



Titre: Planification du transport dans un réseau hybride clients-succursales
Title:

Auteur: Suzanne Pirie
Author:

Date: 2020

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Pirie, S. (2020). Planification du transport dans un réseau hybride clients-succursales [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/5245/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/5245/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Martin Trépanier, & Bernard Gendron
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Planification du transport dans un réseau hybride clients-succursales

SUZANNE PIRIE

Département de mathématiques et de génie industriel

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

Génie industriel

Mars 2020

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Planification du transport dans un réseau hybride clients-succursales

présenté par **Suzanne PIRIE**

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

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

Jean-Marc FRAYRET, président

Martin TRÉPANIÉ, directeur de recherche

Bernard GENDRON, codirecteur de recherche

Maha BEN ALI, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directeurs de recherche, Martin Trépanier et Bernard Gendron d'avoir encadré mon parcours à la maîtrise recherche à Polytechnique Montréal. Je suis particulièrement reconnaissante du soutien reçu mais aussi de toutes les opportunités d'apprentissage tout au long de ce parcours. Il va sans dire que l'aide financière apportée tout au long de cette maîtrise est appréciée et m'a permis de me concentrer sur mes travaux.

J'aimerais aussi remercier les membres de l'équipe de la SAQ qui ont collaboré à cette étude. Leur expertise ainsi que l'aide et les retours apportés ont été particulièrement bénéfiques à l'accomplissement des travaux présentés.

Ce mémoire n'aurait pas eu lieu sans l'aide en programmation apportée par Khedidja Seridi et Ammar Metnani du CIRRELT qui ont su démontrer patience et pédagogie.

Enfin, j'aimerais remercier mes collègues et surtout amis Ngoné Arame Niang, Benjamin Disson ainsi que le reste de notre bureau pour leur soutien et leurs remarques constructives et bienveillantes tout au long de cette maîtrise. Une mention toute spéciale à mes amis d'HEC qui ont cru en moi et m'ont encouragé en tout temps.

RÉSUMÉ

La livraison de marchandises est en enjeu important dans le développement des économies actuelles (Transport Canada, 2019). La demande pour le transport de marchandises ne cesse d'augmenter et le transport routier reste le moyen de transport le plus flexible afin de satisfaire cette demande. Néanmoins, le transport routier est responsable de 20,3% des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Statistiques Canada, 2017) et les entreprises doivent s'adapter pour maintenir leur compétitivité tout en prenant en compte les externalités négatives liées à leurs opérations.

Ce mémoire se concentre sur la planification du transport pour une société dont une partie des opérations consiste en la distribution de produits au Québec. Le réseau de distribution de l'entreprise est composé de succursales et de clients privés. La planification proposée se base sur l'étude de scénarios opérationnels basés sur différents paramètres (seuil de commande des clients, quantités commandées et fréquence de livraison notamment).

L'ensemble de ce mémoire est divisé en plusieurs aspects. Le premier aspect couvert est la préparation de la base de données et des fichiers de traitement pour la création des tournées. Deuxièmement, un plan d'expérience complet sur 216 expériences est mis en place et les résultats obtenus sont présentés. Le plan d'expérience prend en compte des paramètres environnementaux (nombre de clients privés ou de succursales à livrer) et opérationnels (seuil de demande, quantité à livrer ainsi que la fréquence de livraison). Afin de pouvoir comparer les différents jeux de paramètres, des mesures de performance sont mises en place (marge de profit liée à la livraison, quantité de GES et distance totale parcourue).

Les résultats obtenus par l'analyse des résultats du plan d'expérience démontrent que l'importance relative des paramètres opérationnels varie selon l'objectif poursuivi. Dans le cas où le planificateur cherche à minimiser la distance parcourue par la flotte de camions, aucun des paramètres opérationnels étudié ne démontre d'importance significative. Cependant l'étude de la composition des instances pour lesquelles la distance est minimisée retourne un profil de client distinct (seuil de commande compris entre 1400 et 1800 \$), notamment composé d'un équilibre en succursales et clients privés, avec des tournées de véhicules marquées par un faible kilométrage (inférieures à 200 km) mais une haute densité de livraison.

Dans le cas où l'objectif est de maximiser la marge de profit liée à la livraison, le paramètre prépondérant obtenu est la fréquence de livraison. On retire aussi de cette analyse que les clients

qui maximisent la marge de profit de l'entreprise sont majoritairement situés dans des centres urbains et qu'il est préférable que ceux-ci présentent une fréquence de livraison moyenne plutôt que haute.

En conclusion, plusieurs scénarios opérationnels sont développés afin d'aider à la prise de décisions. Le mémoire se conclut sur les limitations rencontrées par les outils mis en place et la méthodologie appliquée au long de cette étude.

ABSTRACT

Freight transportation has an important role to play in the growth of the economy (Transports Canada, 2019). Demand for freight transport continues to increase and freight transport by road remains the most flexible to satisfy this demand. Nevertheless, road transportation accounts for 20.3% of greenhouse gas (GHG) emissions (Statistics Canada, 2017) and companies must adapt to maintain their competitiveness while considering the negative externalities associated with their operations.

This study focuses on transportation planning for a company whose operations include the distribution of products in the province of Quebec. The company's distribution network is composed of branches and private customers. The proposed planning is based on the study of operational scenarios based on different parameters (in particular: customer order threshold, order quantities and delivery frequency).

The first aspect covered in the preparation of the database and processing files for the creation of tours. Then, a comprehensive design of experiment covering 216 experiments is implemented. The design of experiment takes into account parameters linked to the environment of the study (number of private and branch customers to deserve for example) and operational parameters (demand threshold, quantity to be delivered and delivery frequency). In order to be able to compare the different sets of parameters, some performance measures are considered, such as the total distance travelled, GHG emissions and the delivery profit margin.

The results obtained by analysing the design of experiment show that the relative importance of the operational parameters varies according to the objective pursued. Where the planner seeks to minimize the distance travelled by the fleet, none of the operational parameters studied demonstrate a significant importance. However, the study of the composition of instances for which the distance is minimized yields a distinct customer profile. Branches and private clients are balanced inside the tour and those are marked a low mileage but a high delivery density.

In the case for which the objective is to maximise the profit margin related to delivery, the overriding parameter obtained is the delivery frequency. This analysis also shows that customers who maximise the company's profit margin are mostly located in urban centers and that those with a medium frequency are preferable to those with a high delivery frequency.

In conclusion, several operational scenarios are developed to help the decision makers. This study concludes with the limitations encountered by the different tools implemented and the methodologies applied.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	III
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	2
1.1.1 Le transport de marchandises au Canada et au Québec	2
1.2 Description de l'entreprise partenaire	4
1.2.1 Opérations	4
1.2.2 Contraintes liées aux opérations de l'entreprise.....	7
1.3 Objectifs de recherche et structure du mémoire.....	9
1.3.1 Objectifs de recherche	9
1.3.2 Structure du mémoire	9
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	11
2.1 Problème de tournées de véhicules	11
2.1.1 Problème de tournées de véhicules avec capacité	11
2.1.2 Problème de tournées de véhicules avec flotte hétérogène	12
2.1.3 Problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps	13
2.2 Taxonomie des problèmes de tournées de véhicules	14
2.2.1 Taxonomies de 1975 à 2009.....	14

2.2.2	Taxonomies de 2009 à 2019.....	15
2.3	Résolution des problèmes de tournées de véhicules	17
2.3.1	Genèse de l’heuristique de recherche avec tabous	18
2.3.2	Fonctionnement général de l’heuristique de recherche avec tabous	19
2.4	Approche de planification par simulation	20
2.4.1	Notions de simulation.....	20
2.4.2	Approche de simulation par scénarios	21
2.5	Émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le contexte du camionnage	22
2.5.1	Présentation de différentes méthodes pour le calcul des GES dans le contexte du camionnage.....	22
2.5.2	Outils disponibles pour le calcul des GES	26
2.6	Électrification des flottes de camions.....	27
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE.....	31
3.1	Présentation de la méthodologie globale.....	31
3.2	Gestion des données	33
3.2.1	Données fournies par le partenaire industriel.....	33
3.2.2	Consolidation des données	37
3.3	Algorithme de Cordeau et al. (1997).....	47
3.3.1	Présentation de l’algorithme de Cordeau et al. (1997).....	47
3.3.2	Modifications apportées à l’algorithme.....	49
3.4	Préparation des données	49
3.4.1	Préparation pré-heuristique	50
3.4.2	Préparation post-heuristique.....	56
CHAPITRE 4	EXPÉRIMENTATION	58
4.1	Méthodologie de l’expérimentation	58

4.2	Analyse préliminaire	61
4.2.1	Analyse de la demande des clients	61
4.2.2	Répartition spatiale des clients livrés	68
4.3	Plan d'expérience	70
4.3.1	Identification du problème	70
4.3.2	Mesures de performance	70
4.3.3	Identification des facteurs et de leurs niveaux	74
4.3.4	Implémentation du plan d'expérience	77
CHAPITRE 5	ANALYSE DES RÉSULTATS	82
5.1	Résultats du plan d'expérience.....	82
5.2	Scénarios opérationnels.....	91
5.2.1	Seuil de commande	91
5.2.2	Livraisons urbaines	92
5.3	Résultats du scénario 1 : seuil de livraison	93
5.4	Résultats du scénario 2 : livraison urbaine.....	94
CHAPITRE 6	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	96
6.1	Contribution	96
6.2	Limitations	96
6.3	Perspectives générales.....	99
RÉFÉRENCES		101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Tableau récapitulatif du corpus	25
Tableau 2.2 Caractéristiques étudiées pour les véhicules électriques	28
Tableau 2.3 Catégories de paramètres pour la compétitivité des véhicules électriques	29
Tableau 3.1 Tableau récapitulatif du fichier d'historique de commande	34
Tableau 3.2 Tableau récapitulatif des livraisons par camion	35
Tableau 3.3 Résumé des manipulations effectuées pour la consolidation de la base de données	37
Tableau 3.4 Format initial des données obtenues	43
Tableau 3.5 Exemple d'une entrée client avec horaire simple	44
Tableau 3.6 Exemple d'une entrée client avec horaires	44
Tableau 3.7 Nombre de chauffeurs requis	46
Tableau 3.8 Tableau présentant les erreurs possibles ainsi que les détrompeurs mis en place	52
Tableau 3.9 Liste de vérifications effectuées	52
Tableau 3.10 Tests performés sur le programme R	55
Tableau 4.1 Présentation des données statistiques pour la typologie de la demande des succursales, arrondies à l'unité près	62
Tableau 4.2 Résultats des regroupements avec k-moyennes ($k = 3$)	64
Tableau 4.3 Statistiques sur les ventes de caisses entre octobre 2017 et septembre 2018	67
Tableau 4.4 Synthèse des mesures de performance	71
Tableau 4.5 Facteurs et intervalles ou valeurs	75
Tableau 4.6 Ensemble des combinaisons possibles pour les facteurs opérationnels	78
Tableau 4.7 Extrait du plan d'expérience complet (20 expériences sur 216)	80
Tableau 5.1 Fréquence des combinaisons de paramètres pour les instances avec un faible kilométrage	84
Tableau 5.2 Résultats du test ANOVA sur la marge de profit de la livraison	87

Tableau 5.3 Paramètres des instances sélectionnées pour l'étude de la variation de la marge de profit selon la fréquence.....	88
Tableau 5.4 Tableau récapitulatif des tests effectués pour les scénarios opérationnels.....	92

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Comparaison de la demande moyenne entre une succursale et un restaurant	5
Figure 1.2 Comparaison du nombre de livraisons effectuées	6
Figure 1.3 Schéma illustrant la situation actuelle du partenaire industriel	7
Figure 2.1 Schéma de classification par Caceres-Cruz et al. (2015).....	17
Figure 3.1 Schéma global de la méthodologie employé	32
Figure 3.2 Processus de création d'une tournée pour le CSM de Montréal	36
Figure 3.3 Exemple de renvoi de code client	38
Figure 3.4 Méthode 1 de géolocalisation des clients par Google Maps.....	40
Figure 3.5 Méthode 2: géolocalisation par connexion API.....	41
Figure 3.6 Programme R: Géolocalisation des clients	41
Figure 3.7 Exemple d'une adresse présentant des erreurs	42
Figure 3.8 Programme R : Nettoyage des adresses physiques	42
Figure 3.9 Conversion des unités	45
Figure 3.10 Récapitulatif des modifications effectuées sur la base de données	46
Figure 3.11 Exemple trivial de l'application de GENIUS	48
Figure 3.13 Processus de création d'une instance par l'utilisateur	51
Figure 3.14 Processus de création d'instances grâce à un plan d'expérience	54
Figure 4.1 Méthodologie de l'expérimentation	58
Figure 4.2 Détail du processus effectué au chapitre 4.....	60
Figure 4.3 Comparaison de la typologie de la demande pour les succursales	62
Figure 4.4 Étude de la corrélation entre la fréquence de livraison et la demande (saison basse) ..	63
Figure 4.5 Étude de la corrélation entre la fréquence de livraison et la demande (saison haute) ..	63
Figure 4.6 Répartition de la demande selon le nombre de livraison avec présence des clusters pour la saison basse	65

Figure 4.7 Répartition de la demande selon le nombre de livraisons effectuées avec présence des clusters pour la saison haute.....	65
Figure 4.8 Demande en caisses entre octobre 2017 et septembre 2018 pour les titulaires de permis	66
Figure 4.9 Répartition de la quantité de caisses livrées selon la fréquence des livraisons effectuées	68
Figure 4.10 Répartition spatiale des titulaires de permis (agrandissement).....	69
Figure 4.11 Utilisation des polygones de Voronoï pour le grand Montréal.....	70
Figure 4.12 Méthode de calculs de GES, adapté de (Armstrong & Khan, 2004)	73
Figure 4.13 Présentation des facteurs considérés et des mesures de performance	74
Figure 4.14 Régression linéaire entre le montant vendu (\$) et la quantité (caisse)	77
Figure 5.1 Instances non-réalisables	82
Figure 5.2 Répartition des instances avec un faible kilométrage selon la flotte de véhicules	83
Figure 5.3 Répartition des instances selon le seuil de commande et la fréquence de commande	84
Figure 5.4 Répartition géographique des clients présents dans les instances à faible kilométrage dans la grande région de Montréal	85
Figure 5.5 Moyenne des succursales livrées selon le kilométrage observé de l'instance.....	86
Figure 5.7 Variation de la marge de profit selon la valeur de la fréquence, pour une quantité à livrer élevée et une quantité faible	89
Figure 5.8 Répartition des clients présentant les plus hautes marges de profit selon leur situation géographique	90
Figure 5.9 Répartition géographique des clients présents dans les instances avec la marge de profit les plus élevés.....	91
Figure 5.10 Évolution de la marge de profit selon les valeurs du seuil de commande	93
Figure 5.11 Répartition des clients selon le nouveau seuil de commande	94
Figure 5.12 évolution du taux de remplissage du véhicule dans les deux cas présentés	95

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV : analyse du cycle de vie

APRE : analyse des profils des ressources environnementales

CDM : centre de distribution de Montréal

CDQ : centre de distribution de Québec

CSM : centre spécialisé de Montréal

CSQ : centre spécialisé de Québec

EIO-LCA : *economic input – output life cycle analysis*

GES : gaz à effet de serre

LCA : *life cycle analysis*

PIB : produit intérieur brut

PTV : problème de tournées de véhicules

PTVC : problème de tournées de véhicules avec capacité

RSST : règlement sur la santé et sécurité au travail

SAQ : Société des Alcools du Québec

SIG : système d'information géographique

TDVRP : *time dependent vehicle routing problem*

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le transport de marchandises est un point essentiel pour le développement des économies nationales et locales. Il est décrit comme vecteur de commerce et de croissance de l'économie, que ce soit par la création d'emploi ou en favorisant l'accès aux marchés nationaux et internationaux (Transports Canada, 2019). La forte mondialisation des marchés grâce aux différents accords commerciaux internationaux et l'avènement d'internet et de la vente en ligne ont conduit à l'essor d'un transport de biens international. Ce transport se doit d'être toujours plus performant, rapide et à moindre coût pour les consommateurs tout comme les opérateurs.

Le transport routier a pour particularité d'offrir une grande flexibilité pour les entreprises tout en demandant des infrastructures moindres comparés aux autres modes de transport (aérien, ferroviaire etc.) (Engström, 2016). La concurrence accrue présente dans cette industrie requiert de la part des entreprises d'améliorer leurs pratiques afin de garder leur compétitivité. En ce sens, la planification des tournées est un sujet névralgique pour les entreprises afin de limiter les coûts et d'améliorer leur niveau de service auprès de leurs clients. L'utilisation de logiciels de planification est une nécessité afin de planifier des tournées dont le coût d'opération est moindre et desservir tous les clients dans les bons délais. Cependant les coûts économiques ne sont plus les seuls au cœur des problématiques pour les exploitants. Les externalités environnementales sont présentes et représentent un enjeu grandissant pour les entreprises.

Le transport routier de marchandises est responsable à lui seul 20,3% des émissions de Gaz à Effets de Serre (GES) au Canada (Statistiques Canada, 2017), et les pressions gouvernementales et de la part des consommateurs se font de plus en plus ressentir, forçant les entreprises à prendre en compte ce coût dans leur pratique au quotidien. Pour ce faire, celles-ci mettent en place différentes stratégies allant du renouvellement de leurs équipements pour des technologies vertes à une ré-optimisation complète de leur réseau de livraison afin de limiter les externalités négatives reliées à celles-ci. Dans le cadre de ce mémoire, l'accent est porté sur la planification des tournées de véhicules.

La recherche sur les tournées de véhicules représente un travail important conduit depuis les années 1950 afin de prendre en compte un grand nombre de paramètres propres aux industries et aux entreprises afin de trouver des solutions réalisables et effectives pour toutes les parties concernées. Cependant les entreprises présentent des niveaux de complexité toujours plus élevés avec des

chaînes logistiques complexes. Il devient donc nécessaire d'isoler les paramètres qui ont un impact réel selon la situation de l'entreprise.

La fin de cette introduction est divisée entre la présentation de la situation du transport de marchandises au Canada et au Québec, la présentation du partenaire industriel ayant collaboré à ce projet et finalement les objectifs et la structure de ce mémoire.

1.1 Mise en contexte

1.1.1 Le transport de marchandises au Canada et au Québec

Le secteur du transport et de l'entreposage représente 4,6 % du Produit Intérieur Brut (PIB) du Canada en 2017 et affiche une croissance 1,5 fois plus élevée que toutes les autres industries (Transports Canada, 2018). Le transport de marchandises par camion a quant à lui augmenté de 8% entre 2005 et 2016 (Statistiques Canada, 2017), comparativement au transport ferroviaire (6 % entre 2016 et 2018), maritime (2,0 % entre 2016 et 2018) ou encore aérien (7,4 % entre 2016 et 2018) (Transports Canada, 2018). Il existe peu de données précises quant au nombre exact de camions sur les routes ou leur répartition sur le territoire. Il est aussi important de noter que le transport de marchandises par route représente une part importante du transport intermodal, car il assume dans la plupart des cas l'acheminement du point d'origine au premier nœud d'intermodalité et le transport du dernier nœud d'intermodalité au point consommateur final.

Parmi les différents types de marchandises transportées au Québec, les principales sont des biens manufacturés divers (17%), les produits alimentaires (12%) et les produits forestiers (12%). Cependant la majorité des déplacements effectués au Québec sont les camions vides (37%) (Ministère des Transports du Québec, 2013). Cependant, il est à noter que bien que ce rapport date de 2013, les données utilisées pour le produire résultent de l'enquête sur le camionnage de 2006.

Les infrastructures nécessaires pour le transport routier de marchandises est un réseau routier, réseau aussi nécessaire pour le déplacement de personnes. L'augmentation du nombre de déplacements par camion entraîne cependant une dégradation de ce réseau routier, particulièrement dans des lieux géographiques soumis à de fortes variations de température comme le Canada. Il est donc nécessaire d'effectuer la maintenance de ce réseau routier, évaluée entre 2% et 3% de

l'investissement initial (Engström, 2016). Ces coûts de maintenance sont assumés par les gouvernements concernés.

D'un point de vue environnemental, le transport routier de marchandises représente plus de 85% des émissions de Gaz à Effets de Serre (GES) du secteur des transports et 20,3% du total des émissions de GES du Canada (Transports Canada, 2018). Engström (2016) qualifie les conséquences environnementales du transport de marchandises par route de « locales, régionales et globales », entraînant des impacts multiples sur les changements climatiques. L'externalité négative la plus mesurée est les émissions de GES dans l'air, mais il est nécessaire de ne pas sous-estimer la pollution de l'eau, des écosystèmes ou encore la pollution sonore. Toutes ces externalités ont des impacts directs sur la société et les écosystèmes présents au Canada et au Québec.

Les consommateurs, qu'ils soient particuliers ou entreprises ont un rôle important à jouer dans le transport de marchandises. La prise de conscience écologique de ces derniers entraîne une double problématique pour les transporteurs. En effet les consommateurs exigent de la part des entreprises des efforts afin de réduire leur empreinte écologique sur le transport des marchandises, tout en exigeant une livraison toujours plus rapide et efficace et à un coût moindre.

Il va sans compter que les camions, notamment dans les milieux urbains, sont impliqués dans les accidents de la route, ce qui représente un enjeu important pour les villes au niveau de la sécurité routière et du partage de la route entre les différents usagers. Au Québec, on a observé une augmentation de 5% des décès dans un accident impliquant un véhicule lourd entre 2017 et 2018 (Bilan routier de la SAAQ, 2018). Dans les milieux urbains, la congestion routière est un autre problème important auquel il est nécessaire de s'intéresser. La congestion routière augmente les émissions de GES et peut avoir un impact direct pour les entreprises sur le niveau de service promis au client.

Étant donné toutes les externalités citées précédemment, le transport routier de marchandises se doit de présenter des avantages indéniables afin d'être choisi par les entreprises pour la livraison de leurs biens. Tout d'abord, les barrières à l'entrée pour s'établir comme service de livraison sont faibles, l'acquisition des équipements et du capital étant jugée aisée comparativement à d'autres modes de transport (Robinson, 2013). Cependant l'avantage principal de la livraison par route est la flexibilité possible (Engström, 2004). Les volumes transportés sont adaptés à la demande de

l'entreprise, des petites quantités pouvant être acheminées en charge partielle et de grandes quantités en charges complètes.

Le secteur du transport routier de marchandises bénéficie des avancées technologiques et différentes innovations mises en place depuis les dernières années. En autres et de manière non-exhaustive, les innovations dans les technologies de l'information permettent une meilleure traçabilité des marchandises, mais aussi un transport avec une empreinte environnementale plus faible. La pénurie de main d'œuvre dans cette industrie mène à la recherche de solutions, notamment celle portant sur les véhicules autonomes pouvant transporter des marchandises (camions en peloton par exemple). Ces pratiques sont encore actuellement au début de leur développement mais ne sont pas à négliger pour le futur du transport routier.

Étant donné la forte dépendance de cette industrie aux énergies fossiles, des investissements importants sont effectués dans véhicules avec une source d'énergie autre comme les véhicules électriques. Bien que le développement de ces véhicules ne soit pas encore finalisé, il est important de les prendre en compte pour le futur des entreprises et de la recherche.

1.2 Description de l'entreprise partenaire

1.2.1 Opérations

L'entreprise partenaire dans le cadre de ce mémoire est la Société des alcools du Québec (SAQ). La SAQ est un monopole d'état et assure toutes les fonctions relatives à l'alcool au Québec (à l'exception de la bière), que ce soit l'approvisionnement et la distribution, pour les particuliers et les entreprises. Ce mémoire se concentre particulièrement sur la partie distribution auprès des succursales et des entreprises, et notamment sur la planification du transport de marchandises.

Comme mentionné précédemment, les clients de la SAQ sont les particuliers ainsi que les entreprises titulaires d'un permis d'alcool (bars, restaurants, lieux événementiels etc.). Les particuliers vont chercher leur alcool dans les succursales de la SAQ et les titulaires de permis peuvent choisir de se faire livrer par la SAQ ou bien d'aller chercher leur marchandise directement dans une succursale de la SAQ. Étant donné que la SAQ est un monopole d'état, les clients sont captifs et ne peuvent s'approvisionner ailleurs pour leurs besoins en alcool.

Les défis associés à ces deux types de clients sont différents. Les succursales sont le point de contact principal entre les citoyens et la SAQ, ainsi que les points de réception des commandes particulières des clients passées sur internet. En ce sens, les volumes commandés par les succursales sont importants et celles-ci sont approvisionnées plusieurs fois par semaine, rendant la demande stable et régulière dans le temps. Au contraire, les volumes commandés par les titulaires de permis sont plus faibles (à l'exception de certains clients) et irréguliers dans le temps. Cette différence est majoritairement explicable par le fait que les titulaires ne possèdent pas d'espace de stockage, ni de stratégie claire de gestion des stocks dans la majorité des cas.

La figure 1.1 ci-dessous illustre la différence dans la demande entre une succursale et un titulaire de permis, placés dans un rayon de 500 mètres l'un de l'autre sur l'île de Montréal, sur une période allant du 1^{er} janvier 2018 au 28 février 2018.

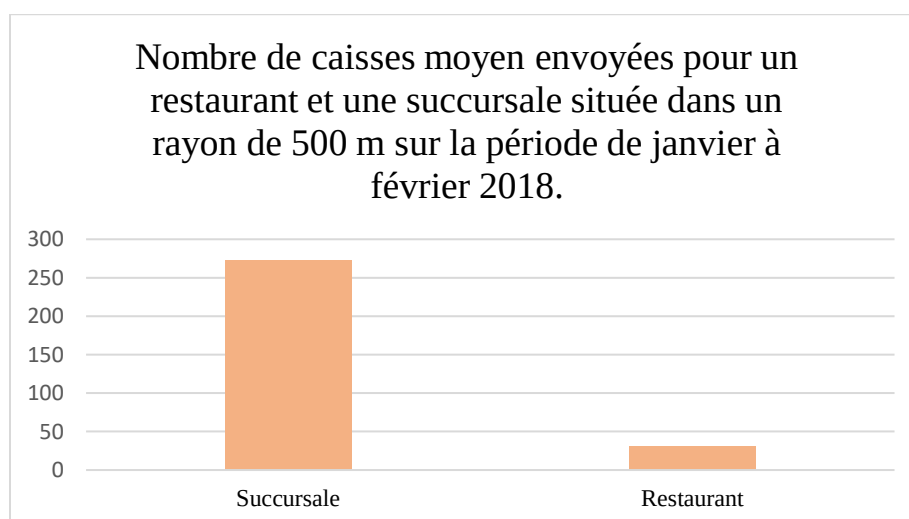


Figure 1.1 Comparaison de la demande moyenne entre une succursale et un restaurant

La figure 1.2 illustre la différence entre le nombre de livraison entre cette même succursale et restaurant, sur la même période allant de janvier à février 2018. On observe que la succursale a une fréquence de livraison proche de deux fois par semaine tandis que le restaurant a une fréquence de livraison aux six jours environ.

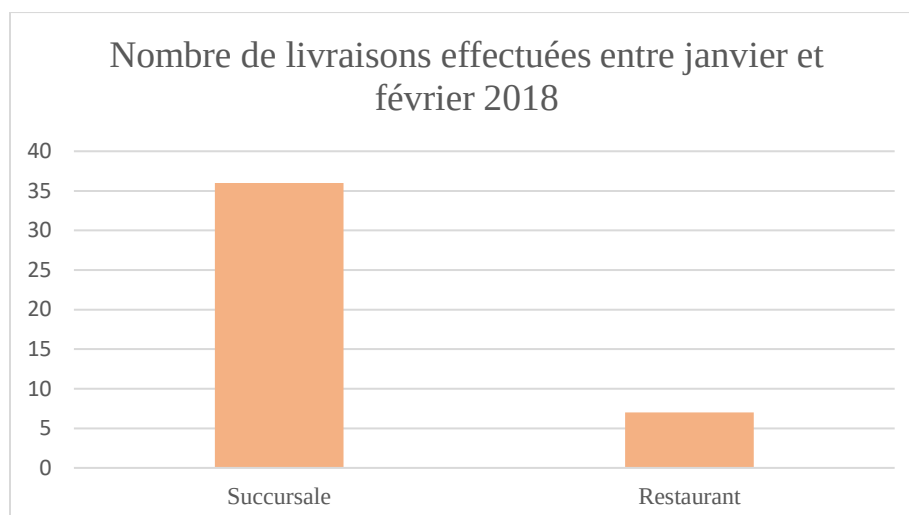


Figure 1.2 Comparaison du nombre de livraisons effectuées

Le réseau logistique de la SAQ en ce qui concerne la livraison de marchandise est constitué de deux entrepôts, un situé sur l'île de Montréal et l'autre à Québec. Au total, la SAQ possède 409 succursales et livre environ 2500 titulaires de permis par année (Rapport annuel de la SAQ, 2019). Le dernier rapport annuel produit par la société fait état de 22,7 millions de caisses expédiées dans ses points de vente par leur réseau logistique.

Pour livrer tous leurs clients, les activités de livraison de la société sont divisées en deux canaux distincts. Un premier canal de distribution permet de livrer les succursales et un deuxième canal assure la livraison des titulaires de permis. Étant donné le nombre important de clients à livrer, la SAQ fait appel à un sous-contractant afin d'absorber les quantités excédentaires qu'elle n'est pas capable de livrer à l'interne. L'utilisation d'un service externe permet aussi de livrer les succursales ou les clients des régions éloignées, qui nécessiteraient de déployer la flotte sur des trop grandes distances.

Les succursales sont livrées par une flotte de camions et les titulaires de permis sont livrés par une deuxième flotte de camions. Les deux flottes ne possèdent pas les mêmes équipements ni les mêmes contraintes. Les contraintes de l'entreprise seront explicitées au point 1.2.2 de ce mémoire. La figure 1.3 illustre le réseau de livraison tel qu'il est actuellement.

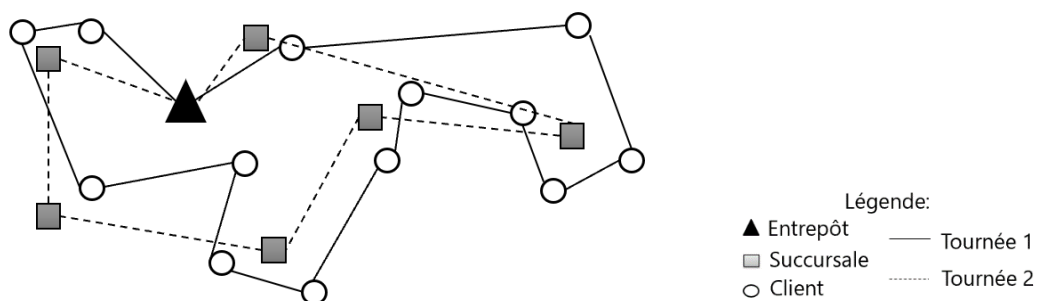


Figure 1.3 Schéma illustrant la situation actuelle du partenaire industriel

Ce réseau de livraison montre que les tournées ne sont pas mutualisées entre les deux canaux de livraison, ce qui peut multiplier les livraisons à différents endroits. Tous les clients ayant émis une demande sont desservis et deux tournées sont créés pour répondre à cette demande.

La flotte de camions de la SAQ est diversifiée et vise à combler les besoins en livraison des différents types de clients qu'elle dessert tout en s'offrant une flexibilité de livraison selon les quantités à livrer ou encore les particularités des routes sur lesquelles elle va livrer. Une des particularités des camions de la SAQ est la forte présence de camions avec plateformes élévatrices (« tailgate ») qui facilitent le déchargement chez les titulaires de permis des caisses d'alcool. Le centre de distribution de Montréal possède 48 camions au total (tout type confondu), 36 d'entre eux sont assignés à la livraison des succursales et 12 sont assignés à la livraison des titulaires de permis. Le centre de distribution de Québec (CDQ) possède 43 camions.

1.2.2 Contraintes liées aux opérations de l'entreprise

Toutes les entreprises font face à des contraintes, qu'elles soient internes ou externes. Ces contraintes peuvent être inhérentes au secteur d'activité de l'entreprise ou bien peuvent découler des décisions d'affaire de celle-ci. Le but de cette sous-partie est de présenter de manière concise les principales contraintes liées aux opérations de livraison de la SAQ.

