

Titre: Identification des obstacles socio-économiques aux technologies durables dans le domaine de la construction au Québec
Title: durables dans le domaine de la construction au Québec

Auteur: Isabel Racine
Author:

Date: 2021

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Racine, I. (2021). Identification des obstacles socio-économiques aux technologies durables dans le domaine de la construction au Québec [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/6318/>

Document en libre accès dans PolyPublie Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6318/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Marcellin Joanis
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Identification des obstacles socio-économiques aux technologies durables dans
le domaine de la construction au Québec**

ISABEL RACINE

Département de mathématique et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Avril 2021

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Identification des obstacles socio-économiques aux technologies durables dans
le domaine de la construction au Québec**

présenté par **Isabel RACINE**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Sophie BERNARD, présidente

Marcelin JOANIS, membre et directeur de recherche

Arezki TAGNIT-HAMOU, membre

DÉDICACE

À tous ceux qui luttent contre la maladie mentale.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier

- Mon directeur de recherche, Marcellin Joanis, pour sa patience, ses précieux conseils et son soutien tout au long de ce long projet, parfois sinueux.
- Le comité d'évaluation de ce mémoire, formé de Mme Sophie Bernard et M. Arezki Tagnit-Hamou
- Le CRIB pour leur soutien financier
- Pour la distribution du questionnaire, merci au CRIB et à l'ABQ
- Un remerciement tout particulier à tous ceux ayant répondu à mon questionnaire, donnant de leur temps pour rendre ce projet possible.

Un merci tout spécial pour ceux grâce à qui l'aventure a semblé moins difficile

- Ma famille, pour le soutien moral et me rappeler de sortir faire du sport. À Papa pour les bons plats durant les dernières semaines de ma rédaction et à Maman pour la relecture.
- Pablo, mon support émotionnel qui m'a aidé à passer au travers de plus d'une crise d'anxiété avec patience et ses petites niaiseries pour me faire sourire.
- Julien, toujours là pour me rassurer vis-à-vis de mon projet et me ramener sur terre.
- Le ++, vous êtes incroyables, je vous aime tant.
- Tous ceux qui ont organisés des soirées Zoom entre amis; ça fait toujours grandement du bien de vous voir, même au travers d'un écran...

RÉSUMÉ

L'importance des technologies ainsi que du développement durables est maintenant clairement reconnue auprès des grandes institutions et des différentes industries. L'un des leviers stratégiques les plus efficaces et permettant de favoriser les technologies ainsi que le développement durables (DD) est sans contredit l'économie circulaire (EC). C'est donc sans surprise que les concepts d'EC gagnent en popularité dans diverses industries, dont l'industrie de la construction. Cependant, malgré un nombre élevé de recherches qui ont permis l'aboutissement et la disponibilité de nouvelles technologies, peu d'entre elles réussissent à se tailler une place sur le marché de la construction. Ce mémoire se penche donc sur la question de recherche suivante:

Quels sont les obstacles socio-économiques à une hausse de la demande de technologies durables dans le domaine de la construction du Québec ?

La recherche porte donc en premier lieu sur la question des obstacles sociaux, c'est-à-dire au niveau des acteurs de l'industrie de la construction. Une collecte de données a été réalisée via un questionnaire distribué dans l'industrie sur le thème du développement durable et d'une technologie développée à l'Université de Sherbrooke : la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire. À partir de ces données, une analyse économétrique a été réalisée via une régression binomiale de type probit. Les constats réalisés à partir de celle-ci suggèrent qu'un acteur du milieu sera moins enclin à utiliser cet ajout cimentaire lorsque ses connaissances sur le DD et l'EC sont faibles. De plus, la régression soutient qu'une mauvaise compréhension quant à cette technologie particulière amène plusieurs acteurs à ne pas percevoir son avantage environnemental.

La seconde section de la recherche se penche sur les obstacles économiques à l'implantation de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire. Deux scénarios de viabilité économique ont été établis et semblent suggérer qu'il est avantageux économiquement de produire cet ajout cimentaire. Toutefois, l'utilisation de cet ajout reste plus dispendieux pour ses utilisateurs comparé aux cendres volantes et légèrement plus dispendieux qu'un béton n'utilisant que du ciment.

Ces deux analyses, mises en parallèle avec la littérature, permettent d'identifier des pistes de solutions pour contourner ces obstacles socio-économiques. Deux de ces solutions sortent du lot et semblent être des pistes cruciales. Soit, un support technique adéquat lors de l'introduction d'un nouveau matériau sur le marché. Ainsi qu'un soutien financier de la part du gouvernement, favorisant l'augmentation de la demande de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire.

ABSTRACT

The importance of sustainable technologies and development is now clearly recognized by major institutions and various industries. One of the most effective strategic levers to promote sustainable technologies and development is without a doubt the circular economy. It is therefore no surprise that circular economy concepts are gaining popularity in various industries, including the construction industry. However, despite a large amount of research that has led to the development and availability of new technologies, few of these technologies have succeeded in making their way into the construction market. This dissertation therefore addresses the following research question:

What are the socio-economic barriers to increasing the demand for sustainable technologies in the Quebec construction industry?

The research focuses first on the issue of social barriers, i.e. at the level of the construction industry actors. Data was collected via a survey distributed in the industry on the theme of sustainable development and a technology developed at the University of Sherbrooke: recycled glass powder as a cement additive. From these data, an econometric analysis was performed using a probit binomial regression. The findings suggest that a stakeholder will be less inclined to use SCM when his knowledge of sustainable development and the circular economy in general is low. Furthermore, the regression argues that a lack of understanding about this particular technology leads many actors to fail to perceive its environmental benefit.

The second section of the research looks at the economic barriers to the implementation of recycled glass powder as a supplementary cementing material. Two economic viability scenarios have been established and seem to suggest that it is economically advantageous to produce this SCM. However, the use of this SCM remains more expensive for its users compared to the use of fly ash and also slightly more expensive than a concrete using only cement.

These two analyses, when compared to the literature, allow us to identify possible solutions to overcome these socio-economic obstacles. Two of these solutions stand out and seem to be crucial. That is, adequate technical support for the introduction of a new material on the market. As well as financial support from the government to increase the demand for recycled glass powder as a supplementary cementing material.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	4
2.1 L'économie circulaire et l'industrie de la construction.....	4
2.1.1 Économie circulaire.....	4
2.1.2 Économie circulaire et construction	6
2.1.3 Un vent de changement en construction.....	10
2.1.4 Recyclage du verre et béton québécois	15
2.1.5 Blocages dans l'industrie.....	22
2.2 Obstacles à la construction durable : une revue systématique	26
2.2.1 Protocole de la revue systématique	26
2.2.2 Obstacles en construction.....	29
2.2.3 Analyse descriptive des articles	30
2.2.4 Analyse du contenu	32
2.2.5 Analyse selon la méthodologie utilisée	32

2.2.6	Analyse par obstacles	33
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	37
3.1	Objectifs spécifiques de la recherche	37
3.2	Questionnaire sur la construction durable au Québec	38
3.2.1	Portrait du secteur de la construction au Québec	38
3.2.2	Répondants visés	39
3.2.3	Construction du questionnaire	40
3.2.4	Diffusion du questionnaire	41
3.3	Analyse économétrique des résultats du questionnaire	42
3.3.1	Données brutes	42
3.3.2	Variables modératrices	42
3.3.3	Variables indépendantes	44
3.3.4	Variables dépendantes	45
3.3.5	Modèles probit	46
3.4	Analyse de la viabilité économique	50
3.4.1	Débit de production	51
3.4.2	Machinerie	52
3.4.3	Coûts fixes	52
3.4.4	Coûts variables	53
3.4.5	Comparaison avec le marché actuel	54
CHAPITRE 4	ANALYSE ÉCONOMÉTRIQUE	56
4.1	Présentation des répondants	56
4.2	Survol des réponses des sections B, C et D	59
4.3	Modèles utilisant les données brutes du questionnaire	65

4.4	Diminution du nombre d'items : KMO	67
4.5	Régression binomiale probit.....	74
4.6	Analyse des réponses aux questions ouvertes	82
CHAPITRE 5 ANALYSE DE LA VIABILITÉ ÉCONOMIQUE		84
5.1	Données	84
5.2	Résultats	87
5.3	Comparaison avec le marché actuel	89
CHAPITRE 6 DISCUSSION		92
6.1	Discussion sur le modèle probit	92
6.2	Retour sur les obstacles	94
6.2.1	Barrières techniques et financières	94
6.2.2	Barrières institutionnelles.....	95
6.2.3	Barrières psychosociales	96
6.3	Pistes de solutions	100
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		103
7.1	Contributions	103
7.2	Limites de la recherche.....	104
7.3	Recommandations	105
RÉFÉRENCES		106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Émissions de gaz à effet de serre en 2017 (en mégatonne de CO ₂ équivalent) [22]....	8
Tableau 2-2 Collecte du verre en 2015 [45][47]	16
Tableau 2-3 Résumé des articles identifiés par les articles de la RS	35
Tableau 3-1 Nombre d'employeurs par secteur selon la région, 2018 [82].....	39
Tableau 3-2 Nombre de compagnies contactées	40
Tableau 3-3 Seuils de la méthode KMO	45
Tableau 3-4 Matrice <i>pred</i>	49
Tableau 3-5 Interprétation du coefficient phi.....	49
Tableau 3-6 Coûts variables et sources de données	54
Tableau 4-1 Questions prises pour construire le premier modèle	65
Tableau 4-2 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 10.....	66
Tableau 4-3 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 11	67
Tableau 4-4 Classement des questions de la section B du questionnaire par catégorie.....	69
Tableau 4-5 Importance des composantes principales des différentes catégories	70
Tableau 4-6 Valeur p donnée entre les groupes de répondants selon le test de Wilcoxon	73
Tableau 4-7 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 12.....	74
Tableau 4-8 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 13	75
Tableau 4-9 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 14.....	76
Tableau 4-10 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 15.....	76
Tableau 4-11 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 16.....	77
Tableau 4-12 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 17.....	78
Tableau 4-13 Modèles finaux - équations 18-19	79
Tableau 4-14 Taux de prédiction des équations 18-19.....	79

Tableau 4-15 Pseudo Mesure de R ² des équations 18-19	80
Tableau 4-16 Rapport des chances des coefficients du modèle A	80
Tableau 4-17 Inverse du rapport des chances du modèle A	81
Tableau 4-18 Rapport des chances des coefficients de l'équation 19	81
Tableau 5-1 Main d'œuvre nécessaire pour un quart de travail.....	86
Tableau 5-2 Estimation des coûts pour les deux scénarios	87
Tableau 5-3 Analyse de sensibilité pour le coût de transport.....	89
Tableau 5-4 Coûts moyens	89
Tableau 5-5 Mélanges de ciments et ajouts pour 1 m ³ de béton	90
Tableau 5-6 Coûts estimés pour 400 kg de mélange de ciment selon quatre scénarios.....	90
Tableau A-1 Barrières spécifiques ressortant de la RS	117

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 Schéma de l'économie circulaire tel que présenté par l'EDDEC [7]	5
Figure 2-2 Destination des matières de CRD reçues en centre de tri en 2015 [17]	8
Figure 2-3 Répartition des matières acheminées au recyclage en 2015 [17]	8
Figure 2-4 Quantités de verre acheminé aux fins de recouvrement ou autres usages [47]	17
Figure 2-5 Réseau bibliométrique	27
Figure 2-6 Années de publication des articles sélectionnés pour la RL.....	30
Figure 2-7 Pays visées par les articles sélectionnés pour la RL	31
Figure 2-8 Journaux de publication des articles sélectionnés pour la RS	31
Figure 2-9 Nombre d'auteurs par article ayant été sélectionné pour la RS	32
Figure 2-10 Éléments étudiés par les articles sélectionnés pour la RS	32
Figure 2-11 Type de recherche.....	33
Figure 2-12 Nombre de répondants.....	33
Figure 2-13 Types de répondants	33
Figure 4-1 Temps de réponse au questionnaire.....	57
Figure 4-2 Types d'entreprises des répondants	57
Figure 4-3 Postes occupé par les répondants.....	58
Figure 4-4 Niveau d'étude atteints par les répondants.....	58
Figure 4-5 Termes dont les connaissances des répondants sont élevées.....	59
Figure 4-6 Termes dont les connaissances des répondants sont basses	60
Figure 4-7 Maitrise des concepts de l'EC	60
Figure 4-8 Questions représentatives de l'importance accordée aux sphères du DD	61
Figure 4-9 Vision des mesures instaurées en réponse à la COVID-19	63
Figure 4-10 Questions et réponses portant sur les changements dans l'industrie.....	64

Figure 4-11 Analyse Biplot des CP 1 et 2 de Co_g	71
Figure 4-12 Analyse Biplot des CP 1 et 2 de Co_t	71
Figure 4-13 Analyse Biplot des CP 1 et 2 de Imp_{ec}	72
Figure 4-14 Analyse Biplot des CP 1 et 2 de Imp_{en}	72
Figure 4-15 Analyse Biplot des CP 1 et 2 de Imp_{so}	72
Figure 5-1 Revenus approximatifs sur 10 ans pour les scénarios	88
Figure 6-1 Vision à court, moyen et long terme.....	97
Figure 6-2 Réponses aux questions 7 à 9 de la section D	98
Figure E-1 Ligne de production	153
Figure G-1 Résultats des connaissances en lien avec le DD	155
Figure G-2 Connaissance avec la déconstruction.....	155
Figure G-3 Résultats des connaissance avec l'impact du béton	156
Figure G-4 Résultats des connaissance en lien avec BIM.....	156
Figure G-5 Résultats des connaissances sur le préfabriqué	157
Figure G 6 Résultats des connaissances sur les énergies alternatives.....	157
Figure G-7 Résultats des connaissance sur diverses techniques	158
Figure G-8 Résultats des connaissances sur l'EC.....	158
Figure G-9 Résultats de l'importance selon l'aspect économie	159
Figure G-10 Résultats de l'importance selon l'aspect environnemental	159
Figure G-11 Résultats de l'importance selon l'aspect social	160

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

La liste des sigles et abréviations présente, dans l'ordre alphabétique, les sigles et abréviations utilisés dans le mémoire

- ABQ Association Béton Québec
ACP Analyse de composantes principales
BIM Build Informaiton Modeling
CCQ Commission de la construction du Québec
CO₂ Dioxide de Carbone
CP Composantes principales
CRD Construction, rénovation, démolition
CRIB Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton
CRU Consigne à remplissage unique
CV Cendres volantes
DD Développement durable
EC Économie circulaire
ÉEQ Éco entreprise Québec
EJ Exajoules
GBC Conseil du bâtiment durable
GES Gaz à effet de serre
GMT Gestion et Mondialisation de la Technologie
KMO Kaiser-Meyer-Olkin
LEED Leadership in Energy and Environmental Design
LET Lieux d'enfouissement technique
MDD Maison du développement durable
MRF Material recovery facility
PJCCI Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée
PV Poudre de verre
RS Revue systématique
SAQ Société des Alcools du Québec
SPI Smart Prosperity Institute
UdeS Université de Sherbrooke

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A OBSTACLES PRÉCIS DE LA RS.....	117
ANNEXE B QUESTIONNAIRE.....	119
ANNEXE C CERTIFICATION ÉTHIQUE	150
ANNEXE D ENVOIS ABQ EXPRESS	152
ANNEXE E LIGNE DE PRODUCTION PROPOSÉE PAR KRYSTELINE	153
ANNEXE F COÛTS D'AJOUTS CIMENTAIRES SELON CHEVALIER.....	154
ANNEXE G RÉPONSES À LA SECTION B DU QUESTIONNAIRE	155
ANNEXE H CALCUL KMO	161
ANNEXE I CALCUL D'ACP	162
ANNEXE J SCORE DES CP GARDÉS.....	165
ANNEXE K RÉSULTATS DES RÉGRESSIONS PROBIT	166
ANNEXE L RÉGRESSIONS AVEC LES VARIABLES MODÉRATRICES.....	172
ANNEXE M TEST CHI2 SUR LES VARIABLES MODÉRATRICES	174
ANNEXE N TABLEAU « POWER & FUEL ».....	175

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le concept d'économie circulaire a gagné en popularité depuis quelques années à travers le monde et, avec raison, puisqu'il permet de s'attaquer à différentes sources importantes responsables des changements climatiques. Les secteurs représentant une part importante du PIB et des émissions de GES sont souvent identifiés à l'international comme étant des voies propices à l'implémentation de technologies pour circulariser l'économie. Le domaine de la construction est l'un des secteurs identifiés en raison de son poids économique et de son empreinte environnementale importants. De nombreuses technologies de construction durable ont été développées au cours des dernières années ; une mise en œuvre efficace et adéquate de celles-ci permettrait de faciliter la transition du domaine de la construction vers les principes d'économie circulaire (EC). Pourtant, ces technologies, au Québec comme ailleurs, semblent pourtant s'implanter difficilement sur le marché.

Ce mémoire explore les raisons pour lesquelles le domaine de la construction au Québec peine à implémenter des technologies axées sur le développement durable (DD) et l'économie circulaire. L'accent sera mis sur l'implantation de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire dans le contexte du marché de la construction au Québec. Afin d'atteindre le but visé par cette recherche, la question de recherche suivante est énoncées posée :

Quels sont les obstacles socio-économiques à une hausse de la demande de technologies durables dans le domaine de la construction du Québec ?

Afin de répondre à cette question, la recherche est divisée en 3 objectifs principaux :

1. Identifier les obstacles rencontrés en construction durable sur divers marchés à l'international ;
2. Dresser un portrait des acteurs du milieu afin d'estimer quelles variables influencent la demande de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire ;
3. Évaluer les coûts théoriques d'implémentation sur le marché de la construction de la poudre de verre comme ajout cimentaire au Québec.

Il est important de savoir que l'utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire pour la fabrication du béton structural est une technique qui répond aux exigences de la norme CSA de construction depuis la fin de l'année 2018. De plus, cette expertise est déjà bien établie au Québec. Malgré tout, son utilisation reste marginale, d'où l'intérêt et l'importance de comprendre, au cours de cette recherche, les obstacles liés à l'implémentation d'une technologie multidisciplinaire pourtant acceptée par la norme.

Cette technologie a été développée au Québec il y a plus de 15 ans par la chaire de recherche de la Société des Alcools du Québec (SAQ) dans un effort de déterminer des alternatives pour diminuer l'empreinte écologique du ciment, tout en trouvant des débouchés pour le verre issu de la collecte sélective. L'équipe de la chaire de recherche SAQ a établi que ce verre, lorsque mis en poudre d'une grosseur de 38 à 45 µm, peut être utilisé comme ajout cimentaire et remplacer environ 15 % du ciment [1]. Malgré son entrée et sa reconnaissance dans la norme québécoise, l'utilisation de cette technologie est encore très limitée dans les projets de génie civil. Et ce n'est pas la première fois qu'une technique verte ne parvient pas à percer dans le domaine de la construction au Québec. Par exemple, la compagnie Lafarge Canada Inc. offre des agrégats issus de béton recyclé et concassé depuis une dizaine d'années. Toutefois, la demande reste faible et ce, même si leur produit est un peu moins dispendieux que des agrégats neufs [2]. Il devient donc impératif d'étudier ce blocage dans l'industrie afin d'aider et de faciliter le développement du marché des technologies vertes en construction au Québec.

Pour répondre aux objectifs de la recherche, trois approches sont suivies. D'abord, une revue de littérature incluant une revue systématique est réalisée. La première a pour but de répertorier différentes technologies durables disponibles à l'international en construction, des exemples d'utilisation, et le potentiel d'implanter de telles technologies en construction au Québec. La seconde permettra d'établir une méthodologie pour répertorier les obstacles à l'implantation de technologies vertes. Les obstacles principaux qui ressortiront de cette revue de littérature permettront d'établir les variables du modèle pour répondre au deuxième objectif.

Pour atteindre le deuxième objectif, une analyse statistique à partir de données recensées via un questionnaire a été réalisée. Ce questionnaire a été distribué durant l'été 2020 auprès d'intervenants de l'industrie de la construction. Les données permettent de dresser un portrait des

acteurs du milieu, tout en estimant quelles variables influencent favorablement ou défavorablement la demande de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire.

Quant au troisième objectif, une méthodologie d'estimation des coûts de production de la poudre de verre est établie. En plus d'estimer combien il en coûterait pour produire cet ajout selon deux scénarios de production, cette partie de l'étude considère la variabilité des coûts de transport grâce à une analyse de sensibilité. Finalement, les coûts de différents mélanges de béton, dont l'un contenant de la poudre de verre recyclé, sont comparés.

En réalisant ces différents objectifs, cette recherche permettra d'identifier pourquoi une technologie durable testée et approuvée arrive difficilement à percer le marché. Ceci pourrait contribuer à une implémentation plus facile et rapide sur le marché non seulement pour cette technologie mais pour des technologies futures.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Comme mentionné un peu plus tôt, les technologies vertes en construction, bien que nombreuses, peinent à pénétrer le marché québécois. Afin de bien en comprendre les raisons, il est primordial de comprendre d'abord le contexte spécifique de la construction au Québec, ainsi que les principes d'économie circulaire. Ces éléments sont présentés dans la section 2.1 de la revue de littérature. Un survol du marché des technologies durables en construction, réalisé dans le cadre d'un mandat pour l'Institut pour l'IntelliProspérité (Smart Prosperity Institute, SPI), est également présenté dans cette première partie de la revue de littérature. Comprendre ce marché permettra d'identifier ensuite les obstacles rencontrés par les nouvelles technologies dans divers contextes. Pour ce faire, une revue systématique est réalisée et présentée en section 2.2 de ce chapitre.

2.1 L'économie circulaire et l'industrie de la construction

2.1.1 Économie circulaire

Le système économique actuel, qualifié par certains de linéaire, est de plus en plus remis en question. La linéarité, basée sur un principe de « prendre, fabriquer, disposer de » [3], est identifiée comme une source de non-durabilité du système économique. Depuis quelques années et de manière de plus en plus marquée, le concept d'économie circulaire (EC) ressort fréquemment dans les discussions entourant l'impact négatif de l'économie actuelle sur l'environnement. Celui-ci contraste fortement avec le système économique actuel. Cependant, le terme *économie circulaire* n'est pas encore un terme à définition unique et reconnue au niveau international. L'idée reste néanmoins similaire d'une définition à l'autre : une économie basée sur un flux de matières considéré en quantité finie et leur potentiel de réinsertion sur le marché [4]. À l'international, la majorité des publications utilisent la définition et les principes de la Fondation Ellen MacArthur [5], fondation ayant comme mission d'accélérer la transition vers une EC. Selon elle, l'EC se base sur trois principes clés : concevoir à partir des déchets et de la pollution, garder les produits et matériaux en utilisation, et régénérer les systèmes naturels [6].

Au Québec, le Pôle d'action québécois sur l'EC a été mis sur pied en 2015. Réunissant plusieurs acteurs importants de la recherche sur l'EC, il a pour but de promouvoir et d'aider les initiatives d'EC sur le territoire du Québec. Ils définissent l'EC comme suit :

« L'économie circulaire est un système de production, d'échange et de consommation visant à optimiser l'utilisation des ressources à toutes les étapes du cycle de vie d'un bien ou d'un service, dans une logique circulaire, tout en réduisant l'empreinte environnementale et en contribuant au bien-être des individus et des collectivités. » [7]

L'Institut EDDEC propose un schéma résumant les différentes sphères d'application de l'EC. Ce schéma, présenté à la Figure 2-1, intègre le principe des 3R, soit la réduction à la source, la réutilisation et le recyclage. Ce schéma est une adaptation plus générale de ce qui est proposé par la Fondation MacArthur; les principes amenés dans ce schéma sont applicables dans tout domaine ou secteur économique.

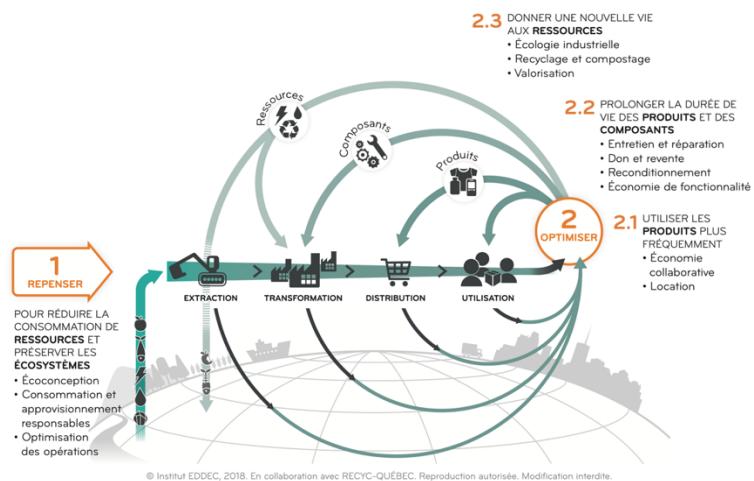


Figure 2-1 Schéma de l'économie circulaire tel que présenté par l'EDDEC [7]

Pour ce projet, la définition du Pôle québécois sera considérée, ainsi que les principes présentés en Figure 2-1. Deux catégories principales divisent les principes illustrés par la figure. La première touche l'optimisation des opérations, de l'approvisionnement et de la conception qui doivent être repensés et ce, durant tous les processus. La seconde touche l'optimisation des produits : utilisation plus fréquente, prolongation de la durée de vie et octroi d'une nouvelle vie aux ressources.

Selon plusieurs études, une transition vers l'EC aurait de nombreux bénéfices tant financier qu'environnementaux. Ainsi, selon la Fondation Ellen MacArthur, l'implantation de l'EC mondialement pourrait avoir des retombées économiques de l'ordre de 700 M\$ USD uniquement en matériaux économisés, ainsi qu'une réduction de 48 % des gaz à effet de serre d'ici 2030 [6]. La possibilité de faire une transition vers une EC est explorée dans divers marchés au Québec comme à l'international. Comme mentionné un peu plus haut, les marchés identifiés comme étant propices à cette transition sont généralement ceux ayant un poids important en termes de PIB, étant donné que leur transition permettrait d'importantes retombées économiques et environnementales [4]. Les quatre secteurs économiques ayant le plus fort potentiel de transition, tels qu'identifiés par le rapport *Économie circulaire au Québec : Opportunités et Impacts Économiques* produite par le Groupe GMT et l'Institut EDDEC en collaboration avec le CPQ, le CPEQ et EEQ, sont les suivants [4] :

- Agroalimentaire
- Énergie
- Construction
- Produits métallurgiques

2.1.2 Économie circulaire et construction

Les domaines identifiés comme étant propices à ce changement peuvent varier d'une région à l'autre, selon leur importance respective dans l'économie de la région. Toutefois, le secteur de la construction est maintes fois identifié comme étant un domaine qui serait avantage par l'implantation de l'EC à l'échelle mondiale par diverses études. Ainsi, une étude publiée en mars 2018 par le Groupe de recherche en Gestion et mondialisation de la technologie (GMT) et l'institut EDDEC a identifié ce secteur comme ayant un fort potentiel basé sur la littérature scientifique et l'importance du secteur sur l'économie canadienne [4]. Il est reconnu que le secteur de la construction est très polluant et dommageable au niveau environnemental, mais plusieurs alternatives économiquement viables ont été développées dans les dernières années et pourraient diminuer l'impact de ce secteur et ce, tout au long du cycle de vie d'une infrastructure. À l'international, des études faites pour le plan de circularité de la ville de Londres révèlent qu'en accélérant sa transition vers l'EC, la ville pourrait atteindre des bénéfices allant jusqu'à 7 Gf

d'ici 2036 [8]. Pour y parvenir, des stratégies de circularité peuvent être implantées dès le début du design d'un projet en passant par la fabrication des matériaux, la construction ou la phase d'utilisation et avoir des impacts positifs jusqu'en fin de vie dudit projet [9].

Importance économique de la construction

Depuis plusieurs années, les données démontrent une croissance constante de l'industrie de la construction. Ainsi, au Canada, en 2019, la construction représentait une industrie de plus de 143 G\$ [10] et embauchait plus de 1,4 million de travailleurs [11]. Au Québec seulement, en 2018, ce secteur était évalué à 46,8 G\$, représentant 12 % du PIB [12] et embauchant plus de 165 000 personnes [13]. En 2014, le marché de la construction verte a quant à lui généré 23,45 G\$ et embauchait directement près de 300 000 travailleurs au Canada [14]. Selon le rapport *Global Powers of Construction 2018* de Deloitte, le secteur de la construction devrait croître encore plus rapidement que l'économie globale entre 2018-2022 [15]. Il y est indiqué que l'économie mondiale devrait croître à un rythme de 2,5 % à 3 % par année durant cette période, alors que l'industrie de la construction croît en moyenne de 3,6 % par année, soit à un rythme plus rapide que celui escompté. Et le Canada me fait pas bande à part puisqu'en Europe, le secteur de la construction représente entre 5 et 13 % de l'économie globale des pays membres de l'Union Européenne [9]. Il est donc clairement démontré que l'importance économique du secteur est prédominante ici et ailleurs.

Poids environnemental de la construction

Le poids environnemental de l'industrie de la construction en termes de consommation de ressources naturelles et de production de matières résiduelles est aussi très important. En Angleterre, en 2015, l'industrie de la construction a utilisé 576 Mt de matériaux et a produit 120 Mt de déchets, dont environ 40 % provenaient de la démolition [16]. En comparaison, en 2015, au Québec, 1,85 Mt de déchets provenaient de la construction, rénovation et démolition (CRD) ; ces déchets envoyés dans les centres de tri représentaient 66 % de la totalité des matières reçues par ces centres. De cette quantité, il est estimé que 53 % des matières de CRD ont pu être recyclées ou envoyées pour valorisation énergétique. Les autres matières issues de CRD sont soit jetées ou utilisées comme recouvrement alternatif dans les sites d'enfouissement, comme le montre la Figure 2-2. Des matières reçues, le bois est celui qui est acheminé le plus fréquemment

pour valorisation énergétique et recyclage, tel que montré en Figure 2-3. Ces figures sont tirées du bilan de Recyc-Québec. [17]

Figure 2-2 Destination des matières de CRD reçues en centre de tri en 2015 [17]

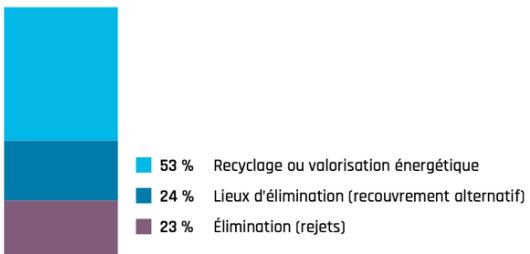
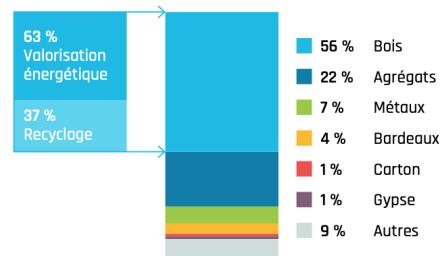


Figure 2-3 Répartition des matières acheminées au recyclage en 2015 [17]



Si cette industrie est aussi intensive en utilisation de ressources, elle émet également beaucoup de pollution. Les émissions de GES sont catégorisées en trois niveaux : les émissions de scope (niveaux) 1, 2 ou 3. Le scope 1 comprend les émissions directes produites par les activités de l'entreprise, soit par les véhicules de la compagnie ou par ses bâtiments et installations. Le scope 1 n'inclut pas les émissions dues à la consommation énergétique; ces émissions indirectes forment le scope 2 [18]. Même en ne regardant que le scope 1 des émissions dues à la construction, le secteur ressort comme étant très polluant avec, parmi les éléments les plus polluants, la production du ciment de Portland. Cette dernière émet 532 g de dioxyde de carbone (CO₂) par kilogramme de ciment produit [19, p. 6]. Elle représente à elle seule entre 4 % et 8 % des émissions mondiales de CO₂ [20]. À titre de référence, les émissions totales liées à la production de ciment, au Canada, en 2016, représentaient 1,5 % des émissions mondiales et celles de l'Union européenne 7,8 % [21].

Tableau 2-1 Émissions de gaz à effet de serre en 2017 (en mégatonne de CO₂ équivalent) [22]

	Canada		Québec	
	MT CO ₂	%	MT CO ₂	%
Ciment	10,90	1,52	2,36	3,02
Chaux & Gypse	2,48	0,35	0,77	0,99
Bâtiments	85,01	11,88	10,93	14,01
Industrie légère, construction et ressources forestières	21,50	3,00	4,15	5,32
Construction	6,04	0,84	1,17	1,50
Total des émissions du territoire	715,76	100	78,03	100

Le Tableau 2-1 détaille les émissions de gaz à effet de serre (GES) des secteurs économiques directement reliés à la construction et aux bâtiments, pour le Canada et le Québec en 2017. L'extraction et la transformation de l'acier, lequel est un matériau fréquemment utilisé en construction, ne sont pas considérées dans ces données. Les émissions des différents secteurs directement liés à la construction représentent 25 % des émissions totales au Québec et 18 % au Canada [22].

La pollution de scope 2 correspond à celle émise par la consommation d'énergie des bâtiments. Tel qu'indiqué dans le rapport *UN Environment - Global Status Report 2017*, les infrastructures et la construction consomment à eux seuls 36 % de l'énergie mondiale et émettent 39 % des CO₂ reliés à l'énergie [23]. Dans les pays en développement, c'est 70 % de l'énergie électrique et 40 % de l'énergie primaire qui sont utilisées pour les bâtiments, les rendant responsables de 40 % des émissions de CO₂ liées à la combustion [24]. Au Canada, en 2016, la consommation d'énergie, tous types d'énergies confondus, pour le secteur résidentiel seulement était responsable de 13 % des émissions de CO₂. De ces différents types d'énergie, les deux principales sources d'énergie du secteur des bâtiments au Canada sont l'électricité et le gaz naturel, représentant respectivement 35 % et 49 % de l'énergie utilisée dans ce secteur [25]. Cette énergie est utilisée principalement pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments [26]. Un manque de législation par rapport aux exigences des bâtiments explique pourquoi ce secteur consomme autant d'énergie. Pourtant, les technologies qui pourraient permettre une diminution significative de cette consommation d'énergie ne manquent pas et ce, tant au Québec qu'ailleurs dans le monde. Comme présenté dans le Global Status Report, si la gestion de l'énergie des bâtiments était connectée à des systèmes d'appareils intelligents ayant fait leurs preuves, ce sont 230 Exajoules (EJ) d'énergie cumulée, soit 230×10^{18} joules, qui pourraient être économisées mondialement d'ici 2040. Ceci représenterait une diminution allant jusqu'à 10 % de la consommation d'énergie au niveau mondial et ce, sans sacrifier le confort des utilisateurs. Le rapport évalue également que si des investissements adéquats étaient effectués dans des systèmes de chauffage et refroidissement plus performants, c'est jusqu'à 25 % de la consommation d'énergie actuelle des bâtiments qui pourrait être réduite. [23]

2.1.3 Un vent de changement en construction

La présente section vise à démontrer différents éléments permettant de constater certains changements qui ont lieu dans le secteur de la construction. Ces changements, souvent d'abord timidement implantés dans le secteur, sont désormais de plus en plus épaulés par des structures de travail circulaires, des mises à niveau des normes et des certifications, etc. Toutefois, ces changements restent mineurs étant donné que les informations relatives aux nouvelles technologies et techniques de travail sont dispersées et manquent d'uniformité tant dans leur compréhension que dans leur application. Afin d'aider à regrouper cette information, l'IntelliProsperité (Smart Prosperity Institute, SPI) a mandaté un groupe de travail qui avait pour but de recenser et résumer les différentes technologies et techniques pouvant s'appliquer au contexte du Canada. Les éléments importants de ce travail sont présentés tout au long de cette section. La recherche effectuée dans le cadre de ce travail a permis la publication d'un document présentant des techniques de travail prometteuses pour le marché canadien de la construction de par leur disponibilité sur le marché et du fait que ces techniques sont adaptées aux ressources disponibles ainsi qu'au climat canadien. Cette publication est la partie quatre de la *Série sur les meilleures pratiques mondiales du secteur de l'économie circulaire* et a été publiée sur le site du SPI.

Augmentation des initiatives vertes

Tel que présenté précédemment, le secteur de la construction a un impact important sur l'environnement et l'économie d'un pays, consommant des volumes importants de ressources naturelles, matérielles et énergétiques. Par contre, des initiatives vertes prennent tranquillement racine dans le secteur, que ce soit dans le domaine de la recherche et du développement ainsi que dans l'industrie. Au Canada, des investissements par le biais, entre autres, de programmes de subvention dans le secteur résidentiel, ont été effectués afin de diminuer l'énergie consommée par les habitants. En 2013, ces améliorations ont permis de diminuer la facture des consommateurs d'en moyenne 869 \$ par logis, par an, représentant 12 G\$ d'économies au niveau du pays. De plus, comme les constructions dites vertes gagnent en popularité, cela a permis une diminution des coûts pour ce type de construction dans les dernières années [26]. En 2014, le nombre de bâtiments certifiés LEED a connu une augmentation de 22,14 % pour les bâtiments commerciaux et de 29,96 % pour les bâtiments institutionnels [14]. Également, au Canada, sur

10 ans, une diminution de 40 % des coûts énergétiques a été observée pour un bâtiment Net-Zero Energy [26].

En plus d'avoir différentes certifications possibles, les constructeurs ont accès à de plus en plus de techniques de construction pour atteindre les exigences de ces certifications. Par exemple, l'utilisation de panneaux préfabriqués est une option intéressante à plusieurs égards puisqu'elle permet non seulement de diminuer la somme de travail requise sur le chantier, mais aussi de mieux gérer les ressources, étant donné que la majorité du travail est effectuée dans un environnement contrôlé. Cette technique permet une meilleure gestion des ressources mais aussi la réutilisation des excédents de matériaux vers d'autres projets. Un autre exemple de technologie qui est de plus en plus préconisée est l'utilisation de logiciels de type *Build Information Modeling* (BIM). L'utilisation de la technologie BIM permet, entre autres, de mieux évaluer les quantités de ressources nécessaires lors de la construction, en plus de permettre une meilleure gestion des déchets générés, permettant ainsi d'augmenter leurs chances d'être récupérés ou réutilisés.

Alternatives au béton

De nombreuses alternatives au béton standard, lequel, comme il a été démontré, exige une utilisation importante de ressources tout en étant très polluant à produire, sont explorées, développées et progressivement implantées sur le marché. Ainsi, l'utilisation de matériaux alternatifs au béton fait partie des pistes ; par exemple, l'utilisation du bois en structure pour des bâtiments commerciaux et résidentiels de 5-6 étages, est maintenant de plus en plus courante en Amérique du Nord. Cecobois, une organisation québécoise ayant pour but de promouvoir l'utilisation du bois comme structure des bâtiments, a développé plusieurs documents et formations afin d'aider l'industrie à développer cette expertise au Québec [27]. D'autres alternatives développées par différents groupes de chercheurs visent, de leur côté, à développer des bétons plus « verts ». Par exemple, la compagnie canadienne CarbonCure injecte du CO₂ directement dans le béton durant sa coulée. Ce CO₂ est alors séquestré dans le béton, le rendant plus résistant qu'un béton conventionnel tout en permettant une réduction de la quantité de ciment requise de 5 à 12 % [28]. Le 725 Ponce, situé à Atlanta, aux États-Unis, un bâtiment de 14 étages de plus de 949 000 pieds carrés, a été construit avec ce type de béton, permettant ainsi de réduire son empreinte écologique [29]. Similairement, la compagnie Blue Planet a développé une technologie permettant, pour sa part, de séquestrer du CO₂ dans des granulats créés

artificiellement à partir de granulats recyclés. L'une des pistes d'aire d'attente de l'aéroport de San Francisco a été réalisée avec ces granulats permettant de réduire et même compenser son empreinte carbone [30]. Une autre manière de diminuer l'impact environnemental du béton est d'en diminuer la quantité de ciment qu'il contient étant donné que ce dernier est très polluant à fabriquer. Bien que le ciment soit un ingrédient de base du béton, un certain pourcentage du ciment peut être substitué par des ajouts cimentaires. Ces ajouts cimentaires proviennent des déchets d'autres industries. Par exemple, la compagnie Lafarge vend des mélanges d'ajouts cimentaires constitués de laitier, un sous-produit de l'industrie du fer, et de cendres volantes, un sous-produit de la combustion du charbon [31]. Bien que les cendres volantes peuvent remplacer jusqu'à 50 % du ciment, il est important de prendre en compte plusieurs éléments, par exemple la résistance minimale que doit atteindre le béton, afin de déterminer le pourcentage de remplacement. De ce fait, la moyenne de remplacement est de 17 % au Canada [32]. De son côté, le centre de tri TriCentris a récemment mis sur le marché une poudre de verre provenant de verre recyclé pouvant être utilisée comme ajout cimentaire, qui a été développée par la chaire de recherche SAQ de l'Université de Sherbrooke, tel que discuté plus tôt [33]. L'utilisation de cet ajout cimentaire sur le marché québécois est très prometteuse et sera davantage discutée en section 2.1.4.

Structures de travail et certifications

De plus en plus d'organismes et entités gouvernementales mettent sur pied des structures de travail encadrant le domaine de la construction afin que ce dernier soit orienté vers des pratiques durables. Ces structures sont souvent basées sur les 17 objectifs de développement durable (DD) publiés en 2015 par les Nations Unies. Ainsi, la société des Ponts Jacques Cartier et Champlain au Canada a intégré certains de ces objectifs directement dans la mission de la société [34]. Également basé sur ces objectifs de DD, L'UNECE (Commission économique des Nations Unies pour l'Europe) a publié en 2017 un guide des meilleures pratiques en termes de standards énergétiques des bâtiments. Ce guide a pour but d'aider l'industrie à rendre les bâtiments plus performants et efficaces et ce, de la conception jusqu'à leur entretien et favoriser ainsi le DD afin de répondre à la demande énergétique mondiale croissante. En publiant un tel guide, la Commission espère que toutes les parties prenantes du secteur, incluant les gouvernements qui

peinent souvent à mettre les législations requises en place, s'y réfèrent afin d'améliorer les exigences énergétiques des constructions [35].

