Amélioration des performances des systèmes de fabrication circulaire dans le paradigme de l'industrie 4.0 en contexte de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée

par

Massiva BOUDANE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAITRISE EN GESTION DE PROJETS D'INGÉNIÉRIE
M. Sc. A

MONTRÉAL, LE 18 JANVIER 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Massiva Boudane, 2022

Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Lucas Hof, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jean Pierre Kenne, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Christian Belleau, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Victor Songmene, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 21 DECEMBRE 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de recherche, Professeur Lucas HOF et Professeur Jean Pierre KENNE. Je les remercie de m'avoir encadrée, orientée, aidée et conseillée.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants de RECYC-QUEBEC et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes sœurs et mon frère pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis dont le soutien inconditionnel et les encouragements ont été d'une grande aide et dédie ce modeste travail à tous ceux qui sont partis trop tôt.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Amélioration des performances des systèmes de fabrication circulaire dans le paradigme de l'industrie 4.0 en contexte de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée

Massiva BOUDANE

RÉSUMÉ

L'économie des énergies non renouvelables ainsi que la réduction des émissions dans l'environnement sont deux objectifs cruciaux de la production industrielle. La valorisation des produits post-consommation conjuguée à la numérisation de l'industrie semble s'inscrire dans un contexte dans lequel nous optimisons ces objectifs. Cette valorisation maximise l'utilisation des ressources issues des produits en fin de vie dans une logique circulaire tout en réduisant l'empreinte environnementale. C'est ce qu'on appelle la fabrication circulaire (FC).

Cette étude envisage une FC adaptée au besoin et à l'urgence de réduire les émissions de gaz à effet de serre marquées par le réchauffement climatique. Le modèle présenté vise à optimiser les profits de cette fabrication tout en minimisant les coûts opérationnels (collecte, tri, recyclage), le transport, les émissions de GES et le ré-usinage. L'objectif est de trouver un compromis entre les gains de la FC et les coûts qui lui sont associés.

La robustesse du modèle conçu est testée à trois reprises (cas de la récupération du papier carton, cas de l'intégration des antennes relais dans les villes intelligentes et cas de la récupération dans le contexte de la pandémie Covid-19). Ainsi, une analyse de sensibilité est effectuée pour démontrer l'impact du coût d'émission (ou coût vert) sur l'objectif global en tenant compte des deux options offertes actuellement aux industries (la taxes carbone ou l'achat de quota). Les résultats obtenus suggèrent que les entreprises prennent en compte l'aspect écologique et intègrent le développement durable dans leurs axes stratégiques pour leurs chaînes logistiques d'approvisionnement.

Une seconde analyse de sensibilité étudie l'impact de l'augmentation de la consommation énergétique sur l'objectif global. La réduction de la consommation d'énergie paraît une bonne stratégie pour limiter à la fois l'impact environnemental (gaspillage des ressources non renouvelables) et économique (baisse des coûts totaux). Les résultats de cette analyse poussent les preneurs de décisions à envisager l'aspect durable dans leur choix d'outils technologiques de surveillance et de production. Enfin, une conclusion générale est présentée pour clôturer l'études et ouvrir des portes à des perspectives de recherches dans le futur.

Mots-clés : Chaîne d'approvisionnement en boucle fermée, ré-usinage, produit en fin de vie, fabrication circulaire, émissions de GES

Improving the performance of circular manufacturing systems in the Industry 4.0 paradigm in the context of a closed-loop supply chain

Massiva BOUDANE

ABSTRACT

The saving of non-renewable energies as well as the reduction of emissions into the environment are two crucial objectives of industrial production. The valuation of post-consumer products associated with the digitalization of the industry seems to be part of a context in which we are optimizing these objectives. This recovery maximizes the use of resources from end-of-life products in a circular logic while recording the environmental footprint. This is called circular manufacturing (CM).

This study envisions a CM adapted to the need and the urgency of reducing greenhouse gas emissions caused by global warming. The presented model aims to optimize the profits of t such circular manufacturing strategies manufacturing while minimizing operational costs (collection, sorting, recycling), transport, GHG emissions and remanufacturing. The objective is to find a compromise between the gains of CM and the costs associated with it.

The robustness of the designed model is tested using three different case studies based on real-world scenarios (case of cardboard paper recovery, case of the integration of relay antennas in smart cities and case of recovery in the context of the Covid-19 pandemic). Hence, a sensitivity analysis is carried out to study the impact of the emission cost (or green cost) on the overall objective, considering the two options currently offered to industries (carbon taxes or the purchase of allowances). The obtained results support companies to take the ecological aspect into account and integrating sustainable development into their strategic axes for their logistics supply chains.

A second sensitivity analysis examines the impact of increased energy consumption on the overall goal. Reducing energy consumption appears to be a good strategy to limit both the environmental impact (waste of non-renewable resources) and the economic impact (reduction in total costs). The results of this analysis support decision-makers to consider the sustainable aspect in their choice of technological monitoring and production tools. Finally, a general conclusion is presented to close the study and open doors to research perspectives in the future.

Keywords: Closed-loop supply chain, remanufacturing, end-of-life product, circular manufacturing, GHG

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTERATURE 5
1.1 Mise en contexte 5
1.2 État de l'art.....6
1.2.1 Valorisation du déchet et création de matière première..... 7
1.2.2 Gestion écologique des déchets 8
1.2.3 Enjeu économique de la gestion des déchets 9
1.2.4 Société urbaine et déchets 10
1.3 Problématique de la recherche 12
1.4 Objectifs de la recherche.....13
1.5 Méthodologie de la recherche.....14
1.6 Structure du mémoire.....16

CHAPITRE 2 MODELISATION ET OPTIMISATION DE LA GESTION DES DECHETS URBAINS (CAS AVEC TRI VS CAS SANS TRI).....17
2.1 Introduction.....17
2.2 Cas de référence.....19
2.3 Cas proposé.....21
2.4 Formulation du problème d'optimisation 23
2.4.1 Ensembles 24
2.4.2 Paramètres..... 24
2.4.3 Variables de décisions..... 25
2.4.4 Fonction Objectif 26
2.4.5 Contraintes 26
2.5 Étude de cas (cas du papier recyclé) 28
2.6 Analyse de sensibilité (impact des engagements du G20 sur les axes ciblés) 33
2.6.1 Introduction..... 33
2.6.2 Contexte actuel des émissions de GES 34
2.6.3 Formulation mathématique 35
2.6.4 Application numérique..... 36
2.6.5 Discussion et conclusion sur l'analyse de sensibilité 38
2.7 Conclusion 39

CHAPITRE 3 MODELISATION DES DEFIS DE L'INTERNET DES OBJETS (IOT) DANS LA GESTION DES DECHETS DES VILLES INTELLIGENTES.....41
3.1 Introduction.....41
3.2 Contexte industriel.....41
3.3 Lien avec la problématique.....42
3.4 Modélisation des 15 défis de l'IoT dans la GMR des villes intelligentes 43

3.4.1 Introduction 43
3.4.2 Identification des défis de l'IoT 44
3.4.3 Formulation du problème d'optimisation 45
3.4.4 Application numérique 48
3.5 Analyse de sensibilité 49
3.6 Conclusion 51

CHAPITRE 4 OPTIMISATION DES REPERCUSSIONS DE LA COVID-19 SUR LA GESTION DES DECHETS (PLASTIQUE ET POLYMERE ANTIVIRAL) AU QUEBEC 53
4.1 Introduction 53
4.2 Contexte étudié et solutions proposées 53
4.3 Objectif du chapitre 55
4.4 Modélisation 55
4.4.1 Problème de sac à dos 56
4.4.2 Problème du voyageur de commerce 57
4.4.3 Modèle combiné (Knapsack & PVC) 59
4.5 Application numérique 64
4.6 Conclusion 67

CONCLUSION 69

ANNEXE I PROGRAMME LINGO PRINCIPAL (OPTIMISATION DE LA GESTION DES DECHETS URBAINS 75

ANNEXE II PROGRAMME LINGO (GESTION DES EPI USAGÉS DANS LE CONTEXTE DE LA PANDÉMIE DE COVID-19 79

BIBLIOGRAPHIE 84

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Synthèse de l'état de l'art 11

Tableau 2.1 Quantités (en tonnes) de papier vendues en 2020 28

Tableau 2.2 Demande prévue pour 2021 29

Tableau 2.3 Paramètres de l'application numérique basique 29

Tableau 2.4 Données tirées du modèle de référence 30

Tableau 2.5 Résultats de l'application numérique. A. Cas sans tri. B. Cas avec tri. 31

Tableau 2.6 Résultat du cas A (sans pré-tri) 32

Tableau 2.7 Résultat du cas B (avec pré-tri) 32

Tableau 2.8 Résultats de la variation du prix d'achat de quotas (Qta) 37

Tableau 2.9 Résultats de la variation de la norme d'émission de GES (Nr) 37

Tableau 3.1 Les 15 défis de l'IoT 45

Tableau 3.2 Identification des paramètres pour les défis de l'IoT 46

Tableau 3.3 Application numérique 48

Tableau 3.4 Résultats de l'application numérique 49

Tableau 3.5 Résultats de l'analyse de sensibilité (coût énergétique) 50

Tableau 4.1 Paramètres des EPI 64

Tableau 4.2 Positions des villes traitées 64

Tableau 4.3 Résultat de l'application numérique (partie 1-Knapsack) 65

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Méthodologie de la recherche 15

Figure 2.1 Étapes de validation du modèle (cas avec tri).....18

Figure 2.2 Réseau de la logistique inverse 19

Figure 2.3 Modèle inspiré du cas de référence (cas sans tri sélectif).....20

Figure 2.4 Schéma du modèle de GMR proposé (Cas avec tri sélectif) 22

Figure 2.5 Application numérique sur un cas de base.....30

Figure 2.6 Résultat de l'étude de cas A. Cas sans tri. B. Cas avec tri. 32

Figure 2.7 Résultats des deux stratégies de l'analyse de sensibilité (GES). A. Effet de la variation de la norme Nr sur le coût d'émission de GES. B. Effet de la variation du prix d'achat Qta sur le coût d'émission de GES. 38

Figure 3.1 Enjeux et défis de l'IoT dans la GMR 43

Figure 3.2 Effet de la variation du coût énergétique sur le coût total 50

Figure 4.1 Problème de sac à dos (Knapsack Problem).....57

Figure 4.2 Problème du voyageur de commerce (PVC) 59

Figure 4.3 Schéma du modèle d'optimisation proposé.....60

Figure 4.4 Résultats de l'application (Partie 1-Knapsack) 65

Figure 4.5 Résultats de l'application (Partie 2-PVC) 66

INTRODUCTION

L'humanité se heurte aujourd'hui à un défi de taille. En effet, dans le but de soutenir l'industrie, des quantités rocambolesques de ressources non renouvelables sont épuisées. Ces pertes engendrent simultanément des déchets considérables dont certains mettent des décennies, voire des siècles, à se dégrader. Ainsi, le défi en question consisterait à réduire la consommation de ces ressources qui ne se renouvellent pas (ou le font très lentement comparé à la durée des activités de l'Homme).

De plus, les enjeux environnementaux accompagnés d'une pénurie de ressources naturelles poussent l'industrie à envisager une gestion axée sur la valorisation des produits post-consommation également appelés 'produits en fin de vie (EOL)'. Ces produits sont pour la plupart des déchets dont la valeur résiduelle ne demande qu'à être exploitée. D'autre part, la gestion de ces produits en fin de vie engendre une matière première pouvant approvisionner des chaînes de production et devient de ce fait une source de profit pour l'industrie qui tente de faire face à une concurrence omniprésente qui ne cesse de croître dans le marché. En effet, de nombreuses industries voient en la politique des '3R' : logistique des retours de déchets, leur recyclage ainsi que la réduction de la pollution, de nouvelles opportunités commerciales.

Un concept basé sur ces '3R' ne cesse de prendre de l'importance. Il s'agit de l'économie circulaire (EC). Au lieu de créer des produits à partir de ressources, l'économie circulaire tente d'inverser les rôles des intrants de la chaîne de production en créant cette fois-ci des ressources à partir de produits en fin de vie (déchets). Elle serait donc en mesure de développer des politiques environnementales plus durables tout en générant du profit et en offrant une meilleure qualité de vie aux générations futures. Il est alors indéniable que son impact écologique, économique, social et générateur de ressources pourrait résoudre les problèmes y compris ceux liés aux enjeux environnementaux ainsi qu'à la rareté des ressources.

En revanche, bien que les avantages de l'EC soient clairs et fassent l'objet de maintes recherches, son adaptation concrète en milieu manufacturier et la méthodologie permettant sa réalisation sont rarement évoqués. Il s'agit de la fabrication circulaire (FC) où la notion de 'cycle' joue un rôle très important. La FC est conçue sciemment pour boucler la boucle des produits fabriqués, consommés puis retournés sous forme de déchets renfermant une valeur qui leur permet d'être réutilisés dans le processus de fabrication de nouveau produits et ce de manière systémique.

D'autre part, les obligations auxquelles font face les fabricants afin de s'ajuster aux nouvelles politiques environnementales en matière d'émissions de gaz à effet de serre (GES) ainsi qu'à la compétition économique mondiale les contraignent à progresser vers une FC en envisageant la mise en place de chaînes d'approvisionnement en boucle fermée (CABF) permettant la récupération des déchets (ou produits post-consommation), leur recyclage et réutilisation. Évidemment, ces CABF sont soumises à de nombreuses incertitudes de par les différents aléas accompagnant les produits de fin de vie. Pour tenir tête à l'aspect stochastique de ces incertitudes, l'Industrie 4.0 propose des développements dans le domaine de l'Internet des objets (IoT) facilitant la collecte d'information tout au long du cycle de vie du produit de sa fabrication faisant de lui produit fini prêt à être consommé à sa post-consommation sous forme de déchet. Ces informations seraient en mesure de déterminer s'il est avantageux ou non de récupérer le produit en question. Autrement dit, si la valeur résiduelle qui sommeille en lui justifie le recours à sa récupération.

Ce mémoire constitue donc un compromis satisfaisant d'une part, l'industrie manufacturière mais également la planète qui restera à jamais le puits de toutes les ressources. En effet, les récentes élections présidentielles Américaines pourraient bien changer la donne. Le 20 janvier 2021, le nouveau chef d'état, Joe Biden, a invité les dirigeants des 40 pays les plus pollueurs de la planète à se réunir à l'occasion du Jour de la Terre, où il a annoncé son intention de réduire les émissions de GES d'au moins 50 % d'ici 2030, par rapport au niveau de 2005 et incité ses invités à suivre la même voie. Pour ce faire, l'accord de Paris jusque-là éclipsé par la crise sanitaire de Covid-19, a été ravivé. Ainsi, toutes les entreprises

industrielles se sont vu accorder deux options de tarification du carbone : Une taxe sur le volume d'émissions (en général, par tonne) ou bien un système de plafonnement et d'échange qui permet de fixer une limite aux émissions de GES et d'exiger que les émetteurs achètent des quotas dans le cadre d'une offre fixe.

Ainsi, cette étude propose un modèle de CABF minimisant le coût total de la gestion des déchets urbains. Il s'agit d'un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers envisagé pour les déchets municipaux avec possibilité de pré-tri effectué directement au domicile du consommateur. Le modèle développé propose une solution optimale pour répondre à une demande de matière issue du recyclage (verre, métal, papier et plastiques). Nous effectuons une modélisation du réseau de fabrication circulaire (FC) dans lequel il est question de minimiser les coûts opérationnels (de tri, recyclage, …), de transport et d'émission de gaz à effet de serre GES tout en tenant compte de l'impact social, écologique, économique et celui des ressources. Le modèle est par la suite exécuté dans le cadre d'une étude de cas afin de déterminer la configuration optimale de la boucle de production puis, une analyse de sensibilité est faite pour déterminer l'effet des coûts d'émission de GES sur le coût total.

À travers ce mémoire, nous tentons d'aider les entreprises de recyclage ou les municipalités à choisir la meilleure stratégie et générer un profit total optimal en modélisant un réseau compact de fabrication circulaire FC. À cet effet, nous déterminons d'une part, le flux optimal de déchets traversant les différents sites et engendrant des coûts opérationnels, de transport et d'émission moindres et d'autre part, la quantité optimale de produits (ballots) à fabriquer afin de satisfaire la demande du marché du recyclage obtenue grâce à des prévisions sous langage R avec le modèle ARIMA basée sur la série chronologique intégrant les récentes données du site du gouvernement canadien. Cela permettrait de générer un revenu de vente maximal tout en réduisant l'impact sur l'environnement.

Le travail est présenté en plusieurs parties. La première élabore un rapport sur la littérature existante à ce jour ayant pour thème la gestion des déchets urbains. Il s'agit d'une revue de la littérature jugée pertinente dans cette étude car ayant un lien avec ce travail. Ainsi, la problématique de la recherche et les objectifs y sont décrits. La partie suivante présente méthodologie de l'élaboration du modèle d'optimisation, la collecte de ses données, les prévisions nécessaires à sa mise en pratique ainsi que l'analyse de sensibilité prouvant sa robustesse et dont les résultats seront interprétés afin de soutenir la contribution précédemment décrite. S'en suit une analyse de sensibilité consistant à augmenter graduellement le coût d'émission de GES, puis la taxe Carbone à travers différents scénarios. Puis, une brève description du rôle de l'industrie 4.0 dans la gestion des déchets urbains est faite en mettant l'accent sur les défis auxquels elle est confrontée. La précédente partie inclura également un modèle tentant d'optimiser l'impact de ces défis.

Le dernier chapitre inclura une extension du modèle conçu dans le précédant chapitre au cas actuel de la crise sanitaire de Covid-19 où les déchets urbains visés seront les équipements de protection individuelle EPI utilisés pour la protection contre le virus. Enfin, des conclusions sont faites pour clôturer l'étude tout en ouvrant les portes à d'autres perspectives ayant pour sujet la gestion des déchets urbains.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTERATURE

1.1 Mise en contexte

De nos jours, les modèles de production et de consommation mondiaux actuels ne sont pas durables. Près de 90 milliards de tonnes de ressources naturelles sont extraites, chaque année (Oberle et al., 2019) pour répondre aux besoins de la société et on s'attend au double d'ici 2050. Cette même année, la population mondiale devrait atteindre les 9,7 milliards d'habitants et la demande de ressources limitées irait jusqu'à 400% de la capacité totale de la Terre (Gouel & Guimbard, 2020). Il est donc temps de songer à mettre en place des pratiques plus durables pour demain en tirant profit des ressources qui existent déjà aujourd'hui. Ces pratiques font partie d'un concept appelé Economie Circulaire (EC). Son but est de produire des biens et services tout en limitant fortement le gaspillage des ressources.

Au Canada, le concept d'économie circulaire présente des avantages à tout point de vue. En effet, le pays prospère depuis des siècles grâce à l'abondance de ses ressources. Actuellement, ces ressources naturelles constituent 17 % du PIB du Canada et assurent 1,75 million d'emplois (Claire Hicks, 2019). En plus de fournir une stabilité et un sentiment de bien-être physique et mental à la population, cette création d'emploi favorise la productivité et la rentabilité des entreprises (Bonet Fernandez, Petit, & Lancini, 2014). On parle alors de 236 milliards de dollars qui alimentent l'économie canadienne (ministère des ressources naturelles au Canada, 2018). Compte tenu de ces données et de la menace présentée dans le paragraphe précédent, n'est-il pas nécessaire d'utiliser en moins grande quantité les ressources qui assurent la vigueur de l'économie ?

En plus des avantages sociaux et économiques cités précédemment, l'économie circulaire se veut réparatrice et régénératrice. En effet, hormis le fait d'avoir pour but de doubler la création d'emploi et d'accroître le produit intérieur brut (Économie circulaire au Québec : opportunités et impacts économiques, 2018), elle s'engage à réduire les émissions de GES de façon significative tout en diminuant la pression sur les ressources ainsi que les coûts

d’approvisionnement de 70% (Steffen et al., 2015).

Les pratiques de l’économie circulaire, notamment la gestion des matières résiduelles (GMR), s’effectuent principalement dans les villes qui sont un point névralgique des cycles de ressources (Amrani, Prud’homme, Maesano, & Annesi-Maesano, 2019) puisqu’elles consomment jusqu’à 80 % des ressources naturelles mondiales et produisent 50 % des déchets mondiaux et 75 % des émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce travail, nous nous intéressons aux déchets que le consommateur produit dans son domicile. Ces ordures ménagères sont des produits en fin de vie (EOL pour ‘’End Of Life’’) renfermant de la valeur résiduelle qui ne demande qu’à être exploitée (Alamerew & Brissaud, 2019). Ainsi, leur bonne gestion permettrait de réduire la pollution de l’environnement, de créer de nouvelles matières premières, de générer du profit tout en créant des emplois qui permettent aux gens de vivre dignement en société. Pour ce faire, nous effectuerons, dans un premier temps, une synthèse de la littérature parcourue traitant le sujet. Puis, nous en extrairons la problématique de cette recherche.

1.2 État de l’art

Une quantité importante de recherches sur la chaîne d'approvisionnement durable a été menée en tenant compte de divers indicateurs de durabilité dans les prises de décisions et la gestion des opérations. Par rapport aux recherches approfondies sur les aspects environnementaux et en particulier les questions économiques, les aspects sociaux et d’approvisionnement en ressources sont souvent négligés dans la littérature de la gestion de matières résiduelles GMR. Dans ce qui suit, nous parcourons les récents travaux en nous penchant sur différents aspects de la problématique (matières premières, aspect écologique, aspect économique et social). Puis, nous en présentons un tableau synthèse.