1.2.2.1 Contraintes internes

Les contraintes internes de l'entreprise sont celles qui proviennent des choix d'affaire de celle-ci mais aussi de sa structure organisationnelle. Pour ce mémoire, les contraintes internes sont considérées comme des règles à prendre en compte, mais qui ne sont pas immuables. L'intérêt

principal de ne pas considérer ces contraintes comme immuables est de s'ouvrir à de nouveaux champs de possibilités opérationnelles.

La première contrainte interne considérée est le nombre de chauffeurs par camion lors des livraisons. Les chauffeurs qui livrent les titulaires de permis doivent effectuer leur tournée de livraison à deux chauffeurs par camion. Cela signifie que les coûts de main d'œuvre au niveau des salaires engagés pour une tournée sont doublés. La raison derrière cette décision est le poids des caisses et un accord avec le syndicat représentant les chauffeurs. D'après le règlement sur la Santé et la Sécurité du Travail (RSST) il n'y a pas de poids maximal que peut soulever seul une personne chargée de manutention (RSST, article 166, section XX). Cependant la loi fédérale dispose qu'un travailleur manuel doit recevoir la formation adéquate quand les charges soulevées sont supérieures à 10kg (RCSST, section III, partie XIV). Les tournées pour livrer les succursales sont quant à elles effectuées par un seul chauffeur car la marchandise est palettisée et peut donc être livrée par un seul employé.

Le jour et les horaires de livraison sont des contraintes importantes qu'il est nécessaire de prendre en compte pour la planification des tournées. Les succursales ont chacune un ou plusieurs jours par semaine pendant lesquels elles reçoivent les livraisons du centre de distribution. Ces jours sont fixes et décidés une fois par an. Quant aux titulaires de permis, la nature particulière de leurs activités de restauration entraîne des horaires de livraison avant le début des services du midi et du soir. Dans le cadre de ce mémoire, les jours et horaires de distribution sont considérés comme modifiables, bien qu'il soit nécessaire de noter que dans une application réelle, ce genre de modification peut ne pas être triviale.

Chaque entreprise dicte ses propres règles d'affaire en ce qui concerne les clients qu'elle souhaite ou ne souhaite pas livrer. Ces critères de livraison sont définis selon une certaine somme commandée annuellement et/ou un minimum de caisses par livraison. Les données fournies par le partenaire industriel démontrent cependant que la très grande majorité de ses clients sont livrés, même si les quantités commandées ou les seuils annuels de commande ne sont pas atteints.

1.2.2.2 Contraintes externes

Les contraintes externes proviennent principalement de l'environnement macroéconomique lié à l'industrie et à l'emplacement géographique du partenaire industriel. Ces contraintes ne sont pas flexibles et doivent être respectées lors de la planification des transports.

Certaines villes, dont Montréal, possèdent des restrictions particulières sur le camionnage dont les entreprises doivent tenir compte pour livrer les biens. La ville de Montréal met à disposition une carte qui recense les artères de la ville dans lesquelles les camions sont autorisés ainsi que les différents horaires de livraisons permis selon les secteurs de la ville. Ces règlements ont pour but de faciliter le partage de la route entre les usagers et de respecter la tranquillité des zones résidentielles la nuit. Certaines zones sont aussi interdites aux camions après une certaine heure de la journée à cause de leur attrait touristique, comme c'est le cas pour le Quartier des Spectacles à Montréal ou le Vieux-Port de Montréal en été.

La nature particulière du chargement des camions de la SAQ entraîne le respect de l'interdiction d'emprunter des tunnels pour entrer et sortir de l'île de Montréal.

1.3 Objectifs de recherche et structure du mémoire

Cette section présente les objectifs de recherche poursuivis ainsi que la structure du mémoire.

1.3.1 Objectifs de recherche

Le partenaire industriel s'intéresse aux potentiels impacts que peuvent avoir différentes décisions stratégiques sur la planification des tournées ainsi que l'utilisation de la flotte et l'impact final sur son niveau de service auprès de ses clients.

L'objectif principal de ce mémoire est donc d'identifier les paramètres opérationnels significatifs pour la planification des tournées de livraison de marchandises en utilisant les données fournies par le partenaire industriel et en modélisant différents scénarios opérationnels. Plus spécifiquement, les sous-objectifs sont les suivants : (i) développer une méthode de création de scénario qui soit reproductible, (ii) développer des jeux de paramètres pertinents pour tester les scénarios et finalement (iii) développer des indicateurs cohérents traitant à la fois la dimension économique mais aussi la dimension environnementale.

1.3.2 Structure du mémoire

La suite de ce mémoire se présente comme suit : la revue de littérature est au chapitre 2 et la méthodologie est présentée au chapitre 3. Les chapitres 4 et 5 constituent le corps expérimental, avec au chapitre 4 les traitements des données et les outils développés et au chapitre 5 les résultats

obtenus et les discussions subséquentes. La conclusion porte sur l'apport du mémoire ainsi que les limites et perspectives qui peuvent être apportées au travail présenté.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'objectif de ce chapitre est de se concentrer sur les apports de la littérature scientifique en ce qui concerne les problèmes de tournées de véhicules pour la livraison de marchandises. Cette courte revue de littérature se divise en cinq parties : (i) les problèmes de tournées de véhicules (PTV) avec la présentation de quelques variantes principales, (ii) les méthodes de résolution exactes et par une heuristique de recherche avec tabous, (iii) l'approche par scénarios pour planifier le transport de marchandises, (iv) les calculs d'émissions de Gaz à Effets de Serre (GES) dans le contexte du transport routier de marchandises et finalement (v) l'électrification des camions.

2.1 Problème de tournées de véhicules

Depuis la première mention des problèmes de tournées de véhicules en 1959 par Dantzig, la littérature portant sur ce type de problème grandit de manière exponentielle à un rythme de 6,09 % par an (Eksioglu, Vural, & Reisman, 2009). Les problèmes de tournées de véhicules ont de nombreuses applications dans des industries diverses et sont déclinables selon les particularités de celles-ci. Ils répondent à la problématique suivante : d'après une demande non-négative, le problème de tournée de véhicules doit trouver un nombre k de tournée avec un coût total minimum en partant du dépôt, en satisfaisant la demande de chaque point et en respectant la capacité du véhicule qui effectue la tournée (Eksioglu et al., 2009). Les problèmes de tournées de véhicules ont la particularité d'être NP-dur (Lenstra & Kan, 1981), rendant la résolution à l'optimal un défi important. En ce sens, un problème où il faut desservir 20 clients à partir d'un dépôt représente $19!/2$ solutions différentes, soit $6,0822 \times 10^{16}$ possibilités de tournées différentes dans un cas symétrique.

Dans le cadre de ce mémoire, l'emphasis est portée sur les problèmes de tournées de véhicules qui correspondent à la situation étudiée, soit les contraintes de capacité de véhicules, l'hétérogénéité de la flotte et les fenêtres de temps. Les variantes présentées ici ne correspondent qu'à une infime partie de ce qui est présent dans la littérature

2.1.1 Problème de tournées de véhicules avec capacité

Comme son nom l'indique, le problème de tournées de véhicules avec capacité prend en compte la capacité de chaque véhicule. De manière générale, les PTV s'adressant à la résolution de cas réels

comportent systématiquement cette caractéristique. Dans la formulation de base du PTV avec capacité, on cherche à distribuer des biens depuis un dépôt unique. La flotte est réputée homogène et les véhicules ont une capacité supérieure à 0 et opèrent à un coût identique. La solution au PTVC est donc un set de routes faisables, une pour chaque véhicule (Irnich, Toth, & Vigo, 2014).

Les problèmes de tournées de véhicules avec capacité ont été largement étudiés dans la littérature. Laporte (2009) retrace les grandes évolutions des études portant sur ces problèmes. Le problème de tournées de véhicules peut être résolu par de nombreuses heuristique, métaheuristique et méthodes exactes mais il n'est possible de résoudre à l'optimal que pour un nombre de clients restreint. Baldacci, Christofides et Mingozzi (2008) parviennent à résoudre un problème contenant 135 clients.

Dans leur revue de littérature portant sur les différentes formulations des PTV, Kumar et Panneerselvam (2012) mettent en avant les différentes formulations mathématiques pour les PTV et identifie les méthodes de résolution qui vont avec chaque type de formulation. Beresneva et Avdoshin (2018) décrivent la formulation classique de PTV avec capacité et classifient chaque formulation des variantes de ce problème avec leurs meilleures méthodes de résolution pour chaque sous problème ainsi que les interconnexions entre chacun des problèmes liés au PTV avec capacité.

Le problème de véhicules avec capacité est la fondation des nombreuses variantes qui existent pour les problèmes de véhicules. La grande majorité des problèmes de tournées de véhicules comprennent cette contrainte de capacité car elle est retrouvée dans la plupart des problèmes réels, dans lesquels les véhicules ont une capacité maximale.

2.1.2 Problème de tournées de véhicules avec flotte hétérogène

Dans les cas réels, les flottes de véhicules sont rarement homogènes afin de permettre de la flexibilité dans les livraisons. Il est donc important d'ajouter cette composante dans les problèmes de tournées de véhicules. Etzioni, Golden et Weld (1994) introduisent le problème de tournées de véhicules avec flotte mixte. Dans ce problème, la flotte est hétérogène et illimitée en nombre. Taillard, É. D. (1999) introduit le problème de tournées de véhicules avec flotte hétérogène et fixe dans lequel la flotte est prédéterminée. Dans les deux cas de figure, l'objectif est de minimiser le coût total qui comprend à la fois les couts fixes et les coûts variables des véhicules.

Koç, Bektaş, Jabali et Laporte (2016) classifient les différentes variantes des problèmes de véhicules avec flotte hétérogène et recense les différentes formulations mathématiques ainsi que les différentes formules objectives rencontrées dans ce type de problèmes. La recherche effectuée dans les PTV avec flotte hétérogène est actuellement indépendante du temps. Parmi les textes principaux cités par Koç et al. (2016) dans leur revue de littérature, seul un article propose une étude basée sur une dépendance au temps dans la résolution de ce type de problème.

Dans les perspectives de recherche liées au problème de PTV avec flottes hétérogène, Koç et al. (2016) met en avant l'idée que les extensions « vertes » de ce problème sont une filière importante pour l'avenir de la recherche.

2.1.3 Problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps

Le problème de véhicule avec fenêtres de temps est une extension du problème de véhicules avec capacité. Il s'agit ici de prendre en compte les contraintes temporelles fréquemment présentes dans la livraison de marchandises.

Pour le PTV avec fenêtres de temps, les clients doivent être desservis à l'intérieur de ce cadre temporel. Les fenêtres de temps peuvent être « dures » (si le véhicule arrive en avance, il devra attendre) ou bien « souples ». Le PTV avec fenêtres de temps a la particularité de présenter une double problématique de gestion simultanée de la contrainte de capacité ainsi que la contrainte de temps. L'objectif principal du PTV avec fenêtres de temps est de minimiser le temps de voyage. Cependant Desaulniers, Madsen et Ropke (2014) apportent la précision que l'objectif global du PTV avec fenêtres de temps varie selon la nature de la méthode de résolution choisie.

Les premiers PTV avec fenêtres de temps recensés dans la littérature sont basés majoritairement sur des cas d'études concrets (Knight & Hofer, 1968) avant d'avoir été généralisés.

Ces généralisations ont mené à la création d'instances « repères » (« benchmark » en anglais), comme les instances de Solomon (Solomon, 1987), contre lesquels l'ensemble de la communauté se compare encore aujourd'hui.

Du point de vue de la notation, le PTV avec fenêtres de temps, des fenêtres temporelles sont ajoutées de la forme $[e_i, l_i]$ avec e_i et l_i qui sont des entiers non-négatifs (Cordeau, J.-F., Laporte, & Mercier, 2001). Le problème consiste à désigner k véhicules de telle manière que (i) chaque route commence et finisse au dépôt, (ii) chaque client appartienne à une route seulement, (iii) la durée

totale et de la route et la quantité attribuée à cette route n'excèdent pas la durée maximale ou la capacité maximale. Et finalement (iv) que le service du client ait lieu dans la fenêtre $[e_i, l_i]$ et que le véhicule revienne au dépôt dans la fenêtre $[e_0, l_0]$ (Cordeau, J.-F. et al., 2001).

La résolution des problèmes de tournées de véhicules avec fenêtres de temps passe par l'utilisation d'heuristique ou de métaheuristiques. Kumar et Panneerselvam (2012) soulignent que les métaheuristiques principales pour la résolution du PTV avec fenêtres de temps sont la recherche avec tabous (TS), les algorithmes génétiques (GA), et finalement les algorithmes évolutionnaires (EA).

Pour conclure sur les problèmes de tournées de véhicules avec fenêtre de temps, ceux-ci sont maintenant à maturité et servent de problèmes de base pour des problèmes de tournées de véhicules plus complexes et plus riches (Desaulniers et al., 2014).

2.2 Taxonomie des problèmes de tournées de véhicules

Comme mentionné précédemment, les problèmes de tournées de véhicule connaissent une croissance de 6,09% par an (Eksioglu et al., 2009). Cette croissance est notamment due à l'enrichissement continu des applications possibles pour les problèmes de tournées de véhicules mais a pour contrepartie de rendre les recherches au sein de la littérature peu efficaces et ardues. L'objectif de cette partie est d'illustrer les grands apports en ce qui concerne la taxonomie des problèmes de tournées de véhicules et d'identifier les futures tendances pour ce type de problèmes. Elle est divisée en deux parties : (i) les taxonomies de 1975 à 2009 et (ii) les taxonomies de 2009 à 2019.

2.2.1 Taxonomies de 1975 à 2009

L'objectif de cette partie est de présenter les principales taxonomies depuis 1975 à 2009 afin de dégager l'évolution des principaux problèmes de tournées de véhicules à travers le temps.

Bodin, L. D. (1975) introduit l'idée que les problèmes de tournées de véhicules présentent un fort potentiel pour être classés selon leurs propriétés. Ces premiers efforts de taxonomies sont repris dans Bodin, L. et Golden (1981) qui proposent la première classification formelle des problèmes selon une classification simple. Les problèmes sont classés selon le temps pour servir un nœud ou un arc (A), le nombre de dépôts (B), la taille de flotte de véhicules (C), le type de flotte de véhicules

(D) et finalement la nature de la demande (E). À partir de cette première classification, il est possible de retrouver les considérations majeures possibles pour les problèmes de tournées de véhicules.

Desrochers, Lenstra et Savelsbergh (1990) introduisent une méthode de classification simple mais robuste. Leur méthode consiste à classer les problèmes selon quatre niveaux différents : (i) « adresses », (ii) « vehicles », (iii) « problem characteristics » et finalement (iv) « objectives ». Cette méthode présente de fortes similarités avec celle présentée par Bodin, L. et Golden (1981) mais se distingue par l'introduction d'une catégorie portant sur les objectifs des problèmes de tournées de véhicules. La méthode présentée par Desrochers et al. (1990) a l'avantage de regrouper l'ensemble des paramètres dans une classification facilement utilisable mais ne prend pas en compte la classification des algorithmes de résolution, ni l'émergence des problèmes dynamiques.

Eksioglu et al. (2009) présentent une taxonomie des problèmes de tournées de véhicules la plus exhaustive possible regroupant l'intégralité des caractéristiques liés à ce type de problème. Les apports principaux de cette taxonomie sont l'intégration des caractéristiques liées à l'information présente (section 4 de la taxonomie) ainsi que des caractéristiques des données utilisées (section 5 de la taxonomie). Les auteurs se concentrent sur une taxonomie qui englobe l'intégralité de la recherche portant sur les problèmes de tournées de véhicules en ajoutant une classification portant sur les méthodes de résolutions utilisées (résolution exacte, heuristique et métaheuristique).

Une brève comparaison entre la taxonomie proposée par Bodin, L. et Golden (1981) et celle d'Eksioglu et al. (2009) permet d'identifier que la structure originelle demeure la structure présente dans la nouvelle taxonomie et qu'elle a été enrichie pour refléter l'évolution des problèmes de tournées de véhicules. Ces évolutions touchent notamment l'introduction des problèmes dynamiques et stochastiques, ainsi que les différentes contraintes liées aux changements de la société (restrictions sur les routes, restrictions sur le nombre de conducteurs etc.).

2.2.2 Taxonomies de 2009 à 2019

Le choix d'une fracture dans l'étude des taxonomies à l'année 2009 correspond aux cinquante premières années de l'étude de ces problèmes. L'objectif de cette sous-partie est de présenter les futures tendances concernant ce type de problème.

Braekers, Ramaekers et Van Nieuwenhuyse (2016) vient traiter les parutions entre 2009 et 2016 portant sur les tournées de véhicules et apporte les éléments suivants. Tout d'abord la taxonomie présentée par Eksiöglu et al. (2009) est reprise et affinée afin d'inclure des contraintes plus proches de la réalité et un niveau de détail plus important au niveau des méthodes de résolution. Leur taxonomie permet de mettre en avant que les futures tendances portent (i) sur le développement des métaheuristiques à un niveau plus avancé afin résoudre les problèmes riches de tournées de véhicules, (ii) sur le OpenVRP, le problème dynamique et finalement le problème de tournées de véhicule dépendant du temps (TDVRP).

Lahyani, Khemakhem et Semet (2015) proposent une taxonomie pour les problèmes riches de tournées de véhicules dans le but d'obtenir une définition de ce type de problème. L'étude conclue qu'un problème riche considère quatre aspects stratégiques ou tactiques dans son modèle ainsi que six restrictions concernant les caractéristiques physiques du problème. Les problèmes riches permettent de combler l'écart qui peut subsister entre la littérature et les problèmes rencontrés par les acteurs privés (Drexler, 2012).

L'étude des taxonomies permet de comprendre l'évolution des problèmes de tournées de véhicules dans le temps, en créant des classifications qui prennent autant en compte les méthodes de résolutions utilisées dans la littérature que les caractéristiques propres des problèmes. Le schéma proposé par Caceres-Cruz, Arias, Guimarans, Riera et Juan (2015) (figure 2.1) résume de manière très synthétique l'évolution des problèmes de tournées de véhicules et leur évolution.

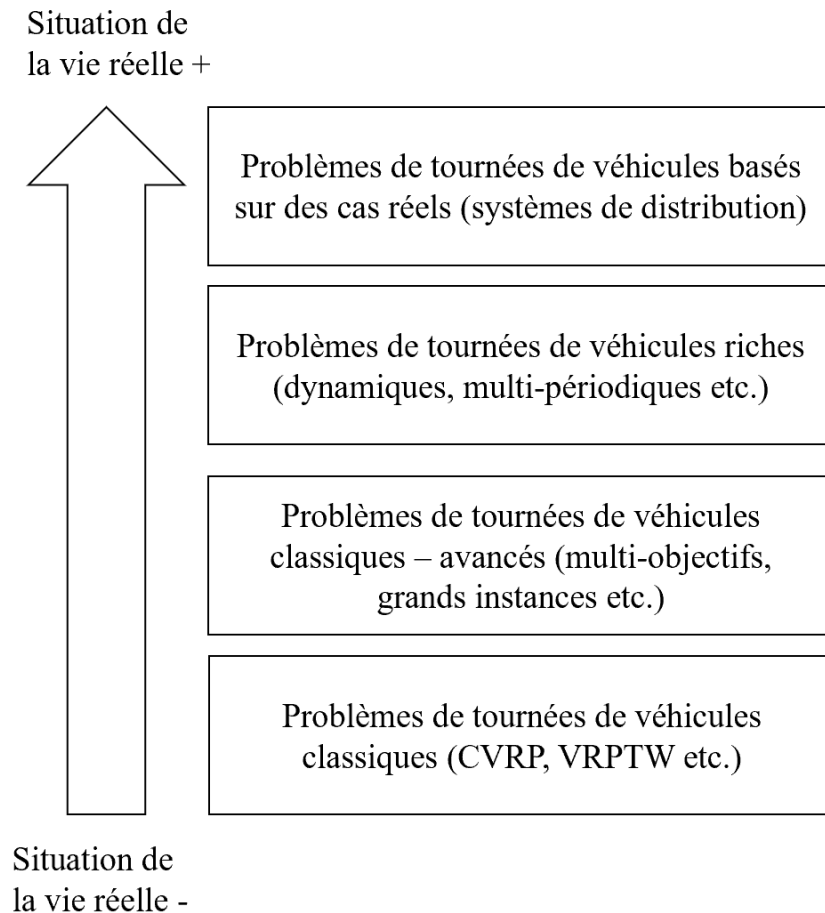


Figure 2.1 Schéma de classification par Caceres-Cruz et al. (2015)

2.3 Résolution des problèmes de tournées de véhicules

Les méthodes exactes de résolution de problèmes de tournées de véhicules sont difficilement utilisables à cause de la taille et la complexité inhérentes des problèmes traités. Par définition, les méthodes de résolution exacte visent la résolution d'un problème à l'optimal. Baldacci et al. (2008) présente une méthode exacte pour le problème de tournées de véhicules avec flotte hétérogène basée sur le partitionnement des ensembles. L'algorithme proposé par les auteurs est capable de résoudre plusieurs extensions du problème de tournées de véhicules avec une flotte hétérogène. Lysgaard, Letchford et Eglese (2004) présente un algorithme « branch-and-cut » pour le problème de tournées de véhicules avec capacité. Les résultats obtenus par les auteurs prouvent que la méthode est compétitive et trois instances d'Augerat sont résolues à l'optimalité. Baldacci, Toth et Vigo (2010) présente des résultats performants avec une méthode exacte pour un large ensemble

de problèmes de tournées de véhicules, incluant le PTV avec capacité, le PTV avec fenêtres de temps et le PTV avec flotte hétérogène ainsi que le PTV avec dépôt et cueillette.

Cependant, les problèmes rencontrés dans les applications pour des entreprises génèrent un nombre de nœuds trop important qui empêche la résolution à l'optimal. Pour pallier ce genre de problèmes, on utilise des heuristiques et métaheuristiques pour trouver des solutions pour ces problèmes.

Une heuristique est une méthode de résolution dont la solution est approximative et dont l'usage est adapté à la résolution de problèmes combinatoires larges (Gendreau & Potvin, 2010). De manière générale, les heuristiques produisent des résultats qui ne sont pas exacts mais avec un temps de résolution avantageux. Cet avantage est indéniable dans les cas où les entreprises doivent effectuer leur processus décisionnel régulièrement afin de créer leurs tournées de véhicules.

Il existe de nombreuses heuristiques ou métaheuristiques, chacune ayant ses forces et ses faiblesses face à des problèmes particuliers. Cette partie vise à présenter l'heuristique de recherche locale avec tabous de manières plus détaillée.

L'objectif de cette sous-partie est de présenter l'heuristique de recherche avec tabous, en retraçant brièvement sa genèse, puis en développant le fonctionnement général de cette heuristique ainsi que les contributions majeures de la littérature sur cette méthode de résolution. Cette sous-partie se conclut sur les forces et les limites de cette heuristique.

2.3.1 Genèse de l'heuristique de recherche avec tabous

Dans cette revue de littérature, l'emphasis est mise sur la recherche avec tabous. Il s'agit en effet de l'approche qui sera utilisée plus tard dans le mémoire avec l'algorithme de Cordeau (1997). Introduite par Glover (1986), la recherche avec tabous n'a cessé d'évoluer et fait maintenant partie des heuristiques majeures. Celle-ci a été appliquée pour la première fois pour un problème de tournée de véhicules en 1989 par Willard. Gendreau et Potvin (2010) présentent la recherche avec tabous comme une extension de la recherche locale et comme une combinaison de celle-ci avec une mémoire court-terme. Gendreau et Potvin (2010) définissent la recherche avec tabous comme une exploration du voisinage avec laquelle les cycles sont évités grâce à la mise en place d'une liste tabous. Quant à Cordeau, J.-F. et al. (2001), ils définissent la recherche avec tabous comme suit : « une méta-heuristique de recherche locale qui explore l'espace de solution en se déplaçant à chaque itération de la solution S actuelle à la meilleure solution dans le voisinage $N(S)$. Des

solutions pour éviter les cycles sont implémentées. ». L'objectif global de la recherche avec tabous est donc de visiter de la manière la plus efficace l'espace de recherche afin de trouver la meilleure solution possible.

2.3.2 Fonctionnement général de l'heuristique de recherche avec tabous

Dans son fonctionnement le plus élémentaire, la recherche avec tabous consiste à chercher une solution à partir d'une solution initiale en effectuant des échanges (aussi appelées assignations dans certains textes) et à bannir les solutions déjà visitées (liste de « tabous ») pendant un certain nombre d'itération afin d'éviter de créer un cycle dont l'algorithme ne pourrait plus sortir.

Gendreau et Potvin (2010) présentent les quatre éléments de la recherche avec tabous : (i) définition de l'espace de recherche, (ii) structure du voisinage et mécanismes d'échange, (iii) liste des tabous et finalement (iv) les critères d'aspiration.

L'espace de recherche est défini comme l'ensemble des solutions réalisables du problème (Gendreau & Potvin, 2010). Cependant cette définition de l'espace de recherche est bousculée par Gendreau, Hertz et Laporte (1994) avec leur algorithme « Taburoute » qui autorise les solutions qui ne sont pas réalisables. Il en résulte un mix de solutions réalisables et non-réalisables, ce qui a pour conséquence de minimiser la probabilité de rester piégé dans un optimum local.

La structure du voisinage est une étape importante pour la recherche avec tabous. Pour chaque modification appliquée à la solution initiale S , un voisinage nommé $N(S)$ est défini. $N(S)$ correspond au sous-ensemble des solutions réalisables dans l'espace de recherche précédemment défini (Gendreau & Potvin, 2010). Ces modifications appliquées sur la solution initiale S sont effectuées grâce à des mécanismes d'échange, dont les principaux sont énumérés et expliqués au paragraphe suivant. Ce sont ces modifications qui permettent de générer des nouveaux voisinages à explorer afin de trouver une meilleure solution.

Afin d'éviter de retourner sur des solutions déjà explorées et donc de tourner en boucle dans l'espace de recherche, une liste de tabous est utilisée. Les mouvements qui inversent les effets des mouvements récents sont déclarés « tabous » pendant un certain nombre d'itération. Les tabous aident la recherche à s'éloigner des portions de l'espace de recherche déjà explorées. Les listes de tabous standards ont une longueur fixe. Les critères d'aspiration empêchent les listes de tabous

d'être trop puissantes et de faire stagner la solution. Le critère d'aspiration le plus simple accorde l'utilisation d'un mouvement « interdit » si le résultat généré au niveau de la fonction objectif est meilleur que celui actuel. Les principes énoncés au-dessus sont ceux de bases en ce qui concerne la recherche avec tabous. Taillard, É. (1991) et Skorin-Kapov (1990) introduit la notion de nombreux auteurs ont introduit la notion de liste donc la longueur n'est pas fixe, des critères d'aspiration plus complexes, mais aussi des structures de voisinages plus riches et mieux adaptées au problème réel à résoudre.

L'heuristique de recherche avec tabous a fait l'objet de contributions importantes afin d'en améliorer le fonctionnement et son utilisation dans la résolution de problèmes concrets. Gendreau et Potvin (2010) mettent en garde l'utilisateur que l'implémentation d'une heuristique de recherche avec tabous procure des résultats satisfaisants à condition que l'heuristique puisse visiter des voisinages satisfaisants.

2.4 Approche de planification par simulation

L'objectif de cette partie de la revue de littérature est de présenter différents types de simulation, et plus particulièrement l'approche de simulation par scénarios qui est celle retenue dans le cadre de ce mémoire.

2.4.1 Notions de simulation

La simulation est un outil pertinent quand il s'agit de représenter des situations réelles. Maria (1997) définit la simulation comme l'application d'un modèle dans un système précis, ce dernier pouvant être reconfiguré. De manière générale, la simulation est un outil qui permet d'évaluer la performance du système réel selon différentes configurations et sur de longues périodes de temps (Maria, 1997). Bien que les approches en simulation soient nombreuses, certaines d'entre-elles sont particulièrement pertinentes dans le cadre du transport de marchandises.

La simulation par événements discrets part de l'idée que le système change de manière instantanée en réponse à un événement particulier (Maria, 1997). La simulation dynamique est utilisée pour les systèmes complexe amené à évoluer dans le temps et donc les paramètres peuvent aussi changer (Tremblay, 2007).

2.4.2 Approche de simulation par scénarios

Comme mentionné au premier chapitre, l'approche choisie dans le cadre de mémoire est une approche par scénarios. Cette approche n'est pas la plus répandue dans les cas d'études présents dans la littérature, car très circonscrite à certains domaines ou industries. L'objectif de cette sous-partie est donc de présenter les concepts-clés de l'approche par scénarios, ses forces et ses limites. Afin d'illustrer l'utilisation de scénarios au niveau tactique ou stratégique du problème, on considère en particulier le contexte de la logistique humanitaire.

L'approche par scénarios est régulièrement choisie dans des contextes où le niveau d'incertitude est élevé (Tofighi, Torabi, & Mansouri, 2016). Deux domaines pour lesquels un niveau élevé d'incertitude est présent sont les déploiements militaires ainsi que la logistique humanitaire en cas de catastrophe (naturelle ou humaine). Pettit et Beresford (2005) soulignent l'importance d'une flexibilité dans les déploiements militaires à des fins humanitaires, rendue possible par une planification par scénarios.

La planification par scénarios est fortement liée à la nature stochastique des problèmes rencontrés dans les contextes de logistique humanitaire (Manopiniwes & Irohara, 2015; Tofighi et al., 2016). En conséquence, différentes utilisations de la planification par scénarios sont possibles. Tofighi et al. (2016) modélisent les différentes possibilités de désastre naturel par plusieurs scénarios afin de valider le modèle développé (modèle possibiliste-stochastique basé sur des scénarios). Paul et Wang (2019) intègrent dans leur modèle les différents scénarios afin de mesurer l'imprévisibilité des différents facteurs considérés (magnitude des tremblements de terre par exemple). Chang, Tseng et Chen (2007) travaillent sur la modélisation de scénarios à un niveau tactique sur un système géographique d'information (SIG) afin de permettre la prise de décisions suite à l'application de leur modèle. La génération de scénarios permet donc d'anticiper les différentes éventualités tout en testant la validité des différents modèles développés.

Cependant, la génération de différentes matrices de scénarios possibles peut s'avérer imprécise quand les probabilités ou les données utilisées ne sont correctement déterminées ou faussées. D'Uffizi, Simonetti, Stecca et Confessore (2015) démontrent que la simulation peut s'avérer être un outil plus efficace car plus flexible comparativement à la génération de scénarios. Les auteurs démontrent que la simulation présente l'avantage de pouvoir être adaptable plus facilement aux

contextes concrets tandis que les scénarios présentent l'avantage de planifier les différentes réponses possibles dans le cadre de la logistique humanitaire.

Au sein des contextes qui présentent moins d'incertitude, peu de littérature traite d'une approche par scénarios au niveau des considérations tactiques ou stratégiques des problèmes. Les problèmes dynamiques et stochastiques utilisent cependant une approche par scénarios afin de trouver une solution pour ces catégories de problèmes (Hvattum, Norstad, Fagerholt, & Laporte, 2013).

2.5 Émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le contexte du camionnage

Les émissions de gaz à effet de serres (GES) sont souvent la première externalité citée dans les travaux de recherche portant sur le transport routier de marchandises (Crainic, Ricciardi, & Storchi, 2004; Engström, 2016). Dans le cadre de ce mémoire, et plus particulièrement de cette revue de littérature, l'accent est mis sur le calcul des émissions de GES dans le contexte du camionnage. Cette section est divisée en quatre parties. La première partie (2.6.1) présente les méthodes les plus utilisées pour le calcul des GES, leurs forces et leurs limites. La deuxième partie (2.6.2) se concentre sur l'ensemble des outils disponibles afin de calculer les émissions de GES en traitant non seulement les outils à disposition dans l'académique mais aussi ceux disponibles en ligne et ceux à vocation commerciale. La troisième partie (2.6.3) traite de la collaboration entre les méthodes de calculs des émissions et la recherche opérationnelle sous le prisme des problèmes de tournées de véhicules verts. Finalement, une dernière partie est consacrée au cas d'étude du camion électrique et de sa place actuelle dans la littérature.