La Fondation Ellen MacArthur a pour sa part publié un guide méthodologique pour aider l'accélération de la transition vers l'EC. Ce guide est basé sur la méthode ReSOLVE : régénérer, partager (*share*), optimiser, boucler (*loop*), virtualiser, échanger. Cette méthode permet d'encadrer plusieurs institutions à travers le monde afin de leur permettre d'élaborer leurs plans de circularité [36]. Plusieurs institutions et compagnies ont déjà adopté la méthode ReSOLVE. Parmi celles-ci se trouve le plan d'action de l'Union européenne « Closing the Loop », de même que le plan de circularité de la ville de Londres. Quelques firmes intègrent un ou plusieurs principes de cette méthode dans leurs projets. La compagnie Caterpillar, quant à elle, reconditionne les moteurs de ses machineries lourdes, ce qui répond aux éléments d'optimisation et de boucle de cette méthode. La compagnie Philips, de son côté, offre un service de lumière à l'utilisation, c'est-à-dire, que plutôt que d'acheter un système d'éclairage, le client le « loue » et Philips s'assure de son bon fonctionnement tout au long de la durée de vie du système. Ce système répond aux cadres de partage, d'optimisation, de virtualisation et d'échange.

Pour répondre à ces structures de travail et encourager l'industrie à y adhérer, plusieurs certifications en construction ont vu le jour au cours des vingt dernières années. Par exemple, la certification LEED, l'une des plus connues et établies, est un système d'évaluation d'un bâtiment selon des critères de durabilité environnementale, laquelle permet d'attribuer une note de performance environnementale au bâtiment évalué. Ses critères sont nombreux et variés : localisation, innovations utilisées lors de la construction, efficacité énergétique, réduction de l'utilisation d'eau et de ressources, qualité du bâtiment, etc. [37]. Elle ne fait toutefois pas l'unanimité ; ainsi, plusieurs acteurs de l'industrie critiquent parfois son système de pointage qui, selon ces derniers, devrait considérer d'autres structures de travail en complémentarité [38]. De plus, Latendresse fait ressortir dans son mémoire que la certification LEED, comme quelques autres certifications, n'est pas adaptée au contexte québécois. En effet, la plupart de ces certifications utilisent souvent la consommation d'énergie comme mesure de base, négligeant l'impact de l'utilisation d'énergies propres comme l'hydroélectricité québécoise [39].

Une autre certification, développée par la division brésilienne du Conseil du Bâtiment Durable (Green Building Council, GBC) est le Standard Énergie Zéro (*Net Zero Building Certification*) [40]. Cette certification est octroyée aux bâtiments énergétiquement autosuffisants.

Les certifications pouvant s'appliquer aux bâtiments sont de plus en plus nombreuses sur le marché. Elles se différencient cependant par les indicateurs principaux de performance considérés, lesquels évoluent constamment grâce à la recherche et au développement de nouvelles technologies [41].

La division canadienne du conseil du bâtiment durable (GBC) a créé un standard de construction nommé Carbone Zéro en 2017 [42]. Ce standard peut être appliqué à des bâtiments neufs ou existants et est le premier standard visant les émissions de carbone comme indicateur principal de performance du bâtiment. La division canadienne de GBC définit un bâtiment carbone zéro comme suit :

“Un bâtiment très écoénergétique qui produit sur place, ou qui se procure, de l’énergie renouvelable sans carbone ou des crédits de carbone de grande qualité dans une quantité suffisante pour compenser les émissions de carbone annuelles associées aux matériaux et à l’exploitation du bâtiment.” [42]

Bien que développé au Canada, le standard est utilisé internationalement pour évaluer la performance de certaines constructions. Par exemple, le bâtiment Carbone zéro à Hong Kong, situé dans le parc industriel CIC-ZCP dans la baie de Kowloon, répond à ce standard.

Certaines certifications s'appliquent aux infrastructures en général plutôt qu'uniquement aux bâtiments. Par exemple, la certification BREEAM évalue les performances environnementales, sociales et économiques des bâtiments [43]. Un exemple de construction répondant à cette certification est situé à Moscou, soit le Ducat Place III [44].

La certification Envision, une nouvelle certification développée en 2018 aux États-Unis, a pour but d'évaluer les infrastructures autres que les bâtiments sur un principe de pointage similaire à LEED [45]. Il s'agit de la première certification applicable spécifiquement aux infrastructures urbaines (ponts, routes, gares, etc.). Le projet de déconstruction du pont Champlain vise à atteindre leur certification Platine de cette certification.

Comme nous pouvons le constater, les certifications, structures de travail et technologies dites vertes sont nombreuses dans le secteur de la construction. À la lecture de ces différents éléments, la question se pose donc à savoir pourquoi ces certifications ne sont pas davantage populaires.

2.1.4 Recyclage du verre et béton québécois

Au cours des dernières années, beaucoup d'efforts ont été déployés au Québec afin de trouver de nouveaux marchés pour le verre recyclé, principalement suite à une chute du taux de recyclage de cette matière. En effet, le bilan de Recyc-Québec publié en 2015 révèle que seulement 55 000 tonnes de verres étaient acheminées vers les conditionneurs et recycleurs québécois cette année-là, soit 57 % de moins qu'en 2008. Tel que présenté dans le Tableau 2-2, de ce tonnage, seulement 23 000 tonnes provenaient de la collecte sélective, le restant provenant du verre consigné ou de collectes privées. C'est très peu, considérant que, toujours en 2015, 120 000 tonnes de verre ont été collectées et triées par les centres de tri, afin d'être recyclées, vendues sur d'autres marchés ou envoyées dans des sites d'enfouissement [46], dont environ 62 % provenaient de contenants alimentaires. Recyc-Québec explique cette baisse importante par cinq principaux facteurs. D'abord, le principal conditionneur de verre du Québec, l'usine Klareco, a fermé ses portes en 2013, diminuant de manière importante la demande de verre recyclé. Ensuite, les marchés qui pourraient utiliser du verre recyclé peinent à se développer malgré leur potentiel. Ce qui fait que, par manque de débouchés, une quantité notable du verre est utilisée comme recouvrement journalier dans les lieux d'enfouissement technique (LET) plutôt que d'être reconditionné ou recyclé. Le rapport de Recyc-Québec souligne également que certains produits alimentaires sont maintenant distribués dans des contenants de plastique, vu son coût et son poids moindre, diminuant ainsi la quantité de verre provenant de l'industrie alimentaire. Finalement, le niveau de contamination du verre qui provient des centres de tri est généralement très élevé, empêchant son recyclage adéquat [47].

Plan Verre l'Innovation

Pour pallier la problématique liée à la contamination du verre, le Plan *Verre l'Innovation* a été mis en place par Éco Entreprise Québec (ÉEQ). ÉEQ est un organisme à but non lucratif qui, à titre d'expert dans la chaîne de valeur de la collecte sélective, travaille dans le but de revaloriser 100 % des matières recyclables. Afin d'atteindre son objectif, le projet explore les diverses

solutions possibles afin d'améliorer le taux de pureté du verre traité en centre de tri et de développer les marchés pour cette matière, afin de permettre un taux de recyclage de 100 % du verre issu de la collecte sélective au Québec [46]. Le but du projet pilote est d'augmenter la quantité de verre collecté et envoyé à des conditionneurs de verre par rapport aux chiffres de 2015, présentés ci-dessous dans le Tableau 2-2.

Tableau 2-2 Collecte du verre en 2015 [45][47]

Source du verre	2015 (tonne)
Verre acheminé à la collecte sélective	120 000
Verre collecté reconditionné	23 000
Consigne à remplissage unique (CRU) reconditionné	24 000

Ainsi, en 2018, des 157 700 tonnes de verre consommé par les ménages, seulement 77 % de celui-ci a été acheminé à la collecte sélective [48]. Le verre produit par les ménages inclut tout contenant alimentaire, de boissons ou autre qui est jeté à la poubelle ou mis au bac de recyclage. Une partie du verre collecté par la collecte sélective est vendu aux conditionneurs. Les conditionneurs de verre ont deux autres sources additionnelles de verre que la collecte sélective, soit la CRU et la collecte privée. Bien qu'il y ait eu davantage de verre recyclé via la collecte sélective en 2018 par rapport à 2015, ce tonnage reste bas. Une grande proportion du verre passant par la collecte sélective est utilisée à titre de recouvrement dans des sites d'enfouissement ou ailleurs. La Figure 2-4, tirée du bilan de Recyc-Québec [48], montre l'évolution de ces quantités de verre :

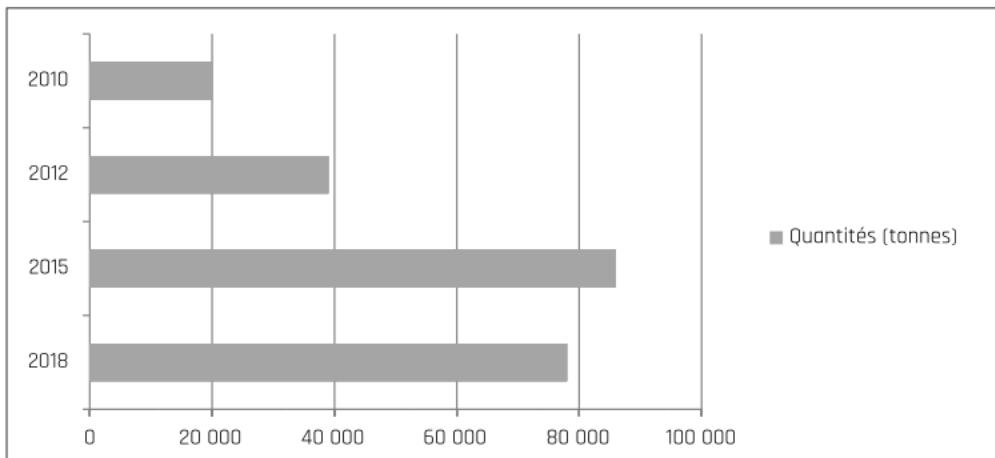


Figure 2-4 Quantités de verre acheminé aux fins de recouvrement ou autres usages [47]

Afin d'atteindre cet objectif, le projet de l'ÉEQ *Verre l'Innovation* a commencé par faire état de la situation du recyclage du verre au Québec en 2015. Le rapport d'ÉEQ dénote qu'on retrouve en moyenne, dans le verre trié, 30 % d'impuretés, dont 13 % de particules fines et 7 % de papiers et cartons [46]. Pour atteindre un taux de pureté plus élevé, le rapport note deux principaux éléments qui peuvent être améliorés. Tout d'abord, l'accent du conditionnement ne doit pas être mis sur une production d'un tonnage élevé, mais plutôt sur une qualité de recyclage, donc un taux d'impuretés bas. Avec la fermeture des marchés asiatiques du recyclage, l'importance de produire un recyclage de qualité est ressortie comme primordiale et ce premier élément comblerait cette problématique. Le second élément, soit une meilleure formation des employés permettrait d'améliorer la qualité du tri, soit un élément de base important [46].

Le but du projet était d'atteindre un taux de pureté d'au moins 95 % dans le verre recyclé, tout en répondant au tonnage entrant dans les centres de tri. Pour ce faire, différentes machineries de tris ont été testées et analysées, permettant de faire des recommandations adaptées selon les tonnages entrant dans les centres de tri. L'aspect économique, soit le prix des machines et le coût actuel pour se départir du verre, qui est entre 19 \$/t et 28 \$/t a également été pris en compte [46]. Au cours du projet pilote, le verre a été vendu entre 0 \$ et 10 \$ la tonne [46] ; le prix du verre n'a pas été plus élevé considérant que les marchés ne sont pas encore développés.

Récemment, la SAQ s'est engagée à offrir un service de collecte avec une consigne élargie. Les contenants vides visés par cette nouvelle consigne pourront être tous rapportés au même endroit,

soit dans une gobeuse installée proche des succursales SAQ. Le tri des contenants déposés à ces points de dépôt se fera de manière automatisée. Cette façon de procéder vise à empêcher des contaminants de se mêler au verre directement à la source de la collecte [49][50].

Marchés potentiels pour le verre recyclé

L'ÉEQ suggère, via le Plan Verre l'Innovation, quelques marchés potentiels pour le verre recyclé, dont notamment la micronisation du verre pour en faire un ajout cimentaire. Ce plan dénote que le verre recyclé serait un bon substitut aux cendres volantes. Soit un ajout cimentaire couramment utilisé au Québec et à l'international, étant donné que ce dernier est un sous-produit des centrales de charbon. Au Québec, ce ajout est importé principalement des États-Unis. Comme les centrales au charbon se font de plus en plus rares, l'offre est amenée à diminuer et conséquemment le prix risque d'augmenter. De plus, ce produit doit être importé ce qui signifie une charge environnementale et économique supplémentaire, contrairement à la poudre de verre qui est un produit local. En étudiant ce marché potentiel, l'importance d'inclure tous les acteurs dans ce changement est soulignée : cimentiers, bétonniers, ÉEQ, ministères et organismes publics, conditionneurs et recycleurs, fabricants de poudre de verre et donneurs d'ouvrages [46]. Le rapport montre un manque de communication important entre les partenaires de cette industrie et il est donc primordial de pallier cette problématique.

Développement d'un nouvel ajout cimentaire : la poudre de verre recyclé

Au Québec, les recherches qui ont mené à cette technologie ont eu lieu principalement au sein de la chaire SAQ à l'Université de Sherbrooke, sous la direction du professeur titulaire Arezki Tagnit-Hamou. Cette chaire, qui a été créée en 2004, a pour but de trouver des solutions innovatrices afin de valoriser le verre mixte issu de la collecte sélective dans le béton. L'utilisation du verre recyclé comme adjuvant cimentaire permet de réduire l'empreinte environnementale du béton tout en respectant les contraintes économiques des projets [51]. Avant d'être approuvée par la norme québécoise de construction CSA, la technique a été étudiée en laboratoire puis dans différents projets pilotes au Québec. En laboratoire, l'équipe de Tagnit-Hamou a déterminé que le verre doit être moulu finement, soit entre 38 µm et 45 µm et peut remplacer entre 10 % et 20 % du ciment habituellement requis [52]. Si la poudre de verre se prête bien à cette utilisation, c'est grâce à sa forte teneur en silice, une grande surface de contact, et sa

nature amorphe [1]. Lors de l'hydratation du ciment permettant le durcissement du béton, le ciment produit des molécules de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La silice amorphe SiO_2 contenue dans la poudre de verre interagit alors avec la portlandite dans le ciment pour créer un gel d'hydrate de silicate de calcium (C-S-H) : cette réaction démontre la propriété pouzzolanique de la poudre de verre [1]. Ce sont ces gels créés qui permettent au béton d'être plus résistant en compression qu'un béton standard, sans ajout cimentaire. Les résultats d'une autre étude, soit celle de Shao et al., de l'université de McGill, démontrent qu'avec une poudre de verre moulu finement il est possible d'atteindre une résistance en compression similaire qu'avec les cendres volantes [53]. Les recherches de Shayan et Xu soulignent toutefois pour leur part que la résistance en compression moyenne des bétons contenant de la poudre de verre requiert plus de 28 jours pour être atteinte, soit la référence de temps utilisée en génie civil pour évaluer la résistance mécanique en compression d'un béton [54]. Ils expliquent ce comportement par le fait que l'hydratation de la poudre de verre est plus lente que celle du ciment de Portland [54].

Les premières études en laboratoire effectuées au Québec qui sont discutées dans le paragraphe précédent datent du début des années 2000 ; les études sur l'utilisation de la poudre de verre étaient alors rares. Ce n'est que récemment que celles-ci ont gagné en popularité à l'international. De nombreuses nouvelles études, comme celle menée par Joshua et al. en 2018 au Niger, confirment les premiers résultats obtenus par Tagnit-Hamou [55] ; des résultats similaires ont aussi été obtenus à Hong Kong, où seulement 10 % du verre provenant de bouteilles de boissons est recyclé, le reste se retrouvant dans les sites d'enfouissement [56]. Jiang, dont l'article a été publié en 2019, analyse en laboratoire la possibilité d'utiliser le verre dans divers produits de béton en construction et confirme les résultats de la chaire SAQ.

Plus récemment, Tagnit-Hamou et son équipe ont, pour leur part, fait des tests terrain dans le cadre d'études pilotes pour différentes applications : murs structuraux, dalles intérieures et trottoirs [1]. Ces études pilotes, réalisées au Québec, en 2016, confirment la validité des résultats précédemment observés en laboratoire. Ces tests ont permis de confirmer qu'un béton contenant de la poudre de verre comme ajout cimentaire non seulement garde de bonnes caractéristiques mécaniques mais que celles-ci augmentent davantage dans le temps comparativement à un béton conventionnel. De plus, le béton contenant la poudre de verre devient environ trois fois plus résistant à la pénétration des ions de chlorure, réduisant directement le risque de corrosion des armatures d'acier et donc d'une usure prématuée. D'un point de vue environnemental, l'équipe

de Tagnit-Hamou rappelle que l'utilisation de la poudre de verre permet la diminution des émissions de CO₂ qui sont associées à la production de ciment. De plus, l'équipe souligne que le verre, considéré comme un produit de post-consommation, permet de récolter le double de points pour obtenir la certification LEED lorsqu'utilisé comme ajout cimentaire, en comparaison à d'autres ajouts [1].

Un élément des plus importants pour cette technologie concerne la mise à jour de la norme de construction québécoise en décembre 2018. Ainsi, la poudre de verre micronisée a été acceptée comme ajout cimentaire, au même titre que les ajouts cimentaires traditionnels (cendre volantes, fumée de silice, laitier). Cet ajout se retrouve dans la section A3004-E1 *Méthode normalisée pour l'évaluation d'autres ajouts cimentaires pour le béton* de la norme CSA A3000-13. Les exigences minimales présentes dans la norme ont été basées sur les recherches par la chaire SAQ [57]. Toutefois, la poudre de verre comme ajout cimentaire n'a toujours pas été ajouté explicitement à la norme CSA A23. En effet, cette norme accepte les matériaux de la norme A3000, dont la poudre de verre depuis 2018, mais n'encadre pas l'utilisation de cette technique.

D'autres projets pilotes hors du Québec ont été réalisés en utilisant cette technologie. Par exemple, publié par Krstic et Davalos en 2019, un projet de trottoir dans le Queens à New York utilise des mixtures de béton composé de 20 % et 40 % de poudre de verre en remplacement du ciment. Les mesures à 28 jours du béton avec 20 % et 40 % de poudre de verre montraient des résistances de 38,3 MPa et 37,8 MPa respectivement, soit bien au-dessus du minimum requis par les normes de construction de la ville de New York dans ce contexte (22 MPa). Ces mêmes mesures à 90 jours étaient encore plus élevées, soit 48,9 MPa et 50,2 MPa [58].

En 2014, Jiang et al. de l'Université de Pittsburgh ont réalisé des analyses de cycles de vie sur différents types de béton. Ces analyses avaient pour but d'évaluer l'impact environnemental d'un produit sur toute sa durée de vie, considérant chacun de ses composants, dans un contexte nord-américain. L'un des bétons analysés contenait de la poudre de verre. Les analyses effectuées démontrent que dans ce contexte, le béton contenant de la poudre de verre a un impact moindre sur l'environnement qu'un béton conventionnel [59].

Similairement, en 2018, Deschamps évalue les gains environnementaux de la poudre de verre comme ajout cimentaire dans un contexte québécois. Afin d'évaluer l'impact environnemental de la poudre de verre, il considère l'énergie nécessaire à sa transformation en poudre ainsi que les

émissions dues à son transport grâce à une analyse de cycle de vie en boucle ouverte. Il compare deux scénarios : un béton standard et un béton contenant de la poudre de verre. Son analyse de cycle de vie révèle que le béton utilisant de la poudre de verre a toujours un impact environnemental moindre. Deschamps teste ensuite quatre scénarios différents pour le béton contenant de la poudre de verre dans une étude de sensibilité. Le premier scénario considère que la fabrication de la poudre de verre émet des particules fines. Le second scénario considère ce béton alors qu'il requiert des fournisseurs distants. Le troisième, que le béton additionné de poudre de verre a une plus longue durée de vie, et le quatrième, que ce béton utilise en plus de la poudre de verre, des granulats recyclés. Le premier et troisième scénarios ne viennent pas impacter l'avantage environnemental de la poudre de verre comme ajout. Toutefois, dans le cas du deuxième scénario un élément intéressant ressort quant au transport nécessaire par les fournisseurs. Si le béton contenant de la poudre de verre nécessite 300 km de transport en train additionnel pour les éléments de base du béton (sable, roches et ciment), alors celui-ci aura un impact environnemental plus grand que le béton standard. Deschamps établit donc une limite où le recyclage en boucle ouverte de la poudre de verre n'est plus bénéfique pour l'environnement [60].

Une étude d'analyse de cycle de vie a été réalisée aux États-Unis, soit dans le contexte de la Floride, par Tucker et al. [61]. Cette étude compare le cycle de vie du verre lorsqu'il est utilisé comme ajout cimentaire plutôt que réutilisé en boucle fermée, soit pour fabriquer du nouveau verre, ou comme revêtement. En Floride comme au Québec, la majeure partie du verre n'est pas recyclée, mais utilisée comme revêtement dans les LET. L'impact environnemental du verre est nettement moins important lorsque utilisé comme ajout cimentaire plutôt que comme revêtement et légèrement moins important, lorsque réutilisé pour faire du nouveau verre. Tucker et al. analysent également la viabilité économique de cette technologie. Pour concurrencer le marché traditionnel du recyclage du verre, ils évaluent que 50 000 tonnes de verre par an devront être traitées sur une période de 10 ans, à raison de 4500 heures opérationnelles par an. Ce calcul considère que la poudre de verre devra se vendre à un prix compétitif vis-à-vis le prix des cendres volantes qui est à 40 \$USD la tonne en Floride.

Un calcul basé sur la méthodologie de Tucker et al. fait dans le contexte québécois décrit plus tôt permettrait de connaître la viabilité économique de cette technologie pour le marché du Québec.

Contrairement au contexte du calcul de Tucker et al., le coût de la poudre de verre comme ajout cimentaire est déjà établi au Québec, soit autour de 200 \$ la tonne.

2.1.5 Blocages dans l'industrie

Comme évoqué un peu plus tôt, de nombreux obstacles minimisent l'implantation de l'économie circulaire dans le domaine de la construction. Ceux-ci peuvent être de nature technique, financière ou sociale. Comme noté par Rohracher, certaines de ces technologies demandent parfois davantage d'expertise ou d'équipement spécialisé, comparé à ce qui est utilisé sur le marché actuellement, alors que l'industrie de la construction a tendance à être très traditionnelle et conservatrice [62]. Rohracher note également un manque de collaboration et de communication dans le domaine ainsi qu'une faible demande pour rendre ce secteur plus « vert ». Des obstacles similaires ont été observés par Poirier dans le cadre de sa recherche de maîtrise en partenariat avec Lafarge laquelle tente de déterminer pourquoi la demande pour les agrégats recyclés n'est pas plus élevée sur le marché de la construction. Comme Rohracher, Poirier dénote que le manque de connaissances et d'expertise est un des problèmes rencontrés par cette technique. D'autres obstacles particuliers à cette technique ont été aussi remarqués, soit l'aspect visuel ainsi que l'odeur des agrégats issus de béton recyclé, lesquels ne sont pas appréciés [2]. Ces obstacles n'avaient encore jamais été répertoriés dans la littérature. Les obstacles sont donc nombreux et variés, étant donné la diversité de technologies durables et les différents contextes dans lesquels ces techniques peuvent être implémentées. Toutefois, bien que variés, il en ressort que certains de ces obstacles se répètent, soulignant l'importance d'y faire face.

Obstacles identifiés par le plan de la ville de Londres

Dans le plan de circularité de Londres énoncé un peu plus tôt, plusieurs obstacles ont été identifiés pour le secteur de la construction [8]. Dans ce plan, la réutilisation des matériaux est mise de l'avant. Toutefois, le plan note une augmentation de l'utilisation des matériaux composites en construction : ces matériaux sont difficiles à désassembler pour le recyclage ou la réutilisation, car ce sont des assemblages de composants qui sont collés ou fusionnés. Aussi, certaines constructions récentes utilisent des matériaux de moins bonne qualité pour diminuer les coûts. De ce fait, à cause de leur mauvaise qualité, ces matériaux ne sont pas réutilisables en fin de vie du bâtiment. Ceci est sans compter que le marché pour des matériaux issus de la

déconstruction n'est pas encore établi. Ceux-ci trouveront donc difficilement preneur, surtout que les matériaux sont souvent mal identifiés lorsqu'une réutilisation serait possible. Cet effort supplémentaire requis est un obstacle capital considérant les ressources nécessaires pour le surmonter alors qu'il n'y a également pas de prime offerte aux firmes qui voudraient concevoir un bâtiment propice à la réutilisation en fin de vie ou utilisant des matériaux recyclés. Ainsi, malgré que le plan de circularité mis de l'avant par la ville de Londres relativement à l'importance de la réutilisation des matériaux, les obstacles à ce marché restent nombreux.

Déconstruction du pont Champlain

Les écueils observés à Londres ne sont pas uniques. Cependant, bien que des obstacles similaires ont été rencontrés par l'équipe responsable de la déconstruction du pont Champlain chez PJCCI, cette dernière a noté certains obstacles qui pouvaient différer de ceux rencontrés dans d'autres situations. Dans l'offre de contrat, il était demandé qu'un maximum de matériaux de l'ancien pont soit réutilisé dans le cadre de la déconstruction du pont. Afin d'atteindre cet objectif, l'équipe de PJCCI avait déjà approché différents projets qui pourraient potentiellement réutiliser lesdits matériaux. Toutefois, afin de ne pas nuire à l'équilibre de marché, l'équipe ne pouvait pas imposer certains de ces projets aux entrepreneurs enchérissant sur le projet de déconstruction. De l'autre côté, les différents projets approchés ne pouvaient obtenir la garantie qu'ils auraient les matériaux visés et, selon leurs échéanciers, allaient possiblement devoir opter pour des matériaux neufs plutôt que ceux provenant de la déconstruction du pont.

Obstacles et acteurs du milieu

Adams et al. ont étudié les blocages possibles de la circularité en sondant les acteurs du marché de la construction en Angleterre et en analysant les niveaux de connaissances qui sont perçus par les différents groupes d'acteurs. Ainsi, en identifiant les perceptions des groupes, les auteurs remarquent relativement à leur niveau de connaissance, que chacun voit les autres comme étant mal informés, et eux-mêmes comme étant les mieux informés, cet aspect met à nouveau en lumière un manque de communication dans l'industrie. Dans tous les groupes, les répondants étaient d'accord à l'effet que les éléments suivants peuvent constituer des obstacles : le manque de compréhension des bénéfices de l'économie circulaire en construction, le manque d'uniformité des mesures du cycle de vie d'une infrastructure, ainsi que le manque de

connaissances sur les possibilités en fin de vie pour les matériaux. Les auteurs ont questionné les répondants sur les défis dans l'industrie. Celui ressortant comme étant le plus important est le manque de motivations pour concevoir des produits relevant les défis rencontrés en fin de vie d'une construction. Celui-ci était suivi de près par un manque de mécanismes sur le marché pour faciliter la récupération des matières et par la complexité des bâtiments. Les entrepreneurs identifient également un manque d'intérêt général dans l'industrie pour les technologies vertes comme obstacle. Les répondants ont identifié quels catalyseurs de l'économie circulaire auraient le plus grand impact positif pour eux. La majorité des suggestions fournies par l'auteur étaient vues comme de bons potentiels catalyseurs pour réduire les obstacles à l'économie circulaire en construction. Celles qui sont ressorties avec les plus hautes notes sont les suivantes : créer une étude de cas clair, faciliter la récupération des matériaux via un plan de retour viable logistiquement et commercialement ainsi que le développement de marché pour les matériaux récupérés. Dans les réponses à cette dernière partie, quelques différences dans la vision des acteurs ont permis de faire ressortir certaines problématiques du marché. Notamment, une perception générale que l'investisseur initial ne bénéficiera pas de l'implémentation de l'économie circulaire à cause des bénéfices non équitables dans la chaîne de marché. Également, les acteurs qui interviennent en fin de vie, tels que les entrepreneurs en démolition, avaient davantage intérêt à augmenter la responsabilité en fin de vie des produits de construction des producteurs que les manufacturiers. Les entrepreneurs principaux et les entrepreneurs de démolition portent beaucoup d'importance sur la création de schémas viables pour la récupération, trouvant les schémas actuels trop restrictifs.

Obstacles pour la construction de bâtiments résidentiels multilogements

Latendresse fait ressortir les freins à l'économie circulaire dans un contexte québécois, mais spécifiquement pour les bâtiments résidentiels multilogements. Des éléments similaires à ceux discutés précédemment sont ressortis, notamment le manque d'un marché pour le réemploi des matériaux ainsi que le manque d'incitatifs pour aider ce marché à se développer, tels que des subventions ou du financement. Latendresse souligne que les édifices résidentiels qui sont construits ne sont pas suffisamment modulables. La fonction d'un bâtiment change plus rapidement que la durée de vie de sa structure ; il est important que le design de la structure permette de s'adapter aux besoins changeants des bâtiments. Également, similairement à ce

qu'Adams et al. faisaient ressortir avec la réutilisation des matériaux, Latendresse souligne un manque d'informations dans ce domaine, ainsi qu'un manque de flexibilité dans le code de construction pour permettre à ce marché de se développer. Selon Latendresse, les coûts environnementaux des matériaux sont rarement, sinon jamais, pris en compte dans les différents calculs, rendant les alternatives vertes plus dispendieuses. Un autre obstacle au Québec à la création de boucles locales des flux soulignés par Latendresse est l'expansion des municipalités sur de grandes superficies. Ce n'est pas seulement parce que le territoire nous le permet, mais aussi à cause de la façon dont les taxes foncières fonctionnent au Québec : une municipalité tirera plus de profits des taxes si elles occupent un plus grand territoire [39].

On peut constater que les obstacles potentiels à l'implémentation de technologies durables dans le domaine de la construction sont nombreux et de natures variées. Il est donc important de clairement les identifier mais aussi de les catégoriser lorsqu'on veut implémenter une certaine technologie sur un marché, soit le marché de la construction au Québec. La revue systématique (RS) présentée dans la section 2.2 vise à atteindre cet objectif.

2.2 Obstacles à la construction durable : une revue systématique

Le but de cette revue systématique est d'identifier et de mieux comprendre les obstacles à l'implantation de l'économie circulaire et des technologies dites vertes dans le secteur de la construction à l'international. Ces obstacles sont situés dans des contextes différents de ceux du Québec, parfois spécifiques à des technologies ou certifications, parfois expliquant dans un sens plus large pourquoi le secteur peine à se tourner davantage vers l'économie circulaire. Ces obstacles seront ensuite répertoriés et synthétisés à titre de référence pour le secteur québécois de la construction.

2.2.1 Protocole de la revue systématique

La revue systématique suit le protocole établi par Briner et Denyer [63]. Le protocole qu'ils ont établi est divisé en huit étapes. Ces étapes permettent à la revue systématique de respecter quatre éléments fondamentaux d'une revue systématique, qu'ils définissent comme suit (Traduit de l'anglais de Briner et Denyer):

- Conduite de manière systématique ou suivant une méthode;
- Présente une méthode transparente;
- Peut être reproduite et mise à jour;
- Résume et synthétise le sujet principal de la recherche;

Les étapes pour répondre à ces éléments fondamentaux sont les suivantes :

Étapes de recherche basées sur Briner et Denyer [63]
1. Problème initial : « Quels sont les obstacles rencontrés par des principes et technologies d'économie circulaire dans l'industrie de la construction, les empêchant d'être implémentés et popularisés? »
2. Objectif : identifier les obstacles que l'EC rencontre dans le secteur de la construction.
3. Critère définissant les études qui sont considérées : papiers traitant des obstacles à l'EC en construction, selon les termes ressortant du réseau bibliométrique.
4. Stratégie pour trouver les études : Utilisation de trois bases de données (Science Direct, Web of Science et Scopus) pour rechercher des articles publiés dans les cinq dernières années.
5. Exclusion des articles non révisés par les pairs et des articles répétitifs. Ajouts d'articles pertinents trouvés hors du processus.

6. Lecture des résumés puis des articles complets.

7. Évaluation de la qualité des articles.

8. Synthétiser les résultats ; classification des obstacles identifiés par les articles.

À partir du problème et de l'objectif initiaux, soit les étapes 1 et 2, un réseau bibliométrique est créé, soit la Figure 2-5. Le but de ce réseau dans le cas de cette revue est de délimiter les grands thèmes et mots clés autour du problème à l'étude. Ceux-ci permettront d'identifier les articles les plus pertinents pour répondre à l'objectif de la revue systématique. Le logiciel VOS Viewer a été utilisé pour créer le réseau basé sur la distance. Dans ce type de réseau, deux éléments sont importants : la distance entre deux nœuds représentant la corrélation entre eux deux, ainsi que la grosseur du nœud représentant son importance selon le nombre de citations contenant ce mot [64].

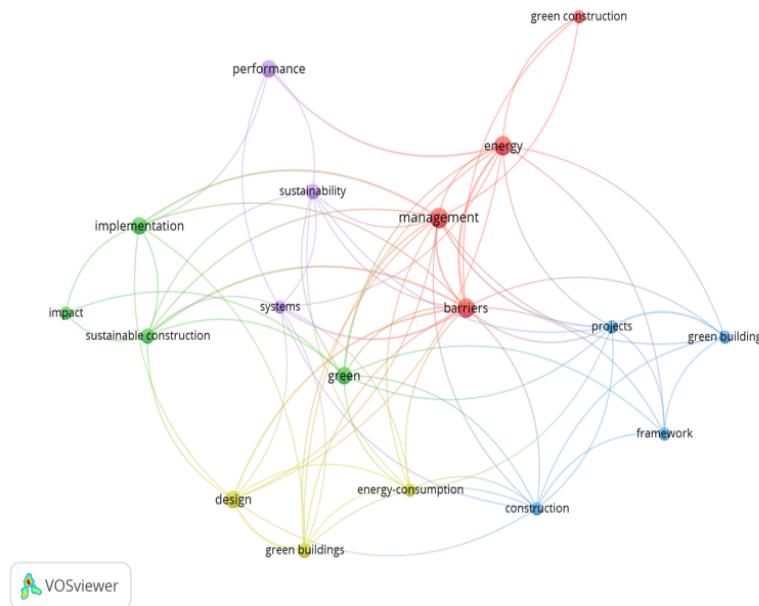


Figure 2-5 Réseau bibliométrique

La base de données Web of Science est utilisée pour la création du réseau. Dans la recherche préliminaire, les mots “green” et “construction” et « obstacles » ont été utilisés ; très peu de résultats ont ainsi été générés, soit 50 résultats. À partir des résultats obtenus par cette recherche, le réseau bibliométrique a été généré avec VOSviewer. Ceci a permis d'identifier des termes qui

pourraient être utilisés comme synonymes ou qui seraient plus appropriés. La recherche s'en est trouvée améliorée :

TS = ((green OR « sustainable development » OR sustainab*) AND (construction OR build*) AND (obstacl* OR barrier*))

Un peu plus de 3000 résultats ont été générés. Afin de diminuer la quantité de résultats il a été déterminé de ne conserver que les plus récents, la recherche a donc été limitée aux cinq dernières années, restreignant l'échantillon à 1674 résultats.

Les types de résultats ci-dessous ont été exclus, réduisant l'échantillon à 1107 résultats :

- **Document de procédure** : ouvrage publié sur des conférences, symposiums, séminaires, colloques, ateliers et conventions dans un large éventail de disciplines. Généralement publié dans un livre d'actes de conférence.
- **Résumé de réunion** : résumé général des articles achevés qui ont été ou seront présentés lors d'un symposium ou d'une conférence.
- **Revue** : étude renouvelée de documents déjà étudiés. Comprends des articles de synthèse et des enquêtes sur la littérature publiée précédemment. Ne présente généralement pas de nouvelles informations sur un sujet.

Une analyse rapide des titres a mis en évidence que le mot clé « build* » rendait la recherche trop large étant donné qu'en anglais « building » ou « to build » peut vouloir dire la création de quelque chose. Également, le terme « green » a été retiré, étant lui aussi trop général. En enlevant ces mots-clés, 391 articles répondaient aux critères.

Comme le thème principal recherché concerne les obstacles rencontrés, la recherche a été précisée pour inclure une référence aux obstacles et barrières (obstacl* OR barrier*) dans le titre des documents. La recherche est devenue la suivante :

TS = ((« sustainable development » OR sustainab*) AND construction) AND TI=(obstacl* OR barrier*) **refined by** : [excluding] **Document Types** : (review or proceedings paper or meeting abstract)

À ce point-ci, 78 articles sont trouvés. L'étape suivante est de vérifier qu'aucun article ne se répète. Une lecture des titres, suivie d'une lecture des résumés permet de sélectionner les articles

appropriés pour la revue systématique. Si un article ne discute pas des obstacles à l'implémentation d'une technologie durable en construction, alors celui-ci n'est pas gardé. Plusieurs articles n'ont pas été conservés parce qu'ils traitaient de barrières à l'implémentation de technologies durables dans un domaine autre que la construction. À ce point, 38 articles répondent aux critères.

Puis, la qualité des articles sélectionnés est évaluée par l'intégrité des bases de données utilisées et en confirmant que les articles ont été revus par les pairs ; dix articles sont ainsi éliminés.

Les articles retenus à ce point sont alors lus en entier. Après lecture, 13 articles sont rejetés pour deux raisons : l'article a été écrit par les mêmes auteurs ou un sujet est similaire à un autre article, tout en étant moins complet, ou l'article ne traite d'aucun nouvel élément de recherche, il s'agit plutôt d'une revue de littérature.

Les 15 articles restants sont relus et les obstacles identifiés par les auteurs ont été collectés et agglomérés.

2.2.2 Obstacles en construction

La revue systématique permet d'identifier divers obstacles au développement durable (DD) rencontrés dans le domaine de la construction à l'international. Le questionnaire qui sera ensuite distribué dans l'industrie québécoise de la construction se base sur les obstacles ressortant le plus fréquemment de cette revue systématique.

Tel que discuté précédemment dans la revue de littérature, certains obstacles aux technologies vertes ressortaient déjà de différentes analyses. Le rapport pour circulariser la ville de Londres, *London's Circular Economy Route Map*, note que souvent, ces nouveaux concepts d'EC et de DD sont peu connus et mal compris [8]. Également, il y est noté qu'il y a un manque de motivation et d'incitatifs à intégrer ces nouvelles techniques qui demandent souvent plus d'efforts, étant donné leur nouveauté. Finalement, le plan souligne le problème de la compétitivité de ces produits par rapport aux produits neufs ayant déjà établi leur marché. Également, Chamberlin et al. [65] identifient la collaboration entre les acteurs comme clés pour que l'économie circulaire s'implémente dans un marché. La variété des obstacles qui ressortent montre l'importance de faire une revue systématique pour les répertorier de manière ordonnée.

La revue systématique permet de s'assurer que tous les obstacles déjà identifiés dans la littérature sont répertoriés et pris en compte dans l'analyse.

2.2.3 Analyse descriptive des articles

La première analyse bibliométrique porte sur l'année de publication des articles retenus, montrée en Figure 2-6. Il est à noter que les articles ont été pris jusqu'en février 2020. Il est fort probable que si cette analyse avait été réalisée à la fin de l'année 2020, un plus grand nombre d'articles publiés durant l'année auraient été gardés.

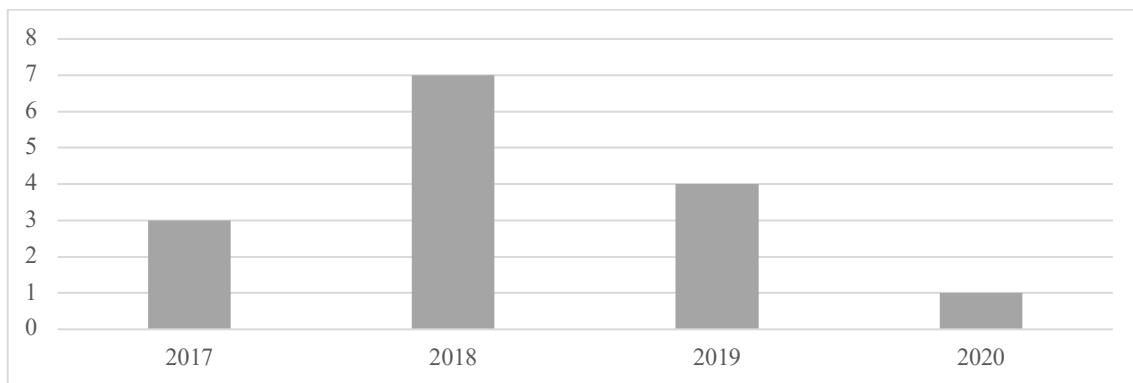


Figure 2-6 Années de publication des articles sélectionnés pour la RL

Il est particulier de constater qu'il y a une nette augmentation dans le nombre de publications en 2018. Celle-ci pourrait s'expliquer par l'Accord de Paris signé à la fin de l'année 2015. Suite à cet accord, il est possible qu'une hausse dans le financement en recherche ait causé une augmentation des publications 2 à 3 ans après la signature dudit accord. La Figure 2-7 répertorie les pays visés par les études sélectionnées

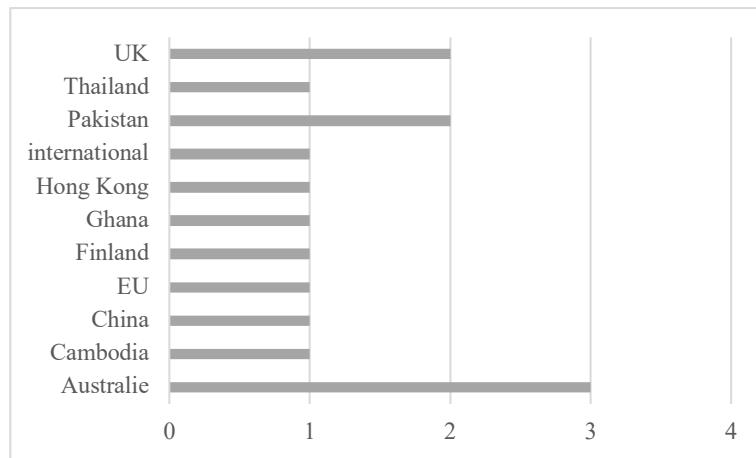


Figure 2-7 Pays visées par les articles sélectionnés pour la RL

Le contexte de l’Australie est visé dans 3 études, suivi du Pakistan et du Royaume Uni, visés tous deux par 2 études. Les autres études visent tous différents pays. Aucune étude ne cible un pays d’Amérique du Nord. L’analyse suivante, montrée à la Figure 2-8 porte sur le journal de publication des articles.