1.2.1 Valorisation du déchet et création de matière première

La forte consommation des ressources naturelles engendre une diminution de ces dernières. La plupart d'entre elles, comme les plastiques issus du pétrole, doit souvent être détruites (incinérées) car jugées irrécupérables. D'autre part, certains minerais nécessaires à la production High-tech se faisant de plus en plus rares, posent des problèmes à d'autres niveaux. Ces derniers étant contrôlés par des pays concurrents économiquement, le réapprovisionnement peut poser problème en cas de pénurie. Par conséquent, l'idée de réemployer la matière (Geeroms, s. d.) issue des déchets (Rassat, s. d.) comme matière première (Simay, 2021) dans les processus de fabrication pourrait éventuellement résoudre le problème. Safaei et al., (2017), Cariou et al., (2019) ou encore McDonald, Normandin, & Sauvé, (2016) soutiennent que le recyclage du papier et du carton soit l'un des meilleurs matériaux secondaires dans le monde constituant une vraie source de matières premières saines. Ils présentent un nouveau cadre pour aider les responsables de la chaîne d'approvisionnement du carton à concevoir une chaîne d'approvisionnement en carton en boucle fermée optimale qui considère un mélange de flux internes et externes pour le réseau de recyclage.

Une telle chaîne serait bien plus efficace grâce à l'internet des objets selon Zuo, Wang, & Sun, (2020), Misra, Das, Chakrabortty, & Das, (2018), Al-Masri, Diabate, Jain, Lam, & Reddy Nathala, (2018) ou encore Ferrari et al., (2020). Dans cette même optique, Miao et al., (2020) proposent un nouveau mode de recyclage basé sur la classification «O2O» (en ligne vers hors ligne) capable d'intégrer les ressources en amont et en aval sur une plateforme réseau nommée «plateforme de recyclage des déchets O2O» où les consommateurs se connectent, s'inscrivent et terminent le processus de recyclage par des soumissions en ligne en suivant le guide d'utilisation. Les recycleurs Gree reçoivent des instructions qui leur permettent de prendre contact avec le consommateur pour un rendez-vous de collecte contribuant ainsi au développement d'un modèle circulaire intégrant « ressources-produits-déchets renouvelables ressources » où les matières premières sont régénérées.

1.2.2 Gestion écologique des déchets

Nombreux sont les problèmes écologiques causés par l'élimination des produits en fin de vie. En effet, la plupart ne se dégrade pas seule dans la nature et d'autres peuvent libérer des éléments qui jusque-là n'existaient pas dans l'environnement causant ainsi des dommages irréversibles sur la sante de l'Homme et son milieu. Certaines quantités impactent fortement l'écosystème mais aussi les conditions de vie des populations se trouvant à proximité des zones de traitement.

Bien que les industriels soient sensibles à ces dangers (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France), 2004), leurs points de vue divergent quant aux solutions à adopter. Certains pensent qu'un système à circuit fermé est réalisable (Ghahremani Nahr et al., 2020) et ont développé un réseau de chaîne d'approvisionnement bi-objectif, multi-période, multiproduit, en boucle fermée en tenant compte de considérations environnementales, de remises et d'incertitudes tandis que d'autres, à l'instar de (Samuel et al., 2020) ont proposé un modèle mathématique déterministe et sa variante robuste dans lequel ils ont étudié la possibilité d'ajouter des centres de pré-tri dans le réseau des CLSC qui génèreraient des coûts généralement inférieurs à ceux encourus aux étapes ultérieures du traitement.

Ces centres de pré-tri sépareraient les produits de mauvaise qualité au début du cycle de logistique inverse réduisant ainsi les coûts de transport et bien d'autres. Parmi ces derniers, un coût d'émissions émergeant ''nommé coût vert'', commence à prendre de l'ampleur. Celui-ci intervient dans la gestion d'une chaîne logistique verte tenant compte des émissions des gaz à effet de serre dans les coûts totaux de la logistique (Bal and Satoglu, 2018) notamment en proposant un modèle qui non seulement prend en compte les caractéristiques de performance d'une entité (véhicules de fabricants) en calculant les émissions de dioxyde de carbone pour un certain type (de camion), mais également les émissions liées au transport, à l'exploitation des installations en termes de consommation énergétique, transport d'employés, consommation de papier et utilisation d'ordinateurs.

D'autres ont tenté de minimiser l'impact environnemental (cas des flottes de transport) en

construisant un modèle de chaîne d'approvisionnement verte intégrant une logistique directe et inverse mise en file d'attente pour optimiser le transport et le temps d'attente du réseau (de ces flottes) afin de réduire les impacts environnementaux (Mohtashami et al., 2020).

1.2.3 Enjeu économique de la gestion des déchets

La forte consommation des ressources naturelles entraîne également une diminution de l'offre de ces dernières et donc, une augmentation des prix parallèlement au grand taux de demandes et bien que les industriels soient conscients de la nécessité d'adopter une production plus respectueuse de l'environnement, ils n'en demeurent pas moins dépendants de la rentabilité économique de leurs entreprises (Jiang et al., 2020). Ces derniers ont présenté un réseau général de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée comprenant diverses options de récupération et ont formulé un modèle de programmation linéaire multi-objectif en nombres entiers mixtes tenant compte du profit de l'entreprise ainsi que son niveau de service. De plus, le déchet engendre des coûts et ce quelle que soit sa provenance (processus de transformation ou de l'obligation de traiter la production en fin de vie).

Il devient donc primordial de songer à adopter une bonne gestion des déchets afin d'optimiser les coûts qui y sont liés. Conscient de cela, (Ghahremani-Nahr et al., 2020) ont conçu un modèle mathématique de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée multiproduits multi-période multi- échelons sous incertitude dont l'objectif est de déterminer les quantités de produits et de matières premières transportées entre les entités de la chaîne au cours de chaque période en minimisant le coût logistique total, qui comprend les coûts fixes, d'ouverture et de clôture, les coûts de transport entre les installations, les coûts de détention des stocks, les coûts d'exploitation dans toutes les installations (coûts de production, coûts de distribution, coûts de collecte, coûts de réparation, coûts de récupération / décomposition, coûts d'élimination) et les coûts de pénurie.

Enfin, la nécessité de justifier le recours à une telle gestion incite les chercheurs à comparer les revenus de vente aux différents coûts de la logistique adoptée. Cet exemple a été suivi par

(Scheller et al., 2021) qui dans le cas des batteries lithium-ion, ont proposé des modèles d'optimisation de la planification de la production et du recyclage générant une marge de revenu-coûts maximale.

1.2.4 Société urbaine et déchets

La conception d'un modèle stipule qu'il faut tout d'abord estimer la valeur des critères choisis avant de pouvoir évaluer si les contraintes sont respectées. Parmi ces critères figure la norme internationale d'orientation sur la responsabilité sociale - ISO 26000 pour l'identification des critères sociaux autour de sept thèmes majeurs: la gouvernance organisationnelle, les droits de l'homme, les pratiques de travail, l'environnement, les pratiques d'exploitation équitables, les problèmes des consommateurs, l'implication de la communauté et le développement considérée par (Bal and Satoglu, 2018) ou encore les cinq catégories de facteurs sociaux (satisfaction de la demande, équité des ressources, opportunités d'emploi, développement régional, niveau de sécurité sur le site, niveau d'accès aux installations médicales) décrits comme étant l'objectif de développement local (Anvari and Turkay, 2017) puis, accompagnés par le maintien du nombre de travailleurs à un certain niveau pour une installation d'exploitation comme objectif social. Le **tableau 1.1** répertorie les recherches étudiées selon les quatre grands axes cités :

Tableau 1.1 Synthèse de l'état de l'art

Article	Aspect			
	Écologique	Économique	Social	Ressources
(Miao, Liu, & Ma, 2020)	✓			✓
(Safaei, Roozbeh, & Paydar, 2017)		✓		✓
(Bal & Satoglu, 2018)	✓	✓	✓	
(Ghahremani-Nahr, Nozari, & Najafi, 2020)	✓	✓		
(Mohtashami, Aghsami, & Jolai, 2020)	✓			
(Samuel, Venkatadri, Diallo, & Khatab, 2020)	✓	✓		
(Jiang, Wang, Wang, Zhang, & Zhou, 2020)		✓	✓	
(Scheller, Schmidt, & Spengler, 2021)		✓		
(Anvari & Turkay, 2017)	✓	✓	✓	
(Al-Masri et al., 2018)		✓		✓
(Cariou et al., 2019)		✓		✓
(Ferrari et al., 2020)	✓	✓		
(McDonald et al., 2016)	✓			✓
(Misra et al., 2018)	✓		✓	
(Zuo et al., 2020)	✓	✓	✓	
(Sharma et al., 2020)	✓		✓	
(Kulkarni & Anantharama, 2020)		✓	✓	
(Patrício Silva et al., 2020)	✓		✓	
(Ragazzi, Rada, & Schiavon, 2020)	✓	✓		
(You, Sonne, & Ok, 2020)		✓		✓
(Fatimah, Govindan, Murniningsih, & Setiawan, 2020)	✓	✓		✓
(Projet de recherche proposé, 2021)	✓	✓	✓	✓

D'après le tableau ci-dessus synthétisant la récente littérature parcourue dans le domaine de la gestion des déchets, il paraît clair que les aspects écologique, social, économique et ressources, bien qu'ils soient fortement liés et parfois mutuellement impactés, n'apparaissent pas conjointement dans les études faites à ce jour. L'objectif de ce travail est d'étudier et modéliser l'impact de la GMR sur ces quatre axes afin de tenter de l'optimiser.

1.3 Problématique de la recherche

Bien que les enjeux de la collecte des MR municipales ait fait l'objet de plusieurs études, la plupart d'entre elles a suggéré des restructurations qui se traduisent par des investissements importants (environ 1.56 milliards d'euros annuellement selon l'observatoire régional des déchets d'Ile de France (ORDIF, 2019)) dont le rendement reste à prouver. De plus, comme le montre le **tableau 1.1**, les différents aspects (écologique, économique, social etressources) ont été traités séparément dans la littérature.

Aucune étude n'a, à ce jour, étudié la possibilité de contrôler l'impact de la récupération des déchets urbains sur la société, l'environnement, la disponibilité des ressources et l'économie. Les chercheurs n'ont cependant pas écarté l'idée qu'il y ait un lien entre eux et encouragent fortement leur intégration conjointe dans les futurs modèles de décision à proposer. Ainsi, la problématique à laquelle nous essayerons de répondre est : comment gérer les déchets domestiques de sorte à créer de nouvelles ressources, protéger l'environnement, réduire le taux de chômage et le tout en faisant du profit ?

Cette étude traitera plus en profondeur la problématique des ordures ménagères, les objectifs des matières, sociaux, écologiques et économiques à atteindre en développant le modèle et la méthodologie utilisée pour y arriver. Il faut donc identifier les indicateurs environnementaux et économiques, comprendre la problématique actuelle des déchets urbains et l'idéal à atteindre.

Enfin, il serait pertinent de regarder un cas particulier afin de vérifier comment s'exerce habituellement une telle gestion pour tester la performance et valider la logique et la faisabilité du modèle développé. Une analyse de sensibilité devrait soutenir les décisions

proposées par le modèle. Celui-ci, bien qu'élaboré pour un territoire local, apparaît approprié dans le contexte actuel pour résoudre ce genre de problème à d'autres échelles. Voilà pourquoi des extensions seront faites afin d'adapter le modèle à différentes situations et contextes.

1.4 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de cette étude est de concevoir un modèle en se basant sur les axes écologique, économique, social et ressources afin de répondre à la problématique citée plus-haut pour proposer une alternative à la GMR conventionnelle qui aiderait les preneurs de décision à mieux choisir entre les alternatives possibles (imposer un pré-tri ou non).

Les objectifs secondaires de ce projet peuvent se résumer comme suit :

Sous-objectif 1 : prouver l'efficacité économique et écologique du modèle en comparant les coûts totaux engendrés par la GMR actuelle avec ceux de la méthode proposée et dans laquelle seront intégrés les différents coûts liés à la gestion, à l'environnement et à la préservation des ressources.

Sous-objectif 2 : garantir une efficacité d'un point de vue social. Nous adoptons alors, conformément à la norme internationale d'orientation sur la responsabilité sociale - ISO 26000 (Bal and Satoglu, 2018) un seuil maximal de main d'œuvre à garantir.

Sous-objectif 3 : étendre l'application du modèle dans des contextes émergents tels que les nouvelles politiques d'émission de gaz à effet de serre, la contribution de l'Internet des objets dans la gestion des déchets d'éventuelles villes intelligentes ou encore, le contexte actuel de pandémie de Covid-19.

1.5 Méthodologie de la recherche

En vue d'atteindre l'objectif principal et les objectifs secondaires mentionnés dans la section 1.4, la présente recherche s'appuie sur la méthodologie suivante :

Sous-objectif 1 :

1. Modélisation du réseau logistique représentant la gestion des déchets urbains effectuée actuellement au Québec ;
2. Transformation du modèle élaboré en l'adoptant au cas de présence d'un premier tri sélectif au domicile du consommateur ;
3. Implémentation des deux modèles dans le cas basique comportant un élément par bloc (foyer-tri-recyclage) et construction du code LINGO correspondant ;

Sous-objectif 2 :

4. L'importance du point social est affirmée par de nombreuses études qui ont démontré que les personnes qui occupent un poste tendent à être en meilleure santé mentale que celles qui n'ont pas d'emploi. En effet, en plus de garantir un revenu stable et un sentiment de bien-être, le travail favorise les contacts sociaux ainsi que le développement de l'estime de soi.

Dans notre contexte, la variabilité de la demande des produits à recycler peut entraîner de nombreux licenciements. Nous avons donc considéré, conformément à la norme internationale d'orientation sur la responsabilité sociale - ISO 26000 (Bal and Satoglu, 2018) un seuil maximal de main d'œuvre permettant le maintien d'un certain nombre d'employés. Cela est notamment garanti par le fait de s'être fixé pour but de récupérer un pourcentage élevé de déchets et de l'inclure dans le modèle afin d'entraîner un grand besoin de main d'œuvre dans les centres de tri et de recyclage. Le coût associé à ce critère social correspond au salaire des employés maintenus dans les centres de tri et de recyclage. Ceux-ci sont inclus dans le coût opérationnel.

Sous-objectif 3 :

5. Effectuer une analyse de sensibilité impliquant les nouvelles politiques d'émission de GES afin de choisir parmi les récentes stratégies proposées par la COP26;

6. Étendre la structure du modèle proposé dans un contexte permettant d'optimiser la contribution de l'Internet des objets IoT dans la gestion des déchets urbains dans des villes intelligentes à travers la modélisation des défis auxquels elle est confrontée ;

7. Étendre la structure du modèle proposé dans un contexte permettant d'optimiser la logistique de retour des déchets constituant des équipements de protection individuelle EPI durant la pandémie de Covid-19 ;

Les principales étapes de cette méthodologie peuvent être schématisées dans la **figure 1.1** :

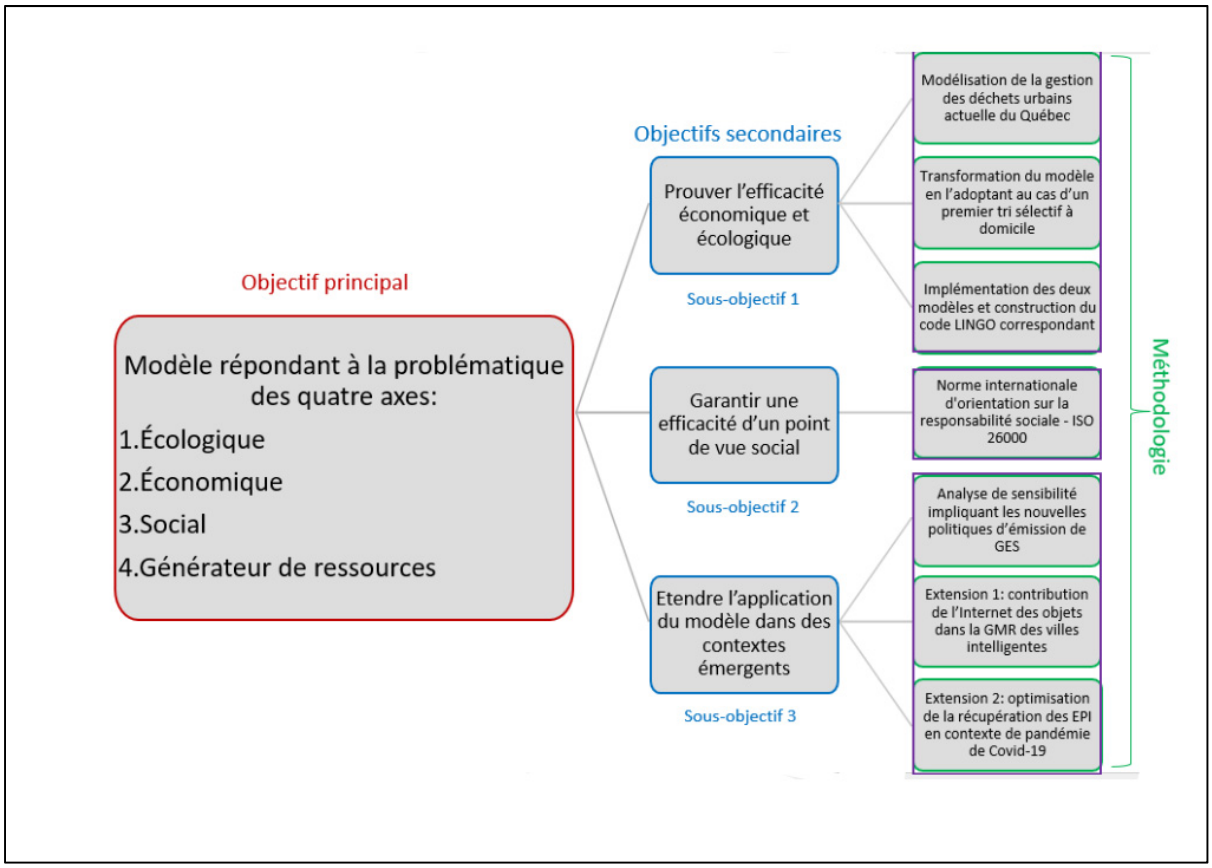

Figure 1.1 Méthodologie de la recherche

1.6 Structure du mémoire

Ce mémoire sera présenté sous quatre chapitres. Le **chapitre 1** traite de la revue de littérature parcourue. Les principaux axes de recherche y seront cités. Nous présentons quelques travauxayant un lien avec la gestion des déchets ainsi que les critères abordés dans chacun d'entre eux et nous abordons l'implication de la recherche dans les axes écologique, économique, ressources et social dont l'étude conjointe constitue la base de notre problématique.

Le **chapitre 2** présente le problème de gestion des déchets urbains dans un contexte incluant un premier tri des matières résiduelles dans les foyers des consommateurs d'une ville du Québec. La conception d'un modèle compact pouvant être adapté à différentes régions, incluant tri sélectif ou non est effectuée.

Dans le **chapitre 3**, le modèle du cas traité dans le **chapitre 2** subira une extension dans le cas des villes intelligentes disposant des moyens nécessaires pour faire appel à l'Internet des objets dans la gestion de leurs déchets. Le modèle du **chapitre 2** est donc étendu en intégrant les principaux défis de l'IOT dans la GMR moderne de ces *Smart Cities.*

Le **chapitre 4** quant à lui est dédié à l'optimisation de la logistique de retour d'un type précis de déchets résultant du contexte actuel de pandémie mondiale, les équipements de protection individuelle usagés. Nous avons combiné dans ce modèle l'approche du problème du voyageur de commerce PVC avec celle du problème du sac à dos KNAPSACK afin d'optimiser les quantités de masques, visières et gants retournées à travers le réseau de la logistique inverse.

CHAPITRE 2

MODELISATION ET OPTIMISATION DE LA GESTION DES DECHETS URBAINS (CAS AVEC TRI VS CAS SANS TRI)

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de concevoir et de développer un modèle compact pouvant gérer les déchets municipaux (carton, plastique, métal, verre...) tout en tenant compte de leur impact sur la préservation des ressources, impact écologique, économique et social. La littérature parcourue nous a permis d'identifier séparément les différents coûts et paramètres liés aux axes étudiés. Le modèle conçu doit permettre de récupérer de la matière première qui sommeille dans les foyers d'une municipalité quelconque en faisant d'elle une ressource fiable, durable, très peu coûteuse, renouvelable et légale dont l'intégration dans cette GMR doit de ce fait garantir la satisfaction des quatre axes ciblés par l'étude.

La section **2.1** est la présente introduction tandis que la prochaine section de ce chapitre **2.2** portera sur l'étude d'un cas de référence (Bal and Satoglu, 2018) tiré de la littérature et à partir duquel nous bâtirons un premier modèle correspondant au cas de gestion de déchets municipaux sans possibilité de pré-tri à domicile. Afin de valider celui-ci, nous allons intégrer les coûts omis dans le cas de référence tels que les coûts d'inventaire et de pénurie puis, nous effectuerons des prévisions sur la demande de matériaux recyclés des 12 prochains mois. Ceci nous permettra d'approcher autant que faire ce peu la satisfaction des quatre critères identifiés dans notre problématique.

Dans la section **2.3,** nous tenterons d'améliorer les performances du modèle conçu à partir du cas de référence avec, cette fois-ci, la possibilité d'effectuer un premier tri sélectif directement dans le foyer du consommateur. La logistique proposée devra considérer la substitution des anciens véhicules de collecte par des camions de faible capacité qui seront alors dédiés à la collecte de matières résiduelles préalablement triées. La réduction de la capacité de chargement permettra à ces véhicules de regagner rapidement les centre de recyclage en parcourant un minimum de distance.

