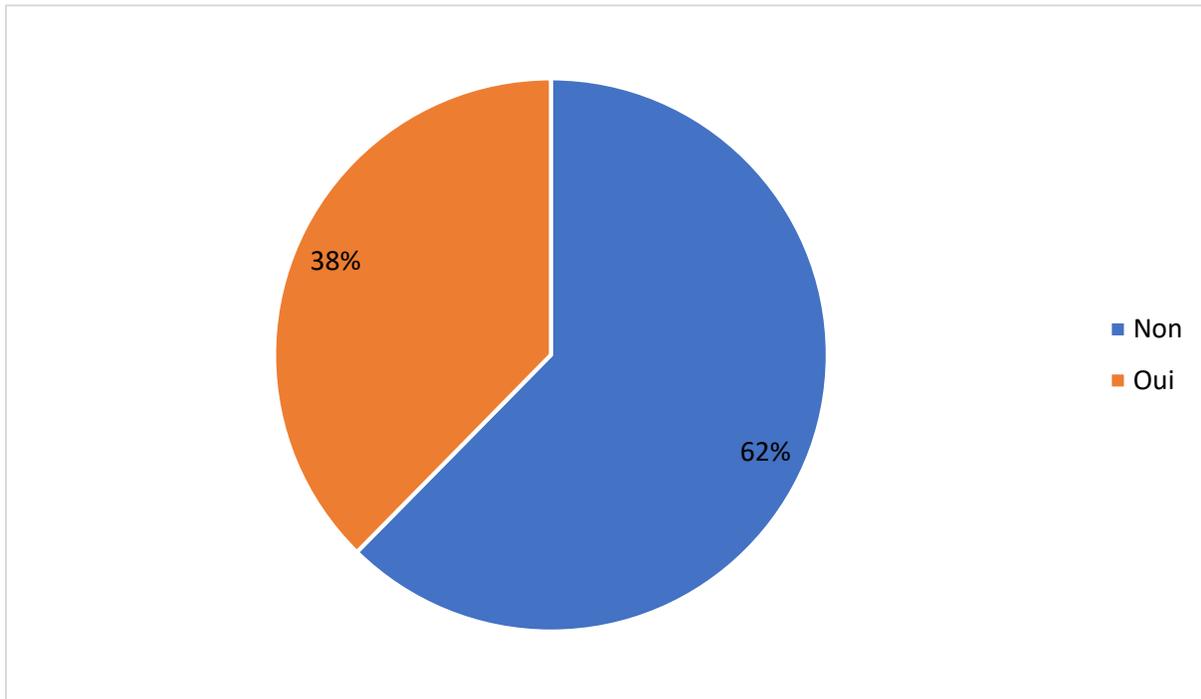


Figure 2.52 : Taux d'adoption de la CHS par les répondants ayant complété cette section du sondage (N=93)

La distribution des répondants ayant adopté la CHS par discipline est illustrée à la Figure 2.53. La proportion des différentes disciplines reflète celle du sondage global et est influencée par la distribution

du sondage, ciblant les entrepreneurs généraux et spécialisés. Fait à noter, aucun des répondants provenant du domaine de l'ingénierie n'a adopté ou été impliqué dans des projets faisant appel à la CHS.

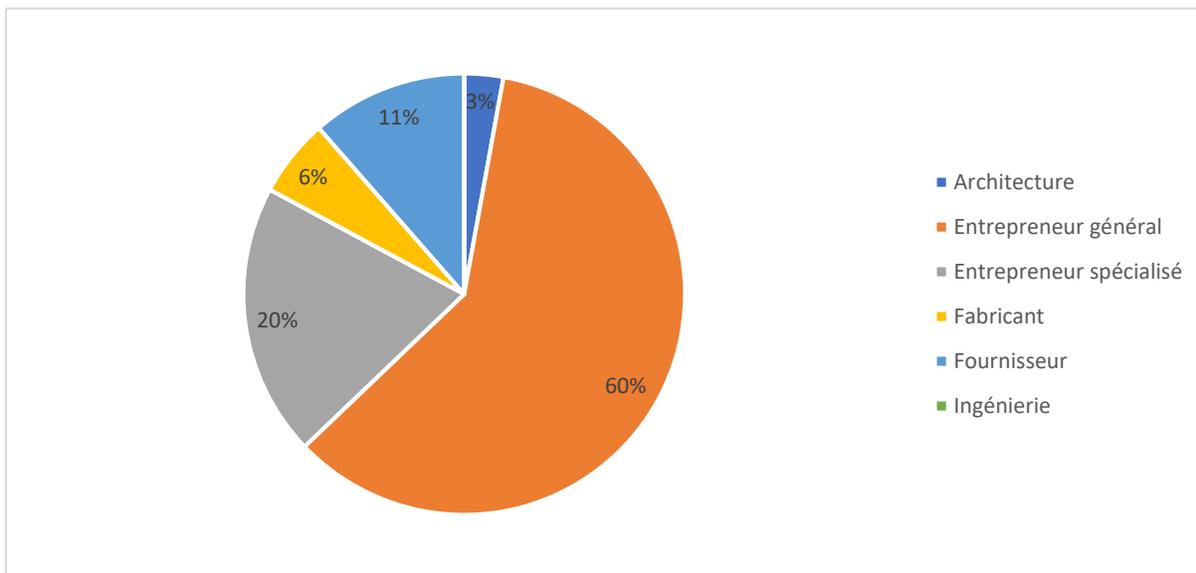


Figure 2.53 : Distribution des répondants ayant adopté la CHS (N= 34)

Les figures Figure 2.54 et Figure 2.55 illustrent la répartition des répondants par nombre d'employés et par chiffre d'affaires. Plus de 50 % des répondants proviennent d'entreprises de plus de 100 employés, tandis que 45 % proviennent d'entreprises ayant un chiffre d'affaires de plus de 50 M\$ par année.

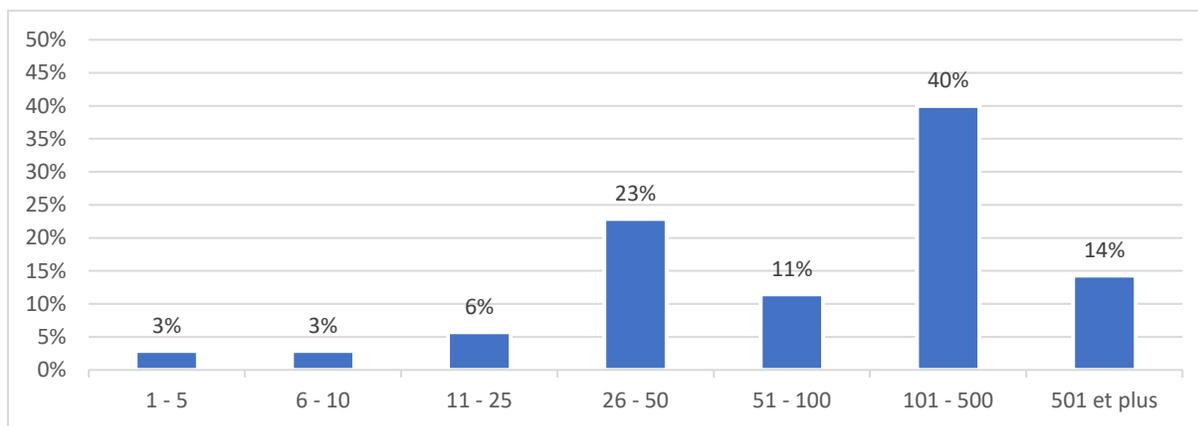


Figure 2.54 : Répartition des réponses par nombre d'employés - CHS (N=34)

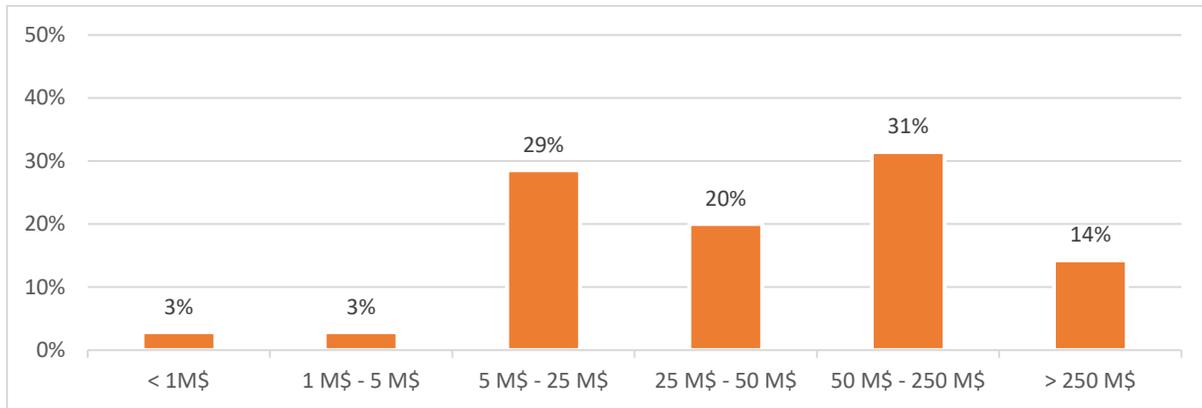


Figure 2.55 : Répartition des réponses par chiffre d'affaires - CHS (N=34)

Finalement, la Figure 2.56 présente la répartition des répondants ayant adopté la CHS par secteur d'affaires. La répartition est somme toute distribuée équitablement. Il est important de noter qu'une même entreprise peut œuvrer dans plusieurs secteurs.

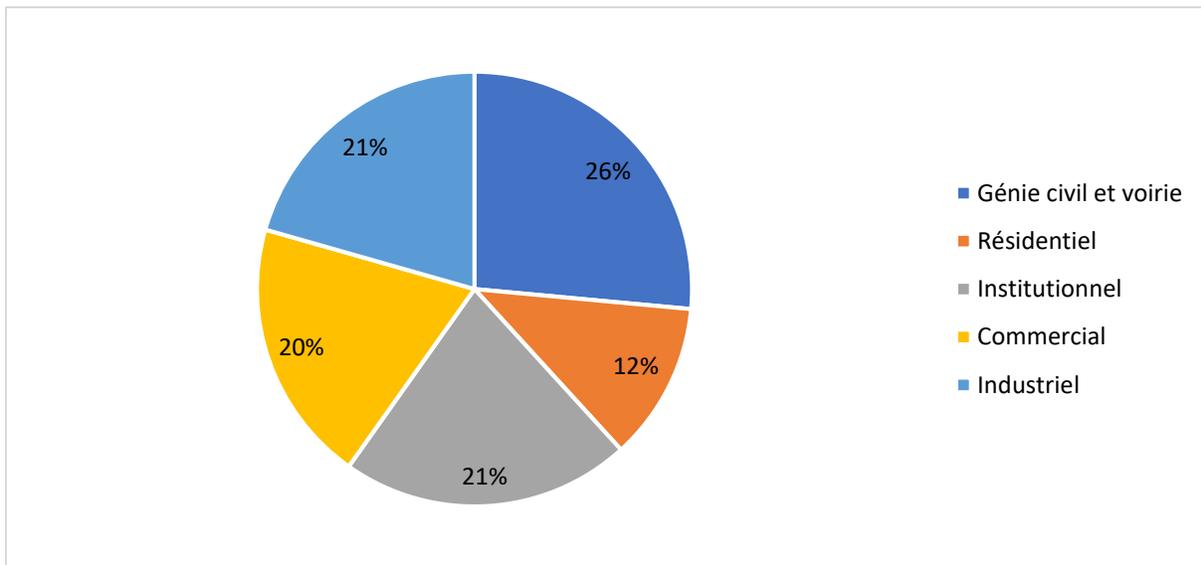


Figure 2.56 : Répartition des réponses par secteur d'affaires (N=34)

2.5.2 Mise en œuvre de la CHS

Dans cette partie, trois questions ont été posées afin d'identifier les différents types de CHS. Le but était de déterminer les principaux systèmes et matériaux utilisés dans ce type de construction au Québec. La majorité des éléments préfabriqués appartiennent à la catégorie des éléments linéaires (41 %), soit des poutres, des tabliers de pont, des systèmes de charpente ou des ponceaux, par exemple (Figure 2.57). Les composantes ou sous-systèmes, les panneaux ouverts ou fermés sont mis en œuvre en proportions relativement égales par les répondants ayant adopté la CHS. Seulement 7 % et 2 % des répondants ont indiqué que leurs entreprises utilisent la CHS pour la préfabrication de noyaux de services (« pods ») ou de modules complets et fermés (volumétriques), respectivement.

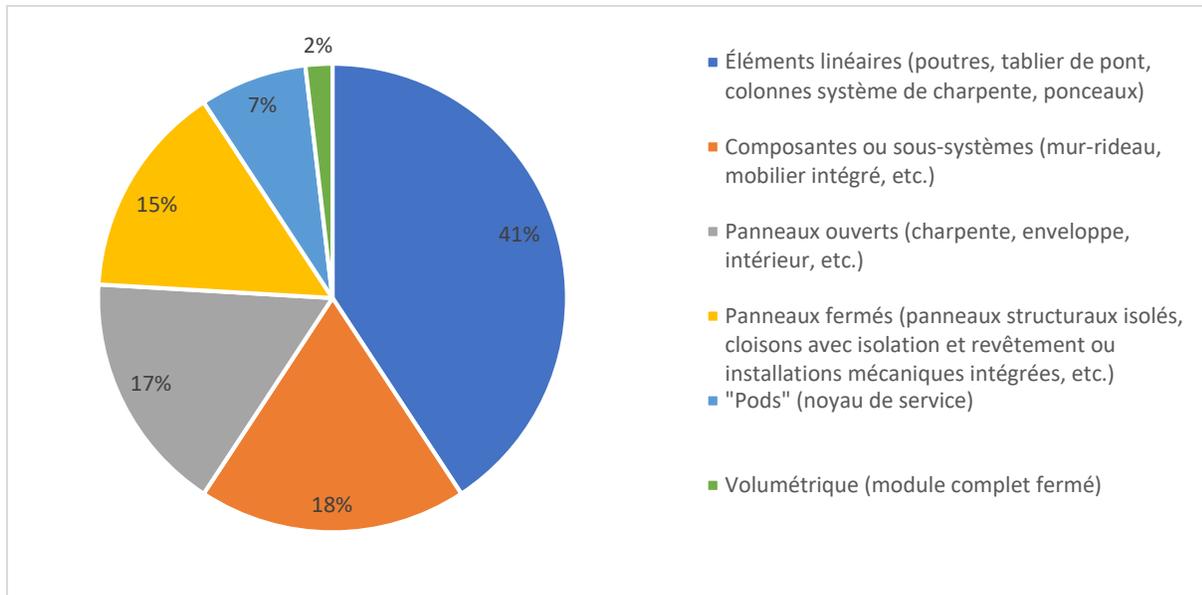


Figure 2.57 : Typologie des éléments assujettis à la CHS (N=34)

Selon l'Institut canadien du béton préfabriqué et précontraint, les entrepreneurs généraux trouvent que l'utilisation d'éléments en béton préfabriqué facilite le travail sur site, assure un bon déroulement à la fois à court et à long terme pour le propriétaire et le concepteur (Préfabriqué Totale - Institut Canadien du Béton Préfabriqué et Précontraint, 2021). Dans le même sens, les Figure 2.58 et Figure 2.59 indiquent que les répondants ont recours à la CHS surtout pour les systèmes structuraux (52 %) et que les principaux matériaux utilisés sont l'acier (42 %) et le béton (31 %).