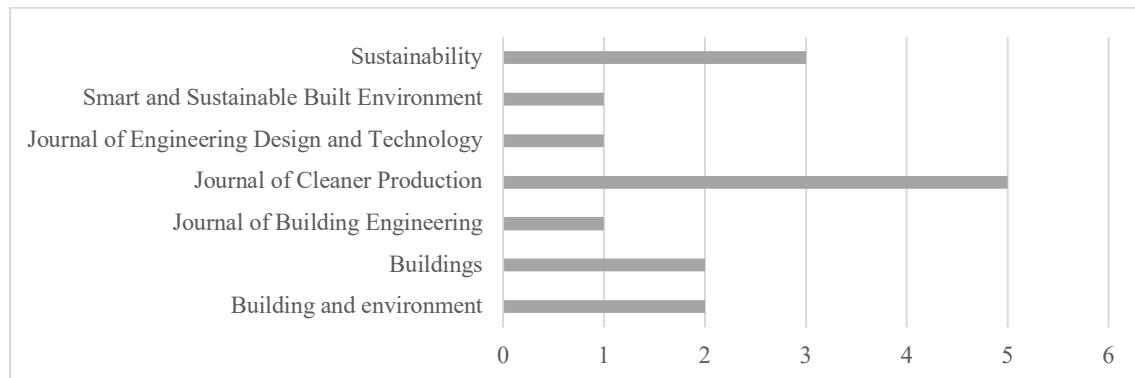


Figure 2-8 Journaux de publication des articles sélectionnés pour la RS

Le « Journal of Cleaner Production », ayant un facteur d’impact de 7,246, a publié six des articles analysés. Le journal suivant, « Sustainability », a un facteur d’impact de 2,576.

La majorité des articles ont entre 3 et 5 auteurs, tels que le montre la Figure 2-9:

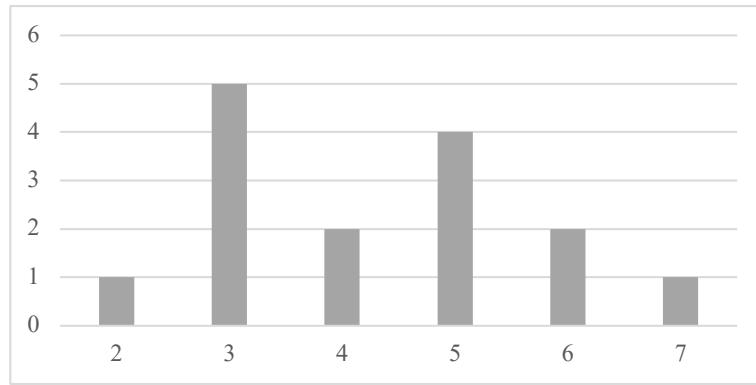


Figure 2-9 Nombre d'auteurs par article ayant été sélectionné pour la RS

2.2.4 Analyse du contenu

La majorité des articles portent sur le secteur de la construction en général. Les thèmes généraux des articles sont présentés dans la Figure 2-10.

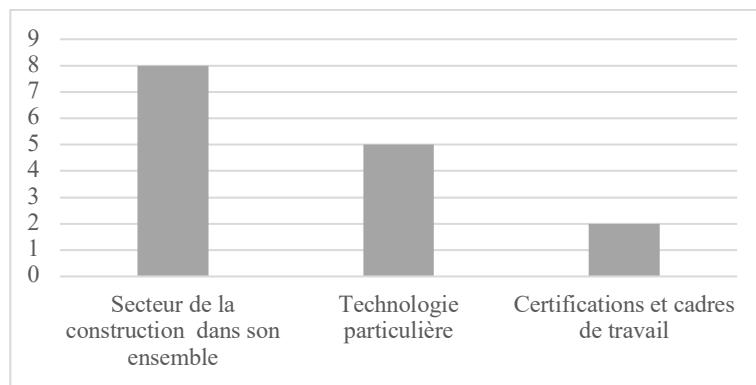


Figure 2-10 Éléments étudiés par les articles sélectionnés pour la RS

2.2.5 Analyse selon la méthodologie utilisée

La majorité des articles à l'étude utilisent une seule technique de collecte de données : soit par le biais d'un entretien ou d'un questionnaire. Seule l'étude par D'Oca et al. [66] n'inclut pas de portion questionnaire ou entretien ; cette recherche analyse plutôt les ateliers réalisés dans le cadre de l'initiative « H2020 Cluster Projects ». Les études utilisant plus d'une technique de collecte de données sont peu nombreuses, soit seulement quatre. Peu d'articles ont plus de 100 répondants, la majorité ayant moins de 60 répondants ; les études ont en moyenne 38 participants.

Si on exclut les deux articles ayant plus de 100 répondants, la moyenne de participants par étude tombe alors à 24. Les Figure 2-11 et Figure 2-12 représentent les types de collectes de données et le nombre de participants pour les 15 articles de la RS. Elles sont présentées à la page suivante.

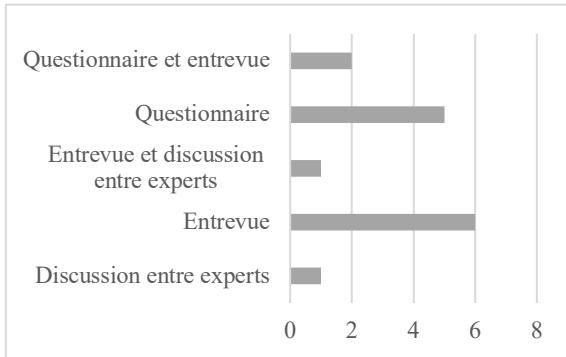


Figure 2-11 Type de recherche

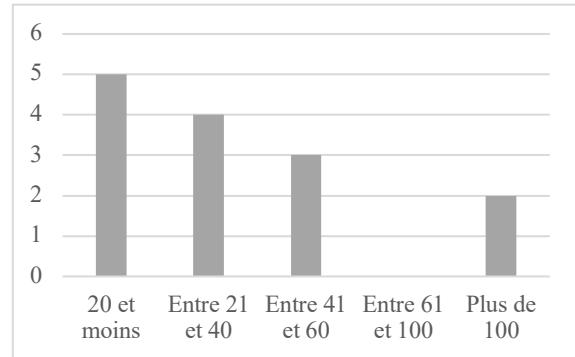


Figure 2-12 Nombre de répondants

La majorité des répondants sont des professionnels de la construction, tels que le montre la Figure 2-13. Comme certains articles portent sur des technologies spécifiques, les répondants à ces études sont des experts sur le sujet concerné (par exemple la technologie BIM).



Figure 2-13 Types de répondants

2.2.6 Analyse par obstacles

Le

Tableau 2-3 regroupe les obstacles identifiés par les auteurs des articles revus. Ces obstacles sont classés en trois grandes catégories : techniques et financières, institutionnelles et psychosociales. Ces trois catégories de barrières ont été choisies en se basant sur les classements les plus fréquemment utilisés dans la littérature. Les obstacles décrits plus précisément sont énumérés en ANNEXE A.

Tableau 2-3 Résumé des articles identifiés par les articles de la RS

	Obstacles	Articles
Barrières techniques et financières	Manque de connaissances et d'information disponible	[67] [68] [69] [70] [66] [71] [72] [73] [74] [75] [76] [77]
	La nature multidisciplinaire des technologies durables rend leur standardisation difficile	[68] [70] [66] [73] [74] [78]
	Incertitudes financières, difficulté d'avoir des fonds	[70] [66] [79] [74]
	Logistiques de conception et/ou de planification limitées et inefficaces	[70] [71] [73] [74] [77]
	Faible capacité de fabrication, traçabilité des matériaux difficile	[70] [71] [74] [75] [76] [77]
Barrières institutionnelles	Limites du cadre réglementaire	[67] [66] [79] [80]
	Passivité du gouvernement : absence ou manque de code, normes et/ou incitatifs	[68] [69] [70] [71] [72] [73] [79] [75] [77]
	Manque de leadership, manque de soutien juridique et institutionnel	[68] [71] [72] [74] [75] [76] [78] [79]
	Intérêts acquis, méthodes d'approvisionnement traditionnelles	[68] [78]
	Outils financiers existants insuffisants et peu attractifs. Taxes et frais élevés imposés	[66] [77] [79]
Barrières psychosociales	Inertie du secteur : priorités économiques ailleurs, absence du soutien des hauts dirigeants	[69] [71] [75] [77] [80]
	Complexité de la terminologie et des méthodes de conception et de construction	[67] [75]
	Manque de demande pour ces technologies	[67] [68] [69] [70] [71] [75] [76] [77] [80]
	Absence de mécanismes d'évaluation des impacts environnementaux	[73] [74] [75] [77]
	Faible acceptation sociale : manque de confiance quant aux avantages	[70] [66] [71] [73] [74] [79]
	Manque de dialogue entre les acteurs	[68] [66] [71] [73] [78] [79]
	Résistance aux changements	[69] [70] [71] [72] [73] [74] [75] [76] [79]

Le manque d'informations disponibles ressort le plus fréquemment dans les différents textes comme étant un obstacle aux technologies durables en construction. Tel que présenté dans la revue de littérature, on sait qu'il y a peu d'informations disponibles au Québec sur les technologies vertes en construction. Le travail mandaté par SPI soutient ce constat.

Nombre des obstacles observés ont un impact les uns sur les autres. Par exemple, le manque de dialogue entre les acteurs de l'industrie a un impact plus important puisque ces technologies ont une nature multidisciplinaire. Également, la complexité de la terminologie et des méthodes de conception nuit à une planification efficace des changements, ou même à mieux évaluer les impacts environnementaux ou économiques. L'inertie du secteur est importante aussi à noter. Dans plusieurs lectures faites lors de la revue de littérature, la résistance au changement dans le domaine de la construction est notée, mais l'inertie amène une autre dimension : celle-ci suggère que les acteurs n'accordent pas assez d'importance à ce changement pour l'implémenter. Au niveau de la structure de l'industrie, le manque d'encadrement gouvernemental et le manque de soutien financier sont souvent à la base des obstacles rencontrés.

Plusieurs obstacles rencontrés sont observés directement au niveau des acteurs. Ceci vient appuyer la décision d'étudier les obstacles sociaux aux changements durables en construction.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

À partir de la revue de littérature et en particulier de la revue systématique, la méthodologie de recherche a pu être établie. À partir des constats de la littérature, un questionnaire a été construit et distribué à l'industrie québécoise de la construction. Une analyse statistique au niveau des acteurs du milieu est faite à partir des résultats de ce questionnaire. Également, un calcul pour évaluer les coûts théoriques d'implémentation sur le marché de la construction de la poudre de verre comme ajout cimentaire au Québec est réalisé.

3.1 Objectifs spécifiques de la recherche

Afin de poser les objectifs spécifiques de la recherche, reprenons la question de recherche initiale :

Quels sont les obstacles socio-économiques à une hausse de la demande pour des technologies durables dans le domaine de la construction au Québec ?

Pour répondre à cette question, la recherche est divisée en 3 objectifs principaux, tels que présentés dans l'introduction de ce mémoire :

1. Identifier les obstacles rencontrés en construction durable sur divers marchés à l'international ;
2. Dresser un portrait des acteurs du milieu afin d'estimer quelles variables influencent la demande de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire ;
3. Évaluer les coûts théoriques d'implémentation sur le marché de la construction de la poudre de verre comme ajout cimentaire au Québec.

Le premier objectif a été complété et est présenté dans la revue systématique à la section 2.2. Cet objectif permet d'établir les lignes directrices pour compléter les objectifs suivants. L'hypothèse suivante est posée pour répondre au second objectif :

Un acteur du milieu sera enclin à utiliser la poudre de verre comme ajout cimentaire lorsque ses connaissances sur le développement durable et sur les technologies vertes en construction ainsi que l'importance qu'il accorde à ceux-ci sont élevées.

Une analyse économétrique sera menée à partir d'un questionnaire distribué dans l'industrie afin d'explorer cette hypothèse ; le modèle construit à partir des réponses de ce questionnaire permettra de la valider ou non. Le dernier objectif est réalisé à partir des données de Recyc-Québec, de TriCentris et de Krysteline. Ces données sont présentées en entiereté au Chapitre 5. L'hypothèse suivante est posée pour répondre à cet objectif :

L'utilisation de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire est viable
économiquement pour le marché québécois.

Un calcul de profits réalisables ainsi que des coûts de production permettront d'établir la viabilité économique de la poudre de verre comme ajout cimentaire. Deux scénarios de production seront considérés, ainsi qu'une analyse de sensibilité selon différents coûts de transport. Les constats découlant de ces objectifs permettront d'identifier des pistes de solutions applicables, tirées de la littérature.

3.2 Questionnaire sur la construction durable au Québec

Un questionnaire a été construit et envoyé à des acteurs du secteur de la construction au Québec.

Ce questionnaire visait les acteurs autour de la production de ciment et de béton ainsi que les acteurs travaillant dans la construction en général, soit les potentiels utilisateurs de la technologie. Il était important que les répondants ne proviennent pas seulement de compagnies ayant déjà amorcé un virage vert.

3.2.1 Portrait du secteur de la construction au Québec

Selon les données de 2019 du gouvernement du Québec, il y a 175 893 salariés actifs au Québec ainsi que 26 005 employeurs actifs. Ces employés représentent une masse salariale de 7,6 G\$ et 177,2 millions d'heures travaillées. Les travailleurs actifs en construction représentent 4 % des personnes en emploi au Québec [81].

Le tableau suivant, tiré des données de la Commission de la construction du Québec, dresse le portrait des employeurs selon la région administrative dans laquelle ils se situent [82]. Un haut pourcentage se situe dans le Grand Montréal, soit 58 % des employeurs.

Tableau 3-1 Nombre d'employeurs par secteur selon la région, 2018 [82]

Région	Génie civil et voirie	Industriel	Institutionnel et commercial	Résidentiel	Total ¹
Bas-Saint-Laurent-Gaspésie	190	67	711	511	940
Saguenay-Lac-Saint-Jean	215	144	602	526	907
Québec	481	204	3 036	2 604	4 287
Mauricie-Bois-Francs	193	200	1 089	1 042	1 694
Estrie	104	105	766	801	1 133
Grand Montréal	1 084	735	9 139	8 746	15 032
Île de Montréal	181	146	1 638	1 067	2 442
Montérégie	419	339	3 242	3 505	5 559
Laval-Laurentides-Lanaudière	484	250	4 259	4 174	7 031
Outaouais	79	34	646	651	1 018
Abitibi-Témiscamingue	84	73	325	211	437
Côte-Nord	94	62	165	91	232
Extérieur	16	8	95	19	128
Ensemble du Québec	2 540	1 632	16 574	15 202	25 808

1. Un employeur peut apparaître dans plus d'un secteur mais n'est considéré qu'une fois dans le total.

Source : CCQ, avril 2019.

3.2.2 Répondants visés

Pour assurer une bonne représentativité de la population visée, l'échantillon visé est stratifié. Ce type d'échantillonnage assure une bonne représentativité par son critère de proportionnalité. Le calcul pour ce type d'échantillonnage est le suivant [83]:

$$(1) \frac{\text{Nombre de membres à prendre dans une strate}}{\text{Taille de l'échantillon}} = \frac{\text{Taille de la strate}}{\text{Taille de la population}}$$

Considérant l'étude de Deschamps [60] qui conclut que la distance à parcourir pour s'approvisionner en un matériau impacte l'empreinte écologique de celui-ci, en plus de son coût d'approvisionnement, il faut s'assurer d'avoir des répondants travaillant sur tout le territoire québécois. Également, considérant la variété des corps de métiers possibles à l'échelle du Québec, l'échantillonnage vise différents types de compagnies afin de rejoindre le plus de corps de métier différents.

La taille de l'échantillon visée était de 50 répondants. Pour atteindre cet échantillon, trois listes d'entreprises sont utilisées pour cibler les entreprises à contacter. Soit les compagnies membres de l'Association Béton Québec (ABQ), les compagnies partenaires du Centre de Recherche sur

les Infrastructures en Béton (CRIB) et la liste des 100 employeurs les plus importants au Québec en construction selon la Commission de la Construction du Québec (CCQ).

Le Tableau 3-2 indique le nombre d'employeurs nécessaire par région, admettant qu'une personne par entreprise répond au questionnaire, pour un échantillon de 50 répondants. Ceci est suivi par le nombre d'entreprises contactées, selon s'ils ont été identifiés via l'ABQ, le CRIB ou à partir de la liste des 100 plus importants employeurs.

Tableau 3-2 Nombre de compagnies contactées

Région de l'employeur	Échantillon de 50	ABQ	CRIB	Les 100	Total contacté
Montréal	29	21	18	22	61
Restant du Québec	21	3	8	16	27

3.2.3 Construction du questionnaire

Le questionnaire est construit à partir de la revue de littérature. Le questionnaire complet se trouve en ANNEXE B et est divisé en quatre sections.

La section A, « Identification du répondant », contient 11 questions et sous-questions. Les différentes catégories d'identification ont été construites à partir de la liste des métiers du Québec [84]. Deux types de données sont récoltées dans la section A : données de type Likert et données catégorielles.

Pour la section B, « connaissances générales sur l'EC et le DD, et importance accordée », les 57 questions et sous-questions portent sur les connaissances du répondant ainsi que l'importance accordée au DD. Les répondants estiment leurs connaissances des différents thèmes en lien avec l'EC, le DD et les technologies selon une échelle de Likert à cinq points. Similairement, ils inscrivent l'importance accordée à différents éléments reliés au DD selon les trois sphères de celui-ci : l'économie, l'environnement et le social. Tout au long de cette section, les répondants pouvaient commenter leurs réponses dans des cases de texte.

La section C, « Poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire », comporte 11 questions sur l'utilisation de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire. Les répondants inscrivaient s'ils avaient déjà utilisé cette technologie, s'ils avaient vécu des expériences négatives ou

positives, s'ils voudraient en connaître davantage, etc. Les données de cette section sont de type booléenne, Likert et textuelle.

La section D, « Impact de la crise sanitaire dans le domaine de la construction », dernière section du questionnaire, comporte 16 questions sur la situation de crise sanitaire actuelle causée par le virus du COVID-19. Les données de cette section sont de type booléenne, Likert et textuelle.

Une relecture du questionnaire a été faite par quatre acteurs du milieu, ayant des expériences professionnelles et profils différents. Soit, un ingénieur en construction, un gestionnaire de projet, un directeur de projet et un membre de l'équipe de l'ABQ.

3.2.4 Diffusion du questionnaire

Avant la diffusion du questionnaire, celui-ci doit être approuvé par le comité d'éthique en recherche de Polytechnique Montréal. Pour recevoir la certification éthique, plusieurs documents ont été fournis au comité :

- Formulaire de demande d'évaluation éthique pour projet de recherche avec des êtres humains
- Protocole de recherche
- Documents de recrutement (script de recrutement, formulaire d'information et de consentement et informations générales sur le projet)
- Sujet de recherche et échéancier à la maîtrise
- Lettre de subvention de recherche octroyée

La certification d'éthique se trouve en ANNEXE C. Une fois la certification reçue, la diffusion du questionnaire a pu commencer. La diffusion du questionnaire s'est réalisée de trois manières distinctes. D'abord, les employés des compagnies membres de l'ABQ ont été contactés via la liste de diffusion de cette association. Deux envois ont été faits via leur liste de diffusion ; le premier envoi est en ANNEXE D, le second était un rappel basé sur l'envoi initial. Ensuite, pour les compagnies partenaires du CRIB, les représentants de ces compagnies ont été directement contactés, avec l'approbation du directeur du CRIB. Lorsque ceux-ci acceptaient de partager le questionnaire au sein de leur compagnie, toute la documentation à partager avec les employés

leur était envoyée. Finalement, les compagnies identifiées à partir de la liste des 100 employeurs les plus importants en construction au Québec ont été contactées directement par téléphone ou par courriel.

Au total, 15 entités ont accepté de distribuer le questionnaire auprès de leurs employés. De celles-ci, neuf sont des compagnies privées, quatre sont des regroupements tel des associations ou instituts et deux sont des entités publiques (société d'État ou municipalité). Toutefois, il est à noter que la distribution d'un questionnaire dans une entreprise ne garantit pas qu'il soit rempli par qui que ce soit au sein de cette entreprise.

3.3 Analyse économétrique des résultats du questionnaire

L'analyse des réponses du questionnaire est faite avec le logiciel R. Le but de cette analyse est de construire régression binomial de type *probit* pour estimer quelles variables influencent la demande de la poudre de verre recyclé. Les données sont prises des résultats des sections A, B et C du questionnaire. Cette section de la méthodologie décrit les différentes étapes menant à la régression.

3.3.1 Données brutes

Les données brutes extraites des réponses collectées via le questionnaire sont utilisées pour construire les variables de la régression. Ces données sont les suivantes :

- Variables modératrices : Section A, identification du répondant
- Variables indépendantes : Section B, questions de type Likert portant sur les connaissances du répondant et l'importance qu'il accorde au DD
- Variable dépendante : Section C, question 3 et 8 portant sur la demande

Les variables indépendantes sont utilisées suivant deux méthodologies différentes : l'une utilisant les données brutes et l'autre des données transformées. Il en résulte des régressions basées sur les mêmes équations, mais appliquées à des variables différentes ayant la même source de données.

3.3.2 Variables modératrices

La section A du questionnaire permet de classer les répondants en différents groupes. Ces variables sont dites modératrices si elles ont un impact sur les variables indépendantes du

modèle, et conséquemment sur les variables dépendantes. Cet impact est traduit par une différence statistique entre les réponses des différents groupes. Comme les variables indépendantes sont de type Likert, il est déconseillé d'utiliser un test paramétrique pour évaluer la différence entre les groupes [85]. En utilisant plutôt un test non paramétrique, les erreurs de type 1 sont évitées et les données n'ont pas besoin d'avoir une distribution normale [86]. Le test de Wilcoxon pour deux échantillons non appariés est utilisé pour évaluer la différence statistique entre les groupes de répondants suivants :

- **Types de compagnies :**
 - *Compagnie spécialisée autour du béton vs construction en général* ;
 - *Compagnie publique vs compagnie privée* ;
- **Localisation** : *compagnie située à Montréal vs compagnie située ailleurs au Québec* ;
- **Années d'expérience dans le domaine** : *le répondant à 10 ans et plus vs le répondant a moins de 10 ans* ;
- **Années d'expérience dans la compagnie actuelle** : *le répondant a plus de 7 ans d'expérience vs le répondant a moins de 7 ans* ;
- **Niveau d'étude du répondant** : *le répondant a obtenu un diplôme d'études supérieures vs le niveau d'étude le plus élevé obtenu par le répondant est un baccalauréat ou une technique* ;
- **Poste occupé par le répondant** : *le répondant occupe un poste de gestion vs le répondant occupe un poste de conception* ;

La librairie R *dplyr* est utilisée pour faire ce test. La fonction *wilcoxon* de cette librairie permet d'évaluer si les deux ensembles de données sont statistiquement différents l'un de l'autre ou non. Lorsque la valeur p est plus grande que 10 %, on suppose qu'il n'y a pas de différence statistique entre les groupes. Inversement, si la valeur p est plus petite que 10 %, il faut considérer cette différence entre les groupes dans la régression logistique plus tard dans la méthodologie. Le test est fait pour les 7 catégories d'abord en utilisant les données brutes, puis sur les composantes principales (CP) extraits.

3.3.3 Variables indépendantes

La section B du questionnaire est construite de sorte que plusieurs éléments sont présentés au répondant qui les note selon une échelle de Likert à cinq points. Ces nombreux éléments doivent être regroupés afin de diminuer le nombre de variables à considérer pour la régression logistique [87]. Ces données étant de type Likert, il est statistiquement incorrect d'en faire la moyenne pour diminuer le nombre d'items. La méthode d'analyse en composantes principales (ACP) est donc utilisée. L'ACP est une méthode permettant de diminuer le nombre de variables sans perdre trop d'information en condensant les données. La méthode d'ACP est adaptée pour des données de type Likert et permet de comprendre la structure sous-jacente d'un ensemble d'items afin d'en condenser l'information en quelques facteurs [88].

Initialement, le questionnaire comprend 33 questions portant sur le niveau de connaissance du répondant ; 14 sur des termes en lien avec l'EC et le DD et 19 sur des techniques de construction durable. À cela s'ajoutent 21 questions sur l'importance accordée au DD, divisées selon les trois grandes sphères du DD : économique (5), environnementale (8), sociale (7). Ces 33 variables, considérées comme ordinaires puisque recueillies par une échelle de Likert, sont divisées en cinq catégories. La méthodologie de l'ACP est appliquée pour chacune de ces catégories.

Comme décrit par Hair et al., la taille de l'échantillon doit faire un minimum de 100 répondants. Si ce n'est pas le cas, la règle à appliquer est un ratio de 10 répondants par variables insérées dans l'analyse. Pour répondre à cette règle, le nombre d'items peut être diminué avant de procéder à l'ACP avec l'indicateur d'adéquation de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO).

Avant d'appliquer la méthode KMO, il faut s'assurer du respect des postulats de corrélation *inter items*. Si ces corrélations sont faibles, l'analyse peut difficilement être effectuée puisqu'elle se base sur ces corrélations pour produire les composantes principales. Une matrice des corrélations en suivant la méthode Spearman est construite avec la fonction *cor* dans R. Les matrices sont évaluées pour les cinq catégories et valident la présence de corrélations entre les items.

La méthode KMO est appliquée pour les 5 catégories ; la fonction *KMO* dans R donne une matrice de corrélation partielle, ayant une valeur entre 0 et 1. Plus la valeur est élevée, plus la corrélation *inter items* est forte, tel que décrit dans la documentation de la fonction, soit :

Tableau 3-3 Seuils de la méthode KMO

0,80 et plus.	Excellent
0,70 et plus	Bien
0,60 et plus	Médiocre
0,50 et plus	Misérable
Moins de 0,50	Inacceptable

Pour respecter le ratio de 10 répondants par variable, seuls les éléments ayant la meilleure corrélation sont conservés. Lorsque possible donc, le seuil est fixé à 0,8. Toutefois, un minimum de trois éléments doivent être gardés pour faire l'ACP : pour respecter cela, le seuil sera diminué lorsque nécessaire. Les différences statistiques entre les groupes de participants pour les variables modératrices ne seront considérées que pour les items gardés. Les items en dessous du seuil KMO établi ne sont pas considérés pour l'ACP.

La fonction *prcomp* est utilisée pour calculer les composantes principales (CP). Cette fonction performe une ACP selon la matrice sélectionnée. La fonction effectue un calcul par décomposition en valeur singulière de la matrice entrée, après l'avoir normalisé avec l'option de *scaling* [89]. La fonction retourne l'importance de chacun des CP extraits du calcul, ainsi que la valeur de ceux-ci. Par convention, les CP conservés sont ceux dont la valeur propre initiale est plus grande que 1 [89].

Cette méthodologie permet de transformer nos 33 questions en un minimum de 5 variables, chacune représentant une des catégories mentionnées précédemment. Ces variables sont indépendantes les unes des autres, étant donné qu'elles ne proviennent pas des mêmes items. Elles seront utilisées comme variables indépendantes.

3.3.4 Variables dépendantes

Un indicateur de demande pour la poudre de verre est la variable dépendante. Celle-ci est déterminée par les questions 3 et 8 de la section C du questionnaire. La question 3 demandait aux répondants s'ils avaient déjà utilisé la poudre de verre comme ajout cimentaire, ceci est la

demande 1 (D₁) dans le modèle. La question 8 explorait l'intérêt potentiel pour cette technologie, ceci est la demande 2 (D₂) dans le modèle. Les questions sont les suivantes :

- Question 3, section C : *Avez-vous déjà utilisé la poudre de verre comme ajout cimentaire?*
- Question 8, section C : *Utiliseriez-vous cette technologie même si elle occasionne des coûts supplémentaires?*

3.3.5 Modèles probit

Le modèle construit est une régression binomiale de type probit, fait à partir des constats de la littérature et de la revue systématique. Le modèle probit est choisi plutôt qu'une régression linéaire à cause de la variable sortante dichotomique. Également, il n'y a pas d'obligation à ce que les variables indépendantes soient distribuées normalement. Considérant que les variables indépendantes sont extraites de données de type Likert, il est probable qu'elles ne respectent pas une distribution normale. Un autre avantage d'utiliser un modèle probit est que les variables indépendantes n'ont pas besoin d'être linéairement corrélées avec la variable sortante [90][91].

Deux méthodologies sont suivies pour construire des modèles probit s'appuyant sur les mêmes constats de la littérature. Les variables utilisées pour la première méthodologie sont des données brutes alors que la seconde utilise les composantes principales (CP) pour représenter les différentes variables.

Dans le cas de la première méthodologie pour construire les modèles probit, les données de type Likert sont prises telles quelles. Elles ne sont pas centrées normalisées, étant donné qu'elles sont déjà toutes sur une même échelle. Chaque variable de ce modèle est constituée d'une question représentative de sa catégorie. Cette méthodologie permet de valider les résultats du modèle utilisant les données transformées par analyse des CP. Les questions choisies sont présentées à la section 4.3. Les régressions respectent quatre des cinq assumptions requises pour une régression binomiale :

1. La variable dépendante est dichotomique ;
2. Les observations, soit les variables insérées dans la régression, sont indépendantes les unes des autres ;
3. Il n'y a pas ou peu de colinéarité multiple entre les variables indépendantes ;
4. Les linéarités des variables indépendantes sont assumées ;
5. L'échantillon à la base de la régression doit être de grande taille.

Seule la dernière assumption n'est pas respectée. Un minimum de 10 répondants par variable considérée, divisée par la valeur de p utilisée, est requis. La régression est construite même si l'assumption n'est pas respectée [90]. La régression, bien qu'elle peut être construite, risque d'avoir des coefficients avec une variance importante. Le coefficient phi et la pseudo-mesure R^2 , expliqués plus bas, sont calculés pour les modèles finaux afin de valider leur pertinence statistique malgré leur petit échantillon.

Les modèles cherchent à déterminer si un acteur sera enclin ou non à utiliser la poudre de verre, selon différentes variables indépendantes et modératrices.

D'abord, un modèle est construit avec toutes les variables indépendantes considérées.

$$(2) P(D_1 = 1) = \Phi (\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_t + \beta_3 Imp_{ec} + \beta_4 Imp_{en} + \beta_5 Imp_{so})$$

$$(3) P(D_2 = 1) = \Phi (\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_t + \beta_3 Imp_{ec} + \beta_4 Imp_{en} + \beta_5 Imp_{so})$$

Où :

Φ = Fonction de répartition de la loi normale centrée réduite

D_1 = La demande 1, et D_2 = La demande 2

Co_g = Connaissances générales du répondant

Co_t = Connaissances sur des technologies spécifiques du répondant

Imp_{ec} = Importance accordée par le répondant à la sphère économique du DD

Imp_{en} = Importance accordée par le répondant à la sphère environnement du DD

Imp_{so} = Importance accordée par le répondant à la sphère sociale du DD

Comme il y a trop de paramètres dans le modèle selon l'assumption non respectée pour une régression probit, seuls les termes ayant une valeur p plus petite que 0,10 seront gardés. Le modèle résultant est ensuite testé avec les différentes variables modératrices.

En plus de cela, deux hypothèses additionnelles sont testées, soit :

1. Est-ce que le niveau de connaissances générales et de connaissances des technologies spécifiques peut expliquer la demande ?

$$(4) P(D_i = 1) = \Phi (\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_t)$$

2. Est-ce que l'importance accordée aux trois différentes sphères du DD peut expliquer la demande ?

$$(5) P(D_i = 1) = \Phi (\beta_0 + \beta_1 Imp_{écono} + \beta_2 Imp_{enviro} + \beta_3 Imp_{social})$$

La fonction GLM du logiciel R teste si les variables prédictives utilisées dans la régression sont significatives ou non selon le test de Wald. Les régressions logistiques représentant le mieux le modèle seront gardées et testées avec une validation croisée à k plis ainsi qu'avec une pseudo-mesure de R^2 , expliquée plus bas.

Le premier test effectué sur les modèles gardés est la validation croisée à k plis (*Cross-validation with k-folds*). Pour ce faire, les fonctions *crossVal* et *pred* disponibles à partir des librairies *e1071* et *caret* dans le logiciel R sont utilisées. La première fonction, *crossVal* utilise une matrice de confusion afin de valider le pouvoir de prédiction du modèle [92]. La matrice de confusion calcule les vrais positifs par rapport aux faux positifs et les vrais négatifs par rapport aux faux négatifs. La fonction *pred* permet de présenter cette matrice [93], tel que :

Tableau 3-4 Matrice *pred*

	y = 1	y = 0	total
x = 1	n ₁₁	n ₁₀	n _{1•}
x = 0	n ₀₁	n ₀₀	n _{0•}
total	n _{•1}	n _{•0}	n

À partir de cette matrice, le coefficient phi, introduit en statistique par Karl Pearson, est calculé selon l'équation suivante [94]:

$$(6) \phi = \frac{n_{11}n_{00} - n_{10}n_{01}}{\sqrt{n_1n_0n \ n}}$$

Le coefficient phi permet d'interpréter la force de la relation entre le modèle et la réalité. Sa valeur varie entre ± 1 . Plus la valeur absolue du coefficient est grande, plus l'association est forte, et il n'y a aucune association entre les deux ensembles de variables lorsque la valeur du coefficient est de 0. L'interprétation de la valeur du coefficient varie beaucoup selon les auteurs, telle que présentée par Akoglu [95]. La table d'interprétation de la mesure du coefficient phi présenté par Scott Jones [96] est utilisée comme référence :

Tableau 3-5 Interprétation du coefficient phi

Coefficient phi	Interprétation
-1,0 à -0,7	Forte association négative entre les variables
-0,69 à -0,4	Moyenne association négative entre les variables
-0,39 à -0,2	Faible association négative entre les variables
-0,199 à -0,01	Association négligeable entre les variables
0	Aucune association entre les variables
0,01 à 0,19	Association négligeable entre les variables
0,2 à 0,39	Faible association positive entre les variables
0,4 à 0,69	Moyenne association positive entre les variables
0,70 à 1,0	Forte association positive entre les variables

En plus de ce calcul, une pseudo-mesure de R^2 sera faite sur les modèles gardés. Cette mesure est similaire à celle de R^2 qui peut être faite sur un modèle linéaire, mais adaptée pour un modèle linéaire généralisé, soit ici un modèle probit. La mesure de R^2 représente la proportion de la variance de la variable dépendante du modèle de régression qui est expliquée par les variables indépendantes du modèle. Contrairement à la corrélation qui explique la force d'une relation entre les variables, la mesure de R^2 exprime comment la variance d'une variable explique la variance d'une seconde variable [97]. Cette pseudo-mesure de R^2 est calculée avec la déviance nulle et la déviance résiduelle extraite via la fonction « summary » dans R, soit :

$$(7) 1 - \frac{\text{Residual Deviance}}{\text{Null Deviance}}$$

Cette mesure est interprétée de la même façon que R^2 : elle varie entre 0 et 1 et plus sa valeur est grande, plus la variation de la variable dépendante est autour de la moyenne.

3.4 Analyse de la viabilité économique

Cette section de la recherche a pour but d'évaluer la viabilité économique de la production de poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire sur le marché québécois. Le calcul pour l'analyse économique est basé sur la méthodologie de Tucker et al. [61]. Leur méthodologie sera adaptée pour le contexte du Québec, tout en suivant les recommandations présentées dans le rapport d'ÉEQ, discutées précédemment en 2.1.4. Ainsi, un calcul du coût de production de la poudre de verre est fait afin d'évaluer les profits potentiels selon deux scénarios. Également, ce calcul est suivi d'une comparaison avec le coût d'autres ajouts cimentaires ainsi que le coût du ciment.

Les scénarios suivants sont considérés pour le calcul des profits potentiels :

1. L'investissement initial de l'usine actuelle de micronisation de Tricentrис est déjà remboursé. Les frais administratifs et de réparation des machineries sont doublés. La production annuelle visée est de 15 000 tonnes de poudre de verre, avec un tonnage entrant de 32 000 tonnes de verre.

2. Prise en compte du scénario 1, en plus de construire une nouvelle usine, au centre de tri de Québec, pour produire un tonnage supplémentaire de 15 000 tonnes de poudre de verre. Le coût d'implantation de cette nouvelle usine est calculé.

Pour ces deux scénarios, une étude de sensibilité est effectuée pour considérer différents coûts de transport. Dans les deux scénarios, le verre traité qui est vendu à d'autres marchés n'est pas considéré dans les profits du calcul. Il est considéré seulement dans le coût d'entretien et d'électricité des machines. Ce qui n'est pas transformé en poudre de verre pour ajout cimentaire est actuellement principalement vendu pour les systèmes de purification de piscine, ou pour fabriquer de la laine minérale.

Les prochaines sections détaillent les différentes données qui seront utilisées pour estimer les revenus et les coûts pour les différents scénarios. Les données sont présentées en totalité dans le chapitre 5, suivies d'une estimation des profits potentiels que généreraient les scénarios annuellement et sur une période de 10 ans.

3.4.1 Débit de production

Deux éléments sont à considérer pour évaluer le volume de production posés dans les scénarios : le volume de verre disponible entrant dans les centres de tri considérés, ainsi que le débit de capacité de traitement des machineries. Pour évaluer le volume de production, quatre sources de données sont utilisées : les recommandations du rapport de l'ÉEQ, les caractéristiques des machines de Krysteline, l'article de Tucker et al., ainsi que les données actuelles de Tricentraris.

À partir des recommandations de l'ÉEQ, un volume de production de poudre de verre destiné à être vendu comme ajout cimentaire est établi. Comme un centre de micronisation ne produit pas qu'un seul produit, un volume de verre plus grand que la production visée entre dans le centre de tri en réalité. Ce volume doit être considéré pour s'assurer qu'il ne dépasse pas le débit maximal de production de la machinerie. Également, le volume total entrant dans le centre de tri est considéré pour évaluer la quantité d'énergie consommée par les machineries, l'usure de celles-ci, les heures de productions, etc.

À partir de ce débit annuel de verre entrant dans l'usine, le débit de production est calculé en suivant la formule suivante :

$$(8) \frac{\text{débit entrant}}{\text{an}} \times \frac{\text{an}}{\text{heure}} = \frac{\text{débit}}{\text{heure}}$$

La formule considère le nombre d'heures de production de l'usine. Le temps de production annuel est estimé en suivant la méthodologie établie en 3.4.3.

3.4.2 Machinerie

Selon le plan Verre l’Innovation, pour réduire le verre en particules fines, un *imploseur* est nécessaire : celui de la marque Krysteline est suggéré dans ce rapport. On pose l’hypothèse que le conditionneur de verre reçoit le verre des centres de tri directement : le conditionneur n’a donc pas besoin de faire le premier tri du verre. En amont et en aval de l’imploseur, différents systèmes pour purifier le verre sont nécessaires. Krysteline propose une ligne de production complète pour ce traitement. La ligne de production de poudre de verre qu’ils proposent est illustrée en ANNEXE E. Une demande de devis pour cette ligne de production leur a été envoyée en date du 15 février 2021, spécifiant que la demande était à titre de référence dans le cadre d’une recherche de maîtrise. Les caractéristiques techniques de celle-ci ont également été fournies par Krysteline.

Deux machines principales sont à considérer dans la chaîne de production pour évaluer le débit maximum de production. D’abord, la machine MRF (*Material Recovery Facility*) a une capacité d’un débit de matériaux entrant d’entre 4 et 30 tonnes par heure. Ensuite, le système de purification additionnelle du verre traite un débit de matières entrant entre 6 et 60 tonnes par heure. Il y a deux scénarios de production maximale possibles. Dans le scénario 1, la production est limitée à l’étape du tri MRF, avec un débit maximal de 30 tonnes par heure. Pour le scénario 2, le but est d’atteindre la capacité maximale du système de purification qui est de 60 tonnes par heure. Le conditionneur pourrait ainsi acheter du verre déjà trié, pour atteindre le débit maximal de purification du verre. Toutefois, comme ce deuxième scénario n’est pas nécessaire pour traiter le débit entrant actuel, il ne sera pas considéré.