La robustesse des deux modèles conçus (cas avec tri VS cas sans tri) sera mise à l'épreuve dans une simple étude de cas de base dans la section **2.4** où l'on considérera un élément par bloc de la chaîne de logistique de retour. Une application numérique avec le logiciel LINGO donnera des résultats que nous devrons interpréter dans les deux cas afin de comparer les politiques et décisions obtenues via les deux approches.

Enfin, dans la section **2.5**, une analyse de sensibilité viendra clôturer ce chapitre et par la même occasion valider le modèle proposé avec tri sélectif en tenant compte des nouvelles politiques d'émissions de gaz à effet de serre.

Les étapes décrites sont synthétisées dans la **figure 2.1** qui illustre le parcours emprunté qui aboutira à la conception et validation du modèle incluant un pré-tri :

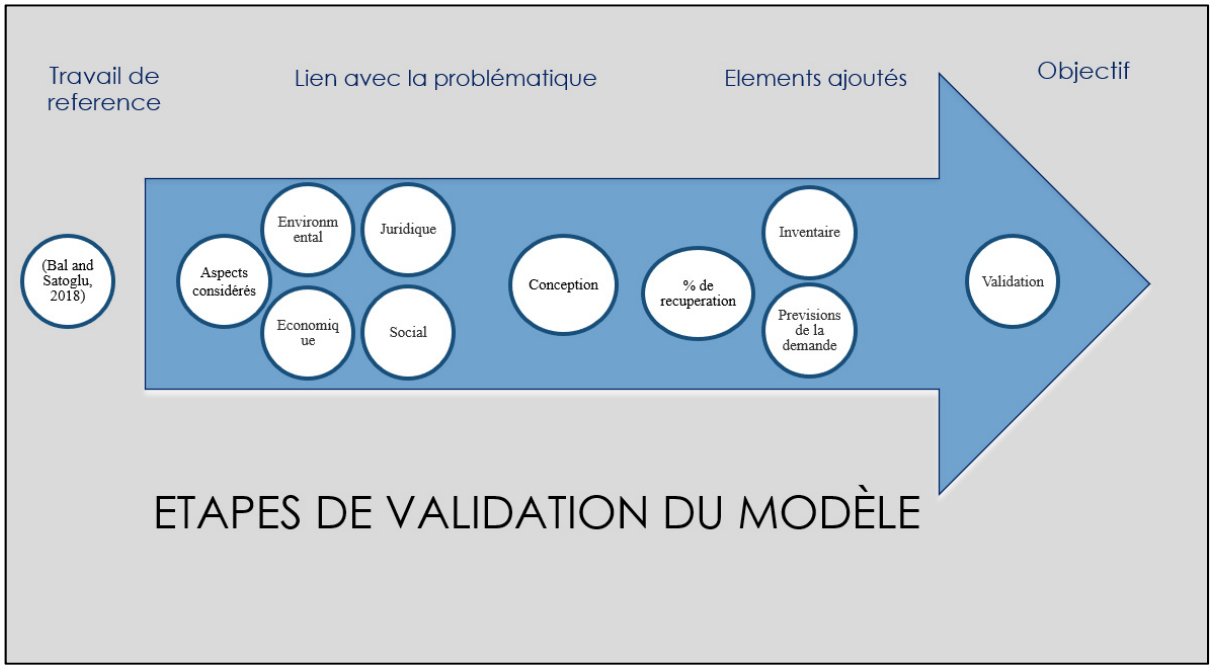

Figure 2.1 Étapes de validation du modèle (cas avec tri)

2.2 Cas de référence

De la littérature proposée et tel qu'illustré dans la **figure 2.2**, nous nous inspirons d'un modèle de programmation multi-objectifs et multiproduits pour une planification durable des opérations de logistique inverse des déchets d'équipements électriques et électroniques (Bal and Satoglu, 2018) ou les objectifs environnementaux, économiques et sociaux sont pris en compte.

Le modèle conçu dans l'article étudié englobe quatre objectifs déterminés en fonction de la minimisation des coûts, de la réduction des effets environnementaux, de l'équilibre des effectifs et des objectifs égaux. Ainsi, la **figure 2.2** correspond au schéma par blocs illustrant le cas de référence étudié :

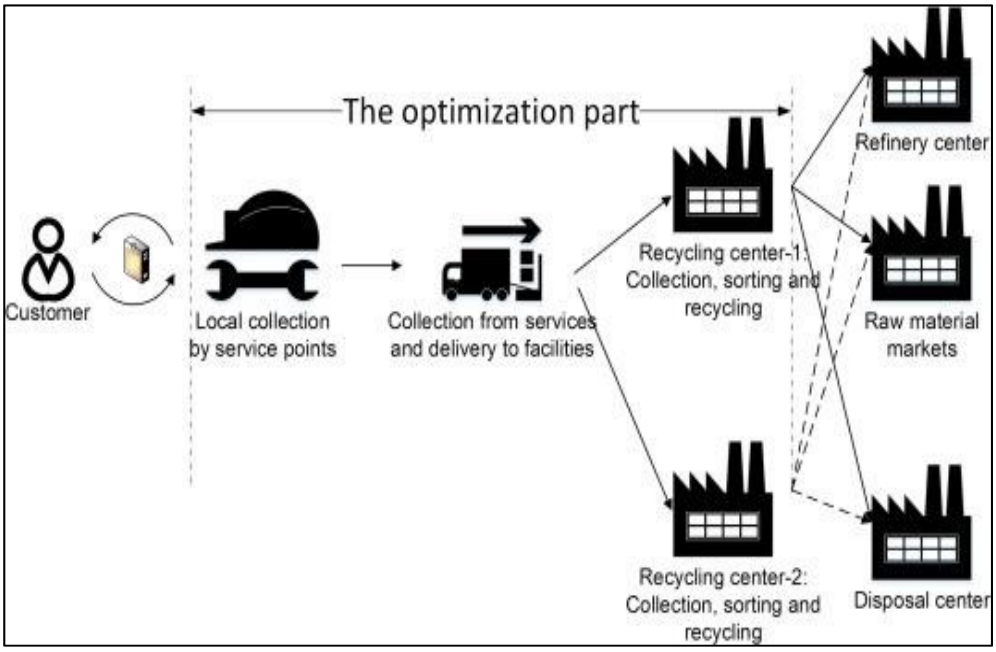

Figure 2.2 Réseau de la logistique inverse
Tirée de Bal and Satoglu (2018)

Les coûts de stockage et de pénurie sont ignorés et le revenu généré par la satisfaction de la demande (souvent à caractère stochastique), bien que cité, n'est pas pris en compte dans le modèle proposé. L'ajout des coûts d'inventaire et de pénurie au modèle de la **figure 2.2** dans un contexte de gestion de déchets municipaux nous permettra d'obtenir le modèle correspondant au cas sans tri sélectif à domicile illustré dans la **figure 2.3.**

Le réseau de la logistique basé sur le cas de référence et considérant une GMR sans pré-tri est illustré dans la **figure 2.3 :**

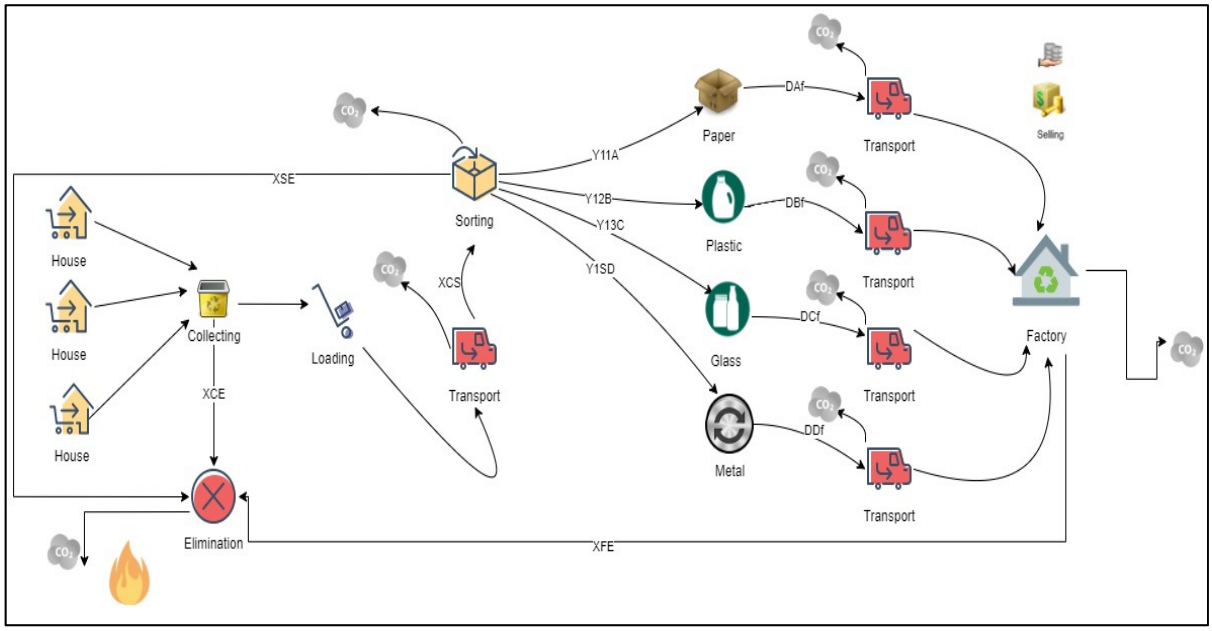

Figure 2.3 Modèle inspiré du cas de référence (cas sans tri sélectif)

La **figure 2.3** s'inspire du type de modèles multi-échelons du cas de référence (*Bal and Satoglu, 2018)* afin de modéliser la logistique d'une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée pour la gestion des déchets urbains à l'échelle d'une ville ou d'une province et ce dans le but de maximiser le profit de la GMR correspondant à la différence entre le revenu de vente et les coûts associés.

Ce modèle (cas sans tri sélectif) tiendra compte de l'aspect stochastique de la demande qui permet de garantir une offre en tout temps, considérera plus d'un type de produits et mettra en place une politique de gestion de surstock. Les frais à minimiser représentent les coûts opérationnels au niveau de chaque site, les coûts de transport et d'émissions de gaz à effet de serre. Ces coûts pourraient être optimisés en considérant cette fois la possibilité qu'il y ait un pré-tri à domicile. Nous étudions cette perspective dans la section **2.3**.

2.3 Cas proposé

Dans cette partie, nous effectuons une modélisation du réseau de logistique pour l'activité de gestion des déchets domestiques dans le cas où un premier tri est effectué chez le consommateur. Quatre types de coûts sont pris en compte : le coût opérationnel de collecte, élimination, tri et recyclage du déchet dans un site, le coût de transport proportionnel à la consommation de carburant et la distance parcourue, ainsi que le coût d'émission des gaz à effet de serre émanant des moyens de transport et enfin, le coût de stockage des invendus. Ce modèle a pour objectif de donner comme résultat les quantités optimales de déchets à transférer entre les sites (tri, recyclage et élimination) qui assurent un profit maximal. Le réseau de logistique est décrit dans la **figure 2.4** où les déchets de chaque foyer (h) sont collectés en bordure de rue, puis transférés dans des centres de tri où un tri manuel et/ou automatique est fait afin de concevoir des flux mono-matériaux (carton, plastique, métal, verre...).

Les quantités optimales ainsi que la désignation des centres de tri auxquels les déchets sont envoyés sont déterminées par le modèle. En fonction du niveau de contamination de la matière, la décision suivante est d'envoyer les déchets aux centres de recyclage ou bien aux centres d'élimination. Les centres de recyclage ont à leurs tours la possibilité de recycler les quantités reçues ou bien les envoyer aux centres d'élimination. Notons par ailleurs qu'un taux de matières à recycler est un paramètre fixe du modèle proposé. Ce pourcentage n'est autre que l'objectif de la GMR annuel ciblé par les différentes campagnes de sensibilisation du gouvernement et intervenant dans le modèle proposé.

Le schéma de la **figure 2.4** représente la logistique adoptée pour une telle GMR :

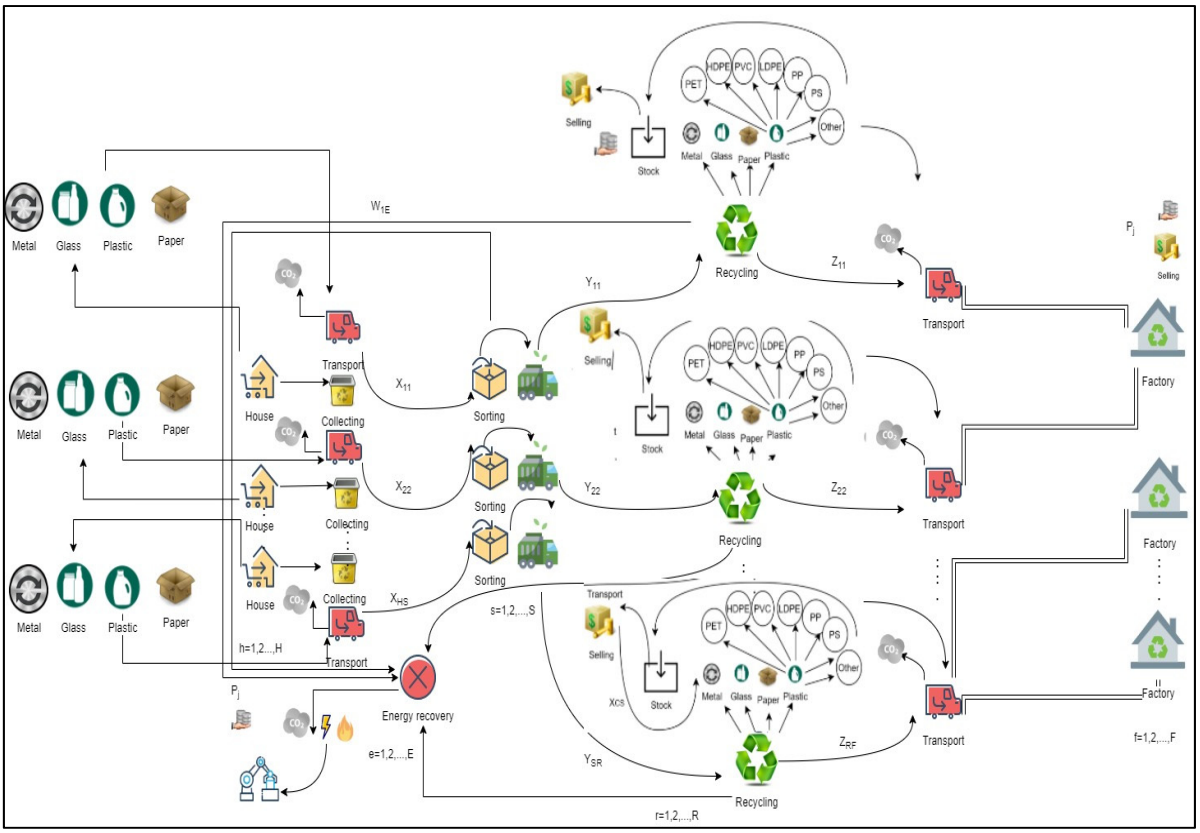

Figure 2.4 Schéma du modèle de GMR proposé (Cas avec tri sélectif)

Les nœuds de gauche à droite, représentent les foyers des consommateurs $h \in \{1,2, \dots , H\}$ ainsi que les bacs de déchets $c \in \{1,2, \dots , C\}$ liés par des arcs illustrant le flux de matières Xhs collectées à ce niveau. Une fois chargées dans des camions, ces quantités Xhs seront transportées aux centres de tri $s \in \{1,2, \dots , S\}$, puis au recyclage $r \in \{1,2, \dots , R\}$ duquel résultera une caractérisation et classification des matières: papier, plastique (PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS,…), verre et métal.

Cette classification permettra d'identifier le bon client (le plus offrant) pour le bon produit.

Une telle décision est représentée par la variable binaire Yf où $f \in \{1,2, \dots , F\}$ représente un client potentiel. Celle-ci sera activée (prendra la valeur 1) si les quantités de matières transportées dans le camion seront vendues au client $f \in F$ (et 0, sinon). Les unités triées invendues seront stockées afin de prévenir d'une éventuelle pénurie de matières dans le futur ou seront vendues en ballots aux différents centres de recyclage. À ce niveau-là, d'autres profits seront pris en compte.

Quant aux matières ayant fait l'objet de contamination ou dont le cycle de vie s'avère plus court que prévu, le processus de valorisation énergétique leur permettra d'intervenir en tant qu'élément tout aussi essentiel dans la chaîne de recyclage car celui-ci libérera assez de chaleur et d'énergie pour alimenter les machines.

2.4 Formulation du problème d'optimisation

Cette section comporte une formulation mathématique du problème à optimiser faite en tenant compte des deux cas (avec ou sans tri sélectif). En effet, il s'agit d'un programme linéaire mixte incluant des variables entières et des variables binaires (MILP) compact pouvant être implémenté et exécuté avec le logiciel LINGO.

L'objectif sera d'optimiser le flux de matières à acheminer jusqu'aux clients tout en minimisant les principaux coûts liés au processus de leur logistique : le coût opérationnel de traitement, de transport (qui est proportionnel à la distance parcourue et représente les dépenses d'achat et de consommation de carburant), ainsi que le coût vert (d'émission des gaz à effet de serre émanant des véhicules).

Les quantités optimales ainsi que la désignation des centres auxquels les déchets sont envoyés seront déterminés par le modèle.

2.4.1 Ensembles

Les ensembles constituant le modèle sont :

H: Ensemble des domiciles.

S: Ensemble des centres de tri.

R: Ensemble des centres de recyclage.

E: Ensemble des centres d'élimination.

F: Ensemble des usines clientes.

2.4.2 Paramètres

Les paramètres du modèle sont :

Cs: Capacité du centre de tri s.

Ce: Capacité du centre d'élimination e.

Pi: Prix unitaire de vente du produit recyclé i ($/t).

a : Coût unitaire de traitement dans un centre de tri ($\t).

Ŋ: Coût unitaire d'élimination ($\t).

u: Coût unitaire de collecte ($\t).

θ: Coût unitaire d'émission de GES ($).

m: Coût unitaire de recyclage ($/t).

c: Coût unitaire de transport ($/t-km).

f: Facteur d'émission de GES (t Co2 eq/km).

dhs: Distance entre la maison h et le centre de tri s (km).

dsr: Distance entre le centre de tri s et le centre de recyclage r (km).

drf: Distance entre le centre de recyclage r et l'usine f (km).

ρ: Coût unitaire de stockage ($\\t).

Ω: Pourcentage de déchets à récupérer (%).

Dfi : Demande du client f pour le produit i (t).

kr: Quantité de déchets disponible dans le centre de recyclage r (t).

Q: Quantité de déchets présents (t) demandant un seuil de 70% d'employés (workforce).

2.4.3 Variables de décisions

Les variables de décisions du modèle sont :

Xhs: Quantité de déchets envoyés du domicile h au centre de tri s (t).

Xsr: Quantité de déchets envoyés du centre de tri s au centre de recyclage r (t).

Xse: Quantité de déchets envoyés du centre de tri s au centre d'élimination e (t).

Xre: Quantité de déchets envoyés du centre de recyclage r au centre d'élimination e (t).

$XArf$: Quantité de déchets i de type papier envoyés du centre de recyclage r à l'usine f (t).

$XBrf$: Quantité de déchets i de type plastique envoyés du centre de recyclage r à l'usine f(t).

$XCrf$: Quantité de déchets i de type verre envoyés du centre de recyclage r à l'usine f (t).

$XDrf$: Quantité de déchets i de type métal envoyés du centre de recyclage r à l'usine f (t).

Xrti: Quantité de déchets de type i stockés dans le centre de recyclage r (t).

Yfi= {1 si l'usine f est cliente du produit i, 0 sinon}.

