

Analyse du réseau de logistique inverse basée sur les données massives

par

Ahmed Hachem BOUGUERRA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 6 MARS 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Ahmed Hachem Bouguerra, 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. Amin Chaabane, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Mustapha Ouhimmou, codirecteur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Julio Montecinos, président du jury
Professeur à l'École de technologie supérieure

Mme. Amina Laghmari, membre du jury
Professeur à l'Université de Québec à Trois rivières

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 29 MARS 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention consciente d'un grand nombre de personnes. Je souhaite ici les remercier.

Je voudrais sincèrement remercier très chaleureusement mes superviseurs, M. Amin Chaabane et M. Mustapha Ouhimmou, pour leurs conseils, leurs patience et surtout pour leurs confiances. Je voudrais également les témoigner ma gratitude pour leurs soutiens qui m'ont été précieux afin de mener mon travail à bon port.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Je tiens également à remercier ma famille : mes parents, ma fiancée, ma sœur et mon frère ainsi que toute la famille BOUGUERRA. Je leur exprime toute ma gratitude pour leurs soutiens inconditionnels, leurs encouragements et leurs amours éternels.

Mes remerciements s'étendent également à l'ensemble de mes enseignants durant mes années d'études, toutes les personnes qui par leurs dires, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mon projet.

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

Analyse du réseau de logistique inverse basée sur les données massives

Ahmed Hachem BOUGUERRA

RÉSUMÉ

L'apparition des techniques d'analyse des données a permis d'explorer de nouvelles connaissances cachées dans le domaine des chaînes d'approvisionnement, entre autres celle de la logistique inverse. La valorisation des données est primordiale pour décideurs et permet d'agir d'une façon optimale dans le but de réaliser l'intérêt public. L'économie circulaire représente une alternative révolutionnaire qui gagne de plus en plus davantage en comparaison au traitement linéaire des déchets. Parmi les métriques d'une économie circulaire, on note un niveau de recyclage très élevé, ce qui n'est pas le cas dans la province du Québec (Canada) où le niveau est insatisfaisant. Parmi les raisons pour lesquelles ce problème existe, on souligne la faible performance opérationnelle du réseau de traitement des déchets et plus spécifiquement les recycleurs.

Dans ce mémoire, on cherche à résoudre la problématique à laquelle le réseau de logistique inverse du traitement des déchets au Québec fait face. Ceci est réalisé en se servant des techniques d'analyse des données pour combler les vides existants dans les données relatives au réseau. Les déchets en plastique sont choisis comme cas d'étude dans ce projet. Un modèle d'estimation basée sur l'intelligence artificielle est ainsi développé pour déterminer les quantités des déchets générés pour l'année prochaine. Puis les résultats obtenus sont injectés dans un modèle d'optimisation linéaire en nombres entiers qui cherche à évaluer les performances économiques, environnementales et opérationnelles du réseau. Le modèle simule une chaîne logistique inverse multiproduct et multiéchelon en cherchant à optimiser les décisions d'allocation des flux, de choix de type de produits traités et la configuration des centres de recyclages.

Afin d'améliorer la performance opérationnelle du réseau, deux configurations sont mises en place dans ce projet. La configuration spécialisée qui représente l'état actuel se caractérise par des centres de recyclages qui traitent un ou deux produits au maximum. Dans l'autre côté, la configuration flexible, qui représente l'état souhaité, se distingue par des centres de recyclages qui sont capables de traiter plusieurs types de produits de plastique. Cette flexibilité est accompagnée par une perte de capacité pour les centres. L'impact de cette modification de configuration est étudié dans ce mémoire pour permettre de comparer ces deux configurations et pour dégager des recommandations managériales capables de guider les preneurs de décisions.

Mots-clés : techniques d'analyse des données, intelligence artificielle, estimation, chaîne d'approvisionnement intelligente, gestion des chaînes d'approvisionnement, gestion des déchets, économie circulaire, logistique inverse, modèle d'optimisation, flexibilité

Big data-based reverse logistics network analysis

Ahmed Hachem BOUGUERRA

ABSTRACT

The emergence of data analysis techniques has made it possible to explore new hidden knowledge in supply chains, including reverse logistics. The support that the data represents to decision-makers will enable them to act optimally to achieve the public interest. The circular economy represents a revolutionary alternative to replace the linear treatment of waste. Among the circular economy metrics, we note a very high level of recycling, yet in Quebec and Canada, the recycling level is still weak. Among the reasons why this problem exists, we highlight the poor operational performance of the waste treatment network and, more specifically, the recyclers.

In this thesis, we seek to solve the problem that the reverse logistics network of waste treatment in Quebec faces by using data analysis techniques to fill the existing gaps in the data relating to the network. Plastic waste is chosen as a case study in this project. An estimation model based on artificial intelligence is developed to determine the quantities of waste generated for the next year. Then the results obtained are fed into a mixed-integer linear optimization model MILP which seeks to assess the network's economic, environmental, and operational performance. The model simulates a multi-product and multi-level reverse logistics chain by optimizing flow allocation decisions, choosing a type of product processed, and the configuration of recycling centres. To improve the network's operational performance, two configurations are developed in this project. The specialized configuration, which represents the current situation, is characterized by recycling centres that treat one or two products at most.

On the other hand, the flexible configuration, which represents the desired situation, is distinguished by recycling centres that can handle several plastic products. This flexibility is followed by a loss of capacity for the centres. The impact of this configuration modification is studied in this thesis to compare the two alternatives and to identify managerial implications to assist the decision makers in acting optimally.

Keywords: big data analytics, artificial intelligence, estimation, intelligent supply chain, supply chain management, waste management, circular economy, reverse logistics, optimization models, flexibility.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE.....	3
1.1 Problématique de recherche	3
1.2 Questions et objectifs de recherche.....	6
1.3 Méthodologie de recherche.....	8
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	9
2.1 Logistique inverse.....	9
2.1.1 Background de la logistique inverse.....	9
2.1.2 Modèle d'optimisation : un outil d'aide à la décision.....	12
2.1.3 Modèle d'optimisation pour la logistique inverse sous incertitude	15
2.2 Analyse de la chaîne d'approvisionnement basée sur les données massives.....	20
2.3 Intelligence artificielle : outil d'estimation.....	22
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	29
3.1 Enchaînement du projet	29
3.2 Modèle d'estimation basée sur l'intelligence artificielle : Réseau des neurones.....	31
3.2.1 Choix des données à considérer dans le réseau des neurones.....	32
3.2.1.1 Triangulation et choix des paramètres	32
3.2.1.2 Validation du choix des données	34
3.3 Modèle d'optimisation pour la configuration spécialisée basée sur les résultats du modèle de prédiction.....	38
3.3.1 Hypothèses.....	39
3.3.2 Ensembles et indices	40
3.3.3 Paramètres.....	41
3.3.4 Variables de décision	41
3.3.5 Fonction objectif.....	42
3.3.6 Contraintes	42
3.3.6.1 Contraintes de conservation de flot.....	42
3.3.6.2 Contraintes de capacité	43
3.3.6.3 Contraintes de non-négativité et d'intégralité	44
3.4 Modèle d'optimisation pour la configuration flexible basée sur les résultats du modèle de prédiction.....	44
3.4.1 Flexibilité	44
3.4.2 Ensembles et indices	46
3.4.3 Paramètres.....	46
3.4.4 Variables de décision	47
3.4.5 Fonction objectif.....	48
3.4.6 Contraintes	49
3.4.6.1 Contraintes de conservation de flot.....	49

3.4.6.2	Contraintes de détermination du nombre de produits traités dans les centres	50
3.4.6.3	Contraintes de capacité	50
3.4.6.4	Contraintes de non-négativité et d'intégralité.....	51
CHAPITRE 4 EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS		53
4.1	Modèle d'estimation	53
4.1.1	Données du modèle d'estimation.....	53
4.1.2	Résultats du réseau de neurones et génération des scénarios	55
4.2	Modèle d'optimisation	59
4.2.1	Données du modèle d'optimisation	59
4.2.1.1	Ensembles	59
4.2.1.2	Les couts	60
4.2.1.3	Les capacités des centres	62
4.2.1.4	Les données environnementales	62
4.2.1.5	Autres paramètres et données	63
4.2.2	Résultats du modèle d'optimisation.....	64
4.2.2.1	Résultats de la configuration spécialisée	65
4.2.2.2	Résultats de la configuration flexible	69
4.2.2.3	Comparaison entre les deux configurations pour le transport	72
4.2.2.4	Évolution des variables de décision relatives à la configuration flexible.....	83
4.2.3	Recommandations managériales.....	88
CONCLUSION.....		91
ANNEXE I	PARAMÈTRES DE CALCULS DES DÉCHETS	95
ANNEXE II	RÉSULTATS DU MODÈLE D'ESTIMATION.....	101
BIBLIOGRAPHIE		102

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Travaux récents des modèles de décision pour le traitement des déchets .19
Tableau 2.2	Caractéristique des catégories d'analyse des données massives.....22
Tableau 3.1	Cas d'étude généré et introduit dans le modèle d'optimisation30
Tableau 3.2	Paramètres socioéconomiques et démographiques utilisés dans certains articles.....33
Tableau 3.3	Types de paramètres étudiés dans le modèle d'estimation.....34
Tableau 3.4	Coefficient de Pearson entre les variables indépendantes et la quantité des déchets générés et entre les variables elles-mêmes.....36
Tableau 4.1	Valeurs des paramètres d'entrées et du paramètre de sortie du réseau de neurones54
Tableau 4.2	Combinaison des variations des paramètres d'entrée au réseau de neurones55
Tableau 4.3	Performance du réseau de neurones pour de différentes configurations57
Tableau 4.4	Ratio de génération des déchets pour les 27 scénarios.58
Tableau 4.5	Type de chaque plastique obtenu et sa proportion.....60
Tableau 4.6	Cout de traitement par activité dans le réseau de logistique inverse61
Tableau 4.7	Taux des émissions de recyclage et d'enfouissement62
Tableau 4.8	Spécialisations des centres de recyclage.....63
Tableau 4.9	Valeurs de capacité disponible en fonction du nombre de produits traités dans des centres de recyclages64
Tableau 4.10	Valeurs de flexibilité en fonction du nombre de produits traités.....64
Tableau 4.11	Couts spécifiques pour la configuration spécialisée69
Tableau 4.12	Couts spécifiques à la configuration flexible.....72

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Configuration générale d'un réseau de logistique inverse.....4
Figure 1.2	Problématique d'un réseau de logistique inverse6
Figure 2.1	Diagramme schématique du réseau de neurones24
Figure 2.2	Processus d'apprentissage et de validation d'un réseau de neurones25
Figure 3.1	Liaison entre le modèle d'estimation et modèle d'optimisation31
Figure 3.2	Carte de fréquentation des valeurs de coefficient de Pearson entre les différentes variables du modèle d'estimation37
Figure 3.3	Cartographie du réseau de logistique inverse pour le traitement des déchets au Québec.....38
Figure 4.1	Carte des MRC du Québec58
Figure 4.2	Variation du cout total en Millions \$ et les émissions des GES en kT CO ₂ eq pour la configuration spécialisée.....65
Figure 4.3	Cout et émission de CO ₂ totaux par tonne de plastique traitée pour la configuration spécialisée.....66
Figure 4.4	Caractérisation du cout total pour la configuration spécialisée67
Figure 4.5	Caractérisation des émissions totales pour la configuration spécialisée68
Figure 4.6	Variation du cout total et les émissions des GES pour la configuration flexible.....69
Figure 4.7	Cout et émission de CO ₂ par tonne pour la configuration flexible70
Figure 4.8	Caractérisation du cout total pour la configuration flexible71
Figure 4.9	Caractérisation des émissions totales pour la configuration flexible71
Figure 4.10	Variation du cout de transport pour les deux configurations.....73
Figure 4.11	Variation des émissions de transport pour les deux configurations.....73

Figure 4.12	Variation de la distance moyenne parcourue entre MRC et centre de tri pour les deux configurations.....	74
Figure 4.13	Variation du cout de transport unitaire entre MRC et centre de tri pour les deux configurations.....	75
Figure 4.14	Variation des émissions de transport unitaire entre MRC et centre de tri pour les deux configurations.....	75
Figure 4.15	Exemple d'un flux physique entre des MRC et un centre de tri pour	76
Figure 4.16	Variation de la distance moyenne entre centre de tri et centre de recyclage pour les deux configurations.....	77
Figure 4.17	Variation du cout de transport unitaire entre centre de tri et centre de recyclage pour les deux configurations.....	78
Figure 4.18	Variation des émissions de transport unitaire entre centre de tri et centre de recyclage pour les deux configurations	78
Figure 4.19	Exemple d'un flux physique entre un centre de tri et des centres de recyclage pour les deux configurations.....	79
Figure 4.20	Variation de la distance moyenne parcourue entre centre de tri et centre d'enfouissement pour les deux configurations.....	80
Figure 4.21	Variation du cout de transport unitaire centre de tri et centre d'enfouissement pour les deux configurations	81
Figure 4.22	Variation des émissions de transport unitaire entre centre de tri et centre d'enfouissement pour les deux configurations	81
Figure 4.23	Exemple d'un flux physique entre un centre de tri et un centre d'enfouissement pour les deux configurations	82
Figure 4.24	La flexibilité normalisée du réseau de logistique inverse.....	83
Figure 4.25	Évolution de la flexibilité versus capacité disponible pour chaque centre de recyclage (30 %).....	84
Figure 4.26	Évolution de la flexibilité versus capacité disponible pour chaque centre de recyclage (45 %).....	85
Figure 4.27	Évolution de la flexibilité versus capacité disponible pour chaque centre de recyclage (65 %).....	85

Figure 4.28	Variation de la capacité disponible: minimale, moyenne et maximale de chaque centre de recyclage.....	86
Figure 4.29	Variation du nombre de produits traités : moyen, minimal et maximal pour chaque centre de recyclage	87
Figure 4.30	Variation de la flexibilité : moyenne, minimale et maximale pour chaque centre de recyclage	87

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACC	Accessibilité au service de collecte séparé
AFM	Analyse des flux de matières
CIAM	Consommation intérieure apparente de matières
CLSC	Closed loop supply chain Chaine d'approvisionnement en boucle fermée
CO2	Dioxyde de carbone
COV	Covariance
DEEE	Déchets d'équipements électriques et électroniques
DPM	Déchets de plastique ménager
DPOP	Densité de population
ECO	Économique
ENV	Environnementale
FAD	Forêt d'arbres décisionnels Random Forest
GCA	Gestion des chaînes d'approvisionnement
INV	Investissement
IPC	Indice du pouvoir d'achat
LOC	Localisation
MINLP	Mixed intégré non linear programming Optimisation non linéaire en nombres entiers
MIP	Mixed integer programming Optimisation linéaire en nombre entier
MLP	Multilayer perceptron Perceptron à multicouches

MOMINLP	Multi objective mixed integer nonlinear programming. Programmation multiobjective non linéaire en nombres entiers mixtes
MRC	Municipalité régionale de compte
MVS	Machine à vecteur de support
PEBD	Polyéthylène à basse densité
PEHD	Polyéthylène à haute densité
PET	Polyéthylène téréphthalate
PIB	Produit intérieur brut
POP	Population
PVC	Polychlorure vinyle
REP	Responsabilité élargie des producteurs
RLI	Réseau de logistique inverse
RN	Réseau de neurones
RNA	Réseau de neurones artificiels
SAA	Sample average approximation Méthode d'approximation de la moyenne
TMF	Taille moyenne des familles (en nombre de personnes)

INTRODUCTION

Pour des décennies, l'étude de la chaîne d'approvisionnement était exclusive au flux des produits et de matières premières qui débarquent au réseau par les fournisseurs et qui terminent chez les clients en passant par les manufacturiers et les détaillants. Un nouveau lexique a pris naissance dans les années 70 appelées logistiques inverses et qui fait appel à un processus dans lequel un fabricant accepte systématiquement des produits ou des pièces déjà expédiées à partir du point de consommation en vue d'un éventuels recyclage, reconditionnement ou élimination (Dowlatshahi, 2000).

Grâce à de différents facteurs, la logistique inverse demeure une partie vitale de toute la chaîne logistique de n'importe quel secteur d'activité. Elle gagne son importance en présentant aux entreprises un avantage économique par la création des nouvelles sources de revenus à travers l'exploitation des produits usés pour le recyclage par exemple (Wilson & Goffnett, 2021). Aussi elle permet aux consommateurs de bénéficier des politiques de retours, d'échanges des produits usagers , activités menées dans le cadre de la responsabilité sociale de l'entreprise ce qui permet d'améliorer son image (Hazen et al., 2012).

Le progrès technologique qui caractérise cette partie de l'histoire de l'humanité a créé une abondance de données des différentes sortes. En effet, plus de données ont été enregistrées durant cette dernière décennie que dans toute l'histoire humaine (Waller & Fawcett, 2013). Dans le but d'exploiter ce flux massif de données, une nouvelle branche analytique a pris naissance ces dernières années, appelée "Big Data Analytics". Cette dernière est définie par l'utilisation des techniques d'analyse avancées face à de très grands ensembles de données volumineuses et diversifiées qui incluent des données structurées, semi-structurées et non structurées, provenant de différentes sources et de différentes tailles allant du téraoctet (240 octets) au zettaoctet (270 octets) (IBM, 2021). Présente dans presque tous les secteurs, entre autres dans la logistique inverse, les mégadonnées peuvent se combiner avec le domaine de la gestion de la chaîne d'approvisionnement pour créer de nouvelles opportunités d'affaires ainsi que de rendre la chaîne logistique plus interactive.

Dans ce projet, on va s'intéresser à réaliser cette combinaison entre les outils analytiques des mégadonnées et un système de gestion de la chaîne de logistique inverse. Un recours à l'intelligence artificielle à travers un réseau de neurones aura lieu pour déterminer les quantités des déchets ménagers générés du plastique pour la prochaine année dans la province du Québec. Ensuite, les résultats obtenus sont introduits dans un programme linéaire en nombres entiers MILP (mixed integer linear program) qui modélise le réseau de logistique inverse (RLI). Ceci est réalisé dans le but d'évaluer la justesse de la décision de modifications de configuration au niveau d'un échelon du réseau. À l'issue de ce modèle, des incitations peuvent être dégagées pour aider les parties prenantes (gouvernements, manufacturiers, organisations...) à prendre conscience de certains aspects et les aider dans le processus de prise de décision.

Le présent mémoire est composé de quatre chapitres, comme suit :

Le premier chapitre, problématique de recherche, va contenir la problématique de recherche, les objectifs à atteindre ainsi que la méthodologie de recherche.

Le deuxième chapitre, revue de littérature, va être consacré à la revue de littérature en rapport avec notre projet. Elle va mettre l'accent sur les mégadonnées et leurs liaisons avec la gestion des chaînes d'approvisionnement, l'intelligence artificielle et son rôle dans les modèles d'estimation et finalement la logistique inverse.

Le troisième chapitre, méthodologie, va présenter le modèle d'estimation basé sur l'intelligence artificielle et le modèle d'optimisation du RLI.

Le quatrième chapitre, expérimentations et résultats, va comporter les données pour le modèle d'estimation ainsi que ces résultats, les données pour le modèle d'optimisation ainsi que ces résultats et à la fin des recommandations managériales dégagés à travers l'interprétation de ces résultats.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

Dans ce chapitre, on va s'intéresser à présenter le contexte du projet, la problématique de recherche, ensuite, les objectifs de recherche et à la fin la méthodologie de recherche adoptée.

1.1 Problématique de recherche

On va s'intéresser dans ce projet, à étudier le réseau de logistique inverse pour le traitement des déchets de plastiques ménagère au Québec. Le plastique comme matériau est quasiment présent dans tous les secteurs grâce au faible cout de sa résine vierge par rapport aux autres matériaux. Avec des ventes totales estimées à 35 milliards de dollars canadiens, la fabrication de résines plastiques (10 milliards de dollars CA) et de produits en plastique (25 milliards de dollars CA) au Canada représente plus de 5 % des ventes du secteur manufacturier canadien (Environnement Canada, 2019). Cette exploitation accrue crée à son tour des quantités de déchets assez importantes d'où la nécessité d'un réseau de logistique inverse capable de les traiter.

Le réseau de logistique inverse du plastique comme le montre la figure 1 est composé en général de 4 grandes étapes :

- La collecte municipale,
- Le tri du déchet de plastique selon leurs niveaux qualité,
- Le recyclage de la partie du déchet disposant de meilleures qualités, et
- l'élimination du reste que ce soit par enfouissement ou bien par autre activité

Comme tout autre entité logistique, la chaîne de logistique inverse pour le recyclage du plastique dépend étroitement du contexte qu'il l'entoure c'est-à-dire par des facteurs externes et internes de son environnement. Le contexte législatif correspond à l'ensemble des décisions que les gouvernements prennent pour un objectif bien déterminé et qui affecte directement ou

indirectement la chaîne de logistique inverse (Govindan & Soleimani, 2014). Un nouveau règlement comme celui de la responsabilité élargie des producteurs (RECYC-QUÉBEC, 2019) ou bien la vision de 2030 pour le gouvernement fédéral peut perturber la performance d'une chaîne de logistique si elle n'est pas capable de réagir correctement à la décision.

Le contexte économique continue d'être le principal facteur qui stimule le développement d'une chaîne logistique inverse. La génération des profits, assurant la vitalité d'une entreprise, a comme but pour toutes les entités de la chaîne à créer plus de profit et à minimiser les coûts correspondant à leurs activités (Kannan et al., 2012a). Donc, dans leurs recherches d'augmentation du profit, les entités du réseau logistique inverse peuvent prendre des décisions qui affectent tout le réseau et donc le perturber.

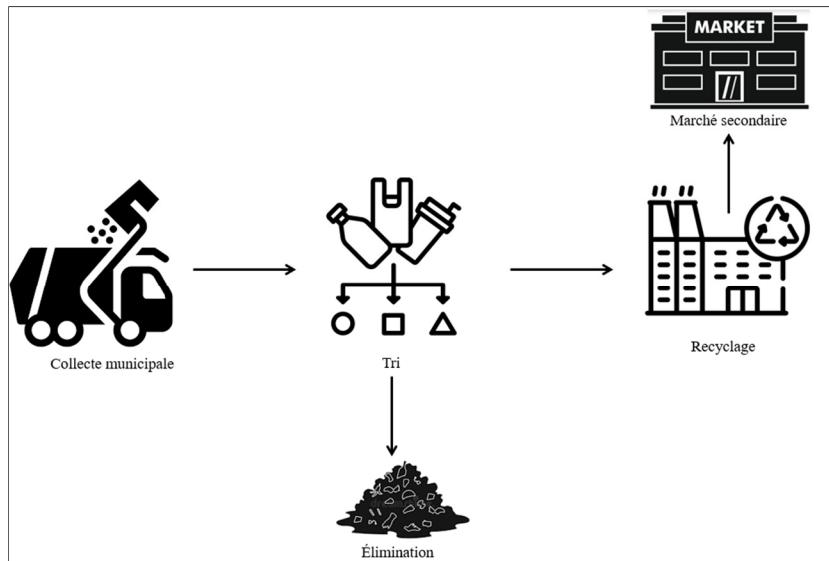


Figure 1.1 Configuration générale d'un réseau de logistique inverse

L'aspect environnemental aussi joue un rôle très important dans la chaîne logistique inverse à travers la comptabilisation et le contrôle des émissions et la génération des déchets de toutes les entités du réseau (Yu & Solvang, 2018). Ceci a pour but d'inciter ces derniers à la prise en considération de l'aspect environnemental dans leurs activités et donc modifier

progressivement et d'une manière totale ou partielle leurs processus métier, ce qui emmène à une perturbation du réseau.

Le réseau de logistique inverse pour le plastique fait face à plusieurs problématiques actuellement et ceci dû à plusieurs raisons. L'augmentation des couts liés à toutes les activités du réseau constitue un problème majeur surtout au niveau du transport. La province de Québec se caractérise par une grande surface géographique de l'ordre de 1,7 million de kilomètres carrés (gouvernement du Québec, n.d) ce qui fait que le transport et les couts qui lui correspond présentent un grand défi pour toutes les entités du réseau.

Les recycleurs qui sont le maillon final du réseau de logistique inverse sont des centres spécialisés. C'est-à-dire ils ne traitent qu'un ou plusieurs types de plastique (Greenpeace Canada, 2020). Cette spécialité fait en sorte qu'une grande partie des déchets à recycler parcourrent de longues distances pour arriver à un centre capable de les traiter ce qui induit une augmentation du cout total. L'augmentation de ces couts de transport et des autres couts du réseau affecte la performance du plastique recyclé dans le marché secondaire. Un cout élevé correspond à un prix de vente élevé qui à son tour ne peut concurrencer la résine primaire du plastique extraite de l'industrie pétrochimique qui se caractérise par ses faibles couts (Environnement Canada, 2019).

Les émissions, le traitement non écologique des déchets et la performance environnementale en générale présentent aussi un souci fondamental dans la chaîne logistique inverse canadienne et plus spécifiquement québécoise. Au Canada, le taux de recyclage du plastique est très bas , de l'ordre de neuf pour cent, par rapport à plusieurs pays dans l'Europe par exemple (Environnement Canada, 2019). Même si le gouvernement impose des couts élevés d'enfouissement des déchets de plastique pour orienter les parties prenantes vers des activités plus écologiques, comme le recyclage, ceci reste encore insuffisant.

Une autre problématique intrinsèque au réseau est sa performance opérationnelle c'est-à-dire sa capacité à traiter les nouvelles quantités de déchets qui sont à la fois élevées, imprédictibles et dynamiques d'une période à l'autre.

Différentes causes sont à l'origine de cette problématique : les habitudes des consommateurs, les explosions de nouveaux produits et matériaux fabriqués chaque année, la mondialisation et l'ouverture à de nouveaux marchés. Ceci nous emmène à trouver une solution de ces problématiques à travers un outil d'aide à la décision dans le projet de recherche.

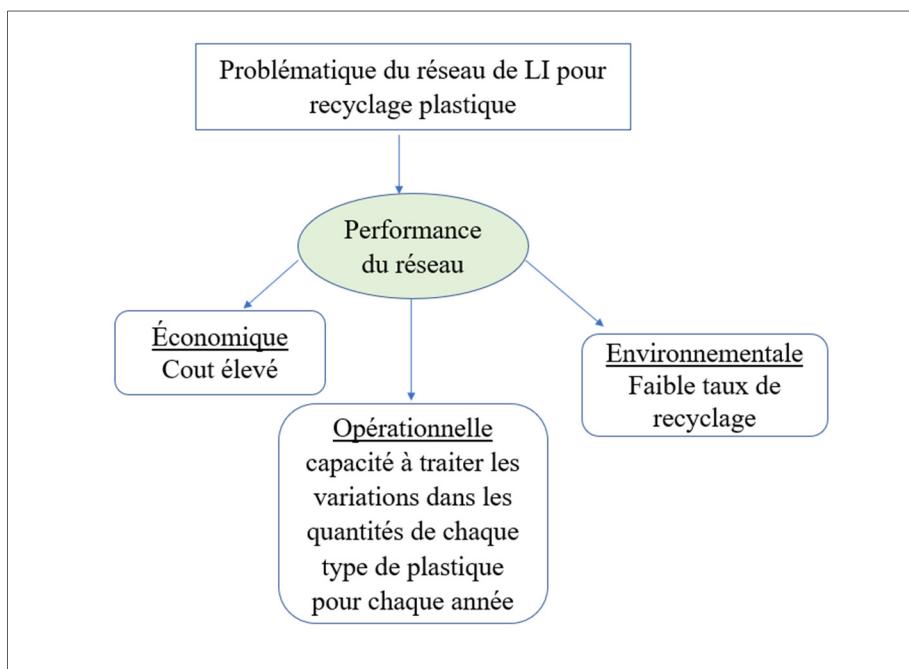


Figure 1.2 Problématique d'un réseau de logistique inverse

1.2 Questions et objectifs de recherche

Ce projet étudie la planification tactique d'un réseau de logistique inverse. Ce type de projet a fait l'objet de différents modèles d'optimisation ces dernières années. Le traitement de fin de vie de certains produits consommables est remis en question à cause du danger potentiel qu'elle représente pour la santé de l'humain ou bien de la faune et la flore (Gileno & Turci, 2021). Par conséquent, un réseau de traitement optimisé demeure une nécessité pour gérer le plus écologiquement possible ces déchets.

Une simple évaluation du réseau de logistique inverse pour le traitement des déchets de plastique au Québec permet de dégager les problématiques décrites dans la section précédente. L'idée est donc de présenter une solution qui permet au réseau d'améliorer ses performances économiques, environnementales et opérationnelles. La spécialité des recycleurs étant un des principaux soucis du réseau signifie qu'un recycleur se spécifie dans son traitement d'un seul type de plastique ou deux au plus. Ceci cause une augmentation de la distance parcourue entre les centres de tri et les centres de recyclage pour que le plastique envoyé trouve un centre capable de le traiter. D'où vient l'idée de donner la possibilité aux recycleurs d'être flexibles ou bien d'injecter de la flexibilité dans le réseau.

La flexibilité d'une des entités constituantes du réseau (recycleur dans notre cas) peut être une solution à ces problématiques vu qu'elle permet aux centres de devenir plus général ou polyvalent (capable de traiter tous les types de plastique) et exploiter d'une manière optimale leurs capacités. Ceci affecte directement les couts de transport à travers l'exploitation des centres de recyclage les plus proches pour ne pas parcourir de longues distances. D'un point de vue écologique, ça permet d'augmenter le taux de recyclage qui est un indice environnemental primordial. Et finalement, ça permet de converger vers une situation qui concorde avec les législations.

L'adoption de la flexibilité est, apriori bénéfique pour le réseau, mais les questions qui devront être posées sont :

Qui parmi les centres de recyclages doit être flexible ou non ?

À quelle valeur de flexibilité chaque centre flexible correspond-il?

À quel point peut-on aller par la flexibilité si on augmente le taux de recyclage?

À quel point peut-on réaliser un compromis entre la flexibilité, le cout et les émissions GES?

1.3 Méthodologie de recherche

La méthodologie de recherche va comporter les efforts déployés, ainsi l'approche suivit pour atteindre les objectifs de recherche. Elle est divisée comme suit :

- Évaluation et diagnostic du réseau de logistique inverse actuel pour déterminer les problèmes auxquels il fait face,
- Recours à la littérature pour fouiller dans les différents cas d'études à travers la triangulation. Cette étape permet de dégager les limites de ce type de recherche ainsi que les améliorations potentielles que notre travail peut dévoiler. À la fin de cette étape, une idée du projet va être constituée et la recherche pour les outils nécessaires à la concrétiser commence.
- S'inspirer des différentes techniques d'analyse de données et des outils d'aide à la décision pour déterminer les outils nécessaires à la réalisation du projet,
- Développement d'un modèle d'estimation: un modèle basé sur l'intelligence artificielle est ainsi développé pour faire la prédiction de la quantité de déchets de plastique générés pour la prochaine année.
- Développement d'un modèle d'optimisation: les résultats du modèle de prédiction vont être injectés dans un MILP modélisant le réseau de logistique inverse. Une évaluation de la flexibilité introduite aura lieu pour déterminer la justesse d'une telle décision.
- Interprétation des différents résultats ainsi qu'une présentation des recommandations managériales dégagées à travers ces résultats.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre contient la revue de littérature de ce sujet de recherche. La première partie est consacrée aux modèles d'optimisation appliqués au sujet de la logistique inverse ainsi que les modèles qui présentent une analyse d'incertitude. La deuxième partie va mettre l'accent sur la valeur des données massives / intelligence artificielle pour prédire les données et la conception des modèles prédictifs/ prescriptifs basés sur les réseaux de neurones.