2.5.1 Présentation de différentes méthodes pour le calcul des GES dans le contexte du camionnage

Les émissions de gaz à effets de serre (GES) peuvent être calculées selon diverses méthodes. Chacune de ses méthodes vise à obtenir des résultats précis tout en prenant en compte différents paramètres. L'objectif de cette sous-partie est de comparer les méthodes les plus répandues dans la littérature afin d'illustrer leurs forces et leurs limites. Dans le cadre de cette revue de littérature, seuls les émissions de GES liées à l'utilisation du véhicule sont traitées. Le calcul des émissions

reliées à l'extraction des matières premières ainsi que le transport des carburants entre le lieu de production et le lieu de consommation sont ainsi omis volontairement.

Analyse du cycle de vie

Sans équivoque, la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV en français, LCA en anglais) est la méthode la plus présentée dans les corpus de texte. Horne et Verghese (2009) présentent l'analyse du cycle de vie comme une évolution depuis les années 1960 des analyses des profils des ressources environnementales (APRE, REPA en anglais) pour se développer comme une « évaluation systématique des impacts environnementaux provenant de la création d'un produit ». Les premières études complètes d'analyse de cycle de vie pour des produits sont parues pour la première fois dans les années 1990 (Obersteiner, Binner, Mostbauer, & Salhofer, 2007). Ekvall, Assefa, Björklund, Eriksson et Finnveden (2007) décrivent l'analyse de cycle de vie comme un outil puissant pour comparer les différentes options envisagées par les décideurs (privés ou publics). Dans le cas plus ciblé du calcul des émissions de GES dans le contexte du camionnage, cette méthode a l'avantage de pouvoir comparer les différents types de carburant présents sur le marché mondial. C'est le cas des études présentées par López, Gómez, Aparicio et Sánchez (2009) qui comparent pour la ville de Madrid (Espagne) les différentes quantités d'émissions entre diesel, biocarburant et gaz naturel et de Sen, Ercan et Tatari (2017) qui calculent les émissions entre des camions 100% électriques comparativement à des camions alimentés par du carburant.

Cependant, l'analyse du cycle de vie présente aussi des limites. Elle est notamment dépendante de la qualité ainsi que des sources des données qui lui sont fournies (Ekvall et al., 2007). Obersteiner et al. (2007) mettent l'accent sur l'importance de la perspective choisie lors de la réalisation de l'étude en démontrant empiriquement qu'une différence de perspective peut modifier les résultats obtenus. Dans leur étude portant sur les limites de l'approche par analyse de cycle de vie dans le cadre de la gestion des déchets, Ekvall et al. (2007) prouvent que l'utilisation des modèles linéaires dans l'analyse de cycle de vie n'est pas applicable pour tous les cas de figures étudiés, ce qui entraîne des résultats pouvant être faussés.

L'analyse du cycle de vie est donc un outil ayant une approche holistique qui favorise la comparaison mais peut présenter des inexactitudes lorsque les sources qui permettent d'effectuer les calculs ne sont pas précises ou erronées.

Modèle hybride EIO-LCA

Le deuxième modèle le plus appliqué dans la littérature est le modèle « Economic Input-Output Life Cycle Assessment » (EIO-LCA), développée par l'Université Carnegie Mellon. Difficilement traduisible en français, l'abréviation pour ce modèle sera utilisée de s'y référer. Cette méthode a été théorisée par l'économiste Wassily Leontief pendant les années 1970. Le fonctionnement de cette méthode est basé sur une matrice d'entrées et de sorties pour l'ensemble des secteurs d'industries présents aux États-Unis (Matthews & Small, 2000). L'ensemble des données nécessaires provient de sources publiques du gouvernement. Matthews et Small (2000) indiquent que cette méthode est préférable face au temps et aux ressources nécessaires afin de monter une analyse de cycle de vie complète. En effet le modèle EIO-LCA permet de retracer l'intégralité de la chaîne logistique impliquée dans la création d'un produit et donc d'en analyser les externalités environnementales, notamment les émissions de GES.

Lee, Thomas et Brown (2013) préviennent que l'utilisation de modèle hybride comme celui EIO-LCA engendre des incertitudes supplémentaires, notamment dues à la source des données qui nourrissent le système, mais aussi dans le cas où l'industrie considérée présente des caractéristiques intersectorielle (Matthews & Small, 2000). En conséquence, Lee et al. (2013) présentent des axes d'amélioration possibles pour les modèles hybrides tels que le EIO-LCA, comme l'utilisation d'autres méthodes plus complètes pour créer les inventaires nécessaires à l'analyse du cycle de vie ainsi que l'amélioration et l'affinage des secteurs proposés dans la matrice d'entrées et de sorties.

Applications concrètes

Les différentes applications qui peuvent être faites des deux modèles présentés plus haut sont détaillées par le corpus suivant. L'ensemble du corpus est synthétisé dans un tableau (tableau 2.1). Celui-ci récapitule en autres le contexte de l'étude, la méthode utilisée et l'objectif poursuivi par celle-ci.

Pour conclure, les différentes versions de l'analyse de cycle présente des résultats fiables car elles considèrent l'ensemble des intrants et des extrants de la chaîne logistique concernée (Facanha & Horvath, 2007). Cependant ces méthodes sont dépendantes de la qualité des données entrées et de la perspective adoptée par l'étude (Obersteiner et al., 2007)). Ekvall et al. (2007) souligne que l'analyse de cycle de vie présente la ou les meilleures alternatives au moment où l'analyse est menée, ce qui peut être amené à changer dans le temps et requiert donc une nouvelle ACV.

Tableau 2.1 Tableau récapitulatif du corpus

Article	Type d'article		Contexte de l'étude	Méthode choisie			Objectif de l'article		
	Théorie	Cas d'étude	Sujet ou industrie	LCA	EIO-LCA	Autre	Comparaison d'alternatives	Calculs de GES	Autres
Gilardino, Rojas, Mattos, Larrea-Gallegos et Vázquez-Rowe (2017)		X	Gestion des déchets	X					X (PTV couplé à LCA)
Shahraeeni, Ahmed, Malek, Van Drimmelen et Kjeang (2015)		X	Gestion de flotte municipale	X			X		
Sen et al. (2017)		X			X			X	
Facanha et Horvath (2007)	X		Comparaison des GES par mode de transport (É.-U.)		X			X	
Nahlik, Kaehr, Chester, Horvath et Taptich (2016)	X		Calculs émissions pour la Californie (É-U.)	X				X	

2.5.2 Outils disponibles pour le calcul des GES

Il existe de nombreux outils permettant de calculer les émissions de GES pour une flotte de véhicules. Cependant, tous ces outils n'ont pas les mêmes sources ou les mêmes paramètres d'entrée pour effectuer ces calculs. L'objectif de cette sous-partie est de présenter quelques-uns de ces outils ainsi que les paramètres qu'ils utilisent.

Birnik (2013) passe en revue quinze calculateurs d'empreinte carbone pour un ménage disponibles en ligne. Ces outils sont populaires et permettent de sensibiliser le public aux enjeux des émissions de GES (Birnik, 2013). L'article permet de déterminer les treize principes qui doivent être respectés afin d'établir un calculateur en ligne qui produit des résultats pertinents. Parmi ces principes on retrouve ceux liés au transport, dont l'auteur préconise que les calculs soient plus détaillés. Il est notamment souligné que les outils présentement disponibles sont en retard sur ce que prescrit la littérature.

Auvinen et al. (2014) prescrivent l'harmonisation dans les méthodes de calculs de GES afin de faciliter la comparaison et le calcul d'émissions pour les chaînes logistiques complexes et internationales. Les auteurs soulignent que les méthodes de calculs actuelles pour le transport de marchandises partent de points initiaux différents, n'ont pas les mêmes données d'entrée, ni les mêmes perspectives sur les calculs. En autres, les bases de données publiques et commerciales (comme le GHGenius au Canada) ne procurent pas les mêmes informations pour une entrée équivalente. De plus, les perspectives envisagées ne sont pas toujours les mêmes. Certaines études travaillent sur les émissions générées par une unité transportée tandis que d'autres considèrent les émissions « puit au réservoir » (extraction des matières-premières), « réservoir aux roues » (acheminement des matières-premières) puis « roues à roues » (émissions pendant le transport).

En conclusion, il existe de nombreux calculateurs d'émissions de GES, certains gratuits et en ligne, d'autres à vocations commerciales ou académiques. Cependant lors de l'utilisation de ceux-ci, il est important de spécifier au lecteur les informations sous-jacentes qui sont utilisées.

2.6 Électrification des flottes de camions

L'arrivée récente sur le marché de camions fonctionnant grâce à l'électricité demande une réévaluation des émissions de gaz à effets de serre. Cette sous-partie vise à présenter une partie de la littérature pouvant aider à la prise de décision lors du choix d'un camion électrique. L'angle adopté ici est celui de la compétitivité, qu'elle soit d'ordre économique ou environnementale.

L'aspect général considéré pour l'électrification des flottes de camions de livraison est leur compétitivité générale comparée à la flotte actuelle. Davis et Figliozzi (2013) proposent un modèle qui intègre les contraintes de routage, les différents profils de vitesse, la consommation d'énergie afin de développer une formule de coût total de possession. Lee et al. (2013) se concentrent sur la compétitivité environnementale des camions électriques et intègre la notion de coût total de possession dans leurs calculs.

Le tableau 2.1 présente les différents facteurs identifiés par différentes études comme ayant un impact considérable sur la compétitivité des véhicules de livraisons électrique comparativement au modèle actuel.

Tableau 2.2 Caractéristiques étudiées pour les véhicules électriques

Article	Faisabilité de la route	Taille de flotte minimale	Distance parcourue	Durée de la batterie	Coût d'acquisition	Paramètres de conduite (comportement du chauffeur)	Horizon de planification	Source de l'énergie utilisée	Paramètres exogènes (température extérieure, nature du terrain)
Davis et Figliozi (2013)	X	X	X	X	X		X		
Lee et al. (2013)			X et cycle de conduite	X et remplacement de la batterie	X			X	
Juan, Mendez, Faulin, De Armas et Grasman (2016)		X	X	X et présence de stations de recharge					
Camilleri et Dablan (2017)			X	X et présence de stations de recharge		X			X
Feng et Figliozi (2013)			X	X	X		X		

Le tableau 2.2 permet de mettre en avant quatre grandes catégories de paramètres à considérer afin d'évaluer la compétitivité d'un camion de livraison électrique.

Tableau 2.3 Catégories de paramètres pour la compétitivité des véhicules électriques

Catégorie :	Paramètres (liste non-exhaustive) :
#1 : Paramètres endogènes au problème étudié	Distance parcourue par le véhicule et cycle de conduite; Demande en quantités de produits à livrer et leurs caractéristiques (poids, taille etc.) ; Faisabilité de la route et composition de la flotte de véhicules.
#2 : Paramètres exogènes	Comportement du conducteur lors de la conduite; Température extérieure au moment de la livraison.
#3 : Paramètres infrastructurels et technologiques	Type de batterie; Présence et positionnement optimal des stations de recharge; Durée de vie de la batterie (et temps de recharge minimal requis).
# 4 : Coûts	Coût d'acquisition d'un camion électrique; Coût de maintenance (incluant le remplacement de la batterie).

Les trois critères les plus récurrents afin de s'assurer la compétitivité du choix d'un camion électrique par rapport à un camion alimenté au pétrole ou au diesel sont les suivants : (i) distance parcourue, (ii) la qualité et durée de vie de la batterie ainsi que (iii) le coût d'acquisition initial d'un tel véhicule.

Cette revue de littérature couvre différents aspects qui seront utilisés dans ce mémoire. Les différents problèmes de tournées de véhicules sont explicités selon leurs particularités (capacité, contraintes de temps etc.) ainsi que les différentes méthodes de résolution possibles. Différentes méthodes de simulation sont présentées et l'accent est mis sur les émissions de gaz à effets de serre dans le contexte du transport de marchandises.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Présentation de la méthodologie globale

Afin de faciliter la suite de la lecture de ce mémoire, une méthodologie globale est présentée sous forme de schéma. Chaque case du schéma correspond à une partie précise, numérotée en dessous. Les données fournies par le partenaire (3.2.1) requièrent une préparation afin de pouvoir être utilisées de manière efficace (partie 3.2.2). Comme mentionné précédemment, l'objectif de ce mémoire est de créer des tournées de véhicules types selon des scénarios opérationnels. Il est donc nécessaire d'utiliser une méthode de résolution pour créer ces tournées. Celle-ci est présentée au point 3.3. Tout d'abord l'algorithme de base est présenté (3.3.1) puis l'ensemble des modifications apportées à cet algorithme se retrouvent au point (3.3.2).

Le chapitre 4 regroupe l'expérimentation et est fractionné en cinq grandes parties. Tout d'abord au point 4.1, la méthodologie pour l'ensemble de l'expérimentation est présentée. Une analyse préliminaire des données ressortir les points saillants (4.2) nécessaires à la réalisation du plan d'expérience (4.3). Le plan d'expérience est ensuite validé et les tournées sont créés. Tous les résultats des expérimentations sont au chapitre 5 de ce mémoire.

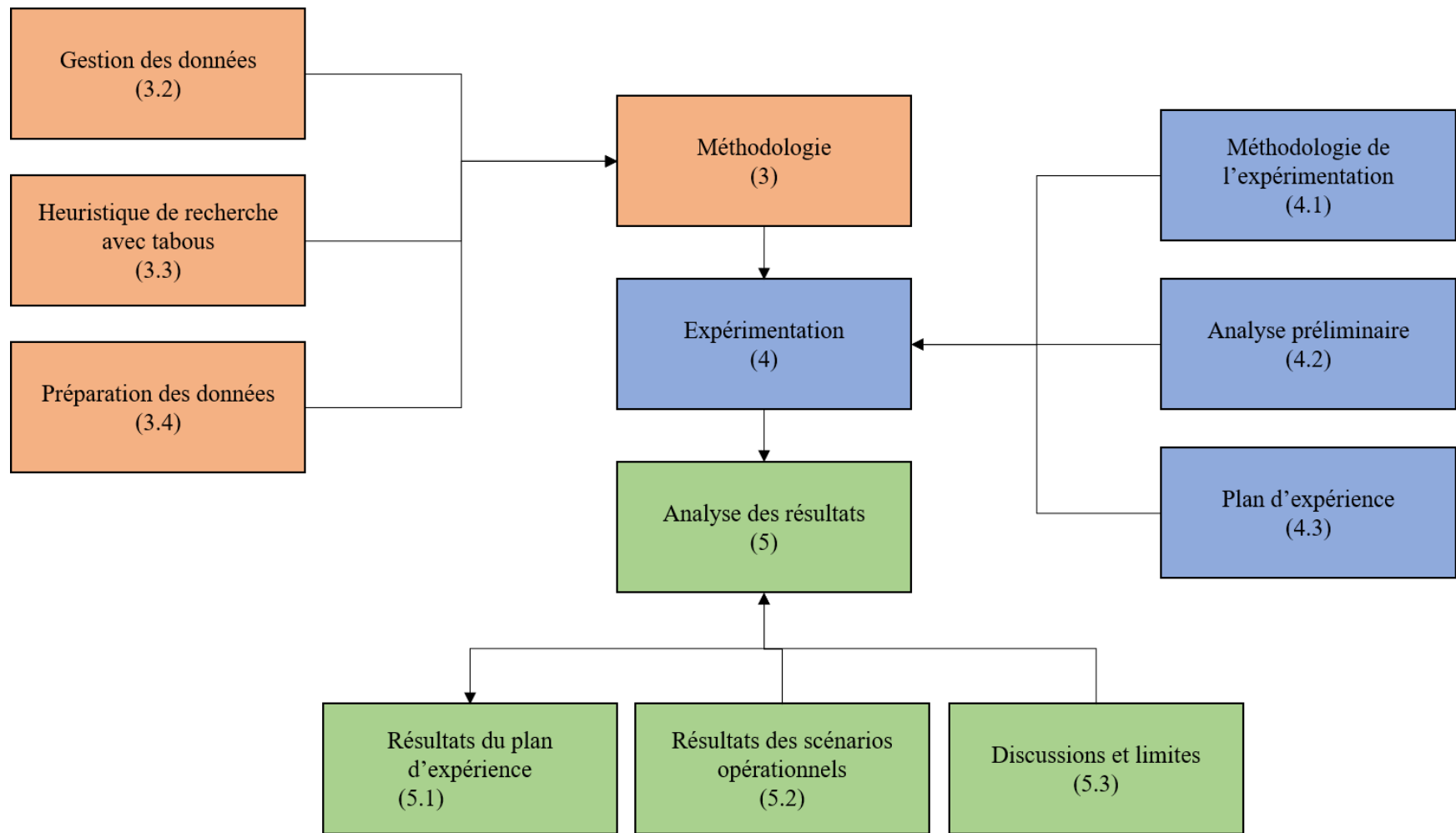


Figure 3.1 Schéma global de la méthodologie employé

3.2 Gestion des données

Les données fournies par le partenaire industriel sont importantes et influent considérablement sur le projet. Cette partie a pour objectif de présenter de manière concise les données qui ont été fournies, la préparation effectuée dessus ainsi que les limites de ces données.

3.2.1 Données fournies par le partenaire industriel

La majorité des données fournies par l'entreprise provient de son système intégré de gestion aussi appelé ERP. Ces extractions prennent la forme de fichiers Excel sous format .csv, facilitant ainsi la manipulation dans différents logiciels utilisés afin de générer des résultats.

Les données peuvent être réunies sous trois grandes catégories : les données concernant les équipements, les données concernant les transactions de l'entreprise et finalement les informations opérationnelles de l'entreprise. Il est à noter que le partenaire industriel a participé de manière active à la collecte des données en préparant les extractions nécessaires selon les besoins émis.

Parmi les données principales reçues, l'historique des commandes des titulaire de permis ainsi que des succursales sont les plus importantes. Elles retracent l'ensemble des quantités envoyées, leur valeur monétaire ainsi que l'origine et la destination du produit. Chaque succursale ou titulaire de permis est identifié par un numéro unique. Cet historique couvre la période de septembre 2017 à septembre 2018. Un historique allant de 2015 à 2017 a été aussi fourni, afin de compléter les informations. Ce fichier comporte environ 83 000 entrées, chacune des entrées correspondant à une transaction effectuée. Un récapitulatif de ce fichier est présenté au tableau 3.1.

Tableau 3.1 Tableau récapitulatif du fichier d'historique de commande

Type du fichier	.csv
Nombre d'entrée	83 000
Champs	Numéro client livré Nom client livré Date de livraison promise Zone de transport Somme quantité Somme de montant de vente Moyenne d'achat Adresse physique Journée livraison dimanche Plage horaire livraison dimanche ... Journée livraison samedi Plage horaire livraison samedi

Un fichier complémentaire est fourni, permettant de lier le véhicule qui a livré la marchandise avec le client livré. Ce fichier comporte des marqueurs temporels, c'est-à-dire le moment auquel le chauffeur du camion est arrivé chez le client et le moment auquel il est reparti de chez le client. Grâce à ces marqueurs temporels, il est possible de dégager des informations importantes, comme le temps moyen passé à livrer un client selon le canal de livraison. Cependant, ces marqueurs temporels sont rentrés manuellement par le chauffeur du camion et ne correspondent pas à une entrée automatique quand le moteur est arrêté comme lors qu'il y a la présence d'un journal de bord électronique. Cela signifie qu'il y a une marge d'erreur humaine dans marqueurs temporels à prendre en compte pour la suite des analyses. Le tableau 3.2 récapitule les informations de ce fichier.

Tableau 3.2 Tableau récapitulatif des livraisons par camion

Type de fichier	.csv
Nombre d'entrées	82 129
Champs	Numéro chargement Numéro expédition Nombre de caisse expédiées Date de confirmation d'expédition Numéro d'origine Nom d'origine Numéro destination Numéro fournisseur Nom fournisseur Référence (tracteur)

Étant donné que ce mémoire porte sur la planification de la livraison, il est nécessaire d'obtenir les heures de livraison ainsi que les adresses de l'ensemble des succursales ainsi que la liste de celles livrées à l'interne et celles livrées à l'externe. Un portrait global de la flotte est aussi procuré, soit le type et la capacité du véhicule.

La figure 3.2 ci-dessous représente le processus de planification des tournées de véhicules tel qu'il a été observé sur le terrain auprès de la personne responsable. Cependant, l'observation ayant été effectuée sur une durée de un jour et sous la forme d'une entrevue avec la personne responsable, ce processus ne représente que le cas général et non les exceptions pouvant avoir lieu lors de la planification du transport au jour le jour. Ici, l'objectif est d'illustrer le processus actuellement en place chez le partenaire industriel. Cependant, il n'est pas question dans ce mémoire de mettre en place un nouveau processus, mais de s'intéresser aux facteurs qui amènent les clients à se retrouver dans le service de livraison, notamment pour les clients titulaires de permis (bars, restaurants etc.). Il est important de mentionner que dans le cas où il y aurait une modification des paramètres opérationnels, le processus de planification du transport serait altéré et aurait probablement moins d'interventions manuelles.

Outre les différentes manipulations entre les logiciels, qui sont nécessaires afin de pouvoir effectuer le tracé des tournées, il est à noter qu'une grande part de manipulation manuelle est nécessaire pour finaliser les trajets. Ces manipulations sont imputables en partie au logiciel actuellement utilisé qui reprend les trajets de la semaine précédente, mais aussi à la grande variabilité dans les demandes de livraison des clients. Cette variabilité entraîne un changement important chaque semaine dans les tracés de livraison. Dans le processus actuel de planification des tournées, l'expérience du planificateur est vitale pour réussir à faire des tournées réalisables.

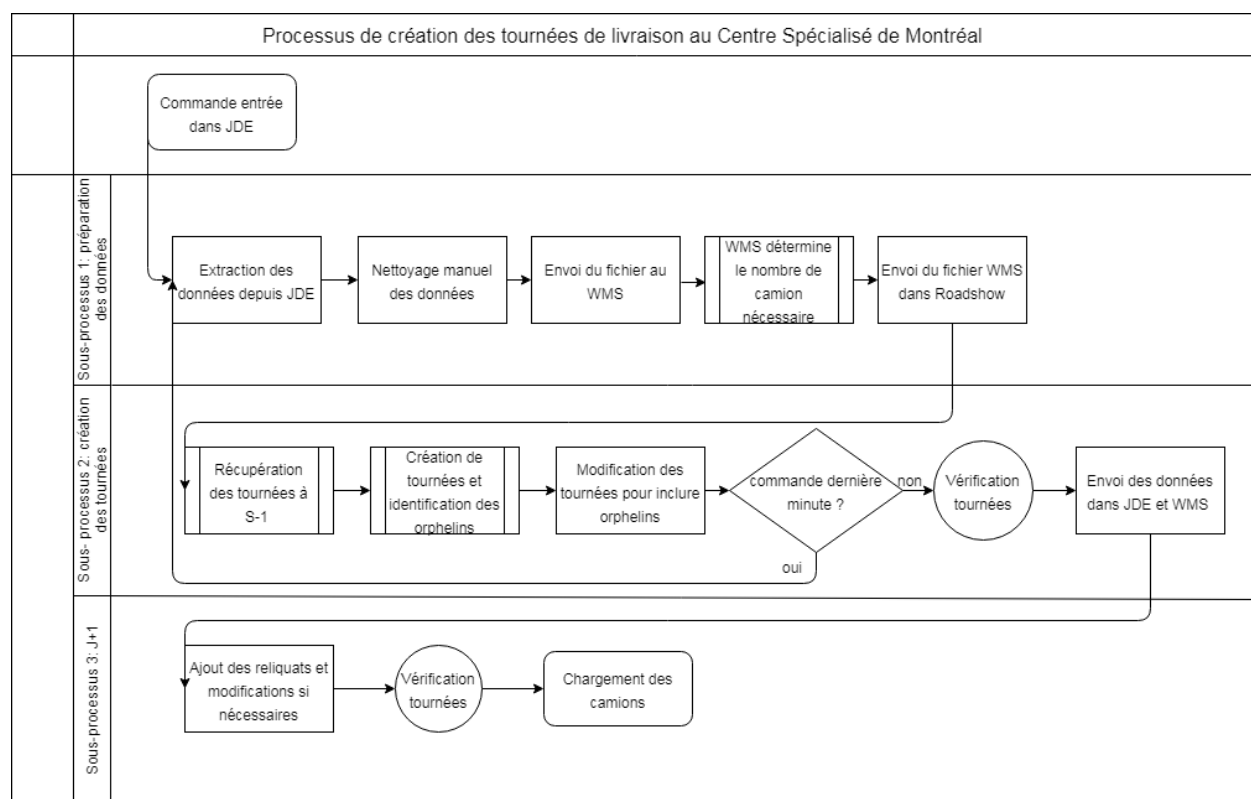


Figure 3.2 Processus de création d'une tournée pour le CSM de Montréal

Les données quantitatives fournies par le partenaire industriel procurent un portrait global des opérations. Seulement, celles-ci ne suffisent pas à avoir un portrait affiné de la situation et il est nécessaire de prendre en compte les données qualitatives pour l'obtenir. Il est difficile de mesurer l'expérience des employés responsables de la planification du transport. Leur expérience prend notamment en compte des variables comme le type de camion à assigner à une route selon les clients livrés, ou encore les conditions météorologiques qui peuvent avoir un impact sur la livraison.

L'ensemble des données fournies par le partenaire industriel présente l'avantage d'avoir été validées par des employés ayant l'expérience de l'industrie, ce qui vient limiter les erreurs aberrantes qu'un œil extérieur ne pourrait détecter. Cependant ces données demandent du travail de préparation afin de pouvoir être exploitées à leur plein potentiel, ce qui est l'objet de la section suivante.

3.2.2 Consolidation des données

Comme mentionné auparavant, les jeux de données proviennent d'extraction de l'ERP de la SAQ. Les extractions sont le reflet de la réalité de l'entreprise et les données sont brutes, bien que validées par une personne d'expérience. Il est donc essentiel de consolider toutes les informations reçues afin de travailler avec une base solide et exploitable facilement.

Le tableau 3.3 retrace les différentes manipulations effectuées afin de compléter la base de données.

Tableau 3.3 Résumé des manipulations effectuées pour la consolidation de la base de données

Fiche client	Transactions
• Harmonisation des codes clients • Géolocalisation des clients • Modification du format des jours de livraison et plages horaires • Ajout du service de livraison	• Conversion des unités • Ajout du nombre de chauffeurs requis

Fiche client

Harmonisation des codes clients

Cas 1 : Les renvois entre différents codes clients

Les données des commandes des clients contiennent des renvois entre les codes clients, comme présenté dans la figure 3.3 qui est une capture d'écran de la base de données brute fournie.

69214	voir 15832178 Le Grand Theatre de Quebec	2018-01-19
69214	voir 15832178 Le Grand Theatre de Quebec	2018-02-06
69214	voir 15832178 Le Grand Theatre de Quebec	2018-03-09

Figure 3.3 Exemple de renvoi de code client

Ces renvois entre codes clients sont fréquents lorsqu'un même titulaire de permis possède plusieurs endroits de consommation sous la même bannière, ce qui est souvent le cas des chaînes de restauration. Chaque endroit physique de restauration possède un code client, mais la facturation se fait auprès d'une même entité qui est le code spécifié, ce qui génère une entrée de type « voir XXXXXX ».

Plus tard dans ce mémoire il sera question des seuils de commande par client, il est donc important de statuer si le client est l'entité physique de livraison ou bien l'entité morale que représente l'entreprise qui possède plusieurs points de livraison. Dans le cas où le client est l'entité physique (sans prendre en compte de son affiliation à une chaîne ou une bannière) alors la somme des commandes sera individuelle, tandis que dans le cas où c'est l'entité morale qui est considérée, la somme des points de livraison de l'entité est utilisée. Étant donné que ces deux cas de figures changent fortement les résultats obtenus plus tard dans l'analyse, la méthode choisie est de développer deux bases de données.

La première base de données est transactionnelle. Dans cette base de données, seuls les points physiques de livraison sont considérés individuellement et chaque transaction est par date de commande. Cette base de données sera utilisée principalement pour l'analyse préliminaire (4.2). La deuxième base de données est agrégée par entité morale, ce qui permet d'obtenir un portrait de consommation par entreprise qui est plus proche de la réalité et qui n'est pas fractionné par entité de livraison. Cette base de données sera utilisée dans les scénarios développés au point 4.3 de ce mémoire.

Cas 2 : différence de codes entre les clients

Dans le cas des succursales, celles-ci apparaissent sous deux codes différents selon les extractions. Afin de simplifier les analyses et d'améliorer le temps passé à manipuler les données, les codes

sont harmonisés. Les codes qui présentent un préfixe (dans ce cas, le préfixe est le nombre « 9 » avant chaque code client) sont changés pour supprimer le préfixe.

Géolocalisation des clients

La géolocalisation des clients est importante pour pouvoir créer des tournées et utiliser des logiciels de cartographie comme QGIS (www.qgis.com). Les extractions fournies par le partenaire industriel nous donnent les adresses physiques des clients, qu'il est nécessaire de transformer en points de coordonnées GPS. Deux méthodes ont été utilisées pour effectuer la géolocalisation des clients.

Méthode 1 : *Google Maps*

La manière la plus simple et intuitive pour obtenir ces points est de passer par la plateforme Google Maps (www.google.com/maps). Une importation au format Excel contenant le numéro du client ainsi que son adresse géographique complète permet de produire des points sur la carte. Cette méthode produit des résultats de manière très rapide et relativement fiable (sur une base de données de 2500 clients, seules 33 entrées ont demandé une saisie ou une rectification manuelle, soit environ 1,32 % des entrées). Cependant, une limite majeure à cette méthode est qu'il est impossible d'extraire au format .kml ces points maintenant géolocalisés, ce service étant maintenant réservé aux clients payants de la plateforme. Il est donc nécessaire de travailler depuis la plateforme *Google Maps* pour pouvoir visualiser les données entrées. Cette plateforme, bien que très performante pour la visualisation simple, n'est pas du tout adaptée aux manœuvres nécessaires dans le cadre de ce mémoire. Aussi, l'utilisation d'une plateforme tierce avec une importation de données privées

d'une entreprise peut aussi représenter un risque pour la confidentialité des données. Le schéma 3.4 illustre la méthode 1 présentée.

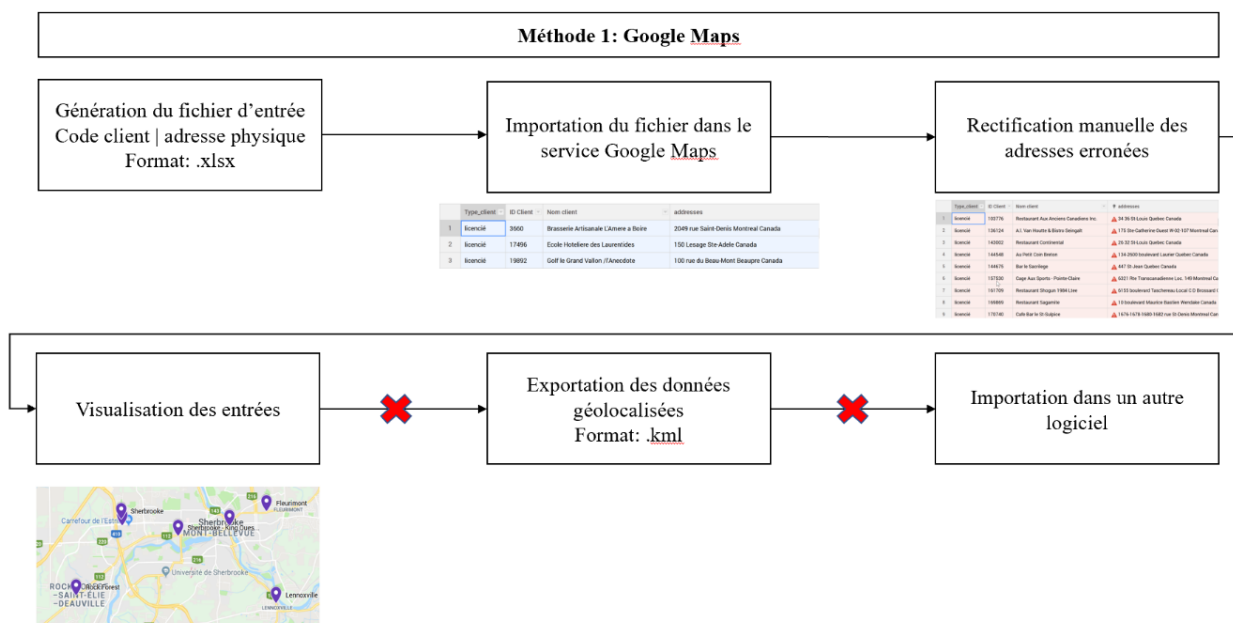


Figure 3.4 Méthode 1 de géolocalisation des clients par Google Maps.