2.4.4 Fonction Objectif

L'équation **(2.1)** représente la fonction Objectif du modèle :

$$
\begin{aligned}
\text{Max} = \quad & \sum_{f\epsilon F}\sum_{r\epsilon R}(P_A x_{Arf} y_f + P_B x_{Brf} y_f + P_C x_{Crf} y_f + P_D x_{Drf} y_f) \\
& - c(\sum_{s\epsilon S}\sum_{h\epsilon H} d_{hs} + \sum_{e\epsilon E}\sum_{s\epsilon S} d_{se} + \sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S} d_{sr} \\
& + \sum_{e\epsilon E}\sum_{r\epsilon R} d_{re} + \sum_{f\epsilon F}\sum_{r\epsilon R} d_{rf}) - u(\sum_{s\epsilon S}\sum_{h\epsilon H} x_{hs}) \\
& - a(\sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S} x_{sr}) \\
& - m(\sum_{f\epsilon F}\sum_{r\epsilon R} x_{rf}) \\
& - \eta(\sum_{e\epsilon E}\sum_{s\epsilon S} x_{se} + \sum_{e\epsilon E}\sum_{r\epsilon R} x_{re}) - \theta f(\sum_{s\epsilon S}\sum_{h\epsilon H} d_{hs} \\
& + \sum_{r\epsilon R}\sum_{s\epsilon S} d_{sr} + \sum_{f\epsilon F}\sum_{r\epsilon R} d_{rf} + \sum_{e\epsilon E}\sum_{s\epsilon S} d_{se} \\
& + \sum_{seE}\sum_{r\epsilon R} d_{re}) - \rho \sum_{f\epsilon F}\sum_{r\epsilon R}((x_{Arf} - D_{Af} + k_{Ar}) + (x_{Brf} \\
& - D_{Bf} + k_{Br}) + (x_{Crf} - D_{Cf} + k_{Cr}) + +(x_{Drf} - D_{Df} \\
& + k_{Dr}))
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

2.4.5 Contraintes

Les contraintes du modèle sont :

Contrainte de capacité des centres de tri

$$\sum_{s\in S}\sum_{h\in H} x_{hs} \leq c_s \quad \forall s \in S \tag{2.2}$$

Contrainte de capacité des centres de recyclage

$$\sum_{r\in R}\sum_{s\in S} x_{sr} \leq c_r \quad \forall r \in R \tag{2.3}$$

Contrainte de capacité des centres d'élimination

$$\sum_{e\in E}\sum_{s\in S} x_{se} + \sum_{e\in E}\sum_{r\in R} x_{re} \leq c_e \quad \forall e \in E \tag{2.4}$$

Contraintes de conservation des flux

$$\begin{gathered}\sum_{s\in S}\sum_{h\in H} x_{hs} = \sum_{r\in R}\sum_{s\in S} x_{sr} + \sum_{e\in E}\sum_{s\in S} x_{se} \quad \forall s \in S \\ \sum_{\mathrm{r}\in R}\sum_{s\in S} x_{sr} + \sum_{r\in R} x_r = \sum_{f\in F}\sum_{r\in R} x_{rf} + \sum_{e\in E}\sum_{r\in R} x_{re} + \sum_{r\in R} k_r \quad \forall r \in R\end{gathered} \tag{2.5}$$

Contrainte de satisfaction de la demande

$$\begin{gathered}\sum_{\mathrm{r}\in \mathrm{R}} (\mathrm{x}_{\mathrm{Mr}} + \mathrm{k}_{\mathrm{Mr}}) + \sum_{\mathrm{f}\in \mathrm{F}}\sum_{\mathrm{r}\in \mathrm{R}} \mathrm{x}_{\mathrm{rMf}} = \mathrm{D}_{\mathrm{iMf}} \\ \forall \mathrm{f} \in \mathrm{F} \quad \forall \mathrm{M} \in \{\mathrm{A}, \mathrm{B}, \mathrm{C}, \mathrm{D}\} \quad \forall \mathrm{i} \in \{\mathrm{jan}, \mathrm{fev}, \ldots, \mathrm{dec}\}\end{gathered} \tag{2.6}$$

Contrainte d'emploi

$$\sum_{s\in S}\sum_{h\in H} x_{hs} \geq \Omega Q \tag{2.7}$$

Contrainte de non-négativité

$$x_{ijk} \geq 0 \forall (i, j, k) \tag{2.8}$$

2.5 Étude de cas (cas du papier recyclé)

Dans cette partie, nous allons tester la robustesse du modèle dans un cas simple où l'on considère une structure basique inspirée de la **figure 2.4** et contenant un élément de chaque ensemble (matière recyclée : papier, un immeuble, un centre de tri, un centre de recyclage et une usine cliente). La situation est illustrée par la **figure 2.5**. Afin de contrôler l'aspect stochastique de la demande, nous effectuerons des prévisions pour les 12 prochains mois.

Etant donné que la demande émanant du marché ne peut être connue à l'avance et en supposant que tout ce qui n'est pas connu peut être estimé, simulé et dans le meilleur des cas approximé nous avons utilisé la méthode ARIMA (Rob J Hyndman et al., 2008) en langage R afin de générer des prévisions de la demande pour l'année 2021 en prenant comme base de calcul une série chronologique constituée de données de l'année 2020 fournies par RECYC-QUEBEC (*Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles au Québec*, 2018).

La demande attendue pour l'année suivante a été estimée par la méthode ARIMA via langage R. Le **tableau 2.1** représente les récentes demandes de papiers et cartons qui constitueront la série chronologique sur laquelle se basent les prévisions :

Tableau 2.1 Quantités (en tonnes) de papier vendu en 2020

Mois\Dem	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
	10 600	13 400	18 300	17 200	11 600	10 600	14 200	11 100	14 900	16 600	12 100	16 300

Les instructions du langage R Demande <- ts (données = Y, début = 1, fin = c (9), fréquence = 3) et Arima (Demand) permettent d'observer les prévisions pour l'année 2021 qui sont données par le **tableau 2.2** :

Tableau 2.2 Demande prévue pour 2021

Mois	Demande (tonnes)	Prix de vente ($ par tonne)
Jan	12 756	67
Fev	12 203	
Mar	13 626	
Avr	13 552	
Mai	12 473	
Juin	13 105	
Juill	13 207	
Août	13 126	
Sept	12 855	
Oct	13 019	
Nov	13 471	
Dec	12 580	

Pour ce cas de base, nous admettons les paramètres illustrés dans le **tableau 2.3 :**

Tableau 2.3 Paramètres de l'application numérique basique

Paramètre	Valeur	Référence
$\boldsymbol{P_A}$	67$/t	(Recyc Québec, 2019).
D_{fA}	14 000t	Générée par ARIMA
u	67$/t	(Recyc Québec. 2016)
a	41$/t	
m	35/t	
θ	18.44$/t	(Statistique Canada, 2018)
η	10$/t	(Environnement et Changement climatique Canada, 2019)
ρ	1$/t	(Outil d'inventaire des matières résiduelles, 2015)

La situation de base qui fera l'objet du test numérique est représentée par la **figure 2.5 :**

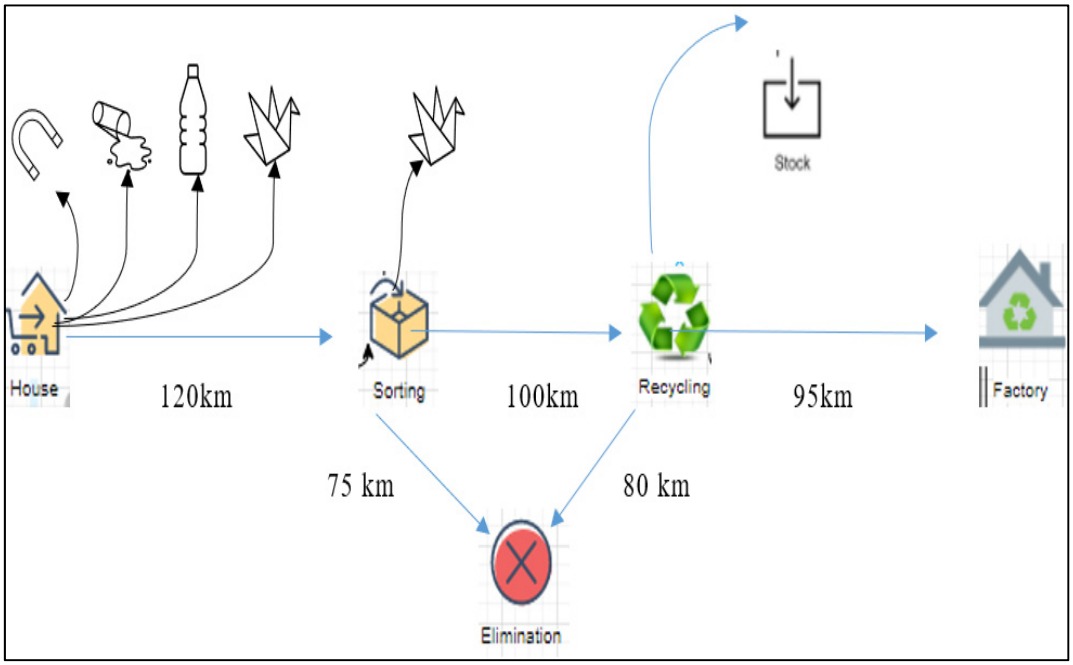

Figure 2.5 Application numérique sur un cas de base

Le programme est exécuté avec certaines données tirées du modèle de référence et citées dans le **tableau 2.4:**

Tableau 2.4 Données tirées du modèle de référence

Elément	Valeur
Q	21 000 t/mois (dont 19% sont Met, Pla ,V)
$Cp,\ Cs$ et Cc	Couverts par le revenu de vente
Obj environnemental	55t/mois
Emission de GES	0,035kg/t-km
Coût fixe de recyclage	35$/t
Coût de main d'œuvre	160 208,4$
Frais de transport	24,4$/t
Frais de pénalité des produits non collectés	22 465,67$/mois
Revenu	Valeur monétaire des matériaux recyclés

La résolution s’est faite à l'aide de LINGO et les résultats sont présentés dans le **tableau 2.5** :

Tableau 2.5 Résultats de l'application numérique. A. Cas sans tri. B. Cas avec tri.

Cas A		
Mois	Q_Mois/t	Rev_vente/$
Jan	13776	922992
Fev	13903	931501
Mar	13324	922708
Avr	13856	928352
Mai	13746	920982
Juin	13700	917900
Juil	13804	924868
Aou	13788	923796
Sep	13915	932305
Oct	14008	938536
Nov	13880	929960
Dec	13704	918168

Cas B		
Mois	Q_Mois/t	Rev_vente/$
Jan	45604	3055468
Fev	51063	3421221
Mar	42915	2875305
Avr	40370	2704790
Mai	41209	2761003
Juin	48661	3260287
Juil	40205	2693735
Aou	51134	3425978
Sep	39723	2661441
Oct	40277	2698559
Nov	53947	3614449
Dec	46053	3085551

Les résultats obtenus dans le précédent tableau sont représentés dans la **figure 2.6** qui montre l’évolution du stock, du coût environnemental et de la demande mensuelle en fonction des décisions à prendre :

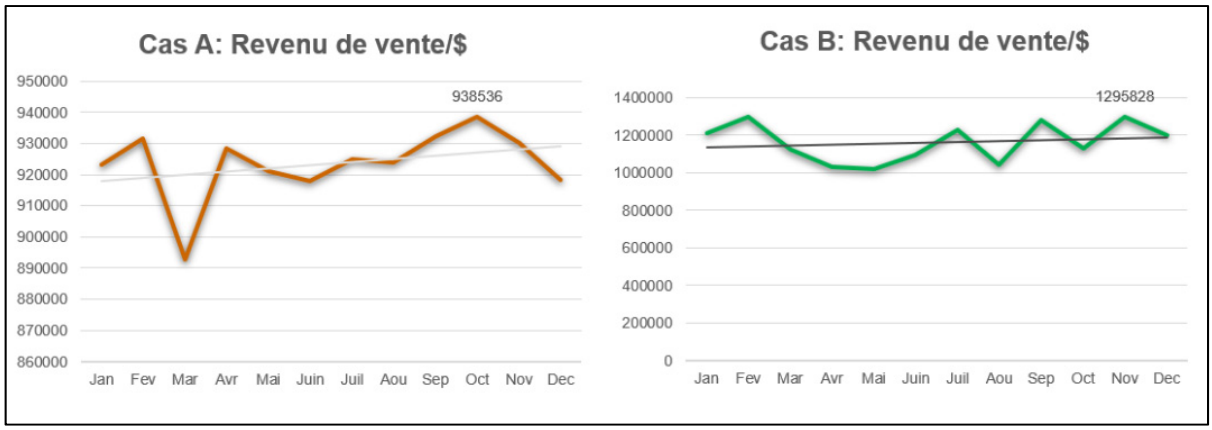

Figure 2.6 Résultat de l'étude de cas A. Cas sans tri. B. Cas avec tri.

L'objectif indiqué pour chaque cas dans la **figure 2.6** est le résultat de la différence entre le revenu de vente et les différents coûts associés dont la valeur est présentée dans les **tableaux 2.6** et **2.7**.

Tableau 2.6 Résultat du cas A (sans pré-tri)

CAS A: Objectif = -343735,00$							
C_Trs/$	C_Em/$	C_Op/$	C_Elim	C_St	Q_Recup/t	Q-Elim	Rev_vente/$
289118,93	116835,77	8902739,14	2064526	52583,4	424440	206452,6	11082068

Tableau 2.7 Résultat du cas B (avec pré-tri)

CAS B: Objectif = 490202,00$							
C_Trs/$	C_Em/$	C_Op/$	C_Elim	C_St	Q_Recup/t	Q-Elim	Rev_vente/$
327240,84	134730	12570700	0	420687,16	628800	0	13943560

Selon la **figure 2.6** ainsi que les **tableaux 2.6 et 2.7**, dans le cas B (avec tri sélectif), le revenu de la vente vaut 13 943 560$ tandis qu'en l'absence de pré-tri (cas A), il vaut 11 082 068$. Cela est dû au fait que les bacs de déchets municipaux soient moins contaminés lorsqu'ils sont préalablement triés par les consommateurs (cas B) et donc, la quantité à récupérer à des fins de recyclage est plus importante et engendre un revenu plus élevé que dans le cas où aucun pré-tri n'est effectué (cas A).

Le coût opérationnel de collecte, tri, recyclage et élimination s'élève à 12 570 700$ en présence de pré-tri (cas B) et à 8 902 739,14 $ lorsqu'il n'y a pas de pré-tri (cas A). Ceci est dû au fait que les quantités de déchets récupérées et nécessitant un traitement dans les sites sont plus élevées dans le cas avec tri sélectif (cas B) tandis que dans le cas A, les déchets contaminés n'ayant plus de valeur résiduelle ne nécessitent pas de traitement mais feront grimper le coût d'élimination.

Le coût d'émission de GES ne vaut quant à lui que 134 730$ en présence de tri sélectif et 116 835,77$ dans le cas sans pré-tri auquel on ajoute un coût d'élimination allant jusqu'à 2 064 526$. Ce coût d'émission (plus connu sous le nom de Coût Vert) paraît négligeable devant le coût opérationnel. Cela est dû au fait que la stratégie écologique imposée par les gouvernements est émergente et s'installe progressivement afin de laisser les preneurs de décisions adopter le coût vert dans leurs chaînes d'approvisionnement directes et de retour.

Étant donnée cette progression à en devenir, dans ce qui suit, nous allons étudier l'impact de la variation progressive de ce coût vert sur l'objectif global à travers une analyse de sensibilité.

2.6 Analyse de sensibilité (impact des engagements du G20 sur les axes ciblés)

2.6.1 Introduction

L'interprétation du coût et limites d'émission de gaz à effet de serre intervient dans cette analyse de sensibilité. Le but ici est d'anticiper d'éventuelles décisions des gouvernements décrétant l'augmentation des pénalités de dissipation. À travers des scénarios croissants, cette analyse a pour objectif de déterminer l'impact que ce genre de décisions puisse avoir sur le coût d'émission et donc, sur l'objectif global. Les premiers ministres canadiens ont fixé l'objectif en mars 2016 : une réduction de 30 pour cent sous les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre (GES) de 2005 d'ici 2030. Ils ont donné leur accord à la tarification du carbone en tant que stratégie politique pour la réduction des émissions de GES.

Deux options de tarification du carbone ont gagné du terrain :

- Une taxe sur le carbone, perçue sur le volume d'émissions (en général, par tonne),
- Un système de plafonnement et d'échange qui fixe une limite aux émissions et d'exiger que les émetteurs achètent des quotas dans le cadre d'une offre fixe.

Le gouvernement fédéral a proposé que le prix par tonne commence à 10 $ en 2018 pour s'élever jusqu'à 50 $ la tonne en 2022. Dans cette partie, nous étudions l'impact des deux stratégies sur le coût total en effectuant une analyse de sensibilité. Pour ce faire, nous faisons varier dans un premier temps, la limite de plafonnement prévue dans le texte de loi du gouvernement du Canada jusqu'à l'atteinte de l'objectif convoité par les gouvernements pour 2030, puis le prix d'achat de quotas qui croie d'année en année. La suite devrait nous permettre d'identifier les nouveaux paramètres à inclure dans le modèle.

2.6.2 Contexte actuel des émissions de GES

Les GES du secteur des transports proviennent des combustibles fossiles (essence, diesel, huile lourde, propane, gaz naturel, etc.) utilisés comme carburant. Au Québec, le secteur des transports est le principal émetteur de GES. Ses rejets atteignaient 36,1 Mt éq. CO_2 en 2018, soit 44,8 % des émissions québécoises. La loi canadienne vise toute la gamme de nouveaux véhicules lourds routiers, allant des camionnettes et des fourgonnettes lourdes aux tracteurs routiers et aux autobus, ainsi qu'une grande variété de véhicules spécialisés, comme les camions de fret, de livraison et de service, les bétonnières et les camions à ordures.

Il est estimé que le règlement actuel entraînera une réduction d'environ 19,1 mégatonnes (Mt) en équivalent de CO_2 des émissions de GES et que les avantages nets du règlement sont de 4,5 milliards de dollars au cours de la durée de vie d'exploitation des véhicules produits dans la cohorte des années de modèle 2014 à 2018.

Il est aussi estimé que le règlement actuel entraînera des réductions des émissions de 3 Mt en équivalent de CO_2 par année en 2020 comparativement au maintien du statu quo, contribuant ainsi à atteindre les engagements faits dans le cadre de l'Accord de Copenhague. Cette même loi stipule que la valeur des émissions de CO_2 des moteurs de véhicules lourds ne peut

dépasser la norme de CO_2 de 627 g/BHP-Heure au cours de leur durée de vie utile. Cette norme est définie en fonction de la quantité maximale des émissions selon la distance dans le cas des véhicules légers (moins de 3 855 kg) ou selon la puissance au frein par heure (bhp/h) dans le cas des véhicules lourds.

2.6.3 Formulation mathématique

Dans le modèle développé pour cette section, nous admettant que :

- Nr : Norme des émissions de CO_2 des moteurs de véhicules lourds (627g/BHP-h).
- V : Vitesse d'un véhicule lourd de classe 8 (105km/h).

Dans cette étude, nous considérons les véhicules à moteurs lourds spécialisés dans la collecte et le transport des déchets urbains dont les moteurs X15 de la marque Volvo-série 505-605 hp, 1850-2050 lb-pi sont équipés d'une puissance au frein pouvant atteindre 600 bhp.

- E : l'émission de CO_2 par véhicule lourd de classe 8 est de 99.7 g CO_{2e} /km .
- Tx : Taxe sur le carbone ($/tonne).
- BHP : Puissance de frein du véhicule lourd.
- Qta : Prix d'achat de quotas (de 10-50 entre 2018 et 2022). Dans le cas du marché Québec-Californie, chaque unité (qui équivaut à une tonne métrique de CO_2) a un prix plancher en $CA qui augmente de 5 % par année. L'argent récolté par le gouvernement québécois est versé dans le Fonds vert et alloué à des initiatives destinées à lutter contre les changements climatiques.
- T : Nombre maximal de véhicules.

Selon les données extraites du contexte étudié, les véhicules mobilisés dans cette étude doivent vérifier la condition **(2.9)** :

Contrainte de non-dépassement de la norme d'émission

$$\frac{E \times V}{BHP} \leq Nr \tag{2.9}$$

D'après les recommandations préliminaires fondées sur la documentation actuelle, il est raisonnable d'estimer les valeurs du coût d'émission à Tx = 28,44 $/tonne de CO_2 augmentant chaque année en fonction de la croissance prévue des dommages.

