

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

SIMULATION D'UNE CHAÎNE DE VALEUR CIRCULAIRE DANS LE DOMAINE DU
BALAYAGE DE RUE PRINTANIER

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA GESTION

PAR
FLORENCE BLOUIN

JANVIER 2022

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

École de gestion

Ce mémoire intitulé :

Simulation d'une chaîne de valeur circulaire dans le domaine du balayage de rue
printanier

Présenté par : Florence Blouin

En vue de l'obtention du grade de : Maître ès sciences

A été dirigé par :

Jean-François Audy, Ph.D.

Directeur de recherche

Amina Lamghari, Ph.D.

Codirectrice de recherche

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Jean-François Audy, Ph.D.

Directeur de recherche

Cécile Fonrouge, Ph.D.

Évaluatrice interne

Mathias Glaus, Ph.D.

Évaluateur externe

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire par article a été possible grâce à l'appui de différentes personnes.

Tout d'abord, je voudrais remercier mon directeur de recherche le Professeur Jean-François Audy pour son soutien dans tous mes projets, sa confiance, son implication ainsi que ses précieux conseils qui ont guidé mes réflexions dans ce processus de recherche.

Je tiens également à remercier ma codirectrice de recherche la Professeure Amina Lamghari pour son accompagnement tout au long de ce projet ainsi que pour ses conseils de rédaction.

De plus, pour leurs commentaires constructifs, j'aimerais remercier les membres du jury la Professeure Cécile Fonrouge ainsi que le Professeur Mathias Glaus.

J'aimerais aussi témoigner ma gratitude aux divers partenaires du milieu pratique (Arseno Balayage, le ministère des Transports du Québec, la ville de Trois-Rivières, Innofibre et Biopterre) pour leur précieuse collaboration dans le cadre de nombreux échanges.

Enfin, ce projet a été réalisé avec le soutien des Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies grâce à une bourse de maîtrise en recherche (dossier #273480).

SOMMAIRE

Chaque hiver, dans les pays nordiques, des abrasifs sont achetés et épandus par les administrations publiques sur le réseau routier pour augmenter le niveau de sécurité. Lors des opérations de nettoyage printanier, une portion de ces abrasifs est collectée par balayage mécanique puis est essentiellement enfouie. Afin de contrer les effets négatifs monétaires et environnementaux de l'enfouissement, une partie des matières résiduelles collectées pourrait être réemployée en abrasifs créant de cette manière une chaîne de valeur circulaire. Néanmoins, bien que la faisabilité technique d'un conditionnement des abrasifs récupérés pour un réemploi lors des saisons hivernales subséquentes soit démontrée, aucune étude n'a évalué les enjeux complémentaires monétaires et environnementaux potentiels d'une transition du modèle linéaire actuel vers un modèle économique circulaire. Ce projet de recherche propose donc un modèle de simulation représentant les deux systèmes de chaîne de valeur dans le domaine du balayage de rue printanier permettant de vérifier la faisabilité économique ainsi que l'impact environnemental qu'engendre la mise en œuvre de cette stratégie. Exécuté sur une période de cinq ans, cet outil a permis l'analyse de la performance du scénario linéaire comparativement à une chaîne de valeur circulaire selon divers indicateurs relatifs aux flux de matières, aux coûts ainsi qu'aux émissions de gaz à effet de serre. Deux cas d'étude associés au réseau routier sous la responsabilité du ministère des Transports du Québec, principalement en contexte autoroutier, ont permis de quantifier les gains résultants d'un modèle économique circulaire. Le premier cas d'étude concerne la portion du réseau routier provincial desservi par le centre de services de Trois-Rivières. Les résultats indiquent que l'intégration d'une stratégie d'économie circulaire dans cette filière permet d'élaborer un scénario viable. En effet, à partir de la deuxième année d'exploitation, l'approche circulaire permettrait de réaliser en moyenne 4,3 % d'économies monétaires par rapport à l'approche linéaire actuelle tout en réduisant légèrement le bilan carbone des opérations de 0,6 %. Le second cas d'étude implique des données collectées

auprès de l'ensemble des centres de services du ministère des Transports du Québec afin d'étendre la portée des résultats avec un cas d'étude générique d'un centre de services de cette province. Toujours en ciblant le balayage effectué sur le réseau routier provincial, les résultats moyens associés à ce cas d'étude démontrent que le détournement de 96,1 % des balayures de rue collectées et la revalorisation d'une partie en abrasifs d'hiver permettent d'engendrer un gain monétaire de 7,2 % ainsi qu'une réduction du bilan carbone de 3,3 % par rapport au scénario linéaire actuel. Par conséquent, la mise en œuvre d'une chaîne de valeur circulaire devrait clairement être une stratégie envisageable par le ministère des Transports du Québec dans le domaine du balayage de rue printanier considérant qu'elle génère des avantages autant économiques qu'environnementaux. Évidemment, l'intégration des principes de l'économie circulaire oblige une nouvelle façon d'opérer ce qui implique cependant la réalisation de travaux additionnels afin de supporter la transition de manière avisée.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	II
SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	IX
1. INTRODUCTION	1
2. ARTICLE SCIENTIFIQUE	7
2.1 Résumé et mots clés	7
2.2 Introduction	7
2.3 Contexte général	11
2.4 Modèle de simulation	13
2.4.1 Étude de cas	13
2.4.2 Collecte et traitement des données	15
2.4.3 Paramètres de la simulation	21
2.4.3.1 Équations du modèle de la chaîne de valeur linéaire	22
2.4.3.2 Équations du modèle de la chaîne de valeur circulaire	23
2.4.4 Méthode d'analyse des scénarios	26
2.4.5 Validation et vérification du modèle	27
2.5 Résultats et discussion	28
2.5.1 Comparatif des deux scénarios de chaîne de valeur	31
2.5.2 Analyse de sensibilité	36
2.6 Conclusion	39

3. DISCUSSION	41
3.1 Simulation d'un cas d'étude générique	41
3.2 Résultats	46
3.3 Analyse	49
3.4 Limites des travaux et perspectives de recherche futures	51
4. CONCLUSION.....	57
RÉFÉRENCES.....	60
ANNEXE I - MODÈLE PRÉSENTÉ DANS LE LOGICIEL DE SIMULATION SIMIO (EXEMPLE POUR LA DEUXIÈME ANNÉE).....	65
ANNEXE II - CENTRE DE SERVICES DU MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Données d'entrée du modèle de simulation des chaînes de valeur linéaire et circulaire.....	17
Tableau 2	Liste exhaustive des paramètres utilisés dans le calcul des différentes mesures de performance.....	19
Tableau 3	Demande annuelle globale en abrasifs.....	28
Tableau 4	Variation des flux de matières engendrée par une transition vers l'économie circulaire.....	32
Tableau 5	Variation des coûts engendrée par une transition vers l'économie circulaire.....	33
Tableau 6	Variation des émissions de gaz à effet de serre engendrée par une transition vers l'économie circulaire.....	35
Tableau 7	Données d'entrée du modèle de simulation des chaînes de valeur linéaire et circulaire (cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec).....	44
Tableau 8	Liste exhaustive des paramètres utilisés dans le calcul des différentes mesures de performance (cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec).....	45
Tableau 9	Demande annuelle globale en abrasifs (cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec)	47
Tableau 10	Variation des flux de matières engendrée par une transition vers l'économie circulaire (cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec).....	47
Tableau 11	Variation des coûts engendrée par une transition vers l'économie circulaire (cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec)	48

Tableau 12	Variation des émissions de gaz à effet de serre engendrée par une transition vers l'économie circulaire (cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec)	48
Tableau 13	Systèmes principaux du modèle de simulation et leur fonction.....	66
Tableau 14	Définition et rôle des processus intégrés dans les systèmes du modèle de simulation	67
Tableau 15	Centres de services du ministère des Transports du Québec selon leur région administrative.....	69

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Scénario linéaire (haut) et scénario circulaire (bas) de chaîne de valeur dans le domaine du balayage de rue printanier 12
Figure 2	Proportion des différents coûts par activité engendrés dans la chaîne de valeur linéaire (gauche) et dans la chaîne de valeur circulaire (droite).....29
Figure 3	Proportion des émissions de gaz à effet de serre par activité dans la chaîne de valeur linéaire (gauche) et dans la chaîne de valeur circulaire (droite).....30
Figure 4	Pourcentages des gains monétaires et environnementaux potentiels en fonction du taux de collecte des balayures engendrés par une transition vers l'économie circulaire.....38
Figure 5	Modèle de simulation dans le logiciel <i>SIMIO</i> 66
Figure 6	Processus intégrés dans les systèmes du modèle de simulation 66

1. INTRODUCTION

Le réseau routier de la province de Québec comprend 325 000 km de routes dont 31 000 km sont gérés par le ministère des Transports du Québec et incluent des autoroutes, des routes nationales, des routes régionales et des routes collectrices (MTQ, 2021). Chaque année en viabilité hivernale, en moyenne un million de tonnes d'abrasifs de source minérale (sable et pierres concassées), dont près de 7 000 tonnes au centre de services de Trois-Rivières, sont achetées et y sont épandues lors des opérations d'entretien visant à assurer de bonnes conditions de circulation. La consommation annuelle d'abrasifs servant au déglacage des chaussées, selon les conditions hivernales variables, dépend du niveau de service requis. Ce dernier est déterminé par le ministère des Transports du Québec, pour chacun des types de routes, en fonction de la classification fonctionnelle du réseau et du débit de circulation journalier moyen (MTQ, 2015).

La majorité des abrasifs épandus durant l'hiver sont perdus dans l'environnement, principalement dans le sol des bordures de routes. Au printemps, la portion des abrasifs encore présente sur les voies routières pavées doit être collectée par balayage mécanique pour éviter de nuire à la sécurité des usagers. Sujette à une stricte réglementation environnementale, les balayures récupérées lors de ces opérations sont essentiellement acheminées dans des lieux d'enfouissement technique.

Les coûts engendrés annuellement pour la disposition des matières résiduelles des abrasifs sont non négligeables. De plus, les effets négatifs environnementaux de l'enfouissement associés au modèle linéaire actuel (dans lequel les abrasifs sont annuellement achetés, utilisés, puis jetés) ne cadrent pas dans une stratégie de développement durable. Les préoccupations environnementales sont désormais une condition intégrée dans les critères d'approvisionnement et les abrasifs épandus sur le réseau routier en hiver représentent une ressource naturelle non renouvelable. Ces constats poussent le ministère des Transports du Québec à considérer le réemploi

d'une partie des matières collectées lors des opérations de balayage de rue printanier, créant de cette manière une chaîne de valeur circulaire. Il se retrouve néanmoins confronté à un problème de décision ; la mise en œuvre d'un modèle économique circulaire dans cette filière permet-elle de minimiser les impacts financiers à long terme tout en améliorant le bilan carbone en comparaison au modèle linéaire actuel ?

Une matière résiduelle représente tout résidu rejeté qui est ensuite mis en valeur ou éliminé (Gouvernement du Québec, 2021). Les matières résiduelles peuvent être divisées en de nombreuses catégories, mais les principales sont les ordures ménagères, les résidus provenant des industries, des commerces et des institutions ainsi que les résidus de construction, de rénovation et de démolition (RECYC-QUÉBEC, 2021). Afin de distinguer les matières premières recyclables entre elles, Environnement Canada a élaboré différents critères classés en cinq grandes catégories : l'origine, l'usage et la destination, le degré et le type de transformation requis, la production éventuelle de résidus et les risques potentiels environnementaux, la conformité aux normes et au contrôle de la qualité ainsi que la valeur économique et la viabilité commerciale de la matière (Gouvernement du Canada, 2013). Ce processus de caractérisation permet d'améliorer la gestion des matières résiduelles en guidant les parties prenantes à trouver des pistes de solution pour les détourner de l'enfouissement afin de réduire les coûts d'exploitation tout en générant des bénéfices environnementaux (BOMA Canada, 2016). La mise en valeur des matières résiduelles peut ensuite être effectuée notamment par l'économie circulaire qui consiste en un ensemble de stratégies pour la réduction de la consommation des ressources vierges et l'optimisation de leur utilisation (RECYC-QUÉBEC, 2020). De nombreuses approches existent afin de concevoir des stratégies : l'écoconception, la consommation et l'approvisionnement responsable, l'optimisation des opérations, l'économie collaborative, la location, l'entretien et la réparation, le don et la revente, le reconditionnement, l'économie de fonctionnalité, l'écologie industrielle, le recyclage et le compostage ainsi que la valorisation (RECYC-QUÉBEC, 2019). Les organisations peuvent les sélectionner et les adapter en fonction de leurs besoins.

Évidemment, la gestion responsable des matières résiduelles par le biais de telles stratégies doit être privilégiée à l'enfouissement, ce qui représente un défi. Dans le cadre de ce projet de recherche, celle principalement étudiée est le recyclage. Dans une chaîne de valeur, cette stratégie consiste en l'utilisation d'une matière récupérée en remplacement d'une matière vierge (RECYC-QUÉBEC, 2019).

Comme toute matière résiduelle, les balayures de rue collectées au printemps doivent être caractérisées afin d'obtenir un portrait statistique de leur nature. Selon le rapport sectoriel de RECYC-QUÉBEC (2021) dans le cadre du mandat du BAPE sur l'état des lieux et la gestion des résidus ultimes, la quantité moyenne (2016-2019) des résidus de balayures de rue représente environ 0,4 % du total des matières résiduelles éliminées (excluant les boues d'épuration) dans la province de Québec. D'autre part, bien que les quantités de balayures de rue récupérées par la très grande majorité des municipalités ne soient pas recensées, la ville de Sherbrooke a estimé en 2013 la proportion de balayures éliminées par rapport au total des matières résiduelles générées d'origine résidentielle à 15 % (Ville de Sherbrooke, 2016). Considérées comme des matières non dangereuses et majoritairement inorganiques, les balayures sont composées principalement des abrasifs épandus et de sel de voirie. Dans une plus faible proportion, les balayures sont également composées de matières organiques ainsi que d'autres déchets dont du verre, du métal et du plastique. Évidemment, les balayures peuvent aussi contenir certains contaminants tels que des métaux lourds, des hydrocarbures pétroliers et des chlorures (FCM, 2005). Au Québec, les abrasifs épandus sur le réseau routier en hiver doivent être conformes aux exigences de la norme 14401 définie par le ministère des Transports, mobilité durable et électrification des transports (MTMDET, 2016). Le réemploi des balayures de rue pour un usage en viabilité hivernale nécessite le respect de critères normatifs physiques et géotechniques de l'abrasif vierge à substituer. En premier lieu, les abrasifs doivent être conformes au fuseau granulométrique normalisé pour garantir une adhérence adéquate sur les routes et éviter les agglomérations. Ils doivent également avoir une certaine teneur en eau afin d'empêcher le sel qui y est ajouté

ultérieurement de se dissoudre avant d'amorcer le déglacage des chaussées lors de l'épandage et finalement, les abrasifs doivent réussir le test d'attrition Micro-Deval. De plus, bien que non normatifs, certains critères sont communément admis dans le milieu municipal dont le coefficient d'écoulement des abrasifs permettant d'estimer l'angularité des granulats par rapport à celle de l'abrasif vierge et la teneur en substances organiques de l'abrasif, puisque leur présence diminue notamment l'adhérence. L'étude de Bouchard et al. (2021) démontre néanmoins qu'il existe un fort potentiel empirique de valorisation des balayures de rue à la suite d'un conditionnement suivi d'une caractérisation chimique pour déterminer les usages autorisés. Par conséquent, même si les abrasifs épandus subissent une usure par abrasion sur les routes en hiver réduisant nécessairement leur granulométrie, lorsque les particules grossières des balayures collectées sont retirées par triage, le sable récupéré peut être recyclé et réemployé lorsqu'il est combiné avec une certaine quantité d'abrasifs vierges. Les abrasifs usagés ainsi fabriqués respectent tous les critères de la norme en vigueur sur la qualité des abrasifs pour l'épandage en viabilité hivernale (Blouin et al., 2022).

Nonobstant ces premiers constats encourageants, l'intégration des principes de l'économie circulaire requiert une analyse de la performance de la chaîne de valeur du scénario actuel (linéaire) comparativement à celui envisagé (circulaire) afin de vérifier la faisabilité économique et l'impact environnemental de ce nouveau modèle économique. En effet, l'évaluation des bénéfices de la mise en œuvre d'une économie circulaire doit être réalisée à l'échelle globale, soit de la chaîne de valeur (Winans et al., 2017), même si ce type d'études est rarement réalisé selon un constat de la revue de la littérature de Merli et al. (2018). Porter (1986) définit la chaîne de valeur comme un « enchaînement d'activités permettant d'aboutir à un produit valorisable sur le marché ». Dans le secteur ciblé dans cette recherche, elle représente donc l'ensemble des activités interreliées qui permettent de reconditionner les balayures collectées en abrasifs pouvant être épandus en viabilité hivernale. En plus de l'analyse du processus afin d'identifier les activités ayant un impact sur les coûts et le

bilan carbone, l'étude de la chaîne de valeur sert aussi à repenser les flux de matières ainsi que les interactions entre les parties prenantes.

Seuls quelques documents existent issus d'initiatives locales de certaines municipalités (Barrie, Edmonton, Granby, Québec, Sherbrooke et Victoriaville) pour la valorisation des balayures de rue à la suite de leur collecte, mais très peu de recherches structurées ont été effectuées sur le sujet. Bien que dans la littérature quelques auteurs (Donovan, 2005 ; Pulley et Baird, 2010 ; Mokwa et Foster, 2013) ont réalisé des travaux sur le réemploi des balayures de rues comme abrasifs en viabilité hivernale, ces études n'ont validé que la faisabilité technique du potentiel de réemploi des matières collectées lors du balayage de rue printanier. Aucune n'a tenu compte des enjeux financiers et environnementaux inévitablement associés à la mise en œuvre d'une chaîne de valeur circulaire.