Méthode 2 : Connexion via l'API de Google Maps

En conséquence, la deuxième méthode développée est celle qui a été retenue. Cette méthode a pour objectif de récupérer les points GPS de chaque client d'après son adresse physique. Pour se faire, elle utilise encore une fois les services de *Google Maps* mais cette fois-ci en se connectant via un API (Application Programming Interface). La deuxième méthode est présentée à la figure suivante et se déroule en deux phases. La première phase est le nettoyage des données et la deuxième phase est la géolocalisation des adresses physiques.

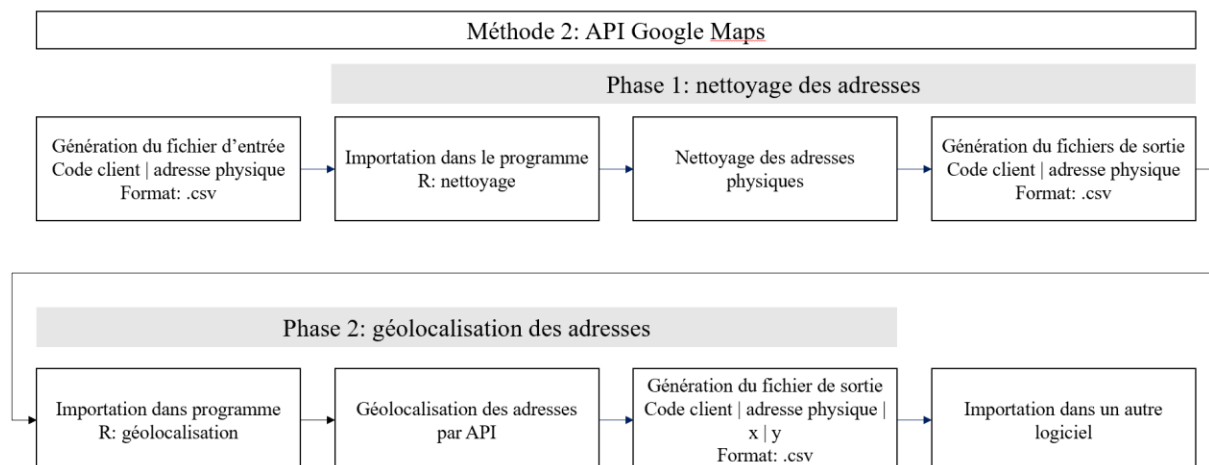


Figure 3.5 Méthode 2: géolocalisation par connexion API

La géolocalisation se fait à partir d'un programme simple dans R, écrit spécialement pour atteindre cet objectif. Le programme lit les entrées du fichier sous format .csv, se connecte à la plateforme *Google Maps* via l'API, retranscrit les coordonnées GPS à côté des adresses physiques et génère finalement un autre fichier format Excel contenant l'ajout des nouvelles informations. Le schéma 3.5 synthétise les grandes étapes du programme de géolocalisation.

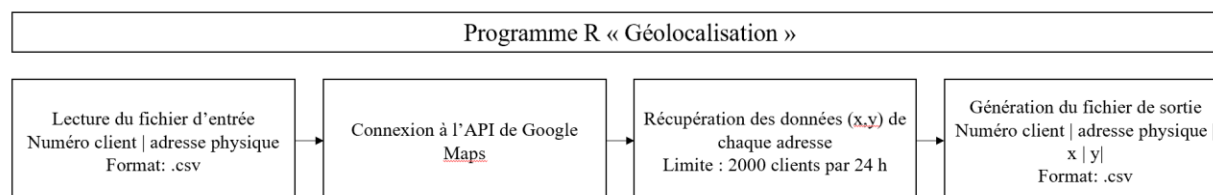


Figure 3.6 Programme R: Géolocalisation des clients

Cette méthode requiert une préparation minutieuse des données afin qu'elle respecte tous les formats nécessaires pour fonctionner. L'API de Google étant un service fourni en anglais, les accents inhérents à la langue française ne sont pas gérés par le service et celui-ci ne sait pas lire l'adresse en leur présence. Les adresses québécoises (et plus généralement canadiennes) ont la particularité de présenter l'orientation de la rue (Ouest/Est et Nord/Sud) pour les axes majeurs, ainsi que des codes postaux avec des lettres et des chiffres mélangés, entraînant une erreur lors de la lecture de l'adresse physique. De même, les spécifications de livraison qui peuvent être présentes dans les adresses de livraisons engendrent des erreurs. L'exemple fictif à la figure 3.7 illustre les

différentes erreurs repérées qui empêchent la lecture de l'adresse par le programme de géolocalisation.

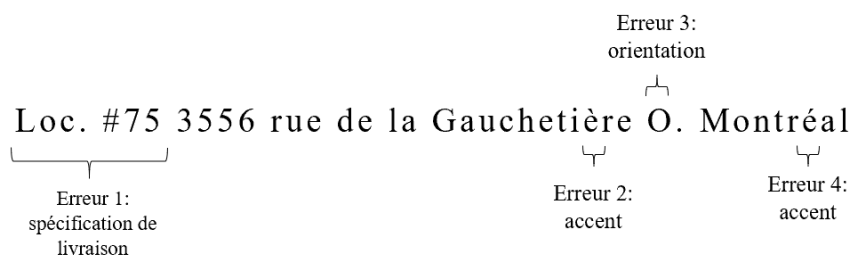


Figure 3.7 Exemple d'une adresse présentant des erreurs

Le programme de « nettoyage » qui précède le passage dans le programme de géolocalisation a pour objectif de nettoyer les adresses physiques afin de générer les résultats de la manière la plus optimale possible. Les étapes suivies par le programme nettoyage sont illustrées dans la figure suivante.

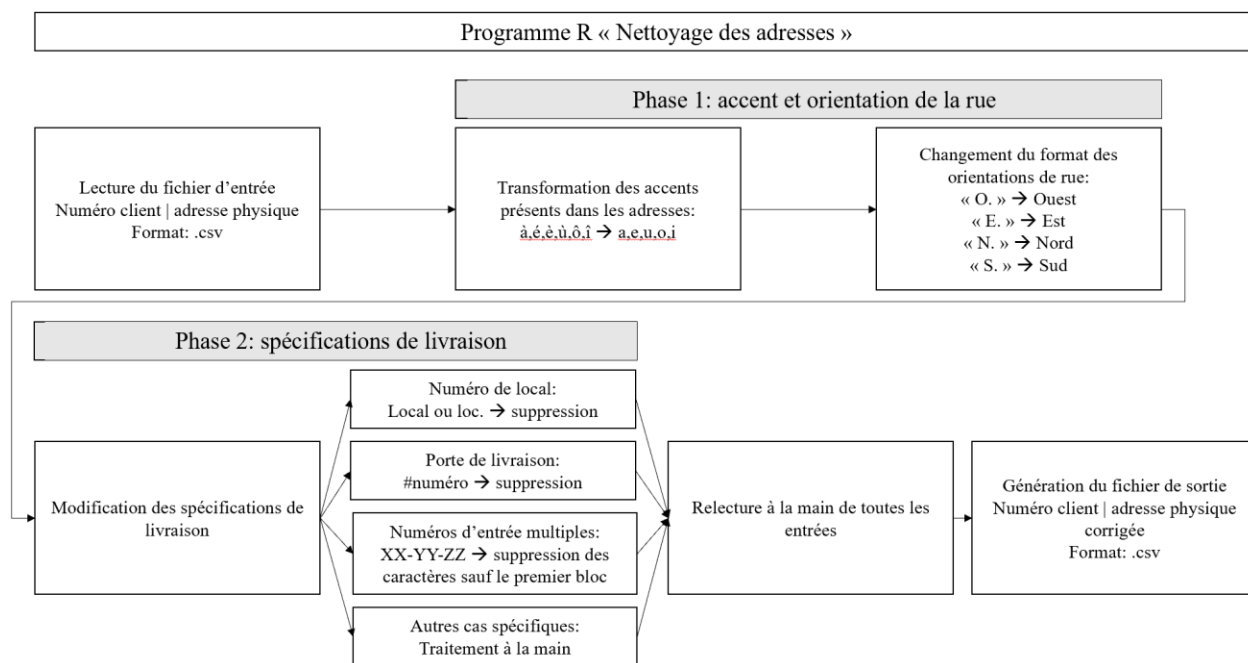


Figure 3.8 Programme R : Nettoyage des adresses physiques

La deuxième méthode présente des résultats convaincants à l'exception des cas de figure précis détaillés ci-contre. Les clients titulaires de permis dont la livraison s'effectue à l'aéroport Pierre-

Elliott Trudeau ou qui font partie d'un centre commercial ainsi que les clients qui sont situés sur un lieu connu par son nom seulement (« Parc Jean Drapeau » ou « Circuit Gilles Villeneuve » par exemple). En effet, les adresses de ces clients sont exactement les mêmes à l'exception de la porte de déchargement de la marchandise ou bien du local de dépôt de celle-ci. En conclusion, le programme de géolocalisation indique des points de GPS erronés (il répète celui précédemment émis). Afin de régler ce problème, le programme de « nettoyage » des adresses physiques, lors de la lecture des adresses, repère la séquence « # numéro » (par exemple « #7 ») et l'élimine, ce qui permet de lever l'erreur. Les clients situés sur un lieu connu représentent une infime minorité, il est donc plus aisé et efficace d'inscrire leurs adresses physiques réelles à la main.

Finalement, les points sont géolocalisés et consignés dans une base de données sous format .csv qui servira pour calculer la matrice des distances entre les points.

Modifications du format des jours de livraison et des plages horaires

Dans les données fournies par le partenaire industriel, les jours de livraison et les plages horaires de livraison ne sont pas dans un format facilement exploitable pour les analyses. Afin de simplifier la lecture de celles-ci pour une utilisation future, le format est modifié selon la procédure ci-contre.

Pour les titulaires de permis, les données initiales des jours de livraison et des plages horaires sont initialement sous le format suivant (tableau 3.4). Ce format commence le dimanche pour finir le samedi.

Tableau 3.4 Format initial des données obtenues

Code client	Journée livraison-dimanche	Début plage horaire-dimanche	Fin plage horaire-dimanche	Journée livraison-lundi	Début plage horaire-lundi	Fin plage horaire - lundi
00000	N	-	-	O	8h00	17h00

Ce format initial est modifié afin d'être plus facilement exploitable pour la suite des analyses (tableau 3.5).

Tableau 3.5 Exemple d'une entrée client avec horaire simple

Code client	Jour de livraison	Début horaire livraison	Fin horaire livraison
00000	Lundi	8 :00	17 :00

Pour modifier le format des jours de livraison ainsi que des horaires, la base de données originelle est passée dans un programme Python qui vient lire les « O » (oui) et les « N » (Non) et inscrire le jour indiqué dans la colonne. Pour les heures de livraison, quand la colonne indique « O », le programme vient récupérer la valeur des deux colonnes suivantes qui contiennent les heures de début et de fin.

Cependant il existe le cas particulier où un client est livré plus d'une fois par semaine. Dans ce cas précis, une double entrée est créée. Ainsi un client livré le lundi et le mercredi voit son horaire indiqué au format présenté au tableau 3.6. Le format des heures est aussi modifié. L'écriture francophone de l'heure (« 8h00 ») complexifie les traitements. En conséquence celle-ci est changée pour une écriture standardisée où les heures et les minutes sont séparées par le symbole « : ».

Tableau 3.6 Exemple d'une entrée client avec horaires

Code client	Jour de livraison	Début horaire livraison	Fin horaire livraison
00000	Lundi	8 :00	17 :00
00000	Mercredi	9 :00	18 :00

L'ensemble des modifications effectuées sur les données fournies par la SAQ permettent la création d'une base de données solide et exploitable. Les tables suivantes retracent l'ensemble de ces bases de données et leurs liens entre elles.

Ajout du service de livraison

Certaines succursales sont livrées par un transporteur privé. Il est donc important de notifier dans la base de données si une succursale est livrée à l'interne ou bien livrée à l'externe. Une colonne est donc ajoutée nommée « service de livraison » et les entrées peuvent être les suivantes. Une succursale qui a le code « CDM » (Centre de Distribution de Montréal) ou « CDQ » (Centre de

Distribution de Québec) signifie qu'elle est livrée un camion de la SAQ. Au contraire, une succursale dont le code est « transporteur » signifie qu'elle est livrée par un transporteur privé. Il arrive aussi que la succursale soit livrée par les deux services, dans ce cas son code est « mixte ».

Transactions

Conversion des unités

L'actuel réseau de distribution de la SAQ est divisé entre les livraisons des titulaires de permis et les livraisons des succursales. Les unités de mesure des quantités à livrer entre ces deux divisions diffèrent. Les titulaires de permis sont livrés à la bouteille tandis que les succursales son livrées à la caisse. De plus, les camions sont chargés par palettes. Au total, les trois unités sont utilisées dans les différents fichiers et il est donc nécessaire d'harmoniser celles-ci afin d'obtenir des résultats cohérents. Quand on observe le fichier de transactions qui retrace les livraisons, on remarque c'est la caisse qui est utilisée par le système. À des fins de cohérence, c'est donc la caisse qui est retenue comme unité dans le cadre de ce mémoire. Le schéma 3.9 explique les conversions entre les différentes unités.

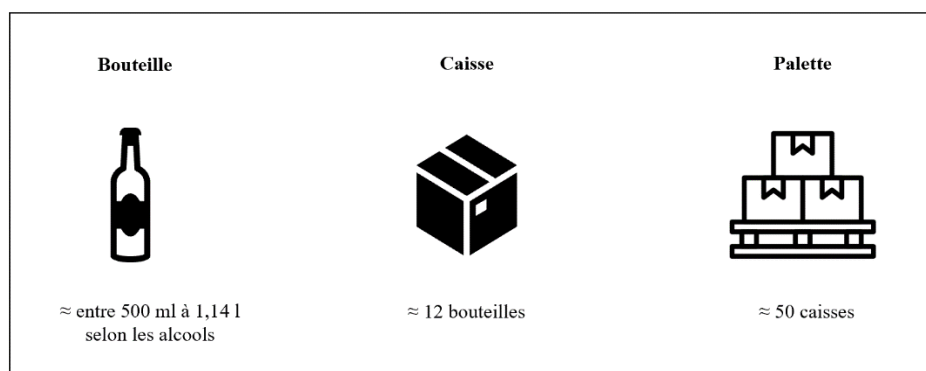


Figure 3.9 Conversion des unités

Ajout du nombre de chauffeurs requis

Une des particularités opérationnelles de l'entreprise partenaire est le nombre de chauffeurs requis pour assurer la livraison de marchandises. Cette variable ayant un impact fort sur le coût des opérations de livraison, il est important que cette information soit consignée dans la base de données afin de simplifier les calculs par la suite. Selon quel canal livre le client (CDM ou CSM), il faut un ou deux chauffeurs afin d'effectuer la livraison. Dans le fichier fourni par le partenaire industriel, il existe une autre catégorie où le nombre de chauffeur est adapté selon la quantité

commandée par le client. Sur les 2044 entrées spécifiées dans le fichier fourni, la répartition du nombre de chauffeurs requis est présentée au tableau 3.7.

Tableau 3.7 Nombre de chauffeurs requis

Nombre de chauffeurs requis	Nombre de clients concernés
1 chauffeur	173 (8,46%)
2 chauffeurs	682 (33,37%)
À déterminer selon la quantité à livrer	493 (24,12%)
Non-spécifié	696 (34,05%)
Total	2044

Quant aux succursales, elles sont habituellement livrées par un seul chauffeur.

En conclusion, l'ensemble des données et des modifications apportées retrace deux morceaux de bases de données qui peuvent être synthétisées dans la figure 3.10.

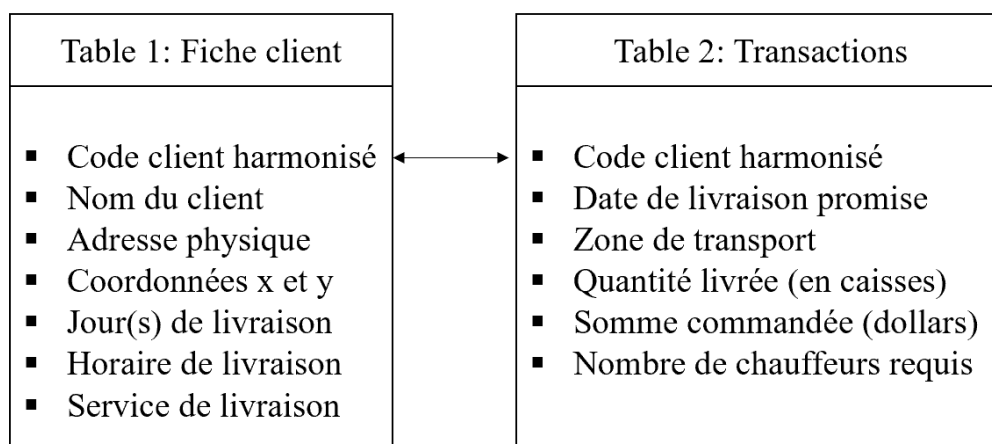


Figure 3.10 Récapitulatif des modifications effectuées sur la base de données

3.3 Algorithme de Cordeau et al. (1997)

Dans le but de réaliser les tournées modèles de véhicules, il est nécessaire d'avoir une méthode résolution éprouvée et qui donne des résultats fiables. M. Cordeau ayant gracieusement accepté de nous fournir ses codes de recherche avec tabous, c'est la méthode de résolution qui sera utilisée dans le cadre de ce mémoire. L'objectif de cette partie est double, tout d'abord il s'agit de présenter l'algorithme de Cordeau et al. (1997) mais aussi l'ensemble des modifications apportées à l'algorithme pour ce mémoire.

3.3.1 Présentation de l'algorithme de Cordeau et al. (1997)

La recherche de solution avec tabous est particulièrement adaptée lorsqu'il y a un grand nombre de solutions possibles, ce qui est généralement le cas pour les problèmes de tournées de véhicules.

Dans le cadre de ce mémoire, l'algorithme utilisé est celui développé par Cordeau, Gendreau et Laporte (1997). Le but de l'algorithme présenté est de résoudre un problème de tournées de véhicules périodique (dans le cas d'étude actuel, la périodicité est égale à 1). Dans le cadre de ce mémoire, cet algorithme permet de bâtir des routes de livraison (ou tournées). En effet, le partenaire industriel utilise un logiciel particulier auquel il n'était pas possible d'avoir accès. En conséquence, il était nécessaire La fonction de coût initiale est basée sur la distance parcourue. Le langage utilisé pour l'algorithme est C et il est utilisable sous systèmes d'exploitation Linux, Windows et Mac. Cependant pour ce mémoire, il a toujours été utilisé sous un environnement Linux.

Construction de la solution initiale

L'algorithme commence par la construction de la solution initiale. Les clients sont géolocalisés par leurs coordonnées euclidiennes et sont ordonnées selon leur angle croissant avec le dépôt. Après cette étape les clients sont insérés dans la route créée grâce à l'heuristique GENI (détaillé ci-après).

Pour cette heuristique de recherche avec tabous, une de ses particularités réside dans l'utilisation de l'heuristique GENI. Le fonctionnement général de cette heuristique est présenté ci-après. L'heuristique « GENIUS » est introduite par Gendreau et al. (1994). Un client peut être inséré entre deux nœuds sur une route, même si les deux nœuds ne sont pas consécutifs. La partie « GENI » est une phase de construction de route tandis que la partie « US » est une phase de post-optimisation. « GENI » insère à chaque itération un nœud qui ne fait pas encore partie d'une route entre les deux

nœuds de la route les plus proches. Suite à cette étape, il y a une ré-optimisation locale de la route, « GENI » sélectionne l'insertion entre deux nœuds dont le coût est minimal. La phase de post-optimisation est appliquée jusqu'à ce qu'il ne reste plus aucune amélioration à apporter. Le schéma 3.11 présente un exemple trivial de l'application de GENIUS.

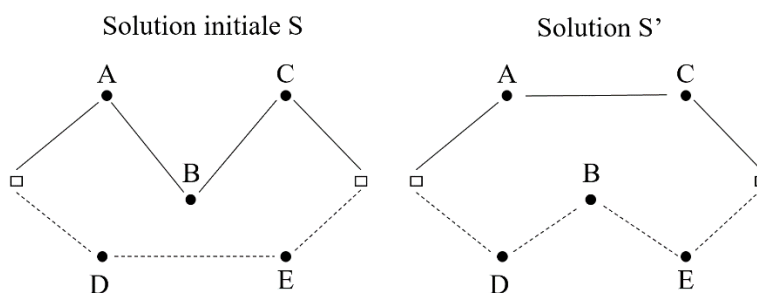


Figure 3.11 Exemple trivial de l'application de GENIUS

La solution initiale est celle dans laquelle tous les clients sont placés dans un camion. Après cette phase de construction de la solution initiale, on retrouve la phase de diversification et d'intensification.

Intensification et diversification

L'intensification et la diversification sont deux mécanismes présents quand une recherche avec tabous est effectuée. L'intensification permet de parcourir au mieux l'espace de recherche, tandis que la diversification permet de ne pas rester bloqué dans une partie de celui-ci.

L'objectif est de ne pas rester bloqué dans une solution locale, pour se faire, à chaque itération, un échange intra-tournées et inter-tournées est effectué afin de trouver une meilleure solution, il s'agit de la phase d'intensification. Les échanges inter-tournées sont les échanges effectués entre les tournées tandis que les échanges intra-tournées sont un repositionnement dans l'ordre de la tournée. Comme il s'agit d'une recherche avec tabous, à chaque fois qu'un mouvement est effectué, celui-ci est proscrit pour un certain nombre d'itérations afin de ne pas rester prisonnier d'une solution optimale locale. Dans le cas de cet algorithme, les solutions non-faisables sont autorisées afin de favoriser les déplacements vers des solutions dont le coût est moindre.

La diversification consiste à appliquer une pénalité si un mouvement est effectué un trop grand nombre de fois pendant la recherche de solutions.

3.3.2 Modifications apportées à l'algorithme

Afin de mieux prendre en compte les spécificités opérationnelles de l'entreprise partenaire pour laquelle les tournées sont créées, il est nécessaire d'appliquer quelques modifications dans le code de l'algorithme de (Cordeau, J. F., Gendreau, & Laporte, 1997).

Ajout de camions avec différentes capacités

Le partenaire industriel possède une flotte de camion hétérogène. En conséquence il est nécessaire d'adapter l'algorithme pour qu'il prenne cet aspect en compte. Dans le fichier d'entrée, le nombre total de camions reste la somme des camions et les capacités des camions sont ajoutées manuellement comme montré à la figure suivante. Une matrice est donc ajoutée dans les fichiers d'instances, qui permet de refléter les différentes possibilités de types de camions disponibles. Cet ajout permet d'augmenter la flexibilité de création des instances et se rapproche au mieux de la situation actuelle.

Matrice de distances

L'algorithme de (Cordeau, J. F. et al., 1997) utilise les coordonnées euclidiennes des points afin de créer les tournées. Cependant afin de prendre en compte les distances réelles entre les points, une matrice de distances est créée entre chaque titulaires de permis et succursales. La matrice de distances donne des résultats asymétriques (la distance du point A ou point B n'est pas la même que du point B au point A). Avec la modification apportée, les points euclidiens ne sont plus utilisés pour créer les tournées. La distance est maintenant lue via la matrice des distances. Cette modification demande de venir modifier l'heuristique GENI pour qu'il prenne en compte le cas asymétrique.

Une fois les modifications réalisées, l'algorithme est prêt à être utilisé pour la création de tournées.

3.4 Préparation des données

L'utilisation de l'heuristique demande un format de données particulier et renvoie à l'utilisateur un fichier dont les informations sont claires mais difficilement directement exploitables. Dans l'optique de faciliter la mise en forme et l'exploitation des données tout en réduisant le risque d'erreurs, un programme de traitement et un programme de sortie sont mis en place. Cette partie est donc divisée entre la préparation pré-heuristique et la préparation post-heuristique des données.

3.4.1 Préparation pré-heuristique

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, l'objectif est de préparer les données et de les mettre en forme afin de pouvoir les entrer dans l'heuristique. L'outil utilisé pour effectuer cette préparation est un traitement sur R (www.rstudio.com). Le choix d'une programmation sur R est motivé par la facilité de gestion des bases de données ainsi que de la manipulation de celles-ci. L'utilisateur possède ainsi un accès aisé à l'ensemble du programme et peut le modifier à sa guise. De plus, comme les extractions du partenaire industriel depuis son ERP se font à l'aide de fichiers .csv, l'intégration entre ceux-ci et R est aisément réalisable.

Au total, deux situations sont programmées à l'aide du fichier de traitement. Pour chaque situation, la méthode appliquée est semblable. Tout d'abord, un diagramme en couloirs est présenté afin de comprendre les différentes étapes effectuées et leurs interactions entre elles. Deuxièmement, quand l'interaction d'un utilisateur est nécessaire alors les erreurs potentielles sont identifiées ainsi que les détrompeurs mis en place pour les éviter. Finalement, les tests de vérification mis en place pour chaque situation sont présentés.

Situation 1 : Création manuelle des fichiers d'instance

La première situation étudiée est celle dans laquelle l'utilisateur crée lui-même sa tournée en entrant les paramètres manuellement. Le diagramme en couloir représentant ce processus est présenté à la figure 3.13.

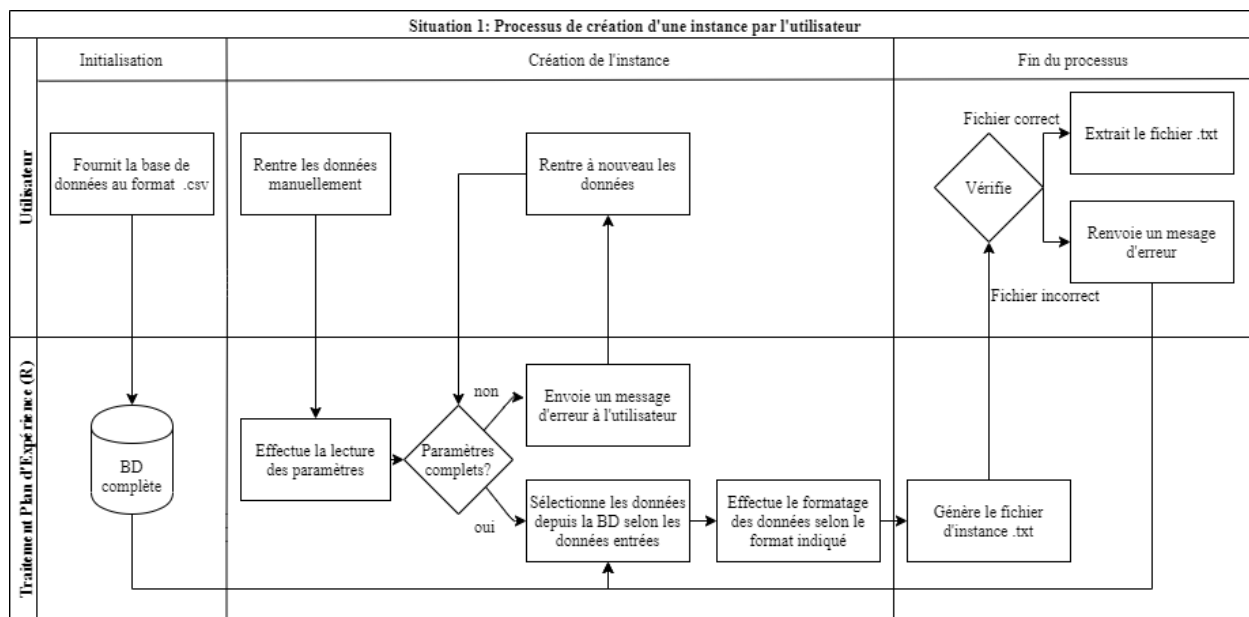


Figure 3.12 Processus de création d'une instance par l'utilisateur

L'utilisateur indique les paramètres nécessaires au fonctionnement de l'heuristique ainsi qu'au tri de la base de données. Ceci sous-entend que ce dernier doit connaître l'ensemble de ces paramètres. Dans le cas présent, la base de données est celle qui a été consolidée aux point 3.2 de ce mémoire, mais l'utilisateur peut choisir de changer cette base de données au besoin. Le fichier de traitement vient ensuite lire les informations entrées, trier la base de données et formater les informations correctes selon le format demandé par l'heuristique. L'utilisateur n'a ensuite qu'à effectuer un contrôle manuel de l'instance générée afin de vérifier que le format est respecté et qu'il n'y a pas d'incohérence. Tant que l'utilisateur n'a pas validé l'instance finale, ce qui a pour effet de la sauvegarder, celui-ci a accès à toutes les pages de travail de tri de la base de données et de mise en page de l'instance et peut à tout moment les vérifier manuellement.

L'utilisation d'un traitement sur R permet d'éviter les erreurs liées aux manipulation successives des fichiers. Cela ne prévient donc pas la présence d'erreurs dans le codage du fichier. Afin de palier à cet inconvénient, une série de mesure de vérifications est mise en place. Les erreurs possibles et les détrompeurs mis en place sont synthétisés dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 Tableau présentant les erreurs possibles ainsi que les détrompeurs mis en place

Erreur possible	Détrompeur instauré
• Certaines données demandées sont laissées vides	• Impossible de lancer le programme.
• Certains champs du formulaire présentent des erreurs de frappe (caractères alphanumériques, signes etc.)	• Message d'erreur; • Impossibilité de lancer le programme.

Les erreurs présentées ci-dessus sont les plus évidentes et les plus probables de se dérouler dans un contexte d'utilisation modérée du fichier de traitement sur R. Dans le cas où ce traitement eue été conçu pour une utilisation intensive et un grand déploiement, d'autres systèmes de détrompeurs auraient été mis en place et une réflexion plus approfondie sur l'outil choisi aurait été nécessaire.

Afin de vérifier cet outil, une série de tests sont effectués et regroupés dans le tableau 3.9. Cette série de test est en quelque sorte une liste à cocher afin de vérifier que tous les aspects du traitement sur R pour créer manuellement les instances fonctionnent.

Tableau 3.9 Liste de vérifications effectuées

Concept testé	Partie du programme concernée	Test effectué	Résultat
Entrée des données	Lecture des données	Les paramètres obligatoires ne sont pas renseignés	Impossibilité de sauvegarder, message d'erreur
	Lecture des données	Des erreurs sont présentes dans les entrées	Message d'avertissement et impossibilité de lancer le traitement.
	Lecture des données	Les données sont correctement entrées	Lancement du traitement possible.

Concept testé	Partie du programme concernée	Test effectué	Résultat
Tri de la base de données	Base de données	La base de données est incomplète (manque des colonnes)	Le traitement ne peut pas fonctionner et s'arrête
	Base de données	La base de données sort du format programmé	Le fichier n'est pas lu et le traitement ne peut fonctionner
	Base de données	La base de données est complète	La base est triée selon les paramètres utilisateurs
Formatage de la base de données	Format de l'instance	Le format n'est pas respecté	L'utilisateur doit modifier le code à la main
	Format de l'instance	Le format est respecté	La macro génère l'instance en fichier .txt
Génération fichier .txt	Fichier .txt	L'utilisateur sauvegarde son instance	Les fichiers temporaires de travail sont effacés et l'instance est sauvegardée
	Fichier .txt	L'utilisateur oublie de sauvegarder son instance	Par défaut, R une sauvegarde des fichiers.

Situation 2 : création des fichiers d'instances selon un plan d'expérience

Le plan d'expérience est développé au chapitre quatre, mais est utilisé dans cette sous-section pour créer les fichiers d'instance. En effet, la création de fichiers d'instances à la main possède ses limites lorsqu'il est nécessaire de générer un grand nombre de fichiers d'instances. En conséquence, on se sert du plan d'expérience et des paramètres qu'il contient afin de créer les fichiers d'instances.

Le diagramme en couloirs correspondant à cette situation est celui de la figure 3.14.