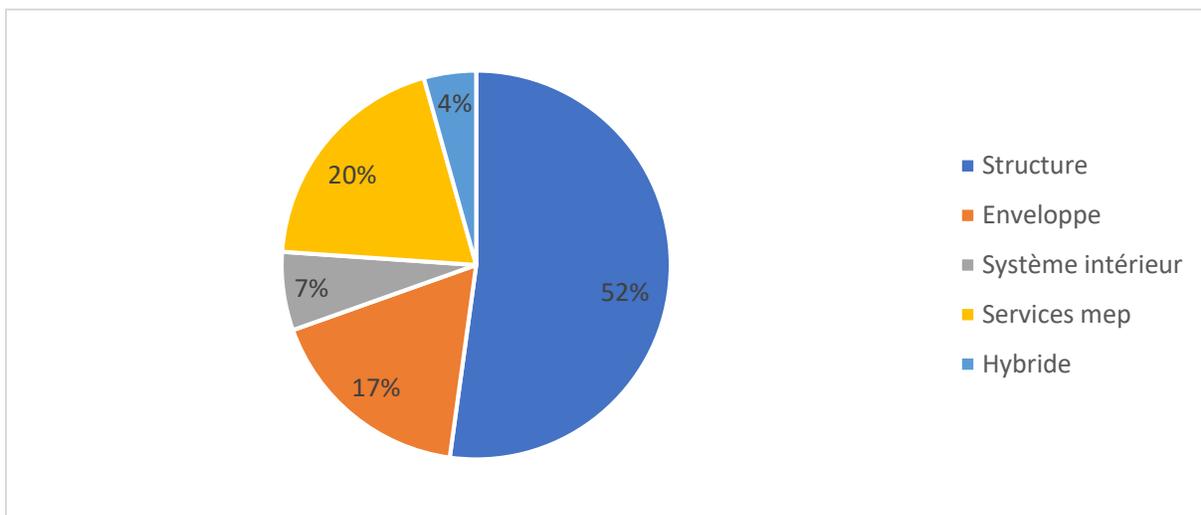


Figure 2.58 : Typologie des systèmes bâtis assujettis à la CHS (N=34)

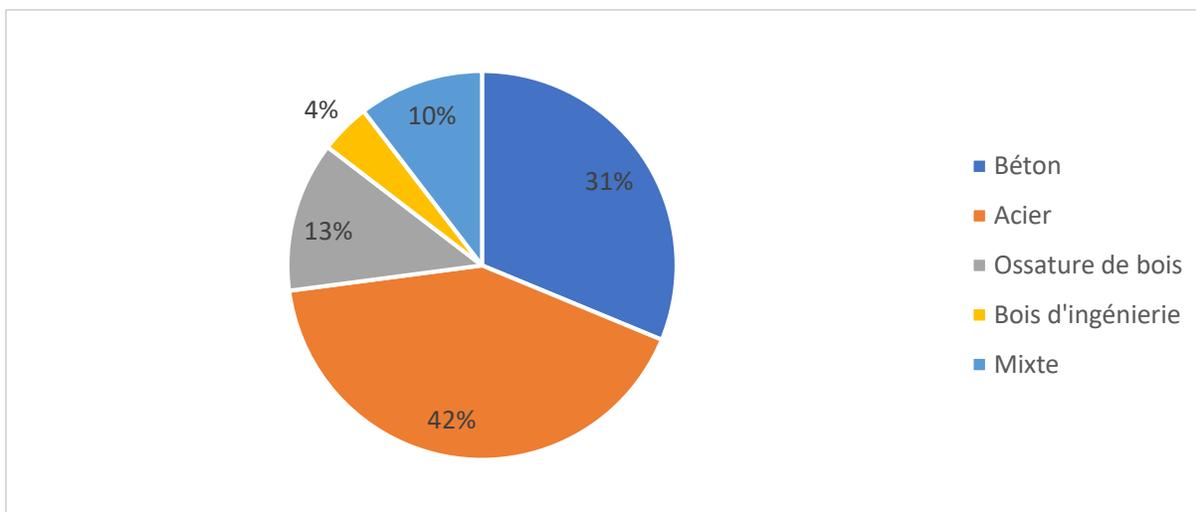


Figure 2.59 : Typologie des matériaux utilisés dans la CHS (N=34)

Finalement, et en complément à la Figure 2.56, les répondants ont été invités à indiquer le taux, ou l'intensité, de mise en œuvre de la CHS par secteur d'affaires. Il est donc possible de constater que la CHS est utilisée sur moins de 25 % des projets pour au moins 50 % des répondants œuvrant dans les secteurs du génie civil et de la voirie, institutionnel, commercial et industriel. Les taux de mise en œuvre de la CHS dans le secteur résidentiel demeurent relativement bas (+/-30 % des répondants indiquant un degré d'utilisation de la CHS). Le domaine du génie civil et de la voirie possède le plus haut taux global de mise en œuvre de la CHS avec 75 % des répondants indiquant une mise en œuvre de celle-ci. Cependant, les plus hauts taux d'adoption (>50 %) sont observables dans les secteurs résidentiel unifamilial et industriel. En revanche, ce taux élevé n'est observable que pour une minorité de répondants (+/- 10 % dans les deux cas).

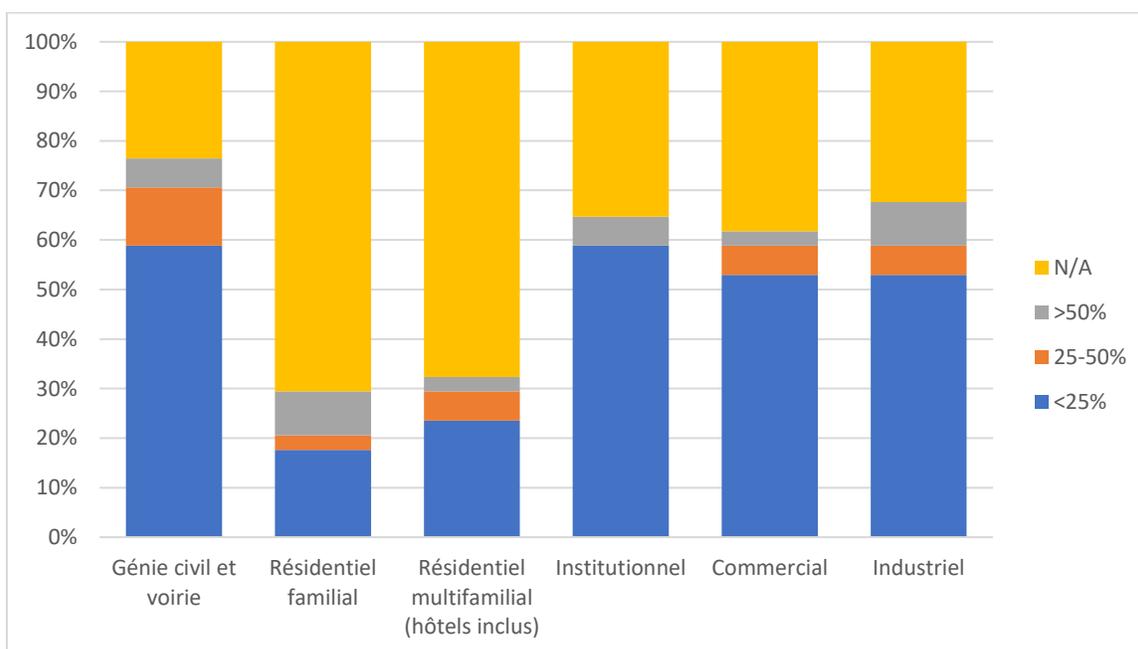


Figure 2.60 : Taux de mise en œuvre de la CHS par secteur d'affaires (N=34)

2.5.3 Potentiel et bénéfices de la CHS

Dans cette partie, il est question du potentiel et des bénéfices liés à la mise en œuvre de la CHS. La Figure 2.61 illustre les différents endroits où les répondants voient un potentiel en matière d'impact de la CHS sur la réalisation de projets (classés en ordre décroissant d'importance). Ainsi, les répondants indiquent que la CHS a le plus grand potentiel d'impact sur l'échéancier de projet (66 % avec un potentiel d'impact de 3), suivi par la productivité de la main d'œuvre (58 % avec un potentiel d'impact de 3) et les coûts de projets (56 % avec un potentiel d'impact de 3).

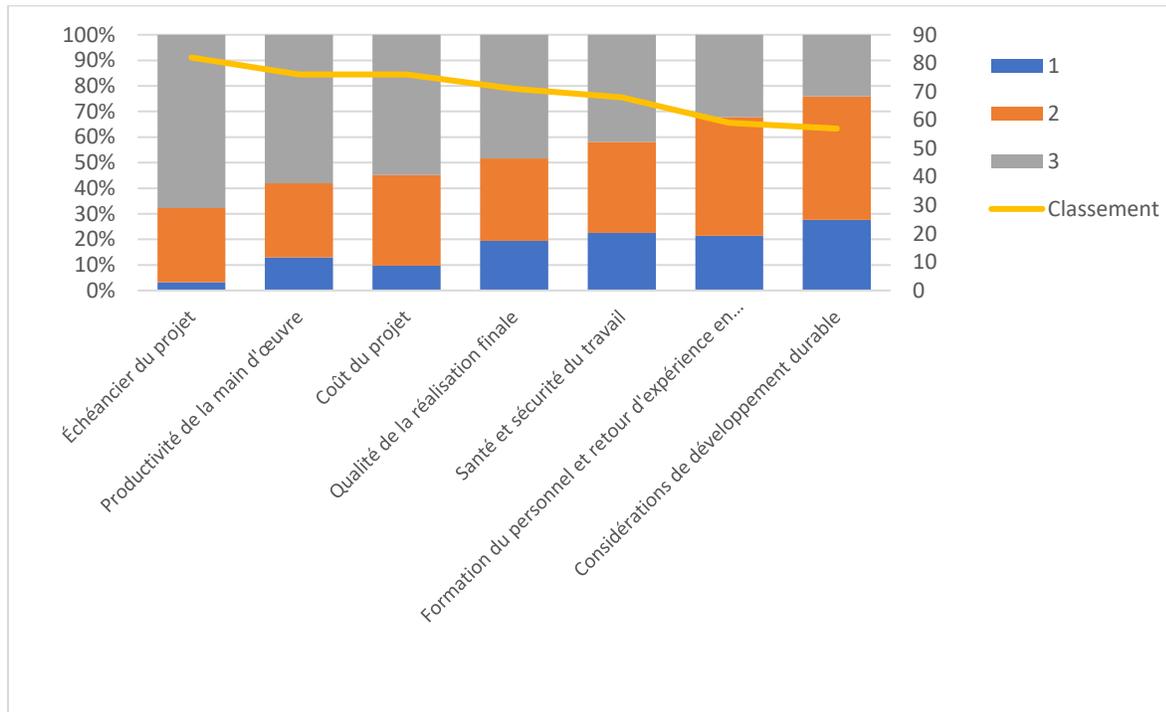


Figure 2.61 : Potentiel en matière d'impact sur la réalisation de projets (N=34)

La Figure 2.62 illustre l'impact perçu de la CHS sur les coûts associés à un projet de construction. Les répondants étaient invités à évaluer l'impact de la CHS sur les coûts associés aux projets selon un classement allant de -2 (impact négatif) à 2 (impact positif) et 0, étant un impact nul par rapport à la construction traditionnelle. Globalement, les répondants s'entendent pour dire que la CHS a un impact soit positif ou très positif sur le coût de la construction total (ce qui inclut le coût des travaux de construction et des frais associés à la construction), de même que sur les coûts de contingences. D'un autre côté, les répondants sont plus mitigés au niveau de l'impact de la CHS sur les coûts de conception et de modification à la conception. Ceci est en lien avec le processus de conception qui demande l'apport de plusieurs parties prenantes, notamment le fabricant/manufacturier ainsi que le temps requis pour développer un concept qui répond tant aux contraintes du programme comme tel qu'aux contraintes liées à la fabrication et à l'assemblage sur le site.

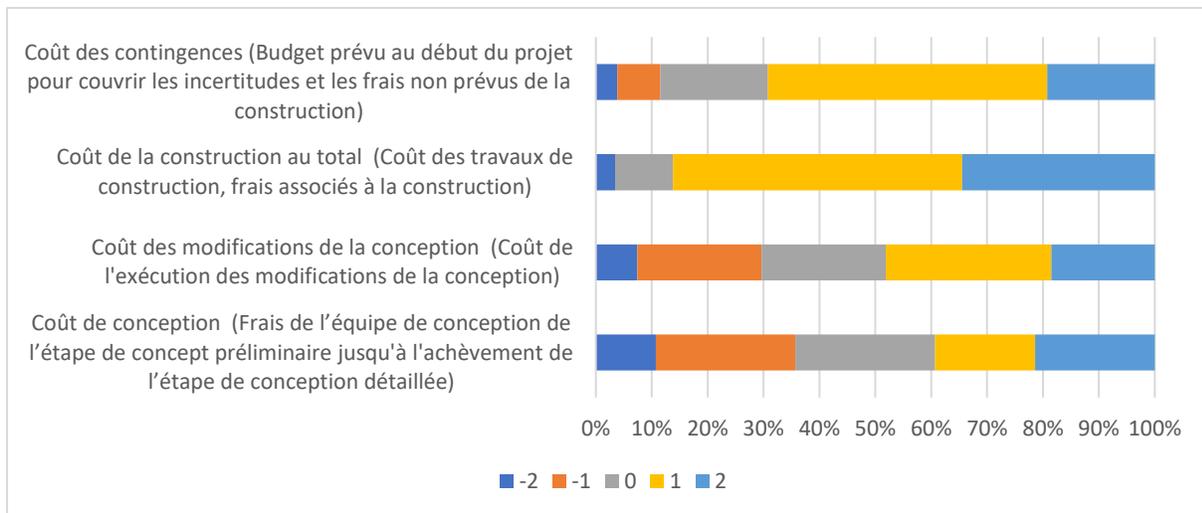


Figure 2.62 : Impact de la CHS sur les coûts associés à un projet de construction (N=34)

Finalement, la Figure 2.63 illustre l'impact perçu de la CHS sur les échéanciers associés à un projet de construction. Comme avec les coûts, les répondants étaient invités à évaluer l'impact de la CHS sur l'échéancier de projet selon un classement allant de -2 (impact négatif) à 2 (impact positif) avec 0 étant un impact nul par rapport à la construction traditionnelle. Globalement, les répondants s'entendent pour dire que la CHS a un impact soit positif ou très positif sur l'échéancier lors de la phase de réalisation, de même que sur l'échéancier global du projet. D'un autre côté, les répondants sont plus mitigés au niveau de l'impact de la CHS sur l'échéancier du projet en phase de conception. Évidemment, ceci est en lien avec la question précédente et le fait que le processus de conception dans le contexte de la CHS qui demande plus de temps en amont afin de développer un concept qui fonctionne.