Le dépassement de cette norme entrainera des frais allant de 28.44$ à près 50$ par tonne de CO_2 émise en 2050 et le coût à ajouter à la fonction objectif (si la précédente contrainte n'est pas satisfaite) est donné par la formule (**2.10)** :

$$\left\{ \begin{array}{c} Tx \sum_{t=1}^{T} \left(\frac{E \times V}{BHP} - Nr \right) z_1 + Qta \sum_{t=1}^{T} \left(\frac{E \times V}{BHB} - Nr \right) z_2 , \ \text{si} \ \frac{E \times V}{BHP} > Nr \\ \text{o Sinon} \end{array} \right\} \tag{2.10}$$

$$\text{Avec } z_i = \left\{ \begin{array}{c} 1 \text{ si la strategie i est choisie} \\ 0 \text{ sinon} \end{array} \right\} \ \forall i \in \{1,2\}$$

$$Z_1 + Z_2 = 1.$$

$$\text{Et } i \in \{1\text{: Taxes sur le carbone}, 2\text{: Rachat de quotas}\}$$

2.6.4 Application numérique

À première vue, la stratégie d'achat de quotas paraît plus intéressante étant donnée la différence entre leur prix et celui des taxes sur le carbone. Cependant, ce prix augmentant de 5% par année, il serait éventuellement judicieux et moins coûteux (voire plus rentable) pour certaines entreprises, de songer à adopter le premier plan afin de réduire leurs coûts sur le long terme. Pour le prouver, nous effectuons une analyse de sensibilité qui aura pour but d'aider les preneurs de décision à choisir parmi ces deux stratégies, celle qui garantira un coût optimal. À travers 6 scenarios, nous allons diminuer progressivement les limites de plafonnement de 627g/bhp-h à 500g/bhp-h (**tableau 2.8)** puis, dans 6 autres scénarios, **tableau 2.9),** nous augmenterons de 5% annuellement le prix d'achat d'une unité (en tonne)

de quotas. Les résultats obtenus à travers l'augmentation du prix d'achat de quotas sont inscrits dans le **tableau 2.8** tandis que ceux de la variation de la norme Nr figurent dans le **tableau 2.9:**

L'augmentation annuelle de 5% du prix d'achat de quotas a donné les résultats illustrés par le **tableau 2.8** :

Tableau 2.8 Résultats de la variation du prix d'achat de quotas (Qta)

Scenario	Paramètre varié	Unité	Valeur	Quantité d'émission	Coût d'émission
1	Qta	$/t co2e	28.44	77.73t co2e	474 663.6$
2			32		534 080.0$
3			36		600 840.0$
4			40		667 600.0$
5			44		734 360.0$
6			50		834 500.0$

La diminution progressive des limites de plafonnement de 627g/bhp-h à 500g/bhp-h a donné les résultats figurant dans le **tableau 2.9 :**

Tableau 2.9 Résultats de la variation de la norme d'émission de GES (Nr)

Scenario	Paramètre varié	Unité	Valeur	Quantité d'émission	Coût d'émission
1	Nr	g/bhp-h	627	77.73t co2e	474 663.6$
2			602		602 643.6$
3			577		730 623.6$
4			552		858 603.6$
5			527		986 583.6$
6			500		1 124 802$

La **figure 2.7** illustre les résultats obtenus de cette analyse :

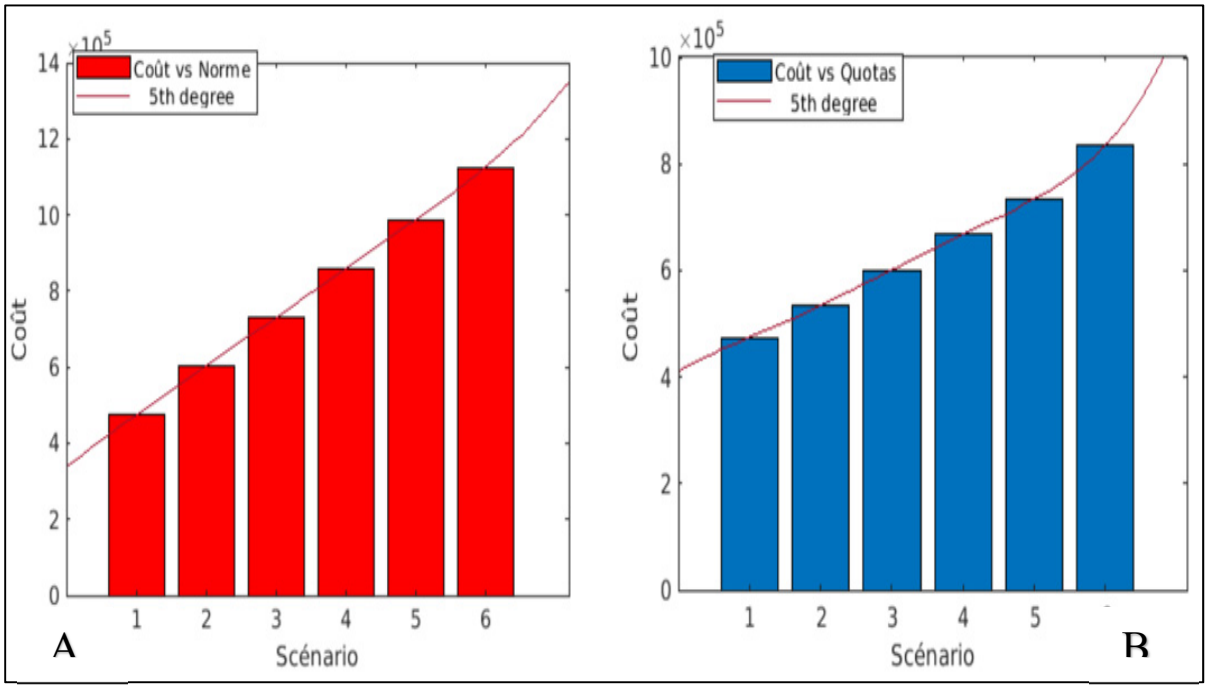

Figure 2.7 Résultats des deux stratégies de l'analyse de sensibilité (GES). A. Effet de la variation de la norme Nr sur le coût d'émission de GES. B. Effet de la variation du prix d'achat Qta sur le coût d'émission de GES.

2.6.5 Discussion et conclusion sur l'analyse de sensibilité

À travers la **figure 2.7.A**, on observe l'évolution du coût d'émission de gaz à effet de serre en fonction de la variation du seuil décrit par la norme imposée (stratégie 1). Il apparait clairement dans ce graphique qu'au fur et à mesure des scénarios représentant une baisse graduelle de près de 4% du seuil toléré par g/bhp-h, le coût vert engendré augmente rapidement jusqu'à atteindre la valeur comprise entre 1 million et 1.2 millions de dollars. Ce montant correspond au coût de 1 124 802$ observé sur le scénario 6 du **tableau 2.9**.

D'après la **figure 2.7.B,** on remarque l'évolution du coût d'émission de gaz à effet de serre en fonction de la variation du prix de quotas (stratégie 2). Il apparait là aussi clairement dans ce graphique qu'au fur et à mesure des scénarios représentant une augmentation graduelle de près de 4$ par tonne de Co2 émise, le coût vert engendré augmente progressivement jusqu'à atteindre la valeur comprise entre 800 000 et 1 million de dollars. Ce montant correspond au coût de 834 500$ observé sur le scénario 6 du **tableau 2.**.

Au vu de ces résultats, on constate qu'il serait moins coûteux sur le long terme pour les entreprises dont les activités émettent de grandes quantités de GES d'opter pour la seconde stratégie et de songer à acheter des quotas plutôt que de devoir verser la taxe carbone dont les coûts engendrés montrés dans cette figure croissent plus rapidement comparer aux prix d'achat de quotas.

2.7 Conclusion

Le but de ce chapitre était de concevoir et de développer un modèle compact pouvant gérer les déchets municipaux en tenant compte de leur impact sur la préservation des ressources, impact écologique, économique et social. Les résultats de l'exécution du modèle en question ont démontré qu'il était possible d'optimiser la récupération de la matière première qui sommeille dans les foyers d'une municipalité quelconque tout en garantissant la satisfaction des quatre axes ciblés par l'étude.

D'un point de vue écologique, pour déterminer l'option la plus optimale, nous avons effectué une analyse de sensibilité qui consistait à faire varier à travers différents scenarios, le volume d'émission de GES autorisé, puis les coûts fixes de rachat de quotas. Les résultats obtenus ont prouvé que les entreprises avaient tout intérêt à opter pour cette dernière stratégie car celle-ci a démontré un coût largement inférieur à la taxe imposée. Ces résultats devraient permettre aux industries d'éviter d'importants coûts écologiques tout en faisant en sorte que leurs plans stratégiques respectifs soient en adéquation avec les lois stipulées par l'accord de Paris.

Afin de prouver l'efficacité économique, le modèle a permis de comparer les coûts totaux engendrés par la GMR conventionnelle avec ceux de la méthode proposée et dans laquelle seront intégrés les différents frais de gestion économique, de l'environnement et de la préservation des ressources. Quant au critère social, le modèle a suggéré d'adopter, conformément à la norme internationale d'orientation sur la responsabilité sociale - ISO 26000, un seuil maximal de main d'œuvre à garantir, offrant ainsi des opportunités de travail plus régulières ; ce qui, comme le prouvent certaines études, garantit un revenu stable et un sentiment de bien-être tout en favorisant les contacts sociaux ainsi que le développement de l'estime de soi au sein de la société.

De plus, il s'agissait de créer de la matière première à partir de la mine de déchets qui sommeillaient dans les foyers. En effet, les ressources non renouvelables auraient fait augmenter le coût d'approvisionnement. Le critère ressources a permis d'injecter de la matière première dans le processus de fabrication à moindres coûts. Enfin, afin de garantir la pertinence du modèle, il a été prouvé que les coûts engendrés par celui-ci étaient moindres comparés aux profits qui y sont liés.

Dans la prochaine partie, nous étendrons l'application et la flexibilité du modèle en étudiant l'éventuel rôle de l'industrie 4.0 dans son amélioration ainsi que son grand intérêt écologique, énergétique, de maîtrise du coût de fonctionnement, ou encore d'amélioration de la rapidité du réseau de la GMR. En effet, l'adoption de l'industrie 4.0 dans les ''Smart Cities'' permettrait la prévision et la connaissance exacte en amont du contenu des poubelles à travers le scan des QRcode inscrits sur les emballages et l'automatisation et optimisation de leur collecte et traitement.

CHAPITRE 3

MODELISATION DES DÈFIS DE L'INTERNET DES OBJETS (IOT) DANS LA GESTION DES DECHETS DES VILLES INTELLIGENTES

3.1 Introduction

De nos jours, l'Internet of Things est devenu l'une des technologies les plus importantes du 21ème siècle (Nora Peter, 2021). Constituant un véritable réseau d'appareils physiques « objets » tels que les électroménagers, ou encore les voitures, cette technologie intègre capteurs et logiciels et les connecte à d'autres terminaux et systèmes sur Internet qui facilitent les échanges de données avec eux, et ce aux fins d'enregistrement, surveillance ou ajustement. Grâce à cela, il est maintenant possible de rendre la communication facile et transparente entre les personnes, les processus et les objets (Patel & Scholar, 2016). Ainsi, les mondes numérique et physique se rencontrent, coopèrent et désormais ne font plus qu'un.

3.2 Contexte industriel

Dans un cadre industriel, l'application de l'Internet des objets (Industrial IoT - IIoT) intervient dans l'instrumentation et le contrôle des capteurs et terminaux qui font appel à des technologies Cloud. D'une part, la transmission de données d'une machine à l'autre (M2M) est, depuis peu, adoptée dans les usines afin de bénéficier des fonctionnalités d'automatisation et de contrôle sans fil. Et d'autre part, l'émergence des technologies associées au Cloud, à l'instar du Machine Learning, a permis aux industriels d'accéder à un niveau encore plus élevé d'automatisation générant ainsi de nouveaux revenus et permettant de créer de nouveaux modèles d'affaire inscrits dans le domaine de l'Industrie 4.0.

3.3 Lien avec la problématique

Nombreux sont les domaines qui surfent sur cette quatrième vague de la révolution industrielle. Allant des maintenances préventives automatisées aux logistiques connectées *Smart Digital Supply Chains* (Bechtsis, et al., 2018), passant par la production intelligente (Lioutas & Charatsari, 2020) et bien plus encore, l'IIoT n'a pas fini d'être exploité. Dans le cadre de cette étude, un grand intérêt est porté sur le domaine des villes intelligentes *Smart Cities* (Talari et al., 2017) et plus précisément, le rôle de l'IIoT dans l'optimisation de la gestion de leurs déchets urbains.

L'adoption de l'industrie 4.0 dans les *Smart Cities* a non seulement permis la prévision et la connaissance exacte en amont du contenu des poubelles à travers le scan des QRcode inscrits sur les emballages, mais également d'automatiser et d'optimiser leur collecte et traitement. Grâce à la communication entre machines (M2M), les robots identifiés par un unique tag et pouvant se déplacer vers un collecteur de zone (benne), de s'y accoupler pour se vider, se reprogrammer (si nécessaire), puis revenir seuls au point de collecte, sont désormais aussi capables de signaler toute panne à la centrale, ce qui leur permet de déclencher une maintenance corrective efficace, rapide et à distance (Mitton et al., 2018). Les avantages de l'IIoT ne s'arrêtent pas là mais son usage nécessite des moyens et des technologies coûteuses que peu de pays en développement peuvent se procurer : alimenter les trottoirs de bornes photovoltaïques, antennes relais dernière génération, pour une meilleure connectivité, modification des emballages afin d'y inclure le QRcode à scanner, …

Bien que la Smart City puisse représenter un grand intérêt écologique, énergétique, de maîtrise du coût de fonctionnement, ou encore d'amélioration de la rapidité du réseau de la GMR notamment grâce à la cartographie de la typologie des déchets d'une ville ou l'automatisation de leur collecte avec les robots compacteurs, celle-ci se heurte à de nombreux obstacles nommés (IoTB) qui freinent son adoption notamment dans les pays en développement : le manque d'infrastructures informatiques, de normalisation et de règlementation, les problèmes de connectivité Internet, de confidentialité et de sécurité, de fiabilité, de transparence ou encore de mobilité.

La **figure 3.1** illustre brièvement cette problématique :

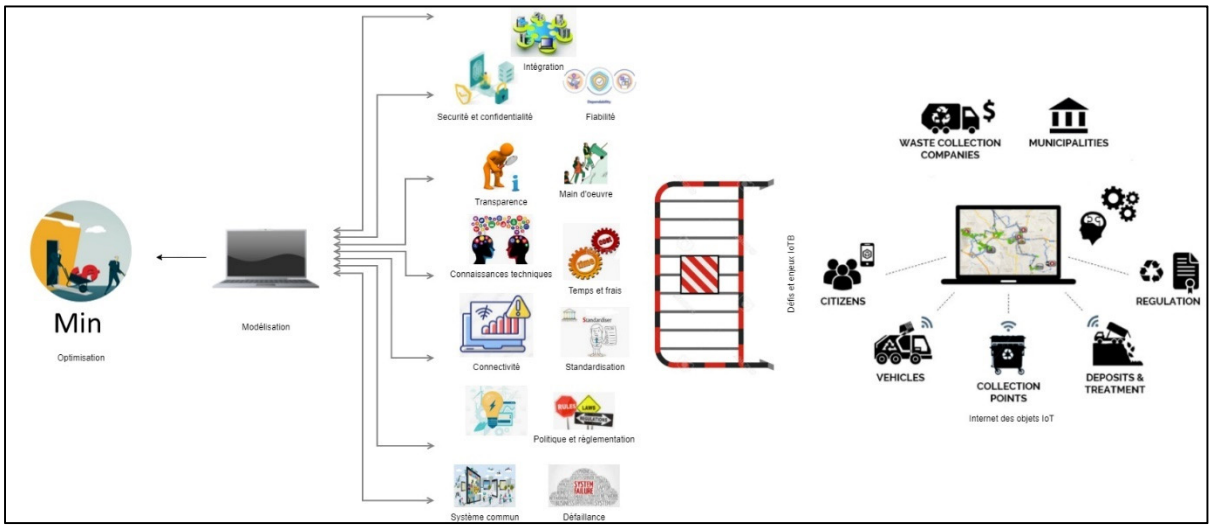

Figure 3.1 Enjeux et défis de l'IoT dans la GMR

3.4 Modélisation des 15 défis de l'IoT dans la GMR des villes intelligentes

3.4.1 Introduction

Cette section consiste à modéliser la situation en tenant compte des différents obstacles à l'adoption de l'IIoT dans la gestion des déchets d'une ville intelligente identifiés dans la récente littérature parcourue (Sharma et al., 2020) afin d'aider les preneurs de décisions (gouvernements, parties prenantes, décideurs politiques,…) à développer des normes réglementaires, des politiques et des orientations qui permettront de tirer avantage de l'industrie 4.0.

Cependant, tandis que les pays développés disposent d'une technologie de pointe, de vastes ressources et d'un cadre solide pour développer des villes intelligentes, les pays en développement, comme l'Inde, ont des difficultés à mettre en œuvre des projets de développement étant données leurs différentes contraintes financières, techniques et écologiques. Il est donc primordial de songer à développer un cadre structurel qui pourrait les aider à mettre progressivement en œuvre des écosystèmes activés par l'IoT dans les villes intelligentes. Pour ce faire, certains chercheurs préconisent de traiter séparément les facteurs

affectant les projets de villes intelligentes dans de tels pays (Muvuna et al., 2019).

3.4.2 Identification des défis de l'IoT

Dans le cadre des systèmes de gestion des déchets des villes intelligentes dans les économies en développement telles que l'Inde, l'article de (Sharma et al., 2020) a identifié 15 obstacles à l'adoption de l'IoT (IoTB) entravant sa mise en œuvre dans les villes intelligentes du pays. Le but de cette section est de concevoir un modèle d'aide à la décision ayant pour objectif d'optimiser la performance de l'IIoT dans la gestion des déchets d'une ville intelligente, tout en tenant compte les 15 obstacles IoTB cités dans la revue et concernant la problématique actuelle (Sharma et al., 2020).

Les critères de performance considérés par le modèle pourront alors être sélectionnés (activés) au préalable par les autorités responsables et les résultats obtenus devront justifier le recours aux applications de l'IIoT. Les paramètres constituant le modèle ont été définis en fonction des défis figurants dans le **tableau 3.1** :

Tableau 3.1 Les 15 défis de l'IoT

Adapté de Sharma (2020, p.5)

Id	Défi
IoTB1	Sécurité et confidentialité
IoTB2	Fiabilité
IoTB3	Manque de transparence
IoTB4	Coût opérationnel et période derécupération prolongée
IoTB5	Standardisation
IoTB6	Absence de normes, politiques et orientations réglementaires
IoTB7	Absence de système d'information commun
IoTB8	Manque d'intégration entre les réseaux informatiques
IoTB9	Main-d'œuvre qualifiée limitée
IoTB10	Manque de connaissances techniques chez les planificateurs
IoTB11	Connectivité Internet inadéquate
IoTB12	Problèmes de défaillance du système /intégrité
IoTB13	Disponibilité des données
IoTB14	Consommation d'énergie élevée
IoTB15	Infrastructure/architecture informatique

3.4.3 Formulation du problème d'optimisation

Ainsi, pour chaque défi, il y a lieu d'identifier les paramètres correspondants aux défis cités précédemment afin de les inclure dans le processus de modélisation. Ces paramètres sont représentés dans le **tableau 3.2 :**

Tableau 3.2 Identification des paramètres pour les défis de l'IoT

Id	Paramètre
IoTB1	Taux de fuites d'informations toléré a%.
IoTB2	Nombre d'objets utilisés N. Fiabilité de l'ensemble d'objets $F = \prod^{N}{}_{1}\, fi$
IoTB3	Coût de diffusion minimale de l'information concernant les responsabilités de chaque installation (caméras de vidéosurveillance dans toute la ville ainsi que la surveillance GPS et vidéos dans les voitures de police en plus des caméras de transit) : I ($) et INF=100000 (Nombre total d'infos à transmettre).
IoTB4	Coûts unitaires d'achat et de maintenance des capteurs et antennes responsables de la collecte et de recyclage des flux de déchets entre les zones i et j: c_{ij}
IoTB5	Coûts fixes d'adoption d'une norme ou d'un identifiant facilitant l'acheminement des données aux parties prenantes c_n.
IoTB6	Coût unitaire de main d'œuvre juridique cl.
IoTB7	Coût fixe de configuration d'une plate-forme intégrée de systèmes d'information et d'une technologie géo spatiale pour le partage en temps réel de données et l'échange d'informations c_c .
IoTB8	Degré de compatibilité entre les logiciels, les véhicules et les équipements $degl$.
IoTB9	Efficacité maximale de la main d'œuvre (compétences techniques de l'ouvrier k) : $\mathbf{Eff_k}$, $\mathbf{c_{o:}Taux\ /h\ d'un}$ ouvrier.
IoTB10	Frais de recours à l'expert en planification p :$ExpPlan$.
IoTB11	Coût d'installation d'antennes relais dernière génération, pour une meilleure connectivité malgré la saturation du réseau : c_A.
IoTB12	Coût fixe de maintenance préventive des objets: c_p par objet.
IoTB13	Temps de traitement de l'information à partir de l'ordinateur central partagé : $\mathbf{t_i}$ et le coût $\mathbf{c_t}$ équivaut a celui de l'émission de 4g de Co2 Deluzarche, « Quelle est l'empreinte carbone d'un e-mail ? ».
IoTB14	Consommation d'énergie de l'objet obj: $cons_{obj}$.
IoTB15	Degré de compatibilité entre l'architecture informatique et la technologie mise à niveau :deg_t.

Les variables de décisions correspondant à la situation sont :

- $ycrit$: Valant 1 si le critère crit est sélectionné par les parties prenantes et 0 sinon.
- Aij : Flux de données véhiculées d'un objet i à un autre j.
- $Xobj$: Valant 1 si l'objet obj est sélectionné pour la GMR et 0 sinon, ($|OBJ| = N$).
- XAV: Nombre d'avocats et autres experts à embaucher au service juridique.
- $XQual$: Nombre d'ouvriers qualifiés à embaucher.
- $XPlan$: Nombre d'experts en planification à embaucher.
- $XAnt$: Nombre d'antennes relais à installer.