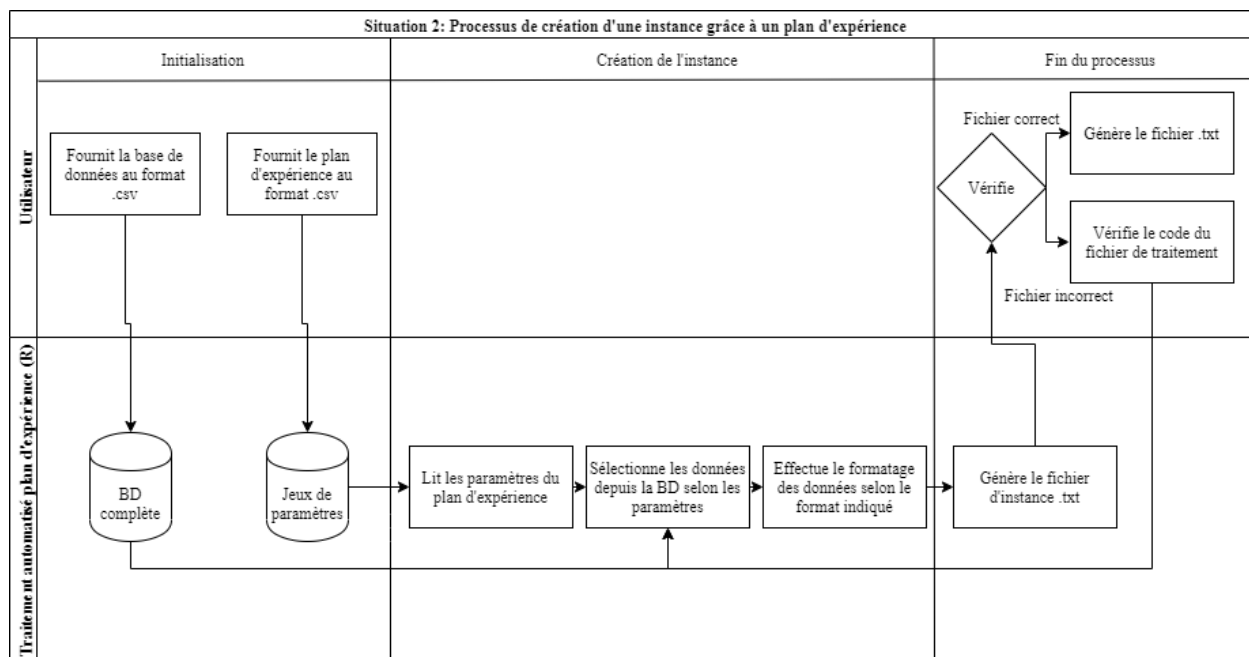


Figure 3.13 Processus de création d'instances grâce à un plan d'expérience

Dans le cas présent, le plan d'expérience est renseigné au format .csv et agit comme une base de données des paramètres. Le programme de traitement vient lire chaque jeu de paramètre et sélectionne les données appropriées depuis la base de données. Une fois ces données mises en forme et vérifiées, elles sont sorties sous un format de fichier .txt. La macro est programmée pour venir itérer pour chaque jeu de données sans autre intervention humaine que la validation finale jusqu'à ce que la liste soit finie. Comme il y a moins de manipulations humaines, il y a aussi moins de risques d'erreurs.

Le tableau 3.3 présente la série de test effectués afin de s'assurer de la stabilité et la robustesse du programme développé. Les tests qui ont déjà été énoncés au tableau précédent concernant la base de données ne sont pas répétés ici.

Tableau 3.10 Tests effectués sur le programme R

Concept testé	Partie du programme concernée	Test effectué	Résultat
Entrée du plan d'expérience	Jeux de paramètres	Chaque ligne représente un jeu de paramètres	Pour chaque ligne un fichier .txt sera généré
	Jeux de paramètres	Certaines lignes présentent des paramètres manquants	Le traitement s'arrête et affiche un message d'erreur s'il manque des paramètres.
Lecture du plan d'expérience	Tri de la base de données	Un fichier d'instance est créé par jeu de paramètres	Un fichier .txt est généré par ligne de paramètres jusqu'à ce que le traitement soit fini.
	Tri de la base de données	Deux jeux d'instances sont identiques	Le programme n'est pas capable de repérer les doublons, c'est à l'utilisateur de s'assurer qu'il n'y en a pas.
Sauvegarde du fichier .txt	Génération du fichier .txt	L'utilisateur ne sauvegarde pas l'instance générée	Un message d'erreur s'affiche et l'utilisateur doit venir sélectionner là où le programme s'est arrêté pour recommencer.

Ce programme présente l'avantage de générer des instances de manière efficace et rapide, tout en diminuant au maximum l'ensemble des manipulations par l'utilisateur. Il est aussi aisé de changer le plan d'expérience et de faire tourner le programme de traitement à nouveau.

Ajout de la matrice de distances

Un des aspects particuliers à prendre en compte avec ce traitement sur R est l'intégration d'une matrice de distances pour les clients choisis dans la base de données selon le plan d'expérience. Il serait contre-productif d'insérer l'ensemble de la matrice de distances (plus de six millions de lignes), d'où le filtre des clients concernés seulement. Au final, l'utilisateur obtient la matrice asymétrique qui sera utilisée pour le calcul des indicateurs de performance présentés au chapitre quatre de ce mémoire.

3.4.2 Préparation post-heuristique

Le format de sortie de l'heuristique est un fichier au format .txt, qui présente l'ensemble des informations pertinentes, comme le nombre de camions utilisés, l'ordre des clients desservis etc. Cependant le format n'est pas facilement exploitable en tant que tel, car difficilement manipulable.

La préparation post-heuristique se déroule en deux étapes, la première consiste à remettre le fichier sous un format .csv et la deuxième générer le fichier qui permet de visualiser les tournées générées sur le logiciel QGIS (www.qgis.com).

Étape 1 : transformation du format du fichier

Comme mentionné auparavant, le fichier de sortie de l'heuristique est un fichier au format .txt. Afin de rendre les données plus facilement manipulable et exploitable par d'autres logiciels, le but est de transformer ce fichier en un fichier .csv.

Pour effectuer cette étape, le fichier .txt est importé sur le logiciel R. R est capable de gérer des fichiers dont il manque un nom de colonne en en imposant un lui-même. Comme la structure du fichier de sortie est toujours identique, un programme spécifique de traitement post-heuristique est mis en place.

- Numero_camion → numéro du camion
- Index_client → numéro du client dans l'heuristique
- Id_client → numéro du client dans la réalité
- Ordre_client → ordre du client dans la tournée de livraison
- X → coordonnées du client
- Y → coordonnées du client

Avant d'être exporté au format .csv, les différentes mesures de performances qui seront présentées au chapitre quatre sont réalisées, ce qui permet d'obtenir un fichier consolidé contenant toutes les informations pertinentes concernant l'instance qui a été créée.

Étape 2 : préparation du fichier pour une entrée sur QGIS

Le fichier .csv précédemment obtenu sert maintenant de base pour que la visualisation puisse se faire dans le logiciel QGIS. Le fichier est importé au format .csv et la fonction « traits depuis

points » est utilisée afin de tracer les tournées dans l'ordre des clients desservis, depuis le dépôt avec un retour au dépôt à la fin de la journée.

La méthodologie présentée ici couvre l'ensemble des modifications qui ont été effectuées sur la base de données fournie, que ce soit sur la manipulation des données ou encore leur transcription dans une base de données intégrée. Les différentes étapes de manipulation qui permettent l'obtention des résultats des tournées sont décrites afin de mettre en avant les forces et faiblesses de la méthodologie.

CHAPITRE 4 EXPÉRIMENTATION

La phase d'expérimentation représente le cœur du mémoire car elle permet de générer les résultats présentés au chapitre suivant. Une méthodologie détaillée est présentée au point 4.1 afin de permettre au lecteur un suivi plus aisé. Ce chapitre a pour objectif de présenter le cadre d'expérimentation mis en place, qui répond au principe de démarche scientifique reproductible et répétable. Le cadre d'expérimentation respecte les trois piliers suivants : (i) observer un plan d'expérience, (ii) présenter l'implémentation pratique du plan, (iii) vérifier les résultats obtenus. Ce chapitre est divisé en cinq parties principales. La méthodologie de l'ensemble de l'expérimentation est présentée au point 4.1. L'analyse préliminaire (4.2) permet de relever les différents facteurs qui sont étudiés dans le plan d'expérience (4.3). Les paramètres pertinents sont ensuite utilisés pour la construction des scénarios opérationnels (4.4).

À des fins de lisibilité et de clarté, les résultats sont présentés au chapitre 5 de ce mémoire.

4.1 Méthodologie de l'expérimentation

À des fins de compréhension et de clarté, la méthodologie est présentée sous forme de schéma (figure 4.1).

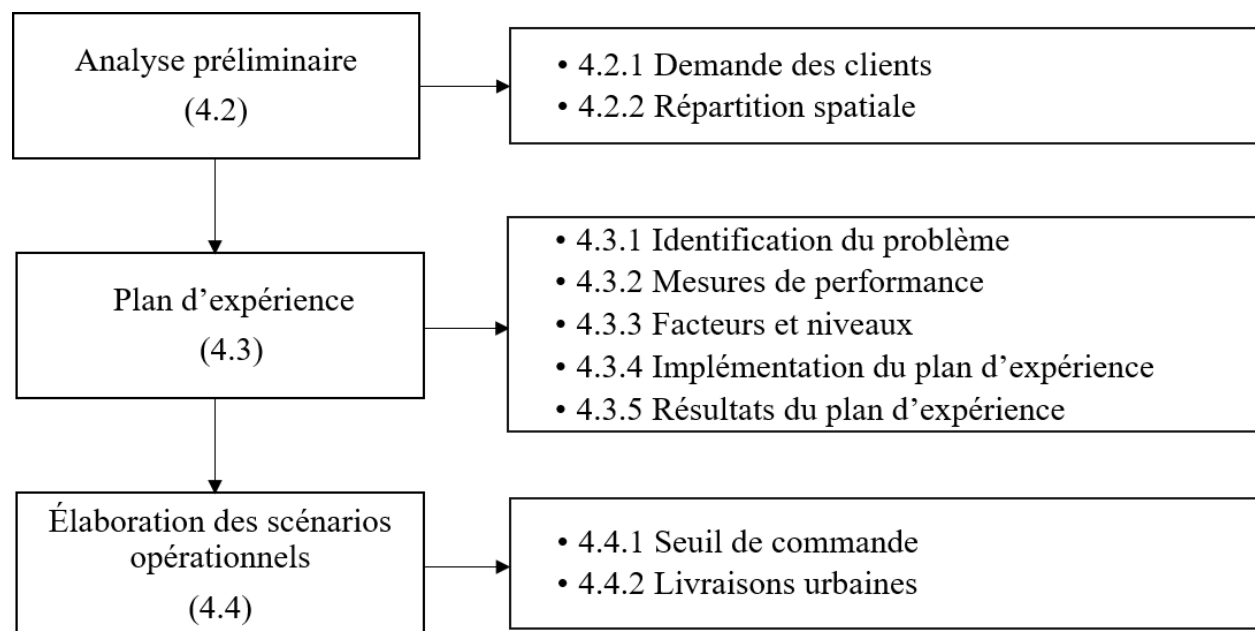


Figure 4.1 Méthodologie de l'expérimentation

L'objectif ultime de cette phase d'expérimentation est de créer les instances de tournées, qui seront testées et dont les résultats seront présentés au chapitre 5. Ce qui est à retenir de l'ensemble de ce chapitre d'un point de vue méthodologique est la présence de mesures de performances au sein du plan d'expérience (phase de vérification) et de tests au point 4.5 du chapitre qui correspondent à la phase de validation du modèle complet.

Cette partie d'expérimentation comporte de nombreuses sous-parties, et chaque sous-partie comporte son lot de manipulation de fichier, de traitement de données ainsi que tests de validation. Le schéma 4.2 proposé a pour objectif de détailler chacune de ces parties afin de comprendre comment elles fonctionnent les unes avec les autres.

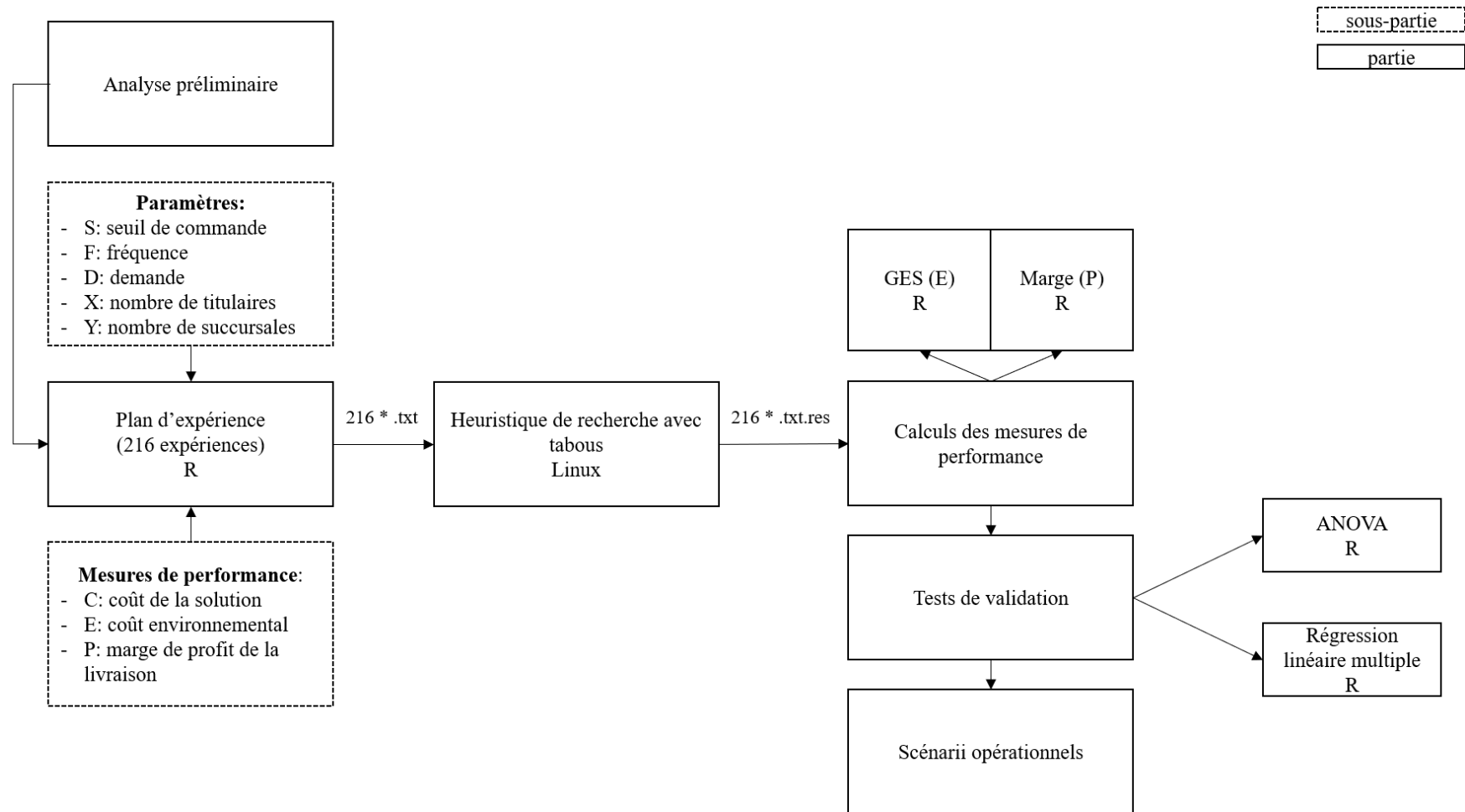


Figure 4.2 Détail du processus effectué au chapitre 4

4.2 Analyse préliminaire

L'objectif de cette section est de présenter les faits saillants qui ressortent de la situation actuelle, en analysant la demande des clients (succursales comme titulaires de permis) ainsi que leur répartition spatiale sur le territoire québécois. Les résultats de ces analyses serviront d'intrants pour les paramètres du plan d'expérience. La base de données précédemment préparée est utilisée afin de réaliser les analyses, en particulier les données portant sur la géolocalisation des clients ainsi que les quantités consommées sur la dernière année par ceux-ci. Dans le cadre des deux analyses, on s'intéresse aussi à la fréquence de commande dans le temps des clients.

Cette analyse préliminaire est donc divisée entre l'analyse de la demande des clients (succursales et titulaires de permis) selon l'historique des ventes et des livraisons effectuées et l'analyse de la répartition spatiale des clients. La méthode appliquée est semblable pour les deux analyses. Tout d'abord une analyse générale est proposée, qui permet de dégager une ou plusieurs hypothèses. Pour chaque hypothèse posée, des tests sont performés et une conclusion est rendue.

4.2.1 Analyse de la demande des clients

Cas 1 : succursales

Comme mentionné auparavant, la SAQ possède 409 succursales, réparties sur tout le territoire du Québec. La première analyse générale effectuée concerne le profil général de demande des succursales sur un échantillon de deux mois de demande pour chaque saison (saison basse et saison haute). Celui-ci est représenté par un diagramme « à moustaches » (figure 4.3), plus connu sous le nom de boxplot. Les données détaillées liées à ce boxplot sont présentées dans le tableau 4.1. Pour les deux types de saison, on observe que la moyenne est supérieure à la médiane, ce qui est dû à la présence de points extrêmes (demande très forte comparativement à la moyenne). Selon le graphique, 50 % des succursales ont une demande entre 4 472 et 10 636 caisses (saison haute) et 2 931 et 6 840 caisses (saison basse). La saison haute présente un profil de demande plus dispersé que pour la saison basse. Cependant, on note que « la boîte » reste peu étendue par rapport à l'intégralité de la série considérée, ce qui nous renseigne sur la stabilité des commandes effectuées par les succursales.

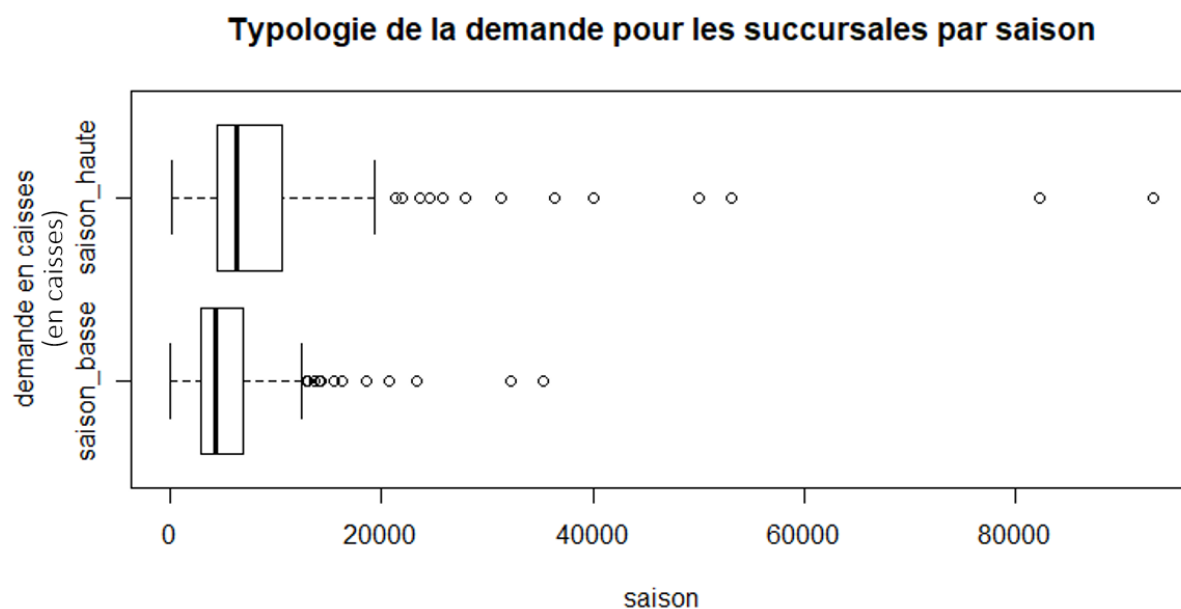


Figure 4.3 Comparaison de la typologie de la demande pour les succursales

Tableau 4.1 Présentation des données statistiques pour la typologie de la demande des succursales, arrondies à l'unité près.

	Saison basse	Saison haute	Variation absolue (%)
Moyenne (en caisses)	5 493	9 172	66,97 %
Médiane (en caisses)	4 259	6 263	47,05 %
Écart-type (en caisses)	4 328	10 026	131,65 %
Premier quartile (en caisses)	2 931	4 472	53,62 %
Troisième quartile (en caisses)	6840	10 636	55,37 %

Suite à ce premier portrait obtenu, il est intéressant de se questionner sur la fréquence de livraison d'une succursale par rapport à sa demande. L'hypothèse de départ est la suivante : plus une succursale a une demande élevée, plus sa fréquence de livraison devrait aussi être élevée.

Cette hypothèse est analysée en effectuant un test statistique de Pearson afin d'évaluer la corrélation entre la fréquence de livraison et la demande. Le test est réalisé sur R et produit les résultats présentés aux figures 4.4 et 4.5.

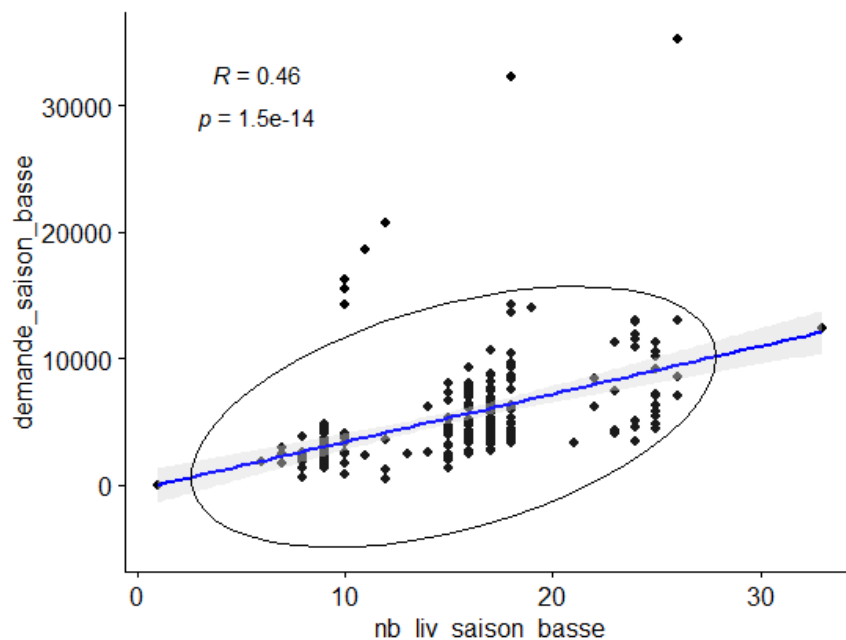


Figure 4.4 Étude de la corrélation entre la fréquence de livraison et la demande (saison basse)

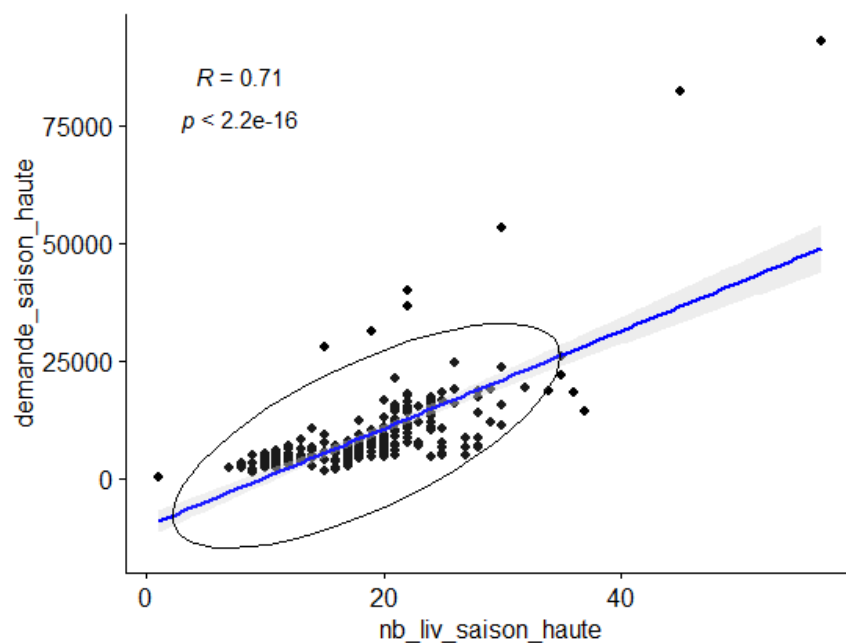


Figure 4.5 Étude de la corrélation entre la fréquence de livraison et la demande (saison haute)

Dans les deux cas, la valeur du test p ($p < 0,05$) indique qu'il existe une forte corrélation entre le nombre de livraison et la demande des succursales. Obtenir une forte corrélation entre ces deux séries confirme l'hypothèse de départ et indique que les ressources utilisées pour la livraison sont adéquates par rapport à la demande. Cependant, certains points qui ne font pas partie de l'ellipse présentent un comportement qui diffère fortement. Soit leur demande est très élevée comparativement au nombre de livraison, soit c'est l'inverse qui se produit. À partir de ce constat, il est intéressant de se questionner sur ces profils particuliers.

À l'aide des deux analyses performées auparavant, il est intéressant de déterminer si des groupes de succursales ressortent quand on les regroupe selon leur demande et leur nombre de livraison. La méthode utilisée pour effectuer cette analyse est un regroupement k -moyennes (k -means), avec $k=3$. Cette méthode présente l'avantage d'obtenir des résultats rapides. Cependant, elle présente l'inconvénient de devoir choisir la valeur de k . Ici, le choix de $k = 3$ du principe que l'algorithme va créer trois groupes, un groupe dont la demande sera élevée, un dont la demande sera moyenne et un dernier dont la demande sera faible. Les résultats produit par l'algorithme k -moyennes sont présentés au tableau 4.2.

Tableau 4.2 Résultats des regroupements avec k -moyennes ($k = 3$)

Saison	Taille cluster 1	Taille cluster 2	Taille cluster 3
Saison basse	61	3	182
Saison haute	3	53	190

La représentation graphique des clusters en reprenant la répartition de la demande par rapport au nombre de livraison donne les résultats aux figures 4.6 et 4.7.

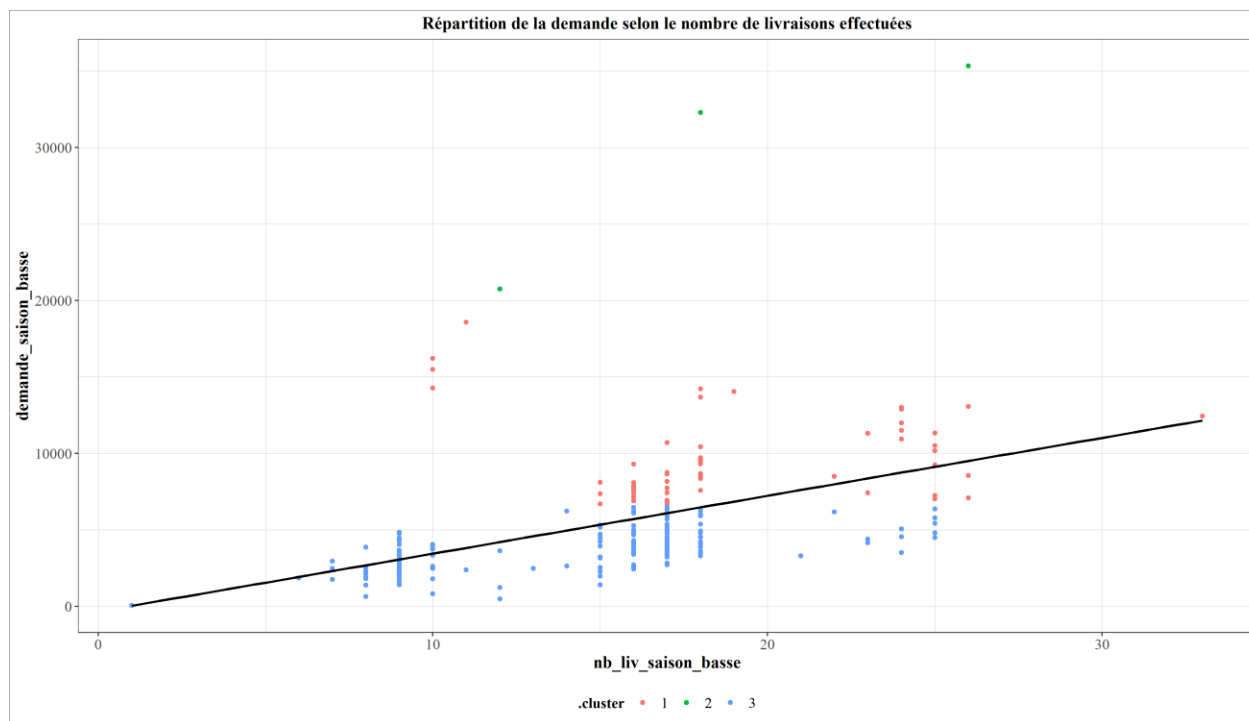


Figure 4.6 Répartition de la demande selon le nombre de livraison avec présence des clusters pour la saison basse

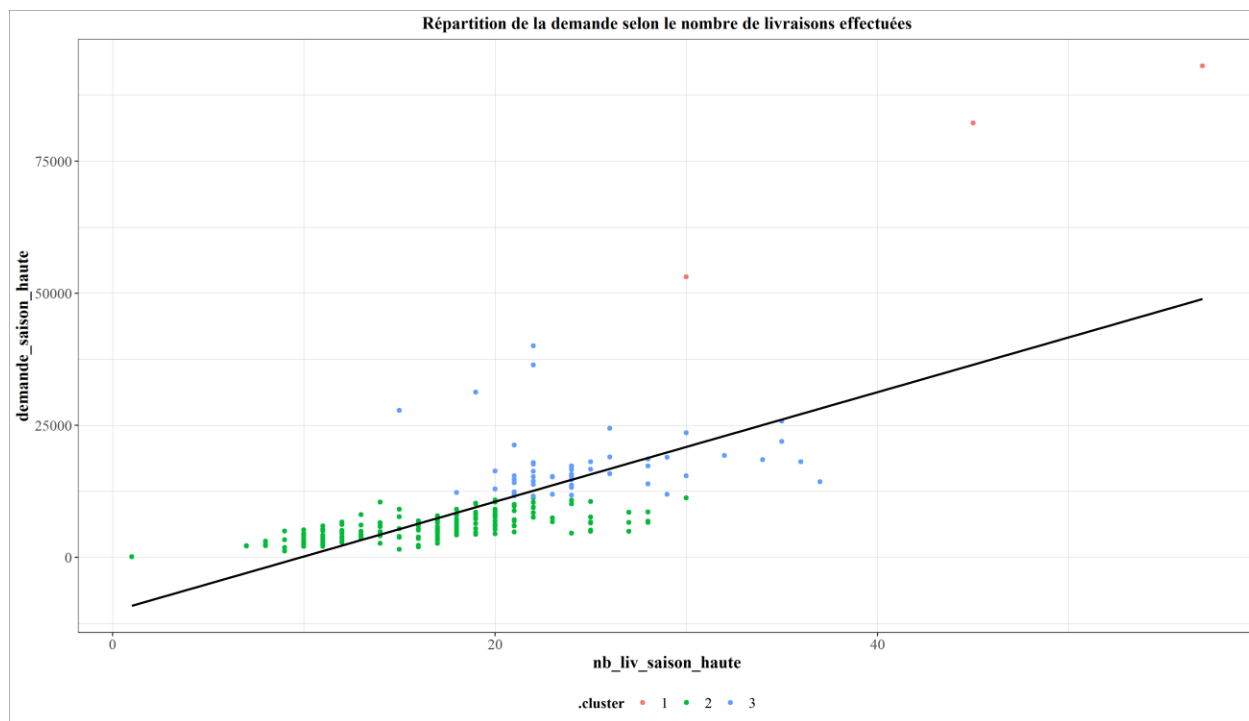


Figure 4.7 Répartition de la demande selon le nombre de livraisons effectuées avec présence des clusters pour la saison haute

Pour les deux saisons, les clusters mettent de l'avant les faits suivants. Tout d'abord, trois succursales présentent des profils de commandes très élevés. Cependant ces informations ne sont pas incohérentes car elles correspondent à trois des emplacements des SAQ dépôts, qui servent de relais pour la livraison et ont des plus grandes capacités de stockage. Ces succursales sont livrées par les camions ayant la plus grande capacité de livraison (53 pieds).