3.4.3 Coûts fixes

Coût de capital

D’abord, le coût de la machinerie est considéré. Comme mentionné plus haut, la machine pour l’implosion du verre considérée est celle de la compagnie Krysteline. La demande de devis qui

leur a été envoyée permet d'établir les coûts fixes et d'avoir les informations techniques (entretien, consommation d'énergie, etc.) de cette machine.

Un bâtiment de 1 000 m² est estimé nécessaire pour l'usine de traitement du verre ainsi que pour stocker le verre. Cette estimation est basée sur la recommandation de Krysteline. Cet investissement est calculé annuellement en utilisant un amortissement linéaire sur une durée de vie de 30 ans, sans valeur de récupération.

Le coût d'investissement pour le terrain est estimé à 6 % de la valeur initiale des équipements, basée sur l'hypothèse de la documentation de Krysteline, également amorti sur 30 ans sans valeur de récupération. Bien que Krysteline soit une compagnie basée en Angleterre, leur hypothèse pour le coût du terrain n'est pas ajustée au scénario spécifique du Québec pour deux raisons : le marché immobilier est très variable et ce coût reste minime en comparaison aux autres dépenses considérées dans le calcul.

Les coûts fixes annuels incluent également l'assurance et les taxes devant être appliquées à la valeur du capital. Ceux-ci sont respectivement de 1 % et 1,5 %, selon ce qui est suggéré par Krysteline.

3.4.4 Coûts variables

Pour les coûts annuels d'exploitation, le taux d'inflation canadien moyen de 2019, établi à 1,9 %, est considéré [98]. Le Tableau 3-6 résume les coûts variables considérés ainsi que les sources de données utilisées. En plus de ces coûts, Krysteline suggère de prévoir un certain pourcentage de contingence, basé sur les revenus bruts.

Tableau 3-6 Coûts variables et sources de données

Coûts	Source
<i>Coûts d'exploitation</i>	
Bâtiment	Électricité
Machines	Électricité
	Kérosène
<i>Coûts d'entretien</i>	
Bâtiment	[61]
Machine (pièces de rechange et main-d'œuvre)	Krysteline : selon tonnage produit
<i>Coût de la main-d'œuvre</i>	
Heures par semaine	Krysteline et Tricentris
Salaire horaire par occupation	[101]
Congé maladie et vacances	Krysteline
<i>Coût de transport</i>	
Basé sur un pourcentage des revenus bruts	Tricentris

3.4.5 Comparaison avec le marché actuel

Tiré de Chevalier [102] le coût du ciment et des ajouts cimentaires a été estimé. En ANNEXE F se trouve le tableau présenté par Chevalier pour les coûts des différents produits. Comme ceux-ci sont en dollars américains (USD) selon différentes années, ils ont été ajustés selon le taux de change moyen de l'année associée ainsi que le taux d'inflation de 2019.

Pour 1 mètre cube de béton « typique », entre 240 kg et 400 kg de ciment sont nécessaires [103]. Les mélanges ciments-ajouts qui seront considérés sont basés sur certains des tests faits dans le cadre de la recherche de Omran et Tagnit-Hamou [1]. Quatre mélanges sont considérés, provenant de deux différents tests : les mélanges avec et sans poudre de verre (PV) pour les trottoirs extérieurs devant la Maison de Développement Durable de Montréal (MDD) et les mélanges avec PV et avec cendres volantes (CV) pour une dalle intérieure à l'Université de

Sherbrooke (UdeS). Le poids total des mélanges de ciment pour les quatre scénarios est de 400 kg.

CHAPITRE 4 ANALYSE ÉCONOMÉTRIQUE

Cette section analyse les réponses collectées via le questionnaire distribué aux intervenants de l'industrie de la construction durant l'été 2020. D'abord le profil général des répondants au questionnaire est présenté, suivi d'un résumé des réponses collectées. Ceci permet d'établir le profil général de l'échantillon. Suivant cela, le modèle binomial construit à partir des réponses au questionnaire pour l'analyse économétrique est présenté et analysé. Finalement, une analyse textuelle des réponses écrites est effectuée.

4.1 Présentation des répondants

Des 51 personnes ayant ouvert le lien vers le questionnaire, 31 l'ont complété. Ce taux de réponse permet d'avoir un écart type (*relative standard error*, RSE) plus petit que 20 % selon le calcul suivant :

$$(9) RSE = \frac{1}{\sqrt{\text{réponses}}} \times 100$$

L'écart type est de 17,9 % ; bien qu'élevée, elle est acceptée puisqu'en dessous du seuil de 20 %. La majorité des personnes ayant ouvert le questionnaire sans le compléter n'ont pas rempli la première page, ou se sont arrêtées après la première moitié de la section B. Seules les 31 réponses complétées seront prises en compte pour les analyses suivantes. Bien que le total de réponses complètes soit inférieur à l'objectif initial de 50 réponses, c'est près de la moyenne, soit 38 participants en moyenne, des études qui ont été discutées dans la revue systématique. Le temps pris par les répondants pour remplir le questionnaire varie entre cinq minutes et plus d'une heure, tel que présenté dans la Figure 4-1 suivante.

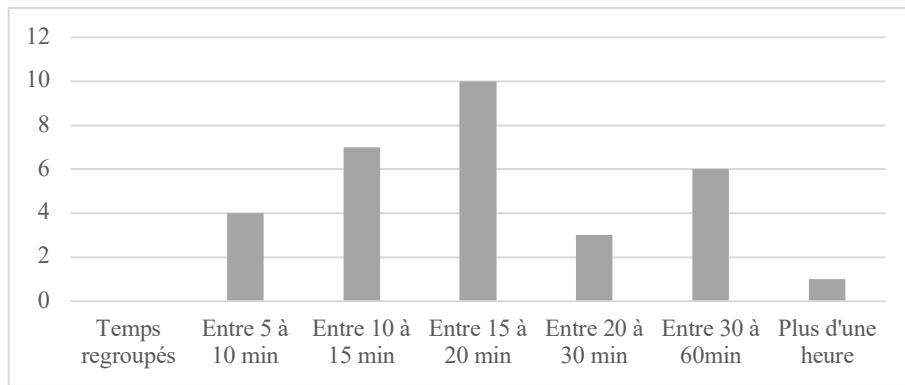


Figure 4-1 Temps de réponse au questionnaire

Une majorité de personnes ont complété le questionnaire entre 15 et 20 minutes : le temps estimé était de 15 minutes. Il est possible que ceux ayant pris plus de 30 minutes à répondre aient pris une pause.

La section A du questionnaire permet d'identifier les répondants selon le type d'entreprise pour laquelle ils travaillent, le type d'emploi ils occupent et depuis quand, les études qu'ils ont fait, etc. Le cumul de ces résultats sont présentés ci-dessous. Seuls quatre répondants viennent du secteur public, la majorité des répondants étant du secteur privé. Également, la majorité des répondants travaillent pour des entreprises localisées à Montréal, soit 19 des 31 répondants. Une majorité de répondants proviennent d'entreprises de type « fournisseur de construction » ou « entrepreneur général ». La Figure 4-2 montre les types d'entreprises auxquels les répondants s'identifient. La Figure 4-3, quant à elle, montre la répartition des répondants selon le poste qu'ils occupent au sein de leur entreprise.

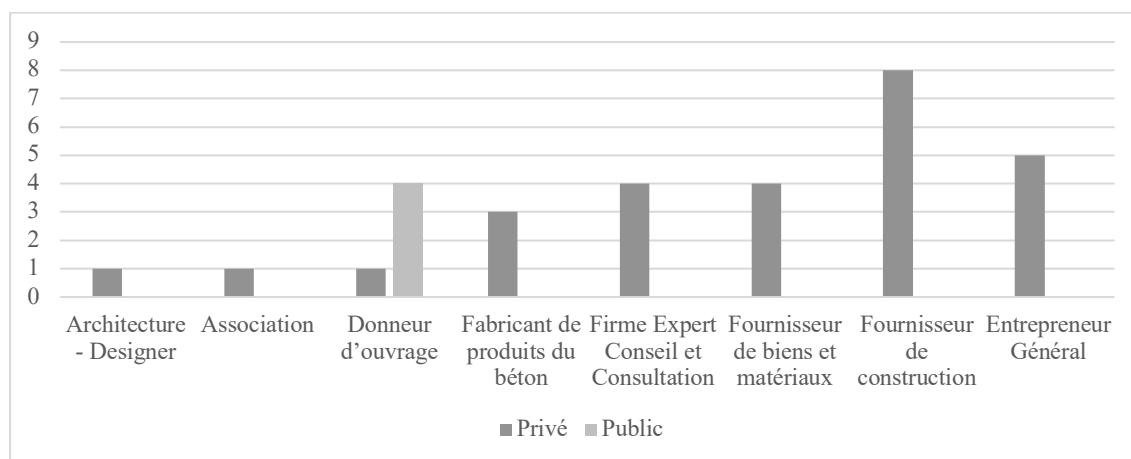


Figure 4-2 Types d'entreprises des répondants

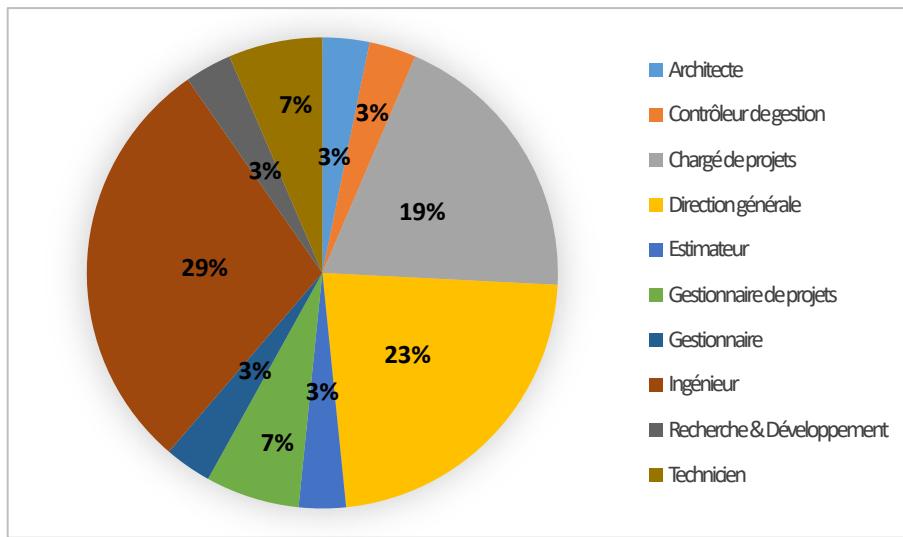


Figure 4-3 Postes occupé par les répondants

La majorité des répondants travaillent à titre d'ingénieur, de chargé de projets ou à un poste de direction dans leur entreprise. La majorité des répondants ont plus de dix ans d'expérience dans le domaine (81 %), suivis par ceux ayant entre 7 et 10 ans d'expérience (13 %). Il est à noter que les années d'expérience dans le domaine excluent les études faites par les répondants, une majorité de détenant un baccalauréat (45 %) ou une maîtrise (39 %), tel que montré par la Figure 4-4.

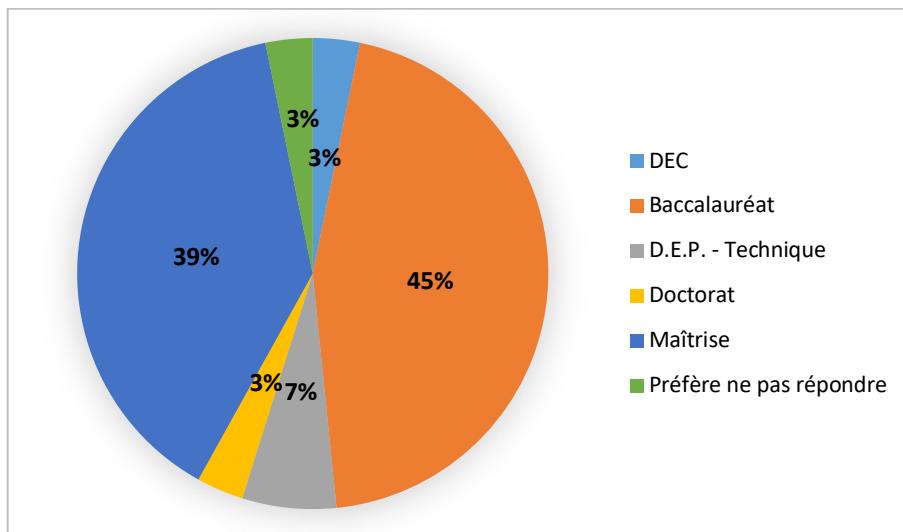


Figure 4-4 Niveau d'étude atteints par les répondants

4.2 Survol des réponses des sections B, C et D

La section B du questionnaire porte sur les connaissances liés au DD et à l'EC en général et selon certaines techniques spécifiques. Suivant cette section, les répondants remplissaient la section C portant sur l'utilisation de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire. Finalement, la section D questionnait les répondants quant à leur point de vue face à la crise sanitaire actuelle.

La section B débute avec une série de questions portant sur les connaissance de différents termes liés au DD et à l'EC. Le répondant doit y estimer, sur une échelle de type Likert, son niveau de connaissance des termes énoncés (1 étant « jamais entendu parler » et 5 étant « maîtrise bien le sujet »). Le cumul du niveau de connaissances varie de beaucoup selon le terme énoncé. Comme il s'agit d'échelles de type Likert, il n'est statistiquement pas représentatif de faire une moyenne pour représenter l'ensemble des réponses. Cette section présentera plutôt le cumul de certaines réponses qui permettront de dresser un portrait général des réponses collectées. Le cumul des réponses de la section B se trouve en ANNEXE G.

Certains termes plus couramment entendus dans l'industrie tel que « LEED », « ajouts cimentaires verts » et « béton préfabriqué » ont un cumul de réponses qui tend vers un score de 5, soit une haute maîtrise du sujet, tel que présenté dans les graphiques suivants :

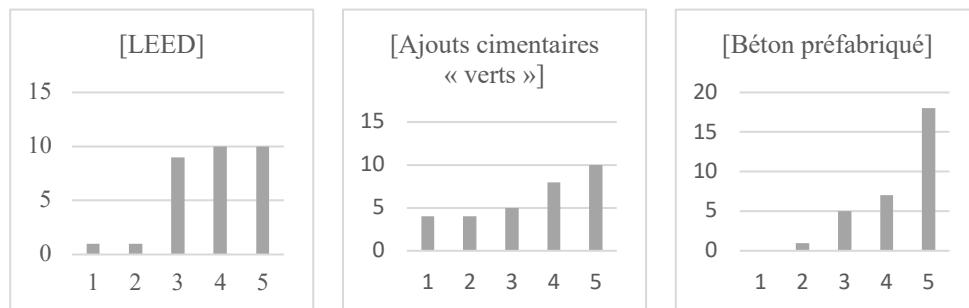


Figure 4-5 Termes dont les connaissances des répondants sont élevées

À l'opposé de ceux-ci se trouvent des termes moins connus, tels que les « trois scopes », « design pour la déconstruction » et « déchets de construction comme combustible ».

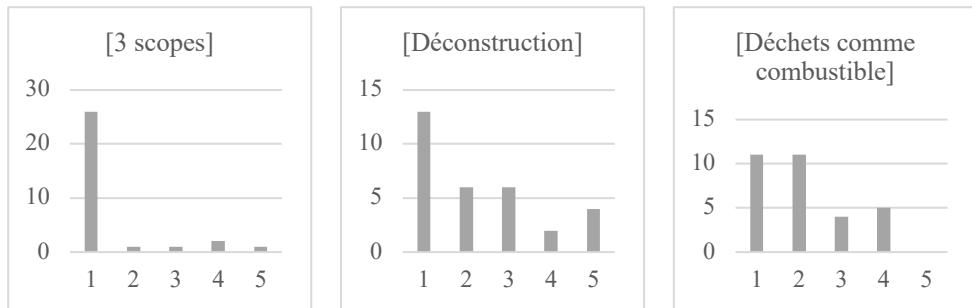


Figure 4-6 Termes dont les connaissances des répondants sont basses

Pour la dernière question portant sur les connaissances du répondant, le diagramme de l'économie circulaire (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**) était montré. Les répondants notaient s'ils maîtrisaient bien (5) ou non (1) les concepts présentés sur ce diagramme. Les réponses aggrégées sont présentées dans le graphique suivant et montrent une maîtrise moyennement basse du concept d'EC :

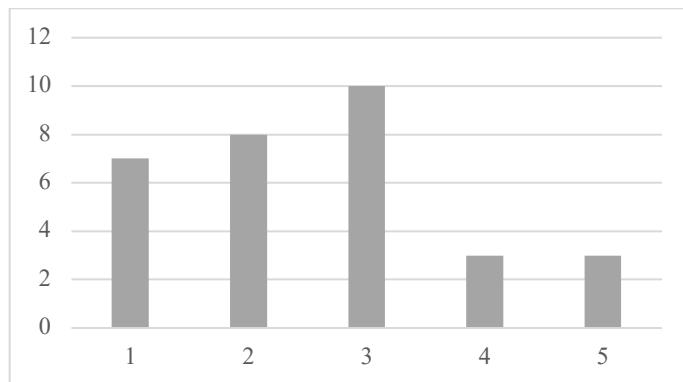


Figure 4-7 Maitrise des concepts de l'EC

Les principes de l'EC prennent de plus en plus de place en construction, comme dans diverses industries, et les concepts s'y rattachant sont à la base de l'innovation durable. Si l'industrie n'a pas une bonne connaissance de ces principes, cela peut rendre l'implémentation de l'innovation durable plus difficile.

La seconde partie de la section B était constituée d'une série de questions voulant mesurer l'importance accordée aux trois différentes sphères du DD (économique, environnementale et sociale). Le répondant indiquait s'il était « en désaccord » (1) ou « tout à fait d'accord » (5) avec

les différents constats qui lui étaient présenté. L'importance accordée aux trois sphères du DD est généralement très élevée, avec la sphère sociale ayant la plus haute importance globale. Les graphiques suivants présentent le cumul des réponses à une question représentative par sphère. Ces questions sont les suivantes :

- **Importance accordée selon un point de vue économique** : [Générer des profits sans compromettre les besoins des générations futures]
- **Importance accordée selon un point de vue environnemental** : [Lors d'une construction neuve, la protection de l'environnement est à considérer en priorité]
- **Importance accordée selon un point de vue social** : [Les projets de construction devraient améliorer la vie sociale autour de ceux-ci]

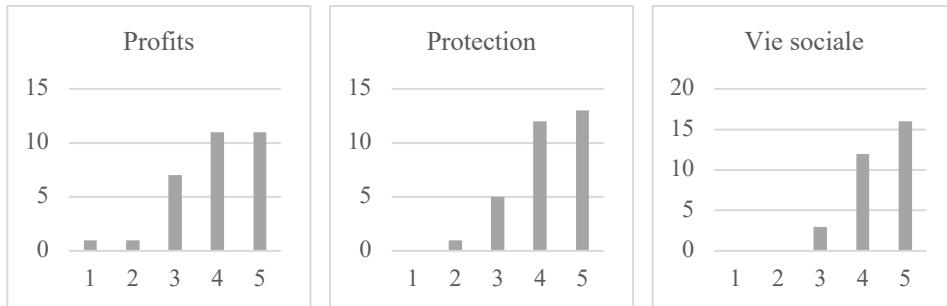


Figure 4-8 Questions représentatives de l'importance accordée aux sphères du DD

Tout au long du questionnaire, les répondants avaient l'option d'ajouter des commentaires. Ces réponses additionnelles permettent de mieux comprendre la réalité vécue par les acteurs et d'avoir des exemples plus spécifiques. La majorité des commentaires sont en lien avec des technologies utilisées dans le béton, ce qui est attendu considérant que ce sont les acteurs de ce milieu qui sont davantage visés par l'étude. Voici une brève liste résumant les technologies principalement discutées par les répondants ainsi que les exemples donnés par eux :

- **Déconstruction** : pont Champlain, design pour la déconstruction.
- **Réutilisation de béton concassé dans du nouveau béton ou comme remblai** : l'un des répondants souligne que la ville de Montréal utilise du Mr-1 ou du Mr-2 dans la majorité des projets de réfection de chaussée depuis plus de 10 ans.

- **Réhabilitation de structures** : barrages, tunnel Louis H Lafontaine.
- **Ajouts cimentaires** : plusieurs répondants sont familier avec l'utilisation d'ajouts plus classiques telle la cendre volante. Quelques répondants ont mentionné des projets pour lesquels ils ont utilisé la poudre de verre, mais il s'agit majoritairement de projets pilotes ou des éléments non structuraux tels des trottoirs ou des dalles. L'un des répondants était familier avec l'utilisation des granulats de CO₂ de BluePlanet ainsi que l'injection de CO₂ directement dans le béton.
- **Utilisation de technologies BIM** : peu de commentaires (2) ; l'un des répondants a spécifié n'avoir jamais entendu ce terme.
- **Béton et éléments préfabriqués** : utilisation de construction modulaire, fondations, piliers et dalles en béton préfabriqué, panneaux préfabriqués. Selon un répondant, le préfabriqué est relativement fréquent (béton ou éléments), mais la construction modulaire ne fait que commencer à s'installer.
- **Autres certifications que LEED** : certains répondants notent la variété des certifications possibles dans le domaine.

Ensuite, la section C questionnait le répondant sur l'utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire. D'abord, il leur était demandé s'ils avaient déjà entendu parler de cette technologie (26 oui et 5 non obtenus). Ceux ayant répondu « oui » étaient questionnés à savoir s'ils avaient déjà participé à un projet utilisant cette technique (9 oui obtenus). Sept d'entre eux ont spécifié le projet dans lequel ils l'ont utilisé. Pour la majorité, il s'agissait soit de trottoirs ou de dalles de béton, soit d'éléments non structuraux. Si des problèmes ou obstacles ont été rencontrés lors de ces projets, les répondants pouvaient également les mentionner en commentaire. La majorité des problèmes mentionnés ont été causés par un manque de consistance dans la qualité du produit et dans l'approvisionnement. Également, certains répondants notaient une faible acceptabilité par les clients institutionnels ainsi qu'un coût élevé en comparaison à d'autres ajouts. Un des répondants note également que de mauvaises informations avaient été transmises (pamphlets par les représentants des producteurs de béton).

Les répondants étaient ensuite questionnés à savoir s'ils voudraient utiliser cette technologie à l'avenir selon différents scénarios (frais supplémentaires occasionnés, possibilité d'avoir des subventions, exigence au contrat d'utiliser un matériau provenant de matière recyclée, etc.). Pour

un seul des scénarios, les réponses étaient partagées (17 oui et 14 non obtenus), soit si cette technologie apportait des frais supplémentaires. Pour les autres scénarios d'utilisation de la poudre de verre présentés aux répondants, la quasi-totalité des réponses était « oui ».

Cette section se conclut en demandant aux répondants s'ils avaient une vision négative de cette technologie (7 oui, 24 non). Un point important souligné par les répondants concerne la qualité variable du produit. L'un des répondants souligne également une idée fausse, répandue dans l'industrie des fabricants de béton, que cette technologie diminue la réaction alcalis-granulats, diminuant la résistance et provoquant l'écaillage du béton.

La dernière section du questionnaire était en lien avec la crise sanitaire causée par le virus COVID-19. La perception des répondants sur les politiques et les structures de travail mises en place en réponse à la crise, mesurées sur une échelle de Likert à 5 points (1 étant « pas du tout efficaces » et 5 étant « efficaces ») est généralement positive. Depuis l'ouverture des chantiers, en date du 20 avril 2020, leur vision de l'efficacité des mesures instaurées par les gouvernements fédéral, provincial et par leur compagnie vont comme suit :

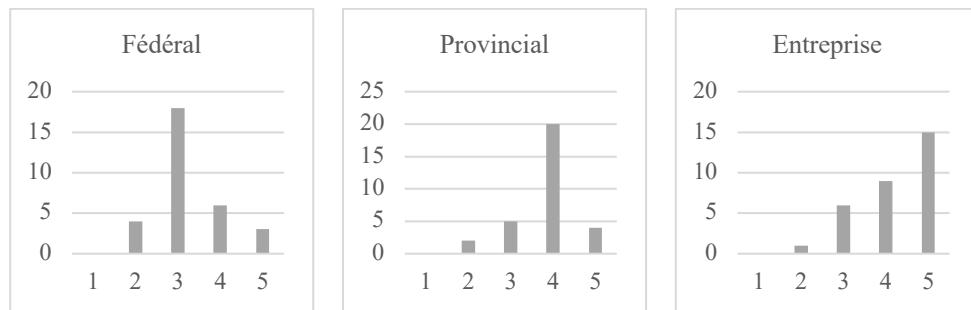


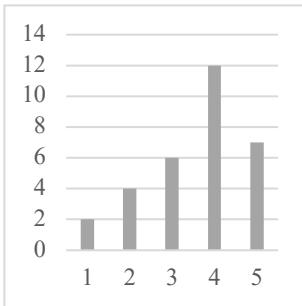
Figure 4-9 Vision des mesures instaurées en réponse à la COVID-19

Les répondants évaluent qu'avant la réouverture des chantiers, leur charge de travail était en général inchangée, mais qu'elle avait légèrement augmenté depuis. L'impact de la crise sur l'approvisionnement des matières est très varié, mais somme toute, les répondants estiment en moyenne que les opérations ont été retardées à cause de l'approvisionnement. Également, les mesures mises en place par les compagnies pour la santé-sécurité de leurs employés, perçues comme efficaces, affectent tout de même les opérations et échéanciers. Selon plusieurs répondants, la plus grande incertitude amenée par la crise concerne l'approvisionnement des

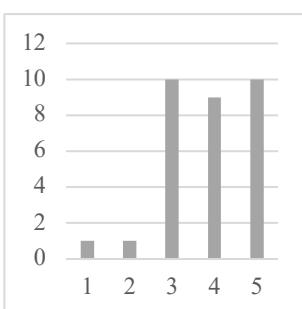
matériaux. Également, la protection des employés est complexe, car la distanciation sur les chantiers peut être logistiquement difficile à accomplir.

Finalement, les trois dernières questions portaient sur les changements dans l'industrie, et s'ils pensaient que la crise était un moment propice ou non pour ces changements. Les réponses pour c'est trois questions sont positives :

La crise a apporté beaucoup de changement dans toutes les industries. Selon vous, est-ce un frein (1) ou une occasion (5) de faire les choses différemment ?



Pensez-vous que c'est un bon moment (5) ou non (1) pour implémenter de nouvelles pratiques environnementales dans le secteur de la construction ?



La crise a amené un stress économique dans beaucoup de secteurs et de compagnies. Selon vous, est-ce un bon moment pour développer des collaborations entre entreprises pour améliorer les pratiques en construction ?

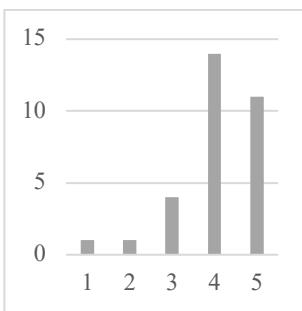


Figure 4-10 Questions et réponses portant sur les changements dans l'industrie

Il est très intéressant de voir cette ouverture des répondants vis-à-vis un changement dans l'industrie, et ce malgré le bouleversement déjà amené par la crise. Ceci suggère que l'industrie est probablement plus ouverte que perçue dans la littérature actuellement.

4.3 Modèles utilisant les données brutes du questionnaire

Tel que discuté à la section 3.3, deux méthodologies sont suivies pour l'analyse économétrique. Les premiers modèles probit qui sont construit utilisent des données brutes du questionnaire. Ceci permettra de valider ou d'infirmer la méthodologie utilisant les données transformées. Comme le nombre de répondants est limité, il est important de s'assurer que les données transformées ne changent pas le sens du résultat. Le Tableau 4-1 classe les questions qui ont été utilisées pour construire le modèle selon la catégorie qu'elles représentent :

Tableau 4-1 Questions prises pour construire le premier modèle

Catégorie		Variable	No	Question posée
Connaissances	DD et EC	Co_g	9	À quel point diriez-vous être familier avec ce diagramme illustrant l'économie circulaire ?
	Techniques de construction	Co_t	3.3	[Utilisation d'ajouts cimentaires « verts » (ex. : poudre de verre recyclé, cendres volantes)]
Importance	Économique	Imp_{ec}	10.1	[La croissance économique peut se faire en utilisant des principes d'économie circulaire]
	Environnement	Imp_{en}	11.5	[Opter pour des solutions protégeant l'environnement]
	Social	Imp_{so}	12.4	[Les projets de construction devraient améliorer la vie sociale autour de ceux-ci]

Ces questions sont assez générales et donc elles permettent de bien représenter les cinq différentes catégories reprises ensuite par les composantes principales (CP). Pour la catégorie *connaissances des techniques spécifiques en construction durable*, la question portant sur les ajouts cimentaires, dont la poudre de verre, a été choisie. Ceci amène une variable différente de celle qui sera créée avec les CP. En effet, cette dernière regroupe le niveau de connaissances de différentes technologies alors qu'ici, la variable est en lien direct avec la demande.

À partir de ces variables, deux modèles probit sont construits, soit les équations 10 et 11. La variable sortante exprimée par ces modèles est la demande « passée » (D_1) et « future » (D_2).

$$(10) P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_t + \beta_3 Imp_{ec} + \beta_4 Imp_{en} + \beta_5 Imp_{so})$$

Tableau 4-2 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 10

Coefficient	Estimé	Pr(> z)
β_1	0.20858	0.4352
β_2	0.64739	0.0559 *
β_3	-0.20134	0.5940
β_4	-0.02408	0.9626
β_5	-0.15433	0.7993
Valeurs p : (*)<0,1 ; (**)<0,05 ; (***)<0,001		

Lorsque la demande 1 est estimée par le modèle, seul le niveau de connaissance technique est statistiquement significatif (valeur p<0,10). Comme ce niveau de connaissance est évalué par la question portant sur les ajouts cimentaires, telle la poudre de verre, ce résultat est attendu : un participant ayant déjà utilisé cette technologie sera plus connaisseur sur celle-ci.

$$(11) P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_t + \beta_3 Imp_{ec} + \beta_4 Imp_{en} + \beta_5 Imp_{so})$$

Tableau 4-3 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 11

Coefficient	Estimé	Pr(> z)
β_1	0.49559	0.0522 *
β_2	-0.04401	0.8165
β_3	-0.27637	0.3749
β_4	-0.84936	0.0880 *
β_5	0.79465	0.1801
Valeurs p : (*)<0,1 ; (**)<0,05 ; (***)<0,001		

Lorsque le modèle estime la probabilité d'utiliser cette technologie dans le futur (demande 2), les variables sur les connaissances générales et sur l'importance accordée à l'environnement sortent comme statistiquement significatives (valeur p<0,10).

4.4 Diminution du nombre d'items : KMO

Maintenant que le premier modèle a été construit à partir des données brutes, les données sont transformées pour construire le second modèle. La première étape consiste à diminuer le nombre d'items qui seront considérés dans l'ACP via l'indicateur KMO.

Comme mentionné précédemment dans la méthodologie, la quantité d'items est trop grande par rapport au nombre de répondants (le ratio de 10 répondants/items n'est pas respecté). L'indicateur KMO permet de réduire le nombre d'items qui seront considérés pour l'ACP avec *rotation varimax*. Les items sont divisés selon les sous-catégories établies précédemment et leur KMO est évalué. Le

Tableau 4-4 suivant classe les questions par catégories ainsi que les questions qui sont gardées pour l'ACP suite à l'analyse KMO selon le seuil indiqué.

Tableau 4-4 Classement des questions de la section B du questionnaire par catégorie

Catégorie		Questions	Seuil KMO	Questions gardées
Connaissances	DD et EC	1,1 à 1,13 9	0,8	1.4; 1.7; 1.12; 9
	Techniques de construction	2 à 7, incluant les sous-questions	0,8	2.2 ; 2.4 ; 5.3; 6.2; 7.4
Importance	Économique	10, incluant les sous-questions	0,6	10.2; 10.7; 10.8; 10.9
	Environnement	11, incluant les sous-questions	0,7	11.1; 11.3; 11.5; 11.8
	Social	12, incluant les sous-questions	0,8	12.2; 12.3; 12.4; 12.5; 12.6; 12.7

Il est à noter que les sous questions 10.3 à 10.5 n'ont pas été considérées ici. Ces questions demandent au répondant l'impact potentiel à court, moyen et long terme qu'il pense que les technologies vertes peuvent avoir, et non l'importance. Également, la formulation de la question 10.6 ne permet pas de la garder.

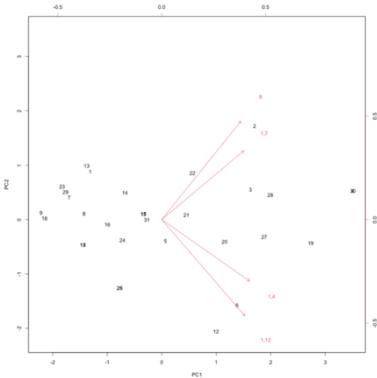
Le seuil pour l'indicateur KMO choisi pour chacune des catégories est le plus haut possible, en conservant au minimum trois éléments, tel qu'établi dans la méthodologie. Les tables contenant toutes les mesures de l'adéquation de l'échantillonnage (KMO) sont en ANNEXE H. Les résultats complets de l'ACP avec rotation varimax pour les 5 différentes catégories à l'étude sont présentés en ANNEXE I. Les tableaux suivants résument l'importance des composantes principales (CP) pour chacune des catégories. Ces données sont extraites à l'aide de la fonction *summary* dans R.

Tableau 4-5 Importance des composantes principales des différentes catégories

connaissances sur le DD et l'EC (Co_g)	PC1	PC2	PC3	PC4		
Standard déviation	1.6542	0.7890	0.62294	0.50295		
Proportion of Variance	0.6841	0.1556	0.09701	0.06324		
Cumulative variance	0.6841	0.8397	0.93676	1.00000		
Techniques de construction durables (Co_t)	PC1	PC2	PC3	PC4		
Standard déviation	2.2306	1.2753	0.7322	0.63851		
Proportion of Variance	0.6341	0.2072	0.06832	0.05195		
Cumulative variance	0.6341	0.8413	0.90963	0.96159		
Importance de l'aspect économie du DD (Imp_{ec})	PC1	PC2	PC3	PC4		
Standard déviation	1.4849	0.9407	0.7090	0.6383		
Proportion of Variance	0.5512	0.2212	0.1257	0.1018		
Cumulative variance	0.5512	0.7725	0.8982	1.0000		
Importance de l'aspect environnemental du DD (Imp_{en})	PC1	PC2	PC3	PC4		
Standard déviation	1.242	0.8195	0.44388	0.42637		
Proportion of Variance	0.595	0.2589	0.07597	0.07009		
Cumulative variance	0.595	0.8539	0.92991	1.00000		
Importance de l'aspect social du DD (Imp_{so})	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Standard déviation	1.4647	0.6852	0.6083	0.48995	0.36337	0.34720
Proportion of Variance	0.6169	0.1350	0.1064	0.06903	0.03797	0.03467
Cumulative variance	0.6169	0.7519	0.8583	0.92737	0.96533	1.00000

Par convention, seuls les composantes principales ayant un écart-type au-dessus de 1 sont conservées, tel que mentionné dans la méthodologie. Pour toutes les catégories, excluant *connaissances techniques*, seul le premier composant est conservé. Les deux premiers composants principaux de la catégorie *connaissances techniques* sont conservés. Le tableau présenté en ANNEXE J résume les scores des composantes principales conservées. Ces scores deviennent les données qui seront utilisées dans le modèle pour représenter chacune des catégories.

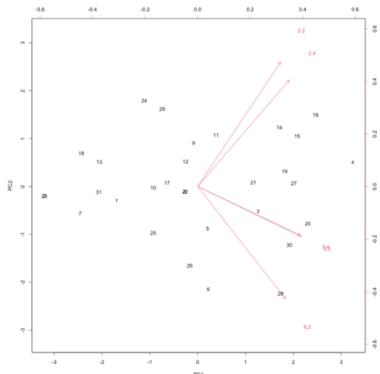
Une analyse graphique *biplot* des deux premières composantes principales permet de comprendre comment celles-ci représentent les données brutes. Un graphique de type *biplot* représente à la fois les observations et les variables d'une matrice donnée. La matrice donnée dans ce cas est composée des composantes principales 1 et 2 calculées précédemment. Son analyse permet de comprendre comment ces deux composantes varient selon les données brutes [104].



La première CP varie entre $-2,215687$ et $3,506735$.

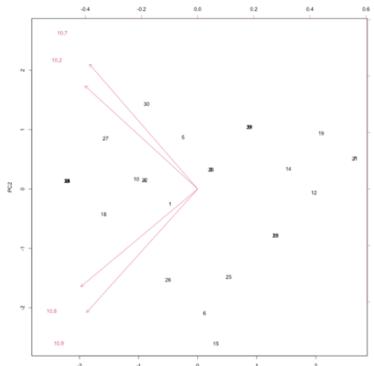
Sa valeur augmente lorsque la « moyenne » des réponses augmente

Figure 4-11 Analyse Biplot des CP 1 et 2 de Co_g



La première CP varie entre $-3,205768$ et $3,24432$ et sa valeur augmente lorsque la « moyenne » des réponses augmente. La seconde CP varie entre $-2,232847$ et $1,796051$ et sa valeur absolue augmente avec une augmentation de la « moyenne » des réponses.

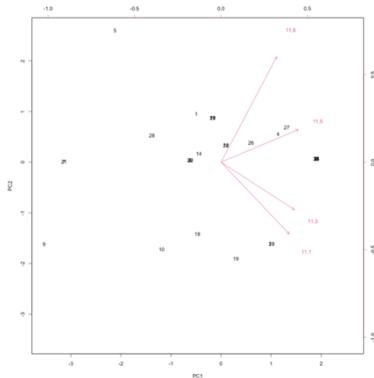
Figure 4-12 Analyse Biplot des CP 1 et 2 de Co_t



La première CP varie entre -2,209208 et 2,661148. Sa valeur diminue lorsque la « moyenne » des réponses augmente.

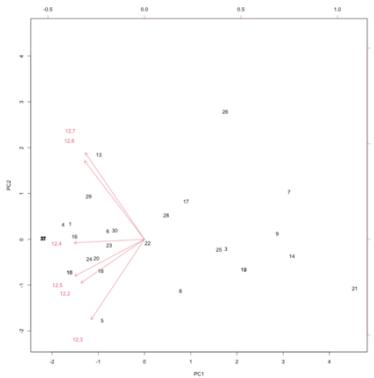
Pour simplifier l'interprétation des résultats et unifier les données quant à l'importance accordée au DD, le CP pour cette catégorie est multiplié par -1. Il s'interprète donc comme la CP pour l'importance environnementale.

Figure 4-13 Analyse Biplot des CP 1 et 2 de Imp_{ec}



La première CP varie entre -3,534065 et 1,904318. Sa valeur augmente lorsque la « moyenne » des réponses augmente.

Figure 4-14 Analyse Biplot des CP 1 et 2 de Imp_{en}



La première CP varie entre -2,189793 et 4,548771. Sa valeur diminue lorsque la « moyenne » des réponses augmente.

Pour simplifier l'interprétation des résultats et unifier les données quant à l'importance accordée au DD, le CP pour cette catégorie est multiplié par -1. Il s'interprète donc comme la CP pour l'importance environnementale.

Figure 4-15 Analyse Biplot des CP 1 et 2 de Imp_{so}

Il est à noter que les données recueillies pour l'importance accordée au DD étaient généralement très élevées. Considérant cela, une faible valeur pour une de ces données n'indique pas que le répondant n'accorde aucune importance à cet aspect du DD. Une haute valeur pour une de ces CP s'interprète plutôt que le répondant accorde une importance encore plus haute qu'un répondant ayant une valeur de CP plus petite.

Les CP deviennent donc les variables qui seront utilisées dans le modèle. La prochaine étape est d'évaluer s'il y a une différence statistique entre les groupes de répondants pour chacune des composantes principales. Pour ce faire, le test de Wilcoxon est utilisé.

Tableau 4-6 Valeur p donnée entre les groupes de répondants selon le test de Wilcoxon

Groupes	Co _g	Co _{t1}	Co _{t2}	Imp _{ec}	Imp _{en}	Imp _{so}
Public vs Privé	0.8596	0.3766	0.6585	0.6585	0.478	0.8354
Type de cie.	0.3204	0.2589	0.2991	0.002486**	0.8562	0.4668
Localisation	0.3507	0.5979	0.1557	0.01191**	0.5282	0.3797
Années expérience	1	0.98	0.0642*	0.8415	0.5306	0.5289
Années dans cie.	0.1853	0.8278	0.304	0.192	0,25	1
Études (Bacc-vs Sup)	0.02129**	0.06257*	0.5481	0.9681	0.3661	0.8877
Poste (gest vs conc)	0.1797	0.3265	0.7793	0.2623	0.7632	0.19
Valeurs p : (*)<0,1 ; (**)<0,05 ; (***)<0,001 : les valeurs p en dessous de 0,10 sont considérées comme ayant une différence statistique entre les groupes de répondants (surligné en gris)						

Des différences sont observées entre deux groupes pour l'importance de la sphère économique, soit le type de compagnie et la localisation de celles-ci. Le niveau d'étude des répondants amène également une différence pour les variables *connaissances générales* et *connaissances techniques*. Également, pour le deuxième CP de *connaissances techniques*, une différence entre les répondants selon leurs années d'expérience est notée. Malgré ces quelques différences entre certains groupes pour certaines variables, peu de différences sont généralement observées entre les groupes de répondants. Ceci peut être expliqué par un biais de sélection. Malgré que différentes compagnies ont été visées, il est possible que le même type de répondants aient décidé de prendre le temps de remplir le questionnaire. Un individu ne portant pas une grande importance au DD ne sera pas enclin à prendre de son temps pour répondre à un questionnaire sur le sujet.