Ce mémoire sous forme d'article scientifique présente ainsi des contributions novatrices à cet enjeu notamment par la proposition d'un modèle de simulation comme outil d'analyse de la performance afin de comparer un modèle économique linéaire à un modèle circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. L'étude des deux scénarios en fonction de divers indicateurs de performance concernant les flux de matières, les coûts et les émissions de gaz à effet de serre permet ainsi de prédire les impacts économiques et environnementaux de l'intégration d'une chaîne de valeur circulaire dans cette filière. Afin d'évaluer les avantages quantitatifs de la transition vers une économie circulaire tout en contribuant à la prise de décisions face aux multiples variables associées aux opérations logistiques de balayage de rue printanier, des tests numériques ont été réalisés sur deux cas d'étude ciblant le réseau routier provincial sous la responsabilité du ministère des Transports du Québec. Le premier cas d'étude cible les opérations de balayage effectuées sur la portion de ce réseau routier qui est desservi par le centre de services de Trois-Rivières. Le second, dans le but d'étendre la portée des résultats, constitue un cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec dont les données ont été obtenues par le biais d'un sondage réalisé en collaboration avec le ministère des Transports du

Québec auprès de l'ensemble de ses centres de services. Ces cas d'études spécifiques en contexte autoroutier ont été sélectionnés en raison de leur accessibilité, de l'aspect prometteur de la démarche et des travaux de conditionnement qui ont été réalisés en collaboration avec ces partenaires.

Ce mémoire est organisé comme suit : l'insertion de l'article scientifique à la deuxième section, une discussion sur la signification et la portée des résultats obtenus en plus des limites des travaux à la troisième section, puis finalement, les conclusions tirées de la recherche ainsi que quelques perspectives de recherche futures à la quatrième section.

2. ARTICLE SCIENTIFIQUE

2.1 Résumé et mots clés

Les abrasifs épanchés en hiver sur le réseau routier doivent être retirés au printemps lors des opérations de balayage de rue avant d'être enfouis. Considérant les effets négatifs monétaires et environnementaux de l'enfouissement, la faisabilité technique d'un conditionnement des abrasifs récupérés pour un réemploi en viabilité hivernale est démontrée. Néanmoins, aucune étude n'a évalué les bénéfices potentiels d'une transition de l'actuelle chaîne de valeur linéaire vers une chaîne de valeur circulaire. Cet article propose un modèle de simulation afin d'analyser la performance du modèle linéaire comparativement à un modèle circulaire pour un cas d'étude en contexte autoroutier afin de vérifier la faisabilité économique et l'impact environnemental de cette stratégie. Les résultats indiquent que l'intégration de l'économie circulaire dans cette filière permettrait de réaliser en moyenne 4,3 % d'économies monétaires par rapport à l'approche linéaire actuelle tout en réduisant les émissions de gaz à effets de serre de 0,6 %.

Les mots clés associés à cet article sont les suivants : simulation des systèmes, économie circulaire, chaînes logistiques, valorisation des matières résiduelles et gestion des opérations.

2.2 Introduction

Les impacts environnementaux négatifs de l'économie linéaire (extraire, fabriquer, consommer et jeter), prédominante dans le système économique actuel, ne sont plus à démontrer. La littérature fait constamment état de l'incidence du modèle linéaire sur la rareté croissante des ressources naturelles (Sørensen, 2018). Ainsi, les principes de

L'économie circulaire soutiennent la mise en œuvre de scénarios viables et durables permettant de faire face à ces enjeux contemporains (Sariatli, 2017). Le concept de l'économie circulaire est d'ailleurs considéré comme un nouveau paradigme économique en pleine émergence (Korhonen et al., 2018). Selon Werning et Spinler (2020), son intégration permet de diminuer les déchets et, par conséquent, mener à une situation souhaitable à la fois pour les entreprises, l'économie et l'environnement. En effet, la création d'un cycle de production en boucle pour réutiliser certaines ressources permet d'augmenter leur utilisation et leur disponibilité tout en amenant la redéfinition des rôles des parties prenantes (Sariatli, 2017). Une chaîne de valeur circulaire implique donc nécessairement une gestion des flux de matières, une amélioration du service et un modèle économique accessible (Nestorovic et Radicevic, 2019). En ce sens, Pagoropoulos et al. (2017) ont démontré que les technologies numériques peuvent soutenir une transition vers une économie circulaire principalement par le biais de l'optimisation des flux de matières. Toutefois, bien que des avantages environnementaux soient inhérents à une démarche d'implantation d'un modèle économique circulaire, la dimension économique peut représenter un enjeu important à son implantation dans une organisation (Genovese et al., 2017). Davantage de travaux de recherche apparaissent également nécessaires afin de garantir que les impacts environnementaux associés à sa mise en œuvre contribuent à la durabilité (Korhonen et al., 2018). Évidemment, des bénéfices doivent être engendrés lors du passage de l'économie linéaire à l'économie circulaire et c'est pourquoi une quantification et un contrôle sont primordiaux (Esbensen et Velis, 2016).

Le cas particulier traité dans cet article concerne les matières résiduelles des abrasifs épandus en viabilité hivernale. Chaque année, dans les pays nordiques, des abrasifs de source minérale (sable et pierres concassées) sont achetés et épandus par les administrations publiques sur le réseau routier lors des opérations d'entretien visant à assurer de bonnes conditions de circulation. Au printemps, pour éviter de nuire à la sécurité des usagers, une portion des abrasifs épandus est collectée lors des opérations

de balayage de rue printanier. Sujette à une stricte réglementation environnementale, les balayures récupérées sont essentiellement enfouies. Afin de contrer les effets négatifs environnementaux et monétaires de l'enfouissement, une partie des matières résiduelles collectées pourrait être réemployée en abrasifs créant de cette manière une chaîne de valeur circulaire. Toutefois, l'intégration de l'économie circulaire dans cette filière requiert une analyse de la performance de la chaîne de valeur du scénario actuel (linéaire) comparativement à celui envisagé (circulaire). Cet article a donc pour objectif de proposer un modèle de simulation permettant de représenter les deux scénarios ; le but étant de vérifier la faisabilité économique et l'impact environnemental d'un nouveau modèle économique circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. Un cas d'étude en contexte autoroutier provincial desservi par un centre de services d'une ville de la province de Québec au Canada a été sélectionné pour fins de démonstration du modèle de simulation tout en permettant l'étude des chaînes de valeur en fonction des flux de matières, des coûts et des émissions de gaz à effet de serre.

Dans la littérature, plusieurs travaux suggèrent d'adopter une approche systémique et d'évaluer les bénéfices de la mise en œuvre de l'économie circulaire à l'échelle de la chaîne de valeur, soit en tenant compte des différents coûts d'activités, des options de revalorisation, des réglementations concernant les matières résiduelles, du taux de récupération, de l'utilisation des ressources vierges et du bilan carbone (Fulconis et Philipp, 2016 ; Cong et al., 2017 ; Genovese et al., 2017 ; Winans et al., 2017). Néanmoins, ce type d'études est rarement réalisé selon un constat de la revue de la littérature récente de Merli et al. (2018). Cet article contribue donc à combler ce vide dans la littérature en s'intéressant particulièrement au domaine du balayage de rue printanier dans les pays nordiques. Par ailleurs, peu d'articles font état de l'utilisation d'un modèle de simulation dans le cadre de l'implantation d'une économie circulaire. Parmi les plus récents, l'étude de Xu et al. (2018) porte sur la revalorisation du fumier d'élevage dans une entreprise de production d'électricité au biogaz, celle de Weber et al. (2020) sur une solution de revalorisation du gaspillage alimentaire associé à la

patate douce en éthanol ainsi qu'en boissons distillées, celle de Ye et al. (2020) sur une technologie de centrale électrique au charbon avec une incinération de déchets et celle de Nevrlý et al. (2021) sur une solution d'attribution des points de collecte des déchets en contexte municipal. Cependant, aucun travail n'a été identifié sur la simulation des gains potentiels générés par une économie circulaire dans laquelle les extrants reconditionnés d'une chaîne de valeur deviennent les intrants de cette même chaîne en remplacement de la matière vierge, comme c'est le cas dans le présent article. Concernant spécifiquement la recension des écrits dans le domaine du balayage de rue printanier tel qu'étudié dans cet article, Donovan (2005), Pulley et al. (2010) et Mokwa et Foster (2013) ont réalisé des travaux sur le réemploi des balayures de rues comme abrasifs en viabilité hivernale alors que Mokhbi et al. (2017) ont considéré une valorisation comme substitut à des matières premières dans les enrobés en infrastructure routière. Toutefois, les études susmentionnées ont validé la faisabilité technique du potentiel de la réutilisation des matières collectées lors du balayage de rue printanier sans tenir compte des enjeux complémentaires (financiers et environnementaux) pour la mise en œuvre de cette transition à l'échelle de la chaîne de valeur. Conséquemment, au meilleur de la connaissance des auteurs, il s'agit des premiers travaux avec le recours à la simulation comme outil d'analyse pour prédire les impacts économiques et environnementaux de l'intégration des principes de l'économie circulaire dans cette filière. L'article contribue ainsi à la recherche en ce sens en comparaison aux travaux précédemment réalisés.

Afin de vérifier la faisabilité économique ainsi que l'impact environnemental d'une économie circulaire dans cette filière, une représentation des deux systèmes de chaîne de valeur a été créée grâce au développement d'un modèle de simulation. Exécuté sur une période de cinq ans, cet outil a permis l'analyse de la performance et la comparaison du scénario linéaire actuel à une chaîne de valeur circulaire selon divers indicateurs relatifs aux flux de matières, aux coûts ainsi qu'aux émissions de gaz à effet de serre. Un cas d'étude en contexte autoroutier ancré dans la réalité d'une administration routière et d'un prestataire de services en balayage de rue a permis de

quantifier les gains résultants de l'approche circulaire par la réalisation de tests numériques. À l'issue de la simulation, il a été possible de démontrer que l'intégration de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier, causant le détournement ainsi que la revalorisation d'une partie des balayures collectées en abrasifs d'hiver, est une stratégie économiquement et environnementalement viable.

2.3 Contexte général

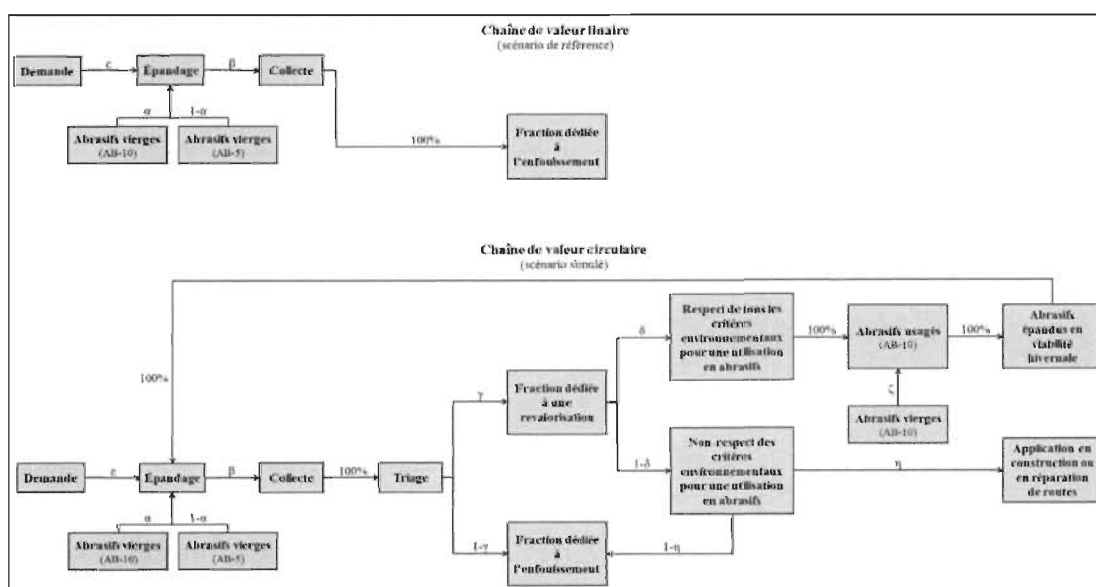
Le balayage de rue effectué au printemps dans les pays nordiques afin de retirer du réseau routier les abrasifs épandus lors de la saison précédente consiste en un processus qui est essentiellement identique, et ce, peu importe l'endroit où se déroulent les opérations. La description des deux systèmes de chaîne de valeur considérés à la Figure 1 a donc une portée générale.

Le scénario de référence représente le scénario actuel, soit la chaîne de valeur linéaire (voir Figure 1 – haut). Ce modèle débute avec l'achat à l'externe d'abrasifs vierges, soit du sable (AB-10) (α) et des petites pierres (AB-5) ($1-\alpha$), qui sont ensuite épandus en viabilité hivernale selon la demande (ϵ). Au printemps, le balayage de rue est effectué (β), suivi du transport des balayures collectées au lieu d'enfouissement ciblé. Une partie des abrasifs épandus est donc enfouie alors que le reste n'est tout simplement pas récupéré, étant perdu dans l'environnement principalement dans le sol des bordures de routes.

Le scénario simulé, quant à lui, représente la situation alternative envisagée, soit la chaîne de valeur circulaire (voir Figure 1 – bas). Ce scénario débute également avec l'achat à l'externe d'abrasifs vierges de type AB-10 (α) et AB-5 ($1-\alpha$) qui sont utilisés sur les routes en hiver en fonction de la demande (ϵ). Comme dans le modèle linéaire, une partie des abrasifs épandus n'est pas récupérée et une autre est collectée lors du balayage de rue printanier (β). Toutefois, plutôt que d'enfouir directement les

balayures collectées, elles sont acheminées à un centre de triage où elles sont séparées en deux catégories selon leur granulométrie. Le processus de triage permet ainsi de dissocier la fraction des balayures qui est admissible à une revalorisation (γ) de celle qui doit être acheminée au lieu d'enfouissement technique ($1-\gamma$). La portion de balayures revalorisables est ensuite redivisée en fonction des critères de la législation environnementale en place. De ce fait, le pourcentage de balayures de rue collectées respectant tous les critères environnementaux pour un réemploi en viabilité hivernale (δ) sert d'intrants à la fabrication d'abrasifs usagés en étant combiné selon une recette d'une part de balayures pour trois parts d'abrasifs vierges de type AB-10 (ζ). Le pourcentage de balayures restant ($1-\delta$), ne respectant pas l'ensemble des critères environnementaux pour un réemploi en abrasifs, est majoritairement éligible à une utilisation pour la construction ou la réparation d'infrastructures routières (η) alors qu'une faible proportion ($1-\eta$) est enfouie. Pour de plus amples détails sur le processus d'analyse et de caractérisation chimique des données afin de vérifier la faisabilité des alternatives de revalorisation des balayures collectées prévues dans la législation environnementale, voir l'article de Bouchard et al. (2021).

Figure 1
Scénario linéaire (haut) et scénario circulaire (bas) de chaîne de valeur dans le domaine du balayage de rue printanier



Les valeurs des données d'entrée qui correspondent aux flux de matières le long des chaînes de valeur linéaire et circulaire (voir Figure 1) dépendent du cas d'étude, soit du contexte où le balayage de rue est effectué. Différents facteurs peuvent donc influencer ces valeurs dont principalement le type de route où se déroulent les opérations (qui a une incidence sur le niveau de service requis ainsi que sur les caractéristiques physiques et chimiques des balayures collectées au printemps), les conditions hivernales et les normes environnementales.

2.4 Modèle de simulation

Un modèle de simulation est proposé permettant de vérifier la faisabilité économique tout en mesurant l'impact environnemental de la transition vers une chaîne de valeur circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. L'analyse de la performance du modèle linéaire actuel comparativement au modèle économique circulaire est effectuée en regard des flux de matières (demande en abrasifs vierges, quantité de balayures enfouies et quantité de balayures revalorisées en abrasifs usagés), des coûts (achat d'abrasifs vierges, opérations et enfouissement) et des émissions de gaz à effet de serre (production d'abrasifs vierges et opérations).

2.4.1 Étude de cas

Les données qui servent d'intrants au modèle de simulation présenté dans cet article ont été collectées par le biais d'une situation réelle en contexte autoroutier. L'étude de cas ciblée concerne des balayures de rue récupérées par un centre de services d'une ville de la province de Québec au Canada sur le réseau routier provincial qui comporte des autoroutes, des routes nationales, des routes régionales et des routes collectrices (MTQ, 2021). Cette recherche a été menée en collaboration avec des

partenaires du milieu public et privé, dont des administrations routières (gouvernement provincial et villes) ainsi qu'un prestataire de services en balayage de rue. Les deux scénarios de chaîne de valeur (linéaire et circulaire) ont été intégrés dans le modèle et ce dernier a été effectué sur une période de cinq ans afin d'évaluer l'effet en boucle des flux de matières engendré par l'intégration de l'économie circulaire. Dans le cadre de ce travail, seule l'avenue de la revalorisation des balayures admissibles au réemploi en abrasifs usagés pour la viabilité hivernale est prise en compte. Par conséquent, les bénéfices potentiels monétaires et environnementaux de la revalorisation d'une portion des balayures de rue collectées pour la construction ou la réparation d'infrastructures routières n'ont pas été évalués. Néanmoins, dans le présent cas d'étude, la demande actuelle pour l'utilisation des balayures en construction ou en réparation d'infrastructures routières est suffisante afin de disposer annuellement de l'ensemble de matières résiduelles éligibles, et ce, sans coût additionnel.

En ce qui a trait à ce cas d'étude, l'achat des deux types d'abrasifs vierges (AB-10 et AB-5) se fait à des coûts différents. Également, le lieu d'enfouissement technique offre deux tarifs selon le degré de contamination des matières résiduelles reçues. Dans le scénario linéaire, la majorité des balayures sont acceptées au tarif faible et seulement un faible pourcentage au tarif élevé alors que dans le scénario circulaire, la totalité des balayures envoyées au lieu d'enfouissement technique engendre le paiement du tarif élevé. Concernant les opérations, le balayage de rue printanier est effectué en tout temps à l'aide d'un système où sont utilisés deux balais (un effectuant le balayage et l'autre la finition), un camion 10 roues permettant de décharger le contenu des balais lors des opérations, un camion-citerne pour approvisionner les balais en eau ainsi qu'un camion semi-remorque afin de décharger le camion 10 roues. Le camion semi-remorque effectue ensuite les opérations de transport de la matière depuis les secteurs de balayage jusqu'au centre de triage et/ou jusqu'au lieu d'enfouissement technique en fonction du scénario. Il fait également le transport des abrasifs vierges entre les carrières et le centre de services de

l'administration routière ciblée. L'opération de triage des balayures est, quant à elle, effectuée à l'aide d'un tamiseur rotatif, d'une excavatrice permettant d'alimenter le tamiseur et d'une chargeuse sur roues déchargeant en continu le point de chute de la matière triée. Enfin, l'opération de fabrication des abrasifs usagés requiert une chargeuse sur roues afin de faire le mélange sur la base d'un godet entre les deux intrants nécessaires, soit les balayures triées et les abrasifs vierges.