2.1 Logistique inverse

2.1.1 Background de la logistique inverse

Durant les dernières années, les chaînes logistiques inverses ont subi une grande évolution et ont été prises en compte par de différentes entreprises, gouvernements et même dans le domaine de la recherche scientifique (Akdoğan & Coşkun, 2012). La préoccupation envers l'environnement et la préservation de la nature ont été le moteur principal de cette transition (Thierry et al., 1995). Pour mieux comprendre les aspects de la logistique inverse et analyser ses variantes, une définition claire de celle-ci demeure nécessaire. Le terme logistique inverse a été introduit la première fois pendant les années 70 (Brito & Dekker, 2011). Depuis ce temps-là, elle ne cesse de se développer jusqu'à devenir un composant vital dans la chaîne logistique de toutes les entreprises.

Par définition, c'est le processus de planification, implémentation et contrôle des flux de retour des matières premières, des stocks en cours de fabrication, des emballages et des produits finis d'un point de fabrication, de distribution ou d'utilisation à un point de récupération ou d'élimination approprié (Brito & Dekker, 2011). Bien que la motivation écologique ait guidé l'opération de création de ce domaine d'intérêt, ceci n'empêche pas que la logistique inverse permette aussi la création de valeur à partir des déchets injectés dans le réseau si ce dernier est efficacement conçu. Physiquement, la logistique inverse ne diffère pas de logistique

conventionnelle puisqu'elle consiste à planifier et transporter des flux entre des nœuds, mais en réalité l'existence des multiples acteurs dans la logistique inverse la rend plus difficile : la qualité des retours, le transport, le stockage, l'emballage (Sangwan, 2017). L'importance de la logistique inverse dans une entreprise réside dans sa part dans les couts logistiques totaux que chaque entreprise dépense. Ce dernier peut atteindre en moyenne 9,5 % (Daugherty, Autry, & Ellinger, 2001).

La constitution d'un réseau de logistique inverse est généralement commune dans toutes les applications, mais ceci n'empêche pas que certains domaines aient une configuration plus spécifique dépendamment du secteur : déchets médicaux, déchets nucléaires, déchets des équipements électriques et électroniques. La logistique inverse commence par une étape de collecte où les produits sont regroupés par un service de collecte ou par un retour des produits par des clients vers des magasins ou un détaillant. Une fois collectés, les produits sont acheminés vers des établissements de tri pour enlever les ordures, la saleté et même dissocier les composants constituant le produit, ceci constitue un premier filtre. Par la suite, les flux générés vont être envoyés aux centres spécialisés de récupération en fonction de la qualité des déchets. Dans cette étape, un tri plus spécifique est réalisé selon le besoin et l'objectif du processus : un type de matériau recherché, un niveau de qualité de déchet sollicité, une caractéristique dans les déchets désirés. La partie des déchets restante non exploitée dans cette partie est envoyée vers des centres de décharge, d'enterrage ou des centres spécialisés dans la récupération de l'énergie électrique à travers l'incinération de ces déchets.

L'étape où la valeur ajoutée est créée est celle qui succède l'étape de tri. Vu la diversification du flux arrivant à cette étape, plusieurs alternatives de récupération peuvent être utilisées telles que: réutilisation, réparation, rénovation, retraitement, recyclage (Thierry et al., 1995).

Réutilisation directe : une partie des produits retournés peut être réutilisée sans pouvoir passer par un processus de production. Elle nécessite juste une étape de nettoyage et quelques réparations le cas échéant (Fernández, Gil, & Torres, 2004).

Réparation : elle consiste à faire retourner un produit en panne par le consommateur afin de réaliser quelques réparations de base pour le rendre en marche. La qualité du produit réparé est généralement inférieure à celle du produit neuf (Fernández et al., 2004).

Remise à neuf : permet de décomposer, inspecter et remplacer ou réparer les pièces défectueuses dans un produit qui a été retourné par le client soit à cause d'une panne (retour sous garantie) ou qu'il devient inutiles pour lui (Zhang et al., 2019). Dans cette option, le produit ne perd pas son identité et il sera revendu comme en unité entière. Ce processus peut être réalisé par le producteur lui-même, le vendeur, ou bien une autre partie. Dans certains cas, la remise à neuf comporte une amélioration de certaines composantes vers une technologie supérieure (Sangwan, 2017).

Reconditionnement : comporte les mêmes étapes de la remise à neuf. Généralement, le fabricant est le responsable de la réalisation du processus vu qu'il demande plus de connaissances sur la conception du produit. Le but du reconditionnement est d'amener les produits usagés à des normes de qualité et de fiabilité aussi rigoureuses que celles des nouveaux produits (Sangwan, 2017).

Recyclage : Dans cette option, le produit entrera dans le canal de la valeur inverse comme étant une matière première où il pourra être réutilisé avec d'autres matières premières pour produire les matières vierges après un certain traitement initial. Dans ce processus, l'identité du produit et ses composants seront perdus (Sangwan, 2017).

Trois grands facteurs ont contribué au développement de la logistique inverse : facteur économique, facteur législatif et facteur social. Le premier consiste à transformer la logistique à une source de minimisation des couts au lieu d'une obligation environnementale. Le géant américain de fabrication des télécopieurs XEROX, a pu économiser des millions de dollars annuellement grâce à l'une ou plusieurs procédures de récupération appliquée dans le cadre de la logistique inverse (Akdoğan & Coşkun, 2012).

Le deuxième facteur ce sont les législations que les gouvernements prennent pour obliger les entreprises à diminuer les émissions des GES (gaz à effet de serre) ou bien les déchets de leurs processus de production. Les législations ont pour but d'établir une performance éco-efficiente

des systèmes. Le concept d'éco-efficience est basé sur la création de plus de services et biens en utilisant le minimum possible de ressources et donc générer moins de pollution (Bing, Bloemhof, & Vorst, 2014). Comme pour le cas de SPEDE (système de plafonnement et d'échange des droits d'émissions au Québec) qui a comme objectif de limiter les émissions de CO₂ (Dioxyde de carbone) (Trochu, 2015).

Le dernier facteur est le social : devant l'intérêt que porte la société envers la pollution et à la préservation de la nature, les entreprises cherchent à établir une image que les consommateurs désirent en tant qu'organisation écologiquement responsable. Donc ils essayent de commercialiser des produits appelés des produits verts qui sont à 30 % recyclables par exemple ou bien qu'ils consomment le minimum d'énergie. L'entreprise Fujitsu met l'aspect environnemental au sommet de ses priorités, en effet 66 % de leurs produits sont des produits verts (Fernández et al., 2004).

2.1.2 Modèle d'optimisation : un outil d'aide à la décision

Un modèle d'optimisation est un outil d'aide à la décision qui a comme objectif de trouver la solution optimale et réalisable d'un problème donné. Dans ce dernier, la fonction objectif est maximisée ou minimisée via des valeurs variables soumises à des contraintes (Ding et al., 2020). La fonction objectif du modèle nous renseigne sur l'aspect économique du réseau : vente, profit ou cout. De point de vue logistique, ce sont les décisions que le modèle prend pour aboutir à une telle valeur de la fonction objectif à laquelle on s'intéresse. Les décisions en ce qui concerne la logistique inverse sont de 3 types (Bing et al., 2014) :

- Décisions de niveau stratégique: caractérisés par un horizon temporel long et par une faible flexibilité. Ce type de décisions nécessite une analyse de faisabilité et des études approfondies avant d'être prises ainsi qu'un suivi à chaque période de la réalisation est indispensable pour assurer l'aboutissement de l'objectif planifié. Parmi les décisions stratégiques les plus couramment prises est la localisation et les capacités des usines, modes de transport, système d'information (Midthun et al., 2016).

- Décisions de niveau tactique: elles sont à un niveau plus bas que les décisions stratégiques. C'est-à-dire ils s'exécutent dans des limites fixées par les décisions stratégiques. Elles sont liées à la planification de la production à moyen terme (moins d'un an), aux contrôles des stocks (Sowlati, 2016).
- Décisions de niveau opérationnel: ce sont des décisions exécutées à court terme pour atteindre les objectifs à long et moyen terme des décisions stratégiques et tactiques (Balaman, 2019). Elles sont prises en temps réel sur une base quotidienne ou hebdomadaire (SteadieSeifi, 2011) et sont de type : allocation des commandes à la production, commande de réapprovisionnement, chargement ou expédition des véhicules, etc.

Plusieurs facteurs externes peuvent orienter ces types de décisions. Parmi ces facteurs, on trouve les fluctuations des prix des matières premières et les législations. Ces derniers ont pour but d'établir une performance éco-efficace des systèmes (Bing, 2014) comme pour le cas du SPEDE au Québec qui a comme objectif de limiter les émissions du CO2 (Trochu, 2015). Parmi les réformes en rapport avec ces réglementations, on note la REP (responsabilité élargie des producteurs). Il est par définition une politique selon laquelle les producteurs dont leurs produits ou leurs emballages sont assujettis aux conditions prédéfinies sont amenés à assumer la responsabilité financière et/ou physique pour le traitement ou l'élimination des produits post-consommation (OECD, 2001).

Ce terme a été présenté pour la première fois en 1990 par les universitaires suédois Thomas Lindhqvist et Karl Lidgren pour le ministère de l'Environnement de la Suisse (Bangura et al., 2018). L'attribution d'une telle responsabilité pourrait inciter à prévenir les déchets à la source, promouvoir la conception de produits pour l'environnement et soutenir la réalisation des objectifs de recyclage et de gestion des matériaux. La responsabilité que chaque producteur doit assumer peut-être partielle ou totale. La première signifie que le producteur contribue à la réalisation d'une étape du cycle inverse des produits post-consommés qui est généralement la collecte. Cette contribution peut être financière comme dans le cas du régime de compensation

au Québec (Trochu, 2015) ou physique c'est-à-dire c'est l'entreprise elle-même qui fait la collecte .

Les nouvelles réglementations vont au-delà de ça, ils exigent maintenant aux producteurs à élargir leurs responsabilités pour qu'elles couvrent le cycle total de post-consommation c'est-à-dire la collecte, le tri, le recyclage et dans certains cas l'élimination (Iqbal et al., 2015).

La prise de conscience des impacts des émissions de GES a rendu l'aspect environnemental un des plus importants critères de performances des RLI, d'où vient l'apparition des conceptions de RLI de type vert (Nurjanni, Carvalho, & Costa, 2017) ou bien celles qui étudient l'empreinte du carbone dans toutes les activités du réseau (Kannan et al., 2012b). Ceci est étudié à la fois pour les chaines d'approvisionnement classique (Wang, Lai, & Shi, 2011) ou bien pour le cas de logistique inverse (Tazi, Idir, & Fraj, 2020). L'intérêt économique n'est plus le seul à comptabiliser, d'où l'apparition des modèles d'optimisation bi objectifs: économiques et environnementaux (Yuchi et al., 2019) et même multiobjectif : économiques, environnementaux et sociaux (Xifeng, Ji, & Peng, 2013).

Aussi un autre facteur externe qu'on peut citer est les parties prenantes de toute la chaîne d'approvisionnement : les clients, les sociétés de transport, les municipalités, les organismes non gouvernementaux, etc.

La logistique inverse est omniprésente dans tous les domaines et secteurs : dans le secteur automobile où Banguera et al. (2018) ont conçu un réseau de logistique inverse pour le cas des pneus usagés des véhicules au Chili. Un MILP multiobjectif et multipériode pour le déploiement et la conception d'une chaîne logistique inverse pour le traitement des déchets aérospatial a été développé par Dong, Azzaro, & Boix (2020). En électronique, Sagnak et al. (2021) ont développé un modèle d'optimisation pour la localisation des centres de collectes des déchets électroniques en Turquie.

Le traitement des déchets municipaux ménagers fait aussi l'objet de plusieurs travaux de recherche. Xu et al. (2021) ont présenté un modèle de localisation-allocation des centres de tri et de recyclage pour les déchets de plastique d'emballage à haute qualité. Ce modèle est

développé pour traiter la variation du taux de change, de fret maritime et les prix des allocations de carbone. La reconception du RLI pour les bouteilles de plastique de type PET (Polyéthylène téréphthalate) est étudiée en Iran permettant de déterminer le nombre et la localisation des centres qui constituent le réseau ainsi que le flux de déchets échangés (Paydar & Olfati, 2018). D'autres études se sont intéressées aussi au problème de routage des flottes qui circulent dans le réseau de logistique inverse pour le traitement des déchets en plastique en Inde (Sheriff, Nachiappan, & Min, 2014), ceci rend le modèle de classe NP (non déterministe polynomial).

Au niveau stratégique, l'évaluation de la stratégie de tri des déchets à la source versus post-séparation constitue l'objet des multiples recherches et qui cherche à établir une performance éco-efficace des RLI (Bing et al., 2014). Dans le même contexte Chari, Venkatadri, & Diallo (2016) ont développé un modèle d'optimisation à deux phases pour examiner la décision d'ajout des camions avec des remorques dotées des systèmes de compactage des déchets aux flottes de camions de collecte.

Le but de ce type de recherche est de déterminer l'effet des décisions d'investissement sur l'optimisation du réseau.

2.1.3 Modèle d'optimisation pour la logistique inverse sous incertitude

Les méthodes d'optimisation stochastique sont des procédures permettant de maximiser ou de minimiser les fonctions objectifs d'un modèle mathématique lorsque les problèmes stochastiques sont pris en compte (Maroufpoor, Azadnia, & Haddad, 2020). Les problèmes stochastiques sont abordés lorsque le caractère aléatoire est présent ou bien lorsque les données du modèle ne sont pas certaines d'une manière totale ou partielle (Glynn, 2004).

Au cours des dernières décennies, ces méthodes sont devenues des outils essentiels pour la science, l'ingénierie, les affaires, l'informatique et les statistiques. L'incertitude dans le contexte de logistique inverse peut toucher les couts de production, les prix de marché, les pénalités, les retours des clients, les quantités des déchets générés, les demandes des clients (Kolomvos, 2007).

La caractérisation de l'incertitude peut être réalisée à travers deux approches : approche probabiliste et approche possibiliste (Lopez, 2010). L'approche probabiliste fait appel aux lois de probabilités, variables aléatoires pour présenter l'incertitude où la fonction densité de probabilité comporte toute l'information fondamentale de l'incertitude (Samuels & Feller, 1969).

L'approche possibiliste est utilisée dans le cas où l'information à exploiter est partiellement disponible, c'est-à-dire qu'elle est disponible sur un intervalle restreint. La théorie des possibilités a été introduite en 1978 par Lotfi Zadeh pour permettre de raisonner sur des connaissances imprécises ou vagues, en introduisant un moyen de prendre en compte des incertitudes sur ces connaissances (Bouchon, 2007). Parmi les approches possibles, on note l'analyse d'intervalle (Benferhat et al., 2011), logique floue (Cormier, 2014), etc.

Il existe plusieurs travaux de recherches dans le domaine de la logistique qui comporte des incertitudes dans leurs données ce qui fait appel à un problème stochastique pour faire face à ce manque d'information. Soleimani, Seyyed, & Shirazi (2016) ont développé un modèle multipériode dans le cadre d'une chaîne logistique en boucle fermée. La demande des clients ainsi que les prix sont considérés les variables stochastiques dans ce travail. Une approche basée sur la génération des scénarios est utilisée pour faire face au problème d'incertitude. L'analyse des scénarios est aussi utilisée par Trochu, Chaabane, & Ouhimmou (2018) dans la résolution d'un modèle de logistique inverse pour le traitement des déchets de bois de construction. La localisation des fournisseurs, la quantité de déchets générés et la qualité du déchet sont les paramètres stochastiques du problème. Ils subissent chacun trois sortes de variation : haute, moyenne et faible, d'où 27 scénarios sont générés et étudiés.

Moslehi, Sahebi, & Teymouri (2020) ont établi un modèle de logistique inverse pour le traitement des DEEE (Déchets d'équipements électriques et électroniques) avec des contraintes environnementales, l'objectif était à la fois de minimiser les couts de toute la chaîne logistique inverse et de maximiser le score environnemental. Les paramètres incertains dans cet article

sont le taux de retour et la demande du marché secondaire. Jerbia et al. (2018) ont étudié une chaîne logistique en boucle fermée avec multiples options de récupération. Premièrement, un modèle déterministe est développé puis une analyse de sensibilité est effectuée pour déterminer les effets d'une légère variation des paramètres d'entrée sur la configuration du réseau. Finalement, la version stochastique du modèle est développée pour faire face aux grandes valeurs d'incertitude rencontrées par le réseau.

Bien que, plusieurs travaux de recherche adoptent l'approche d'analyse de scénarios dans les modèles stochastiques grâce à sa simplicité, d'autres disposent des différentes approches comme l'approche de programmation stochastique à deux étapes. Azizi, Hu, & Mokari (2020) ont utilisé cette approche dans un modèle de logistique inverse avec une incertitude sur le retour des clients et la demande du marché secondaire. Dans cet article, les décisions de la première étape sont de type stratégique : ouverture/ fermeture des centres. En se servant de la conception du réseau créé par les décisions de la première étape, la seconde permet de déterminer les décisions de type tactiques et opérationnelles : flux et inventaire.

Pour mettre l'accent sur le rôle du tri à la source dans l'amélioration de la productivité dans les centres de collectes Trochu, Chaabane, & Ouhimmou (2019) ont développé un modèle d'optimisation pour le traitement des déchets dans le domaine de démolition. Ils abordent une programmation stochastique à deux étapes pour faire face à l'incertitude au niveau des localisations des fournisseurs. La méthode SAA (Sample Average Approximation) est adoptée dans cet article pour résoudre le modèle stochastique.

La programmation floue est aussi une façon de traiter l'incertitude dans les modèles d'optimisation. Comme son nom l'indique, elle est une dérivée de la logique floue. Elle est appliquée dans les situations qui ne peuvent pas être clairement définies et ont une incertitude. Govindan, Paam, & Abtahi (2016) ont développé un modèle multiobjectif, multipériode de logistique inverse à l'aide de la programmation floue. Les paramètres flous considérés dans cet article sont : demande, taux de retours, cout de traitement et capacités des centres de traitement.

Le tableau suivant regroupe toutes l'information reportée dans la section précédente en ce qui concerne la formulation du modèle (MILP, MINLP, etc.), les types de décisions prises par le modèle (flux, localisation, etc.), l'horizon de planification (uni période, multipériode), la performance évaluée (économique, environnementale), la présence ou absence d'incertitude (Incer), type de données exploitées (fictives, étude de cas) et si une étude de cas est appliquée dans quel secteur est-elle exécutée.

Tableau 2.1 Travaux récent des modèles de décision pour le traitement des déchets

	Modèle	Variable de décision			Horizon		Objectif		Incer	Cas
		Loc	Flux	Inv	Up	Mp	Eco	Env		
(Das & Chowdhury, 2012)	MIP		*		*		*			-
(Kannan et al., 2012)	MILP	*	*		*		*	*		DPM
(Bing et al., 2014)	MILP		*		*		*	*		DPM
(Sheriff et al., 2014)	MNLP	*	*	*	*		*			PET
(Govindan et al., 2016)	MILP	*	*				*	*	*	-
(Chari et al., 2016)	MILP			*	*		*			DPM
(Feitó et al., 2017)	MOMINLP	*	*	*	*		*	*	*	PET, PVC
(Babadi et al., 2017)	MOMINLP	*	*		*		*		*	Sac
(Hassanzadeh et al., 2018)	MILP	*	*		*		*			DPM
(Paydar & Olfati, 2018)	MILP	*	*		*		*			PET
(Garside et al., 2020)	MOMILP		*			*	*	*		PET
(Bassi et al., 2020)	MOILP		*			*	*			PP
(Samadikun et al., 2020)	Carbon footprint				*			*		DPM
(Feitó et al., 2021)	FUZZY	*	*	*	*		*	*	*	PET, PVC

2.2 Analyse de la chaîne d'approvisionnement basée sur les données massives

L'utilisation du terme « données massives » est devenue courante à partir de 2008 (Weerasinghe & al., 2012) lorsque les sociétés de médias sociaux basées sur Internet se sont développées et ont commencé à générer rapidement des données non structurées. Les données massives sont par définition un gigantesque ensemble de données complexe qui peut être structuré, non structuré ou semi-structuré (Kacfah, Cullot, & Nicolle, 2015).

Les données massives ont été caractérisées par 5V : volume, variété, vitesse, véracité et valeur (Assunção et al., 2015). Le volume fait appel à l'abondance que ces données sont caractérisées par et qu'un logiciel de traitement de données standard ne serait pas capable de les traiter (Sivarajah et al., 2017). La variété est comme son nom l'indique réfère à l'hétérogénéité structurelle des ensembles de données (Gandomi & Haider, 2015). Ceci est manifesté au niveau de la différence de sources de données générées que ce soient des réseaux sociaux, des capteurs, des appareils mobiles ou bien au niveau du format des données elles-mêmes qui peuvent être structurées ou non structuré. La vitesse signifie la rapidité de génération des données qui peuvent être dans certains cas à temps réel (Lee, 2020). La véracité souligne l'importance de la qualité des données surtout qu'il existe de multiples sources d'incertitude au niveau des sources de données comme les réseaux sociaux par exemple (Shukla et al., 2020). La valeur fait référence au processus de révélation des valeurs non exploitées des données massives pour soutenir la prise de décision (Nguyen et al., 2018).

Travailler avec un énorme volume de données pour extraire des informations utiles pour soutenir la prise de décision est l'une des sources d'avantages concurrentiels pour les firmes d'aujourd'hui. Ces dernières tirent parti de la puissance analytique appliquée sur les données pour formuler une stratégie commerciale dans leurs opérations afin d'atténuer les risques commerciaux (Biswas & Sen., 2016).

Ces dernières décennies, la GCA (gestion des chaines d'approvisionnement) a pris de plus en plus d'ampleur dans le monde des affaires et son optimisation est devenue une condition cruciale pour la réussite de chaque entreprise. Un grand nombre de publications académiques et des experts ont reconnu que la gestion de la chaîne d'approvisionnement subit des changements importants en raison de l'adoption de nouvelles technologies numériques (Calatayud, Mangan, & Christopher, 2019).

Parmi les facteurs qui stimulent ces changements des systèmes de GCA on trouve la révolution industrielle 4.0 qui se caractérise par l'automatisation des procédures de prise de décision, entre autres, dans le domaine de la logistique où on peut appeler cette procédure « The Self-Thinking Supply Chain » (Calatayud et al., 2019). Ce terme signifie que les chaînes d'approvisionnement seront en mesure de prendre des décisions plus précises et en temps réel, d'optimiser les opérations, de gérer les incidents qui nécessitent des actions d'atténuation des risques, d'éviter les perturbations et de satisfaire à une demande qui est de plus en plus volatile. La chaîne d'approvisionnement sera capable d'aller plus loin que ça et prédire l'avenir et les éventuels changements qui peuvent arriver avec un minimum d'erreur.

Afin que les données soient adéquatement exploitées, la chaîne d'approvisionnement doit faire appel à des techniques d'analyse de données « Big Data Analytics » pour extraire des informations utiles cachées de la chaîne d'approvisionnement (Wang et al., 2016). Ces analyses sont classées en: descriptive, prédictive et prescriptive.

L'analyse descriptive cherche à répondre à la question pourquoi. Comme son nom l'indique, elle permet d'analyser les données brutes des événements passés (Souza, 2014). L'analyse prédictive cherche à déterminer ce qui se passera dans le futur ou ce qui se passera probablement, en examinant les tendances des données passées à l'aide de techniques statistiques, de programmation et de simulation (Abbott, 2014). L'analyse prescriptive répond à la question de ce qui devrait se passer. C'est-à-dire en l'appliquant, on cherche à automatiser le processus de prise de décision (Poornima & Pushpalatha, 2020).

Le tableau 2.2 récapitule les caractéristiques des trois types d'analyse tirés de l'article de (Ivanova et al., 2016).

Tableau 2.2 Caractéristique des catégories d'analyse des données massives

Catégorie d'analyse	Caractéristiques
Analyse descriptive	<ul style="list-style-type: none"> - Que s'est-il passé? - Extraire des connaissances à la base de l'historique
Analyse prédictive	<ul style="list-style-type: none"> - Qu'est-ce qui pourrait passer? - Prédire les besoins de la chaîne d'approvisionnement
Analyse prescriptive	<ul style="list-style-type: none"> - Que devrions-nous faire? - Optimisation et automatisation des décisions

L'analyse prédictive, plus couramment utilisée que les deux autres, est exploitée presque dans toutes les activités de la GCA, on la trouve dans l'approvisionnement (Jain et al., 2014), la production (Shahbaz et al., 2006), le stockage (Chuang, Lee, & Lai, 2012), le transport (Cui et al., 2016) et la gestion de la demande (Ma, Kwak, & Kim, 2014). La classification est la technique la plus courante au niveau de l'analyse prédictive et elle est appliquée dans la planification de la production ou bien dans la gestion de la maintenance préventive des équipements (Lee, Cao, & Ng, 2017). L'analyse prescriptive est peu utilisée même s'il existe des grandes entreprises qui ont utilisé l'analyse de données pour optimiser la production et les stocks (Ivanova et al., 2016).

2.3 Intelligence artificielle : outil d'estimation

Comme ça était évoqué dans les sections précédentes, l'idée du projet est de réaliser la combinaison entre les outils analytiques des mégadonnées et un système de gestion de la chaîne de logistique inverse. Un recours à l'intelligence artificielle à travers un réseau de neurones aura lieu pour déterminer les quantités des déchets ménagers du plastique générés pour la prochaine année au Québec. Pour cela, dans cette section on va présenter des articles qui ont déjà concrétisé l'idée d'exploiter l'intelligence artificielle dans l'estimation.

L'IA (intelligence artificielle), également connue sous le nom d'apprentissage automatique, qui englobe la science et l'ingénierie pour créer une machine intelligente dotée de l'intelligence

au niveau humain (ou mieux), mais qui est implantée, d'où le nom d'artificiel, pour résoudre de différents types de problèmes pratiques (Chhay et al., 2018). Ces dernières années, l'IA est devenue une méthode plus populaire et acceptable pour prévoir la génération des déchets solides ménagère. Le type de données de sortie du modèle d'IA de prédiction le catégorise: en effet si la sortie est discrète on parle d'un modèle de classification cependant si la sortie est continue on parle d'un modèle d'estimation (Agard, 2021a).

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour l'estimation des déchets solides municipale, dans son article Goel et al. (2017) les a classés en méthodes conventionnelles et méthodes non conventionnelles. La raison derrière cette classification est la découverte des techniques d'analyse des données, c'est-à-dire cette innovation a ouvert la porte aux multiples autres façons d'exploiter les données que les méthodes usuelles ne les fassent pas. Depuis des décennies, les méthodes conventionnelles étaient toujours appliquées dans l'estimation des déchets. Elle inclut les estimations basées sur les sondages (Alhumoud, Altawash, & Aljallal, 2007), les séries temporelles (Navarro, Diamadopoulos, & Ginestar, 2002), l'AFM (analyse des flux de matières) (Tran et al., 2018), la régression linéaire multiple (Ramesh et al., 2016).

Les méthodes non conventionnelles regroupent les modèles à base de données « Data Driven models » comme les Réseaux de neurones artificiels (RNA) (Zade & Noori, 2008), les FAD (forêts d'arbres décisionnels) (Kannangara et al., 2018), MVS (machines à vecteur de support) (Hu et al., 2021). Un modèle d'estimation basée sur les réseaux de neurones est développé dans ce travail donc on va présenter les travaux de recherche ayant traité cette méthode.

Le réseau de neurones artificiel est un outil d'IA capable d'identifier les patrons fréquents dans un ensemble de données et tirer des apprentissages implicites dans ces ensembles. Le réseau de neurones imite la connexion neuronale du cerveau où les impulsions électriques traversent les neurones et les connexions synaptiques (Oliveira, Sousa, & Ferreira, 2019).

Un RN (réseau de neurones) est composé de : (i) nœuds qui sont l'unité de base du réseau (ii) des couches composées d'un ou de plusieurs nœuds (iii) des poids qui sont associés à chaque

synapse et représentent la force de connexion entre deux nœuds et finalement une fonction d'activation dont la plus connue est la fonction sigmoïde (Younes et al., 2015). Un RN est composé d'une couche d'entrée, une couche de sortie, une ou plusieurs couches cachées. La figure 2.1 représente une vue simplifiée d'un réseau de neurones tirée de l'article de (Bariza, Houichi, & Heddam, 2012)

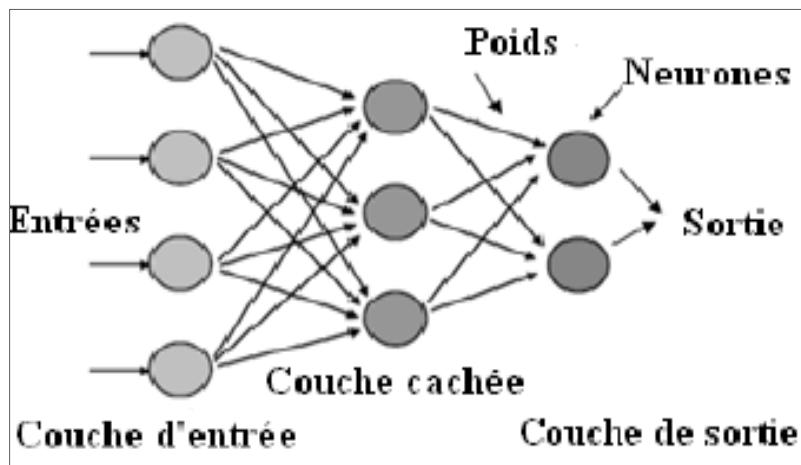


Figure 2.1 Diagramme schématique du réseau de neurones

Les neurones de couche d'entrée agissent comme un déclencheur du signal d'entrée. Leur rôle est d'introduire l'information ou le signal dans le réseau et leurs dénombrements représentent le nombre des paramètres indépendants du modèle. Les neurones de la ou les couches cachées reçoivent les signaux des neurones de la couche d'entrée. C'est là où tout le calcul est fait puis les signaux sont transmis aux couches de sortie pour visualiser le résultat du réseau (Bariza et al., 2012).

Le RN est basé sur le principe suivant : apprentissage, validation et estimation. En effet après avoir déterminé les variables dépendantes et indépendantes et collecté les données, on subdivise la base de données en deux parties : la première pour l'apprentissage et la deuxième pour la validation. Dans la première base, on donne au réseau la possibilité de s'exercer sur ses données et tirer le plus possible de connaissances en lui présentant à la fois les valeurs d'entrée et les résultats de sortie qui correspondent à eux. La figure 2.2 tirée du (Agard,2021b) montre le processus d'apprentissage et validation d'un RN.