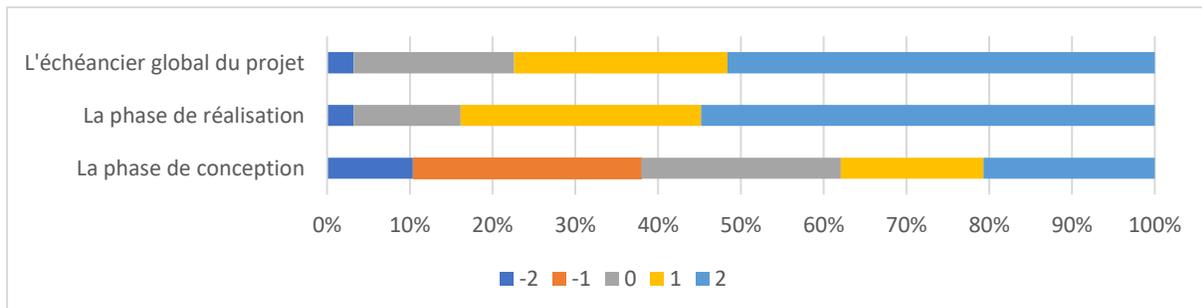


Figure 2.63 : Impact de la CHS sur les échéanciers associés à un projet de construction (N=34)

2.5.4 Discussion

Ayant analysé toutes les réponses obtenues dans la partie liée à la CHS, on a pu remarquer :

- Le taux de réponses demeure peu élevé, parmi les 161 réponses obtenues, il n'y a que 34 répondants qui ont affirmé mettre en œuvre la CHS dans la réalisation des différents projets de construction;
- La plupart des répondants qui ont un intérêt à utiliser la CHS appartiennent à des entreprises de taille moyenne ayant des chiffres d'affaires qui dépassent les 5 M\$;

- Une majorité des entreprises œuvrant dans les domaines du génie civil, industriel, institutionnel ou commercial utilisent la CHS dans la réalisation de 25 % (ou moins) de leurs projets de construction;
- Les principaux éléments améliorés par la CHS sont l'échéancier global et la productivité de la main d'œuvre en chantier;
- Il existe une incertitude dans l'évaluation de l'impact de la CHS sur les différents coûts associés aux projets de construction;
- La CHS est perçue comme ayant un impact négatif sur l'échéancier lors de la phase de conception (par rapport à un projet de construction conventionnel);
- La CHS est perçue comme ayant un fort impact positif sur la phase de réalisation et sur l'échéancier global (durée optimisée par rapport à un projet de construction conventionnel).

Les données recueillies dans cette section ont permis de comprendre l'intérêt de certaines entreprises à utiliser la CHS, et d'identifier, selon l'expérience des personnes interrogées, l'impact de cette méthode sur les pratiques traditionnelles de construction.

2.6 Conclusion

Cette section du rapport a présenté les résultats du sondage portant sur la mise en œuvre des innovations technologiques, incluant la construction hors site, par les entreprises québécoises en construction. Le profil des répondants, leur niveau d'intérêt et leur appétit pour l'innovation, les différents types d'innovations et l'impact de celles-ci ont été étudiés. Pour les entreprises n'ayant pas mis en œuvre d'innovations, les raisons derrière cette absence ont été analysées. Finalement, l'impact de l'innovation technologique sur la productivité a été approfondi. Le sondage n'a pas seulement permis de répertorier une liste de technologies utilisées par les professionnels québécois de la construction, mais a également permis de sonder l'industrie québécoise de la construction sur le rapport à l'innovation, les caractéristiques et les impacts que les technologies déclarées ont sur les entreprises québécoises et leurs projets.

En parallèle, la mise en œuvre de la construction hors site a été examinée. Le taux d'adoption, la typologie d'éléments constructifs, le domaine d'application ainsi que l'impact de celle-ci ont été sondés. Finalement, il est possible de constater qu'en effet, la mise en œuvre de l'innovation technologique et la construction hors site dans l'industrie québécoise de la construction ont un impact positif considérable. Une recherche additionnelle est nécessaire afin de réellement quantifier cet impact, notamment en effectuant des études de cas qui approfondiraient les impacts précis. Dans la prochaine section, il est question d'études de cas visant une réflexion en ce sens.

Il est important de dresser les limites du sondage, notamment en termes d'échantillonnage. Bien que le taux de réponse soit intéressant, un échantillon plus vaste serait nécessaire afin d'assurer la possibilité de généraliser les résultats du sondage. Il serait également intéressant d'élargir le bassin pour inclure d'autres parties prenantes dans l'échantillon.

3 SECTION 03 : ÉTUDES DE CAS

3.1 Introduction

Cette section du rapport présente les résultats de quatre études de cas afin de mieux comprendre les dynamiques et les impacts directs de l'innovation technologique sur la productivité et la performance du projet. Ces études de cas permettent d'approfondir certains des éléments identifiés dans la littérature et le sondage. Ainsi, les éléments moteurs, les avantages et les défis de mise en œuvre ont pu être identifiés et discutés de manière plus approfondie.

Les études de cas portent sur un large éventail d'innovations, concernant autant la construction de bâtiments que d'infrastructures. De plus, les études choisies couvrent un spectre important de la classification par facette développée dans le cadre de cette étude. Les études de cas ciblées sont les suivantes :

- Étude de cas 01 : Construction modulaire hors site pour le projet d'agrandissement de l'Hôpital Maisonneuve-Rosemont
- Étude de cas 02 : Système de construction abritée en hauteur sans grue sur un projet de résidence étudiante
- Étude de cas 03 : Compaction intelligente pour les projets routiers
- Étude de cas 04 : Inspection des ouvrages d'art par drone

Ainsi, en ce qui concerne la facette du **cycle de vie de l'actif**, il est principalement question d'innovations mises en œuvre lors de la phase de construction, mais qui ont une incidence particulière sur la phase de conception (notamment pour les études de cas 01 et 02). Au niveau de la facette de **discipline**, les innovations présentées concernent à la fois les clients, les professionnels, les entrepreneurs généraux et les entrepreneurs spécialisés. Dans le cas des études de cas 01 et 02, même les fournisseurs sont impliqués. Concernant la **forme de l'innovation**, l'étude de cas 01 est une innovation au niveau du processus et du produit et de ses composantes, tandis que l'étude de cas 02 peut être considérée comme une innovation de services et de processus. L'étude de cas 03 peut être considérée comme une innovation au niveau de l'équipement. Finalement, l'étude de cas 04 implique une innovation au niveau de l'équipement, des services et du processus. Concernant la **fonction d'affaires**, les études de cas 01 et 02 ont mis en œuvre des innovations qui couvrent l'exécution et ont des impacts sur les fonctions de conception, de gestion, d'approvisionnement et d'opérations du chantier entre autres. L'étude de cas 03 peut être considérée comme une innovation au niveau de la planification et du suivi et de la gestion de la qualité. Finalement, l'étude de cas 04 implique une innovation au niveau de la fonction de gestion de la qualité et de l'inspection. Finalement, les quatre innovations sont **localisées** sur site, avec l'étude de cas 01 se retrouvant en usine également.

En termes de résultats, chaque innovation technologique présentée a un impact sur la productivité en chantier et sur la performance globale du projet, soit au niveau des coûts, de l'échéancier ou de la qualité. Les impacts sur la productivité sont dus principalement à la mise en place d'un chantier plus sécuritaire ou permettant de travailler dans des conditions plus propice (cas 01, 02 et 04), ou à une optimisation de la main d'œuvre sur le chantier (cas 03). Du point de vue de l'impact des innovations sur les indicateurs de projet, celui-ci mérite d'être étudié plus en profondeur.

Par exemple, au niveau des coûts de projets, certaines innovations entraîneront une hausse des coûts en amont, pour livrer des projets de qualité dans les temps (études de cas 01 et 02). Ceci est comparable aux résultats du sondage (Figure 2.62). En général, les innovations permettent ou contribuent au respect des échéanciers et à la fourniture de services et de produits de qualité. La section suivante présente ces quatre innovations plus en détail.

3.2 Étude de cas 01 : Construction modulaire hors site pour le projet d’agrandissement de l’Hôpital Maisonneuve-Rosemont

3.2.1 Description de l’étude de cas

Le projet d’agrandissement de l’Hôpital Maisonneuve-Rosemont (HMR-Modulaire) mis en œuvre le 13 mars 2020 a été inauguré le 24 janvier 2021. Le projet consistait en la mise en place d’un bâtiment modulaire de deux étages, d’une superficie de 1600 m² par étage, avec un vide sanitaire. Une partie du bâtiment comportait un sous-sol permettant l’accès au tunnel qui relie le nouveau bâtiment au bâtiment existant. Avec la pandémie de la COVID-19, le gouvernement du Québec cherchait à identifier les besoins et les disponibilités en termes d’infrastructure de santé. Ce projet d’agrandissement, déjà commencé avant la pandémie, a donc été ciblé comme prioritaire. Il a donc été mis sur la voie rapide afin de répondre à une pression accrue anticipée sur le réseau de la santé. Étant donné la nature unique et la complexité du projet, le client a décidé de se faire accompagner par une équipe multidisciplinaire de la Société québécoise des infrastructures (SQI) pour profiter de son expertise de gestion de projets. Afin d’accélérer la réalisation tout en assurant la qualité du produit, la SQI a choisi la construction modulaire dans ce projet.

Le projet a été réalisé en mode de gérance de construction au coût global de 40 M\$. La Figure 3.1 illustre la structure organisationnelle et les liens contractuels du projet.

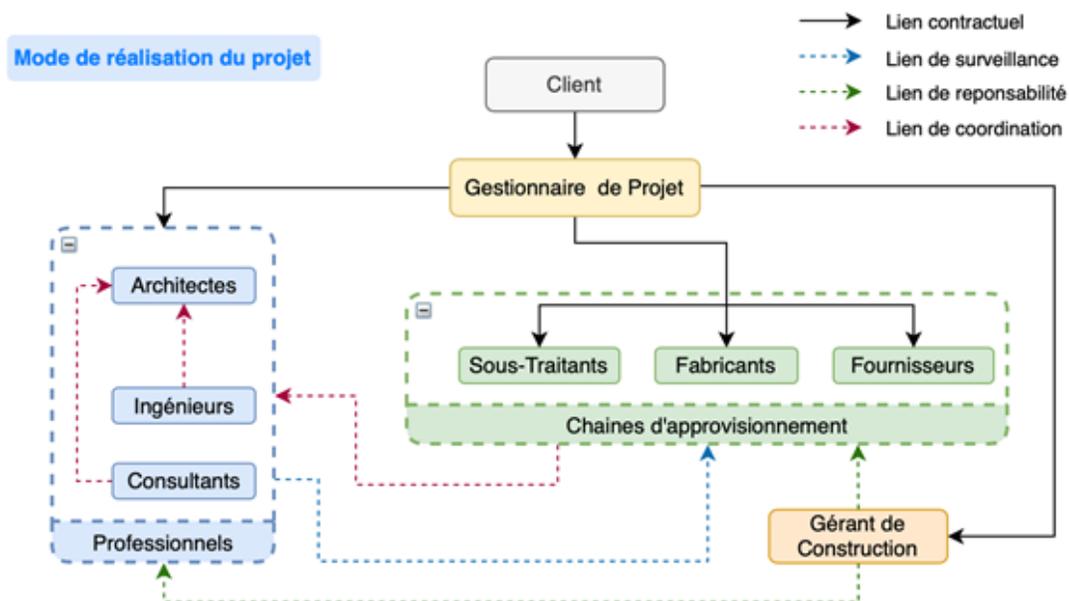


Figure 3.1: Structure organisationnelle et les liens contractuels du projet

L’équipe de projet est composée du client (CIUSSS de l’Est-de-l’Île-de-Montréal), du gestionnaire du projet (SQI), de la firme d’architecture (Architecture49), de la firme d’ingénierie civile, structure, mécanique et

électrique (WSP), du gérant de construction (Pomerleau) avec l'entrepreneur électromécanique (TBC Constructions) et le fabricant d'unités modulaires (Mecart). Sans être une exigence contractuelle, la modélisation des données du bâtiment (BIM) a été principalement utilisée par l'entrepreneur en électromécanique pour la préfabrication et la coordination interdisciplinaire.

Le bâtiment illustré à la Figure 3.2 est constitué d'espaces de travail (postes d'accueil, postes de professionnels, postes d'infirmières, etc.) et de chambres d'isolement, constituées de panneaux métalliques juxtaposés, munies d'un vestibule faisant office de sas, d'une station de lavage des mains sans contact et d'une salle de toilette incluant une douche adaptée. Chacune des 35 chambres est munie d'un système à pression contrôlée selon l'usage (pression positive pour la clientèle oncologique et négative pour la clientèle atteinte de maladies contagieuses). Les moteurs principaux guidant le choix de la construction modulaire étaient la réalisation du projet à l'intérieur des délais tout en assurant une construction de haute qualité. La décision d'aller de l'avant avec une construction modulaire a été prise rapidement par le représentant du client. Cette décision a naturellement grandement influencé les décisions subséquentes liées au projet.