2.4.2 Collecte et traitement des données

Le modèle de simulation, représentant à la fois la chaîne de valeur linéaire et circulaire, requiert diverses données d'entrée ainsi que de nombreux paramètres concernant les flux de matières, les coûts et les émissions de gaz à effet de serre. La quantité annuelle de matières épandues (ϵ) et le taux de collecte des balayures (β) diffèrent d'une année à l'autre et sont donc considérés stochastiques (incertains). Les données historiques des cinq dernières années indiquent que la demande annuelle en abrasifs ainsi que le pourcentage d'abrasifs de type AB-10 épandu (α) peuvent être modélisés avec une loi triangulaire. Par ailleurs, le taux de collecte suit une loi uniforme, car seulement deux données historiques ont pu être obtenues et il a donc été supposé qu'elles ont une probabilité égale de se produire. Spécifiquement pour le scénario de l'économie circulaire, les proportions résultantes du processus de triage granulométrique des matières selon les deux débouchés possibles (revalorisation (γ) ou enfouissement ($1-\gamma$)) varient légèrement en fonction de l'endroit où les balayures ont été collectées et sont donc également considérées stochastiques. Des tests de triage sur les balayures ont été effectués dans le cadre de travaux internes pour quatre échantillons de provenance différente et les résultats peuvent être modélisés avec une loi triangulaire. Toutes les lois de probabilités utilisées en intrant dans le modèle de simulation ont été générées à partir du logiciel *EasyFit* afin de s'assurer que les distributions concordent avec les données collectées. Les autres valeurs des pourcentages séparant les flux de matières le long de la chaîne circulaire selon les

critères de la législation environnementale (δ et η) ont été fournies également dans le cadre de travaux internes par des partenaires ayant réalisé une revue de la littérature ainsi que des méta-analyses (voir l'article de Bouchard et al., 2021). Ces valeurs, permettant de dissocier la quantité de balayures triées réemployable en viabilité hivernale (δ) et pour la construction ou la réparation d'infrastructures routières (η) de celle devant être enfouie ($1-\eta$), sont conséquemment considérées déterministes. Pour ce qui est de la recette de fabrication des abrasifs usagés à partir des balayures triées admissibles et d'abrasifs vierges (ζ), elle a été calculée arithmétiquement selon les fuseaux granulométriques ainsi que les critères chimiques de la matière échantillonnée dans le cas d'étude en vue de respecter la norme environnementale (MTMDET, 2016) sur l'emploi d'abrasifs vierges AB-10 en viabilité hivernale. Le Tableau 1 présente les données d'entrée, avec leur valeur ou distribution de probabilités associée au présent cas d'étude, du modèle de simulation des chaînes de valeur linéaire et circulaire.

Tableau 1
Données d'entrée du modèle de simulation des chaînes de valeur linéaire et circulaire

Donnée d'entrée	Définition	Type de donnée		Valeur ou distribution de probabilités	Source
		Déterministe	Stochastique		
ε	Demande annuelle en abrasifs		X	Loi triangulaire Valeur moyenne = 6 850 Valeur minimum = 5 185 Valeur maximum = 9 309	Données historiques (2015-2020) obtenues lors de communications personnelles avec le centre de services de Trois-Rivières
α	Proportion d'abrasifs de type AB-10 épandus		X	Loi triangulaire Valeur moyenne = 0,901 Valeur minimum = 0,855 Valeur maximum = 0,946	Données historiques (2015-2020) obtenues lors de communications personnelles avec le centre de services de Trois-Rivières
β	Taux de collecte des balayures		X	Loi uniforme Valeur minimum = 0,0355 Valeur maximum = 0,0559	Données historiques (2016-2018) obtenues lors de communications personnelles avec le centre de services de Trois-Rivières
γ	Fraction des balayures triées dédiée à une revalorisation		X	Loi triangulaire Valeur moyenne = 0,981 Valeur minimum = 0,973 Valeur maximum = 0,991	Tests de triage effectués dans le cadre de travaux internes sur quatre échantillons de balayures de rue collectés sur le réseau routier provincial
δ	Portion des balayures triées dédiée à une revalorisation respectant tous les critères environnementaux pour une utilisation en abrasifs	X		0,444	Bouchard et al. (2021)
η	Portion des balayures triées dédiée à une revalorisation ne respectant pas tous les critères environnementaux pour une utilisation en abrasifs et qui est donc éligible à une utilisation pour la construction ou la réparation d'infrastructures routières	X		0,955	Bouchard et al. (2021)
ζ	Proportion d'abrasifs vierges de type AB-10 achetés pour la fabrication d'abrasifs usagés à partir de la portion des balayures triées dédiée à une revalorisation respectant tous les critères environnementaux pour une utilisation en abrasifs		X	$(\varepsilon * \beta * \gamma * \delta) * R$	MTMDET (2016)

L'horizon considéré dans cette étude (cinq ans) est relativement court. De ce fait, le coût d'achat des deux types d'abrasifs vierges, les tarifs d'enfouissement des balayures ainsi que les coûts d'opération unitaires incluant ceux de balayage, de transport, de triage et de fabrication sont considérés déterministes et fixes. Ces données ont été obtenues soit directement par le biais des différents partenaires du milieu pratique ou elles ont été estimées à partir de renseignements des partenaires ainsi qu'à l'aide de travaux internes de simulation sur la consommation et la productivité des opérations de balayage de rue printanier. Également, le kilométrage parcouru lors des transports a été calculé à l'aide du service en ligne *Google Maps* en fonction de renseignements reçus des partenaires et au besoin, d'estimation de la localisation d'emplacements futurs. En ce qui concerne les informations sur les émissions de gaz à effet de serre utilisées dans cette étude pour les opérations de balayage et de transport, les données ont été basées sur des analyses internes réalisées à la suite d'une étude de simulation spécifiquement sur ces opérations dans le domaine du balayage de rue printanier. Les données sur les émissions de gaz à effet de serre associées au triage et à la fabrication de matières ont, quant à elles, été obtenues à la suite de tests réalisés lors de travaux internes sur des balayures de rue collectées par un partenaire. Finalement, la donnée concernant la quantité de gaz à effet de serre émise par la production d'abrasifs vierges a été prise dans la littérature dans l'article écrit par Akan et al. (2017). Le Tableau 2 contient une liste exhaustive des paramètres, avec leur valeur associée dans le cadre du présent cas d'étude, utilisés dans le calcul des différentes mesures de performance (extrants des modèles) pour les chaînes de valeur linéaire et circulaire.

Tableau 2
Liste exhaustive des paramètres utilisés dans le calcul des différentes mesures de performance

Paramètre	Définition	Valeur	Source
C_{AB10}	Coût d'achat unitaire des abrasifs de type AB-10 (sable)	4,00 \$/t	Communication personnelle avec le centre de services de Trois-Rivières
C_{AB5}	Coût d'achat unitaire des abrasifs de type AB-5 (petites pierres)	21,2 \$/t	Communication personnelle avec le centre de services de Trois-Rivières
P	Proportion des balayures dans la chaîne linéaire pour laquelle le lieu d'enfouissement technique requiert le paiement du tarif faible selon le degré de contamination	0,977	Bouchard et al. (2021)
(1-P)	Proportion des balayures dans la chaîne linéaire pour laquelle le lieu d'enfouissement technique requiert le paiement du tarif élevé selon le degré de contamination	0,0227	Bouchard et al. (2021)
T_{EF}	Tarif unitaire d'enfouissement faible	25,0 \$/t	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue
T_{EE}	Tarif unitaire d'enfouissement élevé	145 \$/t	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue
C_B	Coût unitaire pour l'opération de balayage	$C_B *$	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue * Le coût n'est pas divulgué par souci de confidentialité.
C_T	Coût unitaire pour l'opération de transport	4,00 \$/km	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue
C_S	Coût unitaire pour l'opération de triage	1,47 \$/t	Travaux internes pour les tests de triage des balayures
C_F	Coût unitaire pour l'opération de fabrication	1,19 \$/t	Travaux internes pour les tests de fabrication des abrasifs usagés
K_1	Kilométrage (aller-retour) entre le secteur de balayage et le site de dépôt temporaire	32,0 km	Travaux internes de simulation sur la consommation et la productivité des opérations de balayage de rue printanier
K_2	Kilométrage (aller-retour) entre le site de dépôt temporaire et le lieu d'enfouissement technique dans la chaîne linéaire	40,0 km	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue
K_3	Kilométrage (aller-retour) entre le site de dépôt temporaire et le centre de triage dans la chaîne circulaire	24,8 km	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue et le ministère des Transports du Québec
K_4	Kilométrage (aller-retour) entre le centre de triage et le lieu d'enfouissement technique dans la chaîne circulaire	38,0 km	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue et le ministère des Transports du Québec
K_5	Kilométrage (aller-retour) entre la carrière pour les abrasifs AB-10 et le centre de services ou le centre de triage	55,6 km	Communication personnelle avec le ministère des Transports du Québec
K_6	Kilométrage (aller-retour) entre la carrière pour les abrasifs AB-5 et le centre de services ou le centre de triage	96,2 km	Communication personnelle avec le ministère des Transports du Québec
R	Facteur pour la recette de fabrication des abrasifs usagés, à savoir la proportion d'abrasifs vierges AB-10 devant être mélangée aux balayures admissibles à la revalorisation en viabilité hivernale	3,00	MTMDET (2016)
C	Capacité moyenne du camion semi-remorque	29,0 t	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue
E_B	Émissions de gaz à effet de serre unitaire pour l'opération de balayage	61,4 kg éq. CO ₂ /t	Travaux internes de simulation sur la consommation et la productivité des opérations de balayage de rue printanier
E_T	Émissions de gaz à effet de serre unitaire pour l'opération de transport	1,19 kg éq. CO ₂ /km	Travaux internes de simulation sur la consommation et la productivité des opérations de balayage de rue printanier
E_P	Émissions de gaz à effet de serre unitaire pour la production d'abrasifs vierges	5,00 kg éq. CO ₂ /t	Akan et al. (2017)
E_S	Émissions de gaz à effet de serre unitaire pour l'opération de triage	1,18 kg éq. CO ₂ /t	Travaux internes pour les tests de triage des balayures
E_F	Émissions de gaz à effet de serre unitaire pour l'opération de fabrication	0,670 kg éq. CO ₂ /t	Travaux internes pour les tests de fabrication des abrasifs usagés

Lors de la conception du modèle de simulation, certaines hypothèses ont été émises par rapport aux valeurs ou aux lois de probabilités prises par les données d'entrée et les paramètres. En ce qui a trait aux pourcentages séparant les flux de matières au sein de la fraction de balayures triées dédiées à une revalorisation, les valeurs utilisées ont été déterminées dans le cadre des travaux de Bouchard et al. (2021) qui ont réalisé une revue de la littérature ainsi que des méta-analyses. Toutefois, afin que les balayures triées soient admissibles à une utilisation en viabilité hivernale, elles doivent respecter tous les critères environnementaux de la législation en place à cet effet. Ainsi, dès que l'échantillon de balayures testé ne respecte pas un ou plusieurs des critères, l'ensemble des balayures collectées d'où provient l'échantillon ne peut être revalorisé en abrasifs. L'échantillon qui ne peut être revalorisé en viabilité hivernale est néanmoins soumis à d'autres tests afin de déterminer s'il est éligible à une utilisation pour la construction et la réparation d'infrastructures routières ou s'il doit être enfoui. Les résultats des tests chimiques suivent donc une loi de probabilités de type binomiale. Dans le cadre de cet article, l'hypothèse que ces pourcentages soient considérés déterministes donc ne suivant aucune distribution de probabilités, a été émise. Cette décision est basée sur le fait qu'il est anticipé que lors de la mise en œuvre potentielle de la chaîne de valeur circulaire dans cette filière, plusieurs sous-échantillons de balayures de rue collectées seront testés à l'intérieur d'une même collecte d'une administration routière. Par conséquent, les balayures triées admissibles à une revalorisation seront partiellement réutilisées ou enfouies. Cette hypothèse posée permet ainsi de maximiser le potentiel de réemploi des balayures en abrasifs d'hiver.

Des hypothèses ont aussi été émises concernant la localisation de certains emplacements, soit celui du site de dépôt temporaire, du futur centre de triage lors de la mise en œuvre de la chaîne de valeur circulaire et du lieu d'enfouissement technique. En pratique, plusieurs sites de dépôt temporaire sont parfois utilisés lors du balayage de rue printanier. Néanmoins, pour alléger le modèle et puisque ces derniers peuvent varier d'une année à l'autre, un seul a été ciblé à savoir le plus utilisé par le

prestataire de services ayant obtenu le contrat de balayage dans les dernières années pour le centre de services sélectionné dans ce cas d'étude. Il en est de même pour le lieu d'enfouissement technique choisi. L'emplacement du centre de triage a quant à lui été proposé au même endroit que le centre de services actuel. Ces hypothèses sont toutefois représentatives de la réalité. Dans l'éventualité où une base de données historiques serait disponible, ces distances pourraient être une moyenne pondérée et conséquemment, le modèle demeurerait utilisable tel quel. De plus, considérant que la quantité chargée dans le camion semi-remorque effectuant les divers transports varie selon les voyages, sa capacité a été fixée à la quantité moyenne transportée par ce dernier selon le prestataire de services. Enfin, les données sur les émissions de gaz à effet de serre pour les opérations de balayage et de transport ont été obtenues à partir d'analyses internes réalisées grâce à une étude de simulation. Les coûts unitaires associés à ces opérations ont d'ailleurs été calculés à l'aide du taux de collecte généré lors de cette même étude. Les données sont donc simulées et constituent une estimation de la réalité.

2.4.3 Paramètres de la simulation

Deux scénarios ont été intégrés dans le modèle de simulation. Le scénario de référence qui représente le système actuel (chaîne de valeur linéaire) ainsi que le scénario envisagé (chaîne de valeur circulaire). Le modèle de la chaîne de valeur linéaire constitue un problème statique, puisqu'il n'y a aucun lien entre les années en ce qui a trait aux flux de matières et aux coûts. La simulation Monte-Carlo a donc été employée pour ce scénario. Quant au modèle de la chaîne de valeur circulaire, le problème est dynamique, car la quantité d'abrasifs usagés fabriqués à une année donnée approvisionne ce qui sera épandu lors de l'année suivante. Par conséquent, dans cette situation, la simulation à événements discrets a été utilisée.

L'outil de simulation utilisé est le logiciel *SIMIO*. La simulation a été réalisée sur une période de cinq ans afin de démontrer l'effet de l'implantation d'un modèle

économique circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier sur les flux de matières, les coûts et les émissions de gaz à effet de serre de la chaîne. Le modèle de simulation se limite aux opérations associées aux chaînes de valeur linéaire et circulaire présentées à la Figure 1. Pour davantage de détails concernant la conception du modèle de simulation à l'aide du logiciel, voir l'Annexe I.

Différentes équations ont été intégrées dans le modèle de simulation des chaînes de valeur linéaire et circulaire, reprenant l'ensemble des données d'entrée et des paramètres présentés aux Tableaux 1 et 2, afin de calculer les différentes mesures de performance. Considérant la nature administrative de ce travail de recherche et afin de favoriser son accessibilité, les équations ont été écrites sous la forme *Excel*, soit la même que celle utilisée lors de la conception du modèle dans le logiciel *SIMIO*.