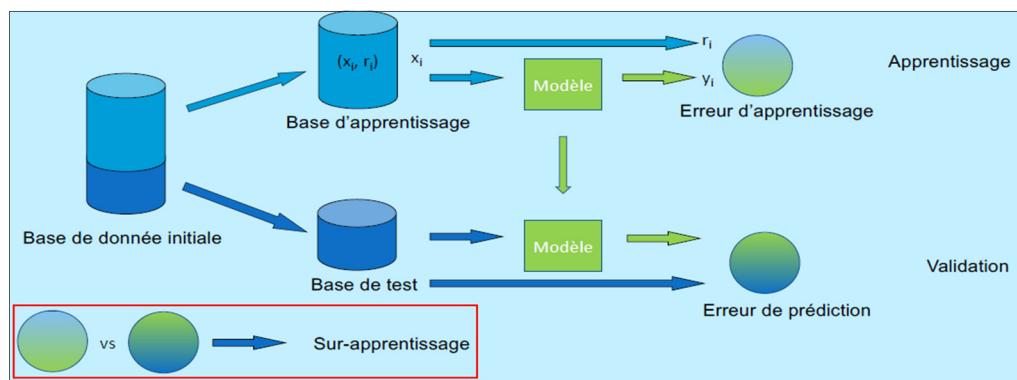


Figure 2.2 Processus d'apprentissage et de validation d'un réseau de neurones

Ensuite, pour la partie restante de la base de données on teste la performance du modèle en déterminant les valeurs de sortie des entrées quelconques, que l'on connaît déjà leurs valeurs de sortie et on compare ces deux sorties entre eux (Agard, 2021b). Parmi les critères de comparaison les plus connus, on donne le R^2 appelé le coefficient de détermination. Dans plusieurs situations, on tombe dans un cas de surapprentissage où l'erreur de validation est inférieure à l'erreur d'apprentissage (Chu et al., 2021).

Après la validation du modèle ou bien la configuration dans le cas échéant (modifier : nombre de couches cachées, nombre de neurones, algorithme d'apprentissage, etc.) on passe à la partie d'estimation dans laquelle on introduit au RN de nouvelles données d'entrées et obtient ainsi les résultats du calcul. La méthode de RN bénéficie d'un grand avantage qu'elle est capable de gérer la non-linéarité entre les données exploitées tandis que d'autres méthodes telles que la régression linéaire sont basées sur l'existence des relations linéaires entre les variables ce qui

peut biaiser le résultat du calcul. Par contre, un RN a un inconvénient connu c'est qu'il est un boîtier noir dont on ne peut suivre au moindre détail ce qui se passe à l'intérieur de lui (Oliveira et al., 2019).

Parmi les grands défis qu'un concepteur de RN fait face est : le choix de la structure du réseau tel que données d'entrées, nombre de nœuds, nombre de couches et les paramètres du réseau tels que la fonction d'activation, le poids des liaisons, l'algorithme d'apprentissage. Il existe plusieurs types d'algorithmes d'apprentissage comme celui de Widrow-Hoff ou rétropropagation du gradient. Plusieurs travaux d'estimation des déchets municipaux font l'objet d'un modèle de réseau de neurones. Généralement, les données d'entrées exploitées sont de type socioéconomique et démographique.

Kumar et al. (2018) ont développé trois méthodes d'estimation des déchets de plastique dont le RN est un d'eux et les ont appliquées dans un cas d'étude en Inde. Quatre paramètres socioéconomiques sont utilisés comme entrées dans cet article à savoir le niveau d'éducation, la profession, le revenu annuel et le type de maison dans laquelle habite chaque famille. Des données ont été collectées à travers un sondage vu l'absence des bases de données gouvernementales qui regroupent ce type de données. Kannangara et al. (2018) ont développé un modèle d'estimation basée sur le RN permettant de déterminer les quantités des déchets solides municipaux en Ontario. Le taux d'emploi, le revenu personnel et le taux de personne ayant plus de 45 ans sont parmi les paramètres considérés dans cet article. La performance du réseau atteint 0,71 comme valeur de R^2 .

À l'échelle nationale, Antanasijević et al. (2013) ont développé un modèle d'estimation des déchets pour la Bulgarie et la Serbie. Des données de 26 autres pays européens ont servi comme données d'apprentissage pour le RN. Tandis que ces travaux cherchent à déterminer la quantité générée, d'autres comme Oliveira et al. (2019) ont réussi à obtenir le ratio de génération de déchets par habitant et par année et qu'il suffit de le multiplier par le nombre de la population pour obtenir la quantité des déchets recherchée. Le taux d'urbanisation ainsi que l'accès au service de collecte municipale sont parmi les paramètres considérés dans cet article.

Des paramètres d'entrée comme les émissions de CO₂, la consommation d'alcool par habitant et le budget que chaque touriste dépense sont parmi les données exploitées dans le travail de Adamović et al. (2017). Les données incomplètes s'opposent à la réalisation des modèles basée sur les données sur le RN et c'est pour cette raison que Ribic et al. (2019) ont développé deux RN : un pour compléter les failles dans la base de données des indicateurs socioéconomiques et le deuxième pour déterminer les quantités des déchets municipaux au Zagreb, Croatie.

À l'échelle temporelle et contrairement à tous les articles évoqués, le RN peut être utilisée pour déterminer des quantités générées non seulement annuelles, mais aussi saisonnières (Abbasi, Rastgoo, & Nakisa, 2019) ou même mensuelles (Abbasi & Hanandeh, 2016). Tous ces articles se basent sur la méthode essai-erreur « trial and error » pour la détermination du nombre de neurones des couches cachées ou même le nombre des couches cachées elles-mêmes. Il n'existe pas des règles générales pour la détermination de ces paramètres : ce sont juste des opérations de tests et de modifications qui sont faites afin d'aboutir à la configuration optimale du RN (Hegazy, Fazio, & Mosehli, 1994).

Comme l'intérêt de ce projet est de faire la liaison de la logistique inverse avec les méthodes d'IA, on ne peut pas évaluer ces deux champs d'intérêt séparément. L'analyse de la littérature concernant le sujet de ce projet a démontré deux lacunes : une au niveau de la forme et l'autre au niveau du contenu.

Au niveau de la forme, les travaux regroupant l'utilisation de l'IA comme outil pour combler le manque de données dans les modèles d'optimisation sont peu présents. Surtout pour les problèmes dédiés au traitement des déchets. Les travaux d'estimation des quantités de déchets à travers l'IA sont existants depuis des dizaines d'années. De même pour le développement des modèles d'optimisation pour gérer les réseaux de logistique inverse. Mais les exploiter ensemble dans un même projet ce n'est pas encore l'objet de plusieurs articles dans la littérature. Dans ce contexte, ce projet est mis en place pour combler cet écart. Surtout que dans cette ère de données massives, projeter l'avenir et déterminer les tendances futuristes n'est

plus un luxe, mais une nécessité. Aussi développer des modèles d'optimisation avec des trous au niveau des données ça ne permet pas d'aboutir à des résultats fiables.

En matière de contenu, on ne voit pas une grande présence de la flexibilité dans la configuration d'une des entités du réseau de logistique inverse au moins pour le plastique. La majorité des articles abordent des sujets avec des types de décisions tels que flux, localisation, technologie adoptée. Mais donner la possibilité aux centres de devenir plus flexibles, ça n'a pas encore été largement étudié dans la littérature.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Après avoir introduit le projet, son contexte et ses problématiques, nous avons enchainé par une revue de littérature pour proposer un bilan sur les études menées en rapport avec l'idée du projet. Ensuite, nous présentons dans ce chapitre les modèles constitutifs du projet : le modèle d'estimation des déchets du plastique au Québec et le modèle d'optimisation auquel sont injectées les quantités des déchets résultantes du modèle d'estimation.

3.1 Enchainement du projet

On va essayer par le présent modèle d'optimisation de migrer de la configuration fixe du RLI (situation actuelle) qui se manifeste par des centres de recyclages spécialisés c'est-à-dire qui ne traitent qu'un ou quelques types de plastique vers la configuration flexible (situation souhaitée) permet aux centres de recyclage d'être plus général et traiter les différents types du plastique.

La méthodologie correspond au développement d'un modèle d'optimisation qui a pour but d'injecter la notion de flexibilité dans un échelon du réseau et déterminer sa performance à la suite de cette décision. Les quantités de déchets pour la prochaine année sont déterminées par un modèle de prédiction développé par un outil d'intelligence artificielle. Des paramètres d'entrées seront considérés pour le modèle de prédiction. Les combinaisons des variations de ces paramètres constituent un scénario. Pour k variations possibles de chaque paramètre avec m le nombre des paramètres considérés on obtient m^k scénarios. Chaque scénario aurait une probabilité de réalisation ce qui fait que la somme totale de ces probabilités est égale à un.

À la suite de cette introduction du modèle de prédiction dans le modèle d'optimisation, il y aura un recours à la programmation stochastique à travers une étude de scénarios. Des cas d'études seront analysés dans ce projet : chaque cas d'étude va comporter un ratio de recyclage versus enfouissement qui peut prendre la valeur : 30/70, 35/65, 40/60, etc. Pour chacun des cas

on va appliquer les m^k scénarios d'approvisionnement en déchets dans le modèle d'optimisation. La programmation par analyse de scénario permet dans sa fonction objectif de déterminer les décisions les plus robustes telles que les décisions d'application ou ne pas de la flexibilité ou bien le nombre de produits à traiter dans chaque centre de recyclage.

Ces décisions ne prennent pas en considération les variations dans les scénarios. Les autres décisions telles que les flux acheminés entre les centres peuvent être affectés par la variation des scénarios parce qu'ils sont capables de s'altérer grâce à leurs caractères dynamiques. C'est pour cette raison que les composants de la fonction objectif en rapport avec les décisions robustes ne seront pas multipliés par la probabilité de chaque scénario tandis que les décisions flexibles les seront.

Un tableau explicatif de la manière avec laquelle les scénarios vont être exploités dans ce projet est présenté ci-dessous.

Tableau 3.1 Cas d'étude généré et introduit dans le modèle d'optimisation

Pourcentage recyclage versus enfouissement	Modèle d'optimisation incluant les scénarios de génération des déchets
Cas d'étude 1 : 70/30	$MIN Z = \sum_{s=1}^{s=n} \text{décision fixe} + \sum_{s=1}^{s=n} P_s \times [\text{décisions flexibles}]$
Cas d'étude 2 : 65/35	$MIN Z = \sum_{s=1}^{s=n} \text{décision fixe} + \sum_{s=1}^{s=n} P_s \times [\text{décisions flexibles}]$
Cas d'étude n : .../...	$MIN Z = \sum_{s=1}^{s=n} \text{décision fixe} + \sum_{s=1}^{s=n} P_s \times [\text{décisions flexibles}]$

Le ratio de recyclage va être supposé comme étant la demande du marché secondaire du plastique recyclé. C'est-à-dire toutes les quantités recyclées trouvent bel et bien des débouchés. Ceci peut être argumenté par la multitude de nouveaux produits conçus chaque année comme étant des produits verts, c'est-à-dire fabriqués pour être recyclés ou bien par des composants, qui ont été déjà recyclés. Autre point argumentatif dans cette hypothèse forte, c'est que dans la vision du gouvernement, les manufacturiers responsables de la fabrication de ces produits vont être amenés, à soutenir le recyclage et même le financer. En contrepartie, ils auront le privilège d'exploiter le plastique recyclé dans le processus de fabrication comme étant une

matière première. Une image explicative de la démarche suivie pour l'accouplement des deux modèles dans ce projet est présentée ci-dessous.

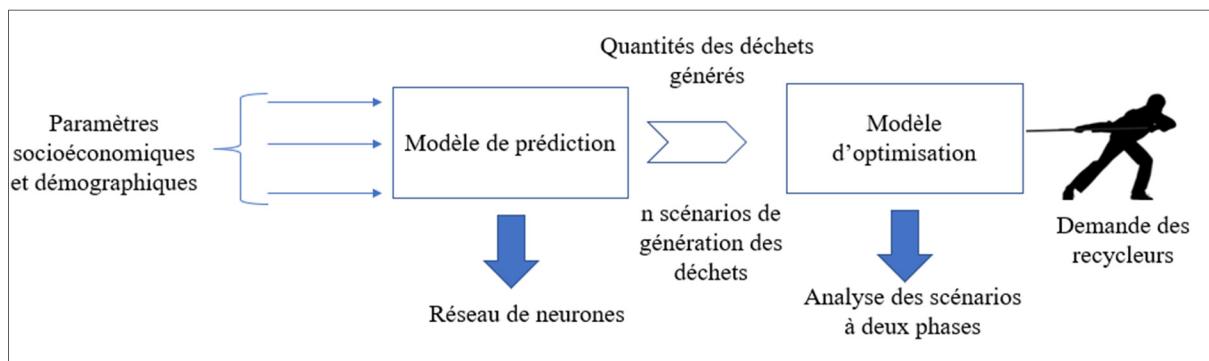


Figure 3.1 Liaison entre le modèle d'estimation et modèle d'optimisation

3.2 Modèle d'estimation basée sur l'intelligence artificielle : Réseau des neurones

La quantité des déchets générés par les ménages s'accroît de façon substantielle d'une année à l'autre (Kannangara et al., 2018). Ceci présente à la fois une grande occasion et des défis aux preneurs de décisions d'exploiter ces immenses quantités dans ce qu'on appelle l'économie circulaire. Le besoin d'instaurer un système de gestion des déchets est donc crucial pour promouvoir l'économie circulaire. Le plastique un des éléments le plus présents dans les bacs des Québécois est étudié dans cette recherche. Grâce à sa légèreté, son faible cout de production et sa durabilité, il est parmi les matériaux les plus consommés dans tous les domaines (Canada, 2019).

Une projection précise des futures quantités de déchets des plastiques est importante pour une planification efficace d'un système de gestion des déchets du plastique. Un recours aux techniques de prédiction demeure donc nécessaire. Pratiquement toutes les techniques font appel aux données historiques que ce soit de la variable à prédire ou bien les variables indépendantes nécessaires à la prédiction de cette dernière. Le réseau de neurones, une des techniques les plus répondues, nécessite à son tour des bases de données pour s'exécuter de façon convenable. Le problème que cette étude affronte contrairement aux autres recherches c'est la décentralisation et la multitude des sources de données pour la projection des quantités

des déchets de plastique générés par les ménages. La méthodologie amenant aux choix des variables indépendantes du modèle du réseau de neurones parmi toutes les variables potentielles qui peut être utilisée est expliquée dans la section suivante. Puis le traitement, la préparation et l'exploitation de ces données sont réalisés pour estimer la quantité des déchets du plastique générés pour les prochaines années au Québec.

3.2.1 Choix des données à considérer dans le réseau des neurones

3.2.1.1 Triangulation et choix des paramètres

La transformation vers un déchet est l'étape qui succède la phase d'utilisation/consommation /exploitation d'un produit donc à travers ce raisonnement on peut définir une relation liant la génération des déchets avec des indicateurs décrivant la consommation d'un produit donné par les ménages appelés aussi donnés socioéconomiques (Maheu et al., 1999). D'un point de vue mathématique, plus que le nombre de sources de génération des déchets augmente (ménages dans notre cas) plus qu'on obtient des déchets. Ceci nous emmène à un autre type de paramètres ou indicateur qui permet l'étude quantitative et qualitative des caractéristiques de la population appelée aussi données démographiques (Galvez-cloutier, 2012).

En se servant de ces deux idées, on a pu commencer la recherche des données nécessaire pour le réseau des neurones. La triangulation est une méthode qualitative de recherche des données qui cherche à valider, contester ou étendre les découvertes existantes (Turner & Turner, 2010). Elle est censée confirmer un résultat en montrant que les mesures indépendantes qu'on en a faites vont dans le même sens, ou au moins ne contredisent pas la littérature (Miles & Huberman, 2003).

Dans ce projet on va exploiter cet outil pour dégager les paramètres socioéconomiques et démographiques les plus utilisés dans la littérature, qui couvrent le problème de prédiction des déchets du plastique. Afin de mieux présenter les résultats de la recherche, un tableau récapitulatif est ainsi réalisé. Le tableau comporte en colonne les différents paramètres socioéconomiques et démographiques abordés par les chercheurs et en ligne les articles eux-

mêmes. À la fin du tableau, une ligne est créée contenant le score de chaque paramètre. Ce score décrit réellement l'occurrence de chaque paramètre sur tous les articles scientifiques que nous avons traité. On a pris 8 ans comme la durée du plus ancien article à sélectionner.

Tableau 3.2 Paramètres socioéconomiques et démographiques utilisés dans certains articles

	PO P	P U	PI B	CIA M	TM F	R	E D	T E	E	DPO P	CO 2	T M	T T
(Antanasijević et al., 2013)			*	*									
(Abbasi & Hanandeh, 2016)	*	*					*						
(Kannangara et al., 2018b)	*					*							
(Ribic et al., 2019)						*							*
(Abbasi et al., 2019)	*		*		*	*	*	*				*	
(Oliveira et al., 2019)	*	*					*						
(Chhay et al., 2018)		*	*					*	*				
(Younes et al., 2015)	*		*					*	*				
(Adamović et al., 2017)	*	*	*	*	*			*		*	*		*
(Ferreira & Oliveira, 2014)										*			*
(Parthasarathy & Narayanan, 2014)	*					*						*	
(Azadi & Karimi, 2015)	*											*	
Score	8	4	5	2	2	4	3	4	2	2	1	3	3

La fouille dans les articles abordant le thème de prédiction des déchets de plastique en utilisant le réseau des neurones permet de dégager 24 paramètres socioéconomiques et démographiques. La ligne intitulée score contient le nombre de fois qu'un paramètre est utilisé

dans tous ces articles. On peut noter que quatre paramètres ont été le plus utilisés dans la littérature en rapport avec notre sujet d'étude. Ces paramètres sont : la population (POP), le taux de la population urbaine (PU), le produit intérieur brut (PIB), le revenu médian après impôt (R) et le taux d'emploi (TE).

Afin que le modèle de prédiction soit développé, les paramètres doivent être indépendants. C'est-à-dire, il ne devrait pas y avoir une corrélation entre ces variables. On peut classer ces paramètres dans le tableau 3.3 comme suit :

Tableau 3.3 Types de paramètres étudiés dans le modèle d'estimation

Type du paramètre	Variable indépendante
Paramètre démographique	Population Taux de population urbaine
Paramètre économique	Produit intérieur brut Revenu annuel médian
Paramètre social	Taux d'emploi

Dans le but d'éviter de se trouver dans une situation de dépendance entre les variables, on a décidé de choisir une variable de chaque type de paramètres c'est-à-dire un paramètre démographique, un économique, et un social. Selon les disponibilités des données, les choix ont été les suivants : Population, Revenu annuel médian et taux d'emploi.

3.2.1.2 Validation du choix des données

Afin de soutenir notre méthodologie et argumenter notre travail de point de vue quantitatif, une analyse de corrélation a été réalisée entre les six paramètres présentés dans la section précédente et la quantité de déchets de plastiques générée chaque année. L'analyse de corrélation permet aussi de dégager les autocorrélations entre les sept paramètres censés être indépendants et qui représentent une source d'erreur.

La corrélation fait référence à la proximité de deux variables ou plus. Dans l'analyse corrélationnelle, l'amplitude et la direction des relations linéaires entre les variables seraient mesurées et la signification statistique doit être testée, où l'hypothèse nulle est qu'il n'y a pas

de relation entre les variables et l'hypothèse alternative est qu'une relation existe (Prematunga, 2012). Il existe des indicateurs permettant de décrire la relation entre des variables comme dans le cas de corrélation de Pearson ou bien Kendall ou bien de Spearman (Sirkin, 2011). Chacune de ces méthodes capture respectivement la relation d'un point de vue différent : corrélation entre les variables, corrélation de rangs entre deux variables, dépendance statique non paramétrique entre deux variables (Polit, 2010).

Nous avons choisi la méthode la plus simple et la plus utilisée qui est celle de Pearson. Ce coefficient appelé aussi (r de Pearson) fournit une mesure de l'amplitude et de la direction d'une relation linéaire. Les valeurs du r de Pearson varient entre -1 et +1. Une valeur de zéro indique qu'aucune relation linéaire entre les variables n'existe ; -1 indique une relation linéaire négative parfaite et +1 indique une relation linéaire positive parfaite. En pratique, il est peu probable qu'une relation parfaite entre les variables soit observée. Un coefficient négatif indique une relation linéaire négative et un coefficient positif indique une relation linéaire positive (Nettleton, 2014).

Tirée de la publication (Berman, 2016), le coefficient de Pearson entre deux variables X et Y est défini dans l'équation 3.1 par :

$$r = \frac{\text{Covariance}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (3.1)$$

Avec $\text{COV}(X, Y)$ est la covariance entre les deux variables et σ_X et σ_Y sont respectivement les variances de la variable X et de la variable Y . Cette étude permet à la fois de dégager les relations d'indépendances entre les paramètres socioéconomiques et démographiques pour ne pas tomber dans l'autocorrélation entre eux et aussi pour confirmer que les trois paramètres déterminés par la méthode de triangulation (population, revenu, taux d'emploi) et la quantité des déchets de plastique générés sont corrélés.

Un tableau récapitulatif est ainsi développé regroupant les valeurs du coefficient du Pearson pour les six paramètres socioéconomiques / démographiques et les quantités des déchets de plastique générées au Québec.

Tableau 3.4 Coefficient de Pearson entre les variables indépendantes et la quantité des déchets générés et entre les variables elles-mêmes

	Pop	Pop urbaine	PIB	Taux d'emploi	Taux de chômage	Pouvoir d'achat	Revenu médian	Quantité
Pop		0,98	0,97	-0,11	-0,51	-0,69	0,96	-0,58
Pop urbaine	0,98		0,93	-0,2	-0,41	-0,73	0,91	-0,7
PIB	0,97	0,93		0,11	-0,69	-0,55	1	-0,47
Taux d'emploi	-0,11	-0,2	0,11		-0,79	0,67	0,14	0,41
Pouvoir d'achat	-0,69	-0,73	-0,55	0,67	-0,16		-0,49	0,56
Revenu médian	0,96	0,91	1	0,14	-0,71	-0,49		-0,43

Ce tableau confirme les choix faits à travers la méthode de triangulation : en effet, il existe une relation de corrélation entre la quantité de déchets de plastique générés et les 3 paramètres choisis : population (-0,58), taux d'emploi (0,41) et le revenu médian (-0,43).

Aussi ce tableau confirme la justesse du choix d'élimination de certains paramètres en raison de leurs autocorrélations. Un exemple ce problème se manifeste entre les deux paramètres : population et taux de population urbaine, où on voit qu'ils sont fortement corrélés avec une valeur de $r = 0,98$.

En ne prenant en compte que ce genre de situation, les résultats du modèle seront automatiquement biaisés. La carte de fréquentation présentée dans la figure 3.2 confirme les données du tableau où on voit que les 3 paramètres sont corrélés avec la quantité des déchets générés.

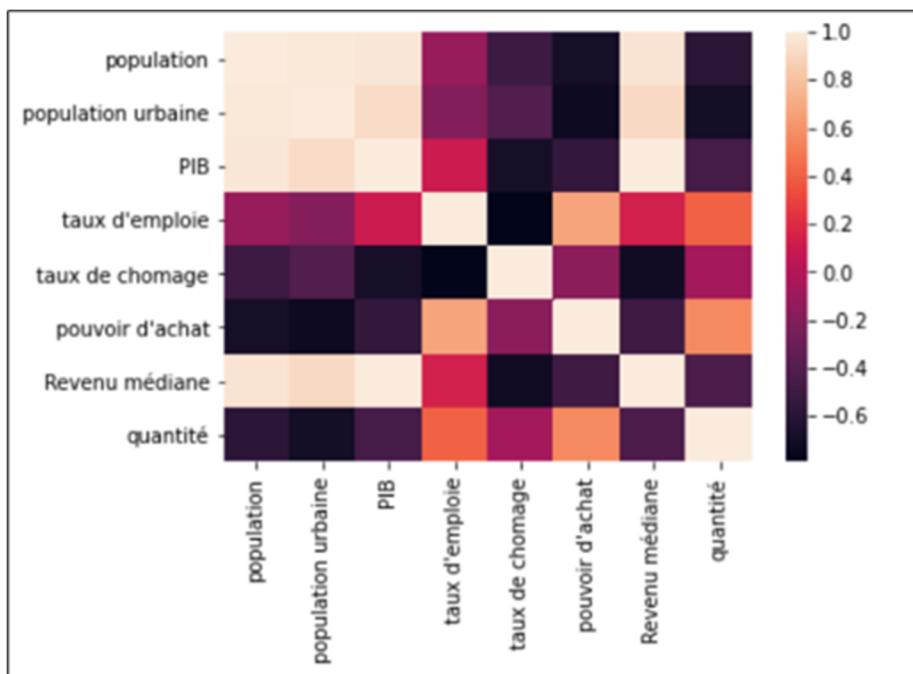


Figure 3.2 Carte de fréquentation des valeurs de coefficient de Pearson entre les différentes variables du modèle d'estimation

Dans le développement du modèle d'estimation, ce n'est pas toute la quantité générée par année de déchets municipaux qui va être utilisée dans le réseau, mais plutôt le ratio de génération par habitant par année qui va être exploitée. C'est-à-dire le résultat du modèle, va être un ratio de génération par personne et il suffit de multiplier ce ratio par la projection du nombre des habitants de chaque municipalité régionale de comté pour l'année prochaine pour obtenir la quantité de déchets générés dans cette MRC (Municipalité régionale de comté).

Ceci est réalisé dans le but de déterminer les déchets générés pour chaque MRC vu qu'on va exploiter ces résultats dans un réseau de logistique inverse. Chaque région diffère à l'autre par sa population, ses établissements de traitements des déchets, son accessibilité au moyen de transport, donc on a intérêt à déterminer ce que chaque région génère plutôt que la quantité globale de toute la province.

3.3 Modèle d'optimisation pour la configuration spécialisée basée sur les résultats du modèle de prédition

Comme la figure 3.3 montre, le processus du traitement des déchets ménagers au RLI du Québec est déclenché par une opération de collecte des déchets. Les municipalités seront les responsables de cette opération que ce soit directement par leurs services de collecte ou à travers une sous-traitance. Ensuite, les déchets collectés seront envoyés à l'opération suivante qui est l'opération de tri. Dans cette étape, les différents types de déchets seront dissociés, triés et classés selon le type du matériau et sa qualité.

En se basant sur la condition des déchets triés, le flux sortant des centres de tri vont être divergé entre les recycleurs et les centres d'enfouissement : pour les premiers, une étape conditionnement suivi d'une autre de recyclage vont être réalisées afin que les produits recyclés puissent être exploités dans le marché secondaire. Le reste des déchets va être envoyé à l'enfouissement.

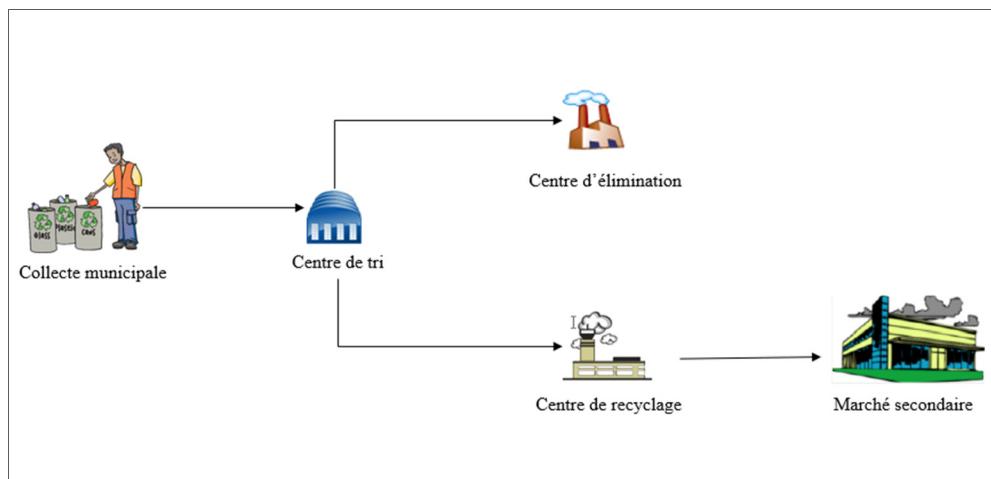


Figure 3.3 Cartographie du réseau de logistique inverse pour le traitement des déchets au Québec

Dans cette section, un modèle d'optimisation linéaire pour le réseau de logistique inverse du plastique au Québec sera présenté. La configuration spécialisée sera présentée dans cette section. C'est un réseau multiéchelon, dont on cherche à minimiser la somme des couts (cout de transport, cout de traitement...), et à évaluer ses émissions de GES. Le modèle aborde aussi la programmation stochastique à travers une étude des scénarios générés par le modèle

d'estimation. Des hypothèses non réalistes portant sur les couts de traitements et capacité des centres sont prises pour remédier au problèmes de manque de données : ce sont des données confidentielles que les centres refusent de les divulguer.

3.3.1 Hypothèses

Dans cette partie, les hypothèses applicables sur les deux configurations sont présentées comme suit.:

- Le plastique mixte est collecté des MRC et envoyé aux centres de tri
- Aux centres de tri, les opérations de tri et dissociation sont faites et le plastique mixte se transforme en sept types de plastique
- Le plastique trié est envoyé aux centres de recyclage selon leurs spécialités. Le reste est envoyé aux centres d'enfouissement.
- Les centres de tri ont le même cout de traitement unitaire
- Les centres de recyclage ont le même cout de traitement unitaire
- Les centres d'enfouissement ont le même cout de traitement unitaire
- Les centres de tri et de recyclage ont une capacité finie
- Les centres d'enfouissement ont une capacité infinie
- Le modèle est uni période pour un horizon d'une année
- Le marché secondaire constitue toutes les activités industrielles qui exploitent les sept types du plastique recyclé. Il existe un seul marché secondaire.
- Le marché secondaire a une demande pour chaque type de plastique et qui est représentée par un pourcentage de la quantité des déchets du plastique générés (80/20, 70/30, 60/40). Ces ratios peuvent être considérés aussi comme les ratios de recyclage/enfouissement puisque par hypothèse les produits recyclés trouvent des débouchés dans le marché secondaire dans le cadre de stimulation du procédé de recyclage et l'économie circulaire par le gouvernement
- Seul le transport terrestre est exploité dans ce modèle.

- La performance économique est mesurée dans ce modèle à travers la minimisation des coûts liés au transport terrestre entre les nœuds et les coûts liés au traitement du plastique dans chaque centre du réseau
- La performance environnementale est représentée dans le modèle par l'évaluation des émissions survenues du transport entre les nœuds et les traitements au sein des différents centres du réseau.

Elles sont proportionnelles aux quantités transportées et aux kilométrages parcourus pour les émissions du transport et aux quantités traitées dans chaque centre pour les émissions de la production. On s'est intéressé au scope 1 et scope 3 (US EPA, n.d.) pour quantifier les émissions en liaison directe avec les activités de toute la chaîne. Les émissions qui appartiennent au scope 2 sont considérées comme des émissions indirectes et aussi sont compliquées à les modéliser et quantifier. Par la suite, ne va pas les considérer dans le modèle et donc les émissions résultantes des activités de tri ne sont pas prises en compte. Ces hypothèses sont valables pour la configuration flexible. Par souci de simplicité, on ne va pas les représenter dans la définition du modèle d'optimisation de la configuration flexible.