Figure 3.2: Le projet d'agrandissement de l'Hôpital Maisonneuve-Rosemont

3.2.2 Les bénéfices

Les principaux avantages attribuables à la construction modulaire dans le projet de HMR-Modulaire sont les suivants :

- Amélioration de la performance au sujet de l'échéancier global du projet de 50 %;
- Réduction de la main-d'œuvre sur le chantier dans un contexte de pandémie;
- Amélioration de la conception;
- Amélioration de la qualité et du contrôle qualité des livrables;
- Amélioration de la productivité;
- Amélioration de la durabilité de construction.

3.2.2.1 Amélioration de la performance au sujet de l'échéancier global du projet

Comme mentionné, le choix de la construction modulaire a été fait afin de réduire l'échéancier global du projet de plus de 50 %. Cet avantage du mode de construction accélérée, surtout dans le contexte de la livraison d'actifs critiques a été soulignée maintes fois par les parties prenantes au projet.

« Tout ça c'est à calculer, quand on remet le bâtiment à notre client un an en avance, il peut en bénéficier beaucoup et c'est sûr qu'il porte son financement rapidement, tout ça c'est à mettre en perspective... » (Membre de l'équipe de projet)

À la suite de son expérience pendant le projet, le client a affirmé sa satisfaction globale vis-à-vis l'implication des ingénieurs, des architectes et des entrepreneurs dans le processus de construction. Il a précisé que l'avantage le plus apprécié de la construction modulaire était en termes de rapidité d'exécution des travaux de construction.

« Oui, en termes de temps gagné, et en termes de qualité des travaux, oui à ce niveau-là c'est une belle façon de faire des projets de ce type-là... » (Membre de l'équipe de projet)

3.2.2.2 Réduction de la main-d'œuvre sur le chantier dans un contexte de pandémie

Dans ce projet, les travaux se font en parallèle à l'usine et au chantier, ce qui permet de réduire non seulement le nombre des effectifs dans le chantier, mais aussi les risques d'accident. La différence de la fluctuation des effectifs entre le mode de réalisation traditionnel et l'intégration de la construction modulaire dans le projet est illustrée à la Figure 3.3. Cette réduction des effectifs au chantier permet de réduire la circulation dans le chantier et améliore la productivité des équipes. De plus, elle améliore la sécurité et réduit le nombre d'accidents et par conséquent les charges associées à cet égard pour les entrepreneurs. Aucun accident n'ayant causé un arrêt de travail n'a été signalé lors de la réalisation de ce projet. La réduction du nombre d'effectifs sur le chantier de HMR-modulaire a surtout permis de respecter les consignes sanitaires et la distanciation physique sur le chantier.

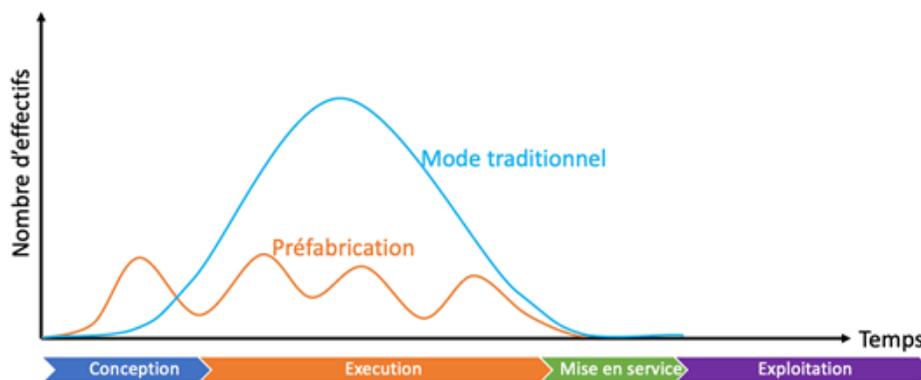


Figure 3.3: Illustration de la réduction des effectifs au chantier par l'approche modulaire

3.2.2.3 Amélioration de la conception

L'approche modulaire a poussé l'équipe de projet à échanger rapidement et à communiquer fréquemment. Le mode de gérance de construction, et le fait que le fabricant était impliqué en amont du processus ont été des éléments clés du succès du projet. La coordination de la conception, soit la communication entre les architectes, les ingénieurs, le sous-traitant électromécanique, le fabricant d'unités modulaires et les autres fournisseurs s'est intensifiée au cours du projet. L'utilisation du BIM a notamment facilité cette communication. Ceci a eu une incidence sur la qualité de la conception et sur la rapidité d'exécution par l'entrepreneur électromécanique.

« Ce projet est un exemple à suivre, la collaboration avec les professionnels et le climat de confiance ont favorisé la créativité lors de la conception et la réalisation. » (Membre de l'équipe de projet)

3.2.2.4 Amélioration du contrôle qualité des livrables

La qualité du produit fini par un contrôle de la fabrication en usine a permis une meilleure traçabilité des composantes et une réduction des contrôles de qualité au chantier. Des conditions optimales ont été assurées à l'usine de fabrication, ce qui a permis d'avoir une meilleure qualité de construction des unités modulaires et une finition supérieure. Deux modèles d'unité modulaires ont été conçus pour répondre aux besoins de ce projet. Donc, il a suffi de contrôler la qualité de chacune d'entre elles.

« Je pense qu'on a un plus grand contrôle en usine, c'est sûr qu'on est dans des conditions optimales, ça, c'est définitif, on est à l'intérieur dans un espace contrôlé, il faut juste faire un petit peu plus attention une fois que les éléments sont livrés au chantier... » (Membre de l'équipe de projet)

3.2.2.5 Amélioration de la productivité des intervenants au projet

Le climat d'entraide et de confiance entre les entrepreneurs a engendré un apport positif sur leur productivité. La perte de productivité par les effectifs sur chantier de construction est une source de conflit entre les intervenants et sujet de réclamation à la fin dans la plupart des projets de construction. Pendant deux semaines, lorsque le nombre d'employés a atteint sa limite maximale de 100 employés, les responsables au chantier ont remarqué une congestion qui a ralenti la productivité. Sans la construction modulaire, cette situation conflictuelle aurait pu durer beaucoup plus longtemps. Par conséquent, la construction hors site (CHS) a permis d'atteindre une progression plus fluide des activités sur le chantier.

Dans ce projet, il faut souligner les avantages et les impacts positifs sur la productivité du fait que les disciplines MEP soient sous la responsabilité de la même entreprise. De plus, les équipes de l'entrepreneur électromécanique se sont déplacées chez le fabricant pour exécuter les travaux MEP des unités modulaires. À son tour, le fabricant des unités modulaires a développé les compétences au sein de son entreprise afin de répondre rapidement aux besoins de son client. Les équipes de travail ont travaillé sans relâche afin de créer un prototype. Par la suite, ils ont assuré la production de 35 chambres durant 5 mois. Pendant ce temps, les travaux de génie civil et structure au chantier ont été exécutés.

« La fabrication en usine permet l'utilisation de la technologie et de l'automatisation pour réduire les coûts de production... » (Membre de l'équipe de projet)

3.2.2.6 Amélioration de la durabilité de construction

La construction modulaire a permis d'améliorer la durabilité de construction. Ainsi, la durée de vie du bâtiment HMR-Modulaire est de 40 à 50 ans. Elle est supérieure ou égale à une construction conventionnelle. Comparativement à la construction conventionnelle, les unités modulaires offrent une meilleure qualité de ventilation et permettent une meilleure prévention et un meilleur contrôle des infections. Les unités modulaires et les panneaux de cloisons intérieurs et de façade sont des processus d'assemblage secs et sont faciles à entretenir. Ils ont tous été construits avec des matériaux recyclables de qualité supérieure et bien contrôlés. De plus, ils ont été conçus d'une manière à pouvoir les retirer de la structure et les déplacer pour être assemblés plus tard dans un autre endroit. Ainsi, ce projet s'inscrit dans le concept de l'économie circulaire. En plus, la construction en usine permet une réduction et un contrôle des déchets.

« La construction en milieu hospitalier est encore dans le mode traditionnel. L'approche modulaire offre la possibilité de réaliser rapidement un bâtiment durable, de qualité, moderne et technique (moins de compromis sur les exigences techniques) ... » (Membre de l'équipe de projet)

3.2.3 Les défis

La réalisation du projet HMR-Modulaire a clairement atteint ses cibles et a permis au client et à l'équipe de projet d'obtenir des bénéfices tangibles. Par contre, la mise en œuvre de la construction modulaire ne s'est pas faite sans difficulté. Les défis liés à la mise en œuvre de la construction modulaire répertoriés sont les suivants :

- Défis liés aux connaissances des systèmes constructifs et de l'approche modulaire;
- Défis liés à l'optimisation de la conception;
- Défis liés à l'utilisation des technologies de l'information;
- Défis liés à la manutention, au transport et à la coordination des opérations sur le site;
- Attentes au niveau des coûts de réalisation.

3.2.3.1 Défis liés aux connaissances des systèmes constructifs et de l'approche modulaire

L'investigation auprès des parties prenantes qui ont été impliquées dans la réalisation du projet a démontré que la construction modulaire était une nouvelle expérience pour la plupart d'entre elles. Elles ont précisé que cette approche de construction était une nouveauté dans le domaine de construction des hôpitaux au Canada. Ce manque d'expérience les a amenées à faire des recherches approfondies sur des projets pilotes dans d'autres pays.

« L'approche de construction modulaire était quand même nouvelle pour nous. À partir des recherches qu'on a faites, on a vu que c'était nouveau dans le milieu hospitalier au Canada, il y a quelques compagnies américaines qui avaient certains modèles de chambres préfabriquées pour les hôpitaux... » (Membre de l'équipe de projet)

Des efforts supplémentaires ont été nécessaires au début du projet, le but était d'assurer une coordination efficace entre les différents intervenants. Il a fallu faire plusieurs échanges d'informations entre les différents acteurs et l'entrepreneur spécialisé en construction modulaire afin d'identifier les exigences liées à la fabrication des chambres. Selon le maître d'ouvrage, l'effort supplémentaire était bien justifié, car l'approche de construction modulaire a permis d'accélérer les processus de réalisation du projet.

3.2.3.2 Défis liés à l'optimisation de la conception

L'approche de construction modulaire n'est pas nouvelle pour tous les intervenants dans ce projet. De l'aveu de certains membres de l'équipe de projet, certains aspects du projet auraient pu être optimisés avec un peu plus de temps et une réduction de la courbe d'apprentissage. Si les professionnels avaient eu un peu plus de temps, ils auraient pu optimiser la conception. En effet, ils auraient probablement pu se servir de la structure des unités modulaires en les superposant l'une sur l'autre au lieu de construire une superstructure en acier et béton pour les insérer dans cette dernière. L'utilisation du BIM et la grande coordination entre les professionnels sont nécessaires pour l'optimisation de la conception. L'unicité, la complexité et le besoin accru du client les ont poussés à construire rapidement le projet sans même avoir le temps nécessaire de bien choisir le mode contractuel optimal adapté. La grande collaboration entre les acteurs a permis de surpasser certaines difficultés dans ce projet.

« Les équipes en place ne sont pas familiarisées avec l'approche modulaire et tous les produits sur le marché. Plus d'analyse est nécessaire pour optimiser la conception, qu'ils auraient dû être inclus dans le projet plus tôt pour pouvoir optimiser la conception (coordination entre structure et architecture). Il faut continuer le développement dans le sens d'optimiser la conception pour répondre aux exigences techniques et le processus de construction pour réduire les coûts... » (Membre de l'équipe de projet)

3.2.3.3 Défis liés à l'utilisation des technologies de l'information et interopérabilité des outils

Bien que le BIM ait été utilisé dans ce projet pour le développement du concept et de la documentation ainsi que la coordination interdisciplinaire, certaines difficultés ont été rencontrées notamment au niveau de l'optimisation des flux d'information au sein de l'équipe de projet. Le projet a été modélisé par l'équipe de conception, notamment au niveau de l'architecture et de la structure, et après, principalement par l'entrepreneur électromécanique pour modéliser les systèmes mécaniques, électriques et plomberies (MEP). L'entrepreneur électromécanique a entièrement profité de l'usage du BIM pour la préfabrication hors site, l'installation et l'assemblage des modules au chantier. Or, le fabricant d'unités modulaires n'a pas pu pleinement bénéficier des modèles d'informations produits par l'équipe, faute d'accès aux logiciels appropriés. Entre autres, certaines parties des unités modulaires n'ont pas été modélisées telles que fabriquées pour insertion dans la maquette de conception, ce qui ne permettait pas à l'équipe d'effectuer une coordination fine. De plus, des problèmes d'interopérabilité entre les outils de conception et les outils de mise en production sont survenus, d'où l'importance d'utiliser le BIM dans l'optimisation des flux d'information en répondant au besoin d'intégration de la chaîne d'approvisionnement dans ce projet.

« Nous avons tout modélisé pour faciliter pour la communication, la fabrication et l'installation sur chantier. Ni le fabricant d'unités modulaires ni l'ingénieur MEP n'ont cette expertise. Il faut réaliser une conception 100 % BIM du début à la fin, pas de CAD pour tous les intervenants. » (Membre de l'équipe de projet)

3.2.3.4 Défis liés à la manutention au transport et à la coordination des opérations

sur le site

La construction modulaire est limitée par deux défis logistiques majeurs, soit la manutention et le transport. La manutention est limitée par la capacité des grues, alors que le transport est limité par les restrictions et les dimensions des camions. Les opérations intensives de levage lourd impliquées lors de la construction et l'assemblage constituent de grands défis techniques de manipulation sur site. Donc, il est important d'apporter la profonde expérience des entreprises en matière d'expédition et de logistique pour faciliter l'appropriation de la construction modulaire dans les projets. De plus, le BIM est indispensable pour analyser et valider la constructibilité. La figure 4 illustre les opérations d'insertion d'unités modulaires dans la structure du bâtiment.



Figure 3.4: Levage et positionnement des chambres modulaires

« Il faut prévoir des grues au chantier pour la manipulation et l'installation de gros volumes au chantier. Il faut avoir une expertise de planification et de transport de ces gros volumes au chantier. » (Membre de l'équipe de projet)

3.2.3.5 Attentes par rapport des coûts de réalisation

Il serait difficile d'estimer avec précision les coûts supplémentaires dans ce projet, surtout dans le contexte particulier de la pandémie. D'ailleurs, des coûts supplémentaires, appelés frais COVID, sont inclus dans le coût du projet. De plus, le respect des consignes sanitaires et de la distanciation devraient avoir eu des effets sur le coût global du projet. Tout de même, précisons que dans ce projet, la durée de réalisation est considérablement raccourcie. Il est évident que l'urgence de livrer en 8 mois un projet qui nécessite pratiquement 24 mois en temps normal n'a pas permis aux concepteurs d'optimiser la conception. Il est nécessaire de préciser d'emblée que le moteur principal de l'utilisation de la construction hors site était l'échéancier. Donc, il n'y avait pas d'attente au sujet de la réduction des coûts liés à l'approche modulaire. Ainsi, la mise en place de cette approche dans le projet HMR-Modulaire était plus coûteuse qu'une approche conventionnelle. Cependant, ce surcoût était justifié par l'urgence dans laquelle le projet devait être réalisé de même que le niveau de qualité attendu.