2.4.3.1 Équations du modèle de la chaîne de valeur linéaire

$$\begin{aligned} &\text{Quantité d'abrasifs vierges éendus} = \\ &t \geq 1 : \varepsilon_t \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\text{Quantité de balayures collectées} = \\ &t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} &\text{Quantité de balayures enfouies} = \\ &t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} &\text{Coût pour l'achat d'abrasifs vierges} = \\ &t \geq 1 : (\alpha_t * \varepsilon_t * C_{AB10}) + ((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t * C_{AB5}) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} &\text{Coût pour les opérations de balayage} = \\ &t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t * C_B \end{aligned} \tag{5}$$

Coût pour les opérations de transport =

$$t \geq 1 : ((K_1 * C_T) + (K_2 * \varepsilon_t * \beta_t / C * C_T)) + ((K_5 * (\alpha_t * \varepsilon_t) / C * C_T) + (K_6 * ((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t) / C * C_T)) \quad (6)$$

Coût pour l'enfouissement =

$$t \geq 1 : ((1 - P) * \varepsilon_t * \beta_t * T_{EE}) + (P * \varepsilon_t * \beta_t * T_{EF}) \quad (7)$$

Émissions de gaz à effet de serre pour la production d'abrasifs vierges =

$$t \geq 1 : \varepsilon_t * E_P \quad (8)$$

Émissions de gaz à effet de serre pour les opérations de balayage =

$$t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t * E_B \quad (9)$$

Émissions de gaz à effet de serre pour les opérations de transport =

$$t \geq 1 : ((K_1 * E_T) + (\varepsilon_t * \beta_t / C * K_2 * E_T)) + (((\alpha_t * \varepsilon_t) / C * K_5 * E_T) + (((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t) / C * K_6 * E_T)) \quad (10)$$

2.4.3.2 Équations du modèle de la chaîne de valeur circulaire

Quantité d'abrasifs vierges épanchés =

$$t = 1 : \varepsilon_t \quad (11)$$

$$t > 1 : SI((\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1} \leq \varepsilon_t, \varepsilon_t - (\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1}, (1 - \alpha_t) * \varepsilon_t)$$

Quantité d'abrasifs usagés épanchés =

$$t = 1 : 0 \quad (12)$$

$$t > 1 : SI((\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1} \leq \varepsilon_t, (\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1}, \alpha_t * \varepsilon_t)$$

Quantité du surplus d'abrasifs usagés =

$$t = 1 : 0 \quad (13)$$

$$t > 1 : SI((\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1} > \varepsilon_t, ((\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1}) - (SI((\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1} \leq \varepsilon_t, (\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1}, \alpha_t * \varepsilon_t)), 0)$$

Quantité de balayures collectées =

$$t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t \quad (14)$$

Quantité de balayures enfouies =

$$t \geq 1 : (\varepsilon_t * \beta_t * (1 - \gamma_t)) + (\varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * (1 - \delta) * (1 - \eta)) \quad (15)$$

Quantité de balayures revalorisées =

$$t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t \quad (16)$$

Quantité de balayures revalorisées en viabilité hivernale =

$$t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * \delta \quad (17)$$

Quantité de balayures revalorisées en application sur les routes =

$$t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * (1 - \delta) \quad (18)$$

Quantité d'abrasifs vierges achetés pour la fabrication d'abrasifs usagés =

$$t \geq 1 : \zeta_t \quad (19)$$

Quantité d'abrasifs usagés fabriqués =

$$t \geq 1 : (\varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * \delta) + \zeta_t \quad (20)$$

Coût pour l'achat d'abrasifs vierges =

$$\begin{aligned} t = 1 : & (\alpha_t * \varepsilon_t * C_{AB10}) + ((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t * C_{AB5}) + (\zeta_t * C_{AB10}) \\ t > 1 : & SI((\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1} \leq \varepsilon_t, ((\alpha_t * \varepsilon_t) - (\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1}) * C_{AB10}) + \\ & ((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t * C_{AB5}) + (\zeta_t * C_{AB10}), ((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t * C_{AB5}) + (\zeta_t * C_{AB10}) \end{aligned} \quad (21)$$

Coût pour les opérations de balayage =

$$t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t * C_B \quad (22)$$

Coût pour les opérations de transport =

$$\begin{aligned} t = 1 : & ((K_1 * C_T) + (K_3 * \varepsilon_t * \beta_t / C * C_T) + (K_4 * ((\varepsilon_t * \beta_t * (1 - \gamma_t)) + (\varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * (1 - \delta) * \\ & (1 - \eta))) / C * C_T)) + ((K_5 * ((\alpha_t * \varepsilon_t) + \zeta_t) / C * C_T) + (K_6 * ((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t) / C * C_T)) \\ t > 1 : & ((K_1 * C_T) + (K_3 * \varepsilon_t * \beta_t / C * C_T) + (K_4 * ((\varepsilon_t * \beta_t * (1 - \gamma_t)) + (\varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * (1 - \delta) * \\ & (1 - \eta))) / C * C_T)) + (SI((\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1} \leq \varepsilon_t, (K_5 * (((\alpha_t * \varepsilon_t) - (\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \\ & \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1}) + \zeta_t) / C * C_T) + (K_6 * ((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t) / C * C_T), (K_5 * \zeta_t / C * C_T) + (K_6 * \\ & ((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t) / C * C_T))) \end{aligned} \quad (23)$$

Coût pour les opérations de triage =

$$t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t * C_S \quad (24)$$

Coût pour les opérations de fabrication d'abrasifs usagés =

$$t \geq 1 : ((\varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * \delta) + \zeta_t) * C_F \quad (25)$$

Coût pour l'enfouissement =

$$t \geq 1 : T_{EE} * ((\varepsilon_t * \beta_t * (1 - \gamma_t)) + (\varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * (1 - \delta) * (1 - \eta))) \quad (26)$$

Émissions de gaz à effet de serre pour la production d'abrasifs vierges =

$$\begin{aligned} t = 1 : & (\varepsilon_t + \zeta_t) * E_P \\ t > 1 : & SI((\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1} \leq \varepsilon_t, (\varepsilon_t - ((\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1}) + \zeta_t) * E_P, \\ & ((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t * E_P) + (\zeta_t * E_P)) \end{aligned} \quad (27)$$

Émissions de gaz à effet de serre pour les opérations de balayage =

$$t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t * E_B \quad (28)$$

Émissions de gaz à effet de serre pour les opérations de transport =

$$\begin{aligned} t = 1 : & ((K_1 * E_T) + (\varepsilon_t * \beta_t / C * K_3 * E_T) + (((\varepsilon_t * \beta_t * (1 - \gamma_t)) + (\varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * (1 - \delta) * (1 - \eta))) / \\ & C * K_4 * E_T)) + (((\alpha_t * \varepsilon_t) + \zeta_t) / C * K_5 * E_T + (((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t) / C * K_6 * E_T)) \\ t > 1 : & ((K_1 * E_T) + (\varepsilon_t * \beta_t / C * K_3 * E_T) + (((\varepsilon_t * \beta_t * (1 - \gamma_t)) + (\varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * (1 - \delta) * (1 - \eta))) / \\ & C * K_4 * E_T)) + (SI((\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \zeta_{t-1} \leq \varepsilon_t, (((\alpha_t * \varepsilon_t) - (\varepsilon_{t-1} * \beta_{t-1} * \gamma_{t-1} * \delta) + \\ & \zeta_{t-1}) + \zeta_t) / C * K_5 * E_T) + (((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t) / C * K_6 * E_T), (\zeta_t / C * K_5 * E_T) + (((1 - \alpha_t) * \varepsilon_t) / \\ & C * K_6 * E_T))) \end{aligned} \quad (29)$$

Émissions de gaz à effet de serre pour les opérations de triage =

$$t \geq 1 : \varepsilon_t * \beta_t * E_S \quad (30)$$

Émissions de gaz à effet de serre pour les opérations de fabrication =

$$t \geq 1 : ((\varepsilon_t * \beta_t * \gamma_t * \delta) + \zeta_t) * C_F \quad (31)$$

2.4.4 Méthode d'analyse des scénarios

La comparaison entre le scénario de référence (chaîne de valeur linéaire) et le scénario envisagé (chaîne de valeur circulaire) sur les cinq années d'étude est effectuée en termes de trois catégories d'indicateurs de performance.

La première est associée aux flux de matières. Un indicateur mesure d'abord la demande annuelle pour l'achat d'abrasifs vierges dans le modèle linéaire (1). Dans le modèle circulaire, cette demande comprend la quantité d'abrasifs vierges épandus afin de combler la demande pour l'épandage à la suite, s'il y a lieu, de l'utilisation des abrasifs usagés (11) et la quantité d'abrasifs vierges nécessaires pour la fabrication des abrasifs usagés (19). Une autre mesure de performance pour les flux de matières évalue ensuite le nombre de tonnes de balayures enfouies (3) et (15). Enfin, un indicateur mesure la quantité de balayures revalorisées en abrasifs usagés pour la viabilité hivernale dans la chaîne de valeur circulaire (17).

Le deuxième indicateur représente le coût total des chaînes de valeur linéaire ainsi que circulaire et il permet de vérifier la faisabilité économique de l'intégration de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. Le coût total inclut d'abord le coût d'achat des abrasifs vierges (4) et (21). Ensuite, cet indicateur tient compte du coût associé aux opérations de balayage de rue (5) et (22), de transport des matières (6) et (23), de triage des balayures (24) et de fabrication des abrasifs usagés (25). Finalement, cette mesure de performance considère le coût relié à l'enfouissement des balayures non revalorisables (7) et (26). Plus précisément, l'opération de balayage comprend des coûts associés aux balais utilisés ainsi qu'aux divers camions requis (10 roues, semi-remorque et citerne). Le transport des matières considéré dans cette étude inclut des coûts pour l'usage d'un camion semi-remorque. L'opération de triage, quant à elle, requiert des coûts liés au tamiseur, à l'excavatrice et à la chargeuse sur roues. En ce qui a trait à l'opération de fabrication, le coût est associé à l'usage d'une chargeuse sur roues. En outre, pour chacune des opérations

mentionnées ci-dessus, des coûts d'acquisition, d'entretien, de consommation énergétique, de manœuvre et d'assurances sont pris en compte.

Le troisième indicateur consiste au bilan carbone des chaînes linéaire ainsi que circulaire et il permet de mesurer l'impact environnemental de l'intégration de l'économie circulaire dans cette filière. Cette mesure de performance comptabilise les émissions de gaz à effet de serre associées à la consommation énergétique requise pour l'ensemble des opérations incluant celles de balayage (9) et (28), de transport (10) et (29), de triage (30) et de fabrication (31). Un indicateur mesure également la quantité d'émissions de gaz à effet de serre générées par la production d'abrasifs vierges (8) et (27).

2.4.5 Validation et vérification du modèle

En ce qui concerne la validation du modèle, à partir de la demande en abrasifs annuelle globale générée par la distribution de probabilités lors de la simulation (ϵ), les autres valeurs attendues des indicateurs de performance mentionnés à la section 2.4.4 ont été calculées manuellement pour une année donnée. La détermination des résultats analytiques du modèle a permis de s'assurer que ceux-ci suivaient la logique du système réel comme indiqué dans les processus lors de la conception. La validation a aussi été effectuée en discutant avec certains partenaires du secteur d'application pour s'assurer que tous les éléments essentiels du système réel sont présents et que le modèle représente adéquatement la réalité.

Le modèle de simulation a été vérifié en l'exécutant à plusieurs reprises afin de s'assurer qu'il fonctionne comme désiré. De plus, les deux scénarios intégrés dans le modèle ont été exécutés en dix répliques afin d'obtenir un niveau de confiance suffisant par rapport aux résultats générés, mais tout en restreignant le temps de calcul lors de la simulation. Les paramètres subissant une variation lors des répliques sont ceux considérés stochastiques à savoir la demande annuelle en

abrasifs (ϵ), la proportion d'abrasifs de type AB-10 épandus (α), le taux de collecte des balayures (β) et la fraction des balayures triées dédiée à une revalorisation (γ).

2.5 Résultats et discussion

Dans cette section, les résultats de la simulation sur une période de cinq ans sont présentés. Les résultats sont les variations des flux de matières, des coûts ainsi que des émissions de gaz à effet de serre engendrées par l'intégration de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. Les indicateurs présentés à la section 2.4.4 sont utilisés dans l'analyse des deux scénarios d'étude. La comparaison du modèle économique linéaire et circulaire est suivie d'une analyse de sensibilité sur certaines données d'entrée du modèle de simulation.

Afin de bien interpréter les résultats présentés dans les sous-sections suivantes, le Tableau 3 indique la demande annuelle globale en abrasifs pour l'épandage (ϵ). Il s'agit de la quantité consommée annuellement par le centre de services, en fonction des conditions hivernales variables, pour assurer le niveau de service requis sur le réseau routier. Ces données, générées lors de la simulation à partir de la distribution de probabilités associée, permettent d'évaluer si les résultats sont corrélés au niveau de service ou à la mise en œuvre de la chaîne de valeur circulaire.

Tableau 3
Demande annuelle globale en abrasifs

Année	Quantité (t)
1	6 607
2	7 198
3	6 805
4	7 297
5	7 120
Moyenne 2 à 5 ans	7 105

Dans le même objectif d'interprétation des résultats, la Figure 2 montre les proportions des différents coûts par activité engendrés par rapport au coût total alors que la Figure 3 montre les proportions des émissions de gaz à effet de serre par activité par rapport au bilan carbone, et ce, dans les chaînes de valeur linéaire et circulaire. Les pourcentages présentés dans les Figures 2 et 3 ont été calculés à partir de la moyenne des résultats obtenus par activité des cinq années simulées pour chacun des deux scénarios.

Figure 2
Proportion des différents coûts par activité engendrés dans la chaîne de valeur linéaire (gauche) et dans la chaîne de valeur circulaire (droite)

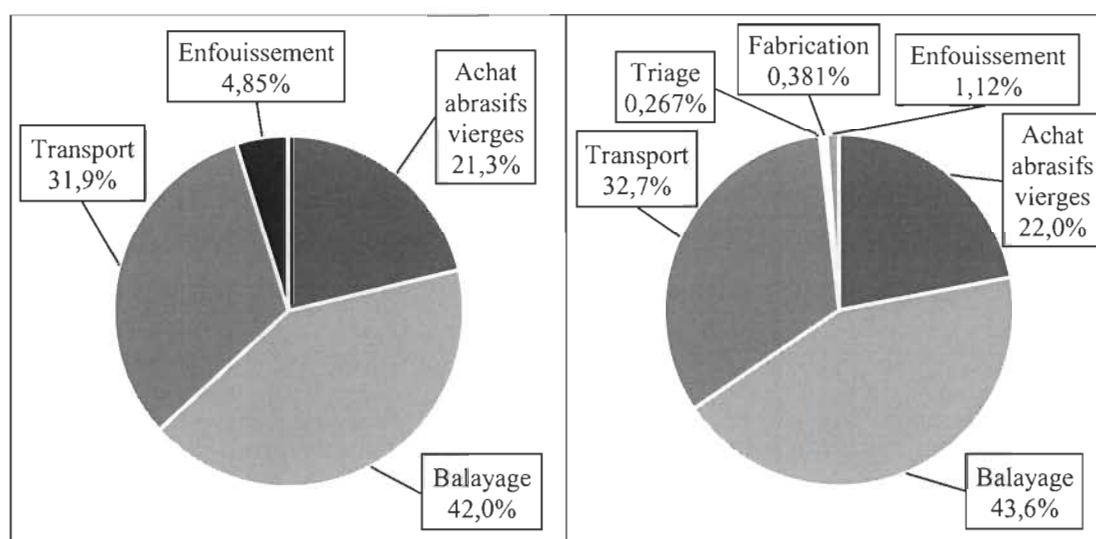
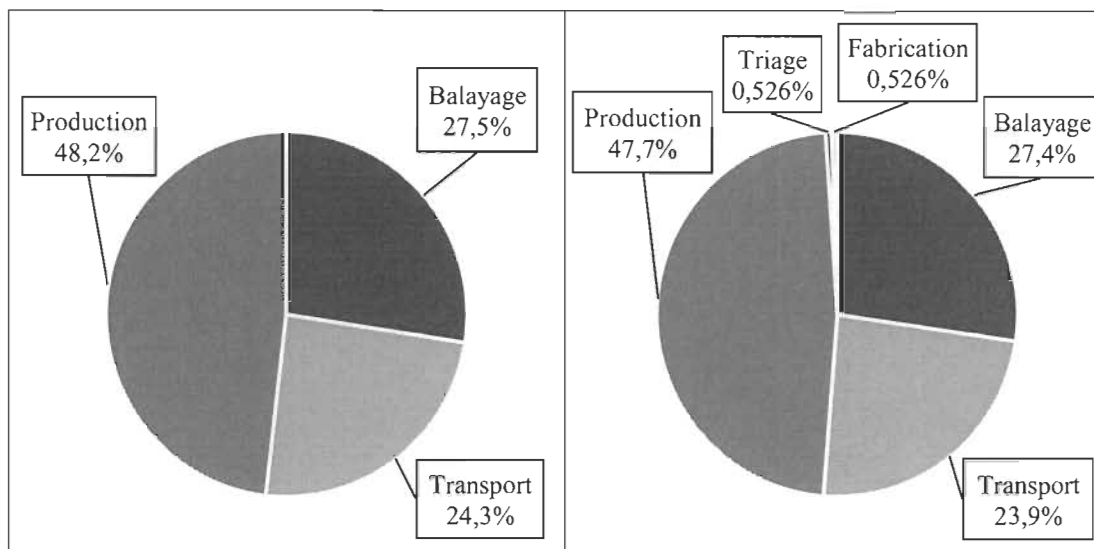


Figure 3

Proportion des émissions de gaz à effet de serre par activité dans la chaîne de valeur linéaire (gauche) et dans la chaîne de valeur circulaire (droite)



La Figure 2 indique que le balayage de rue printanier est l'activité dont la proportion du coût total des chaînes linéaire et circulaire est la plus importante. Selon l'ordre décroissant des proportions, cette activité est suivie des opérations de transport, de l'achat d'abrasifs vierges et, enfin, de l'enfouissement. En comparant les deux scénarios, la proportion du coût total qui est associé à l'enfouissement est moins importante dans le modèle circulaire. La chaîne de valeur circulaire implique toutefois une infime proportion du coût total pour l'ajout des opérations de triage des balayures et de fabrication des abrasifs usagés. La Figure 3 indique, quant à elle, que la production d'abrasifs vierges est l'activité dont la proportion est la plus élevée par rapport au total des émissions de gaz à effet de serre considérées dans les deux scénarios de chaîne de valeur. Les deux autres activités générant une proportion importante de gaz à effet de serre en fonction du bilan carbone sont le balayage ainsi que les opérations de transport. Concernant spécifiquement le modèle de la chaîne circulaire, une faible proportion du total des émissions est causée par les opérations de triage et de fabrication de la matière.

2.5.1 Comparatif des deux scénarios de chaîne de valeur

Le Tableau 4 présente les pourcentages de variation des flux de matières alors que le Tableau 5 et le Tableau 6 résument respectivement les pourcentages de variation des coûts ainsi que les pourcentages de variation des émissions de gaz à effet de serre engendrés par l'intégration de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. Chaque tableau indique également les résultats des variations en valeur absolue (tonne, dollar et kg éq. CO₂). Les variations ont été calculées en comparant les résultats des cinq années simulées du scénario linéaire et du scénario circulaire pour chacun des indicateurs de performance sélectionnés. Les pourcentages de variation ont été obtenus en divisant les résultats du scénario circulaire par ceux du scénario linéaire alors que les variations en valeur absolue ont été obtenues en soustrayant les résultats du scénario linéaire de ceux du scénario circulaire. Également, tous les résultats présentés dans les tableaux ci-dessous ont été calculés à partir de la moyenne des résultats des dix répliques effectuées pour chacune des années lors de la simulation.