Les clusters trois de la saison basse et deux de la saison haute indiquent que les clients qui font partie de ces clusters présentent une demande plus faible mais avec un nombre de livraisons élevés, ce qui signifie peut-être que ces succursales commandent de manière trop fréquente et pourrait consolider leurs commandes. Le cluster du milieu représente les clients dont la fréquence de commande correspond à la demande.

Cas 2 : titulaires de permis

Le nombre de titulaire de permis qui sont livrés par la SAQ est plus élevé que celui des succursales. Dans le cas des titulaires de permis, les données fournies nous permettent de connaître la demande d'un titulaire en quantités, mais aussi en dollars (selon la valeur de la marchandise commandée).

La demande allant d'octobre 2017 à septembre 2018 pour les titulaires de permis est présentée à la figure 4.8.

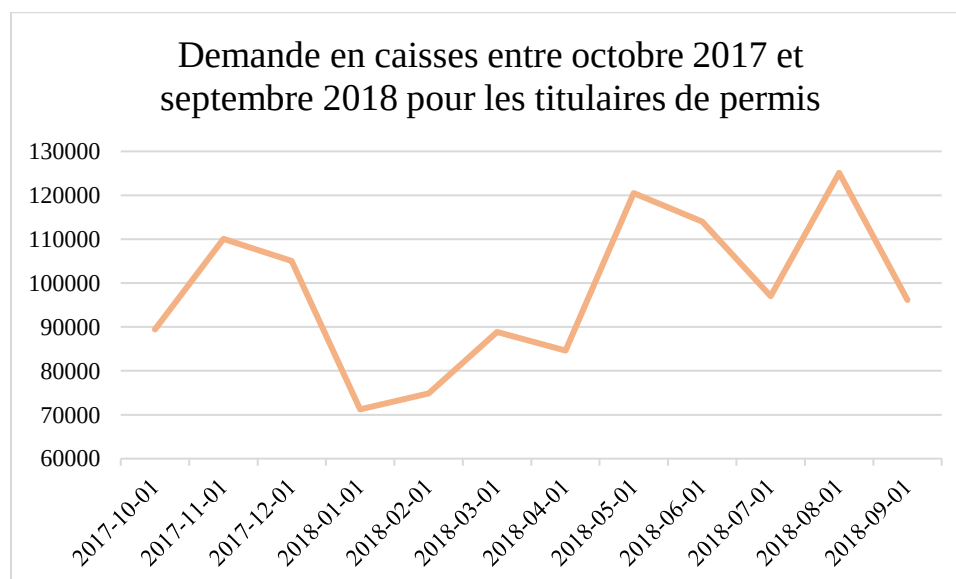


Figure 4.8 Demande en caisses entre octobre 2017 et septembre 2018 pour les titulaires de permis

À partir du graphique, il est difficile d'établir un motif précis dans la demande, cependant il est possible de déterminer intuitivement une saison haute correspondant aux fêtes de fin d'années et à l'été et une saison basse correspondant à la saison hivernale. Cette intuition permet de déterminer qu'il sera peut-être nécessaire d'ajuster la planification du transport afin de prendre en compte cette saisonnalité.

Première analyse : travailler en quantités ou en dollars expédiés ?

La première analyse effectuée a pour objectif de déterminer s'il est préférable de classer les clients selon la quantité de caisses qui leur a été expédiée ou bien selon les dollars qu'ils rapportent à l'entreprise. Les premières statistiques de base produisent les résultats suivants présentés au tableau 4.3. À titre de rappel, les données fournies sur les quantités pour les titulaires de permis sont en bouteille, qui sont reconverties en caisses à des fins d'harmonisation.

Tableau 4.3 Statistiques sur les ventes de caisses entre octobre 2017 et septembre 2018

	Par commande
Moyenne (caisses expédiées)	13,70
Moyenne (dollars de commande)	2 052, 42
Écart-type (caisses)	20,32
Écart-type (dollars)	4 077

Étant donné les disparités présentées selon les résultats obtenus en caisses de vin ou en dollars expédiés, aucune des deux mesures ne peut être éliminée. C'est pour cela que le plan d'expérience (point 4.4 de ce mémoire) prend en compte les deux paramètres (dollars et caisses).

Deuxième analyse : fréquence de livraison

L'objectif de cette deuxième analyse est d'évaluer la situation actuelle au niveau des fréquences de livraisons des titulaires de permis.

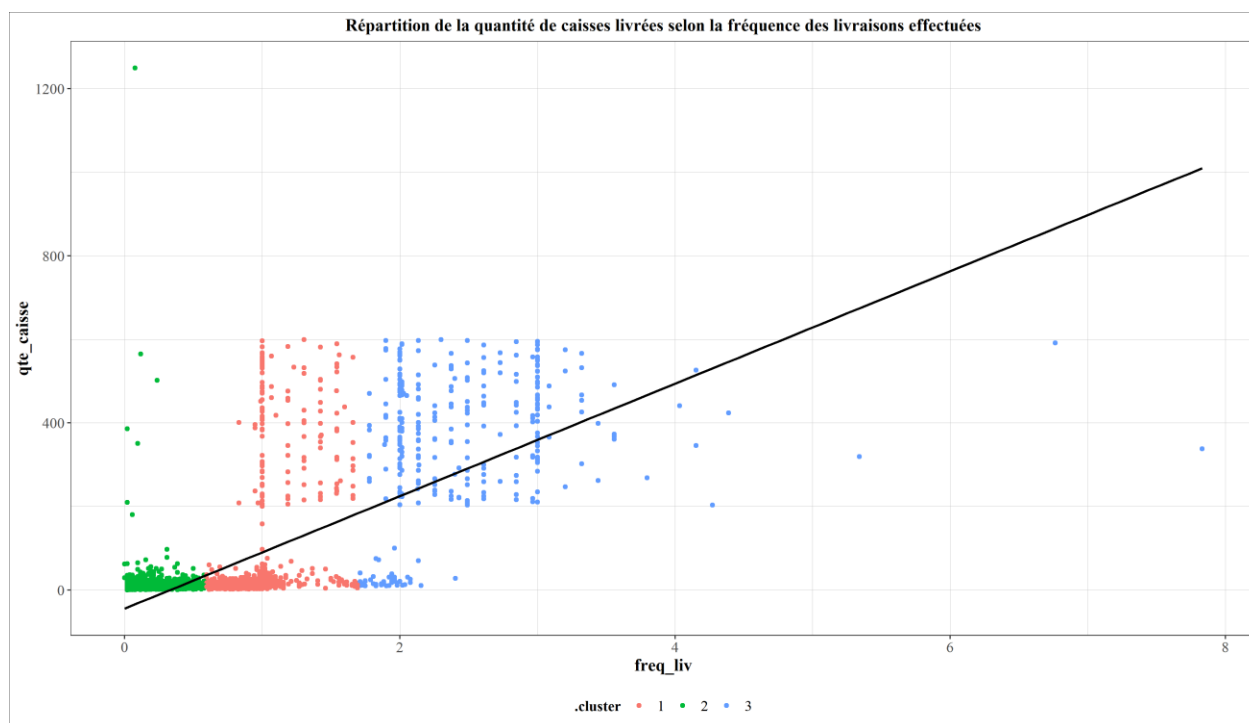


Figure 4.9 Répartition de la quantité de caisses livrées selon la fréquence des livraisons effectuées

4.2.2 Répartition spatiale des clients livrés

La répartition spatiale des clients représente un aspect important à prendre en considération pour la planification de la livraison. Au cours de cette sous-partie, on cherche à montrer les points saillants concernant la répartition géographique des clients, tant titulaires de permis que succursales.

La répartition géographique des clients est présentée à la figure 4.10.

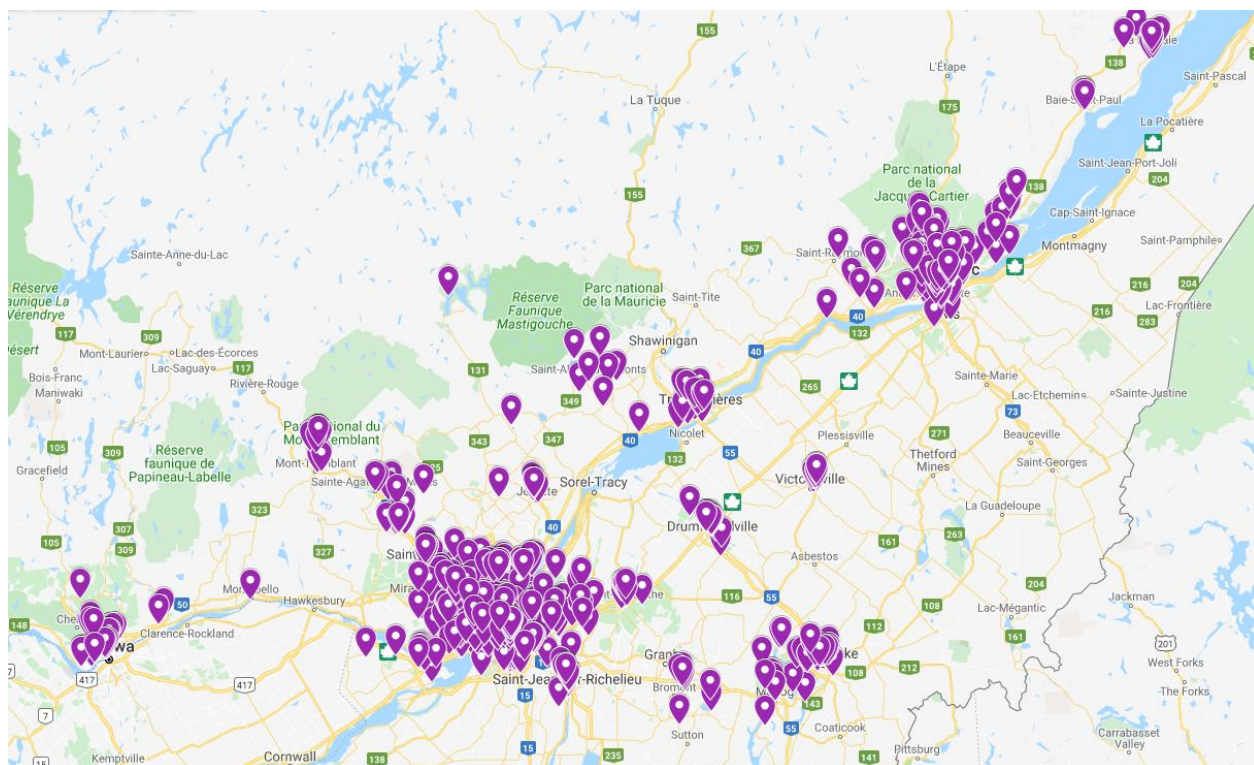


Figure 4.10 Répartition spatiale des titulaires de permis (agrandissement)

On observe que la grande majorité des titulaires de permis livré sont dans centres urbains avec notamment la région du Grand Montréal et de Québec.

Pour les titulaires de permis, 83 % d'entre eux font partie d'une zone urbaine, et dans la grande région de Montréal, on compte environ une succursale pour dix titulaires de permis. La méthode utilisée afin de déterminer le ratio de succursale par titulaires de permis est la méthode de polygone de Voronoï, qui déterminent des zones. Il suffit de compter le nombre de clients par polygone afin de déterminer le ratio (figure 4.11).

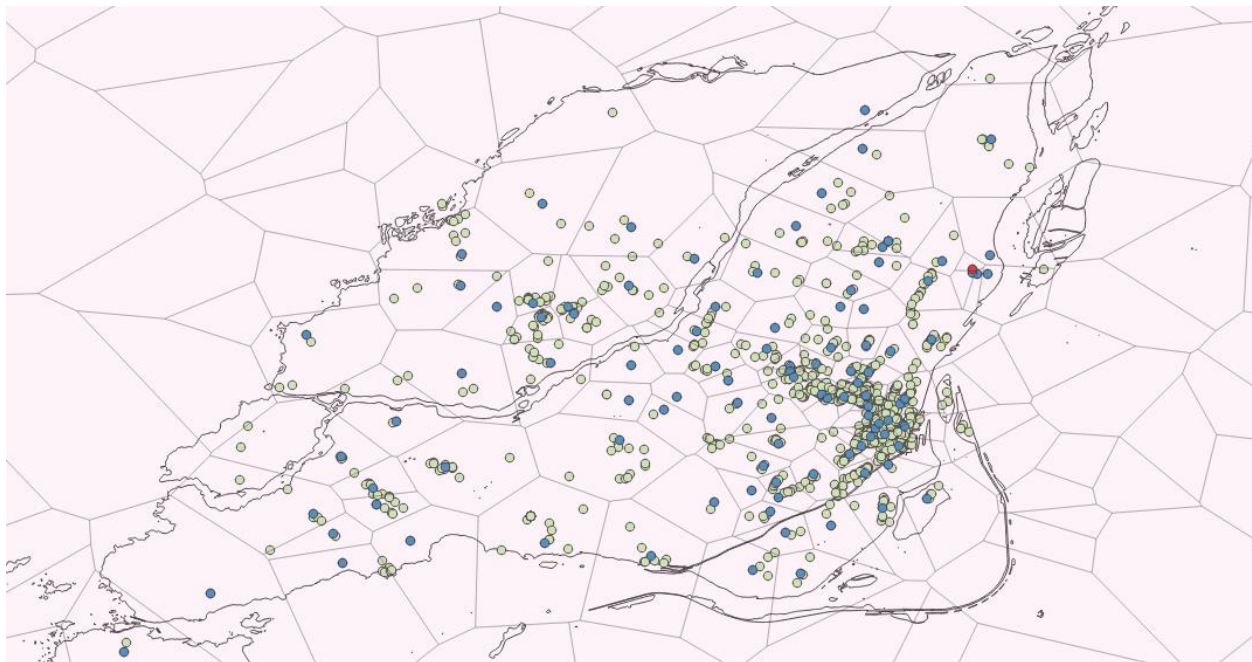


Figure 4.11 Utilisation des polygones de Voronoï pour le grand Montréal

4.3 Plan d'expérience

L'objectif de ce plan d'expérience est d'isoler les combinaisons de facteurs ayant un impact significatif sur la planification du transport. L'ensemble de ce plan d'expérience est inspiré de Coy, Golden, Runger et Wasil (2001).

4.3.1 Identification du problème

L'objectif est de déterminer quels sont les paramètres opérationnels à mettre en place par le partenaire industriel selon les différents scénarios étudiés. Dans le cadre de ce mémoire, différentes politiques de livraison pouvant être appliquées par le partenaire industriel sont étudiées afin de projeter les impacts que celles-ci peuvent avoir sur la planification de la livraison.

4.3.2 Mesures de performance

Les mesures de performance servent à déterminer comment les paramètres choisis influent sur la performance de la planification de la livraison. Les différentes mesures de performance sont présentées une par une avec la méthode de calcul utilisée. Pour chacune des méthodes, les lacunes identifiées sont aussi précisées pour chacune d'entre elles.

Les mesures de performances synthétisées au tableau 4.4.

Tableau 4.4 Synthèse des mesures de performance

Mesure de la performance	Formule générale appliquée
Coût de la solution de l'heuristique (H)	$f(s) = c(s) + \alpha q(s) + \beta d(s)$
Marge de profit pour la livraison (P)	Revenus des ventes – coûts de livraison
Coût environnemental de la solution (E)	$f(E) = f(\text{km, type véhicule, nombre véhicule})$

Coût de la solution de l'heuristique (H)

Cette mesure de performance est fournie par le fichier de solution de l'heuristique pour chaque résolution effectuée. Ce coût est calculé selon la formule suivante ((Cordeau, J.-F. et al., 2001).

$$f(s) = c(s) + \alpha q(s) + \beta d(s)$$

avec $f(s)$: coût total de la solution, $c(s)$: coût de routage de la solution, $q(s)$: coût total de la capacité excédentaire, $d(s)$: coût total de la durée excédentaire. Alpha (α) et bêta (β) sont les coefficients de pénalités associés. Dans le cas où le coût de la solution est excessivement grand, cela signifie que l'heuristique n'a pas trouvé de solution réalisable pour les données demandées. Ce coût sera utilisé par la suite afin de déterminer quels sont les facteurs qui ont une importance prépondérante par rapport aux autres.

Marge de profit pour la livraison (P)

Étant donné l'importance stratégique de ces informations, tous les résultats présentés seront en pourcentage afin de ne pas révéler des informations sensibles.

La formule générale appliquée pour calculer la marge de profit annuelle pour la livraison prend en compte les revenus générés par l'entreprise ainsi que les coûts de livraison, de maintenance de la flotte de camions et des coûts salariaux. Dans une analyse plus large, il aurait été pertinent d'inclure les coûts de passation d'une commande ainsi que les coûts de préparation de celle-ci, mais dans le cadre de ce mémoire, il n'est considéré que les coûts purement liés à la livraison.

La formule appliquée est la suivante :

$$\text{Revenus des ventes} - [\text{coûts de livraison des clients} + \text{coûts reliés à la main d'œuvre} + \text{coûts de maintenance de la flotte de véhicules}]$$

Les revenus des ventes sont issus des données de livraison fournies par le partenaire industriel. Comme ces revenus sont par commande, une moyenne annuelle par client est calculée. Le coût de livraison des clients correspond au nombre de kilomètres parcourus par les camions pour visiter l'ensemble des clients qui doivent être livrés. Les coûts reliés à la main d'œuvre sont calculés selon la formule suivante : nombre de chauffeurs envoyés en livraison * taux horaire * nombre d'heures de livraisons. Le coût de maintenance des véhicules est calculé selon le nombre de véhicules envoyés sur la route multiplié par le taux fixe correspondant aux frais de maintenance.

Cette mesure de performance a pour objectif d'indiquer la marge de profit cible pour chaque tournée selon les scénarios étudiés. Il est certain que ce calcul de marge de profit n'est pas complet et devrait prendre en compte d'autres aspects propres à la comptabilité de gestion de l'entreprise. Cependant, étant donné la sensibilité de ce type de données, cette mesure de performance se veut un indicateur global et qui prend en compte les coûts principaux reliés à la livraison de marchandises.

Coût environnemental de la solution (E)

Le coût environnemental de la solution n'est plus une mesure de performance que les entreprises peuvent ignorer. Calculer le coût environnemental d'une tournée de camions n'est pas trivial. En effet, les coûts environnementaux incluent autant la pollution de l'air, que celle de l'eau ou encore la pollution sonore qui perturbe les écosystèmes.

Dans le cadre de cette étude, le calcul du coût environnemental considéré porte essentiellement sur le calcul des GES émis (en Co2 équivalent). La méthode employée ici pour calculer les GES est adaptée de Armstrong et Khan (2004). Cette méthode est présentée à la figure 4.12.

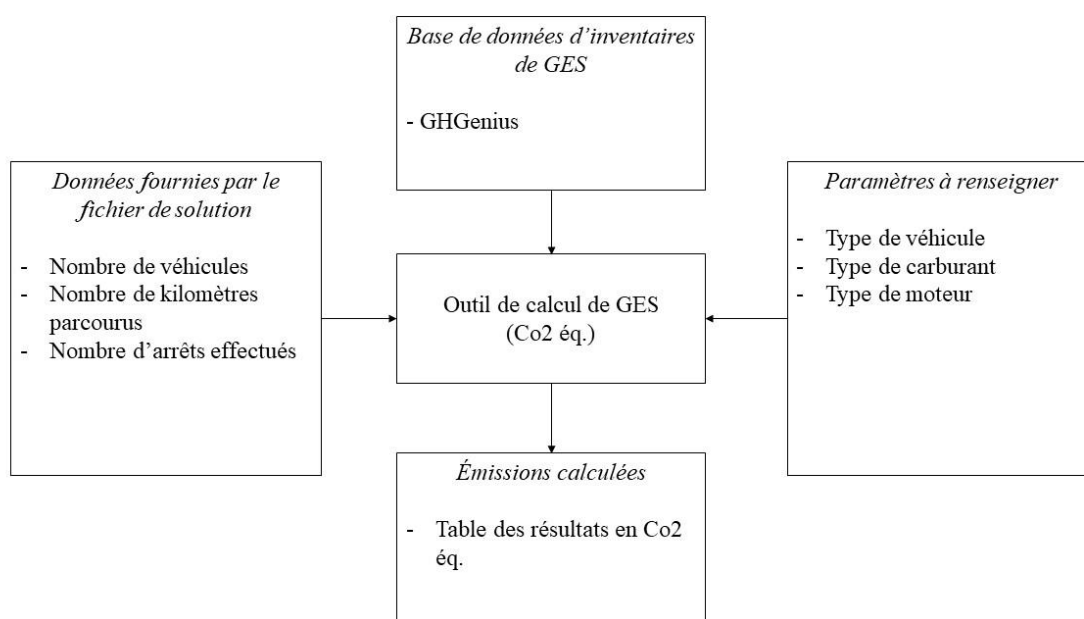


Figure 4.12 Méthode de calculs de GES, adapté de (Armstrong & Khan, 2004)

GHGenius est une base de données d'inventaires de GES pour le Canada fournie gratuitement par la firme de consultation (*S&T Squared*) et téléchargeable sous forme d'un fichier Excel contenant des macros. Les inventaires sont complets et correspondent aux données les plus récentes dans la version utilisée pour ce mémoire. Le principal inconvénient de l'utilisation de la base de données GHGenius est la calibration nécessaire afin d'obtenir des résultats pertinents.

L'outil développé pour calculer les GES est fortement inspiré de celui présenté par le Fond d'Action Québécois pour le Développement Durable (FAQDD) dans son application pratique, mais prend en compte plus de paramètres et les données fournies par la base de données GHGenius.

Les calculs des GES proposés ici présentent de nombreuses limitations. Tout d'abord, les paramètres considérés ne couvrent pas l'ensemble des facteurs à prendre en compte pour estimer au plus juste les émissions de GES. (Trépanier, 2017) présentent la liste des facteurs à prendre en compte pour faire un calcul intégrateur de l'ensemble des GES émis. Les sources d'inventaire des GES qui permettent d'effectuer les calculs présentent aussi des limites qu'il est nécessaire de prendre en compte, notamment leur date de parution ainsi que leur niveau de précision. Les calculs actuels ne prennent pas en compte le « scope 3 » dans les émissions de GES. Le « scope 3 »

correspond aux émissions indirectes générées par une entreprise. Il est à noter que le calcul des GES pour une flotte commerciale de véhicules correspond à un mandat d'étude complet différent de celui présenté ici.

4.3.3 Identification des facteurs et de leurs niveaux

Chaque facteur étudié doit avoir un niveau relié afin de pouvoir étudier son impact sur les scénarios générés plus haut. Les facteurs sont divisés en deux catégories : (i) environnementaux et (ii) opérationnels. Les facteurs environnementaux représentent ce sur quoi l'entreprise n'a pas de pouvoir décisionnel, tandis que les facteurs opérationnels sont des facteurs sur lesquels le partenaire industriel peut influencer.

Le schéma 4.13 et le tableau 4.5 présentent les différents facteurs et leurs niveaux possibles associés.

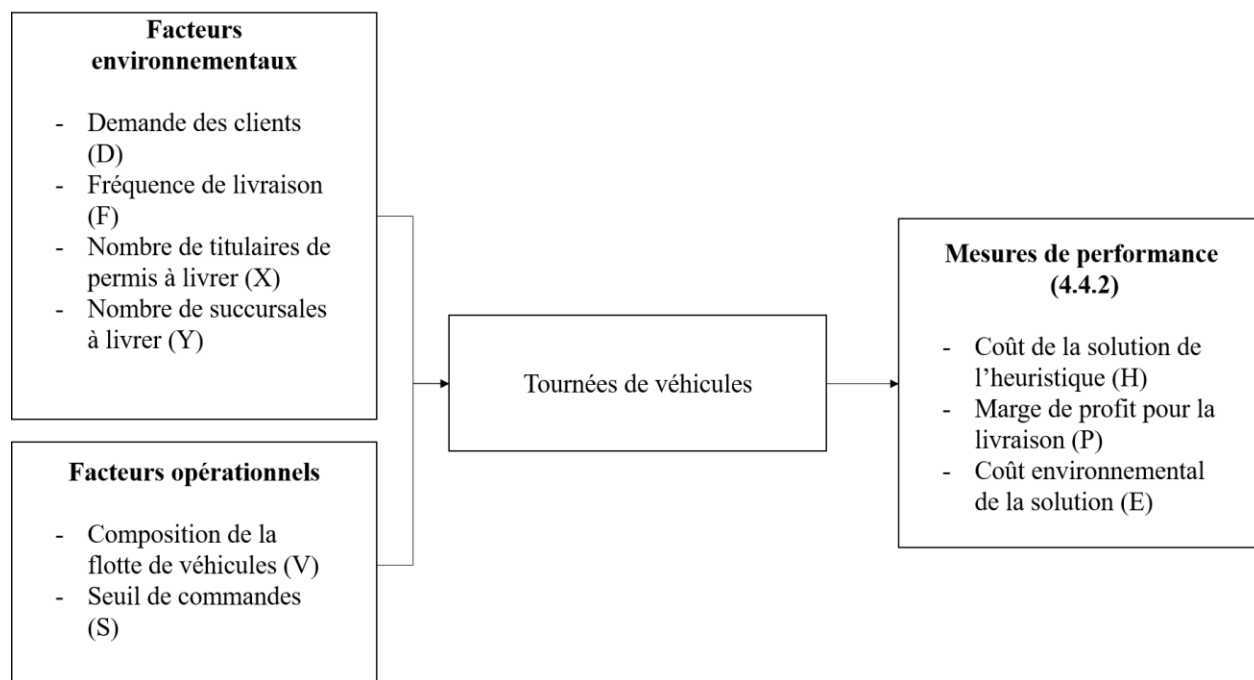


Figure 4.13 Présentation des facteurs considérés et des mesures de performance

Tableau 4.5 Facteurs et intervalles ou valeurs

Facteur	Catégorie du facteur	Valeur /intervalle
Demande des clients (D)	Environnemental	[1;1249]
Nombre de titulaires à livrer (X)	Environnemental	[1;398]
Nombre de succursales à livrer (Y)	Environnemental	[20,155]
Composition de la flotte de véhicules (V)	Opérationnel	[CSM, CDM, M]
Seuil de commandes (S)	Opérationnel	[BAS, MOY, HAUT]
Fréquence de commande (F)	Opérationnel	[fBAS, fMOY, fHAUT]

Demande des clients (D)

L'intervalle de la valeur pour la demande des clients est calculé selon la commande de caisses minimale et celle maximale passée par les clients sur la période d'octobre 2017 à octobre 2018.

Nombre de titulaires à livrer (X)

Pour le nombre de titulaires à livrer, l'intervalle mis en place correspond au minimum et au maximum de clients livrés en un jour d'opérations sur la période d'octobre 2017 à septembre 2018.

Nombre de succursales à livrer (Y)

La méthode est similaire à celle effectuée pour les titulaires. L'intervalle correspond au minimum et au maximum de clients livrés en un jour d'opérations sur la période d'octobre 2017 à septembre 2018.

Composition de la flotte de véhicule (V)

La composition de la flotte de véhicules peut prendre trois valeurs qui correspondent aux trois options suivantes : (i) CDM, (ii) CSM, (iii) mixte. CDM et CSM correspondent aux flottes de véhicules disponibles pour chaque canal de livraison. CDM correspond à la flotte disponible pour livrer les succursales tandis que CSM correspond à la flotte disponible pour livrer les titulaires de

permis. La valeur « mixte » correspond à la mise en commun de ces ressources, l'ensemble de la flotte de camions est disponible. Dans le cas où les valeurs CDM et CSM sont sélectionnées, alors les tournées créées correspondent aux clients concernés par le canal de livraison choisi.

Seuil de commandes (S)

Le seuil de commande considéré peut prendre trois valeurs possibles. Celui-ci est considéré en dollars et non pas en caisses. La première valeur possible est « BAS » soit les titulaires de permis dont la valeur en dollars de commande est inférieure au premier quartile (Q1). L'intervalle pour la valeur « BAS » est donc $[0; Q1]$. La deuxième valeur possible pour le seuil de commande est « MOY » pour moyen. L'intervalle pour la valeur moyenne est compris entre le premier quartile (Q1) observé et le troisième quartile (Q3), soit l'intervalle $] Q1; Q3]$. La dernière valeur possible correspond à la valeur « HAUT », qui correspond à la valeur de commande supérieure au troisième quartile (Q3), soit l'intervalle $]Q3, +\infty]$.

Seuil de fréquence (F)

Le seuil de fréquence peut prendre trois valeurs possibles. La valeur fBAS correspond aux fréquences de commande inférieures au premier quartile (Q1), soit l'intervalle $[0,01 ; Q1]$. La deuxième valeur possible correspond à la fréquence moyenne (fMOY), entre le premier et le troisième quartile. Sur le même schéma, la fréquence haute (fHAUT) correspond à l'intervalle des clients supérieurs au troisième quartile Q3. Il est à noter que la fréquence de commande est fortement liée au seuil de commande. En effet, si le seuil de commande est bas, alors les clients auront tendance à se faire livrer de manière fréquente. De la même manière, si le seuil de commande est haut, alors les clients se feront moins livrer. Cependant, les succursales ne respectent pas ce schéma, étant donné qu'elles se font livrer à intervalle fixe.

Test de linéarité

Il paraît évident que les facteurs considérés du seuil de commande et de la quantité commandée fortement corrélés entre eux. Afin de s'assurer de cette hypothèse, un test de linéarité est effectué sur R entre ces paramètres afin d'obtenir la mesure de R^2 . Pour chaque commande présente dans l'historique de commande, on observe la relation entre la quantité commandée et le montant en dollars associé. Ce test de linéarité renvoie un $R^2 = 0,66$ (figure 4.14). Bien que cette mesure ne soit pas supérieure à $R^2 = 0,8$, il n'en reste pas moins qu'il existe une relation de linéarité entre les paramètres testés.

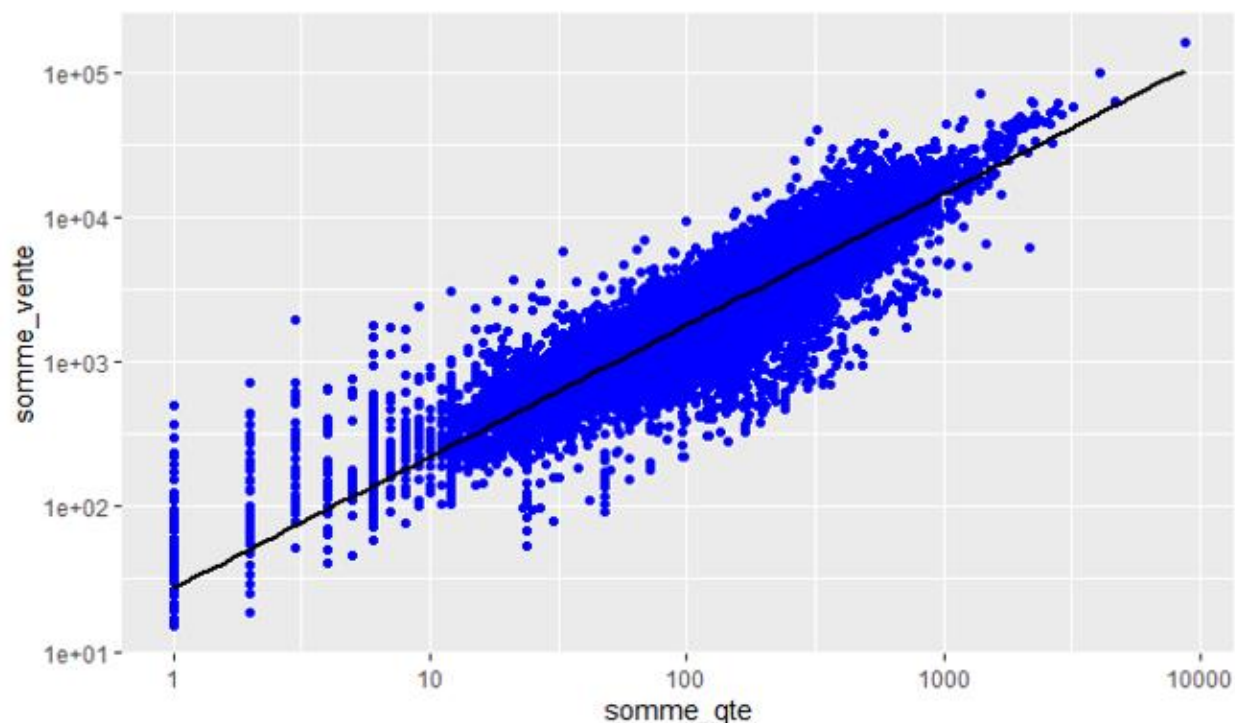


Figure 4.14 Régression linéaire entre le montant vendu (\$) et la quantité (caisse)

Bien que nous soyons en présence d'une corrélation entre ces différents facteurs, il n'en reste pas moins qu'il est nécessaire d'identifier celui ou ceux qui auront une prépondérance plus importante par rapport aux autres.