Cela étant dit, l'entrepreneur général a mentionné que les coûts supplémentaires pourraient être optimisés dans le futur à la suite de l'expérience acquise durant le projet HMR-Modulaire. Il a précisé qu'en termes de rentabilité, le projet pourrait être considéré comme réussi, il suffit de valoriser les avantages de la construction modulaire en suivant une méthode permettant d'analyser les coûts et les bénéfices.

« Si on avait eu plus de temps pour faire la conception du projet, la structure aurait pu être optimisée en collaboration avec les ingénieurs, ce qui aurait probablement fait économiser des coûts... » (Membre de l'équipe de projet)

L'implication précoce des entrepreneurs et des fabricants dans la conception apporte une contribution positive dans le déroulement du projet et réduit considérablement les ordres de changement (ODC), ce qui mène à la réflexion concernant le mode contractuel du projet. La participation des entrepreneurs en amont à la conception, à la planification et à l'estimation des coûts a permis d'innover dans ce projet à de multiples occasions. L'implication du sous-traitant et du fournisseur avec les professionnels dans la conception d'un plancher surélevé a permis de faire des économies de 50 % du coût de cette activité. La proposition de ce type de plancher est le fruit de la communication entre les acteurs du projet. L'implication précoce permet aux entrepreneurs de faire valoir leur méthode de réalisation et aux fournisseurs de présenter les diverses possibilités des matériaux pour permettre au client de faire un choix éclairé. La collaboration précoce entre les professionnels permet de sauver des coûts en plus d'innover dans les projets de construction.

3.2.3.6 Leçons apprises

Après avoir été impliqué dans la réalisation des travaux d'agrandissement de l'Hôpital Maisonneuve-Rosemont, l'entrepreneur spécialisé dans la construction modulaire a réussi à améliorer la productivité au sein de son entreprise.

À la suite de l'expérience acquise en construction modulaire, les architectes ont réussi à développer leurs pratiques. Ils ont pu faire des tests de qualité chez le fabricant des unités modulaires, ce processus de contrôle fait en usine est rendu possible grâce à la flexibilité du mode de production assuré par le fabricant.

« Aujourd’hui, on sort une chambre par semaine, on est capable d’en commencer dix en parallèle. On a travaillé en simultané, nous avons deux usines. Une qui fabrique les panneaux modulaires et l’autre qui fait l’assemblage... » (Membre de l’équipe de projet)

Vu les contraintes du projet, la construction modulaire dans le cadre du projet HMR-Modulaire était un choix naturel et s’est avérée judicieuse. De plus, beaucoup de leçons apprises peuvent être tirées de ce projet, entre autres :

- L’influence du mode d’approvisionnement sur la capacité d’engager les bons joueurs au bon moment;
- L’approche de conception qui diffère des approches traditionnelles, surtout en ce qui a trait à l’optimisation des solutions. Une approche de conception pour la fabrication et l’assemblage (DfMA) est à favoriser;
- Le besoin de coordination accrue entre les parties prenantes, tant au niveau de la conception qu’au niveau des opérations sur le chantier – le BIM est indispensable pour cela;
- Le besoin en formation et en accroissement de la compétence en matière de construction modulaire sur toutes ses facettes;
- Les changements imposés aux modèles d’affaires des entreprises œuvrant dans ce domaine;
- Le besoin d’intégration plus serrée de la chaîne d’approvisionnement, notamment au niveau de l’optimisation des flux d’information via le BIM;
- Les besoins en interopérabilité au niveau des pratiques d’affaires, des processus et des flux d’information.

Pour finir, le projet a été réalisé dans les délais prescrits tout en atteignant les niveaux de qualité attendus. L’ensemble des acteurs du projet sont largement satisfaits et recommenceraient ou même envisagent certainement de recommencer un projet de la sorte, tout en considérant les leçons apprises.

3.3 Étude de cas 02 : Système de construction abritée en hauteur sans grue sur un projet de résidence étudiante

3.3.1 Description de l’étude de cas

Dans le cadre d’un projet de tour multi résidentielle au centre-ville de Montréal, le développeur du projet (le client) a décidé d’aller de l’avant avec un système de construction abritée en hauteur sans grue étant donnée les contraintes du site. Il s’agit d’une solution relativement nouvelle sur le marché, que l’on retrouve dans un exemple québécois : Upbrella (le fournisseur).



Figure 3.5: Système de construction abritée en hauteur

Le fournisseur propose la mise en place d'un système de levage sans grue et abrité sur la périphérie du bâtiment en construction. Le système s'élève au fur et à mesure que les étages se construisent. Cette technologie permet la construction de planchers collaborants (ou COMBSLAM), évitant ainsi le recours à des planchers à poutrelles. Une fois cette partie de l'étage terminée, le système permet de hisser et d'installer les éléments d'enveloppe à l'abri. Cette innovation peut facilement être installée sur des projets d'immeubles dans lesquels l'usage de grues est contraignant. Le système permet aussi de protéger le chantier des intempéries tel que mentionné par le fournisseur :

« Le positionnement du [Fournisseur], c'est la construction abritée. » (Fournisseur)

L'implantation et l'utilisation de cette solution demande une certaine adaptation de la part de l'équipe du projet et des travailleurs. Étant donné qu'elle doit s'adapter au projet, une courbe d'apprentissage a été distinguée dans les chantiers déjà exécutés. Au fur et à mesure de l'élévation des étages, l'efficacité du système augmente. Cela rejoint l'avis du fournisseur concernant le nombre d'étages minimum pour que le système soit rentable pour le projet :

« 10 étages, c'est vraiment le minimum en termes d'efficacité économique pour [la solution du fournisseur]. Étant donné que je déploie de l'équipement pour faire du plancher répétitif, que je fasse 10 ou 25 étages, c'est toujours le même équipement. Donc les rendements économiques sont meilleurs si je peux en faire plus. » (Fournisseur)

Le système est adaptable en fonction des projets et comporte les services d'ingénierie, de matériel et de support. Il doit donc participer au projet en amont :

« L'équipe du [Fournisseur] ne fait pas que louer du matériel. Ils vendent une ingénierie complète et une participation à trouver des solutions pour que le projet s'exécute au mieux. » (Gérant de projet)

La technologie a été utilisée à quelques reprises sur des chantiers au centre-ville de Montréal. Parmi eux, le projet de construction d'une résidence étudiante de 18 étages qui faisait face à des enjeux d'espace public restreint et des charges importantes à soulever, à savoir, des panneaux en béton préfabriqués pour

l'enveloppe du bâtiment. Le système sera implanté à partir du 6^e étage du projet puisque celui-ci comporte une façade existante. La participation du fournisseur pour ce chantier vient de l'initiative du client et l'entreprise a suggéré de joindre au projet des sous-traitants familiers avec les planchers collaborants et leur technologie.



Figure 3.6: Système de planchers collaborants adaptables (Source : Fournisseur)

Le système de base du fournisseur a été adapté grâce à la collaboration avec le gérant de projet par le développement et le montage d'une plateforme adaptée à la voie de livraison des camions, ainsi que la mise en place d'un système incluant un monorail sur tout le contour du bâtiment, servant notamment pour le levage des panneaux et autres charges. Comme sur les différents projets auxquels il est appliqué, le système prend de la hauteur en suivant les travaux d'élévation du bâtiment. Un monte-charge a également été installé pour les aménagements intérieurs du bâtiment.

L'utilisation de ce système dans un projet de construction nécessite quelques adaptations techniques. En effet, pour le bon déroulement des levées avec cette technologie, la structure de toit doit être construite en premier. L'équipe de projet doit donc prendre en compte sa structure et l'adapter au système, pour qu'il puisse soulever le toit au fur et à mesure que la structure est érigée. Ainsi, le toit préconstruit en addition avec le système permet des travaux complètement abrités.

3.3.2 Les bénéfices

Au stade actuel du projet, aucuns bénéfices de coûts et de temps n'ont encore pu être mesurés. Bien que la phase exécution du projet n'ait pas encore débuté, plusieurs avantages de la technologie du fournisseur sont déjà visibles dans la planification et la conception du bâtiment.

- Amélioration de la productivité

L'abri des matériaux et des travailleurs permet un travail plus productif, notamment par la protection du bâtiment des intempéries et l'amélioration de la sécurité sur le chantier pour les travaux en hauteur.

« Pour les échafaudages, on a l'avantage d'avoir l'enveloppe fermée dans sa totalité. Cela protège notamment des intempéries. » (Gérant de projet)

De plus, les finitions des étages pourront débuter plus tôt dans la planification du projet puisque le système permet de construire la structure et l'enveloppe de l'étage avant de passer au niveau supérieur. Les entrepreneurs spécialisés, qui interviennent plus couramment quand la structure est finalisée, pourront débuter leurs travaux au fur et à mesure que les étages du bâtiment s'élèveront.

- Travail en milieu urbain et en espace restreint

Cette technologie comporte plusieurs avantages pour les chantiers urbains. Tout d'abord, les perturbations de circulation liées à la présence des camions de livraison et des engins de construction seront limitées étant donné l'intégration d'une baie de livraison reliée au système de levage. Par ailleurs, grâce au levage de panneaux en béton préfabriqué, le nombre de bétonnières devant accéder au chantier sera limité. Ensuite, ce système de levage engendre des avantages sur l'emprise au sol du chantier. L'absence de grue et d'un monte-charge permet de reconsidérer les espaces de travail. L'usage de la préfabrication des éléments d'enveloppe et de la livraison juste à temps (*just-in-time*) limite le stockage des matériaux et des équipements.

- Hissage du matériel

Pouvoir hisser des ouvrages, des matériaux et des équipements sans avoir recours à une grue dans un espace restreint demeure un avantage indéniable de cette technologie. Le monorail sur tout le périmètre du bâtiment permet de limiter les contraintes au niveau des zones de stockage et de déchargement. Le monte-charge ajouté au système est également complémentaire pour la levée des équipements et les meubles lors de l'aménagement du bâtiment, ainsi que la montée des travailleurs dans les étages en attendant l'installation des ascenseurs.

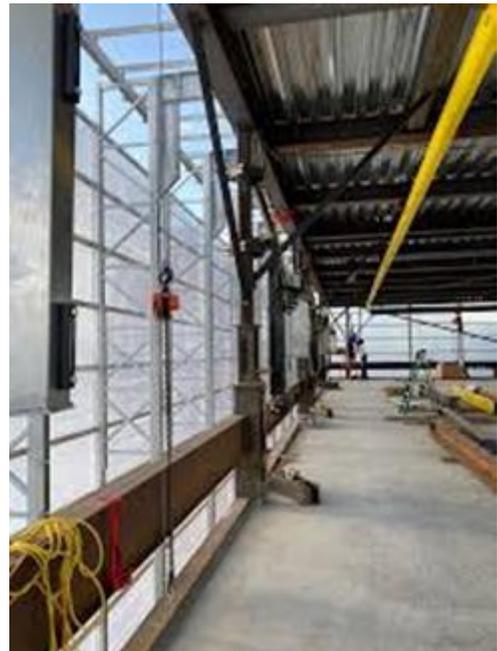


Figure 3.7: Système de monorail

3.3.3 Les défis

- Adaptation de la structure du bâtiment au système

Comme mentionné précédemment, lorsqu'une équipe de projet envisage l'utilisation de ce système, une adaptation des structures du bâtiment est nécessaire, notamment pour le toit que le système doit pouvoir soulever lors des levées. Cela complique l'application de cette technologie dans certains chantiers, comme les projets forfaitaires publics. Cela demande également une certaine réactivité et une écoute de la part de l'équipe de conception.

« La structure du toit doit être conçue en conséquence, parce qu'elle reprend certaines charges de l'abri. Elle s'appliquera donc plus dans des projets dans lesquels on peut impliquer le système rapidement dans le processus [de conception] pour l'intégrer au projet. Sinon, dans un projet forfaitaire public, le client devra demander à son ingénieur de modifier la conception de la toiture pour qu'elle soit capable de prendre les charges de torsion pendant qu'on monte. Ça serait plus difficile. » (Gérant de projet)

- Coordination par rapport aux charges

Cette solution technologique propose une solution de rechange pour élever une construction sans grue. Tout comme cet équipement, le système du fournisseur se limite en charges et en portée. Une bonne préparation de chantier est donc nécessaire pour que le système assure tous les levages du projet, en adaptant si nécessaire les ouvrages à lever lors d'une révision de la conception. Le stockage sur le chantier est également à étudier dans cette préparation.

« Il faut s'assurer de savoir ce que l'on va ériger dès maintenant, de connaître les charges [...]. C'est important de limiter les dimensions des panneaux de béton par rapport aux charges que le système peut prendre. Cela doit vraiment être pris en compte tôt dans le processus. » (Gérant de projet)

- Moins bonne performance sur les petites hauteurs ou dans les projets non répétitifs

La performance est meilleure si le projet comporte suffisamment d'étages et si la construction est répétitive. Plus le bâtiment est de faible hauteur ou comporte des irrégularités, moins l'utilisation de cette technologie sera rentable pour le projet. La hausse de performance de ce système par rapport à la construction traditionnelle se distingue donc sur le moyen terme.

« Pour les deux ou trois premiers étages, c'est sûr qu'il y aura une courbe d'apprentissage. En montant, on va réduire le nombre de jours par étage. Donc, si un projet a juste 4 ou 5 étages, tu auras à peine monté la courbe d'apprentissage, tu n'auras pas atteint son pic. » (Gérant de projet)

3.3.4 Conclusion

L'approche de construction abritée en hauteur sans grue se fait connaître à travers le monde. Elle est un exemple de l'ingéniosité et de l'entrepreneuriat québécois dans le domaine de la construction. Bien qu'adaptées à certains types de projets précis, soit des constructions de plus de 10 étages en milieu urbain, avec la densification des villes et la rénovation de parcs immobiliers importants dans les années à venir, ces solutions envisagent des réponses novatrices à des défis réels et grandissants. Ce genre d'option peut avoir un impact véritable sur un ensemble d'indicateurs de performance, notamment la productivité en construction.