Pour réduire le biais associé à la fluctuation de la demande en abrasifs (conséquence aux conditions hivernales variables) dans l'interprétation des résultats, l'utilisation d'une moyenne des années 2 à 5 accompagnée de son écart-type a été calculée pour l'ensemble des indicateurs. La première année de la transition vers l'économie circulaire a été exclue des résultats moyens de la simulation, puisque lors de cette dernière, la demande en abrasifs vierges est augmentée considérablement que la totalité de la demande annuelle globale en abrasifs est achetée en plus d'une portion additionnelle pour la fabrication des abrasifs usagés qui seront utilisés l'année suivante. Les coûts d'achat et de transport des abrasifs lors de la première année sont donc supérieurs dans le scénario circulaire par rapport au scénario linéaire tout comme les émissions de gaz à effets de serre associées à leur production et à leur transport. Les abrasifs vierges nécessaires à la fabrication d'abrasifs usagés sont pris en compte dès la première année, car en pratique, les abrasifs usagés seront fabriqués

chaque année à la suite du triage afin de manipuler qu'une seule fois la matière d'autant plus qu'une certaine quantité d'abrasifs vierges inutilisés en viabilité hivernale sera normalement déjà entreposée. Dans cette étude, ce choix fait en sorte que seuls les résultats de la première année de l'implantation du nouveau modèle économique sont non représentatifs de ceux qui seraient réellement obtenus dans le cadre de la mise en œuvre d'une chaîne de valeur circulaire. En effet, dès lors des années subséquentes, l'utilisation d'abrasifs usagés sur le réseau routier en viabilité hivernale vient réduire la demande annuelle en abrasifs vierges et des gains monétaires ainsi qu'environnementaux sont générés.

Tableau 4

Variation des flux de matières engendrée par une transition vers l'économie circulaire

Année	Variation des flux de matières					
	Demande en abrasifs vierges		Balayures enfouies		Balayures revalorisées en abrasifs usagés	
	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)
1	+ 6,05	+ 400	- 95,7	- 298	-	+ 133
2	- 0,843	- 60,7	- 95,8	- 333	-	+ 158
3	- 3,53	- 240	- 95,3	- 283	-	+ 130
4	- 0,858	- 61,9	- 96,1	- 333	-	+ 153
5	- 2,52	- 179	- 95,8	- 310	-	+ 144
Moyenne 2 à 5 ans	- 1,94	- 136	- 95,8	- 315	-	+ 146
Écart-type	1,32	89,2	0,363	23,8	-	12,1

Tout d'abord, en ce qui a trait aux flux de matières, les résultats du Tableau 4 indiquent une diminution significative du tonnage de balayures enfouies de 95,8 % en moyenne. Il s'agit d'un résultat escompté, puisque l'ensemble des balayures collectées sont envoyées à l'enfouissement dans le scénario linéaire actuel contrairement au scénario circulaire où elles sont plutôt envoyées au centre de triage et conséquemment, seulement une infime partie est enfouie. En effet, ce sont en

moyenne 315 tonnes de balayures récupérées qui sont détournées annuellement de l'enfouissement et qui peuvent donc être revalorisées. L'autre constat important est que sur ce total, 146 tonnes représentent la portion moyenne de balayures réemployables en viabilité hivernale et qui servira d'intrant à la fabrication d'abrasifs usagés. Par ailleurs, lors de la première année de l'intégration de l'économie circulaire, la demande en abrasifs vierges est augmentée, mais cette dernière est réduite dès les années subséquentes due à l'utilisation d'abrasifs usagés. En effet, il s'agit d'une diminution moyenne de 1,94 %, soit 136 tonnes. Évidemment, considérant le faible taux de collecte des abrasifs épandus lors du balayage de rue printanier, la quantité de balayures revalorisées en abrasifs d'hiver demeure limitée dans ce cas d'étude.

En vue d'effectuer une comparaison adéquate, les paramètres considérés stochastiques, dont la quantité d'abrasifs épandus annuellement, la proportion des deux types d'abrasifs utilisés et le nombre de tonnes de balayures collectées, ne varient pas entre le scénario linéaire et circulaire.

Tableau 5
Variation des coûts engendrée par une transition vers l'économie circulaire

Année	Variation des coûts							
	Achat d'abrasifs vierges		Opérations (Balayage, transport, triage et fabrication)		Enfouissement		Total	
	(%)	(\$)	(%)	(\$)	(%)	(\$)	(%)	(\$)
1	+ 4,26	+ 1 600	+ 2,73	+ 3 577	- 77,3	- 6 676	- 0,846	- 1 499
2	- 0,587	- 243	+ 0,0918	+ 133	- 78,1	- 7 531	- 3,86	- 7 567
3	- 2,57	- 960	- 1,04	- 1 334	- 75,2	- 6 203	- 4,88	- 8 498
4	- 0,406	- 168	+ 0,0723	+ 105	- 79,8	- 7 672	- 3,99	- 7 815
5	- 1,77	- 718	- 0,596	- 823	- 78,1	- 7 011	- 4,56	- 8 551
Moyenne 2 à 5 ans	- 1,34	- 522	- 0,367	- 480	- 77,8	- 7 104	- 4,32	- 8 108
Écart- type	1,02	380	0,549	722	1,90	664,4	0,478	492,2

Ensuite, concernant les coûts présentés dans le Tableau 5, la diminution significative de l'enfouissement des balayures collectées dans la chaîne de valeur circulaire réduit de 77,8 % en moyenne le coût qui lui est associé. Il s'agit du facteur déterminant dans la réduction du coût total de la chaîne avec une économie monétaire moyenne associée d'un peu plus de 7 000 \$. Cependant, puisque les coûts d'enfouissement ne représentent qu'une faible proportion de l'ensemble des coûts, plus précisément 4,85 % en moyenne dans le modèle linéaire, l'incidence sur le coût total est limitée. De plus, l'utilisation d'abrasifs usagés dans le scénario du modèle économique circulaire fait en sorte, qu'à partir de la deuxième année, un peu moins d'abrasifs vierges nécessitent d'être achetés et les coûts reliés sont donc réduits de 1,34 % en moyenne, soit 522 \$ par année. Les coûts associés à l'ensemble des opérations, quant à eux, subissent une infime réduction de 0,367 % en moyenne. En effet, malgré une diminution des coûts de transport de la matière, l'intégration d'une chaîne de valeur circulaire implique des opérations additionnelles, soit le triage des balayures collectées ainsi que le processus de fabrication des abrasifs usagés. Le système de balayage de rue étant identique dans les deux scénarios de chaîne étudiés, les coûts de cette opération n'ont aucun impact sur la comparaison. Il y a donc une économie monétaire totale potentielle de 4,32 % en moyenne, équivalent à une somme annuelle de 8 108 \$, à effectuer la transition vers l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. Ce résultat correspond à gain monétaire moyen de 1,14 \$ par tonne d'abrasifs consommée. D'autre part, ces résultats excluent de possibles investissements en bâtiments nécessaires aux opérations spécifiques à la mise en œuvre d'une chaîne de valeur circulaire, bien que les installations actuellement en place apparaissent suffisantes avec la saisonnalité des opérations.

Tableau 6
Variation des émissions de gaz à effet de serre engendrée par une transition vers l'économie circulaire

Année	Variation des émissions de gaz à effet de serre					
	Production d'abrasifs vierges		Opérations (Balayage, transport, triage et fabrication)		Total	
	(%)	(kg éq. CO ₂)	(%)	(kg éq. CO ₂)	(%)	(kg éq. CO ₂)
1	+ 6,05	+ 2 000	+ 4,09	+ 1 464	+ 5,03	+ 3 464
2	- 0,843	- 304	+ 1,26	+ 500	+ 0,260	+ 196
3	- 3,53	- 1 200	- 0,0338	- 12,0	- 1,75	- 1 212
4	- 0,848	- 310	+ 1,46	+ 582	+ 0,226	+ 172
5	- 2,52	- 897	+ 0,468	+ 177	- 0,979	- 720
Moyenne 2 à 5 ans	- 1,94	- 678	+ 0,790	+ 312	- 0,560	- 391
Écart-type	1,32	446	0,697	278	0,979	694

Enfin, pour ce qui est des émissions de gaz à effet de serre, les résultats du Tableau 6 montrent une réduction des émissions liées à la production d'abrasifs vierges de 1,94 % en moyenne, ce qui représente un gain de 678 kg éq. CO₂. Les opérations entraînent cependant une augmentation moyenne des émissions de 0,790 %. Bien que les émissions de gaz à effet de serre des opérations de transport de la matière soient réduites, ce gain est néanmoins annulé par les émissions de gaz à effet de serre associées à la consommation énergétique de la machinerie nécessaire aux opérations de triage et de fabrication de la matière. Le système de balayage de rue étant identique dans les deux scénarios de chaîne étudiés, il n'y a aucune variation lors de la comparaison en regard aux gaz à effet de serre émis par cette opération. Ainsi, il y a une réduction des émissions de gaz à effet de serre totale potentielle de 0,560 % en moyenne, équivalent à 391 kg éq. CO₂ annuellement, à effectuer la transition vers l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. Ce résultat correspond à une réduction moyenne du bilan carbone de 0,0550 kg éq. CO₂ par tonne d'abrasifs consommée. Cette analyse n'inclut toutefois pas, dans l'éventualité

où un nouveau bâtiment serait requis, les émissions reliées à sa construction ainsi qu'à son maintien.

En somme, pour le cas étudié dans cet article, les résultats de la simulation indiquent que l'intégration de principes de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier permet l'élaboration d'un scénario viable. En effet, à partir de la deuxième année d'exploitation de ce scénario, des gains monétaires sont observés notamment dus à la réduction significative des coûts reliés à l'enfouissement. Également, malgré les opérations additionnelles requises dans le cadre d'une chaîne de valeur circulaire, le bilan carbone est réduit.

2.5.2 Analyse de sensibilité

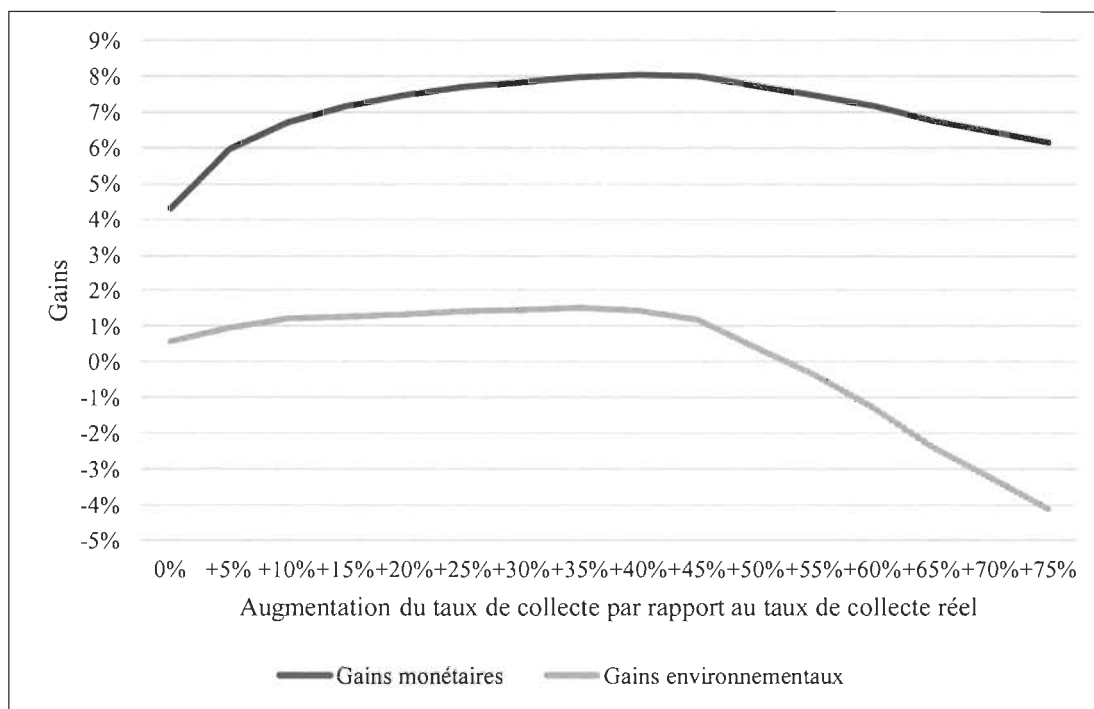
Dans le cadre de cet article, la simulation a été réalisée uniquement sur un cas d'étude, soit à partir de données concernant des balayures de rue collectées sur le réseau routier provincial par un centre de services d'une ville de la province de Québec au Canada. Il s'agit d'un cas représentatif d'une administration routière, bien que ce dernier soit conservateur par rapport à la réalité moyenne vécue dans les autres villes de cette province. Certaines données d'entrée pourraient donc faire varier les résultats obtenus lors de la simulation et, par conséquent, les conclusions tirées de leur interprétation.

En contexte autoroutier, le taux de collecte (β) moyen recensé dans le cadre de cette étude est de seulement 4,57 %. Cette faible quantité collectée annuellement sur cette portion du réseau routier limite la fabrication d'abrasifs usagés et ainsi les économies monétaires concernant l'achat d'abrasifs vierges. Néanmoins, un contexte où la quantité annuelle de balayures collectées serait plus élevée, tel que sur les réseaux routiers municipaux où Mokhbi et al. (2017) mentionne un taux moyen de récupération de 70 %, permettrait de réduire davantage la consommation d'abrasifs vierges. Les scénarios représentant la chaîne de valeur linéaire et circulaire ont donc

également été simulés avec différents taux de collecte majorés par l'augmentation graduelle de 5 % du taux de collecte réel afin de démontrer l'influence de ce paramètre sur les coûts ainsi que sur la quantité engendrée d'émissions de gaz à effet de serre. Les résultats sont présentés à la Figure 4 où il est possible d'observer une augmentation des économies monétaires potentielles jusqu'à un maximum de 8,04 % tout en maintenant la réduction du bilan carbone relativement stable, et ce, jusqu'à un certain point. En effet, un taux de collecte supérieur au taux réel majoré de 40 % pourrait entraîner la fabrication d'un surplus d'abrasifs usagés, à savoir une quantité supérieure à la demande annuelle globale. Dès lors, le bilan carbone de la chaîne augmente considérablement dû à la production et au transport d'abrasifs inutilisés. Cette situation de surplus est causée par la recette (une part de balayures pour trois parts d'abrasifs vierges de type AB-10) nécessaire afin que le fuseau granulométrique des abrasifs usagés ainsi fabriqués soit conforme à celui normalisé. Bien que dans le cas d'étude actuel, la production d'un surplus d'abrasifs usagés affecte négativement le bilan environnemental à l'échelle de la chaîne de valeur, la situation pourrait en revanche être différente au niveau des bénéfices monétaires potentiels occasionnés par la mise en œuvre de l'économie circulaire. Du point de vue d'un centre de services ciblé, dans l'éventualité où les abrasifs usagés fabriqués excédant la demande pour l'épandage seraient revendus à d'autres administrations routières, un revenu supplémentaire pourrait effectivement être généré. Également, en plus des bénéfices potentiels environnementaux associés à la substitution de matières vierges, dans l'éventualité d'un élargissement des frontières du système, la possibilité d'engendrer un gain au niveau des émissions de gaz à effet de serre devrait être évaluée considérant l'arbitrage en regard des distances de transport.

Figure 4

Pourcentages des gains monétaires et environnementaux potentiels en fonction du taux de collecte des balayures engendrés par une transition vers l'économie circulaire



Une autre donnée d'entrée analysée par le biais du modèle de simulation est la recette utilisée pour la fabrication des abrasifs usagés. En fonction des conditions hivernales, des restrictions environnementales en vigueur et de la variabilité existante dans le coût d'achat, la quantité d'abrasifs épandus pour chacun des deux types (AB-10 et AB-5) diffère d'un endroit à l'autre. Dans le cas d'étude présenté, en moyenne 90 % des abrasifs achetés sont de type AB-10 et ont un coût d'achat représentant environ 19 % du coût des 10 % restant qui sont de type AB-5. Une situation qui requerrait des abrasifs de type AB-5 en plus grande quantité ferait donc diminuer encore plus la variation du coût total de la chaîne lors de la transition vers un modèle économique circulaire en comparaison au modèle linéaire. Évidemment, la recette de fabrication des abrasifs usagés doit être adaptée aux besoins de la région en fonction du type d'abrasifs principalement épandus sur les routes. Les scénarios de chaîne de valeur linéaire et circulaire ont également été simulés en utilisant une recette mélangeant une

part de balayures de rue valorisables pour cinq parts d'abrasifs vierges de type AB-10 pour la fabrication des abrasifs usagés. Cependant, considérant le faible taux de collecte du cas d'étude ciblé et la demande annuelle en abrasifs vierges assez élevée, la variation de la recette n'a eu aucune incidence significative sur le coût total et sur le bilan carbone de la chaîne en comparant les deux scénarios.

2.6 Conclusion

Le balayage de rue effectué au printemps dans les pays nordiques entraîne actuellement l'enfouissement annuel de plusieurs milliers de tonnes de balayures collectées. Ce modèle linéaire a des effets environnementaux et monétaires négatifs considérables. L'implantation d'une économie circulaire dans cette filière par la revalorisation d'une partie des matières résiduelles récupérées en abrasifs d'hiver serait une stratégie économiquement et environnementalement viable comme démontré à l'aide du modèle de simulation présenté dans cet article. En effet, grâce au détournement de l'enfouissement moyen de 95,8 % des balayures collectées, le coût total du scénario circulaire est inférieur à celui du modèle linéaire actuel en plus d'entraîner une légère diminution des émissions de gaz à effet de serre.