4.3.4 Implémentation du plan d'expérience

Maintenant que les facteurs et leurs valeurs sont choisis, il est possible de passer à la mise en place du plan d'expérience. L'objectif de cette sous partie est de présenter cette implémentation avec une méthode de « pas par pas ». Cette méthode didactique est fortement inspirée de Coy et al. (2001) et de la mise en place de son plan d'expérience mais aussi de la méthode fournie par (Montgomery, 2017) dans son livre portant sur les méthodes liées aux plans d'expérience.

Étape 1 : choix du plan complet ou partiel

Il est possible de choisir un plan d'expérience partiel ou bien complet (en anglais : « full-factorial »). De manière très théorique, il est conseillé de prendre le plan complet quand c'est possible, le plan partiel étant plus indiqué lors de la présence d'un grand nombre de facteurs pouvant avoir un impact sur le système étudié. Étant donné que dans le cadre de ce plan

d'expérience il y a trois paramètres environnementaux et trois paramètres opérationnels étudiés, c'est un plan complet qui est choisi.

Étape 2 : Nombre d'expériences à mener

Comme il a été déterminé que c'est un plan complet qui est choisi, il est maintenant nécessaire de calculer le nombre d'expériences à mener selon le nombre de paramètres et le nombre de répétition des expériences.

L'ensemble des combinaisons possibles pour les paramètres opérationnels ($3^3 = 27$ possibilités) sont présentés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 Ensemble des combinaisons possibles pour les facteurs opérationnels

	Combinaison véhicule (V)	Seuil de commande (S)	Fréquence de commande (F)
1	CSM	BAS	fBAS
2	CSM	BAS	fMOY
3	CSM	BAS	fHAUT
4	CSM	MOY	fBAS
5	CSM	MOY	fMOY
6	CSM	MOY	fHAUT
7	CSM	HAUT	fBAS
8	CSM	HAUT	fMOY
9	CSM	HAUT	fHAUT
10	CDM	BAS	fBAS
11	CDM	BAS	fMOY
12	CDM	BAS	fHAUT
13	CDM	MOY	fBAS
14	CDM	MOY	fMOY
15	CDM	MOY	fHAUT

	Combinaison véhicule (V)	Seuil de commande (S)	Fréquence de commande (F)
16	CDM	HAUT	fBAS
17	CDM	HAUT	fMOY
18	CDM	HAUT	fHAUT
19	M	BAS	fBAS
20	M	BAS	fMOY
21	M	BAS	fHAUT
22	M	MOY	fBAS
23	M	MOY	fMOY
24	M	MOY	fHAUT
25	M	HAUT	fBAS
26	M	HAUT	fMOY
27	M	HAUT	fHAUT

En ce qui concerne les facteurs environnementaux, il y en a trois et chacun d'entre eux présente deux niveaux (les bornes des intervalles). Il y a donc $2^3 = 8$ combinaisons possibles.

Au total, il y aura donc $3^3 \times 2^3 = 216$ expériences à mener. Il est donc nécessaire de créer 216 jeux de données qui correspondent à l'ensemble des combinaisons des facteurs opérationnels et environnementaux possibles. Cependant, il est à noter que ces 216 expériences représentent une seule répétition des facteurs possibles. Ce point sera approfondi dans les limites du plan d'expérience.

Tableau 4.7 Extrait du plan d'expérience complet (20 expériences sur 216)

	V	S	F	D	X	Y
1	CSM	BAS	fBAS	-1	-1	-1
2	CSM	BAS	fBAS	-1	-1	1
3	CSM	BAS	fBAS	-1	1	-1
4	CSM	BAS	fBAS	-1	1	1
5	CSM	BAS	fBAS	1	-1	-1
6	CSM	BAS	fBAS	1	-1	1
7	CSM	BAS	fBAS	1	1	-1
8	CSM	BAS	fBAS	1	1	1
9	CSM	BAS	fMOY	-1	-1	-1
10	CSM	BAS	fMOY	-1	-1	1
11	CSM	BAS	fMOY	-1	1	-1
12	CSM	BAS	fMOY	-1	1	1
13	CSM	BAS	fMOY	1	-1	-1
14	CSM	BAS	fMOY	1	-1	1
15	CSM	BAS	fMOY	1	1	-1
16	CSM	BAS	fMOY	1	1	1
17	CSM	BAS	fHAUT	-1	-1	-1
18	CSM	BAS	fHAUT	-1	-1	1
19	CSM	BAS	fHAUT	-1	1	-1
20	CSM	BAS	fHAUT	-1	1	1

Une fois l'ensemble des résultats des tournées obtenues passées par la phase de post-heuristique, ceux-ci sont utilisés pour calculer les différentes mesures de performances présentées au point 4.2.2 de ce mémoire. L'ensemble des résultats générés sont consignés dans un fichier Excel.

L'ensemble de ce chapitre présente le plan d'expérience complet qui a été choisi pour ce mémoire. Les 216 expériences à mener sont obtenues grâce à l'identification de facteurs et de niveaux, ainsi que les différents outils utilisés pour effectuer les différentes mesures de performance.

CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS

Ce chapitre porte sur l'ensemble des résultats observés. La première partie se concentre sur les résultats du plan d'expérience, qui permettent de développer les différents scénarios opérationnels pertinents pour l'entreprise partenaire. Chaque scénario est ensuite développé puis étudié.

5.1 Résultats du plan d'expérience

Cette sous-partie est divisée entre les résultats du plan d'expérience ainsi que les tests de validation qui sont effectués. Les résultats sont présentés de manière à identifier les facteurs qui ont une importance accrue par rapport aux autres selon les objectifs poursuivis pour chaque mesure de performance.

Sur les 216 expériences générées, 25 % d'entre elles ne peuvent produire un résultat. Cela est explicable par la nature des paramètres testés. La figure 5.1 présente les raisons pour lesquelles les instances qui ne peuvent générer une solution satisfaisante dans le cadre du problème considéré.

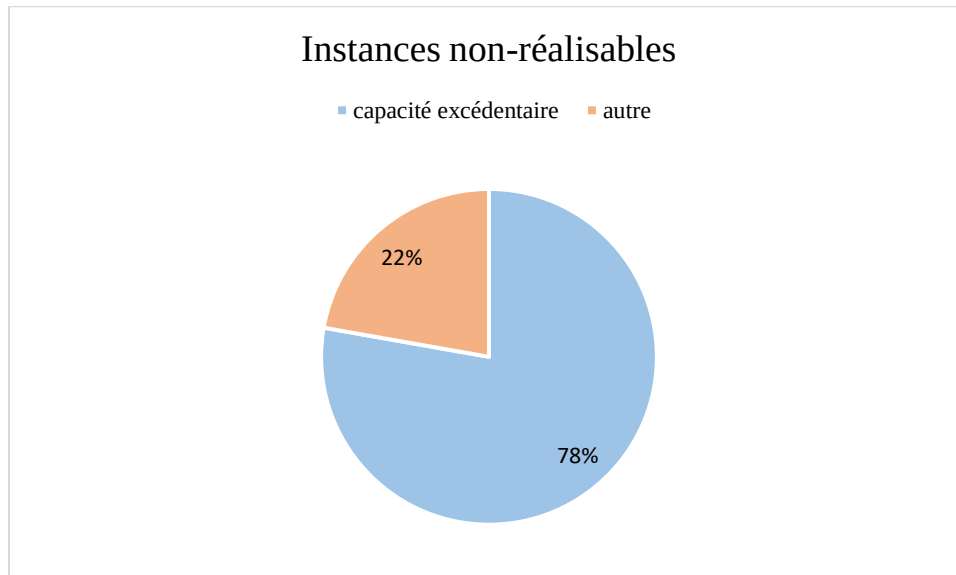


Figure 5.1 Instances non-réalisables

Objectif 1 : minimiser la distance parcourue par les camions ainsi que les émissions de GES

Les résultats obtenus démontrent que les combinaisons de paramètres qui permettent de minimiser la distance parcourue par la flotte de camions sont les suivantes. Les émissions de GES étant fortement liées à la distance parcourue, ces deux objectifs sont joints. Dans le cadre de ce mémoire, il n'est pas tenu compte du cycle de conduite, étant donné l'absence de données sur cet aspect.

Tout d'abord, une classification des instances selon les résultats de distance totale parcourue montre que sur les 162 instances réalisables, 39,50 % d'entre elles présentent une distance parcourue inférieure au premier tiers de la distance maximale. Ces instances

La première analyse effectuée porte sur les combinaisons de paramètres qui renvoient les distances parcourues les plus faibles. D'un point de vue purement descriptif, la première observation porte sur la flotte de camions choisie pour les tournées qui présentent un faible kilométrage. Le graphique 5.2 présente la répartition des instances selon la flotte choisie.

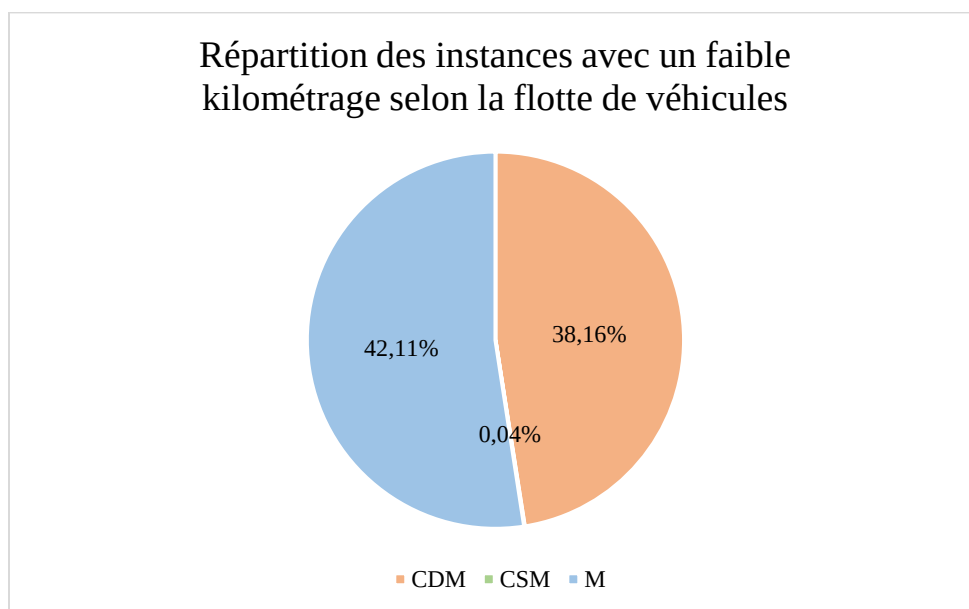


Figure 5.2 Répartition des instances avec un faible kilométrage selon la flotte de véhicules

Ce graphique met en avant le fait que ce sont principalement les options de flotte avec une capacité supérieure qui présentent le kilométrage le plus faible, étant donné que la consolidation est facilitée. A contrario, les instances qui présentent le nombre de kilomètres parcourus les plus importants sont majoritairement effectuées avec la flotte qui présentent la capacité la plus faible. Ceci peut donc s'expliquer par les retours fréquents au dépôt pour ces camions avec moins de capacité.

Les deuxième et troisième paramètres considérés sont le seuil de commande ainsi que la fréquence de livraison. On observe que ces paramètres sont présents de manière équilibrée dans les instances, aucun des niveaux ne semble prépondérant par rapport aux autres niveaux (figure 5.3).

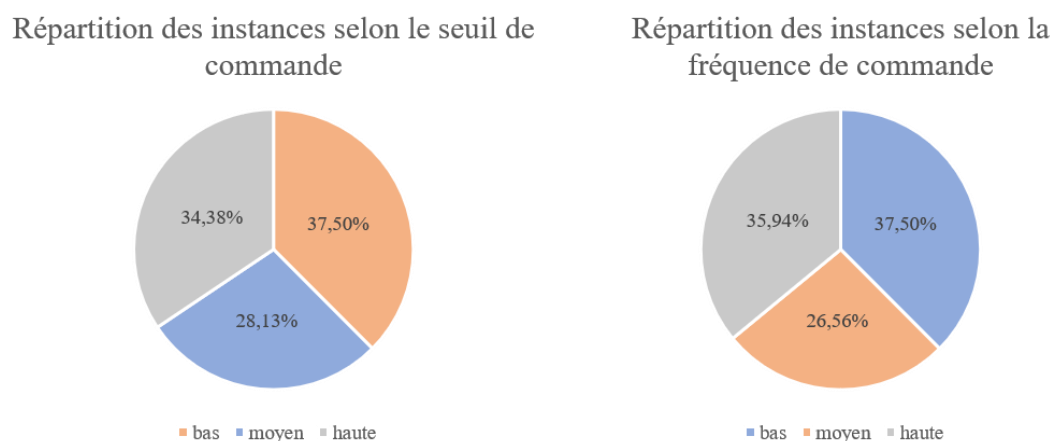


Figure 5.3 Répartition des instances selon le seuil de commande et la fréquence de commande

Il est intéressant de s'intéresser à la combinaison de ces deux paramètres afin de déterminer si certaines d'entre elles sont récurrentes.

Le tableau des résultats obtenus est celui du tableau 5.1 :

Tableau 5.1 Fréquence des combinaisons de paramètres pour les instances avec un faible kilométrage

		Fréquence		
		BAS	MOYEN	HAUT
Seuil de commande	BAS	12,5 %	12,5 %	12,5 %
	MOYEN	12,5 %	7,8 %	7,8 %
	HAUT	12,5 %	6,3 %	15,6 %

Outre la répartition quasi égale des combinaisons de paramètres pour les deux paramètres envisagés, il est possible d'observer que les instances avec le paramètre seuil de commande = HAUT et fréquence = HAUTE semblent présenter une légère prépondérance par rapport aux autres. Au contraire, les instances qui présentent les paramètres seuil de commande = HAUT et fréquence

= MOYENNE sont moins fréquents dans les instances observées. Ces deux cas peuvent s'expliquer par le fait que les clients qui présentent les paramètres de seuil de commande et de fréquence haute sont principalement situés proche de Montréal, ce qui limite le kilométrage nécessaire pour aller les livrer.

Le dernier paramètre à considérer ici est la demande en quantité à livrer aux clients. Intuitivement, l'hypothèse liée à ce paramètre est qu'une succession de petites quantités à livrer représente plus de kilomètres à faire qu'une série de quantités plus importantes. Cette hypothèse est vérifiée par le fait que pour les instances considérées, 95,31 % d'entre elles présentent comme paramètre une quantité à livrer élevée.

Outre les paramètres relevés liés aux clients (titulaires de permis ou succursale), l'étude des clients qui composent les instances minimisant la distance parcourue révèle que les clients partagent certaines caractéristiques. Tout d'abord, la répartition géographique des clients a un fort impact sur le kilométrage nécessaire pour les livrer. La majorité des clients dans le cadre des instances considérées sont situées sur l'île de Montréal ou encore sa proche banlieue (figure 5.4).

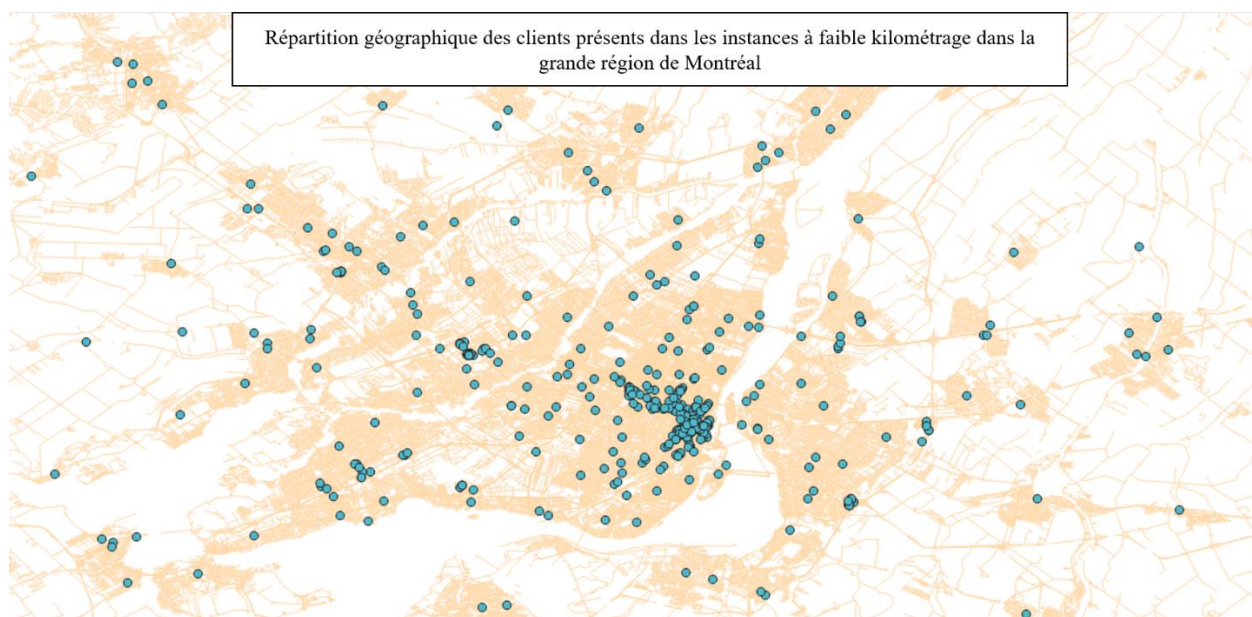


Figure 5.4 Répartition géographique des clients présents dans les instances à faible kilométrage dans la grande région de Montréal

En partant de cette constatation et en s'intéressant à la répartition entre les types de clients, il est possible de constater que dans les tournées qui présentent un kilométrage faible, les succursales sont plus présentes parmi les clients livrés. La figure 5.5 illustre la comparaison entre la moyenne de succursales livrées par camion quand les kilomètres parcourus sont faibles, moyens et élevés.

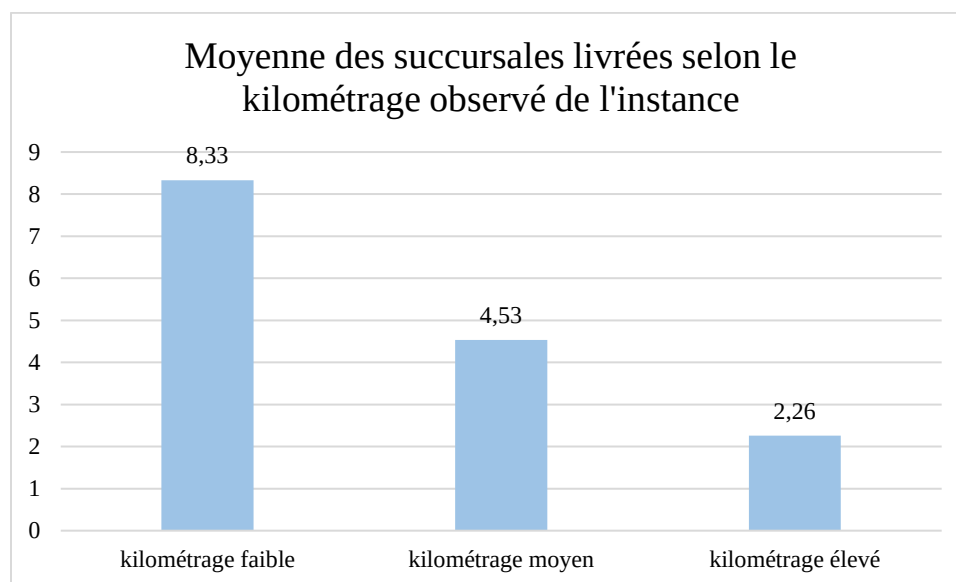


Figure 5.5 Moyenne des succursales livrées selon le kilométrage observé de l'instance

La présence d'une forte densité (milieux urbains) permet d'améliorer la consolidation des tournées des clients. Néanmoins cette observation ne serait pas complète sans observer le nombre de camions utilisés lorsqu'il y a des succursales présentes dans les clients à livrer. Dans ce cas, l'hypothèse intuitive est que si on prend en compte la différence de quantité à livrer entre les succursales et les clients, le nombre de camions augmente fortement.

Bien que l'on observe une augmentation du nombre de camions par tournées, cela ne correspond pas à la forte augmentation attendue. En conséquence, il est impossible de dire que celle-ci est validée. En conséquence, cette observation met en avant le fait que mutualiser les deux canaux de livraison lorsqu'il s'agit d'une zone urbaine à livrer permet de minimiser la distance totale parcourue.

Néanmoins, il est à noter que le comportement de l'heuristique joue un rôle important dans le kilométrage total, il en sera question de manière approfondie au chapitre 5 dans la partie sur les discussions et limites. Or, dans le cas précis des analyses menées, il est possible d'observer que

l'heuristique semble d'abord remplir les grandes quantités à livrer puis à insérer les plus petites de manière à créer des tournées cohérentes et réalisables.

Objectif 2 : maximiser la marge de profit sur la livraison

L'objectif pour toute compagnie est de maximiser les profits, particulièrement en minimisant les coûts liés aux opérations et en maximisant les revenus qui proviennent des clients livrés. Étant donné le peu d'informations financières à disposition, la portée du calcul de la marge de profit porte sur la livraison uniquement, bien que cela ne mène pas à une version globale du profit. Dans le cadre de cette étude, 13,58 % des instances générées (en omettant les instances non-faisables) présentent une marge de profit sur la livraison significativement haute.

Une analyse des caractéristiques des instances permet d'observer que toutes partagent la même valeur du paramètre de seuil de livraison ($S = \text{HAUT}$). Cette observation paraît logique avec la formule de calcul utilisée qui prend en compte les revenus. Cependant, il est intéressant de se questionner sur la prépondérance de ce paramètre par rapport aux autres. Pour se faire, un test ANOVA est effectué sur l'ensemble des résultats obtenus grâce à R et renvoie les résultats présentés au tableau 5.2. Les deux hypothèses pour ce test ANOVA sont : (i) H_0 : il n'y a pas de différence pour la marge de profit selon le paramètre et (ii) H_3 : la marge de profit est différente pour au moins un paramètre. Le test F permet de comprendre la variation entre la moyenne des échantillons par rapport à la variation au sein des échantillons. Dans le cas de cette étude, un échantillon correspond aux données d'une instance, une instance étant composée de différents clients avec des valeurs de paramètres V, F et D différentes.

Tableau 5.2 Résultats du test ANOVA sur la marge de profit de la livraison

Paramètre	Valeur-f	Valeur-p
V	1,186	0,2904
F	6,579	0,0195
D	0,011	0,9169

La valeur-p indique que seul le paramètre F (fréquence de livraison) présente une différence significative entre les groupes. Les paramètres D (quantité) et V (flotte de véhicules) sont supérieurs à 0,05, donc ils ne présentent pas de différence significative.

Le test de régression linéaire multiple effectué sur R renvoie la formule suivante pour expliquer la marge de profit:

$$\text{Marge de profit} = 3,89 * F - 2,60 * V - 0,19 * D$$

Les données utilisées pour cette régression linéaire multiple sont celles des clients sélectionnés dans les instances. Chaque client a une demande assignée aléatoirement selon l'historique fourni pour l'ensemble des clients par le partenaire industriel. Cette formule indique que la marge de profit est principalement expliquée par la fréquence de livraison des clients. Avec des coefficients négatifs, le choix de la flotte de véhicules ainsi que la demande ne présentent pas un impact significatif sur la marge de profit liée à la livraison. Néanmoins, le coefficient associé à la demande est assez proche de zéro pour ne pas le considérer pour la suite des analyses.

Ces résultats n'indiquent cependant pas quelles sont les valeurs de fréquence qu'il faut choisir pour maximiser la marge de profit sur la livraison. Afin de savoir quelles valeurs sont les plus performantes, une analyse de la variation de la marge de profit est effectuée. Les instances choisies sont celles correspondant aux paramètres inscrits dans le tableau 5.3. Les résultats sont présentés dans le graphique 5.6.

Tableau 5.3 Paramètres des instances sélectionnées pour l'étude de la variation de la marge de profit selon la fréquence

Paramètre	Valeur
Seuil de commande (S)	HAUT
Demande (D)	1 ou -1
Flotte de véhicule	CDM

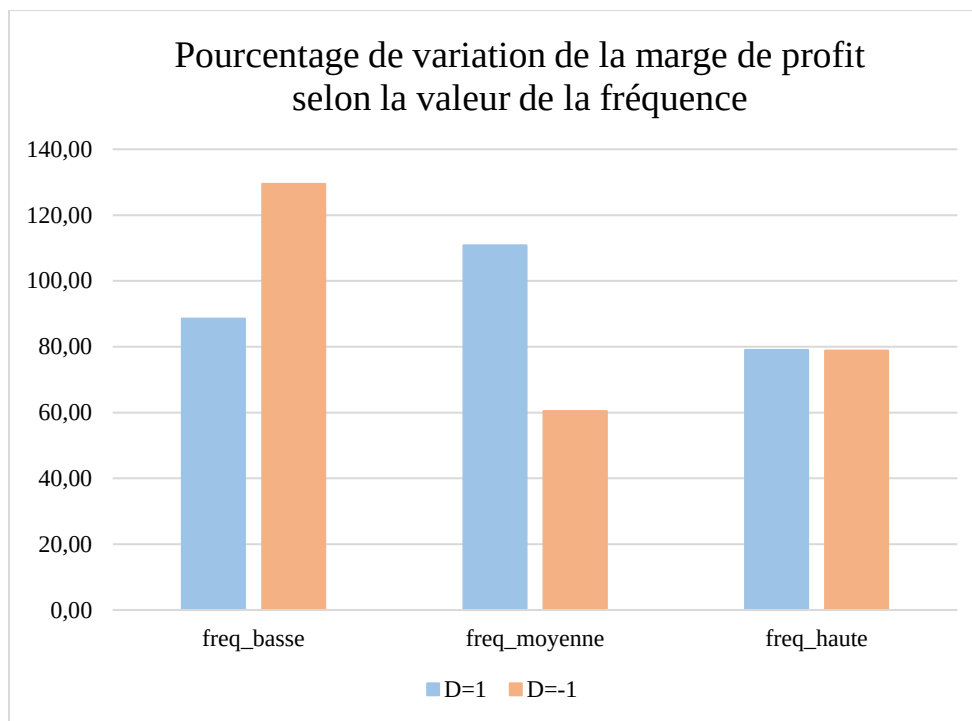


Figure 5.6 Variation de la marge de profit selon la valeur de la fréquence, pour une quantité à livrer élevée et une quantité faible

Tout d'abord les résultats présentés à la figure 5.7 confirment que la fréquence de livraison a un impact significatif sur la marge de profit considérée. Cependant on observe que selon la quantité à livrer, la fréquence n'a pas le même impact sur la marge de profit. Si la quantité à livrer est haute, alors la fréquence qui permet de maximiser la marge de profit est une fréquence moyenne (environ égale à une livraison par semaine). Une fréquence plus haute viendra augmenter les coûts opérationnels et donc diminuer la marge de profit.

Cependant, avec une quantité à livrer basse, il est plus intéressant d'avoir une fréquence de livraison elle aussi basse qui vient limiter les coûts opérationnels par rapport aux revenus générés par la vente de produit. En conséquence, pour un nouveau client à livrer qui présente un seuil de commande par livraison haut, il faudra regarder sa demande de fréquence de livraison par rapport à sa quantité commandée afin de déterminer s'il est profitable ou non de le prendre dans le service de livraison.

Parmi les instances qui présentent les plus hautes marges de profit, outre les caractéristiques mentionnées auparavant, il est intéressant de s'intéresser au type de client retrouvé et sa position géographique.

Ces deux caractéristiques révèlent que 83% des clients peuvent être considérés comme venant d'une zone fortement urbanisée (Montréal et Québec en grande majorité) (Figure 5.7 et figure 5.8). De même, sur 405 clients, seuls trois d'entre eux sont des succursales. Ces deux résultats indiquent que la concentration des titulaires de permis dans les grands centres urbains du Québec permet de limiter les coûts opérationnels tout en maximisant les revenus.

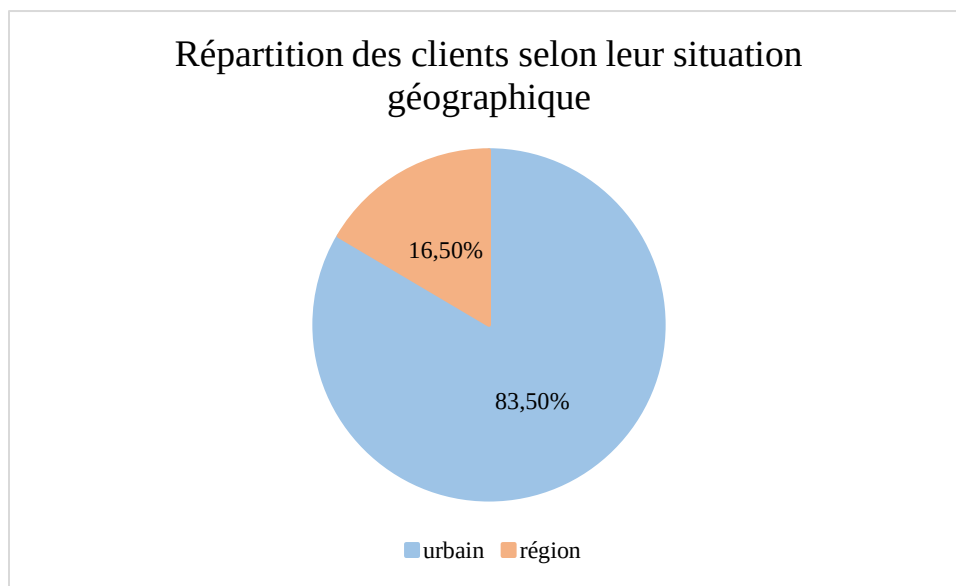


Figure 5.7 Répartition des clients présentant les plus hautes marges de profit selon leur situation géographique

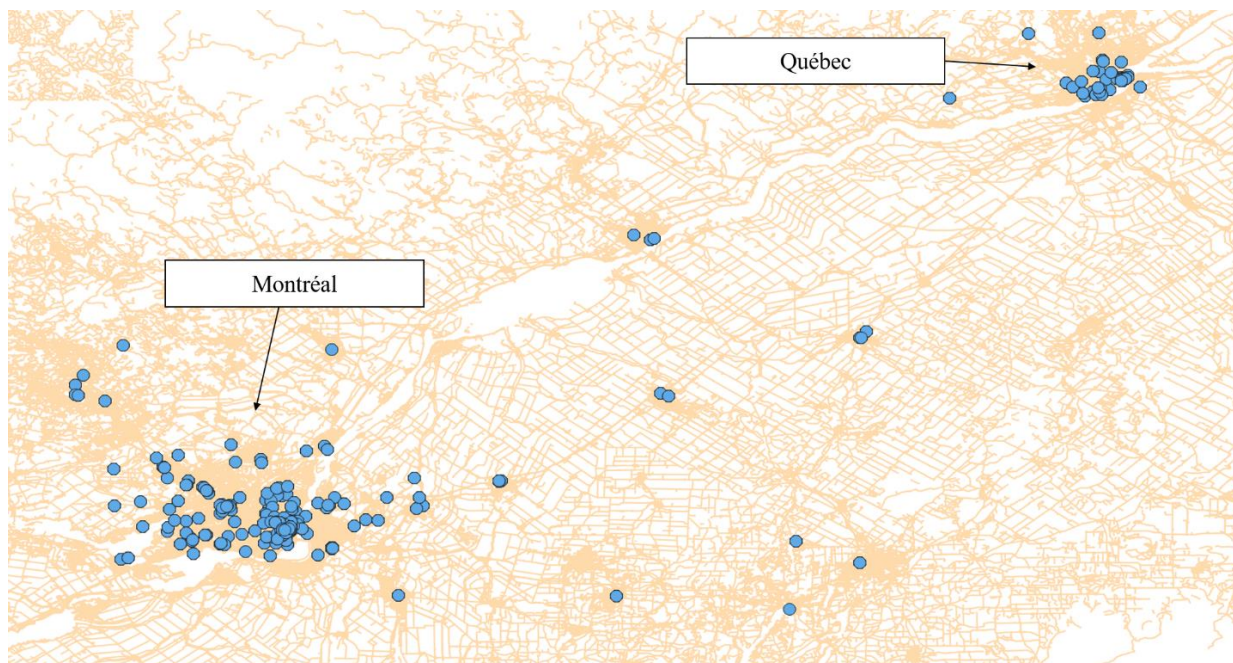


Figure 5.8 Répartition géographique des clients présents dans les instances avec la marge de profit les plus élevés

5.2 Scénarios opérationnels

D'après les résultats précédemment obtenus grâce au plan d'expérience et aux tests des différents paramètres, des scénarios opérationnels sont mis en place. L'objectif de cette sous-partie est de présenter les différents scénarios et les tests qui seront performés pour les valider. Les résultats de ceux-ci seront présentés aux chapitre cinq de ce mémoire. À la fin de cette sous-section, un tableau récapitulatif des tests pour chaque scénario est présenté auquel le lecteur pourra se référer pendant la lecture des résultats.