Tandis que les contraintes sont :

Contrainte de fiabilité des appareils électroniques

$C1$:

$$\prod_{j=1}^{N} f_j x_j \leq F \quad \forall (j < N) \in OBJ \tag{3.1}$$

Contrainte de confidentialité et sécurité des données

$C2$:

$$\sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{N} A_{ij} \geq (1 - a) INF \quad \forall (i, j) \in OBJ^2 \tag{3.2}$$

Contrainte de compatibilité entre logiciels et équipements

$C3$:

$$deg_i x_i \geq deg_j x_j \quad \forall (i, j) \in OBJ^2 \tag{3.3}$$

Contrainte de la main d'œuvre qualifiée

$C4$:

$$Eff_k x_{Qual} \geq EFF \quad \forall k \in QUAL \tag{3.4}$$

Et la fonction Objectif est :

$$
\begin{aligned}
Min = \quad & Iy_1 + c_n y_2 + c_l \sum x_{AV}\, y_3 + c_c y_4 \\
& + Exp_{Plan} \sum x_{Plan} y_5 \\
& + c_A \sum x_{Ant} \\
& + c_p \sum x_{obj} y_7 \\
& + c_t \sum \sum t_i A_{ij} y_8 \\
& + p_{Cons} Cons_{Obj} \sum x_{Obj} y_8 \\
& + c_o \sum x_{Qual}
\end{aligned}
\tag{3.5}
$$

3.4.4 Application numérique

Afin de tester la robustesse du modèle, nous admettons les paramètres tirés des récents travaux (Sharma et al., 2020). Ces données sont représentées dans le **tableau 3.3** :

Tableau 3.3 Application numérique

Paramètre	Valeur estimée
$\mathbf{c_{ij}}$	160$
I	29 300 000$
$\boldsymbol{c_n}$	263$
$\mathbf{c_l}$	66.1$/h
$\mathbf{c_c}$	1 300 000$
$\mathbf{Exp_{Plan}}$	64.1$/h
$\mathbf{c_A}$	500$/Obj/an
$\mathbf{c_p}$	400$/Obj/an
$\mathbf{t_i}$	2s/op
$cons_{obj}$	6.45 kwh
$\mathbf{c_t}$	0.000074$/op
$\mathbf{p_{Cons}}$	0.06159$/kwh
$\mathbf{c_o}$	16.02$/h

Une fois le modèle exécuté sous LINGO on obtient les résultats représentés dans le **tableau 3.4**:

Tableau 3.4 Résultats de l'application numérique

MIN	Xqual	Xobj	Xplan	Xant	Xav	Aij
96 011 600$	1 111	63 157	0	1 058	0	1 079 545

Les résultats figurant sur le **tableau 3.4** suggèrent d'engager un total de 1 111 ouvriers qualifiés, de n'engager ni d'avocats ni d'experts en planification, de configurer un total de 63 157 objets fiable à 88%, compatibles entre eux et connectés à 1 058 antennes relais dernière génération. Ils suggèrent aussi d'adopter la norme ISO 37122 en véhiculant un total d'1 079 545 d'informations pouvant être protégées sur les positions géographiques, les horaires etc. presque entièrement sécurisées (à 95%) entre la centrale et les objets. La valeur minimale des coûts obtenue par l'adoption de telles stratégies est : 96 011 600,00$

3.5 Analyse de sensibilité

De nos jours, la consommation d'énergie a atteint son summum. Que ce soit dans de simples logements ou dans des villes intelligentes, l'énergie consommée augmente proportionnellement avec l'émergence de nouveaux outils technologiques. Ainsi, le choix des outils technologiques a un immense impact écologique mais également économique. À titre d'exemple, selon TotalEnergies, un foyer de $100\ m^2$ équipé d'un système de chauffage et d'eau chaude à l'électricité, consomme en moyenne entre 13 900 kWh/année et 20 300 kWh/année s'il n'est pas correctement isolé (Consommation moyenne en électricité d'une maison en France, 2016). De plus, le prix du kWh dépend de l'offre choisie, du fournisseur et/ou des tarifs réglementés de l'électricité. Ce prix augmente chaque année.

Dans cette partie, nous le faisons varier (prix de consommation énergétique) 'p_{Cons}' pour chaque objet 'Obj' afin d'en étudier l'impact sur l'objectif total. Les résultats obtenus sont représentés dans le **tableau 3.5** et illustrés sur la **figure 3.2**.

Tableau 3.5 Résultats de l'analyse de sensibilité (coût énergétique)

Scenario	P_{Cons} ($/kWh)	$Cons_{Obj}$ (kWh/a)	Coût énergétique ($)	Objectif ($)	Proportion (%)
1	0.06159	56 502	34 074 995	96 011 600	35.5%
2	0.08200		45 366 936	107 303 541	42.3%
3	0.11300		62 517 851	124 454 456	50.1%

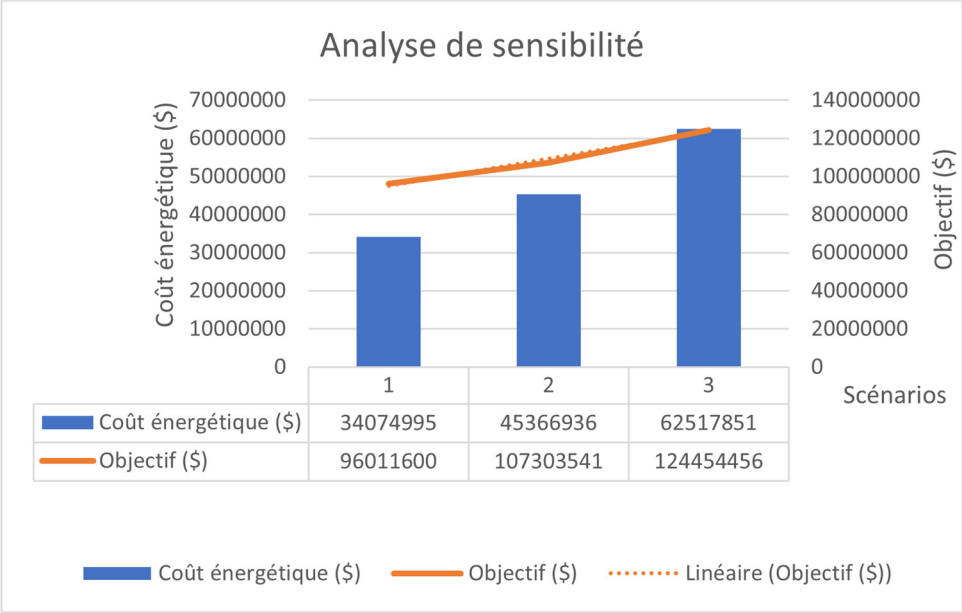

Figure 3.2 Effet de la variation du coût énergétique sur le coût total

On remarque une augmentation du coût énergétique au fil des scénarios, jusqu'à occuper la moitié du coût total. La réduction de la consommation d'énergie paraît donc une bonne stratégie pour limiter à la fois l'impact environnemental (gaspillage des ressources non

renouvelables) et économique (baisse des coûts totaux). Les résultats de cette analyse poussent les preneurs de décisions à envisager l'aspect durable dans leur choix d'outils technologiques de surveillance et de production (les objets).

3.6 Conclusion

Dans cette partie, nous avons étudié la possibilité d'avoir recours aux différentes technologies développées par l'Industrie 4.0 dans notre problématique de GMR urbaines. Il s'agissait principalement de l'Internet des objets en contexte industriel (*Industrial IoT - IIoT*). Afin d'étendre l'application du modèle et de l'optimiser, le recours aux fonctionnalités d'automatisation et de contrôle sans fil semblait être une bonne stratégie à adopter dans notre problématique de gestion des déchets urbains. On parle alors de *Smart Cities*.

Bien que l'IIoT ait pu générer de nouveaux revenus (aspect socio-économique) tout en garantissant un énorme gain de temps, les obstacles auxquels a été confrontée l'adoption de l'IIoT ne cessaient de faire leur apparition dans la littérature récente parcourue. Le but de cette partie était donc basé sur l'amoindrissement des effets des IIoTB (manque de confidentialité, de standardisation, la consommation énergétique, …) afin d'inciter les preneurs de décisions à passer outre ces barrières et leur permettre de bénéficier des avantages sociaux, économiques et écologiques de cette quatrième révolution industrielle.

L'objectif était alors de construire dans un premier temps, un outil d'aide à la décision permettant de contrôler l'effet de ces obstacles et dans lequel nous choisissons, au préalable, ceux à prioriser (selon le contexte et la situation économique du pays). Les résultats obtenus ont démontré la nécessité de munir la ville d'outils performants (objets) permettant de garantir la sécurité informatique, le respect des normes imposées et l'embauche d'un certain nombre d'experts afin de garantir l'efficacité de la planification et gestion de la chaîne tout en franchissant les obstacles cités ci-dessus. De plus, les résultats obtenus ont prouvé que les coûts engendrés par ces décisions sont largement compensés par les profits relatifs à la production de masse, transmission rapide des données et automatisation des opérations de

collecte, tri et recyclage.

Néanmoins, l'IIoTB n'en est pas pour autant moins polluante. En effet, certains objets à installer dans la *Smart City*, allant des simples capteurs aux antennes relais dernière génération, passant par les caméras de surveillance et plateformes de traitement de données, peuvent consommer d'immenses quantités d'énergies. C'est pourquoi, il nous a paru primordial d'étudier l'éventualité de recourir à des objets Eco conçus qui consomment beaucoup moins d'énergie et ont une emprunte carbone réduite.

L'analyse de sensibilité faite nous a permis de proposer aux preneurs de décisions un choix d'outils technologiques dont l'impact écologique et économique sont réduits et ce, en intégrant un paramètre de consommation et d'exploitation de l'énergie p_{Cons} qui, selon Hydro-Quebec, continuera à augmenter au fil des années. Les coûts obtenus à travers la variation de ce prix en $/kwh pour différents objets ont fini par absorber l'équivalant de la moitié du coût global annuel de la gestion des déchets urbains. Ceci a prouvé la nécessité de réduire la consommation d'énergie en ayant recours à des technologies (objets) fonctionnant grâce à des énergies renouvelables, durables et efficaces.

CHAPITRE 4

OPTIMISATION DES REPERCUSSIONS DE LA COVID-19 SUR LA GESTION DES DECHETS (PLASTIQUE ET POLYMERE ANTIVIRAL) AU QUEBEC

4.1 Introduction

Voilà plus d'une année que l'épidémie mondiale de COVID-19 a bouleversé la planète. La santé de l'homme étant la principale touchée, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a suggéré l'utilisation de masques faciaux, gants, combinaisons de protection et chaussures de sécurité afin de ralentir le taux de transmission de la COVID-19 chez les êtres humains (Watts, Leck, & Hu, 2020), ce qui a engendré une augmentation substantielle de leur production à l'échelle mondiale (Torres-Salinas, 2020). La mauvaise gestion de ces équipements de protection individuelle (EPI), principalement fabriqués avec des matériaux polymères et des textiles antiviraux, l'augmentation du recours au plastique à usage unique par crainte de contagion, ou même le ralentissement des opérations de recyclage à cause du couvre-feu, représentent un problème environnemental de taille (Graulich et al., 2021) et aggravent fortement la pollution plastique sur l'environnement (Bilal et al., 2020). Le but de cette partie est de concevoir un modèle permettant la récupération de ces EPI à des fins de recyclage afin de réduire l'effet de la pollution tout en garantissant de la matière première qui faciliterait à la fois leur production ainsi que leur gestion dans la province du Québec.

4.2 Contexte étudié et solutions proposées

Selon un article d'HuffPost Québec (12-08-2020), près de 18 144 tonnes de masques pourraient avoir été jetés au Canada au début de la pandémie alors que leur port n'était pas encore obligatoire. Depuis, ce nombre n'a cessé d'augmenter et de manière exponentielle. Ces équipements (masques et gants), pour la plupart à usage unique, représentent une source de contagion pour la population et ne vont pas dans le bac de recyclage.

Dès le début de la pandémie, des organismes de défense de l'environnement ont commencé à s'inquiéter de la pollution que ces EPI engendreraient. En effet, avant l'éclosion de la Covid-19, l'usage de ces objets polluants était formellement interdit par les municipalités. Ce changement avait déjà sonné l'alerte au niveau des organisations de protection de l'environnement. Une équipe de chercheurs canadiens et portugais s'est basée sur des données préliminaires prélevées sur le cas de l'Italie durant le premier printemps de la pandémie et a conclu que si chaque personne utilisait 17 masques jetables par mois, la Terre en consommerait jusqu'à 129 milliards par mois. L'équipe d'HuffPost Canada s'est à son tour inspirée de cette étude pour calculer la quantité de déchets pouvant avoir été générée durant la pandémie par les Canadiens. Sachant qu'un masque jetable pèse en moyenne 3.5 g, si les 37 millions d'habitant du pays en utilisent 17 par mois chacun, on parlerait de près de 1 815 tonnes par mois et 27 000 par année.

Santé Canada, quant à elle, soutient que le Canada aurait produit jusqu'à 23000 tonnes de déchets liés aux EPI rien qu'au cours des 4 premiers mois de la pandémie où leur port n'était même pas obligatoire. Depuis, la situation ne cesse d'empirer. Face à ce fléau, des solutions ont été envisagées pour la réduction à la source de ces déchets. Par exemple, une étude britannique a estimé que si la population optait pour l'usage de masques réutilisables, la planète générerait jusqu'à 95% moins de déchets et la pollution liée aux couvre-visage serait amoindrie. Pour émettre cette affirmation, l'équipe de scientifiques a étudié la chaîne d'approvisionnement des deux types de masques en incluant l'énergie nécessaire pour le nettoyage de ceux en tissu. Au Canada, le gouvernement fédéral a lancé un programme de subvention pour la confection d'EPI plus verts. La compagnie montréalaise Dorma Filtration en a profité pour concevoir des masques de type N99 entièrement recyclables et pouvant être réutilisés à 30 reprises.

Pour ce qui est des EPI jetables utilisés, RECYC-QUEBEC a dressé une liste d'entreprises récupératrices de masques, gants et visières, qui respectent la hiérarchie des 3R en privilégiant lorsque possible, la réduction à la source puis, le réemploi ensuite le recyclage et enfin l'élimination (dans cet ordre). La plupart de ces entreprises collecte ces EPI auprès des

organismes et sociétés clientes (qui ont envisagé un budget de récupération dès l'acquisition des équipements) puis les achemine vers la reproduction et enfin, transporte ceux destinés à la valorisation énergétique (*liste-options-recuperation-EPI, 2021*).

4.3 Objectif du chapitre

Le but de ce chapitre est de concevoir un outil qui permettrait de collecter et acheminer les EPI utilisés et jetés en pleine nature (lacs, parcs, forêts, …). En effet, n'ayant pas de responsables identifiables, ces déchets n'ont pas été signalés auprès des récupérateurs et leurs coûts n'ont manifestement pas été envisagés par leurs acquisiteurs. Notre étude se limitera au cas de la province du Québec. L'objectif sera de récupérer un maximum de ces EPI utilisés et donc passer par le maximum de sites une et une seule fois tout en réduisant les coûts de transport, les émissions de GES et en respectant la capacité de chargement des véhicules transporteurs. Pour ce faire, l'idée envisagée est de concevoir un modèle compact qui pourra par la suite être applicable dans d'autres secteurs.

Ce modèle devra viser autant que faire ce peu ces objectifs afin de réduire la pollution, les éventuelles contagions qui en découleraient, tout en offrant de la matière première aux producteurs. En effet, la partie souple des masques, faite en polypropylène, est acheminée vers des recycleurs qui en font des billes de plastique pouvant servir dans la fabrication de produits finis. Il en va de même pour l'aluminium des barrettes nasales qui les constituent tandis que les gants sont réduits en poudre et recyclés en surface caoutchoutées (terrains de jeux, tuiles de plancher,). Enfin, comme la politique des 3R l'exige, lorsqu'aucune de ces stratégies n'est envisageable, les EPI seront incinérées afin de générer de l'électricité ou encore de la vapeur.

4.4 Modélisation

Afin de modéliser la situation décrivant le contexte, l'approche étudiée repose sur le fait de combiner deux grands problèmes de recherche opérationnelle : Le problème du sac à dos et

celui du voyageur de commerce.

4.4.1 Problème du sac à dos

Le problème du sac à dos est un problème d'optimisation combinatoire exposé par Richard Karp (1972) et pouvant être défini comme suit :

Étant donné un sac à dos de capacité 'K' limitée et un ensemble de 'N' objets 'j', ayant chacun deux paramètres (une valeur 'vj' et un poids 'pj'). Quels sont les objets à mettre dans le sac qui maximiseraient la valeur totale transportée tout en respectant la contrainte de poids ?

Le programme linéaire associé à ce type de problèmes est :

Fonction Objectif :

La fonction Objectif du problème de sac à dos est représentée par **l'équation (4.1)** :

$$\text{Max} \sum_{j \in N} v_j x_j \tag{4.1}$$

Contraintes :

Les contraintes du problème de sac à dos sont représentées par **l'équation (4.2)** :

$$\sum_{j \in N} p_j x_j \leq K \tag{4.2}$$

Indices :

Les indices variant de 1 à N (objets considérés) sont représentés par l'équa**tion (4.3)** :

$$j \in \{1,2,3,\ldots,N\} \tag{4.3}$$

La **figure 4.1** constitue un schéma traduisant l'énoncé du problème de sac à dos :

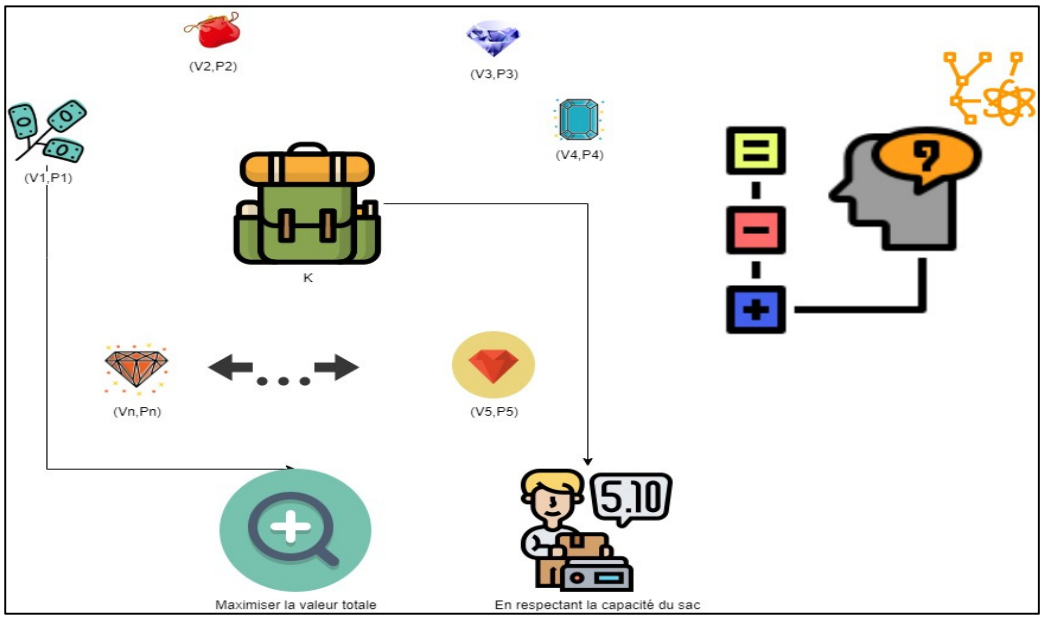

Figure 4.1 Problème de sac à dos (Knapsack Problem)

4.4.2 Problème du voyageur de commerce

Posé pour la première fois en 1859 par William Rowan Hamilton, ce problème, dès 1859 a pour énoncé : « Si un voyageur de commerce doit visiter une et une seule fois un nombre fini de villes et revenir à son point d'origine. Trouvez l'ordre de visite des villes qui minimise la distance totale parcourue par le voyageur ». Il s'agit également d'un problème d'optimisation combinatoire pouvant être défini ainsi :

Étant donné un ensemble ‘N’, de sommets (des « villes ») et les distances ‘di’ séparant chaque ville ‘i’ d’une ville voisine ‘j’, le but est de trouver un chemin de longueur totale minimale qui passe exactement une fois par chaque sommet-ville et revienne au point de départ.

Le programme linéaire associé à ce problème est :

Fonction Objectif :

La fonction Objectif du problème de voyageur de commerce est représentée par **l’équation (4.4)** :

$$\text{Min} \sum_{j \in N} \sum_{i \in N} d_{ij} x_{ij} \tag{4.4}$$

Contraintes :

Les contraintes du problème de sac à dos sont représentées par **l’équation (4.5)** :

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \tag{4.5}$$

Variables binaires :

Les variables de décision sont représentées par l’équa**tion (4.6)** :

$$x_{ij} \in \{0,1\} \tag{4.6}$$

La **figure 4.2** constitue un schéma traduisant l'énoncé du problème du voyageur de commerce :

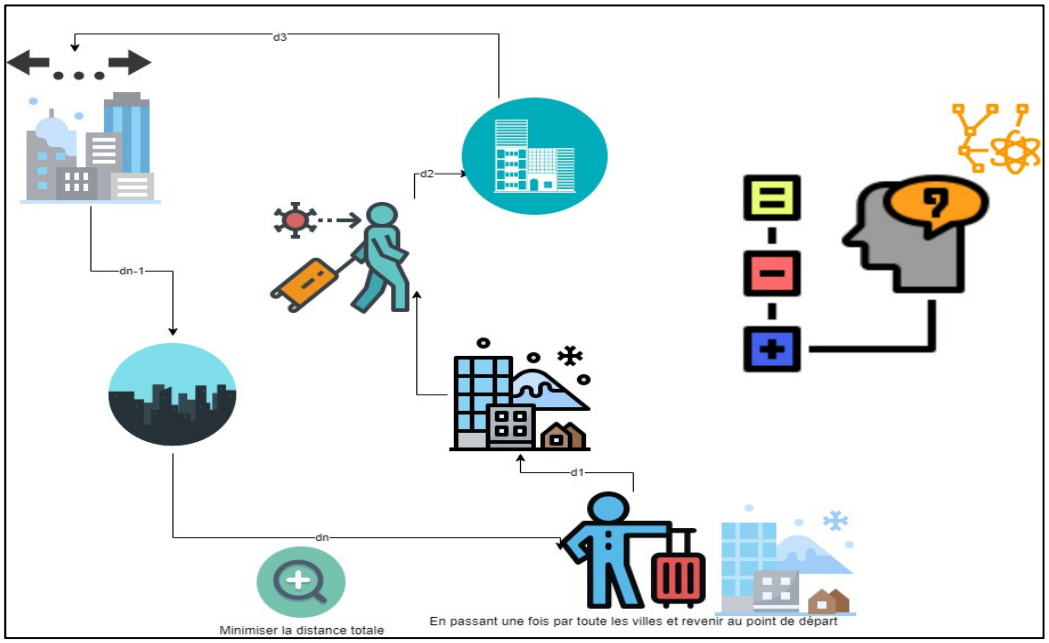

Figure 4.2 Problème du voyageur de commerce (PVC)

4.4.3 Modèle combiné (Knapsack & PVC)

Afin de concevoir le modèle, nous nous inspirons des deux problèmes de recherche opérationnelle définis précédemment et représentés dans **les figures 4.1 et 4.2.** Ainsi, le problème du sac à dos permettrait de récupérer un maximum de déchets plastiques et textiles tout en respectant la capacité limitée des véhicules de classe C8. Et le problème du voyageur de commerce permettrait de récupérer les déchets plastiques et textiles de toutes les villes de la province, en passant une et une seule fois par chacune d'entre-elles, tout en minimisant le coût de leur transport ainsi que ceux de la taxe Carbone analysés dans le chapitre 2.