Cette étude a permis de démontrer qu'au-delà de la faisabilité technique, la revalorisation des balayures de rue en abrasifs pour la viabilité hivernale peut également générer des gains de nature économique et environnementale. Toutefois, en plus de certaines données d'entrée, dont notamment le taux de collecte, divers paramètres servant au calcul des mesures de performance pourraient varier selon l'étude de cas et potentiellement influencer les résultats obtenus lors de la simulation. Entre autres, les distances à parcourir lors des transports entre les carrières, les lieux d'enfouissement technique et les centres de services peuvent différer grandement. Certaines administrations routières sont ainsi confrontées à parcourir des distances plus importantes, voir le triple de celles du présent cas d'étude. Également, les tarifs

imposés pour l'enfouissement des balayures ainsi que les coûts d'achat des abrasifs vierges peuvent varier selon les lieux d'enfouissement technique utilisés ou les carrières sélectionnées. Par conséquent, l'impact sur la variation des coûts et des émissions de gaz à effet de serre lors de la transition vers une chaîne de valeur circulaire peut devenir rapidement considérable en fonction de ces éléments. D'autre part, bien que le modèle de simulation ait été appliqué pour quantifier les gains résultants de la mise en œuvre d'une chaîne de valeur circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier, cet outil d'aide à la décision pourrait être adapté afin d'être utilisé dans d'autres secteurs ou contextes.

Finalement, cet article soulève également de nouveaux enjeux de recherche engendrant la nécessité de travaux subséquents afin de circonscrire les bénéfices individuels des divers acteurs et supporter de manière avisée la transition vers une chaîne de valeur circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. Outre la validation de la faisabilité économique et environnementale de cette stratégie auprès d'administrations municipales par la réalisation de la même démarche, la poursuite de cette recherche sera indispensable afin de mettre en œuvre une économie circulaire pérenne pour l'ensemble des acteurs. Le système pourrait être modélisé de façon détaillée afin de définir les rôles appropriés des différentes parties prenantes le long de la chaîne en vue d'évaluer leurs bénéfices individuels et de subséquentement répartir les coûts, les revenus ainsi que les risques de façon adéquate et équitable.

3. DISCUSSION

Les résultats obtenus à la suite de l'étude de simulation présentée dans l'article démontrent que l'intégration de principes de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier permet la mise en œuvre d'un scénario viable sur le réseau routier provincial desservi par le centre de services de Trois-Rivières. À partir de la deuxième année d'exploitation, ce scénario permet en effet de générer des économies monétaires dues à la réduction significative de l'enfouissement et des coûts y étant reliés tout en réduisant légèrement le bilan carbone des opérations. Le passage de la chaîne de valeur linéaire actuelle vers une chaîne de valeur circulaire devrait donc être une stratégie considérée par le ministère des Transports du Québec pour ce centre de services.

3.1 Simulation d'un cas d'étude générique

Les résultats de la simulation et les conclusions tirées à partir de ces derniers concernent cependant un cas d'étude spécifique à la collecte de balayures en contexte autoroutier effectuée par le centre de services de Trois-Rivières. Par conséquent, afin d'étendre la portée des résultats concernant la faisabilité économique et l'impact environnemental de l'intégration de l'économie circulaire par la revalorisation d'une partie des balayures de rue en abrasifs d'hiver, un sondage a été réalisé en collaboration avec le ministère des Transports du Québec auprès de ses 54 centres de services. Six renseignements étaient demandés dans le sondage : le taux de collecte, le coût d'achat des abrasifs vierges, le tarif d'enfouissement, les adresses des carrières et des lieux d'enfouissement technique utilisés ainsi que les coûts pour les opérations de balayage et de transport. Le Tableau 15 à l'Annexe II présente la liste des centres de services selon leur région administrative et indique ceux ayant répondu au sondage. Pour chacun des renseignements, la moyenne des données collectées a été

calculée afin d'obtenir les valeurs en intrant au modèle qui sont associées à ce cas d'étude. Également, à partir de la base de données du ministère des Transports du Québec, la demande annuelle globale en abrasifs pour l'ensemble des centres de services a été extraite. Cette information a permis d'estimer la consommation moyenne d'un centre de services et, par le fait même, d'établir la proportion d'abrasifs de type AB-10 épandus sur le réseau routier provincial. Les valeurs ainsi obtenues des données d'entrée et des paramètres ont mené à la réalisation d'une simulation en contexte autoroutier d'un cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec.

Toutefois, le taux de réponse au sondage a été de seulement 55,6 % et encore plus faible en fonction de chacun des paramètres. Par ailleurs, lors de la réception des réponses au sondage, certaines données semblaient aberrantes, soit dues à une mauvaise interprétation de la demande ou de l'utilisation d'une unité de mesure inappropriée. Considérant la quantité de réponses reçues, les données jugées erronées ont été retirées en procédant par une exclusion par paramètres et non en excluant complètement l'ensemble des données d'un centre de services. L'exception est le centre de services des Îles-de-la-Madeleine qui a été retiré lors de la compilation des données, puisque le coût d'achat des abrasifs vierges était un peu plus de quatre fois la moyenne de celui déboursé par les autres centres de services ayant répondu au sondage. De plus, aucune carrière locale ni lieu d'enfouissement technique ne sont présents dans cette municipalité faisant en sorte que les grandes distances à parcourir lors des transports pour l'approvisionnement en abrasifs et l'enfouissement des balayures sont non représentatives de la réalité des centres de services du Québec.

Ensuite, des hypothèses ont été posées quant aux valeurs de certains paramètres pour le cas d'étude générique. En l'absence d'information, l'hypothèse que le site de dépôt temporaire de la matière balayée se situe au même endroit que le centre de services et donc également le centre de triage, pour chacun des centres de services, a été posée. Dans le même ordre d'idées, la distance moyenne parcourue lors du transport des balayures depuis les secteurs de balayage jusqu'au site de dépôt temporaire, estimée

lors d'analyses internes à l'aide d'un modèle de simulation pour le cas d'étude du centre de services de Trois-Rivières, a été conservée. Aussi, pour les centres de services consultés effectuant leur approvisionnement en abrasifs auprès de plusieurs carrières ou acheminant leurs balayures dans divers lieux d'enfouissement technique, la moyenne des distances entre le centre de services ciblé et les carrières ou les lieux d'enfouissement a été utilisée. Enfin, concernant les coûts pour les opérations de balayage ainsi que de transport, une quantité insuffisante de données ont été obtenues et considérant que la majorité de celles reçues était sous la forme d'un montant forfaitaire, il a été impossible de les utiliser dans le modèle de simulation. Ainsi, puisque les coûts unitaires de ces opérations sont invariables entre le scénario linéaire et circulaire, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas d'influence sur les mesures de performances lors de la comparaison, les coûts associés au cas d'étude du centre de services de Trois-Rivières ont été empruntés. Les autres valeurs des données d'entrée et des paramètres, utilisées dans la simulation pour le cas d'étude générique (outre la demande annuelle en abrasifs, la proportion d'abrasifs AB-10 épandus et les renseignements présents dans le sondage), demeurent également identiques à celles du cas d'étude du centre de services de Trois-Rivières. Le Tableau 7 présente les données d'entrée du modèle de simulation des chaînes de valeur linéaire et circulaire alors que le Tableau 8 contient une liste exhaustive des paramètres utilisés dans le calcul des différentes mesures de performance. Les valeurs ou distributions de probabilités prises par les données d'entrée ou les paramètres dans le cadre du cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec sont indiquées dans les tableaux. D'ailleurs, la taille d'échantillon relative à chaque donnée d'entrée ou paramètre recueilli dans le cadre du sondage auprès des 54 centres de services du ministère des Transports du Québec, s'il y a lieu, est inscrite dans les tableaux sous la valeur ou la loi de probabilités définie.

Tableau 7
Données d'entrée du modèle de simulation des chaînes de valeur linéaire et circulaire
(cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec)

Donnée d'entrée	Définition	Type de donnée		Valeur ou distribution de probabilités	Source
		Déterministe	Stochastique		
ε	Demande annuelle en abrasifs		X	Loi triangulaire Valeur moyenne = 19 721 Valeur minimum = 17 531 Valeur maximum = 22 195	Données historiques (2012-2019) obtenues lors de communications personnelles avec le ministère des Transports du Québec
α	Proportion d'abrasifs de type AB-10 épandus		X	Loi triangulaire Valeur moyenne = 0,900 Valeur minimum = 0,873 Valeur maximum = 0,927	Données historiques (2012-2019) obtenues lors de communications personnelles avec le ministère des Transports du Québec
β	Taux de collecte des balayures		X	0,0494 (n=7)	Sondage réalisé auprès des 54 centres de services du ministère des Transports du Québec
γ	Fraction des balayures triées dédiée à une revalorisation		X	Loi triangulaire Valeur moyenne = 0,981 Valeur minimum = 0,973 Valeur maximum = 0,991	Tests de triage effectués dans le cadre de travaux internes sur quatre échantillons de balayures de rue collectés sur le réseau routier provincial
δ	Portion des balayures triées dédiée à une revalorisation respectant tous les critères environnementaux pour une utilisation en abrasifs	X		0,444	Bouchard et al. (2021)
η	Portion des balayures triées dédiée à une revalorisation ne respectant pas tous les critères environnementaux pour une utilisation en abrasifs et qui est donc éligible à une utilisation pour la construction ou la réparation d'infrastructures routières	X		0,955	Bouchard et al. (2021)
ζ	Proportion d'abrasifs vierges de type AB-10 achetés pour la fabrication d'abrasifs usagés à partir de la portion des balayures triées dédiée à une revalorisation respectant tous les critères environnementaux pour une utilisation en abrasifs		X	$(\varepsilon * \beta * \gamma * \delta) * R$	MTMDET (2016)

Tableau 8
Liste exhaustive des paramètres utilisés dans le calcul des différentes mesures de performance (cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec)

Paramètre	Définition	Valeur	Source
C _{AB10}	Coût d'achat unitaire des abrasifs de type AB-10 (sable)	14,5 \$/t (n=25)	Sondage réalisé auprès des 54 centres de services du ministère des Transports du Québec
C _{AB5}	Coût d'achat unitaire des abrasifs de type AB-5 (petites pierres)	19,4 \$/t (n=9)	Sondage réalisé auprès des 54 centres de services du ministère des Transports du Québec
P	Proportion des balayures dans la chaîne linéaire pour laquelle le lieu d'enfouissement technique requiert le paiement du tarif faible selon le degré de contamination	0,977	Bouchard et al. (2021)
(1-P)	Proportion des balayures dans la chaîne linéaire pour laquelle le lieu d'enfouissement technique requiert le paiement du tarif élevé selon le degré de contamination	0,0227	Bouchard et al. (2021)
T _{EF}	Tarif unitaire d'enfouissement faible	35,3 \$/t (n=14)	Sondage réalisé auprès des 54 centres de services du ministère des Transports du Québec
T _{EE}	Tarif unitaire d'enfouissement élevé	68,6 \$/t (n=9)	Sondage réalisé auprès des 54 centres de services du ministère des Transports du Québec
C _B	Coût unitaire pour l'opération de balayage	C _B *	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue * Le coût n'est pas divulgué par souci de confidentialité.
C _T	Coût unitaire pour l'opération de transport	4,00 \$/km	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue
C _S	Coût unitaire pour l'opération de triage	1,47 \$/t	Travaux internes pour les tests de triage des balayures
C _F	Coût unitaire pour l'opération de fabrication	1,19 \$/t	Travaux internes pour les tests de fabrication des abrasifs usagés
K ₁	Kilométrage (aller-retour) entre le secteur de balayage et le site de dépôt temporaire	32,0 km	Travaux internes de simulation sur la consommation et la productivité des opérations de balayage de rue printanier
K ₂	Kilométrage (aller-retour) entre le site de dépôt temporaire et le lieu d'enfouissement technique dans la chaîne linéaire	175 km (n=24)	Sondage réalisé auprès des 54 centres de services du ministère des Transports du Québec
K ₃	Kilométrage (aller-retour) entre le site de dépôt temporaire et le centre de triage dans la chaîne circulaire	0 km	Hypothèse de travail
K ₄	Kilométrage (aller-retour) entre le centre de triage et le lieu d'enfouissement technique dans la chaîne circulaire	175 km (n=24)	Sondage réalisé auprès des 54 centres de services du ministère des Transports du Québec
K ₅	Kilométrage (aller-retour) entre la carrière pour les abrasifs AB-10 et le centre de services ou le centre de triage	111 km (n=29)	Sondage réalisé auprès des 54 centres de services du ministère des Transports du Québec
K ₆	Kilométrage (aller-retour) entre la carrière pour les abrasifs AB-5 et le centre de services ou le centre de triage	111 km (n=29)	Sondage réalisé auprès des 54 centres de services du ministère des Transports du Québec
R	Facteur pour la recette de fabrication des abrasifs usagés, à savoir la proportion d'abrasifs vierges AB-10 devant être mélangée aux balayures admissibles à la revalorisation en viabilité hivernale	3,00	MTMDET (2016)
C	Capacité moyenne du camion semi-remorque	29,0 t	Communication personnelle avec le prestataire de services en balayage de rue
E _B	Émissions de gaz à effet de serre unitaire pour l'opération de balayage	61,4 kg éq. CO ₂ /t	Travaux internes de simulation sur la consommation et la productivité des opérations de balayage de rue printanier
E _T	Émissions de gaz à effet de serre unitaire pour l'opération de transport	1,19 kg éq. CO ₂ /km	Travaux internes de simulation sur la consommation et la productivité des opérations de balayage de rue printanier
E _P	Émissions de gaz à effet de serre unitaire pour la production d'abrasifs vierges	5,00 kg éq. CO ₂ /t	Akan et al. (2017)
E _S	Émissions de gaz à effet de serre unitaire pour l'opération de triage	1,18 kg éq. CO ₂ /t	Travaux internes pour les tests de triage des balayures
E _F	Émissions de gaz à effet de serre unitaire pour l'opération de fabrication	0,0670 kg éq. CO ₂ /t	Travaux internes pour les tests de fabrication des abrasifs usagés

3.2 Résultats

Les résultats de la simulation du cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec pour les deux scénarios (chaîne de valeur linéaire et circulaire) sur une période de cinq ans sont d'abord présentés, puis ensuite analysés et comparés. Les mêmes indicateurs de performance que ceux ciblés dans l'article sont utilisés dans cette comparaison. D'abord, le Tableau 9 indique la demande annuelle globale en abrasifs pour l'épandage (ϵ), soit la quantité moyenne consommée par un centre de services de la province de Québec pour assurer le niveau de service requis sur le réseau routier. Ensuite, le Tableau 10 présente les variations en pourcentage et en valeur absolue des flux de matières alors que le Tableau 11 et le Tableau 12 résument respectivement les variations en pourcentage et en valeur absolue des coûts ainsi que des émissions de gaz à effet de serre engendrées par l'intégration de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. Ces tableaux incluent également un bilan de la moyenne des résultats de la simulation, excluant la première année, pour le cas d'étude du centre de services de Trois-Rivières décrit dans l'article afin de permettre la comparaison par rapport aux résultats obtenus pour le cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec. Les variations pour les cinq années simulées ont été calculées, pour chacun des indicateurs de performance, en divisant les résultats du scénario circulaire par ceux du scénario linéaire pour celles en pourcentage et en soustrayant les résultats du scénario linéaire de ceux du scénario circulaire pour celles en valeur absolue. Tous les résultats présentés dans les tableaux ci-dessous ont été calculés à partir de la moyenne des résultats des dix répliques effectuées pour chacune des années lors de la simulation.

Tableau 9
Demande annuelle globale en abrasifs
(cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec)

Année	Quantité (t)
1	19 247
2	19 085
3	19 918
4	20 334
5	20 034
Moyenne 2 à 5 ans	19 843

Tableau 10
Variation des flux de matières engendrée par une transition vers l'économie circulaire
(cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec)

Année	Variation des flux de matières					
	Demande en abrasifs vierges		Balayures enfouies		Balayures revalorisées en abrasifs usagés	
	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)
1	+ 6,67	+ 1 284	- 95,8	- 951	-	+ 428
2	- 2,35	- 449	- 95,8	- 903	-	+ 421
3	- 2,04	- 406	- 95,4	- 933	-	+ 426
4	- 1,62	- 330	- 96,6	- 1 027	-	+ 458
5	- 2,33	- 467	- 96,5	- 978	-	+ 455
Moyenne 2 à 5 ans	- 2,09	- 413	- 96,1	- 960	-	+ 440
Écart-type	0,341	61,0	0,573	54,1	-	19,2
Résultat moyen (cas centre services T-R)	- 1,94	- 136	- 95,8	- 315	-	+ 146
	1,32	89,2	0,363	23,8	-	12,1

Tableau 11
Variation des coûts engendrée par une transition vers l'économie circulaire
(cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec)

Année	Variation des coûts							
	Achat d'abrasifs vierges		Opérations (Balayage, transport, triage et fabrication)		Enfouissement		Total	
	(%)	(\$)	(%)	(\$)	(%)	(\$)	(%)	(\$)
1	+ 6,45	+ 18 566	+ 0,0255	+ 142	- 92,0	- 32 942	- 1,62	- 14 234
2	- 2,28	- 6 492	- 4,66	- 25 253	- 91,9	- 31 276	- 7,32	- 63 022
3	- 1,96	- 5 870	- 4,48	- 25 246	- 91,3	- 32 196	- 7,05	- 63 313
4	- 1,57	- 4 772	- 4,40	- 26 077	- 93,6	- 35 879	- 7,14	- 66 728
5	- 2,25	- 6 753	- 4,71	- 27 072	- 93,3	- 34 112	- 7,46	- 67 936
Moyenne 2 à 5 ans	- 2,02	- 5 972	- 4,56	- 25 912	- 92,5	- 33 366	- 7,24	- 65 250
Écart-type	0,331	881	0,146	866	1,09	2 050	0,182	2 457
Résultat moyen (cas centre services T-R)	- 1,34	- 522	- 0,367	- 480	- 77,8	- 7 104	- 4,32	- 8 108
	1,02	380	0,549	722	1,90	664	0,478	492

Tableau 12
Variation des émissions de gaz à effet de serre engendrée par une transition vers l'économie circulaire
(cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec)