3.3.2 Ensembles et indices

N Ensemble des nœuds du réseau

$m \in M$ Ensemble des MRC ($\subset N$)

$s \in S$ Ensemble des centres de tri ($\subset N$)

$r \in R$ Ensemble des centres de recyclage ($\subset N$)

$I \in L$ Ensemble des centres de décharge ($\subset N$)

F Marché secondaire ($\subset N$)

$p \in P$ Ensemble des produits (plastiques) : de un à sept types de plastique

w Plastique mixte généré par les ménages

$u \in U$ Ensemble des scénarios

$k \in K = w \cup P$

$i, j \in N$ Nœuds du réseau

$Y \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$

3.3.3 Paramètres

T : Cout de transport entre les nœuds par Km et par tonne de produit transporté

C_S : Cout de traitement unitaire au centre de tri (\$/tonne)

C_R : Cout de traitement unitaire au centre de recyclage (\$/tonne)

C_L : Cout de traitement unitaire au centre d'enfouissement (\$/tonne)

Z_S : Capacité de traitement annuel pour un centre de tri

Z_R : Capacité de traitement annuel du centre de recyclage r

Z_L : Capacité de traitement annuel pour un centre d'enfouissement

π_p : Proportion de conversion de chaque type de plastique (1 à 7) à partir du plastique mixte

Q_{mu} : Quantité de déchets mixtes du plastique collectés au MRC m dans le scénario u

H_p : Demande du produit recyclé p (1 à 7) dans le marché secondaire

P_u : Probabilité de réalisation du scénario u

D_{ij} : Distance entre les nœuds i,j en km

E_T : Quantité de CO2 émise liée au transport (tonne CO2 eq/ km)

E_R : Quantité de CO2 émise liée au traitement au centre de recyclage (tonne CO2 eq/ tonne de plastique traités)

E_L : Quantité de CO2 émise liée au traitement au centre d'enfouissement (tonne CO2 eq/ tonne de plastique traités)

S_{rp} Paramètre binaire décrivant la spécialité de chaque centre par rapport aux produits traités

Pour chaque centre de recyclage, ces valeurs sont initialisées par la configuration actuelle :

$S_{rp} : \begin{cases} 1 & \text{si le centre de recyclage } r \in R \text{ traite le produit } p \in P \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

3.3.4 Variables de décision

Continus

x_{wmsu} : Quantité de plastique mixte envoyé du MRC m $\in M$ au centre de tri s $\in S$ en scénario u $\in U$

x_{psru} : Quantité de plastique p (1 à 7) envoyé du centre de tri s $\in S$ au centre de recyclage r $\in R$ en scénario u $\in U$

x_{pslu} : Quantité de plastique p (1 à 7) envoyé du centre de tri s ∈ S au centre de décharge l ∈ L en scénario u ∈ U

x_{prFu} : Quantité de plastique p (1 à 7) envoyé du centre de recyclage r ∈ R au marché secondaire F

x_{kiju} : Quantité de différents produits k ∈ K envoyé à partir des différents nœuds i ∈ I vers j ∈ J du réseau pour en scénario u ∈ U avec $i \neq j$

3.3.5 Fonction objectif

MIN Cout total :

$$\sum_{u \in U} P_u \left[C_s \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{wmsu} + C_R \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} x_{psru} + C_L \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} x_{pslu} \right] \quad (3.2)$$

Émission environnementale :

$$\sum_{u \in U} P_u \left[\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} E_T D_{ij} x_{kiju} + E_R \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} x_{psru} + E_L \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} x_{pslu} \right] \quad (3.3)$$

L'équation (3.2) cherche à minimiser les couts de toutes les activités de la chaîne de logistique inverse (transport, tri, recyclage et enfouissement). L'équation (3.3) permet d'évaluer la performance environnementale en ce qui concerne les émissions des GES qui correspondent à toutes les activités du réseau.

3.3.6 Contraintes

3.3.6.1 Contraintes de conservation de flot

$$\sum_{s \in S} x_{wmsu} = Q_{mu} \cdot \pi_p \quad \forall: u \in U; m \in M; p \in P \quad (3.4)$$

$$\sum_{r \in R} x_{prFu} = H_p \quad \forall: u \in U; p \in P \quad (3.5)$$

$$\sum_{m \in M} x_{wmsu} = \sum_{r \in R} x_{psru} S_{rp} + \sum_{l \in L} x_{pslu} \quad \forall: u \in U; p \in P; s \in S \quad (3.6)$$

$$\sum_{s \in S} x_{psru} = x_{prFu} \quad \forall: u \in U; r \in R; p \in P \quad (3.7)$$

Les contraintes du modèle sont expliquées comme suit : la contrainte (3.4) assure que la quantité envoyée entre une MRC et tous les centres de tri est égale à la quantité de déchets de plastique mixte collectés dans cette MRC. La contrainte (3.5) oblige que la quantité envoyée d'un type de plastique recyclé à partir de tous les recycleurs vers le marché secondaire égale à la demande de dernier. La contrainte (3.6) assure à la fois la conversion du déchet mixte arrivée au centre du tri en sept types de plastique et aussi la conservation des flux entre centre de tri d'un côté et centre de recyclage et d'enfouissement de l'autre côté. La contrainte (3.7) montre que les produits reçus chez les conditionneurs sont tous envoyés au marché secondaire.

3.3.6.2 Contraintes de capacité

$$\sum_{m \in M} x_{wmsu} \leq Z_S \quad \forall: u \in U; s \in S \quad (3.8)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} x_{psru} \leq Z_R \quad \forall: u \in U; r \in R \quad (3.9)$$

Les contraintes (3.8) et (3.9) assure le respect des capacités au niveau de chaque centre de tri et chaque centre de recyclage respectivement.

3.3.6.3 Contraintes de non-négativité et d'intégralité

$$x_{kiju} \in R^+ \text{ avec } R^+ = \{X \in R, X \geq 0\} \forall: u \in U; k \in K; i \in I; j \in J \quad (3.10)$$

$$S_{rp} \in \{0,1\} \forall: r \in R; p \in P \quad (3.11)$$

Les deux dernières contraintes (3.10) et (3.11) sont de non-négativité et d'intégralité.

3.4 Modèle d'optimisation pour la configuration flexible basée sur les résultats du modèle de prédition

Dans cette section, un modèle d'optimisation linéaire pour le réseau de logistique inverse du plastique au Québec sera présenté. C'est un réseau multiéchelon dont on cherche à minimiser la somme des couts (cout de transport, cout de traitement...), évaluer ses émissions de GES et calculer la flexibilité des centres de recyclage. Le modèle aborde aussi la programmation stochastique à travers une étude des scénarios générés par le modèle de prédition.

3.4.1 Flexibilité

La flexibilité est appliquée sur une des deux configurations et c'est pour cette raison que ces hypothèses sont présentées seules dans cette section.

- La flexibilité des centres de recyclage est définie par les types de plastique que chaque centre est capable de traiter.
- Chaque centre de recyclage admet comme paramètre une flexibilité. Cette flexibilité varie d'un centre à un autre selon les technologies qu'il adopte et les procédés industriels utilisés dans le recyclage. La valeur varie entre zéros et un.
- Par cette définition on cherche à établir la liaison entre la flexibilité et la productivité au sein de chaque centre de recyclage
- Chaque centre admet une courbe décrivant la perte de capacité en fonction de nombres des produits traités : la perte de capacité à la suite des traitements d'un ou plusieurs nouveaux produits varie d'un centre à un autre. Un centre est 100 % flexible c'est-à-

dire qu'il est capable de traiter les sept produits, mais il y aura une perte de la capacité. Tandis qu'un centre 0 % flexible c'est-à-dire, il ne traite qu'un seul produit, mais sans perte de capacité.

Intuitivement, l'ajout d'un ou deux nouveaux produits à un centre qui initialement traite un seul produit cause une perte de productivité plus intense que l'ajout de trois ou plus de produits. Après une certaine valeur de perte de capacité suite à l'ajout de nouveaux produits, un centre devient plus général et mature et il serait prêt à traiter de nouveaux produits. C'est la phase initiale perturbante causée par l'ajout d'un nouveau produit qui cause plus de pertes.

Après une certaine expérience, plus qu'on ajoute de produits plus qu'une certaine stabilité va être créée et le niveau de perte de productivité diminue jusqu'à ce qu'il demeure presque constant. En se servant de cette logique, on peut définir la courbe de chaque centre de recyclage comme le montre la figure 3.4.

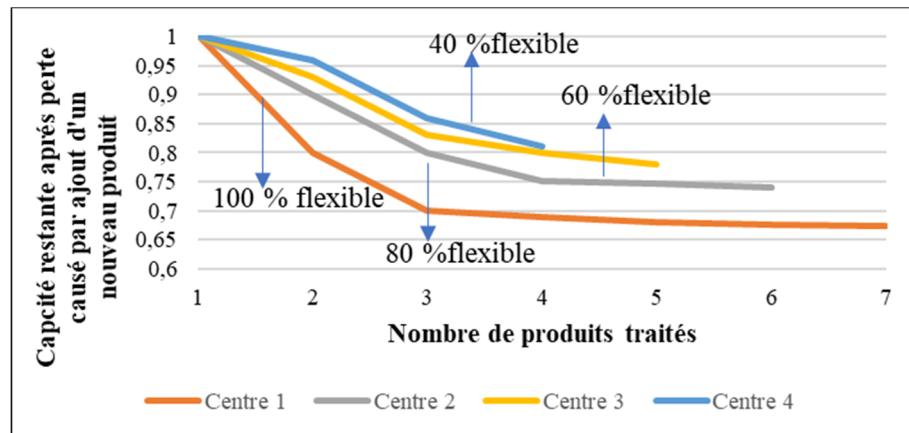


Figure 3.4 Variation de la perte de capacité en fonction du nombre de produits traités

- Les flexibilités de chaque centre sont sommées pour pouvoir déterminer la fonction objectif décrivant la flexibilité du réseau.
- Un compromis va être réalisé par le modèle afin de maximiser la flexibilité tout en gardant un niveau de productivité capable de traiter les demandes des produits recyclés.

- Les investissements nécessaires pour cette transformation vers des centres de recyclage flexibles ne sont pas inclus dans le modèle parce que le modèle aborde une planification tactique et non stratégique.

3.4.2 Ensembles et indices

N Ensemble des nœuds du réseau

$m \in M$ Ensemble des MRC ($\subset N$)

$s \in S$ Ensemble des centres de tri ($\subset N$)

$r \in R$ Ensemble des centres de recyclage ($\subset N$)

$I \in L$ Ensemble des centres de décharge ($\subset N$)

F Marché secondaire ($\subset N$)

$p \in P$ Ensemble des produits (plastiques) : de 1 à 7 types de plastique

w Plastique mixte généré par les ménages

$u \in U$ Ensemble des scénarios

$k \in K = w \cup P$

$i, j \in N$ Nœuds du réseau

$Y \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$: l'ensemble contenant le nombre de produits traités que chaque centre de recyclage peut avoir.

3.4.3 Paramètres

T : Cout de transport entre les nœuds par Km et par tonne de produit transporté

C_S : Cout de traitement unitaire au centre de tri (\$/tonne)

C_R : Cout de traitement unitaire au centre de recyclage (\$/tonne)

C_L : Cout de traitement unitaire au centre d'enfouissement (\$/tonne)

Z_S : Capacité de traitement annuel pour un centre de tri

Z_R : Capacité de traitement annuel du centre de recyclage

Z_L : Capacité de traitement annuel pour un centre d'enfouissement

π_p : Proportion de conversion de chaque type de plastique (1 à 7) à partir du plastique mixte

Q_{mu} : Quantité de déchets mixtes du plastique collectés au MRC m dans le scénario u

H_p : Demande du produit recyclé p (1 à 7) dans le marché secondaire

P_u : Probabilité de réalisation du scénario u

D_{ij} : Distance entre les nœuds i,j en km

E_T : Quantité de CO2 émise liée au transport (tonne CO2 eq/ km)

E_R : Quantité de CO2 émise liée au traitement au centre de recyclage (tonne CO2 eq/ tonne de plastique traités)

E_L : Quantité de CO2 émise liée au traitement au centre d'enfouissement (tonne CO2 eq/ tonne de plastique traités)

S_{rp} : Paramètre binaire décrivant la spécialité de chaque centre par rapport aux produits traités

Pour chaque centre de recyclage, ces valeurs sont initialisées par la configuration actuelle :

$$S_{rp} : \begin{cases} 1 & \text{si le centre de recyclage } r \in R \text{ traite le produit } p \in P \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$flex_r$: Flexibilité disponible de chaque centre r selon le nombre de produits qu'il traite

λ_{rn} : Ratio de capacité restante du centre de recyclage r pour toutes les combinaisons possibles du nombre de produits traités

3.4.4 Variables de décision

Continus

x_{wmsu} : Quantité de plastique mixte envoyé du MRC m $\in M$ au centre de tri s $\in S$ en scénario u $\in U$

x_{psru} : Quantité de plastique p (1 à 7) envoyé du centre de tri s $\in S$ au centre de recyclage r $\in R$ en scénario u $\in U$

x_{pslu} : Quantité de plastique p (1 à 7) envoyé du centre de tri s $\in S$ au centre de décharge l $\in L$ en scénario u $\in U$

x_{prFu} : Quantité de plastique p (1 à 7) envoyé du centre de recyclage r $\in R$ au marché secondaire

x_{kiju} : Quantité de différents produits $k \in K$ envoyé à partir des différents nœuds $i \in I$ vers $j \in J$ du réseau pour en scénario $u \in U$ avec $i \neq j$

φ_r : Variable entière qui contient le nombre de produits traités dans le centre r

$Ratio_r$: Ratio de capacité restante du centre de recyclage r en fonction du nombre de produits traité

q_{rp} : Quantité de produit p traité dans le centre r dans tout scénario

θ_r : Flexibilité du centre r déterminé par le modèle après le calcul du nombre de produits à traiter

Binaires

u_{ro} : $\begin{cases} 1 & \text{si le centre de recyclage } r \text{ traite } o \text{ produit} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

β_{rp} : $\begin{cases} 1 & \text{si le centre de recyclage } r \in R \text{ traite le produit } p \in P \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

3.4.5 Fonction objectif

MIN Cout total :

$$\sum_{u \in U} P_u \left[C_s \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} x_{wmsu} + C_R \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} x_{psru} + C_L \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} x_{pslu} \right] \quad (3.12)$$

Émission environnementale :

$$\sum_{u \in U} P_u \left[\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J, i \neq j} E_T D_{ij} x_{kiju} + E_R \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} x_{psru} + E_L \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} x_{pslu} \right] \quad (3.13)$$

Flexibilité :

$$\sum_{r \in R} \theta_r \quad (3.14)$$

Les deux équations (3.12) et (3.13) comme dans le cas de la configuration spécialisée correspondent respectivement aux performances économiques et environnementales. L'évaluation de la flexibilité totale du réseau est faite dans l'équation (3.14).

3.4.6 Constraintes

3.4.6.1 Constraintes de conservation de flot

$$\sum_{s \in S} x_{wmsu} = Q_{mu} \cdot \pi_p \quad \forall: u \in U; m \in M; p \in P \quad (3.15)$$

$$\sum_{r \in R} x_{prFu} = H_p \quad \forall: u \in U; p \in P \quad (3.16)$$

$$\sum_{m \in M} x_{wmsu} = \sum_{r \in R} x_{psru} + \sum_{l \in L} x_{pslu} \quad \forall u \in U; p \in P; s \in S \quad (3.17)$$

$$\sum_{s \in S} x_{psru} = x_{prFu} \quad \forall: u \in U; r \in R; p \in P \quad (3.18)$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{s \in S} x_{psru} = q_{rp} \quad \forall: r \in R; p \in P \quad (3.19)$$

La contrainte (3.15) assure que la quantité envoyée entre une MRC et tous les centres de tri est égale à la quantité de déchets de plastique mixte collectés dans cette MRC. La contrainte (3.16) oblige que la quantité envoyée d'un type de plastique recyclé à partir de tous les recycleurs vers le marché secondaire soit égale à la demande du dernier. La contrainte (3.17) assure à la fois la conversion des déchets mixtes arrivés au centre du tri en sept types de plastique et aussi la conservation des flux entre centre de tri d'un côté et centre de recyclage et d'enfouissement de l'autre côté. La contrainte (3.18) montre que les produits reçus chez les conditionneurs sont tous envoyés au marché secondaire. La contrainte (3.19) permet de calculer la quantité de chaque produit traité dans chaque centre de recyclage. Autrement dit combien chaque centre de recyclage a reçu pour chaque type de plastique.

3.4.6.2 Contraintes de détermination du nombre de produits traités dans les centres

$$\begin{aligned} & \forall r \in R: \\ & \forall p \in P: \\ & q_{rp} = 0 \rightarrow \beta_{rp} = 0 \\ & q_{rp} \neq 0 \rightarrow \beta_{rp} = 1 \end{aligned} \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned} & \forall r \in R: \\ & \varphi_r = \sum_{p \in P} \beta_{rp} \quad \forall p \in P \\ & \sum_{o \in Y} o * u_{ro} = \varphi_r \\ & \sum_{o \in Y} u_{ro} = 1 \\ & Ratio_r = \sum_{o \in Y} \lambda_{ro} * u_{ro} \\ & \theta_r = \sum_{o \in Y} flex_r * u_{ro} \end{aligned} \tag{3.21}$$

La contrainte (3.20) détermine combien de produits un centre de recyclage a traités en utilisant la quantité calculée dans l'équation (3.19). La contrainte (3.21) permet de déterminer la capacité restante de chaque centre de recyclage après la perte de productivité suite au traitement de i nombre de produit.

3.4.6.3 Contraintes de capacité

$$\sum_{m \in M} x_{wmsu} \leq Z_S \quad \forall: u \in U; s \in S \tag{3.22}$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} x_{psru} \leq Z_R Ratio_r \quad \forall: u \in U; r \in R \tag{3.23}$$

La contrainte (3.22) assure le respect de la capacité au niveau de chaque centre de tri. La contrainte (3.23) assure que la quantité de produits envoyés des centres de tri vers un centre de recyclage ne dépasse pas sa capacité restante après la perte causée par l'ajout d'un nouveau produit.

3.4.6.4 Contraintes de non-négativité et d'intégralité

$$x_{kiju} \in R^+ \text{ avec } R^+ = \{X \in R, x \geq 0\} \forall: u \in U; k \in K; i \in N; j \in N \quad (3.24)$$

$$S_{rp}, U_{ri}, \beta_{rp} \in \{0,1\} \forall: r \in R; p \in P; i \in Y \quad (3.25)$$

Les deux dernières contraintes (3.24) et (3.25) sont de non-négativité et d'intégralité.

CHAPITRE 4

EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS

Ce chapitre est consacré aux expérimentations réalisées sur les deux modèles d'optimisation afin de les valider. Une présentation des données exploitées sera faite en premier lieu, puis les résultats vont être exposés avec les interprétations ainsi que les recommandations. On va commencer par le modèle d'estimation où on va présenter les données utilisées ainsi que les résultats obtenus. Ensuite, on procède à la section relative au modèle d'optimisation qui va comporter au début la présentation de ces données pour les deux configurations (paramètres : cout, facteur d'émission, spécialité des centres...). Puis les résultats relatifs à chaque configuration spécialisée et flexible seront présentés séparément. Après, une comparaison des deux configurations est faite pour dégager les avantages et les inconvénients de chacune des deux. À la suite à cette comparaison, une analyse de certaines variables de décision de la configuration flexible est présentée. À la fin des recommandations managériales tirées des interprétations faites seront présentées pour guider les preneurs de décision vers une situation qui réalise l'intérêt public.

4.1 Modèle d'estimation

4.1.1 Données du modèle d'estimation

Conformément aux résultats des deux étapes de triangulation et validation, on a pu déterminer trois variables indépendantes qui seront les données d'entrées du réseau de neurones. Ces paramètres sont : la population, le taux d'emploi et le revenu médian après impôt. Afin de réaliser l'étape d'apprentissage du réseau de neurones, on lui injecte des valeurs historiques de chaque année pour les trois paramètres socioéconomiques et démographiques choisis et la valeur du ratio de génération qui leur correspond chaque année. Ceci permet au réseau d'établir une relation entre ces paramètres d'entrée et le ratio de génération, cette relation peut être linéaire ou non linéaire. Des valeurs de ces paramètres qui s'étalent sur 45 ans (entre 1974 et 2019) sont collectées à partir de Statistique Canada (Statistique Canada, n.d.) seulement pour

la province du Québec. La majorité des valeurs des variables sont exploitées à leurs états bruts, cependant une seule variable qui est celle de sortie (ratio de génération de déchet de plastique par personne et par an) n'est pas obtenue directement de statistique Canada. Elle est calculée à partir d'une autre variable.

La population représente le nombre d'individus qui résident au Québec, quels que soient leurs âges, leurs sexes et leurs statuts de résidence. Le taux d'emploi représente le pourcentage des personnes qui occupent un travail parmi toute la population active. Cette dernière est définie selon (Organisation internationale du travail, n.d.) comme l'ensemble de personnes ayant 15 ans et plus et qui ont travaillé non bénévolement durant une année de référence. Le paramètre revenu représente le revenu médian après impôt pour les individus. Il est calculé sur la population active. Le revenu après impôt est le revenu total moins l'impôt sur le revenu. Pour le ratio de génération des déchets de plastique, il est obtenu par la division de la quantité de plastique généré par année par la population de cette année. La quantité générée est tirée de statistique Canada. Le tableau 4.1 tiré de (Statistique Canada, 2020) représente la variation de paramètres de l'année 2009 jusqu'en 2019. Le tableau complet sera présenté dans l'annexe I

Tableau 4.1 Valeurs des paramètres d'entrées et du paramètre de sortie du réseau de neurones

Année	Population	Taux d'emploi (%)	Revenu (\$)	Ratio de génération (Kg/pers.an)
2009	7799115	59,4	28000	24,6
2010	7885717	59,8	27700	22,2
2011	7967185	59,8	27600	23,8
2012	8029498	59,7	28600	25,5
2013	8082771	60	29100	24,4
2014	8125478	59,5	29700	24,3
2015	8163132	59,8	29300	24,1
2016	8193624	59,8	30000	24,3
2017	8257450	60,8	30700	24,3
2018	8350601	61	30900	22,9
2019	8446906	61,5	31000	22,0

4.1.2 Résultats du réseau de neurones et génération des scénarios

Trois paramètres d'entrées considérés pour le modèle de prédiction : population, taux d'emploi et le revenu. Chaque paramètre peut subir une variation haute, moyenne et faible et la combinaison d'une seule variation de ces trois paramètres constituent un scénario, donc en tous il va y avoir 3^3 c'est-à-dire 27 scénarios regroupés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Combinaison des variations des paramètres d'entrée au réseau de neurones

Variation	Probabilité	Population			Revenu			Taux d'emploi		
		F	M	H	F	M	H	F	M	H
SC1	0,015625	×			×			×		
SC2	0,03125	×			×				×	
SC3	0,015625	×			×					×
SC4	0,03125	×				×		×		
SC5	0,0625	×				×			×	
SC6	0,03125	×				×				×
SC7	0,015625	×					×	×		
SC8	0,03125	×					×		×	
SC9	0,015625	×					×			×
SC10	0,03125		×		×			×		
SC11	0,0625		×		×				×	
SC12	0,03125		×		×					×
SC13	0,0625		×			×		×		
SC14	0,125		×			×			×	
SC15	0,0625		×			×				×
SC16	0,03125		×				×	×		
SC17	0,0625		×				×		×	
SC18	0,03125		×				×			×
SC19	0,015625			×	×			×		
SC20	0,03125			×	×				×	
SC21	0,015625			×	×					×
SC22	0,03125			×		×		×		
SC23	0,0625			×		×			×	
SC24	0,03125			×		×				×
SC25	0,015625			×			×	×		
SC26	0,03125			×			×		×	
SC27	0,015625			×			×			×

La variation moyenne admet comme probabilité 0,5 alors que les variations haute et faible admet chacune 0,25 comme valeur de probabilité de réalisation. La probabilité de chaque scénario est obtenue de la multiplication des 3 probabilités d'apparition de variation de chaque paramètre seul. Comme tout modèle supervisé, les données à exploiter dans le réseau de neurones devraient être séparées en : données d'apprentissage et données de validation.

L'étape d'apprentissage est réalisée pour que le modèle s'exerce et apprend les différentes relations entre les données alors que celle de la validation permet au modèle d'examiner ces acquis à propos des données. La séparation se fait de façon que le ratio des données d'apprentissage soit plus grand à celui du test parce que c'est la partie la plus importante dans le processus de prédiction. Dans la littérature les chercheurs ont utilisé les ratios: 80:20, 70:30, 60:40, etc. Dans notre projet, on va tester ces combinaisons pour déterminer celle qui donne le meilleur résultat.

La métrique qu'on a adoptée pour déterminer la performance du modèle de classification est la précision de classification « accuracy »: c'est un ratio de l'ensemble d'étiquettes prédites vraies par rapport aux nombres d'étiquettes réels connus à l'avance. Ce score est calculé pour l'apprentissage et le test. Idéalement plus qu'il est proche de 1, plus que la prédiction est précise, mais aussi il ne faut pas tomber dans le surapprentissage où le score du test est plus élevé de celui de l'apprentissage.

Le modèle est développé sur « jupyter notebook » de python. L'algorithme « MLPClassifier » de la bibliothèque « sklearn.neural_network » est utilisé pour notre projet : c'est un algorithme d'apprentissage supervisé, implémente un perceptron multicouche «MLP» qui réalise l'étape d'apprentissage à l'aide de la rétropropagation. Pour des raisons de simplification, on va fixer quelques paramètres du modèle comme: fonction d'activation à « relu », solveur à «lbfgs», et taux d'apprentissage à « constant » avec un taux d'apprentissage initial égal à 0,01.

Pour garantir une configuration optimale du réseau de neurones, un processus d'essai-erreur « trial and error » est ainsi appliqué pour permettre de déterminer les valeurs optimisées des neurones et le ratio de division optimale entre la partie des données consacrée à l'apprentissage

et celle à la validation. La couche d'entrée contient trois neurones puisqu'on a déterminé trois paramètres indépendants et la couche de sortie va comporter un seul neurone c'est celui du ratio de génération des déchets de plastique par personne et par an. Le tableau 4.3 décrit une partie des combinaisons obtenues pour les paramètres du modèle qu'on a essayé de les varier pour déterminer la configuration optimale. Les résultats complets sont présentés dans l'annexe I.

Tableau 4.3 Performance du réseau de neurones pour de différentes configurations

	Configuration des neurones	Division apprentissage /test	Précision apprentissage	Précision test
1	(3-1-1)	70 :30	0,66	0,67
2	(3-2-1)	70 :30	0,84	0,82
3	(3-3-1)	70 :30	0,85	0,85
4	(3-4-1)	70 :30	0,85	0,84
5	(3-5-1)	70 :30	0,83	0,83
6	(3-6-1)	70 :30	0,85	0,85
7	(3-7-1)	70 :30	0,83	0,82
8	(3-8-1)	70 :30	0,84	0,82
9	(3-9-1)	70 :30	0,86	0,84
10	(3-10-1)	70 :30	0,83	0,82

Comme on peut voir dans le tableau 4.3 les performances des différentes configurations sont très proches surtout à partir d'un nombre de neurones de la couche cachée qui est égale à trois. Vu la simplicité du modèle et la faible valeur des paramètres, on a choisi de ne pas dépasser une seule couche cachée avec un nombre de neurones qui ne soit pas supérieur à 10 surtout qu'il n'y a pas un rapport entre un nombre de neurones ou couches cachées assez grand avec des performances élevées du réseau de neurones. Après avoir réalisé les essais de test, on a pu déterminer la meilleure configuration qui admet comme métrique de précision 0,85 pour l'apprentissage et la validation. Ces deux valeurs représentent des valeurs acceptables et surtout réalistes en faisant la comparaison avec la littérature. Cette configuration optimale admet comme nombre de neurones : 3 en couches d'entrée, 6 en couches cachées et 1 dans la couche de sortie, avec un ratio d'apprentissage qui vaut 70 % et celui de validation qui vaut

30 %. Les ratios de génération qui correspondent à chaque scénario sont représentés dans le tableau 4.4

Tableau 4.4 Ratio de génération des déchets pour les 27 scénarios.

Scénario	Ratio de génération	Scénario	Ratio de génération
1	40,59	14	32,46
2	41,62	15	33
3	46,41	16	34,41
4	42,75	17	33,36
5	45,9	18	35,53
6	47,47	19	28,65
7	44,84	20	17,5
8	48,45	21	19,12
9	50,35	22	31,39
10	27,81	23	23,93
11	28,56	24	21,89
12	31,21	25	34,04
13	31,76	26	26,58
27	23,66		

Le réseau de collecte des déchets du plastique comporte 82 MRC. Une MRC regroupe toutes les municipalités d'un même territoire d'appartenance formant une entité administrative. Elle est constituée par lettres patentes délivrées par le gouvernement. Tirée de l'article du (Tremblay et Valentin, 2020), la figure 4.1 montre la carte de toutes les MRC de la province du Québec.

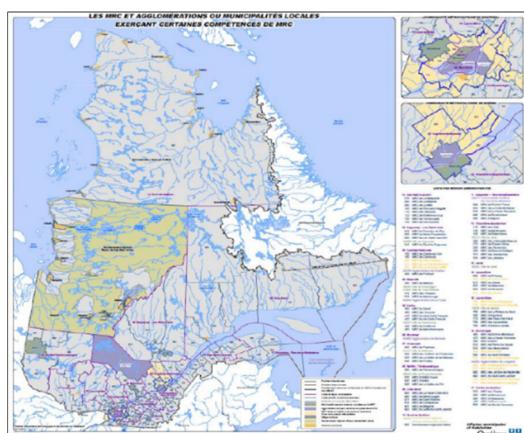


Figure 4.1 Carte des MRC du Québec

Afin de déterminer la quantité des déchets de plastique générés dans chaque MRC, un recours aux prévisions de l'évolution de la population pour l'année prochaine demeure nécessaire. Il suffit donc de multiplier le ratio de génération des déchets en plastique de chaque scénario par la population de chaque MRC pour obtenir la quantité générée par MRC. Par la suite, il y aura 27 scénarios de génération des déchets en plastique qu'on injectera dans le modèle d'optimisation.

La projection démographique de la population de chaque MRC pour la prochaine année est réalisée par l'institut de la statistique du Québec et les résultats sont regroupées dans l'annexe I et ils sont tirés de (Institut de la statistique du Québec, 2019). Les quantités des déchets générés pour chaque MRC et pour les 27 scénarios seront présentées dans l'annexe II vu le grand volume des données qu'elles contiennent. Un exemple d'un seul scénario va être présenté.