De façon concrète, la CI implique une série de nouvelles technologies et de processus qui viennent augmenter les capacités d'équipements de compaction traditionnels. Ainsi, l'équipement est muni des modules mentionnés ci-dessus incluant un moniteur qui permet de visualiser les données provenant des capteurs (température, vibration, position, etc.). Ceci permet à l'opérateur en cabine de visualiser l'état et les résultats des passages de l'équipement afin de s'assurer d'une couverture adéquate. Ceci permet de conserver un registre des résultats de la compaction. De plus, les modules de géopositionnement permettent de coordonner une flotte d'équipement.



Figure 3.9: Exemple d'équipement de compaction avec affichage d'indice de compaction (source: www.constructionequipment.com)

3.4.2 Les bénéfices

Les bénéfices répertoriés de la CI visent principalement une assurance de la qualité dans la compaction des diverses couches d'une infrastructure routière, ce qui affecte la durabilité de celle-ci ainsi qu'une optimisation des opérations de mise en œuvre, ce qui affecte la productivité des entrepreneurs.

Du côté de la qualité de la mise en œuvre, selon les personnes interviewées, cette amélioration est attribuable aux éléments suivants :

- Une amélioration de l'uniformité et de la couverture de compactage via un contrôle et une visualisation accrue.
- Une amélioration de la densité et de la profondeur de compactage.
- Permet d'apporter des correctifs avant de placer des couches supplémentaires.
- Une amélioration de la surveillance et du suivi des travaux.
- Un enregistrement continu des données et des valeurs permettant de conserver un historique des données de résultats de compaction qui sont géoréférencés.

Conséquemment, par ces améliorations, il est attendu que la qualité des routes soit bonifiée, réduisant ainsi les coûts de maintenance et de réparation.

Du côté de l'augmentation de la productivité, selon les personnes interviewées, cette amélioration est attribuable aux éléments suivants :

- Une meilleure planification et suivi des travaux via une centralisation des données.
- Une optimisation des opérations en fonction des résultats de compaction obtenus en temps réel.
- Une identification des zones compactées non uniformes et des zones à problèmes éventuels.
- Une atteinte optimale des normes et des résultats de compaction, permettant de sauver temps et argent liés à la sur-compaction.

Selon un cas sur un projet aux États-Unis, une amélioration de 40 % de la productivité a été mesurée liée à l'utilisation de la CI. De façon précise, l'opérateur de rouleaux a couvert plus de terrain (380 000 pi.ca vs. 316 000 pi.ca) en moins de temps (18 heures vs. 21 heures) pour des résultats de compaction similaire (Moore, 2015).

3.4.3 Les défis

La CI existe depuis les années 1970 selon Liu et al. (2019), cependant les avancées technologiques récentes, soit l'infonuagique et les applications permettant la centralisation des données, permettent aujourd'hui d'opérationnaliser la technologie de façon efficace. Cela étant dit, de nombreux défis persistent dans la mise en œuvre de la CI au Québec. Parmi ces défis :

- L'obtention de fichiers électroniques de CAO, soit en raison de l'impossibilité de les obtenir de la part des donneurs d'ouvrage, d'un refus de la part des professionnels dans le projet ou dans le cas d'interventions sur des routes existantes où les informations ne sont pas disponibles.
- Les limites de la technologie demeurent quant à la précision visuelle (résolution de l'écran) et la précision de la mesure de compaction pour certaines couches de revêtement.
- Le manque d'incitatifs pour la valeur ajoutée et l'innovation dans l'exécution de contrats, notamment dus à :
 - L'élimination des bonus à la performance par les principaux donneurs d'ouvrage publics.
 - Le recours au plus bas soumissionnaire conforme.
- La réticence de partage d'expérience entre les entreprises pour échanger sur les meilleures pratiques liées à la mise en œuvre de la CI.
- Le coût des équipements, soit pour l'achat d'équipements neufs dotés des modules ou de la mise au niveau d'équipements existants.
- Les besoins additionnels en matière de main d'œuvre pour assurer la mise en œuvre de la CI, notamment au niveau de l'arpentage afin d'assurer un positionnement adéquat de l'équipement.

3.4.4 Conclusion

La CI présente un potentiel intéressant pour assurer des infrastructures routières de qualité et durables pour le Québec. De nombreux bénéfices quant à la qualité de mise en œuvre, de suivi des travaux et de la productivité des entreprises œuvrant dans le secteur ont été identifiés par le passé. Cependant, certains défis demeurent, ce qui limite le taux d'adoption au Québec. Au sud de la frontière, de nombreux organismes de transport, dont la Federal Highway Administration (FHWA) et certains départements des transports des États (DOT) (par exemple, le Minnesota, la Californie et le Missouri), étudient ou même imposent l'utilisation de la CI dans l'exécution de leurs mandats (Rahman et al., 2021). Ceci a pour effet

de mener la demande pour cette technologie. Il reste encore du travail à faire pour comprendre pleinement les implications de cette technologie dans le contexte québécois. C'est la raison pour laquelle l'ACRGTO, en plus de formuler des recommandations pour la mise en œuvre de cette technologie auprès des donneurs d'ouvrage, propose également des projets pilotes additionnels. Cette technologie reste donc à surveiller dans les prochaines années.

3.5 Étude de cas 04 : L'inspection des ouvrages d'art par drone sur le projet de l'échangeur Turcot

3.5.1 Description de l'étude de cas

Dans le cadre du mégaprojet de l'échangeur Turcot à Montréal, un projet de 3,67 milliards de dollars s'échelonnant sur une période de 10 ans (2011 à 2021)¹, plus de 56 structures et 145 kilomètres de voies permanentes devaient être conçues, réalisées, et inspectées avant d'être livrées au ministère des Transports du Québec (MTQ) pour exploitation. La portion du projet de l'échangeur Turcot dont il est question dans l'étude de cas a été livrée en mode conception-construction. Ainsi, un certificateur indépendant (CI) a été sélectionné comme expert indépendant pour réaliser les attestations lors de la phase de conception et de construction, conformément au processus d'attestation contractuel de l'ouvrage. Les attestations d'achèvement de la construction du CI passent par l'inspection des ouvrages complétés qui s'assure de la conformité des ouvrages d'art tels que construits aux plans et devis émis pour construction. L'ingénieur principal des structures du Certificateur indépendant pour la phase construction en responsable de l'inspection a été interviewé dans le cadre de cette étude de cas.

Dans le cadre de ses fonctions, l'inspecteur doit s'approcher suffisamment près de l'ouvrage afin de procéder à une inspection visuelle dans le but de repérer tout défaut ou toute inconsistance. Il peut s'agir de défauts, de fissures, d'erreurs d'installation, de présence de rouille etc. Ceux-ci sont relevés sur une tablette numérique, qui permet de prendre une photo du défaut et de la localiser sur les plans numérisés partagés sur une plateforme de gestion documentaire. Afin de permettre à l'inspecteur de se rapprocher des ouvrages, dans la plupart des cas, une nacelle doit être utilisée. Ceci implique la sécurisation des lieux et la mise en place d'infrastructure de support temporaire au besoin. À noter que dans le cadre du projet Turcot, des représentants des trois entités, soit le consortium, le CI et le MTQ étaient présents tout au long des inspections d'achèvements de chacun des éléments payables.

Dans le projet de l'échangeur Turcot (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), plusieurs des ouvrages sont localisés au-dessus de voies carrossables ou ferroviaires, de cours d'eau ou dans des terrains escarpés, ils sont donc situés à une hauteur bien au-dessus du niveau du sol. À cet effet, le projet fait appel à un nombre important de murs de soutènement. Dans son mandat, le consortium assurant l'inspection de l'ouvrage devait inspecter les 56 structures, de même que les murs de soutènement. À eux seuls, ils auraient exigé une mobilisation considérable en termes d'équipement et de ressources. La firme a donc opté pour l'utilisation d'un drone pour effectuer l'inspection. C'est donc dire que l'élément moteur dans le cas de l'implantation de l'innovation est le désir d'une entreprise (ou d'un consortium) d'optimiser ses opérations sur le site.

¹ <https://www.turcot.transports.gouv.qc.ca/>



Figure 3.10 - Le projet de l'échangeur Turcot (Source: Google Earth)

La solution retenue était un drone muni d'une caméra vidéo haute définition (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Celui-ci était opéré manuellement par un opérateur certifié. Les représentants des trois parties étaient tous présents et ils ont pu regarder (ou visionner) la retransmission de la vidéo prise par le drone soit sur une tablette ou à l'aide de casque de réalité virtuelle pour drone. Ils pouvaient ainsi guider l'opérateur si jamais une anomalie était remarquée (identifiée) pour investiguer davantage. Tous les vols étaient enregistrés et donc une trace continue des inspections était disponible. La caméra montée sur le drone avait la capacité de retransmettre vers un casque de visionnement immersif (réalité virtuelle) qui permettait en option de contrôler ladite caméra avec les mouvements de la tête. Puisque la caméra devait être utilisée par l'opérateur pour la navigation, cette option n'a pas été utilisée dans le cadre de ce projet.



Figure 3.11 Drone utilisé pour l'inspection des structures. Photo : ministère des Transports.

3.5.1 Les bénéfices

Le choix d'utiliser un drone pour les inspections des ouvrages d'art a été motivé par plusieurs éléments. Ceux-ci sont énumérés ci-dessous :

- Assurer la sécurité du personnel œuvrant à l'inspection ainsi que les individus aux abords du site d'inspection afin d'éliminer le recours aux équipements, tels que les nacelles, et aux infrastructures temporaires telles que les échafaudages. L'utilisation du drone limite la fermeture de voies de circulation ou de leur protection, donc cela réduit les entraves à la circulation automobile. De plus, l'utilisation du drone facilite beaucoup l'accès aux ouvrages situés dans les environs des voies ferroviaires, qui nécessitait auparavant une coordination étroite pour accéder et permettre le passage des trains.
- Assurer l'efficacité, voire optimiser le processus d'inspection en minimisant le temps de mise en place et de déplacement dans le cadre de l'inspection. Ainsi, l'usage du drone permet de couvrir

une surface de terrain plus importante en moins de temps, tout en facilitant l'accès aux endroits difficiles. (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

- Faciliter la logistique d'inspection à certains égards, notamment en termes de mobilisation des équipements et en planification du personnel assistant aux inspections. Il est envisageable qu'avec la retransmission vidéo des images du site, il ne soit plus nécessaire d'être directement sur le terrain, ainsi l'inspection pourrait se faire du bureau.
- Accroître la traçabilité du processus d'inspection en permettant la capture de vidéo offrant la possibilité de revenir sur certains éléments par la suite. De plus, les images capturées peuvent être géoréférencées, donc il est possible de les positionner sur les cartes et les systèmes d'informations géographiques (SIG).



Figure 3.12 - Exemple de photo provenant du drone (Source: consortium Arup/FNX Innov)

3.5.2 Les défis

Bien que les avantages de l'utilisation des drones pour l'inspection sur le projet de l'échangeur Turcot étaient considérables, plusieurs défis ont été rencontrés et persistent dans l'utilisation des drones pour l'inspection des ouvrages d'art. Ceux-ci sont présentés ci-dessous :

- L'utilisation du drone ne s'applique pas à tous les types d'inspection. C'est notamment le cas pour les inspections qui nécessitent un contact physique avec l'infrastructure, notamment dans le type d'inspection « main sur la pièce ». Ce type d'inspection implique l'utilisation d'un « fissuromètre » pour vérifier que la taille d'une fissure ne dépasse pas la limite de l'article 8.12.3.1 la norme CSA S6-acceptable (+/- 0.25mm dans le cas présent). Ce type de relevé est difficile, voire impossible avec un drone muni d'une caméra. Par contre, d'autres technologies existent, notamment le *scan lidar*, qui permettraient de palier ce défi (Kim et al., 2015). Dans le cas du projet de l'échangeur Turcot, les dalle de tablier et les murs de soutènement étaient préfabriquées et donc les possibilités de fissuration étaient minimes puisque le type de béton utilisé pour la fabrication combiné aux conditions contrôlées d'une usine permettent d'avoir des pièces exemptent de fissuration. De plus les pièces étaient contrôlées à la sortie de l'usine et lors de la réception au chantier.

- Vu l'impossibilité de toucher les ouvrages, il se peut qu'il soit difficile de distinguer certains défauts dus à la saleté ou autre raison. De plus, la forme ou la difficulté d'accès à certains endroits peut limiter la visibilité sur celles-ci.

L'utilisation du drone nécessite des compétences et certifications particulières. Il faut entre autres un permis pour opérer le drone. De plus, dans certains secteurs des autorisations spéciales sont nécessaires, près des aéroports par exemple. Il est nécessaire de fournir les plans de vol et donc de bien les planifier à l'avance (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

- L'impact de la météo est non-négligeable. De manière générale, les drones ne peuvent pas voler dans la pluie. Le vent est également un facteur important dans leur mise en œuvre. De plus, leur autonomie est grandement affectée par temps froid.

La technologie de drone et de capture de la réalité, en l'occurrence ici la vidéo, ont encore plusieurs limites, bien que celles-ci soient outrepassées avec les avancées en la matière. Les questions de poids et de traitement des données posent un défi, avec la quantité de données qui est captée lors de l'inspection et qui doit être traitée par la suite.

- Finalement, et dans une moindre mesure, les coûts d'acquisition et de mise en œuvre de la technologie sont un point à considérer. Cependant, le coût de la technologie est de moins en moins important.



Figure 3.13 – Lieu d'atterrissage pour le drone (Source: consortium Arup/FNX Innov)

3.5.3 Conclusion

L'utilisation des drones dans le domaine de la construction n'est pas un phénomène récent. On recense (constate) une accélération de l'utilisation de cette technologie dans les dernières années due entre autres à la réduction des coûts d'acquisition de l'équipement (Martinez et al., 2020). Ainsi, la présence des drones sur les chantiers ne cessera d'augmenter au cours des prochaines années, permettant un nombre d'utilisations croissant, dont le contrôle qualité, la santé et la sécurité, le suivi des travaux, l'arpentage, etc. (Greenwood et al., 2019).

Bien que ceci entraîne des défis, comme mentionné, les avancées en matière de technologies de capture de réalité (lidar, photogrammétrie, etc.) ne cessent d'augmenter, ce qui accroît la qualité des captures et la fidélité des rendus (Elghaish et al., 2020). Au niveau du traitement des données, l'analyse des images utilisant la vision par ordinateur et l'apprentissage machine deviennent de plus en plus accessibles et peuvent donc grandement améliorer le processus en l'automatisant.