Année	Variation des émissions de gaz à effet de serre					
	Production d'abrasifs vierges		Opérations (Balayage, transport, triage et fabrication)		Total	
	(%)	(kg éq. CO ₂)	(%)	(kg éq. CO ₂)	(%)	(kg éq. CO ₂)
1	+ 6,67	+ 6 420	+ 0,847	+ 1 320	+ 3,07	+ 7 740
2	- 2,35	- 2 245	- 4,14	- 6 285	- 3,45	- 8 529
3	- 2,04	- 2 030	- 3,96	- 6 250	- 3,22	- 8 280
4	- 1,62	- 1 650	- 3,86	- 6 395	- 3,01	- 8 044
5	- 2,33	- 2 335	- 4,18	- 6 730	- 3,47	- 9 065
Moyenne 2 à 5 ans	- 2,09	- 2 065	- 4,04	- 6 415	- 3,29	- 8 480
Écart-type	0,341	305	0,152	219	0,219	438
Résultat moyen (cas centre services T-R)	- 1,94	- 678	+ 0,790	+ 312	- 0,560	- 391
	1,32	446	0,697	278	0,979	694

3.3 Analyse

Les résultats, similaires à ceux obtenus pour le cas d'étude ciblant le centre de services de Trois-Rivières présenté dans l'article, indiquent toutefois que le cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec génère davantage de bénéfices monétaires et environnementaux. En effet, selon l'étude de simulation et en excluant la première année de la transition dans les résultats, l'intégration de l'économie circulaire pour le cas d'étude du centre de services de Trois-Rivières permet d'engendrer une économie monétaire moyenne de 4,32 % (8 108 \$) alors que le cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec génère une économie moyenne de 7,24 % (65 250 \$). Pour ce cas d'étude, ce résultat correspond à gain monétaire moyen de 3,29 \$ par tonne d'abrasifs consommée. Proportionnellement, le gain monétaire total généré est donc presque deux fois plus important lorsque l'on compare les deux études de cas. La diminution du coût total de la chaîne engendrée avec l'implantation de l'économie circulaire est en majeure partie causée par la réduction significative de l'enfouissement et des coûts qui y sont associés. Néanmoins, l'écart dans la variation du gain monétaire entre les deux cas d'étude est principalement attribuable aux coûts reliés aux opérations de transport de la matière. Ce coût représente en effet une plus grande proportion du coût total de la chaîne de valeur linéaire actuelle que le coût d'enfouissement tel qu'illustré à la Figure 2, soit respectivement 31,9 % et 4,85 %. Dans le cas d'étude générique, des distances moyennes beaucoup plus importantes doivent être parcourues entre les carrières d'approvisionnement, les lieux d'enfouissement technique et les différents centres de services de la province de Québec. De ce fait, la réduction des opérations de transport avec la mise en œuvre d'un modèle économique circulaire, en comparaison avec le cas d'étude du centre de services de Trois-Rivières où ces différents sites sont rapprochés, cause de plus grandes économies monétaires. Ce gain, compris dans les coûts totaux d'opération, est toutefois légèrement diminué par les coûts requis au triage des balayures et à la fabrication des abrasifs usagés,

puisque une plus grande quantité de balayures est collectée dans ce cas d'étude. Évidemment, l'enfouissement a aussi un impact considérable sur la différence dans les économies monétaires observées entre les deux cas d'étude. Le cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec génère des économies supplémentaires associées aux coûts d'enfouissement par rapport à celui du centre de services de Trois-Rivières. L'écart dans la réduction des coûts d'enfouissement est provoqué par le fait que le tarif d'enfouissement moyen requis pour la réception des matières résiduelles par les lieux d'enfouissement technique, donc le tarif considéré faible payé pour la majorité des balayures collectées et enfouies, est plus élevé dans le cas d'étude générique. Conséquemment, le passage vers l'économie circulaire dans ce cas d'étude engendre des économies monétaires plus importantes. De plus, comme l'analyse de sensibilité sur la variable du taux de collecte l'a démontré à la Figure 4 et considérant que le taux de collecte moyen est un peu plus élevé dans le cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec, la quantité d'abrasifs vierges achetés annuellement et le coût y étant relié sont légèrement plus faibles par rapport au cas d'étude pour le centre de services de Trois-Rivières. Le coût moyen d'achat unitaire des abrasifs est d'ailleurs plus élevé dans le cas d'étude générique ce qui amplifie la réduction monétaire lors de la transition vers l'économie circulaire grâce à l'utilisation d'abrasifs usagés. En se référant à la Figure 2, les coûts associés à l'achat d'abrasifs vierges représentent quant à eux 21,3 % du coût total de la chaîne de valeur linéaire.

D'autre part, l'intégration de l'économie circulaire dans le cas d'étude du centre de services de Trois-Rivières permet d'engendrer une diminution moyenne du bilan carbone des opérations de 0,560 % (391 kg éq. CO₂) alors que le cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec génère une diminution moyenne de 3,29 % (8 480 kg éq. CO₂). Ce dernier résultat correspond à une réduction moyenne du bilan carbone de 0,427 kg éq. CO₂ par tonne d'abrasifs consommée. Le gain total sur le bilan carbone associé aux opérations est donc pour sa part, toute proportion gardée, pratiquement six fois plus important. Cet écart entre les

deux cas d'étude est également attribuable en majeure partie à la réduction des opérations de transport de la matière. Une infime diminution de la quantité de gaz à effet de serre émise lors de la production d'abrasifs vierges est aussi observée dans le cas d'étude générique en comparaison au cas d'étude du centre de services de Trois-Rivières. Cette différence est causée par une demande plus faible en abrasifs vierges dans le cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec en raison de la fabrication légèrement plus importante d'abrasifs usagés qui est corrélée au taux de collecte des balayures.

La réalisation de l'étude de simulation sur un cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec a permis d'étendre la portée des travaux réalisés au-delà du cas d'étude ciblant spécifiquement le centre de services de Trois-Rivières. Les résultats démontrent qu'une transition vers une chaîne de valeur circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier est une stratégie bénéfique pour l'ensemble du réseau routier géré par le ministère des Transports du Québec. À l'échelle provinciale, un gain important à la fois monétaire qu'environnemental pourrait en effet être généré si le modèle circulaire proposé était adopté par tous les centres de services aptes à effectuer la transition. Toutefois, malgré les résultats concluants obtenus sur la base du cas d'étude générique, la réalisation de bénéfices demeure incertaine pour certains centres de services de la province de Québec. Évidemment, le faible taux de réponse au sondage effectué auprès des centres de services empêche de valider avec certitude pour chacun d'entre eux la faisabilité économique et l'impact environnemental de l'économie circulaire dans cette filière.

3.4 Limites des travaux et perspectives de recherche futures

La démonstration du modèle de simulation a été réalisée sur deux cas d'étude. Le premier concerne spécifiquement le centre de services de Trois-Rivières alors que le second s'intéresse à un cas d'étude générique d'un centre de services de la province de Québec, et ce, tous deux à partir de données concernant des balayures de rue

collectées sur le réseau routier provincial. Bien que ces études de cas soient représentatives de la réalité vécue dans le domaine du balayage de rue printanier en contexte autoroutier dans les pays nordiques, les gains associés à la transition vers l'économie circulaire dans cette filière dans d'autres contextes d'application n'ont pas été évalués dans le cadre de ces travaux de recherche. Par conséquent, il est impossible d'assumer que des bénéfices du même ordre seraient obtenus avec la revalorisation en abrasifs d'une partie des balayures collectées sur des types de routes distincts. Le cas échéant, les lois de probabilités ou valeurs prises par les données d'entrée et les paramètres, utilisées dans le calcul des différentes mesures de performance des modèles de simulation, subiraient inévitablement des variations par rapport à celles utilisées dans les deux cas d'étude présentés. Afin de valider la faisabilité économique et l'amélioration du bilan carbone avec la mise en œuvre d'une économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier autre qu'en contexte autoroutier, la même démarche devrait également être réalisée notamment auprès d'administrations municipales. Les municipalités gèrent pour leur part 107 000 km du réseau routier de la province de Québec comprenant des routes, des rues et des chemins locaux (MTQ, 2021). Ces routes municipales représentent un kilométrage total environ trois fois plus élevé que celui de la portion du réseau routier qui est gérée par le ministère des Transports du Québec. La prédominance de ce type de routes rend pertinente la validation des hypothèses concernant les gains potentiels associés à un modèle économique circulaire, puisque des bénéfices pourraient ainsi être générés à plus grande échelle. De plus, la comparaison dans différents pays de l'étude présentée dans ce mémoire n'a pas été effectuée. Bien qu'intéressante comme perspective de recherche future, une telle analyse nécessite de collecter des données pour les pays ciblés. En effet, puisque les données d'entrée et les paramètres utilisés dans le calcul des coûts ainsi que du bilan carbone peuvent varier, les résultats obtenus à la suite de la simulation pourraient conséquemment être différents si l'on considère d'autres études de cas.

Dans d'autres contextes, certaines données d'entrée pourraient évidemment varier et ainsi influencer les résultats générés lors de la simulation, principalement en regard des taux de collecte des balayures lors des opérations de nettoyage printanier. En effet, en contexte autoroutier, le taux de collecte moyen recensé lors du sondage auprès des centres de services de la province de Québec est de 4,94 %. Cette faible quantité collectée annuellement limite la fabrication d'abrasifs usagés et ainsi les économies monétaires concernant l'achat d'abrasifs vierges. Néanmoins, un contexte où la quantité annuelle de balayures collectée serait plus élevée, tel que le taux moyen de récupération de 70 % mentionné par Mokhbi et al. (2017) dans leurs travaux, permettrait de réduire davantage la consommation d'abrasifs vierges. Un plus grand taux de récupération des balayures de rue influencerait d'ailleurs le bilan carbone lors de la transition vers une chaîne de valeur circulaire. Il y a en effet un potentiel de réduction important considérant que les émissions de gaz à effet de serre associées à la production d'abrasifs vierges représentent 48,2 % du bilan carbone de la chaîne linéaire actuelle selon la Figure 3. Toutefois, comme illustré à la Figure 4, certains cas pourraient rapidement créer un souci de surplus de matières dû à la trop grande fabrication d'abrasifs usagés, ce qui engendrait une déséconomie étant contraire à l'objectif derrière ces travaux de recherche. Dans de tels cas, la fabrication d'abrasifs usagés supérieure à la demande annuelle pour la consommation serait causée par la recette de fabrication (une part de balayures pour trois parts d'abrasifs vierges de type AB-10) utilisée afin de respecter les normes environnementales pour un réemploi des abrasifs en viabilité hivernale. Cependant, d'autres recettes sont envisageables en fonction du type d'abrasifs principalement ou exclusivement épandu sur les routes par un centre de services donné. La recette de fabrication des abrasifs usagés pourra d'ailleurs varier selon la contamination des balayures collectées modifiant ainsi le seuil menant à une quantité d'abrasifs usagés excédant la demande annuelle en abrasifs. Notons, par ailleurs, que des travaux additionnels seront requis afin de valider la conformité de chacune des recettes envisageables.

Également, divers paramètres peuvent varier selon le centre de services étudié. Considérant que ces derniers sont utilisés dans le calcul des différentes mesures de performance, les résultats de la simulation sur l'implantation d'une chaîne de valeur circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier pourraient potentiellement être différents si d'autres études de cas étaient analysées. D'abord, les distances à parcourir lors des transports entre les carrières, les lieux d'enfouissement technique et les centres de services peuvent différer grandement selon le cas d'étude et conséquemment influencer les coûts ainsi que le bilan carbone. Ensuite, les tarifs d'enfouissement imposés pour la réception des matières résiduelles peuvent aussi varier selon le lieu. Cela peut faire en sorte, si les tarifs sont élevés, d'augmenter les bénéfices monétaires lors de la transition vers une économie circulaire considérant le détournement des balayures de l'enfouissement. Enfin, pareillement, les coûts d'achat des abrasifs vierges qui divergent selon le type épandu par le centre de services en fonction des conditions routières hivernales et des restrictions environnementales peuvent engendrer une diminution importante du coût total de la chaîne lors de l'implantation d'un modèle économique circulaire. Ces éléments peuvent donc avoir une incidence sur les coûts, mais aussi sur les émissions de gaz à effet de serre de la chaîne lors de la mise en œuvre d'une économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier.

D'autre part, les résultats présentés de l'étude de simulation incluent l'amortissement des machineries, mais l'absence de coûts directs et d'émissions relatifs à l'usage d'un bâtiment pourrait faire en sorte de reconsidérer les conclusions de rentabilité ainsi que d'amélioration du bilan environnemental. Avant d'effectuer la transition du modèle linéaire actuel à un modèle économique circulaire, chaque centre de services devra donc procéder à une analyse additionnelle pour confirmer les avantages de la mise en œuvre d'une chaîne de valeur circulaire. Selon un principe de développement durable, l'utilisation d'un bâtiment existant pour installer les équipements requis aux opérations spécifiques du modèle circulaire serait à privilégier. Par ailleurs, certains équipements spécialisés, dont le tamiseur rotatif, ne peuvent être acquis qu'aux seules

fins d'une utilisation pour le traitement des balayures de rue. La faible utilisation des équipements pour effectuer le traitement n'en permet la rentabilité à elle seule et c'est pourquoi une alternative devrait être privilégiée (location, sous-traitance, stratégie de partage en économie circulaire, etc.).

Il est aussi important de mentionner que les résultats de la variation des flux de matières, des coûts et des émissions de gaz à effet de serre ne dépendent pas uniquement de la transition vers une chaîne de valeur circulaire, mais également des conditions hivernales variables. Ces dernières influencent en effet le niveau de service et conséquemment la quantité annuelle d'abrasifs consommés. Il serait donc pertinent d'évaluer éventuellement la corrélation entre la sévérité de l'hiver et les résultats obtenus pour les mesures de performances ciblées.

Enfin, dans les travaux de recherche présentés dans ce mémoire, seuls les gains de la valorisation des balayures de rue en abrasifs usagés pour l'épandage en viabilité hivernale ont été prédits. Par conséquent, les bénéfices qui pourraient être retirés de l'utilisation de la portion de balayures revalorisables, mais ne respectant pas tous les critères pour une utilisation en abrasifs, n'ont pas été évalués. Bien qu'une étude de marché afin de connaître la demande en matières résiduelles des abrasifs dans divers secteurs devrait préalablement être faite, l'approche par étude de simulation décrite pourrait également être réalisée afin de supporter l'analyse des autres avenues possibles pour la valorisation des balayures de rue. En effet, les gains potentiels monétaires et environnementaux de l'utilisation des balayures éligibles pour la construction ou la réparation d'infrastructures routières, dont la caractérisation chimique effectuée par Bouchard et al. (2021) a permis de valider la faisabilité, pourraient être mesurés afin de tenir compte de l'ensemble de la chaîne de valeur circulaire. Dans ces travaux, Mokhbi (2016) suggère aussi différentes alternatives dont les avantages potentiels pourraient être évalués. Outre la réutilisation en abrasifs d'hiver ou l'enfouissement, cet auteur affirme que la valorisation des matières résiduelles des abrasifs épandus sur le réseau routier peut être faite par leur utilisation dans les enrobés bitumineux, dans les bétons ordinaires, dans les matériaux

granulaires de type MG20 ou comme matériaux de recouvrement journalier. Évidemment, la capacité de générer davantage de gains monétaires est présente. Cependant, elle est incertaine au niveau de l'amélioration du bilan carbone de la chaîne de valeur considérant les opérations additionnelles nécessaires pour le conditionnement des balayures recyclées en fonction des avenues de réutilisations ciblées en comparaison avec l'achat de matières vierges.

Il convient de noter que les choix de conception du modèle de simulation des deux scénarios, dont les hypothèses posées ainsi que les lois de probabilités définies pour les données d'entrée ou les valeurs prises par certains paramètres, tels que décrits à la section 2.4.2, s'ajoutent aux limites présentées dans cette section.

En somme, l'intégration de l'économie circulaire est généralisable, mais nécessite une adaptation du système aux besoins de l'administration routière relativement au processus de conditionnement des balayures de rues collectées ainsi qu'à la logistique sous-jacente à la chaîne de valeur.

4. CONCLUSION

Le balayage de rue effectué au printemps dans la province de Québec entraîne actuellement l'enfouissement de plusieurs milliers de tonnes de balayures de rue collectées. Ce processus linéaire a des effets environnementaux et monétaires négatifs considérables. L'implantation d'une économie circulaire dans cette filière par la revalorisation d'une partie des matières récupérées en abrasifs d'hiver serait une stratégie économiquement et environnementalement viable pour les opérations de balayage de rue effectuées sur la portion du réseau routier provincial comme démontré à l'aide de l'étude de simulation réalisée sur les deux cas d'étude. En effet, la diminution significative des coûts d'enfouissement dans le scénario de la chaîne de valeur circulaire, due au détournement de 96,1 % en moyenne des balayures collectées, fait en sorte que le coût total du scénario circulaire est inférieur à celui du modèle linéaire actuel. L'utilisation d'une partie des balayures collectées et triées en viabilité hivernale entraîne d'ailleurs une légère diminution des émissions de gaz à effet de serre associées aux opérations de la chaîne. Au-delà de la simulation réalisée sur un cas d'étude ciblant le centre de services de Trois-Rivières pour lequel, en moyenne, une économie monétaire de 4,3 % ainsi qu'une réduction du bilan carbone de 0,6 % pourraient être engendrées, cette recherche démontre que la mise en œuvre d'un modèle économique circulaire serait également bénéfique à l'échelle de l'ensemble des centres de services de la province de Québec. En considérant un cas d'étude générique en contexte autoroutier d'un centre de services de cette province, les résultats de la simulation indiquent qu'une économie monétaire moyenne de 7,2 % et une réduction moyenne du bilan carbone de 3,3 % pourraient effectivement être réalisées. Ainsi, la transition du scénario linéaire actuel vers une chaîne de valeur circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier devrait clairement être une stratégie envisagée par le ministère des Transports du Québec.

Malgré les résultats prometteurs obtenus indiquant que la mise en place d'un modèle économique circulaire serait avantageuse au niveau monétaire et environnemental, les

travaux présentés soulèvent de nouveaux enjeux de recherche. Premièrement, les différentes parties prenantes aux opérations et leurs interactions n'ont pas été prises en compte, mais seulement les avantages globaux d'une transition vers une chaîne de valeur circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. Deuxièmement, le design du nouveau réseau n'a pas été optimisé (sites de dépôt temporaire de la matière collectée, centres de triage, lieux d'enfouissement technique, etc.) afin d'évaluer le potentiel d'une efficacité opérationnelle accrue. Troisièmement, les résultats obtenus jusqu'à présent à l'aide du modèle de simulation ont parfois démontré un conflit entre des gains de nature monétaire et environnementale ainsi que la présence d'aspects stochastiques intrinsèques au contexte des opérations soulevant des enjeux managériaux en matière d'arbitrage et de partage des risques.