4.5 Régression binomiale probit

Les résultats significatifs obtenus pour certaines équations sont présentés ci-dessous. Celles qui ne sont pas présentées se trouvent en ANNEXE K. Les équations présentées permettent d'expliquer le modèle de régression binomiale de type probit gardé au final.

$$(12) P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_{t1} + \beta_3 Co_{t2} + \beta_4 Imp_{ec} + \beta_5 Imp_{en} + \beta_6 Imp_{so})$$

Tableau 4-7 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 12

Coefficient	Estimé	Pr(> z)
β_1	0.8685	0.0120**
β_2	-0.3881	0.1138
β_3	0.6511	0.0931*
β_4	0.1235	0.6708
β_5	-0.6662	0.0163**
β_6	0.3775	0.1593
Valeurs p : (*)<0,1 ; (**)<0,05 ; (***)<0,001		

L'équation 12 est en tout point similaire à l'équation 2 présentée en méthodologie, à la seule différence que deux variables sont considérées pour le terme *connaissances techniques*. Ces deux variables sont les deux composantes principales étant ressorties comme importantes précédemment. Selon les résultats ci-dessus, les coefficients des composantes *connaissances générales* et *importance accordée à l'environnement*, soit β_1 et β_5 , sont les plus représentatifs du modèle ($p<0,10$). Bien que la composante *importance accordée à l'économie* ait une valeur p plus petite que 0,10, elle n'est pas conservée dans le modèle final. Dans les différentes

régressions testées, celle présentée ci-dessus est la seule où ce paramètre ressort comme significatif.

Lorsque l'équation 12 est testé avec la demande D_1 plutôt que la demande D_2 , seul le coefficient de la variable *importance accordée à l'environnement*, soit β_5 , a une valeur p plus petite que 0,10. Pour déterminer si le coefficient de la variable *connaissances générales* devrait être gardé ou non, le modèle a été testé en ne gardant que cette variable pour estimer D_1 , comme présenté à l'équation (13). Le coefficient de cette variable, soit β_1 , ressort comme statistiquement significatif.

$$(13) P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Cog)$$

Tableau 4-8 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 13

Coefficient	Estimé	Pr($> z $)
β_1	0.2606	0.0842*
Valeurs p : (*) $<0,1$; (**) $<0,05$; (***) $<0,001$		

La valeur p du coefficient β_1 dans le modèle testant la demande D_1 avec seulement la variable *connaissances générales* est en dessous de 10 %, tel que présenté dans le Tableau 4-8. Lorsque cette même équation (13) est testée avec D_2 plutôt que D_1 , le paramètre des connaissances générales est légèrement moins significatif ($p = 10,2\%$) et la valeur estimée du coefficient est similaire (0,24).

Le terme *connaissances techniques* n'est jamais statistiquement significatif. Ceci est attendu puisque les connaissances qu'un répondant a (ou non) sur certaines techniques de construction durable ne sont pas représentatives de ses connaissances pour une autre technique spécifique (i.e. la poudre de verre comme ajout cimentaire).

Plusieurs autres combinaisons ont été testées ; aucun modèle ne permet d'avoir tous les paramètres comme significatifs. Puisque les autres combinaisons testées n'apportent aucune

nouvelle information sur quel terme semble impacter le plus le modèle, ils ne sont pas présentés ici. Les tables de ces combinaisons sont présentées en ANNEXE K. Aucune équation initialement testée ne semble bien s'appliquer pour le modèle. Les constats faits de ces observations permettent de définir que les variables *connaissances générales* et *importance à l'environnement* seront gardées dans le modèle final. Les équations 14 et 15 testent respectivement les demandes D₁ et D₂, selon ces deux variables, tel que présentées ci-dessous :

$$(14) P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en})$$

Tableau 4-9 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 14

Coefficient	Estimé	Pr(> z)
β_1	0.3120	0.0501*
β_5	-0.2224	0.1920
Valeurs p : (*)<0,1 ; (**)<0,05 ; (***)<0,001		

$$(15) P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en})$$

Tableau 4-10 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 15

Coefficient	Estimé	Pr(> z)
β_1	0.2905	0.0651*
β_5	-0.2073	0.1914
Valeurs p : (*)<0,1 ; (**)<0,05 ; (***)<0,001		

À partir de ces équations, les variables modératrices sont introduites une à une afin d'examiner leur potentiel impact sur le modèle. Quatre variables modératrices avaient précédemment été identifiées comme ayant une différence significative entre des groupes de répondants :

- La localisation de la compagnie
- Le niveau d'étude du répondant
- Les années d'expérience du répondant
- Le type de compagnie

L'importance statistique sur le modèle des quatre groupes a été testée en utilisant Chi². La localisation de la compagnie ainsi que les années d'expérience du répondant n'impactent pas les modèles, comme montré en ANNEXE L. Le type de compagnie (*cie*) impacte le modèle lorsque l'on considère D₁ et le niveau d'étude (*etu*) du répondant impacte le modèle lorsqu'on considère D₂, tel que présenté ci-dessous par les équations 16 et 17. Tous les autres modèles et les tests de Chi² sont présentés en ANNEXE L et en ANNEXE M.

$$(16) P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + cie)$$

Tableau 4-11 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 16

Coefficient	Estimé	Pr(> z)
β_1	0.2992	0.0875*
β_5	-0.2008	0.2635
Cie1	-1.1610	0.0456**
Valeurs p : (*)<0,1 ; (**)<0,05 ; (***)<0,001		

$$(17) P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_{générales} + \beta_5 Imp_{enviro} + étu)$$

Tableau 4-12 Résultats de la régression produite à partir de l'équation 17

Coefficient	Estimé	Pr(> z)
β_1	0.09429	0.6227
β_5	-0.24179	0.1454
Etu1	-1.45175	0.0161**
Valeurs p : (*)<0,1 ; (**)<0,05 ; (***)<0,001		

Dans le dernier modèle, soit le modèle testant l'équation 17, le coefficient pour *connaissances générales* obtient une valeur p au-dessus de 60 %, et celui pour *l'importance à l'environnement* obtient quant à lui une valeur p au-dessus de 10 %. Toutefois, pour le modèle testé avec l'équation 16, seul le coefficient de la variable *importance à l'environnement* a une valeur p au-dessus de 10 %, soit de 26 %. Pour cette raison, les variables composants l'équation 16 sont gardées pour composer le modèle final. Le modèle final est donc composé de deux variables indépendantes et d'une variable modératrice. Deux variantes du modèle seront construites, soit l'une testant D₁ et l'autre testant D₂, toute deux selon les mêmes variables. Ces trois variables sont les suivantes :

- Connaissances générales du répondant
- Importance accordée à l'environnement par le répondant
- Type de compagnie pour laquelle le répondant travaille

Ainsi, à partir de ces variables, deux modèles sont construits, soit l'un testant la demande D₁ et l'autre testant la demande D₂. Le Tableau 4-13 ci-dessous montre ces modèles, qui sont les modèles gardés au final. Le modèle A détermine la demande D₁ et le modèle B, la demande D₂. Ces deux modèles seront testés davantage selon le taux de prédiction, le coefficient phi, ainsi que la pseudo-mesure de R². Ces tests sont présentés aux pages suivantes.

Tableau 4-13 Modèles finaux - équations 18-19

Modèle A – équation 18			Modèle B – équation 19		
$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Impen + cie)$			$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Impen + cie)$		
	Estimé	Pr(> z)		Estimé	Pr(> z)
β_1	0.2992	0.0875*	β_1	0.3188	0.0482**
β_5	-0.2008	0.2635	β_5	-0.2268	0.1619
Cie	-1.1610	0.0456**	Cie	0.4723	0.4062
Valeurs p : (*)<0,1 ; (**)<0,05 ; (***)<0,001					

Le premier test effectué sur les deux modèles ci-dessus est l'évaluation du taux de prédiction. Celui-ci compare la demande réelle (soit celle provenant de nos données) à la demande qui peut être estimée grâce au modèle. Le taux de prédiction des modèles A et B est donc le pourcentage de « bonnes réponses » qui seront trouvées par les modèles. Le taux de prédiction est de 74,19 % pour le modèle A et de 64,52 % pour le modèle B. Le modèle A permet de trouver un plus haut taux de bonnes estimations que le modèle B donc. Le Tableau 4-14 résume les prédictions des modèles qui sont bons ou non par rapport aux données brutes.

Tableau 4-14 Taux de prédiction des équations 18-19

Modèle A Équ. 18	Données réelles		Modèle B Équ. 19	Données réelles	
	0	1		0	1
Données 0 estimées 1	20	6	Données 0 estimées 1	8	5
	2	3		6	12

Le modèle A permet d'estimer 23 bonnes réponses : soit que 20 répondants n'utilisant pas la poudre de verre (0) versus 3 répondants qui l'utilisent (1). Le modèle estime mal que 6 répondants n'utilisent pas la technologie alors qu'ils l'ont utilisée et que 2 répondants l'ont

utilisée alors qu'en réalité non. Pour le modèle B, l'estimation de 20 réponses est bonne, soit 8 répondants qui n'utiliseraient pas la technologie et 12 qui l'utiliseraient ; 11 réponses sont mal estimées par le modèle. À partir des deux matrices présentées dans le Tableau 4-14, le coefficient phi est calculé : le coefficient est de 0,29918 pour le modèle A et de 0,2796 pour le modèle B. Ces données indiquent une faible corrélation positive entre le modèle et la réalité.

Une pseudo-mesure de R^2 est faite à partir des valeurs de déviance des deux modèles. Le Tableau 4-15 résume ces différentes valeurs. Cette pseudo mesure de R^2 montre une faible corrélation positive entre la réalité et les modèles.

Tableau 4-15 Pseudo Mesure de R^2 des équations 18-19

Modèles	Déviance nulle	Déviance résiduelle	$R^2=1 - Dr/Dn$
Modèle A (equ. 18)	37,351	28,311	0,242
Modèle B (equ. 19)	37,351	32,555	0,128

La valeur des coefficients des modèles A et B, soit la colonne *Estimé* du Tableau 4-13, est exprimée en logarithme des probabilités. Ceci est difficile à visualiser et conséquemment à analyser. Les coefficients extraits de la colonne *Estimé* sont donc modifiés selon l'équation (20) ci-dessous pour en faciliter l'analyse :

$$(20) \text{Rapport des chances} = e^{\text{estimé}}$$

L'équation (20) permet de trouver le rapport des chances (*odds ratio* en anglais) des coefficients pour les deux modèles. Le tableau suivant présente ces valeurs pour le modèle A.

Tableau 4-16 Rapport des chances des coefficients du modèle A

(18) $P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + cie)$		
β_1	β_5	cie
1.3488460	0.8181005	0.3131657

Le rapport des chances fluctue entre 0 et l'infini. Lorsqu'il est plus petit que 1, la variable varie inversement à la demande. S'il est au-dessus de 1, la variable influence positivement la demande, et plus la valeur est grande, plus cette influence l'est aussi. Pour le modèle A, soit l'équation 18, si la variable *connaissances générales* augmente d'un pas, alors un répondant sera 1,35 fois plus susceptible d'avoir utilisé la poudre de verre. Les variables *importance de l'environnement* et *compagnie* influencent inversement la demande. Pour simplifier leur interprétation, leur inverse est calculé, soit :

Tableau 4-17 Inverse du rapport des chances du modèle A

β_5	cie
$1/0,8181005 = 1,222344$	$1/0,3131657 = 3,193198$

Un répondant accordant une importance à l'environnement plus grande d'un pas sera 1,22 fois moins susceptible d'avoir utilisé de la poudre de verre comme ajout cimentaire. Également, un répondant travaillant en construction est 3,19 fois moins susceptible d'avoir utilisé la technologie que s'il travaillait pour une compagnie spécialisée en béton. L'interprétation du modèle B, soit le modèle estimant la demande « future » (D_2), suit la même méthodologie qui vient d'être appliquée pour le modèle A. Le Tableau 4-18 présente les valeurs de rapport des chances des coefficients pour le modèle B.

Tableau 4-18 Rapport des chances des coefficients de l'équation 19

$(19) P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + cie)$		
β_1	β_5	cie
1.3755256	0.7971040	1.6036658

Les valeurs pour les coefficients β_1 et β_5 s'interprètent d'une manière similaire que lorsque la demande D_1 est estimée. Un répondant est 1,38 fois plus susceptible d'avoir utilisé la technologie

lorsque ses connaissances générales augmentent d'un pas. L'importance accordée à l'environnement, quant à elle, est négativement associée à la demande ; un répondant est 1,25 fois moins susceptible d'utiliser la technologie lorsque l'importance qu'il accorde à l'environnement augmente d'un pas. Toutefois, contrairement au modèle A, la variable *cie* varie positivement avec ce modèle. Un répondant travaillant dans une compagnie de construction sera 1,60 fois plus susceptible d'utiliser la technologie qu'un répondant travaillant dans une compagnie spécialisée en béton.

4.6 Analyse des réponses aux questions ouvertes

Tout au long du questionnaire, les répondants avaient l'opportunité d'ajouter à leurs réponses via des cases de texte. Cette section analyse l'ensemble de ces réponses. Pour la majorité des répondants ayant déjà participé à un projet utilisant la poudre de verre comme ajout cimentaire, il ne s'agit pas de projets de grande envergure, mais plutôt de projets pilotes ou de trottoirs. Toutefois, plusieurs problèmes ont été rencontrés par les répondants lors de ces projets. Deux de ces problèmes qui sont souvent soulignés par les répondants sont les suivants :

- Un manque de constance dans la qualité de la poudre de verre ;
- Un entraînement d'air trop élevé dans le béton

Il est à noter que ce second problème est possiblement causé par le premier. Toutefois, ces problèmes ont été rencontrés sur des projets pilotes, réalisés avant la normalisation de cet ajout cimentaire. Ils sont donc probablement dus au fait que le produit n'était pas encore conventionnel et peu fréquent. Il semble que ces mauvaises expériences aient laissé un goût amer dans l'industrie; plusieurs répondants ont entendu ou ont eux-mêmes des préjugés quant à cette technologie. Ceux-ci sont directement liés aux problèmes rencontrés dans les projets pilotes : variabilité dans le produit de poudre de verre, tendance à entraîner de l'air, et même une mauvaise odeur due à la contamination du verre. Également, un répondant note qu'un préjugé commun est que cet ajout cimentaire a une faible réactivité, entraînant une faible résistance dans le béton. Ce préjugé vient d'une mauvaise compréhension de la technologie : bien que la poudre de verre ne participe pas à la réaction alcalis-granulats comme le ciment ou d'autres ajouts, elle permet quand même au béton d'atteindre une résistance maximale plus élevée. L'un des répondants note également que le prix de la poudre de verre est perçu comme équivalent ou

supérieur au ciment. Il semble également y avoir une opposition entre les producteurs de poudre de verre et l'ABQ. Le premier, selon certains, ne prend pas assez au sérieux la qualité requise du produit pour le béton, alors que le second, selon d'autres, répand une vision négative sur cette technologie.

Certains répondants semblent douter de l'avantage environnemental de cette technologie également. Pourtant des études comme celle de Deschamps établissent bien l'avantage de la poudre de verre sur le cycle de vie d'une structure de béton. Ceci pourrait être une piste expliquant que le coefficient de la variable *importance accordée à l'environnement* dans le modèle probit influence négativement la probabilité d'utiliser cette technologie. Quant à payer davantage pour cette technologie, certains répondants semblent ouverts à cela, selon la différence de coût. Pour d'autres, il faudrait que cette surcharge soit compensée par le client.

Lorsque questionnés, certains répondants pensent que cet ajout cimentaire n'est pas une nécessité vu qu'il y a d'autres produits sur le marché tels le laitier, la fumée de silice et les cendres volantes. Ceux-ci ayant un historique déjà établi, ils sont privilégiés par certains répondants.

Comme commentaires additionnels, certains répondants rappellent l'importance de promouvoir davantage cette alternative dans les institutions et associations afin de briser les préjugés autour de cette technologie.

En général, les commentaires sont très variés, certains étant très positifs vis-à-vis de la poudre de verre comme ajout cimentaire alors que d'autres non, ne voyant pas son avantage par rapport aux autres ajouts déjà établis. Il ressort toutefois de ces commentaires que certains biais de perception envers la poudre de verre pourraient être corrigés si une meilleure communication entre les acteurs de l'industrie se faisait.

CHAPITRE 5 ANALYSE DE LA VIABILITÉ ÉCONOMIQUE

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse économique. Basé sur la méthodologie discutée à la section 3.3, les données nécessaires à ce calcul sont d'abord présentées. Ceci est suivi du calcul de viabilité économique pour la production de poudre de verre comme ajout cimentaire, selon les scénarios précédemment présentés en méthodologie. L'analyse de sensibilité réalisée à la suite du calcul de viabilité économique permet d'estimer la différence de coûts pour trois scénarios de coûts de transport. Ce calcul est suivi d'une comparaison de quatre mélanges de ciment pour estimer la différence de coût pour un utilisateur.

5.1 Données

Bien qu'annuellement, le gisement de verre recyclé au Québec soit de 120 000 tonnes [48], une production de 15 000 tonnes de poudre de verre est ciblée pour le calcul, basé sur ce qui est suggéré par le plan Verre l'Innovation [46]. Ceci représente 10 % du marché actuel des cendres volantes. Toutefois, tel que discuté précédemment dans la méthodologie, une bonne quantité du verre entrant dans l'usine ira vers les autres marchés utilisant le verre recyclé. L'hypothèse posée est que le centre de micronisation de Tricentris traite au total 32 000 tonnes de verre. Cette hypothèse est basé sur le tonnage entrant actuel au centre de Tricentris. Le centre de tri de Québec est catégorisé comme ayant une grande capacité par le plan Verre l'Innovation, tout comme Tricentris. Un centre de tri de grande capacité peut traiter plus de 35 000 tonnes de verre recyclé par an. Comme il a été mis dans la même catégorie que Tricentris, l'hypothèse est posée qu'il traite la même quantité de verre et que sa production de poudre de verre sera la même également. Pour les deux centres de tri considérés dans les scénarios, l'hypothèse est que 32 000 tonnes de verre sont traitées par chacun des centres de tri et 15 000 tonnes de poudre de verre sont produites pour être vendues comme ajout cimentaire.

Il est considéré que la poudre de verre se vend 200 \$ la tonne lorsque vendue comme ajout cimentaire. Ceci est basé sur une information donnée par Tricentris en date du 24 février 2021.

Pour calculer le débit de production, on considère que le conditionneur fait fonctionner les machines 16 heures par jour, cinq jours par semaine, 50 semaines par an, pour un total de 4 000 heures par an. Cette estimation de la production est conservatrice. Tel que mentionné par

Grégory Pratte, le représentant de Tricentris, selon la demande et la période de l'année, la production est parfois de 20 heures par jour, six jours par semaine.

On considère 32 000 tonnes de verre entrant annuellement dans le centre de micronisation, avec 5 % de pertes. Ces pertes sont causées lors d'un bris de machinerie qui empêcherait la production adéquate du verre micronisé. Les pertes sont envoyées en LET comme recouvrement et aucun coût ne leur est associé.

$$(8) \text{ Débit/heure} = \frac{32\ 000 \text{ tonnes}}{\text{an}} \times \frac{1 \text{ an}}{4\ 000 \text{ heures}} = 8 \text{ t/h}$$

Coût de la machinerie : 3 275 000 \$. Une dépréciation sur 10 ans à un taux annuel de 10 % est considérée. Le coût d'installation est estimé à 25 % du coût de la machine.

Coût du bâtiment : le coût de construction d'un bâtiment de type entrepôt de 1000 m² est évalué en moyenne à 1 115 \$/m² en 2019 [105]. Le coût annuel du bâtiment est estimé à 37 167 \$ en utilisant un amortissement linéaire sur une durée de vie de 30 ans, sans valeur de récupération.

Coût du terrain : le coût d'investissement des terrains est donc de 196 470 \$. La valeur foncière du terrain est estimée à 6 549 \$ par année en utilisant un amortissement linéaire sur une durée de vie de 30 ans.

Coûts d'exploitation : le coût de l'électricité en 2018 pour grosses industries est de 0,052 \$ le kWh [99]. Le kérosène est quant à lui vendu à 0,66 \$ le litre en moyenne en 2019 au Canada. Selon les données de Krysteline, leur système utilise 156,50 kWh (ANNEXE N) d'électricité et 55 litres par heure de kérosène. Les coûts d'opération des machines sont calculés avec le temps d'opération annuel des machines de 4000 heures calculé précédemment.

Coûts annuels d'entretien : l'entretien du bâtiment est estimé à un taux de 3 \$/h, basé sur la méthodologie de Tucker et al. [61]. Tel que calculé précédemment, son temps d'opération est de 4000 heures par an, donnant un coût d'entretien de 12 000 \$ par an. Le coût de l'entretien de la machinerie est basé sur les informations données par Krysteline. Ils évaluent un coût de 6,76 \$ de réparation nécessaire par tonne de matières entrant dans l'usine de traitement. Ceci inclut le coût des pièces de rechange ainsi que de la main-d'œuvre nécessaire aux réparations et entretien.

Coûts de la main-d'œuvre : selon Krysteline, six employés sont nécessaires pour faire fonctionner l'usine, chacun ayant un certain nombre d'heures par semaine et un salaire selon le poste occupé. Le nombre d'heures par semaine est basé sur ce que Krysteline suggère et le salaire par occupation est basé sur une moyenne canadienne en 2018 [101]. Ces coûts sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 5-1 Main d'œuvre nécessaire pour un quart de travail

Poste	H/semaine	Salaire horaire
Superviseur de l'usine	40h	47,12 \$
Opérateur de l'usine	40h	31,90 \$
Installation d'ensachage	40h	20,91 \$
Monteur / soudeur en atelier	40h	29,93 \$
Travailleur / Nettoyeur	10h	23,01 \$
Mouvement de matériaux	16h	18,31 \$

Deux quarts de travail sont pris en compte, comme au centre de tri de Terrebonne (Tricentris), avec un horaire sur 5 jours par semaine. Également, des dépenses équivalentes à 5 % du salaire sont ajoutées en cas de temps supplémentaire, et 7,5 % du salaire est ajouté en cas de congés de maladie et vacances.

Coûts de transport : le coût de transport, très important à considérer, est également difficile à estimer. Celui-ci dépend de plusieurs facteurs : le poids de la matière transportée, le trajet parcouru, le prix de l'essence, la disponibilité des conducteurs, etc. Ce dernier point est souvent sous-estimé. Tel que discuté avec Pratte [106], une pénurie de camionneurs amène une surenchère dans le coût de cette main-d'œuvre. Dans le cadre de cette recherche, le coût du transport de la poudre de verre est estimé à 15 % du prix de vente de la poudre, soit 30 \$ la tonne. Cette estimation est faite suite à la discussion avec Pratte en février 2021. Tel qu'il le souligne, cette estimation est très difficile ; justifiant une analyse de sensibilité pour cette dépense. Quatre coûts pour le transport y seront considérés, soit 10 %, 15 %, 20 % et 30 % du prix de vente de la poudre de verre. Cette fourchette de coût sera appliquée aux deux scénarios présentés en méthodologie.

Contingence : tel que suggéré par Krysteline, une contingence équivalente à 5% des revenus bruts est prise en compte.

5.2 Résultats

Pour le scénario 1, les revenus bruts sont de 3 000 000 \$, provenant de la vente de 15 000 tonnes de verre à un coût de 200 \$ la tonne. Dans le cas du scénario 2, ce sont 30 000 tonnes de verre qui seront vendues comme ajout cimentaire, totalisant un revenu de 6 000 000 \$. Le Tableau 5-2 résume les coûts annuels pour l'année 1, associés avec la production de poudre de verre recyclé. Les coûts variables impliquent un taux d'inflation de 1,9 %.

Tableau 5-2 Estimation des coûts pour les deux scénarios

	Scénario 1	Scénario 2
<i>Coûts fixes</i>		
Achat d'équipement + 25% pour l'installation	0 \$	409 375 \$
Bâtiment (1000 m ²)	0 \$	37 167 \$
Terrain (20,000 m ²), 6% du coût de l'équipement	6 550 \$	13 100 \$
Assurance de la propriété, 1.0% du capital fixe total	3 712 \$	7 424 \$
Taxes sur la propriété, 1.5% du capital fixe total	5 568 \$	11 136 \$
Financement pour l'achat	0 \$	262 000 \$
<i>Coûts d'opérations</i>		
Coût d'électricité	32 553 \$	65 105 \$
Coût du Kérosène	145 200 \$	290 400 \$
Transport	450 000 \$	900 000 \$
Frais administratifs	300 000 \$	450 000 \$
<i>Entretien</i>		
Bâtiment, \$3/h	12 000 \$	24 000 \$
Équipement	299 397 \$	449 095 \$
<i>Autres coûts</i>		
Main-d'œuvre	663 555 \$	1 327 111 \$
Contingence (5% des profits)	150 000 \$	300 000 \$
Total des coûts	2 068 835 \$	4 546 364 \$

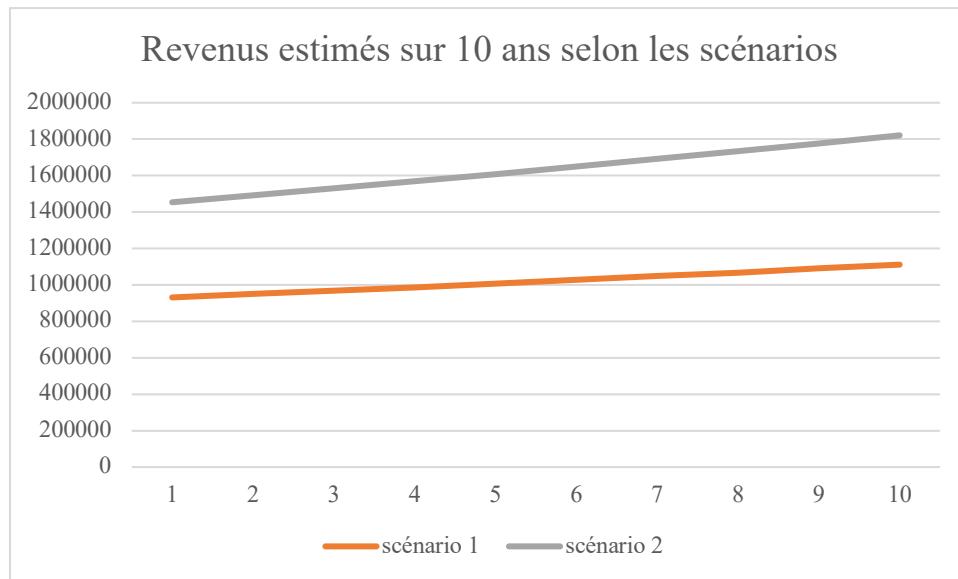


Figure 5-1 Revenus approximatifs sur 10 ans pour les scénarios

La Figure 5-1 représente l'évolution sur 10 ans des revenus des deux scénarios. Ceux-ci sont positif et croissants sur toute la période. Le scénario 2 pourrait éventuellement permettre une augmentation de la production, augmentant de ce fait les revenus.

Contrairement à la suggestion de plan Verre l'Innovation, le centre de tri de Gaspésie n'a pas été considéré pour implémenter une usine de micronisation pour faire de la poudre de verre. En effet, le tonnage de verre entrant à ce centre de tri est trop petit pour que l'investissement soit rentable. C'est pourquoi le centre de tri de Gaspésie a opté pour un autre marché du verre recyclé, soit l'utilisation de celui-ci comme abrasif pour les routes.

L'avantage du scénario 2 c'est la possibilité d'augmenter de manière significative la production de poudre de verre tout en couvrant un grand territoire. Le transport ayant une disponibilité restreinte et un coût élevé, l'implantation de cette usine devient avantageuse, puisqu'elle permet de traiter le verre collecté dans le nord du Québec. Il y aurait donc trois pôles de traitement du verre, soit l'usine Tricentris à Lachute, le conditionneur à Bellemare et l'usine à Québec. Les coûts de transport selon l'analyse de sensibilité sont résumés dans le Tableau 5-3.

Tableau 5-3 Analyse de sensibilité pour le coût de transport

	Scénario 1			Scénario 2		
	Coût transport	Coûts totaux	Profits	Coût transport	Coût total	Profits
10%	300 000 \$	1 918 835 \$	1 081 165 \$	600 000 \$	4 246 364 \$	1 753 636 \$
15%	450 000 \$	2 068 835 \$	931 165 \$	900 000 \$	4 546 364 \$	1 453 636 \$
20%	600 000 \$	2 218 835 \$	781 165 \$	120 0000 \$	4 846 364 \$	1 153 636 \$
30%	900 000 \$	2 518 835 \$	481 165 \$	1 800 000 \$	5 446 364 \$	553 636 \$

Tel que discuté précédemment, le coût de transport choisi initialement (15 % des revenus) est conservateur. L'analyse de sensibilité permet de voir que si ce coût venait à doubler (30 % des revenus), les profits réalisés par le conditionneur de verre diminueraient grandement, particulièrement dans le cas de l'usine fictive qui serait implantée à Québec dans le cas du scénario 2. En effet, les profits inscrits dans le Tableau 5-3 sont en fait les profits combinés de l'usine fictive et de l'usine de Tricentris, dont les investissements initiaux sont considérés comme majoritairement remboursés. Avec des coûts de transport montant à 30 % des revenus, l'usine de Québec ferait environ 72 000 \$ de profits annuels. Ceci démontre l'importance de considérer le coût du transport et de ne pas sous-estimer son impact pour le développement de ce marché.

5.3 Comparaison avec le marché actuel

Quelques répondants du questionnaire mentionnent que la poudre de verre était plus dispendieuse que le ciment et que d'autres ajouts cimentaires déjà implantés sur le marché. Cette section estime la différence de coûts pour un utilisateur selon différents mélanges de ciment pour 1 m³ de béton. Le tableau suivant résume les coûts moyens des différents produits considérés dans ces mélanges, tirés de Deschamps et ajustés pour 2020.

Tableau 5-4 Coûts moyens

Produit	Coûts \$CAD/tonne
Ciment	190,75 \$
Cendres volantes	53,51 \$
Fumée de silice	741,40 \$

Le Tableau 5-5 résume les quantités de chaque produit pour 1 m³ de béton, excluant les quantités d'agrégats, de sable, d'eau et d'adjuvants (tels les entraîneurs d'air et plastifiants), pour un mélange ayant 400 kg de ciment. Ces mélanges sont basés sur Omran et al. [1].

Tableau 5-5 Mélanges de ciments et ajouts pour 1 m³ de béton

	Trottoir extérieur MDD		Dalle intérieur UdeS	
	Réf. (kg/m ³)	PV (kg/m ³)	PV (kg/m ³)	CV (kg/m ³)
Ciment GU	400	320	304	304
PV	0	80	80	0
Fumée de silice	0	0	16	16
CV	0	0	0	80
Total	400	400	400	400

La fumée de silice est présente dans les mélanges ayant utilisé un ciment de type GUB-S/SF. Ce type de ciment contient 5 % de fumée de silice [1]. Dans le Tableau 5-5, afin de faciliter l'estimation des coûts de chacun des mélanges, la fumée de silice a été indiquée à part du ciment lorsque présente dans les mélanges utilisés dans les projets pilotes.

Le Tableau 5-6 résume les coûts estimés pour 400 kg de mélange de ciment, soit ce qui est nécessaire pour faire 1 m³ de béton, selon les quatre scénarios présentés dans la méthodologie à la section 3.4.

Tableau 5-6 Coûts estimés pour 400 kg de mélange de ciment selon quatre scénarios

	Trottoir extérieur MDD		Dalle intérieur UdeS	
	100 % ciment	20 % PV	20 % PV+5 % FS	20 % CV
Ciment GU	76,30 \$	61,04 \$	57,99 \$	57,99 \$
PV	-	16 \$	16 \$	-
FS	-	-	11,86 \$	11,86 \$
CV	-	-	-	4,28 \$
Total	76,30 \$	77,04 \$	85,85 \$	74,13 \$

Le coût pour un béton contenant de la poudre de verre est légèrement plus dispendieux qu'avec les méthodes traditionnelles. Comparativement au béton sans ajout cimentaire, le béton contenant 20 % de poudre de verre n'est que 1 % plus dispendieux. Toutefois, il est 15 % plus dispendieux qu'un béton contenant 20 % de cendres volantes.

L'analyse de viabilité suppose qu'une production de poudre de verre serait avantageuse dans le contexte du Québec selon les scénarios étudiés. Il est important de souligner l'importance du coût de transport, tel que le montre l'analyse de sensibilité. Si celui-ci est trop élevé, l'implémentation d'une nouvelle usine de micronisation du verre à Québec devient alors peu profitable. Pour les usagers, la poudre de verre reste encore plus dispendieuse que des cendres volantes. Comme ce produit doit être importé au Québec et que son offre est amenée à diminuer avec la fermeture d'usines au charbon, il faut considérer que son coût risque d'augmenter dans les prochaines années. Le marché québécois aurait donc un net avantage économique à investir pour produire ce nouvel ajout cimentaire, prenant une longueur d'avance sur les fluctuations futures possibles des produits importés.

CHAPITRE 6 DISCUSSION

Les trois objectifs de la recherche ont été atteints au travers des chapitres 2.2, 4 et 5. Ceux-ci étaient :

1. Identifier les obstacles rencontrés en construction durable sur divers marchés à l'international ;
2. Dresser un portrait des acteurs du milieu afin d'estimer quelles variables influencent la demande de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire ;
3. Évaluer les coûts théoriques d'implémentation sur le marché de la construction de la poudre de verre comme ajout cimentaire au Québec.

Le présent chapitre résume l'ensemble des résultats de la recherche, afin d'en sortir les constats principaux. À partir des constats faits, des pistes de solutions provenant de la littérature sont suggérées.

6.1 Discussion sur le modèle probit

Le modèle a pour but de déterminer quels paramètres influencent la demande pour la poudre de verre comme ajout cimentaire. L'hypothèse avait été posée que les connaissances sur l'EC et les technologies durables ainsi que l'importance accordées aux différentes sphères du DD influencent la demande pour cette technologie. Deux demandes ont été testées, soit D_1 représentant la demande « passée » et D_2 représentant la demande « future ».

Des cinq variables indépendantes testées, trois sont considérées comme non significatives statistiquement au modèle. D'abord, la variable *connaissances techniques*, soit les connaissances du répondant dans différentes technologies durables, ressort comme non significative dans le modèle. Ce résultat est attendu ; une connaissance approfondie dans une technologie spécifique ne signifie pas que le répondant connaît la technologie pour laquelle la demande est évaluée. Ensuite, les variables d'importance accordée aux sphères économique et sociale, soit *importance économique* et *importance sociale*, sont également peu significatives. L'importance accordée en général au DD était très élevée parmi tous les répondants : si tous les répondants accordent une importance élevée, ceci n'aide pas à expliquer la différence dans la demande.

Laissant donc deux des cinq variables indépendantes initialement testées comme significatives au modèle, soit *connaissances générales* et *importance accordée à l'environnement*. Une variable

modératrice a été ajoutée à ces variables indépendantes, soit le type de compagnie, laquelle a également été conservée dans le modèle final. Celle-ci est discutée plus bas. Le coefficient de la variable *connaissances générales* varie similairement pour les deux modèles, avec une valeur *p* de moins de 0,10 dans les deux cas, validant son importance statistique et l'hypothèse posée au départ. Selon la valeur de ce coefficient, plus les connaissances en DD ou en EC d'un répondant sont élevées, plus il sera enclin à avoir une ouverture d'esprit pour utiliser une nouvelle technologie verte, augmentant donc la probabilité qu'il utilise la poudre de verre comme ajout cimentaire.

La seconde variable indépendante gardée dans le modèle final est celle de l'importance accordée à la sphère environnement du DD. Le coefficient de celle-ci a une valeur négative dans les deux modèles, contrairement à ce qui aurait pu être attendu. Cette valeur négative signifie que plus l'importance accordée à l'environnement est élevée, moins un répondant sera susceptible d'utiliser la technologie. Ce résultat peut être expliqué, tel que mentionné à la section 4.6, par une perception négative de certains répondants par rapport à l'impact environnemental de cette technologie. Également, il faut prendre en compte que la valeur *p* de ce paramètre est de 0,26 pour le modèle A et de 0,16 pour le modèle B, soit une valeur au-dessus du seuil de 0,10 posé. Son importance statistique est donc moindre dans le modèle par rapport à la variable des connaissances générales. Toutefois, la valeur négative de ce paramètre rappelle l'importance qu'une information claire et précise soit communiquée et disponible pour éviter les biais de perception.

Bien que ces deux paramètres varient très peu pour une augmentation d'une unité de la variable, il faut souligner que ces variables varient sur une petite échelle également. La composante principales pour les connaissances générales varie entre -2,2 et 3,5 (soit 5,7 pas), alors que l'importance accordée à l'environnement varie entre -3,5 et 1,9 (soit 5,4 pas). Une augmentation d'un pas pour ces variables représente en fait une augmentation de plus de 17 % de leur valeur.

La dernière variable ajoutée au modèle est la variable modératrice laquelle classe les répondants par type de compagnie. Le coefficient de celle-ci varie différemment selon le modèle. Un répondant travaillant dans une compagnie spécialisée en béton est plus enclin à avoir déjà utilisé la poudre de verre comme ajout cimentaire, mais moins enclin à l'utiliser dans le futur. Ce résultat est intéressant et vient supporter l'hypothèse qu'une vision négative de cette technologie

est présente dans les acteurs travaillant en béton. Cette vision négative pourrait par exemple être causée par un biais d'ancrage : même si la technologie s'est améliorée depuis les projets pilotes, les mauvaises expériences vécues lors de ceux-ci sont restées ancrées.

6.2 Retour sur les obstacles

La revue systématique a permis d'identifier les obstacles principaux à l'implémentation de nouvelles technologies. Un retour sur ceux-ci est fait afin de les mettre en relation, lorsque applicable, avec ce qui ressort de l'analyse du questionnaire, du modèle probit et de l'analyse économique.

6.2.1 Barrières techniques et financières

Les barrières suivantes avaient été répertoriées sous cette catégorie dans la revue systématique:

- Manque de connaissances et d'informations disponibles ;
- Nature multidisciplinaire des technologies durables qui rend leur standardisation difficile ;
- Incertitudes financières, difficulté d'obtenir des fonds ;
- Logistiques de conception et/ou de planification limitées et inefficaces ;
- Faible capacité de fabrication, traçabilité des matériaux difficile.

L'hypothèse avait été posée, suite à l'analyse de la revue systématique, que le manque de connaissances était l'une des principales barrières au niveau des acteurs. Le modèle probit a permis de valider cette hypothèse. Lorsqu'un nouveau matériau sort sur le marché, celui-ci peut alors être utilisé par une variété d'acteurs spécialisés dans le milieu, mais ne connaissant pas ce nouveau produit. Pour s'assurer que son intégration sur le marché soit aisée et efficace, il doit être appuyé par des spécialistes techniques qui pourront informer les acteurs sur l'utilisation, de même que les avantages liés au produit. Cet accompagnement technique n'a pas eu lieu lorsque la poudre de verre a initialement été mise en marché, expliquant peut-être le manque de connaissances exactes sur son utilisation.

La barrière financière est quant à elle ressortie dans la section C du questionnaire. Souvent perçue comme trop coûteuse pour être implémentée, certains répondants se disent ouverts à utiliser cette technologie seulement si le client rembourse la surcharge.

Dans le cas de la production de la poudre de verre, le modèle économique montre que la capacité de fabrication est suffisante pour répondre à la demande et est économiquement viable pour les conditionneurs de verre. Même si la demande augmentait, le scénario 2 permettrait de répondre à cette demande sans diminuer la production des autres débouchés tels les abrasifs pour la route.

D'autres barrières financières sont à considérer. Par exemple, pour simplifier l'approvisionnement, il faudrait que les cimentiers se procurent des silos pour stocker la poudre de verre. Ces silos ayant un coût élevé, il est assuré que cet aspect constitue une autre barrière financière à considérer. Cependant, un point non négligeable est que le modèle économique de l'avenir devra considérer le prix du carbone. La taxe carbone est un outil viable que le gouvernement pourra utiliser pour inciter les producteurs à diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre. Sachant comment la production de ciment est polluante, si une taxe carbone venait s'ajouter à son coût, il est possible que le ciment devienne alors plus dispendieux que la poudre de verre.

6.2.2 Barrières institutionnelles

Les barrières suivantes avaient été répertoriées sous cette catégorie dans la revue systématique:

- Limites du cadre réglementaire ;
- Passivité du gouvernement : absence ou manque de code, normes et/ou incitatifs ;
- Manque de leadership, manque de soutien juridique et institutionnel ;
- Intérêts acquis, méthodes d'approvisionnement traditionnelles ;
- Outils financiers existants insuffisants et peu attractifs ; taxes et frais élevés imposés.

Les barrières institutionnelles n'étant pas le centre de cette recherche, peu de constats peuvent être faits vis-à-vis ceux-ci. Toutefois, certaines réponses écrites donnent une piste de réflexion. Quelques répondants soulignent que cette technologie serait plus utilisée si elle était subventionnée ou supportée par certaines mesures gouvernementales. En lien avec la barrière précédente rencontrée par les cimentiers pour l'achat de silos, le gouvernement pourrait financer l'achat de ceux-ci via des subventions ce qui favoriserait un plus grand intérêt pour cette technologie.

Également, le modèle faisait ressortir que les acteurs provenant de compagnies spécialisées en béton étaient moins enclins à utiliser cette technologie. Ces acteurs sont possiblement membres de l'ABQ et pourraient être moins disposés à intégrer de nouvelles technologies dans leurs produits étant donné que leurs connaissances sont bien maîtrisées dans sa condition actuelle, sans compter que très peu d'informations sur les nouvelles technologies se retrouvent sur le site de l'ABQ. Il est primordial que l'industrie du béton appuie davantage l'innovation et devienne un leader dans ce changement. Une association regroupant autant de membres et de compagnies peut avoir un impact positif important s'ils prennent les devants dans ce changement.