Avec la programmation des trajectoires de vol, les capacités de captures de réalité avancée et l'automatisation de l'analyse des données captées, l'utilisation des drones promet d'accroître l'efficacité et la qualité des suivis de chantier et des actifs bâtis. L'étendue des usages potentiels des drones devrait s'accroître dans les années à venir. Il est possible d'entrevoir un temps où ces processus, qui sont laborieux et vulnérables aux erreurs humaines, soient entièrement automatisés. Notamment, il serait possible d'envisager un séquençage d'inspection des infrastructures sur une base annuelle, où la capture et l'analyse des données se feraient de façon entièrement automatisée. Ceci permettrait, entre autres, un suivi plus serré de l'état des infrastructures, qui combiné avec l'intelligence artificielle, permettraient l'entretien préventif de celles-ci.

Dans ce cas, l'usage du drone pour procéder aux inspections des ouvrages d'art dans le cadre du projet Turcot a permis de rendre ce processus clé plus efficace et plus sécuritaire. De plus, les données captées offrent une documentation exhaustive des ouvrages et une archive numérique permettant de revisiter l'ouvrage au moment de l'inspection. Ainsi, il est possible d'indiquer que la mise en œuvre de l'innovation technologique dans ce cas-ci a atteint ses objectifs et a rencontré les résultats escomptés.

3.6 Conclusion

Cette section du rapport a présenté les résultats de quatre études de cas portant sur la mise en œuvre d'innovations technologiques précises. Les études de cas présentent un échantillon de différentes innovations pouvant être déployées sur le site pour améliorer la productivité et la performance globale du projet. Les études de cas ont permis de confirmer les tendances identifiées dans le sondage en matière d'éléments moteurs, de barrières et d'avantages liés à la mise en œuvre de celles-ci.

Un élément qui ressort de l'analyse des études de cas est l'importance du client comme élément moteur ou comme facilitateur de la mise en œuvre de l'innovation technologique. Dans les études de cas 01 et 02, l'impulsion pour l'innovation provenait du client tandis que dans les études de cas 03 et 04, la pertinence et le retour sur investissement étaient liés à la volonté du client. De plus, chacune des études de cas discutées démontre un impact positif, tangible, sur la productivité, en offrant un environnement de travail plus sécuritaire et propice aux ouvriers ou en permettant une planification et un suivi plus serré des travaux.

Évidemment, il ne s'agit ici que d'un survol de quelques innovations et donc, une recherche plus approfondie serait avantageuse afin de documenter un plus large éventail d'innovations, leur mise en œuvre et leur impact. Cela étant dit, cette étude met les bases méthodologiques pour une telle étude.

4 Conclusion

Ce rapport porte sur l'innovation technologique et son impact sur l'industrie québécoise de la construction, notamment au niveau de la productivité. L'étude qui y est présentée a permis de mieux comprendre les dynamiques derrière le processus d'innovation et de sa mise en œuvre. Longtemps vu

comme étant un aspect crucial dans l'accroissement de la performance d'un des secteurs en importance pour l'économie québécoise, l'innovation en construction et la mise en œuvre des technologies semblent vouloir s'accélérer. En effet, l'étude a permis de dégager un réel lien entre l'innovation technologique et l'accroissement de la productivité et de la performance des projets. Elle a également permis d'identifier les éléments moteurs, soit où il est important de focaliser pour faciliter l'innovation, ainsi que les barrières et les défis auxquels font face les entreprises québécoises œuvrant dans l'industrie de la construction. L'appétit et la volonté de celles-ci pour l'innovation sont clairs.

Cela étant dit, il reste passablement beaucoup de travail à faire afin d'accompagner les entreprises œuvrant dans ce domaine. Selon les recherches effectuées dans le cadre de ce rapport, voici quelques pistes de réflexion pour améliorer l'implantation d'innovations et de technologies au sein de l'industrie québécoise de la construction :

- Centraliser la veille technologique afin de mettre en commun les ressources nécessaires pour identifier et suivre l'évolution des innovations et des technologies. Ceci est déjà en cours au sein des associations chapeautant l'étude.
- Offrir de l'accompagnement ciblé pour la mise en œuvre et amortir les coûts de l'innovation à plusieurs entreprises.
- Mettre en place des incitatifs à l'innovation dans le cadre de projets publics.
- Favoriser les modes d'approvisionnement dits intégrés qui favorisent l'apport des entrepreneurs généraux et spécialisés en amont du projet.

Par ailleurs, il convient de dresser les limites de l'étude, notamment au niveau du sondage et des études de cas. Comme mentionné, dans les deux cas, un échantillonnage plus large serait intéressant. Au niveau du sondage, il serait intéressant d'ouvrir le sondage aux autres parties prenantes de l'industrie. De plus, il serait envisageable d'étendre l'échantillon au reste du Canada. Du côté des études de cas, plus de 100 innovations ont été répertoriées dans le sondage, tandis que quatre sont couvertes dans l'étude. Naturellement, le recensement et le développement d'études de cas, qui se veulent neutres et objectifs, pourraient faire l'objet de recherches ultérieures.

Finalement, l'étude présentée ici met les bases pour mieux comprendre l'innovation technologique, le processus et les dynamiques derrière son développement, ses moteurs, ses avantages et ses barrières. Tandis que les façons de faire changent de façon accélérée au sein de l'industrie de la construction, une industrie dite traditionnelle, l'étude permet de mieux cerner les leviers et les mécanismes nécessaires pour encadrer et supporter cette innovation, élément clé dans le maintien de la compétitivité et de la pérennité de ce secteur important pour le Québec.

Références

- Agarwal, R., Chandrasekaran, S. and Sridhar, M., 2016, 24 juin. Imagining construction's digital future. *McKinsey&compagny*. Repéré à : <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-constructions-digital-future>
- Barbosa, F., Woetzel, J., & Mischke, J., 2017. Reinventing Construction: A Route of Higher Productivity. *McKinsey Global Institute*.
- Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G., & Woetzel, J., 2019, 18 juin. Modular construction: From projects to products. *McKinsey & Company: Capital Projects & Infrastructure*, 1-34. Repéré à : <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/modular-construction-from-projects-to-products>
- Blanco, J. L., Mullin, A., Pandya, K., & Sridhar, M., 2017. The new age of engineering and construction technology. *McKinsey & Company - Capital Projects & Infrastructure*.
- Buisman, A., 2018. How are engineering and construction companies adapting digital to their businesses. *Ernst&Young*.
- Chowdhury, T., Adafin, J., & Wilkinson, S. (2019). Review of digital technologies to improve productivity of New Zealand construction industry. (ITcon), Special issue: 'Virtual, Augmented and Mixed: New Realities in Construction', *Journal of Information Technology in Construction*, 24, 569-587. doi: 10.36680/j.itcon.2019.032
- Construction Industry Institute, 2001. Impacts of design/information technology on building and industrial projects. *The Construction Industry Institute, Austin, Texas*.
- Construction Industry Institute, 2006. Impacts of automation and integration technologies on project and company performance. *The Construction Industry Institute, Austin, Texas*.
- Elghaish, F., Matarneh, S., Talebi, S., Kagioglou, M., Hosseini, M. R., & Abrishami, S. (2020). Toward digitalization in the construction industry with immersive and drones technologies: A critical literature review. *Smart and Sustainable Built Environment*, ahead-of-print(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/SASBE-06-2020-0077>
- Faure, C., 2019, septembre 19. BIM & HORS-SITE : Le couple gagnant. HORS SITE. <https://hors-site.com/bim-hors-site-le-couple-gagnant/>
- Greenwood, W. W., Lynch, J. P., & Zekkos, D. (2019). Applications of UAVs in Civil Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, 25(2), 04019002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000464)
- Goodrum, P.M. and Haas, C.T., 2004. Long-term impact of equipment technology on labor productivity in the US construction industry at the activity level. *Journal of construction engineering and management*, 130(1), pp.124-133.
- Goodrum, P.M., Zhai, D. and Yasin, M.F., 2009. Relationship between changes in material technology and construction productivity. *Journal of construction engineering and management*, 135(4), pp.278-287.
- Goulding, J. S., Rahimian, F. P., & Rahimian, F. P., 2019. Offsite Production and Manufacturing for Innovative Construction : People, Process and Technology. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781315147321>
- Jung, Y.; Gibson, G. E. Jr., 1999. Planning for computer integrated construction. *Journal of computing in civil engineering*, 13(4) : 217-225.
- Jung, Y.; Joo, M., 2011. Building information modelling (BIM) framework for practical implementation. *Automation in Construction* 20: 126–133

- Kim, J.-W., Kim, S.-B., Park, J.-C., & Nam, J.-W. (2015). Development of Crack Detection System with Unmanned Aerial Vehicles and Digital Image Processing. 11.
- Koeleman, J., Ribeirinho, M. J., Rockhill, D., Sjödin, E., & Strube, G., 2019. Decoding digital transformation in construction. *McKinsey & Company: Chicago, IL, USA*.
- Kogabayev, T. and Maziliauskas, A., 2017. The definition and classification of innovation. *Holistica* Vol 8, Issue 1, pp. 59-72
- Lépine Thériault, S., 2019. L'ENTRÉE EN SCÈNE DES ROULEAUX COMPACTEURS « INTELLIGENTS » (CI). ACRGTQ. <https://www.acrgtq.qc.ca/index.php/fev2019-p10.html>
- Lim, J.N. and Ofori, G., 2007. Classification of innovation for strategic decision making in construction businesses. *Construction Management and Economics*, 25(9), pp.963-978.
- Liu, D., Wang, Y., Chen, J., & Zhang, Y., 2019. Intelligent compaction practice and development: A bibliometric analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(5), 1213–1232. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2019-0252>
- Loosemore, M. and Richard, J., 2015. "Valuing innovation in construction and infrastructure: Getting clients past a lowest price mentality", *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 22 No. 1, pp. 38-53.
- Martinez, J. G., Gheisari, M., & Alarcón, L. F. (2020). UAV Integration in Current Construction Safety Planning and Monitoring Processes: Case Study of a High-Rise Building Construction Project in Chile. *Journal of Management in Engineering*, 36(3), 05020005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000761](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000761)
- Moore, W., 2015. Intelligent Compaction Rollers Outsmart Soil and Asphalt. *Construction Equipment*. <https://www.constructionequipment.com/intelligent-compaction-rollers-outsmart-soil-and-asphalt>
- NBS, 2018. The National BIM Report.
- Off-Site Construction Council—National Institute of Building Sciences. (s. d.). Consulté 18 septembre 2020, à l'adresse <https://www.nibs.org/page/oscc>
- Oliveira, S., Burch, J., Hutchison, K., Adekola, O., Jaradat, S., & Jones, M., 2017. MMC modes of delivery in housing : Effects on Housing Association clients. Repéré à : <https://uwe-repository.worktribe.com/output/879522/mmc-modes-of-delivery-in-housing-effects-on-housing-association-clients>
- Ottinger, E., Minglani, H. and Gibson, M., 2020. Technological advancements disrupting the global construction industry. *Ernst&Young*. Repéré à <https://www.apqc.org/resource-library/resource-listing/technology-advancements-disrupting-global-construction-industry>
- Ozorhon, B., Oral, K. and Demirkesen, S., 2016. Investigating the components of innovation in construction projects. *Journal of management in engineering*, 32(3), p.04015052.
- Poirier, E.A., Staub-French, S. and Forgues, D., 2015. Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action-research. *Automation in construction*, 58, pp.74-84.
- Poirier, E. A., Frénette, S., Carignan, V., Paris, H., 2018. Accroître la performance de la filière québécoise de la construction par le virage numérique. *Groupe BIM Québec*.
- Préfabriqué Totale—Institut Canadien du Béton Préfabriqué et Précontraint*. (s. d.). Consulté 7 février 2021, à l'adresse https://www.cpci.ca/fr/precast_solutions/total_precast/

Reichstein, T., Salter, A. J., & Gann, D. M., 2005. Last among equals: a comparison of innovation in construction, services and manufacturing in the UK. *Construction management and economics*, 23(6), 631-644.

Rivard, H., 2000. A Survey on the impact of information technology in the Canadian architecture, engineering and construction industry. *ITcon*, 5, 37-56.

Schober, K.-S., 2020, 18 février. Artificial intelligence in the construction industry: How to increase efficiency over the entire lifecycle chain. *Roland Berger*. Repéré à <https://www.rolandberger.com/fr/Point-of-View/Artificial-intelligence-in-the-construction-industry.html>

Slaughter, S., 1998. Models of construction innovation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(3): 226-231

Tatum, C.B., 1988. Classification system for construction technology. *Journal of Construction Engineering and Management*, 114(3), pp.344-363.

The Offsite Revolution in Construction. (s. d.). <https://www.bcg.com>. Consulté 9 juin 2020, à l'adresse <https://www.bcg.com/fr-ca/publications/2019/offsite-revolution-construction.aspx>

Vinodhan, D. (s. d.). (PDF) A Hypothesis on State of Off-Site Production (OSP) in India : OSP as Solution to improve Productivity of Indian Construction Industry. *ResearchGate*. Consulté 22 septembre 2020, à l'adresse https://www.researchgate.net/publication/280445151_A_Hypothesis_on_State_of_Off-Site_Production_OSP_in_India_OSP_as_Solution_to_improve_Productivity_of_Indian_Construction_Industry?channel=doi&linkId=55b50eb908ae9289a08a669f&showFulltext=true

World Economic Forum, 2016. Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology.

Annexe 01 – Méthodologie

Les entrepreneurs québécois, et plus spécifiquement les directeurs d'entreprise, représentent le public ciblé dans le sondage. Ces répondants ont été interrogés sur certains points abordés dans l'état de l'art, à savoir, les moteurs, facilitateurs et obstacles de l'innovation, les technologies utilisées et leurs impacts. Leur opinion sur l'accompagnement qu'ils reçoivent ou non par rapport à l'innovation a également été sondée. Afin de mieux cerner la place de l'innovation dans ce contexte, les répondants ont été questionnés sur leur utilisation d'innovations dans leurs projets, ainsi que sur les technologies les plus utilisées par leur entreprise. Le questionnaire a été construit sur la plateforme Lime Survey, qui est un outil d'enquête reconnu.