4.2 Modèle d'optimisation

4.2.1 Données du modèle d'optimisation

4.2.1.1 Ensembles

Le gouvernement du Québec divise tout le territoire en 82 MRC présentées dans la section précédente. Il existe dans le réseau de logistique inverse 26 centres de tri, 16 centres de recyclage et 38 centres d'enfouissement répartis sur tout le territoire du Québec. Les noms de ces centres ainsi que leurs localisations ne seront pas publiés pour des raisons de confidentialité. Les distances entre les nœuds du réseau sont obtenues de l'institut d'innovation en logistique du Québec.

Selon la charte de matières recyclables publiée par Recyc-Québec (RECYC-QUÉBEC, n.d.), sept types de plastique seront obtenus à partir du déchet mixte collecté dans l'opération de tri. Ces types de plastique ainsi que leurs proportions à partir du plastique mixte en pourcentage

sont décrits dans le tableau 4.5. Les pourcentages sont tirés à partir de (Jacob-vaillancourt, 2018).

Tableau 4.5 Type de chaque plastique obtenu et sa proportion

Type de résine	Exemple produit	Pourcentage de récupération à partir du plastique mixte
Polyéthylène téréphthalate #1 PET	Boissons gazeuses	40 %
Polyéthylène à haute densité #2 PEHD	Bouteilles d'usage alimentaire,	31 %
Polychlorure vinyle #3 PVC	Bouteilles d'eau de javel	0,77 %
Polyéthylène à basse densité #4 PEBD	Emballages, sac, pellicules	14 %
Polypropylène #5 PP	Contenants de yaourt,	10 %
Polystyrène #6 PS	Ustensiles, panneau isolant	1,23 %
Autres types de plastique #7 Autres	Bouteilles de ketchup	3 %

4.2.1.2 Les couts

Le cout de transport est évalué à 0,26 dollar canadien par tonne transportée et par kilomètre parcouru. Un seul type de camion est utilisé dans ce modèle sans aucune restriction sur le chargement maximal. Ces données sont obtenues à partir d'une étude menée par l'institut d'innovation en logistique du Québec.

Les couts de traitement au sein des centres de tri, recyclage et enfouissement sont discutés dans cette section. Au niveau du centre de tri, une étude menée par Recyc-Québec et Éco Entreprise Québec intitulée allocation des couts par activité a permis de déterminer le cout de tri moyen au sein des centres (Recyc-Québec, 2016). Cette étude a modélisé toutes les étapes de tri et a évalué leurs couts individuels pour obtenir une valeur globale égale à 300 \$ par tonne de

plastique traité. La majorité des centres de tri appliquent un tri manuel et c'est pour cette raison que le cout est élevé.

Le cout d'enfouissement est évalué à 122 \$ par tonne de plastique traité. Cette valeur est obtenue d'une étude menée par l'institut d'innovation en logistique du Québec (document confidentiel). Pour des raisons de confidentialité, on ne va pas citer la référence du document contenant cette information. Le tableau 4.6 regroupe tous les couts appliqués dans ce modèle.

Tableau 4.6 Cout de traitement par activité dans le réseau de logistique inverse

Activité	Cout de traitement (\$/ tonne)	
Tri	300	
Recyclage	PET	628
	PEHD	1341
	PVC	52
	PEBD	503
	PP	712
	PS	40
	AUTRES	52
Enfouissement	122	

Vu que la majorité des centres de recyclages sont des entreprises privées, on n'a pas pu obtenir les couts de recyclage pour des raisons concurrentielles. Donc on a opté à une démarche ascendante. C'est-à-dire au lieu de chercher les couts des activités de recyclage, on part des prix de vente de chaque type de plastique recyclé, on fixe une marge de profit pour les entreprises qui est 30 % dans ce cas et on soustrait la valeur qui correspond à cette marge du prix de vente pour obtenir le cout de recyclage pour chaque type de plastique.

4.2.1.3 Les capacités des centres

Conformément à ce qui est présenté dans la présentation du modèle les centres de tri et recyclages admettent des capacités limitées tandis que les centres d'enfouissement ont une capacité illimitée. Les centres de tri ont chacun une capacité de 50000 tonnes par an. Cette information est tirée de Tremblay & Valentin (2020) où ils ont collaboré avec l'institut d'innovation en logistique du Québec pour déterminer cette valeur.

Au niveau des centres de recyclages, le problème d'absence des données claires apparaît encore une fois, donc la même méthode ascendante a été de nouveau appelée. 128 000 tonnes de plastique ont été recyclées en 2018 (Recyc-Québec, 2018). En supposant que les centres ont les mêmes capacités, on peut diviser cette quantité par le nombre total des centres de recyclage pour déterminer la valeur de la capacité de chaque centre de recyclage qui vaut donc 7857 tonnes.

4.2.1.4 Les données environnementales

Les données environnementales représentent les émissions des activités de la chaîne logistique inverse. Pour le transport la valeur de l'émission est de 0,00018 tonne CO₂ eq par tonne de plastique et par kilomètre parcouru. Cette valeur est tirée de (Perumal & Timmons, 2017). Les émissions de recyclage et d'enfouissement sont obtenues du rapport de (Vanderreydt et al., 2021) et sont présentés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.7 Taux des émissions de recyclage et d'enfouissement

Type de plastique	Émission de recyclage (T CO ₂ eq/ T de plastique)	Émission d'enfouissement (T CO ₂ eq/ T de plastique)
PET	0,51	
PEHD	0,348	
PVC	0,348	
PEBD	0,348	
PP	0,348	
PS	0,348	
AUTRES	0,348	3,35

4.2.1.5 Autres paramètres et données

La spécialisation de chaque centre de recyclage par rapport aux produits est obtenue à partir d'un rapport de l'institut d'innovation en logistique du Québec et ses valeurs sont présentées dans le tableau 4.8. La valeur 1 signifie que le centre traite le produit et 0 signifie le cas contraire.

Tableau 4.8 Spécialisations des centres de recyclage

	PET	PEHD	PVC	PEBD	PP	PS	AUTRES
R1	0	0	0	0	0	1	0
R2	0	0	0	0	1	1	0
R3	0	0	0	0	0	1	0
R4	1	0	0	0	0	0	0
R5	1	1	0	0	0	0	0
R6	1	0	0	0	0	0	0
R7	1	1	1	1	0	0	1
R8	0	1	0	1	0	0	1
R9	1	0	0	0	0	0	0
R10	1	0	0	0	0	0	0
R11	0	1	0	0	0	0	0
R12	0	0	0	0	0	0	1
R13	1	1	1	1	1	1	1
R14	0	0	1	0	0	0	0
R15	0	1	0	0	0	0	0
R16	1	1	1	1	1	1	1

Les valeurs de capacités disponibles à chaque centre de recyclage ainsi que les valeurs de flexibilité qui lui correspondent sont initialisées d'une façon aléatoire. Un exemple de la valeur de la capacité restante/disponible par rapport à la capacité initiale de chaque centre de recyclage en fonction du nombre de produits traités est présenté dans le tableau 4.9.

Tableau 4.9 Valeurs de capacité disponible en fonction du nombre de produits traités dans des centres de recyclages

Centre de recyclage	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R5	R5	R5	
Nb de produits	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2
Capacité restante	0	1	0,68	0,64	0,61	0,58	0,55	0,51	0	1	0,76

Pour le centre R1, lorsque le nombre de produits est égal à zéro c'est-à-dire qu'il ne traite aucun produit et il sera fermé. Lorsqu'il est égal à un, ceci signifie qu'il traite un seul produit et donc il sera un centre spécialisé. Dans ce cas-là, il n'y aura pas de perte au niveau de capacité. Il peut traiter jusqu'à sept produits et autant que le nombre de produits traités augmente, le ratio de la capacité restante diminue.

Contrairement au centre R1, le centre R5 aura la possibilité de traiter seulement deux produits au maximum. La flexibilité de chaque centre dépend du nombre de produits qu'il traite, donc en fonction de cette variable, que le modèle détermine, une valeur de flexibilité lui sera donc affectée. Un exemple de valeurs de flexibilité possibles est affiché dans le tableau 4.10.

Tableau 4.10 Valeurs de flexibilité en fonction du nombre de produits traités

Nb de produits	0	1	2	3	4	5	6	7
Flexibilité	0	0	0,28	0,42	0,57	0,71	0,85	1

4.2.2 Résultats du modèle d'optimisation

Les résultats des deux du modèle d'optimisation pour les deux configurations (spécialisée et flexible) seront présentés dans cette section, puis une comparaison entre eux sera faite pour dégager les avantages de cette modification dans la configuration du réseau de logistique inverse. Les résultats seront présentés dans les tableaux ou bien dans les graphes par des instances dans lesquelles le pourcentage de recyclage et le pourcentage d'enfouissement seront les variables. Donc, le pourcentage de recyclage initial est de 30 % contre 70 %

d'enfouissement, et ces deux paramètres seront modifiés à chaque instance : un pas de 5 % sera ajouté au pourcentage de recyclage tandis qu'un pas de 5 % sera soustrait au pourcentage d'enfouissement. Le solveur utilisé est Gurobi qui est un solveur commercial de programmation mathématique capable de traiter les modèles linéaires et quadratiques.

4.2.2.1 Résultats de la configuration spécialisée

La configuration spécialisée comme son nom l'indique se caractérise par des recycleurs qui se spécialisent dans un ou des types de plastique bien spécifiques. La figure 4.2 représente les variations du cout total ainsi que les émissions des GES de toutes les activités du réseau de logistique inverse pour les différentes valeurs du pourcentage de recyclage allant de 30 % jusqu'à 65 %. Cette dernière est la valeur de saturation que le réseau ne peut pas dépasser (impossible de traiter plus de 65 % avec les capacités de recyclage actuelles). Le cout total varie entre 83 000 000 \$ et 115 000 000 \$ et les émissions varient entre 194 000 et 321 000 tonnes de CO₂ eq.

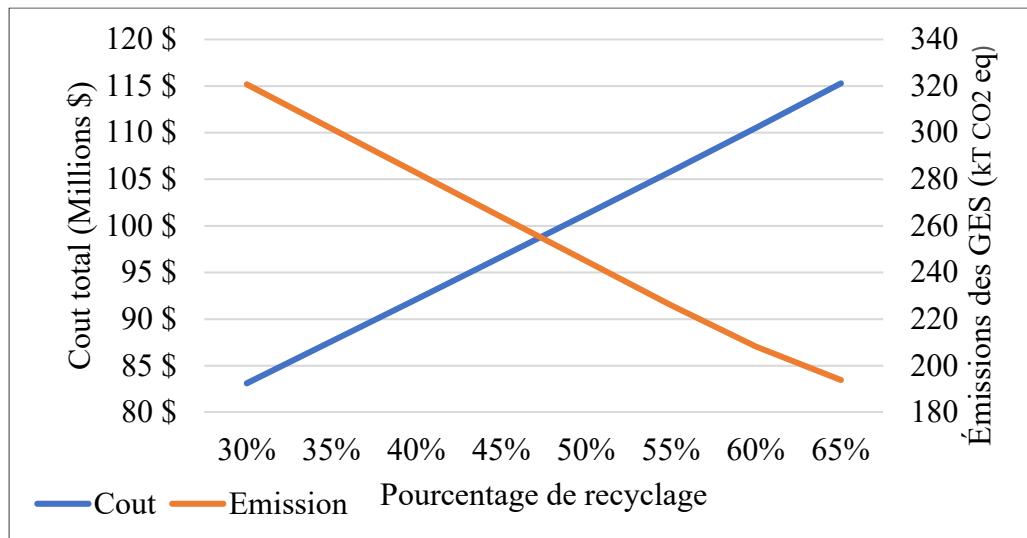


Figure 4.2 Variation du cout total en Millions \$ et les émissions des GES en kT CO₂ eq pour la configuration spécialisée

On peut noter que l'allure des deux courbes est assez prévisible et attendue. En effet plus qu'on recycle, moins qu'on dissipe de GES vu que le recyclage est présenté comme étant la solution efficace face aux grandes valeurs des émissions causées par l'enfouissement ou bien

l’incinération. De l’autre côté, les opérations de recyclage sont très couteuses en les comparant avec la fabrication du plastique à partir de la résine vierge et c’est pour cette raison que le cout total augmente d’une façon linéaire en fonction le pourcentage de recyclage.

En divisant les valeurs globales de ces deux résultats par la valeur de la quantité traitée on peut avoir une idée sur combien ça coute une tonne de plastique traité dans le réseau de point de vue économique et environnemental. La figure 4.3 représente ces valeurs unitaires.

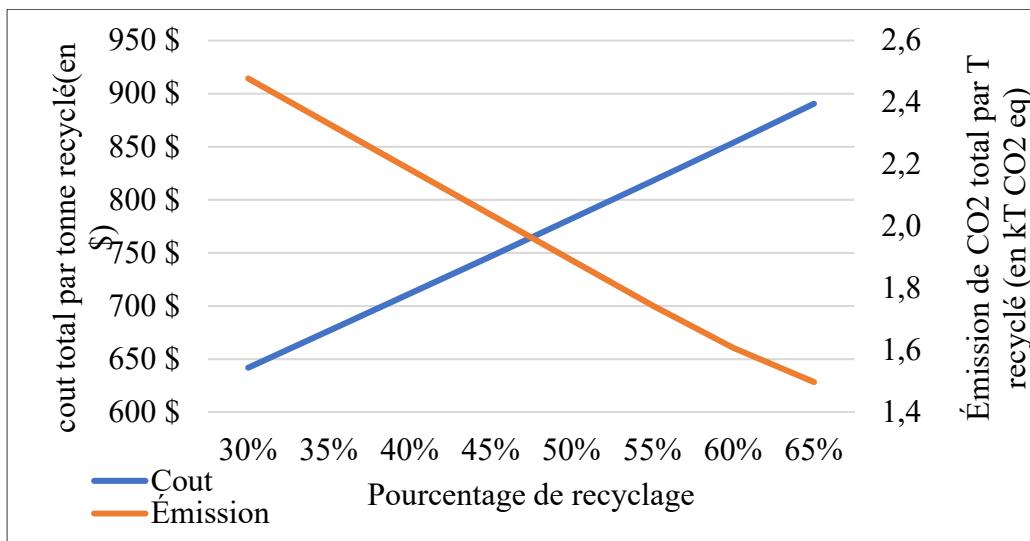


Figure 4.3 Cout et émission de CO2 totaux par tonne de plastique traitée pour la configuration spécialisée

L’allure est la même que celle du cout et émissions globaux vu qu’on divise par le même dénominateur qui est la quantité utilisée. Ces valeurs sont élevées par rapport à celles de la résine vierge.

La figure 4.4 représente les changements qui apparaissent sur la composition du cout total. Celle-ci montre des graphes de camembert représentant la caractérisation de chaque partie du cout selon l’activité par rapport au cout total. La caractérisation est représentée selon chaque pourcentage recyclage.

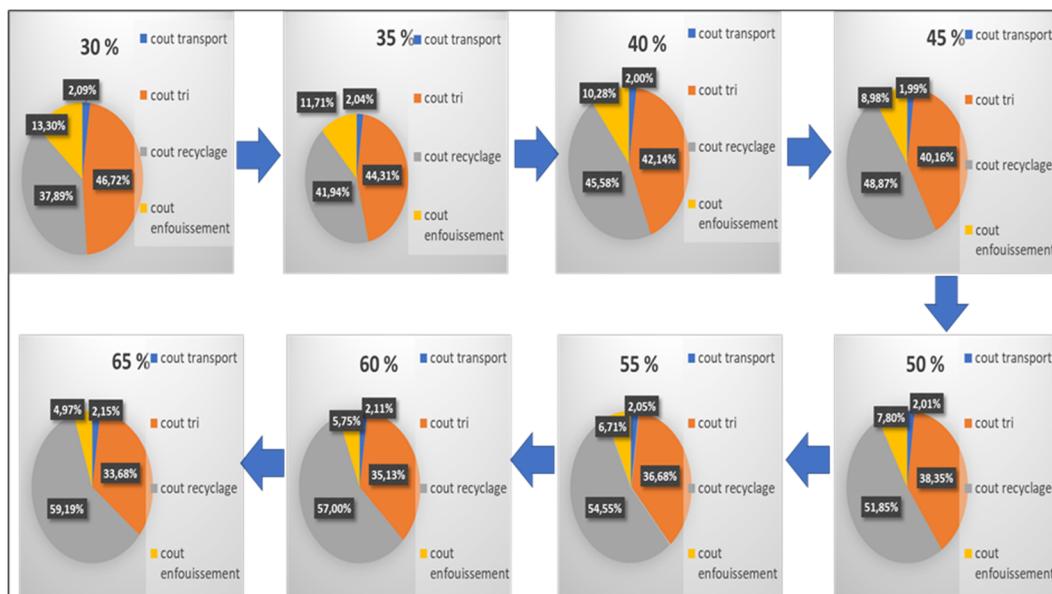


Figure 4.4 Caractérisation du cout total pour la configuration spécialisée

On peut noter que la partie qui constitue le cout de recyclage et tri représente plus de 80 % du cout total dans les meilleurs des cas, ce qui fait que ces deux activités représentent les deux activités les plus critiques. Outre, on peut noter que la proportion du recyclage par rapport au cout total s'accroît plus qu'on augmente les pourcentages de recyclage jusqu'à atteindre la valeur de 60 % du cout total.

Le cout d'enfouissement diminue progressivement jusqu'à atteindre 33,68 % du cout total. Le cout de transport est le moins présent dans la contribution du cout total avec une moyenne de 2 %.

Les émissions des GES sont aussi comptabilisées dans le modèle d'optimisation et elles sont représentées dans la figure 4.5 sous forme des graphes de camemberts comme pour le cas des couts.

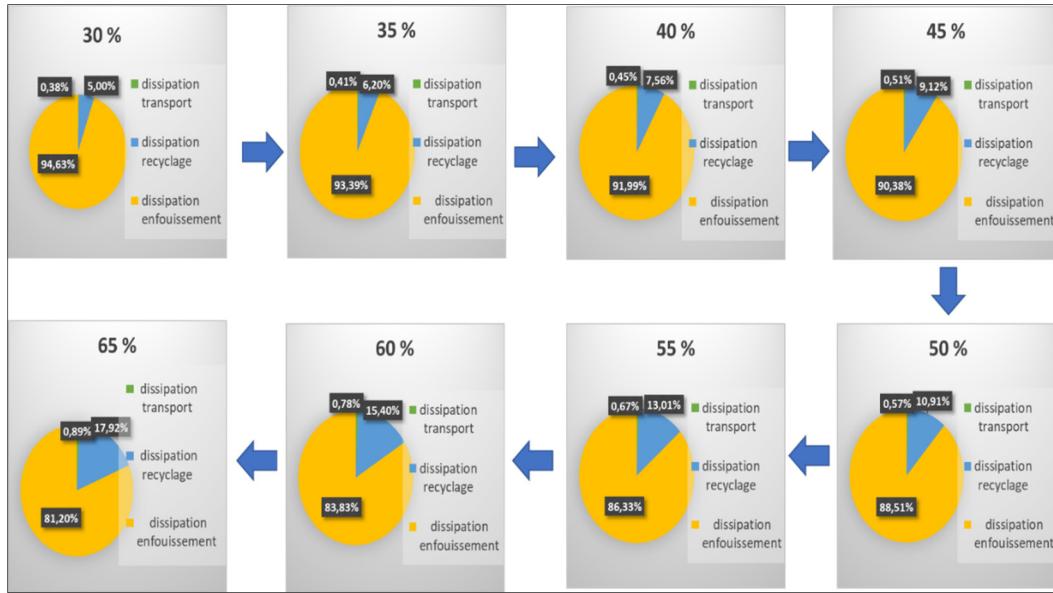


Figure 4.5 Caractérisation des émissions totales pour la configuration spécialisée

On voit clairement que les émissions liées aux activités d'enfouissement représentent la plus grande valeur parmi toutes les activités du réseau. Elle constitue 95 % du cout total pour le cas où le pourcentage de recyclage est à 30 %. Puis elles subissent une diminution au fur et à mesure que le pourcentage de recyclage augmente.

Les émissions de recyclage augmentent en faisant accroître le pourcentage de recyclage jusqu'à atteindre une valeur de 17,92 % des émissions totales. Les émissions des centres de tri n'ont pas été comptabilisées dans le modèle vu l'absence des données d'une part et d'autre part parce que ces émissions relatives aux centres de tri sont considérées de type indirect (scope 2) dont on l'a déjà éliminé dès la définition du modèle.

Finalement, les émissions de transport demeurent négligeables devant les autres émissions des autres activités. Elle n'atteint même pas le 1 % des émissions totales dans les pires des cas. Les valeurs des différents couts pour toute la plage des pourcentages de recyclage sont regroupées dans le tableau 4.11 en fonction des activités du réseau de logistique inverse.

Tableau 4.11 Couts spécifiques pour la configuration spécialisée

	Cout				
	Total	Transport	Tri	Recyclage	Enfouissement
30 %	83 114 079,10 \$	1 739 368,17 \$	38 827 267,34 \$	31 495 745,33 \$	11 051 698,27 \$
35 %	87 619 489,42 \$	1 785 163,79 \$	38 827 267,34 \$	36 745 036,22 \$	10 262 022,08 \$
40 %	92 139 944,99 \$	1 846 004,65 \$	38 827 267,34 \$	41 994 327,11 \$	9 472 345,90 \$
45 %	96 681 107,00 \$	1 927 551,96 \$	38 827 267,34 \$	47 243 617,99 \$	8 682 669,71 \$
50 %	101 245 271,94 \$	2 032 102,20 \$	38 827 267,34 \$	52 492 908,88 \$	7 892 993,53 \$
55 %	105 845 872,42 \$	2 173 087,97 \$	38 827 267,34 \$	57 742 199,77 \$	7 103 317,34 \$
60 %	110 511 031,32 \$	2 335 365,07 \$	38 827 267,34 \$	62 991 490,66 \$	6 356 908,26 \$
65 %	115 281 569,20 \$	2 480 192,46 \$	38 827 267,34 \$	68 240 781,55 \$	5 733 327,86 \$

4.2.2.2 Résultats de la configuration flexible

La configuration flexible est une alternative potentielle pour faire face aux problématiques du réseau actuel. La figure 4.6 montre l'évolution du cout total ainsi que les émissions des GES. L'allure des deux courbes ne diffère pas de celles de la configuration spécialisée : le cout diminue en augmentant le pourcentage de recyclage et en contrepartie les émissions diminuent vu que les quantités mises en enfouissement deviennent de plus en plus minimales.

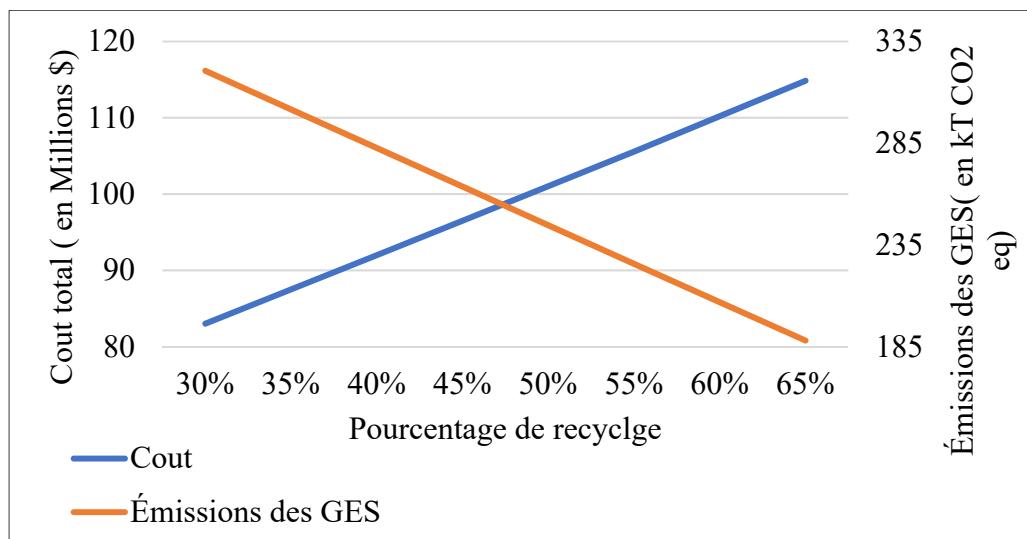


Figure 4.6 Variation du cout total et les émissions des GES pour la configuration flexible

Les couts et les émissions de la configuration flexible sont aussi ramenés à l'unité c'est-à-dire par tonne de plastique traité. Les deux courbes présentant l'évolution de ces résultats sont regroupées dans la figure 4.7.

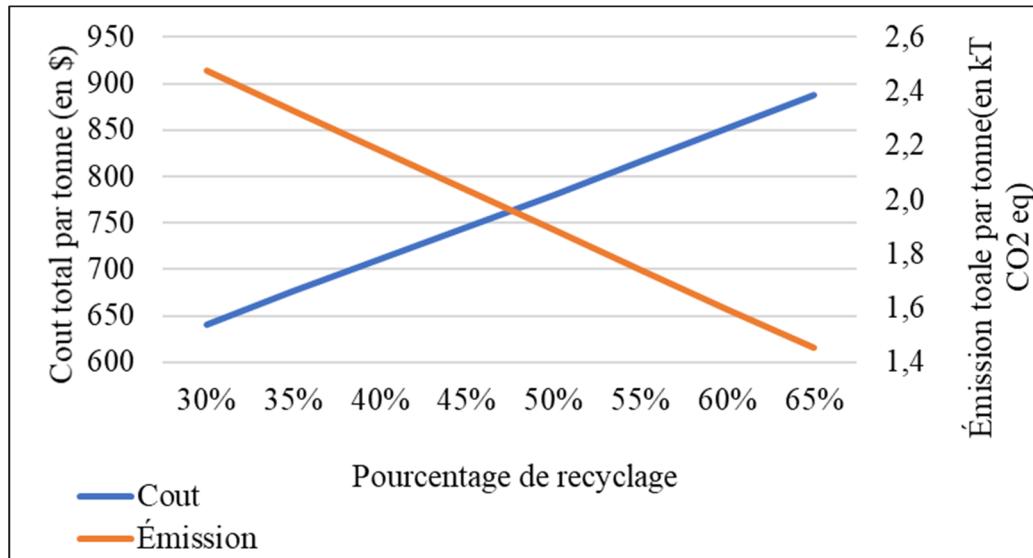


Figure 4.7 Cout et émission de CO₂ par tonne pour la configuration flexible

On remarque une légère diminution entre les couts unitaires des deux configurations : cout total de 890,51 \$ pour la configuration spécialisée contre 887,24 \$ pour la configuration flexible pour le même pourcentage de recyclage (65 %). Pour les émissions et pour le même pourcentage de recyclage, on remarque une diminution de 0,05 tonne. Plus de détails sur la comparaison seront présentés dans les parties suivantes.

Au niveau de la constitution du cout, les mêmes remarques et interprétations que celles de la configuration spécialisée sont notées avec une légère modification : on remarque dans la figure 4.8 que pour un pourcentage de recyclage de 30 % et 35 %, le cout de tri représente la plus grande proportion du cout total avec des valeurs de 37,94 % et 42 % respectivement. Au-delà de ces deux instances, le cout de recyclage dépasse le cout de tri.

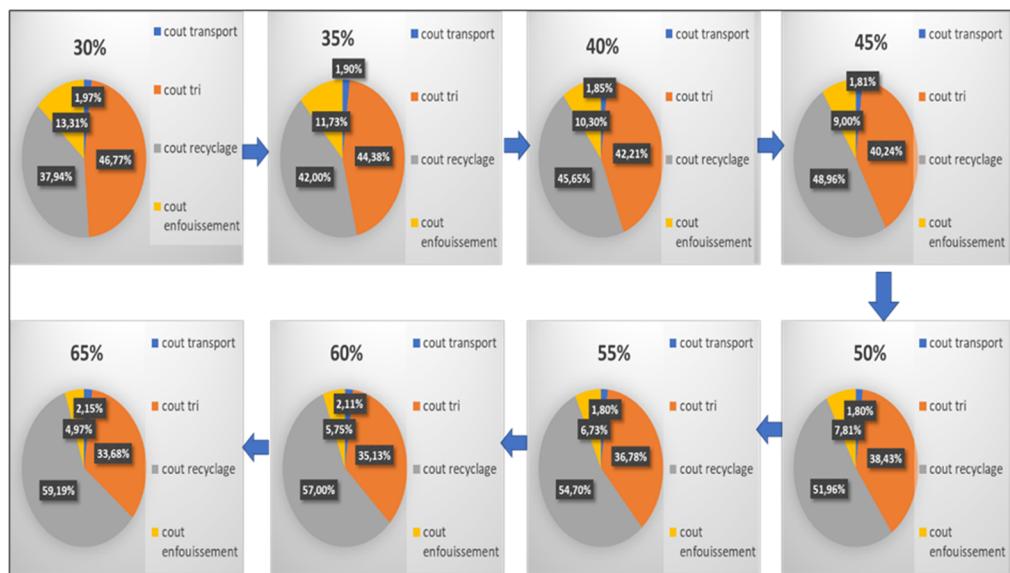


Figure 4.8 Caractérisation du cout total pour la configuration flexible

Le cout d'enfouissement représente 13,31 % du cout total pour un pourcentage d'enfouissement qui est égal à 70 %, puis il diminue jusqu'à atteindre presque 5 % pour un pourcentage d'enfouissement qui est égal à 35 %. Finalement, le cout de transport demeure le plus faible une valeur qui ne dépasse pas 2,15 % du cout total. L'évolution de la proportion de chaque type d'émissions sur l'émission totale est présentée dans la figure 4.9



Figure 4.9 Caractérisation des émissions totales pour la configuration flexible

On voit clairement la dominance de l'émission d'enfouissement sur toutes les autres origines d'émission avec des valeurs qui balance entre 95 % et 81 %. Le recyclage ayant une faible contribution sur l'émission totale par rapport à celle d'enfouissement, demeure quand même une valeur remarquable qui atteint un maximum de 18,5 % pour un pourcentage de recyclage qui est égal à 65 %.

Pour plus de détail sur les valeurs des couts de chaque activité du réseau, le tableau 4.13 est présenté ci-dessous contenant les valeurs des couts liées à chacune des activités du réseau pour chaque valeur de pourcentage de recyclage exécutée.

Tableau 4.12 Couts spécifiques à la configuration flexible

	Cout				
	Total	Transport	Tri	Recyclage	Enfouissement
30 %	83 012 743,17 \$	1 638 032,24 \$	38 827 267,34 \$	31 495 745,33 \$	11 051 698,27 \$
35 %	87 496 319,09 \$	1 661 993,45 \$	38 827 267,34 \$	36 745 036,22 \$	10 262 022,08 \$
40 %	91 991 517,79 \$	1 697 577,45 \$	38 827 267,34 \$	41 994 327,11 \$	9 472 345,90 \$
45 %	96 498 032,47 \$	1 744 477,43 \$	38 827 267,34 \$	47 243 617,99 \$	8 682 669,71 \$
50 %	101 027 565,13 \$	1 814 395,39 \$	38 827 267,34 \$	52 492 908,88 \$	7 892 993,53 \$
55 %	105 570 842,22 \$	1 898 057,78 \$	38 827 267,34 \$	57 742 199,77 \$	7 103 317,34 \$
60 %	110 209 208,45 \$	2 076 809,30 \$	38 827 267,34 \$	62 991 490,66 \$	6 313 641,15 \$
65 %	114 857 850,28 \$	2 265 836,43 \$	38 827 267,34 \$	68 240 781,55 \$	5 523 964,97 \$

4.2.2.3 Comparaison entre les deux configurations pour le transport

Les couts de traitement unitaire de chaque activité du réseau de logistique inverse sont les mêmes pour les deux configurations c'est-à-dire le cout de tri, de recyclage ou d'enfouissement est le même que ce soit dans la configuration spécialisée ou bien la configuration flexible.