6.2.3 Barrières psychosociales

Les barrières suivantes avaient été répertoriées sous cette catégorie dans la revue systématique:

- Inertie du secteur : priorités économiques ailleurs, absence du soutien des hauts dirigeants ;
- Complexité de la terminologie et des méthodes de conception et de construction ;
- Manque de demande pour ces technologies ;
- Absence de mécanismes d'évaluation des impacts environnementaux ;
- Faible acceptation sociale : manque de confiance quant aux avantages ;
- Manque de dialogue entre les acteurs ;
- Résistance aux changements.

La cinquième barrière énumérée ci-haut se reflète dans le résultat du coefficient pour le paramètre de l'importance accordée à l'environnement. En effet, selon le modèle, lorsqu'un acteur accorde une plus grande importance à l'environnement, il sera moins enclin à utiliser la poudre de verre comme ajout cimentaire. Un manque de confiance quant aux avantages environnementaux de la technologie pourrait expliquer ce résultat. Les différentes études discutées en revue de littérature démontrent pourtant comment l'utilisation de cette technologie permet de diminuer l'empreinte écologique du béton. Le manque de dialogue entre les acteurs, soit le 6^e obstacle énuméré ci-haut, peut expliquer en partie cet écart avec la réalité.

Pourtant, les études revues arrivent à évaluer l'impact de l'utilisation de la poudre de verre selon différents scénarios. Dans le cas spécifique de cette technologie, il n'y a pas de barrières à

l'évaluation des impacts environnementaux et les résultats sont disponibles aux acteurs de l'industrie. Il est toutefois fort possible qu'encore ici, le manque de dialogue explique pourquoi ces mécanismes d'évaluation sont méconnus.

Il était souligné par certains répondants qu'ils ne percevaient pas d'avantages à utiliser la poudre de verre comme ajout cimentaire par rapport à d'autres ajouts cimentaires déjà implantés sur le marché, notamment les cendres volantes. Pourtant, les cendres volantes sont un sous-produit des centrales de charbon, importées des États-Unis ou d'ailleurs au Canada. La poudre de verre est une alternative locale aux cendres volantes, diminuant davantage l'impact causé, entre autres, par le transport. Ce constat a également été fait par Chevalier [102]. Graduellement, les centrales de charbon ferment leurs portes pour faire place à des sources d'énergie plus vertes. L'offre de cet ajout cimentaire est donc amenée à diminuer, ce pourquoi il est important d'y trouver une alternative. Comme il s'agit d'une problématique future, il est fort possible que les priorités du secteur soient ailleurs, expliquant l'inertie actuelle. Toutefois, cette inertie nuit actuellement à une augmentation de la demande pour la technologie.

Les questions 10.3, 10.4 et 10.5 de la section B du questionnaire viennent supporter ce constat également. Le postulat suivant était posé : implémenter de nouvelles techniques durables est trop coûteux pour ce que ça rapporte. Les répondants inscrivaient s'ils étaient d'accord (5) ou non (1) avec le postulat, sur le court, moyen et long terme. Les graphiques suivants montrent les résultats :

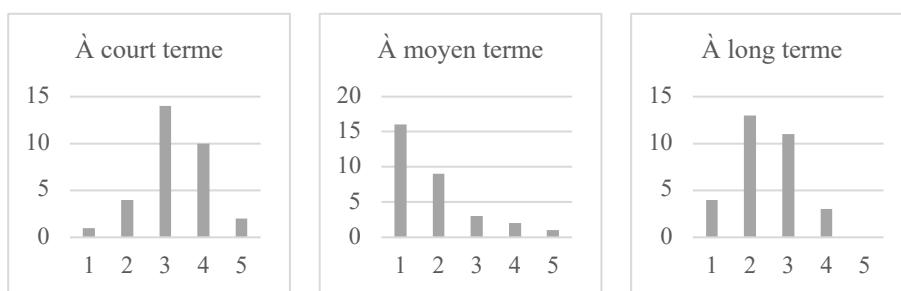


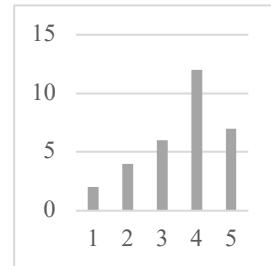
Figure 6-1 Vision à court, moyen et long terme

À court terme, les répondants étaient généralement d'accord avec le constat. Bien qu'à moyen terme il y ait un changement important dans la perception des répondants, celle-ci redevient plus centrée à long terme. Si la priorité des hauts dirigeants d'une entreprise ou industrie est

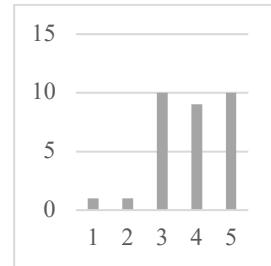
économique plutôt qu'environnementale et qu'ils ne perçoivent pas de bénéfices économiques à court terme, ils n'auront pas avantage à implanter un changement majeur.

Des recherches dans le contexte québécois notent souvent que le milieu est conservateur ; une résistance aux changements apparaît donc logique. Toutefois, quatre questions semblent démontrer l'inverse. La première, soit la question 7 de la section C, demandait aux répondants s'ils étaient intéressés à utiliser cette technologie si elle permet une réduction de l'empreinte écologique : 30 répondants sur 31 ont répondu oui. Bien que la question ne prenne pas en compte les coûts ou la logistique, elle permet tout de même de noter l'ouverture d'esprit des répondants. Les autres questions étaient dans la section D, laquelle portait sur l'impact de la crise sanitaire sur l'industrie de la construction. Les questions 7 à 9 semblent montrer une ouverture d'esprit chez les répondants à un changement dans le milieu de la construction, telles que présentées ci-dessous.

D7. La crise a apporté beaucoup de changement dans toutes les industries. Selon vous, est-ce un frein (1) ou une occasion (5) de faire les choses différemment ?



D8. Pensez-vous que c'est un bon moment (5) ou non (1) pour implémenter de nouvelles pratiques environnementales dans le secteur de la construction ?



D9. La crise a amené un stress économique dans beaucoup de secteurs et de compagnies. Selon vous, est-ce un bon moment pour développer des collaborations entre entreprises pour améliorer les pratiques en construction?

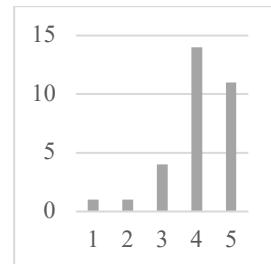


Figure 6-2 Réponses aux questions 7 à 9 de la section D

Si l'industrie n'est pas fermée à un changement, ce qui bloque le marché de cette technologie s'expliquerait plutôt par de mauvaises expériences, des idées erronées et le manque d'informations sur les avantages environnementaux. Ceci vient renforcer l'importance que des experts sur cette nouvelle technologie s'impliquent auprès d'acteurs du milieu pour accompagner son implémentation afin de s'assurer que les bonnes informations et techniques d'utilisation soient partagées avec les acteurs du milieu concernés.

6.3 Pistes de solutions

Cette section explore quelques-unes des pistes de solutions abordées dans la littérature qui pourraient permettre de répondre aux principaux problèmes rencontrés dans l'implémentation sur le marché québécois de la construction de technologies de construction durable.

Manque de connaissances

Kozminski fait ressortir des exemples de projets dans l'industrie de la construction au Danemark et en Norvège ayant incorporé des principes d'EC. Ce type d'étude regroupant plusieurs exemples doit être davantage partagé ici afin d'aider l'industrie québécoise à acquérir de nouvelles connaissances. Ces projets sont souvent supervisés et/ou financés par des programmes implantés au niveau national, régional ou public en Europe. Par exemple, les programmes Green Solution House, Seaweed house, Sunde Boliger, Upcycle house ont permis de faciliter la transition vers l'économie circulaire. Une meilleure connaissance de ceux-ci pourrait permettre aux gouvernements et aux municipalités d'implémenter des programmes qui aideraient l'industrie québécoise de la construction. Un incitatif monétaire n'est pas tout, comme le montrent les exemples ressortis par Kozminski : les programmes doivent accompagner les acteurs dans leurs démarches en leur donnant les outils techniques nécessaires [107].

La nature multidisciplinaire des technologies durables

Comme soulevé par Joensuu et al., une solution pour simplifier l'implémentation de technologies multidisciplinaires consiste en l'établissement d'une base de données, soutenue par les municipalités et autres regroupements publics. Celle-ci regrouperait les meilleures pratiques multidisciplinaires en construction ainsi que des ressources pour en soutenir le développement [108].

Limites du cadre réglementaire

La difficulté du cadre réglementaire est qu'il soit adapté à la réalité du marché dans son ensemble, en opposition à la réalité d'une technologie spécifique, tel qu'étudié par Friant et al., dans le contexte européen. La méthodologie suivie par les auteurs leur permet d'établir l'écart entre ce qui est suggéré par la communauté scientifique et ce qui est réellement implanté dans

les politiques. Leurs constats permettent d'établir des recommandations pour le futur. Une telle méthodologie pourrait être suivie dans le contexte québécois pour aider à ajuster les politiques et diminuer les limitations du cadre réglementaire [109].

Dans un ordre d'idées un peu similaire, Latendresse suggère des ajustements aux certifications dans le contexte québécois, basé sur des constats sur la construction résidentielle multilogements [39].

Passivité du gouvernement : absence ou manque de code, de normes et d'incitatifs

Des protocoles précis doivent être établis par les gouvernements pour les différents secteurs de la construction. Par exemple, le protocole *EU Construction & Demolition Waste Management* permet non seulement d'établir un guide des meilleures pratiques, mais donne aussi des exemples de politiques sur lesquelles les institutions publiques peuvent s'appuyer [110].

Ce type de protocoles peut regrouper des exemples d'incitatifs financiers ayant fonctionné pour d'autres types de technologies en construction. Par exemple, Latendresse discute comment l'arrondissement de Rosemont-La Petite-Patrie à Montréal a réussi, grâce à des incitatifs financiers, à donner une valeur environnementale à certains projets qui n'étaient pas rentables auparavant [39]. Également, Recyc-Québec souligne comment le plan d'action *Greenest City 2020 Action Plan* de la ville de Vancouver a permis d'établir de nombreux incitatifs pour aider le recyclage des matières issues de la déconstruction, comme le gypse [111].

Inertie du secteur

Selon De Luca et al., l'inertie du secteur est causée entre autres par un manque de sensibilisation au niveau des hauts dirigeants et des gouvernements. Si ces acteurs avaient davantage conscience des bénéfices économiques et environnementaux de la technologie étudiée, soit l'utilisation d'agrégats recyclés dans leur cas, un virage vert aurait lieu plus rapidement [112].

Complexité de la terminologie

Rohracher discute comment l'uniformisation du code de la construction entre les provinces autrichiennes a permis de diminuer cette barrière de la terminologie [62]. Cette stratégie a donné

la possibilité à tous les acteurs, quel que soit leur domaine « d'origine », de prendre part à la discussion et à aider le changement.

Absence de mécanismes d'évaluation des impacts environnementaux

De plus en plus de recherches tentent d'établir des mécanismes d'évaluation des impacts environnementaux des techniques de construction verte. Par exemple, Fellner et Lederer suggèrent différentes mesures pour évaluer l'économie circulaire. En plus de noter l'importance du taux de recyclage, ils construisent une méthodologie pour évaluer un facteur de substitution. Celui-ci décrit la quantité de ressources primaires qui ont été substituées grâce à des principes d'économie circulaire [113].

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'étude examine les obstacles auxquels les nouvelles technologies durables en construction font face, en portant une attention particulière à la poudre de verre comme ajout cimentaire dans le contexte québécois. La conclusion reviendra sur les contributions de l'étude, ses limites et contraintes, ainsi que les perspectives pour de futures recherches.

7.1 Contributions

La recherche établit un protocole afin d'extraire de la littérature les obstacles aux technologies durables dans différents contextes. Cette méthodologie a permis de supporter les hypothèses posées pour le modèle probit. Ce modèle, établi à partir des résultats d'un questionnaire distribué à des acteurs du domaine de la construction au Québec, a permis de valider un obstacle majeur au niveau des acteurs, soit les **connaissances générales en lien avec le DD et l'EC**. Cet obstacle était ressorti comme très important dans la revue systématique. Comme celle-ci ne comprenait aucun article dans le contexte Nord-Américain, cette recherche a permis de valider que cet obstacle s'appliquait aussi dans le cas de l'implémentation de la poudre de verre comme ajout cimentaire dans un contexte québécois.

De plus, le modèle a permis de faire ressortir un obstacle particulier au cas de la poudre de verre dans le contexte québécois. En effet, la corrélation de la **variable d'importance environnementale** vis-à-vis la demande semble indiquer une mauvaise perception de la technologie ; les acteurs québécois seraient moins enclins à utiliser cette technologie lorsqu'ils accordent une grande importance à l'environnement. Ce résultat est surprenant pris hors contexte. Toutefois, en prenant en compte les divers problèmes rencontrés lors des projets pilotes, le résultat s'explique par un manque d'expérience subséquentes positives avec la poudre de verre. Ce résultat vient souligner l'importance **d'accompagner une nouvelle technologie** lorsqu'elle est mise en marché au niveau technique afin de s'assurer de sa bonne utilisation et de sa bonne compréhension. Ce suivi permettrait d'éviter que les acteurs du milieu aient de mauvaises expériences et restent avec une mauvaise impression de cette technologie.

La dernière partie du mémoire vient supporter la viabilité économique de la production de poudre de verre. Ce produit reste toutefois plus dispendieux pour ses utilisateurs qu'un béton standard ou

utilisant des cendres volantes. Un soutien du gouvernement pourrait aider à diminuer la différence de coûts.

Finalement, les réponses au questionnaire semblent montrer une **ouverture du marché** pour ces nouvelles technologies, contrairement à l'un des obstacles ressortis de la revue systématique. Cette observation est très importante, surtout dans le contexte actuel où plusieurs changements sont amenés à s'implanter pour répondre à la crise sanitaire et à la crise environnementale. Le secteur de la construction est souvent perçu comme conservateur, mais ce résultat, soutenu par l'analyse du modèle probit, vient plutôt supporter que le secteur est ouvert aux changements, si ceux-ci sont implémentés adéquatement.

7.2 Limites de la recherche

L'analyse des résultats basés sur les réponses au questionnaire est limitée par un faible taux de réponse. Ceci diminue la validité statistique des modèles. Également, le biais de sélection discuté en fin de section 4.4 peut expliquer le peu de différences qui ont pu être observées entre les différents groupes de répondant.

La recherche est axée sur les acteurs du milieu, alors qu'en réalité, l'implémentation de technologies durables dans un domaine est influencée par beaucoup plus de variables que ces acteurs seuls. Un aspect majeur qui n'est pas considéré est l'impact qu'un gouvernement, ses sociétés d'État et l'approvisionnement public peuvent avoir sur le marché. Le gouvernement influencera la demande et l'offre via les normes et incitatifs qu'il met en place ; l'approvisionnement public, en utilisant une certaine technologie dans ses projets, peut augmenter la demande de manière significative, l'aident à s'implanter sur le marché ; le support des sociétés d'État peut aider le développement de la technologie. Par exemple, sans le support de la SAQ, la chaire de recherche SAQ de l'Université de Sherbrooke n'aurait peut-être pas développé aussi rapidement la technologie, comme d'autres pays qui commencent à peine à l'implémenter dans des projets pilotes.

Finalement, la recherche cible l'utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire, mais les nouvelles technologies dans le domaine de la construction sont nombreuses. Plusieurs de ces technologies commencent à être implantées sur le marché ou feront leur entrée bientôt. Les caractéristiques particulières de chaque nouvelle technologie peuvent influencer si elles

s'implantent ou non. La recherche permet d'avoir un aperçu de la réaction du marché pour la poudre de verre, dont certains éléments peuvent s'appliquer à d'autres technologies. Toutefois, chaque nouvelle technologie peut présenter des obstacles différents qui lui sont propres.

7.3 Recommandations

La poudre de verre comme ajout cimentaire est le premier nouvel ajout à la norme CSA en plus de 30 ans. Son implémentation sur le marché et dans la norme n'a pas été sans embûches. Toutefois, de nombreux autres nouveaux matériaux durables risquent de faire leur entrée sur le marché, et conséquemment dans la norme, dans les années à venir. Des années de développement sont derrière ces technologies : une implémentation fluide au marché devrait être primordiale. La question qui se pose est la suivante :

Que peut-on apprendre de l'implémentation de la poudre de verre sur le marché de la construction sur les blocages rencontrés pour les ajouts et matériaux du futur ?

Une des pistes pour répondre à cette question est en lien avec l'acceptation de nouveaux matériaux dans les normes. La crise environnementale doit être une priorité et une acceptation plus rapide dans les normes de technologies durables peut avoir un impact bénéfique direct pour lutter contre les changements climatiques. La rapidité de réaction, de développement de même que l'acceptabilité des vaccins pour s'attaquer à la crise sanitaire actuelle a démontré qu'il est possible d'accélérer les processus tout en s'assurant de protéger le public ; serait-ce possible d'apprendre de ceci pour implémenter des processus plus rapides dans d'autres domaines ?

RÉFÉRENCES

- [1] A. Omran et A. Tagnit-Hamou, « Performance of glass-powder concrete in field applications », *Constr. Build. Mater.*, vol. 109, p. 84-95, avr. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006.
- [2] M.-M. Poirier, « Valorisation des granulats de béton recyclé », déc. 18, 2019.
- [3] Ellen MacArthur Foundation, « TOWARDS A CIRCULAR ECONOMY: BUSINESS RATIONALE FOR AN ACCELERATED TRANSITION », 2015. Consulté le: mai 21, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf.
- [4] CPQ, CPEQ, et EEQ, « Économie circulaire au Québec : opportunités et impacts économiques », p. 76, mars 2018.
- [5] G. L. F. Benachio, « Circular economy in the construction industry: A systematic literature review », p. 45.
- [6] Ellen MacArthur Foundation, « What is the circular economy? » <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/what-is-the-circular-economy> (consulté le mars 17, 2020).
- [7] EDDEC, « Économie circulaire », Institut EDDEC. <http://instituteddec.org/themes/economie-circulaire/> (consulté le mars 17, 2020).
- [8] LWARB, « London's circular economy route map », 2015. https://www.lwarb.gov.uk/wp-content/uploads/2015/04/LWARB-London%20%99s-CE-route-map_16.6.17a_singlepages_sml.pdf (consulté le mars 17, 2020).
- [9] K. T. Adams, M. Osmani, T. Thorpe, et J. Thornback, « Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers », *Proc. Inst. Civ. Eng. - Waste Resour. Manag.*, vol. 170, n° 1, p. 15-24, févr. 2017, doi: 10.1680/jwam.16.00011.
- [10] Trading Economics, « Canada GDP From Construction | 1997-2019 Data | 2020-2022 Forecast | Historical ». <https://tradingeconomics.com/canada/gdp-from-construction> (consulté le mars 17, 2020).

- [11] S. C. Government of Canada, « Labour force characteristics by industry, annual », déc. 27, 2017. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=1410002301> (consulté le mars 17, 2020).
- [12] Ministère de l'Économie et de l'Innovation, « Construction - Présentation de l'industrie de la construction », *Ministère de l'Économie et de l'Innovation*, 2019. https://www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/informer/par-secteur-dactivite/construction/page/le-secteur-12822/?no_cache=1&tx_igaffichagepages_pi1%5Bmode%5D=single&tx_igaffichagepages_pi1%5BbackPid%5D=151&tx_igaffichagepages_pi1%5BcurrentCat%5D= (consulté le mars 17, 2020).
- [13] CCQ, « Indicateurs de l'activité de l'industrie assujettie, 2009-2018 », avr. 2019. <https://www.ccq.org/-/media/Project/Ccq/Ccq-Website/PDF/Recherche/StatistiquesHistoriques/2018/A1.pdf> (consulté le mars 17, 2020).
- [14] Canada Green Building Council et Delphi Group, « Assessing the Market Impacts & Opportunities », p. 17, 2015.
- [15] Deloitte, « GPoC2018 : Global Powers of Construction ». 2018, [En ligne]. Disponible sur: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/energy-resources/us-global-powers-of-construction.pdf>.
- [16] UK GBC, « Resource use : UKGBC's vision for a sustainable built environment is one that eliminates waste and maximises resource efficiency », *UKGBC - UK Green Building Council*. <https://www.ukgbc.org/resource-use/> (consulté le mars 17, 2020).
- [17] D. Michaud, « Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec », p. 39, 2015.
- [18] M. Margni, « Sem. 4 – Performances environnementales de l'ensemble de la chaîne de valeurs de l'entreprise « ACV Organisationnelle » ». CIRAIQ.
- [19] Gouvernement du Canada, « Annexe 6 : Coefficients d'émission ». http://data.ec.gc.ca/data/substances/monitor/canada-s-official-greenhouse-gas-inventory/Coefficients_d_emission.pdf (consulté le mars 17, 2020).
- [20] J. Watts, « Concrete: the most destructive material on Earth », *The Guardian*, févr. 25, 2019.

- [21] E. et C. climatique Canada, « Émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale », *aem*, mars 16, 2012. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre-echelle-mondiale.html> (consulté le mai 21, 2020).
- [22] T. B. of C. Secretariat et T. B. of C. Secretariat, « Canada's Official Greenhouse Gas Inventory - Open Government Portal ». <https://open.canada.ca/data/en/dataset/779c7bcf-4982-47eb-af1b-a33618a05e5b#wb-auto-6> (consulté le mars 17, 2020).
- [23] Global Alliance for Buildings and Construction et International Energy Agency, « UN Environment : Global Status Report 2017 », p. 48, 2017.
- [24] UNECE, « New guidelines on energy efficiency standards pave the way for more sustainable buildings ». <https://www.unece.org/info/media/presscurrent-press-h/sustainable-energy/2017/new-guidelines-on-energy-efficiency-standards-pave-the-way-for-more-sustainable-buildings/doc.html> (consulté le mars 17, 2020).
- [25] N. R. C. Government of Canada, « Energy Efficiency Trends Analysis Tables », 2016. <http://oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/menus/trends/analysis/tables.cfm> (consulté le mars 17, 2020).
- [26] Gouvernement du Canada, *Pan-Canadian Framework On Clean Growth and Climate Change*. 2016.
- [27] Cecobois, « Cecobois | Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois », *Cecobois | Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois*. <https://www.cecobois.com/> (consulté le avr. 06, 2020).
- [28] « 725 Ponce: Aesthetic Efficiency on the Atlanta Beltline », *Uzun+Case*, oct. 21, 2020. <https://uzuncase.com/stories/725-ponce-aesthetic-efficiency-on-the-atlanta-beltline/> (consulté le mars 27, 2021).
- [29] CarbonCure, « CarbonCure Technologies », *CarbonCure Technologies*. <https://www.carboncure.com> (consulté le avr. 06, 2020).
- [30] BluePlanet, « Blue Planet | Economically Sustainable Carbon Capture ». <http://www.blueplanet-ltd.com/> (consulté le avr. 06, 2020).

- [31] Lafarge, « Ciment », *Lafarge Canada*, sept. 07, 2017. <https://www.lafarge.ca/fr/ciment> (consulté le avr. 06, 2020).
- [32] « Cendre volante », *Voir vert - Le portail du bâtiment durable au Québec*. <https://www.voirvert.ca/communaute/wiki/cendre-volante> (consulté le mars 04, 2021).
- [33] <https://www.tricentris.com>, « Tricentris | VERROX », *Tricentris*. <https://www.tricentris.com/verre-recycle/verrox/> (consulté le avr. 06, 2020).
- [34] « Les Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée », *PJCCI*. <http://jacquescartierchamplain.ca/> (consulté le avr. 08, 2020).
- [35] Nations Unies et Commission économique pour l'Europe, *Meilleures pratiques pour promouvoir l'efficacité énergétique: cadre structuré des meilleures pratiques dans les politiques visant à promouvoir l'efficacité énergétique pour atténuer les changements climatiques et favoriser le développement durable*. 2017.
- [36] Arup, « The Circular Economy in the Built Environment ». 2016, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/circular-economy-in-the-built-environment>.
- [37] Canada Green Building Council, « LEED v4 », 2019. <https://www.cagbc.org/leedv4> (consulté le mars 18, 2020).
- [38] For Construction Pros, « 5 Techniques for Sustainable Building Construction », *For Construction Pros*, 2015. <https://www.forconstructionpros.com/business/article/12068798/five-techniques-for-sustainable-building-construction> (consulté le mars 18, 2020).
- [39] S. Latendresse, « L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DANS LE DOMAINE DE LA CONSTRUCTION RÉSIDENTIELLE MULTILOGEMENTS AU QUÉBEC: ANALYSE DU SECTEUR ET PROPOSITION D'UN GUIDE DES PRATIQUES INNOVANTES ». Université de Sherbrooke, mai 2019, [En ligne]. Disponible sur: https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/15589/Latendresse_Sophie_MEnv_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [40] World Green Building Council, « GBC Brasil launches net zero building certification through WorldGBC project », *World Green Building Council*, août 2017. <https://www.worldgbc.org/> (consulté le mars 18, 2020).

- [41] S. Vierra, « Green Building Standards and Certification Systems | WBDG - Whole Building Design Guide », *WBDG a program of the National Institute of Building Science*, mai 2019. <https://www.wbdg.org/resources/green-building-standards-and-certification-systems> (consulté le mars 18, 2020).
- [42] Canada Green Building Council, « Zero Carbon Building Standard », mai 2017. https://www.cagbc.org/cagbcdocs/zerocarbon/CaGBC_Zero_Carbon_Building_Standard_EN.pdf (consulté le mars 18, 2020).
- [43] BREEAM, « BREEAM: the world's leading sustainability assessment method for masterplanning projects, infrastructure and buildings », *BREEAM*, 2020. <https://www.breeam.com/> (consulté le mars 18, 2020).
- [44] S. Beliakov et A. Kapustkina, « Methodical approach to the justification of project design decisions on the application of “green” building technologies », *E3S Web Conf.*, vol. 97, p. 01034-, mai 2019, doi: 10.1051/e3sconf/20199701034.
- [45] Institute for Sustainable Infrastructure, « About ENVISION ». <https://sustainableinfrastructure.org/envision/overview-of-envision/> (consulté le mars 18, 2020).
- [46] Éco Entreprise Québec, « Bilan du plan Verre l’innovation: la solution pour le recyclage de 100% du verre de la collecte sélective au Québec », févr. 2019. [En ligne]. Disponible sur: eq.ca.
- [47] RECYC-QUÉBEC, « Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec », p. 39, 2015.
- [48] RECYC-QUÉBEC, « Mémoire déposé dans le cadre du mandat d’initiative sur les enjeux de recyclage et de valorisation -locale du verre », p. 20, 2019.
- [49] « Une consigne automatisée à deux pas de la SAQ », *La Presse*, févr. 15, 2021. <https://www.lapresse.ca/actualites/environnement/2021-02-15/une-consigne-automatisee-a-deux-pas-de-la-saq.php> (consulté le févr. 20, 2021).
- [50] « Consigne et recyclage: la SAQ s’engage | SAQ.COM », *SAQ*. <https://www.saq.com/fr/consigne-recyclage-la-saq-s-engage> (consulté le févr. 20, 2021).
- [51] Université de Sherbrooke, « Chaire SAQ de valorisation du verre dans les matériaux -

Université de Sherbrooke ». <https://www.usherbrooke.ca/chaire-vvm/francais/> (consulté le mars 18, 2020).

[52] V. Letelier, B. I. Henríquez-Jara, M. Manosalva, C. Parodi, et J. M. Ortega, « Use of Waste Glass as A Replacement for Raw Materials in Mortars with a Lower Environmental Impact », p. 18, 2019.

[53] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, et D. Rodriguez, « Studies on concrete containing ground waste glass », *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, n° 1, p. 91-100, janv. 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00213-6.

[54] A. Shayan et A. Xu, « Value-added utilisation of waste glass in concrete », *Cem. Concr. Res.*, p. 9, 2004.

[55] O. Joshua, K. O. Olusola, D. O. Nduka, A. A. Busari, A. M. Ajao, et B. F. Ogunbayo, « LOCAL INNOVATIVE MATERIAL: PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT WITH PULVERIZED WASTE GLASS IN SUSTAINABLE CONCRETE », p. 8.

[56] Y. Jiang, T.-C. Ling, K. H. Mo, et C. Shi, « A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products », *J. Environ. Manage.*, p. 10, 2019.

[57] Y. Dénommé, « Opérations de bétonnage : Caractéristiques fondamentales du béton », [En ligne]. Disponible sur: www.betonabq.org.

[58] M. Krstic et J. F. Davalos, « Field Application of Recycled Glass Pozzolan for Concrete », *ACI Mater. J.*, p. 10, 2019.

[59] M. Jiang *et al.*, « Comparative Life Cycle Assessment of Conventional, Glass Powder, and Alkali-Activated Slag Concrete and Mortar », *J. Infrastruct Syst.*, p. 9.

[60] J. Deschamps, « ÉVALUATION CRITIQUE DU PRINCIPE D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE EN BOUCLE OUVERTE VIA DEUX EXEMPLES DE VALORISATION DU VERRE MIXTE. », p. 97, juill. 2018.

[61] E. L. Tucker, C. C. Ferraro, S. J. Laux, et T. G. Townsend, « Economic and life cycle assessment of recycling municipal glass as a pozzolan in portland cement concrete production », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 129, p. 240-247, févr. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.025.

- [62] H. Rohracher, « Managing the Technological Transition to Sustainable Construction of Buildings: A Socio-Technical Perspective », p. 15.
- [63] R. B. BRINER et D. DENYER, « Systematic Review and Evidence Synthesis as a Practice and Scholarship Tool », *The Oxford Handbook of Evidence-Based Management*, 2012.
- [64] N. J. van Eck et L. Waltman, « Visualizing Bibliometric Networks », in *Measuring Scholarly Impact*, Y. Ding, R. Rousseau, et D. Wolfram, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2014, p. 285-320.
- [65] L. Chamberlin, E. Jasmin, et A. Raskit, « Wales and the Circular Economy: Favourable System Conditions and Economic Opportunities », *WRAP*, Banbury, UK, 2013.
- [66] S. D’Oca *et al.*, « Technical, Financial, and Social Barriers and Challenges in Deep Building Renovation: Integration of Lessons Learned from the H2020 Cluster Projects », *Buildings*, vol. 8, n° 12, p. 174, déc. 2018, doi: 10.3390/buildings8120174.
- [67] A. C. Hurlimann, G. R. Browne, G. Warren-Myers, et V. Francis, « Barriers to climate change adaptation in the Australian construction industry – Impetus for regulatory reform », *Build. Environ.*, vol. 137, p. 235-245, juin 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.04.015.
- [68] I. Martek, M. R. Hosseini, A. Shrestha, D. J. Edwards, et S. Durdyev, « Barriers inhibiting the transition to sustainability within the Australian construction industry: An investigation of technical and social interactions », *J. Clean. Prod.*, vol. 211, p. 281-292, févr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.166.
- [69] S. Durdyev, E. Zavadskas, D. Thurnell, A. Banaitis, et A. Ihtiyar, « Sustainable Construction Industry in Cambodia: Awareness, Drivers and Barriers », *Sustainability*, vol. 10, n° 2, p. 392, févr. 2018, doi: 10.3390/su10020392.
- [70] X. Gan, R. Chang, et T. Wen, « Overcoming barriers to off-site construction through engaging stakeholders: A two-mode social network analysis », *J. Clean. Prod.*, vol. 201, p. 735-747, nov. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.299.
- [71] F. Franzini, R. Toivonen, et A. Toppinen, « Why Not Wood? Benefits and Barriers of Wood as a Multistory Construction Material: Perceptions of Municipal Civil Servants from Finland », *Buildings*, vol. 8, n° 11, p. 159, nov. 2018, doi: 10.3390/buildings8110159.

- [72] K. Agyekum, E. Adinyira, B. Baiden, G. Ampratwum, et D. Duah, « Barriers to the adoption of green certification of buildings: A thematic analysis of verbatim comments from built environment professionals », *J. Eng. Des. Technol.*, vol. 17, n° 5, p. 1035-1055, août 2019, doi: 10.1108/JEDT-01-2019-0028.
- [73] D. W. M. Chan, T. O. Olawumi, et A. M. L. Ho, « Perceived benefits of and barriers to Building Information Modelling (BIM) implementation in construction: The case of Hong Kong », *J. Build. Eng.*, vol. 25, p. 100764, sept. 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100764.
- [74] K. Hussain, Z. He, N. Ahmad, M. Iqbal, et S. M. Taskheer mumtaz, « Green, lean, Six Sigma barriers at a glance: A case from the construction sector of Pakistan », *Build. Environ.*, vol. 161, p. 106225, août 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106225.
- [75] S. Azeem, M. A. Naeem, A. Waheed, et M. J. Thaheem, « Examining barriers and measures to promote the adoption of green building practices in Pakistan », *Smart Sustain. Built Environ.*, vol. 6, n° 3, p. 86-100, sept. 2017, doi: 10.1108/SASBE-06-2017-0023.
- [76] W. Shen, W. Tang, A. Siripanan, Z. Lei, C. Duffield, et F. Hui, « Understanding the Green Technical Capabilities and Barriers to Green Buildings in Developing Countries: A Case Study of Thailand », *Sustainability*, vol. 10, n° 10, p. 3585, oct. 2018, doi: 10.3390/su10103585.
- [77] D. Densley Tingley, S. Cooper, et J. Cullen, « Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse, a UK perspective », *J. Clean. Prod.*, vol. 148, p. 642-652, avr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.006.
- [78] B. Munyasya et N. Chileshe, « Towards Sustainable Infrastructure Development: Drivers, Barriers, Strategies, and Coping Mechanisms », *Sustainability*, vol. 10, n° 12, p. 4341, nov. 2018, doi: 10.3390/su10124341.
- [79] M. A. Adabre, A. P. C. Chan, A. Darko, R. Osei-Kyei, R. Abidoye, et T. Adjei-Kumi, « Critical barriers to sustainability attainment in affordable housing: International construction professionals' perspective », *J. Clean. Prod.*, vol. 253, p. 119995, avr. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.119995.
- [80] A. Abuzeinab, M. Arif, et M. A. Qadri, « Barriers to MNEs green business models in the UK construction sector: An ISM analysis », *J. Clean. Prod.*, vol. 160, p. 27-37, sept. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.003.

- [81] « Le monde du travail au Québec en chiffres - Secteur du travail ». <https://www.travail.gouv.qc.ca/publications/publications-statistiques-mensuelles-et-trimestrielles/le-monde-du-travail-au-quebec-en-chiffres/> (consulté le févr. 20, 2021).
- [82] CCQ, « Nombre d'employeurs par secteur selon la région de la place d'affaires, 2018 », avr. 2019. <https://www.ccq.org/-/media/Project/Ccq/Ccq-Website/PDF/Recherche/StatistiquesHistoriques/2018/B5.pdf> (consulté le févr. 20, 2021).
- [83] S. C. Gouvernement du Canada et S. C. Gouvernement du Canada, « Les statistiques : le pouvoir des données! Échantillonnage probabiliste », mars 01, 2011. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/edu/power-pouvoir/ch13/prob/5214899-fra.htm> (consulté le févr. 20, 2021).
- [84] « industrie des produits de la construction ». <https://www.metiers-quebec.org/portraits/batiment2.html> (consulté le févr. 20, 2021).
- [85] S. S. Mangiafico, « How Should We Analyze Likert Item Data? », *J. NACAA*, vol. 12, n° 2, déc. 2019, Consulté le: févr. 20, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nacaa.com/journal/index.php?jid=1001>.
- [86] « Unpaired Two-Samples Wilcoxon Test in R - Easy Guides - Wiki - STHDA ». <http://www.sthda.com/english/wiki/unpaired-two-samples-wilcoxon-test-in-r> (consulté le févr. 20, 2021).
- [87] M. Brems, « A One-Stop Shop for Principal Component Analysis », *Medium*, juin 10, 2019. <https://towardsdatascience.com/a-one-stop-shop-for-principal-component-analysis-5582fb7e0a9c> (consulté le févr. 20, 2021).
- [88] « SPSS à l'UdeS - Analyse en composantes principales ». <http://spss.espaceweb.usherbrooke.ca/pages/interdependance/analyse-en-composantes-principales.php> (consulté le févr. 20, 2021).
- [89] « prcomp function | R Documentation ». <https://www.rdocumentation.org/packages/stats/versions/3.6.2/topics/prcomp> (consulté le févr. 20, 2021).
- [90] « Assumptions of Logistic Regression », *Statistics Solutions*. <https://www.statisticssolutions.com/assumptions-of-logistic-regression/> (consulté le févr. 23,

2021).

- [91] C. H. Schmelzer Martin Arnold, Alexander Gerber, and Martin, *11.2 Probit and Logit Regression | Introduction to Econometrics with R* .
- [92] K. Strimmer, « crossval function | R Documentation », *RDocumentation*. <https://www.rdocumentation.org/packages/crossval/versions/1.0.3/topics/crossval> (consulté le févr. 28, 2021).
- [93] K. Bluteau, « pred function | R Documentation », *Rdocumentation*. <https://www.rdocumentation.org/packages/MSGARCH/versions/0.17.7/topics/pred> (consulté le févr. 28, 2021).
- [94] G. Stephanie, « Phi Coefficient (Mean Square Contingency Coefficient) », *Statistics How To*, juin 20, 2016. <https://www.statisticshowto.com/phi-coefficient-mean-square-contingency-coefficient/> (consulté le févr. 28, 2021).
- [95] H. Akoglu, « User's guide to correlation coefficients », *Turk. J. Emerg. Med.*, vol. 18, n° 3, p. 91-93, sept. 2018, doi: 10.1016/j.tjem.2018.08.001.
- [96] J. Scott Jones, *Learn to Use the Phi Coefficient Measure and Test in R With Data From the Welsh Health Survey (Teaching Dataset)* (2009). 1 Oliver's Yard, 55 City Road, London EC1Y 1SP United Kingdom: SAGE Publications, Ltd., 2019.
- [97] J. Fern et o, « R-Squared », *Investopedia*. <https://www.investopedia.com/terms/r/r-squared.asp> (consulté le févr. 28, 2021).
- [98] S. C. Government of Canada, « Le Quotidien — Indice des prix à la consommation : revue annuelle, 2019 », janv. 22, 2020. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/200122/dq200122c-fra.htm> (consulté le mars 19, 2021).
- [99] « Prix de l'électricité », *Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles*. <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques-energetiques/prix-electricite/> (consulté le mars 01, 2021).
- [100] « Carburant aviation - Prix Mensuel (Dollar canadien por Gallon) - Prix des Matières Premières ». <https://www.indexmundi.com/fr/matieres-premieres/?marchandise=carburant-aviation&mois=60&monnaie=cad> (consulté le mars 20, 2021).

- [101] S. C. Gouvernement du Canada, « Salaire des employés selon la profession, données annuelles, inactif », janv. 26, 2016. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=1410030701> (consulté le mars 19, 2021).
- [102] N. Chevalier, « Chevalier_Nicholas_MEnv_2018.pdf », 2018. https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/12625/Chevalier_Nicholas_MEnv_2018.pdf?sequence=1 (consulté le sept. 09, 2018).
- [103] « Constituants et fabrication », *Association Béton Québec*. <https://betonabq.org/le-beton/constituants-et-fabrication/> (consulté le mars 04, 2021).
- [104] K. R. Gabriel, « The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis », *Biometrika*, vol. 58, n° 3, p. 453-467, 1971, doi: 10.1093/biomet/58.3.453.
- [105] « Building construction costs Quebec by type 2019 », *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/972916/-building-costs-quebec-canada-by-type/> (consulté le mars 01, 2021).
- [106] G. Pratte, « Discution sur l'usine de micronisation Tricentris », févr. 2021.
- [107] U. Kozminski, « Circular Economy in Nordic Architecture. Thoughts on the process, practices, and case studies. », p. 9, 2020.
- [108] T. Joensuu, « Circular Economy practices in the Built Environment », p. 51.
- [109] M. C. Friant et R. Salomone, « Analysing European Union circular economy policies: words versus actions », p. 48.
- [110] J. Vermeulen, « EU Construction & Demolition Waste Management Protocol », p. 52.
- [111] Recyc-Québec, « Résidus de construction, de rénovation et de démolition (CRD) », p. 12, 2018.
- [112] A. D. Luca, « Sustainable utilization of recycled aggregates », p. 17.
- [113] J. Fellner et J. Lederer, « Recycling rate – The only practical metric for a circular economy? », p. 2.