Des travaux subséquents seront donc nécessaires pour supporter de manière avisée une mise en œuvre équitable et pérenne pour l'ensemble des parties prenantes de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. Ainsi, une méthodologie générique pour le design d'une chaîne de valeur circulaire et la conception de ses mécanismes de coordination interorganisations pourrait être développée par le biais de la réalisation de divers sous-objectifs. D'abord, le système pourrait être modélisé de façon détaillée afin de définir les rôles appropriés des différentes parties prenantes le long de la chaîne en vue d'évaluer leurs bénéfices individuels. La répartition adéquate des coûts et des revenus entre eux pourrait conséquemment être déterminée tout comme le besoin d'incitatif pour supporter la mise en œuvre de l'économie circulaire. L'évaluation de diverses approches concevables de partage des risques et de rémunération pourrait donc permettre d'effectuer des recommandations aux parties prenantes sur la manière adéquate d'opérationnaliser la chaîne de valeur ainsi que sur des modèles d'affaires à emprunter. Ensuite, le design du réseau pour le balayage de rue printanier pourrait être élaboré. L'optimisation du design du nouveau réseau et du pilotage des flux de matière permettra également de vérifier la possibilité d'engendrer une mutualisation des infrastructures et des ressources entre plusieurs administrations routières

publiques. Enfin, l'arbitrage entre les gains monétaires et environnementaux engendrés lors de certaines opérations de la chaîne de valeur circulaire pourrait être étudié afin de déterminer une combinaison optimale. Évidemment, la mise en œuvre d'une stratégie d'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier oblige une nouvelle façon d'opérer afin d'élaborer un scénario viable à long terme.

RÉFÉRENCES

- Akan, M. Ö. A., Dhavale, D. G., & Sarkis, J. (2017). Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1195-1207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.225>.
- Blouin, F., Audy, J. F., Jebri, M. (2022). Balayures de rues printanières au Québec – Faisabilité de l'intégration de l'économie circulaire. *Vecteur Environnement*, [...] (soumis).
- BOMA Canada (2016). Lignes directrices de la caractérisation des matières résiduelles. Saisie le 15 octobre 2021, de <https://bomacanada.ca/wp-content/uploads/2016/09/Lignes-directrices-de-BOMA-Canada-pour-les-etudes-de-caracterisation-des-matieres-residuelles.pdf>.
- Bouchard, K., Audy, J. F., Lange, S., Jebri, M. (2021). Balayures de rues printanières au Québec – Analyse de données sur les possibilités de valorisation. *Vecteur Environnement*, 54(2), 36-41.
- Cong, L., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2017). Integration of dismantling operations into a value recovery plan for circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 149, 378-386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.115>.
- Donovan, H. (2005). Winter street sand recycling program. TAC-ATC Annual Conference, 18 au 21 septembre, Calgary, Canada.
- Esbensen, K. H., & Velis, C. (2016). Transition to circular economy requires reliable statistical quantification and control of uncertainty and variability in waste. *Waste Management and Research*, 34(12), 1197-1200. <https://doi.org/10.1177/0734242X16680911>.

- FCM (2005). Chaussées et trottoirs – Réutilisation ou recyclage des matériaux de construction ou d'entretien de routes. Saisie le 18 octobre, de <https://fcm.ca/sites/default/files/documents/resources/guide/infraguide-reutilisation-ou-recyclage-des-materiaux-de-construction-pgam.pdf>.
- Fulconis, F., & Philipp, B. (2016). Packaging et chaîne logistique en boucle fermée: contribution au passage d'une économie linéaire à une économie circulaire. *Logistique & Management*, 24(3-4), 186-198. <https://doi.org/10.1080/12507970.2016.1268936>.
- Genovese, A., Acquaye, A. A., Figueroa, A., & Koh, S. L. (2017). Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. *Omega*, 66, 344-357. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.05.015>.
- Gouvernement du Canada (2013). Document d'orientation sur la distinction entre un déchet, matière recyclable et produit pour les règlements sous la LCPE 1999. Saisie le 15 novembre 2021 de, <https://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/default.asp?lang=Fr&n=84791541-1&offset=2&toc=show>.
- Gouvernement du Québec (2021). Fiche du terme – Matière résiduelle. Saisie le 10 novembre 2021, de <http://www.thesaurus.gouv.qc.ca/tag/terme.do?id=7823>.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>.
- Korhonen, J., Nuur, C., Feldmann, A., & Birkie, S. E. (2018). Circular economy as an essentially contested concept. *Journal of cleaner production*, 175, 544-552. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.111>.
- Merli, R., Preziosi, M., & Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178, 703-722. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.112>.

- Mokhbi, S., Assaf, G. J., & Yacef, N. (2017). Évolution des propriétés physiques des abrasifs routiers exposés à un cycle hivernal et perspectives de leur réutilisation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(4), 286-297. <https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0071>.
- Mokhbi, S. (2016). Étude de faisabilité et développement d'une procédure de récupération et de réhabilitation des abrasifs routiers en vue de leur utilisation (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- Mokwa, R., & Foster, A. (2013). Testing and evaluation of recovered traction sanding material (No. FHWA-MT/13-003/8213). Montana. Dept. of Transportation. Research Programs. <https://doi.org/10.21949/1518284>.
- MTMDET (2016). Matériaux divers – Abrasifs. Norme 14401, t. VII, ch. 14, p. 1-2. Document en consultation.
- MTQ (2021). Information sur le réseau routier. Saisie le 9 avril 2021, de <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/projets-infrastructures/info-reseau-routier/pages/information-sur-le-reseau-routier.aspx?fbclid=IwAR39SPiLVLa5Vm5a89WbC7ZZqRxORTnspoJUAxc72G7P0BVn8OBTgLQxYDY>.
- MTQ (2015). Viabilité hivernale – Déneigement et déglacage de la chaussée – Niveaux de service. Norme 6101, t. VI, p. 1-5. Saisie le 19 octobre 2021, de <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/acces-information-renseignements-personnels/documents-reglement-diffusion/demande-acces/Documents/2019/04/DA-2018-2019-00515%20norme.pdf>.
- Nestorovic, M., & Radicevic, T. D. (2019). TRANSITION TO CIRCULAR ECONOMY. *Economic and Social Development: Book of Proceedings*, 203-209.

- Nevrlý, V., Šomplák, R., Smejkalova, V., Lipovský, T., & Jadrný, J. (2021). Location of municipal waste containers: Trade-off between criteria. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123445. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123445>.
- Pagoropoulos, A., Pigosso, D. C., & McAloone, T. C. (2017). The emergent role of digital technologies in the Circular Economy: A review. *Procedia CIRP*, 64, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.047>.
- Porter, M. E. (1986). *L'avantage concurrentiel : comment devancer ses concurrents et maintenir son avance*. Paris: InterÉditions.
- Pulley, A. K., Baird, K., & Felsburg, H. (2010). Investigation of re-use options for used traction sand (No. CDOT-2010-4). Colorado. DTD Applied Research and Innovation Branch.
- RECYC-QUÉBEC (2021). Rapport sectoriel de RECYC-QUÉBEC dans le cadre du mandat du BAPE sur l'état des lieux et la gestion des résidus ultimes. Saisie le 13 novembre 2021, de <https://voute.bape.gouv.qc.ca/dl/?id=00000236275>.
- RECYC-QUÉBEC (2020). L'économie circulaire. Saisie le 18 octobre 2021, de <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/feuilleton-economie-lineaire-circulaire.pdf>.
- RECYC-QUÉBEC (2019). Stratégies de circularité. Saisie le 20 octobre 2021, de <https://www.quebeccirculaire.org/static/strategies-de-circularite.html>.
- Sariatli, F. (2017). Linear economy versus circular economy: A comparative and analyzer study for optimization of economy for sustainability. *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development*, 6(1), 31-34. <https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0005>.
- Sørensen, P. B. (2018). From the linear economy to the circular economy: A basic model. *Finanz-Archiv: Zeitschrift für das Gesamte Finanzwesen*, 74(1), 71-87. <https://doi.org/10.1628/001522118X15097191506475>.

- Urbinati, A., Chiaroni, D., & Chiesa, V. (2017). Towards a new taxonomy of circular economy business models. *Journal of Cleaner Production*, 168, 487-498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.047>.
- Ville de Sherbrooke (2016). Plan de gestion des matières résiduelles (2016-2020). Saisie le 13 novembre 2021 de, <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/mrcvilledesherbrooke-pgmr-2016.pdf>.
- Weber, C. T., Trierweiler, L. F., & Trierweiler, J. O. (2020). Food waste biorefinery advocating circular economy: Bioethanol and distilled beverage from sweet potato. *Journal of Cleaner Production*, 268, 121788. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121788>.
- Werning, J. P., & Spinler, S. (2020). Transition to circular economy on firm level: Barrier identification and prioritization along the value chain. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118609>.
- Winans, K., Kendall, A., & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 825-833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>.
- Xu, X., Ma, Z., Chen, Y., Gu, X., Liu, Q., Wang, Y., ... & Chang, D. (2018). Circular economy pattern of livestock manure management in Longyou, China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(2), 1050-1062. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0667-4>.
- Ye, B., Shi, B., Shi, M., Zhang, L., & Zhang, R. (2020). Process simulation and comprehensive evaluation of a system of coal power plant coupled with waste incineration. *Waste Management & Research*, 0734242X20953494. <https://doi.org/10.1177/0734242X20953494>.

ANNEXE I
MODÈLE PRÉSENTÉ DANS LE LOGICIEL DE SIMULATION *SIMIO*
(EXEMPLE POUR LA DEUXIÈME ANNÉE)

Figure 5
Modèle de simulation dans le logiciel *SIMIO*

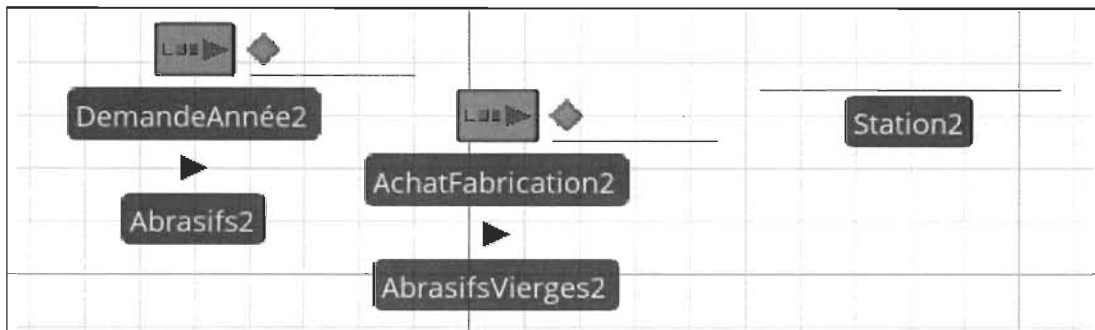


Tableau 13
Systèmes principaux du modèle de simulation et leur fonction

Système	Donnée d'entrée	Fonction
DemandeAnnée2	ε	Génération d'une valeur aléatoire selon la distribution de probabilités pour la demande annuelle en abrasifs
AchatFabrication2	ζ	Détermination de la quantité d'abrasifs vierges AB-10 à acheter sont la recette ciblée pour la fabrication d'abrasifs usagés

Figure 6
Processus intégrés dans les systèmes du modèle de simulation

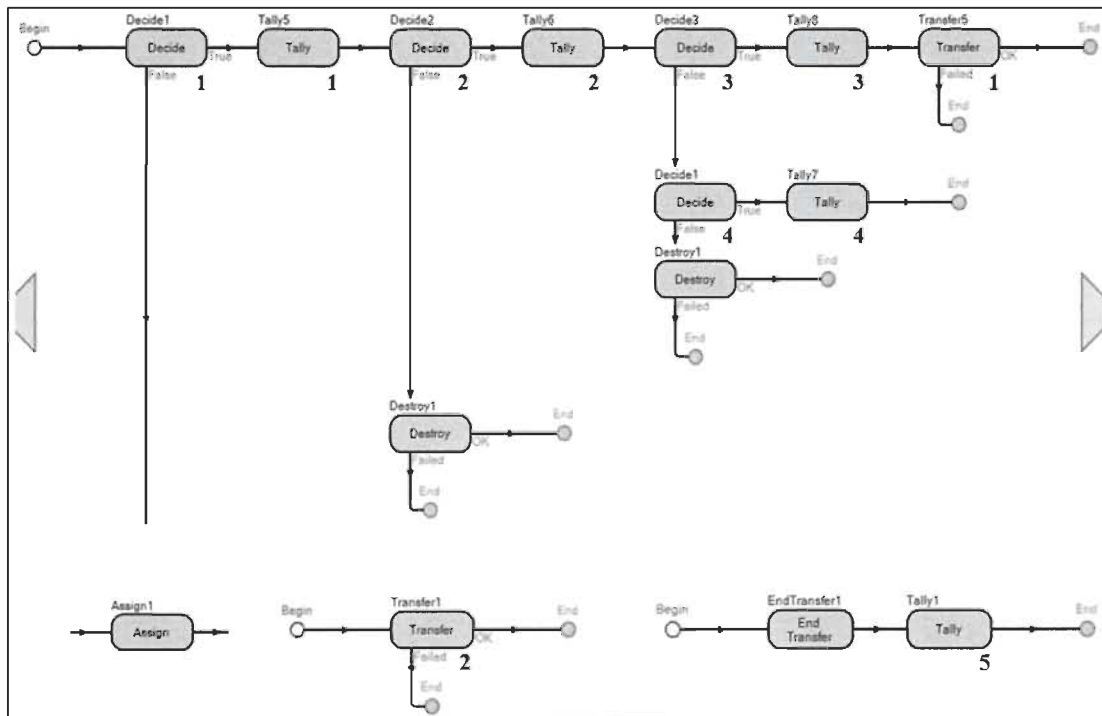


Tableau 14
Définition et rôle des processus intégrés dans les systèmes du modèle de simulation

Processus	Donnée d'entrée	Fonction
Assign	α	Génération d'une valeur aléatoire selon la distribution de probabilités pour la proportion d'abrasifs de type AB-10 épandus
Processus intégré dans le système « DemandeAnnuelle2 »		
Decide1	β	Génération d'une valeur aléatoire selon la distribution de probabilités pour le taux de collecte des balayures
Tally1	-	Mesure de la quantité de balayures collectées
Decide2	γ	Génération d'une valeur aléatoire selon la distribution de probabilités pour la fraction de balayures triée dédiée à une revalorisation
Tally2	-	Mesure du nombre de tonnes de balayures revalorisables
Decide3	δ	Génération de la valeur pour la portion de balayures triée dédiée à une revalorisation respectant tous les critères environnementaux pour une utilisation en abrasifs
Tally3	-	Mesure du nombre de balayures revalorisables en viabilité hivernale
Transfert1	-	Transfert de la quantité de balayures revalorisables en viabilité hivernale à la Station2
Decide4	η	Génération de la valeur pour la portion de balayures triée dédiée à une revalorisation ne respectant pas tous les critères environnementaux pour une utilisation en abrasifs et qui est donc éligible à une utilisation pour la construction ou la réparation d'infrastructures routières
Tally4	-	Mesure du nombre de tonnes de balayures revalorisables pour la construction ou la réparation d'infrastructures routières
Destroy	-	Détermination de la quantité de balayures qui sera dédiée à l'enfouissement
Processus intégré dans le système « AchatFabrication2 »		
Transfert2	-	Transfert de la quantité d'abrasifs vierges achetés pour la fabrication d'abrasifs usagés à la Station2
Processus intégré dans « Station2 »		
EndTransfert	-	Terminer le transfert des balayures et des abrasifs vierges à la Station2
Tally5	-	Mesure du nombre de tonnes d'abrasifs usagés fabriqués

ANNEXE II
CENTRE DE SERVICES DU MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC

Tableau 15
Centres de services du ministère des Transports du Québec selon leur région administrative

Région administrative	Centre de services	Réponse au sondage
Abitibi-Témiscamingue	Amos	X
	Macamic	X
	Rouyn-Noranda	X
	Val-d'Or	X
	Ville-Marie	X
Bas-Saint-Laurent–Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine	Témiscouata-sur-le-Lac	X
	Gaspé	X
	Îles-de-la-Madeleine	X
	Mont-Joli	X
	New Carlisle	X
	Cacouna	X
	Saint-Pascal	X
	Sainte-Anne-des-Monts	X
Capitale-Nationale	Cap-Santé	X
	La Malbaie	X
	Québec	X
Chaudière-Appalaches	Beauceville	
	Thetford Mines	
	Saint-Jean-Port-Joli	
	Saint-Michel-de-Bellechasse	
	Lévis	
	Lac-Etchemin	
Côte-Nord	Baie-Comeau	
	Bergeronnes	
	Havre-Saint-Pierre	
	Sept-Îles	
Estrie	Cookshire	X
	Lac-Mégantic	X
	Foster	X
	Richmond	X
	Sherbrooke	X
	Magog	X
Laurentides–Lanaudière	Saint-Jérôme	
	Joliette	
	Lachute	
	Mont-Laurier	
	Mont-Tremblant	

Tableau 15 (suite)
Centres de services du ministère des Transports du Québec selon leur région administrative

Région administrative	Centre de services	Réponse au sondage
Mauricie–Centre-du-Québec	Trois-Rivières	X
	Shawinigan	
	Nicolet	
	Drummondville	
	Victoriaville	X
Montréal	Ormstown	X
	Napierville	X
	Saint-Hyacinthe	X
	Saint-Jean-sur-Richelieu	X
Outaouais	Campbell's Bay	
	Gatineau	
	Maniwaki	
	Papineauville	
Saguenay–Lac-Saint-Jean–Chibougamau	Alma	X
	Chibougamau	
	Chicoutimi	X
	Roberval	