Aussi, au sein de la même configuration les couts de traitement de tous les centres de la même activité sont les mêmes c'est-à-dire le cout de tri par tonne est le même que ce soit dans S1, S2 ou n'importe quel centre de tri. De ce fait, il apparaît logique que les couts de tri, de recyclage et d'enfouissement soient égaux pour les deux configurations pour chaque deux instances ayant le même pourcentage de recyclage. Cependant, le cout de transport va changer parce que

l'affectation des déchets et l'envoi des flux vont changer selon la spécialité des centres de recyclages. La figure 4.10 montre la variation du cout de transport pour les deux configurations. On voit clairement dans ce graphique que la configuration flexible gagne davantage par rapport à la configuration spécialisée. L'écart entre les deux courbes s'accentue aux furs et à mesure que le pourcentage de recyclage augmente. Le cout ainsi que les émissions de transport sont par définition proportionnels à la distance parcourue donc leurs allures seront pareilles avec un décalage près. Ceci est conforme en visualisant la figure 4.11 qui présente l'évolution des émissions de transport pour les deux configurations.

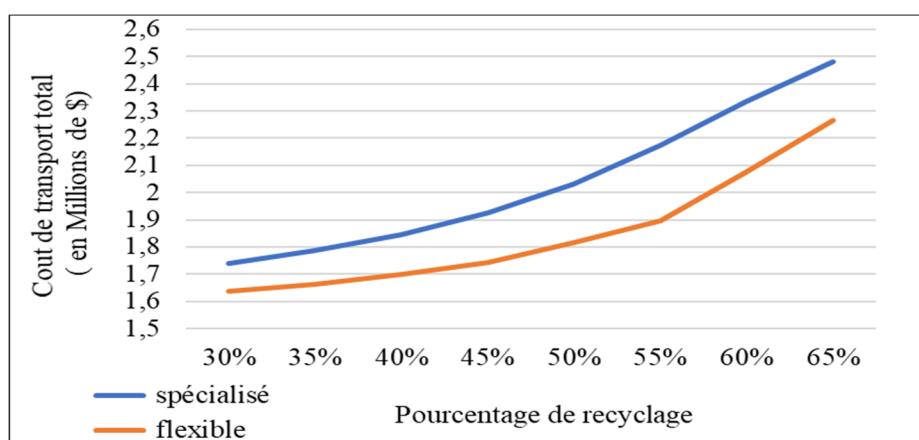


Figure 4.10 Variation du cout de transport pour les deux configurations

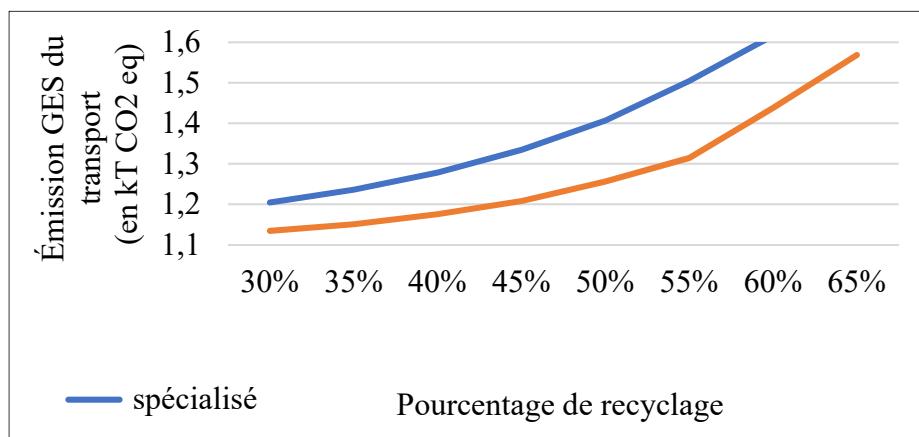


Figure 4.11 Variation des émissions de transport pour les deux configurations

Afin de mieux expliquer la différence des résultats relatifs pour l'activité de transport pour les deux configurations, on va essayer de décortiquer les liaisons entre les échelons du réseau c'est-à-dire entre municipalité et centre de tri, centre de tri et centre de recyclage, et finalement centre de tri et centre d'enfouissement.

MRC →centre de tri

La distance moyenne parcourue entre les municipalités et les centres de tri par une tonne de plastique est calculée et présentée dans la figure 4.12

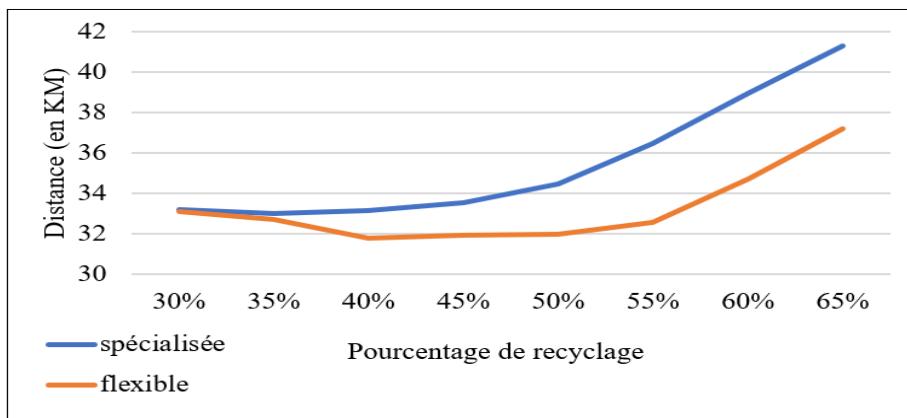


Figure 4.12 Variation de la distance moyenne parcourue entre MRC et centre de tri pour les deux configurations

Pour des valeurs de pourcentage de recyclage qui sont inférieures ou égales à 35 % on remarque qu'il n'existe pas une grande différence entre les courbes, elles sont presque identiques. Cependant au-delà de ces valeurs l'écart commence à apparaître et s'accentue jusqu'aux valeurs de 55 % et après il demeure presque constant.

Les mêmes remarques sont notées pour les couts de transport d'une tonne de plastique ainsi que l'émission de transport d'une tonne plastique qui est présentée respectivement dans les figures 4.13 et 4.14.

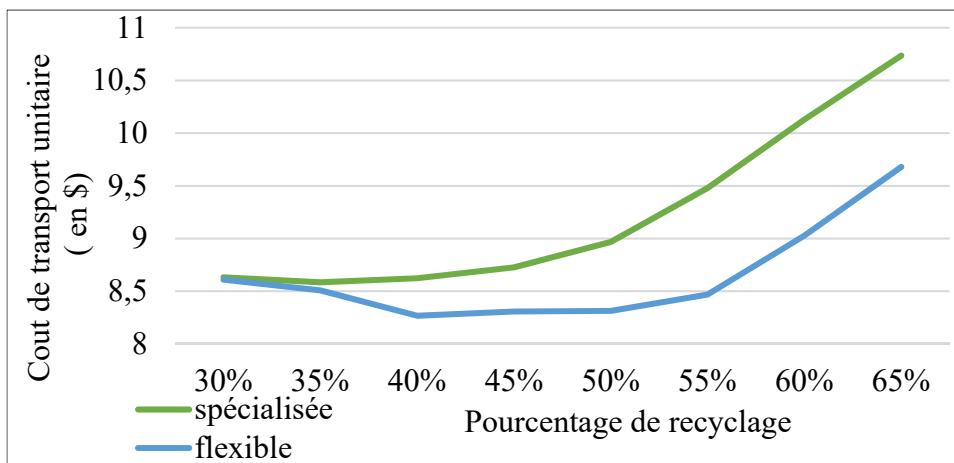


Figure 4.13 Variation du cout de transport unitaire entre MRC et centre de tri pour les deux configurations

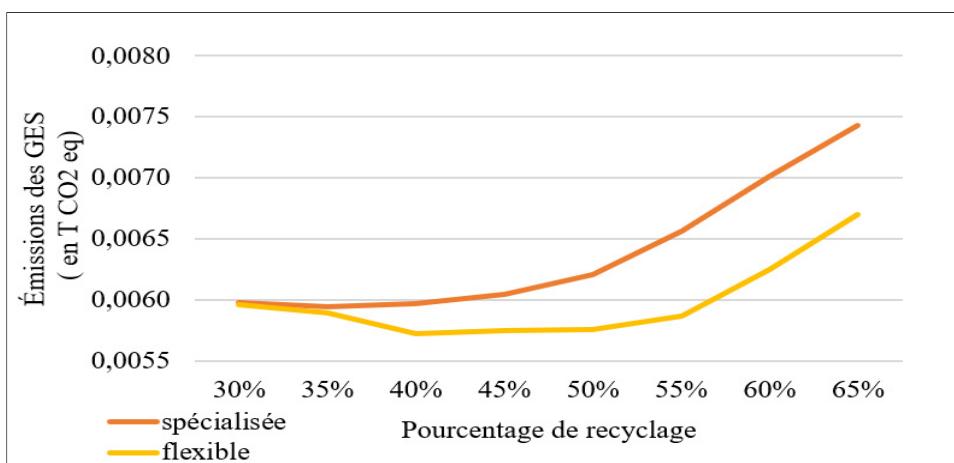


Figure 4.14 Variation des émissions de transport unitaire entre MRC et centre de tri pour les deux configurations

La raison pour laquelle la différence entre les deux configurations se manifeste réside dans l'existence de la flexibilité. En effet grâce à la flexibilité les centres de recyclages deviennent de plus en plus capables à traiter de nouveaux types de plastique. Ceci permet de consolider plusieurs flux à la même destination au lieu de parcourir de longues distances pour envoyer des flux individuels selon la spécialité de chaque centre et donc les centres de tri deviennent des centres de transbordement. Ils reçoivent des flux des différentes MRC proches, les regroupent et les envoient à un ou deux centres de recyclages au lieu de neuf centres par

exemple. Un exemple est présenté dans la figure 4.15 du flux logistique entre des MRC et un centre de tri montre que pour le cas spécialisé les MRC envoient cinq types de plastique au centre de tri alors que pour le cas flexible deux nouveaux types ont été ajoutés dans les mêmes flux. Donc en tout sept types de plastique ont été envoyés et ceci est dû au fait que le centre de recyclage avec lequel communique le centre de tri devient flexible et capable de traiter de nouveaux types de plastique.

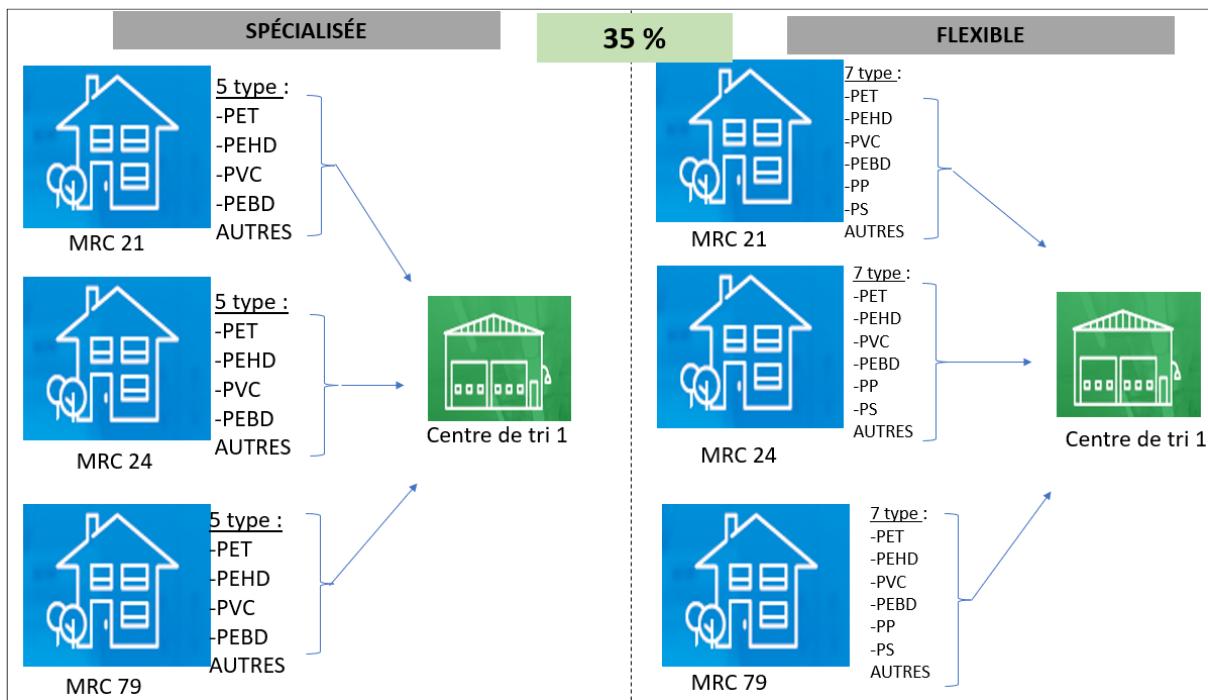


Figure 4.15 Exemple d'un flux physique entre des MRC et un centre de tri pour

En s'appuyant à cette analyse, on peut dire que même la flexibilité migre à travers les échelons du réseau. C'est-à-dire que, grâce à la flexibilité d'un centre de recyclage x, le ou les centres de tri qui lui envoient les déchets deviennent aussi flexibles. Donc une attention doit être accordée aux centres de tri pour les prochaines années surtout au niveau des technologies de tri pour répondre à ce changement qui va survenir si on applique réellement ce type de projet. Présentement, la majorité des centres de tri appliquent le tri manuel ce qui rend à la fois les opérations couteuses et complexes pour accepter de nouveaux types de plastique dans un centre défini. Un modèle stratégique sur les technologies de tri peut être étudié dans un prochain projet.

Centre de tri → centre de recyclage

La distance moyenne entre les centres de tri et les centres de recyclage est capturée dans la figure 4.16. On voit clairement que dans la configuration flexible on parcourt moins de distance pour transporter les plastiques aux centres de recyclages que dans le cas de la configuration spécialisée et la différence atteint à peu 30 %. Ceci est dû au centre de recyclages. Ces derniers étant plus flexibles, c'est-à-dire capables de traiter plus de produits, permettent de gagner davantage en matière de distance en consolidant les envois des déchets.

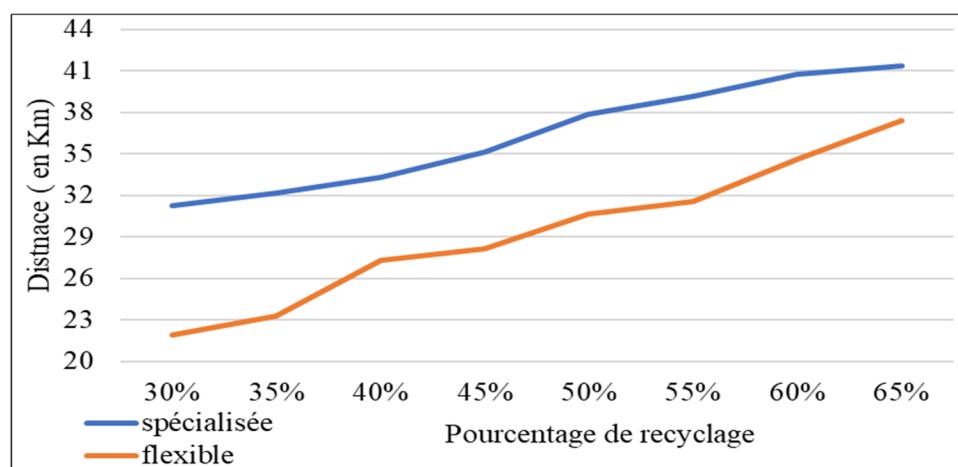


Figure 4.16 Variation de la distance moyenne entre centre de tri et centre de recyclage pour les deux configurations

Dans la configuration spécialisée, un flux sortant d'un centre de tri doit parcourir de longues distances pour atteindre un centre de recyclage qui traite un type x de plastique même s'il existe plusieurs centres de recyclage à proximité, mais malheureusement ils ne sont pas spécialisés pour ce type x de plastique. Grâce à la configuration flexible, ce problème est résolu et les flux deviennent regroupés. La variation du cout de transport ainsi que l'émission des GES d'une tonne plastique sont conformes aux résultats de la distance présentés dans la figure 4.16. Ayant été présentées respectivement dans les figures 4.17 et 4.18, les illustrations montrent que la performance de la configuration flexible est bien meilleure que celle de la configuration spécialisée.

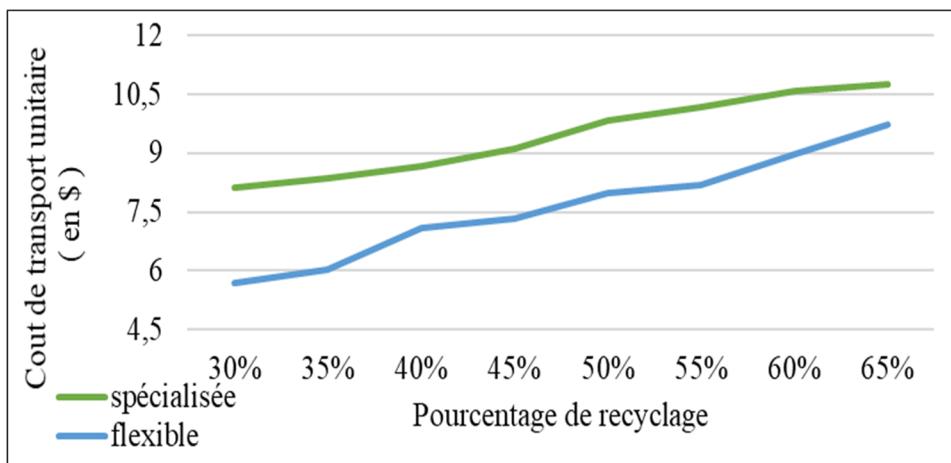


Figure 4.17 Variation du cout de transport unitaire entre centre de tri et centre de recyclage pour les deux configurations

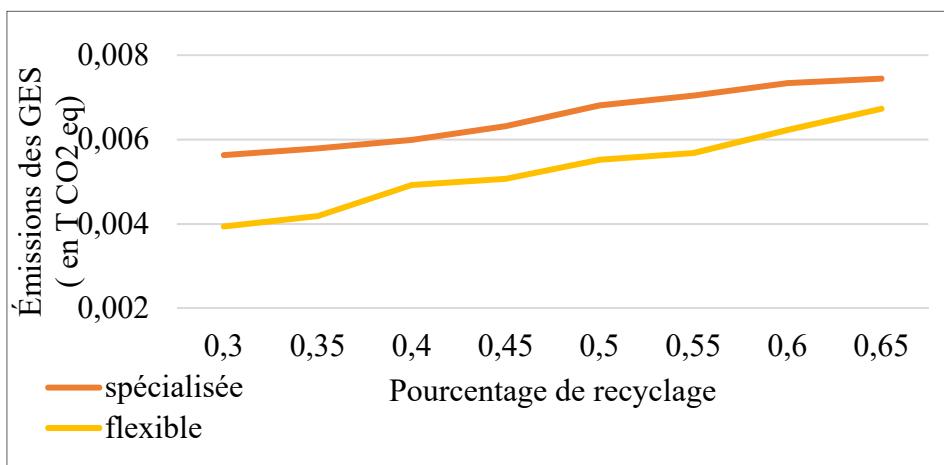


Figure 4.18 Variation des émissions de transport unitaire entre centre de tri et centre de recyclage pour les deux configurations

Comme pour le cas de municipalité- centre de tri on va présenter dans la figure 4.19 un exemple de flux entre un centre de tri et des centres de recyclages pour visualiser qu'est-ce qui se passe réellement dans le flux entre les deux configurations. Cet exemple est capturé pour une instance de 35 % comme valeur de pourcentage de recyclage.

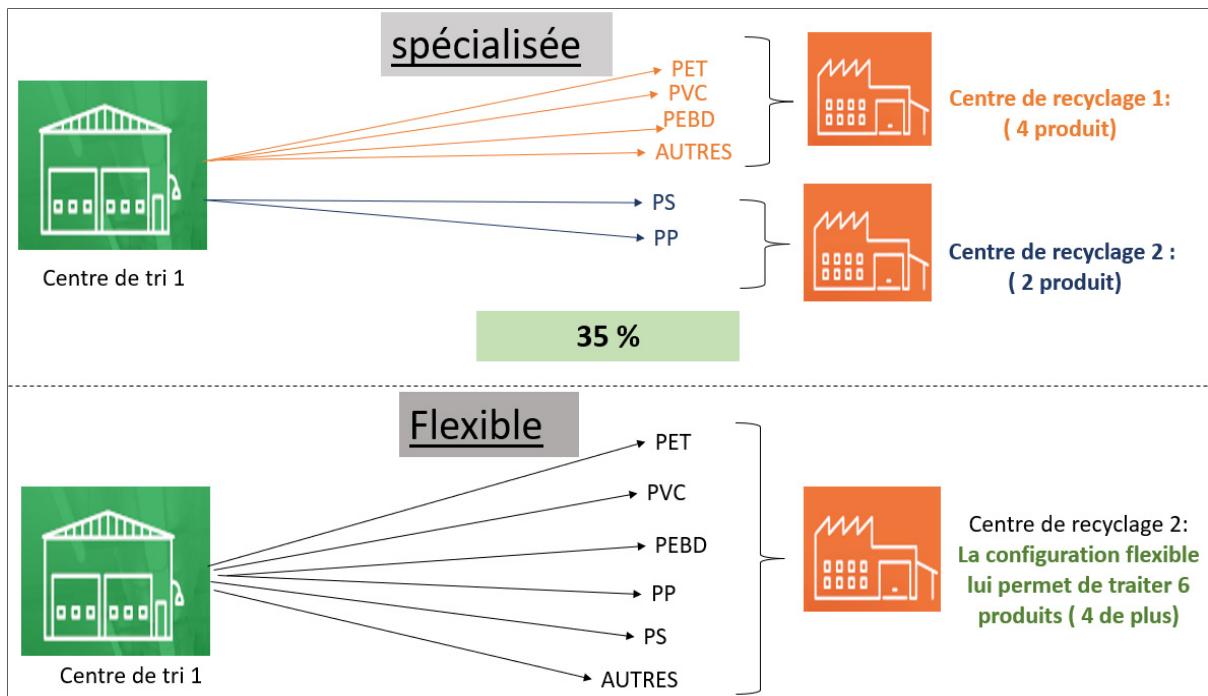


Figure 4.19 Exemple d'un flux physique entre un centre de tri et des centres de recyclage pour les deux configurations

Dans la configuration spécialisée, un flux sortant d'un centre de tri est divergé vers deux centres de recyclages ce qui permet de parcourir plus de distance à cause de la spécialité des centres de recyclages. Dans la configuration flexible, le même flux est regroupé et envoyé vers le centre de recyclage 2 qui est grâce sa flexibilité, devient capable de traiter six types de plastiques au lieu de quatre et donc permet d'optimiser le flux. Par la suite, un centre de tri joue ainsi un nouveau rôle dans la chaîne de logistique inverse qui est le rôle de transbordement.

Centre de tri → centre d'enfouissement

Les flux entre les centres de tri et les centres d'enfouissement sont aussi affectés par le changement entre les deux configurations. La figure 4.20 montre la distance moyenne entre les centres de tri et les centres d'enfouissement parcourue par une tonne de plastique.

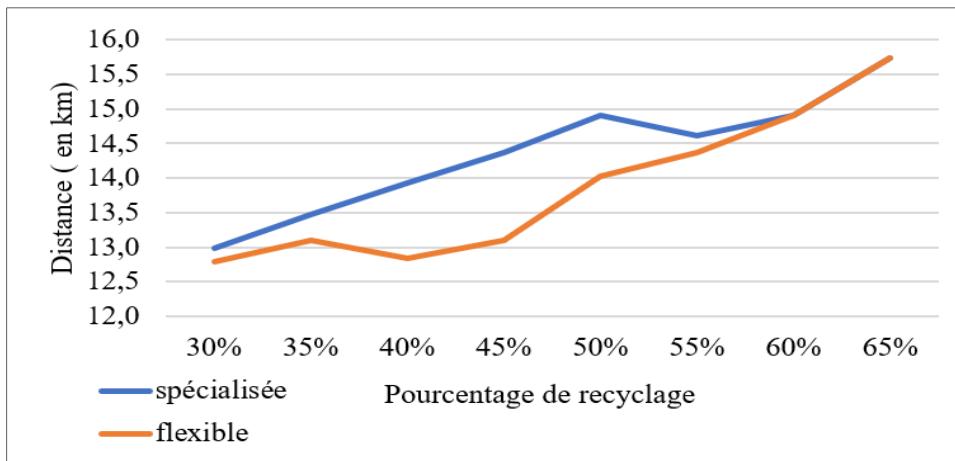


Figure 4.20 Variation de la distance moyenne parcourue entre centre de tri et centre d'enfouissement pour les deux configurations

Ce graphique montre que la distance parcourue par une tonne de plastique entre un centre de tri et un centre d'enfouissement est plus grande dans la configuration spécialisée que dans la configuration flexible. L'écart existe dès les premières instances, mais à partir d'un pourcentage de recyclage qui est égal à 35 % cet écart commence à s'accentuer jusqu'à un pourcentage de recyclage de 55 %. Au-delà de cette valeur, les deux courbes commencent à se confondre.

L'écart mesuré dans les premières instances jusqu'à 55 % de recyclage revient à l'injection de la flexibilité dans le réseau grâce aux centres de recyclage. Étant aussi flexibles, les centres de tri regroupent les différents types de plastique au lieu d'un traitement spécialisé, ce qui fait que l'envoi des flux vers les centres d'enfouissement va être aussi affecté par le processus de transbordement ou bien regroupement que les centres de tri le subissent. La nouveauté dans ce graphe est la partie où les deux courbes se confondent. Ceci montre que même au pire des cas la distance moyenne parcourue dans la configuration flexible sera égale à celle de la configuration spécialisée. Le cout moyen ainsi que l'émission moyenne engendrée par le transport d'une tonne de plastique entre les centres de tri et les centres d'enfouissement sont présentés respectivement dans les figures 4.21 et 4.22.

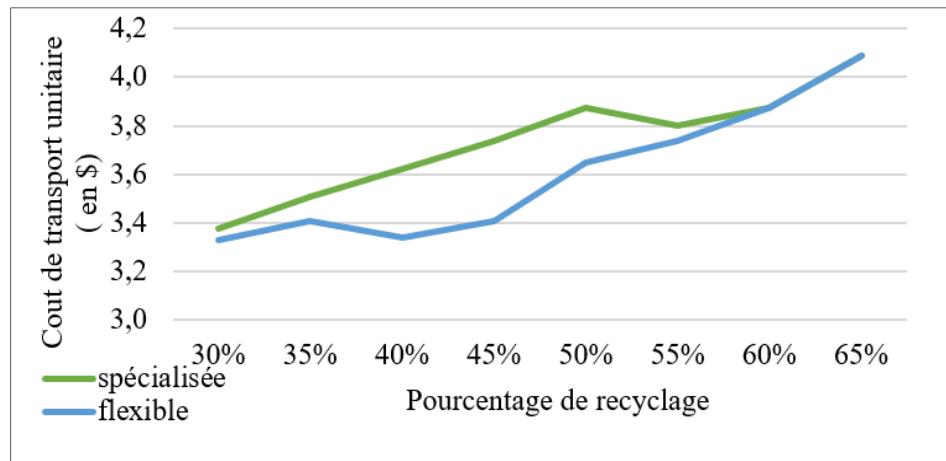


Figure 4.21 Variation du cout de transport unitaire centre de tri et centre d'enfouissement pour les deux configurations

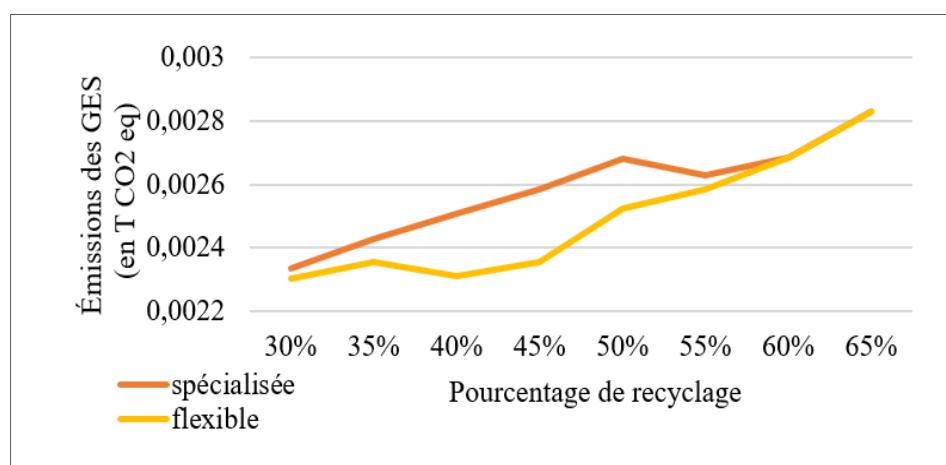


Figure 4.22 Variation des émissions de transport unitaire entre centre de tri et centre d'enfouissement pour les deux configurations

Les résultats des deux figures 4.21 et 4.22 sont conformes à la distance moyenne parcourue qui a été présentée dans la figure 4.20 puisque le cout et les émissions sont proportionnels à la distance parcourue : on voit un écart qui se forme pour les premières instances. Après cet écart s'accentue jusqu'à atteindre une valeur maximale. Au-delà de cette valeur, il commence à se rétrécir jusqu'au fusionnement des deux courbes des deux configurations.

Le flux entre un centre de tri et un centre d'enfouissement est capturé dans la figure 4.23, permettant d'identifier clairement le changement du comportement du réseau en injectant de la flexibilité.