ANNEXE A OBSTACLES PRÉCIS DE LA RS

Tableau A-1 Barrières spécifiques ressortant de la RS

	Obstacles
Barrières technique et financières	Manque de connaissances et d'expertise professionnelle et terrain
	Manque de formations et d'éducation
	Manque d'information sur les bâtiments verts existants, manque d'études de cas
	Marché fragmenté, causé par un marché diverse
	Incertitudes financières : Coûts initiaux plus élevés associés avec les options de construction durable, réticence ou difficulté à emprunter des fonds notamment dû aux longs délais de remboursement des investissements
	Ressources techniques en silos, causé par la nature multidisciplinaire des techniques durables, rendant les processus long et compliqués
	Absence de solutions cohérentes et standardisées selon les normes et certifications
	Logistiques de conception et/ou de planification limitées et inefficaces
	Faible capacité de fabrication, manque de disponibilité de matériaux et de produits écologiques et durables
	Développement stagnant de l'industrie du bois
	Limite des matériaux en bois d'ingénierie (EWP)
	Sécurité et risques sismiques liés à la rénovation profonde
	Matières premières de mauvaise qualité, traçabilité difficile
	Manque de technologies vertes
	Structure organisationnelle ne supportant pas BIM
Barrières institutionnelles	Limites du cadre réglementaire; restrictions de zonage des terrains pour projets de logements abordables
	Passivité du gouvernement : faibles exigences de réglementation, politiques inadéquates, ne couvre pas les achats durables
	Passivité du gouvernement : Manque de vision
	Passivité du gouvernement : Manque d'audit
	Manque de Leadership, manque de soutien juridique et institutionnel
	Intérêts acquis, méthodes d'approvisionnement traditionnelles
	Juridictions variées
	Absence ou manque d'incitatifs gouvernementales
	Absences de codes et de normes, de standards industriels
	Outils financiers existants insuffisants et peu attractifs. Taxes et frais élevés imposés
	Processus décisionnels longs et complexes, retards dans le processus d'approbation du gouvernement
	Environnement politique instable
Barrières PsychoSocial	Priorités économiques ailleurs
	Complexité de la terminologie
	Complexité de la conception nécessaire pour soutenir les pratiques écologiques; les défis posés par les équipements innovants dans les méthodes de conception et de construction
	Manque de demande dans l'industrie et par les utilisateurs, marché limité
	Manque de sensibilisation aux changements climatiques, absence de préoccupation environnementale
	Difficulté à mesurer les impacts de BIM; absence de mécanisme d'évaluation des impacts environnementaux; Une mesure non durable est autorisée par le régulateur ou l'entreprise statutaire (1) ; absence d'avantages définis
	Marketing vert inefficace, faible sensibilisation à l'efficacité énergétique des rénovation; Perception d'une

Tableau A-1 Barrières spécifiques ressortant de la RS (suite et fin)

inaccessibilité aux initiatives relatives aux changements climatiques ; Sensibilisation insuffisante aux avantages de la certification écologique des bâtiments (3) ;
Comportement des utilisateurs : Le manque de consensus, de compréhension et de soutien de la part des habitants qui entrave souvent l'approbation effective des interventions ; mauvaise culture de l'entretien/rénovation inadéquate des installations de logement
Modèle économique inapproprié
Manque d'acceptation social
Manque de confiance des utilisateurs finaux et des propriétaires dans l'efficacité des économies d'énergie réalisées lors des rénovations et du retour économique ; le manque de confiance des investisseurs potentiels ; Manque de confiance en matière de sécurité
Mauvaise performance esthétique; Impact sur le design
Manque de connaissances des utilisateurs finaux, des décideurs politiques et de l'industrie
Manque de coopération et de réseautage, manque de dialogue entre les acteurs
Résistance aux changements : Tendance à maintenir les pratiques actuelles, dominance du processus de projet conventionnel; caractère conservateur du marché
Le problème de la perturbation pendant les travaux et/ou le déménagement (au cas où les propriétaires/utilisateurs doivent quitter leur domicile pendant le processus)
Lobbying par l'industrie du béton
Contraintes des compagnies : Absence du soutien des hauts dirigeants ; une structure organisationnelle faible pour soutenir les pratiques de construction écologique;
Contraintes du secteur : Inertie du secteur de la construction

ANNEXE B QUESTIONNAIRE

Identification des obstacles sociaux-économiques aux technologies durables dans le domaine de la construction au Québec

Nous vous invitons à participer, de manière volontaire, à une activité de recherche qui vise à déterminer les obstacles à l'économie circulaire dans le milieu de la construction. L'utilisation de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire étant une technologie circulaire relativement jeune dans le domaine, elle sera prise en exemple dans cet exercice.

Répondants visés

Travailler dans un industrie reliée directement ou indirectement au domaine de la construction au Québec et appartenir à l'un des corps de métier suivants :

- Ingénieurs ou techniciens pratiquants dans les domaines suivants : civil, mécanique du bâtiment, ou chimique spécialisant en béton;
- Agents d'approvisionnement de groupes d'achat de matériaux;
- Ingénieurs ou professionnels provenant de compagnies privées ou de consortiums industriels participant à des appels d'offres en construction.

En débutant ce questionnaire, vous indiquez que vous avez lu et compris l'information mentionnée ci-haut et le formulaire d'information et de consentement et que vous acceptez de participer à ce sondage.

Aucune notion particulière n'est requise pour remplir le questionnaire. Vous le remplissez au mieux de vos connaissances.

Il y a 50 questions dans ce questionnaire.

Section A : Identification du répondant

Les réponses de cette section ont pour unique but de classer les répondants par groupe. Afin de protéger la confidentialité des réponses individuelles, les résultats seront agrégés

Actuellement, travaillez-vous dans le domaine public ou privé ?

*

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

Public

Privé

Autre

À quel type de compagnie associez-vous la compagnie pour laquelle vous travaillez?

*

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

Donneur d'ouvrage

Fournisseur de biens et matériaux

Fournisseur de services

Fournisseur de construction

Fabricant de produits du béton

Firme Expert Conseil et Consultation

Architecture - Designer

Recherche et développement

Autre

Dans quelle région administrative du Québec se situe le bureau de la compagnie où vous êtes actuellement localisé ?

*

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Bas-Saint-Laurent
- Saguenay-Lac-Saint-Jean
- Capitale-nationale
- Mauricie
- Estrie
- Montréal
- Outaouais
- Abitibi-Témiscamingue
- Côte-Nord
- Nord-du-Québec
- Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine
- Chaudière-Appalaches
- Laval
- Lanaudière
- Laurentides
- Montérégie
- Centre-du-Québec

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Région_administrative_du_Québec](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gion_administrative_du_Qu%C3%A9bec)

Choisir le titre correspondant le mieux à votre poste actuel

*

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Architecte
- Arpenteur-géomètre
- Bétonneur
- Chargé de projets
- Direction générale
- Estimateur
- Gestionnaire
- Gestionnaire de projets
- Ingénieur
- Ingénieur junior
- Inspecteur en bâtiment
- Opérateur
- Recherche & Développement
- Superintendant/Contremaître
- Surveillant de chantier
- Technicien
- Autre

Depuis combien de temps occupez-vous ce poste ?

*

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

1-3 ans

4-6 ans

7-10 ans

+10 ans

Expérience dans le domaine. Depuis combien de temps travaillez-vous dans ce

domaine, excluant les années d'études ? *

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

1-3 ans

4-6 ans

7-10 ans

+10 ans

Quel est votre niveau de formation académique ?

*

! Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Doctorat
- Maîtrise (incluant MBA)
- Baccalauréat
- D.E.P. - Technique
- Certificat
- Préfère ne pas répondre

Autre

Dans quel domaine spécifiquement ?

Veuillez écrire votre réponse ici :

Section B : Économie circulaire et construction

Connaissances générales concernant l'économie circulaire et le développement durable

Une liste de termes reliés au développement durable et à l'économie circulaire vous est présentée. Notez votre connaissance du terme, sur une échelle de 1 à 5 : 1 étant « jamais entendu parler », 5 étant « maîtrise bien ce sujet »

*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
3 scopes	<input type="radio"/>				
3RV-E (Réduction réutilisation recyclage valorisation élimination)	<input type="radio"/>				
Analyse de cycle de vie	<input type="radio"/>				
Développement durable	<input type="radio"/>				
Écoconception	<input type="radio"/>				
Écologie industrielle	<input type="radio"/>				
Économie circulaire	<input type="radio"/>				
Économie collaborative et de partage	<input type="radio"/>				
Économie de fonctionnalité	<input type="radio"/>				
Empreinte carbone	<input type="radio"/>				
LEED	<input type="radio"/>				
Net Zero	<input type="radio"/>				
Triple Bottom Line	<input type="radio"/>				

Section B : Économie circulaire et construction

Connaissances générales concernant l'économie circulaire et le développement durable

La liste suivante contient des techniques en lien avec le thème de la **déconstruction** **plutôt que la démolition**. Notez votre connaissance de celles-ci, sur une échelle de 1 à 5 : 1 étant « jamais entendu parler », 5 étant « maîtrise bien ce sujet ».

Si vous avez déjà utilisée une de ces techniques sur un projet, mettre 5
*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
Design pour la déconstruction	<input type="radio"/>				
Gestion des déchets lors d'une démolition pour une meilleure réutilisation	<input type="radio"/>				
Utilisation des « déchets » issus de démolition comme matériaux pour une nouvelle construction	<input type="radio"/>				

Si vous avez déjà utilisé l'une des techniques suivantes sur un projet, vous pouvez spécifier le nom de la technique, du projet, ajouter un lien web vers les informations du projet etc.

Veuillez écrire votre réponse ici :

La liste suivante contient des techniques en lien avec la **réduction de l'impact du béton**. Notez votre connaissance de celles-ci, sur une échelle de 1 à 5 : 1 étant « jamais entendu parler », 5 étant « maîtrise bien ce sujet ».

Si vous avez déjà utilisée une de ces techniques sur un projet, mettre 5
*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
Matériaux alternatifs (bois, briques de terre compressées)	<input type="radio"/>				
Séquestration de CO2 dans le béton (ex : dans des granulats ou directement lors de la coulée de béton)	<input type="radio"/>				
Utilisation d'ajouts cimentaires « verts » (ex : poudre de verre recyclé, cendres volantes)	<input type="radio"/>				

Si vous avez déjà utilisé l'une des techniques suivantes sur un projet, vous pouvez spécifier le nom de la technique, du projet, ajouter un lien web vers les informations du projet etc.

Veuillez écrire votre réponse ici :

La liste de techniques de construction suivante est en lien avec **l'utilisation de technologies BIM**. Notez votre connaissance de celles-ci, sur une échelle de 1 à 5 : 1 étant « jamais entendu parler », 5 étant « maîtrise bien ce sujet ».

Si vous avez déjà utilisée une de ces techniques sur un projet, mettre 5
*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
Modélisation pour le design	<input type="radio"/>				
Optimisation de la gestion du chantier	<input type="radio"/>				
Optimisation de la gestion des matériaux et déchets	<input type="radio"/>				

BIM : Building Information Modelling

Si vous avez déjà utilisé l'une des techniques suivantes sur un projet, vous pouvez spécifier le nom de la technique, du projet, ajouter un lien web vers les informations du projet etc.

Veuillez écrire votre réponse ici :

La liste de techniques de construction suivante est en lien avec **l'utilisation de sources d'énergie alternatives**. Notez votre connaissance de celles-ci, sur une échelle de 1 à 5 : 1 étant « jamais entendu parler », 5 étant « maîtrise bien ce sujet ». Si vous avez déjà utilisée une de ces techniques sur un projet, mettre 5 *

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
Construction solaire	<input type="radio"/>				
Déchets de construction comme combustible	<input type="radio"/>				
Utilisation de la biomasse, issue des déchets forestiers, comme combustible	<input type="radio"/>				

Si vous avez déjà utilisé l'une des techniques suivantes sur un projet, vous pouvez spécifier le nom de la technique, du projet, ajouter un lien web vers les informations du projet etc.

Veuillez écrire votre réponse ici :

La liste de techniques de construction suivante est en lien avec **l'utilisation d'éléments préfabriqués**. Notez votre connaissance de celles-ci, sur une échelle de 1 à 5 : 1 étant « jamais entendu parler », 5 étant « maîtrise bien ce sujet ».

Si vous avez déjà utilisée une de ces techniques sur un projet, mettre 5
*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
Béton préfabriqué	<input type="radio"/>				
Panneaux préfabriqués	<input type="radio"/>				
Construction modulaire	<input type="radio"/>				

Si vous avez déjà utilisé l'une des techniques suivantes sur un projet, vous pouvez spécifier le nom de la technique, du projet, ajouter un lien web vers les informations du projet etc.

Veuillez écrire votre réponse ici :

La liste suivante est en lien avec **des techniques de construction variées**. Notez votre connaissance de celles-ci, sur une échelle de 1 à 5 : 1 étant « jamais entendu parler », 5 étant « maîtrise bien ce sujet ».

Si vous avez déjà utilisée une de ces techniques sur un projet, mettre 5
*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
Just-In-Time construction	<input type="radio"/>				
Contrats de performance	<input type="radio"/>				
Rénover/Ragréer au lieu de reconstruire à neuf	<input type="radio"/>				
Matériaux provenant des déchets des autres industries	<input type="radio"/>				

Si vous avez déjà utilisé l'une des techniques suivantes sur un projet, vous pouvez spécifier le nom de la technique, du projet, ajouter un lien web vers les informations du projet etc.

Veuillez écrire votre réponse ici :

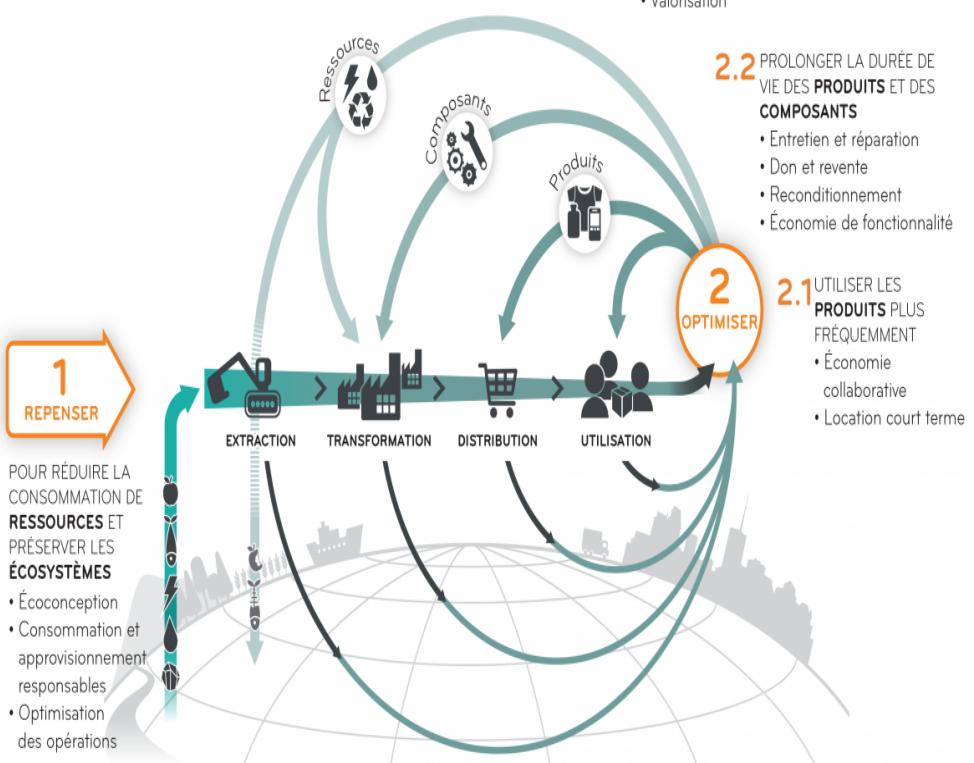
Si vous êtes familier avec une technique durable de construction dont il n'a pas été mentionné dans les questions précédentes, vous pouvez les inscrire ici.

Veuillez écrire votre réponse ici :

Section B : Économie circulaire et construction

Connaissances générales concernant l'économie circulaire et le développement durable

L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE



© Institut EDDEC, 2018. En collaboration avec RECYC-QUÉBEC. Reproduction autorisée. Modification interdite.

Sur une échelle de 1 à 5, à quel point diriez-vous être familier avec ce diagramme illustrant l'économie circulaire ? (1 étant « aucunement » et 5 étant « tout à fait »).
*

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Importance accordée selon un point de vue **économique**. Sur une échelle de 1 à 5 (1 étant « en désaccord », 5 étant « tout à fait d'accord »), notez les affirmations suivantes :

*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
La croissance économique peut se faire en utilisant des principes d'économie circulaire	<input type="radio"/>				
Le développement de nouveaux emplois orientés vers le développement durable, au détriment de certains secteurs plus traditionnels, peut être bénéfique	<input type="radio"/>				
À COURT terme : Implémenter de nouvelles techniques durables est trop coûteux pour ce que ça rapporte	<input type="radio"/>				
À MOYEN terme : Implémenter de nouvelles techniques durables est trop coûteux pour ce que ça rapporte	<input type="radio"/>				
À LONG terme : Implémenter de nouvelles techniques durables est trop coûteux pour ce que ça rapporte	<input type="radio"/>				

	1	2	3	4	5
Lors du choix de matériaux et techniques de production de ces matériaux, le choix le moins dispendieux a toujours un net avantage par rapport à d'autres	<input type="radio"/>				
Générer des profits sans compromettre les besoins des générations futures	<input type="radio"/>				
Supporter l'économie locale	<input type="radio"/>				
Considérer le coût d'un projet sur tout son cycle de vie	<input type="radio"/>				

Importance accordée selon un point de vue **environnemental**. Sur une échelle de 1 à 5 (1 étant « en désaccord », 5 étant « tout à fait d'accord »), notez les affirmations suivantes :

*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
Lors d'une construction neuve, la protection de l'environnement est à considérer en priorité	<input type="radio"/>				
Lors d'une rénovation, la protection de l'environnement est à considérer en priorité	<input type="radio"/>				
Lors d'une démolition, la protection de l'environnement est à considérer en priorité	<input type="radio"/>				
Se questionner de l'impact sur l'environnement des techniques de construction, matériaux, etc. qui sont souvent utilisés	<input type="radio"/>				
Opter pour des solutions protégeant l'environnement	<input type="radio"/>				
Utiliser des matériaux limitant l'extraction des ressources premières	<input type="radio"/>				
Utiliser des matériaux et méthodes émettant peu de gaz à effet de serre	<input type="radio"/>				
Diminuer la quantité de déchets générés lors d'un projet	<input type="radio"/>				

Importance accordée selon un point de vue **social**. Sur une échelle de 1 à 5 (1 étant « en désaccord », 5 étant « tout à fait d'accord »), notez les affirmations suivantes :

*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
La compagnie pour laquelle je travaille se doit d'avoir une image verte auprès du public	<input type="radio"/>				
Les projets publics devraient intégrer une composante développement durable	<input type="radio"/>				
En tout temps dans une nouvelle construction le bien-être de ses occupants futurs doit être considéré (par exemple en ayant des espaces lumineux, en utilisant des matériaux avec peu de toxicité, etc.)	<input type="radio"/>				
Les projets de construction devraient améliorer la vie sociale autour de ceux-ci	<input type="radio"/>				
Créer de nouveaux emplois spécialisés et former les travailleurs pour utiliser de nouvelles techniques plus durables est important	<input type="radio"/>				

	1	2	3	4	5
Réduire le bruit et la pollution (notamment la poussière) lors d'un projet pour déranger le moins possible le voisinage est important	<input type="radio"/>				
Délivrer un produit de qualité qui durera ainsi plus longtemps est important	<input type="radio"/>				

Section C : Poudre de verre comme ajout cimentaire

La section suivante vise à déterminer les connaissances de l'industrie vis-à-vis une technique développée par la chaire SAQ de recherche, soit l'utilisation de poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire.

Avez-vous déjà entendu parler de l'utilisation du verre dans le béton? *

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Oui
 Non

Comme granulat ou comme ajout cimentaire ?

*

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse était 'Oui' à la question '28 [C1]' (Avez-vous déjà entendu parler de l'utilisation du verre dans le béton?)

❶ Cochez la ou les réponses

Veuillez choisir toutes les réponses qui conviennent :

- Granulat
 Ajout cimentaire
 Autre: _____

Avez-vous déjà participé à un projet utilisant la poudre de verre comme ajout cimentaire? Spécifiez

*

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse était 'Oui' à la question '28 [C1]' (Avez-vous déjà entendu parler de l'utilisation du verre dans le béton?)

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

Oui

Non

Faites le commentaire de votre choix ici :

Avez-vous rencontré des problèmes ou obstacles? Spécifiez

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse était 'Oui' à la question '30 [C3]' (Avez-vous déjà participé à un projet utilisant la poudre de verre comme ajout cimentaire? Spécifiez)

Veuillez écrire votre réponse ici :

Est-ce pour une raison spécifique (disponibilité, non conventionnel, dispendieux, etc.) ?

Spécifiez

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

La réponse était 'Non' à la question '30 [C3]' (Avez-vous déjà participé à un projet utilisant la poudre de verre comme ajout cimentaire? Spécifiez)

Veuillez écrire votre réponse ici :

Seriez-vous intéressé à en apprendre plus si l'information vous était davantage disponible? Spécifiez

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :
La réponse était 'Non' à la question '28 [C1]' (Avez-vous déjà entendu parler de l'utilisation du verre dans le béton?) *et* La réponse était 'Non' à la question '30 [C3]' (Avez-vous déjà participé à un projet utilisant la poudre de verre comme ajout cimentaire? Spécifiez)

● Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Oui
- Non

Faites le commentaire de votre choix ici :

Section C : Poudre de verre comme ajout cimentaire

Utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire dans un projet futur

Seriez-vous intéressé à l'utiliser considérant qu'elle permet une réduction de l'empreinte écologique et l'utilisation d'une matière recyclée?

*

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Oui
- Non

Et si cette technique apportait des frais supplémentaires, pour le transport par exemple?

*

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

Oui

Non

Faites le commentaire de votre choix ici :

Et si cette technique apportait des frais supplémentaires mais qu'il était exigé, au contrat, qu'une partie des matériaux proviennent de recyclé, peu importe le matériau.

*

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

Oui

Non

Faites le commentaire de votre choix ici :

Et si cette technique apportait des frais supplémentaires mais qu'il vous serait possible d'obtenir des subventions gouvernementales pour compenser la totalité des coûts engendrés?

*

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

Oui

Non

Faites le commentaire de votre choix ici :

Avez-vous entendu ou vous-même avez-vous, une vision négative ou des préjugées concernant cette technologie? Spécifiez *

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

Oui

Non

Faites le commentaire de votre choix ici :

Est-ce suite à une mauvaise expérience sur un projet réalisé par vous ?

*

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :
La réponse était 'Oui' à la question '38 [C11]' (Avez-vous entendu ou vous-même avez-vous, une vision négative ou des préjugées concernant cette technologie? Spécifiez)

! Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Oui
- Non

Faites le commentaire de votre choix ici :

Est-ce suite à une mauvaise expérience sur un projet réalisé par un collègue ?

*

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :
La réponse était 'Oui' à la question '38 [C11]' (Avez-vous entendu ou vous-même avez-vous, une vision négative ou des préjugées concernant cette technologie? Spécifiez)

❶ Veuillez sélectionner une réponse ci-dessous

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- Oui
- Non

Faites le commentaire de votre choix ici :

Autre commentaire ou expériences dont vous voudriez partager vis-à-vis l'utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire

Veuillez écrire votre réponse ici :

Section D : Impact de la crise sanitaire actuelle

Les questions de cette section portent sur la crise sanitaire actuelle et comment celle-ci a affecté le secteur de la construction.

Quelle est votre perception des politiques et structures de travail mises en place en réponse à la crise sanitaire (1 étant pas du tout efficaces et 5 étant efficaces)

*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
Par le gouvernement fédéral lors de la crise en général	<input type="radio"/>				
Par le gouvernement provincial lors de la crise en général	<input type="radio"/>				
Par le gouvernement fédéral en lien avec la réouverture du secteur de la construction	<input type="radio"/>				
Par le gouvernement provincial en lien avec la réouverture du secteur de la construction	<input type="radio"/>				
Par l'entreprise pour laquelle vous travaillez lors de la réouverture du secteur de la construction.	<input type="radio"/>				

Depuis le début de la crise, votre charge de travaille a-t-elle diminuée considérablement (1), restée inchangée (3) ou augmentée (5) ? *

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
Avant l'ouverture récente des chantiers	<input type="radio"/>				
Depuis que les chantiers sont ré ouverts	<input type="radio"/>				

Sur une échelle de 1 à 5, est-il difficile pour vous ou votre compagnie de vous approvisionner en matériaux, matière premières, etc. ? 1 étant si les opérations sont retardés à cause d'un manque en approvisionnement ; 5 étant si les opérations n'ont pas été affectées. *

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1	2	3	4	5
Depuis le début de la crise, avant l'ouverture des chantiers	<input type="radio"/>				
Depuis que les chantiers sont recommandés	<input type="radio"/>				
Depuis le début de la crise, les marchés et échanges internationaux ont dû fermer. Cette déglobalisation a eu quel impact sur l'approvisionnement ?	<input type="radio"/>				

En tant qu'employé, vous sentez-vous en sécurité avec les mesures de prévention du Covid mises en place par votre compagnie ? (1 étant pas du tout ; 5 étant tout à fait)
*

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Ces mesures de sécurité affectent-elles les opérations et échéanciers?

*

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	Oui	Incertain	Non
Les opérations sont affectés mais les échéanciers sont respectés	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Les opérations et échéanciers sont affectés, créant un retard	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Les opérations et échéanciers ne sont pas affectés	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Selon vous, qu'est-ce qui a été le plus affecté sur le marché et dans votre travail avec cette crise? Quel est le plus grand défi que votre compagnie ou le secteur de la construction a à relever.

Veuillez écrire votre réponse ici :

La crise a apporté beaucoup de changement dans toutes les industries. Selon vous, est-ce un frein (1) ou une occasion (5) de faire les choses différemment ?

*

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Pensez-vous que c'est un bon moment (5) ou non (1) pour implémenter de nouvelles pratiques environnementales dans le secteur de la construction ?

*

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

La crise a amené un stress économique dans beaucoup de secteurs et compagnies. Selon vous, est-ce un bon moment pour développer des collaborations entre entreprises pour améliorer les pratiques en construction?

*

Veuillez sélectionner une seule des propositions suivantes :

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Merci de votre participation.

Si vous avez des questions sur les **aspects scientifiques** du projet de recherche ou pour vous **retirer de l'étude**, vous pouvez contacter ISABEL RACINE au (514) 291-2747 ou encore par courriel à isabel.racine@polymtl.ca (<mailto:isabel.racine@polymtl.ca>).

2020.10.06 – 15:28

Envoyer votre questionnaire.

Merci d'avoir complété ce questionnaire.

ANNEXE C CERTIFICATION ÉTHIQUE

CER-1920-56-D



Montréal, le 8 mai 2020

Objet: Approbation éthique – « Développer une approche méthodologique économique et environnementale analysant l'utilisation de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire » - Projet CER-1920-56-D

Mme Isabel Racine,

J'ai le plaisir de vous informer le Comité d'éthique de la recherche, selon les procédures en vigueur, en vertu des documents qui lui ont été fournis, a examiné le projet de recherche susmentionné et conclu que ce dernier répond aux normes en vigueur au chapitre de l'éthique de la recherche énoncées dans la *Politique en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains* de Polytechnique Montréal.

Veuillez noter que le présent certificat est valable pour une durée d'un an, soit du 8 mai 2020 au 9 mai 2021, pour le projet tel qu'approuvé au Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains.

Veuillez noter que conformément aux exigences auxquelles l'institution et son personnel sont assujettis afin d'être admissibles aux fonds des organismes subventionnaires, il est de votre responsabilité de déposer au CER un rapport annuel ou un rapport final avant l'expiration de la présente approbation éthique afin de l'informer de l'avancement de vos travaux. Le formulaire à remplir est disponible à l'adresse suivante : (<http://www.polymtl.ca/recherche/formulaires-et-guides>).

De plus, il est de votre responsabilité d'informer le CER de toute modification importante qui pourrait être apportée au protocole expérimental avant sa mise en œuvre, de même que de tout élément ou événement imprévu pouvant avoir une incidence sur le bien-être ou l'intégrité des participant(e)s impliqué(e)s dans le projet de recherche. Nous vous invitons aussi à nous signaler tout problème susceptible d'avoir une incidence sur les membres de l'équipe de recherche.

Je vous souhaite bonne chance dans la poursuite de vos travaux.

Nous vous prions d'agréer, Madame, l'expression de nos sentiments les meilleurs,

Farida Cheriet, présidente
Comité d'éthique de la recherche
Polytechnique Montréal

c.c. Direction de la formation et de la recherche; Service des Finances
Marcelin Joanis, professeur titulaire, Département de mathématiques et génie industriel

Cochercheurs
p.j. Certificat # CER-1920-56-D

Comité d'éthique de la recherche
avec des êtres humains
Tél.: 514 340-4711 poste : 3755
Fax : 514 340-4992
Courriel : ethique@polymtl.ca

Adresse postale
C.P. 6079, succ. Centre-Ville
Montréal (Québec) Canada H3C 3A7

Campus de l'Université de Montréal
2900, boul. Édouard-Montpetit
2500, chemin de Polytechnique
Montréal (Québec) Canada H3T 1J4

CER-1920-56-D

**CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE**

Le Comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal, selon les procédures en vigueur, en vertu des documents qui lui ont été fournis, a examiné le projet de recherche suivant et conclu qu'il respecte les règles d'éthique énoncées dans sa Politique en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains.

Projet

Titre du projet	Développer une approche méthodologique économique et environnementale analysant l'utilisation de la poudre de verre recyclé comme ajout cimentaire CER-1920-56-D
Étudiante requérante	Isabel Racine, Candidate à la maîtrise, Département de mathématiques et de génie industriel
Sous la direction de:	Marcelin Joanis, professeur titulaire, Département de mathématiques et génie industriel, Polytechnique Montréal
Avec la collaboration de:	Arezki Tagnit-Hamou (UdeS)

Financement

Organisme	Centre de recherche sur les infrastructures en béton (FQRNT)
No de UBR	
Programme	Appel à projet du CRIB 2019-20
No d'octroi:	Lettre du 9 avril 2020 signée par Benoît Fournier, Richard Gagné et Bruno Massicotte.
Titre original de l'octroi:	Comprendre le marché nord-américain potentiel de la poudre de verre comme ajout cimentaire
Chercheur principal:	Marcelin Joanis

MODALITÉS D'APPLICATION

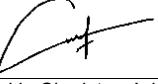
Toute modification importante qui pourrait être apportée au protocole expérimental doit être transmise au Comité avant sa mise en œuvre.

L'équipe de recherche doit informer le Comité de tout élément ou événement imprévu pouvant avoir une incidence sur le bien-être ou l'intégrité des participant(e)s impliqué(e)s dans le projet de recherche ainsi que tout problème susceptible d'avoir une incidence sur les membres de l'équipe de recherche.

Selon les règles universitaires en vigueur, un suivi annuel est minimalement exigé pour maintenir la validité de la présente approbation éthique, et ce, jusqu'à la fin du projet. Le questionnaire de suivi est disponible sur la page web du Comité.

Date de délivrance :
8 mai 2020

Date de fin de validité :
1er juin 2021


Farida Cheriet, présidente
Comité d'éthique de la recherche
Polytechnique Montréal

Date du prochain
suivi :
9 mai 2021

Comité d'éthique de la recherche
avec des êtres humains
Tél.: 514 340-4711 poste : 3755
Fax : 514 340-4992
Courriel : ethique@polymtl.ca

Adresse postale
C.P. 6079, succ. Centre-Ville
Montréal (Québec) Canada H3C 3A7

Campus de l'Université de Montréal
2900, boul. Édouard-Montpetit
2500, chemin de Polytechnique
Montréal (Québec) Canada H3T 1J4

ANNEXE D ENVOIS ABQ EXPRESS

[Version Web](#) | [Envoyer à un ami](#) | [S'inscrire à l'infolettre](#) | [Se désabonner](#)



Volume 14, numéro 21

Économie circulaire et construction : Votre opinion est importante!

Nous avons besoin de votre aide!

Votre précieuse participation à un court sondage est sollicitée. Ce sondage est réalisé dans le cadre d'une recherche sur l'innovation durable en construction au Québec et les obstacles rencontrés. Nous espérons améliorer comment les technologies vertes sont implantées en construction afin que tous puissent bénéficier de ce virage durable éminent.

Nous recherchons :

- Ingénieurs ou techniciens pratiquants dans les domaines suivants : civil, mécanique du bâtiment, ou chimique spécialisant en béton;
- Agents d'approvisionnement de groupes d'achat de matériaux de construction;
- Ingénieurs ou professionnels provenant de compagnies privées ou de consortiums industriels participant à des appels d'offres en construction.

Vous répondez à l'une des catégories ? Vous souhaitez aider à l'amélioration de votre domaine? [Cliquez ici](#)

Pour d'avantage d'information sur le contexte de la recherche et la confidentialité des résultats, vous pouvez vous référer aux documents suivants:
[Lettre d'invitation et d'information concernant un sondage sur l'innovation durable en construction au Québec](#)
[Formulaire d'information et de consentement](#)



Copyright © 2020 *ILIST:COMPANY1*, Tous droits réservés betonabq.org.

ILIST:DESCRIPTION
ILIST_ADDRESS



ANNEXE E LIGNE DE PRODUCTION PROPOSÉE PAR KRYSTELINE

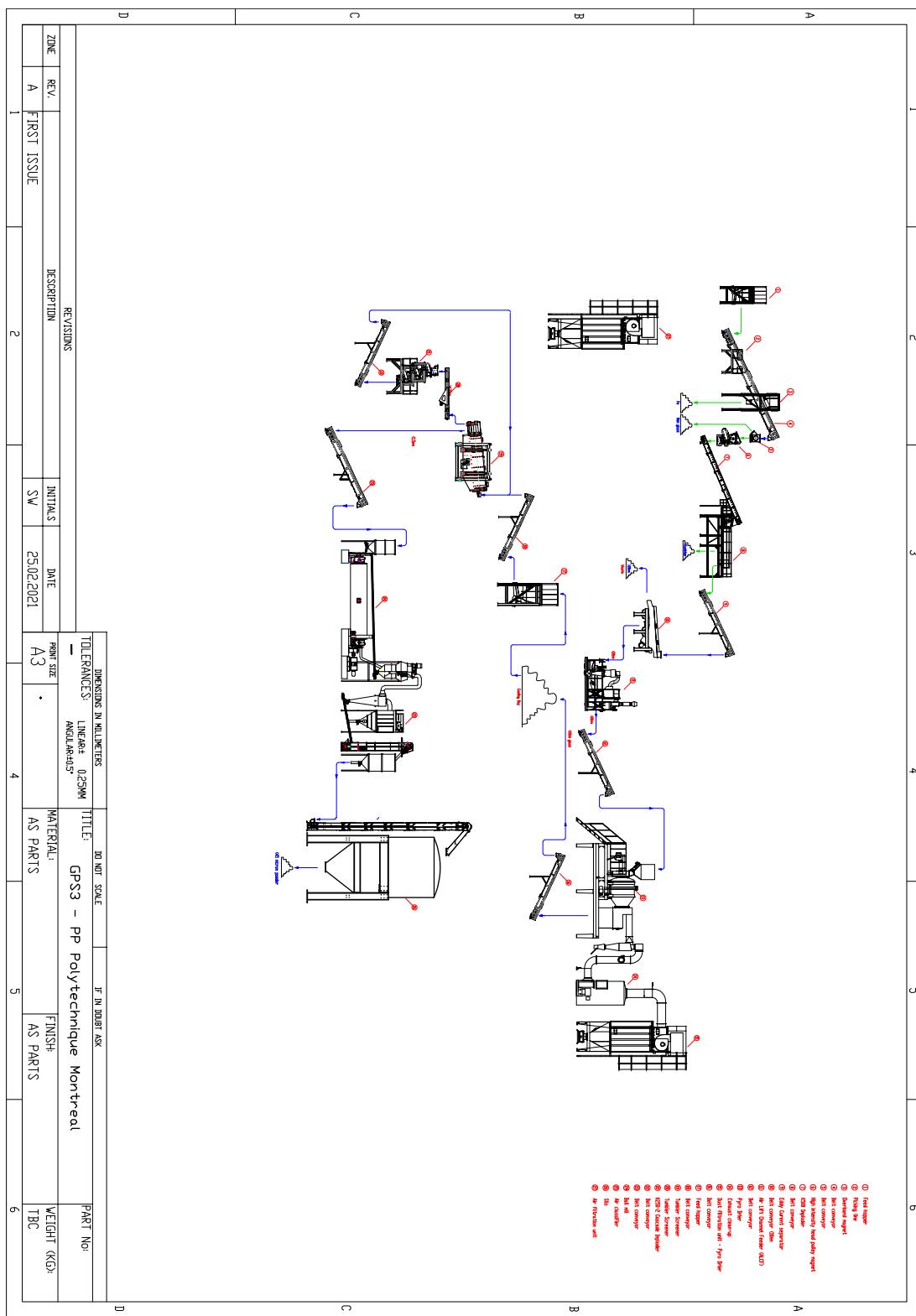


Figure E-1 Ligne de production

ANNEXE F COÛTS D'AJOUTS CIMENTAIRES SELON CHEVALIER

Tableau 5.3 Prix du ciment et d'ajouts cimentaires aux États-Unis (compilation d'après : DeFord, 2016, p. 17; Jim Wolsiefer, échange de courriels, 2018; Statistica, 2018; Tucker, Ferraro, Laux et Townsend, 2018, p. 245; United States Geological Survey [USGS], 2017, p. 1)

Matière	Prix	Année	Sources
Ciment Portland	113 US \$/tonne	2017	Statistica, 2018
	120 US \$/tonne	2015	Tucker et al., 2018
	130 US \$/tonne	S.O.	DeFord, 2016
Laitier de haut-fourneau	≤ 110 US \$/tonne	2016	USGS, 2017
Ciment de laitier de haut-fourneau	115 US \$/tonne	S.O.	DeFord, 2016
Cendres volantes	35 US \$/tonne	S.O.	DeFord, 2016
	40 US \$/tonne	S.O.	Tucker et al., 2018
Fumée de silice	450-600 US \$/tonne	2018	Jim Wolsiefer pour Norchem, Inc., échange de courriels, 2018
	1100 US \$/tonne	S.O.	DeFord, 2016