5.2.1 Seuil de commande

Il a été précédemment montré que le seuil de commande avait une forte incidence sur la marge de profit des activités de livraison, particulièrement quand il est couplé à la fréquence de livraison de la marchandise. Dans le cadre de ce scénario opérationnel, l'objectif est de trouver pour quelles valeurs de seuil de commande et pour quelle fréquence de livraison le résultat de la solution est le meilleur. Pour se faire, la valeur de seuil de commande est incrémentée afin de trouver celle qui

permet de trouver un équilibre entre les revenus générés et les dépenses opérationnelles. Le même processus est effectué pour la fréquence de livraison.

5.2.2 Livraisons urbaines

L'intérêt de ce scénario opérationnel est de se concentrer sur les clients placés en zone urbaine, qui représentent la plus grande partie des clients desservis par la flotte de camions. L'objectif de ce scénario opérationnel est d'étudier le comportement des tournées qui se concentrent sur les clients urbains. L'indicateur proposé est celui du taux de remplissage du véhicule de la tournée.

Pour se faire, le taux de remplissage du camion est calculé sur deux situations. La première situation envisagée est celle où il n'y a que les titulaires de et la deuxième celle dans laquelle il y a des succursales et des titulaires de permis. La raison pour laquelle ces deux situations sont différenciées est que les quantités commandées par les deux types de clients diffèrent fortement, ce qui va avoir un impact direct sur le taux de remplissage des camions.

Tableau 5.4 Tableau récapitulatif des tests effectués pour les scénarios opérationnels

	Scénario 1 : Seuil de commande	Scénario 2 : livraisons urbaines
Objectif	Déterminer les meilleures valeurs des seuils de commande	Étudier le comportement des tournées qui sont en milieu urbain
Tests	Varier les valeurs du seuil de livraison pour trouver l'intervalle de valeurs qui maximise la marge de profit.	Indicateur de remplissage du camion
Méthodes des tests	Tracer le graphique d'évolution de la marge de profit selon les différentes valeurs du seuil de livraison.	Mesurer l'évolution du taux de remplissage du camion sur deux situations. a) Titulaires de permis b) Titulaires de permis et succursales

5.3 Résultats du scénario 1 : seuil de livraison

Comme mentionné auparavant, l'objectif de ce scénario est de trouver une valeur pour le seuil de commande sur laquelle le partenaire industriel pourra se baser pour déterminer son offre de service de livraison. La méthode employée est de faire varier les valeurs possibles pour le seuil de commande par incrément de 200 \$ afin de déterminer un intervalle qui permet de maximiser les revenus. Les résultats sont présentés à la figure 5.9.

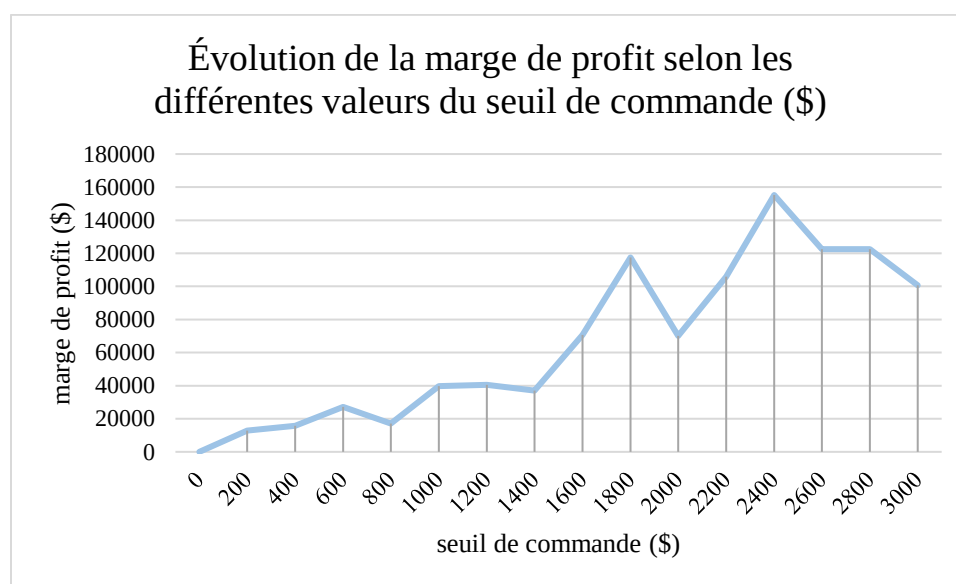


Figure 5.9 Évolution de la marge de profit selon les valeurs du seuil de commande

La figure 5.9 met en avant qu'outre un résultat plus bas pour 2000\$ de seuil de commande, l'intervalle qui semble maximiser la marge de profit est entre 1800\$ et 2400 \$. Une fois ce seuil passé, la marge de profit diminue, ce qui est explicable par l'augmentation des coûts pour livrer les clients avec 3000 dollars et plus. Cependant, il est intéressant de s'attarder sur la forte augmentation entre les seuils de 1400 \$ et 1800 \$. En effet, avant ces montants le profit stagne et c'est seulement à partir de 1400 \$ que le seuil de commande se traduit en augmentation de la marge de profit.

En conséquence, il est possible de déterminer qu'un nouveau client à inclure dans le réseau de livraison doit être considéré à partir d'un seuil de commande autour de 1400\$. Dans l'idéal, ce client aurait un seuil de commande entre 1800\$ et 2600\$. Pour les clients déjà dans le réseau, il serait intéressant de consolider leurs commandes afin d'atteindre ce seuil de 1800\$.

De manière plus concrète pour le partenaire industriel, il est possible de déterminer la proportion de clients titulaires de permis qui seraient touchés par un changement de politique quant au seuil de commande (figure 5.10). Les clients considérés comme capables de consolider leurs commandes sont ceux dont la fréquence de livraison est supérieure à 0,8 (soit presque une fois par semaine en moyenne) et donc le seuil de commande est situé entre 1000 et 1800 dollars. Le reste des clients est considéré comme étant redirigé vers les succursales.

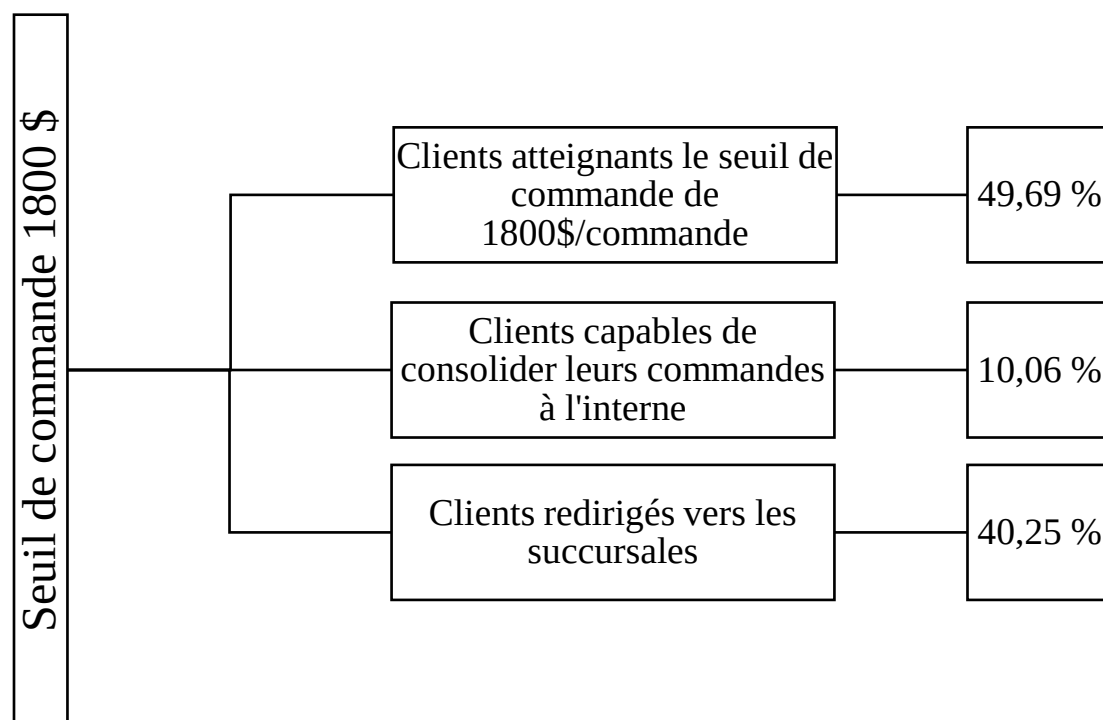


Figure 5.10 Répartition des clients selon le nouveau seuil de commande

Au total, il serait possible d'aller chercher jusqu'à 59,75% du bassin actuel de clients qui présentent des revenus très intéressants pour l'entreprise.

5.4 Résultats du scénario 2 : livraison urbaine

Il a été mentionné auparavant que 83% des titulaires de permis sont dans une zone urbaine, ce qui rend le scénario portant sur la livraison urbaine pertinent dans le cadre de ce mémoire. Or, un autre enjeu à prendre en compte est la circulation de camions circulant à vide dans les villes. L'indicateur mis en place mesure l'évolution du chargement des véhicules pour les tournées urbaines (île de Montréal). Deux mesures sont effectuées, la première pour les tournées ne contenant que des

titulaires de permis et la deuxième portant sur les tournées qui contiennent à la fois les titulaires de permis ainsi que les succursales.

Les résultats pour les deux situations sont présentés à la figure 5.11.

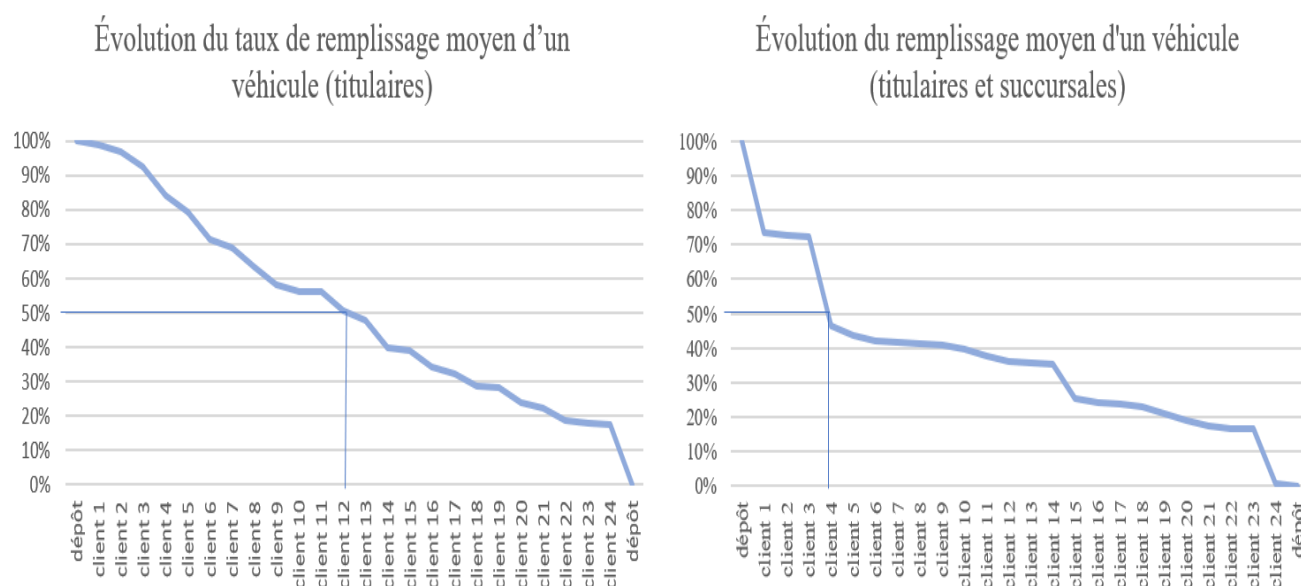


Figure 5.11 évolution du taux de remplissage du véhicule dans les deux cas présentés

On observe que dans le cas où il y a présence des succursales et des titulaires, le véhicule atteint 50% de remplissage autour du quatrième client livré car l'heuristique charge d'abord les succursales puis ensuite les titulaires car leur volume est moins important. Dans le cas où il n'y a que des titulaires de permis, la demande est beaucoup plus similaire entre les clients et donc on atteint un taux de remplissage de 50% autour du 12^{ème} client livré dans la tournée.

Les différents résultats présentés ont pour objectif de permettre à l'entreprise partenaire de pouvoir prendre certaines décisions, que ce soit pour l'intégration d'un nouveau client au sein du service de livraison, ou encore sur les paramètres à considérer pour une livraison rentable.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre a pour objectif de présenter la contribution de ce mémoire, les limitations ainsi que les perspectives.

6.1 Contribution

Ce mémoire intègre un problème de tournées de véhicules à travers le développement de scénarios opérationnels et la mise en place d'un plan d'expérience. L'intégration de scénarios opérationnels permet de prendre en compte les facteurs internes de l'entreprise partenaire.

Une contribution de ce mémoire est l'obtention des paramètres opérationnels significatifs pour le partenaire industriel grâce au plan d'expérience, notamment le seuil de commande nécessaire. À la différence des plans d'expérience qui viennent affiner les paramètres des heuristiques, ici le but est de trouver les paramètres opérationnels pertinents. Dans le cas où les entreprises collectent et analysent de plus en plus leurs données opérationnelles, cette approche vient sélectionner les données réellement pertinentes pour l'opérateur par rapport à sa situation.

L'utilisation de scénarios opérationnels offre l'opportunité de tester différentes modifications, que celles-ci soient opérationnelles (jours de livraison), tactiques (ajout d'un véhicule) ou bien stratégiques (sélection des critères de service par exemple). Les différents résultats obtenus peuvent servir de base à la prise de décision ou bien encore afin de monter un plan d'expérience ou des scénarios plus complexes. Dans un contexte où le transport de marchandises par transport routier est amené évoluer fortement, l'approche par scénario permet d'effectuer des décisions éclairées.

6.2 Limitations

Résultats du plan d'expérience

Les résultats provenant du plan d'expérience mettent de l'avant que la fréquence de commande ainsi que le seuil de commande comme étant les deux paramètres avec les plus grands impacts sur les livraisons. Là où la fréquence vient avoir un impact significatif sur les coûts opérationnels, le seuil de commande vient influencer les revenus de la livraison.

Il est aussi important de mentionner que les données financières obtenues ne sont pas exhaustives, ce qui n'empêche pas d'obtenir des indicateurs pertinents qui mettent en relief les différents paramètres qui ont le plus d'impacts d'un point de vue financier.

La génération des 216 expériences est réalisée grâce à une seule répétition de la génération des instances. Il aurait été pertinent de générer plusieurs répétitions de celles-ci afin de pouvoir générer des moyennes et donc éviter des résultats trop marqués. Par exemple, une simulation grâce à la méthode Monte Carlo aurait été pertinente dans le cadre de ce mémoire.

Résultats des scénarios

Le premier scénario opérationnel met en avant l'idée qu'il serait pertinent de revoir les critères de choix des clients qui sont livrés par le service de livraison de la SAQ. Cependant une telle décision aurait des impacts majeurs en ce qui concerne l'organisation interne de la société ainsi que l'organisation de son transport. En effet, comme les clients sont captifs, un bris de service de livraison les emmène directement à la succursale la plus proche pour s'approvisionner. Or, il serait important de prendre en compte les impacts de cette demande redistribuée aux succursales, notamment sur leur capacité d'absorption des quantités à stocker pour les clients. De même, d'un point de vue environnemental, il serait pertinent d'étudier les micros-trajets effectués par les clients titulaires de permis afin d'aller chercher leurs caisses de marchandises comparativement aux émissions liées à la livraison. Dans une éventualité où les calculs liés au « scope 3 » deviendrait une obligation pour les entreprises, ce calcul devient particulièrement pertinent.

Le deuxième scénario opérationnel met en évidence que le taux de remplissage du véhicule chute rapidement lors de la présence de succursales dans les clients à livrer. Ceci indique donc que lors d'une mutualisation des canaux de livraison, il est important de tenir compte du ratio de succursales par rapport aux titulaires livrés, afin de ne pas faire de retours au dépôt trop fréquents.

Ce scénario ouvre donc la possibilité de récupérer des marchandises au fur et à mesure du déroulement de la tournée, bien qu'il serait dans ce cas pertinent de déterminer les impacts sur le temps de livraison une fois à la succursale ou chez le titulaire de permis.

Vol d'oiseau et réseau routier

L'heuristique utilisée calcule les distances en vol d'oiseau et non pas en prenant en compte les distances ou le temps réel de trajet entre deux points. Ceci a un impact direct sur les tournées qui

sont créées car les distances ne sont pas « réelles ». Cependant, avec une majorité de clients urbains, les impacts négatifs de ne pas utiliser les distances réelles sont diminués car les points à livrer sont proches.

Comportement de l'heuristique

Dans un premier temps, il est nécessaire de rappeler qu'aucune modification n'a été effectuée sur le fonctionnement de l'heuristique elle-même. Les modifications qui ont été effectuées portent sur la lecture des informations fournies pour résoudre le problème et l'ajout d'une structure permettant d'ajouter des capacités différentes. De manière générale le comportement observé de l'heuristique est qu'elle cherche à remplir le véhicule avec les grandes charges en premier, puis qu'elle complète les livraisons avec les plus petites charges qui sont géographiquement proches. Il est aussi important de noter que l'heuristique remplit les camions en moyenne à 98 %, ce qui signifie que les camions partent pleins au maximum possible.

Calcul des GES

Dans le cadre de ce mémoire, le calcul de GES est présenté comme un indicateur de performance. Cependant, il est de plus en plus fréquent d'observer l'intégration de ce calcul au sein de la fonction objectif des problèmes de tournées de véhicules. Avoir un indicateur portant sur les GES permet d'établir un portrait de la situation tandis qu'intégrer le calcul des GES au sein de la formulation dans le but de les minimiser permettrait d'obtenir des impacts certainement plus intéressants sur ce volet. De plus, il est à noter que le calcul des GES se base sur de nombreuses approximations, que ce soit par informations manquantes ou encore des bases de données d'inventaires qui ne sont pas systématiquement mises à jour.

Outils développés

Dans le cadre de ce mémoire, les outils mis en place utilisent différents logiciels qui ont des vocations différentes. L'ensemble de ces programmes de traitement sont liés entre eux par les manipulations de l'utilisateur. En conséquence, il est possible d'estimer que la création d'un outil unique et intégré qui utilise notamment le langage de programmation de l'heuristique permettrait de diminuer le temps d'obtention des résultats. Cela permettrait aussi de diminuer la possibilité d'erreurs liées aux manipulations des différents fichiers par l'utilisateur. Les outils présentés

présentent l'avantage d'être exploitables aisément par l'utilisateur pour une utilisation occasionnelle à modérée. Cependant l'ensemble des outils n'a pas été testé pour une utilisation très fréquentes de ceux-ci. Quel que soit l'outil mis en place, celui-ci ne sera aussi performant que la qualité des données entrées au départ. Dans le cadre de cette étude, la grande majorité des données est quantitative et représente un pan seulement des pratiques d'affaires mises en place. Il serait intéressant d'intégrer d'autres aspects qualitatifs pertinents, comme les règles de chargement liées à la situation météorologique etc.

Méthodologies et les données présentes dans le mémoire

Dans le cadre de ce mémoire, les méthodologies employées sont tirées à la fois des pratiques de recherche opérationnelle en ce qui concerne les tournées de véhicules, mais aussi des pratiques de plan d'expérience afin de générer des scénarios qui soient réalistes et reproductibles. La méthodologie portant sur le plan d'expérience est une application textuelle de celle employée par (Coy et al., 2001).

Les données gracieusement fournies par le partenaire industriel reflètent l'état de la situation actuelle au moment où les données ont été collectées. Les données ne représentent cependant qu'un seul pan des pratiques d'affaire de l'entreprise. Les analyses effectuées dans ce mémoire se basent majoritairement sur les données quantitatives fournies mais un travail de mise en perspective est nécessaire dans tous les résultats obtenus.

6.3 Perspectives générales

Les quelques paragraphes précédents mènent à des perspectives générales, qui sont pertinentes pour engager plus loin la discussion.

Il est évident qu'il serait pertinent d'approfondir les expérimentations sur la partie urbaine des livraisons effectuées par la SAQ. La livraison urbaine présente des défis particuliers, notamment en termes de congestion et de stationnement qui ne sont pas présentés actuellement. De plus, l'arrivée imminente d'un nouveau camion électrique vient changer bien des paramètres sur la capacité de chargement ainsi que sur la capacité de livraison, tout en générant moins d'externalités négatives pour l'environnement.

L'étude qui a été menée ici tient en compte de la livraison depuis un dépôt vers des clients puis un retour à vide vers le dépôt (dans la majorité des cas). Une suite logique serait d'intégrer la logistique

de retour, plus particulièrement étant donné le contexte actuel ou une consigne pourrait être appliquée sur les bouteilles de vin.

Finalement, il serait intéressant d'étudier les effets de considérer les succursales de la SAQ comme des petites plateformes logistiques dans les milieux urbains, ce qui permettrait de réduire les tournées au sein de la ville tout en ouvrant la porte à d'autres possibilités modales pour la livraison du dernier kilomètre.

RÉFÉRENCES

- Armstrong, J. M., & Khan, A. M. (2004). Modelling urban transportation emissions: role of GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(4), 421-433.
- Auvinen, H., Clausen, U., Davydenko, I., Diekmann, D., Ehrler, V., & Lewis, A. (2014). Calculating emissions along supply chains—towards the global methodological harmonisation. *Research in Transportation Business & Management*, 12, 41-46.
- Baldacci, R., Christofides, N., & Mingozzi, A. (2008). An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts. *Mathematical Programming*, 115(2), 351-385.
- Baldacci, R., Toth, P., & Vigo, D. (2010). Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints. *Annals of Operations Research*, 175(1), 213-245.
- Beresneva, E., & Avdoshin, S. (2018). Analysis of mathematical formulations of capacitated vehicle routing problem and methods for their solution. *Труды Института системного программирования РАН*, 30(3).
- Birnik, A. (2013). An evidence-based assessment of online carbon calculators. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 17, 280-293.
- Bodin, L., & Golden, B. (1981). Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11(2), 97-108.
- Bodin, L. D. (1975). A taxonomic structure for vehicle routing and scheduling problems. *Computers & Urban Society*, 1(1), 11-29.
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300-313.
- Caceres-Cruz, J., Arias, P., Guimarans, D., Riera, D., & Juan, A. A. (2015). Rich vehicle routing problem: Survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47(2), 32.
- Camilleri, P., & Dablanc, L. (2017). An assessment of present and future competitiveness of electric commercial vans.
- Chang, M.-S., Tseng, Y.-L., & Chen, J.-W. (2007). A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6), 737-754.
- Cordeau, J.-F., Laporte, G., & Mercier, A. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational research society*, 52(8), 928-936.
- Cordeau, J. F., Gendreau, M., & Laporte, G. (1997). A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks: An International Journal*, 30(2), 105-119.
- Coy, S. P., Golden, B. L., Runger, G. C., & Wasil, E. A. (2001). Using experimental design to find effective parameter settings for heuristics. *Journal of Heuristics*, 7(1), 77-97.
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2004). Advanced freight transportation systems for congested urban areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(2), 119-137. doi:10.1016/j.trc.2004.07.002

- D'Uffizi, A., Simonetti, M., Stecca, G., & Confessore, G. (2015). A simulation study of logistics for disaster relief operations. *Procedia CIRP*, 33, 157-162.
- Davis, B. A., & Figliozzi, M. A. (2013). A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 8-23.
- Desaulniers, G., Madsen, O. B., & Ropke, S. (2014). Chapter 5: The vehicle routing problem with time windows. Dans *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition* (p. 119-159): SIAM.
- Desrochers, M., Lenstra, J. K., & Savelsbergh, M. W. (1990). A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 46(3), 322-332.
- Drexel, M. (2012). Synchronization in vehicle routing—a survey of VRPs with multiple synchronization constraints. *Transportation Science*, 46(3), 297-316.
- Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472-1483.
- Ekvall, T., Assefa, G., Björklund, A., Eriksson, O., & Finnveden, G. (2007). What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. *Waste management*, 27(8), 989-996.
- Engström, R. (2004). Competition in the freight transport sector—a channel perspective.
- Engström, R. (2016). The Roads' Role in the Freight Transport System. *Transportation Research Procedia*, 14, 1443-1452. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.217
- Etzioni, O., Golden, K., & Weld, D. (1994). *Tractable closed world reasoning with updates*. Communication présentée à Principles of Knowledge Representation and Reasoning (p. 178-189).
- Facanha, C., & Horvath, A. (2007). Evaluation of life-cycle air emission factors of freight transportation. *Environmental Science & Technology*, 41(20), 7138-7144.
- Feng, W., & Figliozzi, M. (2013). An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 135-145.
- Gendreau, M., Hertz, A., & Laporte, G. (1994). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management science*, 40(10), 1276-1290.
- Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2010). *Handbook of metaheuristics* (vol. 2): Springer.
- Gilardino, A., Rojas, J., Mattos, H., Larrea-Gallegos, G., & Vázquez-Rowe, I. (2017). Combining operational research and Life Cycle Assessment to optimize municipal solid waste collection in a district in Lima (Peru). *Journal of Cleaner Production*, 156, 589-603.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5), 533-549.
- Horne, R., & Verghese, K. L. (2009). Accelerating life cycle assessment uptake: life cycle management and 'quick' LCA tools. *Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects*, 141-160.

- Hvattum, L. M., Norstad, I., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2013). Analysis of an exact algorithm for the vessel speed optimization problem. *Networks*, 62(2), 132-135.
- Irnich, S., Toth, P., & Vigo, D. (2014). Chapter 1: The family of vehicle routing problems. Dans *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition* (p. 1-33): SIAM.
- Juan, A., Mendez, C., Faulin, J., De Armas, J., & Grasman, S. (2016). Electric vehicles in logistics and transportation: A survey on emerging environmental, strategic, and operational challenges. *Energies*, 9(2), 86.
- Knight, K., & Hofer, J. (1968). Vehicle scheduling with timed and connected calls: A case study. *Journal of the Operational Research Society*, 19(3), 299-310.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). The fleet size and mix location-routing problem with time windows: Formulations and a heuristic algorithm. *European Journal of Operational Research*, 248(1), 33-51. doi:10.1016/j.ejor.2015.06.082
- Kumar, S. N., & Panneerselvam, R. (2012). A survey on the vehicle routing problem and its variants. *Intelligent Information Management*, 4(03), 66.
- Lahyani, R., Khemakhem, M., & Semet, F. (2015). Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research*, 241(1), 1-14.
- Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4), 408-416.
- Lee, D.-Y., Thomas, V. M., & Brown, M. A. (2013). Electric urban delivery trucks: Energy use, greenhouse gas emissions, and cost-effectiveness. *Environmental science & technology*, 47(14), 8022-8030.
- Lenstra, J. K., & Kan, A. R. (1981). Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2), 221-227.
- López, J. M., Gómez, Á., Aparicio, F., & Sánchez, F. J. (2009). Comparison of GHG emissions from diesel, biodiesel and natural gas refuse trucks of the City of Madrid. *Applied Energy*, 86(5), 610-615.
- Lysgaard, J., Letchford, A. N., & Eglese, R. W. (2004). A new branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, 100(2), 423-445.
- Manopiniwes, W., & Irohara, T. (2015). Integrated relief supply distribution and evacuation: A stochastic approach. Dans *Toward sustainable operations of supply chain and logistics systems* (p. 297-308): Springer.
- Maria, A. (1997) Introduction to modeling and simulation. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference.
- Matthews, H. S., & Small, M. J. (2000). Extending the boundaries of life-cycle assessment through environmental economic input-output models. *Journal of Industrial Ecology*, 4(3), 7-10.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*: John wiley & sons.
- Nahlik, M. J., Kaehr, A. T., Chester, M. V., Horvath, A., & Taptich, M. N. (2016). Goods movement life cycle assessment for greenhouse gas reduction goals. *Journal of Industrial Ecology*, 20(2), 317-328.

- Obersteiner, G., Binner, E., Mostbauer, P., & Salhofer, S. (2007). Landfill modelling in LCA—a contribution based on empirical data. *Waste management*, 27(8), S58-S74.
- Paul, J. A., & Wang, X. J. (2019). Robust location-allocation network design for earthquake preparedness. *Transportation research part B: methodological*, 119, 139-155.
- Pettit, S. J., & Beresford, A. K. (2005). Emergency relief logistics: an evaluation of military, non-military and composite response models. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 8(4), 313-331.
- Sen, B., Ercan, T., & Tatari, O. (2017). Does a battery-electric truck make a difference?—Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States. *Journal of cleaner production*, 141, 110-121.
- Shahraeeni, M., Ahmed, S., Malek, K., Van Drimmelen, B., & Kjeang, E. (2015). Life cycle emissions and cost of transportation systems: Case study on diesel and natural gas for light duty trucks in municipal fleet operations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 24, 26-34.
- Skorin-Kapov, J. (1990). Tabu search applied to the quadratic assignment problem. *ORSA Journal on computing*, 2(1), 33-45.
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, 35(2), 254-265.
- Taillard, É. (1991). Robust taboo search for the quadratic assignment problem. *Parallel computing*, 17(4-5), 443-455.
- Taillard, É. D. (1999). A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *RAIRO-Operations Research*, 33(1), 1-14.
- Tofighi, S., Torabi, S. A., & Mansouri, S. A. (2016). Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 239-250.
- O. Tremblay, L. Dessaint and A. Dekkiche. (2007) "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles" *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Arlington, TX, pp. 284-289.
- Trépanier, M.-P., Coelho, L. (2017). Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre. *Cahier du CIRRELT*.
- Transports Canada, 2018, p.7, <https://www.tc.gc.ca/fr/transports-canada/organisation/transparence/gestion-rapports-ministeriels/rapports-annuels.html>
- Ministère des Transports du Québec, 2013, p. 30 <http://www.cargo-montreal.ca/wp-content/uploads/2015/08/Bloc-3-Volume-1.pdf>
- Bilan Routier de la SAAQ, 2018, p. 11, <https://saaq.gouv.qc.ca/fileadmin/documents/publications/bilan-routier-2018.pdf>

Robinson, C.H., 2013. Strategies For Transportation Spend: Understanding the Dynamics of Carrier Pricing, Service, and Commitment (white paper).

http://www.mypurchasingcenter.com/files/4513/9705/1896/CarrierPricing_WP.pdf

Rapport annuel de la SAQ, 2019, http://s7d9.scene7.com/is/content/SAQ/Communications/la-saq/acces-information/documents-disponibles/publications/rapports-annuels/Rapport_annuel_SAQ_2019_FR_PDF_Final.pdf