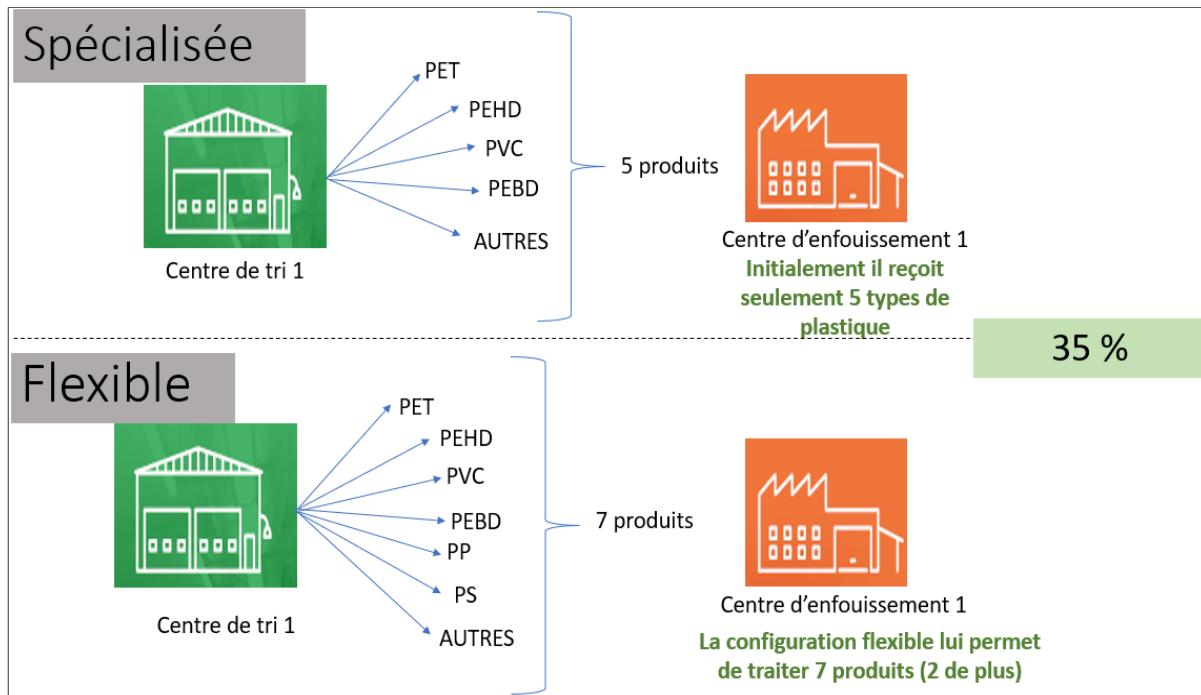


Figure 4.23 Exemple d'un flux physique entre un centre de tri et un centre d'enfouissement pour les deux configurations

Dans cet exemple, un centre de tri traite dans la configuration spécialisée cinq types de plastiques qu'il envoie aux centres d'enfouissement, alors que dans la configuration flexible il gagne davantage en ajoutant deux autres types de plastique pour traiter les sept types de plastiques. Cette modification au niveau du comportement des centres de tri permet d'optimiser le flux en regroupant plusieurs produits dans un seul endroit ce qui permet de créer des liaisons plus convergentes et concentrées entre les échelons du réseau au lieu de les disperser avec des liaisons de type mono produit.

4.2.2.4 Évolution des variables de décision relatives à la configuration flexible

Des variables de décisions développées et utilisées dans la configuration flexible seront présentées et discutées dans cette section. Comme son nom l'indique, la configuration flexible nécessite l'injection de la flexibilité dans les centres de recyclages, et donc la flexibilité totale de tout le réseau n'est autre que la somme normalisée des flexibilités individuelles de chaque centre.

Pour chaque instance un centre de recyclage admet une valeur de flexibilité entre zéros et un. Le score de flexibilité de tout le réseau de cette instance est la somme de la flexibilité individuelle de chaque centre de recyclage. Afin de normaliser ce score, on le divise par le nombre total de centres de recyclage qui est dans notre cas 14. On obtient ainsi une flexibilité normalisée en pourcentage. La figure 4.24 montre l'évolution de la flexibilité normalisée totale au fur et à mesure qu'on augmente le pourcentage de recyclage.

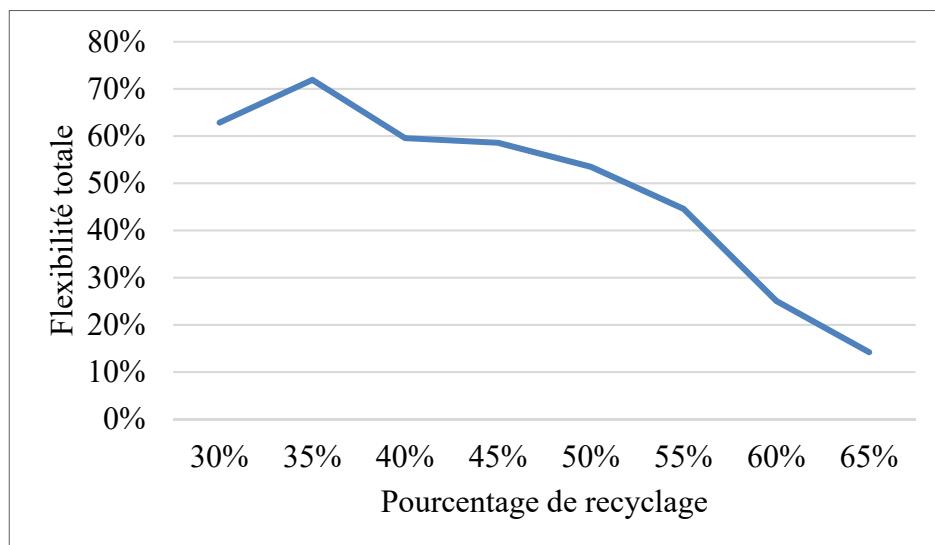


Figure 4.24 La flexibilité normalisée du réseau de logistique inverse

La courbe commence par une valeur de flexibilité qui est égale à 62,83 % puis elle subit une croissance dans l'instance suivante pour atteindre sa valeur maximale de 71,93 %. Au-delà de cette valeur de pourcentage de recyclage, la flexibilité subit une baisse continue et importante

pour tout le reste des instances jusqu'à atteindre une valeur minimale de 14,21 % pour un pourcentage de recyclage qui est égale à 65 %. L'allure de la courbe montre la réaction du modèle en ce qui concerne la flexibilité en augmentant le pourcentage de recyclage : en effet, le modèle développe des résultats prometteurs pour de faibles et moyennes valeurs de pourcentage de recyclage, cependant il fournit des valeurs de flexibilité faibles pour des valeurs élevées de pourcentage de recyclage. En interprétant cette courbe, on peut révéler que l'idée d'injecter de la flexibilité est une solution requise pour de faibles valeurs de recyclage, mais si on cherche à hausser la barre et atteindre des valeurs des taux de recyclage très élevés la flexibilité n'apparaît pas comme une solution valable.

Afin de justifier les interprétations ci-dessus une vérification sur la flexibilité individuelle ainsi que la capacité disponible dans chaque centre par rapport à sa capacité initiale sont faites. Cette vérification est réalisée pour trois phases : phase à un faible taux de recyclage, phase à un taux de recyclage moyen et phase à un grand taux de recyclage pour capturer l'évolution du modèle. Dans la définition du modèle, la capacité de chaque centre de recyclage est dépendante de la flexibilité de ce dernier : en effet, un centre traite initialement deux produits peut ajouter de nouveaux produits, mais ceci va lui causer une perte au niveau de sa capacité et c'est le compromis entre ces deux variables qu'on cherche à étudier. Les figures 4.25, 4.26 et 4.27 présentent respectivement l'évolution des deux variables pour des valeurs de taux de recyclage de 30 %, 45 % et 65 %.

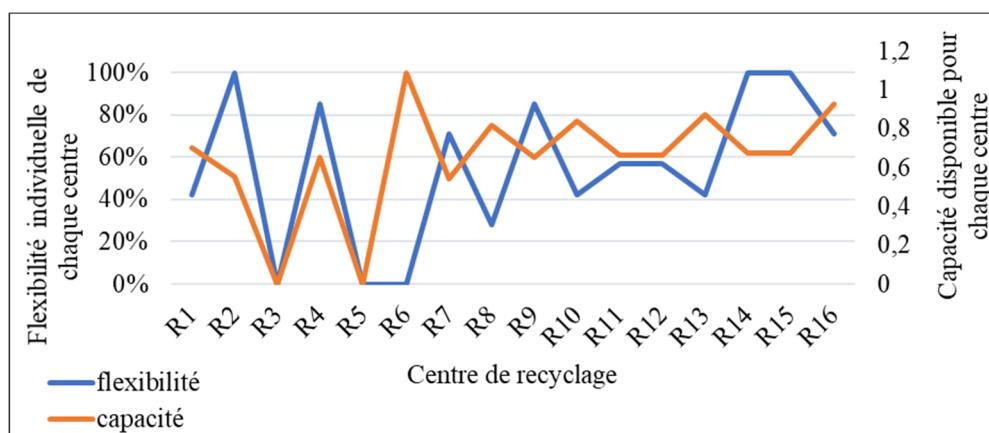


Figure 4.25 Évolution de la flexibilité versus capacité disponible pour chaque centre de recyclage (30 %)

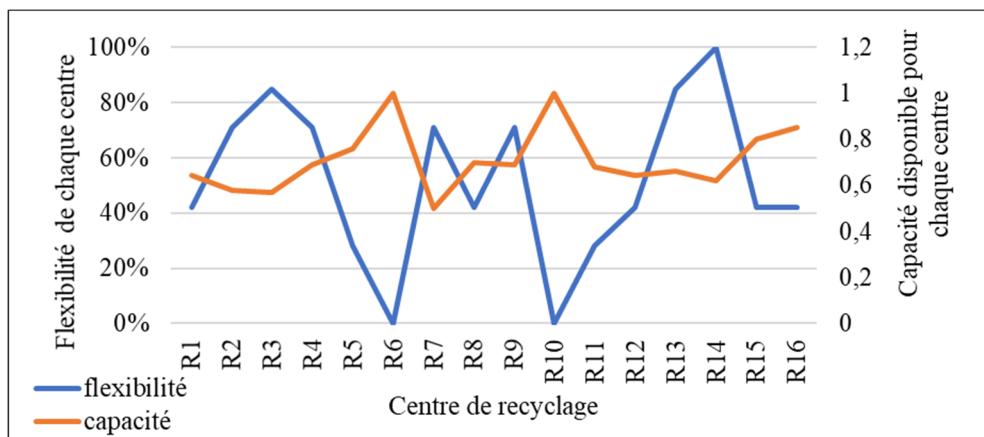


Figure 4.26 Évolution de la flexibilité versus capacité disponible pour chaque centre de recyclage (45 %)

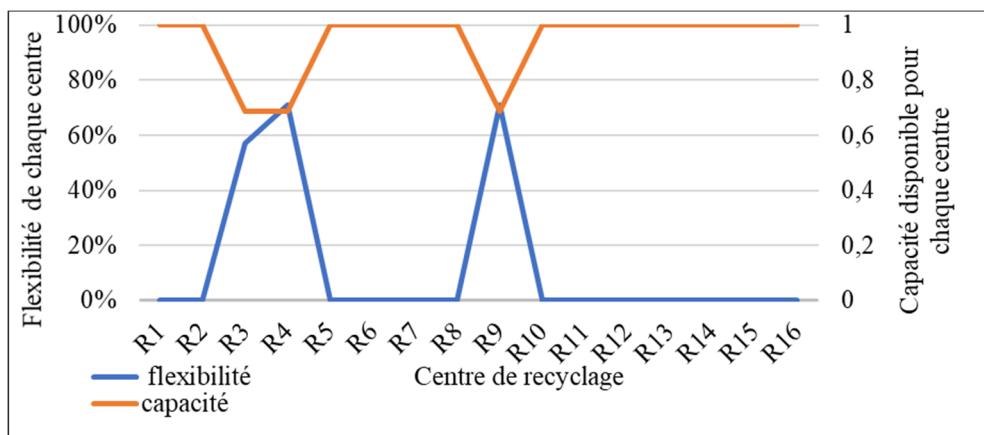


Figure 4.27 Évolution de la flexibilité versus capacité disponible pour chaque centre de recyclage (65 %)

On remarque que pour la première courbe (30 %) les valeurs de flexibilité et de capacité tendent vers un système flexible qui se caractérise par de grandes valeurs de flexibilité de chaque centre et de faibles valeurs de capacité disponible. Pour une valeur de taux de recyclage qui est égale à 45 %, les deux courbes commencent à se séparer. En effet, la courbe de flexibilité translate verticalement vers le bas et celle de la capacité translate vers le haut ce qui montre une diminution de la flexibilité de chaque centre et réciproquement une augmentation de la capacité ce qui dévoile la migration vers un système spécialisé.

La figure 4.27 confirme les conclusions tirées où on voit deux courbes presque parallèles dont chacune forme une ligne horizontale à l'exception de trois valeurs. Les valeurs de flexibilité valent toutes 0 % et les valeurs de capacité sont égales à 1 à l'exception des trois centres. Ceci montre un système dont les centres de recyclages sont presque tous spécialisés pour grande valeur de taux de recyclage.

Les valeurs minimales, moyennes et maximales des capacités, du nombre de produits traité et de la flexibilité de chaque centre sont présentées respectivement dans les figures 4.28, 4.29 et 4.30. Ces graphes aident à catégoriser les centres selon leurs comportements c'est-à-dire compte tenu de leurs localisations et la densité de population qui les entourent. Il existe des centres qui restent toujours spécialisés avec un seul produit comme dans le cas du centre R6 pour toutes les valeurs du taux de recyclage.

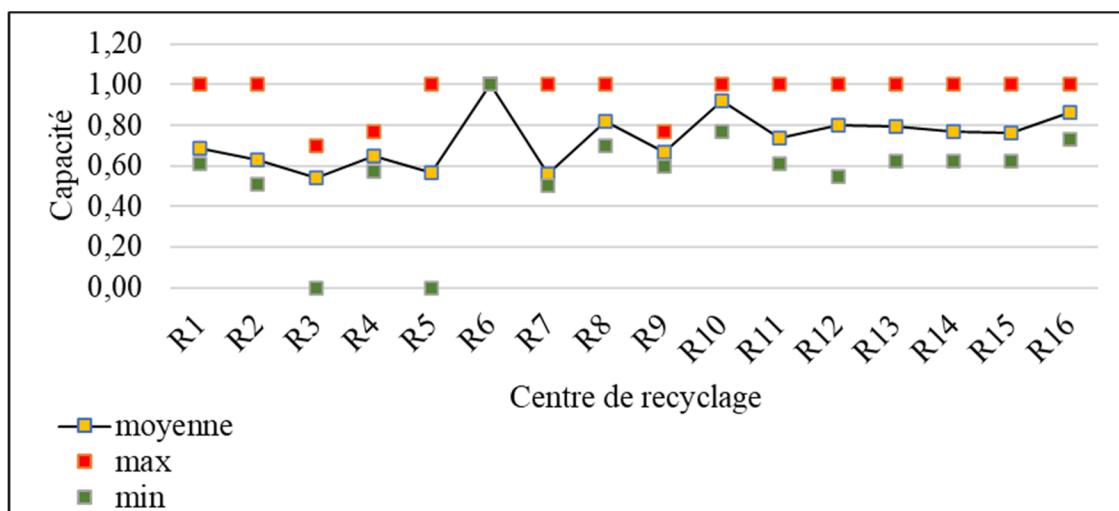


Figure 4.28 Variation de la capacité disponible: minimale, moyenne et maximale de chaque centre de recyclage

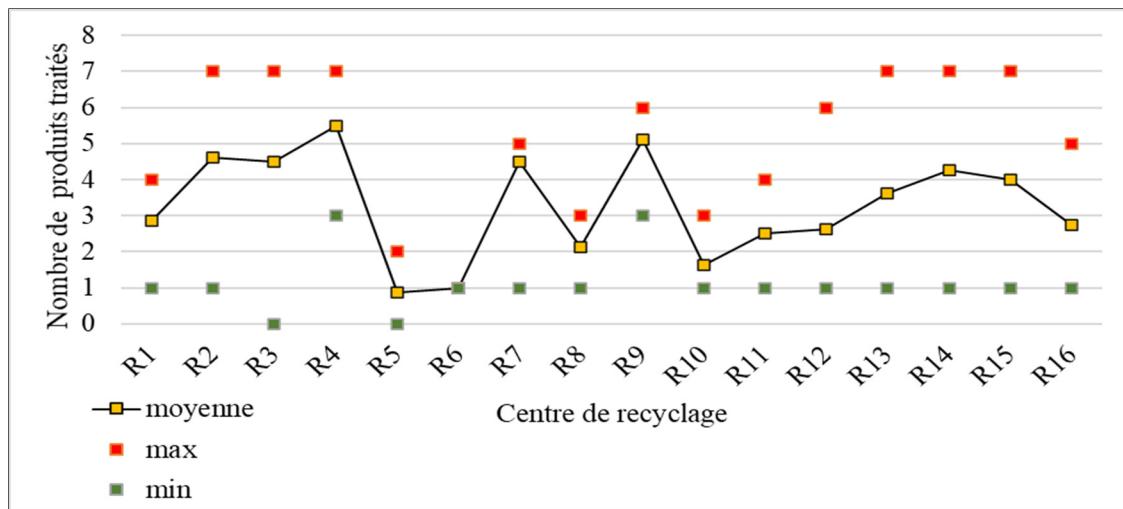


Figure 4.29 Variation du nombre de produits traités : moyen, minimal et maximal pour chaque centre de recyclage

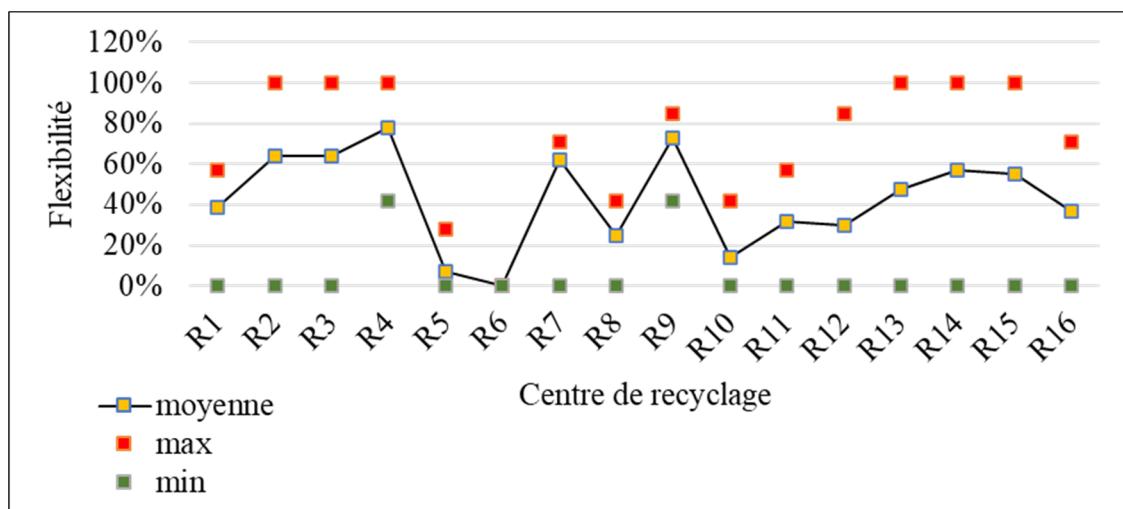


Figure 4.30 Variation de la flexibilité : moyenne, minimale et maximale pour chaque centre de recyclage

Aussi une autre catégorie des centres apparaît. Dans cette catégorie les centres sont assez flexibles comme dans le cas des centres R1, R5, R7, R8, R9, R10, R11. Ces centres subissent une variation dans leurs comportements en fonction de la variation du pourcentage de recyclage, mais ça ne reste quand même pas une grande variation vue que leurs moyennes sont plus proches de l'une des deux bornes que de l'autre. Ceci veut dire qu'ils sont quasi flexibles,

c'est-à-dire, ils ont une tendance à tourner autour d'une valeur de flexibilité, de capacité ou bien de nombre de produits traités spécifique.

La dernière catégorie est celle des centres flexibles qui sont : R2, R12, R13, R14, R15, R16.

Cette catégorie se caractérise par des centres dont le comportement s'altère en fonction de la variation du pourcentage de recyclage. Ces centres peuvent former la liste des sites potentiels pour un projet stratégique d'installation de nouvelles technologies de recyclage capables de traiter des flux de plastique hétérogènes.

4.2.3 Recommandations managériales

La détermination des résultats relative à un modèle est une étape cruciale dans ce présent projet, mais ce qui est plus important c'est de dégager des conclusions, soutenir ou réfuter des propositions et même proposer des recommandations. Des recommandations seront ainsi présentées dans cette section pour faciliter et simplifier la compréhension du projet et aussi pour aider les preneurs de décisions à agir d'une façon efficace et dans le but d'assurer l'intérêt public. Les conclusions dégagées des deux modèles développés dans ce modèle sont présentées comme suit :

- Le réseau de neurones est un outil simple et efficace qui peut donner des résultats acceptables au niveau de l'estimation et qui ne nécessite pas la linéarité entre les variables d'entrée et la variable à estimer.
- L'application du modèle d'optimisation développé permet de donner une liste exhaustive des centres de recyclages qui sont capables de changer de configuration (deviennent flexibles) et d'un autre côté la liste des centres qui devraient rester spécialisés ou même qui devraient être fermés.
- La flexibilité des recycleurs améliore la performance du réseau de logistique inverse surtout au niveau du transport : cout et émission
- Une étude plus approfondie sur le cout de traitement des déchets au niveau du tri et recyclage peut être réalisé pour démontrer l'effet de l'augmentation du taux de recyclage sur la diminution du cout de traitement ou ce qu'on appelle l'économie

d'échelle. De cette façon, le cout de total du réseau aura un grand potentiel de diminution au-delà de l'optimisation des flux et du cout de transport.

- L'injection de la flexibilité nécessite des investissements stratégiques surtout au niveau des technologies de recyclage qui seront capables de traiter des flux hétérogènes
- La flexibilité touche tout le réseau et est transmise d'une manière implicite aux autres activités : tri et enfouissement
- Une attention doit être accordée aux centres de tri en essayant de les reformer avec des technologies de pointe à la place du tri manuel appliquée dans la majorité des cas.
- Les niveaux de recyclages au Québec et généralement au Canada sont faibles. Pour atteindre des ratios de recyclages très élevés, les résultats démontrent qu'un système spécialisé est la meilleure solution. Cependant, atteindre ces niveaux de recyclage nécessite des projets à long terme étalés sur des années. Cette augmentation doit être graduelle et ascendante. C'est-à-dire, une étape transitoire à moyen terme doit être intégrée pour atteindre les valeurs de ratio de recyclage moyennes. Après, on peut chercher à hausser plus la barre en mettant comme objectif des ratios de recyclage supérieur ou égale à 80 %. C'est dans cette étape transitoire qu'on aura besoin d'injecter de la flexibilité parce qu'elle est efficace seulement dans ce palier.

CONCLUSION

Dans ce projet, nous avons mis l'accent sur la nécessité d'exploiter les données massives dans les analyses de chaînes d'approvisionnement. Depuis quelques années, l'analyse des données volumineuse gagne de plus en plus d'ampleur dans le monde en touchant presque tous les secteurs, mais au moment de l'écriture de ces lignes sa présence dans la logistique inverse est encore faible. En s'appuyant sur ce diagnostic, on a constaté la nécessité de développer un projet qui teste la justesse de réaliser cette cohésion entre l'analyse des données et la gestion du réseau de logistique inverse. Un constat du réseau de logistique inverse pour les traitements des déchets ménagers au Québec permet facilement de dégager quelques problématiques auxquelles le réseau fait face. Au-delà du coût et des émissions élevés, le réseau n'a pas la capacité de traiter les variations des quantités de déchets générées d'une année à l'autre surtout que les recycleurs se caractérisent par une spécialisation des processus de traitement. Une modification au niveau de la configuration du réseau demeure nécessaire pour améliorer sa performance opérationnelle et qui est dans notre cas l'injection de la flexibilité dans le réseau à travers les centres de recyclage.

Dans le but d'atteindre ces deux objectifs, deux modèles sont développés dans ce projet : un modèle d'estimation et un modèle d'optimisation linéaire. Le premier consiste à déterminer les quantités des déchets générés dans la prochaine année en se basant sur un réseau de neurones et dans le deuxième ces quantités déterminées seront injectées pour combler le manque de données qui a été aperçu. Le plastique était le type de déchet adopté dans ce projet.

Le modèle d'estimation développé permet de calculer le ratio de génération des déchets en plastique par personne par année. Une fois cette valeur dévoilée, il fallait juste la multiplier par la projection du nombre de populations de chaque MRC au Québec pour la prochaine année pour déterminer la quantité de déchets générée relative à chaque MRC. Deux modèles d'optimisation sont développés pour les deux configurations du réseau : la configuration actuelle qui est spécialisée et la configuration souhaitée qui est flexible. La configuration flexible montre une meilleure performance que celle spécialisée au niveau du coût total et des

émissions totales. Après avoir décortiqué ces mesures globales par activité nous avons pu déterminer que seul le cout de transport est diminué tandis que les autres couts demeurent constants d'une configuration à l'autre. Ceci était prévisible vu qu'on n'a pas défini des couts de traitement unitaire par intervalle dans les centres. C'est-à-dire, quelle que soit la quantité traitée le cout unitaire reste constant.

Les flux physiques du plastique ont été visualisés pour arriver à comprendre ce qui se passe réellement dans le réseau. Ceci a aidé à comprendre que la flexibilité permet de regrouper les flux de plastique dans les centres de tri pour les envoyer ensemble à un seul centre déterminé à la fois. Cela affecte directement les couts de transport à travers l'exploitation des centres de recyclage les plus proches qui deviennent flexibles. Cette exploitation permet de ne pas parcourir de longues distances cherchant des centres capables de traiter un type x de plastique dans la configuration spécialisée.

Une fouille dans les variables de décision relatives à la configuration flexible est réalisée. La flexibilité totale normalisée, étant présentée, montre une décroissance continue pour des pourcentages de recyclage élevés. Cela veut dire que pour de grandes valeurs de recyclage le système tend à être spécialisé. Donc pour de grandes valeurs de pourcentage de recyclages, la configuration spécialisée est bien meilleure, mais afin d'atteindre ces objectifs un passage par une étape transitoire est nécessaire et c'est dans cette étape qu'on aura un recours à la configuration flexible.

Le suivi de la variation moyenne de la flexibilité de chaque centre de recyclage ainsi que sa capacité disponible et le nombre de produits traités font l'objet de la dernière partie de l'analyse. Grâce à cette analyse, on a réussi à catégoriser les centres de recyclages selon leurs tendances à devenir flexible. Une liste exhaustive a été donc développée montrant quels sont les centres qui nécessitent plus que les autres ce changement de configuration. Une étude sur les choix de technologies de recyclage à adopter pour assurer la flexibilité des centres peut être une perspective complémentaire à ce projet. Aussi faire manifester la liaison de la flexibilité entre les opérations de tri et les opérations de recyclage peut être le sujet d'un prochain projet.

ANNEXE I

PARAMÈTRES MODÈLE D'ESTIMATION

Tableau-A I-1 Valeurs des paramètres du réseau de neurones (1974-2019) (Statistique Canada, 2020)

Année	Population	Taux d'emploi (%)	Revenu (\$)	Ratio de génération (Kg/pers.an)
1974	6362125	53,7	20900	44,4
1975	6412575	53,1	21300	43,3
1976	6432019	53,4	21800	43,4
1977	6446529	54,7	21400	43,6
1978	6480428	55,3	21200	43,3
1979	6523258	55,4	21300	42,6
1980	6565745	51,9	20800	39,7
1981	6588636	52,4	19900	39,2
1982	6613628	53,6	20700	39,7
1983	6645778	54,8	21200	40,1
1984	6684699	56	21500	40,2
1985	6745101	57,1	21900	39,9
1986	6805203	57,7	22200	39,3
1987	6882602	58	23400	38,7
1988	6955119	57,5	22300	36,8
1989	7026241	55,9	21300	34,5
1990	7082645	54,6	21800	33,2
1991	7137514	54	21400	31,9
1992	7177923	54,8	21600	31,7
1993	7205074	55,1	21700	31,5
1994	7232952	54,6	21300	30,7
1995	7262945	55	21200	30,4
1996	7286008	56,1	22000	31,0
1997	7262945	55	21200	30,4
1998	7286008	56,1	22000	31,0
1999	7310238	56,9	23200	31,5
2000	7340269	57,8	23800	31,8
2001	7373978	58	24600	31,7
2002	7417882	59,5	25500	32,2

Tableau-A I-1 Valeurs des paramètres du réseau de neurones (1974-2019)
 (Statistique Canada, 2020) (suite)

Année	Population	Taux d'emploi (%)	Revenu (\$)	Ratio de génération (Kg/pers.an)
2003	7461516	60,1	25300	31,7
2004	7510408	60,3	26100	31,5
2005	7559625	60,2	26300	30,8
2006	7604258	60	26500	30,1
2007	7661583	60,7	27300	30,1
2008	7725513	60,6	27300	27,1
2009	7799115	59,4	28000	24,6
2010	7885717	59,8	27700	22,2
2011	7967185	59,8	27600	23,8
2012	8029498	59,7	28600	25,5
2013	8082771	60	29100	24,4
2014	8125478	59,5	29700	24,3
2015	8163132	59,8	29300	24,1
2016	8193624	59,8	30000	24,3
2017	8257450	60,8	30700	24,3
2018	8350601	61	30900	22,9
2019	8446906	61,5	31000	22

Tableau-A I-2 Projection de la population pour les MRC du Québec tiré de (Institut de la statistique du Québec, 2019)

MRC	Population	MRC	Population
Le Québec	8 568 200	Jamésie	13 700
Bas-Saint-Laurent	196 800	Administration régionale Kativik	14 300
La Matapédia	17 300	Eeyou Istchee	18 600
La Matanie	20 700	<u>Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine</u>	89 800
La Mitis	17 900	Communauté maritime des Îles-de-la-Madeleine	12 400
Rimouski-Neigette	58 000	Le Rocher-Percé	16 900
Les Basques	8 500	La Côte-de-Gaspé	17 500
Rivière-du-Loup	34 800	La Haute-Gaspésie	10 900
Témiscouata	18 900	Bonaventure	17 400
Kamouraska	20 800	Avignon	14 700
<u>Saguenay–Lac-Saint-Jean</u>	277 300	<u>Chaudière-Appalaches</u>	431 300
Le Domaine-du-Roy	30 900	L'Islet	17 500
Maria-Chapdelaine	24 400	Montmagny	22 500
Lac-Saint-Jean-Est	52 900	Bellechasse	38 300
Saguenay	146 500	Lévis	148 300
Le Fjord-du-Saguenay	22 700	La Nouvelle-Beauce	38 700
<u>Capitale-Nationale</u>	760 100	Robert-Cliche	19 300
Charlevoix-Est	15 100	Les Etchemins	16 300
Charlevoix	12 900	Beauce-Sartigan	54 000
L'Île-d'Orléans	7 800	Les Appalaches	42 300
La Côte-de-Beaupré	29 700	Lotbinière	34 100
La Jacques-Cartier	47 700	<u>Laval</u>	445 700
Québec	591 400	Laval	445 700
Portneuf	55 600	<u>Lanaudière</u>	522 100
<u>Mauricie</u>	271 400	D'Autray	43 500
Mékinac	12 300	L'Assomption	128 800
Shawinigan	49 000	Joliette	70 200
Trois-Rivières	138 900	Matawinie	52 700
Les Chenaux	19 300	Montcalm	57 500
Maskinongé	36 900	Les Moulins	169 400
La Tuque	15 000	<u>Laurentides</u>	630 800
<u>Estrie</u>	333 200	Deux-Montagnes	105 000
Le Granit	21 300	Thérèse-De Blainville	163 600
Les Sources	14 200	Mirabel	59 200