ANNEXE G RÉPONSES À LA SECTION B DU QUESTIONNAIRE

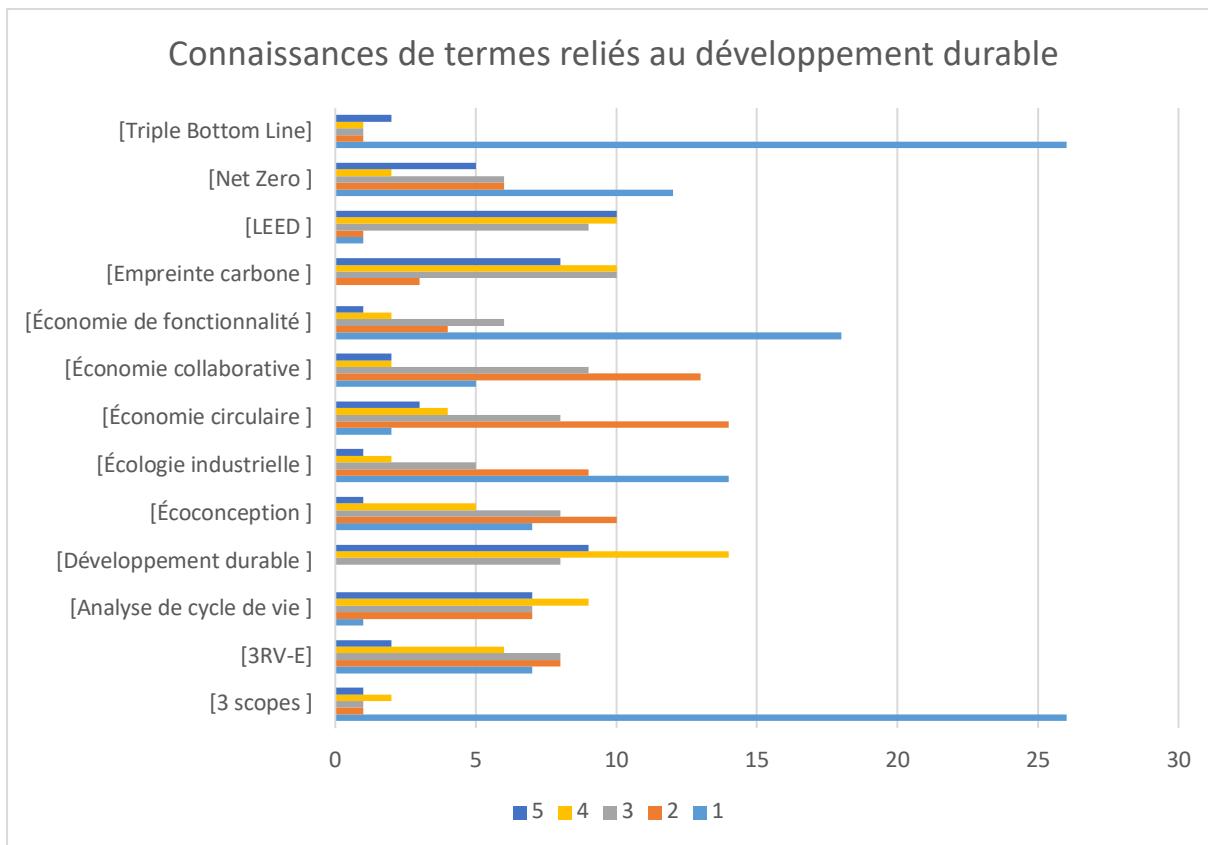


Figure G-1 Résultats des connaissances en lien avec le DD

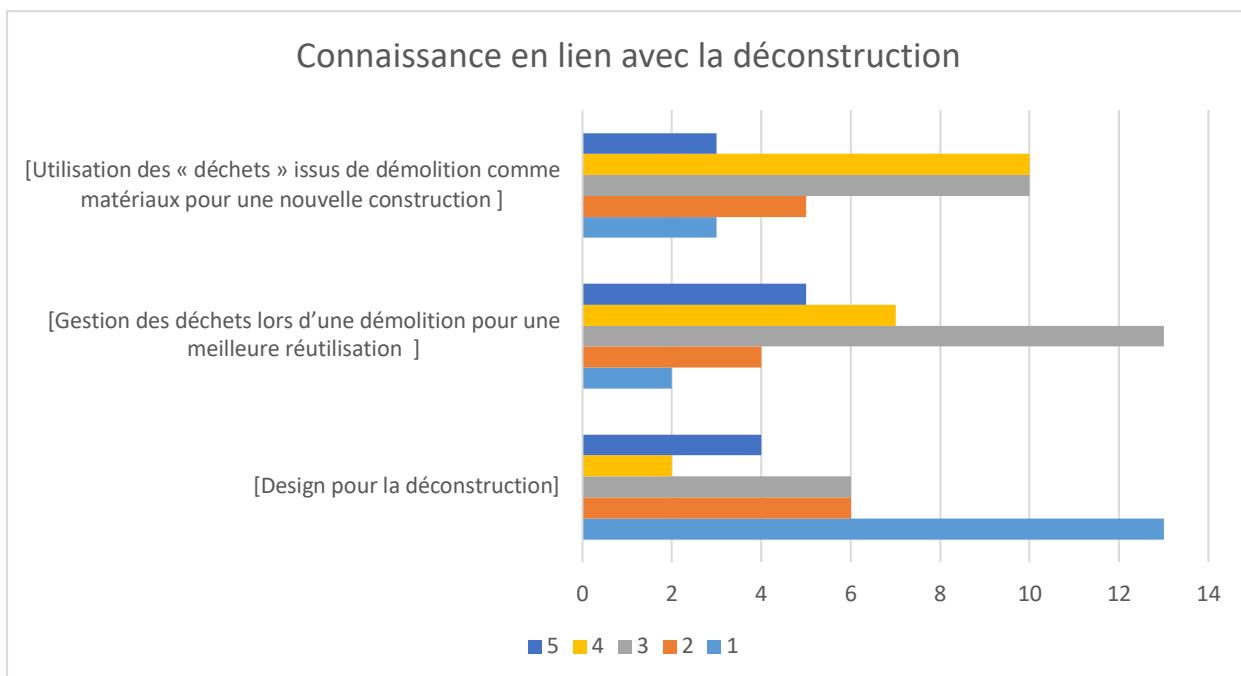


Figure G-2 Connaissance avec la déconstruction

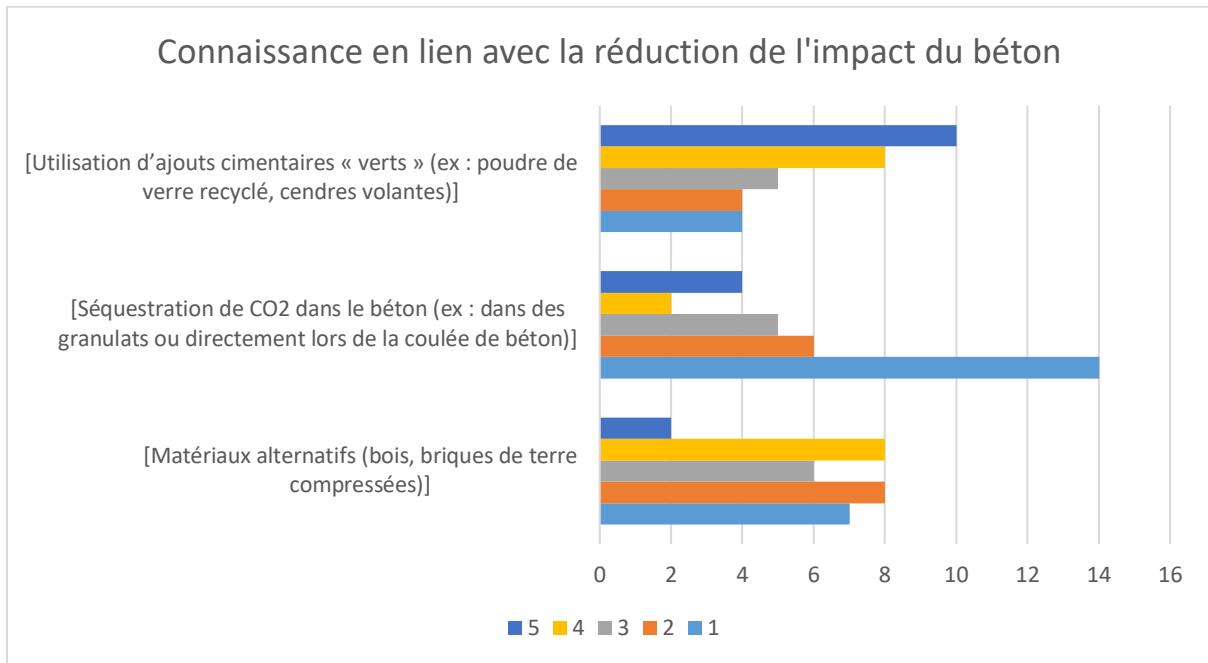


Figure G-3 Résultats des connaissance avec l'impact du béton

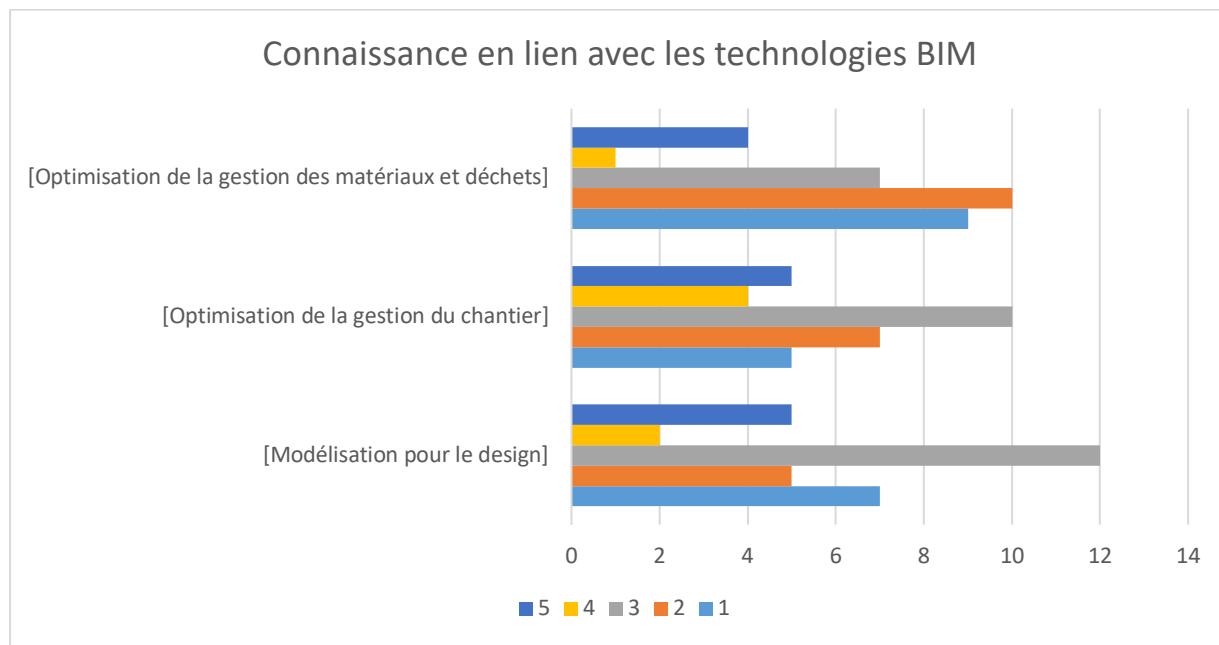


Figure G-4 Résultats des connaissance en lien avec BIM

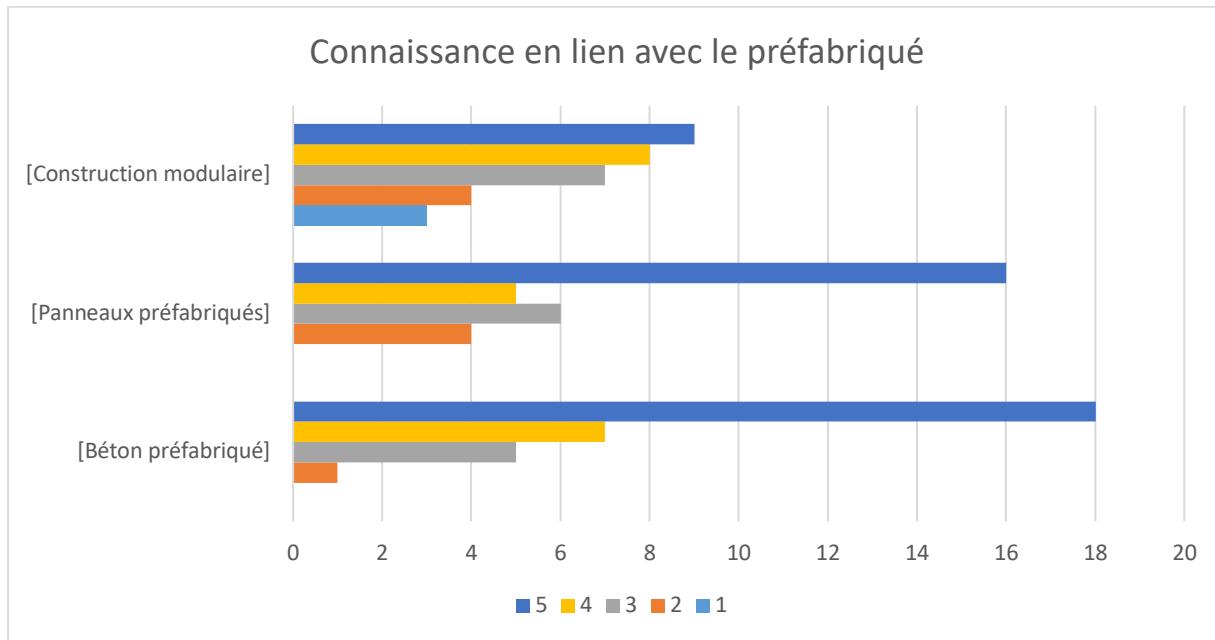


Figure G-5 Résultats des connaissances sur le préfabriqué

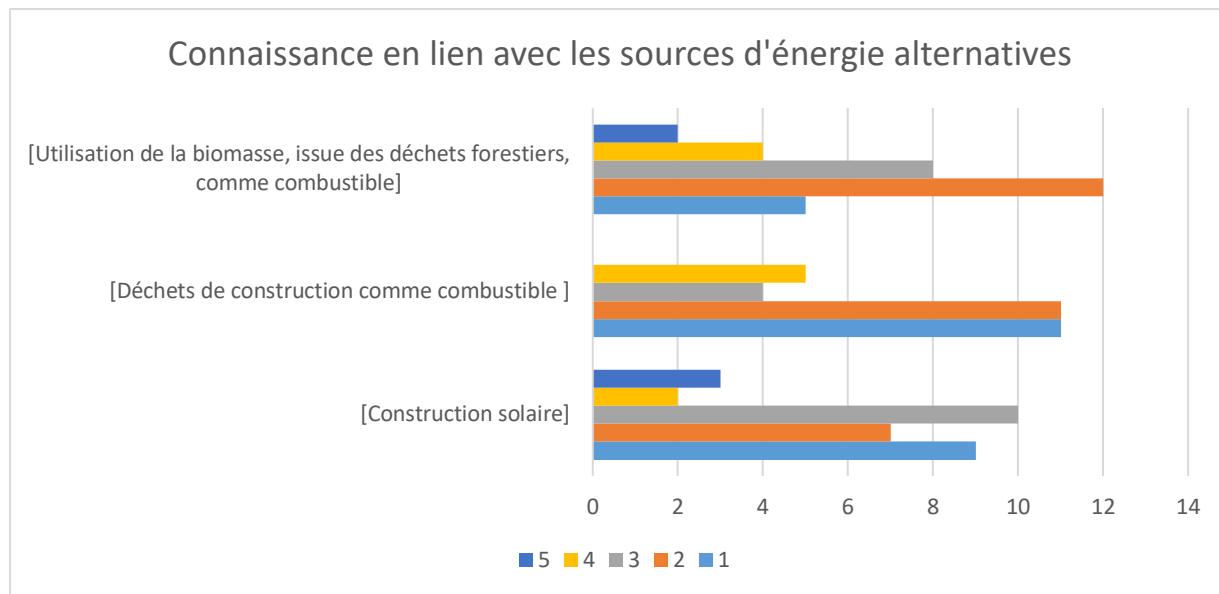


Figure G-6 Résultats des connaissances sur les énergies alternatives

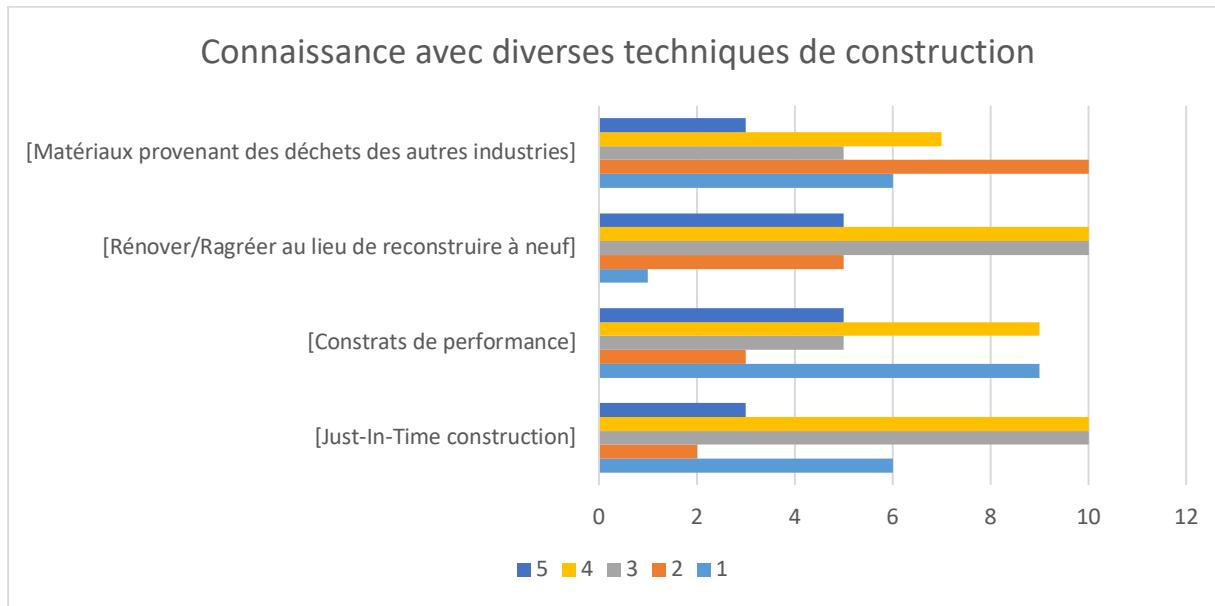


Figure G-7 Résultats des connaissances sur diverses techniques

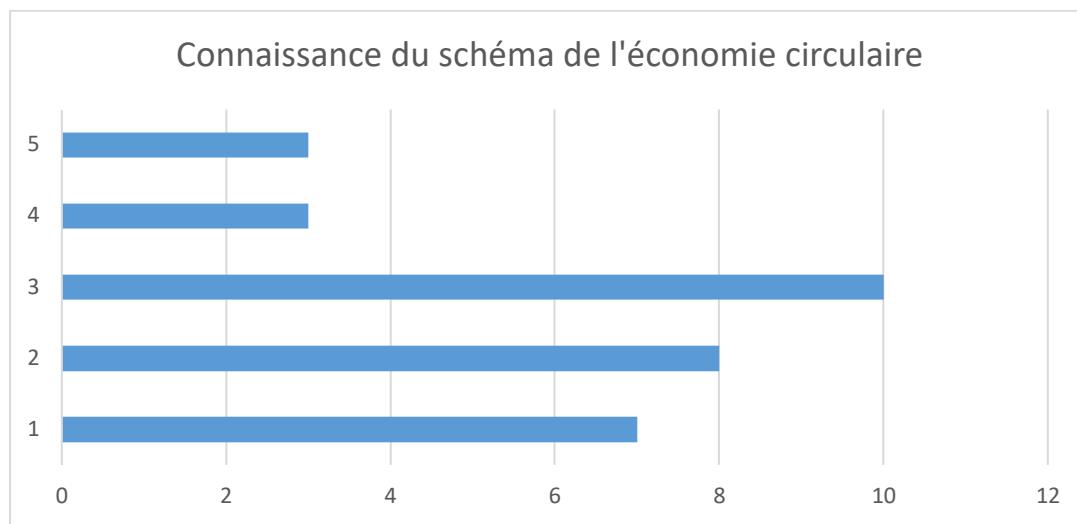


Figure G-8 Résultats des connaissances sur l'EC

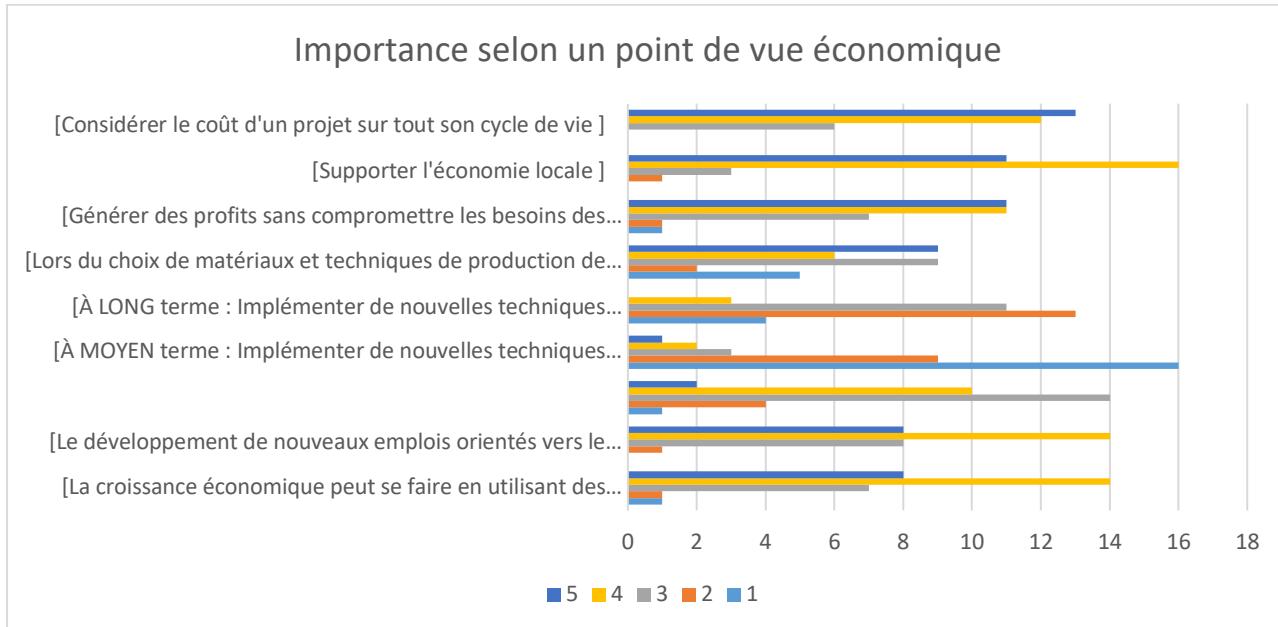


Figure G-9 Résultats de l'importance selon l'aspect économie

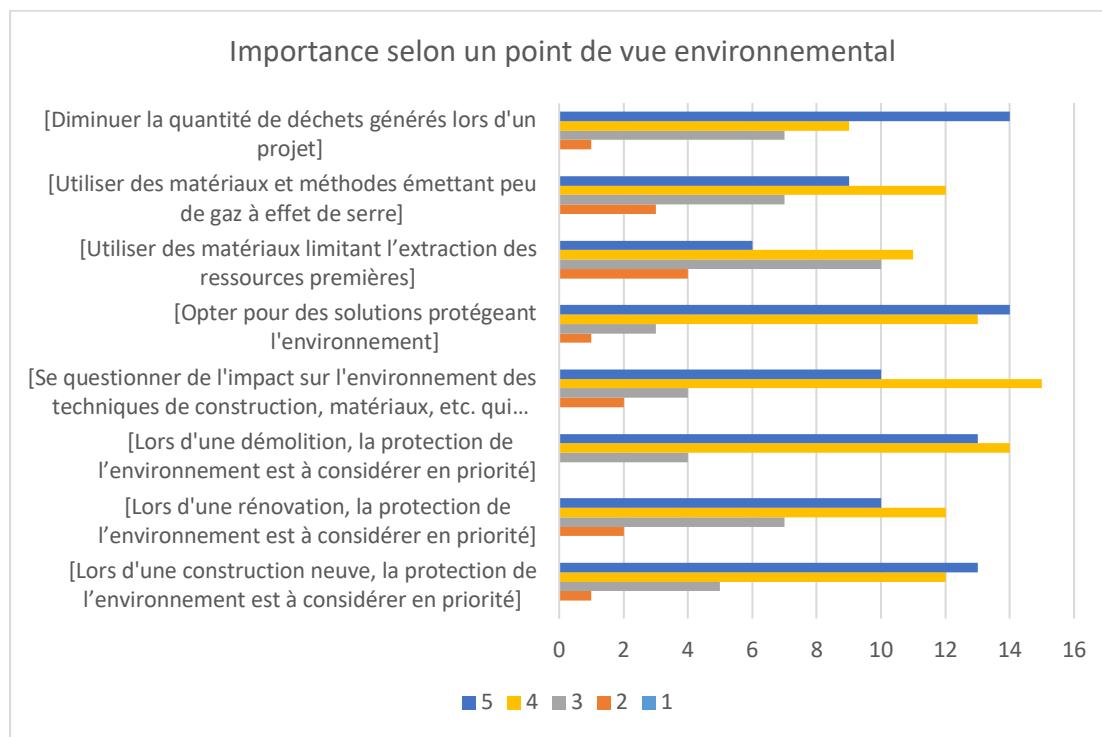


Figure G-10 Résultats de l'importance selon l'aspect environnemental

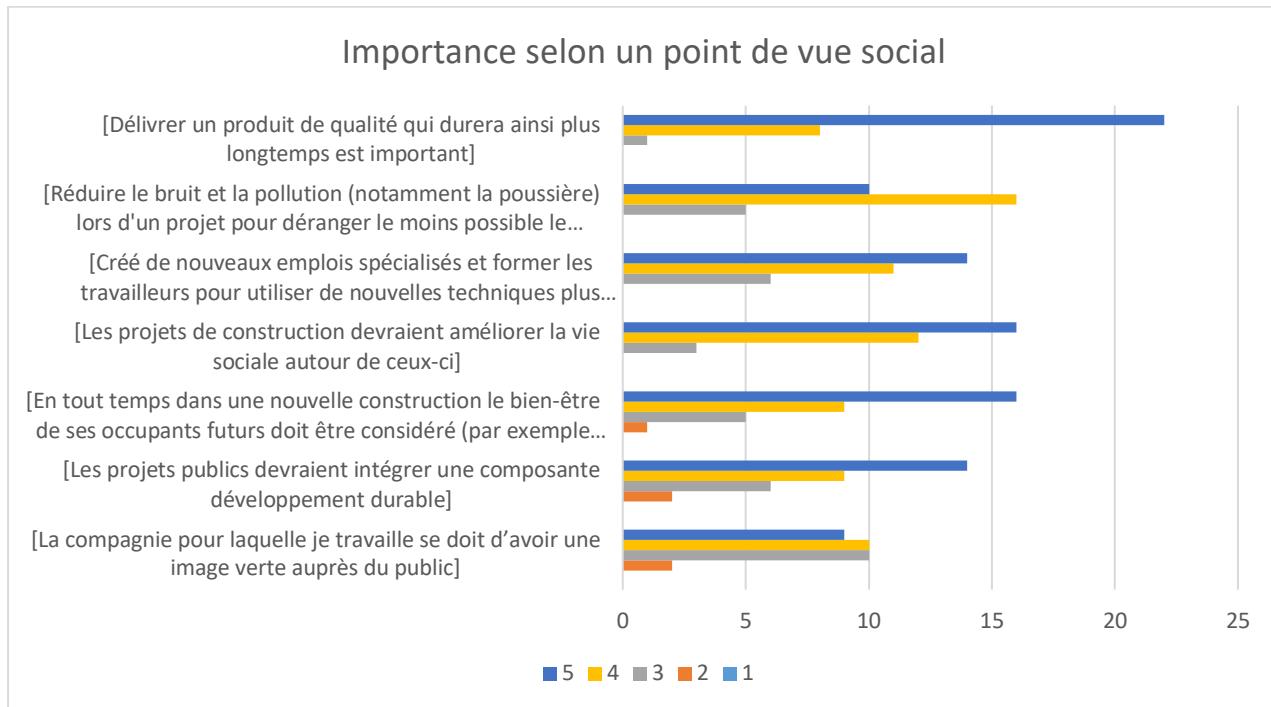


Figure G-11 Résultats de l'importance selon l'aspect social

ANNEXE H CALCUL KMO

Mesure de l'adéquation de l'échantillonnage (KMO) des questions de la section B

KMO(A) : Connaissances générales

Overall MSA = 0.76

1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	9
0.61	0.70	0.73	0.85	0.75	0.76	0.86	0.72	0.70	0.73	0.75	0.85	0.72	0.83

KMO(B) : Connaissances techniques

Overall MSA = 0.71

2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2
0.84	0.72	0.82	0.68	0.65	0.67	0.70	0.58	0.64	0.68	0.66
5.3	6.1	6.2	6.3	7.1	7.2	7.3	7.4			
0.81	0.73	0.82	0.74	0.58	0.73	0.75	0.82			

KMO(C) : Importance accordée à la sphère économique du développement durable

Overall MSA = 0.65

10.1	10.2	10.7	10.8	10.9
0.57	0.63	0.77	0.68	0.60

KMO(D) : Importance accordée à la sphère environnementale du développement durable

Overall MSA = 0.68

11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8
0.70	0.69	0.77	0.66	0.73	0.58	0.56	0.80

KMO(E) : Importance accordée à la sphère sociale du développement durable

Overall MSA = 0.83

12.1	12.4	12.3	12.2	12.5	12.6	12.7
0.73	0.85	0.91	0.85	0.81	0.82	0.82

ANNEXE I CALCUL D'ACP

Les tableaux suivants présentent les différents résultats d'analyse ACP avec rotation varimax pour les 5 différentes catégories à l'études. Avec scaling

Analyse ACP #1 : connaissances sur le DD et l'EC				
Standard deviations (1, .., p=4): [1] 1.6542387 0.7889730 0.6229434 0.5029489				
Rotation (n x k) = (4 x 4):				
	CP1	CP2	CP3	CP4
Question 1.4	0.5285673	- 0.3712580	0.12900213	-0.7524244
Question 1.7	0.4933595	0.4148146	-0.76446570	0.0108353
Question 1.12	0.5004951	-0.5813538	0.01663717	0.6412921
Question 9	0.4761487	0.5934004	0.63140625	0.1499483
Importance of components				
Standard deviation	1.6542	0.7890	0.62294	0.50295
Proportion of Variance	0.6841	0.1556	0.09701	0.06324
Cumulative variance	0.6841	0.8397	0.93676	1.00000

Analyse ACP #2 : Connaissance sur les techniques de construction durables					
Standard deviations (1, .., p=5): [1] 1.7741488 1.0160466 0.5942336 0.5035107 0.4619619					
Rotation (n x k) = (5 x 5):					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Question 2.2	0.3945045	0.5908967	-0.560090159	0.06408781	-0.42118758
Question 2.4	0.4356213	0.5053073	0.379519423	0.11747553	0.63012942
Question 5.3	0.4926360	-0.2379842	-0.008388147	-0.83694324	0.01135673
Question 6.2	0.4178428	-0.5340516	-0.493797043	0.40764995	0.36080782

Question 7.4	0.4871524	-0.2316419	0.546221695	0.33976432	-0.54334765
Importance of components					
Standard deviation	1.7741	1.0160	0.59423	0.5035	0.46196
Proportion of Variance	0.6295	0.2065	0.07062	0.0507	0.04268
Cumulative variance	0.6295	0.8360	0.90661	0.9573	1.00000

Analyse ACP #3 : Importance de l'aspect économie du DD				
Standard deviations (1, .., p=4): [1] 1.4849153 0.9407100 0.7090068 0.6382794				
Rotation (n x k) = (4 x 4):				
	CP1	CP2	CP3	CP4
Question 10.2	-0.5018625	0.4568047	0.6495520	0.3428493
Question 10.7	-0.4822033	0.5524696	-0.5504581	-0.3990654
Question 10.8	-0.5203035	-0.4325099	-0.4178596	0.6063109
Question 10.9	-0.4948720	-0.5468473	0.3169723	-0.5963122
Importance of components				
Standard deviation	1.4849	0.9407	0.7090	0.6383
Proportion of Variance	0.5512	0.2212	0.1257	0.1018
Cumulative variance	0.5512	0.7725	0.8982	1.0000

Analyse ACP #4 : Importance de l'aspect environnemental du DD				
Standard deviations (1, .., p=4): [1] 1.5616442 0.9632475 0.5854281 0.5391619				
Rotation (n x k) = (4 x 4):				
	CP1	CP2	CP3	CP4
Question 11.1	0.4937131	-0.5137234	0.58099745	0.39341784
Question 11.3	0.5306280	-0.3388505	-0.77601377	0.03764075

Question 11.5	0.5591511	0.2331272	0.24380910	-0.75733674
Question 11.8	0.4025312	0.7529411	-0.02831463	0.51985253
Importance of components				
Standard deviation	1.5616	0.9632	0.58543	0.53916
Proportion of Variance	0.6097	0.2320	0.08568	0.07267
Cumulative variance	0.6097	0.8416	0.92733	1.00000

Analyse ACP #5 : Importance de l'aspect social du DD						
Standard deviations (1, .., p=6): 1.9078887 0.8742648 0.7716721 0.6609972 0.5739398 0.4835491						
Rotation (n x k) = (6 x 6):						
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Question 12.2	-0.4116280	-0.28530454	0.4955489	-0.32523360	0.6099311	-0.16063046
Question 12.3	-0.3459151	-0.52473045	-0.7634628	-0.07755012	0.0726190	-0.10410441
Question 12.4	-0.4559275	-0.02278309	0.2326660	0.19383444	-0.5662220	-0.61587212
Question 12.5	-0.4515347	-0.24005466	0.2156446	0.30622973	-0.2348582	0.73692104
Question 12.6	-0.3892871	0.51381210	-0.1532863	-0.69102455	-0.2157181	0.19211124
Question 12.7	-0.3841968	0.56666665	-0.2177685	0.52853166	0.4476724	-0.06404925
Importance of components						
Standard deviation	1.9079	0.8743	0.77167	0.66100	0.5739	0.48355
Proportion of Variance	0.6067	0.1274	0.09925	0.07282	0.0549	0.03897
Cumulative variance	0.6067	0.7341	0.83331	0.90613	0.9610	1.00000

ANNEXE J SCORE DES CP GARDÉS

A1	B1	B2	C1	D1	E1
-1.314131787621	-1.6935638226307	-0.29254817049561	0.468515008179187	-0.494919400416444	1.60581682085177
1.7015805458189	-3.20576760554412	-0.199223610372263	2.209207680419	1.90431794795931	2.18979306325569
1.62810887551499	1.26048094177504	-0.512073447087659	-0.22597011621289	-0.616762028124475	-1.76346523796876
3.50673484356966	3.24432016841198	0.507510708244548	0.898076653686054	1.13807897740074	1.75973546529867
0.0658843103900594	0.207880167111508	-0.879898265342105	0.248638974832575	-2.11951989956462	0.913420935435784
1.38154912652837	0.222053132627232	-2.14447013953263	-0.115339117649081	1.90431794795931	0.793341907751628
-1.70055816190561	-2.45553588240766	-0.561647950154517	-2.66114791284479	-3.13784200420826	-3.12794531556142
-1.42631528338	-0.265847186398935	-0.105935522132291	-0.22597011621289	-0.616762028124475	-0.779054696425727
-2.21568709993571	-0.0848404575619837	0.908248154727724	-0.875407795066369	-3.53406471950022	-2.87196462742635
-1.44850804084861	-0.931591762853726	-0.0234483908367034	1.04011346498146	-1.18684439430031	1.62383380484776
-1.44850804084861	0.384945961751842	1.07367554573421	2.209207680419	1.90431794795931	2.18979306325569
0.995122752243758	-0.254885312546709	0.523114922280427	-1.96666278845271	0.0974599192582487	-2.14588255311189
-1.37848306949374	-2.05849627313499	0.515240768779793	-1.31722510959923	1.0078384710237	0.98849016583835
-0.675655292279389	1.70620308334232	1.23388302311726	-1.53710114294584	-0.442902377240606	-3.18953969229073
-0.337061131881039	2.08131894491054	1.05267085322614	-0.305874586103729	-0.168522289656672	1.62383380484776
-0.997730384691251	2.467396680331	1.50050912774773	2.209207680419	1.90431794795931	1.51135127175512
-0.337061131881039	-0.640963047967162	0.0752766477588357	-0.875407795066369	-0.168522289656672	-0.899133724109883
-2.15133581806296	-2.43361213470321	0.69645293867092	1.59256177807813	-0.472622446917585	0.945392013347192
2.73388209500044	1.81582506939193	0.318424384852787	-2.08954945604251	0.293616523640977	-2.14588255311189
1.15513846188902	2.30211984258635	-0.773299073245932	-1.31722510959923	1.0078384710237	1.03985756244384
0.452310684674669	1.16264791262111	0.0831508012594697	-2.66114791284479	-3.13784200420826	-4.54877105438538
0.564494180433675	-0.265068723610646	-0.103461847103849	0.898076653686054	-0.616762028124475	-0.0686418270137479
-1.8292607256511	-3.20576760554412	-0.199223610372263	-0.22597011621289	1.90431794795931	0.763718608933722
-0.723487506165648	-1.11629594730935	1.79605055027027	2.209207680419	0.0974599192582487	1.19377620689074
-0.771319720051907	-0.929986217021977	-0.970259550138327	-0.525750619450341	1.90431794795931	-1.60954659352186
-0.771319720051907	-0.16563014862497	-1.6454972547526	0.501306784691792	0.597716680901889	-1.74764260520201
1.88015899657198	2.00910711907975	0.0723133724317104	1.55977000156553	1.31193862828461	2.18979306325569
1.99234249233099	1.73581384111723	-2.2328473495991	-1.31722510959923	-1.38300099868304	-0.469076126152863
-1.76490944377835	-0.740401622952838	1.61731205540759	-0.875407795066369	-0.168522289656672	1.20538252171266
3.50673484356966	1.91682056995419	-1.21866367273908	0.865284877173448	-0.616762028124475	0.639423263304729
-0.272709850008291	-2.06867968419892	-0.111336000604483	2.209207680419	1.90431794795931	2.18979306325569

Valeur des PC1 pour tous et PC2 pour B. Note que C1 et E1 ont été multiplié par -1.

ANNEXE K RÉSULTATS DES RÉGRESSIONS PROBIT

1. Modèles avec données brutes

$$P(D_1 = 1) = \Phi (\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_t + \beta_3 Imp_{ec} + \beta_4 Imp_{en} + \beta_5 Imp_{so})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.20858	0.4352
β_2	0.64739	0.0559 .
β_3	-0.20134	0.5940
β_4	-0.02408	0.9626
β_5	-0.15433	0.7993

$$P(D_2 = 1) = \Phi (\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_t + \beta_3 Imp_{ec} + \beta_4 Imp_{en} + \beta_5 Imp_{so})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.49559	0.0522 .
β_2	-0.04401	0.8165
β_3	-0.27637	0.3749
β_4	-0.84936	0.0880 .
β_5	0.79465	0.1801

$$P(D_1 = 1) = \Phi (\beta_0 + \beta_1 Co_g)$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.2968	0.1435

$$P(D_2 = 1) = \Phi (\beta_0 + \beta_1 Co_g)$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.3813	0.0644 .

$$P(D_1 = 1) = \Phi (\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_4 Imp_{en})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.3312	0.114

β_4	-0.2234	0.490
-----------	---------	-------

$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_4 Imp_{en})$
--

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.4314	0.0428 *
β_4	-0.4093	0.2023

2. Modèles avec variables transformées selon l'ACP

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_{t1} + \beta_3 Co_{t2} + \beta_4 Imp_{ec} + \beta_5 Imp_{en} + \beta_6 Imp_{so})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.1280	0.6033
β_2	0.1973	0.3729
β_3	-0.5067	0.1233
β_4	0.1539	0.6284
β_5	-0.4327	0.0799 .
β_6	0.2170	0.3735

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_{t1} + \beta_3 Co_{t2} + \beta_4 Imp_{ec} + \beta_5 Imp_{en} + \beta_6 Imp_{so})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.8685	0.0120 *
β_2	-0.3881	0.1138
β_3	0.6511	0.0931 .
β_4	0.1235	0.6708
β_5	-0.6662	0.0163 *
β_6	0.3775	0.1593

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g)$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.2606	0.0842 .

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g)$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.2461	0.102

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_{t1} + \beta_3 Co_{t2})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.06673	0.7579
β_2	0.18131	0.3608
β_3	-0.43211	0.1385

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_2 Co_{t1} + \beta_3 Co_{t2})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.5533	0.0271 *
β_2	-0.2727	0.1758
β_3	0.4494	0.1183

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_4 Imp_{ec} + \beta_5 Imp_{en} + \beta_6 Imp_{so})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_4	0.009121	0.972
β_5	-0.300545	0.145
β_6	0.211920	0.341

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_4 Imp_{ec} + \beta_5 Imp_{en} + \beta_6 Imp_{so})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_4	0.1153	0.6375
β_5	-0.3952	0.0544 .
β_6	0.2615	0.2199

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_4 Imp_{ec} + \beta_5 Imp_{en} + \beta_6 Imp_{so})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.34390	0.0422 *
β_4	0.07832	0.7802
β_5	-0.42858	0.0727 .
β_6	0.20025	0.4060

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_4 Imp_{ec} + \beta_5 Imp_{en} + \beta_6 Imp_{so})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.3894	0.0367 *
β_4	0.1978	0.4445
β_5	-0.5299	0.0260 *
β_6	0.2874	0.2093

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en})$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.3120	0.0501 .
β_5	-0.2224	0.1920

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Impen)$$

	Estimate	Pr(> z)	
β_1	0.2905	0.0651 .	
β_5	-0.2073	0.1914	---

ANNEXE L RÉGRESSIONS AVEC LES VARIABLES MODÉRATRICES

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + cie)$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.2992	0.0875 .
β_5	-0.2008	0.2635
cie1	-1.1610	0.0456 *

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + cie)$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.3188	0.0482 *
β_5	-0.2268	0.1619
cie1	0.4723	0.4062

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + etu)$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.30572	0.103
β_5	-0.22347	0.193
etu1	-0.03621	0.953

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + etu)$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.09429	0.6227
β_5	-0.24179	0.1454
etu1	-1.45175	0.0161 *

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + reg)$$

	Estimate	Pr(> z)

β_1	0.3128	0.0504 .
β_5	-0.2141	0.2196
reg1	-0.1113	0.8319

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + reg)$$

	Estimate	Pr(> z)
β_1	0.3218	0.054 .
β_5	-0.2432	0.134
reg1	0.4738	0.352

ANNEXE M TEST CHI2 SUR LES VARIABLES MODÉRATRICES

Tester les variables modératrices selon Chi2 test

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + cie)$$

Chi-squared test: X2 = 4.0, df = 1, P(> X2) = 0.046

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + cie)$$

Chi-squared test: X2 = 0.69, df = 1, P(> X2) = 0.41

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + etu)$$

Chi-squared test: X2 = 0.0034, df = 1, P(> X2) = 0.95

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + etu)$$

Chi-squared test: X2 = 5.8, df = 1, P(> X2) = 0.016

$$P(D_1 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + reg)$$

Chi-squared test: X2 = 0.045, df = 1, P(> X2) = 0.83

$$P(D_2 = 1) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 Co_g + \beta_5 Imp_{en} + reg)$$

Chi-squared test: X2 = 0.87, df = 1, P(> X2) = 0.35

ANNEXE N TABLEAU « POWER & FUEL »

Voltage	415 V	Kw rating	FLA	kW/hr @ 80% of FLA
Feeder	415 V	0,56	1,60	0,81
		0,56	1,60	0,81
Conveyor	415 V	2,5	0,90	0,46
Overband magnet	415 V	0,56	1,60	0,81
HIM	415 V	0,25	0,90	0,46
K300	415 V	7,5	18	9,14
TSS	415 V	1,5	3,4	1,73
		1,5	3,4	1,73
ECS	415 V	2,2	5	2,54
		2,2	5	2,54
Conveyor	415 V	2,5	0,90	0,46
Drier drum	414 V	7,5	18	9,14
Burner	415 V	1,5	3,4	1,73
Air compressor	415 V	3	6,5	3,30
		1,5	3,40	1,73
Conveyor	415 V	1,5	3,4	1,73
Gyratory Screener	415 V	2,2	5	2,54
K200-2	415 V	5,5	8	4,06
		5,5	8	4,06
Tube feeder	415 V	1,1	2,6	1,32
	415 V	1,1	2,6	1,32
Screw conveyor	415 V	0,5	1,3	0,66
Dust filter	415 V	11	22	11,18
Raw material feeder, vibrator	415 V	2,20	5,00	2,54
Raw material Transfer conveyor	415 V	2,20	5,00	2,54
Screw feeder	415 V	2,20	5,00	2,54
Ball mill	415 V	55,00	96,00	48,76
Dust collector-2	415 V	15,00	28,00	14,22
Powder transfer device	415 V	5,50	11,00	5,59
Powder bridge prevention vibrator	415 V	0,56	1,60	0,81
Particle size sorter	415 V	3,70	8,00	4,06
Classifier	415 V	11,00	22,00	11,18