Structure du sondage

Le déroulement du sondage a été découpé en 4 étapes, soit :

- Des **informations générales sur l'entreprise et le répondant** qui permettent d'identifier les différents profils des compagnies par rapport à l'innovation en construction. Cette partie servira également dans le suivi des réponses au sondage pour s'assurer un taux de participation suffisamment élevé afin d'avoir un échantillon représentatif de l'industrie de la construction par secteur d'activité. Les informations demandées ne permettent pas d'identifier le répondant. Il lui est cependant possible de laisser ses coordonnées à la fin du questionnaire;
- Des questions sur les **processus internes sur l'implantation et l'adoption des innovations technologiques**. Parmi elles se trouvent des questions à échelle numérique afin d'obtenir l'avis des répondants sur leur intérêt pour l'innovation et sur les aides extérieures qu'ils reçoivent pour leur mise en œuvre technologique. De plus, les répondants répondent à des questions quant à leur utilisation et leur gestion des innovations. Les autres questions de cette partie concernent l'utilisation de la fabrication hors site dans l'industrie québécoise.
- Des données sur les **technologies implantées** dans les entreprises et leurs projets. Cela inclut les objectifs lors de l'implantation, le taux d'adoption et la correspondance aux attentes de l'entreprise. Dans cette partie, le répondant a la possibilité de déclarer jusqu'à trois technologies implantées dans son entreprise. Les questions relatives aux technologies seront les mêmes pour chaque champ identifié afin de pouvoir faire des comparaisons entre les technologies.
- Les **impacts des technologies** implantées sur les projets et les entreprises. Comme pour l'étape précédente, ces questions sont posées pour chaque technologie identifiée. Elles portent sur les indicateurs, l'évaluation sur la productivité, les impacts, leurs mesures et le retour sur investissement de la technologie.

La figure A.1 illustre le cheminement des questions et des étapes du sondage, incluant ses différents embranchements. Ils orientent le répondant dans le questionnaire. Dans l'étape 2, s'il déclare ne pas utiliser de technologies dans ses projets, il peut justifier les raisons de sa non-utilisation et sera ensuite dirigé vers la fin du sondage. Ces dernières ne sont abordées que si le répondant l'utilise dans ses projets. Enfin, un dernier embranchement se trouve au niveau de la déclaration des trois technologies implantées. Les deuxième et troisième technologies sont facultatives.

Ainsi le questionnaire et ses embranchements se répartissent en 8 groupes de questions sur Lime Survey. Le premier concerne l'étape 1 de la structure; les groupes 2, 3 et 4 concernent l'étape 2, en fonction de l'utilisation ou non d'innovations dans l'entreprise du répondant. Le groupe 5 aborde les questions de

l'étape 3 en proposant au répondant de déclarer 3 technologies implantées dans son entreprise. Enfin, les groupes de questions 6, 7 et 8 sont composés des mêmes questions liées à l'étape 3 et 4, mais ils concernent respectivement chaque technologie déclarée.

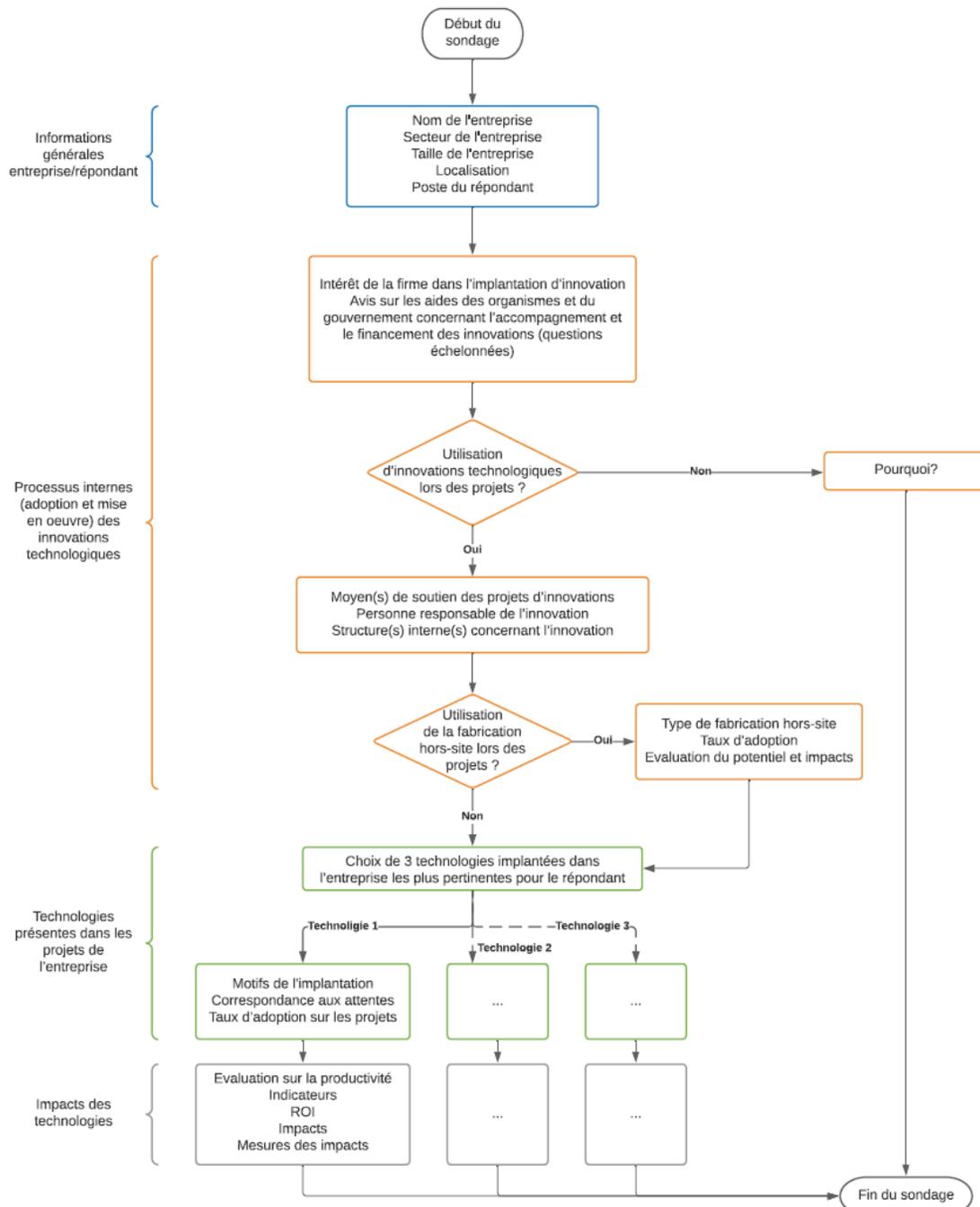


Figure A.1: Structure et étapes du sondage

En regroupant tous les groupes, le questionnaire complet comporte 53 questions. Selon le cheminement qu'ils prendront, les répondants devront répondre à au moins 12 questions pour finir le questionnaire. Ce sondage a été rendu disponible pour une durée de 112 jours. Le questionnaire a été soumis aux partenaires et a été validé par eux avant d'être transmis à leurs membres.

La publication du sondage s'est faite depuis leur site Internet respectif, leurs infolettres, ou encore leur compte LinkedIn. La collecte de données s'est faite entre le 30 septembre 2020 et le 20 janvier 2021. Le nombre de réponses est de 161, dont 121 sondages qui ont été entièrement remplis. Le temps de réponse varie entre 5 et 15 minutes. L'échantillon est composé à 79 % d'entrepreneurs généraux et spécialisés, ce qui valide la cible de l'échantillon pour ce questionnaire.

Annexe 02 – Liste des innovations technologiques répertoriées

| Forme | Localisation | Fonction d'affaires | Discipline | Technologie |
|------------|-------------------------|--------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Composant | Sur site | Exécution | Génie civil | Guidage machine (pelle, bélier) |
| Composant | Usine | Production | Génie civil | Les passes à poissons intégrées aux ponceaux en usine |
| Composant | Usine | Production | Manufacturier | Système d'injection d'ammoniac à la cheminée principale (-73 % NOx par tonne produite) |
| Composant | Usine | Exécution | Manufacturier | Utilisation de filtres ultra-performants pour atteindre les normes NESHAP |
| Équipement | Sur site | Relevé | Multiplés | Relevés terrain caméra 360 et 3D |
| Équipement | Sur site | Production | Génie civil | Technologie PERFECT - fabrication de regards et cunettes monolithiques |
| Matériaux | Usine | Production | Structure | Béton préfabriqué |
| Multiforme | Bureau | Multiplés | Multiplés | Système informatique plus performant |
| Multiforme | Collaboration numérique | Gestion de l'information | Multiplés | BIM |
| Multiforme | Sur site | Gestion des équipements | Multiplés | GPS |
| Multiforme | Sur site | Relevé | Multiplés | Scan 3D |
| Multiforme | Sur site | Relevé | Multiplés | Scan laser |
| Multiforme | Usine | Production | Génie civil | Automatisation des usines d'enrobés |
| Processus | Bureau | Comptabilité | Multiplés | Implantation d'un nouveau système comptable |
| Processus | Bureau | Gestion des ressources | Multiplés | Informatisation de la planification du travail |
| Processus | Bureau | Gestion des ressources | Multiplés | Intégration des tâches chantier vers une collection de données unique |
| Processus | Bureau | Multiplés | Multiplés | Transition Web (ERP, etc.) |
| Processus | Multisite | Gestion de la production | Multiplés | Lean Construction |
| Processus | Multisite | Gestion des équipements | Entrepreneurs | Maintenance équipement |
| Processus | Sur site | Production | Manufacturier | Valorisation des rejets dans nos procédés de fabrication |
| Processus | Usine | Production | Entrepreneurs | Fabrication hors site de certains produits |
| Processus | Usine | Planification | Entrepreneurs | Préconstruction |
| Processus | Usine | Conception | Entrepreneurs | Préconstruction (Design collaboration) |
| Processus | Usine | Production | Entrepreneurs | Préfabrication |
| Processus | Usine | Production | Entrepreneurs | Préfabrication de coffrage complexe |
| Processus | Usine | Production | Manufacturier | Récupération des chaleurs thermiques (-40 % d'énergie nécessaire par tonne produite) |
| Produit | Multisite | Exécution | Entrepreneurs | Robot |
| Produit | Multisite | Gestion de l'information | Multiplés | Utilisation de l'iPad |
| Produit | Sur site | Relevé | Multiplés | Drone |
| Produit | Sur site | Gestion des équipements | Entrepreneurs | Gestion des outils, outils connectés |
| Produit | Sur site | Exécution | Génie civil | Niveleuse avec <i>joystick</i> et <i>4 wheels steering</i> |
| Produit | Sur site | Exécution | Génie civil | Paveuse avec système électrique au lieu de propane |

| | | | | |
|---------|-------------------------|------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Produit | Sur site | Relevé | Multiplés | Relevé par drone |
| Produit | Sur site | Relevé | Multiplés | Scan laser, outils connectés |
| Produit | Usine | Production | Entrepreneurs | Atelier de modularisation |
| Service | Bureau | Conception | Concepteurs | Conception numérique |
| Service | Bureau | Gestion des clients | Multiplés | CRM |
| Service | Bureau | Estimation | Multiplés | Estimateur Général / Bluebeam - Automatisation du processus de soumission |
| Service | Bureau | Gestion documentaire | Multiplés | Gestion documentaire et connexions ERP |
| Service | Bureau | Comptabilité | Multiplés | Logiciel de comptabilité et projet : Maestro |
| Service | Bureau | Conception | Multiplés | Logiciel de conception Cabinet Vision |
| Service | Bureau | Gestion documentaire | Multiplés | Logiciel de gestion de documents |
| Service | Bureau | Gestion de projet | Multiplés | Logiciel de soumission et de suivi de réalisation de projet |
| Service | Bureau | Estimation | Multiplés | Logiciel d'estimation |
| Service | Bureau | Estimation | Multiplés | Logiciel d'estimation avancée |
| Service | Bureau | Estimation | Multiplés | Logiciel d'estimation Gextim |
| Service | Bureau | Estimation | Multiplés | Logiciel d'estimation intégrée |
| Service | Bureau | Gestion documentaire | Multiplés | OCR (Gestion documentaire) |
| Service | Bureau | Gestion des ressources | Multiplés | PGI/ERP |
| Service | Bureau | Estimation | Multiplés | Stack takeoff software |
| Service | Bureau | Relevé | Multiplés | Web Cab |
| Service | Collaboration numérique | Collaboration | Multiplés | Application collaborative |
| Service | Collaboration numérique | Conception | Multiplés | Conception numérique |
| Service | Collaboration numérique | Gestion de projet | Multiplés | Dreeven - Gestion de projet / fiches techniques / rapport de chantier |
| Service | Collaboration numérique | Gestion documentaire | Multiplés | Dropbox / iCloud - Circulation de l'information bureaux VS chantier |
| Service | Collaboration numérique | Gestion documentaire | Multiplés | Logiciel de gestion file wire |
| Service | Collaboration numérique | Gestion des opérations | Multiplés | Logiciel Opérations et Gestion |
| Service | Collaboration numérique | Gestion des opérations | Multiplés | Logiciel de gestion en nuage avec suivi de projet |
| Service | Collaboration numérique | Conception | Multiplés | Modélisation 3d |
| Service | Collaboration numérique | Collaboration | Multiplés | Plateforme partagée ou participative |
| Service | Collaboration numérique | Gestion de projet | Multiplés | Procore |
| Service | Collaboration numérique | Gestion documentaire | Multiplés | SmartUse |
| Service | Collaboration numérique | Collaboration | Multiplés | Technologie de réseautage avancée |
| Service | Multisite | Estimation | Multiplés | Calcul quantités avec takeoff |
| Service | Multisite | Gestion de projet | Multiplés | Logiciel de suivi |

| | | | | |
|---------|-----------|-------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Service | Multisite | Gestion de projet | Entrepreneurs | Logiciel de suivi de chantier |
| Service | Multisite | Gestion des opérations | Multiplés | Logiciel opération et gestion |
| Service | Multisite | Gestion des ressources | Entrepreneurs | Mobile Punch |
| Service | Multisite | Gestion des équipements | Entrepreneurs | Outil de suivi des équipements et matériaux |
| Service | Multisite | Estimation | Multiplés | Outils de relève informatisé |
| Service | Multisite | Gestion de projet | Multiplés | Outils de suivi de performance Civalgo pour les équipes de Uniroc Construction |
| Service | Multisite | Conception | Multiplés | Plans en 3 dimensions |
| Service | Multisite | Gestion de projet | Entrepreneurs | Rapport journalier tablette Web |
| Service | Sur site | Gestion des ressources | Multiplés | Système de feuille de temps électronique |
| Service | Usine | Production | Manufacturier | Outils de calibration et de mesures dans nos usines de production |