Tableau-A I-2 Projection de la population pour les MRC du Québec
tiré de (Institut de la statistique du Québec, 2019) (suite)

MRC	Population	MRC	Population
Le Haut-Saint-François	22 800	La Rivière-du-Nord	140 900
Le Val-Saint-François	31 500	Argenteuil	33 500
Sherbrooke	171 800	Les Pays-d'en-Haut	44 900
Coaticook	18 700	Les Laurentides	48 200
Memphrémagog	52 900	Antoine-Labelle	35 600
Montréal	2 081 700	<u>Montérégie</u>	1 591 800
Montréal	2 081 700	Brome-Missisquoi	62 200
<u>Outaouais</u>	400 800	La Haute-Yamaska	92 700
Papineau	23 400	Acton	15 700
Gatineau	291 100	Pierre-De Saurel	51 200
Les Collines-de-l'Outaouais	51 900	Les Maskoutains	89 500
La Vallée-de-la-Gatineau	20 300	Rouville	37 900
Pontiac	14 000	Le Haut-Richelieu	121 300
<u>Abitibi-Témiscamingue</u>	148 000	La Vallée-du-Richelieu	131 800
Témiscamingue	15 600	Longueuil	431 600
Rouyn-Noranda	43 300	Marguerite-D'Youville	80 600
Abitibi-Ouest	20 500	Roussillon	194 200
Abitibi	24 900	Les Jardins-de-Napierville	31 200
La Vallée-de-l'Or	43 600	Le Haut-Saint-Laurent	24 400
<u>Côte-Nord</u>	89 400	Beauharnois-Salaberry	67 600
La Haute-Côte-Nord	10 300	Vaudreuil-Soulanges	159 900
Manicouagan	29 800	<u>Centre-du-Québec</u>	251 400
Sept-Rivières	34 600	L'Érable	23 500
Caniapiscau	3 800	Bécancour	20 700
Minganie	6 500	Arthabaska	74 800
Le Golfe-du-Saint-Laurent	4 500	Drummond	108 500
<u>Nord-du-Québec</u>	46 600	Nicolet-Yamaska	23 900

Tableau-A I-3 Performance du réseau de neurones

	Configuration des neurones	Division apprentissage /test	Précision apprentissage	Précision test
1	(3-1-1)	80 :20	0,71	0,73
	(3-1-1)	70 :30	0,66	0,67
	(3-1-1)	60 :40	0,72	0,70
2	(3-2-1)	80 :20	0,72	0,71
	(3-2-1)	70 :30	0,84	0,82
	(3-2-1)	60 :40	0,77	0,77
3	(3-3-1)	80 :20	0,77	0,8
	(3-3-1)	70 :30	0,85	0,85
	(3-3-1)	60 :40	0,85	0,84
4	(3-4-1)	80 :20	0,83	0,81
	(3-4-1)	70 :30	0,85	0,84
	(3-4-1)	60 :40	0,82	0,83
5	(3-5-1)	80 :20	0,82	0,84
	(3-5-1)	70 :30	0,83	0,83
	(3-5-1)	60 :40	0,85	0,84
6	(3-6-1)	80 :20	0,83	0,83
	(3-6-1)	70 :30	0,85	0,85
	(3-6-1)	60 :40	0,83	0,83
7	(3-7-1)	80 :20	0,83	0,83
	(3-7-1)	70 :30	0,83	0,82
	(3-7-1)	60 :40	0,82	0,83
8	(3-8-1)	80 :20	0,83	0,84
	(3-8-1)	70 :30	0,84	0,82
	(3-8-1)	60 :40	0,84	0,82
9	(3-9-1)	80 :20	0,83	0,82
	(3-9-1)	70 :30	0,86	0,84
	(3-9-1)	60 :40	0,83	0,82

Tableau-A I-3 Performance du réseau de neurones (suite)

	Configuration des neurones	Division apprentissage /test	Précision apprentissage	Précision test
10	(3-10-1)	80 :20	0,83	0,83
	(3-10-1)	70 :30	0,83	0,82
	(3-10-1)	60 :40	0,84	0,85

ANNEXE II

RÉSULTATS DU MODÈLE D'ESTIMATION

Tableau-A II Quantité de déchets générés pour le scénario 1

Municipalités	Scénario	Quantité (en T)
MRC 01 - MRC de Sept-Rivières	Scénario 1	842,72
MRC 02 - MRC de Minganie	Scénario 1	158,32
MRC 03 - MRC de Manicouagan	Scénario 1	725,81
MRC 04 - MRC de La Haute-Côte-Nord	Scénario 1	250,87
MRC 05 - MRC de Caniapiscau	Scénario 1	92,55
MRC 06 - MRC de Shawinigan	Scénario 1	1193,45
MRC 07 - MRC de Maskinongé	Scénario 1	898,74
MRC 08 - MRC de Mékinac	Scénario 1	299,58
MRC 09 - MRC des Chenaux	Scénario 1	470,07
MRC 10 - MRC de la Tuque	Scénario 1	365,34
MRC 11 - MRC de CMQ	Scénario 1	14404,23
MRC 12 - MRC de Portneuf	Scénario 1	1354,20
MRC 13 - MRC de Charlevoix	Scénario 1	314,19
MRC 14 - MRC de Charlevoix-EST	Scénario 1	367,78
MRC 15 - MRC de Gatineau	Scénario 1	7090,08
MRC 16 - MRC de la Vallée-de-la-Gatineau	Scénario 1	494,43
MRC 17 - MRC de Papineau	Scénario 1	569,93
MRC 18 - MRC de Pontiac	Scénario 1	340,99
MRC 19 - MRC des Collines-de-l'Outaouais	Scénario 1	1264,08
MRC 20 - MRC de Drummond	Scénario 1	2642,64
MRC 21 - MRC de Bécancour	Scénario 1	504,17
MRC 22 - MRC d'Arthabaska	Scénario 1	1821,84
MRC 23 - MRC de L'Érable	Scénario 1	572,37
MRC 24 - MRC de Nicolet-Yamaska	Scénario 1	582,11
MRC 25 - Ville de Sherbrooke	Scénario 1	4184,39
MRC 26 - MRC de Coaticook	Scénario 1	455,46
MRC 27 - MRC de Memphrémagog	Scénario 1	1288,44
MRC 28 - MRC des Sources	Scénario 1	345,86
MRC 29 - MRC du Granit	Scénario 1	518,79
MRC 30 - MRC du Val-Saint-François	Scénario 1	767,22
MRC 31 - MRC du Haut-Saint-François (a)	Scénario 1	555,32
MRC 32 - MRC de CMM	Scénario 1	50702,21
MRC 33 - MRC de Maria-Chapdelaine	Scénario 1	594,29

Tableau-A II Quantité de déchets générés pour le scénario 1 (suite)

Municipalités	Scénario	Quantité (en T)
MRC 34 - Ville de Saguenay	Scénario 1	3568,18
MRC 35 - MRC du Fjord-du-Saguenay	Scénario 1	552,88
MRC 36 - MRC d'Argenteuil	Scénario 1	815,93
MRC 37 - MRC d'Antoine-Labelle, des Laurentides et des Pays-d'en-Haut	Scénario 1	3134,64
MRC 38 - MRC de La Rivière-du-Nord	Scénario 1	3431,78
MRC 39 - MRC d'Acton et MRC des Maskoutains	Scénario 1	2562,27
MRC 40 - MRC de Beauharnois-Salaberry	Scénario 1	1646,48
MRC 41 - MRC de Brome-Missisquoi	Scénario 1	1514,95
MRC 42 - MRC de La Haute-Yamaska	Scénario 1	2257,82
MRC 43 - MRC de La Vallée-du-Richelieu	Scénario 1	3210,14
MRC 44 - MRC de Pierre-De Saurel	Scénario 1	1247,04
MRC 45 - MRC de Rouville	Scénario 1	923,1
MRC 46 - MRC des Jardins-de-Napierville	Scénario 1	759,91
MRC 47 - MRC de Vaudreuil-Soulanges	Scénario 1	3894,55
MRC 48 - MRC du Haut-Richelieu	Scénario 1	2954,4
MRC 49 - MRC du Haut-Saint-Laurent	Scénario 1	594,29
MRC 50 - MRC de Kamouraska	Scénario 1	506,61
MRC 51 - MRC de La Matanie	Scénario 1	504,17
MRC 52 - MRC de La Matapédia	Scénario 1	421,36
MRC 53 - MRC de La Mitis	Scénario 1	435,98
MRC 54 - MRC de Rimouski-Neigette	Scénario 1	1412,66
MRC 55 - MRC Rivière-du-Loup	Scénario 1	847,59
MRC 56 - MRC des Basques	Scénario 1	207,03
MRC 57 - MRC de Témiscouata	Scénario 1	460,33
MRC 58 - MRC d'Abitibi-Ouest	Scénario 1	499,3
MRC 59 - MRC d'Abitibi	Scénario 1	606,47
MRC 60 - MRC de La Vallée-de-l'Or	Scénario 1	1061,93
MRC 61 - MRC de Témiscamingue	Scénario 1	379,96
MRC 62 - MRC de Rouyn-Noranda	Scénario 1	1054,62
MRC 63 - MRC de Bonaventure	Scénario 1	423,8
MRC 64 - MRC d'Avignon	Scénario 1	358,04
MRC 65 - MRC de La Haute-Gaspésie	Scénario 1	265,48
MRC 66 - MRC des Îles-de-la-Madeleine	Scénario 1	302,02

Tableau-A II Quantité de déchets générés pour le scénario 1 (suite)

Municipalités	Scénario	Quantité (en T)
MRC 67 - MRC du Rocher-Percé et MRC de La Côte-de-Gaspé	Scénario 1	837,85
MRC 69 - MRC de Lévis	Scénario 1	3612,02
MRC 70 - MRC de Robert-Cliche	Scénario 1	470,07
MRC 71 - MRC des Etchemins	Scénario 1	397,01
MRC 72 - MRC des Appalaches	Scénario 1	1030,27
MRC 73 - MRC de Montmagny	Scénario 1	548,01
MRC 74 - MRC de Lotbinière	Scénario 1	830,54
MRC 75 - MRC de L'Islet	Scénario 1	426,23
MRC 76 - MRC de Bellechasse	Scénario 1	932,84
MRC 77 - MRC de Beauce-Sartigan	Scénario 1	1315,23
MRC 78 - MRC de La Nouvelle-Beauce	Scénario 1	942,58
MRC 79 - RC de D'Autray	Scénario 1	1059,49
MRC 80 - MRC de Joliette	Scénario 1	1709,8
MRC 81 - MRC de Matawinie	Scénario 1	1283,57
MRC 82 - MRC de Montcalm	Scénario 1	1400,48

BIBLIOGRAPHIE

- Abbasi, Maryam, et Ali El Hanandeh. 2016. « Forecasting municipal solid waste generation using artificial intelligence modelling approaches ». *Waste Management* 56:13-22.
- Abbasi, Maryam, Mohammad Naim Rastgoo, et Bahareh Nakisa. 2019. « Monthly and seasonal modeling of municipal waste generation using radial basis function neural network ». *Environmental Progress and Sustainable Energy* 38(3). doi: 10.1002/ep.13033.
- Adamović, Vladimir M., Davor Z. Antanasijević, Mirjana Ristić, Aleksandra A. Perić-Grujić, et Viktor V. Pocajt. 2017. « Prediction of municipal solid waste generation using artificial neural network approach enhanced by structural break analysis ». *Environmental Science and Pollution Research* 24(1):299-311. doi: 10.1007/s11356-016-7767-x.
- Agard, Bruno. 2021. *Réseaux de neurones : le perceptron multi-couches*.
- Akdoğan, M. Sükr., et Ayşen Coşkun. 2012. « Drivers of Reverse Logistics Activities: An Empirical Investigation ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 58:1640-49. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.1130.
- Antanasijević, Davor, Viktor Pocajt, Ivanka Popović, Nebojša Redžić, et Mirjana Ristić. 2013. « The forecasting of municipal waste generation using artificial neural networks and sustainability indicators ». *Sustainability Science* 8(1):37-46. doi: 10.1007/s11625-012-0161-9.
- Azizi, Vahid, Guiping Hu, et Mahsa Mokari. 2020. « A two-stage stochastic programming model for multi-period reverse logistics network design with lot-sizing ». *Computers and Industrial Engineering* 143.

Balaman, Şebnem Yılmaz. 2019. « Basics of Decision-Making in Design and Management of Biomass-Based Production Chains ». P. 143-83 dans *Decision-Making for Biomass-Based Production Chains*. Elsevier.

Bariza, Belourghi, Larbi Houichi, et Salim Heddam. 2012. « RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS POUR LA MODELISATION DU DOSAGE DU COAGULANT DANS LES STATIONS DE TRAITEMENTS DES EAUX DE SURFACE A FAIBLE TURBIDITE ».

Benferhat, Salem, Julien Hué, Sylvain Lagrue, et Julien Rossit. 2011. « Logique Possibiliste à Intervalles ».

Berman, Jules J. 2016. « Understanding Your Data ». *Data Simplification* 135-87. doi: 10.1016/B978-0-12-803781-2.00004-7.

Bing, Xiaoyun, Jacqueline M. Bloemhof-Ruwaard, et Jack G. A. J. Van Der Vorst. 2014. « Sustainable reverse logistics network design for household plastic waste ». *Flexible Services and Manufacturing Journal* 26(1-2):119-42. doi: 10.1007/s10696-012-9149-0.

Bouchon-Meunier, Bernadette. 2007. « La logique floue ». doi: 10.3917/PUF.BOUCH.2007.01.

Brito, Marisa P. de, et Rommert Dekker. 2011. « A Framework for Reverse Logistics ». *An Automated Irrigation System Using Arduino Microcontroller* 1908(January):2-6. doi: 10.1007/978-3-540-24803-3.

Chari, Navin, Uday Venkatadri, et Claver Diallo. 2016. « Design of a reverse logistics network for recyclable collection in Nova Scotia using compaction trailers ». *Infor* 54(1):1-18. doi: 10.1080/03155986.2016.1149315.

Chu, Jianchun, Xiangyang Liu, Ziwen Zhang, Yilin Zhang, et Maogang He. 2021. « A novel method overcomeing overfitting of artificial neural network for accurate prediction: Application on thermophysical property of natural gas ». *Case Studies in Thermal Engineering* 28:101406. doi: 10.1016/J.CSITE.2021.101406.

Chuang, Yi Fei, Hsu Tung Lee, et Yi Chuan Lai. 2012. « Item-associated cluster assignment model on storage allocation problems ». *Computers and Industrial Engineering* 63(4):1171-77.

Cormier, Gabriel. 2014. « Logique Floue - Chapitre 11 ». 1-13.

Cui, Jian Xun, Feng Liu, Jia Hu, Davy Janssens, Geert Wets, et Mario Cools. 2016. « Identifying mismatch between urban travel demand and transport network services using GPS data: A case study in the fast growing Chinese city of Harbin ». *Neurocomputing* 181:4-18.

Daugherty, Patricia, Chad Autry, et Alexander Ellinger. 2001. « Reverse Logistics: The Relationship Between Resource Commitment and Program Performance ». *Journal of Business Logistics* 22:107-23. doi: 10.1002/j.2158-1592.2001.tb00162.x.

Denise F. Polit. 2010. « Statistics and Data Analysis for Nursing Research, 2nd Edition ». Consulté 7 décembre 2021 (<https://www.pearson.com/us/higher-education/program/Polit-Statistics-and-Data-Analysis-for-Nursing-Research-2nd-Edition/PGM141444.html>).

Ding, Tao, Liang Liang, Kaile Zhou, Min Yang, et Yuqi Wei. 2020. « Water-energy nexus: The origin, development and prospect ». doi: 10.1016/j.ecolmodel.2020.108943.

Díz Fernández, Adenso., María José. Álvarez Gil, et Pilar. González Torres. 2004. *Logística inversa y medio ambiente: aspectos estratégicos y operativos*. McGraw-Hill / Interamericana de España.

Dong, Anh Vo, Catherine Azzaro-Pantel, et Marianne Boix. 2020. « Multi-period optimal design of an aerospace CFRP waste management supply chain: Data set, variables and criteria for the development of a multi-objective MILP model ». *Data in Brief* 28:104766. doi: 10.1016/J.DIB.2019.104766.

Dowlatabadi, Shad. 2000. « Developing a Theory of Reverse Logistics ». *Interfaces* 30:143-55. doi: 10.1287/inte.30.3.143.11670.

Environment and Climate Change Canada. 2019. *Economic study of the Canadian plastic industry, markets and waste : summary report to Environment and Climate Change Canada*.

Galvez-cloutier, Rosa. 2012. *Par.*

Gileno, Luciano Antonio, et Luiz Felipe Ramos Turci. 2021. « Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes ». *Cleaner Environmental Systems* 3:100057. doi: 10.1016/J.CESYS.2021.100057.

Glynn, Peter W. 2004. « Stochastic Optimization ». *Encyclopedia of Actuarial Science* 1-20. doi: 10.1002/9780470012505.tas034.

Gouvernement du Québec. s. d. « Géographie du territoire québécois | Gouvernement du Québec ». Consulté 25 novembre 2021 (<https://www.quebec.ca/gouv/portrait-quebec/geographie-territoire>).

Govindan, Kannan, Parichehr Paam, et Amir Reza Abtahi. 2016. « A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design ». *Ecological Indicators* 67:753-68.

Greenpeace Canada. 2020. *Plastic Recycling: That's Not a Thing*.

Hazen, Benjamin T., Yun Wu, Casey G. Cegielski, L. Allison Jones-Farmer, et Dianne J. Hall. 2012. « Consumer reactions to the adoption of green reverse logistics ». <http://dx.doi.org/10.1080/09593969.2012.690777> 22(4):417-34. doi: 10.1080/09593969.2012.690777.

Hegazy, T., P. Fazio, et O. Moselhi. 1994. « Developing practical neural network applications using back-propagation ». *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 9(2):145-59.

IBM. 2021. « Big Data Analytics | IBM ». Consulté 24 novembre 2021 (<https://www.ibm.com/analytics/hadoop/big-data-analytics>).

INSTITUT DE LA STATISTIQUE DU QUÉBEC. 2019. *Perspectives démographiques du Québec et des régions* ,.

Iqbal, Mehreen, Knut Breivik, Jabir Hussain Syed, Riffat Naseem Malik, Jun Li, Gan Zhang, et Kevin C. Jones. 2015. « Emerging issue of e-waste in Pakistan: A review of status, research needs and data gaps ». *Environmental Pollution* 207:308-18. doi: 10.1016/J.ENVPOL.2015.09.002.

Ivanova, Nadezhda, Viliana Gugleva, Mirena Dobreva, Ivaylo Pehlivanov, Stefan Stefanov, et Velichka Andonova. 2016. « We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 % ». *Intech i(tourism)*:13.

Jacob-vaillancourt, Colin. 2018. « Caractérisation avancée et valorisation des plastiques mélangés postconsommation Caractérisation avancée et valorisation des plastiques mélangés postconsommation Étude de cas chez Gaudreau Environnement Inc . »

Jain, Rajeev, A. R. Singh, H. C. Yadav, et P. K. Mishra. 2014. « Using data mining synergies for evaluating criteria at pre-qualification stage of supplier selection ». *Journal of Intelligent Manufacturing* 25(1):165-75. doi: 10.1007/s10845-012-0684-z.

Jerbia, Rim, Mouna Kchaou Boujelben, Mohamed Amine Sehli, et Zied Jemai. 2018. « A stochastic closed-loop supply chain network design problem with multiple recovery options ». *Computers and Industrial Engineering* 118:23-32.

Kannan, Devika, Ali Diabat, Mahmoud Alrefaei, Kannan Govindan, et Geng Yong. 2012a. « A carbon footprint based reverse logistics network design model ». *Resources, Conservation and Recycling* 67:75-79.

Kannan, Devika, Ali Diabat, Mahmoud Alrefaei, Kannan Govindan, et Geng Yong. 2012b. « A carbon footprint based reverse logistics network design model ». *Resources, Conservation and Recycling* 67:75-79. doi: 10.1016/J.RESCONREC.2012.03.005.

Kannan Govindan , H. Soleimani, Devika Kannan. 2014. « Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future ». Consulté 25 novembre 2021(<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0377221714005633?token=719384E84583966F05AAD78A1CB5A215FF5DE5D02E3B25FAC8ACDB95ADB436BE088CD1BF2F6B26A790DCE0BC043FEAAD&originRegion=us-east-1&originCreation=20211125173119>).

Kannangara, Miyuru, Rahul Dua, Leila Ahmadi, et Farid Bensebaa. 2018. « Modeling and prediction of regional municipal solid waste generation and diversion in Canada using machine learning approaches ». *Waste Management* 74:3-15. doi: 10.1016/J.WASMAN.2017.11.057.

Kolomvos, Georges. 2007. « Résolution de grands problèmes stochastiques multi-étapes : Application à un problème de dimensionnement de capacités et de gestion de flux et de stocks soutenue ».

Kumar, Atul, S. R. Samadder, Nitin Kumar, et Chandrakant Singh. 2018. « Estimation of the generation rate of different types of plastic wastes and possible revenue recovery from informal recycling ». *Waste Management* 79:781-90. doi: 10.1016/j.wasman.2018.08.045.

Lee, C., Yi Cao, et Kam K. H. Ng. 2017. « Big Data Analytics for Predictive Maintenance Strategies ».

Lopez, Rafael Holdorf. 2010. « Thèse Le grade de Docteur Rafael HOLDORF LOPEZ Optimisation en présence d'incertitudes ». (May). doi: 10.13140/RG.2.2.34441.80480.

Ma, Jungmok, Minjung Kwak, et Harrison M. Kim. 2014. « Demand trend mining for predictive life cycle design ». *Journal of Cleaner Production* 68:189-99.

Maheu, Louis, Jean-Guy Vaillancourt, Liliane Cotnoir, et Michel Séguin. 1999. « Chapitre 12. Gestion des déchets, environnement et société ». *La gestion écologique des déchets* 213-20. doi: 10.4000/BOOKS.PUM.14785.

Maroufpoor, Saman, Rahim Azadnia, et Omid Bozorg-Haddad. 2020. « Stochastic optimization: stochastic diffusion search algorithm ». *Handbook of Probabilistic Models* 437-48. doi: 10.1016/B978-0-12-816514-0.00017-5.

Midthun, K. T., V. S. Nørstebø, A. Tomsgard, et A. S. Werner. 2016. « Natural Gas Networks ». dans *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier.

Miles, Matthew B., et A. Michael Huberman. 2003. *Analyse des données qualitatives*. De Boeck Supérieur.

Moslehi, M. Saleh, Hadi Sahebi, et Ashkan Teymouri. 2020. « A multi-objective stochastic model for a reverse logistics supply chain design with environmental considerations ». *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*.

Nettleton, David. 2014. « Commercial Data Mining: Processing, Analysis and Modeling for Predictive Analytics Projects ». *Commercial Data Mining: Processing, Analysis and Modeling for Predictive Analytics Projects* 1-288. doi: 10.1016/C2013-0-00263-0.

Nurjanni, Kartina Puji, Maria S. Carvalho, et Lino Costa. 2017. « Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model ». *International Journal of Production Economics* 183:421-32.

Oliveira, Verónica, Vitor Sousa, et Celia Dias-Ferreira. 2019. « Artificial neural network modelling of the amount of separately-collected household packaging waste ». *Journal of Cleaner Production* 210:401-9.

Organisation internationale du travail. s. d. « Organisation internationale du Travail ». Consulté 14 décembre 2021 (<https://www.ilo.org/global/lang--fr/index.htm>).

Paydar, Mohammad Mahdi, et Marjan Olfati. 2018. « Designing and solving a reverse logistics network for polyethylene terephthalate bottles ». *Journal of Cleaner Production* 195:605-17.

- Perumal, Andrew, et David Timmons. 2017. « Contextual Density and US Automotive CO₂ Emissions across the Rural–Urban Continuum ». *International Regional Science Review* 40(6):590-615. doi: 10.1177/0160017615614897.
- Prematunga, Roshani K. 2012. « Correlational analysis ». *Australian Critical Care* 25(3):195-99. doi: 10.1016/J.AUCC.2012.02.003.
- RECYC-QUÉBEC. 2019. « Responsabilité élargie des producteurs FICHE INFORMATIVE Février ».
- RECYC-QUÉBEC. s. d. « RECYC-QUÉBEC - Centre de documentation ». Consulté 16 décembre 2021 (<https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/centre-de-documentation>).
- Recyc-Québec, Éco entreprise Québec. 2016. « ALLOCATION DES COÛTS PAR ACTIVITÉ RÉSULTATS 2016 ». 1-5.
- Recyc Québec. 2018. « Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles au Québec Avant-propos ». 50:15.
- Ribic, Bojan, Lato Pezo, Dinko Sincic, Biljana Loncar, et Neven Voca. 2019. « Predictive model for municipal waste generation using artificial neural networks—Case study City of Zagreb, Croatia ». *International Journal of Energy Research* 43(11):5701-13. doi: 10.1002/er.4632.
- Sagnak, Muhittin, Yalcin Berberoglu, İlker Memis, et Ogulcan Yazgan. 2021. « Sustainable collection center location selection in emerging economy for electronic waste with fuzzy Best-Worst and fuzzy TOPSIS ». *Waste Management* 127:37-47. doi: 10.1016/J.WASMAN.2021.03.054.

Samuels, S. M., et William Feller. 1969. « An Introduction to Probability Theory and Its Applications, Vol. 1 ». *Technometrics* 11(2):405. doi: 10.2307/1267275.

Sangwan, Kuldip Singh. 2017. « Key Activities, Decision Variables and Performance Indicators of Reverse Logistics ». *Procedia CIRP* 61:257-62. doi: 10.1016/j.procir.2016.11.185.

Shahbaz, M., M. Srinivas, J. A. Harding, et M. Turner. 2006. « Product Design and Manufacturing Process Improvement Using Association Rules ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 220(2):243-54. doi: 10.1243/095440506X78183.

Sheriff, K. M. M., S. Nachiappan, et H. Min. 2014. « Combined location and routing problems for designing the quality-dependent and multi-product reverse logistics network ». *Journal of the Operational Research Society* 65(6):873-87. doi: 10.1057/jors.2013.22.

Sirkin, R. 2011. « Statistics for the Social Sciences ». *Statistics for the Social Sciences*. doi: 10.4135/9781412985987.

Soleimani, Hamed, Mirmehdi Seyyed-Esfahani, et Mohsen Akbarpour Shirazi. 2016. « A new multi-criteria scenario-based solution approach for stochastic forward/reverse supply chain network design ». *Annals of Operations Research* 242(2):399-421. doi: 10.1007/s10479-013-1435-z.

Sowlati, T. 2016. « Modeling of forest and wood residues supply chains for bioenergy and biofuel production ». P. 167-90 dans *Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining*, édité par J. B. Holm-Nielsen et E. A. Ehimen. Woodhead Publishing.

Statistique Canada. 2020. *Statistique Canada, Estimations démographiques (septembre 2020)*.
Adapté par l’Institut de la statistique du Québec.

Statistique Canada. s. d. « Statistique Canada : L'organisme statistique national du Canada ». Consulté 14 décembre 2021 (<https://www.statcan.gc.ca/fr/debut>).

SteadieSeifi, Maryam. 2011. « Logistics Strategic Decisions ». P. 43-53 dans *Logistics Operations and Management*, édité par R. Z. Farahani, S. Rezapour, et L. Kardar. London: Elsevier.

Tazi, Nacef, Rachida Idir, et Amor Ben Fraj. 2020. « Sustainable reverse logistic of construction and demolition wastes in French regions: Towards sustainable practices ». *Procedia CIRP* 90:712-17. doi: 10.1016/J.PROCIR.2020.01.126.

Thierry, Martijn, Marc Salomon, Jo van Nunen, et Luk van Wassenhove. 1995. « Strategic Issues in Product Recovery Management ». *California Management Review* 37(2):114-35. doi: 10.2307/41165792.

Tremblay, Caroline, et Rose-laure Valentin. 2020. « CONCEPTION D ’ UN RÉSEAU LOGISTIQUE INVERSE POUR LE RECYCLAGE DU PLASTIQUE ».

Trochu, Julien. 2015. « Modèle de planification tactique de chaîne d’approvisionnement soumise à des régulations environnementales ».

Trochu, Julien, Amin Chaabane, et Mustapha Ouhimmou. 2018. « Reverse logistics network redesign under uncertainty for wood waste in the CRD industry ». *Resources, Conservation and Recycling* 128:32-47.

Trochu, Julien, Amin Chaabane, et Mustapha Ouhimmou. 2019. « A two-stage stochastic optimization model for reverse logistics network design under dynamic suppliers’ locations ». *Waste Management* 95:569-83.

Turner, Phil, et Susan Turner. 2010. « Triangulation in Presence Research ». *Triangulation In Practice* 1-13.

US EPA. s. d. « Scope 1 and Scope 2 Inventory Guidance | US EPA ». Consulté 8 décembre 2021 (<https://www.epa.gov/climateleadership/scope-1-and-scope-2-inventory-guidance>).

Vanderreydt, Ive, Tom Rommens, Anna Tenhunen, Lars Fogh Mortensen, et Ida Tange. 2021. « Greenhouse gas emissions and natural capital implications of plastics (including biobased plastics) ». (May).

Waller, Matthew A., et Stanley E. Fawcett. 2013. « Data science, predictive analytics, and big data: A revolution that will transform supply chain design and management ». *Journal of Business Logistics* 34(2):77-84. doi: 10.1111/jbl.12010.

Wang, Fan, Xiaofan Lai, et Ning Shi. 2011. « A multi-objective optimization for green supply chain network design ». *Decision Support Systems* 51(2):262-69. doi: 10.1016/J.DSS.2010.11.020.

Wilson, Matthew, et Sean Goffnett. 2021. « Reverse logistics: Understanding end-of-life product management ». *Business Horizons*. doi: 10.1016/J.BUSHOR.2021.10.005.

Xifeng, Tang, Zhang Ji, et Xu Peng. 2013. « A multi-objective optimization model for sustainable logistics facility location ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 22:45-48. doi: 10.1016/J.TRD.2013.03.003.

Xu, Zhitao, Adel Elomri, Wenjie Liu, Hui Liu, et Miao Li. 2021. « Robust global reverse logistics network redesign for high-grade plastic wastes recycling ». *Waste Management* 134(October 2020):251-62. doi: 10.1016/j.wasman.2021.08.024.

Yu, Hao, et Wei Deng Solvang. 2018. « Incorporating flexible capacity in the planning of a multi-product multi-echelon sustainable reverse logistics network under uncertainty ». *Journal of Cleaner Production* 198:285-303.

Yuchi, Qunli, Nengmin Wang, Shuang Li, Zhen Yang, et Bin Jiang. 2019. « A Bi-Objective Reverse Logistics Network Design under the Emission Trading Scheme ». *IEEE Access* 7:105072-85. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2898213.

Zhang, Yan, Yanyan He, Jinfeng Yue, et Qinglong Gou. 2019. « Pricing decisions for a supply chain with refurbished products ». *International Journal of Production Research* 57(9):2867-2900. doi: 10.1080/00207543.2018.1543968.