Il s'agira donc d'un programme linéaire bi-objectif dont les deux critères. La maximisation de la valeur précédemment notée 'vj' des quantités de déchets représentant dans ce cas des EPI

récupérées identifiés comme ‘Objets’ dans le problème de sac à dos défini dans la **section 4.4.1** et noté ‘j’, ainsi que la minimisation des frais de leur transport qui sont proportionnels à la distance parcourue entre deux villes i et j dans le cas où celles-ci sont visitées (Xij=1). Cette distance est notée ‘dij’ dans la **section 4.4.3**. Ces deux critères seront associés à une pondération préalablement spécifiée dans une fonction de désirabilité représentant l'objectif. Les contraintes à respecter seront, entre autres, celles des quantités d’EPI disponibles notée ‘Qv’, les capacités des véhicules d'acheminement de ces EPI aux centres de tri notée ‘Kc’ ainsi que celles de ces derniers ‘Kt’. La **figure 4.3** représente le contexte d’application du modèle souhaité :

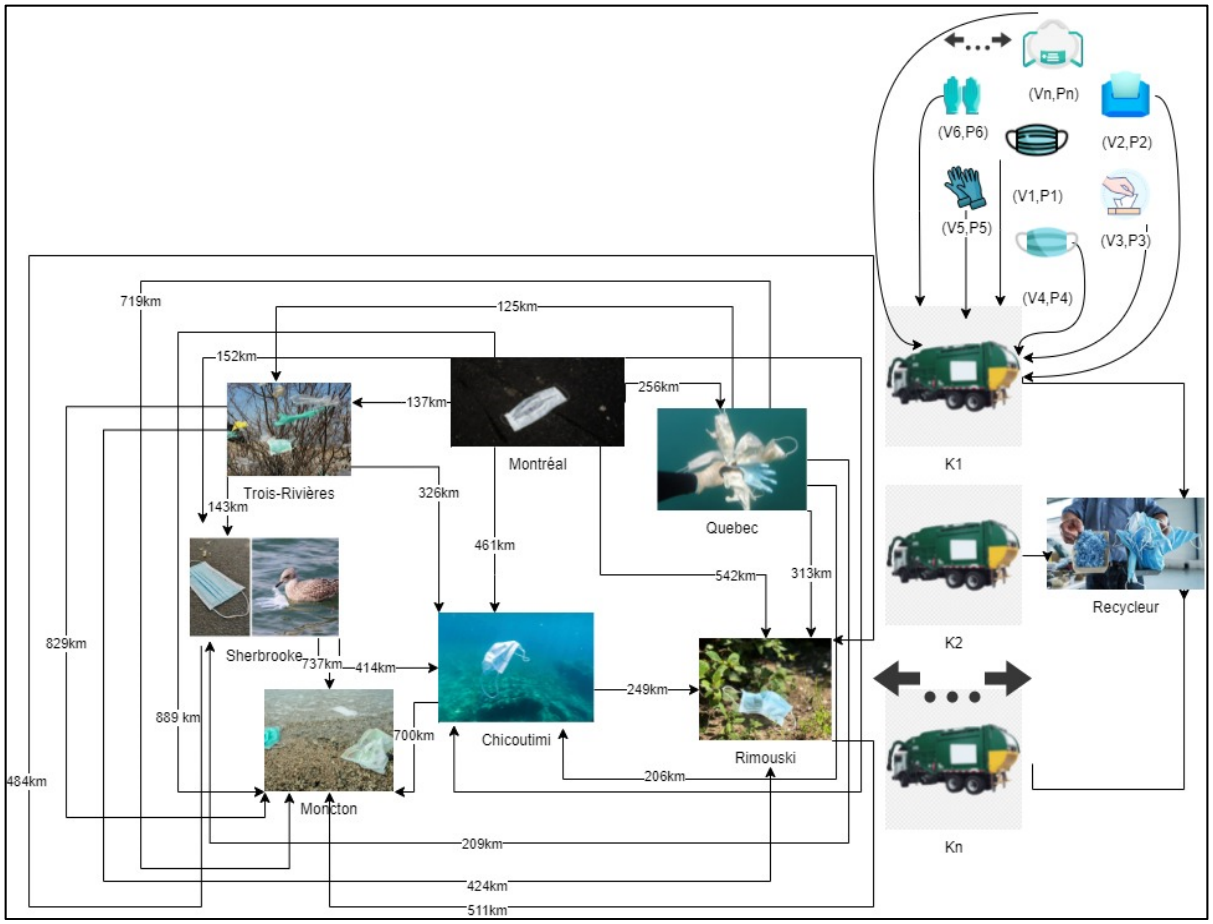

Figure 4.3 Schéma du modèle d'optimisation proposé

À partir de la **figure 4.3,** nous tentons d'identifier les éléments nécessaires à la conception du modèle :

Ensembles

V: Ensemble des villes($v \in V$)

C: Ensemble des camions de classe C8 ($c \in C$)

T: Ensemble des centres de tri ($t \in T$)

Paramètres

K_c: Capacité de chargement du camion c, ($c \in C$)

K_t: Capacité de récéption du centre de tri t, ($t \in T$)

$t_{v_{i,j}}$: coût de transport de la ville v_i à la ville v_j, $(v_i, v_j) \in V^2$

$t_{v_{i,t}}$: coût de transport de la ville v_i au centre de tri t, ($v_i \in V$) et ($t \in T$)

val_v: Valeur d'un EPI à récupérer dans la ville v (\$\tonne)

p_m: Poids d'un EPI récupéré (tonnes)

Q_v: Quantité d'EPI jetés dans la ville v (tonnes), ($v \in V$)

$d_{v_{i,j}}$: Distance entre la ville v_i et la ville v_j, $(v_i, v_j) \in V^2$

d_{vt}: Distance entre la ville v et le centre de tri t, $(v, t) \in (V \times T)$

Variables de décisions

$x_{v,c}$: Quantité d'EPI provenant de la ville v, à charger dans le camion c, $(v, c) \in (V, C)$

y_v = {1 si la ville v a été visitée et 0 sinon, ($v \in V$)}

Fonction Objectif :

La fonction Objectif du problème de sac à dos est représentée dans **l'équation (4.7)** :

$$F(x_{cv}, y_v) = \alpha \mathrm{Max} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} val_v x_{vc} + (1-\alpha)\mathrm{Min}(\sum_{v_j \in V} \sum_{v_i \in V} d_{it} x_{it} + \sum_{v_j \in V} \sum_{v_i \in V} d_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in V} \sum_{i \in V} t_{ij} d_{ij} x_{ij} + \sum_{t \in T} \sum_{v_i \in V} d_{it} t_{it} x_{it} \quad (4.7)$$

Contraintes :

La Contrainte de capacité d'un véhicule est représentée dans **l'équation (4.8)** :

$$\sum_{c \in C} \sum_{v \in V} p_m x_{vc} \leq K_c, \quad \forall c \in C \quad (4.8)$$

Pour chaque camion, la quantité d'EPI chargée ne doit pas dépasser sa capacité.

La Contrainte de visite d'une ville est représentée dans **l'équation (4.9)** :

$$\sum_{v \in V} y_v = 1, \quad \forall v \in V \quad (4.9)$$

Chaque ville doit être visitée exactement une seule fois.

La contrainte liée aux EPI disponibles est représentée dans **l'équation (4.10)** :

$$\sum_{t \in T} \sum_{v \in V} x_{vt} = Q_v, \quad \forall v \in V \quad (4.10)$$

Pour chaque ville, les EPI à récupérer correspondent à la quantité Qv.

La contrainte de capacité des centres de tri est représentée dans **l'équation (4.11)** :

$$\sum_{v \in V} x_{vt} \leq K_t, \forall t \in T \tag{4.11}$$

Pour chaque centre de tri, la quantité d'EPI reçue ne doit pas dépasser sa capacité de stockage.

Les contraintes de non-négativité sont représentées dans **l'équation (4.12)** :

$$\begin{aligned} x_{vc} \geq 0, \quad & \forall (v, c) \in (V, C) \\ x_{vt} \geq 0, \quad & \forall (v, t) \in (V, T) \\ x_{v_i v_j} \geq 0, \quad & \forall (v_i, v_j, t) \in (V \times V \times T) \end{aligned} \tag{4.12}$$

Les quantités d'EPI transportées d'un site à l'autre sont positives.

La contrainte de binarité est définie dans **l'équation (4.13)** :

$$\mathrm{y_v} \in \{0,1\}, \forall \mathrm{v} \in \mathrm{V} \tag{4.13}$$

4.5 Application numérique

Nous considérons dans cette application numérique en considérant 10 camions de classe C8 ainsi qu'un centre de tri doté d'une capacité de 120 000 tonnes (éq. 285 715 d'EPI de 3.5g par tonne) et considérons les paramètres figurants dans les **tableaux 4.1 et 4.2 :**

Tableau 4.1 Paramètres des EPI

Paramètre	Valeur
$\boldsymbol{K_c}$	14 969 kg
$\boldsymbol{P_m}$	3.5 g
$\boldsymbol{K_v}$	85 000 000 t
$\boldsymbol{t_{v_i v_j}}$	0.097 $/t-km

Tableau 4.2 Positions des villes traitées

Nom	Latitude	Longitude	Qté EPI
Montréal	45.3031	73.3516	29 673 254
Québec	46.4844	71.1252	24 930 178
TR	46.2042	72.3251	18 967 326
Sherbrooke	45.2400	71.5356	4 379 621
Chicoutimi	48.2500	71.0356	3 288 326
Rimouski	48.2655	68.3126	2 168 937
Moncton	46.0540	64.4747	1 119 389

La résolution de la première partie de l'objectif avec le problème de sac à dos donne les résultats figurant dans le **tableau 4.3:**

Tableau 4.3 Résultat de l'application numérique (partie 1-Knapsack)

Ville	Quantité(t)	Objectif ($)
XQuébec	2,49E+15	
XMontréal	2,93E+15	
Xsherbrooke	4,38E+14	
Xtrois-Rivières	1,90E+15	2,97E+21
Xrimouski	3,02E+14	
Xchicoutimi	3,29E+14	
Xmoncton	1,12E+14	

Ces valeurs obtenues sont représentées dans la **figure 4.4** :

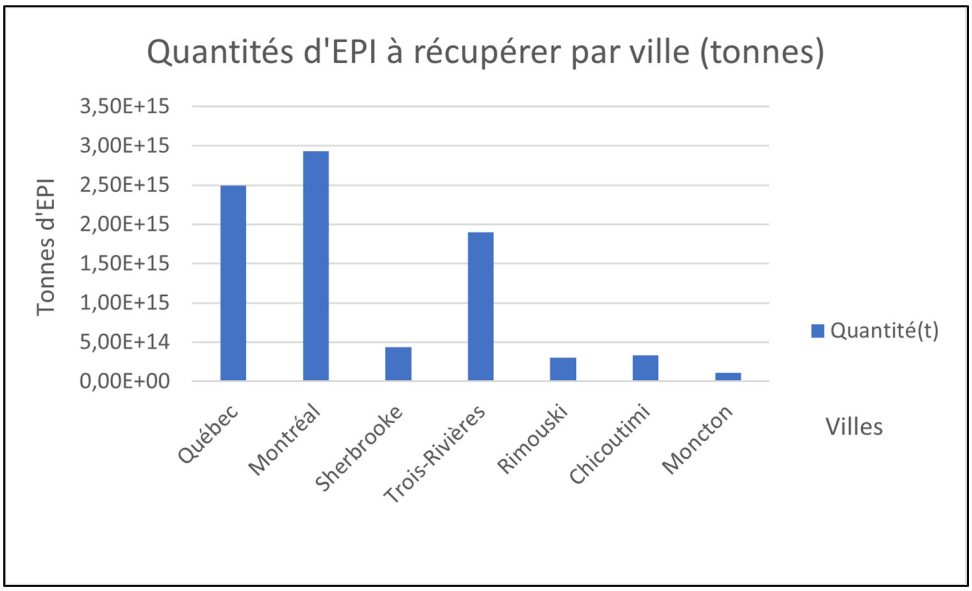

Figure 4.4 Résultats de l'application (Partie 1-Knapsack)

Les résultats du **tableau 4.3** apparaissant sur la **figure 4.4** suggèrent de récupérer un grand nombre d'EPI dans les villes les plus peuplées (quantités valant 2.49E+15 dans la ville de Québec, 2.93E+15 à Montréal et 4.38E+14 à Sherbrooke) ainsi que des quantités moins conséquentes au niveau des villes les moins peuplées disposant de capacité de collecte proportionnelle au nombre d'habitants (1.90E+15 à Trois-Rivières, 3.02E+14 à Rimouski, 3.29E+14 à Chicoutimi et enfin 1.12E+14). Au total, cette logistique est supposée engendrer un coût de 0.2973503E+15$.

Maintenant que les quantités optimales d'EPI pour chaque ville ont été identifiées dans la première partie du modèle en se basant sur le problème du sac à dos (**section 4.4.1**), nous allons appliquer la deuxième partie du modèle inspirée du le problème du voyageur de commerce (**section 4.4.2**) afin d'obtenir l'ordre de visite de ces villes qui minimise les coûts de transport.

La **figure 4.5** résulte du recours au TSP pour l'optimisation de la seconde partie de l'objectif :

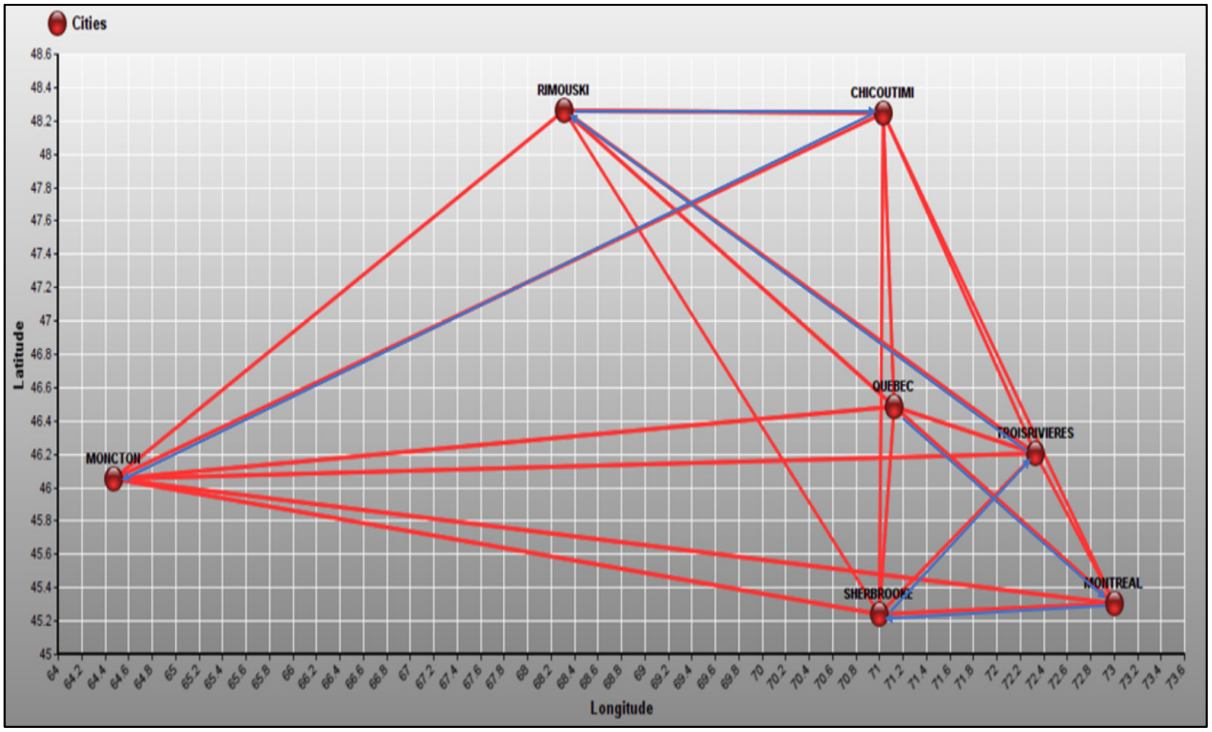

Figure 4.5 Résultats de l'application (Partie 2-PVC)

Les coûts de transport seront de : 1.586338E+10$.

4.6 Conclusion

Les résultats de l'exemple numérique suggèrent que l'on récupère environ 79 501 495 EPI en passant dans l'ordre par : Québec, Montréal, Sherbrooke, Trois-Rivières, Rimouski, Chicoutimi et Moncton. Les plus grandes quantités d'EPI usagés ont été prélevées de Québec et Montréal à raison de 63.8% au total tandis que celles qui ont été récupérées à Chicoutimi par exemple, ne représentent que 3.87% du total d'EPI considérés dans l'exemple. Bien que le modèle nous oblige à considérer cette ville, les coûts de transport ainsi que les émissions de GES dépassent le gain de la récupération dans ce type de villes. Il serait économiquement plus avantageux de se limiter aux 5 premières villes de la tournée.

CONCLUSION

De nos jours, le constat de la crise écologique marque déjà l'impossibilité d'une croissance économique infinie. Les ressources naturelles s'épuisent au fur et à mesure que les pollutions croissent dans l'environnement. En effet, le modèle économique linéaire né à la fin du XVIIIe siècle démontre qu'en entrée, l'homme n'a cessé de consommer de plus en plus de ressources naturelles non renouvelables et en sortie, produire plus de pollutions et de déchets. Grâce à la fabrication circulaire (ou économie circulaire), la donne pourrait changer. Dans ce nouveau modèle, il n'est plus question de gaspiller des ressources non renouvelables pour produire des déchets mais au contraire, utiliser les déchets pour produire des ressources. L'objet de ce travail était d'élaborer un plan compact de gestion des déchets urbains basé sur le principe de cette fabrication circulaire et pouvant être adopté par différentes industries afin satisfaire leurs contraintes, optimiser leur profit tout en préservant les ressources planétaires. Pour ce faire, nous avons parcouru la récente littérature étudiant le sujet et en avons déduit une problématique et émis des objectifs à travers sa synthèse dans le premier chapitre.

Le défi était de préserver les ressources tout en considérant l'aspect économique, social mais aussi écologique. En plus des politiques strictes de l'UE en matière d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et de recyclage, les états unis d'Amérique, à leur tête le nouveau chef d'état Joe Biden, ont récemment (janvier 2021) annoncé leur intention de réduire les émissions de GES d'au moins 50 % d'ici 2030 par rapport au niveau de 2005. Ils ont également incité les 40 pays les plus pollueurs à en faire de même, ravivant ainsi l'accord de Paris jusque-là éclipsé par la crise sanitaire de Covid-19. L'industrie s'est alors vu accorder deux options de tarification du carbone : Une taxe sur le volume d'émissions (en général, par tonne) ou bien un système de plafonnement et d'échange qui permet de fixer une limite aux émissions de GES et d'exiger que les émetteurs achètent des quotas dans le cadre d'une offre fixe. Une intention particulière a été accordée à ces deux options dans le deuxième chapitre comprenant une analyse de sensibilité qui a mis en avant la stratégie d'achat de quotas en matière d'émission de gaz à effet de serre.

Dans cette partie, nous avons effectué une modélisation du réseau de fabrication circulaire (FC) dans lequel il était question de minimiser les coûts opérationnels (de tri, recyclage, …), de transport, d'émission de gaz à effet de serre tout en tenant compte de l'impact social. Le modèle a été exécuté dans le cadre d'une étude de cas afin de déterminer la configuration optimale de la boucle de production suivi de l'analyse de sensibilité déterminant l'effet des coûts d'émission de GES sur le coût total.

Nous avons ensuite étudié brièvement le rôle des technologies de l'industrie 4.0, plus précisément de l'Internet des objets dans la gestion des déchets urbains en mettant l'accent sur les défis auxquels elle est confrontée. Nous avons consacré le troisième chapitre à l'étude et à l'optimisation de l'impact des enjeux de l'Industrie 4.0 sur le coût global de la gestion des déchets urbains en tenant compte des quatre axes ciblés par l'étude. Une analyse de sensibilité nous a permis de constater que le choix des matériaux (ou objets) pouvait également être soumis à la condition de durabilité. En effet, les outils technologiques incluant antennes relais, tablettes et câbles consommant un minimum d'énergie ont montré une augmentation largement inférieure des coûts comparé à ceux qui en consomment plus.

Enfin, le dernier chapitre présentait une extension du modèle conçu précédemment au cas actuel de la crise sanitaire de Covid-19 où les déchets urbains visés étaient les EPI utilisés pour la protection contre le virus. Dans cette partie, le modèle a été ajusté afin de tenir compte des villes concernées (celles où le couvre-feu a limité la collecte d'ordures ménagères), des distances les séparant ainsi que la valeur estimée des masques chirurgicaux, en tissus et des gants récupérés. Les résultats ont suggéré que les régions les plus peuplées et identifiées comme zones rouges comme Montréal ou encore Québec soient débarrassées en priorité car celles-ci contiendraient l'équivalent de 63.8% de la totalité des EPI usagés jetés dans la province du Québec.

RECOMMANDATIONS

Le travail effectué lors de cette recherche a permis d'identifier la problématique grâce à la revue de littérature synthétisée dans le **chapitre 1** et de mettre en évidence certaines recommandations. En effet, les résultats obtenus dans le **chapitre 2** ont mis l'accent sur la nécessité d'effectuer un pré-tri au domicile du consommateur. En pratique, un tel apport volontaire devrait, d'une manière ou d'une autre, être récompensé. Certains industriels comme COCORICO en France, ont élaboré un contrat les liant au client. Il y est stipulé qu'à l'achat d'un article, une réduction sur le prix est réalisée si le client s'engage à rapporter le produit lorsque celui-ci devient obsolète. Ceci permet à l'industriel de le recycler afin d'en faire de nouveaux produits finis.

Dans cette perspective, le modèle proposé et implémenté peut davantage être amélioré selon le contexte. À titre d'exemple, la théorie des jeux pourrait intervenir dans l'optimisation de sa performance puisque les consommateurs sont des entités rationnelles *Rational Entities* pouvant agir dans le but d'atteindre *un gain*. Ainsi, il s'agirait d'un jeu coopératif à utilité transférable *Transferable utility game* où des joueurs *Players* participent dans la *coalition* des différentes parties prenantes de la gestion des déchets d'une municipalité. Les stratégies dominantes et dominées *Dominant and dominated strategies* pourraient ainsi être :

- Effectuer un pré-tri à la maison ou non.
- Payer une taxe Carbone ou respecter la contrainte de dépassement de la norme d'émission de GES.
- En cas de dépassement de la norme de CO_2, payer la taxe Carbone ou acheter des quotas d'émission de CO_2.
- Dans le cas de déchets des villes intelligentes, opter ou non pour l'Internet des Objets.

De plus, l'étude de cas effectuée a également permis de démontrer l'importance de la présence de codes à barres sur les emballages qui permettent d'identifier le type de matière à récupérer. En effet, le modèle proposé avait pris en considération les différentes catégories de

plastiques (PET, HDPE, PVC, LDPE, PP et PS) pour en faire des produits mono-matériaux. En revanche, ceci ne peut être envisagé pour d'autres types de matériaux comme les métaux, par exemple, qui n'ont pas de codes permettant leur identification à des fins de recyclage. Il s'agit là d'une recommandation également soutenue par le contexte étudié dans les **chapitres 3 et 4** puisque qu'ils soient indiqués sur les produits faisant partie de notre quotidien passé ou actuel (EPI), ces codes pourraient aussi faciliter la détection automatique des matières résiduelles par les objets connectés chargés de la gestion des déchets dans d'éventuelles villes intelligentes.

Enfin, tel que prouvé dans le **chapitre 4**, l'emballage des masques anti-Covid, visières et gants devraient inclure des indications sur le poids et la valeur post-recyclage qui inciterait d'une part, les consommateurs à le déposer dans les endroits appropriés et d'autre part, les producteurs souhaitant limiter leurs coûts d'approvisionnement en matières premières.

ANNEXE I

PROGRAMME LINGO PRINCIPAL (OPTIMISATION DE LA GESTION DES DECHETS URBAINS

```
SETS :

HOUSE:y,u;

SORTING:c_s,a;

RECYCLING:c_r,m,rho;

ELIMINATION:c_e,nu;

FACTORY:c_f,Dem_f;

ARC1(HOUSE,SORTING):X_hs,d_hs;

ARC2(SORTING,RECYCLING):X_sr,d_sr;

ARC3(SORTING,ELIMINATION):X_se,d_se;

ARC4(RECYCLING,ELIMINATION):X_re,d_re;

ARC5(RECYCLING,FACTORY):X_rf,d_rf;

ENDSETS

DATA :

Dem_f = 13776 13903 13324 13856 13746 13700 13804 13788 13915 14008 13880
13704;

c_s=200000;

a=41;

u=67;
```

```
lambda=0.0025;

c_r=180000;

m=35;

c_e=10000000000;

nu=10;

fac=0.2;

Teta=18;

d_hs=120;

d_sr=100;

d_se=75;

d_re=80;

d_rf=95;

Omega=0.7;

rho=10;

ENDDATA

coût_operationnel=@SUM(ARC1(h,s):a(s)*X_hs(h,s))+@SUM(ARC2(s,r):m(r)*X_sr(s,r))+
@SUM(ARC3(s,e):nu(e)*X_se(s,e))+@SUM(ARC4(r,e):nu(e)*X_re(r,e));

coût_transport=@SUM(ARC1(h,s):lambda*d_hs(h,s))+@SUM(ARC2(s,r):lambda*d_sr(s,r)
)+@SUM(ARC3(s,e):lambda*d_se(s,e))+@SUM(ARC4(r,e):lambda*d_re(r,e))+@SUM(A
RC5(r,f):lambda*d_rf(r,f));

coût_emission=@SUM(ARC1(h,s):Teta*fac*d_hs(h,s))+@SUM(ARC2(s,r):Teta*fac*d_sr(
```

```
s,r))+@SUM(ARC3(s,e):Teta*fac*d_se(s,e))+@SUM(ARC4(r,e):Teta*fac*d_re(r,e))+@SU
M(ARC5(r,f):Teta*f*d_rf(r,f));

[FO]  MAX = (810000*0.7*47)-( coût _operationnel+ coût _transport+ coût _emission);

@FOR(SORTING(t):@SUM(HOUSE(h):X_hs(h,t))=@SUM(RECYCLING(r):X_sr(t,r))+
@SUM(ELIMINATION(e):X_se(t,e)));

@FOR(RECYCLING(r):@SUM(SORTING(t):X_sr(t,r))=@SUM(ELIMINATION(e):X_re(
r,e))+@SUM(FACTORY(f):X_rf(r,f)));
@FOR(SORTING(t):@SUM(HOUSE(h):X_hs(h,t))<=c_s(t));
@FOR(RECYCLING(r):@SUM(SORTING(t):X_sr(t,r))<=c_r(r));
@FOR(ELIMINATION(e):@SUM(SORTING(t):X_se(t,e))+@SUM(RECYCLING(r):X_re(
r,e))<=c_e(e));
@FOR(HOUSE(h):@SUM(SORTING(t):X_hs(h,t))=y(h));
@FOR(FACTORY(f):@SUM(RECYCLING(r):X_rf(r,f))=@SUM(FACTORY(f):Dem_f(f))
);
@FOR(ARC1(j,t):
        @GIN(X_hs(j,t))
);
@FOR(ARC2(t,r):
        @GIN(X_sr(t,r))
);
@FOR(ARC3(t,e):
        @GIN(X_se(t,e))
);
@FOR(ARC4(r,e):
        @GIN(X_re(r,e))
);
@FOR(ARC5(r,f):
        @GIN(X_rf(r,f))
);
```

ANNEXE II

PROGRAMME LINGO (GESTION DES EPI USAGÉS DANS LE CONTEXTE DE LA PANDÉMIE DE COVID-19

```
SETS:
  CITY : LATI, LNGT, LVL;
  CXC( CITY, CITY): DIST, Z;
  CXCSUB( CXC): DCITY, ACITY, ARROHD;
ENDSETS
DATA:
     CITY,          LATI,     LNGT=
     Rimouski    48.2655  +68.3126
     Chicoutimi      48.2500  +71.0356
     Montreal      45.3031  +73.3516
     TroisRivieres    46.2042  +72.3251
     Quebec   46.4844  +71.1252
     Sherbrooke       45.2400  +71.5356
     Moncton    46.0540  +64.4747
;
ENDDATA

SUBMODEL TSPROB:

 MIN = OBJV;
   OBJV= @SUM( CXC(i,j): DIST(i,j) * Z(i,j));

  @FOR( CITY( k):

    @SUM( CITY( i)| i #NE# k: Z( i, k)) = 1;
```

```
   @SUM( CITY( j)| j #NE# k: Z( k, j)) = 1;
    Z( k, k) = 0;      );
    LVL(1) = 0;

  @FOR( CITY(i) | i #GT# 1:
    LVL(i) >= 2 - Z(1,i) + (N-3)*Z(i,1);
    LVL(i) <= (N-2) + Z(i,1) - (N-3)*Z(1,i);
     );
   @FOR( CXC(i,j)| i #GT# 1 #AND# j #GT# 1 #AND# i #NE# j:
      LVL( j) >= LVL( i) + Z(i,j)
                  - Z(j,i)
                  - (N-2)*(1 - Z(i,j) - Z(j,i));
      );

 @FOR( CXC(i,j): @BIN( Z(i,j)););

  @SUM( CITY( i): LVL( i)) = ( N-1)*N/2;

ENDSUBMODEL

  @FOR( CITY(i) | i #GT# 1:
   Z(i-1,i) = 1;
     );
ENDSUBMODEL

CALC:
  @SET( 'TERSEO',2);
  D2R=@PI()/180;
  @FOR( CXC(i,j):
```

```
   @IFC( i #EQ# j: DIST(i,j) = 0;
     @ELSE
      DIST( i,j) =
6371*@acos(@sin(D2R*LATI(i))*@sin(D2R*LATI(j))+@cos(D2R*LATI(i))*@cos(D2R
*LATI(j))
              *@cos(@ABS(D2R*(LNGT(i)-LNGT(j)))));
       );
     );

N = @SIZE( CITY);

@SOLVE( TSPROB);
@FOR( CXC( i,j) | Z(i,j) #GT# 0.5:
  @INSERT( CXCSUB, i, j);
  DCITY(i,j) = i;
  ACITY(i,j) = j;
  ARROHD(i,j) = 0;
   );

  @CHARTNETNODE(

     ' TSP Tour, Optimal Order, KM= ' + @FORMAT(OBJV,'8.2f')
    , 'Longitude', 'Latitude'
    , 'Cities'
    , LNGT, LATI
    , DCITY, ACITY);

 @CHARTNETNODE(
     ' TSP Tour, No Arrowheads, KM= ' + @FORMAT(OBJV,'8.2f')
    , 'Longitude', 'Latitude'
```

```
    , 'Cities'
    , LNGT, LATI
    , DCITY, ACITY
    , ARROHD);
 ENDCALC

MAX 0.13 XQuebec + 0.13 XMontreal + 0.13 XSherbrooke + 0.13 XTroisRivieres + 0.13
XRimouski + 0.13 XChicoutimi + 0.13 XMoncton

SUBJECT TO

WEIGHT)  3.5 XQuebec + 3.5 XMontreal +  3.5 XSherbrooke + 3.5 XTroisRivieres + 3.5
XRimouski + 3.5 XChicoutimi + 3.5 XMoncton <= 149690000000

QTY)     XQuebec + XMontreal + XSherbrooke + XTroisRivieres + XRimouski +
XChicoutimi + XMoncton = 85000000000000
END
```

BIBLIOGRAPHIE

Abbes, A., Sellami, I., Haddar, A., Halweni, H., Hrairi, A., Jmal, K., … Hajjeji, M. (s. d.). Evaluation de la pratique des mesures de prévention universelles chez les personnels de la santé pendant la pandémie du covid-19. 1.

Alain, G. (s. d.). ECONOMIE CIRCULAIRE : NOTIONS. 10.

Alamerew, Y. A., & Brissaud, D. (2019). Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies. Journal of Remanufacturing, 9(3), 169-185. https://doi.org/10.1007/s13243-018-0064-8

Al-Masri, E., Diabate, I., Jain, R., Lam, M. H., & Reddy Nathala, S. (2018). Recycle.io : An IoT-Enabled Framework for Urban Waste Management. 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 5285-5287. Seattle, WA, USA: IEEE. https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622117

Amrani, F., Prud'homme, J., Maesano, C., & Annesi-Maesano, I. (2019). Évolution de la pollution atmosphérique urbaine dans 13 grandes villes françaises entre 2008 et 2015. Revue des Maladies Respiratoires, 36(10), 1096-1106. https://doi.org/10.1016/j.rmr.2019.09.003

Anvari, S., & Turkay, M. (2017). The facility location problem from the perspective of triple bottom line accounting of sustainability. International Journal of Production Research, 55(21), 6266-6287. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1341064

ARIMA: AutoRegressive Integrated Moving Average. (s. d.). Time Series, 32.

Bal, A., & Satoglu, S. I. (2018). A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. Journal of Cleaner Production, 201, 1081-1091. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.104

Bechtsis, D., Tsolakis, N., Vlachos, D., & Srai, J. S. (2018). Intelligent Autonomous Vehicles in digital supply chains : A framework for integrating innovations towards sustainable value networks. Journal of Cleaner Production, 181, 60-71. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.173

Bilal, Bashir, M. F., Benghoul, M., Numan, U., Shakoor, A., Komal, B., … Tan, D. (2020). Environmental pollution and COVID-19 outbreak : Insights from Germany. Air

Quality, Atmosphere & Health, 13(11), 1385-1394. https://doi.org/10.1007/s11869-020-00893-9

Bonet Fernandez, D., Petit, I., & Lancini, A. (2014). L'économie circulaire : Quelles mesures de la performance économique, environnementale et sociale ? Revue Française de Gestion Industrielle, 33(4), 23-43. https://doi.org/10.53102/2014.33.04.791

Cariou, N., Vergnaud, S., Le Galliot, S., Berger, V., Rigous-Lemercier, C., & Ouattara, A. (2019). Recyclage du papier au bloc opératoire, un enjeu pour l'avenir. Interbloc, 38(3), 168-171. https://doi.org/10.1016/j.bloc.2019.07.006

Côté, A. (s. d.). LA RÉDUCTION À LA SOURCE ET LE RÉEMPLOI AU COEUR DES SOLUTIONS POUR DIMINUER LE RECOURS À L'ÉLIMINATION AU QUÉBEC. 34.

Dahan, J., & Woods, M. (s. d.). Renouvellement de l'approvisionnement à l'ASFC. 29.

Ezechina, M. A., Okwara, K. K., & Ugboaja, C. A. U. (s. d.). The Internet of Things (Iot) : A Scalable Approach to Connecting Everything. The Internet Of Things, 4.

Fatimah, Y. A., Govindan, K., Murniningsih, R., & Setiawan, A. (2020). Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals : A case study of Indonesia. Journal of Cleaner Production, 269, 122263. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122263

Ferrari, F., Striani, R., Minosi, S., De Fazio, R., Visconti, P., Patrono, L., … Greco, A. (2020). An innovative IoT-oriented prototype platform for the management and valorisation of the organic fraction of municipal solid waste. Journal of Cleaner Production, 247, 119618. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119618

Geeroms, M. (s. d.). Etude des caractéristiques du réemploi et du recyclage dans les projets paysagers. 112.

Ghahremani-Nahr, J., Nozari, H., & Najafi, S. E. (2020). Design a green closed loop supply chain network by considering discount under uncertainty. Journal of Applied Research on Industrial Engineering, 7(3). https://doi.org/10.22105/jarie.2020.251240.1198

Gouel, C., & Guimbard, H. (s. d.). La demande alimentaire mondiale en 2050. 5.

Graulich, K., Köhler, A., Löw, C., Sutter, J., Mehlhart, G., & Egeb, K. R. (s. d.). Impact of COVID-19 on single-use plastics and the environment in Europe. 67.

Guan, G., Jiang, Z., Gong, Y., Huang, Z., & Jamalnia, A. (2021). A Bibliometric Review of Two Decades' Research on Closed-Loop Supply Chain : 2001-2020. IEEE Access, 9, 3679-3695. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047434

Iracy, M. (s. d.). Utilisation du Logiciel R dans les Séries Chronologiques. 35.

Jiang, G., Wang, Q., Wang, K., Zhang, Q., & Zhou, J. (2020). A Novel Closed-Loop Supply Chain Network Design Considering Enterprise Profit and Service Level. Sustainability, 12(2), 544. https://doi.org/10.3390/su12020544

Kulkarni, B. N., & Anantharama, V. (2020). Repercussions of COVID-19 pandemic on municipal solid waste management : Challenges and opportunities. Science of The Total Environment, 743, 140693. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140693

Lioutas, E. D., & Charatsari, C. (2020). Smart farming and short food supply chains : Are they compatible? Land Use Policy, 94, 104541. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104541

McDonald, M., Normandin, D., & Sauvé, S. (2016). L'économie circulaire : Une transition incontournable. Presses de l'Université de Montréal. https://doi.org/10.4000/books.pum.4151

Miao, S., Liu, D., & Ma, J. (2020a). O2O Recycling Closed-Loop Supply Chain Modeling Based on Classification Process considering Environmental Index. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2020, 1-15. https://doi.org/10.1155/2020/5737514

Miao, S., Liu, D., & Ma, J. (2020b). O2O Recycling Closed-Loop Supply Chain Modeling Based on Classification Process considering Environmental Index. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2020, 1-15. https://doi.org/10.1155/2020/5737514

Misra, D., Das, G., Chakrabortty, T., & Das, D. (2018). An IoT-based waste management system monitored by cloud. Journal of Material Cycles and Waste Management, 20(3), 1574-1582. https://doi.org/10.1007/s10163-018-0720-y

Mohtashami, Z., Aghsami, A., & Jolai, F. (2020). A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption.

Journal of Cleaner Production, 242, 118452. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118452

Oberle, B., Bringezu, S., Hatfield Dodds, S., Hellwig, S., Schandl, H., Clement, J., & United Nations Environment Programme. (2019). Global resources outlook 2019 natural resources for the future we want.

Patel, K. K., Patel, S. M., & Scholar, P. (2016). Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges. 11.

Patrício Silva, A. L., Prata, J. C., Walker, T. R., Campos, D., Duarte, A. C., Soares, A. M. V. M., … Rocha-Santos, T. (2020). Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic : Policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. Science of The Total Environment, 742, 140565. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140565

Ragazzi, M., Rada, E. C., & Schiavon, M. (2020). Municipal solid waste management during the SARS-COV-2 outbreak and lockdown ease : Lessons from Italy. Science of The Total Environment, 745, 141159. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141159

Ramade, F. (1978). Crise de l'énergie, ressources naturelles et production alimentaire. Économie rurale, 124(1), 30-38. https://doi.org/10.3406/ecoru.1978.2553

Rassat, F. (s. d.). Le rôle des initiatives civiles de prévention des déchets dans la fabrique de la ville : L'exemple des lieux de réemploi. 382.

Réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de l'environnement bâti au Canada. (s. d.). 108.

Safaei, A. S., Roozbeh, A., & Paydar, M. M. (2017). A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain. Journal of Cleaner Production, 166, 1154-1168. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.085

Saleh, I. (2017). Les enjeux et les défis de l'Internet des Objets (IdO). Internet des objets, 17(1). https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2017.0133

Samuel, C. N., Venkatadri, U., Diallo, C., & Khatab, A. (2020). Robust closed-loop supply chain design with presorting, return quality and carbon emission considerations. Journal of Cleaner Production, 247, 119086. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119086

Scheller, C., Schmidt, K., & Spengler, T. S. (2021). Effects of CO2-Penalty Costs on the Production and Recycling Planning of Lithium-Ion Batteries. Procedia CIRP, 98, 643-647. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.168

Seriai, D. (s. d.). Les Objets Connectés ou l'internet des objets (IoT). 20.

Sharma, H. B., Vanapalli, K. R., Cheela, V. S., Ranjan, V. P., Jaglan, A. K., Dubey, B., … Bhattacharya, J. (2020). Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic. Resources, Conservation and Recycling, 162, 105052. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105052

Siham, C., & Naima, F. (s. d.). Traitement des séries temporelles par le logiciel R. 21.

Simay, P. (2021). Le réemploi comme ressource première. Cahiers de la recherche architecturale, urbaine et paysagère, (11). https://doi.org/10.4000/craup.7092

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., … Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet. Science, 347(6223), 1259855. https://doi.org/10.1126/science.1259855

Talari, S., Shafie-khah, M., Siano, P., Loia, V., Tommasetti, A., & Catalão, J. (2017). A Review of Smart Cities Based on the Internet of Things Concept. Energies, 10(4), 421. https://doi.org/10.3390/en10040421

Torres-Salinas, D. (2020). Ritmo de crecimiento diario de la producción científica sobre Covid-19. Análisis en bases de datos y repositorios en acceso abierto. El Profesional de la Información, 29(2). https://doi.org/10.3145/epi.2020.mar.15

Watts, E., Leck, A., & Hu, V. (2020). Équipements de protection individuelle. 17, 6.

WHO-2019-nCov-IPC_PPE_use-2020.3-fre.pdf. (s. d.).

Wirth, C. (s. d.). La réaction du secteur du recyclage. 4.

You, S., Sonne, C., & Ok, Y. S. (2020). COVID-19's unsustainable waste management. Science, 368(6498), 1438.1-1438. https://doi.org/10.1126/science.abc7778

Zhou, J., Xia, W., Wang, K., Li, H., & Zhang, Q. (2020). Fuzzy Bi-Objective Closed-Loop Supply Chain Network Design Problem with Multiple Recovery Options. Sustainability, 12(17), 6770. https://doi.org/10.3390/su12176770

Zoughaib, A., & Mecarelli, G. (2016). COP21, croissance verte : Soutient-on suffisamment les start-ups Cleantech? 164.

Zuo, L., Wang, C., & Sun, Q. (2020). Sustaining WEEE collection business in China : The case of online to offline (O2O) development strategies. Waste Management, 101, 222-230. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.008

10 Faits sur les ressources naturelles au Canada. (s. d.). 1.